

#### 저작자표시 2.0 대한민국

#### 이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

#### 다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건
   을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 <u>이용허락규약(Legal Code)</u>을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🗖





#### 工學博士 學位論文

# AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템 개발을 통한 항해안전성 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Navigational Safety by the Development of Ship Motion Monitoring System based on the AHRS



2014년 8월 한국해양대학교 대학원 운항시스템공학과 김 대 해





본 논문을 김대해의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 工學博士 金順甲

위 원 工學博士/金世源

위 원 工學博士 文聲培

위 원 工學博士 李相旻

위 원 工學博士 孔吉永



2014년 8월

한국해양대학교 대학원







# 목 차

List of	f Tables ·····	vi
	f Figures v	iii
Abstra	ct x	iii
Nomer	nclature x	vi
Abbre	viations	iii
1. 서		
	연구의 배경 및 목적	1
	관련 연구 동향	4
1.3 ₹	논문의 구성	8
	(a)1 (3)	
2. AH]	RS의 선체운동 계측 수치계산 이론	
	Of OF LII	10
2	2.1.1 선체 좌표계	10
2	2.1.2 지구표면 NED 좌표계	12
2	2.1.3 지구중심고정관성 좌표계	13
2.2	선체운동 계측 계산	14
2	2.2.1 초기 정렬	14
	2.2.1.1 개략 정렬	14
	2.2.1.2 정밀 정렬	16



2.2.2 선체운동 좌표계 변환	· 17
2.2.3 선체운동 계측 모델	· 17
2.2.4 오일러각을 이용한 좌표변환	· 17
2.2.5 방향코사인행렬을 이용한 자세 계산	· 19
2.2.6 오일러각을 이용한 자세 계산	· 20
2.2.7 쿼터니언을 이용한 자세계산	· 21
2.3 AHRS 기반의 선체운동 계산 알고리즘	
2.4 오차 보정을 위한 칼만필터링	· 27
2.4.1 이산형 칼만필터 시스템 모델	· 28
2.4.2 칼만필터 계산 과정	· 30
3. 항해안전성평가 기술 분석 1945	
3.1 항해안전성 평가요소	· 32
3.1.1 해양파 스펙트럼	· 32
3.1.2 내항성능평가요소와 시스템적 결합	
5.1.2 대성성등행/[효소과 시스템적 설립	· 34
3.1.2 대항성등정기요소와 시스템적 설립         3.1.3 대항성능평가요소의 분산치	
	· 38
3.1.3 내항성능평가요소의 분산치	· 38
3.1.3 내항성능평가요소의 분산치	· 38
3.1.3 내항성능평가요소의 분산치 ···································	· 38 · 39 · 40



3.3	내항성능지표	42
	3.3.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치	43
	3.3.2 내항성능지표의 정의	44
3.4	임의의 대표적인 요소에 의한 항해안전성 평가	47
3.5	상하가속도 계측에 의한 항해항전성 평가	48
	체운동모니터링시스템 제작 및 검증	
4.1	선체운동모니터링시스템 설계	50
	4.1.1 선체운동 계측부	50
	4.1.1 자이로 센서	52
	4.1.1.2 가속도계 센서	56
	4.1.1.3 지자기 센서	60
	4.1.1.4 AHRS 모듈 ·······	63
	4.1.2 네트워크 처리부	65
	4.1.2.1 무선 선체운동계측센서 통신	66
	4.1.3 데이터 수집처리부	69
4.2	선체운동모니터링시스템의 성능 검증	71
	4.2.1 회류수조실험 개요	71
	4.2.1.1 회류수조 주요 제원 및 성능	72
	4.2.1.2 모형 선박의 제원	74
	4.2.2 선체운동모니터링시스템 성능 검증을 위한 실험 조건 및	
	<b>밧</b> 번	75



4.2.3 회류수조실험 데이터 계측 및 취득	77
4.2.3.1 AHRS 센서를 사용한 모형선 선체운동 계측	77
4.2.4 회류수조실험의 AHRS 센서 성능 분석 및 결과	80
5. AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템을 통한 항해안전성 평가	
5.1 선체운동모니터링시스템의 실선 실험	85
5.1.1 실험 대상 선박의 제원 및 계측 방법	86
5.1.1.1 실험 대상 선박의 제원 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	86
5.1.1.2 선체운동 계측 방법	89
5.1.1.3 계측된 선체운동 데이터의 처리	95
5.1.2 실선시험을 통한 선체운동 계측	102
5.1.2.1 실선시험 개요 ~~~~~~	102
5.1.2.2 제 1차 실선실험	103
5.1.2.3 제 2차 실선실험	105
5.1.2.4 제 3차 실선실험	107
5.1.2.5 제 4차 실선실험	109
5.2 선체운동 계측 데이터 분석 및 결과	111
5.2.1 횡요 선체운동 계측 데이터 분석	111
5.2.1.1 실험 대상 선박의 횡요주기 및 풍압력에 의한	
최대 횡경사 계산	111
5.2.1.2 횡요 선체운동 계측 분석 및 결과	114



5.2.2 종요 선체운동 계측 데이터 분석	129
5.2.2.1 실험 대상 선박의 종요주기 계산	129
5.2.2.2 종요 선체운동 계측 분석 및 결과	131
5.3 AHRS 센서를 이용한 항행안전성 평가	145
5.3.1 선체 가속도를 이용한 항해안전성능 평가	145
5.3.1.1 항해안전성의 기준	145
5.3.2 상하가속도 계측 분석 및 항해안전성 평가	147
5.3.2.1 AHRS 가속도 센서의 상하가속도 계측 검증 ··	148
5.3.2.2 상하가속도 계측 값을 적용한 내항성능지표	
계산 및 평가	157
6. 결론 1945 (6)	174
참고문헌	177



# List of Tables

Table 2-1 Comparison of Coordinate Conversion Method	····· 23
Table 3-1 Factors Presently Adopted for Evaluating Seakeeping	
Performance and their Critical Values	36
Table 4-1 Specification of Gyroscope Sensor ·····	••••• 55
Table 4-2 Specification of Accelerometer Sensor	<b></b> 59
Table 4-3 Specification of Magnetometer Sensor	····· 62
Table 4-4 Specification of General AHRS	64
Table 4-5 Specification of Device Used for Wireless Sensor	
Communication	68
Table 4-6 Specification & General Performance of C.W.C	<b></b> 72
Table 4-7 Main Particulars of Test Model Ships	····· 74
Table 4-8 Measurement Data of Ship Motion by CWC Test	82
Table 5-1 General Particulars of Training Ship (T.S. HANBADA)	····· 87
Table 5-2 ASCII Output Data of AHRS Sensor	<b></b> 97
Table 5-3 Beaufort Scale Number and Wave Characteristics	99
Table 5-4 Schedule of Actual Ship Test	102
Table 5-5 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (1st Tes	t) 103
Table 5-6 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (2nd Te	st) 105
Table 5-7 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (3rd Tes	st) 106
Table 5-8 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (4th Tes	st) 109
Table 5-9 Measurement Data of Ship's Rolling Motion	
(1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)	<b></b> 119
Table 5-10 Measurement Data of Ship's Rolling Motion	
(2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)	····· 122



Table 5-11	Measurement Data of Ship's Rolling Motion	
	(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)	125
Table 5-12	Measurement Data of Ship's Rolling Motion	
	(4th Actual Ship Test, 2014.04.05.)	127
Table 5-13	Measurement Data of Ship's Pitching Motion	
	(1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)	135
Table 5-14	Measurement Data of Ship's Pitching Motion	
	(2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)	138
Table 5-15	Measurement Data of Ship's Pitching Motion	
	(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)	141
Table 5-16	Measurement Data of Ship's Pitching Motion	
	(4th Actual Ship Test, 2014.04.05.)	143
Table 5-17	Seakeeping Criteria of ITTC	146
Table 5-18	Principal Specifications of the Mechanical Accelerometer	150
Table 5-19	Measurement Data of Vertical Acceleration	
	(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)	153
Table 5-20	Measurement Data of Vertical Acceleration	
	(4th Actual Ship Test, 2014.04.05.)	155
Table 5-21	Calculation Data of SPI	
	(1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19)	160
Table 5-22	Calculation Data of SPI	
	(2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22)	165
Table 5-23	Calculation Data of SPI	
	(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20)	169
Table 5-24	Calculation Data of SPI	
	(4th Actual Ship Test, 2014.04.05)	172



# List of Figures

Fig.	1-1	Block Diagram of General IMU Sensor	5
Fig.	1-2	Classification of Navigation Systems According to	
		the Accuracy of the Sensor	6
Fig.	2-1	Ship Coordinate System	11
Fig.	2-2	Body Frame and NED Coordinate System	12
Fig.	2-3	Geodetic ECEF and Local NED Coordinate System	13
		Ship Coordinate & Eulerian Angles	18
Fig.	2-5	Quaternion Representation	22
Fig.	2-6	Block Diagram of AHRS Kalman Filter	27
		Block Diagram of Discrete Kalman Filter	28
Fig.	2-8	Flow Chart of Kalman Filter	30
Fig.	3-1	Serial Combination of Factors for Evaluating Seakeeping	
		Performance ·····	34
Fig.	4-1	Application Diagram of IMU	50
Fig.	4-2	Structure Block Diagram of MEMS AHRS	51
Fig.	4-3	ITG-3200 Gyroscope Sensor ·····	52
Fig.	4-4	Function Block Diagram of Gyroscope	53
Fig.	4-5	Orientation of Axes of Sensitivity and Polarity of Rotation	54
Fig.	4-6	Circuit of MEMS Gyroscope	54
Fig.	4-7	ADXL345 Accelerometer Sensor	56
Fig.	4-8	Function Block Diagram of Accelerometer Sensor	57



Fig.	4-9	Axes of Acceleration Sensitivity	58
Fig.	4-10	Comparison of Output Response and Orientation to Gravity $\cdots$	58
Fig.	4-11	HMC5883 Magnetometer Sensor	60
Fig.	4-12	Internal Schematic Diagram	61
Fig.	4-13	HMC5883 Performance	61
Fig.	4-14	Axes of AHRS	63
Fig.	4-15	Outline of AHRS	64
Fig.	4-16	Wireless Sensor Networking for Serial Device	65
Fig.	4-17	Wireless Communication Module	66
Fig.	4-18	Operation Procedure of Wi-Fi module	67
		Data Aquisition Program using NT-ARS	69
Fig.	4-20	Data Aquisition and Analysis S/W	70
Fig.	4-21	Body Frame of CWC	73
Fig.	4-22	Electric and Control System of CWC	73
Fig.	4-23	Model ship of 1,300 ton Class Barge Mockup	74
Fig.	4-24	Installation of AHRS Sensor at Model Ship	76
Fig.	4-25	Data Measurement S/W for AHRS	76
Fig.	4-26	CWC Test 1, Model Ship Test for Ship Motion Data Acquisition	
		using AHRS Sensors (Full Load Condition, V=5 kts)	78
Fig.	4-27	CWC Test 2, Model Ship Test for Ship Motion Data Acquisition	
		using AHRS Sensors (Full Load Condition, V=7 kts)	79
Fig.	4-28	Comparison of AHRS Rolling Angle by CWC Test	81
Fig.	4-29	Comparison of AHRS Pitching Angle by CWC Test	81
Fig.	4-30	Comparison of AHRS Yawing Angle by CWC Test	81
Fig.	5-1 9	Sea Trial of T.S. HANBADA	86



Fig.	5-2 General Arrangement of T.S. HANBADA	87
Fig.	5-3 Lines of Body Plan (T.S. HANBADA)	88
Fig.	5-4 Lines of Sheer Plan (T.S. HANBADA)	88
Fig.	5-5 Lines of Half Breadth Plan (T.S. HANBADA)	88
Fig.	5-6 Flow Chart of the Measurement and Analysis System	90
Fig.	5-7 Position of AHRS Sensors at T.S. HANBADA	91
Fig.	5-8 Installation of AHRS Test Equipment at T.S. HANBADA	92
Fig.	5-9 Installation of AHRS Test Equipment at T.S. HANBADA	93
Fig.	5-10 Block Diagram of Integrated Seakeeping Performance	
	Evaluation System	100
Fig.	5-11 Navigational Safety Evaluation S/W of Intergrated Ship	
	Motion Monitoring System	101
Fig.	5-12 Track of Actual Ship Test (1st)	104
Fig.	5-13 Track of Actual Ship Test (2nd)	106
Fig.	5-14 Track of Actual Ship Test (3rd)	108
Fig.	5-15 Track of Actual Ship Test (4th)	110
Fig.	5-16 Maximum Heel Angle with Wind Speed	113
Fig.	5-17 AHRS Outputs and Actual Values of Roll Angle	115
Fig.	5-18 Measured Position of Sampling Data by AHRS Sensor	116
Fig.	5-19 Comparison of Rolling Angle by Measurement	
	(1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)	118
Fig.	5-20 Comparison of Rolling Angle by Measurement	
	(2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22)	121
Fig.	5-21 Comparison of Rolling Angle by Measurement	
	(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20)	124



Fig.	5-22	Comparison of Rolling Angle by Measurement	
		(4th Actual Ship Test, 2014.04.05) ·····	127
Fig.	5-23	Comparison of Rolling Angle by Standard Deviation	128
Fig.	5-24	AHRS Outputs and Actual Values of Pitching Angle	132
Fig.	5-25	Comparison of Pitching Angle by Measurement	
		(1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19)	134
Fig.	5-26	Comparison of Pitching Angle by Measurement	
		(2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22)	137
Fig.	5-27	Comparison of Pitching Angle by Measurement	
		(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20)	140
Fig.	5-28	Comparison of Pitching Angle by Measurement	
		(4th Actual Ship Test, 2014.04.05) ······	143
Fig.	5-29	Comparison of Pitching Angle by Standard Deviation	144
Fig.	5-30	Photograph of Mechanical Accelerometer Measuring System	148
Fig.	5-31	Accelerometer Principle	149
Fig.	5-32	Comparison of Vertical Acceleration by Measurement	
		(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)	152
Fig.	5-33	Comparison of Vertical Acceleration by Measurement	
		(4th Actual Ship Test, 2014.04.05)	155
Fig.	5-34	Comparison of Vertical Acceleration by Standard Deviation $\cdot \cdot$	156
Fig.	5-35	Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement	
		(1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)	159
Fig.	5-36	Evaluation Diagram of Navigation Safety	
		(1st Actual Ship Test 2013 03 18 22:30 KST)	161



Fig.	5-37	Calculation Input & Output Data using SPI	
		(1st Actual Ship Test, 2013.03.18. 22:30 KST)	162
Fig.	5-38	Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement	
		(2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)	164
Fig.	5-39	Evaluation of Navigation Safety using SPI	
		(2nd Actual Ship Test, 2013.03.22. 03:30 KST)	166
Fig.	5-40	Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement	
		(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19)	168
Fig.	5-41	Evaluation of Navigation Safety using SPI	
		(3rd Actual Ship Test, 2014.03.19. 18:00 KST)	170
Fig.	5-42	Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement	
		(4th Actual Ship Test, 2014.04.05)	172
Fig.	5-43	Evaluation of Navigation Safety using SPI	
		(4th Actual Ship Test, 2014.04.03. 14:00 KST)	173
		1945	
		OF CH	



# A Study on the Evaluation of Navigational Safety by the Development of Ship Motion Monitoring System based on the AHRS

#### Kim, Dae Hae

Division of Maritime Safety and Environment

Department of Ship Operation System Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

## Abstract

In the current era of the 21st, the shipbuilding technology has undergone many changes by the trends, shifting to more automatical, bigger, faster, greener and more IT technological with strong connection to E-navigation. Within these technologic, economic and environmental trends, the navigators on the other hand, must serve their duties to keep the safety of ship's navigation from irregular external force like wind and wave, and to prevent maritime accidents.

When a ship underway meets a danger in rough sea, a system analyzing or evaluating the safety and risk of navigation using a standard scale according to certain conditions of ship, and weather and sea state will be essential but is absent in these days of outstanding development of shipbuilding.

Typically, the ship handling in heavy weather involves three maneuvers: 1)



alteration of both course and speed, 2) aleration of course and 3) alteration of speed. Today, the maneuvers are conducted depend on just experiences and subjective and intuitive judgements from the navigational officers.[1~2] But the research on setting up a evaluating system of seakeeping performances is ongoing and this promising project will allow navigators to test the ship's seakeeping performance and finally help to adjust the ship's operating speed and course in every sea condition based on the automation technology used in monitoring ship's motions. It is expected to define the navigation safety with more qualified and specialized evaluating system and therefore much better human experience.

There is a model method for quantitative evaluation of navigation safety, based on idea of the ship's seakeeping performance. SPI(Synthetic Seakeeping Performance Index) which adopts specialized system, using seakeeping efficiency and reliability engineering, makes synthetic assessment of ship's navigation safety. By using theoretical equation, SPI is able to compute the occurrence possibility, evaluation value and a degree of risk of every each evaluation element of seakeeping performance which is effected by hull motions in the certain state of sea and weather. In case the risk rate of evaluation elements are the same, the elements' possibility of occurrence are also the same: and the relationship called reliability engineering.

By the reliability engineering theory, it is possible to evaluate overall safety of navigation in all ship's condition irrespective of ship's type, load status of cargo, etc. in assessing only one random evaluation element of seakeeping performance.

In this study, the ship motions monitoring system, equipped with AHRS as MEMS which can be applicable to real ship on the sea, is developed for practical use. AHRS is the one of inertia sensors and it is consist of an accelerometer measuring linear acceleration and a geomagnetic sensor



measuring angular velosity. AHRS is widely used in the special fields of aeronautics, automobile engineering, ship engineering, military equipment and in the general field of home cleaning robot, portable telephone, personnel multimedia device, game console, etc. AHRS which can provide the attitude and direction of moving transportation like ships, vehicles, aircraft was recognized of being high-priced with IMU until early 2000s. However, in recent years, MEMS continues to grow and AHRS is now low-priced and have to be highly accurate and massively produced according to rising demands and extensive use like in recognition of robot motion.

The inertial measurement unit is combined with a gyroscope, accelerometer, magnetic compass to design a low price and small size MEMS AHRS sensor that can be used in ship motions monitoring at sea. In order to deal with cumulative errors, the errors occur after a long-term operation, the kalman filtering sensor is chosen as a troubleshooting. To win a analysing software of ship motions monitoring with almost exact measuring value, the study goes through algorithmic treatment approach for ship motions monitoring. In addition, to measure the ship motions effectively in restricted circumstance, the SAN(Ship Area Network) is grafted onto the inertial measurement unit. At the end, the inertial measurement unit can offer a tool working for estimating the degree of safety of navigation with the measurement and calculation in 2-axis acceleration of ship's major motions and expressing the results visually.

The Wireless hull motion monitoring system rooted in AHRS sensors that is devloped in this paper is tested and proves its accuracy in terms of assessing frequency and acceleration that may be helpful in limited installation circumstances of the ship. In the future, this technology will be not only the standard of the INS, VDR and other navigation equipments but also a ruling technology in the field of safety of navigation and maritime accident analysis.



### Nomenclature

 $C_n^b$  : 좌표변환 행렬

E; : 내항성능 평가요소의 평가치

 $\widetilde{E_i}$  : 내항성능 평가요소의 변환 평가치

 $\widetilde{E_{\scriptscriptstyle T}}$  : 선박 시스템의 내항성능 변환 평가치

 $\mathbf{E}_{\mathrm{T}_{\mathrm{c}}}$  : 선박 시스템의 내항성능 한계 평가치

 $E_{x_i}$  : 내항성능 평가요소의 평가치

 $\mathbf{E}_{\mathbf{X}_{sc}}$  : 내항성능 평가요소의 한계 평가치

 $f^b$  : 선체 좌표계에서의 가속도

g : 중력 가속도

H<sub>1/3</sub> : 유의파고

 $\mathrm{H}_{\mathrm{X}}\left(\omega,\mathrm{V},\chi- heta
ight)$  : 내항성능 평가요소의 응답 함수

 $L_w$  : 파장

P : 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수

 $P_T$  : 내항성능 평가요소의 종합 신뢰도 함수

 $\mathbf{Q}_{\mathbf{X}_{ic}}$  : 내항성능 평가요소의 한계발생확률

 $Q(X_i)$  : 내항성능 평가요소의 발생 확률

Q(t) : 내항성능 평가요소인 현상이 최저 1회 발생할 확률

 $q(X_i)$  : Rayleigh 분포의 1차원 확률밀도함수

S : 해상 상태

 $S_{X_i}(\omega,\chi)$  : 내항성능 평가요소의 스펙트럼

 $S_{_{\zeta}}(\omega)$  : 장파정 해양파 스펙트럼



 $S_c(\omega, \theta)$  : 단파정 해양파 스펙트럼

SPI : 내항성능지표

 $T_0$  : 평균 파주기

 $T_e$  : 해양파와 선박과의 만남 주기(Encounter Period)

 $T_P$  : 종요 주기(Pitching period)

T<sub>R</sub> : 횡요 주기(Rolling period)

 $T_w$  : 실제 파도의 주기

V : 선박의 속도(Ship Speed),

 $X_i$  : 내항성능 평가요소

X<sub>iC</sub> : 내항성능 평가요소의 한계치

 $X_{i}(t)$  : 내항성능 평가요소의 확률 과정

 $\sigma_{X_i}$  : 내항성능 평가요소의 표준 편차

 $\sigma_{\mathrm{X}_{\mathrm{lo}}}$  : 내항성능 평가요소의 한계표준편차

 $\sigma^2_{
m X_i}$  : 내항성능 평가요소의 분산치

 $\mu_{
m ii}$  : 내항성능 평가요소의 상대 위험도

μ<sub>m</sub> : 내항성능 평가요소의 최대 위험도

 $\mu_{X_i}$  : 내항성능 평가요소의 위험도

 $\omega_{ie}^n$  : 지구자전 각속도

ω : 파의 원주파수(Circular frequency)

 $\omega_{\mathrm{e}}$  : 파와 선체의 만남주파수

χ : 선박과 파와의 만남각(Encounter angle)

### **Abbreviations**

acc. : acceleration 가속도

AHRS : Attitude and Heading Reference System 자세방위결정시스템

BF : Beaufort scale of wind Force 보퍼트 풍력계급

COG : Course Over the Ground 대지 침로

CWC : Circulating Water Channel 회류 수조

DOF : Degree Of Freedom 자유도 운동

DVR : Digital Video Recorder 디지털 비디오 영상 기록장치

ECEF : Earth-Centered Earth-Fixed Coordinate System

지구중심고정관성 좌표계

HDG : Heading 침로

ICT : Information and Communication Technology 정보통신기술

IMU : Inertial Measurement Unit 관성측정장치

LBP : Length Between Perpendiculars 수선(垂線)간의 길이

LOA : Length Over-All 전장(全長)

LOG : Speed Logger 선속계

MCR : Maximum Continuous Rating 엔진 최대 연속 정격 출력

MCU : Micro Controller Unit 초소형 조정 장치

MEMS : Micro Electro Mechanical System 초소형 관성센서

NCR : Normal Continuous Rating 엔진 상용 출력

NED : North-East-Down Coordinate System 지구표면 NED좌표계

PSN : Position 위치



RWD : Relative Wind Direction 상대풍향

RWS : Relative Wind Speed 상대풍속

SAN : Ship Area Network 선박 네트워크

SOG : Speed Over the Ground 대지속력

SPI : Seakeeping Performance Index 내항성능지표

STW : Speed Through Water 대수 속력

TCP : Transmission Control Protocol 전송 제어 프로토콜

TWD : True Wind Direction 진풍향

TWS : True Wind Speed 진풍속

UDP : User Datagram Protocol 사용자 데이터그램 프로토콜

VA : Vertical Acceleration 상하가속도

VDR : Voyage Data Recorder 항해기록장치









## 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

21세기 조선 기술은 선박의 자동화, 대형화, 고속화, 친환경화 및 IT 기술을 접목한 e-Navigation 등의 추세에 맞추어 여러 분야에서 급격하게 변화하고 있다. 이런 변화하고 있는 환경 속에서 선박을 운항하는 해기사들은 해상에서 바람, 파랑 등의 불규칙한 외력에 대응하여 선박의 안전성을 유지하면서, 항해의목적을 달성하고 해양사고를 미연에 방지하는 등의 주된 임무를 변함없이 수행하고 있다.

해상을 항해하고 있는 선박에서 바람과 파랑 등의 외력으로 인해 위험 현상이 발생하는 경우, 선장 이하 선박 운항자가 당시의 선박 상태와 침로 및 속력 그리고 기상·해상 상태에 따른 항해안전성과 그 위험도를 정량적으로 분석·평가하여 대응할 수 있는 시스템은 조선 기술이 발전한 지금 시대에도 선박에 적용되고 있지 못하다.

황천 시 선박의 안전을 확보하기 위한 피항 조선은 감속과 변침을 동시에 행하는 방법이 가장 많고, 다음으로 감속, 변침의 순서로 피항 조치를 취하고 있다. 이러한 조치는 주로 선박 운항자들의 경험적이고 주관적 판단을 토대로 실시되고 있는 것으로 나타나 있다.[1~2] 그러나 고도화된 선박 자동화 기술을 이용하여 어떤 해상을 항해하고 있는 선체운동을 계측하고, 이를 기초로 내항성능을 평가하여 해상 상황에 따른 선박의 운항 속도와 침로를 적절히 조정할 수있는 기술이 개발되고 있다. 따라서 항해하는 선박의 종합적인 항해안전성 평가를 운항자의 경험보다 검증된 항해안전성 평가 시스템을 이용하여 정량적으



로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.[3~7]

파랑중 항해하는 선박의 안전성을 평가하는 방법으로 내항성능(Seakeeping performance)을 이용하고 있다. 내항성능이란 「선박이 바람이나 파랑 등의 외력을 받으며 항행할 경우, 유효한 평균선속의 저하를 최소로 하여 안전하고 쾌적하게 항해할 수 있는 성질」 또는 「어떤 해상상태에서 예정속도를 유지하고 선체의 손상이나 성능의 저하없이 항해가 가능한 성질」이라 정의하고 있다.[8~17]

파랑 중에서 선박의 내항성능을 이용한 항해안전성을 평가하는 대표적인 방법으로서는 선속 감소에 관한 추진성능을 포함한 내항성능과 신뢰성 공학 기법을 이용한 전문가 시스템을 도입하는 것이다. 이 시스템은 선박의 항해안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 내항성능지표(SPI : Seakeeping Performance Index)를 이용하고 있다. SPI는 이론 계산식을 이용하여 파랑 중을 항해하고 있는 선박의 선체운동이 원인이 되어 발생하는 기존의 각 내항성능 평가요소에 대한 발생 확률을 계산하고, 내항성능 평가치, 위험도를 계산한다. 그리고 내항성능 평가요소의 위험도가 같은 경우 그 발생 확률도 같다는 신뢰성 공학 이론을 이용하여 선박의 종류, 적재 상태 등에 관계없이 어떠한 운항 상태에서도 선박 전체의 항해안전성을 임의의 편리한 한 개의 내항성능 평가요소만을 계측하여 평가하는 방법이다. [18~26]

본 연구에서는 지금까지 개발된 항해안전성 평가 방법을 실용화하기 위하여 실제 해역을 항해중인 선박에 적용할 수 있는 초소형 관성센서(MEMS: Micro Electro Mechanical System)인 자세방위결정시스템(AHRS : Attitude and Heading Reference System)을 적용한 선체운동모니터링시스템을 개발하였다. AHRS는 선형 가속도를 측정하는 가속도계, 회전 각속도를 측정하는 자이로, 지구 지자기를 감지하여 방향을 측정하는 지자기 센서로 구성되어 있다. 선박, 자동차, 항공기 등의 움직이는 운송장비의 자세와 진행 방향을 제공하는 AHRS는 2000 년 초반까지 AHRS 센서와 그 관성측정장치(IMU : Inertial Measurement Unit)가



고가여서 널리 이용되지 못하였다. 근래에 MEMS 기술이 발전하면서 각종 로봇이나 모션 인식과 같이 높은 정확도가 요구되는 분야로 범위가 확대되어 수요 증가와 대량 생산을 통해 센서의 정도가 높아지고 저가로 시장에 공급되고 있는 추세이다.[27~40]

AHRS 장치를 활용하여 선박에서 선체운동을 계측하기 위해 선박의 자세 및 진행방향 계산은 자이로 센서로부터 출력되는 각속도를 적분함으로써 이루어진다. 그러나 자이로 출력값은 바이어스 오차를 포함하고 있기 때문에 이 값을 그대로 이용할 경우 자세오차가 크게 발생하게 된다. 그러므로 이를 보상하기위해 가속도계 센서를 이용하게 되었고, 진행 방향에 대한 오차를 보상하기위해 지자기 센서를 이용한다.[41~43] 본 연구에서는 이런 AHRS 센서의 단점을보완하기위해 칼만필터를 이용한 쿼터니언 기반의 선박 자세 및 진행방향 추정 알고리즘을 적용하였다. 쿼터니언 기반의 선체운동 계측 알고리즘은 오일러각을 이용한 필터에서 발생하는 특이점 문제를 해결할 수 있도록 연산과 필터구조를 단순하게 구성한 것이 특징이다.[44~46]

본 연구에서는 해상에서 선체운동 계측에 이용할 수 있는 저가의 범용 MEMS 형 AHRS 센서를 사용하여 선체운동 측정과 항해안전성 평가를 할 수 있는 선체운동모니터링시스템을 설계 및 제작하였다. AHRS 센서 자체의 특성 오차와장시간 사용으로 인한 누적 오차를 보상하기 위해 칼만필터링 기능이 탑재된센서를 선정하여 시스템에 적용하였다. 그리고, 선체운동 계측 알고리즘을 적용하여 정확도가 높은 선체운동 측정값을 산출하였으며, 이 계측치를 사용한 선체운동 해석 알고리즘을 개발프로그램에 탑재하였다. 또한, 해상에서 선박의 주요 선체운동과 상하가속도 값을 계측하여 실시간으로 항해안전성을 시각적으로쉽게 인식할 수 있는 툴을 제공하였다. 특징으로는 제한된 환경인 선박에서 선체운동 계측을 효과적으로 측정하기 위하여 선박네트워크(SAN : Ship Area Network)를 접목시킨 유·무선 데이터 통신방식을 적용한 선체운동모니터링시스템을 개발하였다.



#### 1.2 관련 연구 동향

황천 등과 같은 거친 해상상태에서 운항중인 선박의 항해 안전성을 평가하는 방법으로 지금까지는 선박의 내항성능을 이용하여 평가해 왔다.[47~66] 최근에는 충분한 이론적인 연구 성과를 기초로 기존의 항해안전성 평가 방법에 대한문제점을 개선 · 보완하여, 실선에서 임의 선체운동의 한 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가하는 시스템이 개발되었다.[67~69]

선박의 항해 및 계류 안전성 평가에 기초가 되는 선체운동 요소와 선박 가속도 값을 계측하기 위해서 가속도계, 방위 센서, 경사계, 초음파 변위계 등 여러특정 센서를 이용한 선체운동 계측시스템을 개발하려는 노력이 있어 왔다.[70~75] 그러나, 다양한 환경적 변수가 많은 해상에서 선체운동을 계측하는 것은 많은 기술적 어려움과 고가의 특수 센서로 주로 구현됨에 따라 일반 상선에서는 채택되지 못했었다.

2000년대에 들어서 MEMS의 발달로 저가이면서 소형의 관성 센서들이 많이 개발되고 센서 데이터를 처리할 마이크로프로세서의 처리속도도 향상되어 고성 능 제품으로 시장에 자리를 잡아가고 있는 추세이다.[76~80]

관성측정장치(IMU, Inertial Measurement Unit)는 가속도계, 각속도계 등의 관성 센서를 이용하여 움직이는 물체의 위치, 자세, 속도, 가속도, 각속도의 정량적인 정보를 취득할 수 있어서 차량, 선박, 항공기 등 운송수단의 항법에 효과적으로 이용할 수 있다. 최근에는 가격이 저렴한 MEMS AHRS 센서가 여기에접목되어 상용화되어 가고 있다.[81~86]

IMU는 계측 대상 장비 및 설비(자동차, 항공기, 선박 등)에 직접 부착된 자이로와 가속도계의 출력을 이용하여 기준좌표계에 대한 계측 대상의 상대적인 위치, 속도 및 자세를 항법 컴퓨터로 계산하는 알고리즘이 연구되어 왔다.[87~93]

AHRS와 같은 관성 센서들은 특성상 해결해야 할 많은 공학적인 문제들을 발생시킨다. 예를 들면 자이로나 가속도계와 같은 센서 보상(Calibration) 방법에



대한 문제와 항법 모드 진입 전에 계측 대상의 초기자세를 결정하는 초기 정렬이나 항법 모드 중에 발생하는 항법 오차를 가속도계와 자이로 이외의 보조 센서를 사용하여 보정하는 항행 중 정렬 문제 등이 있으며, 이를 해결하기 위한연구가 활발히 진행되고 있다.[94,95] 또한 관성센서의 신뢰성을 높이기 위한자이로나 가속도계의 고장 검출 및 최적 배치 문제도 해결해야 할 중요한 문제로 부각되고 있다. Fig. 1-1은 일반적인 관성센서의 블록선도를 나타낸다.

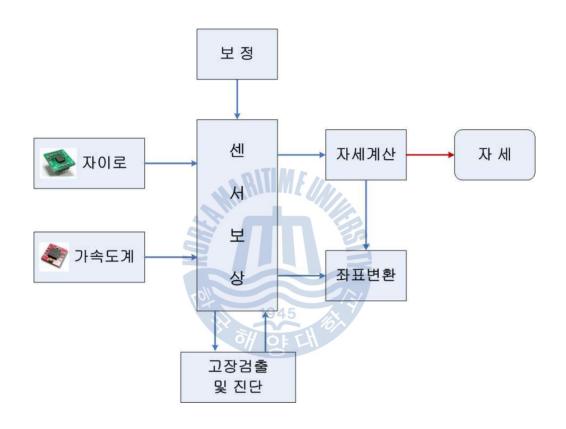


Fig. 1-1 Block Diagram of General IMU Sensor

관성항법시스템이 사용되는 응용분야에 따라 요구되는 관성항법센서의 정확도가 결정되며, 관성항법센서의 성능은 일반적으로 바이어스라는 계수를 통해판단된다. 즉, 일정시간 동안 변화하는 신호의 특성을 의미하는데 바이어스가 크면 클수록 Fig. 1-1에서 자세 계산 과정이 적분을 사용하므로 시간에 따라누적되는 오차를 발생시키게 된다.[44,96]



보통 항법시스템은 사용되는 센서의 정확도에 따라 Fig. 1-2와 같이 구분할수 있다. 최근 반도체 제작 기술의 발전으로 MEMS, AHRS 기술을 이용한 항법 장치의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 결과 계측 센서의 오차가 낮은 신뢰성이 높은 고성능 제품이 개발되고 있다.[93,97] 하지만 이 정도의 정확도로는 장시간의 운용범위를 갖는 관성항법시스템에서 사용하기에는 어려움이 있다. MEMS형 자이로와 같은 저가형 센서는 IMU 또는 AHRS를 구성하기 위해서 사용된다.[98~103]

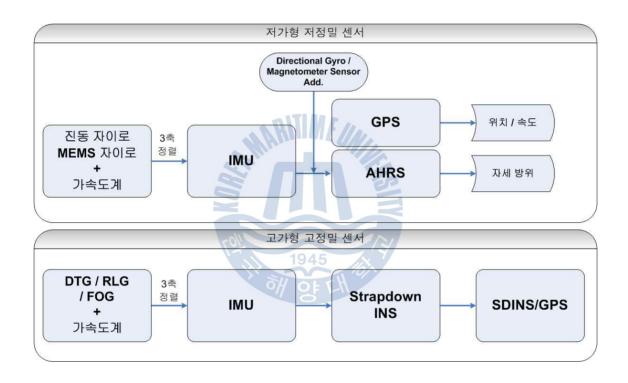


Fig. 1-2 Classification of Navigation Systems According to the Accuracy of the Sensor

선박의 안전성 평가에 가장 중요한 요소는 항행중 외력에 따른 선체의 동적 동요를 정량적인 방법으로 분석하여, 외력의 크기와 방향 그리고 선형에 따라 일반화하는 일이라 할 수 있다. 본 논문은 이러한 항해안전성 평가를 위한 선 체운동을 계측하기 위하여 최근 정확도가 향상되고 경제적인 가격대를 형성하



고 있는 AHRS 기반의 선체운동 계측 알고리즘을 적용한 선체운동모니터링시스템 개발에 대하여 연구하였다. 그리고, 이 장비를 선박에 탑재하여 선체운동 정보를 제공하는 AHRS 센서의 정확성 및 신뢰도 향상을 위한 선체운동 계측 알고리즘 개발에 대하여 연구하였다. 그 방법으로 선박의 각속도와 가속도를 측정하는 자이로와 가속도계 등의 관성센서와 자세 계산 하드웨어 그리고 AHRS를 기반으로 한 인터페이스를 개발하였다. 개발과정 중에 발생하는 오차를 줄이기 위한 오차 보정 방법과 선체운동모니터링 소프트웨어를 구성하기 위한 선체운동 계측 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구는 선박을 운항하는 항해사에게 현재 운항되고 있는 선박의 운항성능과 항해위험도를 보다 쉽게 인지할 수 있도록 선체운동의 각종 요소들의 정량적인 데이터를 실시간으로 확인할 수 있는 정보를 제공하여 항해안전성을 확보하는 데 목적이 있다. 이런 목적으로 개발된 선체운동모니터링시스템은 상선뿐만아니라 요트, 어선과 같은 소형선박에도 적용되어 선박의 감항성 평가 기준으로 활용될 수 있다. 또한, 해양사고 발생 시 사고 원인 조사의 객관적 자료로 활용 가능하다. 이 시스템을 사용하여 선박별 또는 해상상태별 다양한 형태로 수집된 선체운동 계측치가 데이터베이스화 된다면, 해양사고 예방을 위한 비 데이터(Big data)로서의 역할도 할 수 있을 것으로 판단된다.



#### 1.3 논문의 구성

본 연구에서는 최신 정보통신기술(ICT: Information and Communication Technology)의 개념을 적용한 MEMS형 AHRS를 이용하여 선체운동 계측 및 항해안전성 평가를 할 수 있는 선체운동모니터링시스템을 개발하였다. 이 시스템은 실제 해상에서 실시간으로 선체운동을 계측하고, 계측된 데이터를 분석과 SPI의 산출을 통하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가할 수 있다. 특히, 선박의 종류와 적재 상태 등에 관계없이 해상에서 운항하는 선박의 전체 항해안전성을 평가할 수 있는 알고리즘의 독창적인 기술을 적용하였다. 이 시스템을 사용하여 선박을 운항하는 항해사에게 정량적인 항해안전성 기준을 제시할 수 있으므로 다양한 해상상태에서 운항자가 선박의 안전한 진로를 판단하기 위한항해 보조수단으로서 효과적으로 사용이 가능하므로 선박의 안전운항에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

제 1장은 서론으로 연구의 배경 및 목적, 관련 연구 동향을 소개하였으며, AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템에 대한 간략한 연구 내용과 방법에 관하여 기술하였다.

제 2장에서는 선체운동 계측 알고리즘의 구현을 위한 수치 계산 이론을 제시하였다. 계측 센서의 측정 기준이 되는 좌표계에 대한 정의와 AHRS 센서의 아날로그적인 선체운동을 계측하여 디지털화하기 위한 일련의 수치 계산 과정을 나타내었다.

제 3장에서 선체운동 계측을 통한 항해안전성 평가를 위한 기술에 대해 기술하였다. 선체운동이 원인이 되어 발생하는 기존의 각 내항성능평가요소에 대한 발생확률을 계산하고, 내항성능 평가치, 위험도의 계산 결과를 나타낸다. 이계산결과를 분석한 결과인 선박의 항해안전성을 손쉽게 종합적으로 평가할 수있도록 내항성능평가요소 중 상하가속도 계측에 의한 SPI를 정의하였다. 이것은 내항성능평가요소 중 한 개의 요소라도 그 한계 발생확률을 초과하면 전체 선박시스템의 항해안전성이 위험하게 된다는 성질을 이용한 것으로써, 대표적인



선체운동 계측치인 상하가속도를 측정하여 내항성능평가요소를 종합적으로 반영할 수 있는 지표를 구할 수 있다. 이 방법은 선체운동모니터링시스템의 하드웨어 제작 시 간편성, 편리성, 경제성을 더할 수 있다.

제 4장에서는 선체운동모니터링시스템의 AHRS 센서와 유·무선 통신모듈에 대한 하드웨어 특성 및 시스템 설계와 제작에 대한 사항을 다루고 있다. 제작된 장비는 회류수조 실험을 통하여 선체운동 계측 센서의 성능 평가에 대한 결과를 분석하였다.

제 5장에서는 AHRS 기반으로 제작된 선체운동모니터링시스템의 실선을 대상으로 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 AHRS 센서의 선체운동 계측 성능을 평가하였고, 실험 대상 선박의 계측된 선체운동 측정값의 분석 및 해석 알고리즘을 통한 항해안전성 평가를 수행하였다. 실선 실험은 총 4차례에 걸쳐실시하였고, 각각의 실험마다 실선 실험의 개요, 방법 및 결과를 기술하였다.

제 6장에서는 본 논문의 연구 및 실험 결과로부터 얻어진 사항에 대한 요약과 결론, 추후 연구 과제를 기술하였다.



## 제 2 장 AHRS의 선체운동 계측 수치계산 이론

## 2.1 관성항법시스템의 좌표계 정의

선박의 위치, 속도 및 자세를 표현하기 위해서 관성항법시스템에 사용되는 좌표계(Frame or Coordinate system)는 몇 가지 종류로 나눌 수 있다. 적절한 좌표계의 선정은 관성항법식의 간략화 및 계산량의 감소, 목표로 하는 항법시스템의 요구조건에 따라서 설계자가 임의로 선정하게 된다. 일반적으로 사용되는 관성항법시스템에서 사용되는 좌표계는 선박의 운동식을 표현하기 위해서다음과 같은 좌표계를 사용한다.[104~106]

## 2.1.1 선체 좌표계(Ship Coordinate System)

선체 좌표계(Ship Coordinate System or Body Frame)는 관성센서를 위한 좌표 계로써 선박의 질량중심에 원점을 두고 선박의 운동방정식을 유도하는데 사용된다. 선박의 경우 선수 방향을 X축, 좌우 방향을 Y축, 상하 방향을 Z축으로 정의한다.

파랑 중 선체운동 계산을 위한 좌표계는 Fig. 2-1과 같다.

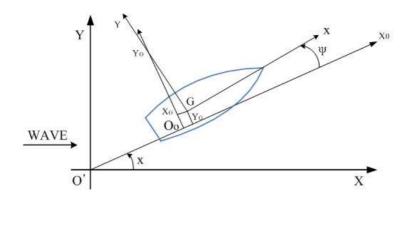
O'-XYZ : 정지 공간 좌표계

 $O_0 - x_0 y_0 z_0$  : 등속이동 공간 좌표계

○-xyz : 원점을 정지 자유표면에 놓은 선체 고정 좌표계

 $G-x_by_bz_b$  : 원점을 중심에 놓은 선체 고정 좌표계





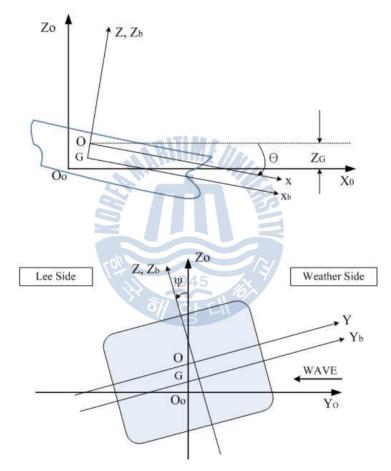


Fig. 2-1 Ship Coordinate System

선박은 파의 진행방향에 대해 x각도로 이루어지는 직선상을 속도 v로서 항해를 하고, 평균위치 Oo의 주위에서 무게중심 G가 각각의 축 방향 및 축 주위로 미소 진폭의 동요를 한다고 가정한다. 그리고 위상각은 파정이 선체 중앙의 중심선에 있을 때를 기준으로 하며 위상전진을 (+)로 정한다.



### 2.1.2 지구표면 NED 좌표계(NED Coordinate System)

지구표면 NED 좌표계(North-East-Down, referred as NED Coordinate System)는 항법좌표계(Navigation frame)라고도 하며, 원점이 항법시스템의 원점으로 사용되며, 선박의 실제적인 궤적 및 위치를 계산하는데 사용된다. N 벡터는 북쪽을 가리키며, E 벡터는 동쪽을, D 벡터는 중력벡터 방향이다. 즉 선체의 무게 중심을 원점으로 북쪽(N), 동쪽(E), 그리고 수직 아래(D) 방향을 각각 축으로 한다.[107]

지구표면 NED 좌표계는 Fig. 2-2에 수면상에 선체 좌표계와 같이 나타냈으며, Fig. 2-3에서는 원형의 지구 표면상에 NED 좌표계를 3차원 그림 형태의 녹색화살표로 나타내었다. 여기서, On은 지구표면상의 한 점을 원점으로하여, Xn은 북쪽 방향을 x축으로, Yn은 동쪽 방향을 y축으로, Zn은 아래 방향을 z축으로 정의하였다.

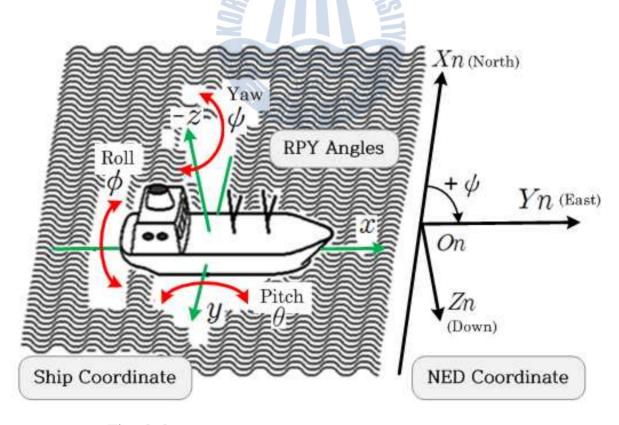


Fig. 2-2 Body Frame and NED Coordinate System



## 2.1.3 지구중심고정관성 좌표계(ECEF Coordinate System)

지구중심고정관성 좌표계(Earth-Centered Earth-Fixed, referred as ECEF Coordinate System)는 원점이 지구 중심을 회전축으로 한 회전 좌표계이며, 지구의 자전과 상관없이 고정된 좌표계이다.[107]

ECEF 좌표계는 Fig. 2-3에 3차원 그림 형태의 파란색 화살표로 나타내었다. 여기서 Oe는 지구중심을 원점으로, Xe는 그리니치 자오선을 x축으로, Ye는 경도  $90^\circ$  동쪽 방향을 y축으로, Ze는 지구의 북극 방향을 z축으로 정의하였다. 그리고,  $\lambda$ 는 위도(Latitude),  $\phi$ 는 경도(Longitude)이다.

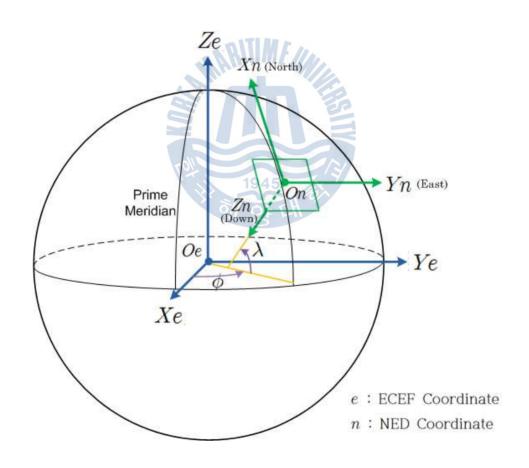


Fig. 2-3 Geodetic ECEF and Local NED Coordinate System



### 2.2 선체운동 계측 계산

### 2.2.1 초기 정렬

초기 정렬은 크게 개루프 상태에서 초기 좌표변환 행렬과 초기 자세각을 구하는 초기 개략 정렬(Coarse alignment)과 칼만필터와 같은 최적의 추정자를 이용하여 자세 및 자이로, 가속도계의 오차를 추정하여 보정하는 정밀 정렬(Fine alignment)로 구분된다.[94,95,108~111]

### 2.2.1.1 개략 정렬(Coarse alignment)

개략 정렬은 선박이 정지한 상태에서 가속도계와 자이로 측정치를 이용하여 개루프 상태에서 항법좌표계와 선체 좌표계 사이의 초기 좌표변환 행렬과 초기 자세각을 구하는 과정으로, 정밀 정렬 전단계로 이용된다. 선체가 정지한 경우 선체 좌표계에서의 가속도  $f^b$ 는 다음과 같이 측정된다.

$$\mathbf{f}^{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\mathbf{x}} \\ \mathbf{f}_{\mathbf{y}} \\ \mathbf{f}_{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\mathbf{n}}^{b} \mathbf{f}^{\mathbf{n}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mathbf{g} \end{bmatrix}$$
 (2-1)

 $C_n^b$ 에 횡요(Roll), 종요(Pitch), 선수요(Yaw) 각(Angle)을 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = C_n^b f^n \\ = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ -\cos\phi\sin\psi + \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\cos\psi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \sin\phi\sin\psi + \cos\phi\sin\theta\cos\psi & -\sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} (2-2)^n \\ = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\sin\phi\cos\theta \\ -g\cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$



여기서,  $\phi$ 는 횡요각,  $\theta$ 는 종요각, 그리고  $\psi$ 는 선수요각을 나타낸다. 다음과 같이 횡요각과 종요각을 구한다.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{-\operatorname{gsin}\phi \cos \theta}{-\operatorname{gcos}\phi \cos \theta} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{f_y}{f_z} \right)$$
 (2-3)

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{-\operatorname{gsin}\theta}{-\operatorname{gcos}\theta} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\operatorname{f}_{x}}{\sqrt{\operatorname{f}_{y}^{2} + \operatorname{f}_{z}^{2}}} \right)$$
 (2-4)

한편 선수요각을 얻기 위해서는 정지시 선박에서 측정되는 지구자전 각속도를 이용한다. 먼저 계산된 횡요, 종요각을 이용하여 항법좌표계에서 선체 좌표계로의 좌표변환 행렬  $C_n^b$ 을 다음과 같이  $C_1$ ,  $C_2$ 로 나타낸다.

$$C_{n}^{b} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = C_{1}C_{2}$$
 (2-4)

또한 선체에서 측정되는 지구자전 각속도  $\omega_{ie}^b$ 는 항법좌표계에서의 지구자전 각속도  $\omega_{ie}^n$ 으로부터 좌표변환 과정을 통하여 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{ie}^{b} = C_{n}^{b} \omega_{ie}^{n} = C_{1} C_{2} \omega_{ie}^{n}$$

$$C_{1}^{T} \omega_{ie}^{b} = C_{2} \omega_{ie}^{n}$$
(2-5)

여기서  $\omega_{ie}^n$ 은 다음과 같다.

$$\omega_{\text{ie}}^{\text{n}} = \begin{bmatrix} \Omega \cos L \\ 0 \\ -\Omega \sin L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_N \\ 0 \\ \Omega_D \end{bmatrix}$$
 (2-6)



$$\mathbf{C}_{1}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{x}} \\ \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{y}} \\ \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{1} \\ \boldsymbol{\omega}_{2} \\ \boldsymbol{\omega}_{3} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{2} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{N}} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi\Omega_{\mathrm{N}} \\ -\sin\phi\Omega_{\mathrm{N}} \\ \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix}$$
(2-7)

 $C_1$ 의 성분들은 앞에서 구한 횡요, 종요각을 이용하여 쉽게 구할 수 있으며,  $\omega_1,\;\omega_2,\;\omega_3$ 를 이용하여 다음과 같이 선수요각  $\psi$ 를 구한다.

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \tag{2-8}$$

저가형의 정밀도가 떨어지는 MEMS 자이로를 사용하는 AHRS의 경우 자이로 를 이용하여 지구자전 각속도를 측정하는 것이 어렵다. 이에 지자기 센서의 x 방향 출력  $H_X$ 와 y방향 출력  $H_Y$ 을 이용하여 다음과 같이 선수요각  $\psi$ 를 구한다.

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{H_{Y}}{H_{x}} \right) \tag{2-9}$$

# 2.2.1.2 정밀 정렬(Coarse alignment)

정밀 정렬은 선체가 정지한 경우에 수행되는 영속도 보정(Zero-velocity aiding) 알고리즘과 선체가 항해 중에 수행되는 항행 중 정렬(In-sailing alignment)로 분류될 수 있다. 영속도 보정 알고리즘의 경우 영속도 정보를 이용하여 자세 오차와 센서 오차를 추정하며, 항행 중 정렬을 위해서는 별도의 측정치를 얻을 수 있는 센서가 필요하다.

칼만필터가 자세 오차 추정에 이용되며, 일반적으로 정지 상태에서의 영속도 정보는 별도의 속도 측정치에 비해 상대적으로 정확하다는 점과 선체의 가속도 및 각속도에 변화가 있는 항행 중 정렬의 경우 시스템의 가관측성 (Observability)이 증가한다는 장점이 있다.[112]



#### 2.2.2 선체운동 좌표계 변환

AHRS 센서를 이용한 선박의 자세 결정은 항법좌표계에 대한 선체 좌표계의 각속도를 시간에 대해 적분하여 자세를 계산한다. 선체운동 계측을 위한 선박 좌표는 방향코사인행렬, 오일러각, 쿼터니언 등의 미분방정식을 이용하여 표현 할 수 있다.[113,114]

#### 2.2.3 선체운동 계측 모델

AHRS는 관성센서인 자이로, 가속도계 센서와 지자기 센서를 이용한다. 본 연구에서 고려하는 관성센서 모델은 다음과 같다.

$$\widetilde{G}_{k} = \omega_{k} + {}^{g}b_{k} + {}^{g}v_{k}$$

$$\widetilde{f}_{k} = (a+g) + {}^{a}b_{k} + {}^{a}v_{k}$$

$$\widetilde{m}_{k} = m_{k} + {}^{m}b_{k} + {}^{m}v_{k}$$
(2-10)

 $\omega_k$ ,  $\widetilde{f}_k$ ,  $m_k$ 는 각각 자이로, 가속도계, 지자기 센서로부터 얻을 수 있는 측정 치이고,  ${}^gb_k$ ,  ${}^ab_k$ ,  ${}^mb_k$ 는 각 센서의 바이어스 오차를 나타내며,  ${}^gv_k$ ,  ${}^av_k$ ,  ${}^mv_k$ 는 각 센서의 측정치 잡음을 나타낸다. 각 센서의 오차는 스케일 팩터 오차, 바이어스 오차, 측정치 잡음 오차로 분류할 수 있으며, 실제 AHRS 센서에서는 바이어스 오차가 가장 크게 작용한다.

### 2.2.4 오일러각을 이용한 좌표변환

하나의 좌표계가 어떤 회전을 통해 다른 좌표계로 변환되었을 경우, 이 회전을 표현하는 세 가지의 각도를 정의하면, 회전 관계를 나타낼 수 있다.

선체에 부착된 IMU으로부터 측정한 가속도 $(a_x,a_y,a_z)$ 와 각속도(p,q,r)을 선체좌표계에서 항법좌표계로 변환을 하는데, 이 세 회전 각도를 사용한다. 이를



오일러각 $(\phi,\theta,\psi)$ 이라고 하며,  $\phi$ 는 x축을 중심으로 회전한 각도를 의미하고,  $\theta$ 는 y축을 중심으로 회전한 각도이며,  $\psi$ 는 z축을 중심으로 회전한 각도량이다.[92, 106]

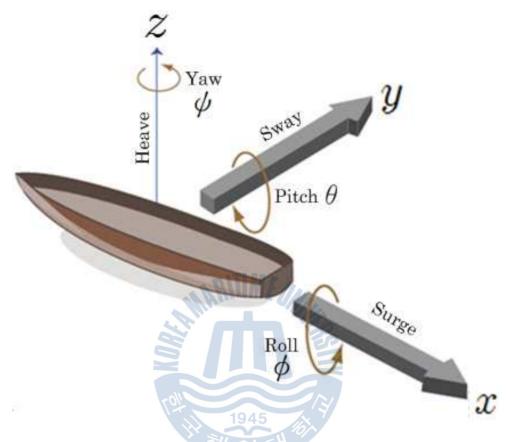


Fig. 2-4 Ship Coordinate & Eulerian Angles

좌표변환을 위하여 오일러각을 사용할 때 세 축에 대한 회전관계는 다음과 같이 방향코사인행렬(Direct cosine matrix)을 사용하여 표현할 수 있다.

횡요(Roll rotation) :

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$
 (2-11)



종요(Pitch rotation):

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$
 (2-12)

선수요(Yaw rotation):

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 (2-13)

### 2.2.5 방향코사인행렬을 이용한 자세 계산

선체좌표계에서 항법좌표계로 변환하기 위해서 회전하는 단계를 세부분으로 나누어 우선 x축을 중심으로  $\phi$ 각 만큼 회전한 후, y축을 중심으로  $\theta$ 각 만큼 회전하고, 마지막으로 z축을 중심으로  $\psi$ 각 만큼 회전하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{split} \mathbf{C}_{\mathrm{bn}} &= \mathbf{R}(\phi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_{\psi} \mathbf{R}_{\theta} \mathbf{R}_{\phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{11} & \mathbf{c}_{12} & \mathbf{c}_{13} \\ \mathbf{c}_{21} & \mathbf{c}_{22} & \mathbf{c}_{23} \\ \mathbf{c}_{31} & \mathbf{c}_{32} & \mathbf{c}_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & -\cos\phi \sin\psi + \sin\phi \sin\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\psi + \cos\phi \sin\theta \cos\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \cos\phi \cos\psi + \cos\phi \sin\theta \sin\psi & -\sin\phi \sin\psi + \cos\phi \sin\theta \sin\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \end{split}$$

회전각이 매우 작을 경우  $\sin \phi \approx \phi$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\sin \psi \approx \psi$ ,

 $\cos \phi = \cos \theta = \cos \psi = 1$ 이라고 하면 위 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{bn} = I^{3\times3} + I^{3\times3} \times \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & -\phi & \theta \\ \phi & 1 & -\psi \\ -\theta & \psi & 1 \end{bmatrix}$$
 (2-15)

방향코사인 성분을 이용하여 오일러각을 표현하면 다음과 같다.



$$\phi = \arctan\left(\frac{c_{32}}{c_{33}}\right) = \arctan\left(\frac{\sin\phi\cos\theta}{\cos\phi\cos\theta}\right)$$

$$\theta = \arcsin(-c_{31}) = \arcsin(\sin\theta) \qquad (2-16)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{c_{21}}{c_{11}}\right) = \arctan\left(\frac{\cos\theta\sin\psi}{\cos\theta\cos\psi}\right)$$

### 2.2.6 오일러각을 이용한 자세 계산

선체좌표계에서의 IMU으로부터 측정한 각속도를 p,q,r 이라고 하고, 오일러 각의 변화율을  $\dot{\phi},\dot{\theta},\dot{\psi}$ 이라고 하면 선체좌표계에서의 회전 각속도와 오일러각의 변화율은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\phi) \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$
 (2-17)

$$\begin{bmatrix}
p \\
q \\
r
\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
1 & -\sin\theta & 0 \\
0 & \cos\theta & \cos\theta\sin\phi \\
-\sin\phi & 0 & \cos\theta\cos\phi
\end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$
(2-18)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{q} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\mathbf{p}\mathbf{q}\mathbf{r}|\dot{\phi}\dot{\theta}\dot{\psi}} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$
 (2-19)

 $[\dot{\phi}\,,\dot{ heta}\,,\dot{\psi}]^T$ 를 풀기 위해서  $C_{pqr}$  $\dot{\phi},\dot{ heta},\dot{\psi}$  의 역행렬을 구하면 다음과 같다

$$C_{\dot{\phi}\dot{\theta}\psi|\dot{p}qr} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix}$$
(2-20)

따라서 오일러각의 변화율은 다음과 같이 계산된다.



$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = C_{\dot{\phi}\dot{\theta}\dot{\psi}|pqr} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$
 (2-21)

식 (2-20)을 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$
 (2-22)

정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = \mathbf{p} + (\mathbf{q}\sin\phi + r\cos\phi)\tan\theta$$

$$\dot{\theta} = \mathbf{q}\cos\phi - r\sin\phi \qquad (2-23)$$

$$\dot{\psi} = (\mathbf{q}\sin\phi + r\cos\phi)\sec\theta$$

# 2.2.7 쿼터니언을 이용한 자세계산

쿼터니언은 한 개의 스칼라량과 3개의 벡터량으로 좌표변환을 나타낼 수 있다. 일반적인 벡터 계산과 계산방식이 비슷하고 4개의 선형 미분방정식을 통해연속적인 자세 계산을 수행할 수 있다. 쿼터니언은 다음과 같이 표현된다.[44]

$$q = a + ib + jc + kd \qquad (2-24)$$

 $\mu$ 는 Fig. 2-5에서와 같이 벡터 u와 v 사이의 각으로 정의되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.[115]

$$\mu = \arccos\left(\frac{\mathbf{u} \times \mathbf{v}}{\|\mathbf{u}\| \|\mathbf{v}\|}\right) \tag{2-25}$$



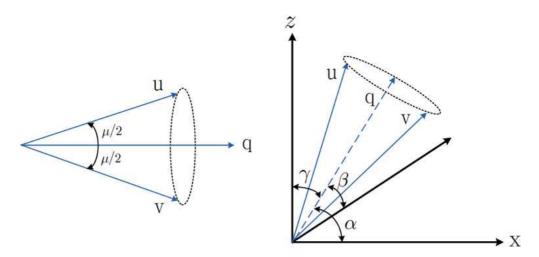


Fig. 2-5 Quaternion Representation

쿼터니언 q를 성분으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mu/2) \\ (\mu_x/\mu)\sin(\mu/2) \\ (\mu_t/\mu)\sin(\mu/2) \\ (\mu_z/\mu)\sin(\mu/2) \end{bmatrix}$$
(2-26)

쿼터니언 각을 방향코사인으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{bn} = \begin{bmatrix} (a^2 + b^2 - c^2 - d^2) & 2(bc - ad) & 2(bd + ac) \\ 2(bc + ad) & (a^2 - b^2 + c^2 - d^2) & 2(cd - ab) \\ 2(bd - ac) & 2(cd + ab) & (a^2 - b^2 - c^2 + d^2) \end{bmatrix}$$
(2-27)

오일러각과 쿼터니언각 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\phi = \arctan\left(\frac{c_{32}}{c_{33}}\right) = \arctan\left(\frac{2(ab+cd)}{a^2 - b^2 - c^2 + d^2}\right)$$

$$\theta = \arcsin(-c_{31}) = \arcsin(2(ac-db))$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{c_{21}}{c_{11}}\right) = \arctan\left(\frac{2(ad+bc)}{a^2 + b^2 - c^2 - d^2}\right)$$
(2-28)



관성 좌표계 또는 항법좌표계에서 선체좌표계로 변환시 사용되고 있는 3가지 방법은 사용되는 선박의 운동에 따라 선택적으로 사용될 수 있으며, 일반적으로 다음의 Table 2-1과 같은 특징을 갖는다.

Table 2-1 Comparison of Coordinate Conversion Method

좌표 변환	장 점	단 점
오일 러각	<ol> <li>③ 3개의 미분방정식만 필요</li> <li>② φ<sub>0</sub>,θ<sub>0</sub>,ψ<sub>0</sub>로부터 직접 초기화 가능</li> </ol>	<ol> <li>미분방정식이 비선형</li> <li>Singularity가 φ<sub>0</sub>,θ=±90° 에서 존재</li> <li>변환 행렬을 바로 사용할 수 없음</li> <li>좌표축 회전 순서가 중요</li> </ol>
방향 여현	① 미분방정식이 선형 ② 특이성(Singularity)이 없음 ③ 변환 행렬이 바로 계산됨	① 9개의 선형미분방정식이 필요 ② 초기계산을 위해 오일러각을 바로 사용할 수 없음 ③ 계산이 번거로움
쿼터 니언	① 4개의 선형 미분방정식만 필요         ② 특이성(Singularity)이 없음         ③ 계산이 단순함	① 초기 좌표값이 0이 아니면 오일러 각을 사용하여 계산하여야 함 ② 오일러각을 바로 사용할 수 없음 ③ 변환행렬을 바로 사용할 수 없음



## 2.3 AHRS 기반의 선체운동 계산 알고리즘

선박의 선체운동 계산에는 방향여현, 오일러각, 쿼터니언 등의 방법이 사용되며, 본 논문에서는 4개의 선형 미분방정식을 이용하여 선체운동를 계산하며 정규화 수행이 쉽고, 특이성(Singularity)가 없고, 계산이 쉬운 장점을 갖는 쿼터니언을 이용한 선박의 선체운동을 구하는 알고리즘을 사용하였다.

쿼터니언 자세 표현법을 이용한 쿼터니언 q의 미분방정식은 다음과 같다.[99]

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{q} \cdot \mathbf{p} \tag{2-29}$$

여기서

$$p = \begin{bmatrix} 0 & \omega^T \end{bmatrix}$$
$$q = \begin{bmatrix} a & b & c & d \end{bmatrix}$$

식 (2-29)의 방정식은 다음과 같이 행렬의 형태로 표현할 수 있다.

$$\dot{q} = \frac{1}{2} W_q$$
 (2-30)

여기서

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & p & -q & 0 \end{bmatrix}$$

이고 p,q,r은 자이로로부터 측정된 각속도이다.

회전 벡터의 원점이 계산이 갱신되는 시간동안 고정되어 있는 경우 위 방 정식의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.



$$q_{k+1} = \left[ \exp \frac{1}{2} \int_{t_k}^{t_{k+1}} W dt \right] q_k$$
 (2-31)

여기서

$$\int_{t_{k}}^{t_{k+1}} Wdt = \sum \begin{bmatrix} 0 & -\sigma_{x} & -\sigma_{y} & -\sigma_{z} \\ \sigma_{x} & 0 & \sigma_{z} & -\sigma_{y} \\ \sigma_{y} & -\sigma_{z} & 0 & \sigma_{x} \\ \sigma_{z} & -\sigma_{y} & -\sigma_{x} & 0 \end{bmatrix}$$

따라서 식 (2-31)는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$q_{k+1} = \left[ \exp \frac{1}{2} \sum \right] q_k \tag{2-32}$$

지수항을 전개하고 위에서 방향코사인행렬을 얻기 위해 사용되는 것과 유사 한 전개방법에 의해서 지수항이 다음과 같이 쿼터니언항으로 바뀔 수 있다

$$q_{k+1} = q_k \bullet r_k \tag{2-33}$$

$$\mathbf{r}_{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{\mathbf{c}} \\ \mathbf{a}_{\mathbf{s}} \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{x}} \\ \mathbf{a}_{\mathbf{s}} \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{y}} \\ \mathbf{a}_{\mathbf{s}} \boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{z}} \end{bmatrix}$$
 (2-34)

$$a_c = \cos\left(\frac{\sigma}{2}\right) = 1 - \frac{(0.5\sigma)^2}{2!} + \frac{(0.5\sigma)^4}{4!} - \bullet \bullet$$
 (2-35)

$$a_{s} = \frac{\sin\frac{\sigma}{2}}{\sigma} = 0.5 \left( 1 - \frac{(0.5\sigma)^{2}}{2!} + \frac{(0.5\sigma)^{4}}{4!} - \bullet \bullet \bullet \right)$$

$$(0.5\sigma)^{2} = 0.25 \left( \sigma_{x}^{2} + \sigma_{y}^{2} + \sigma_{z}^{2} \right)$$

$$(2-36)$$



앞 절에서 쿼터니언과의 비교에서  $r_k$ 가 벡터  $\sigma$ 에 대한 크기  $\sigma$ 의 회전을 표현하는 것을 볼 수 있다. 이것은  $t_{k+1}$ 에서의 선체좌표계에서  $t_k$ 에서의 선체좌표계 로 변환시키는 쿼터니언이고,  $q_k$ 는 시간  $t_k$ 에서 선체좌표계와 항법좌표계 (navigation axes)와의 관계를 나타내는 쿼터니언을 나타낸다. 따라서 쿼터니언 q는 자이로에서 얻어지는 선체운동(Ship motion)에 대하여 식 (2-33)에서 식 (2-36)을 반복적으로 사용하는 것에 의해서 갱신된다.

갱신된 쿼터니언의 수치적 안정성을 얻기 위해서 쿼터니언의 정규화 (Normalization) 과정이 필요하다. 쿼터니언은 각 항의 제곱의 합을 1과 비교하는 것에 의하여 정규화 할 수 있다. 정규화 오차는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta \mathbf{q} = 1 - \mathbf{q} \cdot \mathbf{q}^* \tag{2-37}$$

쿼터니언은 각항을  $\sqrt{q \cdot q}^*$ 로 나누는 것에 의하여 정규화 된다. 그러므로 다음과 같이 쓸 수 있다

$$q = \frac{q}{\sqrt{q \cdot q^*}} = 1 - \Delta q^{-0.5} q = \left\{1 + \frac{1}{2} \Delta q\right\} q$$
 (2-38)

정규화된 쿼터니언으로부터 다음 변환식에 의하여 오일러각을 구할 수 있다.

$$\phi = \arctan\left(\frac{c_{32}}{c_{33}}\right) = \arctan\left(\frac{2(ab+cd)}{a^2 - b^2 - c^2 + d^2}\right)$$

$$\theta = \arcsin(-c_{31}) = \arcsin(2(ac-db))$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{c_{21}}{c_{11}}\right) = \arctan\left(\frac{2(ad+bc)}{a^2 + b^2 - c^2 - d^2}\right)$$
(2-39)



### 2.4 오차 보정을 위한 칼만필터링

칼만필터는 대상 시스템의 확률적인 모델과 측정값을 이용하여 시스템의 상태변수를 찾아내는 최적 추정기법이다. 1960년대 초에 칼만필터가 제안된 이후로 그 응용 범위는 점점 넓어져 왔으며 유도, 항법, 제어의 여러 문제에 성공적으로 적용되고 있다[116,117]. 특히 위성 궤도추정, 위성체 자세결정, 관성항법, GPS, 관성항법과 GPS를 혼합한 통합 항법 등에서 그 진가를 발휘하고 있다.

칼만필터는 상태식에 의한 시간전파와 측정식에 의한 개선을 통하여 상태값을 추정하게 되는데, 이는 실제 상태값과 추정된 상태값의 오차 공분산을 최소화하는 알고리즘이다. 시스템이 선형이고 정규분포를 갖는 백색잡음에 의해 구동되는 칼만필터는 최소 공분산을 갖는 편향되지 않는 최적의 추정기로 알려져있다.[116~119] Fig. 2-6은 AHRS 모듈의 칼만필터를 사용한 자세각 출력의 과정을 나타낸 블록선도이다.

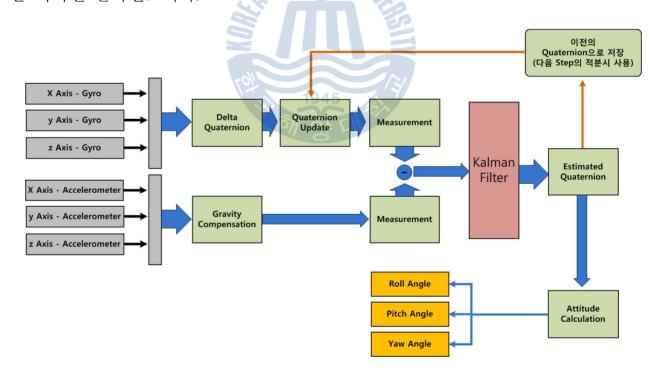


Fig. 2-6 Block Diagram of AHRS Kalman Filter



### 2.4.1 이산형 칼만필터 시스템 모델

일반적으로 상태 방정식은 다음과 같이 연속 시간에 대해서 기술된다.

$$z(t) = H(t)x(t) + v(t)$$
 (2-40)

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + w(t)$$
 (2-41)

시스템의 오차상태(Error state)에 대한 연속형 시스템의 상태 방정식과 측정 방정식이 식 (2-40)과 식 (2-41)과 같을 때, 이산화 과정을 통하여 식 (2-42)와 식 (2-43)과 같은 이산형(Discrete-time) 시스템 방정식과 측정 방정식을 얻을 수 있다.[120]

$$\mathbf{x}_{k} = \Phi_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \tag{2-42}$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \tag{2-43}$$

한편 Fig. 2-7은 선체운동모니터링시스템에 적용한 이산형 칼만필터 변수의 시간에 따른 블록선도를 나타낸다.

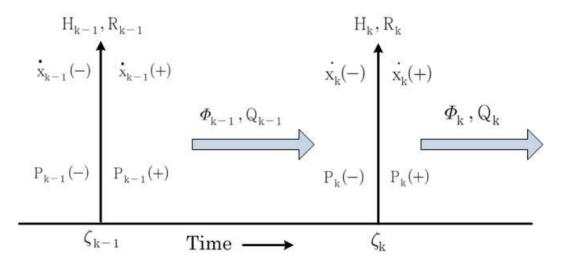


Fig. 2-7 Block Diagram of Discrete Kalman Filter



잡음은 정규분포(Gaussian distribution)를 갖는 영평균 백색잡음이라고 가정한다. 상태잡음(Process noise)은 외란 또는 모델의 부정확성에 기인하고, 공분산은 대칭행렬인  $Q_k$ 를 갖는다.

$$\begin{split} & E\left[w_{k}\right] = 0 \\ & E\left[w_{k}w_{i}^{T}\right] = \begin{cases} 0 & k \neq i \\ Q_{k} & k = i \end{cases} \end{split} \tag{2-44}$$

측정잡음(Measurement noise)은 센서의 부정확성에 기인하고, 공분산은 대칭 행렬인  $R_k$ 를 갖는다

$$E[v_k] = 0$$

$$E[v_k v_i^T] = \begin{cases} 0 & k \neq i \\ R_k & k = i \end{cases}$$
(2-45)

상태잡음과 측정잡음은 서로 독립적으로 발생하므로 다음과 같은 직교 특성을 만족한다.

$$E[w_k v_i^T] = 0$$
, for all k and i (2-46)

이때 오차 상태와 공분산행렬(Covariance matrix)의 초기값은 다음과 같이 표현된다

$$E[x(0)] = \hat{x}_0 \tag{2-47}$$

$$\mathbb{E}\left[ (\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}_0)^{\mathrm{T}} \right] = \mathbb{P}_0 \tag{2-48}$$



# 2.4.2 이산형 칼만필터 계산 과정

이산형 칼만필터의 계산은 Fig. 2-8과 같은 과정에 의해 이루어진다.

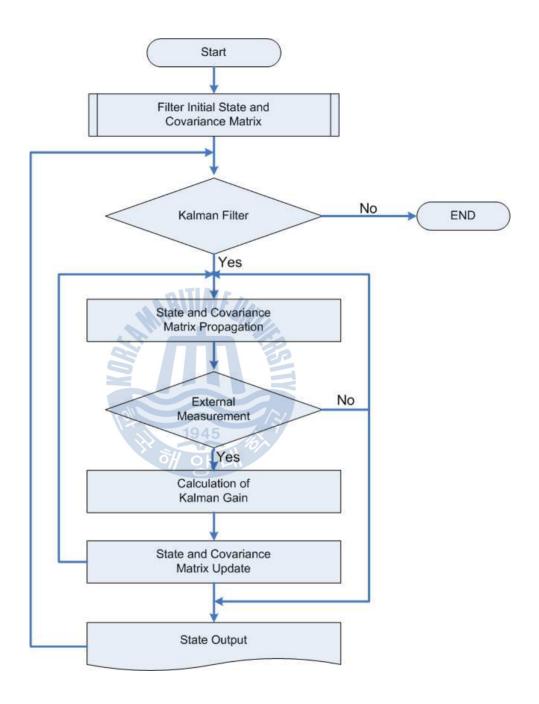


Fig. 2-8 Flow Chart of Kalman Filter



먼저 상태 천이 행렬  $\Phi_{k-1}$ 을 이용하여 오차 상태를 전파(Propagation)한다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k}(-) = \Phi_{k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1}(+)$$
 (2-49)

오차 공분산 행렬을 전파한다.

$$P_{k}(-) = \Phi_{k-1}P_{k-1}(+)\Phi_{k-1}^{T} + Q_{k-1}$$
 (2-50)

칼만 이득 행렬을 계산한다.

$$K_k = P_k(-)H_k^T[H_kP_k(-)H_k^T + R_k]^{-1}$$
 (2-51)

식 (2-51)의 계산된 칼만 이득 행렬을 이용하여 오차 공분산 행렬을 갱신  $P_k(+) = [I - K_k H_k]^{-1} P_k(-)$ (Update)한다.

$$P_k(+) = [I - K_k H_k]^{-1} P_k(-)$$
 (2-52)

계산된 칼만 이득 행렬과 전파된 오차 상태를 이용하여 오차 상태를 갱신한 다.

$$\hat{x}_{k}(+) = \hat{x}_{k}(-) + K_{k}[z_{k} - H_{k}\hat{x}_{k}(-)]$$
 (2-53)



# 제 3 장 항해안전성평가 기술 분석

# 3.1 항해안전성 평가요소

### 3.1.1 해양파 스펙트럼

불규칙적인 해상 상태는 수많은 규칙적인 소성파들을 중첩시켜 표현할 수 있고, 개개의 소성파들은 각각의 진폭, 진행 방향과 주파수 및 위상 값들을 가진다. 이러한 소성파들의 합성으로 이루어진 불규칙파의 순간 시간에 대한 파고의 변동은 Gauss 분포를 하며, 그 진폭 변동의 극치는 Rayleigh 분포에 따른다.이와 같은 불규칙한 해양파는 스펙트럼 분석 방법에 의해 이론적 특성 해석이가능하다. 본 연구 개발에서는 국제선체구조회의(ISSC)에서 채용한 장파정 해양파 스펙트럼인 P-M(Modified Pierson-Moskowitz)형 스펙트럼을 채택하였으며, 스펙트럼 식은 다음과 같이 표현된다.[121]

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 (H_{1/3})^2 T_0 (\frac{T_0}{2\pi} \omega)^{-5} \exp \left\{ -0.44 (\frac{T_0 \omega}{2\pi})^{-4} \right\}$$
 (3-1)

여기서,  $T_0$  : 평균파주기

H<sub>1/3</sub> : 유의파고

 $\omega$  : 파의 원주파수(Circular frequency)



또한, 실제 해상에 가깝게 표현하기 위해 식 (3-1)에 성분파의 방향 스펙트럼을 고려한 단파정(Short crested wave) 불규칙파로서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega, \theta) = \frac{2}{\pi} S_{\zeta}(\omega) \cos^{2}\theta \qquad (-\frac{\pi}{2} \le \theta \le \frac{\pi}{2})$$

$$= 0 \qquad (기타의 경우) \qquad (3-2)$$

여기서,  $\theta$ : 파의 평균 진행 방향과 성분파가 이루는 각도

선박이 파도와의 만남각(Encounter angle)  $\chi$ , 속도 V로서 항해 중일 때 선체와 파와의 만남주파수( $\omega_e$ )와 파도의 원주파수( $\omega$ ) 사이에는  $\omega_e = \omega(1-\frac{\omega V}{g}\cos\chi)$ 의 관계가 성립하므로,  $\omega$ 로써 표현된  $S_\zeta(\omega,\theta)$ 은 만남 주파수  $\omega_e$ 로써 표현된  $S_\zeta(\omega_e,\theta)$ 로 변형하여 계산하며, 그 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{d\omega_{e}}{d\omega} = 1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi$$

$$d\omega_{e} = (1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi) d\omega$$
(3-3)

파도의 원주파수  $\omega$ 와 이에 대응하는  $\omega_{\rm e}$ 를 갖는 스펙트럼 아래의 면적은 크기가 서로 같아야 함으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega, \theta) d\omega = S_{\zeta}(\omega_{e}, \theta) d\omega_{e}$$

$$S_{\zeta}(\omega_{e}, \theta) = S_{\zeta}(\omega, \theta) \frac{d\omega}{d\omega_{e}}$$
(3-4)

따라서, 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega_{e}, \theta) = \frac{S_{\zeta}(\omega, \theta)}{1 - (2\omega V/g)\cos \chi}$$
 (3-5)



## 3.1.2 내항성능평가요소와 그 시스템적 결합

불규칙한 해상을 항해하는 선박의 인명, 선체, 화물의 안전을 고려하여 파랑 등의 외력에 대한 선박의 항해안전성을 평가하기 위해, 선체의 운동으로부터 발생하는 다음과 같은 현상을 선박의 내항성능평가요소로 채택하였다.[122~124]

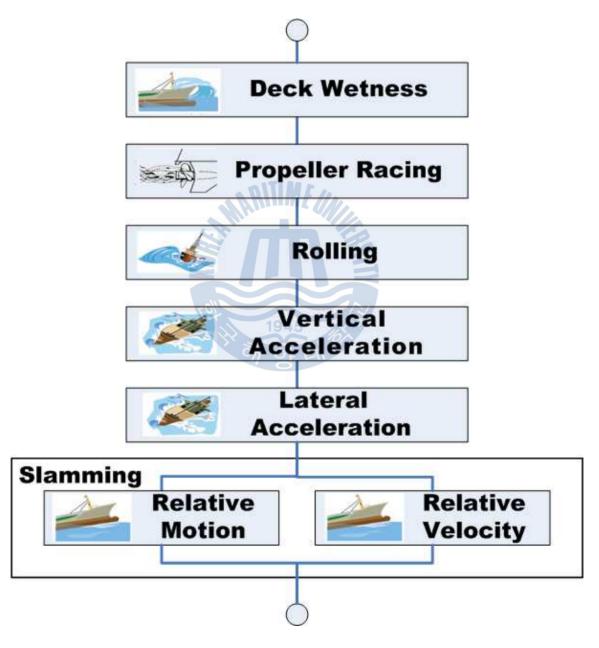


Fig. 3-1 Serial Combination of Factors for Evaluating Seakeeping Performance



- (1) 선수 갑판 침수(Deck wetness)
- (2) 프로펠러 레이싱(Propeller racing)
- (3) 슬레밍(Slamming)
- (4) 횡동요(Rolling)
- (5) 좌우가속도(Lateral acceleration)
- (6) 상하가속도(Vertical acceleration)

파랑 중을 항해하는 선박에서 각 내항성능평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때에 그 현상이 발생하고, 그 발생확률이 주어진 한계발생확률을 초과할 때선박은 파랑 중에서 기능을 잃거나 아니면 위험하게 된다. 이와 같은 각 내항성능평가요소의 시스템적 결합은 Fig. 3-1에 나타낸 바와 같이 직렬 결합 (Serial combination) 구조로서, 한 가지 요소만이라도 발생확률이 한계발생확률을 초과할 경우 선박은 전체 내항성능 기능을 잃어 위험한 상태에 도달하게된다.[125]

예를 들어, 내항성능평가요소 중 하나인 횡동요의 경우 한계치를 '정수 중 흘수면에서 Bulwark top까지의 높이'로 정하여 항해중에 선체중앙부 Weather side의 Bulwark top으로 해수가 유입되면 위험하다고 볼 수 있는데 그 확률은 1/1,000로 보는 것이다. 즉, 그러한 현상이 1,000번 발생하였을 경우 그 중 한번은 위험하게 된다는 것이다. 또한, 6가지의 내항성능평가요소 중 하나만이라도이러한 현상(각각의 내항성능평가요소마다 한계치가 설정되어 있고, 그러한 한계치를 초과하는 현상이 발생하고, 이러한 한계치를 초과하는 현상이 해당 발생확률에 이르렀을 경우)이 발생하면 그 선박은 위험하게 됨을 의미한다.

한편, 이들 각 내항성능평가요소들에 대해 일반적으로 적용되고 있는 한계치와 한계발생확률은 Table. 3-1과 같다. 여기에서 각 내항성능평가요소에 대한 한계발생확률이 다르게 제안되어져 있다. 이것은 각 요소에 대한 연구가 따로 행하여져 얻은 결과이기도 하고, 한편으로는 내항성능평가시 각 요소의 중요도를 달리 부여한 의미도 있다.



**Table 3-1** Factors Presently Adopted for Evaluating Seakeeping Performance and their Critical Values

내항성능 평가요소	한계치	한계발생 확 률
Deck wetness	정수 중 항주시의 수위 상승을 고려한 선수 수 선(F.P)의 유효 건현	2× 10 <sup>-2</sup>
Propeller racing	정수 중 항주 시의 상대 수위 상승을 고려하지 않은 상태에서 프로펠러 반경의 ½ 노출	10 -1
Slamming	S.S.8½에서 선저 노출과 동시에, 파에 돌입할 때 선저의 파면에 대한 상대속도가 한계속도를 초과하는 것 단, Threshold velocity= $0.09\sqrt{gL}$	10 -2
횡동요	선체중앙부 weather side의 bulwark top에 해수가 유입되는 것을 한계 상태로 하여 정수 중 흘수선에서 bulwark top까지의 높이	10 -3
좌우가속도	아우가속도 선교에서 좌우가속도가 0.6 <i>g</i> 를 초과할 경우	
상하가속도	선교에서 상하가속도가 $0.8g$ 를 초과할 경우	10 -3

# (1) 선수 갑판 침수

선수 갑판 침수의 한계치는 모형 시험 결과에 의해 해석된 정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 선수수선(F.P.)의 유효 건현이다. 한계발생확률은  $2\times10^{-2}$ 이다.[126]



#### (2) 프로펠러 레이싱

Nakamura, Naito 등의 실험에 의하면 프로펠러 상단이 수면 가까이 왔을 때, 프로펠러 특성상 토크의 급격한 변화가 일어난다. 따라서 프로펠러 레이싱의 한계치는 정수중 항주시의 상대 수위 상승을 고려하지 않은 상태에서 프로 펠러 반경의 ⅓이 노출되는 것이다. 한계발생확률은  $10^{-1}$ 이다.[127]

#### (3) 슬래밍

슬래밍의 한계치는 S.S.8½에서의 선저 노출과 동시에, 파에 돌입할 때의 선저의 파면에 대한 상대속도가 한계속도(threshold velocity)를 초과하는 것을 한계치로 한다. 여기에서 한계속도는  $0.09\sqrt{gL}$ 을 채택한다. 한계발생확률은  $10^{-2}$ 이다. [128,129]

#### (4) 횡동요

횡동요의 한계치는 정수중 항주시 선체 중앙부 Weather Side의 Bulwark Top에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 흘수면에서 Bulwark Top까지의 높이이다. 한계발생확률은  $10^{-3}$ 이다.[130]

#### (5) 좌우가속도

항해하는 선박에서 인간은 좌우가속도에 대해 민감하게 반응한다는 연구 결과를 바탕으로, 한계치는 선교에서의 운항자 작업성을 고려하여 0.6g를 적용한다. 한계발생확률은  $10^{-3}$ 이다.[131]

#### (6) 상하가속도

선교에서 작용하는 상하가속도는 선박 길이에 따른 가속도의 한계치를 이용하여 0.8q를 적용한다. 한계발생확률은  $10^{-3}$ 이다.[132]



## 3.1.3 내항성능평가요소의 분산치

선박이 단파정 불규칙파 중을 파에 대하여 일정한 속도로 일정한 침로  $\chi$ 를 유지하면서 항해하고 있는 경우, 선체운동 응답 계산을 위한 NSM에 의해 구하여진 임의의 내항성능평가요소의 확률과정  $X_i(t)$ 의 주파수 응답 함수를  $H_{x_i}(\omega_e, V, \chi-\theta)$ 라 하면, 확률과정  $X_i(t)$ 의 P-M형 스펙트럼  $S_{X_i}(\omega, \chi)$ 는 다음과 같다.[133]

$$S_{x_{i}}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |H_{x_{i}}(\omega, V, \chi - \theta)|^{2} S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta$$
 (3-6)

또한 확률과정  $X_i(t)$ 의 분산치  $\sigma_{X_i}^2(X)$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{x_i}^2(\chi, V, S) = \int_0^\infty S_{x_i}(\omega, \chi) d\omega$$
 (3-7)

여기에서 식 (3-7)의 분산치를 변화시키는 변수는 선박과 파와의 만남각( $\chi$ ), 선박의 속도(V), 해상 상태(S)이다.

0151100

분산치를 방향파 성분을 고려하여 수치 계산을 할 때, 근사적으로 이용하는 단 파정파에서의 분산치  $\sigma_{\rm S}$ 와 장파정파에서의 분산치  $\sigma_{L}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{split} \sigma_S^2(0^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ 4\sigma_L^2(0^\circ) + 3\sigma_L^2(30^\circ) + 2\sigma_L^2(60^\circ) \right\} \\ \sigma_S^2(30^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ 1.5\sigma_L^2(0^\circ) + 5\sigma_L^2(30^\circ) + 1.5\sigma_L^2(60^\circ) + \sigma_L^2(90^\circ) \right\} \\ \sigma_S^2(60^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ \sigma_L^2(0^\circ) + 1.5\sigma_L^2(30^\circ) + 4\sigma_L^2(60^\circ) + 1.5\sigma_L^2(90^\circ) + \sigma_L^2(120^\circ) \right\} \\ \sigma_S^2(90^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ \sigma_L^2(30^\circ) + 1.5\sigma_L^2(60^\circ) + 4\sigma_L^2(90^\circ) + 1.5\sigma_L^2(120^\circ) + \sigma_L^2(150^\circ) \right\} \\ \sigma_S^2(120^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ \sigma_L^2(60^\circ) + 1.5\sigma_L^2(90^\circ) + 4\sigma_L^2(120^\circ) + 1.5\sigma_L^2(150^\circ) + \sigma_L^2(180^\circ) \right\} \\ \sigma_S^2(180^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ 2\sigma_L^2(120^\circ) + 3\sigma_L^2(150^\circ) + 4\sigma_L^2(180^\circ) \right\} \\ \sigma_S^2(150^\circ) &= \frac{1}{9} \left\{ \sigma_L^2(90^\circ) + 1.5\sigma_L^2(120^\circ) + 5\sigma_L^2(150^\circ) + 1.5\sigma_L^2(180^\circ) \right\} \end{split}$$



스펙트럼이 식 (3-3)과 같이 표현될 경우, 내항성능평가요소의 확률과정  $X_i(t)$ 는 다음과 같이 된다.[134]

$$X_{i}(t) = \int_{0}^{\infty} \sqrt{2 \operatorname{Sx}_{i}(\omega, \chi) d\omega} \cdot \cos(\omega t + \psi_{i})$$
 (3-9)

여기서,

$$\psi_{\rm i} = \epsilon(\omega) + \gamma_{\rm i}$$

 $\gamma_i$ : 0 $^22\pi$ 까지 일양 분포하는 위상각

선체운동은 파와의 만남 주파수 $(\omega_{\rm e}=\omega-{
m KV}\cos\chi,\,{
m K}:{
m 파수})$ 를 이용하여 계산한다.

#### 3.1.4 내항성능평가요소의 발생확률 및 한계표준편차

내항성능평가요소의 확률과정  $X_i(t)$ 의 순간 시간에 대한 진폭 변동은 Gauss 분포를 따르고, 그 극치는 Rayleigh 분포에 따른다. 임의의 내항성능평가요소의 분산치  $\sigma_{X_i}^2$ 이 구해지면, 확률과정  $X_i(t)$ 의 극치가 어떤 일정한 값  $X_1$ 을 초과할 확률  $Q_{X_i}$ 는 다음과 같다.

$$Q_{X_{i}} = \int_{X_{1}}^{\infty} (\frac{X_{i}}{\sigma_{X_{i}}}) \exp(-\frac{X_{i}^{2}}{2\sigma_{X_{i}}^{2}}) dX$$

$$= \exp(-\frac{X_{1}^{2}}{2\sigma_{X_{i}}^{2}})$$
(3-10)

이것을 표준편차  $\sigma_{\mathrm{X_i}}$ 에 관하여 풀면 아래 식이 된다.

$$\sigma_{X_{i}} = \sqrt{\frac{-X_{1}^{2}}{2\ln Q_{X_{i}}}} \tag{3-11}$$

식 (3-11)에 각 내항성능평가요소의 한계치  $X_{ic}$ 를 넘을 확률인 한계발생확률  $Q_{X_{ic}}$ 를 고려하면, 위험치가 되는 한계표준편차  $\sigma_{X_{ic}}$ 를 구할 수 있다.

$$\sigma_{X_{ic}} = \sqrt{\frac{-X_{ic}^2}{2\ln Q_{X_{ic}}}}$$
 (3-12)



# 3.2 내항성능 평가치와 위험도

선박의 내항성능평가는 일반적으로 각 내항성능평가요소가 그 한계치를 초과하는 발생확률로부터 정의되는 평가치, 위험도, 최대 위험도, 상대 위험도를 적용한다.[135,136]

### 3.2.1 평가치

임의 내항성능평가요소의 극치 분포는 Rayleigh 분포로서, 그 발생확률을  $Q(X_i)$ 라고 하면, 임의 내항성능평가요소의 평가치  $E_{X_i}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$E_{X_i} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln{\{Q(X_i)\}}}} = \left[\frac{\sigma_{X_i}}{X_i}\right]$$
 (3-13)

평가치  $E_{X_i}$ 가 0이 되면 임의 요소  $X_i$ 의 신뢰도는 1이 되고,  $E_{X_i}$ 가 무한대가되면  $X_i$ 요소의 신뢰도는 0이 된다.

## 3.2.2 위험도

임의  $X_i$ 요소의 주어진 한계발생확률에 관한 한계 평가치를  $E_{X_{ic}}$ 로 하고, 한계 평가치  $E_{X_i}$ 에 대한 평가치  $E_{X_i}$ 의 비를  $X_i$ 요소의 위험도  $\mu_{X_i}$ 라 정의한다.

$$\mu_{X_{i}} = \frac{E_{X_{i}}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[\frac{X_{i}}{\sigma_{X_{ic}}}\right]}{\left[\frac{X_{i}}{\sigma_{X_{i}}}\right]} = \frac{\sigma_{X_{i}}}{\sigma_{X_{ic}}}$$
(3-14)

여기서,  $\sigma_{X_{i,\cdot}}$ 는  $X_i$ 가 위험하게 되는 한계표준편차

위험도  $\mu_{X_i}$ 는 파에 대한 만남각( $\chi$ ), 선속(V) 및 해상 상태(S)에 따라 변화한다. 여기에서  $\mu_{X_i} \ge 1.0$ 인 경우  $X_i$ 요소가 위험하고,  $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다



는 것을 나타낸다.

### 3.2.3 최대 위험도와 상대 위험도

내항성능평가요소의 위험도  $\mu_{\mathrm{X}}$ 에서 최대치를 최대 위험도  $\mu_{\mathrm{m}}$ 이라 정의한다.

$$\mu_{\rm m}(\chi, V, S) = \text{Maximum}[\mu_{\rm i}(\chi, V, S)]$$
 (3-15)

이  $\mu_{\rm m}$ 은 어떤 상황하에서  $\mu_{\rm X_i}$ 의 최고치인 값으로서, 그 값은 각 요소에 대한 상대치로 비교되는 값이다.

또한 임의  $X_{i,}$   $X_{j}$  요소의 위험도가  $\mu_{i}$ ,  $\mu_{j}$ 인 경우,  $X_{i}$  요소를 기준으로 하여 나타낸  $X_{j}$  요소의 위험도의 비를  $X_{i}$  요소에 대한  $X_{j}$  요소의 상대 위험도  $\mu_{ij}$  라정의한다.

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{\overline{\sigma_{X_i}}}{\overline{\sigma_{X_i}}} = \frac{\overline{\sigma_{X_{ic}}}}{\overline{\sigma_{X_{jc}}}} \cdot \frac{\overline{\sigma_{X_j}}}{\overline{\sigma_{X_i}}}$$

$$E, \alpha_{ij} = \frac{E_{X_{jc}}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[\frac{\overline{X_{ic}}}{\overline{\sigma_{X_{ic}}}}\right]}{\left[\frac{\overline{X_{jc}}}{\overline{\sigma_{y}}}\right]}$$

$$(3-16)$$

여기에서  $\mu_{ij} > 1.0$ 인 경우는  $X_i$ 요소에 비해  $X_j$ 요소가 더 위험하고,  $\mu_{ij} < 1.0$ 인 경우는 그 반대의 의미를 갖는다.

이러한 상대 위험도  $\mu_{ij}$ 를 계산함으로써 기준 요소인  $X_i$ 요소와 임의 요소  $X_j$ 는 상대적으로 동등하게 성능을 평가할 수 있게 된다. 그것은  $X_i$ 요소의 한계치를  $\alpha_{ij}\cdot\mu_{ij}$  배한 값이  $X_j$ 요소의 겉보기 한계치  $X_{jc}$ 로 되기 때문에 기준으로 한  $X_i$ 요소로서 임의의  $X_j$ 요소의 상태를 평가할 수 있다.



# 3.3 내항성능지표

파랑 중을 항해하는 선박에서 각 내항성능평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때 앞의 6가지 현상은 발생하고, 그 발생확률이 주어진 한계발생확률을 넘었을 때 선박은 파랑 중에서 그 기능을 상실하거나 아니면 위험하게 된다.

그런데 기존의 연구에서 내항성능평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어 있고, Fig. 3-1과 같이 그 시스템적 결합은 직렬 결합이다. 따라서 기존의 내항성능평가요소를 이용하여 선박의 항해안전성을 평가하기 위해서는 모든 내항성능평가요소를 계측하여야 한다. 그러나 각 요소의 특성상 계측을 위한 센서의 설치가 불가능한 것도 있고, 또 모든 요소에 센서를 설치하여 평가하는 것은 경제적인 면에서도 문제가 있다.

Table 3-1에 나타낸 각 내항성능평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 가지는 요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 이것은 신뢰성 공학에서 시스템 요소의 고장발생확률이 같은 경우, 그 고장률이 동일하게 되는 것과 같은 의미를 가진다.

이와 같은 각 내항성능평가요소의 위험도가 같은 경우, 그 발생확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 것으로 선박시스템 전체의 항해안전성을 평가할수 있는 내항성능지표(SPI: Seakeeping Performance Index)가 개발되었다.

이 SPI는 선박의 종류, 적재 상태(홀수 상태) 등에 관계없이, 어떤 운항 상태에서도 한 개의 내항성능평가요소만을 계측하여 선박시스템 전체의 항해안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 지표이며, 임의의 한 개 내항성능평가요소만을 계측하여도 6개 내항성능평가요소 전체의 최대 위험도를 계산할 수 있다. 따라서 6개 요소를 모두 계측하지 않아도 전체 선박시스템의 항해안전성을 평가할수 있는 지표이다. 또한 이 지표는 기존의 6개 내항성능평가요소의 위험도가모두 1보다 작은 경우 최대 위험도를 이용하면 전체 선박시스템이 안전하게 평가되는 부분을 보완하여, 6개 내항성능평가요소를 종합하여 보다 항해 안전을



## 3.3.1 내항성능평가요소의 변환 평가치

현재까지 연구되어진 바에 따르면, 파랑중을 항해하는 선박시스템의 내항성능을 평가할 수 있는 요소의 한계발생확률은 각각 다르게 설정되어 있다. 따라서 한계발생확률이 큰 내항성능평가요소에 비해서 작은 요소의 위험도가 전체선박시스템의 내항성능평가에서 무시되어 위험한 상태가 안전한 상태로 평가되는 경우가 있다. 이것을 보완하기 위해서는 각 내항성능평가요소들이 한계발생확률에 도달하면, 그 위험도가 한계발생확률이 가장 큰 프로펠러 레이싱의 한계발생확률(Qpc=10<sup>-1</sup>)에 도달하는 것과 같은 값으로 변환하여 평가하는 것이다. 즉 각 내항성능평가요소의 위험도가 프로펠러 레이싱의 위험도와 같은 경우, 그 발생확률도 프로펠러 레이싱의 발생확률과 동일하게 되는 각 내항성능평가요소의 평가치(E<sub>i</sub>)에 대한 변환 평가치(E<sub>i</sub>)를 다음과 같이 계산한다.

(1) 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치

$$\widetilde{E_{P}} = \frac{E_{P}}{\alpha_{PP}} = E_{P} \cdot \frac{E_{Pc}}{E_{Pc}} = E_{P}$$
 (3-17)

여기서,

 $ext{E}_{ ext{P}}$  : 프로펠러 레이싱의 평가치  $\left(rac{\sigma_{ ext{P}}}{ ext{X}_{ ext{P}}} = rac{1}{\sqrt{-2 ext{ln}(Q_{P})}}
ight)$ 

 $\widetilde{E_p}$  : 프로펠러 레이싱의 변환 평가치

 $ext{E}_{ ext{Pc}}$  : 프로펠러 레이싱의 한계 평가치  $\left(rac{\sigma_{ ext{Pc}}}{ ext{X}_{ ext{P}}} = rac{1}{\sqrt{-2 ext{ln}(0.1)}}
ight)$ 



### (2) 프로펠러 레이싱 이외의 임의 요소에 대한 변환 평가치

$$\widetilde{E_{i}} = \frac{E_{i}}{\alpha_{p_{i}}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_{i} = \mu_{i} \cdot E_{Pc}$$

$$\widetilde{E_{j}} = \frac{E_{j}}{\alpha_{p_{j}}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_{j} = \mu_{j} \cdot E_{Pc}$$
(3-18)

여기서,

 $lpha_{P_i}$  : 프로펠러 레이싱과 i요소의 한계 평가치의 비  $\left(=\frac{E_{ic}}{E_{Pc}}\right)$ 

 $\mu_{
m i}$  : i요소의 위험도  $\left(=rac{{
m E}_{
m i}}{{
m E}_{
m ic}}
ight)$ 

식 (3-17), (3-18)에서 위험도가 같은 경우 변환 평가치도 같아지며, 그 발생확률  $(\widetilde{Q_i})$ 도 같은 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

$$\mu_{i} = \mu_{j} \qquad \Longrightarrow \widetilde{E}_{i} = \widetilde{E}_{j}, \quad \widetilde{Q}_{i} = \widetilde{Q}_{j}$$
(3-19)

# 3.3.2 내항성능지표의 정의

프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치를 이용하여, N 개의 내항성능평가요소로 구성되는 전체 선박 시스템의 변환 평가치( $E_T$ )와 한계 평가치( $E_{Tc}$ )에 대한 개념을 분석하여 SPI를 정의할 수 있다.

전체 선박 시스템의 변환 평가치  $E_T$  는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수있다.



$$\widetilde{E_T} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1-\widetilde{P_T})}}$$
 (3-20)

여기서, 
$$\widetilde{P_T} = \prod_{i=1}^n \widetilde{P_i}$$

선박의 내항성능평가요소의 신뢰도 함수  $\widetilde{P_i}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{split} \widetilde{P_{i}} &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\widetilde{E_{i}}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{P_{i}}}{E_{i}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{P_{i}} \cdot X_{i}}{\sigma_{i}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - Q\left(X_{i}\right)^{\alpha_{P_{i}}^{2}} \end{split}$$
 (3-21)
$$= 1 - Q\left(X_{i}\right)^{\alpha_{P_{i}}^{2}}$$

그리고 선박시스템의 한계 평가치  $E_{Tc}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Tc} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1 - P_{Tc})}}$$
 (3-22)

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{Tc}} &= \prod_{i=1}^{n} \mathbf{P}_{\text{ic}} \\ \mathbf{P}_{\text{ic}} &= 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{X_{i}}{\sigma_{ic}} \right)^{2} \right\} = 1 - Q_{X_{ic}} \end{aligned} \tag{3-23}$$



P<sub>Tc</sub> : 내항성능 신뢰도 함수

 $Q_{X_{ic}}$  : 각 요소의 한계발생확률 (Rayleigh 분포)

따라서 선박시스템 전체의 내항성능을 평가하기 위해서는 식 (3-22)의 한계 평가치  $(E_{T_c})$ 와 식 (3-23)의 변환 평가치  $(\widetilde{E_T})$ 의 비를 SPI로 정의하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$SPI = \frac{\widetilde{E_T}}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{Tc})}{\ln(1 - \widetilde{P_T})}}$$
 (3-24)

여기에서  $SPI \ge 1.0$ 인 경우 선박시스템 전체는 위험하게 되고, SPI < 1.0인 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

또한 이 SPI는 내항성능평가 요소중 한 개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우, SPI도 1보다 크게 되는 성질을 가지고 있다. 따라서 SPI는 내항성능평가요소의 최대 위험도와 근사하는 값이 된다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능평가요소의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있다.

$$SPI = \mu_{m}(\chi, V, S) = Maximum[\mu_{i}(\chi, V, S)]$$
 (3-25)



# 3.4 임의의 대표적인 요소에 의한 항해안전성평가

내항성능평가요소 중 대표적인 요소 한 가지에 의해 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있다. 즉, 임의의 대표적 요소  $X_i$ 로서 신뢰도함수  $P_i$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{split} \widetilde{P}_{i} &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_{i}}X_{im}}{\beta_{i}\sigma_{i}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_{i}}X_{im}}{\alpha_{P_{i}}\mu_{ij}\sigma_{i}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{ic}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{im}}{\mu_{ij}\sigma_{i}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_{i}}}{\mu_{ij}} \cdot \frac{X_{im}}{\sigma_{i}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - Q\left(X_{im}\right)^{\left(\frac{\alpha_{P_{i}}}{\mu_{ij}}\right)^{2}} \end{split}$$

$$\Leftrightarrow \mathcal{I}, \quad Q(X_{j}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{j}}{\sigma_{j}}\right)^{2}\right\} \end{split}$$

 $X_{
m im}$  : 계측하는 임의의 내항성능평가요소

$$\beta_i = \alpha_{ji} \, \boldsymbol{\cdot} \, \mu_{ji}$$

 $\mu_{ij}$  : 임의의 i 요소에 대한 임의 j 요소의 상대 위험도

 $\mathfrak{a}_{\mathit{pi}}$  : 프로펠러 레이싱에 대한 임의 j 요소의 한계평가치의 비



## 3.5 상하가속도 계측에 의한 항해안전성평가

앞에서 정의된 SPI는 기존의 내항성능평가요소 중 한 개 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 본 장에서는 기존 내항성능평가요소 중 계측하기 편리하고, 화물의 안전과 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하가속도 한 개의 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해안전성을 평가한다. 식 (3-21)의  $P_i$ 는 상하가속도를 계측하여 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 SPI를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{split} \widetilde{P}_{i} &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{P_{i}} X_{AV}}{\beta_{i} \sigma_{AV}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{P_{i}} X_{AV}}{\alpha_{P_{i}} \mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{AVc}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \cdot \frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^{2}\right\} \\ &= 1 - Q\left(X_{AV}\right)^{\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}}\right)^{2}} \end{split}$$

$$(3-27)$$

여기서,

$$Q(X_{AV}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\}$$

$$\beta_i = \alpha_{AVi} \cdot \mu_{AVi}$$

 $\mu_{AVi}$  : 상하가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도



# $a_{PAV}$ : 프로펠러 레이싱에 대한 상하가속도의 한계 평가치의 비

그런데 프로펠러 레이싱과 상하가속도의 한계발생확률이 각각  $Q_{Pc}=10^{-1}$ ,  $Q_{AVc}=10^{-3}$  이므로,  $\alpha_{PAV}=1/\sqrt{3}$ 로 되는 값이다. 따라서 식 (3-27)은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{P}_{i} = 1 - Q(X_{AV})^{\frac{1}{3} \left(\frac{1}{\mu_{AVi}}\right)^{2}}$$
(3-28)

여기서, 전체 선박시스템의 변환 평가치는 아래 식과 같다.

$$\widetilde{E}_{T} = \frac{1}{\sqrt{-2\ln(1-\widetilde{P}_{T})}}$$
 (3-29)

계산된 식 (3-28)의 변환 평가치와 식 (3-29)의 한계평가치를 통해 실선 계측 결과에 의한 SPI를 아래 식과 같이 구한다.

$$SPI = \frac{\widetilde{E}_{T}}{E_{TC}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{TC})}{\ln(1 - \widetilde{P}_{T})}}$$
(3-30)



## 제 4 장 선체운동모니터링시스템 제작 및 검증

## 4.1 선체운동모니터링시스템 설계

선체운동모니터링시스템은 세 부분으로 구성하여 설계하였다. AHRS를 사용하여 항해중인 선박의 횡요(Roll), 종요(Pitch), 선수요(Yaw) 데이터를 측정하는 선체운동 계측부분, 측정된 데이터를 유·무선 네트워크를 통하여 전송하는 네트워크 처리부분과 전송된 데이터를 수신하여 정보를 처리하는 데이터 수집처리부분이다.

## 4.1.1 선체운동 계측부

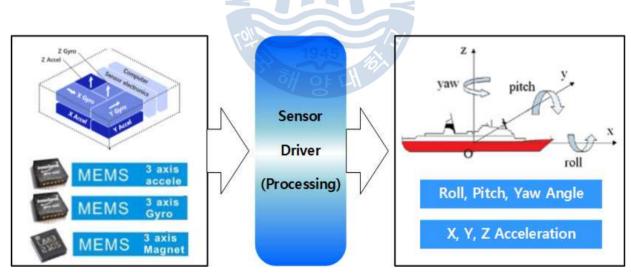


Fig. 4-1 Application Diagram of IMU

본 연구에서 실선에서의 선체운동을 실시간 계측하기 위해 사용된 AHRS의 관성센서는 3축 MEMS형 가속도(Accelerometer), 자이로스코프(Gyroscope), 지자기(Magnetometer) 센서로 구성되어 있으며, 이는 3축에 직각으로 배치되어 총



9축이 측정되므로 각 센서로부터 선체운동을 6 자유도(DOF: Degree Of Freedom) 요소를 계측하여 결과 값을 얻을 수 있다. 선체운동 계측부에 적용한 센서는 시중에서 판매하는 저가의 상용 제품인 32Bit MCU(Micro Controller Unit, 초소형 조정장치)를 탑재한 디지털 타입의 AHRS 모듈센서와 정밀도가 높은 6 DOF 및 범용 3 DOF 계측용 MEMS AHRS 센서를 사용하였다. Fig. 4-1은 구축된 AHRS 기반 선체운동 계측에 대한 구조도를 나타내고 있고, Fig. 4-2는 MEMS AHRS 센서의 내부 및 외부 데이터 처리과정을 보여주는 도표이다.[137~139]

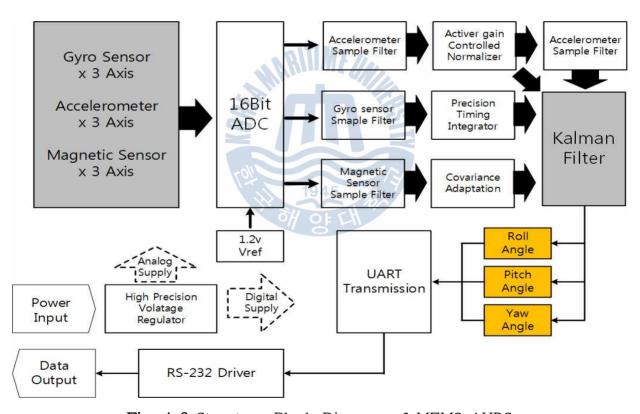


Fig. 4-2 Structure Block Diagram of MEMS AHRS



## 4.1.1.1 자이로 센서

자이로(Gyroscope) 센서는 3축 회전 각속도를 측정하기 위하여 INVENSENSE 사의 ITG-3200 디지털 출력 자이로스코프를 탑재한 IC를 사용하였다. 이 센서 는 자이로 출력을 샘플링하기 위한 16비트 ADC와 사용자가 선택 가능한 내부 저역(Low path) 필터와 Fast mode I<sup>2</sup>C(400Khz)인터페이스를 가지고 있다.[140]

Fig. 4-3은 ITG-3200 자이로 센서의 외형과 내부 구조도이다.

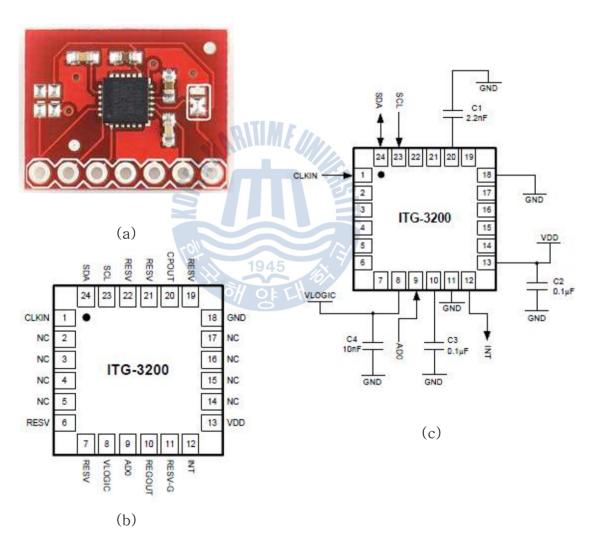


Fig. 4-3 ITG-3200 Gyroscope Sensor

(a) Outline, (b) Pin Configuration(Top View), (c) Operating Circuit



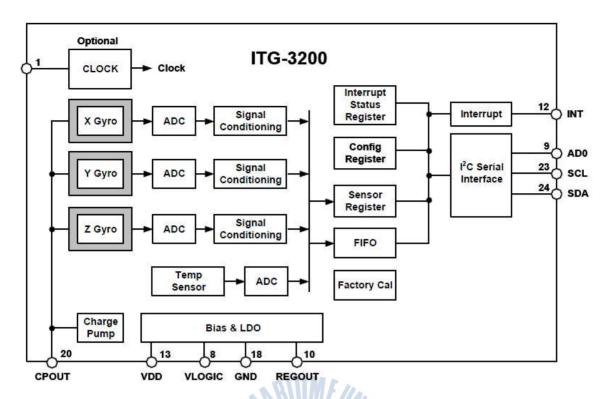


Fig. 4-4 Function Block Diagram of Gyroscope

Fig. 4-4는 3축 자이로 센서의 신호 처리를 나타내는 블록선도이다. ITG-3200 자이로 센서는 한 개의 IC에 의한 디지털 출력 X, Y, Z 축 각속도 센서(Gyros)를 제공하며, 2.1V ~ 3.6V의 VDD 공급 전압 범위로 3축 가속도 신호를 출력한다. 이 신호는 내부 ADC를 통해 16bit 디지털 데이터로 변환되며, I<sup>2</sup>C 직렬통신 인터페이스를 통해 출력된다.

자이로 센서는 가속도를 출력하며, 보통 이 가속도를 적분하여 회전각을 계산하는데 이때 미소한 Bias drift도 적분으로 누적되면 결국 큰 오차가 발생한다. 이 Bias drift를 최소화하기 위해 HDR(Heuristic Drift Reduction) 알고리즘과같이 소프트웨어적으로 해결한다.

Fig. 4-5은 자이로 센서의 축 방향을 나타내고, Fig. 4-6은 회로도를 보여준다. Table. 4-1은 ITG-3200 자이로 센서의 주요 사양이다.



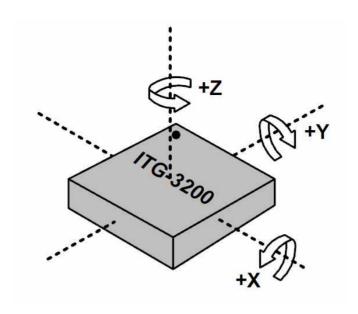


Fig. 4-5 Orientation of Axes of Sensitivity and Polarity of Rotation

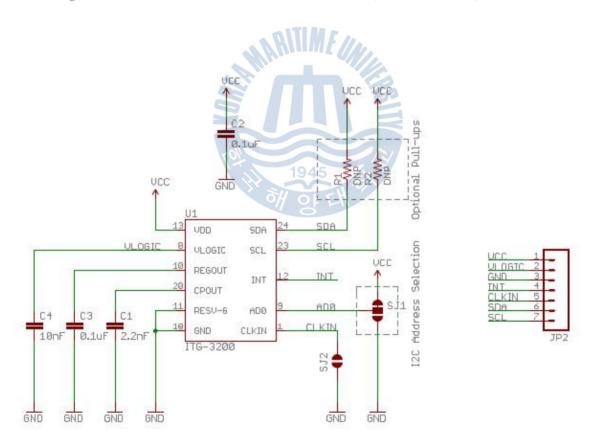


Fig. 4-6 Circuit of MEMS Gyroscope



Table 4-1 Specification of Gyroscope Sensor

Characteristics	Conditions	Min	Typical	Max	Units			
GYRO SENSITIVITY								
Full-Scale Range	FS_SEL=3	±2000			º/s			
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=3	14.375			LSB/ (º/s)			
Nonlinearity	Best fit straight line; 25° C	0.2			%			
GYRO ZERO-RATE OUT	PUT (ZRO)							
Power-Supply Sensitivity (1–10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.2V	0.2			<u>°</u> /s			
Power–Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.2V	0.2			º/S			
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.2V	4			º/s			
Linear Acceleration Sensitivity	Static	0.1			º/s/g			
GYRO MECHANICAL FRI	EQUENCIES 1945	[Z]						
X-Axis	अं शिया	30	33	36	kHz			
Y-Axis		27	30	33	kHz			
Z-Axis		24	27	30	kHz			
VDD POWER SUPPLY								
Operating Voltage Range		2.1		3.6	V			
Power-Supply Ramp Rate		0		5	ms			
Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.71V to VDD, TA=25° C.								



## 4.1.1.2 가속도계 센서

가속도계(Accelerometer) 센서는 ANALOG DEVICE사의 ADXL345를 사용하였다. 이 센서는 3축(axis) 가속도 신호 출력이 가능하여 x, y, z 축의 정보를 따로따로 받을 수 있는 센서이며, 측정 범위는 ±2g, ±4g, ±8g, ±16g 중의 하나를 선택하여 계측할 수 있다.[141]

Fig. 4-7는 ADXL345 가속도 센서의 외형과 내부 구조도이다.

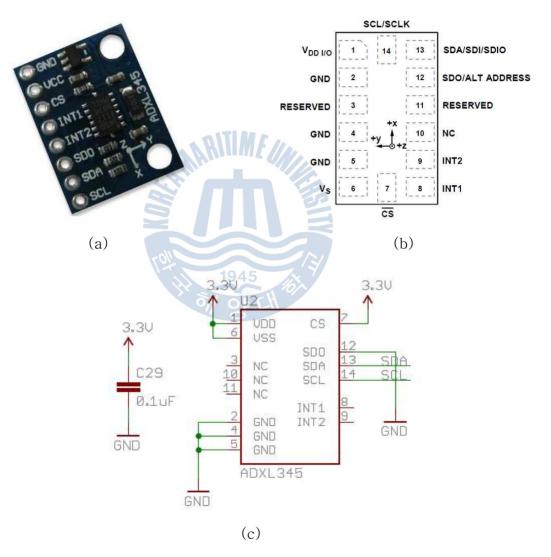


Fig. 4-7 ADXL345 Accelerometer Sensor

(a) Outline, (b) Pin Configuration(Top View), (c) Circuit



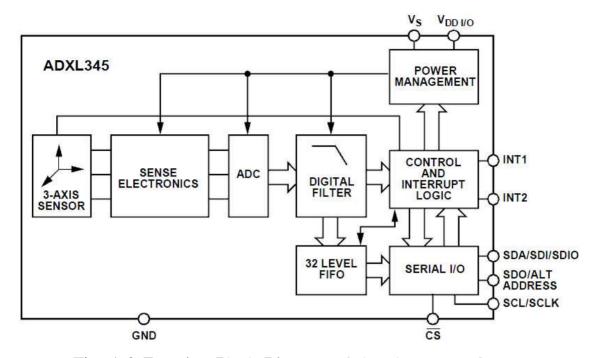


Fig. 4-8 Function Block Diagram of Accelerometer Sensor

ARITME

Fig. 4-8은 3축 가속도계 센서의 신호 처리를 나타내는 블록선도이다. ADXL345 가속도 센서는 2.0 ~ 3.6V의 사용 전압을 가지며, 3축 가속도 신호를 출력한다. 이 신호는 내부 ADC를 통해 12bit 디지털 데이터로 변환되며, I<sup>2</sup>C 직 를 통신 인터페이스를 통해 출력된다.

가속도 센서는 가속도를 출력하는데 있어 중력 가속도가 포함되어 있기 때문에 중력 가속도를 제거한 후 적분하여 속도와 위치를 계산해야 한다. 이때 미소한 Scale factor의 변화로 인해 중력 가속도 성분이 제대로 제거되지 않고 적분으로 누적되면 결국 큰 오차가 발생한다. 이런 오차는 센서로부터 가속도값을 받아 가속도 오차를 수정하기 위해 HSR(Heuristic Scale Regulation) 알고리즘과 같이 소프트웨어적으로 해결한다.

Fig. 4-9는 가속도 센서의 축 방향을 나타내고, Fig. 4-10은 중력과 방향별로 가속도 응답값을 보여준다. Table. 4-2는 ADXL345 가속도 센서의 주요 사양이다.



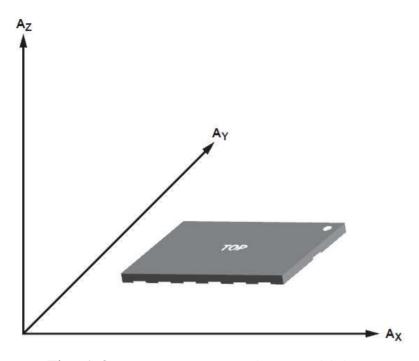


Fig. 4-9 Axes of Acceleration Sensitivity

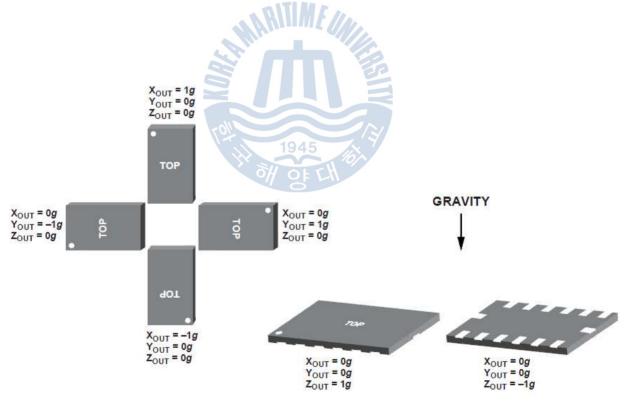


Fig. 4-10 Comparison of Output Response and Orientation to Gravity



Table 4-2 Specification of Accelerometer Sensor

Characteristics		Conditions	Min Typical		Max	Units	
Measurement Range		User selectable	-16 ~ +16		16	dps (deg/s)	
Nonlinearity		Percentage of full scale	±0.5			%	
	2 g	10-bit resolution	232	256	286	LCDI	
Concitivity	4 g	10-bit resolution	116	128	143		
Sensitivity	8 g	10-bit resolution	58	64	71	LSB/g	
	16 g	10-bit resolution	29	32	36		
	2 g	10-bit resolution	3.5	3.9	4.3		
Scala Factor	4 g	10-bit resolution	7.0	7.8	8.6	mali CD	
Scale Factor	8 g	10-bit resolution	14.0	15.6	17.2	mg/LSB	
	16 g	10-bit resolution	28.1	31.2	34.3		
BIAS Level	x, y	Each axis	-150	±40	+150	LSB rms	
DIAD LEVE	Z	Each axis	-250	±80	+250	LSB rms	
Measurement Ra	ate	User selectable	6.25		3500	Hz	
Operating Voltage Range			2.0	2.5	3.6	V	
Interface Voltage Range		Vs ≤ 2.5 V	1.7	1.8	V	V	
Operating Temperature Range			-40		+85	° C	
Device Weight				20		mg	



## 4.1.1.3 지자기 센서

지자기(Magnetometer) 센서는 ±8 gauss의 측정 범위를 갖는 Honeywell사의 HMC5883 4-Axis Digital Compass IC를 사용하였다. 이 센서는 3축(Axis)을 측정하며 메인보드와의 통신은 I²C 디지털 직렬 통신을 한다. 사용 전압은 2.5 ~ 3.3V이며, 출력은 15 ~ 116Hz이고, 선형성은 0.1% FS이다. Fig. 4-11은 HMC5883 지자기 센서의 외형과 내부 구조도이고, Fig. 4-12는 내부 회로도이며, Fig. 4-13은 성능(Performance) 그래프이다. Table. 4-3은 HMC5883 지자기 센서의 주요 사양이다.[142]

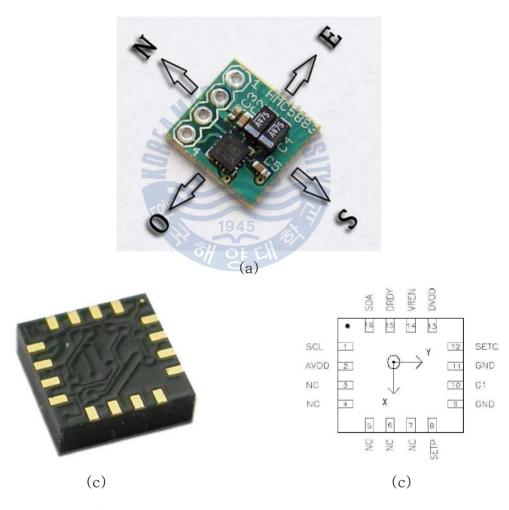


Fig. 4-11 HMC5883 Magnetometer Sensor

(a) Magnetometer Sensor Module Top View, (b) HMC5883 Sensor Outline,

(c) Pin Configuration



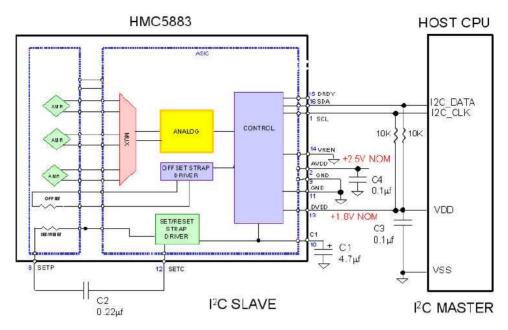


Fig. 4-12 Internal Schematic Diagram

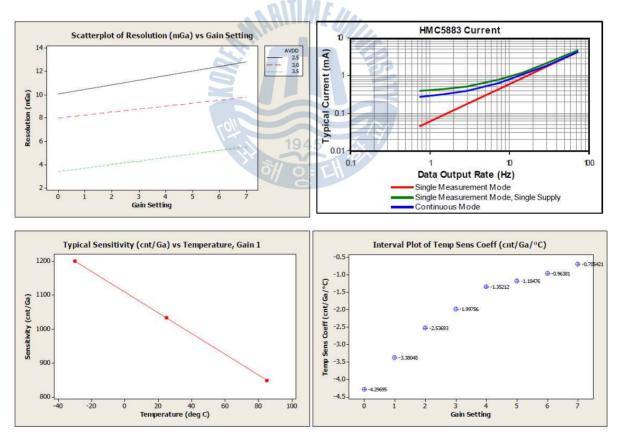


Fig. 4-13 HMC5883 Sensor Performance



Table 4-3 Specification of Magnetometer Sensor

Characteristics	Conditions	Min	Typica 1	Max	Units
Voltogo	AVDD referenced to AGND	2.5		3.3	Volts
Voltage	DVDD referenced to DGND	1.6	1.8	2.0	Volts
Field Range	Full scale (FS) - total applied field (Typical)	-8		+8	gauss
Mag Dynamic Range	3-bit gain control	±1		±8	gauss
Resolution	AVDD=3.0V, GN2		10		milli- gauss
Linearity	±2.0 gauss input range			0.1	±% FS
Hysteresis	±2.0 gauss input range		±25		ppm
Cross-Axis Sensitivity	Test conditions: Cross field = 0.5 gauss, Happlied = ±3 gauss		±0.2%		%FS/gau ss
Disturbing Field	Sensitivity starts to degrade. Use S/R pulse to restore sensitivity.	RSITY		20	gauss
Output Rate	Refer to configuration register a section		15	116	Hz
Measurement Period	From receiving command to data ready		8.3		msec
Turn-on Time			200		μs
Gain Tolerance	All gain/dynamic range settings		±5		%
I2C Address	7-bit address 8-bit read address 8-bit write address		0x1E 0x3D 0x3C		hex hex hex
I2C Rate	Controlled by I2C master			400	kHz
Operating Temperature	Ambient	-30		85	°C
Package Size	Length and width	2.85	3.00	3.15	mm



## 4.1.1.4 AHRS 모듈

자이로 센서는 방위각을 나타내는 선수요 및 기울기를 나타내는 횡요와 종요를 모두 측정하며, 가속도 센서는 지구 중력가속도를 이용하여 센서의 기울기인 횡요와 종요를 계산할 수 있고, 지자기 센서는 지구의 자기장을 측정하여 선수 방향과 같은 방향 각도를 계산할 수 있다. AHRS 모듈은 자이로 센서, 가속도 센서, 지자기 센서로 구성되어 세 종류의 3축 MEMS 센서가 연동되어 계측대상의 자세 및 움직임을 측정하여 표현할 수 있는 시스템이다. 본 연구에서는 상용화된 AHRS의 두 가지 형태의 제품을 각각 실험 모델로 선정하여 수조실험과 실선실험에 적용하였다.[138, 139]

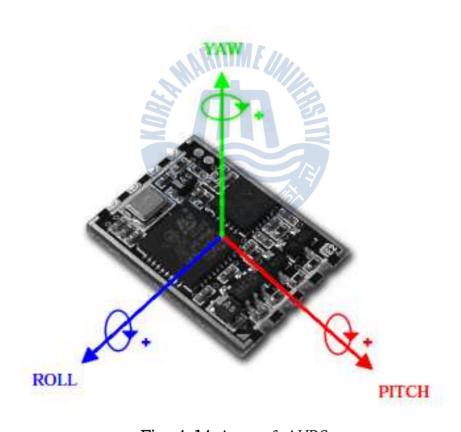


Fig. 4-14 Axes of AHRS



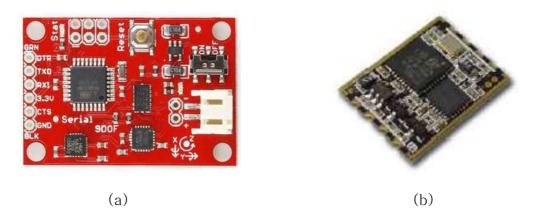


Fig. 4-15 Outline of AHRS

(a) Razor IMU AHRS Model, (b) EBIMU-9DOFV2 AHRS Model

Table 4-4 Specification of General AHRS

Para	meter	Value	Unit	
Static accuracy	(roll/pitch)	< 0.2	deg	
Static accuracy (roll/pitch)  * Magnetometer OFF		1945 < 0.02	deg	
Static accuracy	(yaw)	< 0.5	deg	
Dynamic accuracy (RMS)		< 1.5	deg	
Dynamic accuracy (RMS)  * Magnetometer OFF		< 0.5	deg	
Angular resolution	on	0.01	deg	
	roll	-180 ~ +180		
Output Ragne	pitch	-90 ~ +90	deg	
	yaw	-180 ~ +180		
Output data rate		1Hz ~ 1000Hz	Hz	



## 4.1.2 네트워크 처리부

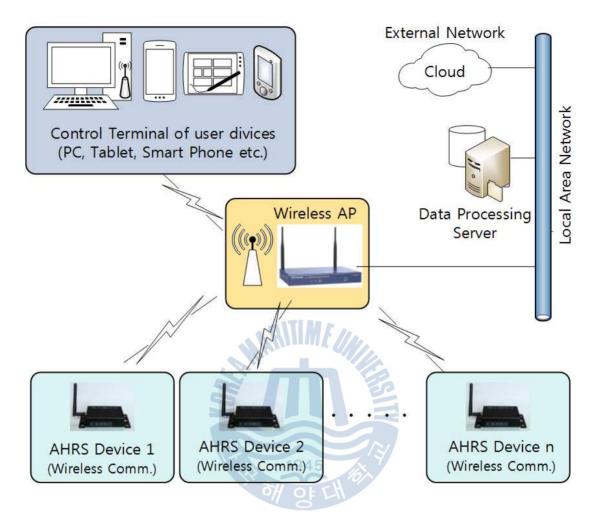


Fig. 4-16 Wireless Sensor Networking for Serial Device

선체운동모니터링시스템의 장비간 통신은 선박네트워크(SAN: Ship Area Network)를 적용하였으며, 마이크로프로세서와 메모리, 전원 공급기, 무선 통신 기능을 갖춘 저전력 디바이스인 지능형 소형 센서 노드들의 집합으로 구성된다. 이것은 공간 및 위치에 제약없이 다양한 공간에 설치되어 주위 환경 정보를 수집한 뒤 센서 노드들 간의 독립적인 유선 또는 무선 네트워크를 통해 목적지로 전송할 수 있는 기술이다. 특히 선박의 제한된 환경에서 이러한 장점을 지닌 SAN을 적용하여 선박 내 외부의 근거리 통신망의 활용을 통한 선박 환경에 최적화된 선체운동모니터링시스템의 유 무선 네트워크를 구축하였다. Fig. 4-16은



AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템에서 직렬 통신 처리를 하는 AHRS 센서의 유·무선 센서 네트워크 구성도를 나타낸다. 이 시스템의 네트워크 프로토콜은 UART (Universal Asynchronous Receiver & Transmitter)를 사용하는 센서장비와 Wi-Fi 네트워크를 사용하는 TCP(Transmission Control Protocol) 또는 UDP(User Datagram Protocol) 기반의 네트워크 모델로 제작되었다.

## 4.1.2.1 무선 선체운동계측센서 통신

무선 선체운동계측센서의 통신은 전형적인 무선 통신 방식과 동일하게 데이터를 전송하는 송신부와 데이터를 수신하는 수신부로 구성되어 있다. 송신부에서는 MEMS AHRS 센서에 의해 획득한 데이터를 WiFi-RS232C 변환 모듈을 사용하여 직렬 통신 방식인 RS-232C를 지원하는 주변기기를 손쉽게 무선랜(Wi-Fi)을 이용하는 SAN에 접속하여 통신한다. 수신부인 PC측에서도 SAN에 접속하여 AHRS 센서부에 직접 연결하여 선체운동 계측 데이터를 수신 받는다. 본 연구에 의해 구현된 무선 선체운동 계측 통신을 구성하는데 사용된 부품들의 주요 사양은 Table 4-5에 나타내었다. Fig. 4-17의 (a)는 선체운동모니터링시스템의 센서부와 네트워크부를 탑재한 선체운동계측기의 외형이고, (b)는 네트워크부의 송신 모듈인 WiFi-TTL 변환 모듈이고, (c)는 TTL-UART 변환 모듈이다. Fig. 4-18은 무선 Wi-Fi 통신의 운영 절차도이다.[143]

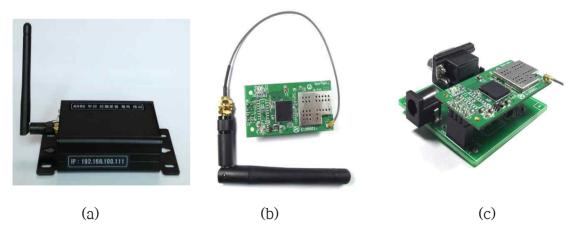


Fig. 4-17 Wireless Communication Module

(a) AHRS Main Unit Body, (b) WiFi-RS232C Transmitter, (c) RS232C-TTL Convertor



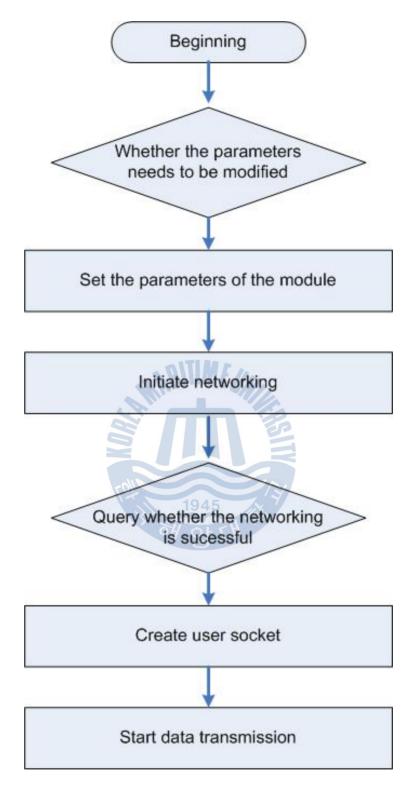


Fig. 4-18 Operation Procedure of Wi-Fi module



Table 4-5 Specification of Device Used for Wireless Sensor Communication

Item		Parameters		
	Wireless standard	IEEE 802.11 b/g		
	Frequency range	2.412 ~ 2.484 GHz		
Wireless	Receiver/Transfer	802.11 b/g (11 Mbps / 54 Mbps)		
	Output power	18±2 dBm (typical)		
	Antenna Interface	IPX		
	Serial type	UART		
	Serial rate	1200 ~ 115200 bps		
	Operating voltage	$3.3 \pm 0.3 \text{ V}$		
H/W	Operating currnet	300 mA (typical)		
	Storage temp.	-40 ~ 85 ℃		
	Operating temp.	0 ~ 75 ℃		
	Dimensions	55.2 × 25.4 × 11.5 mm		
	Network protocol	TCP, UDP, ARP, ICMP, DHCP, HTTP		
S/W	Work mode	auto / command		
5, 11	Serical command	AT + instruction set		
	Max. sending rate	11 kbytes/s (TCP)		



## 4.1.3 데이터 수집처리부

외력에 따른 선체의 6 DOF 중 주요 3요소인 횡요, 종요, 선수요와 항해안전성에 활용되는 가속도를 계측하기 위한 AHRS 센서의 데이터를 취득하고 분석하기 위하여 센서 제작업체에서 개발 툴로 제공하는 AHRS Property Editor와 Uni-Matrix의 두 가지 프로그램을 사용하였다. 이 S/W는 AHRS 센서를 사용하여 실험대상의 계측 데이터 모니터링 및 수집 작업을 하였다. 이 S/W는 AHRS 센서 데이터 수집 및 제어가 가능한 프로그램으로서 센서별 통신포트 설정, 센서 보정, 주파수 설정 등의 기능이 있다. 그리고, 센서 계측 값의 텍스트 데이터, 그래프 표시, 2D 그래프와 3D 그래픽 구현이 되어 사용상 편리성과 결과데이터를 다양하게 가공할 수 있다.

Fig. 4-19, 4-20은 AHRS 센서를 이용하여 실시간으로 측정된 선체운동 계측 데이터를 표시하고 저장하고 있는 모습을 보여주고 있는 데이터 취득 프로그램 (DAQ)을 보여준다.[137,138,144]

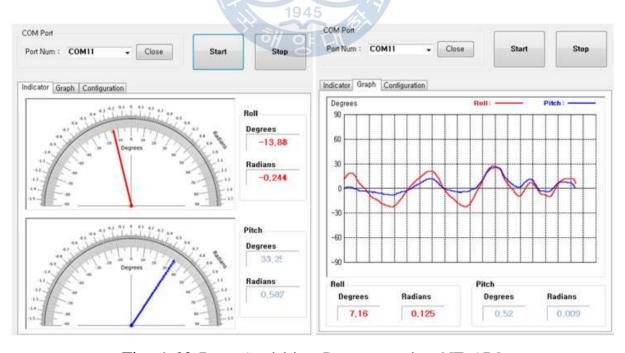
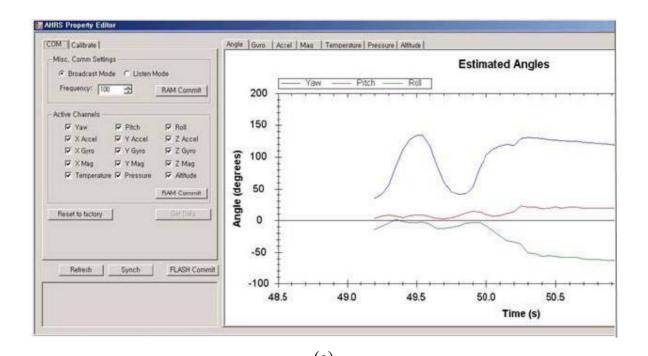


Fig. 4-19 Data Aquisition Program using NT-ARS





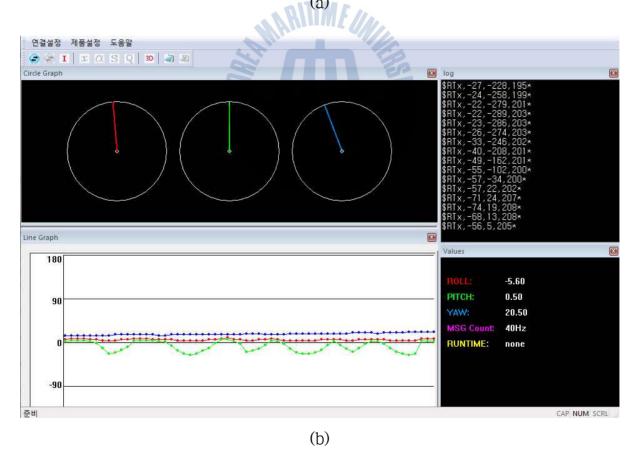


Fig. 4-20 Data Aquisition and Analysis S/W (a) AHRS Property Editor (b) Uni-Matrix



## 4.2 선체운동모니터링시스템의 성능 검증

제작된 선체운동모니터링시스템의 성능 검증을 위해 국립수산과학원의 회류수조(CWC: Circulating Water Channel)를 사용하여 모형선에 선체운동 계측센서 모듈을 탑재 후 각 센서별 탐지 및 정상 기능 요건의 충족 여부를 확인하는 실험을 실시하였다.

## 4.2.1 회류수조실험 개요

선체운동모니터링시스템의 성능을 확인하기 위해 사용한 회류수조는 2 임펠러 방식의 수직순환형 회류수조로서 임펠러로 수로에 유속을 발생시켜 모형 선박 및 해양관련 구조물을 유체역학적인 방법으로 검증 실험을 할 수 있는 시설이다.

회류수조의 주요한 특징은 연속적으로 장시간 유체의 흐름장 설정이 가능하므로, 실험에 필요한 만큼 "무한하게 긴 수로" 환경을 제공할 수 있다. 그리고, 관측부에 균일한 유속 분포를 가지는 흐름을 설정할 수 있으므로, 모형선의 선체운동과 선박 및 해양구조물에 대한 유체 흐름 자체를 근처에서 관찰 가능하여, 실험하고자 하는 현상을 시각적으로 볼 수 있으며 정량적인 데이터 수집이 가능하다.

실험에 사용한 회류수조는 회류수조 본체 (CWC Body Frame), 임펠러 & 구동 시스템(Impeller & Driving System), 표면류 가속장치 (Surface Flow Accelerating System), 정류장치 (Flow Uni-former), 전기 & 제어 시스템 (Electric & Control System)으로 구성되어 있다.



## 4.2.1.1 회류수조 주요 제원 및 성능

실험에 사용한 회류수조의 주요 제원과 성능은 Table 4-6과 같으며, Fig. 4-21 ~ Fig. 4-22는 국립수산과학원 회류수조실의 주요 실험 설비이다.

Table 4-6 Specification & General Performance of CWC

항 목	규 격
형 식	2 임펠러 방식 수직순환형 회류수조
전체 크기	4.50W * 8.27H * 25.12L (m)
시험부 크기	2.80W * 1.80H * 8.00L (m)
시험부 수심	1.40 (m)
주요장비 용량	<ul><li>○ 주전동기 출력 (90 x 6P KW)</li><li>○ 임펠러 직경 (1294 MM)</li></ul>
유속 범위	0.05 ~ 3.00m/s
유속 분포	○ 1.00m/s ± 2.0% (벽면과 저면 100mm, 수면 20mm 제외) ○ 2.00m/s ± 1.0% (상 동)
정재파	○ 1.00m/s에서 ± 2.0mm 이내 ○ 1.50m/s에서 ± 4.0mm 이내 ○ 2.50m/s에서 ± 40.0mm 이내
Surging	1.50m/s에서 ± 1.5mm 이내
수면 경사	○ 1.00m/s에서 1/6000 이내 ○ 2.00m/s에서 1/2000 이내
난류 강도	1.00m/s에서 0.50% 이내





Fig. 4-21 Body Frame of CWC

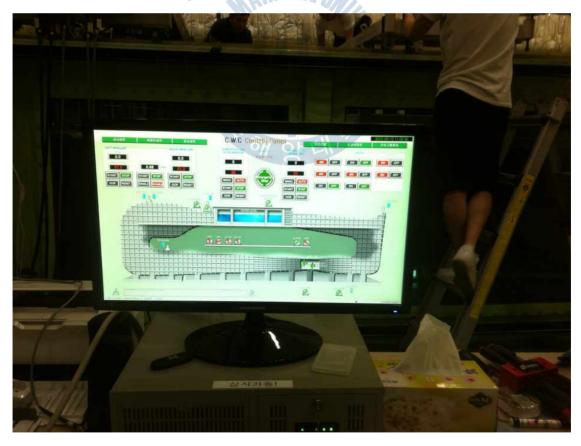


Fig. 4-22 Electric and Control System of CWC



## 4.2.1.2 모형 선박의 제원

본 실험에 활용한 선박은 1,300톤급 바지 선박을 1/50 축척으로 제작한 바지 선 모델을 사용하였고, 실제 바지선과 모형선에 대한 상세한 제원 및 형상은 Fig. 4-23과 Table 4-7에 나타내고 있다.

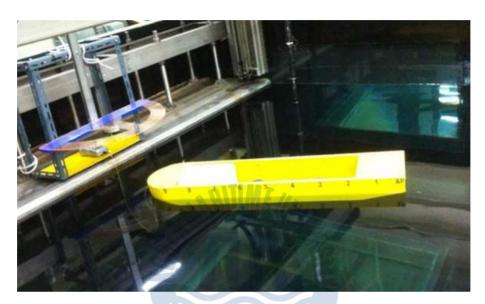


Fig. 4-23 Model ship of 1,300 ton Class Barge Mockup

Table 4-7 Main Particulars of Test Model Ships

Items	Dimensions			
items	Actual Ship	Model Ship		
LOA	50.0 <i>m</i>	1.0 <i>m</i>		
LBP	50.0 <i>m</i>	1.0 m		
Breath	12.0 m	0.24 m		
Draft	2.8 m	0.056 <i>m</i>		
$C_b$	0.8267			
Displacement	1,389.0 m³	0.01111 m³		



## 4.2.2 선체운동모니터링시스템 성능 검증을 위한 실험 조건 및 방법

실선에서의 선체운동모니터링시스템의 신뢰성 있는 운용을 위하여 제작된 계측장비의 AHRS 센서별 감도 및 성능 충족 요건을 테스트하는 실험을 실시하였다. 실제의 선박과 비슷한 환경에서 테스트하기 위하여 회류수조에서 모형선에 선체운동모니터링시스템의 선체운동 계측센서를 장착하여 모형선의 선체운동을 계측하였다.

수조실험에서 선체운동모니터링시스템의 선체운동 계측 센서는 앞 절에서 기술한 두 가지 타입의 AHRS 센서를 대상으로 하였다. 회류수조실험은 실험 대상 선박이 자유 선체운동을 하여야 계측이 가능하므로 부선 선박모델을 선정하여 선체운동의 효과를 줄 수 있도록 예인하는 형태로 실험 환경을 설정하였다. 회류수조에서의 모형선 고정은 유속이 정지 상태에서 모형선을 회류수조 정중앙에 위치시킨 후 수류가 입사하는 입구쪽에 가상의 예인점을 선정하고 이곳에예인삭을 연결하였다. 실선의 운항 속도를 7 kts로 선정하고, 조류의 영향을 고려하여 5 kts ~ 10 kts의 선속 범위에 해당하는 무한수심 조건하에서 수행하였다.

모형 선박의 횡동요, 종동요, 상하가속도의 계측은 회류수조에서 유속의 흐름에 따른 모형선의 선체운동을 계측하였다. 선수동요의 계측은 실험을 시작하여 유속을 차츰 증가시키면 부선의 브라이들 특성에 따라 좌우 회두운동이 일정한주기로서 반복되어 나타나므로 이 상태에서 모형선의 선수동요값을 계측하였다.

본 실험의 결과로서 다음의 4가지의 사항에 대한 선체운동 계측 값을 도출하여 제작한 선체운동모니터링시스템의 성능 검증을 실시한다.

- (1) AHRS 센서별 횡동요각(Roll Angle) 계측 및 비교
- (2) AHRS 센서별 종동요각(Pitch Angle) 계측 및 비교
- (3) AHRS 센서별 선수동요각(Yaw Angle) 계측 및 비교
- (4) AHRS 센서별 상하가속도(Vertical Acceleration) 계측 및 비교





Fig. 4-24 Installation of AHRS Sensor at Model Ship

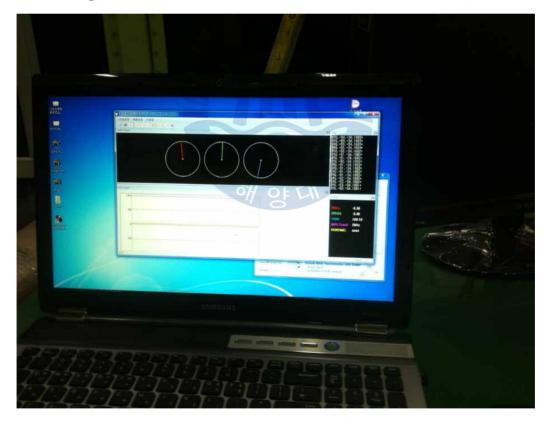


Fig. 4-25 Data measurement S/W for AHRS

## 4.2.3 회류수조실험 데이터 계측 및 취득

## 4.2.3.1 AHRS 센서를 사용한 모형선 선체운동 계측

실험대상인 AHRS 센서는 앞 절에서 소개한 RuvaTech사의 RTxQ AHRS Model을 AHRS 센서 1로 지정하였고, Razor IMU AHRS Model은 AHRS 센서 2로 지정하여 실험을 수행하였다.

AHRS 센서의 설치는 모형선의 선수부터 1/3 지점에 수밀이 되는 케이스 안에 두 가지 타입의 AHRS 센서를 같이 장착하여 모형선에 고정하였고, 실험 실시 전에 각 방향별 가속도 센서의 보정(Calibration)을 실시하여 횡요와 종요 값의 0점 보정을 하였다. 실선에서의 선체는 낮은 주파수 주기로 움직이므로 모형선의 수조실험에서도 선체의 특성을 감안하여 각 AHRS 센서마다 Sampling rate를 20Hz로 하여 센서 계측 값을 취득하였다. 모형선의 테스트시 선체운동데이터의 수집은 횡동요각, 종동요각, 선수동요각, 상하가속도 값을 측정하였으며, 실시간 계측 시그널을 무선으로 전송받아 데이터 수집 컴퓨터에서 처리 및데이터 저장을 하였다. 본 실험에서는 AHRS 센서가 계측하는 모형선의 선체운동 측정을 5분 단위로 저장하여 기록하였다.

AHRS 센서가 탑재된 모형선의 초기 상태는 해면상태가 정수(Still water) 중에서 Starboard(오른쪽) 방향으로 0.7° 경사(heeling)가 있었고, 0.1° 선미 트림이 있는 상태이었다. 이 초기 상태를 기준점으로 모형선의 선체운동을 계측하였다. 수조실험은 5 kts와 7 kts의 다른 선속을 적용하여 2 차례에 걸쳐 수행하였다.

Fig. 4-26은 모형선이 만재시 선속 5 kts로 예인되는 상황에서 선체운동을 계측하는 모습이며, Fig. 4-27은 모형선이 만재시 선속 7 kts로 예인되는 상황에서 선체운동을 계측하는 모습이다.



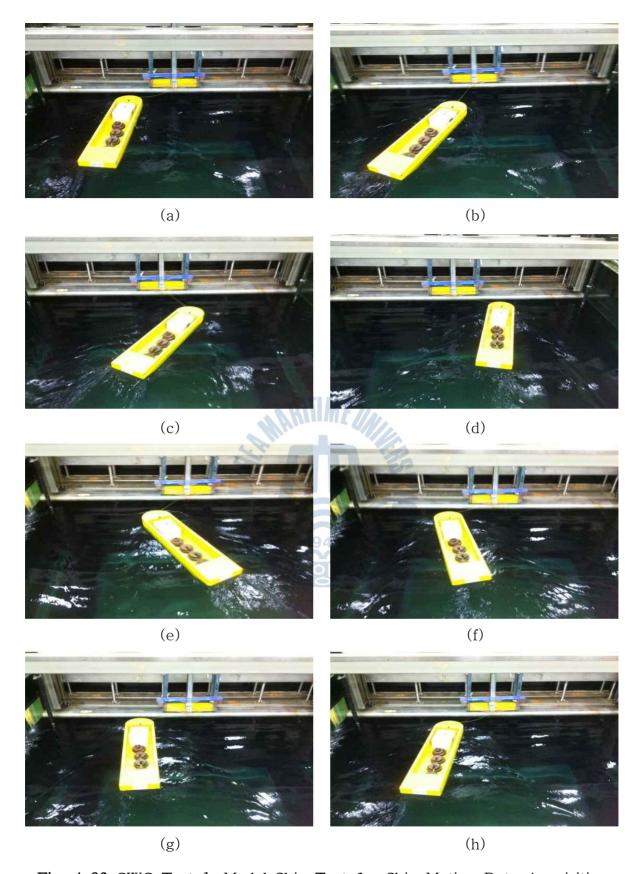


Fig. 4-26 CWC Test 1, Model Ship Test for Ship Motion Data Acquisition using AHRS Sensors (Full Load Condition, V=5 kts)



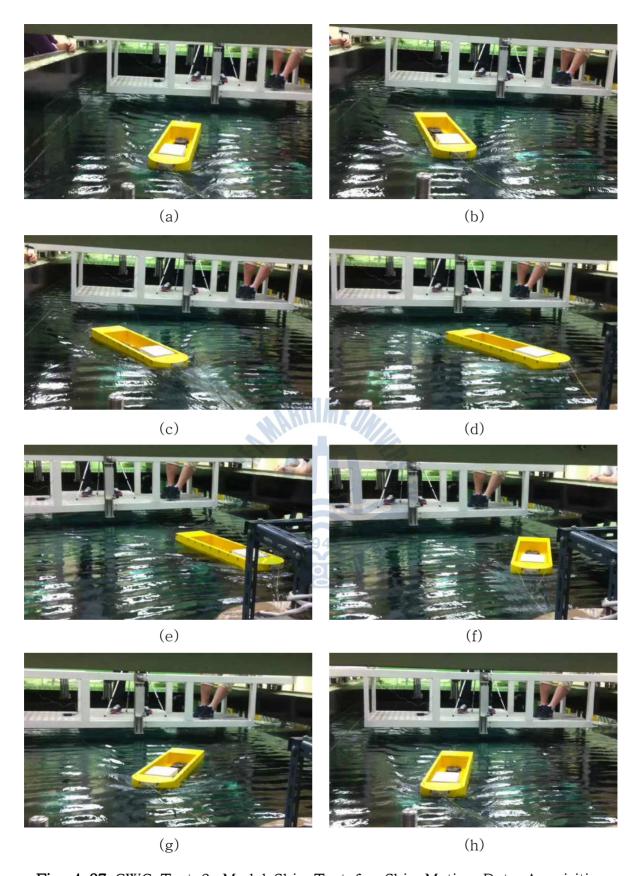


Fig. 4-27 CWC Test 2, Model Ship Test for Ship Motion Data Acquisition using AHRS Sensors (Full Load Condition, V=7 kts)

## 4.2.4 회류수조실험의 AHRS 센서 성능 분석 및 결과

실선의 선체운동 중 주요 회전운동 요소인 횡요, 종요, 선수요의 계측을 위하여 선행한 모형선의 수조실험의 주요 목적은 실험 대상인 두 가지 타입의 AHRS 센서의 선체운동 계측에 대한 결과를 서로 비교분석하여 센서의 계측 성능을 확인하는데 있다. AHRS 센서를 일정한 시간 및 간격에 따라 모형선의 선체운동을 일정 시간 간격으로 계측하여 두 가지 타입의 AHRS 센서가 모형선의움직임에 따른 데이터를 취득하였다. 각 AHRS 센서로부터 취득된 선체운동 계측 데이터를 통계 처리 및 비교분석하여 AHRS 센서의 선체운동 측정 기능의성능을 확인하였다.

## (1) AHRS 센서별 모형선 선체운동 계측의 샘플 분석

Fig. 4-28 ~ Fig. 4-30은 두 개의 AHRS 센서를 사용하여 회류수조실험에 대한 모형선의 횡요각, 종요각, 선수요각 측정을 약 3분간 동안 샘플링하여 도시하였다. 그래프에서 x축은 계측시간(Hour)을 10초 단위로는 나타내고, y축은 횡요각, 종요각, 선수요각을 도(Degree) 단위로 표시하였다.

샘플링 구간에서의 계측 데이터의 AHRS 1 센서 계측치는 횡동요각 0.00°~ 1.53°, 종동요각 (-)0.49°~ 0.76°, 선수동요각 90.9°~ 98.8°의 범위에서 측정되었다. AHRS 2 센서 계측치는 횡동요각 0.00°~ 1.76°, 종동요각 (-)0.59°~ 0.91°, 선수동요각 89.5°~ 97.9°의 범위에서 계측되었다.

이 그래프에서 두 센서의 계측치를 비교해보면 AHRS 1과 AHRS 2의 센서 계측 값의 유의치가 비슷한 값이고, 최대 및 평균 진폭치 또한 유의수준 5%에서 유의하다는 것을 볼 수 있다. 그러므로 이 실험을 통해서 두 AHRS 센서가 서로 동일한 성능을 내고 있는 것을 알 수 있고, 선체운동 측정에 대한 계측 값의 신뢰성 또한 높다고 판단된다.



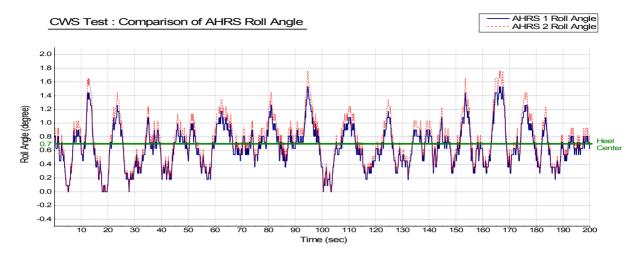


Fig. 4-28 Comparison of AHRS Rolling Angle by CWC Test

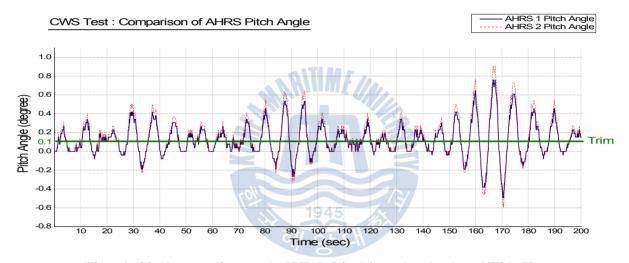


Fig. 4-29 Comparison of AHRS Pitching Angle by CWC Test

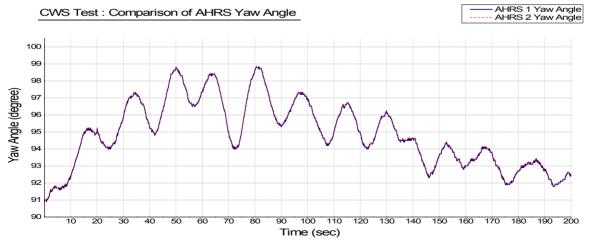


Fig. 4-30 Comparison of AHRS Yawing Angle by CWC Test



## (2) 회류수조실험의 모형선 선체운동 계측 결과 및 종합 분석

Table. 4-8은 두 가지 타입의 AHRS 센서를 탑재한 모형선의 선체운동을 계측한 결과를 보여준다.

Table 4-8 Measurement Data of Ship Motion by CWC Test

Test Ship	AHRS	Sensor Type	Unit	AHRS sensor gauge				
Speed	Sensor Name			Max	Significant S 1/3	Av.Amp.	Av.Period	
	AHRS 1	Roll	Degree	1.3	0.7	1.5	1.1	
		Pitch	Degree	0.8	0.5	1.1	0.8	
	AHNS I	Yaw	Degree	_	16.5	-	_	
5 kts		V. Acc.	g	0.06	0.04	0.11	0.03	
(1st Test)		Roll	Degree	1.4	0.7	1.6	1.2	
	AHRS 2	Pitch	Degree	0.8	0.5	1.2	0.8	
		Yaw	Degree		17.3	_	-	
		V. Acc.	9 194	0.06	0.04	0.12	-	
	AHRS 1	Roll	Degree	1.9	1.2	2.1	1.3	
		Pitch	Degree	0.9	0.6	1.1	0.9	
		Yaw	Degree	_	21.8	_	-	
7 kts (2nd Test)		V. Acc.	g	0.12	0.09	0.16	0.05	
	AHRS 2	Roll	Degree	2.0	1.3	2.2	1.4	
		Pitch	Degree	0.9	0.6	1.2	0.9	
		Yaw	Degree	_	22.9	-	-	
		V. Acc.	g	0.13	0.09	0.17	_	



#### ① 횡요 계측 결과

회류수조실험에서 모형선의 횡요는 AHRS Roll Sensor로 계측하였으며, AHRS 1, 2의 센서가 계측한 1차 실험 횡요각의 유의치는 0.7°, 횡요주기는 1.1 ~ 1.2 초로 서로 비슷한 값이었고, 2차 실험 또한 횡요각의 유의치가 1.2°,~ 1.3°, 횡요주기는 1.3 ~ 1.4초로 두 센서가 유의수준 5% 내에서 비슷한 값으로 계측되었다.

#### ② 종요 계측 결과

실험 모형선의 종요는 AHRS Pitch Sensor로 계측하였으며, AHRS 1, 2의 센서가 계측한 1차 실험 종요각의 유의치는 0.5°, 종요주기는 0.8초로 서로 동일한 값이었고, 2차 실험 또한 횡요각의 유의치가 0.6°, 횡요주기는 0.9초로 두 센서의 계측 값이 일치하였다.

## ③ 상하가속도 계측 결과

실험 모형선의 상하가속도는 AHRS acceleration sensor로 계측하였으며, AHRS 1, 2의 센서가 계측한 1차 실험 상하가속도의 유의치는 0.04g, 상하가속도 평균 진폭은 각각 0.11, 0.12로 서로 비슷한 값이었고, 2차 실험 또한 상하가속도의 유의치가 0.09g, 상하가속도 평균 진폭은 각각 0.16, 0.17로 두 센서가유의수준 5% 내에서 비슷한 값으로 계측되었다.

#### ④ 선수요 계측 결과

실험 모형선의 선수요는 AHRS magnetic sensor로 계측하였으며, AHRS 1, 2의 센서가 계측한 1차 실험의 선수요각의 유의치는 16.5°, 17.3°로 서로 비슷한 값이었고, 2차 실험 또한 선수요각의 유의치가 21.8°, 22.9°로 두 센서가비슷한 값으로 계측을 되었다.

회류수조에서의 실험에서 모형선의 선수 방향은 약 10초 내외 주기로 8자 형태로 좌우측 방향으로 회전운동을 하였는데, 이때 AHRS 지자기 센서가 측정하



는 선수 방향의 값이 모형선의 빠른 움직임에 대응하여 추종되지 못하였다. 이런 선수요의 차이가 큰 원인은 AHRS 지자기 센서가 지구의 자기장을 측정하여 Magnetic Heading으로 방위각을 계산하는데, 지구의 자기장이 약하기 때문에 이를 측정하여 방위로 환산할 경우 높은 오차를 가지므로 급격히 방향이 바뀔때에는 방위 측정이 늦고 오차 또한 크다. 이 문제를 해결하기 위해서는 지자기 외란에 대한 보상 또는 주기적으로 자이로를 통한 교정이 필요하다.[145]

선박에서의 환경은 육상에서와는 다르게 선체가 철재로 구성되어있어 지자기 센서의 지구자기장 감지에 대한 측정오차가 크게 되므로, AHRS 지자기 센서로 측정된 선수방위(Heading) 계측 값이 실측치인 자이로 컴파스에 의한 값보다 변동 폭이 크게 나타날 것으로 추정된다. 그러므로 AHRS 지자기 센서를 이용한 선수방위 값에 대한 선수동요 계산의 정확도를 향상시키기 위해서는 향후이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단되며, 현재까지 개발된 기술에서는 정확도 및 신뢰도가 낮으므로 실선 실험에서 선수요 계측에 AHRS 지자기센서를 적용하지 않는 것으로 하였다.



Collection
 ■

# 제 5 장 AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템을 통한 항해안전성 평가

# 5.1 선체운동모니터링시스템의 실선실험

AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템을 사용하여 항해중인 실선의 항해안전성 평가를 수행하였다. 실선실험의 목적은 개발된 시스템의 선체운동 계측부의 정밀성 및 신뢰성을 확인과 실험대상 선박의 실제 해상에서의 선체운동 계측을 기준으로 한 항해안전성 평가를 하기 위함이다.

실선실험은 다양한 해상 및 기상 환경에서 총 4회에 걸쳐 시행하였다. 실험 선에 탑재된 AHRS 선체운동 계측 모듈을 사용하여 횡요, 종요와 같은 선체의 회전운동과 상하가속도를 계측하였다. 이 실선실험에서 측정데이터를 이용한 선체운동 계측 모듈에 대한 실선실험을 통한 검증과 수치화된 실험선의 항해안 전성 평가를 수행하였다.

실선실험은 먼저 AHRS 선체운동계측센서를 사용하여 실선의 선체운동을 측정하여, 선체운동 데이터 수집 및 실시간 모니터링을 하였다. 실험 항해구간별로 계측된 실험선의 선체 상하가속도를 30분 단위로 분산치를 구하여, 이것을입력값으로 한 SPI 산출에 의한 항해안전성평가를 수행하였다.



# 5.1.1 실험 대상 선박의 제원 및 계측 방법

## 5.1.1.1 실험 대상 선박의 제원

AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템의 실선 해상 실험 대상으로 한국해양대학교 실습선인 한바다호로 선정하여 실험을 실시하였다. 실험 선박은 여객선형의 선박으로서 선형 특성상 수면 상부의 구조물이 상대적으로 큰 면적을 차지하므로(중앙 흘수 5.9m 기준에서 측면 투영 면적의 6.3배) 일반적인 화물선에비해 풍압을 많이 받는 편이어서 풍향과 풍속의 외력 요인에 따라 선박의 횡요에 영향을 미친다.

Fig. 5-1은 실험 대상 선박인 한바다호의 시운전시의 해상 운항 모습이며, Fig. 5-2와 Table 5-1은 실험 대상 선박의 일반배치도(General Arrangement)와 주요 제원을 나타내었다. Fig. 5-3은 정면도(Body Plan), Fig. 5-4는 측면도 (Sheer Plan), Fig. 5-5는 반폭도(Half Breadth Plan)이다.



Fig. 5-1 Sea Trial of T.S. HANBADA



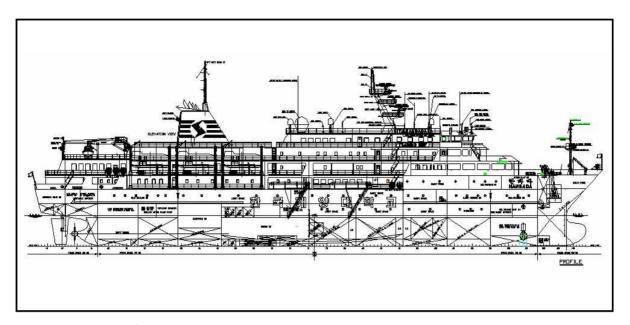


Fig. 5-2 General Arrangement of T.S. HANBADA

Table 5-1 General Particulars of Training Ship (T.S. HANBADA)

Items	Dimensions
LOA / LBP	117.2 m / 104.0 m
Breath	17.8 m
Mean Draft	5.9 m
Displacement	6,434 ton
Max. Speed	19.0 <i>kts</i>
Service Speed	17.5 <i>kts</i>
Main Engine MCR(100%)	8,130 BHP × 176 RPM
Main Engine NCR(85%)	6,910 BHP × 167 RPM
Transverse Projected Area	300 m²
Lateral Projected Area	1,480 m²



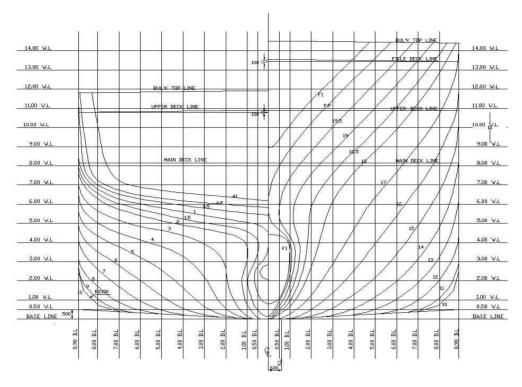


Fig. 5-3 Lines of Body Plan (T.S. HANBADA)

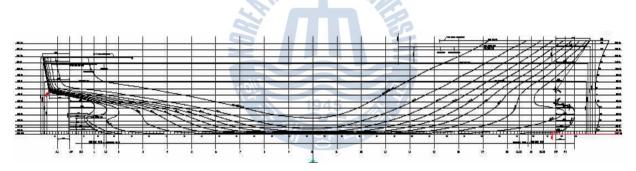


Fig. 5-4 Lines of Sheer Plan (T.S. HANBADA)

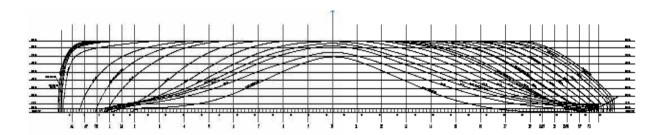


Fig. 5-5 Lines of Half Breadth Plan (T.S. HANBADA)



## 5.1.1.2 선체운동 계측 방법

# (1) 선체운동계측센서 및 모니터링 시스템 설치

파랑 중 실선의 항해시 선박의 횡요, 종요, 선수요는 동시에 변화하기 때문에 정확한 선체운동 계측을 위해서는 선체운동계측센서(AHRS sensor)를 선박의 무게 중심점에 설치하여 데이터를 획득하는 것이 좋다. 그러나, 현실적으로 선박의 구조상 무게 중심점에 선체운동계측센서를 설치하기가 어렵고 무게 중심 또한 선박 화물의 적양하 상황이나 본선 컨디션에 따라 변화하기 때문에 정확한위치에 설치하는 것은 불가능하다.

본 연구에 적용한 계측 장비는 크기가 작고 무선으로 데이터 처리가 가능하여, 선교 또는 기타 선내 특정 장소에 쉽게 설치 할 수 있다. 따라서, 정밀도 높은 선체운동 계측 데이터의 취득을 위해 실선실험에서는 실습선 한바다호의무게중심 근처 상부 부근에 위치한 지점인 Boat Deck에 위치한 학생상담실, 선내병원, 우측 복도 중앙부의 세 장소를 선정하여 실험하였다.

AHRS 센서기반 선체운동계측센서의 실험선박 내에서의 설치는 보다 정확한 선체운동 계측을 하기 위하여 선수방향은 선체의 중심선 상에, 좌우 방향은 선 체 중심선과 수직이 되도록 설치하였다. 그리고 선체의 움직임으로 인해 실험 장치의 동요가 생기지 않도록 고정을 하였다.

Fig. 5-6은 AHRS 기반의 선체운동계측센서 및 모니터링시스템의 전체적인 구성도이다. 그리고, Fig. 5-7은 무선 선체운동모니터링시스템 및 AHRS 센서를 설치한 선내 위치(Boat deck)를 표시하였고, Fig. 5-8은 선체운동모니터링시스템의 선체운동 데이터 수집 및 모니터링을 하기 위한 시스템을 설치한 모습이며, Fig. 5-9은 선내 AHRS 센서를 장착한 모습과 실선의 선체운동을 아날로그 타입으로 경사계로 계측한 영상을 DVR로 실시간 저장하는 모습이다.



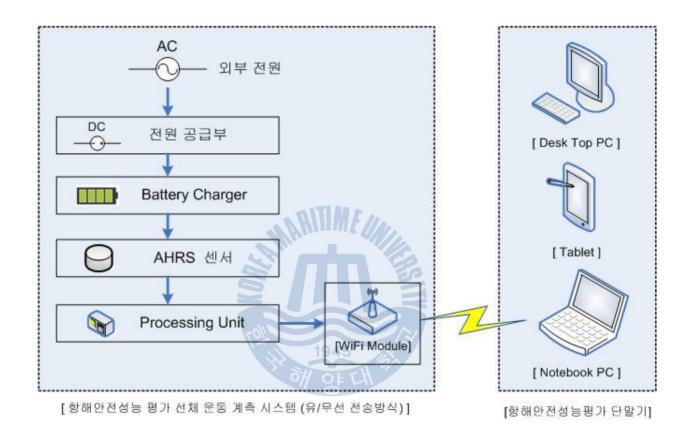


Fig. 5-6 Flow Chart of the Measurement and Analysis System



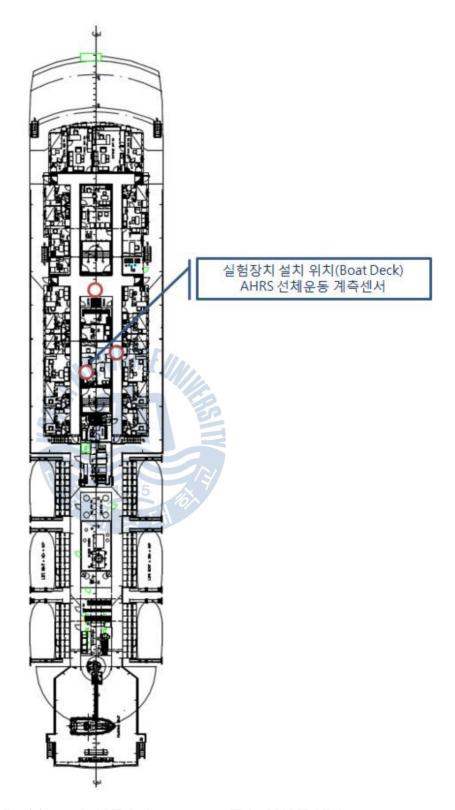


Fig. 5-7 Position of AHRS Sensors at T.S. HANBADA



Fig. 5-8 Installation of AHRS Test Equipment at T.S. HANBADA(a) Arrangement of AHRS, (b) Test Sensors of AHRS(c) Data Acquisition System No. 1, (d) Data Acquisition System No. 2



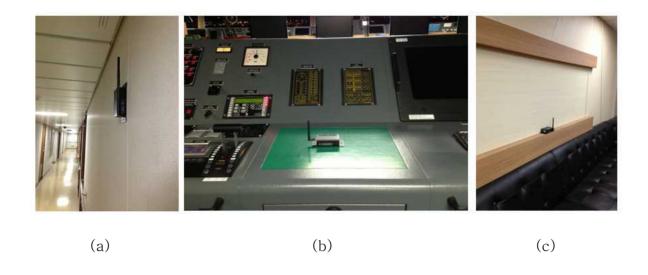




Fig. 5-9 Installation of AHRS Test Equipment at T.S. HANBADA (a) Boat Deck Passage, (b) Bridge, (c) Boat Deck Meeting Room (d) Arrangement of Inclinometer (e) Inclinometer & DVR



## (2) 실선의 AHRS 기반의 선체운동 계측 방법

실선에서의 운항 중 해상실험을 하기 위하여 먼저 출항 전 접안한 부두에서 AHRS 선체운동계측센서의 자세 결정과 선수각의 오차를 보정하기 위해서 고정 판에 각 센서를 고정하고, 횡요와 종요 값의 0점 보정 작업과 침로(Heading)를 선박의 Gyro Compass 값과 일치시켜 초기 설정을 하였다.

전용 데이터 수집 S/W를 사용하여 출항 후 30분 간격으로 횡동요각(Rolling angle), 종동요각(Pitching angle), 선수동요각(Yawing angle) 데이터를 취득하여 기록 및 저장하였다.

AHRS 센서 계측 값의 검증을 위한 실선에서의 실제 측정은 선체 중앙부 부근에 위치한 지점에서 JIN HANG Marine Equipment사와 LILLEY & GILLIE사에서 제작된 눈금간격이 1°인 아날로그형 선박용 경사계(Clinometer for ship)를 설치하여 횡요와 종요를 실측하였다.

선박용 경사계를 사용한 횡경사각과 종경사각의 측정은 경사계의 지침을 CCTV로 촬영하여 기록하였다. 촬영 영상은 시간 정보를 포함하고 있는 DVR(Digital Video Recorder) 시스템에 기록하여 실험 후 데이터 분석시에 시간 대별 검색이 가능하도록 하였다.

실험선의 운항데이터는 ECDIS에서 NMEA-0183 표준 포맷으로 기록된 GYRO Compass(TokyoKeiki TG-8000 Model)의 선수방위(Heading 값, 진방향), GPS의 위치, COG, SOG 정보, 풍향풍속계의 상대 풍향풍속 값, 선속계의 대수속력 값 등을 디지털 데이터로 전송받아 기록하였다.



## 5.1.1.3 계측된 선체운동 데이터의 처리

## (1) 선체운동 계측 데이터 취득 처리

선체운동모니터링시스템에서 디지털 데이터의 취득은 AHRS 선체운동계측센서에서 수집되는 데이터와 선교에 설치된 주요 항해보조장비(Navigational Aids)로부터의 선박 운항 자료 데이터를 수집하여 데이터베이스화하였다.

AHRS 선체운동계측센서에서 수집되는 데이터는 횡요 자세각, 종요 자세각, 선수요 자세각, 가속도 X축, Y축, Z축 출력값, 축가속도 X축, Y축, Z축 출력값, 지자기 X축, Y축, Z축 출력값, 자이로 X축, Y축, Z축 출력값을 ASCII 문자 출력방식인 Text로 취득하였다. 계측된 값은 다음과 같은 디지털 데이터 형식인 Sentence로 출력 값을 받을 수 있다. 여기서, 자세각은 0.1도(deg.) 단위의 오일러(Euler) 각도(Roll, Pitch, Yaw)로 출력되고, 자세 출력값 범위는 0 ~ 1799 로서 각각 0.0° 부터 179.9° 까지 표현된다. Table 5-2는 AHRS 선체운동계측센서의 ASCII 출력모드에 대한 설명을 나타내었다.

\$RQ,10,-741,1143, 534, 321, -16383, 0, 0, 0, 23, 32, 468, 0, 0, 0\*

항해안전성평가시스템에서 선체의 상하가속도 계측은 중요한 평가 기초 데이터 다. 특히 이 시스템에서는 선박의 내항성능 평가요소 중에서 한 개의 평가요소만을 계측한 상하가속도의 분산치를 사용하여 선박의 종합적인 항해안전성을 평가하는 SPI를 계산하기 때문에 상하가속도에 대한 적절한 계측시간 및 계측간격 등의 설정이 요구된다. 그러므로 선박의 상하가속도 계측을 포함한 선체운동계측센서의 계측 간격을 10Hz로 설정하여 데이터를 취득하였다.

선박 운항 자료 데이터는 GPS로부터 시간정보(Date & Time), 위치 정보(PSN : Position), 대지침로(COG : Cousrse of Ground), 대지속력(SOG : Speed of Ground)의 데이터를 받고, Gyro Compass에서 침로(HDG : Heading), 선속계



(Speed Logger)에서 대수속력(STW : Speed thru Water), 풍향풍속계 (Anemometer)에서는 진풍향(True Wind Direction)과 진풍속(True Wind Speed) 데이터를 NMEA-0183 형식의 디지털 데이터로 취득하였다.

\$GPRMC,183729,A,3907.356,N,12102.482,W,000.0,360.0,080301,015.5,E\*6F

\$GPRMB,A.....V\*71

\$GPGGA,183730,3907.356,N,12102.482,W,1,05,1.6,646.4,M,-24.1,M,,\*75

\$GPGSA,A,3,02,,,07,,09,24,26,,,,1.6,1.6,1.0\*3D

\$GPGSV,2,1,08,02,43,088,38,04,42,145,00,05,11,291,00,07,60,043,35\*71

\$GPGSV,2,2,08,08,02,145,00,09,46,303,47,24,16,178,32,26,18,231,43\*77

\$PGRME.22.0.M.52.9.M.51.0.M\*14

\$GPGLL,3907.360,N,12102.481,W,183730,A\*33

\$PGRMZ,2062,f,3\*2D

\$PGRMM,WGS 84\*06

\$GPBOD.,T.,M.,\*47

\$GPRTE.1.1.c.0\*07

\$GPRMC,183731,A,3907.482,N,12102.436,W,000.0,360.0,080301,015.5,E\*67

\$GPRMB,A,,,,,,,V\*71

\$HCHDG.101.1...7.1.W\*3C

\$GPZDA,201530.00,04,07,2002,00,00\*60

AHRS 선체운동계측센서와 선박 운항 자료의 수집 데이터는 실시간으로 받아서 데이터베이스화 처리를 하였으며, 30분 단위의 간격으로 저장하였다. 저장파일명은 파일의 구분이 쉽도록 계측 시작 당시의 년, 월, 일, 시간, 분을 사용하여 표기하였다. 참조 자료로서 선체운동 계측 및 선박 운항 자료의 취득된데이터 목록은 【부록-1】에 수록하였다.



Table 5-2 ASCII Output Data of AHRS Sensor

필드	출력 예시	설 명	출력값 범위	비 고					
0	\$	시작 기호	-	-					
1	RQ	메시지 헤더	-	-					
2	30	Roll 자세	-1799~+1800	Roll 각도 +0.3°					
3	-32	Pitch 자세	0~900	Pitch 각도 -3.2°					
4	-1387	Yaw 자세	-1799~+1800	Yaw 각도 -138.7°					
5	534	가속도 X 출력							
6	321	가속도 Y 출력	-20000 ~ +20000	± 2G (1만 배율)					
7	-16383	가속도 Z 출력	Mar.						
8	0	축가속도 X 출력	ME (Alle)						
9	0	축가속도 Y 출력	-10000 ~ +10000	± 1G (1만 배율)					
10	0	축가속도 Z 출력							
11	23	지자기 X 출력	45						
12	32	지자기 Y 출력	E EH _						
13	468	지자기 Z 출력							
14	0	자이로 X 출력							
15	0	자이로 Y 출력	_	단위 : DPS 설정에 따라 다름					
16	0	자이로 Z 출력							
17	*	종료 기호	-	-					
18	\r\n	개행 문자	-	-					
	출력 모드(오일러각) 예시 \$RO 30 -32 1387 534 321 -16383 0 0 0 23 32 468 0 0 0*								

\$RQ,30,-32,,1387, 534, 321, -16383, 0, 0, 0, 23, 32, 468, 0, 0, 0\*



## (2) 선체운동 계측을 통한 선박 항해안전성 평가 처리

3장에서 정의한 SPI는 내항성능 평가요소 중 한 개의 요소만을 계측하여 선 박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서, 내항성능 평가요소 중 선박 운항자들이 감각적인 면에서 정량화된 평가요소로 채택하기 쉬운 선박 의 상하가속도를 AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템을 통해 계측 및 해석하 여 그 중 발생 확률이 큰 한 개의 요소만을 채택하여 항해안전성 평가를 한다.

실선의 선체운동 계측에 의한 선박 항해안전성 평가 시스템의 구성은 Fig. 5-10과 같다.

이 시스템에서 입력 데이터로서 선형 요소, 파랑 조건, 운항 조건 및 실시간계측된 선체운동의 상하가속도 값이 필요하다. 각 요소에 대한 세부 내용은 다음과 같다.

# 1) 선형 요소

선체의 AP부터 FP까지 등분한 각 Station의 반폭, 흘수, 단면적, 중심높이, 횡요주기, 관동반경 등 선박의 기본 선형요소

## 2) 파랑 조건

파고( $L_{pp}$ 의  $\frac{1}{50}$ ), 유의파고 ( $H_{1/3}$ ), 평균파주기 ( $T_0$ )

해상 상태는 WMO의 CODE 1100을 이용하였으며, 유의파고 및 평균 파주기는 Table 5-3에 나타낸다.



# 3) 운항 조건

파장과 선체 길이의 비  $(\lambda/L_{pp})$ , 선속, 파와의 만남각  $(\chi)$ 

위와 같은 입력 데이터에 의해 실제 해상에서의 선속 저하량 및 각 내항성능평가 요소의 확률과정 특성이 계산되고, 최종적으로 SPI에 의한 선박의 항행안전성 평가를 하게 된다.

Table 5-3 Beaufort Scale Number and Wave Characteristics (WMO CODE 1100)

Beaufort No.	Wind Speed (kts)	Description	Mean Wave Period $T_0$ (sec)	Significant Wave Height H1/3 (m)	
		S. Allina			
1	1 ~ 4	Light air	1.2	0.1	
2	4 ~ 7	Light breeze	1.7	0.2	
3	7 ~ 11	Gentle breeze	3.0	0.6	
4	11 ~ 17	Moderate breeze	3.9	1.0	
5	17 ~ 22	Fresh breeze	5.5	2.0	
6	22 ~ 28	Strong breeze	6.7	3.0	
7	28 ~ 34	Near gale	7.7	4.0	
8	34 ~ 41	Gale	9.1	5.5	
9	41 ~ 48	Strong gale	10.2	7.0	



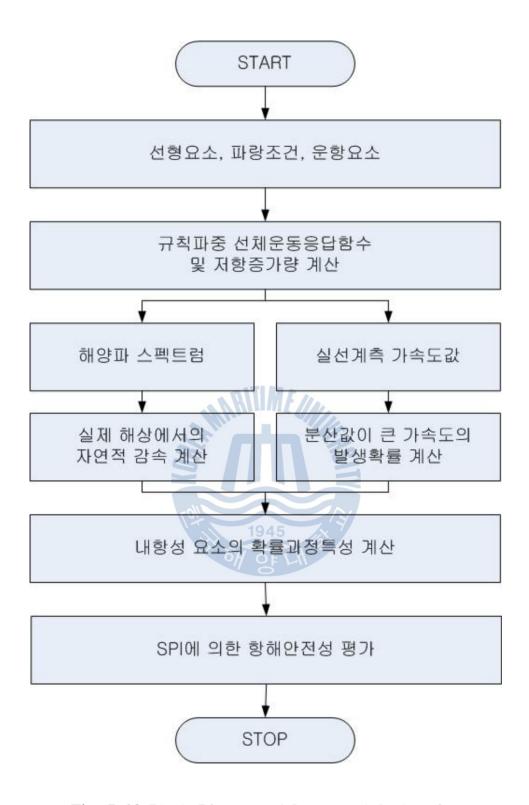


Fig. 5-10 Block Diagram of Integrated Seakeeping
Performance Evaluation System

항해안전성 평가를 위한 수치 계산의 첫 번째 방법은 본선의 운항실적을 토대로 하여 실제 항행 중 관측되어 기록되었던 정보를 이용하여 계산하고, 두번째 방법으로 실선의 선체운동 계측을 통해 얻은 상하가속도 값을 이용하여수치 계산을 하였다.

항해안전성 평가의 수치 계산은 2013년 1차 및 2차 실선실험과 2014년 3차 및 4차 실선실험에 의한 대상 선박의 운항 결과 및 실선 선체운동 계측 값을 모델로 하였다. 실선의 선체운동 계측 모니터링 시스템에서 수집된 데이터를 사용한 선박안전성 평가를 위한 통계 처리는 AHRS의 가속도 계측 센서의 디지털 데이터로 저장된 상하가속도 계측치의 평균 및 분산치이며, 30분 단위로 저장된 상하가속도 계측 데이터를 기준으로 평균과 분산치를 계산하여 SPI에 반영하였다. 실선실험에서 실험선의 적재 상태는 부산항을 출항하는 시기에는 Full loaded condition이였으며, 목적항에서 부산으로 귀항시에는 Half loaded condition이어서항해안전성 평가는 두 가지 선박 컨디션 상태를 기준으로 적용하였다.

Fig. 5-11은 선체운동모니터링시스템의 선체운동모니터링 및 항해안전성 평가 S/W를 보여 주며, 캡쳐 화면은 2014년 3월 19일 17시경에 계측된 데이터이다.

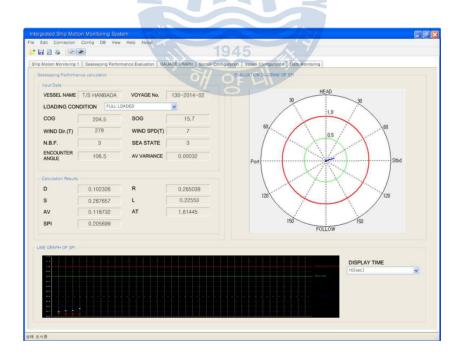


Fig. 5-11 Navigational Safety Evaluation S/W of Intergrated Ship Motion Monitoring System



# 5.1.2 실선실험을 통한 선체운동 계측

# 5.1.2.1 실선실험 개요

실선실험은 한국해양대학교 실습선 한바다호의 2013년도 제 1차 연안 항해 (제주항 기항) 기간 중인 3월 18일에서 3월 22일 사이에 부산 ~ 제주 항해 구간에서 1차 실험, 제주 ~ 부산 항해 구간에서 2차 실험을 선상에서 실시하였다. 동 선박의 2014년도 제 1차 연안 항해(목포항 기항) 기간인 3월 19일에서 3월 20일 동안의 목포 ~ 부산 항해 구간에서 3차 실험을 하였으며, 제 2차 연안 항해(진해항 기항) 기간 중의 4월 3일에 진해만 ~ 부산 항해 구간에서 4차 실험을 수행하였다. Table 5-4에 AHRS 기반의 선체운동 계측 및 항해안전성평가를 위한 한바다호의 실선실험에 대한 주요 사항을 표시하였다.

Table 5-4 Schedule of Actual Ship Test

항 목	1차 실선실험	2차 실선실험	3차 실선실험	4차 실선실험	
날 짜			2014.3.19. ~ 20	2014. 4. 3	
항해구간	부산 ~ 제주	제주 ~ 부산	목포 ~ 부산	진해 ~ 부산	
날 씨	흐림	맑음	호립	흐림	
바 람	SW ~ W, 20 ~ 28 <i>kts</i>	SW ~ S, 5 ~ 10 kts	E ~ N, 10 ~ 22 kts	S ~ SW, 5 ~ 10 <i>kts</i>	
파 고	고 3 ~ 4 m 0 ~ 1 m		2 ~ 3 <i>m</i>	0 ~ 1 <i>m</i>	
외 력	력 순조 순조/역조		순조	순조	
항해거리	175 <i>nm</i>	195 <i>nm</i>	224 <i>nm</i>	40 <i>nm</i>	
항해시간	해시간 16 <i>Hrs</i> 17 <i>Hrs</i>		22 <i>Hrs</i>	7 Hrs	



## 5.1.2.2 제 1차 실선실험

제 1차 실선실험은 2013년 3월 18일 ~ 19일, 2일에 걸쳐 한바다호의 부산에서 제주 운항구간을 대상으로 하였다. 이 기간 동안에 선박 운항은 16시간, 175 해상마일을 항진하였으며, 선체운동 계측 실험 개시 후 종료시까지는 총 14.5시간이 소요되었다.

실험 대상 선박은 남서 방향으로 항해하였으며, 실험 당시의 해상 조건은 풍향풍속계 관측에 의한 최대 풍속이 30노트 이상, 풍향은 남서 ~ 서풍 계열이었고, 목측으로 측정한 파고가 최대 3 ~ 4m 정도였다. 기상 및 해상 상태는 흐린날씨에 풍랑이 이는 상황이었고, 대지속력과 대수속력을 비교하여 측정한 조류및 해류에 의한 외력(current)은 선박의 진행방향에 대하여 순방향(순조)으로 작용하였다.

Table 5-5와 Fig. 5-12는 제 1차 실선실험의 선박운항 스케쥴과 항해 항적도를 나타내었다. 【부록 1-1】에 1차 실선실험 구간의 자세한 항해 기록을 수록하였다.

Table 5-5 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (1st Test)

항구명	입 항 일 시 출 항 일 시	거리 (N.mile)	항해일수	
부 산				
, ,	2013. 03. 18 16:00	175	04 165	
제 주	2013. 03. 19 08:00	175	0d-16h	



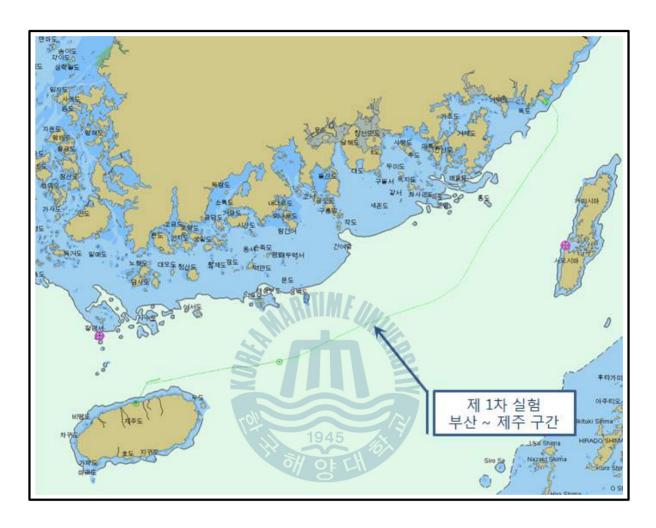


Fig. 5-12 Track of Actual Ship Test (1st)



## 5.1.2.3 제 2차 실선실험

제 2차 실선실험은 2013년 3월 21일 ~ 22일, 2일에 걸쳐 한바다호의 제주에서 부산 운항구간을 대상으로 하였다. 이 기간 동안에 선박 운항은 17시간, 195해상마일을 항진하였으며, 선체운동 계측 실험 개시 후 종료시까지는 총 16.5시간이 소요되었다.

실험 당시의 해상 조건은 풍향풍속계 관측에 의한 최대 풍속이 20노트 이상, 풍향은 남서 ~ 서풍 계열이었으며, 목측으로 측정한 파고는 1 ~ 2m 이하로 작 용하였다. 기상은 맑은 날씨에 해상 상태가 비교적 평온한 편이었으며, 조류 및 해류에 의한 외력은 출항 후 선박의 진행방향에 대하여 순방향(순조)으로 작용 하였고, 부산 인근해역에서는 역방향(역조)으로 작용하였다.

Table 5-6과 Fig. 5-13은 제 2차 실선실험의 선박운항 스케쥴과 항해 항적도를 나타내었다. 【부록 1-2】에 2차 실선실험 구간의 자세한 항해 기록을 수록하였다.

Table 5-6 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (2nd Test)

항구명	입 항 일 시	거 리 (N.mile)	항해일수	
	출 항 일 시	(14.111110)		
제 주				
	2013. 03. 21 16:00	195	0d-17h	
부 산	2013. 03. 22 09:00	190	0u-1711	



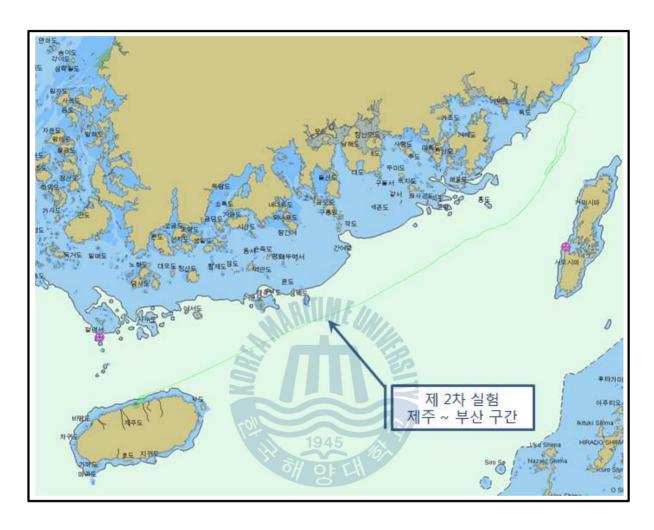


Fig. 5-13 Track of Actual Ship Test (2nd)



## 5.1.2.4 제 3차 실선실험

제 3차 실선실험은 2014년 3월 19일 ~ 20일, 2일에 걸쳐 한바다호의 목포에서 부산 운항구간을 대상으로 하였다. 이 기간 동안에 선박 운항은 22시간, 224 해상마일을 항진하였으며, 선체운동 계측 실험 개시 후 종료시까지는 총 20시간이 소요되었다.

실험 당시의 해상 조건은 풍향풍속계 관측에 의한 최대 풍속이 22노트 이상, 풍향은 동 ~ 북풍 계열이었으며, 목측으로 측정한 파고는 3 ~ 4m 이하로 작용 하였다. 기상 및 해상 상태는 흐린 날씨에 풍랑이 이는 상황이었고, 조류 및 해 류에 의한 외력은 선박의 진행방향에 대하여 순방향(순조)으로 작용하였다.

Table 5-7과 Fig. 5-14는 제 3차 실선실험의 선박운항 스케쥴과 항해 항적도를 나타내었다. 【부록 1-3】에 3차 실선실험 구간의 자세한 항해 기록을 수록하였다.

Table 5-7 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (3rd Test)

항구명	입 항 일 시 출 항 일 시	거리 (N.mile)	항해일수
목 포	2014. 03. 19 14:00		
부 산	2014. 03. 20 11:00	224	0d-22h
구 산			



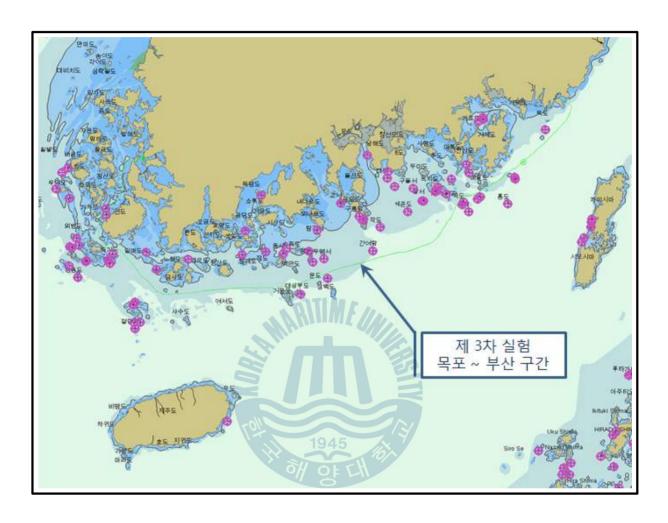


Fig. 5-14 Track of Actual Ship Test (3rd)



## 5.1.2.5 제 4차 실선실험

제 4차 실선실험은 2014년 4월 3일, 1일에 걸쳐 한바다호의 진해만에서 부산 구간을 대상으로 하였다. 이 기간 동안에 선박 운항은 7시간, 40 해상마일을 항 진하였으며, 선체운동 계측 실험 개시 후 종료시까지는 총 4시간이 소요되었다.

실험 당시의 해상 조건은 풍향풍속계 관측에 의한 최대 풍속이 14노트 이상, 풍향은 남 ~ 남서 계열이었으며, 목측으로 측정한 파고는 0 ~ 1m 이하로 작용 하였다. 기상은 맑은 날씨에 해상 상태가 평온한 상황이었고, 조류 및 해류에 의한 외력은 선박의 진행방향에 대하여 순방향(순조)으로 작용하였다.

Table 5-8과 Fig. 5-15는 제 4차 실선실험의 선박운항 스케쥴과 항해 항적도를 나타내었다. 【부록 1-4】에 4차 실선실험 구간의 자세한 항해 기록을 수록하였다.

Table 5-8 Coastal Navigation Schedule of T/S 'HANBADA' (4th Test)

항구명	입 항 일 시 출 항 일 시	거리 (N.mile)	항해일수
부 산			
, .	2014. 04. 03 10:00	40	0d-7h
제 주	2014. 04. 03 17:00	40	ou-711



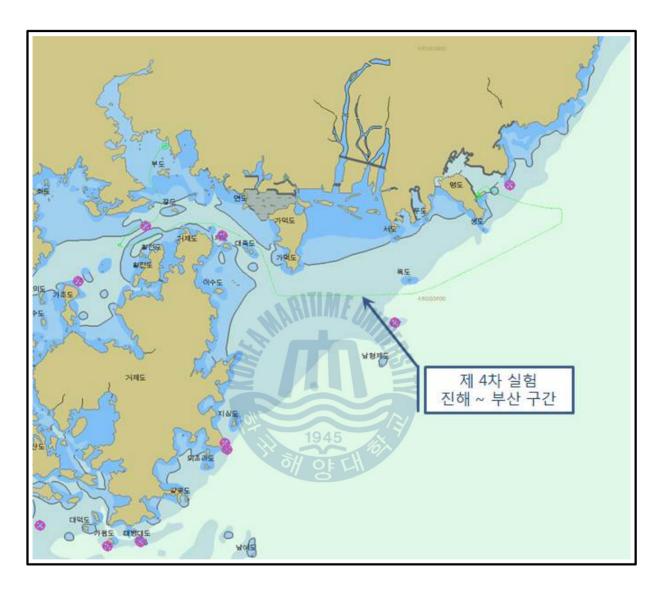


Fig. 5-15 Track of Actual Ship Test (4th)



# 5.2 선체운동 계측 데이터 분석 및 결과

해상에는 날씨 및 해상 변화에 따라 차이는 있으나 항상 파도가 존재한다. 항해안전성은 이러한 파도 위를 항해하는 선박의 내항성능을 나타내는 것으로 일반적으로 파도에 의해 선박의 동요가 발생되고, 그 동요로 인해 선원 및 승객의 승선감과 작업 능력을 저하시키고 선속을 떨어뜨리며 심한 경우에는 선박의 구조적 손상을 발생시켜 침몰에 이르기까지도 한다.

해양파에 기인한 선박의 동요 중 항해안전성 평가의 척도가 되는 횡동요 (Rolling)와 종동요(Pitching)의 신뢰성 있는 정량적인 계측을 위해 휴대성과 가격대비 성능이 뛰어난 AHRS 센서 기반의 선체운동 계측 장치로 4차례에 걸친성능 실험을 수행하였다. 다음에 횡요와 종요와 같은 주요 선체운동을 디지털데이터로 출력이 가능한 계측 센서로 측정하여 수치화하였다. 이 선체운동과상하가속도 계측을 통한 선박의 항해안전성을 정량화한 SPI의 적용으로 실선의항해안전성 평가에 대한 실험 결과를 기술하였다.

1945

# 5.2.1 횡요 선체운동 계측 데이터 분석

#### 5.2.1.1 실험 대상 선박의 횡요주기 및 풍압력에 의한 최대 횡경사 계산

#### (1) 한바다호의 횡요주기 계산

실험 대상 선박인 한바다호의 적화상태(Loading condition)에 따른 횡요주기 (Rolling period ;  $T_R$ )를 식 (5-1)에서 구할 수 있다.[146,147]



$$T_R = \frac{0.802B}{\sqrt{GoM}} \tag{5-1}$$

여기서, 선폭(B) = 17.8m

- 1) GoM (Full loaded) = 1.931m
- 2) GoM (1/3 consumed) = 1.498m
- 3) GoM (90% consumed) = 1.131m

1), 2), 3) 조건을 대입하여 만재(Full loaded)시의 횡요주기(T<sub>R</sub>)는 10.2초, 선박 적재 1/3 소비((1/3 consumed))시의 횡요주기 11.6초, 선박 적재 90% 소비(90% consumed)시의 횡요주기 13.4초를 얻을 수 있다.

실선실험에서 횡요주기의 수치 계산은 실선실험 1은 한국해양대학교 부두에서 Full Condition 상태로 출항하여 항해하는 상태이므로 만재 상태를 적용하였고, 실선실험 2 ~ 4는 기항지에서 적재물의 추가 보급없이 모항인 부산으로 귀항하는 상태이므로 1/3 consumed 상태의 선박 컨디션을 적용하였다.

## (2) 한바다호의 풍압력에 의한 최대 횡경사 계산

실험 대상 선박인 한바다호가 전진 속력이 없는 정선 중에 특정 방향에서 풍압력을 받을 경우의 최대 횡 경사각은 풍압 경사모멘트와 선박의 복원모멘트와의 관계를 이용하여 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$GoM \sin\phi \Delta = \frac{1}{2} \rho_a C_y(\theta) A_L V_a^2 h \tag{5-2}$$

단, GoM: 유동수 영향을 고려한 GM,

 $\phi$ : 횡경사각,  $\Delta$ : 배수량,  $Cv(\theta)$ : 측면풍압계수

h : 수면 상부의 풍압 중심점과 수면 하부의 중심점과의 거리(m)



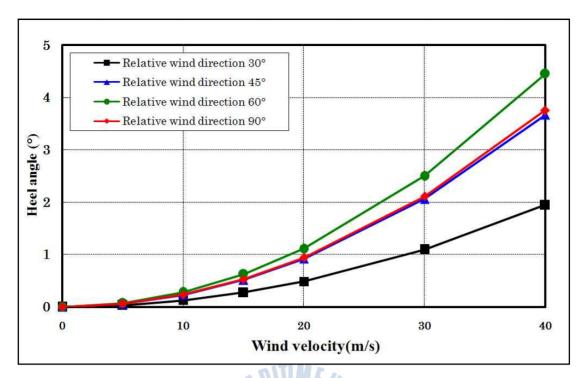


Fig. 5-16 Maximum Heel Angle with Wind Speed

Fig. 5-16은 한바다호의 흘수 d=5.9m에 대한 최대 횡경사각을 풍속과 풍향에 따라 제시한 것이다. 결과를 분석하여보면 정횡 방향에서 풍속이 10m/s, 20m/s, 30m/s로 작용할 경우 최대 횡경사는 각각 0.3°, 1.6°, 3.5°로 분석되었다.

실선실험에서는 한바다호의 계산된 횡요주기와 풍압력에 의한 최대 횡경사 각은 실선 계측에서 실제 횡요각 계측과 비교하기 위해 참조 요소로 적용하였 다. 실선실험이 행해지는 대부분의 해상 상태가 불규칙적인 해상파가 이는 상 황이므로 횡요각 및 횡요주기 등의 계산치와 계측치는 서로 차이가 있을 것으 로 예상하였다.



## 5.2.1.2 횡요 선체운동 계측 분석 및 결과

불규칙적인 해상 위에서 움직이는 실선의 선체운동 요소 중 횡요(Roll) 계측을 위한 실선실험의 주요 목적은 AHRS roll 센서와 아날로그 경사계를 이용하여 일정한 시간 및 간격으로 선박의 횡요를 주기적으로 계측하고, 다양한 해상환경과 선박 컨디션 상황에서 수집 데이터의 정확성 및 신뢰도를 확률적인 평가 기법을 통해 검증하기 위해 실시되었다.

본 실험 결과에서는 AHRS roll 센서가 계측하는 선박의 횡요운동과 아날로그 선박용 경사계의 횡요각 측정값을 30분 단위로 저장하여 데이터베이스화 하였고, 같은 해상상태 조건에서 일정한 계측 시간 간격으로 저장한 계측 데이터를 대상으로 횡동요의 최대값(Max)과 유의치(Significant), 평균 횡요 진폭(Av. Amp) 요소를 상호 비교하였다. 또한, 계측하여 기록된 파일을 항해 실험 구간인 한 항차 기간 동안 하루 단위로 분석하여 그 결과 값을 그래프로 표시하였다.

# (1) 샘플 구간의 횡요 선체운동 계측 분석

Fig. 5-17은 1차 실험 구간인 [부산 ~ 제주] 항해 구간 중에서 횡요가 심했던 2013년 3월 19일 04시 10분경(한국표준시, KST), 실험 선박 위치 33°41.5'N, 127°04.4'E의 지점(Fig. 5-18에 샘플 계측 지점 표시)에서 약 3분간(4시 10분 ~ 13분 구간) 동안 실험선의 횡요의 계측에 대한 샘플링을 AHRS roll 센서 감지와 아날로그 선박용 경사계를 사용한 실제 측정치 결과를 함께 도시하였다.

이 샘플 실험구간에서의 실험 선박인 한바다호의 횡요주기는 계산 값이 10.2 초(만재시 적용), 그 당시 기상 외력에 따른 풍압력에 의한 추가 경사도 1.6°~ 3.5°로 예측되었다. 아날로그 경사계에 의한 실측 횡요 평균값은 8.6초로 계측되었고, 선체가 낮은 주기로 움직이므로 각 AHRS 센서마다 Sampling rate를 10Hz로 하여 센서 계측 값을 취득하였다.



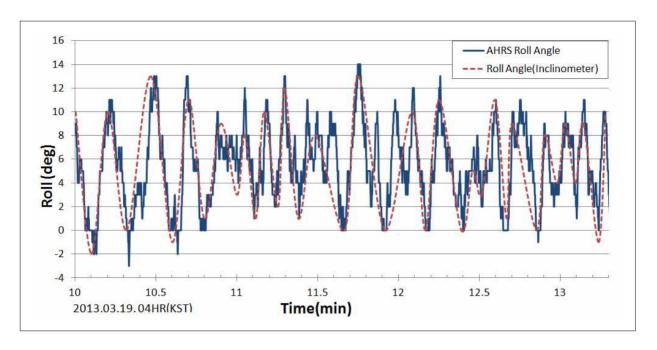


Fig. 5-17 AHRS Outputs and Actual Values of Roll Angle

샘플링 구간에서 AHRS 센서를 사용하여 선박의 횡요를 계측한 결과를 분석하면, 계측치의 최대/최소 횡요각 값은 (-)3°~ 14°로 계측되었고, 선박용 아날로그 경사계를 사용한 측정치의 최대/최소의 횡요각도는 (-)2°~ 13°가 측정되었다. Fig. 5-17에서 보듯이 AHRS roll 센서 계측치와 아날로그 선박용 경사계의 측정치가 서로 유사한 최대 및 최소 값을 가지며, 그래프에서 두 계측치의 패턴도 또한 비슷하게 그려진 것을 볼 수 있다. 그러므로 AHRS 센서로 계측된 횡요값은 실측치와 전반적으로 일치하며, 계측된 횡요운동 값의 디지털 데이터는 실측치와 비슷한 패턴임을 확인할 수 있으므로 신뢰성 있는 횡요 데이터로서 아날로그 횡요 계측기를 대체하여 사용할 수 있는 수준으로 판단된다.





Fig. 5-18 Measured Position of Sampling Data by AHRS Sensor



## (2) 실험 전체 구간의 횡요 선체운동 계측 분석

Fig. 5-19 ~ 22와 Table 5-9 ~ 12는 실선실험 1 ~ 4차의 각 구간별 횡요각 (Roll angle)을 실측하여 계측시간 30분 단위로 기록하였다. 이 기록 단위별 실험 대상 장비인 AHRS roll 센서의 계측값과 아날로그 경사계에서 측정된 횡요각의 최대치(Max), 유의치(Significant), 평균 횡요폭(Av. Amp)을 통계 처리하여 각 요소별로 비교하여 그래프로 나타내었다.

그래프에서 x축은 계측 시간(hr)을 30분 단위로 나타내고, y축은 횡요각을 1도 및 2도 단위로 표시하였다. 그래프의 심볼 표시로  $(-\circ-)$ 는 AHRS roll 센서로 계측된 횡요각의 최대치와  $(-\bullet-)$ 은 유의치를,  $(-\circ-)$ 은 평균 횡요폭을 나타내며,  $(-\triangle-)$ 은 아날로그 경사계로 측정된 횡요각의 최대치와  $(-\bullet-)$ 은 유의치를,  $(-\circ-)$ 은 평균 횡요폭을 나타낸다.  $(-\bullet-)$ 은 평균 횡요폭을 나타낸다.

# ① 제 1차 실선실험의 횡요 선체운동 분석

1945

Fig. 5-19와 Table 5-9는 제 1차 실선실험 [부산 ~ 제주] 항해 구간의 횡요운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 (B.F. Scale) 1 ~ 8 계급의 풍랑이 거센 다양한 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각(Encounter angle)은 선수정향파(Head seas)에서 선수사파(Bow seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.1 ~ 5.5미터 사이의 범위였다.

AHRS roll 센서와 선박용 경사계에서 계측된 횡요각은 3월 18일 22시 30분 데이터에 각각 22.7도, 21도로 최대치가 기록되었다. 유의치와 평균 진폭치는 AHRS roll 센서에서 측정된 횡요 값이 평균적으로 약 1.1배 가량 크게 계측되었다. 횡요주기는 두 계측 모두 6.8 ~ 14.7초 사이에서 진행되었으며, 선수정향파(Head seas)를 받을 때 최대 횡요주기가 관측되었다.



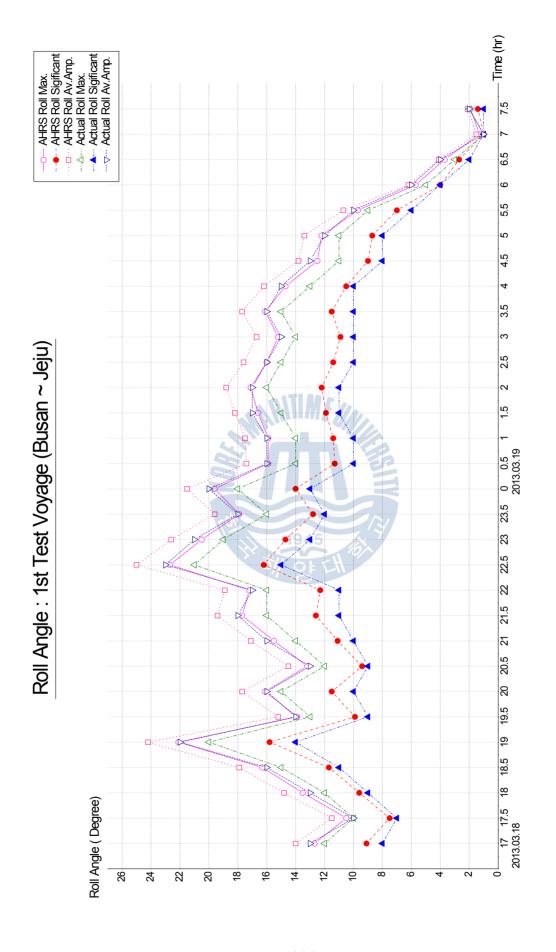


Fig. 5-19 Comparison of Rolling Angle by Measurement (1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)



Table 5-9 Measurement Data of Ship's Rolling Motion (1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)

D .	Time	B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	S Roll	Sensor (	Gauge	Analog Inclinometer Roll Gauge			
Date		Scale	Force (kts)	Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	17:00	5	19.1	2.0	Beam	12.7	9.1	14.0	8.2	12	8	13	7
	17:30	4	15.7	1.0	Bow	10.5	7.5	11.5	6.8	10	7	10	6
	18:00	5	20.2	2.0	Head	13.5	9.6	14.8	8.7	12	9	13	8
	18:30	6	24.5	3.0	Head	16.3	11.7	17.9	10.6	15	11	16	10
	19:00	7	33.1	4.0	Head	22.1	15.8	24.2	14.3	20	14	22	13
	19:30	5	20.8	2.0	Bow	13.9	9.9	15.2	9.0	13	9	14	8
2013.	20:00	6	24.2	3.0	Bow	16.1	11.5	17.7	10.4	15	10	16	9
3.18.	20:30	5	19.8	2.0	Bow	13.2	9.4	14.5	8.5	12	9	13	8
	21:00	6	23.3	3.0	Bow	15.5	11.1	17.1	10.0	14	10	16	9
	21:30	6	26.5	3.0	Bow	17.7	12.6	19.4	11.4	16	11	18	10
	22:00	6	25.8	3.0	Head	17.2	12.3	18.9	11.1	16	11	17	10
	22:30	8	34.1	5.5	Head	22.7	16.2	25.0	14.7	21	15	23	13
	23:00	7	30.8	4.0	Head	20.5	14.7	22.6	13.3	19	13	21	12
	23:30	6	26.8	3.0	Head	17.9	12.8	19.6	11.5	16	12	18	10
	0:00	7	29.4	4.0	Head	19.6	14.0	21.5	12.7	18	13	20	12
	0:30	6	23.8	3.0	Bow	15.9	11.3	17.4	10.3	14	10	16	9
	1:00	6	23.9	3.0	Bow	15.9	11.4	17.5	10.3	14	10	16	9
	1:30	6	24.9	3.0	Bow	16.6	11.9	18.2	10.7	15	11	17	10
	2:00	6	25.7	3.0	Bow	17.1	12.2	18.8	11.1	16	11	17	10
	2:30	6	24.0	3.0	Bow	16.0	11.4	17.6	10.3	15	10	16	9
	3:00	6	22.8	3.0	Bow	15.2	10.9	16.7	9.8	14	10	15	9
2013.	3:30	6	24.1	3.0	Head	16.1	11.5	17.7	10.4	15	10	16	9
3.19.	4:00	6	22.1	3.0	Bow	14.7	10.5	16.2	9.5	13	10	15	9
	4:30	5	18.8	2.0	Head	12.5	9.0	13.8	8.1	11	8	13	7
	5:00	5	18.3	2.0	Bow	12.2	8.7	13.4	7.9	11	8	12	7
	5:30	4	14.6	1.0	Bow	9.7	7.0	10.7	8.1	9	6	10	7
	6:00	3	8.5	0.6	Bow	5.7	4.0	6.2	8.4	5	4	6	8
	6:30	2	5.6	0.3	Bow	3.7	2.7	4.1	8.2	3	2	4	7
	7:00	1	2.0	0.1	Head	1.3	1.0	1.5	9.1	1	1	1	8
	7:30	1	2.9	0.1	Beam	1.9	1.4	2.1	9.3	2	1	2	8



# ② 제 2차 실선실험의 횡요 선체운동 분석

Fig. 5-20과 Table 5-10은 제 2차 실선실험 [제주 ~ 부산] 항해 구간의 횡요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 5로 비교적 평온한 일반적인 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각은 정횡파(Beam seas)에서 선미추파(Follow seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.3 ~ 2미터 사이의 범위였다.

AHRS roll 센서와 선박용 경사계에서 계측된 횡요각은 3월 22일 3시 30분 데이터에 각각 13.5도, 12도로 최대치가 기록되었다. 유의치와 평균 진폭치는 제1차 실선실험과 비슷하게 AHRS roll 센서에서 측정된 횡요 값이 평균적으로 약1.1배 가량 크게 계측되었다. 횡요주기는 두 계측 모두 8.8 ~ 15.1초 사이에서 진행되었으며, 선미추사파(Quartering seas)를 받을 때 최대 횡요주기가 관측되었다.



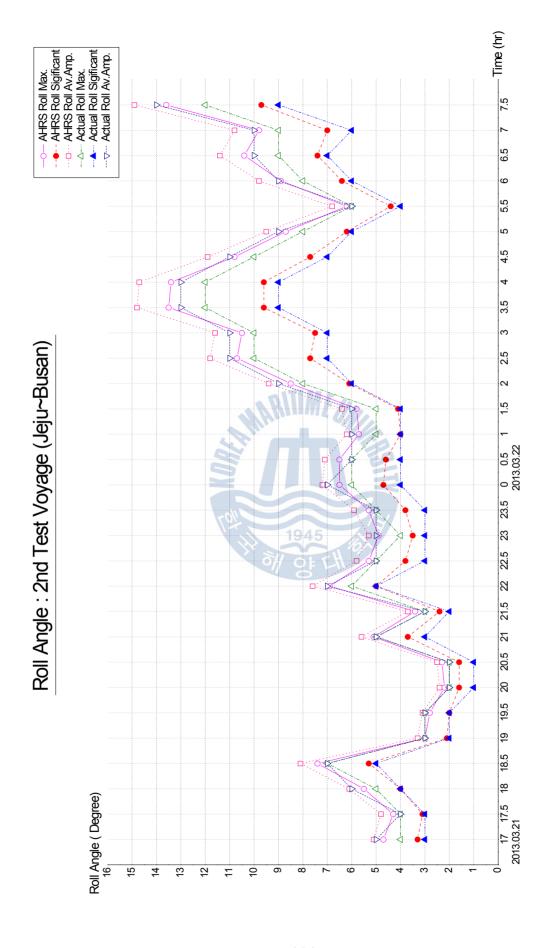


Fig. 5-20 Comparison of Rolling Angle by Measurement (2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)



Table 5-10 Measurement Data of Ship's Rolling Motion (2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)

	<b></b>	B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	S Roll	Sensor (	Gauge	Ar	_	nclinome Gauge	ter
Date	Time	Scale	Force (kts)	Wave Height H1/3(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	17:00	3	7.0	0.6	Follow	4.7	3.3	5.1	10.8	4	3	5	10
	17:30	2	6.5	0.3	quartering	4.3	3.1	4.8	10.0	4	3	4	9
	18:00	3	8.3	0.6	Follow	5.5	4.0	6.1	12.8	5	4	6	12
	18:30	4	11.1	1.0	quartering	7.4	5.3	8.1	8.9	7	5	7	16
	19:00	2	4.5	0.3	quartering	3.0	2.1	3.3	12.2	3	2	3	11
	19:30	2	4.2	0.0	Follow	2.8	2.0	3.1	11.4	3	2	3	10
2013.	20:00	1	3.3	0.1	Follow	2.2	1.6	2.4	8.9	2	1	2	8
3.21.	20:30	1	3.4	0.1	Follow	2.3	1.6	2.5	9.2	2	1	2	8
	21:00	3	7.7	0.6	Follow	5.1	3.7	5.6	11.8	5	3	5	11
	21:30	2	5.1	0.3	quartering	3.4	2.4	3.7	13.8	3	2	3	13
	22:00	3	10.4	0.6	quartering	6.9	5.0	7.6	16.0	6	5	7	15
	22:30	3	7.9	0.6	Follow	5.3	3.8	5.8	12.2	5	3	5	11
	23:00	3	7.3	0.6	quartering	4.9	3.5	5.3	11.2	4	3	5	10
	23:30	3	8.0	0.6	Follow	5.3	3.8	5.9	12.3	5	3	5	11
	0:00	3	9.8	0.6	quartering	6.5	4.7	7.2	15.1	6	4	7	14
	0:30	3	9.7	0.6	Follow	6.5	4.6	7.1	14.9	6	4	6	14
	1:00	3	8.5	0.6	Follow	5.70	4.0	6.2	13.1	5	4	6	12
	1:30	3	8.7	0.6	Follow	5.8	4.1	6.4	13.4	5	4	6	12
	2:00	4	12.8	1.0	quartering	8.5	6.1	9.4	10.3	8	6	9	9
	2:30	4	16.1	1.0	quartering	10.7	7.7	11.8	13.0	10	7	11	12
	3:00	4	15.8	1.0	quartering	10.5	7.5	11.6	12.7	10	7	11	12
2013.	3:30	5	20.2	2.0	Beam	13.5	9.6	14.8	8.7	12	9	13	8
3.22.	4:00	5	20.1	2.0	Beam	13.4	9.6	14.7	8.7	12	9	13	8
	4:30	4	16.2	1.0	Bow	10.8	7.7	11.9	13.1	10	7	11	12
	5:00	4	13.0	1.0	Bow	8.7	6.2	9.5	10.5	8	6	9	10
	5:30	3	9.3	0.6	quartering	6.2	4.4	6.8	14.3	6	4	6	13
	6:00	4	13.4	1.0	Follow	8.9	6.4	9.8	10.8	8	6	9	10
	6:30	4	15.6	1.0	quartering	10.4	7.4	11.4	12.6	9	7	10	11
	7:00	4	14.7	1.0	quartering	9.8	7.0	10.8	11.8	9	6	10	11
	7:30	5	20.4	2.0	Beam	13.6	9.7	14.9	8.8	12	9	14	8



# ③ 제 3차 실선실험의 횡요 선체운동 분석

Fig. 5-21과 Table 5-11은 제 3차 실선실험 [목포 ~ 부산] 항해 구간의 횡요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 6으로 약간 거친 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각은 선수정향파(Head seas)에서 정횡파(Beam seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.1 ~ 3미터 사이의 범위였다.

AHRS roll 센서와 선박용 경사계에서 계측된 횡요각은 3월 19일 20시 데이터에 각각 14.9도, 14도로 최대치가 기록되었다. 유의치와 평균 진폭치는 제 1차실선실험과 비슷하게 AHRS roll 센서에서 측정된 횡요 값이 거의 비슷하게 계측되었다. 횡요주기는 두 계측 모두 7.0 ~ 16.8초 사이에서 진행되었으며, 선수사파(Bow seas)를 받을 때 최대 횡요주기가 관측되었다.





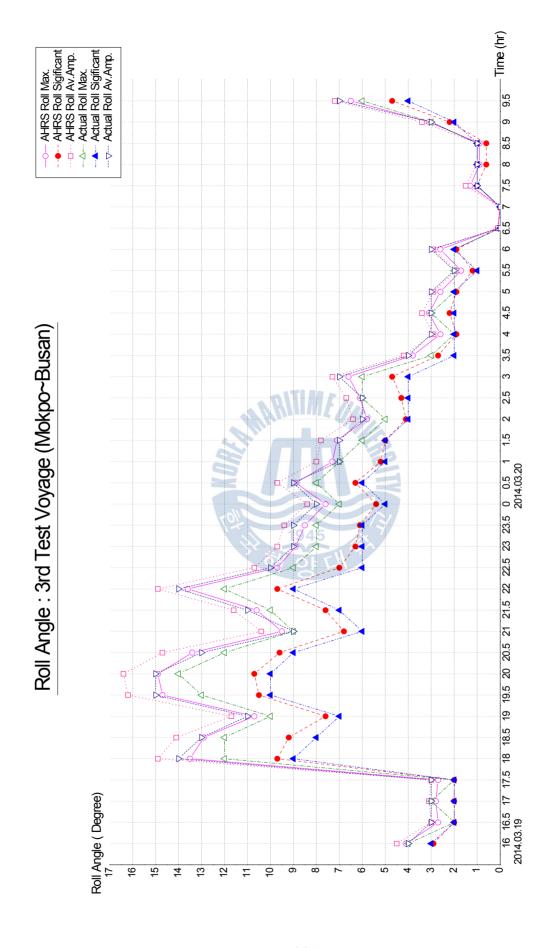


Fig. 5-21 Comparison of Rolling Angle by Measurement (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)



Table 5-11 Measurement Data of Ship's Rolling Motion (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)

		B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	Roll S	Sensor (	Gauge	Ar		iclinome Gauge	eter
Date	Time	Scale		Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	16:00	2	6.1	0.3	quartering	4.1	2.9	4.5	9.4	4	3	4	9
	16:30	2	4.1	0.3	quartering	2.7	2.0	3.0	11.1	2	2	3	10
	17:00	2	4.2	0.3	Beam	2.8	2.0	3.1	11.4	3	2	3	10
	17:30	2	4.1	0.3	quartering	2.7	2.0	3.0	11.1	2	2	3	10
	18:00	5	20.3	2.0	Head	13.5	9.7	14.9	8.7	12	9	14	8
	18:30	5	19.3	2.0	Bow	12.9	9.2	14.1	8.3	12	8	13	8
	19:00	4	16.0	1.0	Bow	10.7	7.6	11.7	12.9	10	7	11	12
2014.	19:30	6	22.1	3.0	Head	14.7	10.5	16.2	9.5	13	10	15	9
3.19.	20:00	6	22.4	3.0	Head	14.9	10.7	16.4	9.7	14	10	15	9
0.10.	20:30	5	20.1	2.0	Head	13.4	9.6	14.7	8.7	12	9	13	8
	21:00	4	14.2	1.0	Head	9.5	6.8	10.4	11.4	9	6	9	10
	21:30	4	15.9	1.0	Head	10.6	7.6	11.6	12.8	10	7	11	12
	22:00	5	20.4	2.0	Head	13.6	9.7	14.9	8.8	12	9	14	8
	22:30	4	14.6	1.0	Head	9.7	7.0	10.7	11.8	9	6	10	11
	23:00	4	13.3	1.0	Head	8.9	6.3	9.7	10.7	8	6	9	10
	23:30	4	12.8	1.0	Head	8.5	6.1	9.4	10.7	8	6	9	9
	0:00	4	11.4	1.0	Head	7.6	5.4	8.4	9.2	7	5	8	16
	0:30	4	13.3	1.0	Head	8.9	6.3	9.7	10.7	8	6	9	10
	1:00	3	10.9	0.6	Bow	7.3	5.2	8.0	16.8	7	5	7	15
	1:30	3	10.6	0.6	Bow	7.10	5.0	7.8	16.3	6	5	7	15
	2:00	3	8.7	0.6	Bow	5.8	4.1	6.4	13.4	5	4	6	12
	2:30	3	9.1	0.6	Bow	6.1	4.3	6.7	14.0	6	4	6	13
	3:00	3	9.9	0.6	Bow	6.6	4.7	7.3	15.2	6	4	7	14
	3:30	2	5.7	0.3	Head	3.8	2.7	4.2	8.8	3	2	4	14
	4:00	1	3.9	0.1	Head	2.6	1.9	2.9	10.6	2	2	3	10
2014.	4:30	2	4.6	0.3	Beam	3.1	2.2	3.4	12.5	3	2	3	11
3.20.	5:00	1	3.9	0.1	Beam	2.6	1.9	2.9	10.6	2	2	3	10
	5:30	1	2.6	0.1	Bow	1.7	1.2	1.9	7.0	2	1	2	6
	6:00	1	3.9	0.1	Head	2.6	1.9	2.9	10.6	2	2	3	10
	6:30	0	0.2	0.0	Follow	0.1	0.1	0.1	0.5	0	0	0	0
	7:00	0	0.1	0.0	Head	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0
	7:30	1	2.0	0.1	Follow	1.3	0.6	1.5	5.4	1	1	1	5 3
	8:00	1	1.3	0.1	Beam Head	0.9	0.6	1.0	3.5 3.5	1	1	1	3
	9:00	2	4.7	0.1	Bow	3.1	2.2	3.4	12.7	3	2	3	12
	9:30	3	9.8	0.6	Beam	6.5	4.7	7.2	15.1	6	4	7	14



#### ④ 제 4차 실선실험의 횡요 선체운동 분석

Fig. 5-22와 Table 5-12는 제 4차 실선실험 [진해 ~ 부산] 항해 구간의 횡요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 4로 비교적 평온한 일반적인 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각은 정횡파(Beam seas)에서 선미추사파(Quartering seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.1 ~ 1미터 사이의 범위였다

AHRS roll 센서와 선박용 경사계에서 계측된 횡요각은 4월 5일 14시 데이터에 각각 6.7도, 6도로 최대치가 기록되었다. 유의치와 평균 진폭치는 제 1차 실선실험과 비슷하게 AHRS roll 센서에서 측정된 횡요 값이 평균적으로 약 1.1배가량 크게 계측되었다. 횡요주기는 두 계측 모두 6.0 ~ 15.4초 사이에서 진행되었으며, 정횡파(Beam seas)를 받을 때 최대 횡요주기가 관측되었다.





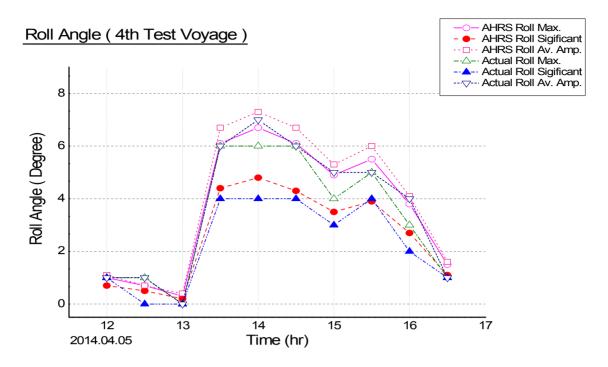


Fig. 5-22 Comparison of Rolling Angle by Measurement (4th Actual Ship Test, 2014.04.05)

Table 5-12 Measurement Data of Ship's Rolling Motion (4th Actual Ship Test, 2014.04.05.)

Diti	TD:	B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	A5 Foll S	Sensor	Gauge	Analog Inclinometer Roll Gauge			
Date	Time	Scal e	Force (kts)	Wave Height H1/3(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S ½ (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S ½ (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	12:00	1	1.5	0.1	Follow	1.0	0.7	1.1	4.1	1	1	1	4
	12:30	1	1.0	0.1	Follow	0.7	0.5	0.7	2.7	1	0	1	2
	13:00	0	0.5	0.0	quartering	0.3	0.2	0.4	1.4	0	0	0	1
	13:30	3	9.2	0.6	Bow	6.1	4.4	6.7	14.2	6	4	6	13
2014.	14:00	3	10.0	0.6	Beam	6.7	4.8	7.3	15.4	6	4	7	14
4.05.	14:30	3	9.1	0.6	Beam	6.1	4.3	6.7	14	6	4	6	13
	15:00	3	7.3	0.6	quartering	4.9	3.5	5.3	11.2	4	3	5	10
	15:30	4	8.2	1.0	quartering	5.5	3.9	6.0	12.6	5	4	5	11
	16:00	4	14.9	1.0	quartering	3.8	2.7	4.1	8.6	3	2	4	14
	16:30	4	13.5	1.0	Beam	1.5	1.1	1.6	6.0	1	1	1	5



#### (3) 횡요 선체운동 계측 실험 결과

Fig. 5-23은 제 1 ~ 4차 실험 전 구간에 계측한 AHRS roll 센서 계측치와 아날로그 경사계 실측치의 표준편차를 비교한 표이다. 표준편차 결과를 살펴보면 횡요의 경우 AHRS 센서에 의한 계측값과 실측값의 편차가 0.46 이내로 서로비슷한 패턴을 보이고 있으며, 1차 실험에서는 해상상태가 좋지 않아 횡요 의진폭이 2차 실험의 평온한 상태보다 편차가 크게 나타났다.

이상의 4번에 결친 횡요 운동 계측을 위한 실선실험의 결과를 종합하면, AHRS roll 센서와 선박용 경사계에서 계측한 3가지 요소의 최대치(Max), 유의치 (Significant), 평균 횡요폭(Av. Amp) 값은 Fig. 5-26의 그래프에서와 같이 전반적으로 비슷한 패턴을 보이고, 센서 계측치의 정량적인 측정값은 실측치와 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 유의수준 5%에서 유의한 것으로 나타나므로 AHRS 센서 계측 장비에 대한 신뢰도가 높은 수준으로 판별된다.

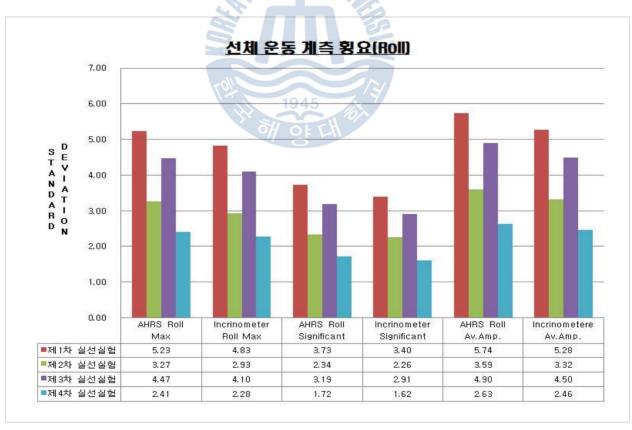


Fig. 5-23 Comparison of Rolling Angle by Standard Deviation



# 5.2.2 종요 선체운동 계측 데이터 분석

#### 5.2.2.1 실험 대상 선박의 종요주기 계산

### (1) 실험 대상 선박의 종요주기 계산

최대 종요주기(Pitch period)는 해상 상태와 선박 길이(수선간장, LBP)와의 관계에 따라 결정된다. 실험 대상 선박인 한바다호의 종요주기(Pitching period ; T<sub>P</sub>)를 식 (5-3)에서 구할 수 있다.

$$T_P = 2.44 + 0.032L - 0.000036L^2 (5-3)$$

여기서, L = Length between perpendiculars(수선간장) L.B.P. = 104.0m

식 (5-3)에 의한 실험대상 선박인 한바다호의 종요주기는  $T_p = 5.4$ 초를 얻을 수 있다. 해상에서의 실제 종요주기는 선박 컨디션 상태 및 해상 상황에 따라 변동되며, 일반적으로 실제 해상에서는 계산된 종요주기 값의 1/3에서 2/3의 값사이에서 종요 운동을 하게 된다.

길이가 긴 선박은 상대적으로 종요각의 크기가 작고, 일반적으로 Sea-state 4에서  $1^{\circ}$  ~  $2^{\circ}$  의 종요각을 가지며, Sea-state 8에서는 약  $5^{\circ}$  ~  $11^{\circ}$ 를 가진다.

일반적으로 모든 해상조건에서 상선에 적용하는 한계 종요각은 10°이내를 기준으로 하며, 선박 건조시 이 제한 한계기준을 고려한 선형 디자인을 적용하여 외력에 대해 선체를 보호한다.

실선실험에서는 한바다호의 계산된 종요주기를 기준으로 AHRS 센서와 아날 로그 경사계를 사용한 종요각 계측을 상호 비교하기 위해 참조 요소로 적용하



였다. 실선실험이 행해지는 대부분의 해상에서는 불규칙적인 해양파가 발생하는 상황이므로 종요각 및 종요주기 등은 계산치와 실측치는 차이가 있을 것으로 예상하였다.

#### (2) 선체의 운동 응답 특성

선박의 6자유도 선체운동은 선박에 고정된 좌표계에 대한 왕복운동과 회전운 동으로 정의되므로 선박에 대해 진행하는 해양파의 방향에 따라 선체운동의 양 상이 다르게 나타난다. 선박의 형상은 길이가 폭과 깊이에 비해 매우 큰 세장 체로서 항해안전성에 영향을 미치는 주요 회전운동 중의 하나인 선체에 대한 종요 운동은 특히 해양파의 진행 방향에 따라 영향을 많이 받게 된다.

예를 들어, 선박이 전진하는 방향(x축)과 파가 진행하는 방향이 이루는 각을 입사각 $(\beta)$ 이라 가정하면, 파의 진행방향이 x축과 평행한 경우에는 y축에 대한 운동은 없음을 알 수 있으며, 파의 진행 방향이 y축과 평행한 경우에는 y축에 대한 운동이 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 선체의 운동 응답은 입사파의 진폭에 비례한다는 것이다. 종요의 크기는 선속이 있는 경우에는 실제 파도의 주기  $(T_w)$ 와 해양파와 선박과의 만남주기 $(T_e$ : Encounter Period)에 따라 종속된다. 만남주기는 식 (5-4)에서 구할 수 있다.

$$T_e = T_w \left( 1 - \frac{V \cos \beta}{L_w / T_w} \right) \tag{5-4}$$

여기서, V = 선속(Ship Speed),  $L_w$  = 파장

배의 전진 방향과 파의 진행방향이 반대인 경우( $\beta$ =180°)를 선수정향파 또는 선수파(Head Seas),  $\beta$ =90°, 270°인 경우를 횡파(Beam Seas),  $\beta$ =0°인 경우를 선미추파 또는 선미파(Follow seas), 선수정향파와 횡파 사이를 선수사파



(Bow Seas), 선미추파와 횡파 사이를 선미추사파 또는 선미사파(Quartering Seas)라 한다. 이러한 입사각의 변화에 따라 선박과 해양파의 만남주기가 바뀌게 된다. 즉, 선수파, 선수사파에서 만남주기는 실제 파주기보다 항상 짧아지며, 횡파에서는 만남주기와 파주기는 같게 되지만 선미파와 선미사파에서는 선속에 따라 다소 복잡한 양상을 띠게 된다. 식 (5-4)에서  $\left(1-\frac{V\cos\beta}{L_w/T_w}\right)$ 의 값이 1보다 크게 되는 선속(선속이 파의 진행 속도보다 작은 경우,  $V\cos\beta < L_w/T_w$ )에서는 만남주기가 파주기보다 길게 되지만 반대의 경우에는 오히려 만남주기가 파주기보다 짧게 된다. 이와 같이 파도의 진행방향과 선속에 따라 배의 운동응답 특성이 다르게 나타나므로 항해하는 선박의 모든 선속과 파도의 입사각 조건에 따른 선박의 운동응답 특성 해석을 하여 선체운동을 계산한다.

# 5.2.2.2 종요 선체운동 계측 분석 및 결과

종요(Pitch) 계측을 위한 실선실험은 앞 절에서의 종요의 실험과 동일한 실험 조건으로 실시하였다. 실선실험 방법도 AHRS pitch 센서와 아날로그 경사계를 일정한 시간 및 간격으로 선박의 종요를 주기적으로 계측하기 위해 4 차례에 걸쳐 실험을 수행하였다.

본 실험 결과에서는 AHRS pitch 센서가 계측하는 선박의 종요운동과 아날로그 선박용 경사계의 종요각 측정값을 30분 단위로 저장하여 데이터베이스화하였고, 같은 해상상태 조건에서 일정한 계측 시간 간격으로 저장한 계측 데이터를 대상으로 종동요의 최대값(Max)과 유의치(Significant), 평균 종요 진폭(Av. Amp) 요소를 상호 비교하였다. 그리고 실험선의 종요 운동에 대한 해석 및 분석은 계측하여 기록된 파일을 항해 실험 구간인 한 항차 기간 동안 하루 단위로분석하여 그 결과 값을 그래프로 표시하였다.



# (1) 샘플 구간의 종요 선체운동 계측 분석

Fig. 5-24는 1차 실험 구간인 [부산 ~ 제주] 항해 구간 중에서 종요가 심했던 2013년 3월 19일 04시 10분경(한국표준시, KST), 실험 선박 위치 33°41.5'N, 127°04.4'E의 지점(Fig. 5-18에 샘플계측 지점 표시)에서 약 3분간(04시 10분~13분) 동안 실험선의 종요의 계측에 대한 샘플링을 AHRS pitch 센서 감지와 아날로그 선박용 경사계를 사용한 실제 측정치 결과를 함께 도시하였다.

실험 선박인 한바다호의 종요주기는 계산 값이 5.4초, 실측 평균값이 Sea-state 4 기준에서 2.4초의 주기를 가진다. AHRS pitch 센서의 Sampling rate 는 10Hz로 하여 센서 계측 값을 취득하였다. 계측한 결과 샘플링 구간 계측 AHRS 센서 계측치의 최대/최소 종요각 값은 (-)3.6° ~ 5.7°를 계측하였고, 실제 측정치의 최대/최소값은 종요각도 (-)3° ~ 5°가 측정되었다. Fig. 5-24에서 보듯이 AHRS pitch 센서 계측치와 아날로그 선박용 경사계의 측정치가 서로 유사하게 최대 및 최소값을 갖으며, 전반적인 종요운동 값이 비슷한 패턴임을 확인할 수 있다.

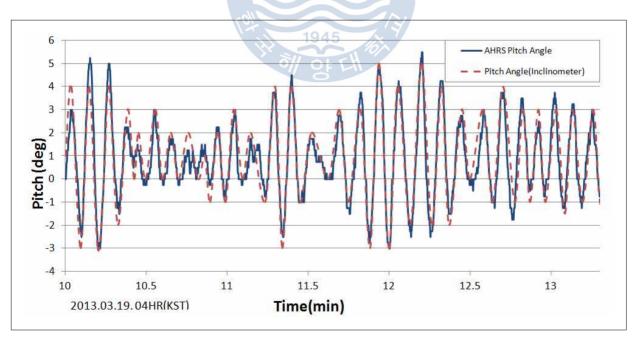


Fig. 5-24 AHRS Outputs and Actual Values of Pitching Angle



# (2) 실험 전체 구간의 종요 선체운동 계측 분석

Fig. 5-25 ~ 28과 Table 5-13 ~ 17은 실선실험 1 ~ 4차의 각 구간별 종요각 (Pitch angle)을 실측하여 계측시간 30분 단위로 기록하였고, 실험 대상 장비인 AHRS pitch 센서의 계측 값과 비교할 아날로그 경사계에서 측정된 종요각의 최대치(Max), 유의치(Significant), 평균 종요폭(Av. Amp)을 통계 처리하여 각 요소별로 비교한 그래프를 나타내었다.

그래프에서 x축은 계측 시간(hr)을 30분 단위로는 나타내고, y축은 종요각을 0.5도 단위로 표시하였다. 그래프의 심볼 표시로 ( $-\circ$ -)는 AHRS pitch 센서로 계측된 종요각의 최대치와 ( $-\bullet$ -)은 유의치를, ( $-\circ$ -)은 평균 종요폭을 나타내며, ( $-\Delta$ -)은 아날로그 경사계로 측정된 종요각의 최대치와 ( $-\bullet$ -)은 유의치를, ( $-\circ$ -)은 평균 종요폭을 나타낸다.

# ① 제 1차 실선실험의 종요 선체운동 분석

Fig. 5-25와 Table 5-13은 제 1차 실선실험 [부산 ~ 제주] 항해 구간의 종요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 8계급으로 풍랑이 거센 다양한 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와실험선 간의 만남각은 선수정향파(Head seas)에서 선수사파(Bow seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.1 ~ 5.5미터 사이의 범위였다.

AHRS pitch 센서와 선박용 경사계에서 계측된 종요각은 3월 18일 22시 30분 데이터에 각각 7.6도, 8도로 최대치가 기록되었고, 유의치와 평균 진폭치는 AHRS pitch 센서에서 측정된 종요 값이 평균적으로 약 1배에서 1.2배 가량 작게 계측되었다. 종요주기는 두 계측 모두 0.2 ~ 5.0초 사이에서 진행되었으며, 선수정향파(Head seas)를 받을 때 최대 종요주기가 관측되었다.



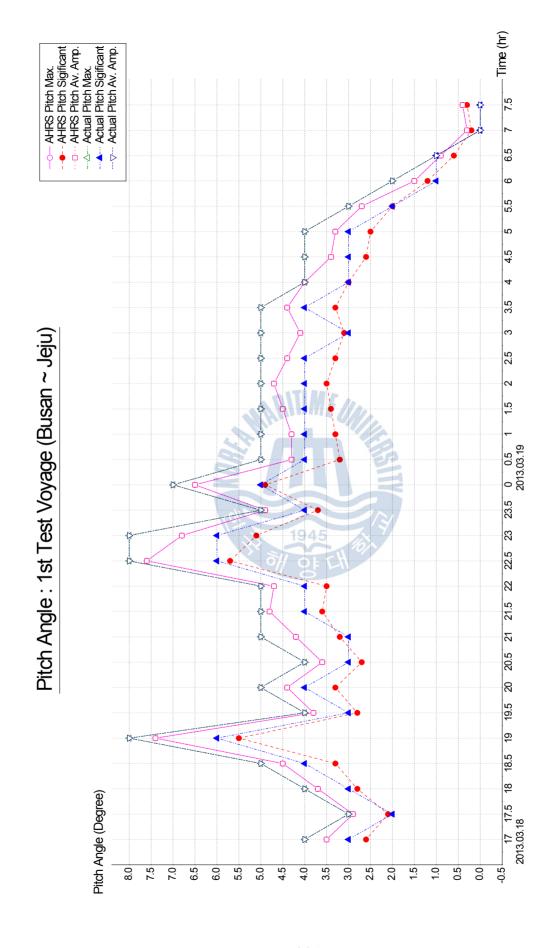


Fig. 5-25 Comparison of Pitching Angle by Measurement (1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)



Table 5-13 Measurement Data of Ship's Pitching Motion (1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)

D .		B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	Pitch	Sensor	Gauge	Ar	_	nclinome Gauge	eter
Date	Time	Scale	Force (kts)	Wave Height H1/3(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	17:00	5	19.1	2.0	Beam	3.5	2.6	3.5	2.0	4	3	4	2
	17:30	4	15.7	1.0	Bow	2.9	2.1	2.9	1.7	3	2	3	2
	18:00	5	20.2	2.0	Head	3.7	2.8	3.7	2.2	4	3	4	2
	18:30	6	24.5	3.0	Head	4.5	3.3	4.5	2.6	5	4	5	3
	19:00	7	33.1	4.0	Head	7.4	5.5	7.4	4.3	8	6	8	5
	19:30	5	20.8	2.0	Bow	3.8	2.8	3.8	2.2	4	3	4	2
2013.	20:00	6	24.2	3.0	Bow	4.4	3.3	4.4	2.6	5	4	5	3
3.18.	20:30	5	19.8	2.0	Bow	3.6	2.7	3.6	2.1	4	3	4	2
	21:00	6	23.3	3.0	Bow	4.2	3.2	4.2	2.5	5	3	5	3
	21:30	6	26.5	3.0	Bow	4.8	3.6	4.8	2.8	5	4	5	3
	22:00	6	25.8	3.0	Head	4.7	3.5	4.7	2.8	5	4	5	3
	22:30	8	34.1	5.5	Head	7.6	5.7	7.6	4.5	8	6	8	5
	23:00	7	30.8	4.0	Head	6.8	5.1	6.8	4.0	8	6	8	4
	23:30	6	26.8	3.0	Head	4.9	3.7	4.9	2.9	5	4	5	3
	0:00	7	29.4	4.0	Head	6.5	4.9	6.5	3.8	7	5	7	4
	0:30	6	23.8	3.0	Bow	4.3	3.2	4.3	2.5	5	4	5	3
	1:00	6	23.9	3.0	Bow	4.3	3.3	4.3	2.6	5	4	5	3
	1:30	6	24.9	3.0	Bow	4.5	3.4	4.5	2.7	5	4	5	3
	2:00	6	25.7	3.0	Bow	4.7	3.5	4.7	2.7	5	4	5	3
	2:30	6	24.0	3.0	Bow	4.4	3.3	4.4	2.6	5	4	5	3
	3:00	6	22.8	3.0	Bow	4.1	3.1	4.1	2.4	5	3	5	3
2013.	3:30	6	24.1	3.0	Head	4.4	3.3	4.4	2.6	5	4	5	3
3.19.	4:00	6	22.1	3.0	Bow	4.0	3.0	4.0	2.4	4	3	4	3
	4:30	5	18.8	2.0	Head	3.4	2.6	3.4	2.0	4	3	4	2
	5:00	5	18.3	2.0	Bow	3.3	2.5	3.3	2.0	4	3	4	2
	5:30	4	14.6	1.0	Bow	2.7	2.0	2.7	1.6	3	2	3	2
	6:00	3	8.5	0.6	Bow	1.5	1.2	1.5	0.9	2	1	2	1
	6:30	2	5.6	0.3	Bow	0.9	0.6	0.9	0.5	1	1	1	1
	7:00	1	2.0	0.1	Head	0.3	0.2	0.3	0.2	0	0	0	0
	7:30	1	2.9	0.1	Beam	0.4	0.3	0.4	0.3	0	0	0	0



# [2] 제 2차 실선실험의 종요 선체운동 분석

Fig. 5-26과 Table 5-14는 제 2차 실선실험 [제주 ~ 부산] 항해 구간의 종요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 5계급으로 비교적 평온한 일반적인 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각은 주로 정횡파(Beam seas)에서 선미추파(Follow seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.3 ~ 2미터 사이의 범위였다.

AHRS pitch 센서와 선박용 경사계에서 계측된 종요각은 3월 22일 3시 30분 데이터에 각각 3.7도, 4도로 최대치가 기록되었고, 유의치와 평균 진폭치는 AHRS pitch 센서에서 측정된 종요 값이 실측치와 거의 비슷하게 계측되었다. 종요주기는 두 계측 모두 0.3 ~ 2.2초 사이에서 진행되었으며, 정횡파(Beam seas)를 받을 때 최대 종요주기가 관측되었다.



- 136 -



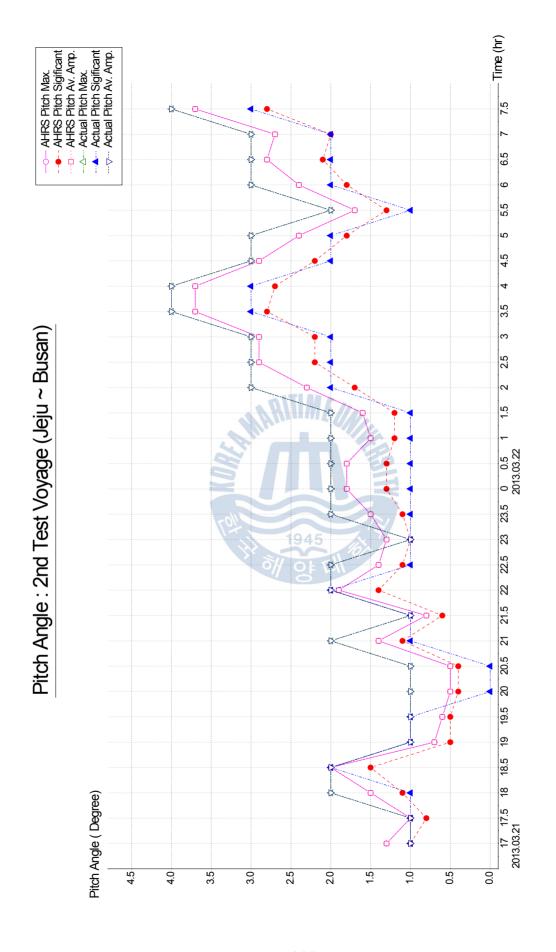


Fig. 5-26 Comparison of Pitching Angle by Measurement (2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)



Table 5-14 Measurement Data of Ship's Pitching Motion (2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)

		B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	Pitch	Sensor	Gauge	Ar		nclinome Gauge	eter
Date	Time	Scale	Force (kts)	Wave Height H1/3(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S ½ (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	17:00	3	7.0	0.6	Follow	1.3	1.0	1.3	0.7	1	1	1	1
	17:30	2	6.5	0.3	quartering	1.0	0.8	1.0	0.6	1	1	1	1
	18:00	3	8.3	0.6	Follow	1.5	1.1	1.5	0.9	2	1	2	1
	18:30	4	11.1	1.0	quartering	2.0	1.5	2.0	1.2	2	2	2	1
	19:00	2	4.5	0.3	quartering	0.7	0.5	0.7	0.4	1	1	1	0
	19:30	2	4.2	0.0	Follow	0.6	0.5	0.6	0.4	1	1	1	0
2013.	20:00	1	3.3	0.1	Follow	0.5	0.4	0.5	0.3	1	0	1	0
3.21.	20:30	1	3.4	0.1	Follow	0.5	0.4	0.5	0.3	1	0	1	0
	21:00	3	7.7	0.6	Follow	1.4	1.1	1.4	0.8	2	1	2	1
	21:30	2	5.1	0.3	quartering	0.8	0.6	0.8	0.5	1	1	1	1
	22:00	3	10.4	0.6	quartering	1.9	1.4	1.9	1.1	2	2	2	1
	22:30	3	7.9	0.6	Follow	1.4	1.1	1.4	0.8	2	1	2	1
	23:00	3	7.3	0.6	quartering	1.3	1.0	1.3	0.8	1	1	1	1
	23:30	3	8.0	0.6	Follow	1.5	1.1	1.5	0.9	2	1	2	1
	0:00	3	9.8	0.6	quartering	1.8	1.3	1.8	1.0	2	1	2	1
	0:30	3	9.7	0.6	Follow	1.8	1.3	1.8	1.0	2	1	2	1
	1:00	3	8.5	0.6	Follow	1.5	41.2	1.5	0.9	2	1	2	1
	1:30	3	8.7	0.6	Follow	1.6	1.2	1.6	0.9	2	1	2	1
	2:00	4	12.8	1.0	quartering	2.3	1.7	2.3	1.4	3	2	3	2
	2:30	4	16.1	1.0	quartering	2.9	2.2	2.9	1.7	3	2	3	2
	3:00	4	15.8	1.0	quartering	2.9	2.2	2.9	1.7	3	2	3	2
2013.	3:30	5	20.2	2.0	Beam	3.7	2.8	3.7	2.2	4	3	4	2
3.22.	4:00	5	20.1	2.0	Beam	3.7	2.7	3.7	2.1	4	3	4	2
	4:30	4	16.2	1.0	Bow	2.9	2.2	2.9	1.7	3	2	3	2
	5:00	4	13.0	1.0	Bow	2.4	1.8	2.4	1.4	3	2	3	2
	5:30	3	9.3	0.6	quartering	1.7	1.3	1.7	1.0	2	1	2	1
	6:00	4	13.4	1.0	Follow	2.4	1.8	2.4	1.4	3	2	3	2
	6:30	4	15.6	1.0	quartering	2.8	2.1	2.8	1.7	3	2	3	2
	7:00	4	14.7	1.0	quartering	2.7	2.0	2.7	1.6	3	2	3	2
	7:30	5	20.4	2.0	Beam	3.7	2.8	3.7	2.2	4	3	4	2



# ③ 제 3차 실선실험의 종요 선체운동 분석

Fig. 5-27과 Table 5-15는 제 3차 실선실험 [목포 ~ 부산] 항해 구간의 종요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 6계급으로 약간 거친 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각은 선수정향파(Head seas)에서에서 정횡파(Beam seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.1 ~ 3미터 사이의 범위였다.

AHRS pitch 센서와 선박용 경사계에서 계측된 종요각은 3월 19일 20시 데이터에 각각 4.1도, 4도로 최대치가 기록되었고, 유의치와 평균 진폭치는 AHRS pitch 센서에서 측정된 종요 값이 평균적으로 약 (-)1.2배에서 1.2배 가량 계측되었다. 종요주기는 두 계측 모두 0.1 ~ 3초 사이에서 진행되었으며, 선수정향파(Head seas)를 받을 때 최대 종요주기가 관측되었다.



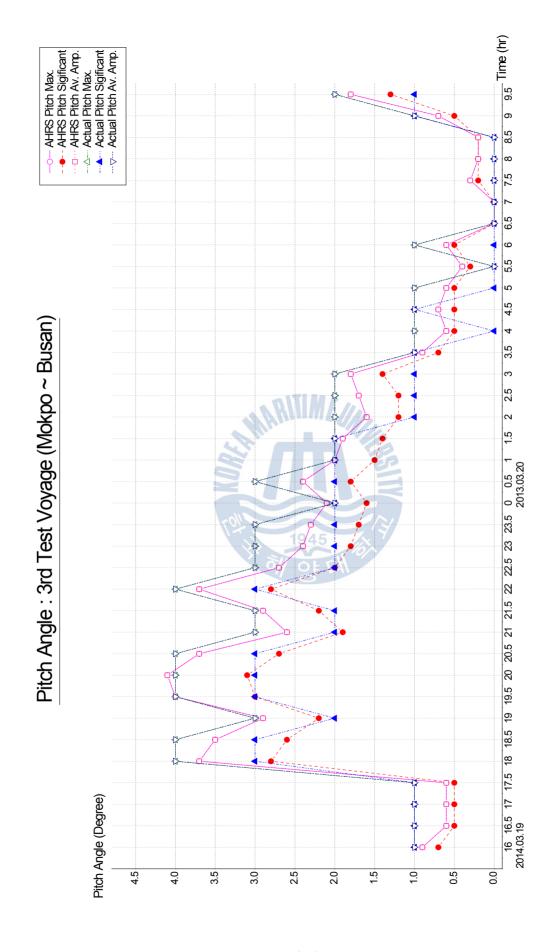


Fig. 5-27 Comparison of Pitching Angle by Measurement (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)



Table 5-15 Measurement Data of Ship's Pitching Motion (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)

<b>.</b>		B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS	Pitch	Sensor	Gauge	An		iclinome Gauge	ter
Date	Time	Scale	Force (kts)	Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S ½ (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S ½ (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)
	16:00	2	6.1	0.3	quartering	0.9	0.7	0.9	0.6	1	1	1	1
	16:30	2	4.1	0.3	quartering	0.6	0.5	0.6	0.4	1	1	1	0
	17:00	2	4.2	0.3	Beam	0.6	0.5	0.6	0.4	1	1	1	0
	17:30	2	4.1	0.3	quartering	0.6	0.5	0.6	0.4	1	1	1	0
	18:00	5	20.3	2.0	Head	3.7	2.8	3.7	2.2	4	3	4	2
	18:30	5	19.3	2.0	Bow	3.5	2.6	3.5	2.1	4	3	4	2
	19:00	4	16.0	1.0	Bow	2.9	2.2	2.9	1.7	3	2	3	2
2014.	19:30	6	22.1	3.0	Head	4.0	3.0	4.0	2.4	4	3	4	3
3.19.	20:00	6	22.4	3.0	Head	4.1	3.1	4.1	2.4	4	3	4	3
0.10.	20:30	5	20.1	2.0	Head	3.7	2.7	3.7	2.1	4	3	4	2
	21:00	4	14.2	1.0	Head	2.6	1.9	2.6	1.5	3	2	3	2
	21:30	4	15.9	1.0	Head	2.9	2.2	2.9	1.7	3	2	3	2
	22:00	5	20.4	2.0	Head	3.7	2.8	3.7	2.2	4	3	4	2
	22:30	4	14.6	1.0	Head	2.7	2.0	2.7	1.6	3	2	3	2
	23:00	4	13.3	1.0	Head	2.4	1.8	2.4	1.4	3	2	3	2
	23:30	4	12.8	1.0	Head	2.3	1.7	2.3	1.4	3	2	3	2
	0:00	4	11.4	1.0	Head	2.1	1.6	2.1	1.2	2	2	2	1
	0:30	4	13.3	1.0	Head	2.4	1.8	2.4	1.4	3	2	3	2
	1:00	3	10.9	0.6	Bow	2.0	1.5	2.0	1.2	2	2	2	1
	1:30	3	10.6	0.6	Bow	1.90	1.4	1.9	1.1	2	2	2	1
	2:00	3	8.7	0.6	Bow	1.6	1.2	1.6	0.9	2	1	2	1
	2:30	3	9.1	0.6	Bow	1.7	1.2	1.7	1.0	2	1	2	1
	3:00	3	9.9	0.6	Bow	1.8	1.4	1.8	1.1	2	1	2	1
	3:30	2	5.7	0.3	Head	0.9	0.7	0.9	0.5	1	1	1	1
	4:00	1	3.9	0.1	Head	0.6	0.5	0.6	0.4	1	0	1	0
2014.	4:30	2	4.6	0.3	Beam	0.7	0.5	0.7	0.4	1	1	1	0
3.20.	5:00	1	3.9	0.1	Beam	0.6	0.5	0.6	0.4	1	0	1	0
	5:30	1	2.6	0.1	Bow	0.4	0.3	0.4	0.2	0	0	0	0
	6:00	1	3.9	0.1	Head	0.6	0.5	0.6	0.4	1	0	1	0
	6:30	0	0.2	0.0	Follow	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0
	7:00	0	0.1	0.0	Head	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0
	7:30	1	2.0	0.1	Follow	0.3	0.2	0.3	0.2	0	0	0	0
	8:00 8:30	1	1.3	0.1	Beam Head	0.2	0.2	0.2	0.1	0	0	0	0
	9:00	2	4.7	0.1	Bow	0.2	0.2	0.2	0.1	1	1	1	0
	9:30	3	9.8	0.6	Beam	1.8	1.3	1.8	1.0	2	1	2	1



# 4 제 4차 실선실험의 종요 선체운동 분석

Fig. 5-28과 Table 5-16은 제 4차 실선실험 [진해 ~ 부산] 항해 구간의 종요 운동 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서는 풍력계급 1 ~ 4계급으로 비교적 평온한 일반적인 기상 및 해상 상황이었으며, 해양파와 실험선 간의 만남각은 정횡파(Beam seas)에서 선미추사파(Quartering seas) 사이의 방향에서 받았다. 파고는 유의 파고 0.1 ~ 1미터 사이의 범위였다.

AHRS pitch 센서와 선박용 경사계에서 계측된 종요각은 4월 5일 16시 데이터에 각각 2.7도, 3도로 최대치가 기록되었고, 유의치와 평균 진폭치는 AHRS pitch 센서에서 측정된 종요 값이 평균적으로 약 1.1배 가량 크게 계측되었다. 종요주기는 두 계측 모두 0.1 ~ 3초 사이에서 진행되었으며, 선미추사파 (Quartering seas)를 받을 때 최대 종요주기가 관측되었다.





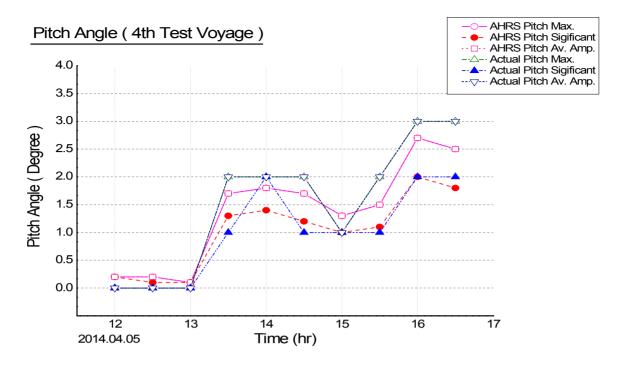


Fig. 5-28 Comparison of Pitching Angle by Measurement (4th Actual Ship Test, 2014.04.05)

Table 5-16 Measurement Data of Ship's Pitching Motion (4th Actual Ship Test, 2014.04.05.)

Diti	TD:	B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle		Pitch 45	Sensor	Gauge	Analog Inclinometer Pitch Gauge				
Date	Time	Scal e	Force (kts)	Wave Height H1/3(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	Max (g)	S 1/3 (deg)	Av.Amp (deg)	Av. Period (sec)	
	12:00	1	1.5	0.1	Follow	0.20	0.20	0.20	0.10	0	0	0	0	
	12:30	1	1.0	0.1	Follow	0.20	0.10	0.20	0.10	0	0	0	0	
	13:00	0	0.5	0.0	quartering	0.10	0.10	0.10	0.00	0	0	0	0	
	13:30	3	9.2	0.6	Bow	1.70	1.30	1.70	1.00	2	1	2	1	
2014.	14:00	3	10.0	0.6	Beam	1.80	1.40	1.80	1.10	2	2	2	1	
4.05.	14:30	3	9.1	0.6	Beam	1.70	1.20	1.70	1.00	2	1	2	1	
	15:00	3	7.3	0.6	quartering	1.30	1.00	1.30	0.80	1	1	1	1	
	15:30	4	8.2	1.0	quartering	1.50	1.10	1.50	0.90	2	1	2	1	
	16:00	4	14.9	1.0	quartering	2.70	2.00	2.70	1.60	3	2	3	2	
	16:30	4	13.5	1.0	Beam	2.50	1.80	2.50	1.40	3	2	3	2	



# (3) 종요 선체운동 계측 실험 결과

Fig. 5-29는 제 1 ~ 4차 실험 전 구간에 계측한 AHRS pitch 센서 계측치와 아날로그 경사계 실측치의 표준편차를 비교한 표이다. 표준편차 결과를 살펴보면 횡요의 경우 AHRS 센서에 의한 계측값과 실측값의 편차가 0.44 이내로 서로 비슷한 패턴을 보이고 있으며, 제 1차와 제 3차 실험에서는 해상상태가 좋지 않아 종요의 진폭이 제 2차와 제 3차 실험의 평온한 상태보다 편차가 크게 나타났다.

이상의 4번에 걸친 종요 운동 계측을 위한 실선실험의 결과를 종합하여 보면, AHRS pitch 센서와 선박용 경사계에서 계측한 3가지 요소의 최대치(Max), 유의치(Significant), 평균 횡요폭(Av. Amp) 값을 그래프 상에서 비교해 보면 전반적으로 비슷한 패턴의 양상을 보인다. 그러므로 센서 계측치의 정량적인 측정값은 실측치와 거의 유사하다는 것을 알 수 있어서 계측 장비에 대한 신뢰도가 높은 수준으로 판별된다.

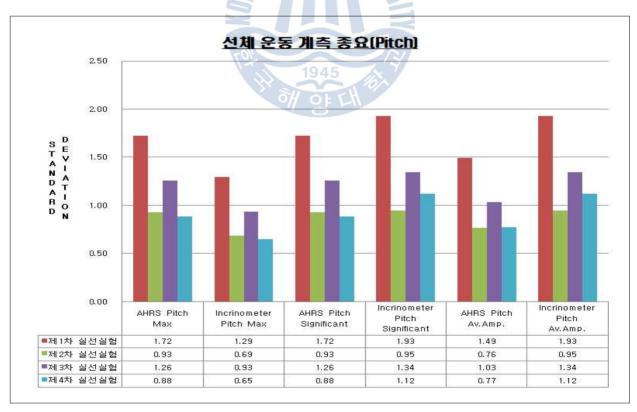


Fig. 5-29 Comparison of Pitching Angle by Standard Deviation



#### 5.3 AHRS 센서를 이용한 항해안전성 평가

#### 5.3.1 선체 가속도를 이용한 항해안전성 평가

#### 5.3.1.1 항해안전성의 기준

파랑 중을 항해하는 선박의 항해안전성을 평가하는 일반적인 방법은 내항성 능(Seakeeping Performance) 평가를 이용하는 것이다.

선박의 내항성능을 고려할 때 설계자는 승선하고 있는 선원 및 승객의 안락함과 관련된 거주성(Habitability), 선원이 지정된 임무를 완수할 수 있도록 설치된 장치 및 장비를 포함한 선박의 능력과 관련된 운항 능력(Operability), 선박과 선원 및 화물의 안전과 관련된 생존 능력(Survivability)을 고려해야 한다. 내항성능을 분석하는데 있어 필요한 주요소는 주어진 고유한 특성을 지닌 선박, 선박이 해당 임무를 완수해야 하는 특정한 해상 조건(Sea conditions), 선박이 해당 임무를 효과적으로 완수하는데 있어 초과해서는 안 되는 운항 기준 (Operational criteria) 등이 있다. Table 5-17은 ITTC에서 제시하고 있는 내항성능 기준을 나타내고 있다.

본 연구에서는 이러한 내항성능을 평가하기 위한 주요 요소인 선수갑판침수, 슬래밍, 횡동요, 종동요, 상하가속도 및 좌우가속도를 시스템적으로 결합한 수 치화된 정량적인 지표 모델로 제시한 SPI를 사용한다. 이 SPI를 실선실험에 적용하여 실험선박의 항해안전성 평가를 수행하였다.



Table 5-17 Seakeeping Criteria of ITTC

Items	Definitions	Seakeepin	g Criteria
rtems	Definitions	Operational	Survival
Roll	Significant Single Amplitude in Degree(°)	8.0°	30.0°
Pitch	Significant Single Amplitude in Degree(°)	4.8°	8.0°
Deckwetness	Number/hour	30 HR	50 HR
Slamming	Number/hour	20 HR	50 HR
V. Acceleration	Significant Single Amplitude in $g$	0.4 g	0.8 g
L. Acceleration	Significant Single Amplitude in $g$	0.2 g	0.4 g



#### 5.3.2 상하가속도 계측 분석 및 항해안전성 평가

상하가속도(Vertical acceleration) 계측을 위한 실선실험은 앞 절에서의 횡요 및 종요의 실선실험과 동일한 실험 조건으로 실시하였고, 실선실험 방법도 AHRS 가속도 센서를 이용하여 일정한 시간 및 간격으로 선박의 상하가속도를 주기적으로 계측하였다. 총 4 차례에 걸쳐 실험을 수행하였으며, 각 실험마다 항해 종료 후 항해안전성 평가를 위한 계산 및 분석을 하였다.

AHRS 가속도 센서로부터 계측된 상하가속도 데이터는 양과 음의 두 개의 극치(Extreme value)를 취득할 수 있다. 이 두 개의 상하가속도 극치 값에서 이번 실험에서 항해안전성능 평가에 적용한 입력 데이터는 상하가속도의 양의 극치값 만을 취하여 분산치를 구하였다. 그 이유는 일반적인 선체의 운동은 기준점을 중심으로 상하 대칭운동을 하기 때문에 두 값을 다 취하여 계산할 필요가 없기 때문이다. 그리고 선박의 운동 특성상 상하가속도는 외력에 의해 선체가 위로 올라갈 때가 내려갈 때보다 가속도가 크므로 양의 극치값 데이터의 취득이 항해안전성능 지표 산출을 위한 데이터로 선정하는 것이 적절하다. 본 실험 결과에서는 AHRS 가속도 센서가 계측하는 선박의 상하가속도 측정값을 30분 단위로 저장하여 데이터베이스화 하였고, 같은 해상상태 조건에서 일정한 계측 시간 간격으로 저장한 계측 데이터를 대상으로 상하가속도의 최대값(Max)과 유의치(Significant), 평균 종요 진폭(Av. Amp) 요소를 통계 처리하였다. 그리고 실험선의 종요 운동에 대한 해석 및 분석은 계측하여 기록된 파일을 항해 실험 구간인한 항차 기간 동안 하루 단위로 분석하여 그 결과 값을 그래프로 표시하였다.

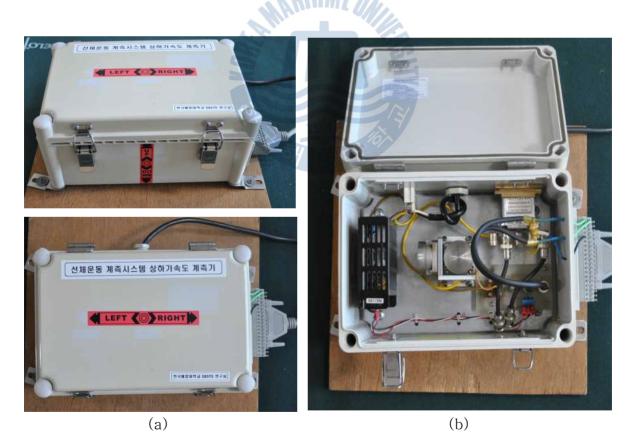


# 5.3.2.1 AHRS 가속도 센서의 상하가속도 계측 검증

# (1) 가속도 계측 비교 검증 장비(기계식 방식의 가속도 측정 센서)

본 실험에 사용된 AHRS 가속도 센서의 실선에서의 가속도 측정 값의 정확성을 검증하기 위하여, 실선을 대상으로 한 항해안전성 평가의 선행된 연구에서 사용된 기계식 가속도계를 제 3차와 제 4차 실선실험에서 실험 대상 선박에 탑재하여 AHRS 가속도 센서의 가속도 계측 값과 비교하였다.

AHRS 가속도 센서의 계측치를 검증하기 위해 사용된 가속도 센서는 한국해양대학교 선박운항자동화연구실에서 과거 다년간 선체운동 계측에 사용된 계측장비로서 외형은 Fig. 5-30과 같으며, Fig. 5-31에서와 같이 진동 질량 m이 센서 패키지 안의 스프링에 의해 매달려 있는 구조로 모델링할 수 있는 일반적인기계식 가속도계 방식의 센서이다.



**Fig. 5–30** Photograph of Mechanical Accelerometer Measuring System (a) External Apparatus(L275×B185×H140cm), (b) Internal Apparatus



기계식 방식의 가속도 센서의 계측 원리는 실험 대상 물체의 움직임에 따른 가속도(a)를 발생하여 관성력에 의해 진동 Mass의 상대적 변위 (x)가 생기게 되고, 이에 따른 전기적 신호로서 감지된다. 계측에 대한 운동 방정식은 아래의식 (5-5)와 같다.

$$ma = m\frac{d^2x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + kx$$
 (5-5)

여기서, k는 스프링 상수,  $\lambda$ 는 Damping 상수

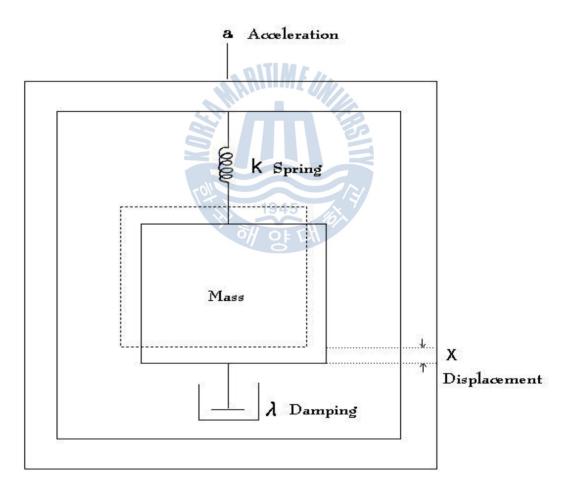


Fig. 5-31 Accelerometer principle



선체운동 가속도 계측의 검증에 사용된 기계식 가속도계의 가속도 센서의 주요 사양은 Table 5-18과 같다.

Table 5-18 Principal Specifications of the Mechanical Accelerometer

Items	Dimension
Measured acceleration range	±2 g
Scale factor	5 V/g
Operating temperature	-50℃ ~ +70℃
Power consumption	0.5 W
Shock resistance	30 g
Vibration strength (within a range of up to 500 Hz)	<i>E</i>
Supply voltage	±15 V
Dimension	38  imes 38  imes 25 (mm)
Mass 1948	115 (g)

참조로 검증에 비교한 두 가지 타입의 가속도 센서의 일반적인 특징은 기계식 가속도 센서는 구조가 복잡하면서 크고 무겁고, 같은 규격의 제품 양산이어려우므로 센서별 일원화된 측정 결과치가 달라져 신뢰성이 낮으며 가격이 높아 그 활용이 제한된다. 반면에 실리콘 가속도 센서(AHRS 센서)는 실리콘의 기계적 성질이 우수하고, 기존에 확립된 반도체 집적회로 공정기술을 이용함으로써 신뢰성과 양산성이 우수하며, 소자의 소형화와 경량화, 저가격화가 가능하다는 장점이 있다.



# (2) AHRS 가속도 측정 센서의 검증 실험

Fig. 5-32 ~ 33과 Table 5-19 ~ 20은 제 3차 및 제 4차 실선실험의 각 구간별 상하가속도(Vertical Acceleration)을 실측하여 계측시간 30분 단위로 기록하여 실험 대상 장비인 AHRS 가속도 센서의 계측값과 비교할 기계식 가속도계에서 측정된 상하가속도의 최대치(Max), 유의치(Significant)를 통계 처리하여 각 요소 별 비교 그래프로 나타내었다.

그래프에서 x축은 계측 시간(hr)을 30분 단위로는 나타내고, y축은 상하가속도를 g 단위로 표시하였다. 그래프의 심볼 표시로 ( $-\circ$ -)는 AHRS 가속도 센서로계측된 상하가속도 값의 최대치와 ( $-\bullet$ -)은 유의치를 나타내며, ( $-\Delta$ -)은 기계식가속도계로 측정된 상하가속도 값의 최대치와 ( $-\bullet$ -)은 유의치를 나타낸다.

AHRS의 가속도 센서와 기계식 가속도계의 상하가속도의 계측은 3차 실선실험 [목포 ~ 부산] 항해 구간의 항해시작 시기인 2014년 3월 19일 16시에서 항해 종료 시점인 3월 20일 9시 30분까지 실시되었다. 실험선박의 상하가속도 계측에 대한 AHRS 가속도 센서 감지와 기계식 가속도 센서를 사용한 측정치 결과를 상호 비교하기 위해 Fig. 5-32에 함께 도시하였다.

Fig. 5-32와 Table 5-19는 제 3차 실선실험의 상하가속도 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. AHRS 가속도 센서와 기계식 가속도 센서의 Sampling rate는 동일하게 10Hz로 상하가속도 측정값을 취득하였다.



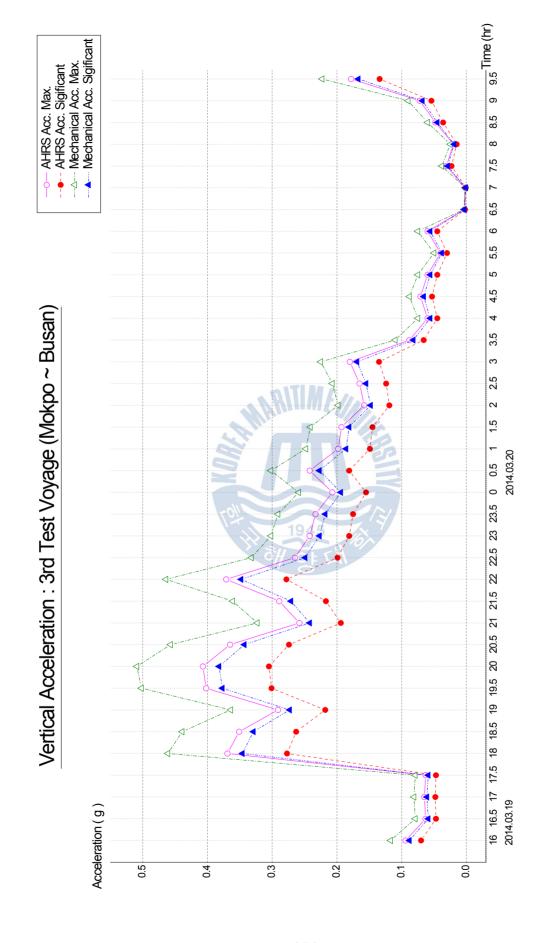


Fig. 5-32 Comparison of Vertical Acceleration by Measurement (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)



Table 5-19 Measurement Data of Vertical Acceleration (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)

D.		B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle		Acc. Gauge	Mechani Roll	cal Acc, Gauge
Date	Time	Scale	Force (kts)	Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/3 (g)	Max (g)	S 1/ <sub>3</sub> (g)
	16:00	2	6.1	0.3	quartering	0.0940	0.0700	0.117	0.088
	16:30	2	4.1	0.3	quartering	0.0630	0.0470	0.079	0.059
	17:00	2	4.2	0.3	Beam	0.0650	0.0480	0.081	0.061
	17:30	2	4.1	0.3	quartering	0.0630	0.0470	0.079	0.059
	18:00	5	20.3	2.0	Head	0.3690	0.2770	0.461	0.346
	18:30	5	19.3	2.0	Bow	0.3510	0.2630	0.439	0.329
	19:00	4	16.0	1.0	Bow	0.2910	0.2180	0.364	0.273
2014.	19:30	6	22.1	3.0	Head	0.4020	0.3010	0.502	0.377
3.19.	20:00	6	22.4	3.0	Head	0.4070	0.3050	0.509	0.382
0.10.	20:30	5	20.1	2.0	Head	0.3650	0.2740	0.457	0.343
	21:00	4	14.2	1.0	Head	0.2580	0.1940	0.323	0.242
	21:30	4	15.9	1.0	Head	0.2890	0.2170	0.361	0.271
	22:00	5	20.4	2.0	Head	0.3710	0.2780	0.464	0.348
	22:30	4	14.6	1.0	Head	0.2650	0.1990	0.332	0.249
	23:00	4	13.3	1.0	Head	0.2420	0.1810	0.302	0.227
	23:30	4	12.8	1.0	Head	0.2330	0.1750	0.291	0.218
	0:00	4	11.4	1.0	Head	0.2070	0.1550	0.259	0.210
	0:30	4	13.3	1.0	Head	0.2420	0.1810	0.302	0.134
	1:00	3	10.9	0.6	Bow	0.1980	0.1490	0.248	0.186
	1:30	3	10.6	0.6	Bow	0.1930	0.1450	0.241	0.181
	2:00	3	8.7	0.6	Bow	0.1580	0.1190	0.198	0.148
	2:30	3	9.1	0.6	Bow	0.1650	0.1240	0.207	0.155
	3:00	3	9.9	0.6	Bow	0.1800	0.1350	0.225	0.169
	3:30	2	5.7	0.3	Head	0.0880	0.0660	0.110	0.082
	4:00	1	3.9	0.1	Head	0.0600	0.0450	0.075	0.056
2014.	4:30	2	4.6	0.3	Beam	0.0710	0.0530	0.088	0.066
3.20.	5:00	1	3.9	0.1	Beam	0.0600	0.0450	0.075	0.056
	5:30	1	2.6	0.1	Bow	0.0400	0.0300	0.050	0.038
	6:00	1	3.9	0.1	Head	0.0600	0.0450	0.075	0.056
	6:30	0	0.2	0.0	Follow	0.0030	0.0020	0.004	0.003
	7:00	0	0.1	0.0	Head	0.0020	0.0010	0.002	0.001
	7:30	1	2.0	0.1	Follow	0.0310	0.0230	0.038	0.029
	8:00	1	1.3	0.1	Beam	0.0200	0.0150	0.025	0.019
	8:30	2	1.3	0.1	Head	0.0480	0.0360	0.060	0.045
	9:00 9:30	3	4.7 9.8	0.3	Bow Beam	0.0720	0.0540	0.090 0.223	0.068 0.167
	ყ.ას	၂ ၁	9.0	0.0	Dealli	0.1780	0.1340	0.443	0.107



3차 실선실험 결과 AHRS 가속도 센서로 측정된 상하가속도 값의 범위는 (-)0.247g ~ (+)0.407g에서 계측되었고, 기계식 가속도 센서 측정치는 (-)0.352g ~ (+)0.509g의 범위에서 계측이 되었다. 이 항해 구간에서는 3월 19일 18시경부터 22시경까지 전 항해구간에서 비교적 선체운동이 많이 있었다.

AHRS 가속도 센서와 기계식 가속도 센서에서 계측된 가속도 값은 3월 19일 20시 기준 기록 데이터에 각각 0.407g, 0.509g로 상하가속도의 최대치가 기록되었고, 유의치는 AHRS 가속도 센서에서 측정된 상하가속도 값이 기계식 가속도 센서에 비해 평균적으로 약 1.1배에서 1.2배가량 낮게 계측되었다. 이 실험구간에서의 상하가속도의 값이 비교적 높게 계측된 시간의 AHRS 가속도 센서최대치는 3월 19일 18시경에 0.369g, 20시경에 0.407g, 3월 20일 0시 30분경에 0.242g였고, 모두 실험선과 해양파와의 만남각이 선수정향파(Head seas)를 받고있는 상황이었다.

Fig. 5-33과 Table 5-20은 제 4차 실선실험 [진해 ~ 부산] 항해 구간의 상하가속도 계측 결과 데이터를 시계열 그래프로 나타내었다. 이 구간에서의 AHRS 가속도 센서로 측정된 상하가속도 값의 범위는 (-)0.168g ~ (+)0.245g에서 계측되었고, 기계식 가속도 센서 측정치는 (-)0.215g ~ (+)0.339g의 범위에서 계측되었다.

AHRS 가속도 센서와 기계식 가속도계에서 계측된 상하가속도는 4월 5일 16 시 시간대에 측정된 데이터에서 각각 0.271g, 0.339g로 최대치가 기록되었고, 유의치는 AHRS 가속도 센서에서 측정된 상하가속도 값이 평균적으로 약 1.1배에서 1.2배정도 가량 낮게 계측되어 제 3차 실선실험에서의 상하가속도 계측과 같은 범위였다. 이 실험 구간에서는 날씨가 비교적 평온한 상태이어서 ITTC에서 규정하고 있는 작업가능기준치인 상하가속도 0.4g 이하로 전 항해구간에 계측되어 실험선의 내항성능은 안전한 수준으로 평가되었다.



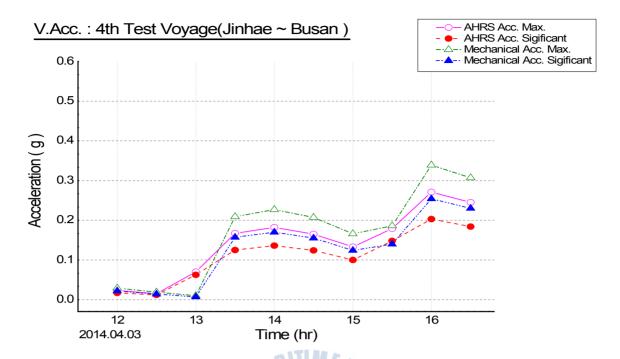


Fig. 5-33 Comparison of Vertical Acceleration by measurement (4th Actual Ship Test, 2014.04.05)

Table 5-20 Measurement Data of Vertical Acceleration (4th Actual Ship Test, 2014.04.05.)

_		B.F.	Wind (True)	Wave	Encounter Angle	AHRS Sensor	Acc. Gauge	Mechani Roll	cal Acc, Gauge
Date	Time	Scale	Force (kts)	Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S 1/ <sub>3</sub> (g)	Max (g)	S 1/ <sub>3</sub> (g)
	12:00	1	1.5	0.1	Follow	0.023	0.017	0.029	0.022
	12:30	1	1.0	0.1	Follow	0.015	0.012	0.019	0.014
	13:00	0	0.5	0.0	quartering	0.070	0.063	0.01	0.007
	13:30	3	9.2	0.6	Bow	0.167	0.125	0.209	0.157
2014.	14:00	3	10.0	0.6	Beam	0.182	0.136	0.227	0.17
4.05.	14:30	3	9.1	0.6	Beam	0.165	0.124	0.207	0.155
	15:00	3	7.3	0.6	quartering	0.133	0.100	0.166	0.124
	15:30	4	8.2	1.0	quartering	0.179	0.148	0.186	0.14
	16:00	4	14.9	1.0	quartering	0.271	0.203	0.339	0.254
	16:30	4	13.5	1.0	Beam	0.245	0.184	0.307	0.23



### (3) 가속도 측정 센서의 계측 평가 및 검증 결과

Fig. 5-34는 제 3차 및 제 4차 실험 전 구간에 계측한 AHRS 가속도 센서 계측치와 기계식 가속도 센서 실측치의 표준편차를 비교한 표이다. 표준편차 결과를 살펴보면, 상하가속도는 AHRS 가속도 센서에 의한 계측값과 기계식 가속도 센서의 측정값의 편차의 차가 0.03 이내로 서로 비슷한 모양을 보이고 있다.

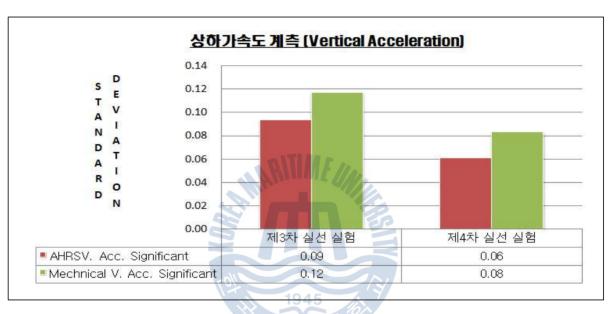


Fig. 5-34 Comparison of Vertical Acceleration by Standard Deviation

Fig. 5-32와 Fig. 5-33의 AHRS 가속도 센서와 기계식 가속도계에서 계측한 2가지 요소 최대치(Max), 유의치(Significant) 값을 그래프 상에서 비교해 보면, 전반적으로 수치화 된 두 요소의 그래프 패턴이 동일한 양상을 보이고, Fig. 5-34의 표준편자 비교표에서도 서로 거의 일치하는 통계 값을 보이므로, AHRS 가속도 센서 계측치의 정량적인 측정값은 선행 연구에서 검증된 계측 장비의 측정치와 거의 유사하다는 것을 알 수 있어서 AHRS 가속도 센서의 상하가속도계측 값의 정확성이 높은 수준으로 판별된다.



#### 5.3.2.2 상하가속도 계측 값을 적용한 SPI 계산 및 평가

본 연구의 목표인 AHRS 센서를 활용한 실선의 주요 항해안전성 평가를 위하여 내항성능지표 계산의 주요 선박자료수집 요소인 선체의 상하가속도의 신뢰성 있는 정량적인 값을 계측할 수 있는 선체운동모니터링시스템을 구현하였다. 이 시스템을 사용한 항해안전성 평가의 방법으로 제 1차 ~ 제 4차 실선실험의 각 항행 구간별로 AHRS 가속도 센서로 계측한 실측 상하가속도(Vertical Acceleration)를 실시간으로 취득하여 30분 단위로 기록 및 데이터베이스화한자료를 각 기록 단위별로 상하가속도의 유의치를 통계 처리하여 구하였다. 이실측된 상하가속도 유의치의 정확도를 검토하기 위하여 선박의 운항 데이터를기반으로 한 계산된 상하가속도 값을 구하여 비교하였다. 그리고, 계측된 상하가속도 유의치의 분산 값을 입력 데이터로 하여 SPI 값을 계산하여 산출하였다. 실측된 상하가속도의 유의치와 상하가속도 계산 값과의 SPI와의 상관 관계에대하여 비교 및 분석하여 실선의 실제 항해정보 데이터 값을 기반으로 한 실제적인 항해안전성을 평가 결과를 Table. 5-21 ~ Table. 5-24와 같이 도출하였다.

각 실선실험 구간별 상하가속도 계측 값 및 항해안전성능평가에 대한 계산 결과 데이터의 상세 자료는 【부록-2】에 수록하였다.

Fig. 5-35, 39, 41, 43의 그래프에서 x축은 계측 시간(hr)을 30분 단위로 나타내고, y축은 상하가속도 g값과 SPI를 같이 표시하였다. 그래프의 심볼 표시로  $(-\Delta^-)$ 는 항해정보 데이터를 기반으로 한 상하가속도의 계산값이고,  $(-\Delta^-)$ 은 AHRS 가속도 센서로 계측된 상하가속도의 유의치이며,  $(-\Phi^-)$ 은 SPI를 나타낸다.



### (1) 제 1차 실선실험의 항해안전성 평가 분석 및 결과

제 1차 실선실험의 [부산 ~ 제주] 구간에서는 기상 및 해상 상태가 SW ~ W 계열의 풍향과 실험선과 파랑의 만남각은 선수정향파(Head seas)에서 선수사파(Bow seas)를 받는 상황으로 남서 방향으로 항진하는 실험선의 진행 방향에 역행하는 외력을 받고 있는 운항 상황이었다.

Fig. 5-35와 Table 5-21은 제 1차 실선실험 항해 구간에서의 AHRS 가속도 센서로 계측한 상하가속도 유의치(V.Acc. S½)와 항해데이터를 기반으로 계산된 상하가속도 값(Cal.V.Acc.), 그리고 계측된 상하가속도의 분산치(V.Acc.Var.)를 사용하여 평가된 SPI의 산출 결과 데이터를 시계열 그래프 및 도표로 나타내었다.

2013년 3월 18일 19시경에 풍력계급은 7계급(Near gale), 유의파고는 4m 정도 되었고, 계측된 상하가속도의 최대 유의치가 0.736g이며, SPI는 0.528409로서 ITTC에서 규정하고 있는 작업가능기준치 0.4g의 기준보다 높아 주의를 요하는 상황이었다. 앞 절에서 분석한 횡/종요는 이 시각대에서 22.1°, 7.4°의 심한 선체운동을 하였고, 실험선의 운항요건이 안 좋아짐에 따라 선장은 선속의 감속(Engine Telegraph Nav. Full에서 Man. Full로 변경)과 침로를 변경하여 만남각을 선수정향과(Head seas)에서 선수사파(Bow seas)를 받도록 조치를 취하였다.

제 1차 실험구간에서의 SPI의 최대치는 2013년 3월 18일 22시 30분경에 발생하였다. 이 시기는 풍력계급은 8계급(Gale), 유의파고는 5.5m 정도 되는 아주 강한 폭풍이 이는 해상상태이었고, 만남각은 선수정향파(Head seas)였다. 계측된 상하가속도의 최대 유의치는 0.758g로 생존가능기준치에 근접하였다.



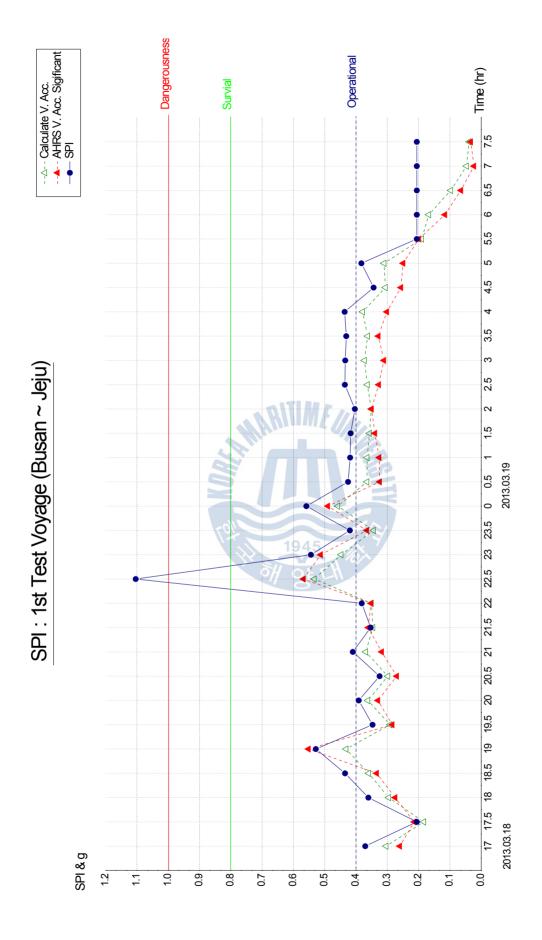


Fig. 5-35 Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement (1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19.)



Table 5-21 Calculation Data of SPI (1st Actual Ship Test, 2013.03.18.~19)

Time	Ship Heading	Ship Speed	Wind(True)		Wave	Encounter Angle		Acc. Sensor)	_	ping Perfo	
Time	HDG   SOG   Dir.		Dir. (Point)	B.F. Scale	Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S ½ (g)	V.Acc. Var.	Cal. V.Acc.	SPI
					Date	: 2013.	03. 18				
17:00	150.5	11.2	SW	5	2.0	Beam	0.347	0.260	0.002094	0.303725	0.370355
17:30	179.2	11.7	SW	4	1.0	Bow	0.285	0.214	0.000764	0.183459	0.205699
18:00	206.5	11.6	SW	5	2.0	Head	0.367	0.275	0.001980	0.295342	0.360419
18:30	211.0	11.9	SW	6	3.0	Head	0.445	0.334	0.002939	0.359826	0.434898
19:00	211.7	11.3	WSW	7	4.0	Head	0.736	0.552	0.004230	0.431681	0.528409
19:30	211.5	11.5	WSW	5	2.0	Bow	0.378	0.284	0.001923	0.291060	0.347099
20:00	210.8	14.8	WSW	6	3.0	Bow	0.440	0.330	0.002975	0.362023	0.391234
20:30	215.7	15.0	WSW	5	2.0	Bow	0.360	0.270	0.002020	0.298311	0.324682
21:00	208.3	15.0	WSW	6	3.0	Bow	0.424	0.318	0.003090	0.368954	0.409978
21:30	207.8	16.8	WSW	6	3.0	Bow	0.482	0.361	0.002717	0.345969	0.353108
22:00	234.8	16.6	W	6	3.0	Head	0.469	0.352	0.002791	0.350649	0.381500
22:30	249.3	14.3	W	8	5.5	Head	0.758	0.568	0.006452	0.533139	1.103900
23:00	249.3	11.7	WSW	7	4.0	Head	0.684	0.513	0.004545	0.447466	0.544032
23:30	250.2	11.6	W	6	3.0	Head	0.487	0.365	0.002687	0.344054	0.419431
					Date	: 2013.	03. 19				
0:00	248.2	11.6	W	7	4.0	Head	0.653	0.490	0.004762	0.458023	0.558608
0:30	245.0	11.9	WNW	6	3.0	Bow	0.433	0.325	0.003025	0.365053	0.425247
1:00	244.3	12.0	WNW	6	3.0	Bow	0.435	0.326	0.003013	0.364328	0.418737
1:30	243.2	12.1	WNW	6	3.0	Bow	0.453	0.340	0.002892	0.356937	0.416901
2:00	243.5	12.0	WNW	6	3.0	Bow	0.467	0.350	0.002802	0.351339	0.403706
2:30	255.2	12.1	WNW	6	3.0	Bow	0.436	0.327	0.003000	0.363541	0.435561
3:00	256.8	12.2	WNW	6	3.0	Bow	0.415	0.311	0.003158	0.372992	0.434385
3:30	269.8	12.4	WNW	6	3.0	Head	0.438	0.329	0.002988	0.362813	0.431046
4:00	258.0	12.6	WNW	6	3.0	Bow	0.402	0.301	0.003258	0.378851	0.436127
4:30	256.8	15.7	W	5	2.0	Head	0.342	0.256	0.002128	0.306181	0.343720
5:00	256.8	10.8	NW	5	2.0	Bow	0.333	0.250	0.002186	0.310326	0.382728
5:30	256.8	10.9	SSW	4	1.0	Bow	0.265	0.199	0.000822	0.190296	0.205699
6:00	257.5	10.4	NW	3	0.6	Bow	0.155	0.116	0.000635	0.167255	0.205699
6:30	248.8	10.3	WNW	2	0.3	Bow	0.086	0.065	0.000214	0.097096	0.205699
7:00	209.7	12.2	SW	1	0.1	Head	0.031	0.023	0.000050	0.046933	0.205699
7:30	216.3	7.6	ESE	1	0.1	Beam	0.045	0.033	0.000034	0.038702	0.205699



내항성능평가요소의 한계치 기준인 0.6g를 넘겼고, SPI는 1.103900로서 위험조건인 SPI = 1.0의 기준보다 높아 실험선의 항해안전성에 매우 위험한 상태를 맞았다. 이에 따라 실험선의 선장은 감항성 유지 및 선박의 안전성을 확보하기위해 즉시 선속 감속 및 변침을 하였고, 이런 대처를 통해 선박의 내항성을 확보하였다.

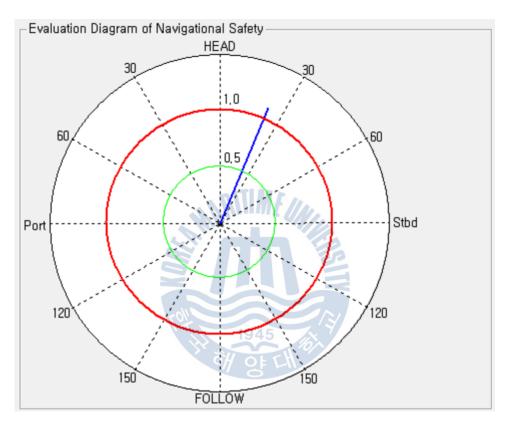


Fig. 5-36 Evaluation Diagram of Navigation Safety (1st Actual Ship Test, 2013.03.18. 22:30 KST)

Fig. 5-36은 이 당시의 상하가속도 값의 실선 계측을 통해 산출한 SPI를 이용하여 항해안전성을 나타낸 평가도이다. 이 항해안전성 평가도에서 붉은 원형선 (SPI=1.0)은 SPI의 한계 위험치를 나타내고, 각도 표시는 본선과 파도와의 만남 각을, 굵은 파란색 실선은 SPI를 나타낸다. SPI가 한계치인 붉은 색의 원을 초과할 때 이 선박은 위험에 처하게 된다. 즉, 녹색선 안쪽의 경우에는 안전한 상태(SPI=0.5이하)이고, 녹색선과 적색선 사이(SPI=0.5 ~ 1.0)는 주의 상태, 적색선



(SPI=1.0)을 넘어서면 선박은 위험한 상태에 있게 되는 것이다.

Fig. 5-36의 항해안전성 평가도를 해석해보면, 계측 환경은 선속 14.3kts, 침로 249.3°, 해상상태는 풍력계급 8계급(Gale)에 상응하는 등급의 선박운항 상황에서의 파도와의 만남각은 157.3°(Head seas)와 SPI 값 1.103900을 평가도에 파란색 굵은 선으로 만남각 및 SPI 값을 표시하고 있다.

선박 운항자는 이런 항해안전성 평가도를 이용하면 그 당시의 항해위험도를 시각적으로 쉽게 판정할 수 있으며, 항해의 위험에 대한 사항을 정량적으로 판 별할 수 있는 객관적인 의사결정 수단으로서 신뢰성 있는 유용한 항해보조 수 단으로 사용할 수 있다.

Fig. 5-37은 SPI를 계산하기 위한 항해안전성평가 프로그램에서의 입력값과 계산 결과값을 보여준다. 여기서 입력값은 상하가속도의 유의치의 분산값, 본선의 침로와 선속, 풍향풍속 값을 입력하며, 항해안전성평가의 계산 결과는 풍력계급(NBF), 자선의 만남각, 6가지 내항성요소의 한계치의 계산값인 Vertical Acceleration (AVmu), Deck wetnetss(Dmu), Propeller racing(Rmu), Slamming(Smu), Rolling (ALmu), Lateral Acceleration(ATmu), SPI(ISPI) 값을 계산하여 출력한다.

Input & Output————						
_Input—		Results——				
AV VARIANCE	0,006452	AVMU	0,533139			
WIND DIRECTION	272	DMU	1,79059			
SHIP COURSE	249,3	RMU	0,92251			
NBF	8	SMU	1,6659			
	Full 🔻	ALMU	0,160308			
F,H,B,	34, 1	ATMU	0,978612			
WIND SPEED(Kts) ( 7 <= WSD < 54) EANGLE	157,3	ISPI	1,1039			
SHIP SPEED(Knots)	14,3	RUN				

Fig. 5-37 Calculation Input & Output Data using SPI (1st Actual Ship Test, 2013.03.18. 22:30 KST)



#### (2) 제 2차 실선실험의 항해안전성 평가 분석 및 결과

제 2차 실선실험의 [제주 ~ 부산] 구간에서는 기상 및 해상 상태가 W ~ SW 계열의 풍향이었고, 유의파고는 1미터 내외의 파고이었으며, 실험선과 파랑의 만남각은 선미추파(Follow seas)에서 선미추사파(Quartering seas)를 받는 상황으로 북동 방향으로 항진하는 실험선의 진행 방향에 순행하는 외력을 받고 있는 운항 상황이었다.

Fig. 5-38과 Table 5-22는 앞 절의 실선실험과 동일한 실험 사항으로 제 2차실선실험 항해 구간의 상하가속도의 유의치와 분산치, SPI의 산출 결과 데이터를 시계열 그래프 및 도표로 나타내었다.

제 2차 실험구간에서의 SPI의 최대치는 2013년 3월 22일 3시 30분경에 발생하였다. 이 시기는 풍력계급은 5계급(Fresh breeze), 유의파고는 2m 정도 되는약간의 풍랑이 이는 해상상태이었고, 만남각은 정황파(Beam seas)였다. 계측된상하가속도의 최대 유의치는 0.367g로 작업가능기준치의 기준선 내의 값이었으나, 바람과 파도의 외력이 급격히 거세지고 파향이 선미추사파에서 정횡파로바뀌는 영향으로 SPI는 0.877596으로 높은 값으로 계산되었으며, 생존가능 기준치인 0.8g의 기준보다 높아 실험선의 항해안전성에 있어서 위험에 주의 및 대비해야할 상태를 맞았다. 이에 따라 실험선의 선장이 취한 조치 사항으로 선속감속 및 변침을 하여 선박의 안전성을 확보하였다.

Fig. 5-39는 이 당시의 상하가속도 값의 실선 계측을 통해 산출한 SPI를 이용하여 항해안전성을 나타낸 평가도를 나타낸다. 계측시의 선박운항 환경은 선속 11.1kts, 침로 001.7도, 기상 및 해상상태는 풍력계급 5계급에 상응하는 등급이었다. 파도와의 만남각은 065.3도(Beam seas)와 SPI 값은 0.877596을 평가도에 파란색 굵은 선으로 만남각 및 SPI 값을 표시하고 있다.



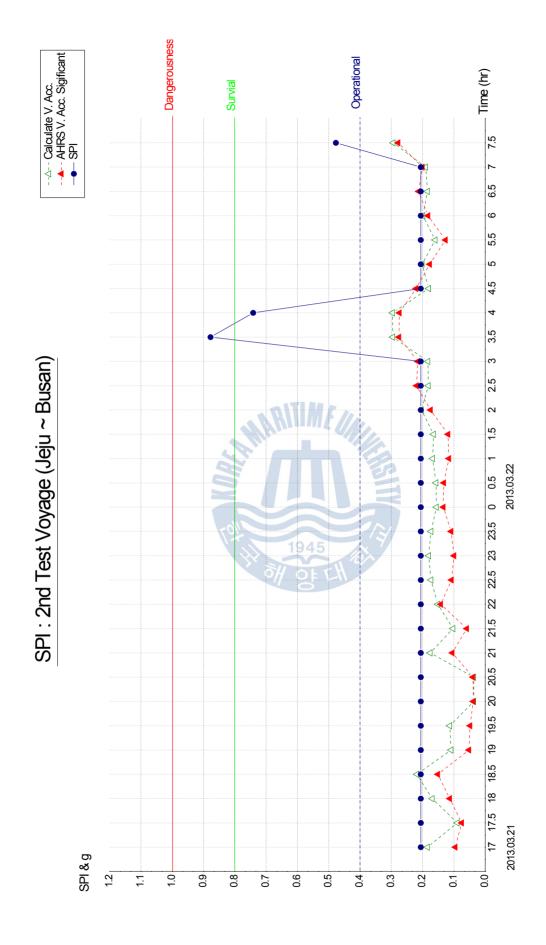


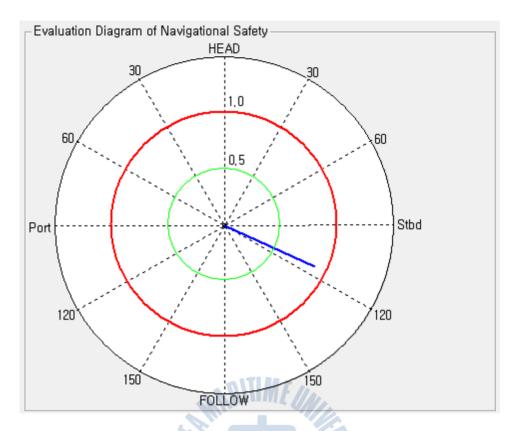
Fig. 5-38 Companison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement (2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22.)



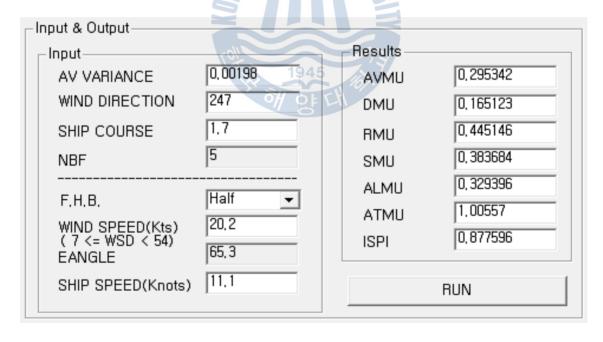
Table 5-22 Calculation Data of SPI (2nd Actual Ship Test, 2013.03.21.~22)

Time	Heading Speed  HDG SOG Dir. B.F. Wa' Heig		Wave	Encounter Angle		Acc. Sensor)	_	ping Perfo			
Time			Wave Height H½(m)	Dir. (Point)	Max (g)	S ½ (g)	V.Acc. Var.	Cal. V.Acc.	SPI		
					Date	: 2013.	03. 21				
17:00	68.7	13.5	W	3	0.6	Follow	0.127	0.095	0.000770	0.184178	0.205699
17:30	68.2	13.6	WNW	2	0.3	quarter	0.100	0.075	0.000180	0.089049	0.205699
18:00	63.0	15.2	W	3	0.6	Follow	0.151	0.113	0.000650	0.169219	0.205699
18:30	62.7	16.2	WNW	4	1.0	quarter	0.202	0.151	0.001080	0.218125	0.205699
19:00	62.8	17.2	WNW	2	0.3	quarter	0.069	0.052	0.000270	0.109062	0.205699
19:30	63.7	18.4	W	0	0.0	Follow	0.065	0.048	0.000290	0.113030	0.205699
20:00	63.5	18.7	SW	1	0.1	Follow	0.051	0.038	0.000030	0.036354	0.205699
20:30	62.8	18.4	WSW	1	0.1	Follow	0.052	0.039	0.000030	0.036354	0.205699
21:00	67.0	13.7	W	3	0.6	Follow	0.140	0.105	0.000700	0.175607	0.205699
21:30	57.0	13.5	WNW	2	0.3	quarter	0.078	0.059	0.000240	0.102825	0.205699
22:00	57.5	13.4	W	3	0.6	quarter	0.189	0.142	0.000520	0.151354	0.205699
22:30	60.2	13.5	W	3	0.6	Follow	0.144	0.108	0.000680	0.173080	0.205699
23:00	58.0	13.3	W	3	0.6	quarter	0.133	0.100	0.000740	0.180555	0.205699
23:30	47.5	13.4	WSW	3	0.6	Follow	0.145	0.109	0.000680	0.173080	0.205699
					Date	: 2013.	03. 22	/¥/			
0:00	44.3	12.9	W	3	0.6	quarter	0.178	0.134	0.000550	0.155659	0.205699
0:30	64.5	13.3	SW	3	0.6	Follow	0.176	0.132	0.000560	0.157068	0.205699
1:00	69.5	12.7	W	3	0.6	Follow	0.155	0.116	0.000640	0.167912	0.205699
1:30	46.3	12.8	WSW	3	0.6	Follow	0.158	0.119	0.000620	0.165268	0.205699
2:00	36.3	12.7	WSW	4	1.0	quarter	0.233	0.175	0.000940	0.203496	0.205699
2:30	29.8	12.8	WSW	4	1.0	quarter	0.293	0.220	0.000750	0.181771	0.205699
3:00	22.0	13.2	WSW	4	1.0	quarter	0.287	0.215	0.000760	0.182978	0.205699
3:30	1.7	11.1	WSW	5	2.0	Beam	0.367	0.275	0.001980	0.295342	0.877596
4:00	168.0	9.0	WSW	5	2.0	Beam	0.365	0.274	0.001990	0.296087	0.741297
4:30	204.7	10.1	WSW	4	1.0	Bow	0.295	0.221	0.000740	0.180555	0.205699
5:00	219.5	10.0	WSW	4	1.0	Bow	0.236	0.177	0.000920	0.201320	0.205699
5:30	39.0	11.3	WSW	3	0.6	quarter	0.169	0.127	0.000580	0.159848	0.205699
6:00	34.2	11.9	WSW	4	1.0	Follow	0.244	0.183	0.000900	0.199120	0.205699
6:30	16.0	11.6	WSW	4	1.0	quarter	0.284	0.213	0.000770	0.184178	0.205699
7:00	28.5	14.1	WSW	4	1.0	quarter	0.267	0.200	0.000820	0.190064	0.205699
7:30	299.3	8.3	WSW	5	2.0	Beam	0.371	0.278	0.001960	0.293847	0.476896





(a) Evaluation Diagram



(b) Calculation Input & Output Data for SPI

Fig. 5-39 Evaluation of Navigation Safety using SPI (2nd Actual Ship Test, 2013.03.22. 03:30 KST)



### (3) 제 3차 실선실험의 항해안전성 평가 분석 및 결과

제 3차 실선실험의 [목포 ~ 부산] 구간에서는 기상 및 해상 상태가 E ~ NE 계열의 풍향이었고, 유의파고는 1 ~ 3미터의 파고, 실험선과 파랑의 만남각은 선수정향파(Head seas)에서 선수사파(Bow seas)를 받는 상황으로 북동 방향으로 항진하는 실험선의 진행 방향에 역행하는 외력을 받고 있는 선박 운항 상황이었다.

Fig. 5-40과 Table 5-23은 앞 절의 실실선실험과 동일한 실험 사항으로 제 3차 실선실험 항해 구간의 상하가속도의 유의치와 분산치, SPI의 산출 결과 데이터를 시계열 그래프 및 도표로 나타내었다.

제 3차 실험구간에서의 SPI의 최대치는 2014년 3월 19일 18시경에 발생하였다. 이 시기는 풍력계급이 5계급(Fresh breeze), 유의파고는 2m 정도 되는 약간의 풍랑이 이는 해상상태이었고, 만남각은 선수정향과(Head seas)였다. 계측된상하가속도의 최대 유의치는 0.369g로 ITTC에서 규정하는 작업가능기준치의기준선 내의 값이었으나, SPI는 0.755347으로 높은 값으로 계산되어 안전 SPI기준인 0.5 보다 높으므로 실험선의 항해안전성에 있어서 위험에 주의 및 대비해야 할 상태를 맞았다. 이 경우에도 앞선 실험에서와 같이 실험선의 선장은선체의 동요가 발생함에 따라 조치 사항으로 선속 감속 및 변침을 하여 선박의안전성을 확보하였다.

Fig. 5-41은 이 당시의 상하가속도 값의 실선 계측을 통해 산출한 SPI를 이용하여 항해안전성을 나타낸 평가도를 나타내며, 계측시의 선박운항 환경은 선속 18.0kts, 침로 097.0도, 기상 및 해상상태는 풍력계급 5계급에 상응하는 등급이었다. 파도와의 만남각은 165.0도(Head seas)와 SPI 값 0.755347을 평가도에 파란색 굵은 선으로 만남각 및 SPI 값을 표시하고 있다.



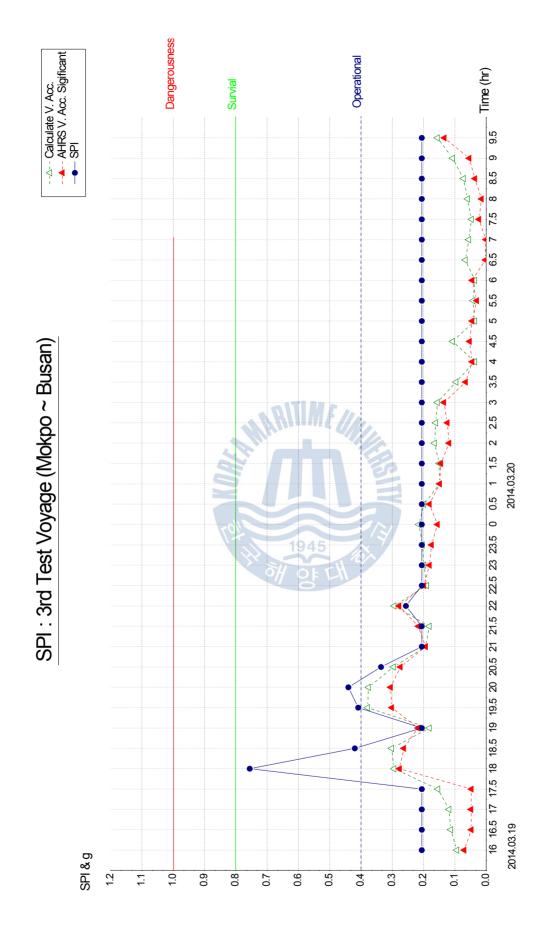


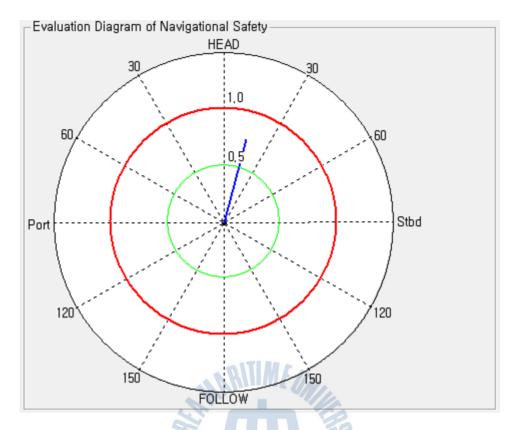
Fig. 5-40 Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20.)



 $\textbf{Table 5-23} \ \ \textbf{Calculation Data of SPI (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19.~20)}$ 

Time	Ship Heading	Ship Speed	Wind(True)		Wave	Encounter Angle		Acc. Sensor)	_	ping Perfo		
Time	HDG	SOG	Dir.	Dir. B.F.		Dir.	Max	S 1/3	V.Acc.	Cal.	CDI	
	(Deg.)	(Kts)	(Point)	Scale	0.3	(Point)	(g)	(g)	Var.	V.Acc.	SPI	
					Date	: 2014.	03. 19					
16:00	214.70	12.30	NNW	2	0.3	quarter	0.094	0.070	0.000200	0.093866	0.205699	
16:30	175.30	15.10	NW	2	0.3	quarter	0.063	0.047	0.000290	0.113030	0.205699	
17:00	204.50	15.70	W	2	0.3	Beam	0.065	0.048	0.000320	0.118732	0.205699	
17:30	184.50	18.10	NW	2	0.3	quarter	0.063	0.047	0.000540	0.154237	0.205699	
18:00	97.00	18.00	ESE	5	2.0	Head	0.369	0.277	0.001970	0.294595	0.755347	
18:30	144.20	16.80	Е	5	2.0	Bow	0.351	0.263	0.002070	0.301980	0.419801	
19:00	133.70	16.80	Е	4	1.0	Bow	0.291	0.218	0.000750	0.181771	0.205699	
19:30	85.20	13.20	Е	6	3.0	Head	0.402	0.301	0.003260	0.378967	0.408881	
20:00	84.30	9.90	Е	6	3.0	Head	0.407	0.305	0.003210	0.376050	0.440360	
20:30	85.30	10.80	Е	5	2.0	Head	0.365	0.274	0.001990	0.296087	0.335964	
21:00	86.20	14.40	Е	4	1.0	Head	0.258	0.194	0.000850	0.193510	0.205699	
21:30	87.00	15.30	Е	4	1.0	Head	0.289	0.217	0.000750	0.181771	0.205699	
22:00	89.30	15.30	Е	5	2.0	Head	0.371	0.278	0.001960	0.293847	0.256444	
22:30	79.70	14.80	Е	4	1.0	Head	0.265	0.199	0.000820	0.190064	0.205699	
23:00	71.80	11.10	ENE	4	1.0	Head	0.242	0.181	0.000900	0.199120	0.205699	
23:30	73.20	10.70	ENE	4	1.0	Head	0.233	0.175	0.000940	0.203496	0.205699	
					Date	: 2014.	03. 20					
0:00	75.50	11.20	ENE	4	1.0	Head	0.207	0.155	0.001050	0.215074	0.205699	
0:30	76.50	11.60	ENE	4	1.0	Head	0.242	0.181	0.000900	0.199120	0.205699	
1:00	71.70	11.90	NE	3	0.6	Bow	0.198	0.149	0.000500	0.148415	0.205699	
1:30	75.30	12.30	NNE	3	0.6	Bow	0.193	0.145	0.000510	0.149892	0.205699	
2:00	69.50	12.40	NNE	3	0.6	Bow	0.158	0.119	0.000620	0.165268	0.205699	
2:30	59.80	12.80	NNE	3	0.6	Bow	0.165	0.124	0.000590	0.161220	0.205699	
3:00	29.70	12.70	N	3	0.6	Bow	0.180	0.135	0.000550	0.155659	0.205699	
3:30	19.80	10.60	NNE	2	0.3	Head	0.088	0.066	0.000210	0.096184	0.205699	
4:00	359.00	5.40	N	1	0.1	Head	0.060	0.045	0.000030	0.036354	0.205699	
4:30	55.70	1.00	NNW	2	0.3	Beam	0.071	0.053	0.000260	0.107024	0.205699	
5:00	37.50	0.30	NW	1	0.1	Beam	0.060	0.045	0.000030	0.036354	0.205699	
5:30	24.00	0.00	NNW	1	0.1	Bow	0.040	0.030	0.000040	0.041978	0.205699	
6:00	351.80	0.10	NW	1	0.1	Head	0.060	0.045	0.000030	0.036354	0.205699	
6:30	3.20	0.40	S	0	0.0	Follow	0.003	0.002	0.000100	0.066373	0.205699	
7:00	1.30	0.40	N	0	0.0	Head	0.002	0.001	0.000070	0.055532	0.205699	
7:30	79.70	12.40	SW	1	0.1	Follow	0.031	0.023	0.000050	0.046933	0.205699	
8:00	59.50	12.20	S	1	0.1	Beam	0.020	0.015	0.000080	0.059366	0.205699	
8:30	50.20	11.90	ENE	1	0.1	Head	0.048	0.036	0.000120	0.072708	0.205699	
9:00	50.30	14.60	N	2	0.3	Bow	0.072	0.054	0.000260	0.107024	0.205699	
9:30	55.50	14.90	NNW	3	0.6	Beam	0.178	0.134	0.000550	0.155659	0.205699	





(a) Evaluation Diagram

_Input & Output———			
_Input—	1945	Results —	
AV VARIANCE	0,00197	AVMU	0,294595
WIND DIRECTION	112	DMU	0, 297954
SHIP COURSE	97	RMU	0,696512
NBF	5	SMU	0,649848
	Half 🔻	ALMU	0,0547358
F,H,B,	20.3	ATMU	0,824308
WIND SPEED(Kts) ( 7 <= WSD < 54)	165	ISPI	0, 755347
EANGLE			
SHIP SPEED(Knots)	18		RUN

(b) Calculation Input & Output Data for SPI

Fig. 5-41 Evaluation of Navigation Safety using SPI (3rd Actual Ship Test, 2014.03.19. 18:00 KST)



#### (4) 제 4차 실선실험의 항해안전성 평가 분석 및 결과

제 4차 실선실험의 [진해 ~ 부산] 구간에서는 기상 및 해상 상태가 SE ~ SW 계열의 풍향이었고, 유의파고는 1미터 이하의 파고, 실험선과 파랑의 만남 각은 정횡파(Beam seas)에서 선미추사파(Quartering seas)를 받는 상황으로 북동 방향으로 항진하는 실험선의 진행 방향에 순행하는 외력을 받고 있는 선박운항 상황이었다.

Fig. 5-42와 Table 5-24는 앞 절의 실실선실험과 동일한 실험 사항으로 제 4차 실선실험 항해 구간의 상하가속도의 유의치와 분산치, SPI의 산출 결과 데이터를 시계열 그래프 및 도표로 나타내었다.

제 4차 실험구간에서의 SPI의 최대치는 4월 5일 14시경에 발생하였다. 이 시기는 풍력계급이 3계급(Gentle breeze), 유의파고는 0.6m 정도 되는 보통의 해상상태이었고, 만남각은 정횡파(Beam seas)였다. 계측된 상하가속도의 최대 유의치는 0.182g로 작업가능기준치의 기준선 내의 값이었고, SPI는 0.205699으로 안전 SPI 기준인 0.5 보다 이하에 있어 실험선의 항해안전성은 안전한 것으로 판별되었다. 이번 실험은 전 항해 구간이 기상 및 해상이 평온한 상태이어서 SPI는 최저값으로 산출되었다.

Fig. 5-43은 이 당시의 상하가속도 값의 실선 계측을 통해 산출한 SPI를 이용하여 항해안전성을 나타낸 평가도를 나타내며, 계측시의 선박운항 환경은 선속 13.0kts, 침로 090.7도, 기상 및 해상상태는 풍력계급 3계급에 상응하는 등급이었다. 파도와의 만남각은 119.7도(Head seas)와 SPI 값 0.205699를 평가도에 파란색 굵은 선으로 만남각 및 SPI 값을 표시하고 있다.



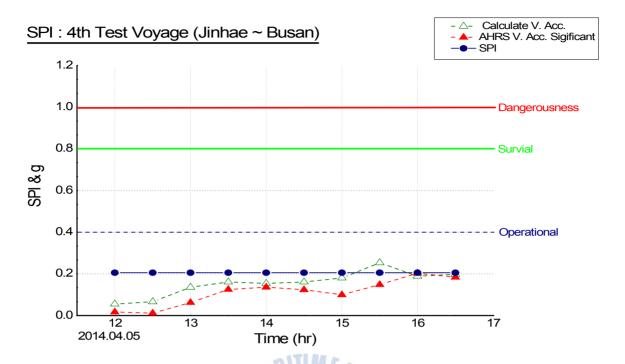
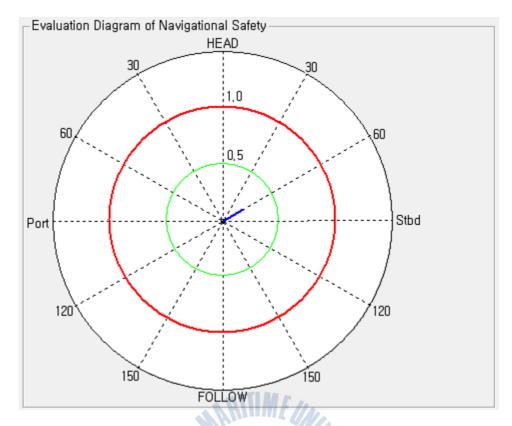


Fig. 5-42 Comparison of SPI & Vertical Acceleration by Measurement (4th Actual Ship Test, 2014.04.05)

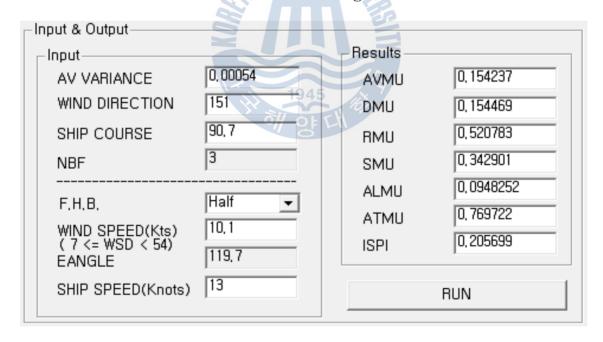
Table 5-24 Calculation Data of SPI (4th Actual Ship Test, 2014.04.05)

Time	Ship Heading	Ship Speed	- I Windiarije)		Wave	Encounter Angle		Acc. Sensor)	Seakeeping Performance Caculation			
Time	HDG (Deg.)	SOG (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Wave Height H <sup>1</sup> / <sub>3</sub> (m)	Dir. (Point)	Max (g)	S ½ (g)	V.Acc. Var.	Cal. V.Acc.	SPI	
12:00	50.7	1.1	SW	1	0.1	Follow	0.023	0.017	0.000070	0.055532	0.205699	
12:30	168.5	1	N	1	0.1	Follow	0.015	0.012	0.000100	0.066373	0.205699	
13:00	61.2	10.9	WNW	0	0.0	quarter	0.070	0.063	0.000420	0.136025	0.205699	
13:30	122	11.1	SSE	3	0.6	Bow	0.167	0.125	0.000590	0.161220	0.205699	
14:00	90.7	13	SSE	3	0.6	Beam	0.182	0.136	0.000540	0.154237	0.205699	
14:30	90.5	13.1	S	3	0.6	Beam	0.165	0.124	0.000590	0.161220	0.205699	
15:00	65.3	13.7	SSW	3	0.6	quarter	0.133	0.100	0.000740	0.180555	0.205699	
15:30	359	12.6	SSW	4	1.0	quarter	0.179	0.148	0.001460	0.253612	0.205699	
16:00	293.7	11.5	ENE	4	1.0	quarter	0.271	0.203	0.000810	0.188901	0.205699	
16:30	10.2	1.1	Е	4	1.0	Beam	0.245	0.184	0.000890	0.198010	0.205699	





(a) Evaluation Diagram



(b) Calculation Input & Output Data for SPI

Fig. 5-43 Evaluation of Navigation Safety using SPI (4th Actual Ship Test, 2014.04.03. 14:00 KST)



## 제 6 장 결론

본 논문에서는 ICT 융합 기술을 접목한 AHRS 센서 기반의 선체운동모니터링 시스템 개발을 통한 항해중인 실선의 선체운동을 실시간으로 계측하여 내항성 능지표에 의한 항해안전성평가시스템 개발을 위한 연구를 수행하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 파랑 중을 항해하고 있는 선박의 실제적인 항해안전성을 효과적으로 평가하기 위하여 기존 선체운동 계측에 사용되고 있는 고가의 고정밀 가속도계를 대체할 수 있는 MEMS형 저가의 범용 관성센서인 AHRS 센서를 사용한선체운동모니터링시스템을 개발하였다. 이 시스템을 선박에 탑재하여 내항성능평가요소 주요소인 상하가속도를 실시간 계측하여 데이터베이스화하였다. 이 선체운동 데이터를 분석 및 해석한 내항성능지표를 적용하여 선박의항해안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 항해안전성평가시스템을 개발하였다.
- (2) 본 연구에서 구현한 AHRS 센서 기반의 선체운동모니터링시스템은 항해안 전성 평가의 주요 평가 요소인 횡동요(Rolling), 종동요(Pitching)의 회전 운동과 상하가속도(Vertical Acceleration) 값을 계측함에 있어, 모형 수조 실험과 실제 해상에서 파랑을 직접 받는 실선에서 실험한 결과 충분한 정확성과 신뢰도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다.



- (3) 항해 및 운항 정보 디지털 데이터의 실시간 취득 처리는 기존의 평가 처리 방식이었던 항해사가 수기로 기록하는 갑판로그북 기록 위주의 운항 실적 에 의한 평가 기초 자료 수집 방법을 개선하였다. 이런 개선된 시스템을 적 용하여 실시간 내항성능 지표 산출을 위한 정도 높은 운항정보 데이터의 체계적인 데이터베이스화로 항해안전성 평가의 처리 프로세스를 고도화 시 켰으며, 그 동안의 관련 분야에서의 기초 입력 데이터의 불명확성 문제의 해결 및 운항데이터의 자동처리를 통하여 연구를 실용화시켰다.
- (4) ICT 융합 기술을 접목한 선체운동모니터링시스템에 유선 및 무선 데이터 전송처리 시스템을 접목시킴으로써 선박의 제한된 환경 요건에서도 다양한 방법으로 계측 센서의 설치가 가능하도록 하였다. 이 시스템을 사용하여 선박의 여러 위치에서 선체운동을 계측할 수 있어 실무적으로 편리하게 적용시킬 수 있는 방안을 마련하였다.
- (5) 국제해사기구(IMO)에서 2012년도에 전자 경사계의 성능 기준이 채택되었다. 이 장비를 통해 횡요주기 및 경사각의 디지털 데이터를 항해자에게 제공하고 항해기록장치(VDR: Voyage Data Recorder)에 기록하는 국제 규정이 발효되었다. 본 연구에서 개발된 AHRS 기반의 선체운동모니터링시스템은 횡요와 종요의 경사각과 주기 등의 여러 요소를 계측할 수 있는 전자 경사계의 기능도 수행할 수 있다. 이 개발 장비를 사용하여 실선실험을 수행한 결과 검증된 고정밀 전자 경사계 개발 기술을 확보하였다. 또한, MEMS형 AHRS를 사용한 선체운동모니터링시스템 개발 기술을 응용한 관련 여러 목적으로 활용할 수 있는 기반 기술의 토대를 마련하였다.

향후 계속되어야 할 연구과제로는 해상 통신의 환경이 개선되어감에 따라 실시간 선체운동 계측에 따른 항해안전성 평가 시스템에 부가하여 해상 및 기상



정보 서비스의 실시간 연계가 필요하다. 항해안전성 평가 시스템을 기상 정보 와의 연동에 의한 24시간 또는 48시간 이후의 선박 운항 상태를 예측하여 최적 의 선박 안전과 효과적인 연료 절감 운항을 위한 정보 서비스의 제공에 따른 최적 항로 선정에 대한 개발이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구에 적용한 MEMS형 소형 관성센서인 AHRS는 향후 Hull stress monitor, Loading master, Electronic inclinometer, VDR 등에 기초 장비로 적용될 것으로 전망된다. 이 기술은 ICT 융합 기술이 접목된 e-Navigation 체계에서 여러 선박 안전시스템 관련 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.





## 참고 문헌

- [1] 湯淺通史, 1982. 9. 船體監視システムの役割とその適用について, 日本造船 *學會論文集*, 第186号, pp.341-351
- [2] 山口雄三, 内藤 林, *大洋航行の自動化*, 日本造船學會 運動性能研究委員會 第8回シンポジウム 第2章 p.29
- [3] 小瀬邦治·上田一郎, 平成5年7月. 船舶の運航技術の課題, 日本造船 學會誌, 第769号
- [4] L. von Breda, 1990. 6. Ship Control with Electric Chart and Path Prediction, MARSIM & ICSIM symposium
- [5] Torben Munk, 1993. 7. Integrated Bridge of the Ditlev Lauritzen, Techno marine
- [6] K. Paetow, 1991. 7. Ship of the Future, Marine Technology
- [7] 日下清彦, 1989. 高信賴度知能化船(そ6の) 最適航路計劃システム, *日本造船學會誌*, 第723號
- [8] 박문수, 1994. 선박종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구, 석사학위논 문, 부산:한국해양대학교대학원
- [9] 조익순, 2000. 船舶搭載用 綜合耐航性能 評價시스템 開發을 위한 基礎的 研究, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원
- [10] 金順甲, 1987. 선박의 파랑중 내항성능 평가에 관한 연구, *한국항해학회* 지, 제11권, 제1호, pp.67-91
- [11] 김순갑, 이충로, 공길영, 2001. 선박의 종합내항성능 평가정보제공시스템 개발에 관한 연구, *한국항해학회지*, 제25권 3호, pp.247-256
- [12] 細田龍介·小山初見 等, 1983. 5. 船舶の初期設計における耐航性能の綜合的 評價に關する研究(第1報), 日本造船學會集, 第153号



- [13] 細田龍介·小山初見 等, 1983. 11. 船舶の初期設計における耐航性能の綜合的評價に關する研究(第2報), 日本造船學會集, 第154号
- [14] Comstock E.N.:Keane R.G., 1980. 4. Seakeeping by Design, *Naval Engineers Journal*, Vol. 92, No. 2
- [15] Comstock E.N.·Bales S. L.·Keane R.G., 1980. 6. Seakeeping in Ships Operations, Proc. 5th SNAME STAR Symp.
- [16] Murdey D.C., 1979. 6. Experiment Techniques for The Prediction of Ship Seakeeping Performance, Proc. Int. Symp. on Advances in Marine Technology, Vol.1
- [17] Heeyong Lee, Gilyong Kong, Sihwa Kim, Taechul Lee, 2002. Optimum Ship Routing and It's Implementation on the Web, *LNCS*, 2402권(집), PP. 125-136
- [18] 細田龍介·國武吉邦, 昭和61年8月. 耐航性能の綜合評價, 日本造船學會誌, 第686号
- [19] 田才福造·高木又男,昭和44年7月. 規則波中の応答理論および計算法, 日本 造船學會, 耐航性に關するシンボジウム
- [20] 高石敬史·高利伊三夫·宮本武,昭和59年12. ストリップ法計算の比較と解析, 日本造船學會,運動性能研究委員會第1回シンボジウム
- [21] 溝口純敏, 昭和61年5月. ストリツプ法その周邊, *日本造船學會誌*, 第61年5月
- [22] 김순갑, 공길영, 1997. 6. 선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구, 한국항해학회지, 제21권 제2호
- [23] 공길영, 1992. 安全空間 設定에 의한 船舶 耐航性能의 評價시스템 開發에 관한 研究, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원
- [24] 공길영, 1997. *船舶의 耐航性能指標에 의한 航海 安全性 評價*, 박사학위 논문, 부산:한국해양대학교대학원
- [25] Kong.G.Y, Lee. C.R, Kim.S.K, 2002.8 On the Development of an Information Service System for Navigational Safety of Seagoing Vessels, *LNCS 2402*, pp.273-283
- [26] 김병진, 2006. 선체가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템 개발, 박사학 위논문, 부산:한국해양대학교대학원



- [27] 유주연,박근철,전아영,김철한,김윤진,노정훈,전계록, 2011. 3축 가속도 센서 기반의 무선 진동 측정 시스템, *한국센서학회지*, 제20권 2호, pp.131-136, 2011
- [28] 노형석,김윤경,조위덕, 2011. 3축 가속도 센서를 이용한 실시간 활동량 모니터링 알고리즘, 정보처리학회논문지, 18-D권 2호, pp.143-148, 2011
- [29] 김영균,이기룡,백운혁,송봉섭,홍석교, 2006. 무선 센서 네트워크를 이용한 차량의 피치/롤 예측 알고지듬 개발, *한국자동차공학회 ITS부문 Symposium*, pp.46-51
- [30] Ying-Chih Lai, Shau-Shiun Jan, Fei-Bin Hsiao, 2010.10. Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform, *Sensors*, pp.2472-2491
- [31] 김성철,채영호, 2012.1. MEMS IMU(관성), 압력, 장력 센서 입력을 이용한 승마 시뮬레이션 시스템의 실시간 영상 제어, 한국HCI학회 2012년 학술 대회, pp.227-229
- [32] 황종현,백동현,홍성경,조현진,김삼수, 2008.10. MEMS 관성센서를 이용한 무인수중운동체의 통합자세제어기 설계 연구, 2008년 제어자동화시스템 심포지엄 논문집, pp.368-373
- [33] 유은실,신규식,조남규,박정호,이대성, 2008. 7. MEMS 기술을 이용한 초소형 풍향 풍속 센서, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.16-18,
- [34] 황아롬,윤선일,김문환, 2012. 5. MEMS 자세 측정 센서 적용 고속 무인 잠수정 자동 조타 기법 검증, 한국해양환경·에너지학회 학술대회논문집, pp.1234-1237
- [35] 공형직,박성수,김해동, 2007.11. MEMS 자이로스코프 개발 및 성능시험, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.1130-1133
- [36] 김영민, 2003. 5. 자동차에서의 MEMS 센서의 활용, *한국자동차공학회 Symposium*, pp.9-9
- [37] 송진우, 장현기, 이정환, 안시홍, 정학영, 2004. 12. MEMS 관성센서를 이용한 3차원 스마트 입력장치 설계, 한국정보기술학회 한국정보기술학회 지, 2(1), pp. 63-68
- [38] 송기무, 2010. 11. MEMS 가속도센서를 이용한 경사도 측정장치, *전력전* 자학술대회논문집, pp. 40-43
- [39] 권상욱, 원종화, 2005. 11. MEMS 기술을 이용한 온도, 압력, 습도 복합센서, *대한전자공학회, 전자공학회논문지-SD*, 42(11), pp.1-8



- [40] 최훈, 배현덕, 2012. 6. MEMS형 가속도 센서를 이용한 지진 데이터 취득 시스템의 설계 및 구현, *대한전기학회 전기학회논문지*, 61(6), pp.851-858
- [41] 나종기,이종출,차성렬,백기석, 2004. 10. AHRS을 이용한 자세결정과 Heading 산출을 위한 연구, *대한토목학회 학술대회*, pp. 3494-3499
- [42] 권승태,송진우,홍진석,유근복,사공병춘, 2005. 10. MEMS 센서를 이용한 GPS/AHRS 결합 항법 시스템 설계 및 비행평가, 제어로봇시스템학회 국 내학술대회 논문집, 34, pp.509-514
- [43] 황서영,이현,한종호,이장명, 2011. 7. 이동하는 물체의 자세와 위치를 추정하기 위한 다중 필터 적용 관성 항법 시스템, 제어로봇시스템학회 각 지부별 자료집, 12, pp.13-16
- [44] 조암, 강영신, 박범진, 유창선, 구삼옥, 노희권, 기창돈, 2012. 11. 관성센서 바이어스를 고려한 쿼터니언 기반 AHRS, 한국항공우주학회 학술발표 회 논문집, pp.2066-2070
- [45] 조수장, 방효충, 2011. 4. 각속도 변화를 고려한 쿼터니언 전파법 및 칼만 필터 적용, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp. 1150-1155
- [46] 신진옥, 홍대희, 2006. 10. 쿼터니언을 이용한 소형 자세센서의 개발과 자세 오차 보정, 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp.87-88
- [47] 高木乾雄, 1992. 運動性能の研究動向-耐航性に關する研究-, *日本造船學會誌*, 第756号, pp.54-57
- [48] 溝口純敵, 1993. 運動性能の研究動向-耐航性に關する研究-, 日*本造船學會誌*, 第774号, pp.33-37
- [49] 齋藤公男, 1995. 運動性能の研究動向-耐航性に關する研究-, *日本造船學會誌*, 第788号, pp.35-40
- [50] 平山次清, 1996. 運動性能の研究動向-耐航性に關する研究-, 日本造船學會誌, 第808号, pp.45-51
- [51] 内藤 林, 1998. 7. 耐航性における非線型問題, 日本造船學會紙, 829號
- [52] 影本 浩, 1991. 1. 耐航性に關するCFDの現狀, 日本造船學會紙, 835號
- [53] 공길영, 김철승, Hiroyuki Sadakane, 2002. 선회중 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 연구 (1), *한국항해항만학회지*, 제26권 1호, pp.1-7
- [54] 김순갑, 1990. 6. 선박의 풍파중 항해능력 및 추진성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제14권 제2호, pp.15-31



- [55] 김순갑, 공길영, 1992. 안전공간 설정에 의한 선박 내항성능의 평가시스 템 개발에 관한 연구, 韓國航海學會誌, 16(1), pp.14-35
- [56] 김순갑·김병진·이충로, 1993. 8. 벌크선의 적화상태에 따른 항해안전성 평가에 관한 연구, 해사산업연구소
- [57] 김순갑·박문수·공길영, 1994. 선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제18권, 제2호, pp.69-79
- [58] 김순갑, 이상민, 이충로, 1998. 2. 실시간 기상정보를 이용한 선박의 종합 내항성능 평가에 관한 연구, *한국항해학회지*, 제22권 제2호, pp.23-32
- [59] 김순갑,김정만,공길영, 1998. 7. 선박의 적화 상태별 종합내항성능지표에 의한 항해 안전성 평가, *해양환경안전학회지*, 4(2), pp.43-52
- [60] Bruce L Hutchison, 2002. 12. Joint Seakeeping Response Processes for Determining Structural Loads, *Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.110, pp.189–214
- [61] Robert F.Beck and Arthur M.Reed, 2001. 12. Modern Computational Methods for Ships in a Seaway, *Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.109, pp.1–52
- [62] Paul D.Sclavounos and Henning Borgen, 2004. 6. Seakeeping Analysis of a High Speed Monohull with a Motion-Control Bow Hydrofoil, *Journal of Ship Research*, Vol. 48, No.2, pp.77-117
- Y.S.Shin, V.L.Belenky, W.M.Lin, K.M.Weems, W.F.Belknap and A.H.Engle, 2004.
   Nonlinear Time Domain Simulation Technology for Seakeeping and Wave-Load Analysis for Modern Ship Design, Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.111, pp.557-578
- [64] C.Maury, G.Delhommeau, M.Ba, J.P.Boin and M.Guilbaud, 2004. 12. Comparison between Numerical Computations and Experiments for Seakeeping on Ship Models with Forward Speed, *Journal of Ship Research*, Vol. 48, No.4, pp.347–364
- [65] 공길영, 김철승, 2001. 황천항해중인 선수선교선의 내항성능평가기준 설정 방안에 관한 연구, 한국해양환경안전학회지, 제7권 3호, pp.17-27
- [66] 한국해양연구소, 2002, 선박의 내항성능지표 개발에 관한 연구, 부산:한국 해양대학교 해사산업연구소
- [67] 조현기, 2000. 항해중인 벌크선의 실시간 종합내항성능 평가를 위한 선형 데이터베이스 구축에 관한 연구, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원



- [68] 정창현, 2003, 한국 연안 해역을 항해하는 선박의 안전성 평가에 관한 연구, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원
- [69] 김영두, 2005, VDR 성능 향상을 위한 항해위험도 평가 기술의 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원
- [70] 조익순,이충로,김순갑, 2000. 선박 탑재용 종합내항성능 평가시스템 개발을 위한 기초적 연구, 한국항해학회지, 제20권 제2호
- [71] 공길영, 이상민, 김철승, 2004. 선박 탑재형 내항성능 평가시스템 개발 (1), 한국항해항만학회지, 제28권 1호, pp.1-8
- [72] 김철승,이윤석,공길영,정창현,김대해,조익순, 2005. 선체운동 평가를 위한 다목적 계측시스템 개발에 관한 연구, 한국항해항만학회지, 제29권 제10호
- [73] 김대해, 2006. 항해중인 선박의 내항성능평가를 위한 선체운동계측시스템 개발, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원
- [74] 정창현, 이형기, 이윤석, 2007. 실습선 한바다호의 운항성능에 관한 연구 (I) -선체감시장치(HMS) 계측 데이터를 이용한 내항성능 평가, *한국항해항 만학회지*, 31(10), pp.905-910
- [75] (주)토탈소프트뱅크, 2003, 선박탑재형 내항성능 평가시스템 개발에 관한 연구, 부산:한국해양대학교 해사산업연구소
- [76] Priyanka A., Zainab S., Aboelmagd N. and Naser E. S., 2010. MEMS-Based Integrated Navigation, Artech House, Norwood, MA.
- [77] 유은실, 신규식, 조남규, 박정호, 이대성, 2008. 7. MEMS 기술을 이용한 초소형 풍향 풍속 센서, *대한전기학회 학술대회 논문집*, pp.1468-1469
- [78] 양훈철, 송철화, 김무환, 2004. 4. *MEMS를 이용한 미세 열유속센서의 개발*, 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 1364-1369
- [79] 노용래, 2001. MEMS 기술을 이용한 마이크로 음향센서, *소음진동*, 11(6), pp.660-666
- [80] 박세광, 김태송, 2000. 12. *MEMS 기술을 이용한 감지 및 제어기의 기술 동향*, 대한전기학회, 전기의세계 49(12)
- [81] Zhu, R., Sun, D., Zhou, Z. and Wang, D., 2007. A Linear Fusion Algorithm for Attitude Determination Using Low Cost MEMS-Based Sensors, *Measurement*, Vol. 40, No. 3, pp. 322–328.
- [82] 송기무, 이진우, 2006. 7. *2축 MEMS 가속도 센서를 이용한 2차원 디지털 경사계*, 대한전기학회, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 1619-1620



- [83] 황종현, 백동현, 홍성경, 조현진, 김삼수, 2008. 10. MEMS 관성센서를 이용한 무인수중운동체의 통합자세제어기 설계 연구, 제어로봇시스템학회국내학술대회 논문집 37, 368-373
- [84] 허오철, 최군호, 박기헌, 2010. 저가형 MEMS 센서를 이용한 움직이는 물체의 자세 추정, *반도체디스플레이기술학회지* 9(2), pp. 41-47
- [85] 홍진석,김성중,정학영,이현철, 2004. *MEMS 센서를 이용한 GPS/AHRS 결합 항법 시스템 설계 및 평가*, 한국항공운항학회 학술발표대회자료, pp. 302-307
- [86] 허근섭, 배기만, 이상룡, 이춘영, 2010. 6. 가속도센서를 이용한 운전패턴 인식기법 , 제어로봇시스템학회, 제어로봇시스템학회 논문지 16(6), pp.517-523
- [87] Robin B. Miller, 1983. A New Strapdown Attitude Algorithm, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.6, No4, pp.287–292
- [88] M.B. Inagni, 1990. Optimal Strapdown Attitude Integration Algorithms, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.13, No.2, pp.363-369
- [89] Paul G. Savage, 1998, Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.21, No.1,pp.19–28
- [90] Paul G. Savage, 1998. Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 2: Velocity and Position Algorithms, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.21, No.2, pp.208–221
- [91] 김용호, 2005, *MEMS 센서를 이용한 무인항공기용 자세측정장치의 특성에 대한 연구*, 석사학위논문, 인천:인하대학교대학원
- [92] 김종철외 10명, 2000. 8. *관성항법 및 위성항법 시스템 기술연구개발*, 한 국항공우주연구소
- [93] 박찬국, 1999. 4. *관성항법시스템의 원리 및 전망*, 대한전자공학회, 전자 공학회지. 26(4), pp.59-66
- [94] 박찬국, 김광진, 박흥원, 이장규, 1996. 10. 스트랩다운 관성항법시스템의 초기 개략정렬 알고리즘, 제어로봇시스템학회 국내학술대회 논문집 21, pp. 856-859
- [95] 김종혁, 문승욱, 이시호, 김세환, 황동환, 이상정, 나성웅, 2000. 2. 스트랩 다운 관성항법시스템의 초기정렬 알고리즘 구현, 제*어로봇시스템학회 논문지 6(2)*, pp. 138-145



- [96] H. Kim, C. Park, 2008, Quaternion-based Heading Estimation Algorithm for AHRS, *Spring KSAS Conference*
- [97] 박찬국 외, 1997, 항공우주 제어 기술 특집 관성항법장치 기술, *제어* 자동화시스템공학회지 제3권 제2호
- [98] 이상철, 유태석, 홍성경, 2011. 11. 최소 자승법을 이용한 MEMS IMU의 확정적 오차 동시 보정 기법, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.1094-1097
- [99] David H. Titterton, John L. Weston, 2004. *Strapdown Inertial Navigation Technology*, 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, UK
- [100] S.K.Hong, 1999. Compensation of Nonlinear thermal Bias drift of Resonant Rate Sensor using Fuzzy logic, Sensors and Actuators A-Physical, 78(2), pp.143-148
- [101] S.K. Hong, Sungsu Park, *Minimal-Drift Heading measurement using a MEMS Gyro for indoor mobile robot*
- [102] J M De Freitas, J P FWooler and P J Nash, 2006. Measurement of sensor axis misalignment infibre-opticaccelerometers, *Meas.Sci.Technol.* 17, pp.1819-1825
- [103] Z F Syed, P Aggarwal, C Goodall, X Niu and N EI-sheimy, A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation system
- [104] A.B. Chatfield, 1997. Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA
- [105] G M. Siouris, 1993. Aerospace Avionics Systems, Academic Press
- [106] D.H. Titterton and J.L. Weston, 1997. Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd.
- [107] Wikipedia, Axes conventions [Online] <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/">http://en.wikipedia.org/wiki/</a> Axes\_conventions [Accessed 18. Mar. 2013]
- [108] 송기원, 전창배, 김현백, 1993. 10. 스트랩다운 관성항법장치의 각을 이용한 초기전달 정렬기법, 제어로봇시스템학회 국내학술대회 논문집, 1(1), pp. 29-33



- [109] 박찬국, 이장규, 1991. 9. 관성항법장치의 초기정렬을 위한 중복 분해 필터, 한국항공우주학회지, 19(3), pp.65-76
- [110] Y. F. Jiang, 1998. 1. Error analysis of analytic coarse alignment methods, IEEE Trans. *Aerospace and Electronic Systems*, vol.34, no.1, pp.334-337
- [111] Y. F. Jiang and Y. P. Lin, 1992. 1. Error estimation of INS ground alignment through observability analysis, IEEE Trans. *Aerospace and Electronic Systems*, vol.28, no.1, pp.92–97
- [112] 조성윤, 2008. 6. 경사각을 갖는 관성항법시스템 초기 정밀정렬의 오차 분석, 제어로봇시스템학회 논문지, 14(6), pp.595-602
- [113] 함운철, 후렐바타르, 2009. 6. 회전행렬과 쿼터니언에 근거한 비행체 제어기 설계, 한국로봇학회 논문지 4(2), pp.88-96
- [114] 황명신, 박욱제, 2000. 10. 쿼터니언을 이용한 비행운동 모델링, 제어로 봇시스템학회 국내학술대회 논문집 32, pp.1114-1117
- [115] Sven Ronnback, 2000. Development of a INS/GPS navigation loop for an UAV, Lulea Univ. Master's Thesis
- [116] Robert G. Brown and Patrick Y.C. Hwang, 1998. *Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering*, 3rd ed, Wiley, New York
- [117] Arthur Gelb, 1996. Applied Optimal Estimation, MIT Press
- [118] Mohinder S. Grewal and Angus P. Andrews Navtech, 2001. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, 2<sup>nd</sup> Edition
- [119] Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill and Angus P. Andrews, 2001. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, John Wiley Publishing
- [120] 김수대, 백경동, 김태림, 김성신, 2011. 12. 적응형 퍼지-칼만 필터를 이용한 자세추정 성능향상, 한국정보통신학회논문지 15(12), pp.2511-2520
- [121] 山內保文, 1986. 不規則 現象論, 海文堂, pp.6-29
- [122] A.R.J.M. LLOYD, 1989. Seakeeping; Ship Behaviour in Rough Weather, Ellis Horwood Limited, pp.409-473
- [123] 關西造船協會編, 1983. *造船設計便覽(第4版)*, pp.422-434



- [124] Edward V. Lewis, 1989. *Principles of Naval Architecture*, SNAME, pp.137-159
- [125] 金順甲·內藤 林·中村彰一, 1984. 船舶の波浪中耐航性能評價に關する研究, 日本造船學會論文集, No.155
- [126] Lewis E.V.1980.7. The Status of Merchant Ship Seakeeping Reserch, Proc. 19th ATTC, Vol. 1
- [127] Nakamura S.·Hosoda R., 1975. A Method for Predicting the Power in a Seaway, Proc.14th ITTC, Vol.4
- [128] Ochi, M.K.·Motter L.E., 1973. Prediction of Slamming Characteristic and Hull Responses for Ship Design, *Trans. of SNAME*, Vol81
- [129] Bishop, R.E.D., Price W.G.·Tam P.K.Y., 1978. On the Dynamics of Slamming, *Trans. of RINA*, Vol.120
- [130] 中村彰一, 1969. *耐航性の諸要*素, 第1回 耐航性に關しるシンポジウム, 日本造船學會
- [131] 細田龍介·黑井昌明, 1977. 最適航法,第2回耐航性に關するシンポジウム, 日本造船學會
- [132] Aertssen G.·Sluijs M.F.: Service Performance and Seakeeping Trials on a Containership. *TRINA*, Vol.114
- [133] 김순갑,이충로, 1991. 황천시의 항해안전 평가시스템 개발에 관한 연구, 한국항해학회지, 제15권 제1호, pp.49-65
- [134] J. N. Newman, 1980. Marine Hydrodynamics, MIT Press, pp.328-373
- [135] 高木又男·新井新一, 1996. 船舶·海洋 構造物の耐波理論,成山堂書店, PP. 269-274
- [136] 三根久·河合一, 1982. 信賴性·保全性の數理, 朝倉書店, pp.90-152
- [137] JK Electronics, *IMU AHRS 10DOF Dragon User Manual*, <a href="http://www.jkelec.co.kr">http://www.jkelec.co.kr</a> [Accessed 20. Jun. 2012]
- [138] RUVA Tech, Attitude Reference System RTxQ Data Sheet, http://www.ruva.kr/ [Accessed 20. Jun. 2012]
- [139] JK Electronics, EBIMU-9DOFV2 Data Sheet, <a href="http://www.e2box.co.kr/">http://www.e2box.co.kr/</a> [Accessed 20. Jun. 2012]



- [140] InvenSense Inc., 2010. *ITG-3200 Instructor Manual*, Doc. No. PS-ITG-3200A-00-01.4
- [141] Analog Devices, 2009. *ADXL345 Digital Accelerometer Data Sheet*, www.analog.com/ [Accessed 22. Jun. 2012]
- [142] Honeywell,. 2010. *HMC5883 3-Axis Digital Compass IC Data Sheet*, http://www.honeywell.com/magneticsensors/ [Accessed 22. Jun. 2012]
- [143] Shenzhen Hi-Link Electronic Technology Co., Ltd., *HLK-WIFI-M03 User Manual*, http://www.hlktech.net/ [Accessed 22. Jun. 2012]
- [144] NTREX Co. Ltd., 2011. NT-ARSv1 User Manual, Ver. 1.0, www.ntrex.co.kr/ [Accessed 22. Jun. 2012]
- [145] Rotenberg, D., Luinge, H., Baten, C. and Veltink, P., 2005, Compensation of Magnetic Disturbances improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation, *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, Vol. 13, pp.395–405.
- [146] 이윤석, 2007. 실습선 한나라호에 작용하는 풍압력 및 풍압모우멘트 영향에 관한 연구, 한국항해항만학회지 31(3), pp.223-228
- [147] 정창현, 공길영, 실선계측을 통한 묘박중인 선박의 풍압력 적용에 관한 연구, 해양환경안전학회지 15(3), 2009.9, pp.223-228



#### ※ 본 연구와 관련하여 발표된 논문 및 보고서

- (1) 김대해, 이상민, 2013.5.23.~25 *AHRS 센서 기반의 무선 선체운동 모니터 링 알고리즘의 개발*, 2013년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp.187
- (2) 김대해, 이상민, 공길영, 2013.12. AHRS를 이용한 무선 선체 운동 측정 시스템에 관한 연구, 한국항해항만학회지, 제37권 6호, pp.575-580





# 부록 1 실험선박 운항 자료 데이터

【부록 1-1】실험선박 운항 자료 데이터 : 제 1차 실선 실험 (부산 ~ 제주) 항해 구간, 2013. 3. 18 ~ 19

【부록 1-2】실험선박 운항 자료 데이터 : 제 2차 실선 실험 (제주 ~ 부산) 항해 구간, 2013. 3. 21 ~ 22

【부록 1-3】실험선박 운항 자료 데이터 : 제 3차 실선 실험 (목포 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 3. 19 ~ 20

【부록 1-4】실험선박 운항 자료 데이터 : 제 4차 실선 실험 (진해 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 4. 3







【부록 1-1】 <u>실험선박 운항 자료 데이터 : 제 1차 실선 실험 (부산 ~ 제주) 항해 구간, 2013. 3. 18 ~ 19</u>

Date & Date		Ship Heading		ip Heading Ship Speed			Wind(	True)		Wave(Sea State)			Save	Save	
Time Positio	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	Works		File Name	Time (Min)	Remark		
2013.03.18 17:00(KST)	34° 02′ N 128° 08′ E	150.5	148.0	11.2	11.1	223	19.1	SW	5	SW	4	2.0	NAV-HBD- 201303181700	30	Coast of Busan Port
2013.03.18 17:30(KST)	34° 56′ N 129° 09′ E	179.2	182.0	11.7	11.6	219	15.7	SW	4	SW	3	1.0	NAV-HBD- 201303181730	30	
2013.03.18 18:00(KST)	34° 51′ N 129° 07′ E	206.5	211.0	11.6	11.6	225	20.2	SW	5	SW	4	2.0	NAV-HBD- 201303181800	30	
2013.03.18 18:30(KST)	34° 46′ N 129° 03′ E	211.0	214.0	11.9	11.5	232	24.5	SW	6	SW	4	3.0	NAV-HBD- 201303181830	30	
2013.03.18 19:00(KST)	34° 42′ N 128° 59′ E	211.7	214.0	11.3	10.7	240	33.1	WSW	7	SW	5	4.0	NAV-HBD- 201303181900	30	
2013.03.18 19:30(KST)	34° 37′ N 128° 55′ E	211.5	212.0	11.5	11.0	254	20.8	WSW	5	W	4	2.0	NAV-HBD- 201303181930	30	
2013.03.18 20:00(KST)	34° 32′ N 128° 50′ E	210.8	214.4	14.8	13.9	254	24.2	WSW	6/6	W	4	3.0	NAV-HBD- 201303182000	30	
2013.03.18 20:30(KST)	34° 26′ N 128° 45′ E	215.7	217.0	15.0	14.7	255	19.8	WSW	5	W	4	2.0	NAV-HBD- 201303182030	30	
2013.03.18 21:00(KST)	34° 19′ N 128° 40′ E	208.3	210.0	15.0	14.9	240	23.3	WSW	6	W	4	3.0	NAV-HBD- 201303182100	30	
2013.03.18 21:30(KST)	34° 12′ N 128° 36′ E	207.8	206.0	16.8	16.2	246	26.5	WSW	6	W	4	3.0	NAV-HBD- 201303182130	30	
2013.03.18 22:00(KST)	34° 06′ N 128° 30′ E	234.8	235.0	16.6	16.3	259	25.8	W	6	W	4	3.0	NAV-HBD- 201303182200	30	
2013.03.18 22:30(KST)	34° 02′ N 128° 21′ E	249.3	251.0	14.3	14.1	272	34.1	W	8	W	5	5.5	NAV-HBD- 201303182230	30	



Date &		Ship H	eading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2013.03.18 23:00(KST)	34° 00′ N 128° 15′ E	249.3	252.0	11.7	11.6	258	30.8	WSW	7	W	5	4.0	NAV-HBD- 201303182300	30	
2013.03.18 23:30(KST)	34° 58′ N 128° 08′ E	250.2	251.0	11.6	11.6	270	26.8	W	6	W	4	3.0	NAV-HBD- 201303182330	30	
2013.03.19 00:00(KST)	33° 57′ N 128° 01′ E	248.2	250.0	11.6	11.5	274	29.4	W	EZIA	W	5	4.0	NAV-HBD- 201303190000	30	
2013.03.19 00:30(KST)	33° 54′ N 127° 55′ E	245.0	245.0	11.9	11.7	299	23.8	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190030	30	
2013.03.19 01:00(KST)	33° 52′ N 127° 48′ E	244.3	245.0	12.0	11.9	294	23.9	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190100	30	
2013.03.19 01:30(KST)	33° 49′ N 127° 42′ E	243.2	242.0	12.1	12.2	283	24.9	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190130	30	
2013.03.19 02:00(KST)	33° 47′ N 127° 35′ E	243.5	243.0	12.0	12.0	295	25.7	WNW	6 %	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190200	30	
2013.03.19 02:30(KST)	33° 45′ N 127° 29′ E	255.2	256.0	12.1	12.1	288	24.0	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190230	30	
2013.03.19 03:00(KST)	33° 44′ N 127° 22′ E	256.8	259.0	12.2	12.2	295	22.8	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190300	30	
2013.03.19 03:30(KST)	33° 42′ N 127° 14′ E	269.8	272.0	12.4	12.4	297	24.1	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190330	30	
2013.03.19 04:00(KST)	33° 42′ N 127° 07′ E	258.0	260.0	12.6	12.3	298	22.1	WNW	6	NW	4	3.0	NAV-HBD- 201303190400	30	
2013.03.19 04:30(KST)	33° 41′ N 126° 58′ E	256.8	259.0	15.7	15.1	280	18.8	W	5	NW	4	2.0	NAV-HBD- 201303190430	30	



Date &		Ship H	leading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H1/3(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2013.03.19 05:00(KST)	33° 39′ N 126° 50′ E	256.8	256.0	10.8	10.4	305	18.3	NW	5	NW	4	2.0	NAV-HBD- 201303190500	30	
2013.03.19 05:30(KST)	33° 38′ N 126° 44′ E	256.8	257.0	10.9	10.6	300	14.6	NW	4	NW	3	1.0	NAV-HBD- 201303190530	30	
2013.03.19 06:00(KST)	33° 37′ N 126° 37′ E	257.5	260.0	10.4	10.8	305	8.5	NW	3	NW	3	0.6	NAV-HBD- 201303190600	30	Coast of Jeju Port
2013.03.19 06:30(KST)	33° 38′ N 126° 39′ E	248.8	252.0	10.3	10.7	300	5.6	WNW	2	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201303190630	30	
2013.03.19 07:00(KST)	33° 37′ N 126° 36′ E	209.7	208.0	12.2	12.6	224	2.0	SW	1	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201303190700	30	
2013.03.19 07:30(KST)	33° 32′ N 126° 32′ E	216.3	218.0	7.6	7.5	111	2.9	ESE	1	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201303190730	30	Arr. Jeju Port Pier
								1945	11/6						
								OF O							



【부록 1-2】 <u>실험선박 운항 자료 데이터 : 제 2차 실선 실험 (제주 ~ 부산) 항해 구간, 2013. 3. 21 ~ 22</u>

Date &		Ship H	leading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2013.03.21 16:00(KST)	33° 31′ N 126° 32′ E	137.2	-	0.0	-	292	7.1	WNW	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303211600	30	Dep. Jeju Port
2013.03.18 16:30(KST)	34° 31′ N 126° 32′ E	163.0	-	0.9	1.1	342	7.4	NNW	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303211630	30	
2013.03.21 17:00(KST)	33° 34′ N 126° 36′ E	068.7	072.0	13.5	13.4	266	7.0	W	F 3/	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303211700	30	Coast of Jeju Port
2013.03.21 17:30(KST)	33° 37′ N 126° 45′ E	068.2	071.0	13.6	13.4	296	6.5	WNW	2	W	2	0.3	NAV-HBD- 201303211730	30	
2013.03.21 18:00(KST)	33° 40′ N 126° 53′ E	063.0	064.0	15.2	15.6	272	8.3	W	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303211800	30	
2013.03.21 18:30(KST)	33° 43′ N 127° 02′ E	062.7	064.0	16.2	16.2	288	11.1	WNW	4	W	3	1.0	NAV-HBD- 201303211830	30	
2013.03.21 19:00(KST)	33° 47′ N 127° 10′ E	062.8	064.0	17.2	16.4	291	4.5	WNW	2/6	W	2	0.3	NAV-HBD- 201303211900	30	
2013.03.21 19:30(KST)	33° 51′ N 127° 20′ E	063.7	066.0	18.4	17.2	268	4.2	W	2	W	2	0.3	NAV-HBD- 201303211930	30	
2013.03.21 20:00(KST)	33° 54′ N 127° 31′ E	063.5	067.0	18.7	17.5	235	3.3	SW	1	SW	1	0.1	NAV-HBD- 201303212000	30	
2013.03.21 20:30(KST)	33° 58′ N 127° 41′ E	062.8	065.0	18.4	17.6	242	3.4	WSW	1	SW	1	0.1	NAV-HBD- 201303212030	30	
2013.03.21 21:00(KST)	34° 01′ N 127° 50′ E	067.0	069.0	13.7	13.2	264	7.7	W	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303212100	30	
2013.03.21 21:30(KST)	34° 03′ N 127° 58′ E	057.0	060.0	13.5	12.9	282	5.1	WNW	2	W	2	0.3	NAV-HBD- 201303212130	30	



Date &		Ship H	eading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2013.03.21 22:00(KST)	34° 07′ N 128° 05′ E	057.5	059.0	13.4	12.9	281	10.4	W	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303212200	30	
2013.03.21 22:30(KST)	34° 10′ N 128° 12′ E	060.2	061.0	13.5	12.9	265	7.9	W	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303212230	30	
2013.03.21 23:00(KST)	34° 13′ N 128° 19′ E	058.0	060.0	13.3	12.6	279	7.3	W	<b>E</b> 3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303212300	30	
2013.03.21 23:30(KST)	34° 17′ N 128° 26′ E	047.5	051.0	13.4	12.7	257	8.0	WSW	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303212330	30	
2013.03.22 00:00(KST)	34° 20′ N 128° 32′ E	044.3	050.0	12.9	12.9	279	9.8	W	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303220000	30	
2013.03.22 00:30(KST)	34° 23′ N 128° 39′ E	064.5	072.0	13.3	11.7	230	9.7	SW	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303220030	30	
2013.03.22 01:00(KST)	34° 26′ N 128° 46′ E	069.5	071.0	12.7	10.9	262	8.5	1w15	3/6	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303220100	30	
2013.03.22 01:30(KST)	34° 29′ N 128° 53′ E	046.3	049.0	12.8	12.0	256	8.7	WSW	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303220130	30	
2013.03.22 02:00(KST)	34° 33′ N 128° 58′ E	036.3	042.0	12.7	12.8	250	12.8	WSW	4	W	3	1.0	NAV-HBD- 201303220200	30	
2013.03.22 02:30(KST)	34° 39′ N 129° 03′ E	029.8	032.0	12.8	12.6	256	16.1	WSW	4	W	3	1.0	NAV-HBD- 201303220230	30	
2013.03.22 03:00(KST)	34° 44′ N 129° 07′ E	022.0	024.0	13.2	12.6	244	15.8	WSW	4	SW	3	1.0	NAV-HBD- 201303220300	30	
2013.03.22 03:30(KST)	34° 50′ N 129° 09′ E	001.7	005.0	11.1	10.3	247	20.2	WSW	5	SW	4	2.0	NAV-HBD- 201303220330	30	



Date &		Ship H	eading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2013.03.22 04:00(KST)	34° 53′ N 129° 12′ E	168.0	162.0	9.0	9.3	258	20.1	WSW	5	W	4	2.0	NAV-HBD- 201303220400	30	
2013.03.22 04:30(KST)	34° 48′ N 129° 10′ E	204.7	205.0	10.1	10.4	257	16.2	WSW	4	W	3	1.0	NAV-HBD- 201303220430	30	
2013.03.22 05:00(KST)	34° 45′ N 129° 06′ E	219.5	221.0	10.0	10.6	254	13.0	WSW	[4]	W	3	1.0	NAV-HBD- 201303220500	30	
2013.03.22 05:30(KST)	34° 44′ N 129° 07′ E	039.0	040.0	11.3	10.8	254	9.3	WSW	3	W	3	0.6	NAV-HBD- 201303220530	30	
2013.03.22 06:00(KST)	34° 48′ N 129° 11′ E	034.2	036.0	11.9	10.6	237	13.4	WSW	4	SW	3	1.0	NAV-HBD- 201303220600	30	
2013.03.22 06:30(KST)	34° 54′ N 129° 12′ E	016.0	018.0	11.6	10.8	245	15.6	WSW	4	SW	3	1.0	NAV-HBD- 201303220630	30	
2013.03.22 07:00(KST)	34° 59′ N 129° 15′ E	028.5	030.0	14.1	12.8	257	14.7	WSW	4/6	SW	3	1.0	NAV-HBD- 201303220700	30	
2013.03.22 07:30(KST)	35° 03′ N 129° 14′ E	299.3	312.0	8.3	8.1	238	20.4	WSW	5	SW	4	2.0	NAV-HBD- 201303220730	30	
2013.03.22 08:00(KST)	34° 05′ N 129° 08′ E	269.0	277.0	10.5	10.9	269	17.5	W	5	SW	4	2.0	NAV-HBD- 201303220800	30	Coast of Busan Port
2013.03.22 08:30(KST)	35° 04′ N 129° 05′ E	022.8	-	1.1	0.9	226	14.6	SW	4	SW	3	1.0	NAV-HBD- 201303220830	30	Arr. KMOU Pier



【부록 1-3】 <u>실험선박 운항 자료 데이터 : 제 3차 실선 실험 (목포 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 3. 19 ~ 20</u>

Date &		Ship H	leading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2014.03.19 14:00(KST)	34° 47′ N 126° 21′ E	309.8	-	0.0	-	126	8.4	SE	3	SE	3	0.6	NAV-HBD- 201403191400	30	
2014.03.19 14:30(KST)	34° 47′ N 126° 21′ E	309.8	-	0.0	-	162	7.8	SSE	3	SE	3	0.6	NAV-HBD- 201403191430	30	
2014.03.19 15:00(KST)	34° 47′ N 126° 21′ E	308.8	219.0	0.5	0.5	165	8.6	SSE	F 3//	SE	3	0.6	NAV-HBD- 201403191500	30	Dep. Mokpo
2014.03.19 15:30(KST)	34° 46′ N 126° 17′ E	299.8	296.0	9.1	10.0	300	4.2	WNW	2	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403191530	30	
2014.03.19 16:00(KST)	34° 44′ N 126° 14′ E	214.7	210.0	12.3	12.1	340	6.1	NNW	2	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403191600	30	
2014.03.19 16:30(KST)	34° 36′ N 126° 13′ E	175.3	175.0	15.1	13.8	310	0.2	NW	2	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403191630	30	
2014.03.19 17:00(KST)	34° 30′ N 126° 08′ E	204.5	204.0	15.7	14.9	278	4.2	10/15	2/6	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403191700	30	
2014.03.19 17:30(KST)	34° 24′ N 126° 04′ E	184.5	186.0	18.1	15.4	305	4.1	NW	2	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403191730	30	
2014.03.19 18:00(KST)	34° 17′ N 126° 12′ E	097.0	098.0	18.0	14.0	112	20.3	ESE	5	E	4	2.0	NAV-HBD- 201403191800	30	
2014.03.19 18:30(KST)	34° 11′ N 126° 19′ E	144.2	142.0	16.8	14.9	085	19.3	Е	5	E	4	2.0	NAV-HBD- 201403191830	30	
2014.03.19 19:00(KST)	34° 05′ N 126° 26′ E	133.7	133.0	16.8	15.1	091	16.0	Е	4	Е	3	1.0	NAV-HBD- 201403191900	30	
2014.03.19 19:30(KST)	34° 03′ N 126° 34′ E	085.2	088.0	13.2	11.9	082	22.1	Е	6	E	4	3.0	NAV-HBD- 201403191930	30	



Date &		Ship H	eading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2014.03.19 20:00(KST)	34° 04′ N 126° 40′ E	084.3	083.0	9.9	9.4	080.0	22.4	Е	6	Е	4	3.0	NAV-HBD- 201403192000	30	
2014.03.19 20:30(KST)	34° 04′ N 126° 46′ E	085.3	082.0	10.8	10.9	095	20.1	Е	5	Е	4	2.0	NAV-HBD- 201403192030	30	
2014.03.19 21:00(KST)	34° 05′ N 126° 54′ E	086.2	084.0	14.4	14.5	084	14.2	E	4	Е	3	1.0	NAV-HBD- 201403192100	30	
2014.03.19 21:30(KST)	34° 05′ N 127° 03′ E	087.0	086.0	15.3	15.8	087	15.9	Е	4	Е	3	1.0	NAV-HBD- 201403192130	30	
2014.03.19 22:00(KST)	34° 05′ N 127° 13′ E	089.3	090.0	15.3	15.9	087	20.4	Е	5	E	4	2.0	NAV-HBD- 201403192200	30	거문도 통과
2014.03.19 22:30(KST)	34° 06′ N 127° 21′ E	079.7	078.0	14.8	15.9	086	14.6	Е	4	Е	3	1.0	NAV-HBD- 201403192230	30	
2014.03.19 23:00(KST)	34° 08′ N 127° 28′ E	071.8	069.0	11.1	11.7	060	13.3	ENE	4/6	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201403192300	30	
2014.03.19 23:30(KST)	34° 10′ N 127° 34′ E	073.2	068.0	10.7	11.7	071	12.8	ENE	4	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201403192330	30	
2014.03.20 00:00(KST)	34° 12′ N 127° 40′ E	075.5	074.0	11.2	11.8	059	11.4	ENE	4	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201403200000	30	
2014.03.20 00:30(KST)	34° 13′ N 127° 47′ E	076.5	076.0	11.6	11.8	062	13.3	ENE	4	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201403200030	30	
2014.03.20 01:00(KST)	34° 15′ N 127° 54′ E	071.7	072.0	11.9	11.7	040	10.9	NE	3	NE	3	0.6	NAV-HBD- 201403200100	30	간여암 통과
2014.03.20 01:30(KST)	34° 17′ N 128° 01′ E	075.3	076.0	12.3	12.0	032	10.6	NNE	3	NE	3	0.6	NAV-HBD- 201403200130	30	



Date &		Ship H	eading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2014.03.20 02:00(KST)	34° 18′ N 128° 09′ E	069.5	069.0	12.4	11.9	022	8.7	NNE	3	NE	3	0.6	NAV-HBD- 201403200200	30	
2014.03.20 02:30(KST)	34° 21′ N 128° 15′ E	059.8	060.0	12.8	12.0	020	9.1	NNE	3	NE	3	0.6	NAV-HBD- 201403200230	30	
2014.03.20 03:00(KST)	34° 26′ N 128° 20′ E	029.7	031.0	12.7	12.0	350	9.9	N	<b>F</b> 3//	N	3	0.6	NAV-HBD- 201403200300	30	
2014.03.20 03:30(KST)	34° 31′ N 128° 23′ E	019.8	023.0	10.6	10.0	020	5.7	NNE	2	N	2	0.3	NAV-HBD- 201403200330	30	국도 통과
2014.03.20 04:00(KST)	34° 35′ N 127° 25′ E	359.0	007.0	5.4	5.5	357	3.9	N	1	N	1	0.1	NAV-HBD- 201403200400	30	
2014.03.20 04:30(KST)	34° 35′ N 128° 26′ E	055.7	-	1.0	0.4	338	4.6	NNW	2	N	2	0.3	NAV-HBD- 201403200430	30	Drifting
2014.03.20 05:00(KST)	34° 35′ N 128° 26′ E	037.5	-	0.3	0.1	314	3.9	NW	1/6	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201403200500	30	Drifting
2014.03.20 05:30(KST)	34° 35′ N 128° 26′ E	024.0	-	0.0	0.2	327	2.6	NNW	1	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201403200530	30	Drifting
2014.03.20 06:00(KST)	34° 35′ N 128° 26′ E	351.8	-	0.1	0.3	323	3.9	NW	1	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201403200600	30	Drifting
2014.03.20 06:30(KST)	34° 35′ N 128° 26′ E	003.2	-	0.4	0.2	183	0.2	S	0	ı	0	0.0	NAV-HBD- 201403200630	30	Drifting
2014.03.20 07:00(KST)	34° 35′ N 128° 26′ E	001.3	-	0.4	0.1	002	0.0	N	0	1	0	0.0	NAV-HBD- 201403200700	30	Drifting
2014.03.20 07:30(KST)	34° 35′ N 128° 31′ E	079.7	078.0	12.4	12.4	231	2.0	SW	1	S	1	0.1	NAV-HBD- 201403200730	30	



Date &		Ship H	eading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2014.03.20 08:00(KST)	34° 39′ N 128° 38′ E	l Nau a l	059.0	12.2	12.0	169	1.3	S	1	S	1	0.1	NAV-HBD- 201403200800	30	매몰도 통과
2014.03.20 08:30(KST)	34° 42′ N 128° 43′ E	050.2	050.0	11.9	12.2	061	1.3	ENE	1	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201403200830	30	북여도 통과
2014.03.20 09:00(KST)	34° 46′ N 128° 50′ E	050.3	050.0	14.6	15.3	356	4.7	N	[2]	N	2	0.3	NAV-HBD- 201403200900	30	
2014.03.20 09:30(KST)	34° 51′ N 128° 57′ E	055.5	054.0	14.9	15.1	332	9.8	NNW	3	N	3	0.6	NAV-HBD- 201403200930	30	
2014.03.20 10:00(KST)	34° 56′ N 129° 03′ E	043.7	044.0	15.1	15.2	335	5.7	NNW	2	N	2	0.3	NAV-HBD- 201403201000	30	목도 통과
2014.03.20 10:30(KST)	35° 01′ N 129° 08′ E	020.8	025.0	12.3	12.3	277	5.5	W	2	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403201030	30	
2014.03.20 11:00(KST)	35° 05′ N 129° 06′ E	299.7	305.0	7.8	7.9	317	4.1	NW	2/6	NW	2	0.3	NAV-HBD- 201403201100	30	부산항 방파제
2014.03.20 11:30(KST)	35° 04′ N 129° 05′ E	032.0	-	0.0	0.2	002	2.9	N	1	NW	1	0.1	NAV-HBD- 201403201130	30	Arr. KMOU Pier
														30	
														30	
														30	
														30	



### 【부록 1-4】 <u>실험선박 운항 자료 데이터 : 제 4차 실선 실험 (진해 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 4. 3</u>

Date &		Ship H	leading	Ship S	Speed		Wind(	True)		Wave	e(Sea S	State)	Save	Save	
Time	Position	HDG (Deg.)	COG (Deg.)	SOG (Kts)	STW (Kts)	Dir. (Deg.)	Force (Kts)	Dir. (Point)	B.F. Scale	Dir. (Point)	Sea Scale	Wave Height H½(m)	File Name	Time (Min)	Remark
2014.04.03 12:00(KST)	35° 01′ N 128° 35′ E	050.7	-	1.1	1.5	231	1.5	SW	1	N	1	0.1	NAV-HBD- 201404031200	30	Jinhae-man Anchoring
2014.04.03 12:30(KST)	35° 01′ N 128° 36′ E	168.5	-	1.0	-	349	1.0	N	1	N	1	0.1	NAV-HBD- 201404031230	30	
2014.04.03 13:00(KST)	35° 03′ N 128° 40′ E	061.2	060.0	10.9	10.3	283	0.5	WNW	FO	N	0	0.0	NAV-HBD- 201404031300	30	Dep.Jinhae-man
2014.04.03 13:30(KST)	35° 01′ N 128° 46′ E	122.0	122.0	11.1	10.9	161	9.2	SSE	3	S	3	0.6	NAV-HBD- 201404031330	30	
2014.04.03 14:00(KST)	35° 58′ N 128° 52′ E	090.7	089.0	13.0	12.2	151	10.0	SSE	3	S	3	0.6	NAV-HBD- 201404031400	30	
2014.04.03 14:30(KST)	35° 58′ N 128° 59′ E	090.5	087.0	13.1	12.1	175	9.1	S	3	S	3	0.6	NAV-HBD- 201404031430	30	
2014.04.03 15:00(KST)	35° 00′ N 129° 07′ E	065.3	063.0	13.7	12.8	199	7.3	SSW	3/6	S	3	0.6	NAV-HBD- 201404031500	30	
2014.04.03 15:30(KST)	35° 03′ N 129° 12′ E	359	2	12.6	12.1	210	8.2	SSW	4	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201404031530	30	
2014.04.03 16:00(KST)	35° 05′ N 129° 06′ E	293.7	289.0	11.5	11.5	070	14.9	ENE	4	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201404031600	30	Coast of Busan Port
2014.04.03 16:30(KST)	35° 04′ N 129° 05′ E	010.2	-	1.1	0.8	082	13.5	Е	4	NE	3	1.0	NAV-HBD- 201404031630	30	Arr. KMOU Pier







## 부록 2

# 실험선박 항해안전성 평가도

【부록 2-1】항해안전성평가도 : 제 1차 실선 실험 (부산 ~ 제주) 항해 구간, 2013. 3. 18 ~ 19

【부록 2-2】항해안전성평가도 : 제 2차 실선 실험 (제주 ~ 부산) 항해 구간, 2013. 3. 21 ~ 22

【부록 2-3】항해안전성평가도 : 제 3차 실선 실험 (목포 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 3. 19 ~ 20

【부록 2-4】항해안전성평가도 : 제 4차 실선 실험 (진해 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 4. 3







### 【부록 2-1】<u>항해안전성평가도 : 제 1차 실선 실험 (부산 ~ 제주) 항해 구간, 2013. 3. 18 ~ 19</u>

	Evaluation Diagram of 1	Navigation Safety / 항해안전성평가 /	1차 실선실험
Date & Time	2013.03.18. 17:00(KST)	2013.03.18. 17:30(KST)	2013.03.18. 18:00(KST)
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW
Date & Time	2013.03.18. 18:30(KST)	2013.03.18. 19:00(KST)	2013.03.18. 19:30(KST)
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150



	Evaluation Diagram of	Navigation Safety / 항해안전성평가 /	1차 실선실험
Date & Time	2013.03.18. 20:00(KST)	2013.03.18. 20:30(KST)	2013.03.18. 21:00(KST)
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety  HEAD  30  1.0  60  Port  120  150  FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150
Date & Time	2013.03.18. 21:30(KST)	2013.03.18. 22:00(KST)	2013.03.18. 22:30(KST)
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 11.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 1차 실선실험				
Date & Time	2013.03.18. 23:00(KST)	2013.03.18. 23:30(KST)	2013.03.19. 00:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 0,5 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.19. 00:30(KST)	2013.03.19. 01:00(KST)	2013.03.19. 01:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 11.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Pont 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 1차 실선실험				
Date & Time	2013.03.19. 02:00(KST)	2013.03.19. 02:30(KST)	2013.03.19. 03:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.19. 03:30(KST)	2013.03.19. 04:00(KST)	2013.03.19. 04:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 50 Port 120 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 1차 실선실험				
Date & Time	2013.03.19. 05:00(KST)	2013.03.19. 05:30(KST)	2013.03.19. 06:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.19. 06:30(KST)	2013.03.19. 07:00(KST)	2013.03.19. 07:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		



### 【부록 1-2】 <u>항해안전성평가도</u> : 제 2차 실선 실험 (제주 ~ 부산) 항해 구간, 2013. 3. 21 ~ 22

	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 2차 실선실험				
Date & Time	2013.03.21. 17:00(KST)	2013.03.21. 17:30(KST)	2013.03.21. 18:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.21. 18:30(KST)	2013.03.21. 19:00(KST)	2013.03.21. 19:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 2차 실선실험				
Date & Time	2013.03.21. 20:00(KST)	2013.03.21. 20:30(KST)	2013.03.21. 21:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.21. 21:30(KST)	2013.03.21. 22:00(KST)	2013.03.21. 22:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 2차 실선실험				
Date & Time	2013.03.21. 23:00(KST)	2013.03.21. 23:30(KST)	2013.03.22. 00:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 11.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150		
Date & Time	2013.03.22. 00:30(KST)	2013.03.22. 01:00(KST)	2013.03.22. 01:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 2차 실선실험				
Date & Time	2013.03.22. 02:00(KST)	2013.03.22. 02:30(KST)	2013.03.22. 03:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.22. 03:30(KST)	2013.03.22. 04:00(KST)	2013.03.22. 04:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 2차 실선실험				
Date & Time	2013.03.22. 05:00(KST)	2013.03.22. 05:30(KST)	2013.03.22. 06:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2013.03.22. 06:30(KST)	2013.03.22. 07:00(KST)	2013.03.22. 07:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 10.5 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW		



### 【부록 2-3】<u>항해안전성평가도 : 제 3차 실선 실험 (목포 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 3. 19 ~ 20</u>

	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 3차 실선실험			
Date & Time	2014.03.19. 16:00(KST)	2014.03.19. 16:30(KST)	2014.03.19. 17:00(KST)	
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	-Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 0,5 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	
Date & Time	2014.03.19. 17:30(KST)	2014.03.19. 18:00(KST)	2014.03.19. 18:30(KST)	
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 FOLLOW Stbd	



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 3차 실선실험				
Date & Time	2014.03.19. 19:00(KST)	2014.03.19. 19:30(KST)	2014.03.19. 20:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2014.03.19. 20:30(KST)	2014.03.19. 21:00(KST)	2014.03.19. 21:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Pont 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 3차 실선실험				
Date & Time	2014.03.19. 22:00(KST)	2014.03.19. 22:30(KST)	2014.03.19. 23:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety  HEAD  30  1.0  60  Port  120  150  FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 80 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2014.03.19. 23:30(KST)	2014.03.20. 00:00(KST)	2014.03.20. 00:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety  HEAD  30  1.0  60  Port  120  150  FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		



	Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 3차 실선실험				
Date & Time	2014.03.20. 01:00(KST)	2014.03.20. 01:30(KST)	2014.03.20. 02:00(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		
Date & Time	2014.03.20. 02:30(KST)	2014.03.20. 03:00(KST)	2014.03.20. 03:30(KST)		
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW		



Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 3차 실선실험						
Date & Time	2014.03.20. 04:00(KST)	2014.03.20. 04:30(KST)	2014.03.20. 05:00(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW			
Date & Time	2014.03.20. 05:30(KST)	2014.03.20. 06:00(KST)	2014.03.20. 06:30(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 11.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 30 1.0 80 Port 120 150 FOLLOW			



Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 3차 실선실험						
Date & Time	2014.03.20. 07:00(KST)	2014.03.20. 07:30(KST)	2014.03.20. 08:00(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW			
Date & Time	2014.03.20. 08:30(KST)	2014.03.20. 09:00(KST)	2014.03.20. 09:30(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Port 120 150 FOLLOW	Port 150 FOLLOW 150			



### 【부록 2-4】<u>항해안전성평가도</u>: 제 4차 실선 실험 (진해 ~ 부산) 항해 구간, 2014. 4. 3

Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 4차 실선실험						
Date & Time	2014.04.03. 12:00(KST)	2014.04.03. 12:30(KST)	2014.04.03. 13:00(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 11.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW			
Date & Time	2014.04.03. 13:30(KST)	2014.04.03. 14:00(KST)	2014.04.03. 14:30(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1,0 60 0,5 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD  30 30 1,0 60 Port 120 150 FOLLOW			



Evaluation Diagram of Navigation Safety / 항해안전성평가 / 4차 실선실험						
Date & Time	2014.04.03. 15:00(KST)	2014.04.03. 15:30(KST)	2014.04.03. 16:00(KST)			
SPI	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW	Evaluation Diagram of Navigational Safety HEAD 30 1.0 60 Port 120 150 FOLLOW			
Date & Time		1945				
SPI		Of CH				

