



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

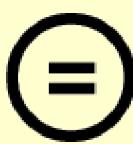
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

거친 해상에서 선박의 성능(Ship's performance)이 저하된다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. 파도로 인하여 선체가 동요하게 되면 승객들과 선원은 일상적인 활동과 작업수행에 장애를 갖게 된다. 심하면 멀미에 시달리게 되며, 선내에서 이동할 때 다치지 않도록 하기 위해 더욱 주의를 기울이게 된다. 또한 작동중인 기계나 전자장치의 물리적 성능이 나빠지고, 군함에서는 해상보급이나 대공·대함·대잠무기 및 레이더·소나의 운용에 상당히 제약을 받게 된다. 거친 파도로 인하여 선체운동이 더욱더 심해지면 선체에 과도한 응력이 가해지고 선적한 화물에 손상을 초래할 수도 있게 된다. 최근 들어 컨테이너선 또는 자동차 운반선이 대형화, 고속화되면서 선수 충격파 영향으로 선체 또는 화물에 갖은 손상을 초래하기도 한다. 극단적인 상황에서는 선박이 절단되거나 전복 또는 침몰 될 수도 있다.

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)의 ISSC(International Ship and Offshore Structures Congress, 국제선체구조회의) 보고서에 따르면, 1974~1988년까지의 북태서양 장기 파랑관측 결과 매년 유의파고가 5cm씩 높아지는 경향이 있는 것으로 확인되었으며, 실제 북태평양을 운항하고 있는 선박의 선장 및 항해사들 또한 해상 상태가 예전에 비하여 많이 악화되었다고 느끼고 있다. 기상이변이 세계 곳곳에서 발생하고 태풍의 발생빈도 또한 점점 많아지고 있으며, 태풍의 세기가 강해지고 파고가 높아지고 있다는 것은 항해하고 있는 선박으로서는 그 만큼 거친 해상을 조우할 확률이 더 높아지고 있다는 것을 의미한다.

해상에서의 선체운동에 대한 연구에서 중요한 것은 선박의 움직임 그 자체뿐만 아니라, 그 운동으로 인하여 발생되는 선수갑판침수(Deckwetness), 슬래밍

(Slamming), 그리고 종요(Pitch), 상하운동(Heave), 횡요(Roll) 등으로 발생되는 가속도 효과이다. 선수와 파면의 상대적 운동이 커지고 파도에 의해 선체에 가해지는 압력이 파도해지면 슬래밍 현상과 선수갑판침수가 발생한다. 가속도가 커지면서 슬래밍 현상이 자주 발생하게 되면 선체에 손상을 줄 뿐만 아니라, 화물붕괴, 장비손상, 그리고 선박 운항자에게도 상당한 영향을 준다.¹⁾

Table 1.1 및 1.2에 나타낸 해양안전심판원의 2002~2006년 해양사고 통계자료²⁾에 따르면, 해양사고의 대부분은 어선 사고(68%)이며, 상선에서 발생한 사고는 18.3%이다. 상선을 대상으로 사고 유형을 살펴보면, 충돌이 76%로 가장 높고, 좌초·전복·침몰사고가 10%를 차지한다. 충돌사고의 원인으로는 경계소홀이 가장 큰 비중을 차지하고 있으나, 충돌이 임박한 상황에서 운항자(선장 또는 항해사)가 해당 선박의 조종성능을 충분히 이해하고 충돌회피 동작을 취한다면 충돌을 피하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 이와 더불어 내항성능 및 복원성능 등도 명확히 이해하고 선박을 운항한다면 좌초 또는 전복·침몰사고 방지에 많은 도움이 될 것이다.

Table 1.1 Marine Accidents of Vessel Types

선종 연도	여객선	화물선	유조선	어선	예선	기타	계
2002	13	132	17	509	46	58	775
2003	10	120	28	483	51	75	767
2004	20	130	24	734	67	95	1,070
2005	8	99	24	657	37	59	884
2006	17	110	43	584	53	58	865
계 (건수)	68	591	136	2,967	254	345	4,361
구성비 (%)	1.6	13.6	3.1	68.0	5.8	7.9	100

Table 1.2 Classification of Marine Accidents

사고유형 선종	충돌/접촉	좌초/침몰	화재/폭발	기관손상	기타	계
여객선	38	9	1	4	16	68
화물선	460	56	15	18	42	591
유조선	108	12	4	3	9	136
계 (건수)	606	77	20	25	67	795
구성비 (%)	76	10	3	3	8	100

Figure 1.1에 나타낸 바와 같이 선박은 항해중에 다양한 해상조건을 접하게 되고, 선박을 운항하는 항해사들은 IMO 또는 ITTC(International Towing Tank Conference, 국제수조협의회) 등에서 정하는 운항기준(Operational criteria)³⁾에 따라 선박을 안전하게 운항해야 한다. 그러기 위해서는 해당 운항기준과 함께 현재 운항중인 선박의 내항성능과 조종성능 및 복원성능 등을 포함한 종합적인 운항성능과 항해안전도가 어느 정도인가를 정량적으로 판단할 수 있어야 한다. 그리고 만약 선박이 현재 위험하다고 판단되는 경우 그 위험을 벗어나기 위해 일반적으로 침로를 변경하거나 선속을 변경하게 되는데, 그러한 조치를 얼마만큼 취해야 선박의 안전을 확보할 수 있는지 확인 가능해야 한다. 본 논문에서 정의하고 있는 선박의 운항성능은 Figure 1.2에 나타낸 바와 같이 승무원-선체-탑재장비-추진기로 구성된 선박 전체 시스템의 파랑 중 성능을 말하는 내항성능과 선박을 조종할 때 이에 반응하여 움직이는 선박의 능력을 말하는 조종성능, 화물의 적재 및 안정성과 관련된 복원성능, 그리고 승객과 승무원의 활동 및 작업가능성과 안락함 및 쾌적함을 뜻하는 승선감을 총칭하여 나타낸 성능을 의미한다.

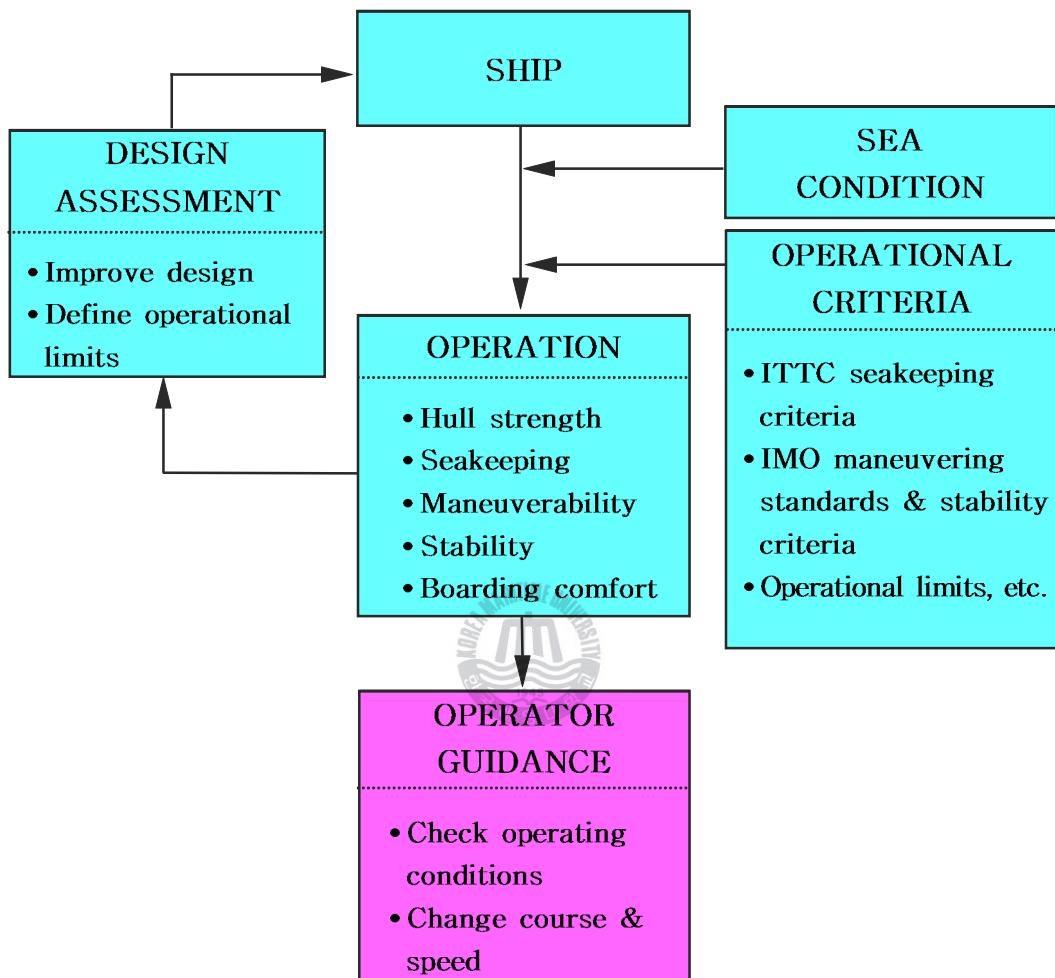


Figure 1.1 Safe Operation & Design Improvement of Ship

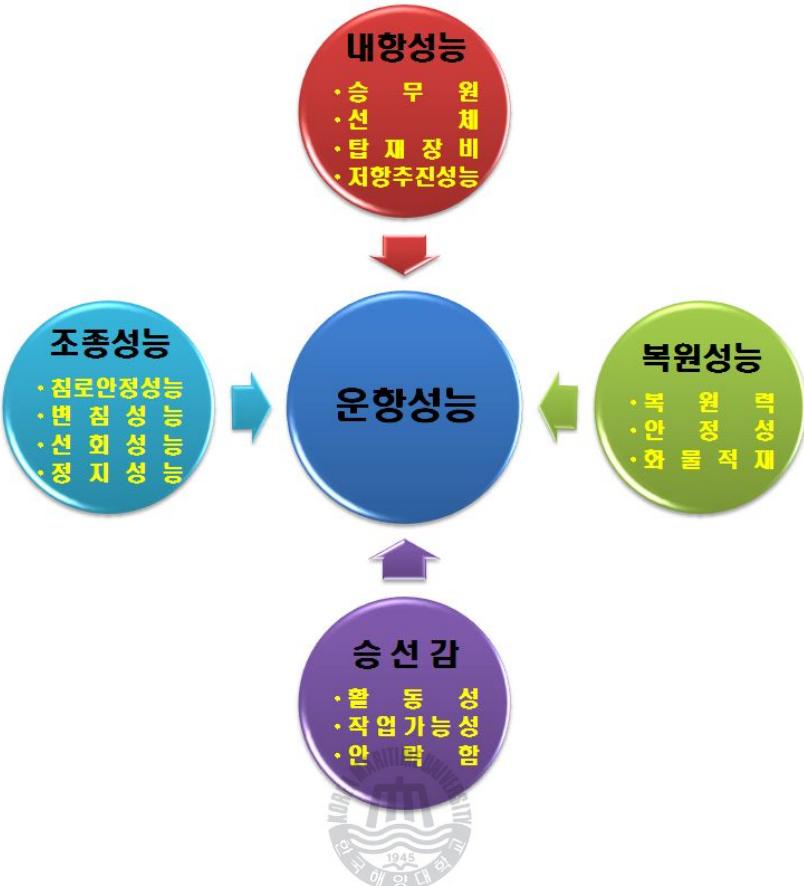


Figure 1.2 Ship's Performance

본 논문에서는 내항성능 평가요소 중 하나인 상하가속도 값을 선교에 설치된 선체용력 감시 장치를 이용하여 해상상태별 변화량을 계측하고, 이를 모형시험 및 이론계산 결과와 상호 비교하였다. 또한 ITTC에서 제시하고 있는 내항성능 기준치와도 비교함으로써 실습선 한바다호의 내항성능을 평가하였다.

그리고 수차례 실시한 선회시험과 그 동안의 운항 자료를 검토함으로써 실습선 한바다호가 IMO에서 제시하고 있는 조종성 기준 및 복원성 기준을 얼마나 만족하고 있는지도 검토하였다. 선회시험을 통해 확인한 선회권과 선회성 지수는 충돌회피 조선을 위한 중요한 정보가 될 수 있고, 해상상태에 따른 최대 횡 요각을 산출하고 동조횡요를 피하기 위한 조건을 분석함으로써 선박의 안전운항을 확보하였다.

또한 실습선에 승선 중인 실습생들을 대상으로 항해 중 멀미 증상을 호소하는 시점에 설문조사를 실시하여, 당시의 해상상태 및 상하가속도와 상호 비교·분석하였다. 그 결과 상하가속도가 멀미증상을 유발하여 승선감에 주는 영향을 파악할 수 있었고, 또한 멀미에 대한 저주파수 운동의 영향과 승선감 향상을 위한 운항 방안에 대해서도 검토하였다.

이러한 결과는 앞으로 경험할 수 있는 다양한 해상상태에서의 작업 가능성 및 위험성 정도의 예측을 가능하게 함으로써 선박의 안전운항에 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 해상에서 운항중인 타 선박에서도 이와 같은 내항성능, 조종성능, 복원성능 등의 운항성능을 평가함으로써 항해 안전성을 향상시키고, 초기 설계 과정에서부터 불필요한 부분을 제거함으로써 보다 우수한 성능의 선박 건조가 가능하다고 본다.

1.2 관련 연구 동향

황천 등과 같은 비교적 거친 해상상태에서 운항중인 선박의 항해 안전성을 평가하는 방법으로 내항성능을 이용하여 평가해 왔으며, 최근에는 충분한 이론적인 연구 성과를 기초로 기존의 내항성능 평가 방법에 대한 문제점을 개선·보완하여, 실선에서 임의의 한 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가하는 항해안전성 종합 평가시스템을 구축하였다.^{4)~12)}

이러한 항해 안전성 평가에 있어 가장 중요한 요소는 외력에 따른 선체의 동적 동요를 정량적인 방법으로 분석하여, 외력의 크기와 방향 그리고 선형에 따라 일반화하는 일이라 할 수 있다. 이를 위하여 상하·좌우·전후방향의 가속도를 측정하는 3축 가속도 계측기를 포함하여, 방위 센서, 2축 경사계 및 초음파 변위계로 구성된 다목적 계측시스템을 개발하여 외력에 의해 발생되는 동적 동요를 계측·분석하는 작업도 진행 중이다.^{13),14)}

또한 해양사고 실례를 통한 황천 항해중인 선수선교선의 내항성능 평가기준 설정에 관한 연구¹⁵⁾에서는 각종 해상상태에서 선속 및 파와의 만남각에 따른

선수선교선의 항해안전성을 정량적으로 평가하고, 특히 조타실 창유리 파손을 초래한 선수갑판침수에 대한 평가 결과와 실제 해양사고 실례와의 비교·분석을 통하여 기존의 평가기준 적용상의 문제점을 제기하고, 선수갑판침수에 대한 내항성능 평가기준의 합리적 설정 방안을 제시하였다.

해상을 항해하는 모든 선박은 내항성능을 평가하기 위해서 파랑 또는 바람과 같은 외력에 의해 발생되는 선체의 불규칙한 운동의 최대 허용가능치인 내항성능 기준(Seakeeping criteria)의 설정이 필요하다. 특히, 해상 상태가 거칠어지면서 생존 및 작업 가능성에 대한 기준으로서 슬래밍, 선수갑판침수, 횡동요, 종동요, 상하가속도 및 좌우가속도 등에 대한 연구가 ITTC의 내항성 분과위원회를 중심으로 이루어지고 있다.

선박이 운항되고 있는 실제 해역에서 선체의 불규칙한 운동을 정확히 예측하고, 거친 해상에서 선박의 성능이 얼마나 저하 되는지를 검토함으로써 내항성능 기준을 설정할 수 있다. 이는 선종과 선형에 따라 약간의 차이는 있을 수 있으나, 실제 선체동요가 일어나는 다양한 해상조건에서 항해중인 선박에 승선 중인 승객 및 승무원의 활동과 작업 가능성을 확인하는 작업은 대단히 현실적이면서 유용한 기준이 될 수 있다. 이와 더불어 내항성능 기준을 정하는 또 다른 방법으로 이론적 계산을 통한 예측, 시뮬레이션, 설문조사 등이 이용될 수 있다.^{16)~25)}

특히 여객선의 경우 내항성능 평가 기준에 대한 연구로, 승객의 안락함과 쾌적함(Comfort & well-being)에 영향을 주는 선체운동과 가속도의 영향을 평가함에 있어 승객들의 멀미 발생률(Vomiting ratio) 또는 MSI(Motion Sickness Incidence) 등 다양한 기준들이 사용된다. 또한 운항가능 지표(Operability indices)를 얻기 위해서는 이러한 제한기준과 예상되는 선체운동과의 비교가 필요함을 제안한 경우도 있다.²⁶⁾

해상 상태가 거칠어짐에 따라 선체의 동요가 점점 심해지면 인체는 다양한 요소로 영향을 받게 된다. 이러한 요소들은 활동성 및 업무방해, 피로, 인지능력 감소, 멀미 그리고 숙련도 저하 등 여러 요소들의 복합으로 나타난다. 해양

사고의 80% 정도가 직·간접적으로 인적요인(Human factor)에 기인한 것으로 밝혀졌으며, 멀미 증상으로 인한 다양한 신체적 기능 저하는 이러한 인적요인에 의한 사고와 직접적인 연관이 있을 것으로 추정된다.

하지만, 이러한 연구는 선박의 다양한 성능에 대한 개별적인 연구로서 선박에 승선중인 항해사들이 다소 접하기 어려운 부분들이 있고, 선박을 운항하는 항해사 입장에서 볼 때 이해하기 쉽지 않은 부분들이 많다.

따라서, 본 논문은 선박을 운항하는 항해사에게 현재 운항되고 있는 선박의 운항성능과 항해위험도를 보다 쉽게 인지할 수 있도록 하고, 만약 현재 그 선박이 위험하다고 판단되면 일반적으로 침로와 속력을 변경하게 되는데 그러한 조치를 어떻게 그리고 얼마만큼 취해야 그 위험으로부터 벗어날 수 있는가를 정량적으로 제시하는데 그 목적이 있다. 이러한 연구는 모든 선박에서 활용될 수 있으며, 현재 승선하고 있는 항해사나 새롭게 승선하게 되는 항해사들에게 해당 선박을 보다 안전하게 운항할 수 있도록 해 주는 안전운항지침서(Safe Navigation Guidebook)가 될 것이다.



1.3 논문의 구성

본 논문은 대상 선박인 한국해양대학교 실습선 한바다호 신조 인수 후 약 2년간의 운항 데이터를 바탕으로 선박의 내항성능, 조종성능, 복원성능 및 승선감을 포함한 종합적인 운항성을 평가하였다. IMO 또는 ITTC 등에서 정하고 있는 운항 기준과 다양한 실선시험을 통하여 얻은 자료를 분석·평가함으로써 선박의 안전운항을 위한 가이드라인을 제시하였다. 그 결과, 앞으로 경험할 수 있는 다양한 해상상태에서의 운항성능에 대한 예측이 가능하게 되었고, 이를 이용함으로써 선박의 안전운항에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

제 1장은 서론으로, 연구 배경 및 목적과 관련 연구 동향을 소개하였으며, 선박의 운항성능에 대한 내용과 그 범위를 기술하였다.

제 2장에서는 대상선박의 제원, 선체응력 감시 장치(HMS)의 구성과 데이터 계측 및 디스플레이, 그리고 실선계측이 이루어진 주요 운항실적을 소개하였다.

제 3장에서는 내항성능 평가요소 중 하나인 상하가속도 값을 선교에 설치된 선체응력 감시 장치를 이용하여 계측하고, 그 결과를 ITTC에서 제시하고 있는 내항성능 기준(ITTC Seakeeping criteria)으로 평가하였으며, 또한 모형시험 및 이론계산 결과와 상호 비교·분석하였다. 그리고 내항성능 평가시스템을 이용하여 대상선박의 종합적인 내항성능을 평가하였다.

제 4장에서는 다양하게 실시한 대상선박의 선회시험 결과를 타각, 선회방향, 적화상태, 속력 등 여러 기준으로 비교·분석하고, 그 결과가 IMO에서 규정하고 있는 조종성 기준(IMO Maneuvering standards)을 얼마나 만족하고 있는지 검토하였다. 그리고 선박을 조종하는데 중요한 지표가 되는 조종성지수와 신침로거리 그리고 풍압력 및 풍압모우멘트의 영향에 따른 조종성능도 분석하였다. 또한 풍압력과 파주력을 분석하여 태풍피항 시 진해만에서의 투표 안전성을 평가하였다.

제 5장에서는 대상선박의 표준적화상태에서의 복원성을 계산하여 이를 IMO 복원성 기준(IMO Stability criteria)으로 평가하였다. 또한, 2년간의 실선계측 자료를 분석하여 각 해상상태에 대한 최대 횡요각을 제시하였으며, 동조횡요(Parametric rolling)가 일어나는 조건을 파와의 만남각과 선속으로 표현하여 제시하였다.

제 6장에서는 멀미의 발생 및 작업수행과 관련된 대표적인 국제표준안을 살펴보았고, 가속도 변화에 따른 승선감을 조사·분석하여 멀미증상이 시작되는 가속도의 크기를 확인할 수 있었다. 또한 승선감 향상을 위한 운항 방안도 제시하였다.

제 7장은 결론으로 연구내용을 요약하고, 추후 연구 과제를 기술하였다.

제 2 장 대상 선박의 특성 및 계측 시스템

2.1 대상 선박의 제원 및 특성

본 연구의 대상 선박은 한국해양대학교 실습선 한바다호이다. 본선에 설치된 주요 연구시설로는 선박 조종성능 계측 시스템(Ship's Maneuverability Measuring System), 선체응력 감시 시스템(Hull Stress Monitoring System), 엔진성능 측정 시스템(M.I.P & Ship Performance System), 배기ガ스 분석 시스템(Emission Analyzer System) 등이 있다. 본 연구에서는 내항성능 및 승선감을 평가하기 위해서 선체응력 감시 시스템을 사용하였고, 조종성능을 평가하기 위해서는 선박 조종성능 계측 시스템을 이용하였다.

Figure 2.1과 2.2는 대상 선박의 일반배치도(General Arrangement), 정면도(Body Plan)이며, Table 2.1는 한바다호의 일반제원을 나타내고 있다.²⁷⁾ 참고로 측면도(Sheer Plan)와 반폭도(Half Breadth Plan) 및 유체정력학적 특성 테이블(Hydrostatic Table) 등을 부록에서 제시하였다.

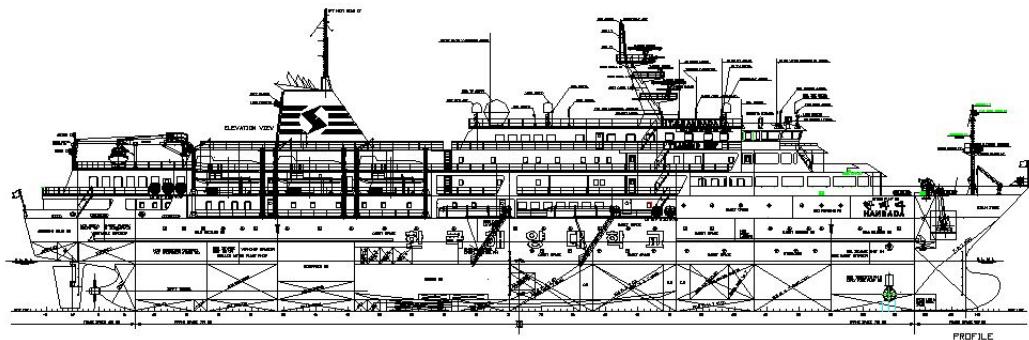


Figure 2.1 General Arrangement of T.S. HANBADA

Table 2.1 General Particulars

ITEMS	DIMENSIONS
Ship's Name	HANBADA
Builder	STX Shipbuilding Co.,Ltd.
Length Overall (LOA)	117.20 m
Length Between Perpendiculars (LBP)	104.00 m
Breath (B)	17.80 m
Mean Draft (Full Loaded Condition)	5.915 m
Maximum Speed	19.0 kts
Service Speed	17.5 kts
Main Engine MCR(100%)	8,130 BHP×176 RPM
Main Engine NCR(85%)	6,910 BHP×167 RPM
Complement	246 persons
Gross Tonnage	6,686 ton
Displacement (Full Loaded Condition)	6,434.6 ton
Block Coefficient (C_b)	0.5719 at 5.915 m
L.C.G (Full Loaded Condition)	-1.955 m
V.C.G (Full Loaded Condition)	6.551 m
G_oM (Full Loaded Condition)	1.931 m
Rudder Area ratio (A_R/L_d)	1/43.94
Transverse Projected Area (A_T)	287 m ²
Lateral Projected Area (A_L)	1,430 m ²

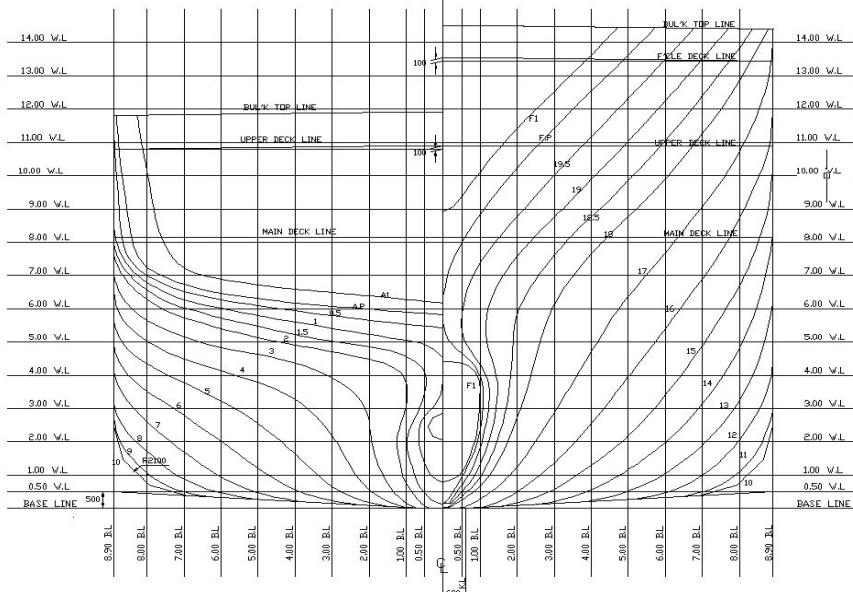


Figure 2.2 Body Plan of T.S. HANBADA

2.2 주요 운항 실적

실습선 한바다호는 2005년 12월 8일 진해 STX 조선소로부터 인수 이후, 연간 실습 일정에 따라 연안 및 원양항해를 실시하였다. 그 중 각종 행사로 단기간 항해한 경우를 제외하고 2006년도, 2007년도의 주요 운항 실적을 Table 2. 2~2.6에 나타내었다.

Table 2.2 Voyage Schedule of T.S. HANBADA

2006년도		2007년도	
일정	기항지	일정	기항지
03/08 ~ 03/13	1차 연안항해(인천)	03/19 ~ 03/22	1차 연안항해(인천)
04/03 ~ 04/06	2차 연안항해(여수)	04/02 ~ 04/05	2차 연안항해(제주)
04/17 ~ 04/20	3차 연안항해(동해)	04/17 ~ 04/21	3차 연안항해(목포)
05/08 ~ 06/12	1학기 원양항해	04/30 ~ 05/01	4차 연안항해(무기항)
06/28 ~ 06/30	4차 연안항해(울산)	05/14 ~ 06/18	1학기 원양항해
09/04 ~ 09/07	5차 연안항해(목포)	09/17 ~ 09/20	5차 연안항해(무기항)
09/19 ~ 09/21	6차 연안항해(제주)	10/09 ~ 11/08	2학기 원양항해
10/18 ~ 11/17	2학기 원양항해	11/26 ~ 11/29	6차 연안항해(여수)
12/04 ~ 12/06	7차 연안항해(보길도)	12/10 ~ 12/13	7차 연안항해(진해)

지난 2년간 한바다호는 4차례의 원양항해를 실시하였고, 그 중에서 2006년 1학기 원양항해와 2007년 2학기 원양항해가 해상상태 6~7로 가장 거칠었다. 따라서 이를 내항성능을 평가하는 대표적인 자료로 가장 많이 이용하였다.

Table 2.3 Schedule of Ocean-going Voyage(2006-1)

항구명	입항일시	거리(mile)	항해일수
	출항일시		
BUSAN			
	2006.05.08 11:00	3598	10d-09h
RANGOON	2006.05.18 18:00		
	2006.05.22 09:00	2927	7d-22h
KEELUNG	2006.05.30 10:00		
	2006.06.02 09:00	1134	3d-00h
YOKOHAMA	2006.06.05 12:00		
	2006.06.08 10:00	1191	4d-00h
BUSAN	2006.06.12 09:00		

Table 2.4 Schedule of Ocean-going Voyage(2006-2)

항구명	입항일시	거리(mile)	항해일수
	출항일시		
BUSAN			
	2006.10.18 11:00	3363	09d-00h
SINGAPORE	2006.10.27 11:00		
	2006.10.30 10:00	1830	5d-00h
CEBU	2006.11.04 10:00		
	2006.11.07 10:00	1844	4d-23h
KOBE	2006.11.11 17:00		
	2006.11.15 10:00	744	2d-00h
BUSAN	2006.11.17 10:00		

Table 2.5 Schedule of Ocean-going Voyage(2007-1)

항구명	입항일시	거리(mile)	항해일수
	출항일시		
BUSAN			
	2007.05.14 11:00	2898	08d-01h
PENANG	2007.05.22 10:00		
	2007.05.25 09:00	1686	4d-23h
HAIPHONG	2007.05.30 10:00		
	2007.05.30 08:00	1635	4d-23h
NAGASAKI	2007.06.07 10:00		
	2007.06.10 10:00	730	3d-01h
DALIAN	2007.06.13 09:00		
	2007.06.16 10:00	559	1d-23h
BUSAN	2007.06.18 10:00		

Table 2.6 Schedule of Ocean-going Voyage(2007-2)

항구명	입항일시	거리(mile)	항해일수
	출항일시		
BUSAN			
	2007.10.09 11:00	1,621	5d-00h
DANANG	2007.10.14 09:00		
	2007.10.17 10:00	1,383	3d-23h
JAKARTA	2007.10.21 09:00		
	2007.10.24 10:00	3,096	09d-22h
TIANJIN	2007.11.03 09:00		
	2007.11.06 07:00	736	2d-02h
BUSAN	2007.11.08 10:00		

2.3 선체응력 감시 장치

한바다호에 탑재된 선체응력 감시 장치(Hull Stress Monitoring System)는 하역작업을 실시하는 정박 중이나 일반적인 항해기간 동안에도 선체운동에 기인한 가속도와 종꼽힘모우멘트를 실시간으로 측정하여 항해사에게 제공해 주는 장치이다. 또한 화물의 부적절한 선적을 피하고 황천항해 중 선체에 가해지는 과도한 응력을 계측하여 선체의 손상을 사전에 예방할 수도 있다.

선체응력 감시 장치의 주요 구성요소는 상갑판(Upper deck)상에 설치되어 선체에 가해지는 응력을 계산하는 4개의 Long Based Strain Gauge, 선수와 선미의 가속도를 실시간으로 계측할 수 있는 각각 1개씩의 상하가속도계, 선교에 설치된 1개의 경사계, 그리고 이러한 신호를 표시해 주는 디스플레이 장치이다.

본 논문은 선수에 설치된 상하가속도계를 이용하여 연안항해 및 원양항해 동안의 가속도를 계측하여 대상 선박의 내항성능을 평가하였다. Figure 2.3은 선교에 설치된 HMS의 디스플레이 장치이다.²⁸⁾

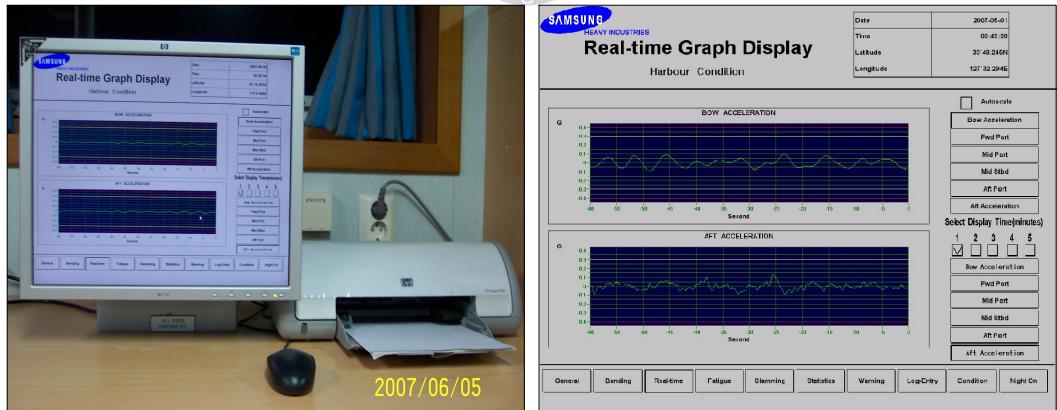


Figure 2.3 Logger Display Unit of HMS

2.3.1 선체응력 감시 장치의 구성

Figure 2.4는 HMS의 배치도이며, 그 구성은 다음과 같다.

- ◆ Computer
- ◆ Signal Conditioning Box
- ◆ One bow accelerometer
- ◆ One aft accelerometer
- ◆ One Inclinometer
- ◆ UPS
- ◆ Four Long Based Strain Gauges (LBSG)
- ◆ Interface with navigational instruments
(GPS, Speed Log, RPM, Anemometer, VDR, Loading Computer)

측정 장치로는 선교에 경사계가 설치되어 있고, 상갑판에는 응력을 측정하는 응력계이지 그리고 선수창고 및 선미의 타기실에는 상하가속도계가 설치되어 있다.

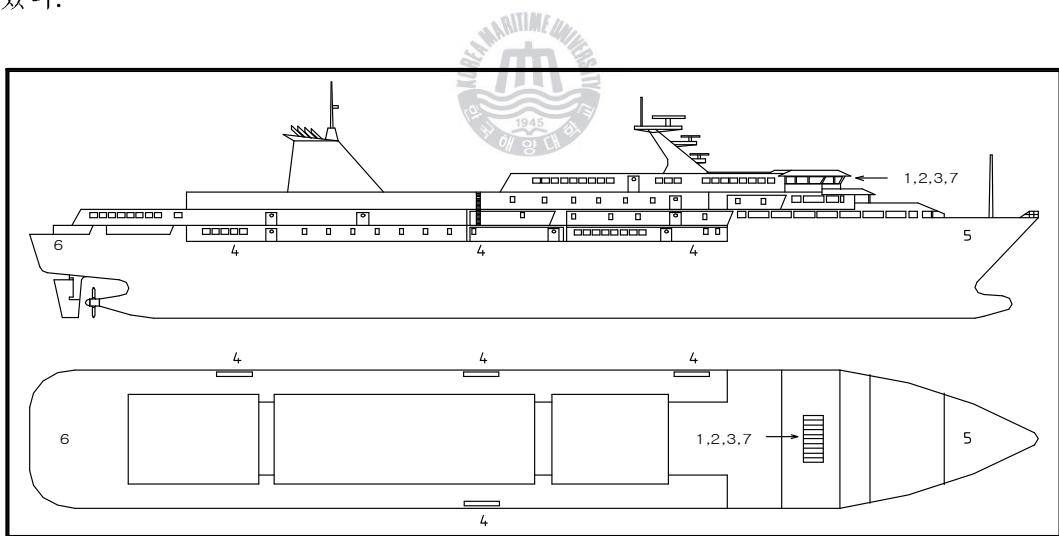


Figure 2.4 Overview of HMS

(1:Logger Display Unit, 2:Signal cond. Unit, 3:UPS,
4:Long Based Strain Gauge, 5: Bow accelerometer
6:Aft accelerometer, 7:Inclinometer)

Figure 2.5는 HMS의 구성도이며, 경사계, 응력계이지, 상하가속도계 뿐만 아니라 GPS, Wind Speed & Direction, Speed Log, M/E RPM 등의 신호를 받아 저장 및 처리하고, 일부 레이터는 Loading Computer, VDR, Lan System, AMS 등에 제공된다.

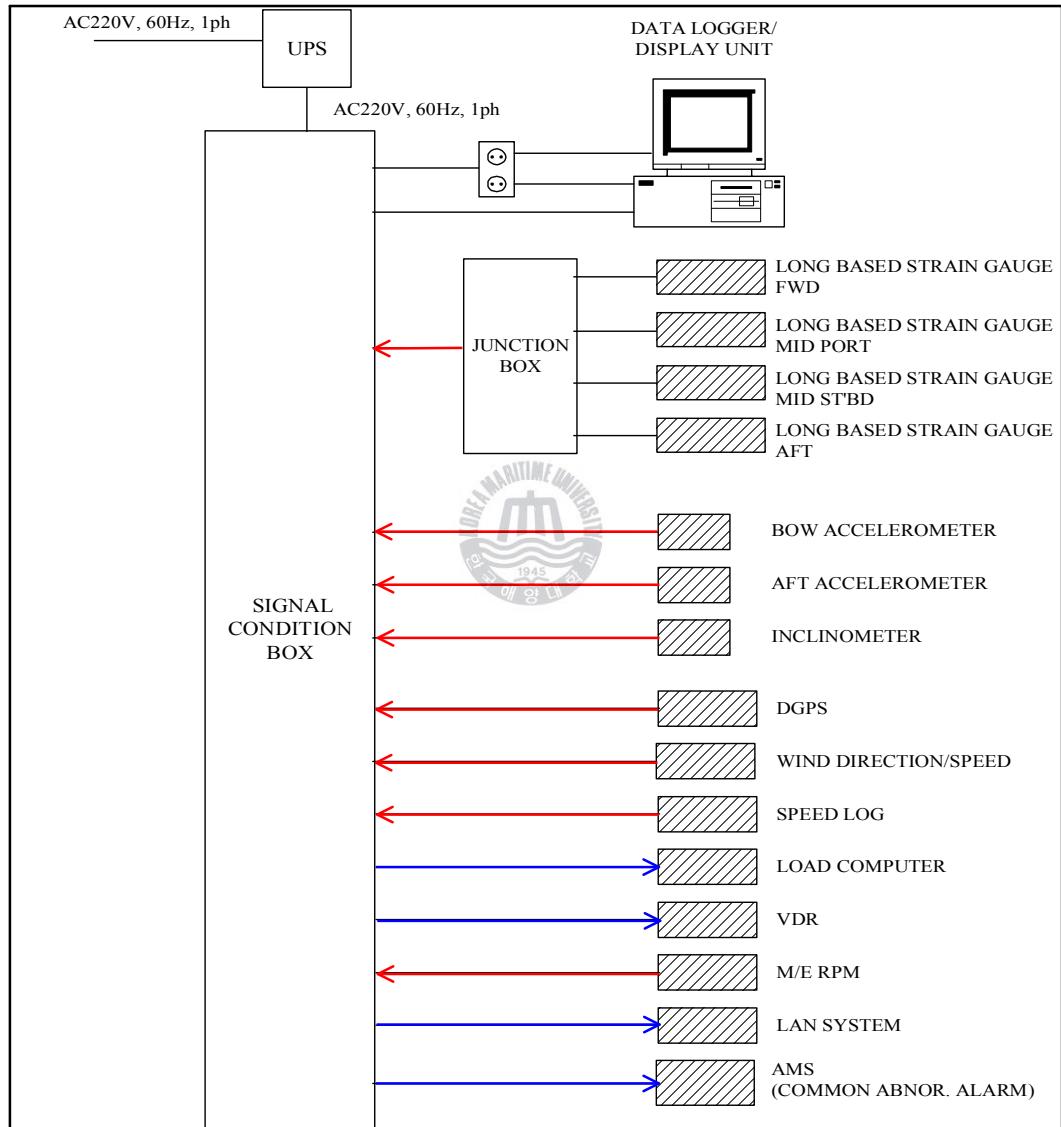


Figure 2.5 Block Diagram of HMS

2.3.2 데이터 계측 및 디스플레이

선박의 운동 계산에 사용된 상하가속도계 센서는 선체의 무게중심(G)으로부터 선수방향으로 47.3m(S.S.19), 위로 5.8m에 위치한 선수창고 내부의 중심선에 설치되어 있고, 롤링 및 피칭을 확인할 수 있는 경사계 센서는 선체의 무게중심(G)으로부터 선수방향으로 27.0m(S.S.15), 위로 13.8m에 위치한 선교의 중심선에 설치되어 있으며, 그 모습과 사양은 Figure 2.6, Table 2.7과 같다. 참고로 Loading Condition(1/3 Consumed)의 VCG는 6.78m이고, LCG는 -1.173m(重心에서 선미방향)이다.

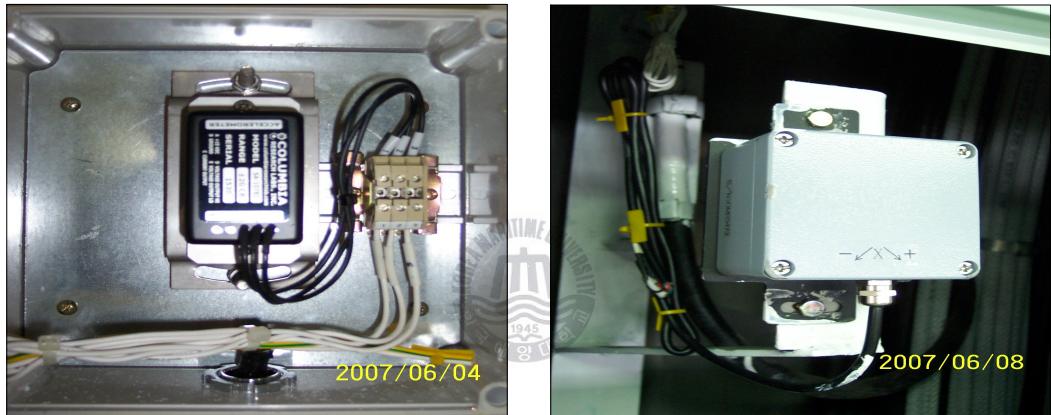


Figure 2.6 Photograph of Sensors

Table 2.7 Specification of Sensors

Accelerometer		Inclinometer	
Type	Servo	Measuring range (Trim)	-15° ~ +15°
Measuring range	± 2g going down(+)	Measuring range (Heeling)	-15° ~ +15°
Frequency response	0 ~ 50 Hz	Response speed	0.3 sec
Accuracy	± 0.2%	Accuracy	± 1%

저장되는 데이터 값들의 형식과 의미는 Figure 2.7 및 2.8과 같다. 각각의 센서에 대한 샘플링 주기는 상하가속도계와 LBSG(응력계이지)의 경우는 초당 20 샘플을 이용하였고, 기타 신호는 초당 1 샘플을 이용하였다. 아래의 데이터는 5 분 동안의 측정값 중에서 Max./Mean/Min. 값을 기록한 것으로, 모든 샘플 데이터에 대한 통계치는 5분 간격으로 메모장 형식으로 저장된다. 그리고 가속도 값은 1g(단, g는 중력가속도) 값을 뺀 값으로 표시되며, 선수가 내려가면 양(+)으로 표시된다. 아래에 저장된 값은 2006년 6월 4일에 저장된 데이터 값이다.

```

2006 6 3 150527 16.2 61 3056.299 N 13103.24 E
12.26194 10.54051 5.396469 6.544463 0.7917037 10.5702 6.122449
23.573 17.73084 11.41378 11.32495 1.878768 17.8301 5.769231
22.17655 14.89924 7.62636 14.16349 2.026565 15.03644 5.660378
15.53142 13.14295 10.63042 4.411715 0.7634764 13.16511 6
0.4482336 -8.436855E-06 -0.5652599 0.9048676 0.1287518 0.1287518 5.555555
0.2878471 -2.189719E-04 -0.2400575 0.5279046 7.870229E-02 7.870259E-02 5.555555
12.32895 2.573995 -5.024872 15.52277 2.33915 3.478085 5.454545
2.789154 -1.736681 -5.519257 5.717468 1.240929 2.134406 6.976744
165.0269 160.7286 156.3904 3.02124 1.307826 160.7339 5.882353
15.78 15.29284 14.78 0.5099993 0.2676819 15.29518 150
17.7 10.40367 5.9 9.500001 3.551652 10.99321 33.33333
86 56.66333 2 76 30.6974 64.44427 12
6117.714 1281.981
9407.252 3169.034
6382.216 1037.027

-7.56
-10.08
-9.11
-5.87
0
0
0.312
Harbour

```

Figure 2.7 Storage of Data

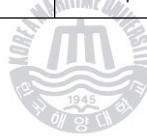
PC time						
Year/month/date from GPS(UTC)	time from GPS(UTC)	speed from GPS	heading from GPS	latitude	longitude	
fwd port max stress	f.p mean stress	f.p min stress	f.p p-to-p	f.p stdv	f.p rms	f.p period
mid port max stress	mid port mean stress	mid port min stress	mid port p-to-p	mid port stdv	mid port rms	mid port period
mid stbd max stress	mid stbd mean stress	mid stbd min stress	mid stbd p-to-p	mid stbd stdv	mid stbd rms	mid stbd period
aft port max stress	aft port mean stress	aft port min stress	aft port p-to-p	aft port stdv	aft port rms	aft port period
fwd accele. max	fwd.a mean	fwd.a min	fwd.a p-to-p	fwd.a stdv	fwd.a rms	fwd.a period
aft accele. max	aft.a mean	aft.a min	aft.a p-to-p	aft.a stdv	aft.a rms	aft.a period
Trim angle max	t.a mean	t.a min	t.a p-to-p	t.a stdv	t.a rms	t.a period
Heel angle max	h.a mean	h.a min	h.a p-to-p	h.a stdv	h.a rms	h.a period
engine rpm max	e.rpm mean	e.rpm min	e.rpm p-to-p	e.rpm stdv	e.rpm rms	e.rpm period
log speed max	l.s mean	l.s min	l.s p-to-p	l.s stdv	l.s rms	l.s period
wind speed max	w.s mean	w.s min	w.s p-to-p	w.s stdv	w.s rms	w.s period
wind direc. max	w.d mean	w.d min	w.d p-to-p	w.d stdv	w.d rms	w.d period
fwd swbm (ton-m)	fwd wbm					
mid swbm (ton-m)	mid wbm					
aft swbm (ton-m)	aft wbm					
fwd port offset						
mid port offset						
mid stbd offset						
aft port offset						
fwd accel. offset						
aft accel. offset						
aft accel. offset						
Slamming_severity						
ship's condition						

Figure 2.8 Meaning of Data

Figure 2.9~2.11은 HMS을 이용하여 계측한 중요한 측정값들을 나타낸 화면이다. 여기에서 제시되는 값들은 한바다호 인수 후 약 2년 동안의 데이터 중에서 해상상태가 6~7로 매우 거칠었던 2006년 6월 4일 원양항해 중의 상태를 보여주고 있다.

Figure 2.9에 나타낸 상하가속도에 대한 그림에서 (-)로 표시되는 가속도는 선수가 위로 올라갈 때의 가속도로 최고 1.2g 정도에 이르며, 선수가 내려갈 때의 가속도(+) 보다 크게 측정되었음을 알 수 있다. 또한 측정된 가속도를 보면 8시를 기점으로 가속도가 크게 차이를 보이고 있는데, 6월 4일의 해상상태가 8시 이전에는 해상상태 5이었고, 그 이후에 해상상태가 점점 거칠어져 해상상태 7에 이르렀기 때문인 것으로 판단된다. 가속도가 측정된 시간은 24시간으로 표시되어 있으나, 필요에 따라 화면 변경이 가능하다.

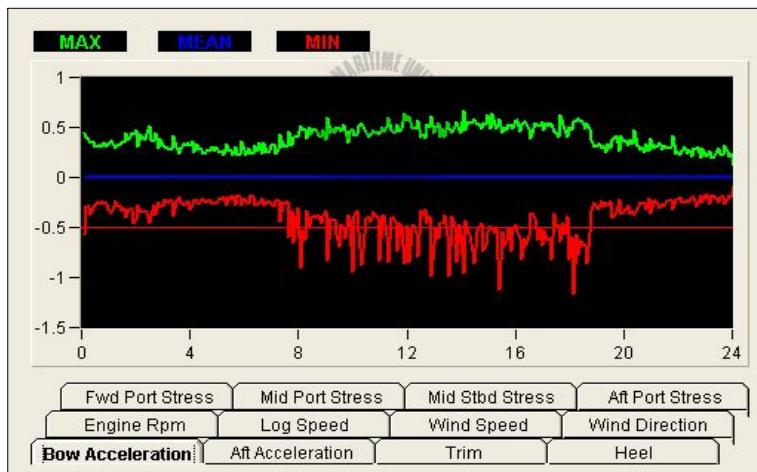


Figure 2.9 Display of Bow Acceleration

Figure 2.10은 종요를 나타내며, 상하가속도와 유사한 형태를 보이고 있다. 이는 일반적으로 종요와 상하요가 발생할 때 가속도가 함께 발생하기 때문이다. 따라서 가속도가 커지는 부분에서 종요도 동시에 크게 발생되었음을 알 수 있다. (+)값은 선수가 올라간 상태를 의미하고, (-)는 선수가 내려간 상태를 의

미한다. 그리고 평균값에서 알 수 있듯이 선박은 선미트림이 3° 정도인 상태이다.

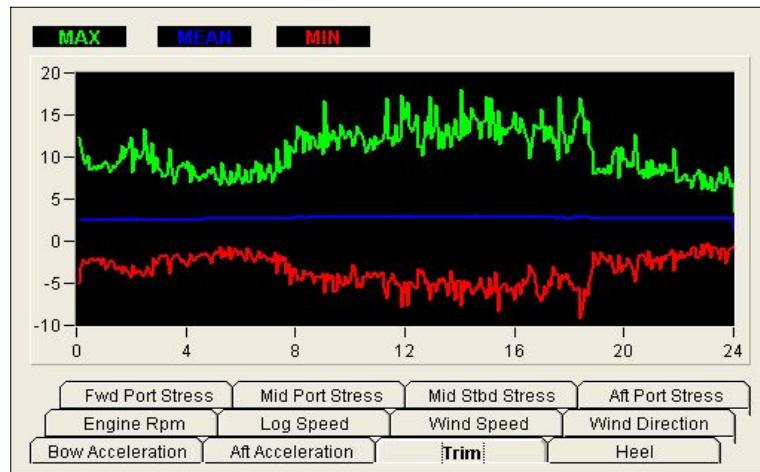


Figure 2.10 Display of Trim(Pitch)

Figure 2.11은 횡요를 나타내며, (+)는 우현 경사를 의미하고, (-)는 좌현으로의 경사를 의미한다. 전반적으로 큰 경사는 없었으나, 18시 전후에 15° 정도의 경사가 있었음을 알 수 있다.

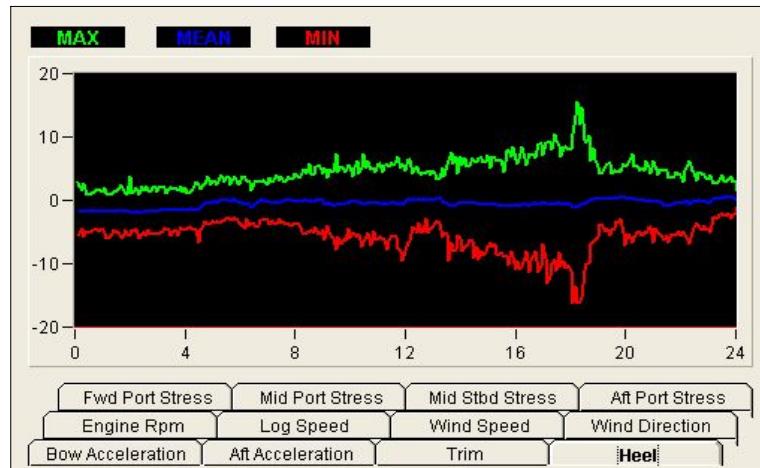


Figure 2.11 Display of Heel(Roll)

제 3 장 내항성능 평가

바다를 항해하는 선박은 때때로 거친 파도를 만나게 되는데 이러한 악조건에서도 선박은 화물을 안전하게 운송할 수 있어야 하며, 여객선은 승객의 안락과 안전을 보장해야 한다. 특히, 군함과 같이 특수한 임무를 수행하는 선박들은 거친 해상에서도 주어진 임무를 완벽하게 수행할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.

선박이 파랑 중을 항해하게 되면 파도로 인한 동요를 경험하게 되며, 이러한 선체의 동요는 승객의 안락감을 해치고 선원의 작업능력을 저하시킬 뿐만 아니라 선박에 탑재된 각종 장비의 성능을 떨어뜨린다. 동요가 점점 심해지면 선적 중인 화물에 손상을 주기도 하고, 매우 심한 경우에는 선체에 과도한 응력이 가해져 절단되거나 전복되는 경우도 생긴다. 따라서, 선박을 설계함에 있어 파랑 중에서도 파손이나 전복되지 않고 우수한 성능을 발휘할 수 있도록 해야 하는데, 이를 위해서는 파도에 의해 선박이 받게 되는 힘과 그 힘으로 말미암아 발생되는 선박의 동요를 해석하는 기술이 필요하다. 아울러 선박의 동요로 인해 저하되는 선박의 성능을 정량적으로 예측할 수 있어야 한다. 이렇게 파랑 중 선박의 성능을 해석하고 평가하는 기술을 내항성능 평가기술이라 한다.^{4),6),29)}

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 운항능력(Operability), 선박과 선원 및 화물의 안전과 관련된 생존능력(Survivability)을 최우선으로 고려해야 한다. Figure 3.1에서는 내항성능을 만족하는 선박을 설계할 때 필요한 단계를 보여주고 있다. 이러한 내항성능을 분석하는데 있어 필요한 주요소는 주어진 고유한 특성을 지닌 선박(Ship), 선박이 해당 임무를 완수해야 하는 특정한 해상조건(Sea conditions), 선박이 해당 임무를 효과적으로 완수하는데 있어 초과해서는 안 되는 운항기준(Operational criteria) 등이다.³⁰⁾

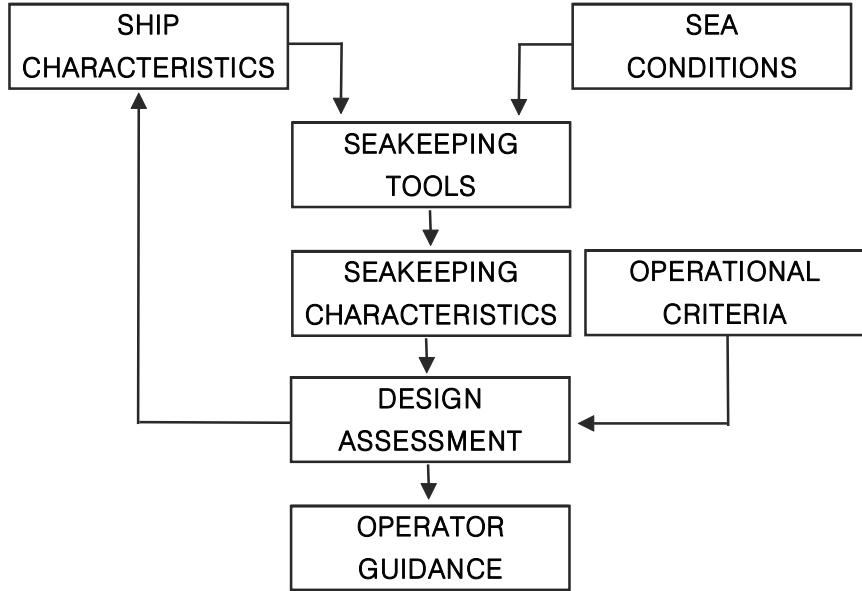


Figure 3.14 Seakeeping Performance

실제 해상을 항해하는 모든 선박은 파랑 및 바람과 같은 외력으로 인하여 발생하는 선체의 불규칙한 운동의 최대허용 가능치인 내항성능 기준(Seakeeping criteria)의 설정이 필요하다. 특히, 해상 상태가 거칠어지면서 생존 및 작업 가능성에 대한 기준으로서 슬래밍, 선수갑판침수, 횡동요, 종동요, 상하가속도 및 좌우가속도 등에 대한 연구가 ITTC의 내항성 분과위원회를 중심으로 이루어지고 있다. 하지만 여기서도 주로 이론 및 실험적 연구만이 이루어지고 있으며, 실선측정 자료를 수집하는 데는 상당한 어려움이 있다.

따라서, 본 논문에서는 내항성능 평가요소 중 하나인 상하가속도 값을 선교에 설치된 선체응력 감시 장치를 이용하여 해상상태별 변화량을 계측하고, 이를 모형시험 및 이론계산 결과와 상호 비교하였다. 또한 실측한 가속도를 내항성능 평가 시스템에 적용하여 종합적인 항해 위험도를 산출하였으며, ITTC에서 제시하는 내항성능 기준치와도 비교함으로써 대상 선박의 내항성능을 평가하였다. 이러한 결과는 앞으로 경험할 수 있는 다양한 해상상태에서의 작업 가능성 및 위험성 정도의 예측을 가능하게 함으로써 선박의 안전운항에 큰 도움

이 될 것으로 판단되며, 또한 폭넓고 다양한 실선계측을 통하여 조선소에서는 보다 우수한 성능의 선박 건조가 가능할 것으로 사료된다.

3.1 실선 조사

최근에 선박이 대형화, 고속화되면서 선수 충격파 영향으로 선체 또는 화물에 잦은 손상을 초래하기도 하고, 극단적인 상황에서는 선박이 절단되기도 한다. 따라서, 본 논문에서는 선교에 설치된 선체용력 감시 장치(HMS)를 이용하여 실습선 한바다호 인수 후 실시한 수차례의 연안항해와 원양항해를 통해 수집한 가속도, 슬래밍, 횡요, 종요, 선속, 풍속, 파고 등 각종 자료를 분석하여 실습선 한바다호의 내항성능을 평가하였다. 첫째, 파장이 비교적 큰 대양에서의 실측자료를 바탕으로 해상상태에 따른 가속도 수준을 살펴보았고, 둘째, 동일한 해상 조건에서도 선박과 파와의 만남각에 따른 가속도 차이를 살펴보았으며, 셋째, 연안 및 대양의 서로 다른 파장에서의 가속도 차이를 살펴보았다.



3.1.1 해상상태에 따른 가속도 비교

해상상태의 변화에 따른 가속도 변화량을 조사하기 위하여 항해일지(Log Book)의 기록을 바탕으로 먼저 연안항해와 대양항해를 구분하여 조사하였다. 그 중에서 동일한 해상상태(Sea state)에 해당되는 날짜를 찾아 분류하였으며, 마지막으로 동일한 해상상태일지라도 선박과 파와의 만남각을 고려하여 분석하였다. 또한 선체용력 감시 장치의 풍향 및 풍속자료도 함께 이용하여 해상상태를 판단하는데 참고하였다.

여기에서는 동일한 해상조건에서도 가속도 값이 가장 크게 측정된 선수파에 가까운 경우를 선택했고, 연안항해보다는 가속도 값이 더 크게 측정된 대양항해를 선택하여 각 해상상태별로 측정된 가속도 값을 제시하였다. 4차례의 원양항해 중 2006년 1학기 원양항해에 해당되는 5월 8일부터 6월 12일까지의 일정인 ‘부산-양곤

-기릉-요코하마-부산'의 항해와 2007년 2학기 원양항해에 해당되는 10월 9일부터 11월 8일까지의 일정인 '부산-다낭-자카르타-천진-부산'의 항해가 해상상태가 가장 거칠었고 대표적인 자료로 많이 이용되었다.

Table 3.1은 US Navy Hydrographic Office에서 제시한 해상상태별 파고를 나타내고 있으며, Figure 3.2는 해상상태 6에 해당되는 2006년 6월 3일 실습선 한바다호의 선교에서 찍은 사진을 보여주고 있다. Table 3.2는 ITTC에서 제시하고 있는 내항성능 기준을 나타내고 있으며, 해상상태별 대표적인 날짜의 항해일지 기록과 선체응력 감시 장치 측정 화면은 Table 3.3~3.6 및 Figure 3.3~3.13에 나타낸 바와 같다.

Table 3.1 Sea State of US Navy Hydrographic Office

Sea State	Significant Wave Height[m]	Model Period[sec]
4	1.88	8.8
5	3.25	9.7
6	5.00	12.4
7	7.50	15.0



Figure 3.15 Photograph of T.S. HANBADA(Sea State 6)

Table 3.2 Seakeeping Criteria of ITTC

Items	Definitions	Seakeeping Criteria	
		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	50
Slamming	Number/hour	20	50
V. Acceleration	Significant Single Amplitude in G	0.4	0.8
L. Acceleration	Significant Single Amplitude in G	0.2	0.4

Table 3.3 Records of Log Book(Sea State 4)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Route
06051004	25-39N 122-57E	210	14.75	S	4	3	BUSAN-RANGOON
06051008	25-50N 122-34E	199	14.25	SSE	4	4	BUSAN-RANGOON
06051012	24-01N 122-11E	199	12.75	SSE	4	4	BUSAN-RANGOON
06051016	23-09N 121-50E	199	13.75	SSE	4	4	BUSAN-RANGOON
06051020	22-16N 121-27E	206	14.25	SE	3	3	BUSAN-RANGOON
06051024	21-25N 120-58	221	14.25	NE	3	3	BUSAN-RANGOON
06102504	06-47N 106-22E	170	16.00	NNE	5	5	BUSAN-SINGAPORE
06102508	06-50N 107-12E	170	16.25	NNE	4	4	BUSAN-SINGAPORE
06102512	06-53N 108-02E	040	15.25	NE	5	5	BUSAN-SINGAPORE
06102516	07-42N 108-44E	041	16.25	NNE	5	4	BUSAN-SINGAPORE
06102520	08-28N 109-24E	041	15.00	NE	4	4	BUSAN-SINGAPORE
06102524	07-34N 108-38E	221	17.00	NNE	3	3	BUSAN-SINGAPORE
06103104	04-19N 105-57E	039	15.50	NNE	5	4	SINGAPORE-CEBU
06103108	04-44N 106-56E	074	15.50	NNE	5	4	SINGAPORE-CEBU
06103112	04-59N 107-52E	072	15.25	NE	4	4	SINGAPORE-CEBU
06103116	05-16N 108-48E	074	14.50	NNE	4	4	SINGAPORE-CEBU
06103120	05-34N 109-50E	074	15.50	N	4	4	SINGAPORE-CEBU
06103124	05-53N 110-52E	070	16.50	W	4	4	SINGAPORE-CEBU



Figure 3.16 Vertical Acceleration (2006. 5. 10)

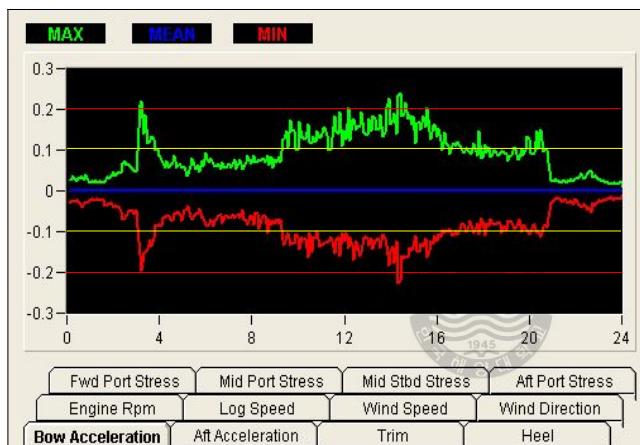


Figure 3.17 Vertical Acceleration (2006. 10. 25)

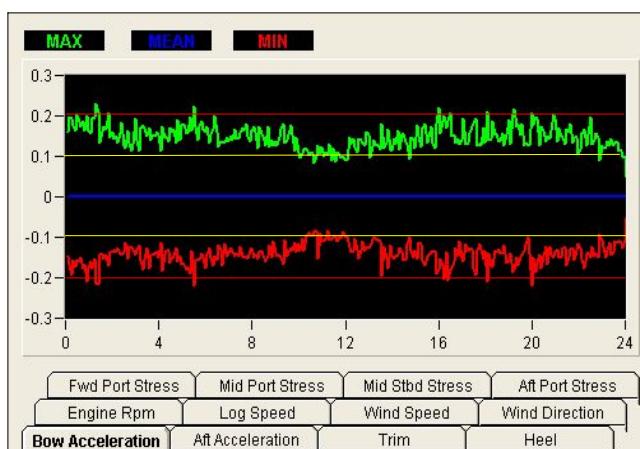


Figure 3.18 Vertical Acceleration (2006. 10. 31)

Sea State 4

- Maximum : 0.1g
- Significant : 0.08g
- Bow Sea

Sea State 4

- Maximum : 0.24g
- Significant : 0.2g
- Head Sea

Sea State 4

- Maximum : 0.22g
- Significant : 0.2g
- Bow Sea

Table 3.4 Records of Log Book(Sea State 5)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Route
06052204	RANGOON PORT		BERTHED	SE	3	3	AT RANGOON
06052208	RANGOON PORT		BERTHED	SE	3	3	AT RANGOON
06052212	RANGOON PORT		BERTHED	SSW	3	3	AT RANGOON
06052216	15-20N 096-44E	176	13.75	S	3	3	RANGOON-KEELUNG
06052220	14-20N 096-44E	180	15.50	S	4	4	RANGOON-KEELUNG
06052224	13-14N 096-41E	180	16.25	SW	6	5	RANGOON-KEELUNG
06110804	14-30N 125-00E	018	16.25	ENE	5	4	CEBU-KOBE
06110808	15-34N 125-22E	018	15.75	ENE	5	4	CEBU-KOBE
06110812	16-31N 125-40E	018	15.00	ENE	5	5	CEBU-KOBE
06110816	17-28N 126-00E	018	14.75	NNE	5	5	CEBU-KOBE
06110820	18-24N 126-15E	018	14.50	ENE	5	5	CEBU-KOBE
06110824	19-19N 126-39E	018	14.50	NE	6	5	CEBU-KOBE
06110904	20-14N 126-57E	018	14.25	NE	6	5	CEBU-KOBE
06110908	21-12N 127-17E	018	15.00	NE	6	5	CEBU-KOBE
06110912	22-12N 127-38E	018	15.75	NE	6	5	CEBU-KOBE
06110916	23-12N 128-00E	018	15.75	ENE	5	5	CEBU-KOBE
06110920	23-50N 128-15E	018	16.00	ENE	5	5	CEBU-KOBE
06110924	24-40N 128-31E	018	16.33	ENE	5	5	CEBU-KOBE

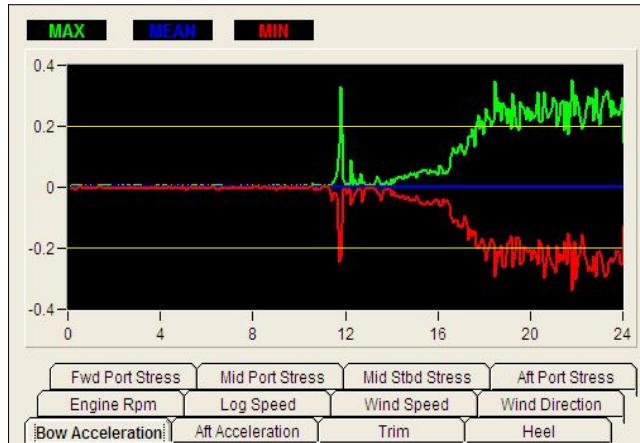


Figure 3.19 Vertical Acceleration (2006. 5. 22)

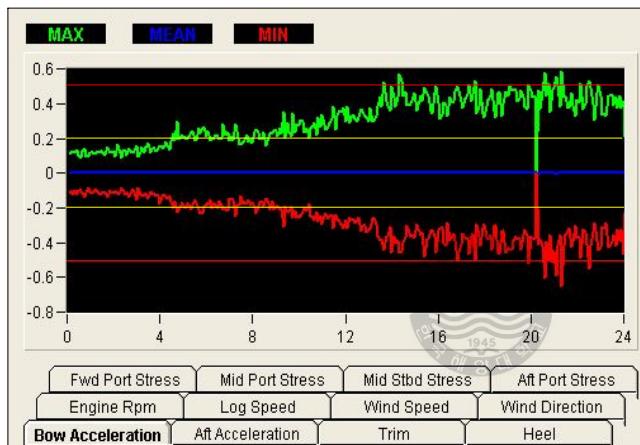


Figure 3.20 Vertical Acceleration (2006. 11. 8)

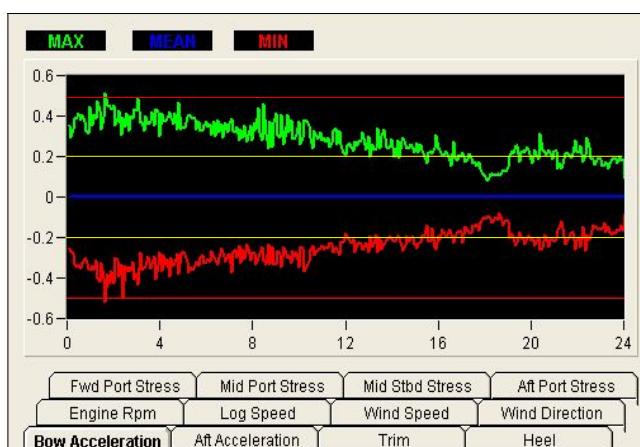


Figure 3.21 Vertical Acceleration (2006. 11. 9)

Sea State 5

- Maximum : 0.35g
- Significant : 0.3g
- Head Sea

Sea State 5

- Maximum : 0.6g
- Significant : 0.5g
- Bow Sea

Sea State 5

- Maximum : 0.5g
- Significant : 0.4g
- Head Sea

Table 3.5 Records of Log Book(Sea State 6)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Route
06060304	28-03N 126-26E	049	17.50	NW	6	6	KEELUNG-YOKOHAMA
06060308	28-45N 127-30E	049	17.00	N	7	6	KEELUNG-YOKOHAMA
06060312	29-33N 128-10E	049	12.00	NNE	6	6	KEELUNG-YOKOHAMA
06060316	29-51N 129-08E	049	15.75	NE	6	6	KEELUNG-YOKOHAMA
06060320	30-23N 129-38E	065	16.75	NE	6	6	KEELUNG-YOKOHAMA
06060324	30-56N 131-03E	065	17.33	NE	5	5	KEELUNG-YOKOHAMA
07102804	15-01N 114-33E	027	15.75	NE	6	6	JAKARTA-TIANJIN
07102808	15-56N 115-04E	027	14.00	NE	6	6	JAKARTA-TIANJIN
07102812	16-48N 115-30E	027	14.50	NE	6	6	JAKARTA-TIANJIN
07102816	17-30N 115-53E	027	14.00	NE	6	6	JAKARTA-TIANJIN
07102820	18-26N 116-24E	027	13.50	NE	7	6	JAKARTA-TIANJIN
07102824	19-01N 116-42E	027	10.00	NE	7	6	JAKARTA-TIANJIN
07102904	19-46N 117-06E	027	14.00	NE	6	6	JAKARTA-TIANJIN
07102908	20-40N 117-35E	027	14.00	NE	7	6	JAKARTA-TIANJIN
07102912	21-34N 118-04E	027	14.00	NE	7	6	JAKARTA-TIANJIN
07102916	22-18N 118-27E	027	13.75	NE	7	7	JAKARTA-TIANJIN
07102920	22-55N 118-55E	010	10.05	NNE	8	6	JAKARTA-TIANJIN
07102924	23-34N 119-06E	027	09.25	NNE	9	7	JAKARTA-TIANJIN

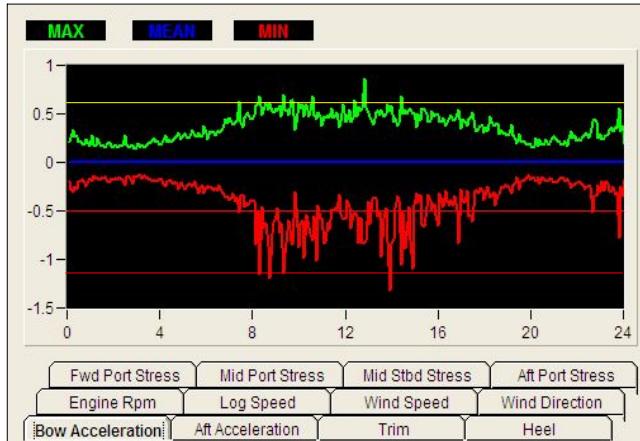


Figure 3.22 Vertical Acceleration (2006. 6. 3)

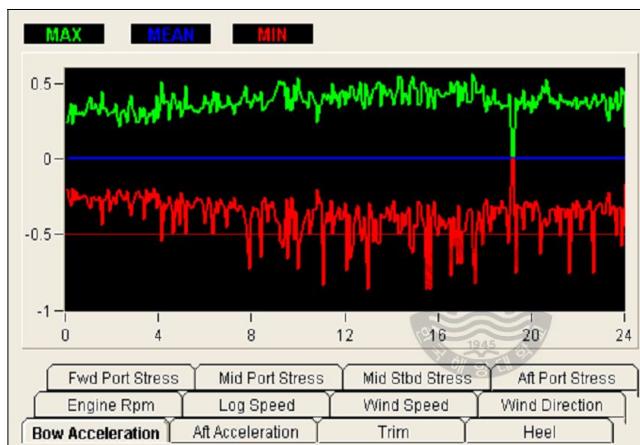


Figure 3.23 Vertical Acceleration (2007. 10. 28)

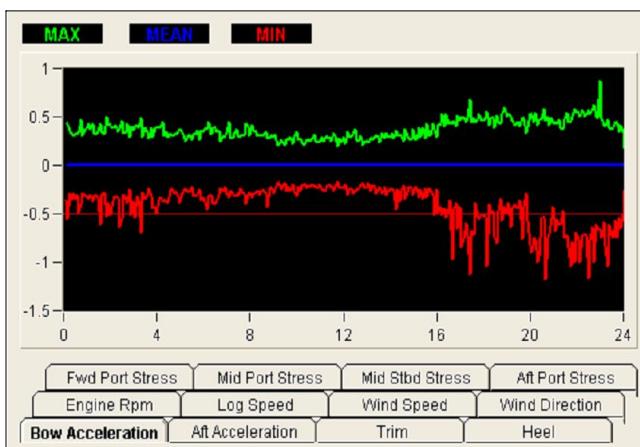


Figure 3.24 Vertical Acceleration (2007. 10. 29)

Sea State 6

- Maximum : 1.2g
- Significant : 1.0g
- Head Sea

Sea State 6

- Maximum : 0.8g
- Significant : 0.7g
- Head Sea

Sea State 6/7

- Maximum : 1.2g
- Significant : 0.9g
- Head Sea

Table 3.6 Records of Log Book(Sea State 7)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Route
06060404	31-25N 132-06E	062	15.50	NE	5	5	KEELUNG-YOKOHAMA
06060408	31-57N 133-15E	062	15.75	NE	6	5	KEELUNG-YOKOHAMA
06060412	33-30N 134-20E	057	16.00	NE	8	7	KEELUNG-YOKOHAMA
06060416	33-00N 135-23E	050	15.25	NE	8	7	KEELUNG-YOKOHAMA
06060420	33-37N 136-20E	051	15.00	NE	7	7	KEELUNG-YOKOHAMA
06060424	34-11N 137-21E	078	16.00	ENE	6	6	KEELUNG-YOKOHAMA
07103004	23-48N 119-13E	023	04.25	NE	7	7	JAKARTA-TIANJIN
07103008	24-15N 119-25E	023	06.50	NNE	8	7	JAKARTA-TIANJIN
07103012	24-43N 119-51E	040	09.00	NNE	8	7	JAKARTA-TIANJIN
07103016	25-07N 120-12E	040	08.75	NNE	8	7	JAKARTA-TIANJIN
07103020	25-50N 120-50E	040	12.50	NE	8	6	JAKARTA-TIANJIN
07103024	26-33N 121-03E	055	13.25	NE	7	6	JAKARTA-TIANJIN

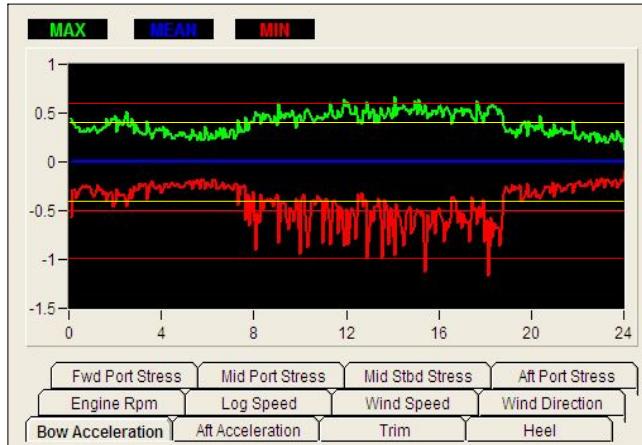


Figure 3.25 Vertical Acceleration (2006. 6. 4)

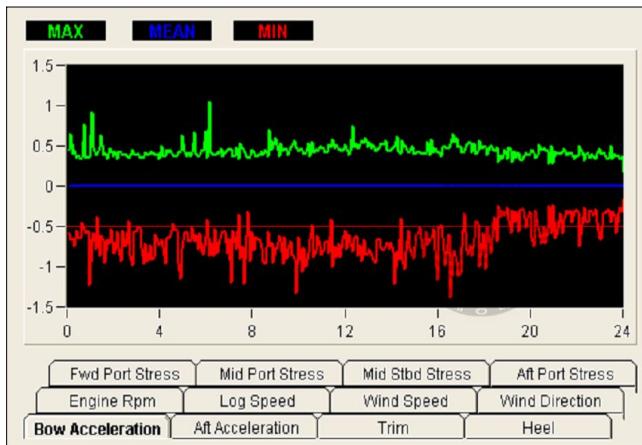


Figure 3.26 Vertical Acceleration (2007. 10. 30)

Figure 3.3~3.13에서 실측된 상하가속도 값의 각 해상상태별 범위는 Table 3.7과 같고, 1/3유의치와 최대치를 분석한 결과는 Figure 3.14와 같다. 가속도는 과향 및 선속에 따라 다소 차이는 있지만, 해상상태 4에서는 0.2g이하였고, 해상상태가 점점 나빠져 7정도에 가까워 갈수록 0.8g를 넘었다. 한바다호 인수 이후로 가장 해상상태가 거칠었던 원양항해 기간중인 2006년 6월 4일과 2007년 10월 30일에는 1.3g에 이르기 까지도 하였다. 이는 ITTC에서 규정하고 있는 작업가능기준치 0.4g 및 생존가능기준치 0.8g보다 다소 높은 결과이다.

Table 3.7 Measurement Value of Vertical Acceleration

Sea State	Significant Wave Height[m]	Vertical Acceleration[g]	Date of Sampling
4	1.88	0.1~0.2	5/10, 10/25, 10/31
5	3.25	0.2~0.4	5/22, 11/8, 11/09
6	5.00	0.4~0.8	6/3, 10/28, 10/29
7	7.50	0.8~1.2	6/4, 10/30

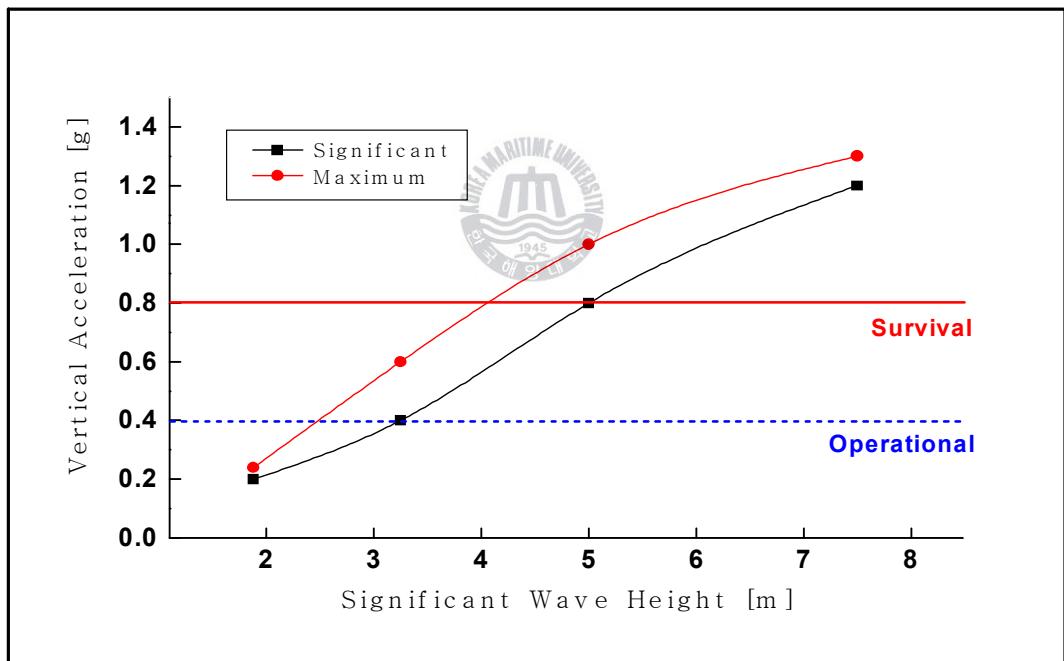


Figure 3.27 Variation of V. Acceleration with Wave Height

3.1.2 선박과 파도의 만남각에 따른 가속도 비교

Figure 3.15는 선박과 파와의 만남각에 따른 상하가속도의 1/3 유의치 측정 결과를 나타내고 있으며, 선수파를 받으면 항해할 때 가속도가 가장 높게 측정되었다. 특히, 해상상태 6에서는 선수파를 받으면 항해할 때 측정된 상하가속도가 0.8g로 선미파를 받으면 항해할 때 측정된 상하가속도 0.3g보다 0.5g 높게 측정되었다.

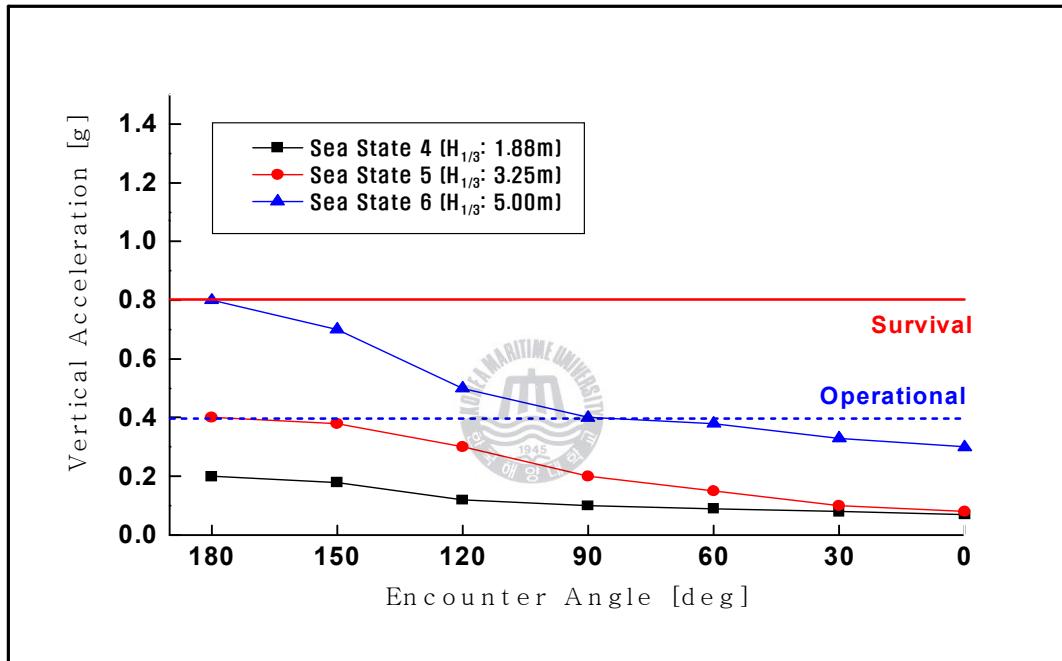
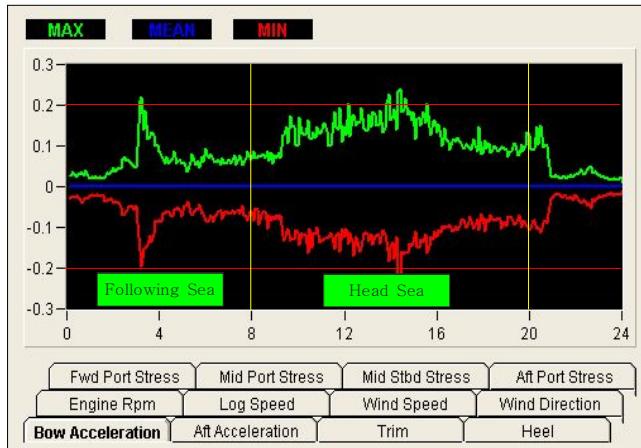


Figure 3.28 Variation of V. Acceleration with Encounter Angle

Figure 3.16과 Table 3.8은 2006년 10월 25일의 가속도 변화 및 해당 날짜의 항해일지 기록을 나타내고 있다. 00~08시까지는 추파(Following sea)인 상태로 항해하다가, 08~20시까지는 선수파(Head sea)를 받으며 항해하였고, 선수파를 받으면 항해할 때 가속도가 0.1g정도 높게 측정되었다.



Sea State 4

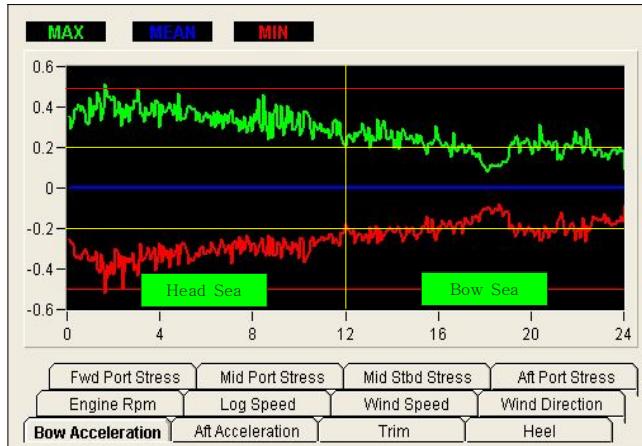
- Maximum : 0.24g
- Significant : 0.2g
- Following Sea
- Head Sea

Figure 3.29 Vertical Acceleration (2006. 10. 25)

Table 3.8 Records of Log Book(Sea State 4)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Encounter Angle
06102504	06-47N 106-22E	170	16.00	NNE	5	5	following sea
06102508	06-50N 107-12E	170	16.25	NNE	4	4	following sea
06102512	06-53N 108-02E	040	15.25	NE	5	5	head sea
06102516	07-42N 108-44E	041	16.25	NNE	5	4	head sea
06102520	08-28N 109-24E	041	15.00	NE	4	4	head sea
06102524	07-34N 108-38E	221	17.00	NNE	3	3	following sea

Figure 3.17과 Table 3.9는 2006년 11월 9일의 가속도 변화 및 해당 날짜의 항해일지 기록을 나타내고 있다. 00~12시까지는 선수파를 받으며 항해하다가, 12~24시까지는 사향파(Bow Sea)를 받으며 항해하였고, 선수파를 받으며 항해 할 때 가속도가 0.2g정도 높게 측정되었다.



Sea State 5

- Maximum : 0.5g
- Significant : 0.4g
- Head Sea
- Bow Sea

Figure 3.30 Vertical Acceleration (2006. 11. 9)

Table 3.9 Records of Log Book(Sea State 5)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Encounter Angle
06110904	20-14N 126-57E	018	14.25	NE	6	5	head sea
06110908	21-12N 127-17E	018	15.00	NE	6	5	head sea
06110912	22-12N 127-38E	018	15.75	NE	6	5	head sea
06110916	23-12N 128-00E	018	15.75	ENE	5	5	bow sea
06110920	23-50N 128-15E	018	16.00	ENE	5	5	bow sea
06110924	24-40N 128-31E	018	16.33	ENE	5	5	bow sea

Figure 3.18과 Table 3.10은 2006년 6월 3일의 가속도 변화 및 해당 날짜의 항해일지 기록을 나타내고 있다. 00~06시까지는 횡파(Beam sea)인 상태로 항해하다가, 08~16시까지는 선수파를 받으며 항해하였고, 선수파를 받으며 항해할 때 가속도가 0.7g정도 높게 측정되었다.



Figure 3.31 Vertical Acceleration (2006. 6. 3)

Sea State 6

- Maximum : 1.2g
- Significant : 1.0g
- Head Sea
- Beam Sea

Table 3.10 Records of Log Book(Sea State 6)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Encounter Angle
06060304	28-03N 126-26E	049	17.50	NW	6	6	beam sea
06060308	28-45N 127-30E	049	17.00	N	7	6	bow sea
06060312	29-33N 128-10E	049	12.00	NNE	6	6	head sea
06060316	29-51N 129-08E	049	15.75	NE	6	6	head sea
06060320	30-23N 129-38E	065	16.75	NE	6	6	head sea
06060324	30-56N 131-03E	065	17.33	NE	5	5	head sea

3.1.3 연안항해와 대양항해의 가속도 비교

선체운동은 파도와 선박의 만남각 뿐만 아니라 주기 및 파장에 따라서도 상당히 달라진다. 실습선 한바다호는 50m 미만의 비교적 짧은 연안을 항해할 때 보다는 선박 길이의 1~1.5배에 해당되는 100~150m 전후의 긴 대양을 항해할 때 선체운동이 크게 일어난 것으로 확인되었다. Figure 3.19에서는 연안에서와 대양에서의 항해 중 상하가속도 값의 차이를 나타내고 있으며, 대양에서 0.1g정도 높게 측정되었다.

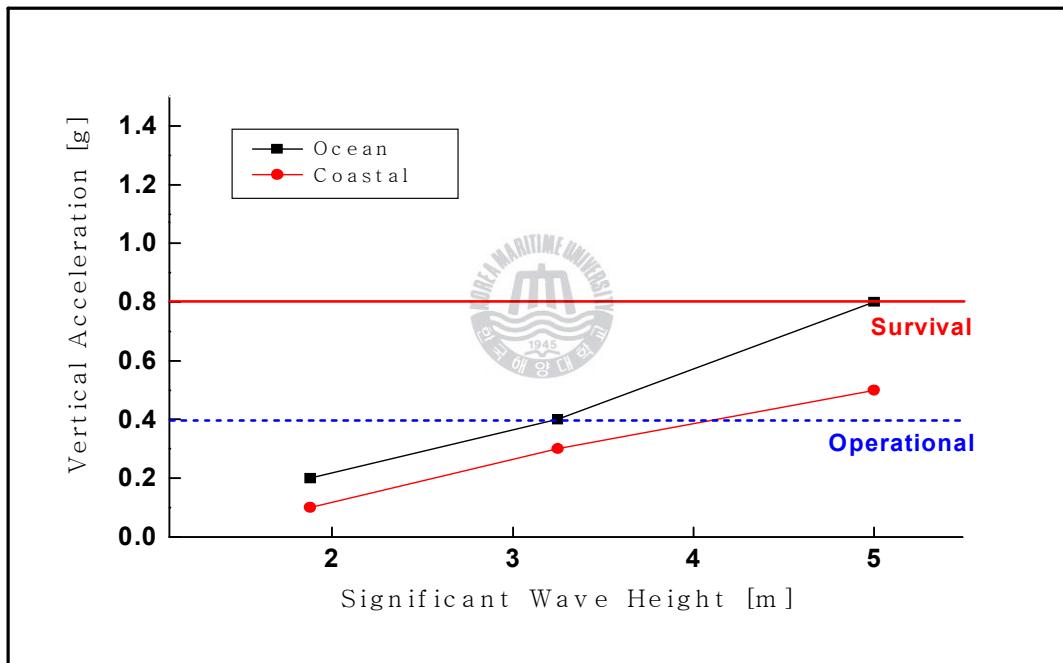


Figure 3.32 Variation of V. Acceleration with Wave Height

Figure 3.20과 Table 3.11은 2006년 04월 20일 동해항에서 부산항으로 연안항 해를 할 때의 가속도 변화를 나타내고 있다. 해상상태가 7일 때 대양에서의 상하가속도는 최대 1.2g까지로 예측되나, 연안에서는 0.5g정도로 대양에서 측정된 가속도 값에 크게 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

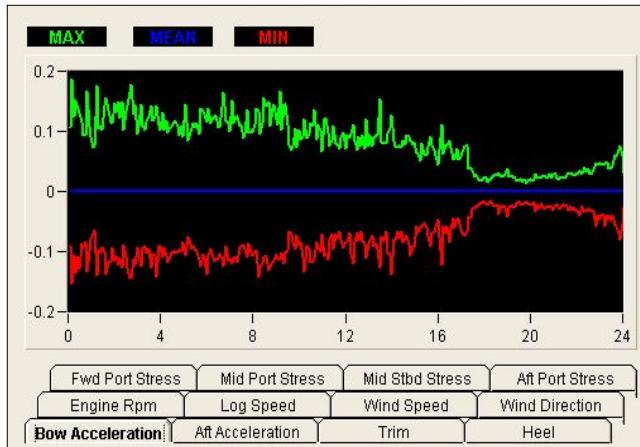


Figure 3.33 V. Acceleration (Coastal, 2006. 4. 20)

Table 3.11 Records of Log Book(Coastal, 2006. 4. 20)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Route
06042000	35-46N 129-37E	187	17.00	W	7	5	Tonghae-Busan
06042002	35-05N 129-20E	187	15.25	WSW	7	5	Tonghae-Busan
06042004	34-53N 129-05E	226	15.25	WSW	8	5	Tonghae-Busan
06042006	34-33N 128-37E	130	16.00	WSW	9	7	Tonghae-Busan
06042008	34-05N 128-30E	050	16.00	WSW	7	6	Tonghae-Busan
06042010	K.M.U	BERTHED		W	6	5	Tonghae-Busan

Figure 3.21과 Table 3.12도 마찬가지로 2007년 04월 04일 제주항에서 부산항으로 연안항해를 할 때의 가속도 변화를 나타내고 있으며, 해상상태가 5이면 상하가속도는 최대 0.4g까지 예측되나, 0.2g에 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.



Sea State 5

- Maximum : 0.18g
- Significant : 0.15g
- Bow Sea

Figure 3.34 V. Acceleration (Coastal, 2007. 4. 4)

Table 3.12 Records of Log Book(Coastal, 2007. 4. 4)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Route
07040404	34-45N 125-06E	009	17.00	NW	6	5	Cheju-Busan
07040408	35-48N 125-50E	009	15.00	NNW	7	5	Cheju-Busan
07040412	35-48N 125-37E	176	15.50	NNW	5	5	Cheju-Busan
07040416	34-35N 125-45E	165	15.50	NW	6	5	Cheju-Busan
07040420	34-05N 126-50E	085	17.00	W	5	4	Cheju-Busan
07040424	34-18N 128-03E	070	15.75	W	4	4	Cheju-Busan

3.2 이론계산 및 모형시험과의 비교분석

선박 설계단계에서 내항성능을 검토하기 위해 다양한 실험조건에 따른 모형시험을 실시하였다. 그 중 본 연구에서 비교 대상으로 한 선속은 15노트이며, 과향은 횡운동(Roll) 및 좌우가속도(Lateral acceleration)에서는 횡파이고, 종운동(Pitch) 및 상하가속도(Vertical acceleration)에서는 선수파를 기준으로 하였다.

Table 3.13 및 3.14는 모형시험을 실시하여 계측한 항목과 모형선에 대한 주요 제원을 나타낸다.³¹⁾

Table 3.13 Measurement Items

Item	Position	Gauge	Remarks
Pitch	Center of G	Potentiometer	Pitch angle
Roll	Center of G	Potentiometer	Roll angle
V. Acceleration	Wheel House	Accelerometer	V. Acceleration

Table 3.14 Principal Dimensions of Model Ship

Item	Ship	Model	Unit
LBP	104.0	3.467	m
Breadth	17.8	0.593	m
Draft	5.9	0.1966	m
Displacement	6238.2	0.23104	m ³
LCG	0.0624	0.00208	m
VCG	6.254	0.2085	m
GM	2.426	0.0809	m
Gyradius of Roll	6.23	0.2077	m
Gyradius of Pitch	26.0	0.8667	m
Roll Natural Period	8.94	1.627	sec

이론계산 및 모형시험 결과와 실측한 자료를 비교해 보면, Figure 3.22에서 알 수 있듯이 실측된 상하가속도는 이론계산 결과와는 비교적 잘 일치하고 있으나, 모형시험 결과와는 상당한 차이가 있다. 또한 ITTC에서 제시한 기준치와 비교해 볼 때 다소 높게 측정된 경향을 보이고 있다. 이는 실측치 및 이론계산의 측정위치가 선수창고로 모형시험의 측정위치인 선교보다 약 20여 미터 전방에 위치해 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 ITTC에서 제시한 내항성능 기준치의 가속도 측정 위치가 명확히 제시되어 있지 않고, 그 평가 기준이 각 선박마다 고유의 임무에 따라 설정되어야함에도 불구하고 일률적으로 정해짐으로써 나타난 것으로 사료된다. 실측치는 해상상태 5에서 작업가능기준치인 0.4g에 도달하고 해상상태 6에서 생존조건인 0.8g에 도달한다.

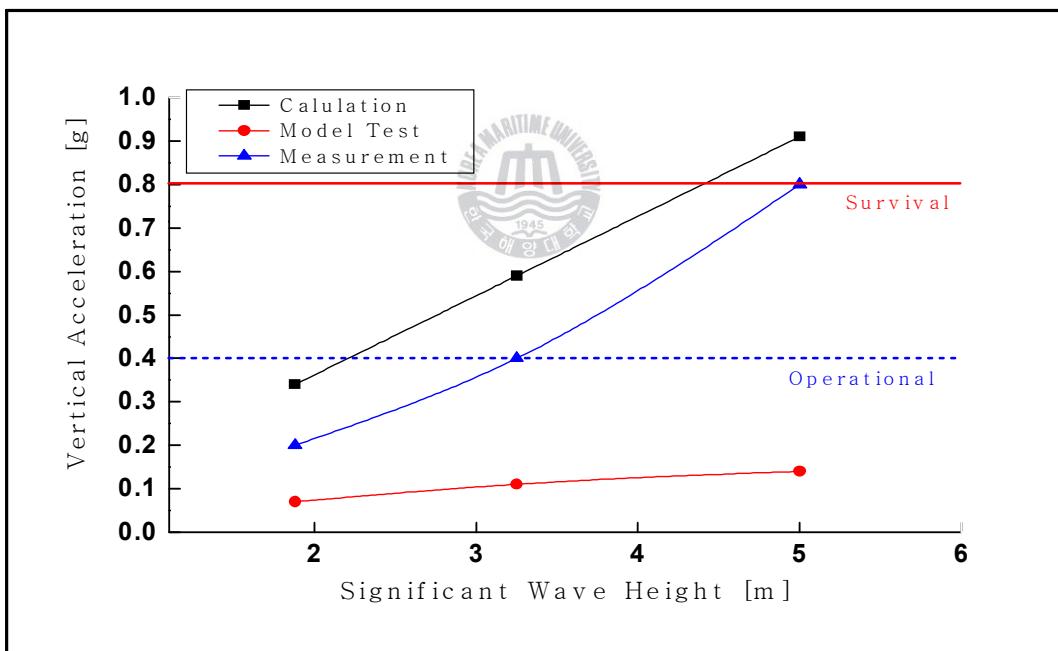


Figure 3.35 Variation of V. Acceleration with Wave Height

Figure 3.23은 해상상태에 따른 종운동 결과를 비교한 것으로 상하가속도와 비슷한 형태를 보이고 있다. 이론계산 결과와 실측치는 비교적 잘 일치하고 있으나, 모형시험 결과와는 다소 차이가 나고 있다. 이는 모형시험의 기준점이 무게중심인데 비해, 실측장비의 센서는 선교에 위치해 있어 섭동 차이가 생기는 요인이 될 수 있다. 실측치는 해상상태 5에서 작업가능기준치인 4.8° 에 도달하고, 해상상태 6에서 생존조건인 8° 를 초과한다.

Figure 3.24~3.26은 2006. 6. 2~4일의 해상상태 6, 7에 해당되는 종요각을 나타낸 것으로, 6월 3일 최대 17° 를 기록하고 있다(그림에서는 20° 에 도달하고 있으나, 중간값(Mean)이 3° 로 트림이 진 상태를 의미함).

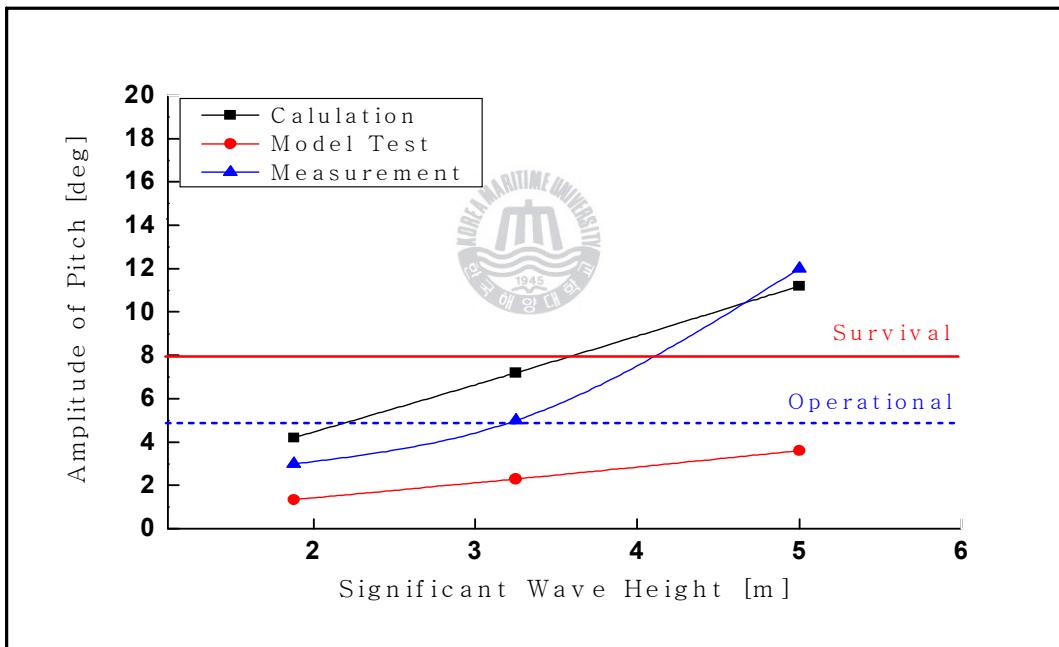


Figure 3.36 Variation of Pitch with Wave Height

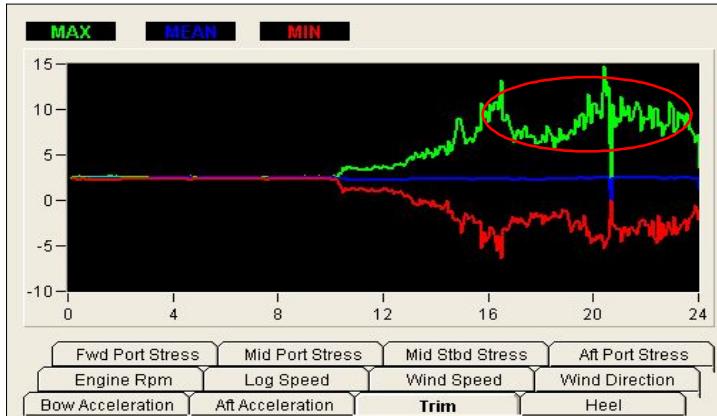


Figure 3.37 Display of Pitch (2006. 6. 2)

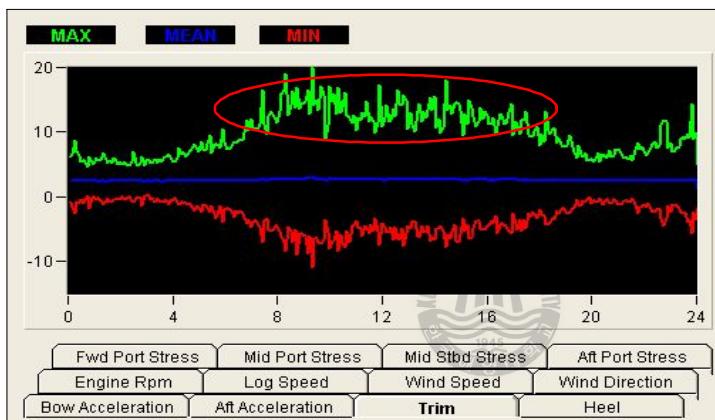


Figure 3.38 Display of Pitch (2006. 6. 3)

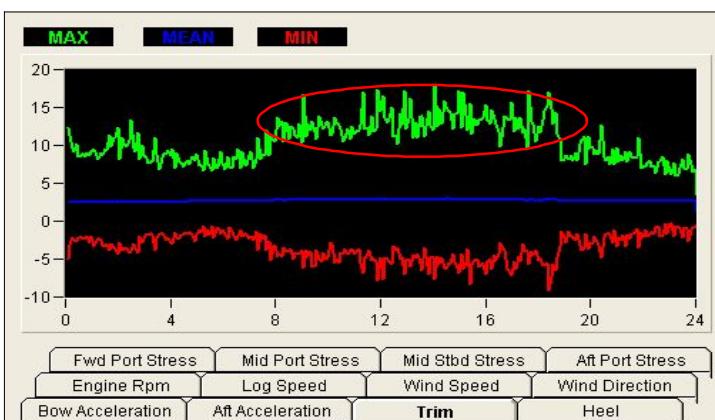


Figure 3.39 Display of Pitch (2006. 6. 4)

Figure 3.27은 해상상태에 따른 횡운동 결과를 비교한 것으로, 이론계산과 모형시험 및 실측치가 비교적 잘 일치하고 있다. 횡파중 횡운동은 유의파고가 높아짐에 따라 모두 증가하고, 해상상태 5이상에서는 작업가능 기준치인 8° 를 초과하고 있다.

Figure 3.28~3.30은 2006. 6. 2~4일의 해상상태 6, 7에 해당되는 횡요각을 나타낸 것으로, 6월 2일 최대 17° 를 기록하고 있다(풍압에 의한 경사 3° 를 고려하면 20° 에 해당됨).

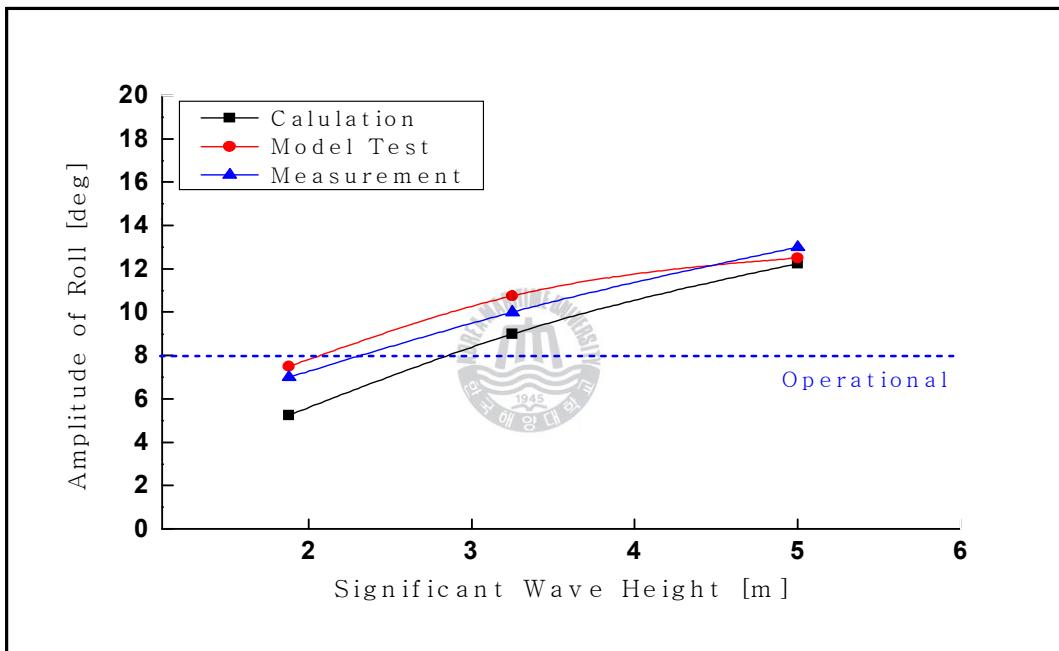
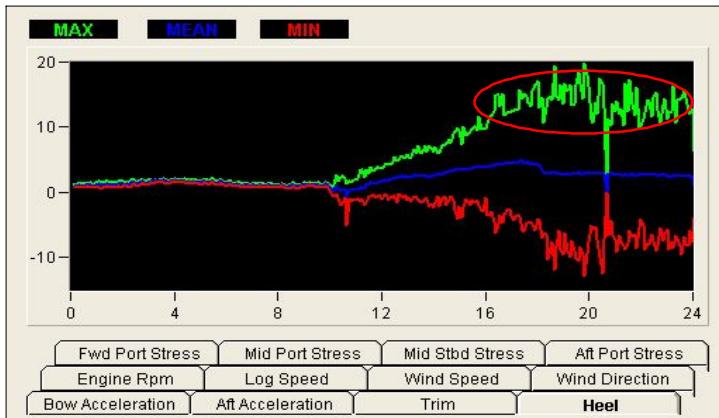
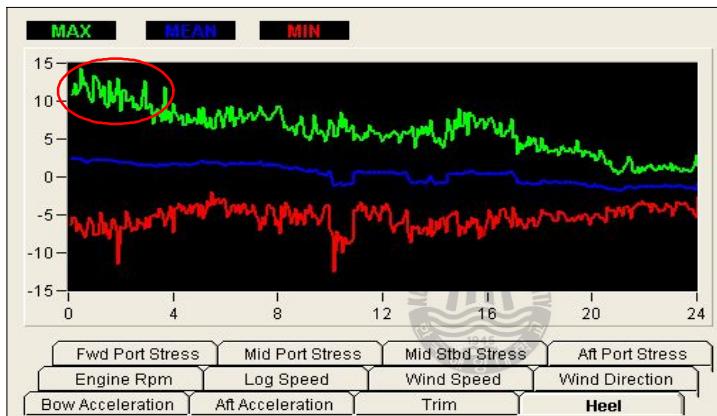


Figure 3.40 Variation of Roll with Wave Height



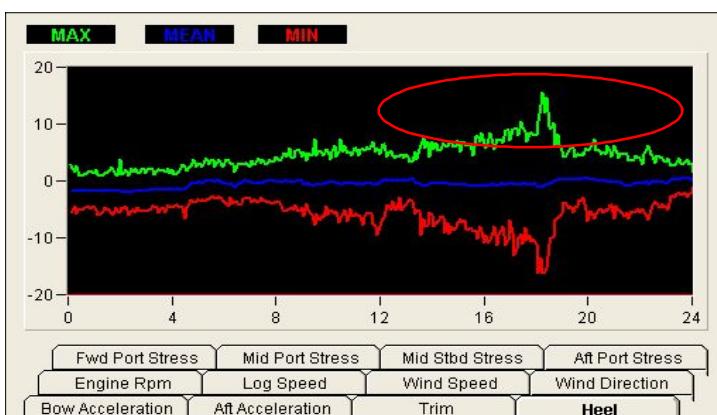
Sea state 6
-Maximum:17°
-Significant:13°
-Quartering sea

Figure 3.41 Display of Roll (2006. 6. 2)



Sea state 6
-Maximum:14°
-Significant:12°
-Beam sea

Figure 3.42 Display of Roll (2006. 6. 3)



Sea state 7
-Maximum:15°
-Significant:7°
-Head sea

Figure 3.43 Display of Roll (2006. 6. 4)

3.3 내항성능 평가

내항성능 평가요소 중 하나인 상하가속도를 선체응력 감시 장치를 이용하여 실측한 결과, 해상상태 4에서는 0.2g 이하로 계측되었고, 해상상태 7에서는 0.8g 를 넘어 1.3g 에 이르렀다. 이는 ITTC 내항성능 기준에서 규정하고 있는 작업 가능기준치 0.4g 및 생존가능 기준치 0.8g 보다 다소 높은 결과이다. 물론, 여기에서는 상하가속도의 측정위치에 대한 명확한 기준이 요구된다.

내항성능 평가를 위한 또 다른 방법으로 선체운동 계산 프로그램을 이용할 수 있다. 선체운동이 원인이 되어 발생하는 기존의 각 내항성능 평가요소에 대한 발생 확률을 계산하고, 내항성능의 평가치 및 위험도를 계산한다. 그리고 내항성능 평가요소의 위험도가 같을 경우 그 발생 확률도 같다는 신뢰성 공학 이론을 이용하여, 임의의 한 개의 내항성능 평가요소만을 계측하여 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있다.^{6),32)}

최근에는 충분한 이론적인 연구 성과를 기초로 기존 내항성능 평가 방법에 대한 문제점을 개선·보완하여, 실선에서 임의의 한 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가하는 항해안전성 종합 평가시스템을 구축하였다.^{11)~14)}

따라서, 실습선 한바다호에서 약 2년 동안 항해 중 실측한 상하가속도를 분석하여 선체운동 계산 프로그램에 적용함으로써 실습선 한바다호의 내항성능을 평가하였다.

3.3.1 내항성능 평가요소와 그 시스템적 결합

파랑 중을 항해하는 선박에서 각 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때에 그 현상이 발생하고, 그 발생 확률이 주어진 한계발생확률을 초과할 때 선박은 파랑 중에서 기능을 잃거나 아니면 위험하게 된다. 이와 같은 각 내항성능 평가요소의 시스템적 결합은 Figure 3.31에 나타낸 바와 같이 직렬 결합(Serial combination) 구조로서, 한 가지 요소만이라도 발생확률이 한계 발생확률을 초과할 경우 선박은 전체 내항성능 기능을 잃어 위험한 상태에 도달하게 된다.

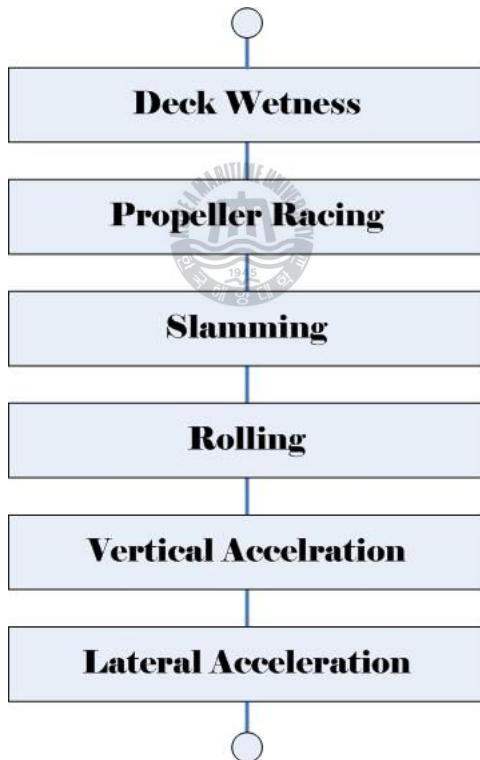


Figure 3.44 Factors for Evaluating Seakeeping Performance

한편, 이들 각 내항성능 평가요소들에 대해 일반적으로 적용되고 있는 한계치와 한계발생확률은 Table 3.15와 같다. 여기에서, 상하가속도는 선수부근을 기준으로 하였고, 좌우가속도는 선체의 무게중심을 기준으로 한계치를 설정하였다. 또한 각 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되었는데, 이는 각 요소에 대한 연구가 따로 행해진 결과이기도 하고, 한편으로는 내항성능 평가시 각 요소의 중요도를 달리 부여한 의미도 있다.

Table 3.15 Factors Adopted for Evaluating Seakeeping Performance

내항성능 평가요소	한계치	한계발생 확률
Deck wetness	정수 중 항주시의 수위 상승을 고려한 선수 수선(F.P)의 유효건현	2×10^{-2}
Propeller racing	정수 중 항주 시의 상대 수위 상승을 고려하지 않은 상태에서 Propeller 반경의 $\frac{1}{3}$ 노출	10^{-1}
Slamming	S.S.17에서 선저노출과 동시에, 파에 돌입할 때 선저의 파면에 대한 상대속도가 한계속도 (Threshold velocity)를 초과하는 것 단, Threshold velocity = $0.09\sqrt{gL}$	10^{-2}
횡동요	선체중앙부 weather side의 bulwark top에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 정수 중 흘수면에서 bulwark top까지의 높이	10^{-3}
좌우가속도	LCG에서 좌우가속도가 1.0g를 초과할 경우	10^{-3}
상하가속도	S.S.19에서 상하가속도가 1.0g를 초과할 경우	10^{-3}

3.3.2 내항성능 평가요소의 분산치

선박이 단파정 불규칙파 중을 일정한 속도와 침로(χ)를 유지하면서 항해하는 경우, NSM에 의한 선체 운동 응답 계산에서 임의의 내항성능 평가요소의 확률 과정($X_i(t)$)의 주파수 응답 함수를 $H_x(\omega, V, \chi - \theta)$ 라 하면, 확률 과정 $X_i(t)$ 의 P-M형 스펙트럼 $S_x(\omega, \chi)$ 은 다음과 같다.

$$S_{x_i}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |H_{x_i}(\omega, V, \chi - \theta)|^2 S_\zeta(\omega, \theta) d\theta \quad (3-1)$$

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

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

여기에서, 식 (3-2)의 분산치를 변화시키는 변수는 선박과 파와의 만남각(χ), 선속(V), 해상상태(S)이다.



분산치를 방향성분을 고려하여 수치 계산할 때, 근사적으로 이용하는 단파정파에서의 분산치(σ_S)와 장파정파에서의 분산치(σ_L)의 관계는 다음과 같다.

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

내항성능 평가요소의 확률 과정($X_i(t)$)은 다음과 같다.

$$X_i(t) = \int_0^{\infty} \sqrt{2Sx_i(\omega, \chi)d\omega} \cdot \cos(\omega t + \psi_i) \quad (3-4)$$

여기서,

$$\psi_i = \epsilon(\omega) + \gamma_i$$

$\gamma_i : 0 \sim 2\pi$ 까지 일양 분포하는 위상각

선체운동은 파와의 만남 주파수($\omega_e = \omega - KV\cos\chi$, K : 파수)를 이용하여 계산 한다.

3.3.3 내항성능 평가요소의 발생확률 및 한계표준편차

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

$$\begin{aligned} Q_{X_i} &= \int_{X_1}^{\infty} \left(\frac{X_i}{\sigma_{X_i}} \right) \exp\left(-\frac{X_i^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right) dX \\ &= \exp\left(-\frac{X_1^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right) \end{aligned} \quad (3-5)$$

이것을 표준편차 (σ_{X_i})에 관하여 풀면 다음과 같다.

$$\sigma_{X_i} = \sqrt{\frac{-X_1^2}{2\ln Q_{X_i}}} \quad (3-6)$$

식 (3-6)에 각 내항성능 평가요소의 한계치(X_{ic})를 넘을 확률인 한계발생확률($Q_{X_{ic}}$)을 고려하면, 위험치가 되는 한계표준편차($\sigma_{X_{ic}}$)를 구할 수 있다.

$$\sigma_{X_{ic}} = \sqrt{\frac{-X_{ic}^2}{2\ln Q_{X_{ic}}}} \quad (3-7)$$

3.3.4 내항성능 평가요소의 평가치

임의 내항성능 평가요소의 극치는 Rayleigh 분포로써, 그 발생확률을 $Q(X_i)$ 라고 하면, 평가치(E_{X_i})는 다음과 같이 정의된다.

$$E_{X_i} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln \{Q(X_i)\}}} = \left[\frac{\sigma_{X_i}}{X_i} \right] \quad (3-8)$$

평가치(E_{X_i})가 0이 되면 임의 요소 X_i 의 신뢰도는 1이 되고, E_{X_i} 가 무한대가 되면 X_i 요소의 신뢰도는 0이 된다.



3.3.5 내항성능 평가요소의 위험도 및 상대위험도

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

$$\mu_{X_i} = \frac{E_{X_i}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[\frac{X_i}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[\frac{X_i}{\sigma_{X_i}} \right]} = \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_{X_{ic}}} \quad (3-9)$$

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

위험도(μ_{X_i})는 파에 대한 만남각(X), 선속(V) 및 해상상태(S)에 따라 변화한다. 여기에서 $\mu_{X_i} \geq 1.0$ 인 경우 X_i 요소가 위험하고, $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다.

또한 임의 X_i, X_j 요소의 위험도가 μ_i, μ_j 인 경우, X_i 요소를 기준으로 하여 나타낸 X_j 요소의 위험도의 비를 X_i 요소에 대한 X_j 요소의 상대 위험도(μ_{ij})라 정의한다.

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{\frac{X_i}{\sigma_{X_i}}}{a_{ij} \left[\frac{X_j}{\sigma_j} \right]} = \frac{\sigma_{X_{ic}}}{\sigma_{X_{jc}}} \cdot \frac{\sigma_{X_j}}{\sigma_{X_i}} \quad (3-10)$$

$$단, a_{ij} = \frac{E_{X_{jc}}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[\frac{X_{ic}}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[\frac{X_{jc}}{\sigma_{X_{jc}}} \right]}$$


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(μ_{ij})를 계산함으로써 기준 요소인 X_i 요소와 임의 X_j 요소는 상대적으로 동등하게 성능을 평가할 수 있게 된다. 그것은 X_i 요소의 한 계치를 $a_{ij} \cdot \mu_{ij}$ 배한 값이 X_j 요소의 곁보기 한계치(X_{jc})로 되기 때문에 기준으로 한 X_i 요소로서 임의의 X_j 요소의 상태를 평가할 수 있다.

3.3.6 내항성능지표

내항성능지표(SPI)는 기존의 내항성능 평가요소 중 한 개의 요소만을 계측하

여 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 이는 다음과 같이 한계 평가치 (E_{T_c})와 변환 평가치 (\widetilde{E}_T)의 관계로 나타낼 수 있다.

$$SPI = \frac{\widetilde{E}_T}{E_{T_c}} = \sqrt{\frac{\ln(1-P_{T_c})}{\ln(1-\widetilde{P}_T)}} \quad (3-11)$$

특히, 기준의 내항성능 평가요소 중 계측이 편리하고 화물의 안전과 승조원의 작업성에 직접적인 영향을 주는 상하가속도를 계측하여 선박 전체의 항해안전성을 평가할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_i &= 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\beta_i \sigma_{AV}} \right)^2 \right\} \\ &= 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\alpha_{PAV} \mu_{AVi} \sigma_{AV}} \right)^2 \right\} \\ &= 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{AVc}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}} \right)^2 \right\} \\ &= 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \cdot \frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}} \right)^2 \right\} \\ &= 1 - Q(X_{AV})^{\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \right)^2} \end{aligned} \quad (3-12)$$

여기서, \widetilde{P}_i : 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수

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

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

$$\mu_{AVi} : \text{상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도}$$

$$\alpha_{PAV} : \text{프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의 한계 평가치의 비}$$

3.3.7 내항성능 평가 결과

Figure 3.32~3.35는 선체운동 계산 프로그램을 이용하여 대상선박의 항해안전성을 평가한 결과로, 각 내항성능 평가요소의 위험도와 내항성능지표를 동시에 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 선박과 파와의 만남각으로, 180° 는 선수정향파(Head sea), 90° 는 정횡파(Beam sea) 그리고 0° 는 선미추파(Following sea)를 나타내고, Y축은 위험도(Dangerousness)를 나타낸다.

해상상태가 거칠어짐에 따라 위험도가 증가하는 경향을 보이고, Figure 3.35에 나타낸 바와 같이 해상상태 7에서는 위험도가 1을 초과하였다. 특히 선수파일 때의 프로펠러 레이싱과 슬래밍, 횡파일 때의 좌우가속도와 횡요가 다른 평가요소에 비하여 위험도가 큰 것으로 평가되었다. 따라서 해상상태 7 이상에서는 적절한 침로유지와 선속의 감소가 필요할 것으로 판단된다.

Figure 3.32는 해상상태 4에서 선속이 15.7kts인 경우의 평가 결과로 위험도가 1미만으로 안전하게 평가되었다.

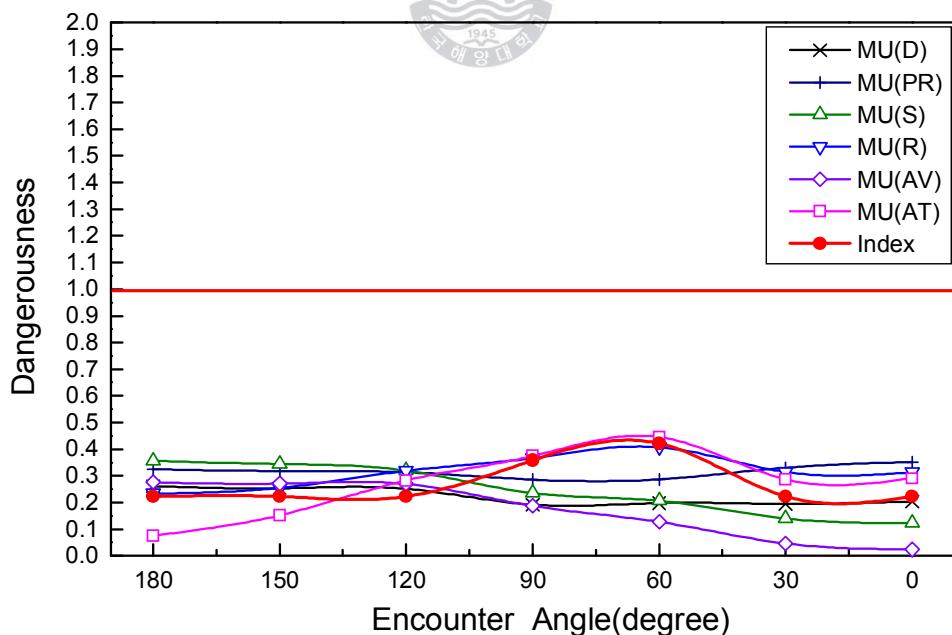


Figure 3.45 Seakeeping Performance Index(Sea State 4, FN=0.252)

Figure 3.33 및 3.34는 해상상태 5/6에서 선속이 13.9/8.7kts인 경우의 평가 결과로 위험도가 1미만으로 안전하게 평가되었다.

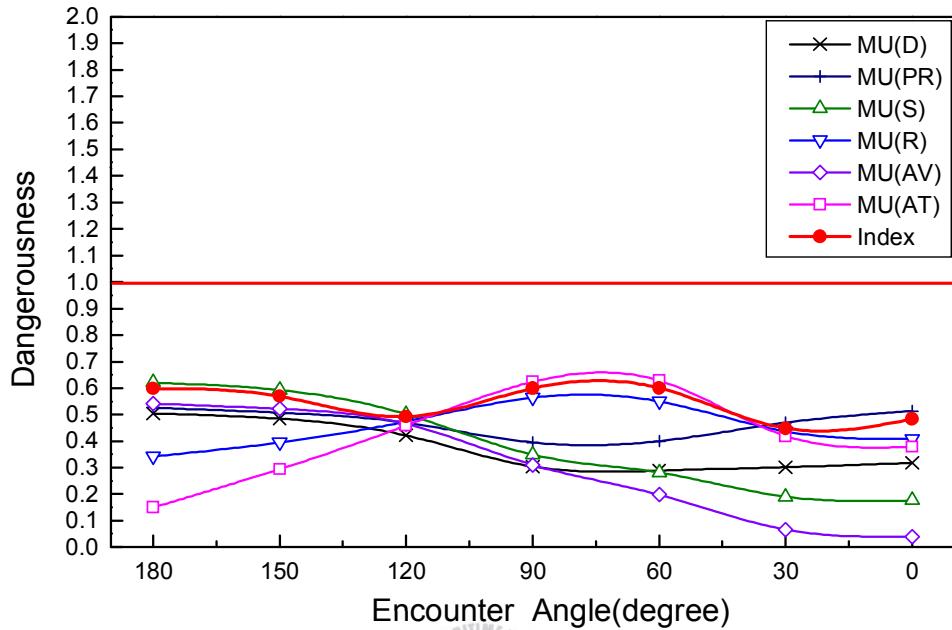


Figure 3.46 Seakeeping Performance Index(Sea State 5, FN=0.224)

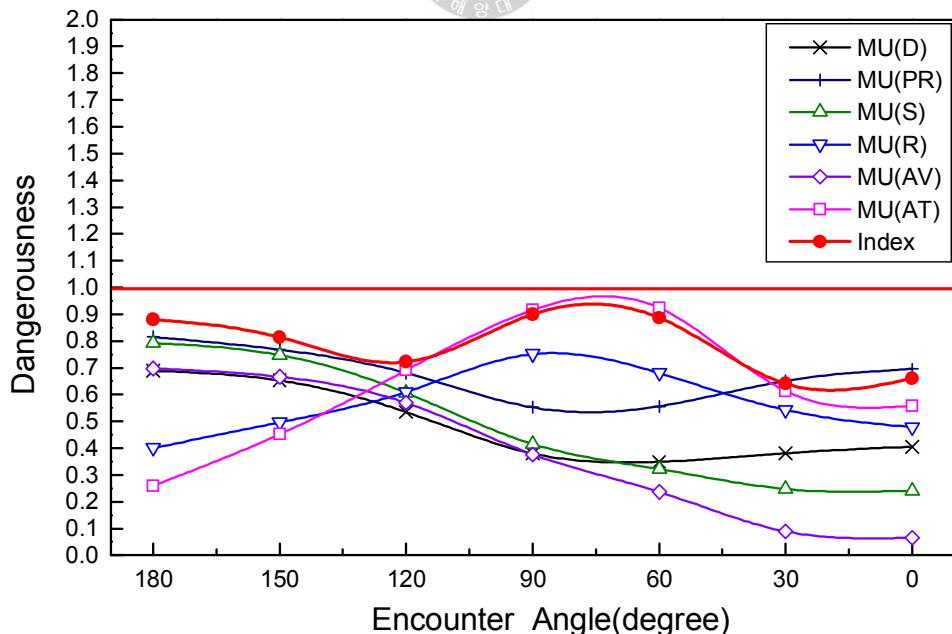


Figure 3.47 Seakeeping Performance Index(Sea State 6, FN=0.139)

Figure 3.35는 해상상태 7에서 선속이 6.1kts인 경우의 평가 결과로 위험도가 1을 초과하여 위험할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 해상상태 7 이상에서는 적절한 침로 유지와 선속의 감소가 필요할 것으로 판단된다.

내항성능의 평가 기준은 선체, 고유 임무 및 측정위치에 따라 다양하게 정해질 수 있으므로, 추후 내항성능 평가요소 특히, 상하가속도와 좌우가속도의 측정위치에 따른 한계치 설정에 대한 다각적인 연구·검토가 필요할 것으로 판단된다.

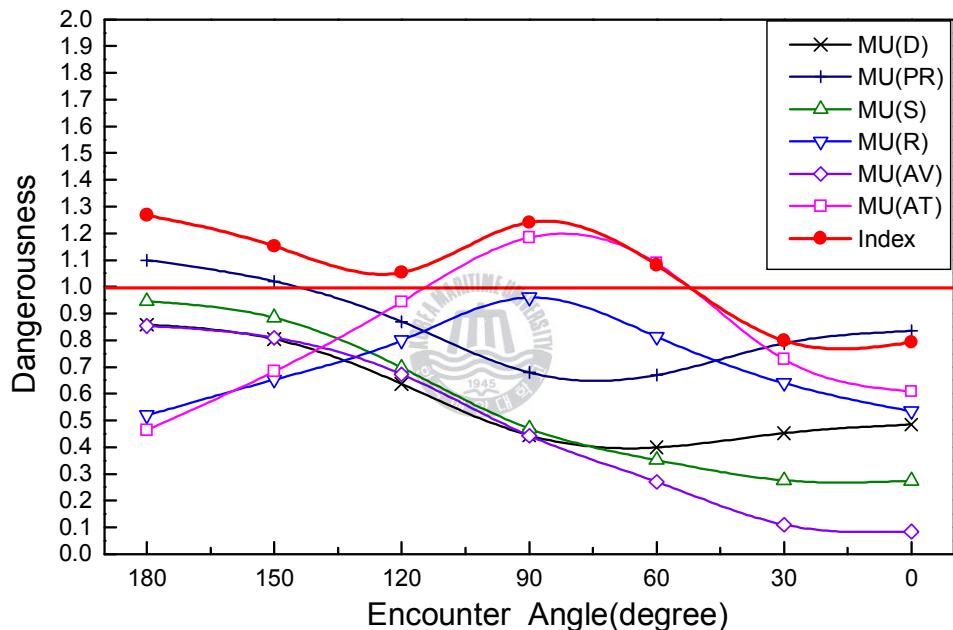


Figure 3.48 Seakeeping Performance Index(Sea State 7, FN=0.099)

3.4 요 약

실습선 한바다호 인수 후 약 2년간의 연안항해와 원양항해를 통하여 측정한 가속도, 슬래밍, 횡요, 종요, 선속, 풍속, 파고 등 각종 자료를 분석하여 실습선 한바다호의 내항성능을 평가하였다. 내항성능 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 비교적 파장이 큰 대양에서의 상하가속도는 해상상태 4에서 0.2g이하로 계측되었고, 해상상태 7에 가까워 갈수록 0.8g를 넘어 1.3g에 이르렀다. 이는 ITTC에서 규정하고 있는 작업가능기준치 0.4g 및 생존가능 기준치 0.8g보다 다소 높은 결과이다.

둘째, 동일한 해상 조건에서는 선박이 파도를 선수방향에서 받으며 항해할 때 상하가속도가 가장 높게 측정되었으며, 선미에서 가장 낮게 측정되었다.

셋째, 연안항해보다는 대양항해에서의 상하가속도가 0.1g정도 높게 측정되었는데, 이는 대양에서 파장이 커기 때문인 것으로 판단된다.

또한 실측된 상하가속도를 선체운동 계산 프로그램에 적용하여 평가한 결과, 해상상태가 거칠어짐에 따라 위험도가 증가하는 경향을 보이고, 해상상태 7에서는 위험도가 1을 초과하여 위험함을 알 수 있었다. 특히, 선수파일 때의 프로펠러 레이싱과 슬래밍, 횡파일 때의 좌우가속도와 횡요가 다른 평가요소에 비하여 위험도가 큰 것으로 평가되었다. 따라서, 해상상태 7이상에서는 적절한 침로 유지와 선속의 감소가 필요할 것으로 판단된다.

이러한 결과는 앞으로 경험할 수 있는 다양한 해상상태에서 선박의 항해위험도가 어느 정도인지 예측 가능함으로써 보다 안전한 선박운항이 가능하고, 초기 설계과정에서부터 불필요한 부분을 제거함으로써 보다 우수한 성능의 선박을 건조하는데 이용 가능하다.

선박에서의 가속도는 선형 및 선박의 크기 그리고 측정위치에 따라 그 크기가 달라질 수 있으므로 그 기준을 일률적으로 정하기 어렵겠지만, 다양한 실선시험을 통하여 확인 가능할 것이다. 따라서 ITTC 내항성능 기준도 실선계측 부분에서 미진했던 연구 부분을 보완할 필요성이 있고, 앞으로 보다 다양하고 충분한 실선시험을 통하여 기준에 제시되어 왔던 기준치 및 측정위치에 대한 다각적인 연구·검토가 필요할 것으로 판단된다.

제 4 장 조종성능 평가

항해사가 선박을 조종할 때 이에 반응하여 움직이는 선박의 능력을 선박의 조종성능이라고 한다. 조종성능은 선박의 선회 능력뿐만 아니라, 자세 유지와 정지 및 후진 등의 속도 제어 성능도 함께 포함되며, 주로 선박의 조타장치의 성능과 수면 아래의 형상과 관계가 깊다. 최근에 선박이 대형화되면서 갑판 상부의 구조물이 상대적으로 큰 컨테이너선, 자동차 운반선, 대형 여객선 등을 쉽게 볼 수 있는데, 이러한 선박들이 접·이안 또는 항내에서 저속으로 운항할 경우 바람과 같은 외력으로 인하여 압류나 회두와 같은 현상이 현저하게 나타나 선박조종에 상당한 지장을 초래하는 경우가 있다.^{33),34)}

선박운항자는 자선의 조종성능을 충분히 숙지하여 선박을 안전하게 운항하여야 하며, 이러한 조종성능은 크게 침로안정성능(Course keeping ability), 변침성능(Course changing ability), 선회성능(Turning ability), 정지성능(Stopping ability)으로 나누어 살펴볼 수 있다.

침로안정성능은 선박이 원하는 방향으로 똑바로 정침하여 갈 수 있는 능력을 말한다. 똑바로 가고 있는 선박이 일시적으로 외력(바람이나 파도)을 받게 되면 선회하게 되는데 이 외력이 잠시 후 사라졌을 때 선박이 더 이상 선회하지 않고 직진한다면 이 선박은 동적으로 안정한 선박이라고 말한다.

변침성능은 선박이 충돌이나 좌초 위험으로부터 회피하기 위해 방향을 바꾸거나 예정된 위치(변침점 등)에서 방향을 바꾸는 능력을 말한다. 변침성능은 직진 상태에서 원하는 정해진 방향으로 침로를 바꾸는데 필요한 시간으로 판정할 수 있다. 한 쪽 방향으로 돌고 있는 선박의 방향을 반대 방향으로 바꾸는 능력도 변침성능에 포함된다.

선회성능은 선박을 360도 회전시켰을 때 차지하는 회전 공간의 크기로 그 성능을 판단한다. 선박은 진행 중에 앞에 장애물이 생길 경우 피하거나 정지해야 한다. 그러나 선박은 관성력이 대단히 크기 때문에 프로펠러를 역전시켜 정지를

시도해도 멈추기까지에는 상당한 시간과 거리(최단정지거리)가 필요하게 된다. 통상 선박의 최단정지거리는 배 길이의 10~15배에 이르므로, 200m 길이의 선박은 장애물을 발견하고 후진 명령을 내리더라도 2~3km 앞으로 더 나아간 후 정지하게 된다. 따라서 선박에서는 전방의 근거리 장애물을 피하는 최선의 방법으로써 선회를 택하는 경우가 많다. 이 때 선박이 방향을 바꾸기까지 나아가는 거리(Advance)는 통상 배 길이의 5배 이하이므로 효과적인 회피 수단이 될 수 있다. 이러한 의미에서 선회권(Turning circle)이 작을수록 선회성능이 우수한 선박이라고 말할 수 있다.

정지성능은 앞서 설명한 바와 같이 정지할 때까지 필요한 거리가 판단 지표이다. 정지성능을 향상시키려면 큰 후진력을 낼 수 있는 프로펠러와 엔진이 필요하다.

Samuelides et al.(1984)에 의하면³⁵⁾, 길이 90m 이상 되는 선박들 중에서 약 5%는 매년 충돌사고를 경험하며, 이 중 약 80%는 다른 선박과의 충돌사고인 것으로 조사되었다. 또한 해양안전심판원에서 제공하는 2002~2006년까지의 5년간의 해양사고 통계자료를 살펴보면(Table 1.1 및 1.2), 상선에서의 사고 중 충돌사고가 76%로 가장 높게 나타나고 있다. 그 원인으로는 경계소홀이 48%로 가장 큰 비중을 차지하고, 그 다음으로는 항행법규 위반(25%) 그리고 조선부적절(5%) 순이다. 조선부적절은 조종성능 측면과 연관해서 본다면, 운항자가 해당선박의 조종성능을 충분히 숙지하고 선박을 조선한다면 충돌회피에 큰 도움이 될 수도 있을 것이다.

충돌사고의 또 다른 이유로는 선박 자체의 조종성능 불량에 기인한 것도 있을 것이다. 특히, 상대적으로 사고 위험성이 높은 항만이나 연안 해역에서의 해양사고는 인명에 대한 위협뿐 아니라 심각한 환경오염의 원인이 될 수 있다. 이에 IMO에서는 장기간에 걸친 자료수집과 산하 회원국들의 의견을 바탕으로 선박 조종성 기준(IMO Maneuvering standards)을 설정하고, 길이 100m 이상의 모든 선박과 위험화물을 수송하는 케미컬탱커 및 LNGC(Liquefied Natural Gas Carrier)는 길이에 관계없이 이 규정의 적용을 받도록 하고 있다. 이러한 기준을

설정한 목적은 선박의 조종성능에 대한 구체적인 기준을 설정함으로써 이 기준을 만족하지 못하는 신조선박과 개조선박에 대해 운항 불가 판정을 내리는 등 직접적인 규제를 하기 위한 것이다.^{36),37)}

4.1 선박 조종성능 계측 시스템

항해사는 자신이 운항하고 있는 선박의 조종성능을 정확히 파악하고 있어야 하며, 항해 중 변침하거나 선회 또는 정지할 때 그 기준으로 삼아야 한다. 특히, 충돌의 위험성이 존재하여 선회하거나 정지할 필요가 있을 경우 또는 좁은 수역에서 선회하고자 할 경우 조종성능에 대한 정보가 무엇보다도 중요하다.

조종성능을 추정하는 방법으로는 자유항주시험을 수행하여 직접 조종성능을 판단하는 방법과 유체력 계수를 구하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하는 방법이 있다. 하지만, 보다 정확한 자료는 실해역에서 운항해 봄으로써 조종성능이 좋고 나쁨을 직접 느끼는 것이다. 즉, 이 선박은 침로안정성은 좋지만, 선회성능이 좋지 않다는 등의 평가를 할 수 있다. 그러나, 이러한 평가는 주관적이기 때문에 다른 선박과 비교하여 얼마나 좋고 나쁜지에 대한 객관적인 평가는 어렵다. 선박 설계자로서도 조종성능이 우수한 선박을 설계하려면 자신이 설계한 선박이 어느 정도의 조종성능을 갖고 있는지에 대한 정량적인 평가 수단이 필요할 것이다. 따라서 IMO에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 조종성 기준을 설정하고 있으며, 조종성능에 대해 정량적으로 평가할 수 있는 방법으로써 조종성능 시험을 수행하고 있다.^{38)~40)}

실습선에 설치된 선박 조종성능 계측 시스템은 컴퓨터에 설치된 해당 프로그램을 실행함으로써, 항해 중 본선의 각종 항해 기기(GPS, Speed Log, RPM, Gyro Compass 등)로부터 신호를 받아 신호변환장치(Sea trial navigational interface system, Korea Comtronics Co., Ltd 제작)를 통하여 신호를 변환하고, 프로그램(Sea Trial Test[Report] System)을 통하여 분석 및 출력하는 시스템이

다. 본선의 시운전 자료(Results of sea trial)도 이를 이용하여 작성되었고, 그 내용으로는 Speed trial, Turning circle test, Crash stop test, Inertia stop test, Zig-zag test, Spiral maneuver test 등이 있다. Figure 4.1은 Bridge에 설치된 선박 조종성능 계측 시스템을 나타내고 있다.

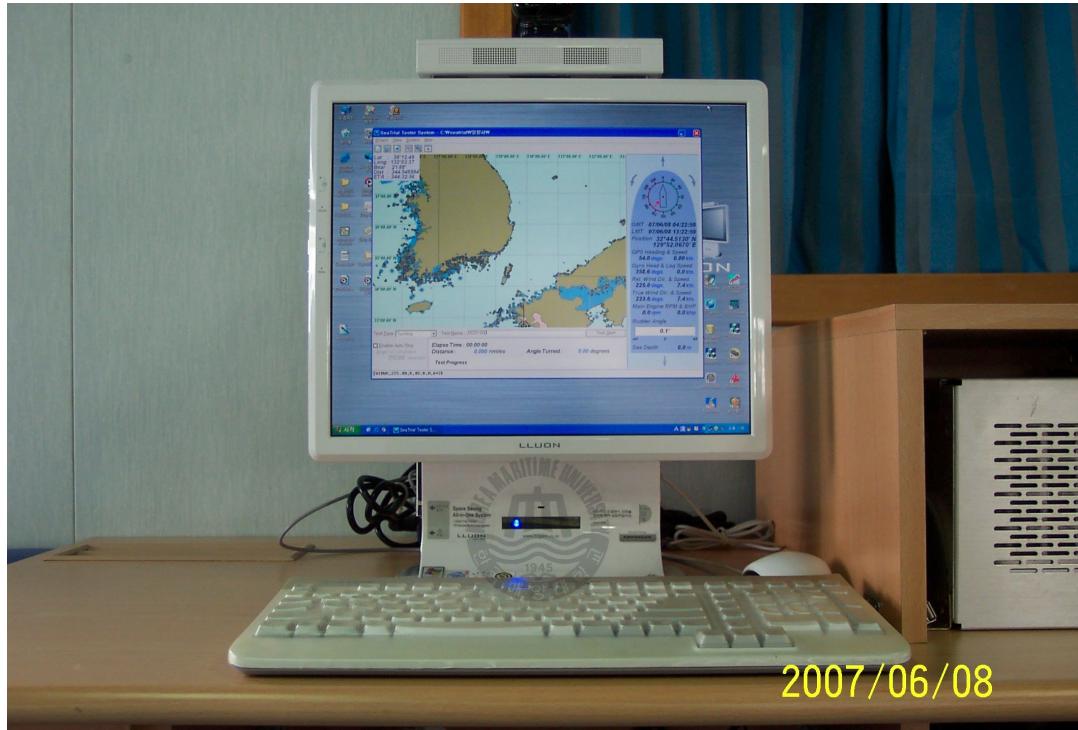


Figure 4.1 Ship's Maneuverability Measuring System

4.2 IMO 조종성 기준

조종성능을 평가하는 조종시험의 종류는 수십 가지에 이른다. 이는 각국이 각기 독자적으로 조종성능을 평가하는 시험방법을 고안했기 때문이다. 그러나 조종시험을 수행하는 경비 문제와 서로 통일된 기준을 확보할 필요가 있어 현재는 선회시험(Turning test), 지그재그시험(Zig-zag test), 나선시험(Spiral test), 정지시험(Crash astern test) 등 4가지 조종시험이 표준 조종시험으로 정착되었다. IMO에서 안전을 위하여 요구하고 있는 조종성 기준은 Table 4.1과 같고, 이를 각 시험의 시험방법, 평가항목, 조종성능과의 관계에 대하여 살펴보았다.³⁷⁾

Table 4.1 IMO Maneuvering Standards

Test	Item	IMO Standards
Turning ability	+ 35° rudder angle	Advance 4.5L
		Tactical Diameter 5.0L
	-35° rudder angle	Advance 4.5L
		Tactical Diameter 5.0L
Yaw checking & Course keeping ability	10°/10° Zig-Zag	First overshoot angle 10.0°
		Second overshoot angle 25.0°
	20°/20° Zig-Zag	First overshoot angle 25.0°
Initial Turning ability	+ 10° rudder angle	Path Length 2.5L
	-10° rudder angle	Path Length 2.5L
Stopping ability	Crash astern	Track reach 15.0L

선회시험(Turning test)은 일정 속도(보통 설계속도)로 직진하다가 최대 타각(35°)으로 돌리고 엔진은 제어하지 않고 일정하게 유지한 상태에서 선박이 360° 회전할 때까지 수행한다. 시험이 시작되면 시간에 따라 변하는 선속, 선수각, 선박의 궤적을 기록한다. Figure 4.2는 실습선 한바다호의 선회권을 나타낸 것이다. 여기서 전진거리(Advance)와 가로이동거리(Transfer)는 타를 작동한 후 선박이 90° 회전할 때까지 이동한 전진방향과 횡방향의 이동거리를 나타내며, 전술직경(Tactical diameter)은 선박이 180° 회전했을 때까지 이동한 횡방향 거리이다. 전진거리는 전방에 나타난 장애물을 선회하여 회피할 때 필요한 최소거리는 점에서 선회능력을 판단하는 중요한 값이다. IMO 조종성 기준을 만족하려면 Table 4.1에서 보듯이 35° 타각 혹은 최대 타각에서 수행한 선회시험 결과에서의 전진거리가 선박 길이의 4.5배 이하, 전술선회직경이 선박 길이의 5배 이하가 되어야 한다. Figure 4.2 및 Table 4.1에서 보듯이 한바다호의 선회시험 결과는 IMO 조종성 기준을 잘 만족하고 있다.

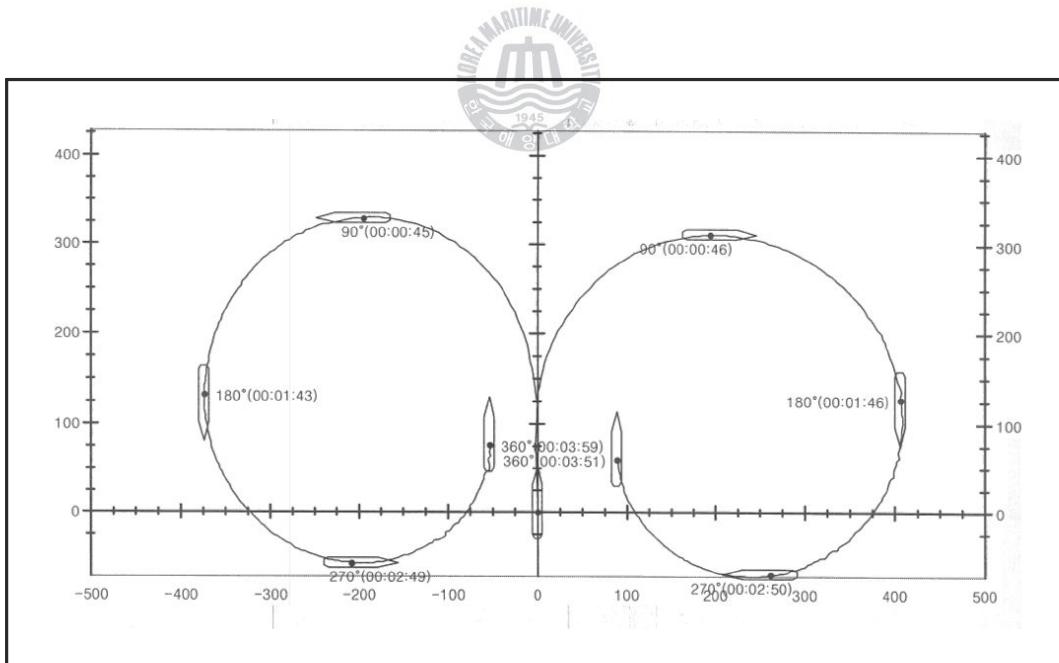


Figure 4.2 Turning Circle of T.S. HANBADA

변침성능을 살펴보기 위한 시험으로 Zig-zag test가 있다. Zig-zag test는 일정 속도(보통 설계속도)로 직진하다가 타각을 10° 돌리고 선회하는 선박의 선수각이 10° 에 도달하면 타를 반대 방향으로 10° 돌린다. 원침로 반대편으로 선수각이 10° 가 되면 다시 반대 방향으로 타를 돌리게 되는데, 이 때 선박은 Zig-zag 운동을하게 되므로, 이를 Zig-zag test라고 한다. 통상 수행되는 시험은 $10^\circ/10^\circ$ 및 $20^\circ/20^\circ$ Zig-zag test이다. Figure 4.3은 Zig-Zag Test를 할 때 계측된 타각과 선수각을 보여주고 있다. 이를 살펴보면 선회하고 있는 선박에 반대 방향의 타각을 가하여도 선박은 곧바로 반대 방향으로 움직이지 않고 얼마간 더 선회하게 된다. 타를 반대방향으로 작동한 후에도 더 돌아가는 각도를 Overshoot angle이라고 하며, 첫 번째 및 두 번째 Overshoot angle을 변침성능을 판단하는 자료로 사용한다. 즉, Overshoot angle이 크면 클수록 변침성능이 나쁜 선박이 된다.

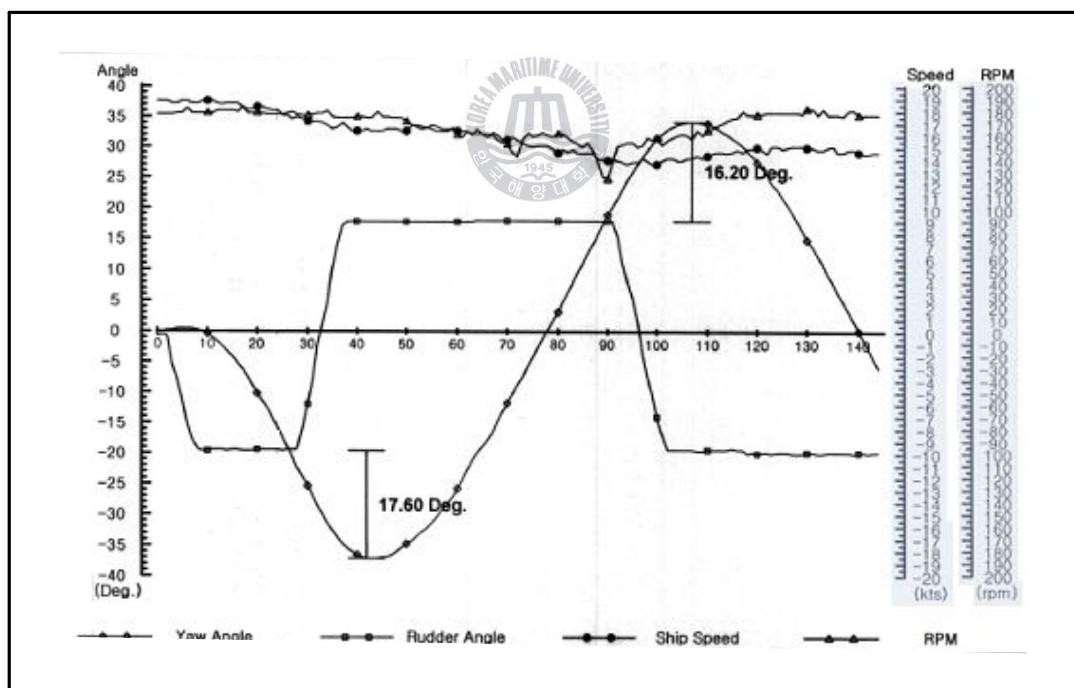


Figure 4.3 Zig-Zag Test of T.S. HANBADA

또한, $10^{\circ}/10^{\circ}$ Zig-zag test에서 처음에 타를 돌리고 선수각이 10° 에 도달한 시간을 초기선회시간(Initial turning time)이라고 하는데 초기선회능력을 나타내는 척도로 사용한다. 즉, 이 값으로부터 타를 돌린 후 얼마나 빨리 원하는 선수각을 얻을 수 있는지를 알 수 있다. IMO 조종성 기준을 만족하려면 $10^{\circ}/10^{\circ}$ Zig-zag test에서는 첫 번째 Overshoot angle이 10° 이내, 두 번째 Overshoot angle이 25° 이내, 그리고 $20^{\circ}/20^{\circ}$ Zig-zag test에서는 첫 번째 Overshoot angle이 25° 이내 이어야 한다. Figure 4.3 및 Table 4.1에서 보듯이 한바다호는 IMO 조종성 기준을 잘 만족하고 있다.

정지시험(Crash astern test)은 프로펠러의 후진력에 의하여 선박을 정지시킬 수 있는 능력을 평가하기 위한 시험이다. 정지시험은 최대속도로 전진(Full ahead)하다가 프로펠러를 가능한 최대 회전수로 역전(Full astern)시킨 후 선박이 완전히 정지할 때까지의 거리(최단정지거리)를 측정하는 시험이다. IMO 조종성 기준은 정지거리가 배 길이의 15배 이내이다. Figure 4.4 및 Table 4.1에서 보듯이 한바다호의 정지시험 결과는 IMO 조종성 기준을 만족하고 있다.

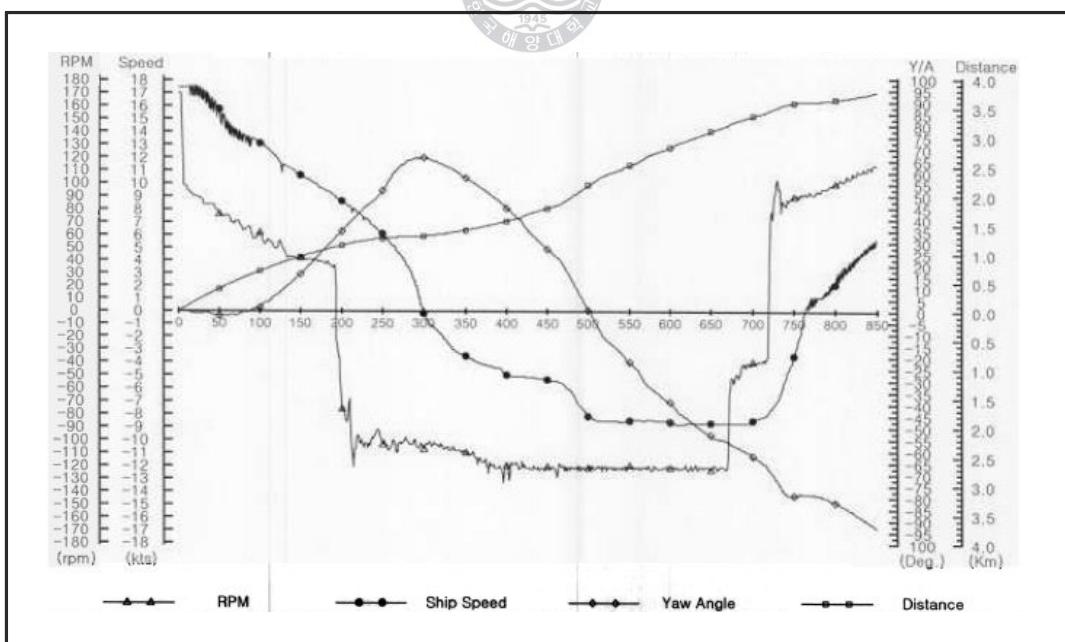


Figure 4.4 Crash Astern Test of T.S. HANBADA

나선시험(Spiral test)은 선박의 침로안정성을 정량적으로 측정하기 위한 시험이다. 시험은 처음에 타각을 우현 20° (STB'D 20°)로 시작하여 15° 도, 10° 등으로 타각을 줄였다가, 반대편 타각 좌현 20° 까지 수행한다. 다음에는 반대로 타각을 좌현 20° (PORT 20°)에서 시작하여 15° 도, 10° 등으로 타각을 줄였다가, 우현 20° 까지 선회시험을 수행한다. 각 선회시험에서 측정된 선박의 선회각속도를 타각에 대하여 그린 곡선은 보통 나선(Spiral)이 되는데, 이 곡선으로부터 선박의 침로안정성이 여부를 판단할 수 있다. 침로안정성이 좋은 선박은 단일 곡선으로 나타나지만, 침로가 불안정한 선박은 이중 곡선 형태를 보이며, 곡선의 폭이 20° 이상이면 조종이 불가능하게 된다. Figure 4.5에서 보듯이 한바다호는 나선시험 결과 침로안정성이 좋은 것으로 판단된다.

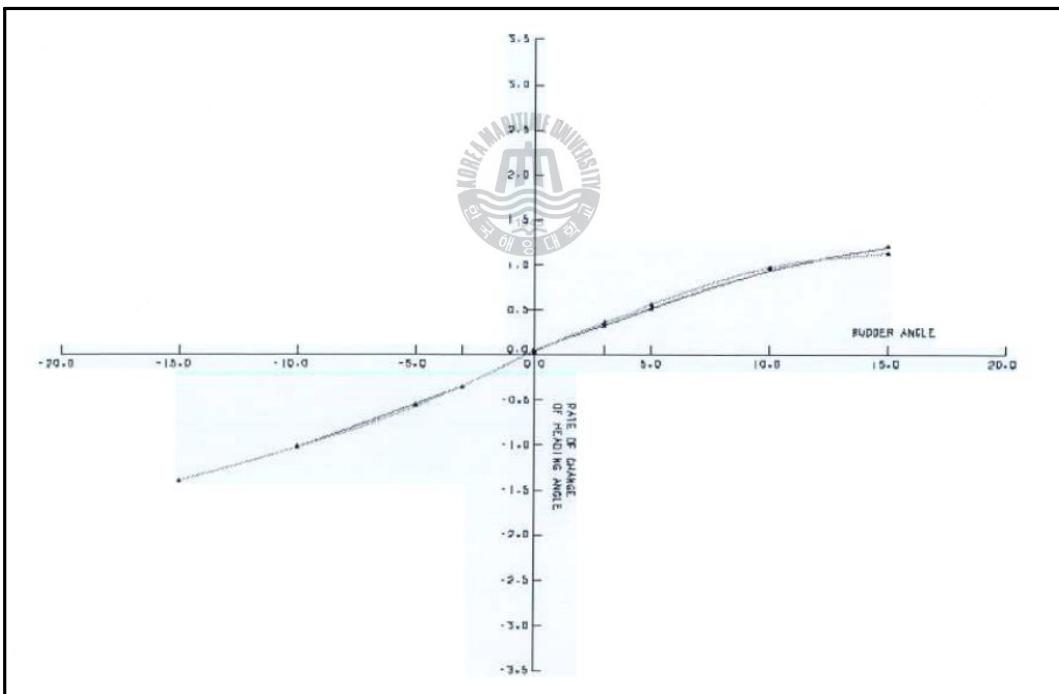


Figure 4.5 Spiral Test of T.S. HANBADA

4.3 대상 선박의 조종성능

2005년 11월 18일 실시한 실습선 한바다호의 시운전(Sea trial) 결과와 2007년 1학기 원양항해 중 실시한 다양한 선회시험(Turning test)을 타각, 선회방향, 적화상태, 속력 등 여러 기준으로 비교 검토해 보고, 그 결과가 IMO에서 규정하고 있는 조종성 기준을 얼마나 만족하고 있는지 살펴보았다. 또한 선박을 안전하게 조종하는데 매우 중요한 지표가 되고 있는 선박의 조종성지수인 선회성지수(K)와 추종성지수(T)를 실선시험을 통하여 구함으로써 실습선 한바다호를 조종하는 항해사들에게 참고가 되도록 하였다. Figure 4.6은 시운전 당시 선회하는 모습을 찍은 항공사진이다.



Figure 4.6 Photograph of T.S. HANBADA

4.3.1 대상 선박의 선회성능

원양항해 중 실시한 선회시험은 2007년 5월 20일과 29일 두 차례에 걸쳐서 실시하였으며, 20일은 우현(Starboard)으로 타각 35° , 20° , 10° 의 선회시험을 실시하였고, 29일은 좌현(Port)으로 타각 35° , 20° , 10° 의 선회시험을 실시하였다. 이러한 선회시험 자료와 함께 인수 직전 실시한 시운전 선회시험 자료를 취합하여 몇 가지 비교분석을 실시하였다. 또한, Table 4.3에서 보는 바와 같이 선회시험을 실시하면서 타를 돌리는 시점부터 선수각이 해당 타각에 도달할 때까지의 시간을 측정하는데 이를 초기선회시간(Initial turning time)이라 하고, 초기 선회능력을 나타내는 척도로 사용된다. 즉, 이 값으로부터 타를 돌린 후 얼마나 빨리 원하는 선수각을 얻을 수 있는지를 알 수 있다. 선회시험을 실시했던 당시의 선박 및 해상조건은 Table 4.2와 같다.

Table 4.2 Ship's Conditions on Turning Test

Item \ Date	2005. 11. 18	2007. 5. 20	2007. 5. 29
Displacement (ton)	5529	6125	5846
Draft(F/M/A) (m)	4.6/5.3/5.8	5.3/5.7/6.1	5.3/5.5/5.7
Trim (m)	1.2	0.8	0.4
C_b	0.549	0.563	0.556
Beaufort Scale	3	3	3
Depth (m)	110	65	60

Table 4.3은 초기선회시간을 다양한 선회시험을 통하여 확인한 결과이다. Table 4.1에서 알 수 있듯이 IMO 조종성 기준에서는 그 기준이 항적(Path length)으로 표시되어 있고, 그 값은 10° 타각을 주었을 경우 선박이 실제로 항주한 거리는 선박길이의 2.5배 이내이어야 한다. 한바다호는 10° 타각에서 뿐만 아니라 35° 타각에서도 2.5L을 넘지 않아 IMO 기준을 잘 만족하고 있다. 속력이 빠른 경우에 해당 타각까지 선회하는데 걸리는 시간은 짧게 측정되었으나, 이동거리로 환산하여 계산해 본 결과 거의 비슷하였으며, 또한 타각이 커질수록 선회 각속도는 커지나 해당타각까지 선회하는데 걸리는 시간은 더 길어짐을 알 수 있었다.

Table 4.3 Initial Turning Time of T.S. HANBADA

Item	Rudder Angle($^{\circ}$)	5 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	20 $^{\circ}$	35 $^{\circ}$
Time to arrive Rudder Angle (sec)	2	3	6	10	
Initial Turning Time (sec)	16.5kts	21	22	26	28
	13.0kts	26	28	34	36
Path Length (m)	16.5kts	178(1.71L)	186(1.79L)	221(2.13L)	230(2.21L)
	13.0kts	174(1.67L)	187(1.80L)	227(2.18L)	240(2.30L)

Table 4.4는 인수 직전 실시한 35° 선회 시운전 자료와 2007년 5월 20일과 29일 두 차례에 걸쳐 실시한 선회시험 결과를 비교한 것이다. Table 4.2에서와 같이 배수량, 훌수, 트림 등의 영향을 무시할 수는 없지만, 좌현으로 선회한 경우가 우현으로 선회한 경우보다 타각 35° 에서 전술선회경이 작게 나타났다. 그 이유는 프로펠러 회전으로 인한 횡압력의 관계로 프로펠러 회전쪽의 선미가 회전 반대 방향으로 치우쳐짐에 따라 선수가 회전방향으로 치우치는 경향이 생기므로 선회권이 작아진 것으로 판단된다. Table 4.5 및 4.6에서 보면 이 같은 타각이 작아질 수록 더욱 더 커져감을 알 수 있었다. 또한, 시운전 때 17.6kts로 속력이 큰 경우가 원양항해 중 12.6kts로 속력이 작은 경우보다 선회경이 크게 나타났다. 선회권의 크기에 영향을 주는 요소로는 일반적으로 방형비척계수, 트림, 훌수, 수면하 형상, 수심 그리고 속력 등으로 알려져 있으며, 타 선박과의 충돌상황이 아닌 전방의 장애물을 피하는 상황에서는 속력을 낮추고 좌현으로 전타하는 것이 보다 유리하다고 볼 수 있다.

Table 4.4 Turning Ability of T.S. HANBADA

Rudder Angle($^\circ$) Item	Port 35°		Stb'd 35°	
	Sea trial	Measurement	Sea trial	Measurement
Speed(Initial/End) (kts)	17.6/6.0	12.9/5.9	17.5/6.8	12.3/5.9
Advance (m)	329(3.2LBP)	294(2.8LBP)	311(3.0LBP)	302(2.9LBP)
Transfer (m)	195(1.9LBP)	196(1.9LBP)	193(1.9LBP)	190(1.8LBP)
Tactical Diameter (m)	374(3.6LBP)	325(3.1LBP)	407(3.9LBP)	368(3.5LBP)

Table 4.5~4.6 및 Figure 4.7~4.11에서는 우현과 좌현으로 각각 선회시 타각별(10° , 20° , 35°) 선회권의 크기를 비교하였고, 또한 선회를 완료하는데 소요되는 시간을 측정하였다. 타각이 35° 에서 10° 로 작아져감에 따라 좌현과 우현의 선회권의 크기가 각각 43m, 78m 그리고 129m로 점점 큰 차이를 보이며, 타각 35° 로 선회하였을 경우가 타각 10° 로 선회하였을 경우보다 선회권의 크기가 1/2 정도 감소하고, 완전히 선회를 완성하는데 걸리는 시간도 상당히 줄어들며, 또한 속력 감소도 큰 차이를 보이고 있다.

Table 4.5는 2007년 5월 20일 실시한 선회권 시험으로 모두 우현으로 선회하였다. 타각 35° 로 선회하였을 경우 종거가 2.9L이고, 전술선회경이 3.5L로 측정 되었다. 이는 IMO에서 요구하는 조종성 기준의 종거(4.5L) 및 전술회전경(5.0L)의 범위를 잘 만족하고 있다.

Table 4.5 Turning Ability of T.S. HANBADA(Starboard side)

Rudder Angle($^\circ$)	Stb'd 10°	Stb'd 20°	Stb'd 35°
Item			
Speed(Initial/End) (kts)	12.3/10.3	12.5/8.6	12.3/5.9
Time of Turning (min-sec)	8'-07"	5'-56"	5'-03"
Advance (m)	516(5.0LBP)	425(4.1LBP)	302(2.9LBP)
Transfer (m)	421(4.0LBP)	250(2.5LBP)	190(1.8LBP)
Tactical Diameter (m)	781(7.5LBP)	528(5.1LBP)	368(3.5LBP)

Table 4.6은 2007년 5월 29일 실시한 선회권 시험으로 모두 좌현으로 선회하였다. 타각 35° 로 선회하였을 경우 종거가 2.8L이고, 전술선회경이 3.1L로 측정 되었다. 좌현 또한 IMO에서 요구하는 조종성 기준의 종거(4.5L) 및 전술회

전경(5.0L)의 범위를 잘 만족하고 있다.

Table 4.6 Turning Ability of T.S. HANBADA(Port side)

Item	Rudder Angle(°)	Port 10°	Port 20°	Port 35°
Speed(Initial/End) (kts)		13.0/9.4	13.0/8.0	12.9/5.9
Time of Turning (min-sec)		7'-11"	5'-38"	4'-53"
Advance (m)		484(4.7LBP)	408(3.9LBP)	294(2.8LBP)
Transfer (m)		351(3.4LBP)	246(2.4LBP)	196(1.9LBP)
Tactical Diameter (m)		652(6.3LBP)	450(4.3LBP)	325(3.1LBP)

Figure 4.7은 타각 35°로 우현과 좌현으로 각각 선회한 선회권의 크기를 비교한 것이다. 좌현으로 선회한 경우 선회권이 43m정도 작게 측정되었다.

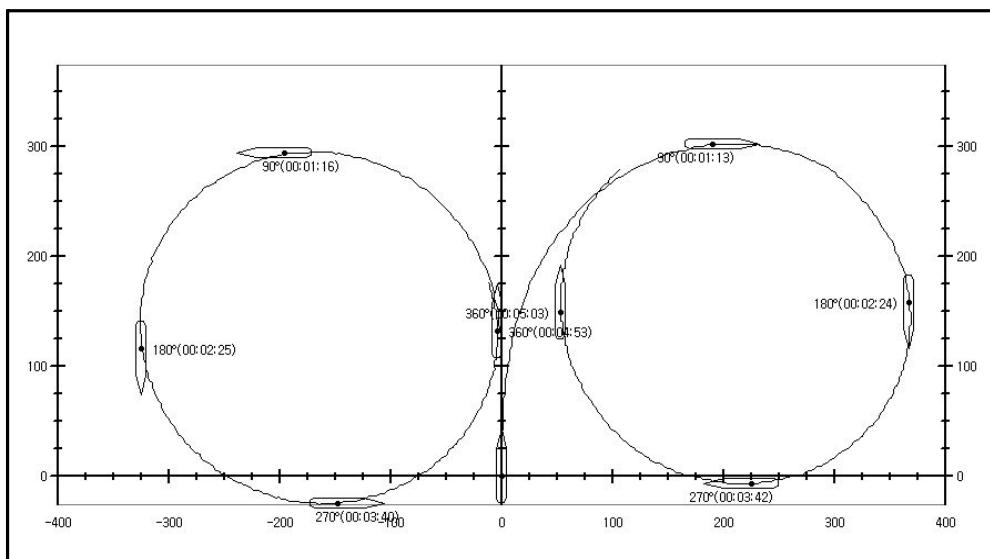


Figure 4.7 Turning Circle of T.S. HANBADA(R/A 35°)

Figure 4.8은 타각 20° 로 우현과 좌현으로 각각 선회한 선회권의 크기를 비교한 것이다. 좌현으로 선회한 경우 선회권이 78m정도 작게 측정되었다.

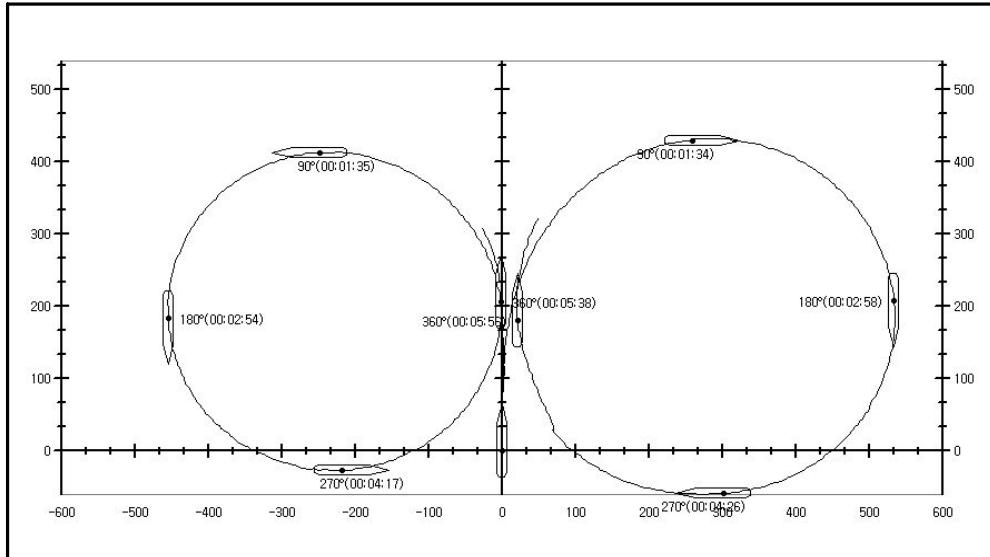


Figure 4.8 Turning Circle of T.S. HANBADA(R/A 20°)

Figure 4.9는 타각 10° 로 우현과 좌현으로 각각 선회한 선회권의 크기를 비교한 것이다. 좌현으로 선회한 경우 선회권이 129m정도 작게 측정되었다.

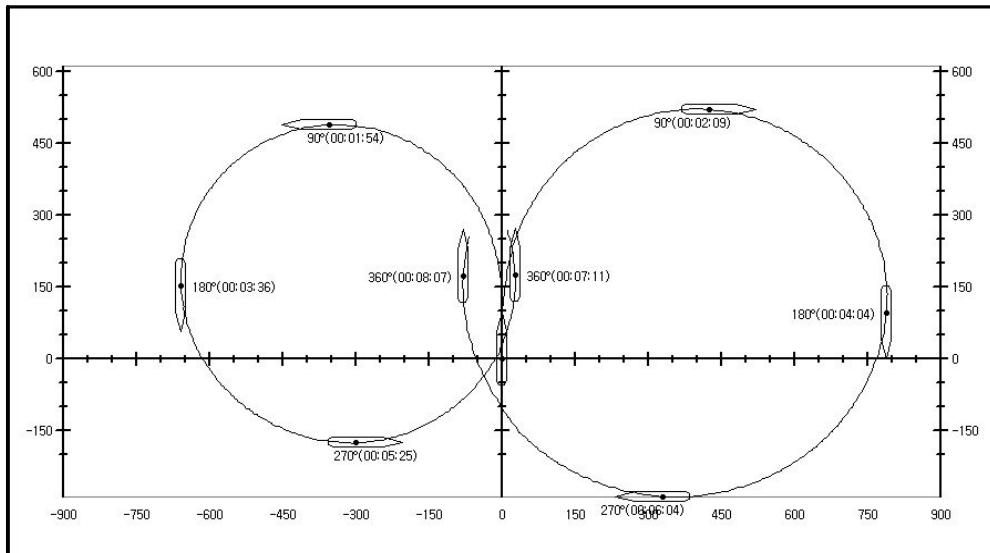


Figure 4.9 Turning Circle of T.S. HANBADA(R/A 10°)

Figure 4.10 및 4.11은 우현 및 좌현으로 타각 10° 와 35° 로 선회하였을 경우 선회권의 크기를 비교한 것이다. 타각 10° 로 선회한 경우가 35° 로 선회한 경우보다 선회권이 $1/2$ 정도로 감소하였다.

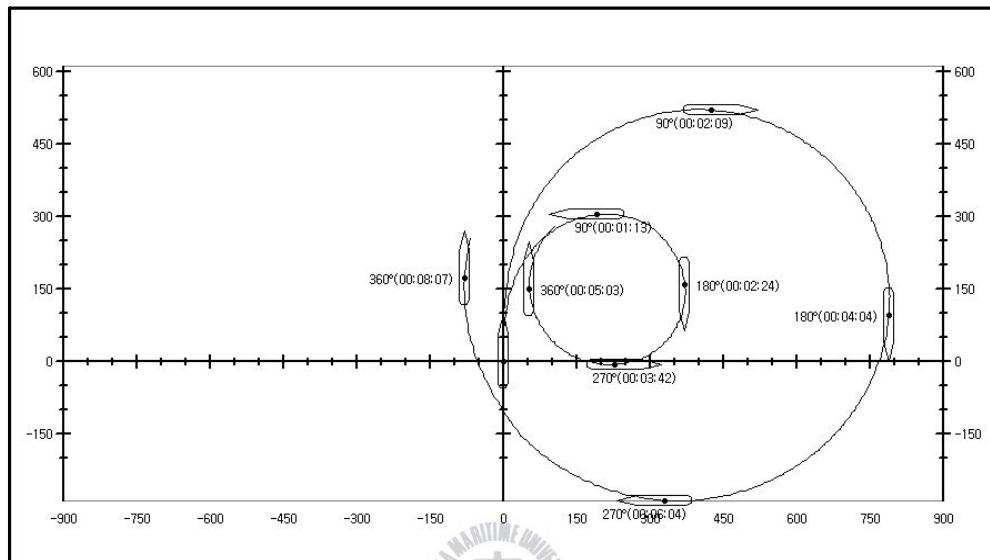


Figure 4.10 Turning Circle of Starboard Side(10° - 35°)

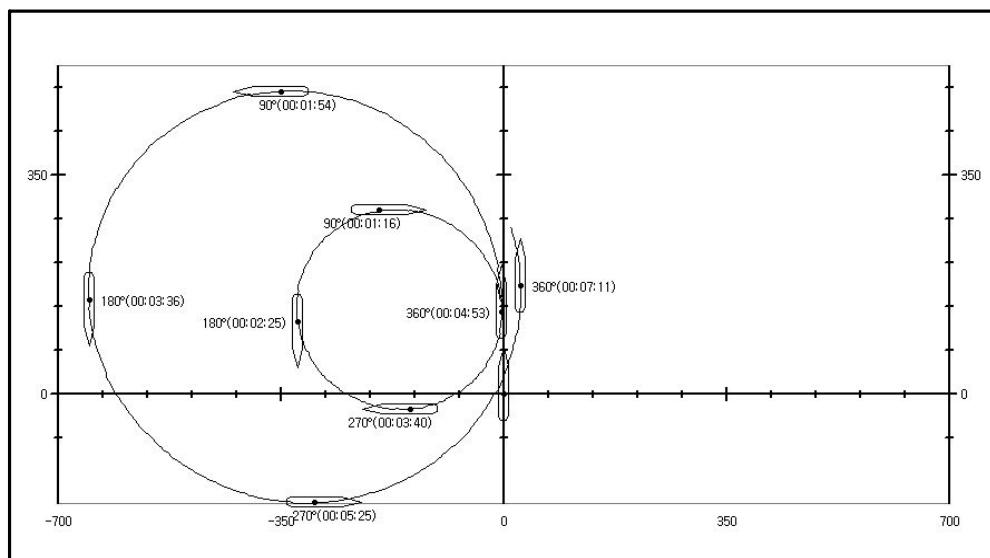


Figure 4.11 Turning Circle of Port Side(10° - 35°)

Table 4.7은 2005년 11월 18일 실시한 실습선 한바다호의 시운전 결과와 2007년 1학기 원양항해 중 실시한 다양한 선회시험 결과를 종합하여 나타낸 것으로, 실습선 한바다호의 조종성능은 IMO에서 제시하고 있는 조종성 기준과 비교해 볼 때 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 4.7 Comparison between Turning Abilities

Test	Items		IMO Standards	Ability of HANBADA
Turning ability	+ 35° rudder angle	Advance	4.5L	2.9L/3.0L
		Tactical Diameter	5.0L	3.5L/3.9L
	-35° rudder angle	Advance	4.5L	2.8L/3.2L
		Tactical Diameter	5.0L	3.1L/3.6L
Yaw checking & Course keeping ability	10°/10° Zig-Zag	First overshoot angle	10.0°	9.0°
		Second overshoot angle	25.0°	12.0°
	20°/20° Zig-Zag	First overshoot angle	25.0°	17.6
Initial Turning ability	+ 10° rudder angle	Path Length	2.5L	1.79L
	-10° rudder angle	Path Length	2.5L	1.79L
Stopping ability	Crash astern	Track reach	15.0L	13.3L

4.3.2 대상 선박의 조종성 지수

조종성 지수를 산출하기 위한 실험은 2007년 5월 29일 선회시험과 동시에 실시하였다. 실험방법은 일정침로를 유지하다가 해당 타각(δ)을 명령하고, 한 사람은 시작과 동시에 초시계를 가지고 1분까지는 2초 간격, 그 이후로는 5초 간격으로 알리고, 다른 사람은 그 때의 선수각(Heading)을 기록하였다. 또 다른 사람은 조타 구령 후 몇 초만에 해당 타각에 도달하는지 확인하였으며, 기타 자료도 참고하기 위해 속력(Speed), 타각(Rudder angle), 선회각속도(Rate of turn), 경사각(Heeling), RPM 등도 기록하였다.

Table 4.8은 좌현(Port)으로 타각 35° 로 선회하였을 때 기록한 자료 중 일부를 나타내고 있다. 각 시각별 선수각으로부터 초당 선수각 변화에 해당되는 각속도를 구하여 그래프를 그리면 Figure 4.12~4.14와 같고, 그래프에서 각속도가 일정해지는 시점인 일정각속도(ϕ)는 부여한 타각의 K배 이므로 ($\phi = K\delta$), 여기서 선회성 지수(K)를 구할 수 있다. 또한 $K\delta$ 의 0.63배인 지점($0.63 \times K\delta$)의 시간축과 조타각 완성시간의 $1/2$ 인 시간의 차에 해당되는 시간이 추종성 지수(T)에 해당된다.

하지만, 선회시험 결과에서도 알 수 있듯이 선속에 따라 선회성능이 다르므로 선박의 길이(L)와 선속(u)으로 무차원하여 표시할 수 있다. 타 선박과 비교하여 K' 가 크면 각속도가 커지므로 선회가 빠르고, T' 가 작으면 선체는 조타에 빨리 대응하게 되어 선회성이 우수함을 의미한다. 이번 실험은 좌현으로 10° , 20° 및 35° 에 대하여 실시하였다.

Table 4.8 Test for Maneuvering Performance Index (Port 35°)

Time	Heading	Speed	Rudder Angle	R.O.T	Heeling	RPM
0	0	13	0	0	0	119
2	0	13	6	0	0	119
4	0	13	14	0	1	119
6	0	13	18	-5	0.5	119
8	0	13	25	-15	0.5	119
10	359	12.9	31	-20	0.5	119
12	358	13	33	-28	1	119
14	357	12.9	33	-30(limit)	1	120
16	356	12.9	33	-30(limit)	1	121
18	354	12.9	33	-30(limit)	1	121
20	352	12.9	33	-30(limit)	1.5	120
22	349	12.9	33	-30(limit)	2.7	119
24	346	12.8	33	-30(limit)	2.7	119
26	343	12.8	33	-30(limit)	2.7	119
28	340	12.9	33	-30(limit)	2.7	117
30	337	12.8	33	-30(limit)	2.7	117
32	331	12.8	33	-30(limit)	3	117
34	328	12.7	33	-30(limit)	3	117
36	325	12.7	33	-30(limit)	3	117
38	322	12.5	33	-30(limit)	3	117
40	319	12.4	33	-30(limit)	3	117
42	316	12.3	33	-30(limit)	3	116
44	313	12.2	33	-30(limit)	3	117
46	309	12.1	33	-30(limit)	3	116
48	306	11.7	33	-30(limit)	3	116
50	303	11.7	33	-30(limit)	3	118
52	300	11.3	33	-30(limit)	3	116
54	297	11.1	33	-30(limit)	3	116
56	294	11.1	33	-30(limit)	3	116
58	291	10.7	33	-30(limit)	3	116
60	288	10.4	33	-30(limit)	3	115

Figure 4.12 및 4.13은 타각 10° 및 20° 일 때의 조종성 지수를 나타낸 것이다.
 선회성 지수(K)는 $0.1/\text{sec}$ 및 $0.06/\text{sec}$ 이고, 주종성 지수(T)는 20초 및 17초이다.

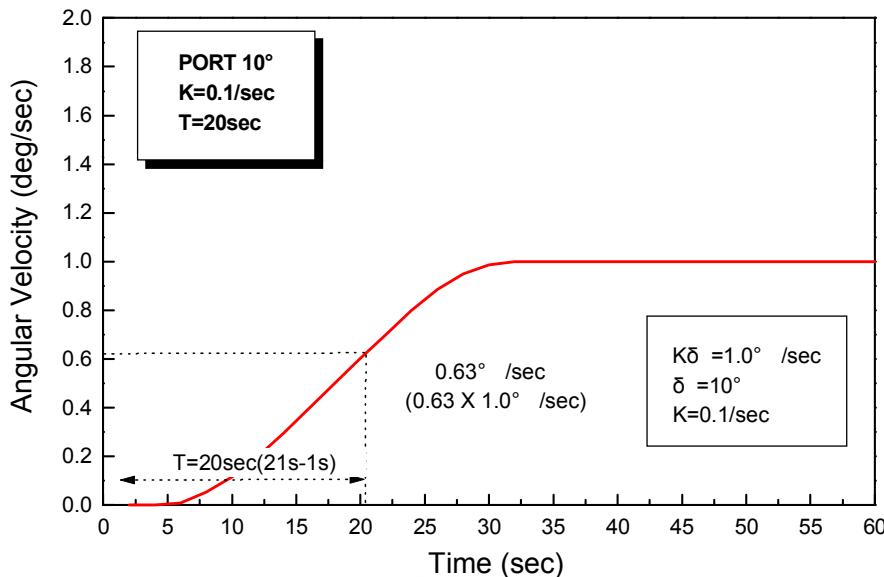


Figure 4.12 Maneuvering Performance Index (Port 10°)

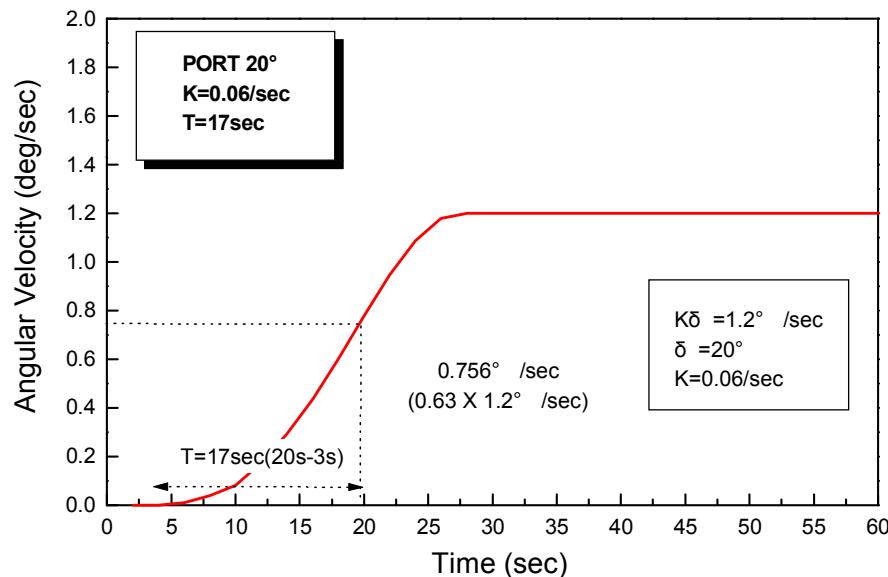


Figure 4.13 Maneuvering Performance Index (Port 20°)

Figure 4.14는 타각 35° 일 때의 조종성 지수를 나타낸 것이다. 선회성 지수(K)는 $0.05/\text{sec}$ 이고, 추종성 지수(T)는 13초이다.

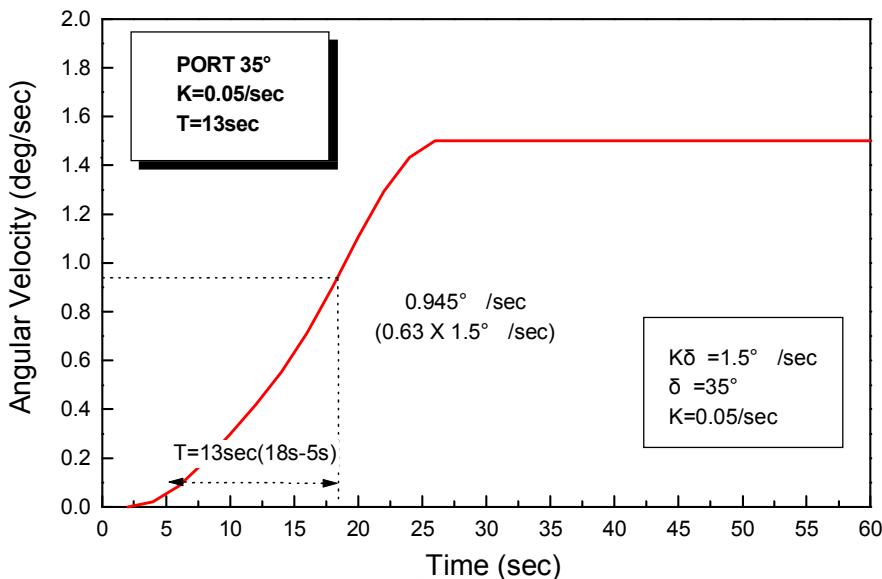


Figure 4.14 Maneuvering Performance Index (Port 35°)

Figure 4.12~4.14를 정리하면 Table 4.9와 같다. 선회성능은 선속 및 선박의 길이에 따라 달라질 수 있으므로, 선박의 길이(L)와 선속(u)으로 무차원하여 표시할 수 있다.

Table 4.9 Maneuvering Performance Index of T.S. HANBADA

타 각(δ)	K (선회성 지수)	T (추종성 지수)	K' ($K \cdot L/u$)	T' ($T \cdot u/L$)	최초 속력(Knot)
Port 10°	0.10	20	0.80	2.50	13.0
Port 20°	0.06	17	0.42	2.13	13.0
Port 35°	0.05	13	0.40	1.63	13.0

Table 4.10은 실습선 한바다호와 다른 선박의 조종성 지수를 비교한 것이다. 실습선 한바다호는 다른 선박과 비교하여 조타에 빨리 대응하는 능력이 다소 떨어지나(T' 가 상대적으로 큼), 일단 선회가 시작되면 빠른 각속도로 선회하는 능력이 비교적 우수한 것으로 조사되었다(K' 가 상대적으로 큼). 따라서, 실습선 한바다호의 경우 선회과정에서 선회경은 다소 작아질 수 있으나, 전진거리(종거)가 길어질 수 있으므로 전방의 위험물 회피에 주의가 요구된다.

Table 4.10 Comparison of Maneuvering Performance Index

선 종	속력 (Knot)	K	T	K'	T'	타 각(δ)
화물선 밸라스트	17.2	0.04	11.0	0.35	1.24	15°
화물선 밸라스트	15.7	0.05	6.9	0.36	0.95	15°
철도연락선 반재	15.0	0.03	7.0	0.22	0.93	15°
철도연락선 반재	14.5	0.1	22.5	0.76	2.94	15°
실습선	10.0	0.05	13.6	0.46	1.48	20°
실습선	10.0	0.04	12.0	0.37	1.30	30°
한바다호	13.0	0.10	20.0	0.80	2.50	10°
한바다호	13.0	0.06	17.0	0.42	2.13	20°
한바다호	13.0	0.05	13.0	0.40	1.63	35°

* 비교자료 출처 : 선박조종의 이론과 실무⁴¹⁾

4.3.3 대상 선박의 신침로 거리

선박 상호간 충돌이 임박한 상황, 방파제 통과 등 장애물과의 충돌 위험성이 있을 경우, 또는 항내조선 및 협수도 항해 시 선박 운항자(항해사, 선장, 도선사)는 선박을 안전하게 조선하기 위해서 신침로 거리를 미리 파악하고 있어야 한다.

신침로 거리란, Figure 4.15에서와 같이 선박이 어떤 침로로 항주 중 신침로로 변침할 때 전타(Hard over)하여 신침로에 정침하기까지의 전진거리로, 원침로의 전타위치에서 신·구침로의 교차점까지의 거리를 의미한다.

따라서, 본 논문에서는 선박이 피항동작 또는 변침동작을 취할 때 어느 정도의 신침로 거리만큼 여유를 두고 조타 명령을 내려야 할지 정량적으로 제시하여 선박을 보다 안전하게 조선하고자 한다. 또한, 연안항해 중 변침점에서의 변침 시 전타하지 않고 일반적으로 10° ~ 20° 정도의 타각을 사용하여 변침하므로 전타(35°)뿐만 아니라 타각 10° 및 20° 를 함께 제시하였다.

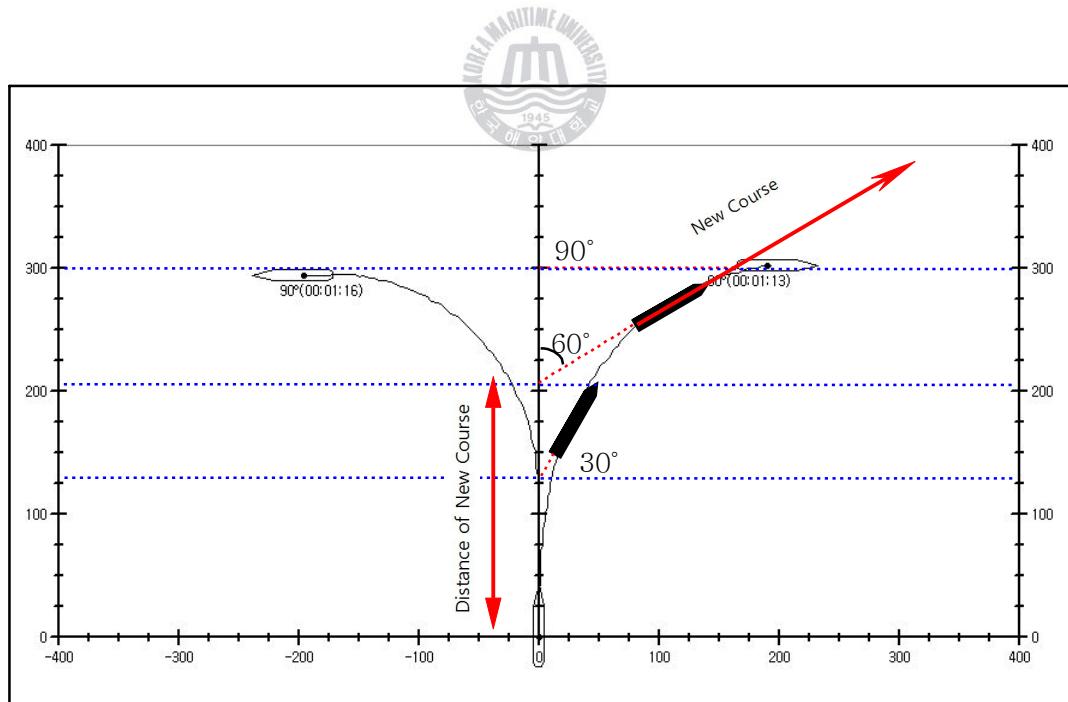


Figure 4.15 Distance of New Course(35°)

신침로 거리의 계산은 ‘4.3.1 실습선 한바다호의 선회성능’에서와 같이 2007년 5월 20일과 29일 실시되었던 선회시험 자료를 바탕으로 산출하였다.

Figure 4.15에서는 좌현과 우현으로 각각 전타하였을 경우의 항적을 나타내고 있으며, 양현의 항적이 유사하여 우현으로 선회한 경우만 신침로 거리를 제시하였다. 그림에 나타난 항적은 GPS 신호를 받아 항적을 자동으로 표시해 주는 선박 조종성능 계측 시스템을 이용하여 산출된 항적이다. 원침로로부터 신침로가 각각 30° , 60° 및 90° 인 경우를 예로 들었으며, 우현으로 전타(35°)하여 변침하였을 때 신침로 거리는 각각 125m, 205m 그리고 300m로 확인되었다.

Figure 4.16에서는 우현으로 타각 20° 를 사용하여 변침한 경우로, 원침로로부터 신침로가 각각 30° , 60° 및 90° 일 때 신침로 거리는 각각 200m, 300m 그리고 425m로 확인되었다. 타각을 35° 에서 20° 로 줄여 변침하게 되면 약 100m정도 신침로 거리가 길어짐을 알 수 있다.

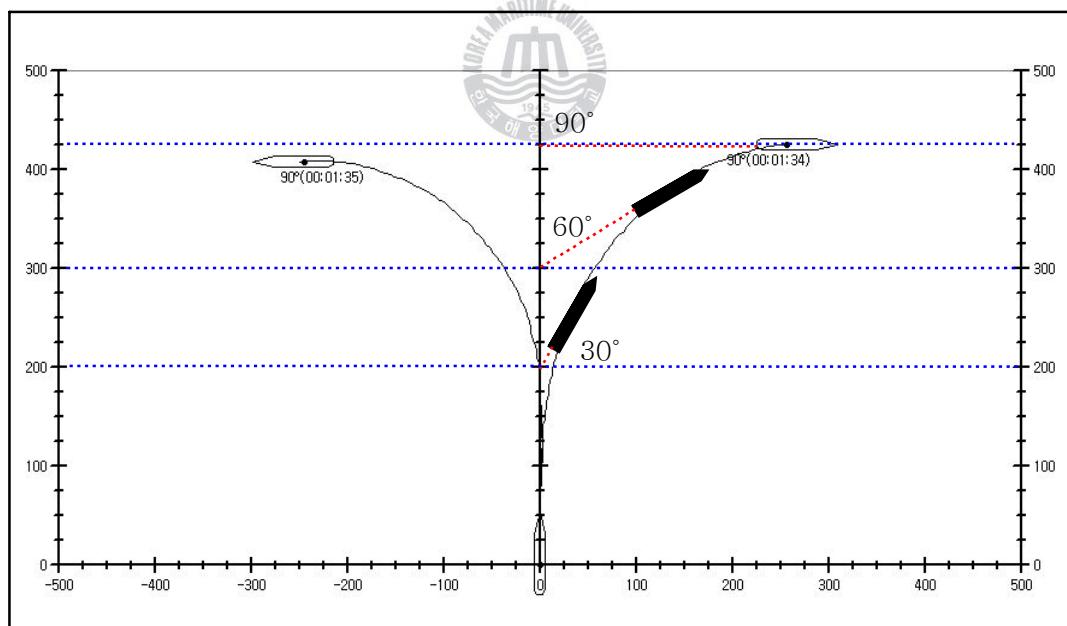


Figure 4.16 Distance of New Course(20°)

Figure 4.17에서는 우현으로 타각 10° 를 사용하여 변침한 경우로, 원침로로부터 신침로가 각각 30° , 60° 및 90° 일 때 신침로 거리는 각각 210m, 340m 그리고 525m로 확인되었다.

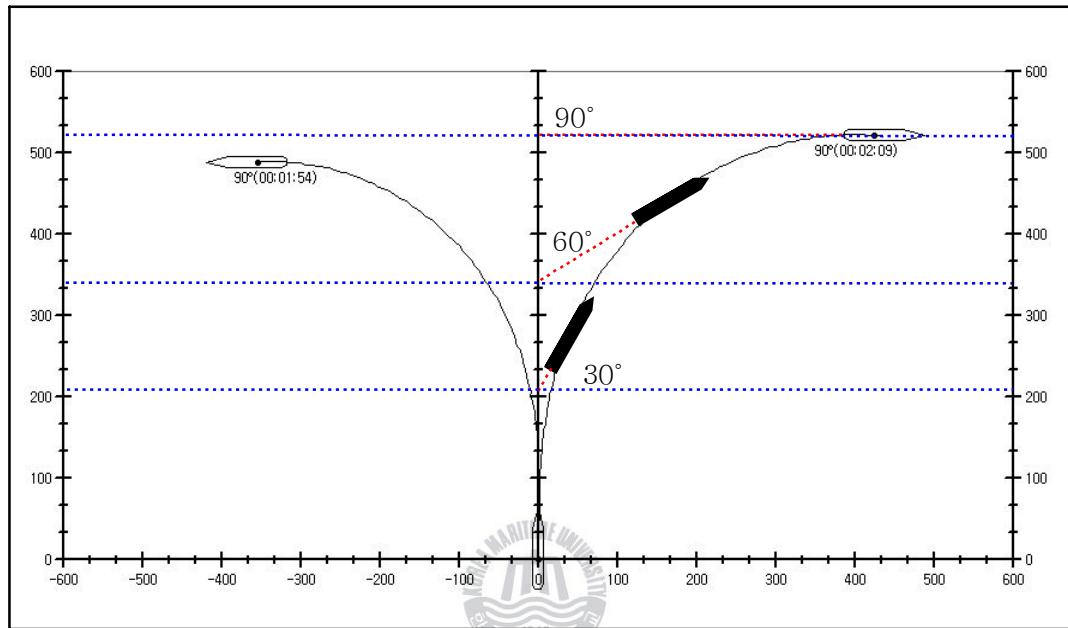


Figure 4.17 Distance of New Course(10°)

이상의 내용을 정리하면 Figure 4.18 및 Table 4.11과 같다. 동일한 타각을 사용하였을 경우 양현의 신침로 거리가 거의 유사하게 측정되었으며, 타각을 크게 하여 전타할 경우 신침로 거리가 크게는 200m정도 짧게 산출되었음을 알 수 있다.

이와 같은 신침로 거리는 충돌회피조선 또는 일반적인 피항동작에 유용하게 이용될 수 있으며, 연안항해 시에는 변침점을 결정하고 변침동작을 취할 때 어느 정도의 신침로 거리만큼 여유를 두고 조타 명령을 내려야 할지 결정하는데 많은 도움이 될 것이다.

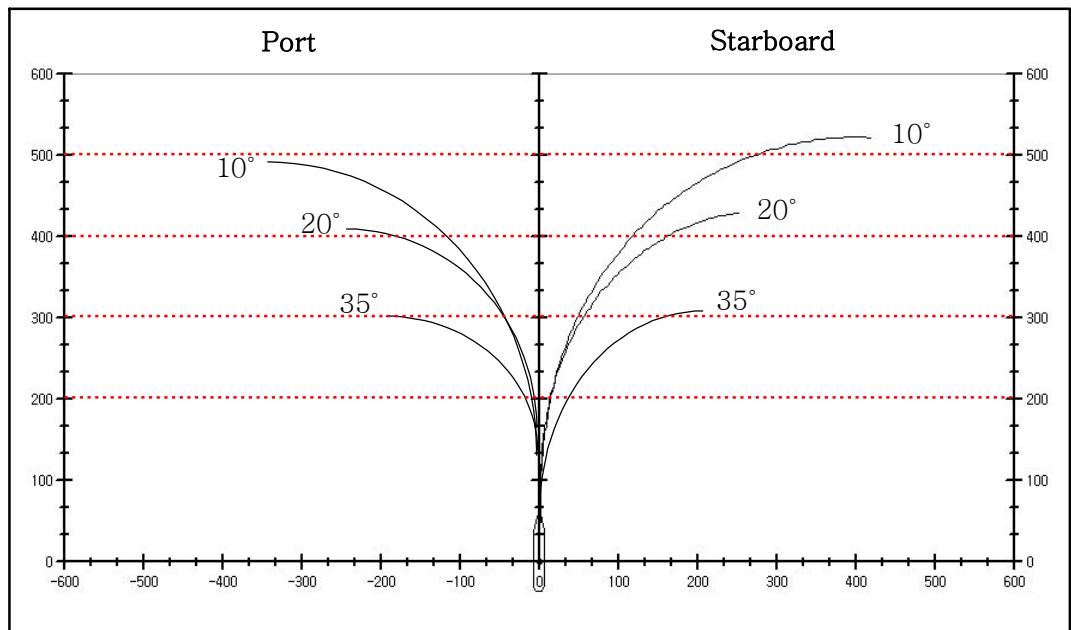


Figure 4.18 Distance of New Course($10^\circ \sim 35^\circ$)

Table 4.11 Distance of New Course(Starboard)

Rudder Angle	New Course			Remark
	30°	60°	90°	
10°	210	340	525	
20°	200	300	425	Unit : m (Speed : 13Kts)
35°	125	205	300	

4.4 풍압력의 영향을 고려한 조종성능

실습선 한바다호는 수면 상부의 구조물이 상대적으로 큰 선형으로 바람(외력)의 영향을 크게 받아 압류나 회두와 같은 현상이 비교적 크게 나타난다. 특히 접·이안 또는 항내에서 저속으로 운항할 경우 이러한 현상이 두드러지게 나타날 것으로 예상된다. 항내 저속 항해나 접·이안 조선에 있어서 강풍이나 갑작스런 돌풍이 작용할 경우 풍압력과 풍압모우멘트의 영향으로 표류각이 형성되고, 이에 대응하기 위한 적절한 대응 타각을 적시에 사용하지 못하면 선박은 위험한 상황에 직면하게 된다.

따라서, 실습선 한나라호의 풍압력과 풍압모멘트 영향에 관한 연구³³⁾와 동일한 방법으로 실습선 한바다호에 작용하는 풍압력과 풍압모우멘트를 계산하고, 조류의 영향이 적고 파도가 충분히 발달되지 않은 항내 조선을 전제로 상대 풍향과 풍속에 따른 표류각과 대응 타각 및 Bow Thruster를 이용한 접·이안 가능 최대 풍속을 산출하였다.



4.4.1 풍압력과 유체력 운동방정식

선박이 바람이나 조류 등과 같은 외력 하에서 항해할 경우 외력이 작용하는 방향과 크기에 따라 그 영향이 다르겠지만, 일반적으로 선체에 나타나는 현상은 저항 증가로 인한 선속의 감소, 압류에 의한 표류각 형성, 선수 회두, 풍압력에 의한 횡경사 등을 들 수 있다. 이러한 현상을 선체 중심을 기준으로 성분별로 분리하면 수면 상부에 작용하는 바람으로 인한 풍압력(Wind force), 표류에 의한 수면 하부에 작용하는 유체력(Drifting force), 타각 사용에 따른 타력(Rudder force) 등이다. 일반적으로 선박에 외력이 작용하면 선체는 압류되면서 일정한 표류각을 갖고 항주하기 때문에 선박이 진행하고자 하는 방향과 실제 항적은 Figure 4.19와 같이 반드시 일치하지는 않는다.^{33),42),43)}

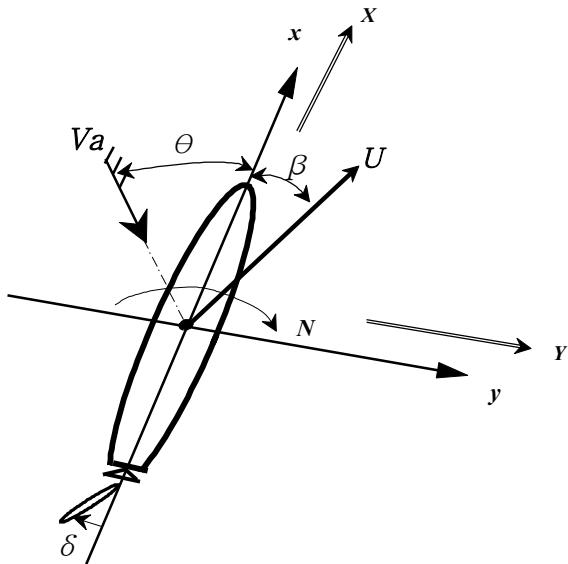


Figure 4.19 Coordinate Systems

외력에 의한 횡압류 성분과 모우멘트 성분을 각각 Y_E , N_E 라 정의하면 다음과 같다.

$$Y_E = Y_a + Y_w + Y_\delta, \quad N_E = N_a + N_w + N_\delta \quad (4-1)$$

여기서, Y_a , Y_w , Y_δ 는 바람에 의한 풍압력, 표류에 의한 유체력, 대용 타각에 의한 타력을 의미하고, N 은 해당 요소의 모우멘트를 의미한다. 선박이 풍압력으로 인해 일정한 표류각을 갖고 정상 상태로 항행하기 위해서는 풍압력과 수면 하부의 유체력 및 타각으로 기인되는 유체력이 상호 평행을 유지해야 하므로 $Y_E = 0$, $N_E = 0$ 조건을 만족하는 평형방정식(Equilibrium condition)이 다음과 같이 유도된다.

$$Y_a + Y_w + Y_\delta = 0, \quad N_a + N_w + N_\delta = 0 \quad (4-2)$$

바람에 의한 풍압력 및 풍압 모우멘트 산출에 있어서 가장 중요한 풍압 계수 결정은 한바다호의 정면 및 측면 풍압면적, 풍압 중심점, 선교 높이 등을 기초

로 Fujiwara et al.⁴⁴⁾에 의해 제안된 추정식에 입력하여 산출하였다.

$$Y_a = \frac{1}{2} \rho_a C_y(\theta) A_L V_a^2 \quad (4-3)$$

$$N_a = \frac{1}{2} \rho_a C_N(\theta) A_L V_a^2 L_{oa} \quad (4-4)$$

단, A_L : 측면풍압면적, V_a : 풍속, ρ_a : 공기밀도

$C_y(\theta)$: 측면풍압계수, $C_N(\theta)$: 풍압모우멘트 계수

θ : 상대 풍향, L_{oa} : 전장

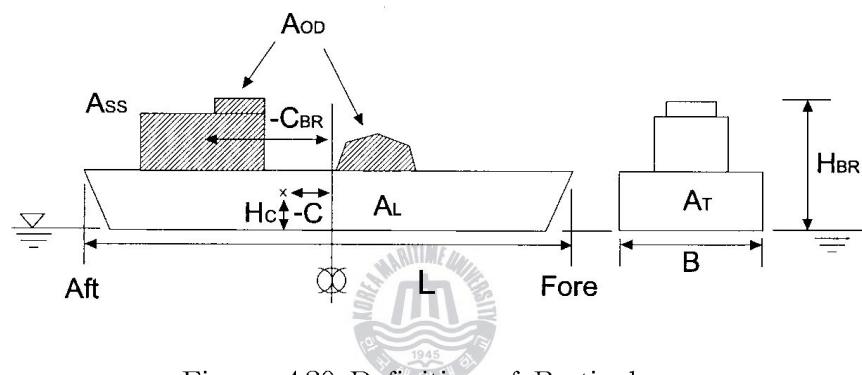


Figure 4.20 Definition of Particulars

L : Length over all (m)

B : Breadth (m)

AT : Transverse projected area (m^2)

AL : Lateral projected area (m^2)

A_{OD} : Lateral projected area of superstructure(ASS)

and LNG tanks, containers etc. on the deck (m^2)

C : Distance from midship section to center of

lateral projected area (m)

CBR : Distance from midship section to center of the ASS (m)

H_{BR} : Height to top of superstructure (Bridge) (m)

H_C : Height to center of lateral projected area (m)

$$C_X = X_0 + X_1 \cos \theta + X_3 \cos 3\theta + X_5 \cos 5\theta$$

$$C_Y = Y_1 \sin \theta + Y_3 \sin 3\theta + Y_5 \sin 5\theta$$

$$C_N = N_1 \sin \theta + N_2 \sin 2\theta + N_3 \sin 3\theta$$

여기서,

C_X 의 계수

$$X_0 = x_{00} + x_{01} \frac{BH_{BR}}{A_T} + x_{02} \frac{C}{H_C} + x_{03} \frac{A_{OD}}{L^2}$$

$$\begin{aligned} X_1 = & x_{10} + x_{11} \frac{A_L}{LB} + x_{12} \frac{LH_C}{A_L} + x_{13} \frac{LH_{BR}}{A_L} + x_{14} \frac{A_{OD}}{A_L} \\ & + x_{15} \frac{A_T}{LB} + x_{16} \left(\frac{A_T}{L^2} \right)^{-1} + x_{17} \left(\frac{H_C}{L} \right)^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_3 = & x_{30} + x_{31} \left(\frac{LH_{BR}}{A_L} \right)^{-1} + x_{32} \frac{A_L}{A_T} + x_{33} \frac{LH_C}{A_L} + x_{34} \frac{A_{OD}}{A_L} \\ & + x_{35} \frac{A_{OD}}{L^2} + x_{36} \frac{C}{H_C} + x_{37} \frac{C_{BR}}{L} \end{aligned}$$

$$X_5 = x_{50} + x_{51} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + x_{52} \frac{C_{BR}}{L} + x_{53} \frac{A_L}{LB}$$

C_Y 의 계수

$$Y_1 = y_{10} + y_{11} \frac{C_{BR}}{L} + y_{12} \frac{C}{L} + y_{13} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + y_{14} \frac{C}{H_C} + y_{15} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1}$$

$$Y_3 = y_{30} + y_{31} \frac{A_L}{LB} + y_{32} \frac{LH_C}{A_L} + y_{33} \frac{C_{BR}}{L} + y_{34} \left(\frac{H_{BR}}{B} \right)^{-1}$$

$$+ y_{35} \frac{A_{OD}}{A_L} + y_{36} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1}$$

$$Y_5 = y_{50} + y_{51} \frac{A_L}{LB} + y_{52} \left(\frac{H_{BR}}{L} \right)^{-1} + y_{53} \frac{C_{BR}}{L} + y_{54} \left(\frac{A_T}{B^2} \right)^{-1}$$

$$+ y_{55} \frac{C}{L} + y_{56} \frac{LH_C}{A_L}$$

C_N 의 계수

$$\begin{aligned}
 N_1 = & n_{10} + n_{11} \frac{C}{L} + n_{12} \frac{LH_C}{A_L} + n_{13} \left(\frac{A_L}{A_T} \right)^{-1} + n_{14} \frac{C}{H_C} \\
 & + n_{15} \frac{A_L}{LB} + n_{16} \frac{A_T}{L^2} + n_{17} \left(\frac{A_T}{B^2} \right)^{-1} + n_{18} \frac{C_{BR}}{L} \\
 N_2 = & n_{20} + n_{21} \frac{C_{BR}}{L} + n_{22} \frac{C}{L} + n_{23} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + n_{24} \frac{A_T}{B^2} \\
 & + n_{25} \left(\frac{H_{BR}}{L} \right)^{-1} + n_{26} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1} + n_{27} \frac{A_L}{LB} + n_{28} \frac{A_L}{L^2} \\
 N_3 = & n_{30} + n_{31} \frac{C_{BR}}{L} + n_{32} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1} + n_{33} \frac{A_L}{A_T}
 \end{aligned}$$

상기 식의 각 계수는 다음의 Table 4.12와 같다.

Table 4.12 Each Coefficients of Independent Variables

$m =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
C_X	x_{0m}	-0.330	0.293	0.0193	0.682				
	x_{1m}	-1.353	1.700	2.87	-0.463	-0.570	-6.640	-0.0123	0.0202
	x_{3m}	0.830	-0.413	-0.0827	-0.563	0.804	-5.67	0.0401	-0.132
	x_{5m}	0.0372	-0.0075	-0.103	0.0921				
C_Y	y_{1m}	0.684	0.717	-3.22	0.0281	0.0661	0.298		
	y_{3m}	-0.400	0.282	0.307	0.0519	0.0526	-0.0814	0.0582	
	y_{5m}	0.122	-0.166	-0.0054	-0.0481	-0.0136	0.0864	-0.0297	
C_N	n_{1m}	0.299	1.71	0.183	-1.09	-0.0442	-0.289	4.24	-0.0646
	n_{2m}	0.117	0.123	-0.323	0.0041	-0.166	-0.0109	0.174	0.214
	n_{3m}	0.0230	0.0385	-0.0339	0.0023				-1.06

위의 식을 사용하여 한바다호의 상대 풍향(좌현 +)에 따른 정면풍압계수(C_x)와 측면풍압계수(C_y) 및 풍압모우멘트계수(C_N)를 계산하면 Figure 4.21과 같고, 그림의 풍압모우멘트는 10배 확대한 것이다. 각 방향별 계수값의 특성을 살펴보면 C_x 의 최대값은 $\Theta = 180^\circ$ (선미방향)인 경우가 0.878이며, C_y 의 최대값은 $\Theta = 60^\circ$ 및 120° 인 경우가 0.986이고, $C_N \times 10$ 의 최대값은 $\Theta = 040^\circ$ 및 130° 인 경우가 1.062로 나타났다.

Figure 4.21에 의하면, 풍압력에 의한 횡방향 압류는 측면풍압계수(C_y)의 최대값에 해당하는 상대풍향 $\Theta = 60^\circ$ 및 120° 부근에서 크게 발생할 것으로 예상되며, 선수 회두 현상은 풍압모우멘트계수(C_N)가 최대인 상대풍향 $\Theta = 040^\circ$ 및 130° 부근에서 크게 발생할 것으로 예상된다.

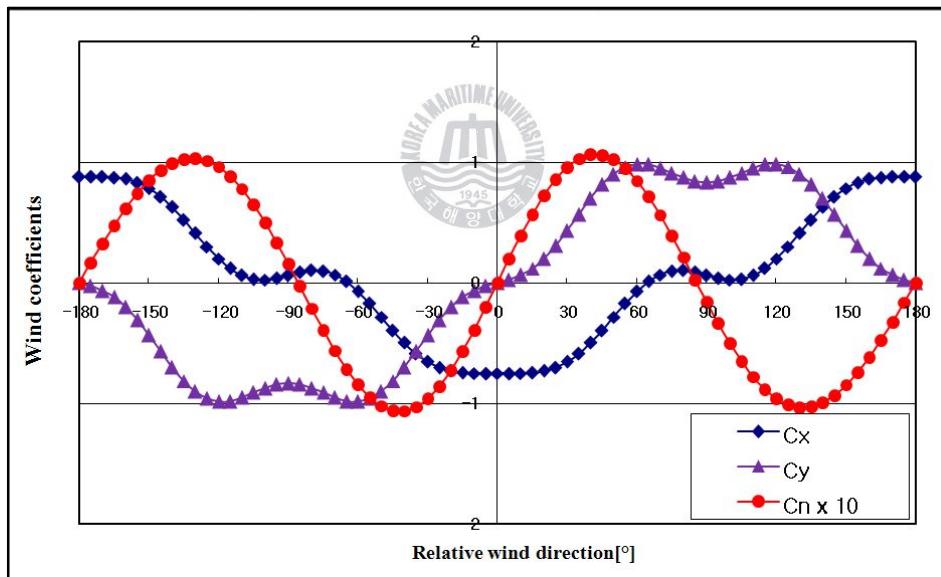


Figure 4.21 Wind Coefficients & Moments with Relative Wind Direction

상대 풍향과 풍속에 따른 횡방향 풍압력 산출 결과는 Figure 4.22와 같고, 가장 풍압력이 크게 작용하는 상대풍향 $\Theta = 60^\circ$ 및 120° 방향에서 풍속이 10m/s, 15m/s, 20m/s로 작용하면 선체는 각각 8.82tonf, 19.84tonf, 35.27tonf(1tonf=9.8kN)

의 풍압력을 받는다.

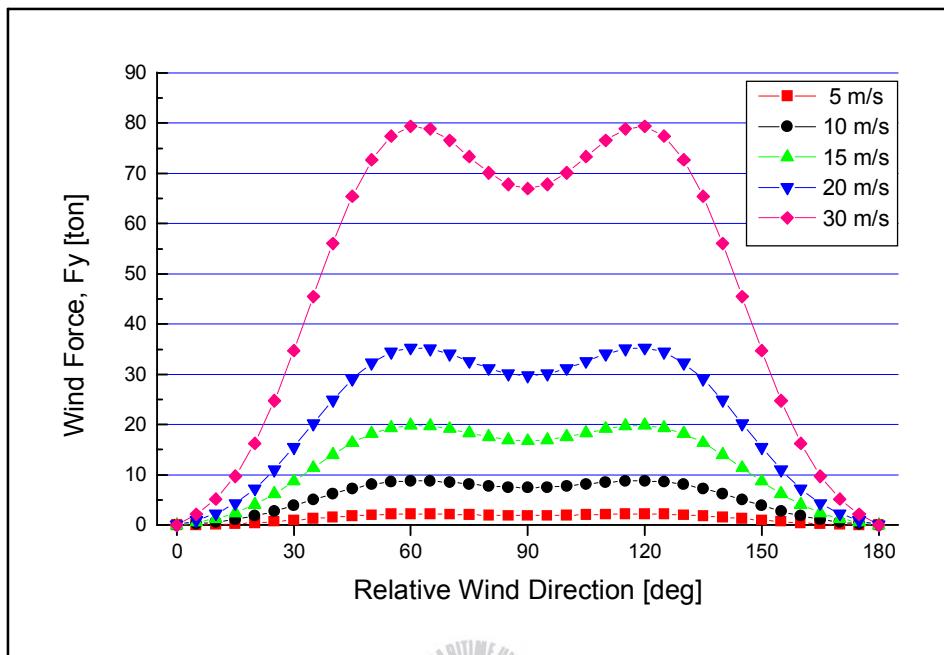


Figure 4.22 Wind Force with Wind Velocity & Relative Direction

또한 선체에 외력이 작용할 경우 표류각을 형성하게 되므로 수면 하부에 작용하는 힘은 결국 표류각 β 로 표현할 수 있고, 소각도 β 범위의 유체력을 고려하여 제1차 선형만을 고려하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Y_w = Y_w(\beta) = \frac{1}{2} \rho_w L d U^2 Y'_\beta \beta \quad (4-5)$$

$$N_w = N_w(\beta) = \frac{1}{2} \rho_w L^2 d U^2 N'_\beta \beta \quad (4-6)$$

단, ρ_w : 해수밀도, L : 선체 길이(수선간장)

d : 평균흘수, β : 표류각, U : 선박의 진행 속도

Y'_β : 표류각에 대한 횡방향 유체력 미계수

N'_β : 표류각에 대한 선회모우멘트 유체력 미계수

계산에 이용된 유체력 미계수는 선체와 프로펠러의 상호 간섭 현상을 선체의 주요 제원만으로 간략하게 산출할 수 있는 Inoue et al.⁴⁵⁾의 연구에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$Y'_\beta = \left(\frac{1}{2} \pi \nu + 1.4 C_b \frac{B}{L} \right) \left(1 + \frac{2}{3} \frac{\tau}{d} \right) - Y'_\delta \gamma \quad (4-7)$$

$$N'_\beta = \nu \left(1 - \frac{0.27}{\kappa} \frac{\tau}{d} \right) - N'_\delta \gamma \quad (4-8)$$

단, ν : $2d/L$, γ : 정류계수, C_b : 방형계수,

κ : $(\frac{1}{2} \pi \nu + 1.4 C_b \frac{B}{L})$, B : 선폭, τ : 트림,

Y'_δ & N'_δ : 타각에 의한 유체력 미계수

타에 의한 유체력은 타각을 함수로 표현할 수 있고, 유체력 미계수는 타직압력, 타에 유입되는 유효속력, 타 간섭계수, 타면적 등을 이용하여 다음 식에 의해 산출 가능하다.

$$Y_\delta = Y_\delta(\delta) = \frac{1}{2} \rho_w L d U^2 Y'_\delta \delta \quad (4-9)$$

$$N_\delta = N_\delta(\delta) = \frac{1}{2} \rho_w L^2 d U^2 N'_\delta \delta \quad (4-10)$$

$$Y'_\delta = -A_R \left(\frac{U_R}{U} \right)^2 K_r (1 + a_H) \cos \delta \quad (4-11)$$

$$N'_\delta = -A_R \left(\frac{U_R}{U} \right)^2 K_r (x_R + a_H x_H) \cos \delta \quad (4-12)$$

단, Y'_δ : 타각에 의한 횡방향 유체력 미계수,

N'_δ : 타각에 의한 모우멘트 유체력 미계수,

$K_r = 6.13 \lambda / (\lambda + 2.25)$, λ : 타의 종횡비,

U_R : 타유효유입속도, A_R : 타면적,

x_R : 중심에서 타까지의 길이

a_H, x_H : 타각에 따른 선체와 프로펠러의 간섭계수

4.4.2 표류각 및 대응타각

평형방정식에 대입할 풍압력과 각 유체력 요소에 대한 산출 식인 (4-3)식에서 (4-12)식까지를 식(4-2)에 대입한 후 $1/2\rho_w LdU^2$ 로 정리하면 다음과 같다.

$$Y'_\beta \beta + A_1 A_R C_y(\theta) \left(\frac{V_a}{U} \right)^2 + Y'_\delta \delta = 0 \quad (4-13)$$

$$N'_\beta \beta + A_1 A_2 A_R C_N(\theta) \left(\frac{V_a}{U} \right)^2 + N'_\delta \delta = 0 \quad (4-14)$$

단, $A_1 : \rho_a / \rho_w$, $A_2 : Loa / L$ (전장/수선간장),

A_R : 타면적 비율, V_a/U : 풍속 · 선속비

위의 식(4-13)과 식(4-14)을 연립하여 풍속 · 선속비와 상대 풍향에 대한 표류각과 대응타각을 산출하면 Figure 4.23 및 Figure 4.24와 같다. 표류각은 풍압중심을 고려할 때 측면 풍압계수가 최대인 상대풍향 60° 부근에서 최대값을 나타내며, 풍속 · 선속비가 2, 3, 4일 경우 각각 1.3° , 3.0° , 5.4° 로 계산되었다.

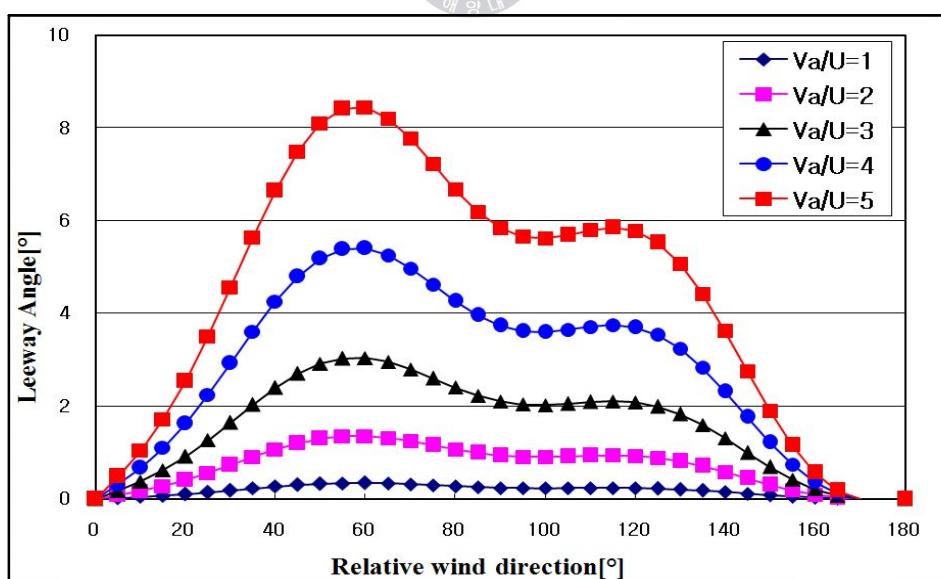


Figure 4.23 Variation of Leeway Angle with Relative Wind Direction

반면, 대웅타각의 경우 상대풍향이 120° 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 이는 횡방향의 횡압력에 의한 표류보다는 풍압중심이 선미방향으로 이동하면서 선수 회두(항풍성)가 강하게 발생하여 이를 억제하기 위한 대웅타각으로 판단된다. 실습선 한바다호는 풍속·선속비가 2, 3, 4일 경우 대웅타각이 각각 4.5° , 10.3° , 18.3° 정도가 된다.

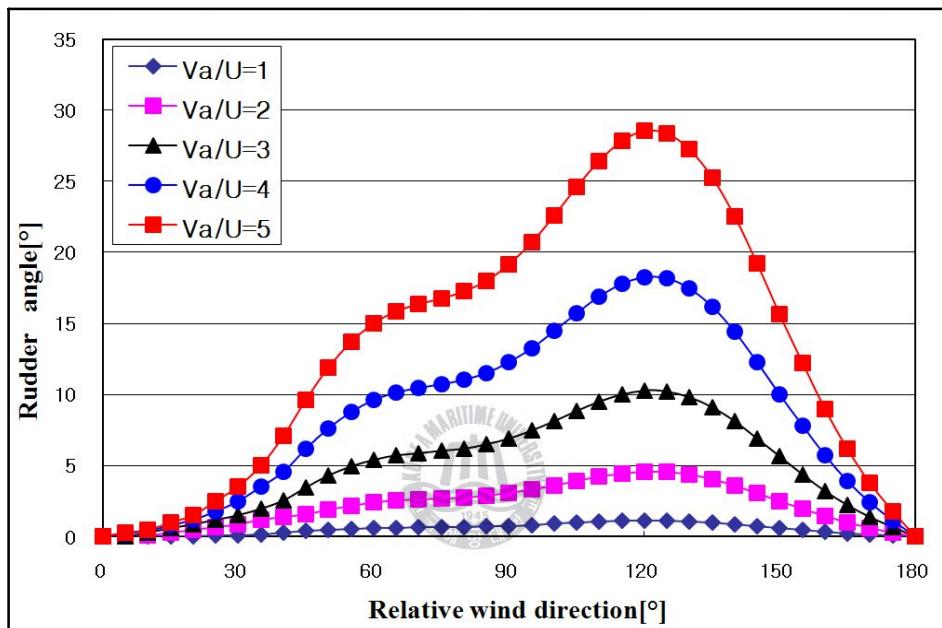


Figure 4.24 Counter Rudder Angle with Relative Wind Direction

4.4.3 대상 선박의 예인선 사용 기준

일본의 해난방지협회에서는 Table 4.13과 같이 평균풍속이 9m/s이하인 비교적 양호한 기상에서의 예선의 사용 척수 및 마력을 제시하고 있으며, 우리나라에서는 Table 4.14와 같이 주요 항구마다 항만법에 따라 예선 사용 세칙을 정하여 시행하고 있다.

Table 4.13 Numbers of Tug Boat with Ship's Tonnage in Japan

Size of Ship	Horse Power & Number of Tug Boat
Under G/T 3,000	500HP×1 또는 400HP×2
G/T 3,000 ~ 6,000	800HP×1 또는 400HP×1, 600HP×1
G/T 6,000 ~ 10,000	1,000HP×1 또는 600HP×2, 800HP×1
G/T 10,000 ~ 15,000	800HP×1, 1,000HP×1
G/T 15,000 ~ 20,000	1,000HP×1, 1,200HP×1 또는 1,000HP×2
Under D/W 45,000	1,500HP×2
D/W 45,000 ~ 70,000	1,500HP×4 또는 2,000HP×3
D/W 70,000 ~ 100,000	2,000HP×4 또는 2,500HP×3

Table 4.14 Numbers of Tug Boat with Ship's Tonnage in Busan

Size of Ship	Horse Power & Number of Tug Boat
Under G/T 5,000	저마력 × 1
G/T 5,000 ~ 10,000	저마력 × 1, 중마력 × 1
G/T 10,000 ~ 20,000	중마력 × 2
G/T 20,000 ~ 40,000	고마력 × 2
G/T 40,000 ~ 70,000	중마력 × 1, 고마력 × 1, 대마력 × 1
G/T 70,000 ~ 100,000	중마력 × 1, 고마력 × 1, 대마력 × 2
Over G/T 100,000	고마력 × 2, 대마력 × 2

* 저마력 : Under 1,500 HP, 중마력 : 1,500~2,500HP
 고마력 : 2,500~3,200 HP, 대마력 : Over 3,200HP

하지만, 외력이 강하게 작용하는 경우에는 특정 외력에 대한 명확한 예인선 사용 기준이 아직까지 없다. 따라서, 강풍 시에도 안전하게 접·이안이 가능한 예인선 사용 기준을 실습선 한바다호를 대상으로 산출하여 제시하고자 한다. 단, 여기에서는 항내조선으로 가정하여 조류의 영향은 무시하고, 풍압력이 가장 강하게 작용하는 방향으로 하였다. 또한, 예인선의 소요 마력 결정은 갑작스런 돌풍에 따른 풍압력의 변화와 예상치 못한 상황에 대비하여 일반적으로 외력의 1.5배정도를 상향하여 설정하고 있음을 감안하였다.

Table 4.15는 실습선 한바다호에 장착된 Bow Thruster의 사양을 나타내고 있으며, Figure 4.25는 선박의 무게중심(LGC)을 기준으로 선수의 Bow Thruster와 선미의 Tug Boat 위치에서의 작용되는 모우멘트를 나타내고 있다.

Table 4.15 General Particulars of Bow Thruster

ITEMS	DIMENSIONS
Model	KT-55B1
Maker	Kawasaki Heavy Inc., Ltd.
Number of Units	1 unit
Type of Propeller	4 blade, CPP
Propeller Diameter	1,300 mm
Maximum Thrust	67.8 kN (6.9 ton)

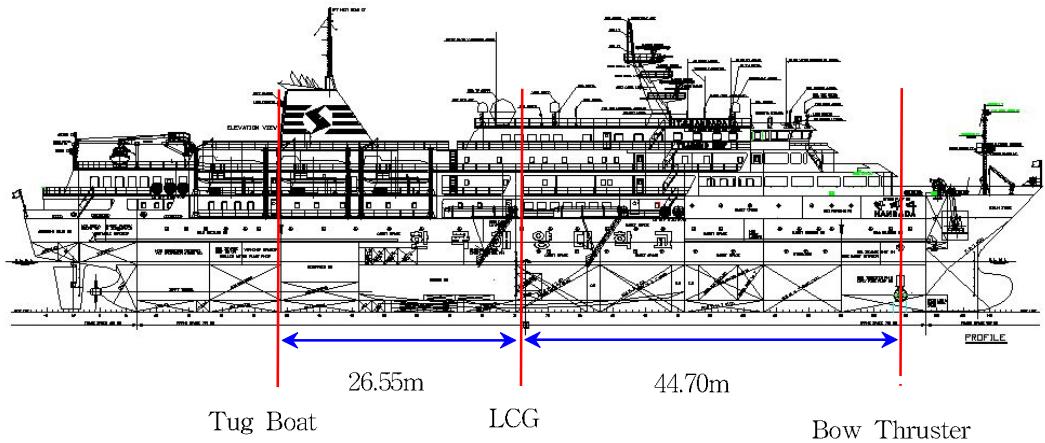


Figure 4.25 Moment Lever of Each Point

Figure 4.26은 Bow Thruster를 이용하여 접·이안 작업이 가능한 한계풍속을 산출한 결과이다. 접·이안 작업이 부두와 평행하게 이루어진다고 가정할 때(전진 중에는 효율이 크게 저하 됨), 선수에서 Bow Thruster 최대 출력인 6.9톤이 작용하게 되면, 평행을 유지하기 위해서는 선미의 Tug Boat에서는 11.6톤의 힘으로 끌거나 당기게 된다. 이 때 선체는 18.5톤의 힘을 받으며 횡이동하게 된다. 만약 Bow Thruster가 5톤의 출력을 낸다면 선미의 Tug Boat에서는 8.4톤의 출력으로 예인하여야 하며, 이 때 선체는 13.4톤의 힘을 받게 된다.

따라서, 풍속이 5m/s, 10m/s, 15m/s로 선체에 작용할 때 실습선 한바다호가 받는 1.5배 풍압력은 각각 3.3tonf, 13.2tonf, 29.7tonf($1\text{tonf}=9.8\text{kN}$)이므로, 선수에 Bow Thruster를 사용하고 선미에 ZDP 중마력 예인선(1,500HP~2,500HP) 1척만을 사용하여 접·이안 가능한 풍속은 10m/s까지이다. 만약 풍속이 10m/s 초과되면 선수에도 예인선을 1척 추가하여 운용하는 것이 바람직하다.

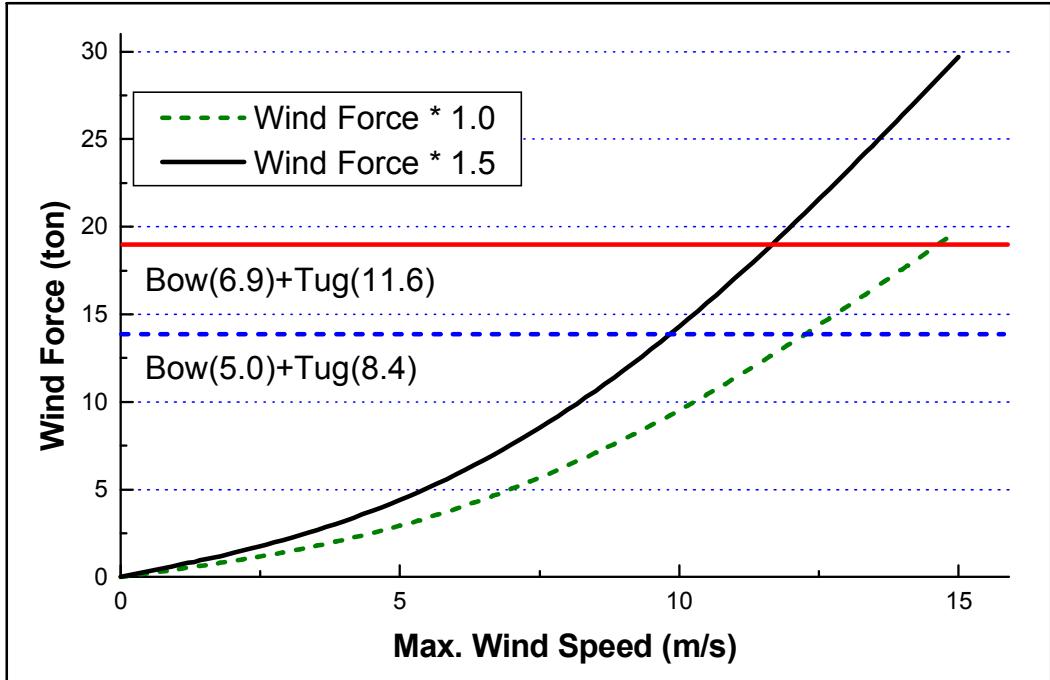


Figure 4.26 Berthing and Unberthing with Bow Thruster

또한, 강풍으로 인하여 외력이 점점 강해지면 예인선을 선수 및 선미에 각각 사용하게 되는데, 현재 대부분의 항만에서 사용되고 있는 ZDP 예인선을 기준으로 실습선 한바다호에 작용하는 다양한 풍속에 따른 예인선 사용 척수 및 마력을 산출하면 Table 4.16과 같다. 단, ZDP 예인선의 예인력은 일반적으로 15ton/1000HP이다.

실습선 한바다호의 경우 20m/s 이하의 풍속이 예상되면 저마력 및 중마력의 예인선을 각각 1척 사용해야 하며, 25m/s 이상의 강풍이 예상되면 고마력의 예인선을 2척 사용해야 하는 것으로 분석되었다.

Table 4.16 Numbers of tug boat with wind velocity

풍 속	10m/s	15m/s	20m/s	25m/s	30m/s
풍압력×1배 (ton)	8.8	19.8	35.3	55.1	79.4
풍압력×1.5배 (ton)	13.2	29.7	52.9	82.6	119.1
총 소요마력 (HP)	880	1980	3526	5506	7940
사용 예선 (척)	저마력 1	저마력 2	저마력 1 중마력 1	고마력 2	고마력 2 중마력 2

4.5 대상 선박의 묘박 안전성 평가

우리나라에는 매년 평균 3~4개 정도의 태풍이 영향을 주고 있다. 이러한 태풍은 강한 바람과 많은 비를 동반하며, 1959년 사라, 2002년 루사, 2003년 매미는 막대한 재산피해와 인명피해를 가져왔다. 특히, 태풍 매미로 인하여 피항지에 묘박중인 선박과 부두에 계류중인 선박들이 강풍과 높은 파도의 영향으로 침몰, 좌초, 좌안, 충돌 및 접촉 등과 같은 많은 해양사고를 유발하였다.

태풍 내습시 선박들은 태풍의 예상 진로에서 멀리 벗어나거나 안전한 피항지를 선택하여 투표를 실시하고 있다. 하지만, 투표에 대한 사항이나 투표 후 선박의 안전에 대한 판단은 운항자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 선체에 작용하는 외력을 계산하고, 그러한 외력에 대한 대항력을 정량적으로 분석하여 선박의 안전을 확보하고자 한다.

4.5.1 태풍의 영향

Table 4.17은 태풍 매미의 영향으로 진해만을 포함한 마산항, 진해항 등 마산지방해양수산청 관할수역 내에서 발생한 해양사고 현황을 나타낸 것이다. 진해만 주변에서 발생한 해양사고는 총 62척으로, 침몰 8척, 좌초 및 좌안 32척, 그

리고 충돌 및 접촉이 22척이었다. 그리고 진해만 내에서 발생한 해양사고는 총 25척으로, 침몰 3척, 좌초 및 좌안 13척, 그리고 충돌 및 접촉이 9척이었다.

Table 4.17 Marine Accidents at Bay of Jinhae by Typhoon ‘Maemi’

구분	침몰	좌초 · 좌안	충돌 · 접촉	총 계
척수	8/3척	32/13척	22/9척	62/25척

* 자료출처 : 마산지방해양수산청(2003)

* 척수 : 마산지방해양수산청 관할 해양사고척수/진해만에서 발생한 해양사고척수

태풍 매미가 우리나라를 통과하는 동안 관측된 기상 관측치를 보면 Table 4.18에서 보듯이 최대순간풍속이 제주에서 60m/s로 우리나라 기상관측 이래 가장 높은 값을 기록하였고, 여수에서 49.2m/s, 통영에서 43.8m/s, 그리고 부산에서 42.7m/s를 각각 기록하였다. 그리고 Table 4.19 및 4.20에서는 태풍의 강도와 연도별 태풍발생 및 우리나라에 영향을 준 태풍현황을 보여준다.

Table 4.18 Maximum & Maximum Instantaneous Wind Velocity

지점	제주	고산	여수	통영	부산
최대풍속(m/s)	39.5(18:12)	51.1(16:05)	35.9(19:51)	30.0(20:53)	26.1(22:10)
최대순간풍속	60.0(18:11)	60.0(16:10)	49.2(18:57)	43.8(20:57)	42.7(21:01)

*주 : ()내의 숫자는 2003년 9월 12일 그 풍속값이 나타난 시각임

*자료출처 : 기상청 기상소식지 2003년 10월호

Table 4.19 Intensity of Typhoon

구분	최대 풍 속
약	17m/s(34kts)이상~25m/s(48kts)미만
중	25m/s(48kts)이상~33m/s(64kts)미만
강	33m/s(64kts)이상~44m/s(85kts)미만
매우 강	44m/s(85kts)이상

Table 4.20 Occurrence of Typhoon & Influencing in Korea

연도 \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계	
1971	1		1	3	4	2	8	5(2)	6(1)	4	2		36(3)	
1972	1				1	3	6(2)	5(1)	5(1)	5	3	2	31(4)	
1973							7(2)	5(1)	2	4	3		21(3)	
1974	1		1	1	1	4	4(2)	5(1)	5(1)	4	4	2	32(4)	
1975	1						2(1)	4(1)	5	5	3	1	21(2)	
1976	1	1		2	2	2	4(3)	4(2)	5(1)	1	1	2	25(6)	
1977			1			1	3	3(1)	5(1)	5	1	2	21(2)	
1978	1			1		3(1)	4	8(2)	5(1)	4	4		30(4)	
1979	1		1	1	2		4	2(2)	6	3	2	2	24(2)	
1980				1	4	1	4(1)	2(1)	6(1)	4	1	1	24(3)	
1981			1	2		3(2)	4(1)	8	4(2)	2	3	2	29(5)	
1982				3		1	3	3	5(3)	3	1	1	25(4)	
1983						1	3	5	2(1)	5	5	2	23(1)	
1984						2	5(1)	5(1)	4(1)	7	3	1	27(3)	
1985	2				1	3(1)	1	8(3)	5	4(1)	1	2	27(5)	
1986		1			1	2	2(1)	3	5(1)	3(1)	5	4	3	29(3)
1987	1				1		2	4(2)	4(1)	6	2	2	1	23(3)
1988	1				1	3	2	8	8	5	2	1	31(0)	
1989	1			1	2	2(1)	7(1)	5	6	4	3	1	32(2)	
1990	1			1	1	3(1)	4(1)	6	4(2)	4	4	1	29(4)	
1991			2	1	1	1	4(1)	5(2)	6(2)	3	6		29(5)	
1992	1	1				2	4	8(1)	5(1)	7	3		31(2)	
1993				1		1	4(2)	7(1)	5(1)	5	2	3	28(5)	
1994				1	1	2	7(2)	9(2)	8	6(1)		2	36(5)	
1995				1		1	2(1)	6(1)	5(1)	6	1	1	23(3)	
1996		1			1	2		5(1)	6(1)	6	2	2	1	26(2)
1997				2	3	3(1)	4(1)	6(2)	4(1)	3	2	1	28(5)	
1998					2		1	3	5(1)	2(1)	3	2	16(2)	
1999					2		1	4(1)	6(2)	6(2)	2	1		22(5)
2000					2		5(2)	6(2)	5(1)	2	2	1	23(5)	
2001					1	2	5	6(1)	5	3	1	3	26(1)	
2002	1					1	3	5(3)	6(1)	4	2	2	1	26(4)
2003	1	1			2(1)	2(1)	2	5(1)	3(1)	3	2		21(4)	
2004				1	2(1)	5(1)	2	8(3)	3	3	3	2	29(5)	
2005	1		1	1		1	5	5(1)	5	2	2		23(1)	
2006					1	1	3(1)	7(1)	3(1)	4	2	2	23(3)	
2007					1	1	3(2)	4	5(1)	6	4	2	24(3)	

* 자료출처 : 기상청, ()는 우리나라에 영향을 미친 태풍 수

4.5.2 외력에 대한 분석

묘박중인 선박에 영향을 주는 외력에는 바람, 파랑, 조류 등을 들 수 있다. 이러한 외력에 의해 선체에 작용하는 힘은 바람에 의한 풍압력, 파랑에 의한 표류력, 조류에 의한 유압력 등으로 분리할 수 있다. 하지만, 실습선 한바다호가 태풍 피항 시 투표를 주로 하고 있는 진해만은 상대적으로 수심이 얕고 폐쇄된 해역으로 해양파가 충분히 발달하지 못하여 파고가 낮고, 조류 또한 미약하여 외력평가 요소에서 제외하였다. 따라서 본 논문에서는 외력에 대한 요소로 바람에 의한 풍압력만을 고려하였다.

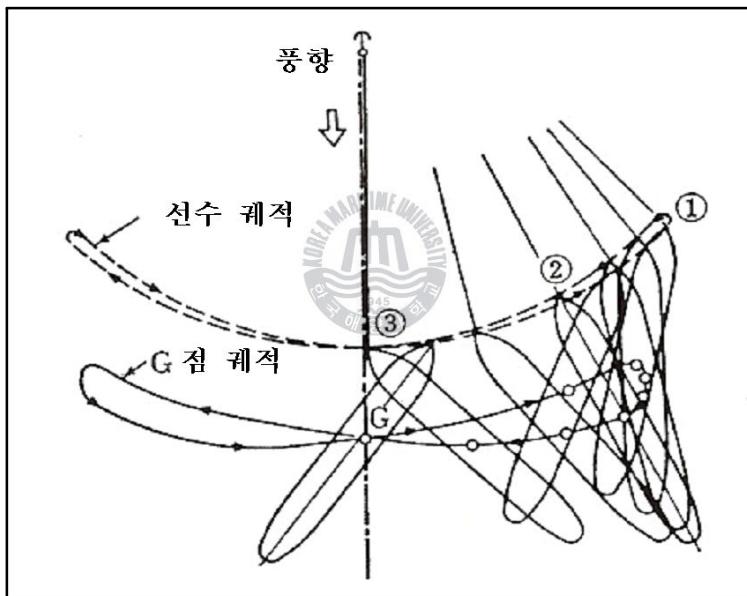


Figure 4.27 Swinging Pattern of Bow at Anchoring

풍압력을 산출하는 식은 일반적으로 항해 또는 묘박중인 선박에 동일하게 적용되나, 묘박의 경우 Figure 4.27과 같이 바람이 불어오는 방향을 기준으로 선수가 좌우로 움직이는 스윙(Swing) 현상이 발생한다. 이러한 스윙 현상은 그림에서 보는 바와 같이 중심점(G)을 기준으로 ∞ 모양의 궤적을 만들면서 선수가 좌우로 이동하기 때문에 상대풍향에 따른 정면 풍압면적과 측면 풍압면적을 함

께 고려해주어야 한다. 그러나 실시간 상대풍향을 정확히 계측하기 어려우므로 일반적으로 적하상태에 따라 만선상태(Full loaded condition)에서는 정면 풍압면적의 2배, 그리고 공선상태(Ballast condition)에서는 정면 풍압면적의 3배에 해당하는 값을 각각 사용하고 있다(Honda, 1986).

실습선 한바다호의 정면 풍압력은 측면 풍압력 계산식(4-3)에 정면풍압계수와 정면풍압면적을 대입하여 산출하였고, 정면 풍압면적의 2배 및 3배에 해당되는 풍압력을 풍속별로 계산하면 Table 4.21 및 Figure 4.28과 같다.

Table 4.21 Wind Force with Wind Velocity & Transverse Area

풍압면적 \ 풍속	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	45m/s	50m/s
정면 풍압력 (ton)	1.35	5.39	12.13	21.56	27.29	33.70
정면 풍압면적×2.0배	2.70	10.78	24.26	43.12	54.58	67.40
정면 풍압면적×3.0배	4.05	16.17	36.39	64.68	81.87	101.1

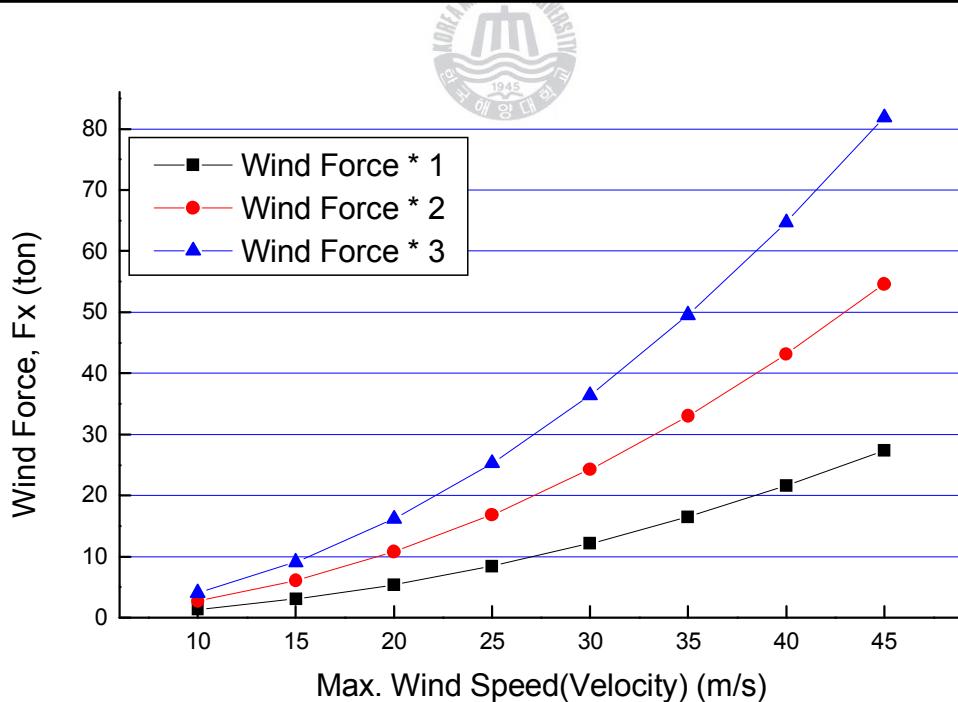


Table 4.28 Wind Force with Wind Velocity & Transverse Area

4.5.3 파주력에 대한 분석

일반적으로 닻 및 닻줄이 해저 바닥에 박혀 끌리지 않으려는 힘을 파주력 (Holding power)이라 한다. 이 힘은 주로 해저 바닥에 투표된 닻과 닻줄로 구성되는 파주부에 의해 형성되며, 동일한 규격의 닻 및 닻줄이라 할지라도 해저 저질에 따른 파주계수에 따라 그 값이 달라진다. 파주계수는 장소 및 조건에 따라 저질의 점성이나 성분이 다르기 때문에 다소의 차이는 있으나, 일반적으로 사용되는 파주계수는 Table 4.22와 같다. 그리고 한바다호의 닻 및 닻줄에 대한 사양은 Table 4.23에서 제시한다.

묘박 중인 선박의 파주력은 일반적으로 다음 식(4-15)에 따라 계산된다.

$$P_T = P_a + P_c = \lambda_a w_a + w_c \lambda_c l \quad (4-15)$$

여기서, P_a : 닻의 파주력

P_c : 닻줄의 파주력

λ_a : 닻의 파주계수

λ_c : 닻줄의 파주계수

W_a : 닻의 수중중량

W_c : 닻줄의 수중중량

ℓ : 해저에 깔린 닻줄의 길이

Table 4.22 Holding Factors with Seabed

파주계수 \ 저질	Mud	Sand	Gravel	Flat Rock	Dragging
AC-14형 λ_a	10	8	8	2.5	2
λ_c	1	1	0.8	0.8	0.5

Table 4.23 Specification of Anchor & Chain Cable

Item	Weight	Remark
Anchor	2.475 ton	AC-14
Chain Cable	0.04634 ton/m	9.5 Shackles

Figure 4.29에서 보면, 일정 외력(H_T)이 작용할 때 2묘박에 대한 파주력 계산은 좌·우현 체인이 선수미션과 이루는 각을 각각 a_p , a_s 라 하면 C점에서의 장력은 P_p (좌현묘 파주력)와 P_s (우현묘 파주력) 벡터의 합력 방향이 되므로 전체 파주력 (P_T)은 식(4-16)과 같이 표현된다.

$$P_T = P_p \cos \alpha_p + P_s \cos \alpha_s \quad (4-16)$$

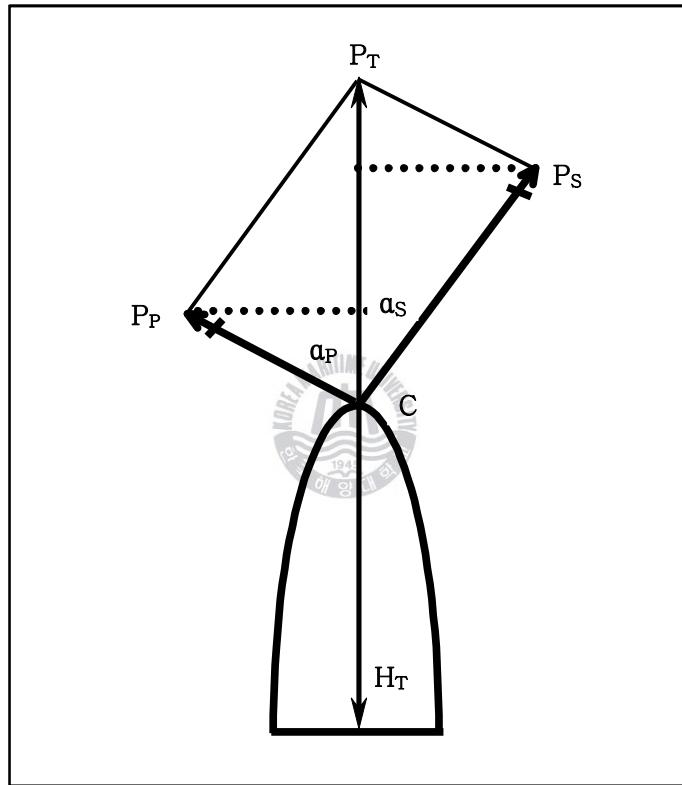


Figure 4.29 Holding Power of Riding at Two Anchors

또한, 파주력 계산시 추가로 고려하여야 할 사항은 외력의 크기에 따라 파주부의 길이가 달라지므로 이를 감안해야 한다. 따라서, 파주부의 길이를 먼저 산출하고, 산출된 파주부의 길이를 토대로 전체 파주력을 계산하였다.

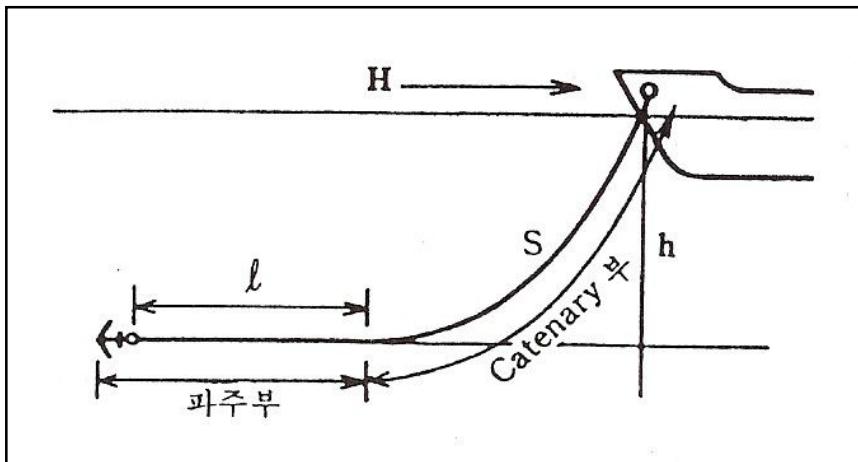


Figure 4.30 Holding Power at Anchoring

현수부의 길이(S)는 외력이 선체에 미치는 장력을 기초로 하여 식(4-17)에 의해 구할 수 있고 파주부의 길이는 신출된 닻줄길이에서 현수부의 길이를 뺀 값이다.



$$S = \sqrt{h(h + 2H/W_c)} \quad (4-17)$$

여기서, h : 해저에서 묘쇄공(Hawse pipe)까지의 높이

W_c : 1m에 해당하는 닻줄의 수중무게(톤)

H : 외력에 의해 닻줄에 작용하는 장력(톤)

묘박지 진해만의 저질은 Mud로 확인하였고, 해저에서 묘쇄공까지의 높이는 진해만에서의 수심 21m를 고려하여 25m로 계산하였다. 또한, 체인에 작용하는 외력은 정면 풍압면적의 2배에 해당되는 풍압력을 적용하였다.

우선, 단묘박을 실시한 경우로 체인의 길이가 각각 7, 8, 9 샤클인 경우의 외력에 따른 현수부 및 파주부의 길이를 계산하면 Table 4.24와 같다.

Table 4.24 Holding & Catenary Part with Wind Force(Single Anchor)

파주력		풍속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
	총 외력 (ton)		2.70	10.78	16.84	24.26	33.02	43.12
앵커체인	현수부 길이(m)	63.0	118.3	146.7	175.3	203.9	232.6	
7샤클	파주부 길이(m)	129.5	74.2	45.8	17.2	0	0	
8샤클	파주부 길이(m)	157.0	101.7	73.2	44.7	16.1	0	
9샤클	파주부 길이(m)	184.5	129.2	100.8	72.2	43.6	14.9	

Table 4.25는 Table 4.24에서 계산된 파주부 길이를 토대로 단묘박인 경우의 파주력을 계산한 결과이다. 외력이 강해져 체인에 장력이 점점 강해짐으로써 파주부 길이가 '0'이 되는 경우에는 앵커의 파주력을 16.14ton으로 계산하였다(Anchor Shank가 해저면에서 5~7°정도 들리므로 파주력이 1/4정도 감소⁴¹⁾).

Table 4.25 Holding Power of Lying at Single Anchor

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
앵커 및 체인의 파주력	앵커 (ton)	21.53 / 16.14(파주부가 '0'인 경우)						
	7샤클	5.22	2.99	1.85	0.69	0	0	
	8샤클	6.33	4.10	2.96	1.80	0.65	0	
	9샤클	7.43	5.21	4.06	2.91	1.76	0.60	
총 파주력	7샤클	26.75	24.52	23.38	22.22	16.14	16.14	
	8샤클	27.86	25.63	24.49	23.33	22.18	16.14	
	9샤클	28.96	26.74	25.59	24.44	23.29	22.13	

$$(1) P_a = \lambda_a \times w_a = 10 \times 2.475 \times 0.87 = 21.53 \text{ ton} \quad (0.87\text{은 수중중량 환산계수})$$

$$(2) P_c = \lambda_c \times w_c \times l = 1 \times l \times 0.04634 \times 0.87$$

Figure 4.31은 Table 4.25에서 계산된 파주력을 그림으로 표현한 것이다. 풍속(외력)이 강해짐에 따라 앵커체인의 파주부 길이가 점점 짧아져 파주력이 점차적으로 작아지고 있음을 알 수 있다. 또한 풍속이 35m/s이상이 되면 Anchor Shank가 들림으로써 파주력이 급격하게 감소되고, 만약 앵커 및 앵커체인에 의한 파주력보다 외력이 강해지는 시점에서는 주묘가 시작될 것으로 예상된다. 주묘가 시작되면 Table 4.22에서 제시하고 있는 주묘에 해당되는 파주계수를 사용해야하므로 파주력은 이보다도 훨씬 크게 감소될 것이다.

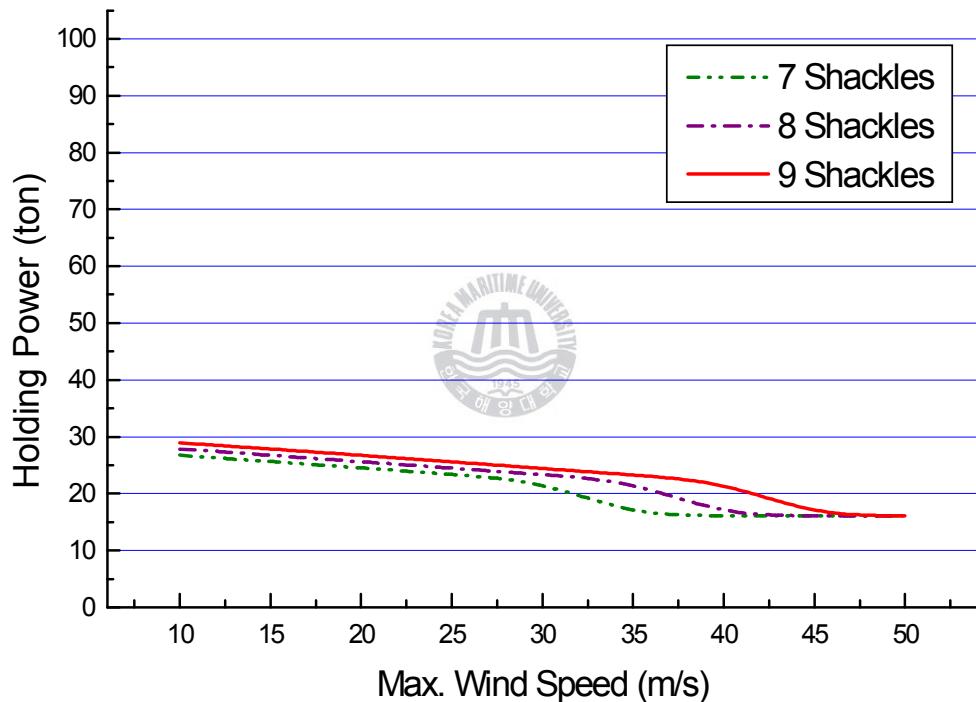


Figure 4.31 Holding Power of Lying at Single Anchor

다음은 2묘박을 실시하였을 경우의 파주력을 계산하였다. 강풍하에서는 Figure 4.27과 같이 스윙 현상이 발생하므로 반대편 엉커를 투하하고 그 묘쇄를 2샤클 정도 내어 주어 해저를 끌도록 한다. 그렇게 함으로써 스윙 현상을 막고 동시에 강한 파주력을 얻을 수 있다.

Table 4.26은 제진묘(우현앵커)를 2샤클 정도 내어주고 양현묘쇄의 교각을 60°정도로 하여 반대쪽 엉커(좌현앵커)의 체인을 7샤클 내어 주었을 때의 외력에 따른 현수부 및 파주부의 길이를 계산한 결과이다(본선이 태풍의 우반원에 위치할 것으로 예상되는 경우, 우현묘를 제진묘로 사용하다가 최대풍속에 달할 때 우현묘를 더 신출하여 등량 조치할 수 있다).

양현묘쇄에 동일한 외력이 가해지다가 우현앵커의 파주력이 외력보다 작아지는 시점부터는 엉커가 끌리게 되므로 외력의 크기를 엉커의 파주력(4.31ton)과 동일한 값으로 계산하였다.

Table 4.26 Holding & Catenary Part with Wind Force(7+2 Shackle)

파주력		풍속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
	총 외력(H_T) (ton)		2.70	10.78	16.84	24.26	33.02	43.12
좌현 (7샤클)	외력(H_S) (ton)	1.56	8.14	15.14	23.71	33.15	40.09	
	현수부 길이(m)	50.6	103.5	139.3	173.3	204.3	224.4	
	파주부 길이(m)	141.9	89.0	53.2	19.2	0	0	
우현 (2샤클)	외력(H_P) (ton)	1.56	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	
	현수부 길이(m)	50.6	77.3	77.3	77.3	77.3	77.3	
	파주부 길이(m)	4.4	0	0	0	0	0	

$$(1) H_T = H_S \cos \alpha_S + H_P \cos \alpha_P \quad (\alpha_S, \alpha_P = 30^\circ)$$

Table 4.27은 Table 4.26에서 계산된 파주부 길이로 2묘박인 경우의 파주력을 계산한 결과이다. 외력이 강해짐에 따라 체인에 장력이 강해져 파주부 길이가 '0'이 되는 경우에는 앵커의 파주력을 각각 16.14 및 4.31ton으로 계산하였다(좌현묘의 경우 7 Shackles × 27.5m = 192.5m, 해저에서 묘쇄공까지의 높이 = 25m이므로 Anchor Shank가 해저면에서 들리는 각도는 약 7°정도로 이 때 파주력은 1/4 감소한다. 그리고 우현묘의 경우는 2 Shackles × 27.5m = 55m, 해저에서 묘쇄공까지의 높이 = 25m이므로 Anchor Shank가 해저면에서 들리는 각도가 약 27°정도이므로 파주력은 4/5정도 감소⁴¹⁾).

Table 4.27 Holding Power of Riding at Two Anchors(7+2 Shackle)

파주력		풍 속					
		10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
좌현 (7샤클)	앵커 (ton)	21.53 / 16.14					
	체인	5.72	3.59	2.14	0.77	0	0
우현 (2샤클)	앵커	21.53 / 4.31					
	체인	0.18	0.0945	0	0	0	0
총 파주력	좌현	27.25	25.12	23.67	22.30	16.14	16.14
	우현	21.71	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
	합계	42.40	25.49	24.23	23.04	17.71	17.71

$$(1) P_a = \lambda_a \times w_a = 10 \times 2.475 \times 0.87 = 21.53 \text{ ton} \quad (0.87 \text{은 수중중량 환산계수})$$

$$(2) P_c = \lambda_c \times w_c \times l = 1 \times l \times 0.04634 \times 0.87$$

$$(3) P_T = P_s \cos as + P_p \cos ap \quad (as, ap = 30^\circ)$$

이와 동일한 방법으로 양현묘쇄의 교각을 60°정도로 하여 반대쪽 앵커(좌현앵커)의 체인을 8 및 9샤클 내어 주었을 때와 양현묘쇄를 60°정도(스윙억제 측면에서 볼 때 가장 양호한 각도)로 하여 모두 9샤클 내어 주었을 때의 파주력을 계산하여(Table 4.28~4.33) 그림으로 표현하면 Figure 4.32와 같다. 2묘박에서도

풍속(외력)이 강해짐에 따라 앵커체인의 파주부 길이가 짧아져 파주력은 점차적으로 작아졌다. 제진묘를 사용한 경우 단묘박 시의 파주력과 비교하면 외력이 10m/s일 때는 파주력이 16ton정도의 큰 차이를 보이는데, 점차적으로 외력이 강해져 20m/s에 이르러서는 2ton정도로 점점 그 차이가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 앞서 언급되었듯이 Anchor Shank가 해저면에서 들리므로 파주력이 급격히 감소되었기 때문이다. 그러나, 양현묘쇄를 모두 9샤클을 내어 주었을 때에는 외력이 50m/s에 이르기까지도 파주력이 일정한 감소를 유지하였다.

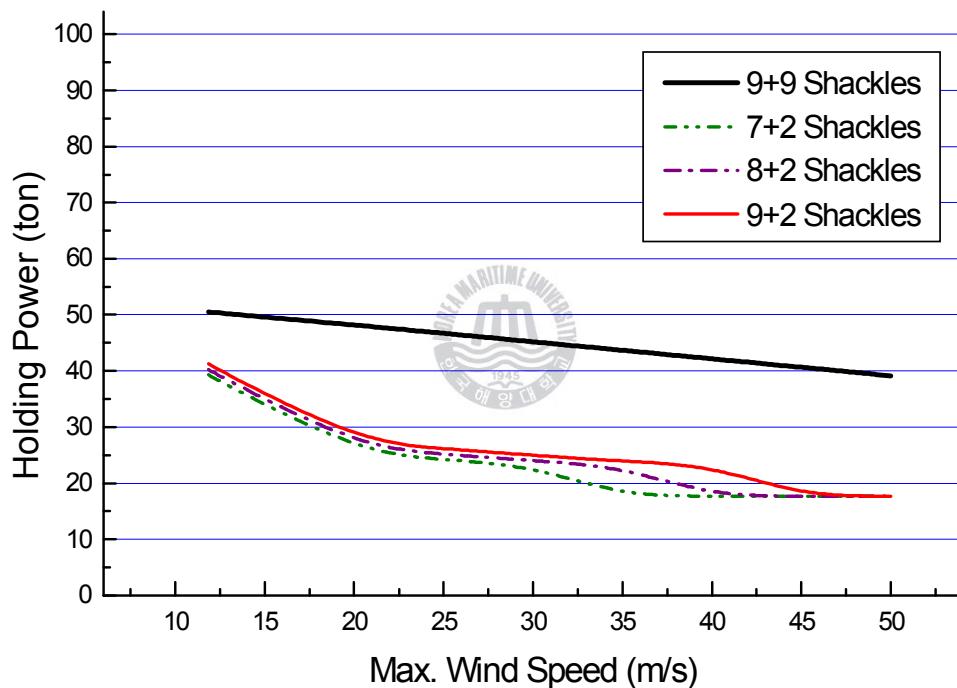


Figure 4.32 Holding Power of Riding at Two Anchors

Table 4.28 Holding & Catenary Part with Wind Force(8+2 Shackle)

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
	총 외력(H_T) (ton)	2.70	10.78	16.84	24.26	33.02	43.12	
좌현 (8샤클)	외력(H_S) (ton)	1.56	8.14	15.14	23.71	33.15	40.09	
	현수부 길이(m)	50.6	103.5	139.3	173.3	204.3	224.4	
	파주부 길이(m)	169.4	116.5	80.7	46.7	15.7	0	
우현 (2샤클)	외력(H_P) (ton)	1.56	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	
	현수부 길이(m)	50.6	77.3	77.3	77.3	77.3	77.3	
	파주부 길이(m)	4.4	0	0	0	0	0	

$$(1) H_T = H_S \cos \alpha_s + H_P \cos \alpha_p \quad (\alpha_s, \alpha_p = 30^\circ)$$

Table 4.29 Holding Power of Riding at Two Anchors(8+2 Shackle)

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
좌현 (8샤클)	앵커 (ton)			21.53 / 16.14				
	체인	6.83	4.69	3.25	1.88	0.63	0	
우현 (2샤클)	앵커			21.53 / 4.31				
	체인	0.18	0	0	0	0	0	
총 파주력	좌현	28.36	26.22	24.78	23.41	22.16	16.14	
	우현	21.71	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	
	합계	43.36	26.44	25.19	24.01	22.92	17.71	

$$(1) P_a = \lambda_a \times w_a = 10 \times 2.475 \times 0.87 = 21.53 \text{ ton} \quad (0.87 \text{은 수중중량 환산계수})$$

$$(2) P_c = \lambda_c \times w_c \times l = 1 \times l \times 0.04634 \times 0.87$$

$$(3) P_T = P_a \cos \alpha_s + P_c \cos \alpha_p \quad (\alpha_s, \alpha_p = 30^\circ)$$

Table 4.30 Holding & Catenary Part with Wind Force(9+2 Shackle)

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
	총 외력(H_T) (ton)	2.70	10.78	16.84	24.26	33.02	43.12	
좌현 (9샤클)	외력(H_S) (ton)	1.56	8.14	15.14	23.71	33.15	40.09	
	현수부 길이(m)	50.6	103.5	139.3	173.3	204.3	224.4	
	파주부 길이(m)	196.9	144.0	108.2	74.2	43.2	23.1	
우현 (2샤클)	외력(H_P) (ton)	1.56	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	
	현수부 길이(m)	50.6	77.3	77.3	77.3	77.3	77.3	
	파주부 길이(m)	4.4	0	0	0	0	0	

$$(1) H_T = H_S \cos as + H_P \cos ap \quad (as, ap = 30^\circ)$$

Table 4.31 Holding Power of Riding at Two Anchors(9+2 Shackle)

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
좌현 (9샤클)	앵커 (ton)			21.53 / 16.14				
	체인	7.94	5.80	4.36	2.99	1.74	0.93	
우현 (2샤클)	앵커			21.53 / 4.31				
	체인	0.18	0	0	0	0	0	
총 파주력	좌현	29.47	27.33	25.89	24.52	23.27	22.46	
	우현	21.71	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	
	합계	44.32	27.40	26.15	24.97	23.88	23.18	

$$(1) P_a = \lambda_a \times w_a = 10 \times 2.475 \times 0.87 = 21.53 \text{ ton} \quad (0.87 \text{은 수중중량 환산계수})$$

$$(2) P_c = \lambda_c \times w_c \times l = 1 \times l \times 0.04634 \times 0.87$$

$$(3) P_T = P_a \cos as + P_c \cos ap \quad (as, ap = 30^\circ)$$

Table 4.32 Holding & Catenary Part with Wind Force(9+9 Shackle)

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
	총 외력(H_T) (ton)	2.70	10.78	16.84	24.26	33.02	43.12	
좌현 (9샤클)	외력(H_S) (ton)	1.56	6.22	9.72	14.00	19.06	24.90	
	현수부 길이(m)	50.6	91.4	112.6	134.2	155.8	177.5	
	파주부 길이(m)	196.9	156.1	134.9	113.3	91.7	70.0	
우현 (9샤클)	외력(H_P) (ton)	1.56	6.22	9.72	14.00	19.06	24.90	
	현수부 길이(m)	50.6	91.4	112.6	134.2	155.8	177.5	
	파주부 길이(m)	196.9	156.1	134.9	113.3	91.7	70.0	

$$(1) H_T = H_S \cos \alpha_s + H_P \cos \alpha_p \quad (\alpha_s, \alpha_p = 30^\circ)$$

Table 4.33 Holding Power of Riding at Two Anchors(9+9 Shackle)

파주력		풍 속	10m/s	20m/s	25m/s	30m/s	35m/s	40m/s
좌현 (9샤클)	앵커 (ton)			21.53				
	체인	7.94	6.29	5.44	4.57	3.70	2.82	
우현 (9샤클)	앵커			21.53				
	체인	7.94	6.29	5.44	4.57	3.70	2.82	
총 파주력	좌현	29.47	27.82	26.97	26.10	25.23	24.35	
	우현	29.47	27.82	26.97	26.10	25.23	24.35	
	합계	51.04	48.19	46.71	45.21	43.70	42.18	

$$(1) P_a = \lambda_a \times w_a = 10 \times 2.475 \times 0.87 = 21.53 \text{ ton} \quad (0.87 \text{은 수중중량 환산계수})$$

$$(2) P_c = \lambda_c \times w_c \times l = 1 \times l \times 0.04634 \times 0.87$$

$$(3) P_T = P_a \cos \alpha_s + P_c \cos \alpha_p \quad (\alpha_s, \alpha_p = 30^\circ)$$

4.5.4 대상 선박의 묘박 안전성 평가

Figure 4.33은 실습선 한바다호의 단묘박에 따른 풍압력과 파주력을 동시에 나타낸 것이다. 스윙 현상을 고려하여 체인에 작용하는 외력은 정면 풍압면적의 2배에 해당되는 풍압력을 적용하여 파주력을 계산하였으므로, 여기서는 2배 풍압력과 파주력에 대하여 비교한다. 그림에서 보면 파주력만으로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속은 약 30m/s임을 알 수 있다. 따라서 풍속이 30m/s 이상이 예상되면 주요의 가능성이 크므로, 2묘박 또는 엔진의 사용 등을 고려해야 할 것이다.

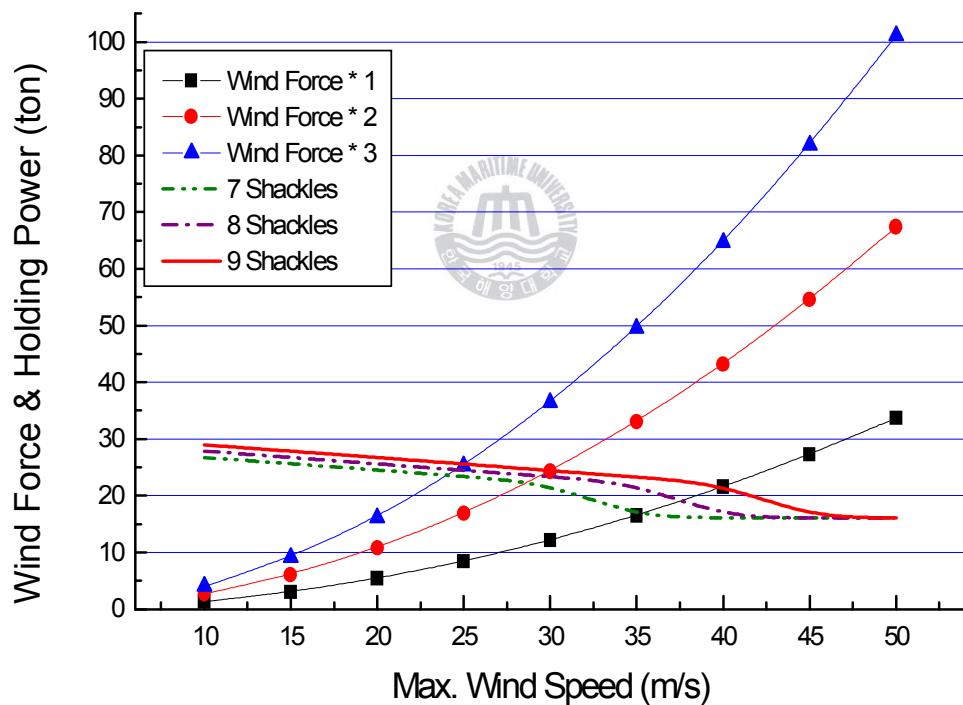


Figure 4.33 Comparison with Wind Force & Holding Power(Single Anchor)

Figure 4.34는 2묘박에 따른 풍압력과 파주력을 동시에 나타낸 것으로 제진 묘 방식의 경우 20m/s이후에는 단묘박과 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 제진묘의 사용으로 스윙 현상이 다소 줄어들 것으로 예상되므로 풍압면적에 의한 풍압력이 단묘박에 비해 작아질 것으로 판단된다. 따라서 풍압력을 2배 이하로 본다면 외력에 대항할 수 있는 한계풍속은 30m/s보다 다소 커질 수 있다.

또한, 양현묘쇄를 모두 9샤를 내어 주었을 때에는 파주력만으로 외력에 대항 할 수 있는 한계풍속이 약 40m/s임을 알 수 있다. 따라서, 실습선 한바다호가 양현묘를 모두 사용하여 최대로 버틸 수 있는 한계풍속이 40m/s임을 감안한다면 적정한 시기에 엔진의 사용을 고려해야 할 것이다.

마지막으로, 본선의 안전대책을 제시하면 다음과 같다. 1) 훌수(배수량)를 증대하여 풍압면적을 줄임으로써 풍압력을 줄인다. 2) 트림을 선수트림으로 조정하여 스윙을 억제함으로써 묘쇄에 걸리는 장력 및 풍압면적을 줄인다. 3) Bow Thruster를 사용하여 선수미 방향을 유지함으로써 스윙을 억제한다.

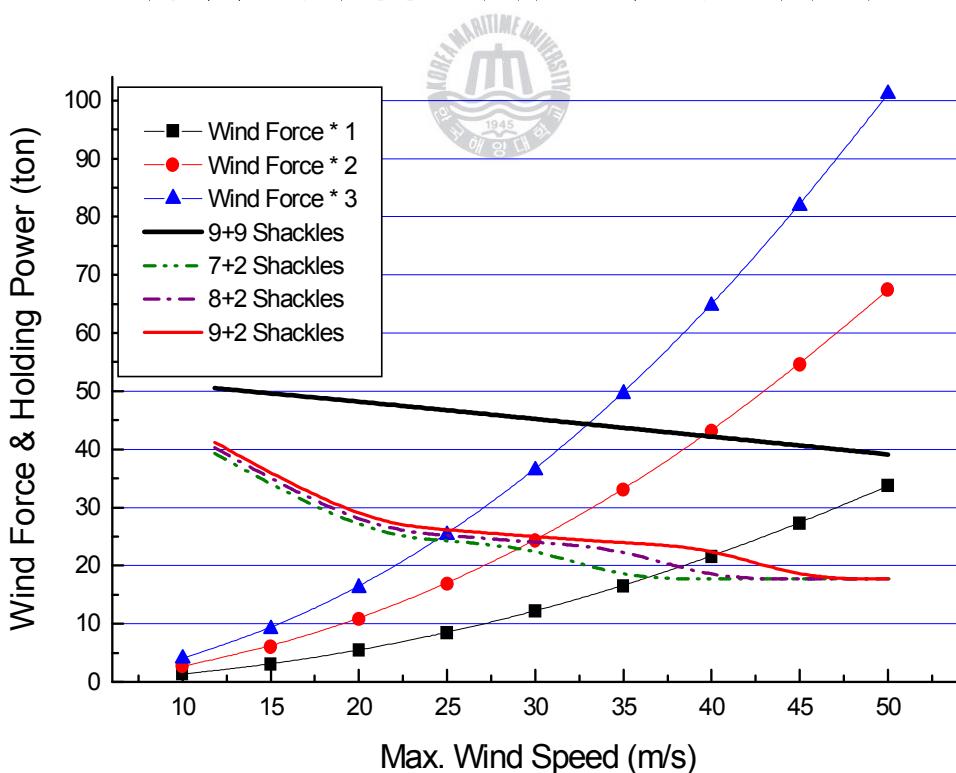


Figure 4.34 Comparison with Wind Force & Holding Power(Two Anchors)

4.6 요 약

다양한 선회시험을 통하여 실습선 한바다호의 조종성능을 확인하고 이를 IMO 조종성 기준과 비교하였다. 그리고 선박을 안전하게 조종하는데 중요한 지표가 되고 있는 선박의 조종성지수인 선회성지수(K)와 추종성지수(T) 및 신침로거리를 산출하였다. 또한, 풍압력에 의한 표류각과 선수회두를 억제하기 위한 대응타각을 제시하였고, 안전 접·이안을 위한 Bow Thruster 및 예인선의 사용에 대해서도 제안하였다. 마지막으로, 태풍 등 강풍에 대비한 선박의 묘박 안전성 평가를 실시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 좌현(Port)으로 선회한 경우가 우현(Starboard)으로 선회한 경우보다 선회권이 작게 나타났으며, 이 값은 타각이 작아질수록 더욱 더 커져감을 알 수 있었다. 또한, 12.6kts로 속력이 작은 경우가 17.6kts로 속력이 큰 경우보다 선회권이 작게 나타났다. 따라서, 타 선박과의 충돌상황이 아닌 전방의 장애물을 피하기 위한 상황에서는 속력을 낮추고 좌현으로 전타하는 것이 보다 유리할 것으로 판단된다.

둘째, 좌현으로 타각을 10° , 20° 및 35° 사용하여 조종성 지수를 산출하였다. 선회성 지수(K)는 각각 $0.1/\text{sec}$, $0.05/\text{sec}$ 및 $0.06/\text{sec}$ 이고, 추종성 지수(T)는 각각 20초, 17초 및 13초이다. 실습선 한바다호는 다른 선박과 비교하여 조타에 빨리 대응하는 능력이 다소 떨어지나(T'가 상대적으로 큼), 일단 선회가 시작되면 빠른 각속도로 선회하는 능력이 비교적 우수한 것으로 조사되었다(K'가 상대적으로 큼). 따라서, 실습선 한바다호의 경우 선회과정에서 선회경은 다소 작아질 수 있으나, 전진거리(종거)가 길어질 수 있으므로 전방의 위험물 회피에 주의가 요구된다.

셋째, 원침로로부터 신침로가 각각 30° , 60° 및 90° 인 경우 우현으로 전타(35°)하여 변침하였을 때 신침로 거리는 각각 125m, 205m, 300m로 확인되었다. 타각을 20° 로 사용하면 신침로 거리는 각각 200m, 300m, 425m 그리고, 타각을 10° 로

사용하면 신침로 거리는 각각 210m, 340m, 525m로 확인되었다. 이와 같은 신침로 거리는 충돌회피 조선 또는 일반적인 피항동작에 유용하게 이용될 수 있으며, 연안항해 시에는 변침점을 결정하고 변침동작을 취할 때 어느 정도의 신침로 거리만큼 여유를 두고 조타 명령을 내려야 할지 결정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

넷째, 실습선 한바다호는 상대풍향 $\Theta = 60^\circ$ 및 120° 에서 풍속 10m/s, 15m/s, 20m/s가 작용하면 선체는 각각 8.82tonf, 19.84tonf, 35.27tonf(1tonf=9.8kN)의 풍압력을 받는 것으로 계산 되었다. 그리고 표류각은 상대풍향이 60° 에서 최대값을 나타내며, 풍속 · 선속비가 2, 3, 4일 경우 각각 1.3° , 3.0° , 5.4° 로 계산되었다. 반면, 대응타각의 경우 상대풍향이 120° 에서 최대값을 나타내는데, 풍속 · 선속비가 2, 3, 4일 경우 각각 4.5° , 10.3° , 18.3° 로 나타났다.

다섯째, 접 · 이안 작업이 부두와 평행하게 이루어진다고 가정할 때, 선수에 Bow Thruster를 사용하고 선미에 중마력 예인선 1척만을 사용하여 접 · 이안 가능한 풍속은 10m/s까지로 계산되었다. 만약 풍속이 10m/s를 초과하게 되면 선수에도 예인선을 1척 추가하여 운용하는 것이 바람직하다.

마지막으로, 진해만에서 단묘박을 실시하였을 경우에는 파주력만으로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속은 약 30m/s이었고, 제진묘를 사용한 경우에는 스윙 현상의 감소로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속은 약 30m/s보다 다소 커질 것으로 예상된다. 또한, 양현묘쇄를 모두 9 Shackle 내어 주었을 때에는 파주력만으로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속이 약 40m/s임을 알 수 있었다. 따라서, 실습선 한바다호가 양현묘를 모두 사용하여 최대로 베틸 수 있는 한계풍속이 40m/s임을 감안한다면 적정한 시기에 엔진의 사용을 고려해야 할 것이다.

제 5 장 복원성능 평가

복원력은 선박의 안정성을 판단하는 중요한 기준으로 복원력 상실로 인하여 전복되는 사례를 가끔 접하게 된다. 복원력은 너무 과대하면 횡요가 심하여 선체는 물론 장비 또는 화물의 손상이 우려되고 승무원 및 승객에게는 불쾌감을 주며, 반대로 복원력이 너무 작으면 바람 또는 파도 등 외력의 영향으로 쉽게 경사되고 또한 경사 후 빨리 복원되지 않으므로 전복될 위험이 크다. 따라서 적절한 복원력이 유지될 수 있도록 항해사는 승선중인 선박의 복원력에 대한 충분한 지식을 가지고 있어야 한다.^{46),47)}

5.1 선박의 복원성

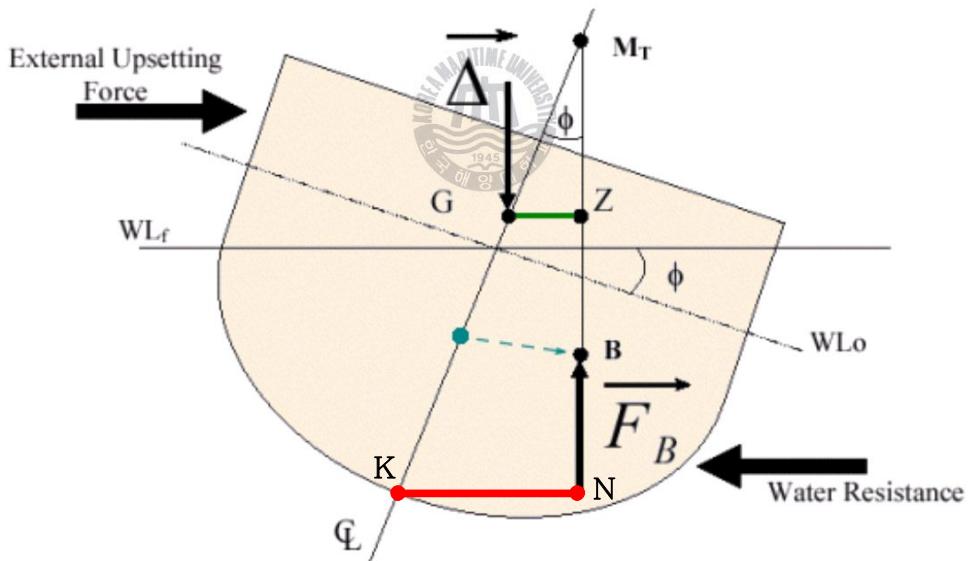


Figure 5.1 Stability Hullform

복원력은 Figure 5.1에서 보듯이, 배수량(\triangle)과 복원우력(Righting arm, \overline{GZ})의 곱으로 표시되는데, 선박이 10° 미만으로 소각도 경사시에는 경심(Metercenter)

이 거의 변하지 않으므로, 복원력 = $\Delta \times \overline{GM} \times \sin\phi$ 로 표현할 수 있다. 따라서 실무에서는 \overline{GM} 을 복원력을 판단하는 기준으로 삼고 있다. 하지만, 해상에서는 거친 파도로 인하여 선박이 10° 를 초과하여 경사되는 경우가 흔하며, 이 때는 M점이 변하게 되므로 \overline{GZ} 을 각 적화상태별로 경사각에 따라 구하여 복원력을 판단하는 기준으로 삼는다.

G_oZ 곡선을 그리기 위해 우선 G_oZ 값을 구해야 하며, $G_oZ = KN - KG_o \times \sin\theta$ (θ : Heeling angle)이다. 여기서 KN값은 조선소에서 제공하는 값으로 Trim & Stability Booklet에서 당시의 배수량에 해당되는 KN값을 찾아내고, KG_o 값도 당시의 적재상태에서 해당되는 값을 찾아낸다. 예를 들어 만재상태의 G_oZ 값을 구해보면 Table 5.1과 같고, G_oZ 곡선은 Figure 5.2와 같다.

Table 5.1 Example of G_oZ Calculation

Angle	KN (m)	$KG_o \times \sin\theta$	G_oZ (m)
5	0.779	0.608	0.171
10	1.545	1.212	0.333
20	3.043	2.387	0.656
30	4.478	3.490	0.988
40	5.721	4.487	1.234
50	6.635	5.347	1.288
60	7.181	6.045	1.136

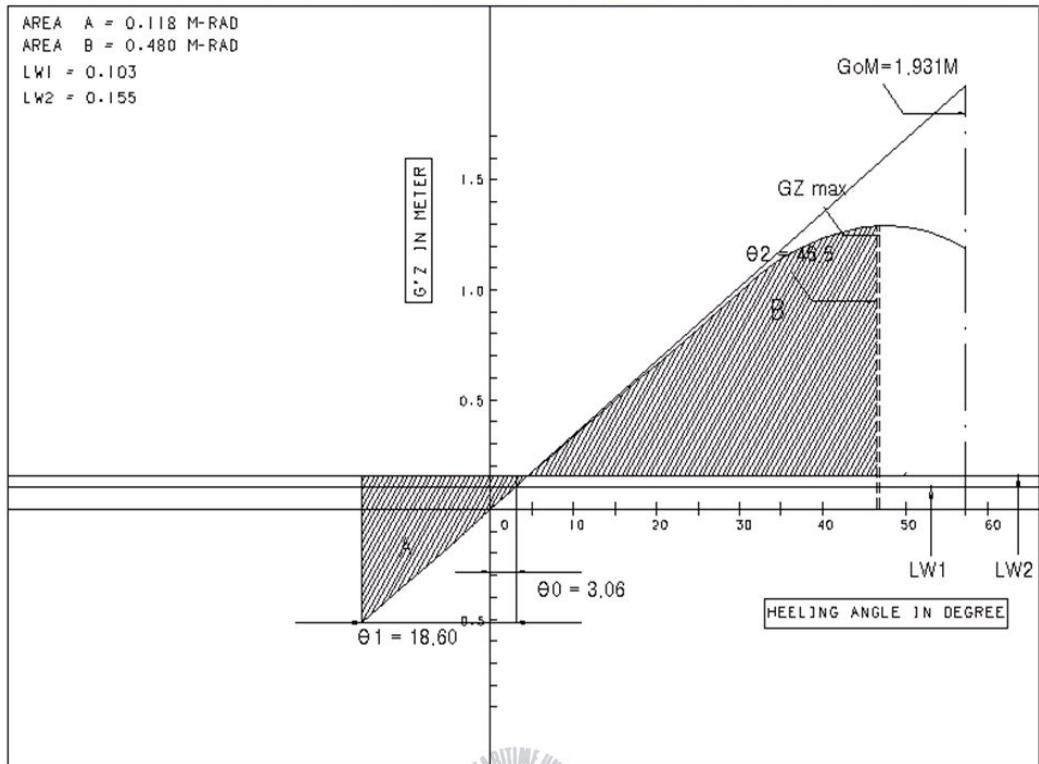


Figure 5.2 Example of G_oZ Curve

다음으로 Steady Wind Heeling Lever($LW1$)는 $LW1 = \frac{0.0514AZ}{\Delta}$ 으로 Table

5.2에서 구해지고(A:측면 풍압면적, Z:풍압중심으로부터 수면하 측면적 중심까지의 거리), $LW2$ 는 $1.5 \times LW1$ 로 돌풍에 의한 경사우력을 의미하며, $LW1$ 과 G_oZ 곡선이 만나는 점의 경사각 θ_0 값이 바람에 의해 선박이 경사되는 각을 의미한다. 그리고 θ_1 의 값은 $\theta_1 = 109X_1X_2k\sqrt{rs}$ (B/d , C_b , T 함수; 계산과정은 부록 참조)로 바람이 불어가는 방향으로 파도에 의해 선박이 경사되는 각을 의미하며, θ_2 는 해수유입각(θ_f)과 50° 중 적은 값을 의미한다. 여기서 해수유입각(Angle of down flooding)이라 함은 Figure 5.3에서 보듯이 신속하게 풍우밀로 폐쇄할 수 없는 선체, 선루 또는 갑판상의 개구가 침수를 시작할 때의 횡경사각(도)을 말하며, 한바다호의 해수유입각은 Table 5.3과 같다.

Table 5.2 Steady Wind Heeling Lever Calculation

Draft(mld) (m)	Area (m ²)	Center (m)	draft/2 (m)	Moment (m ³)	Z (m)	Disp. (ton)	LW1 (m)
3.00	1651.00	10.99	1.50	18144.49	9.49	2658.5	0.3029
4.00	1515.00	11.61	2.00	17589.15	9.61	3833.0	0.1952
5.00	1430.00	12.05	2.50	17231.50	9.55	5133.6	0.1367
5.90	1353.00	12.47	2.95	16871.91	9.52	6434.6	0.1029
7.00	1235.00	13.05	3.50	16116.75	9.55	8217.2	0.0738
8.00	1126.00	13.59	4.00	15302.34	9.59	9943.6	0.0558

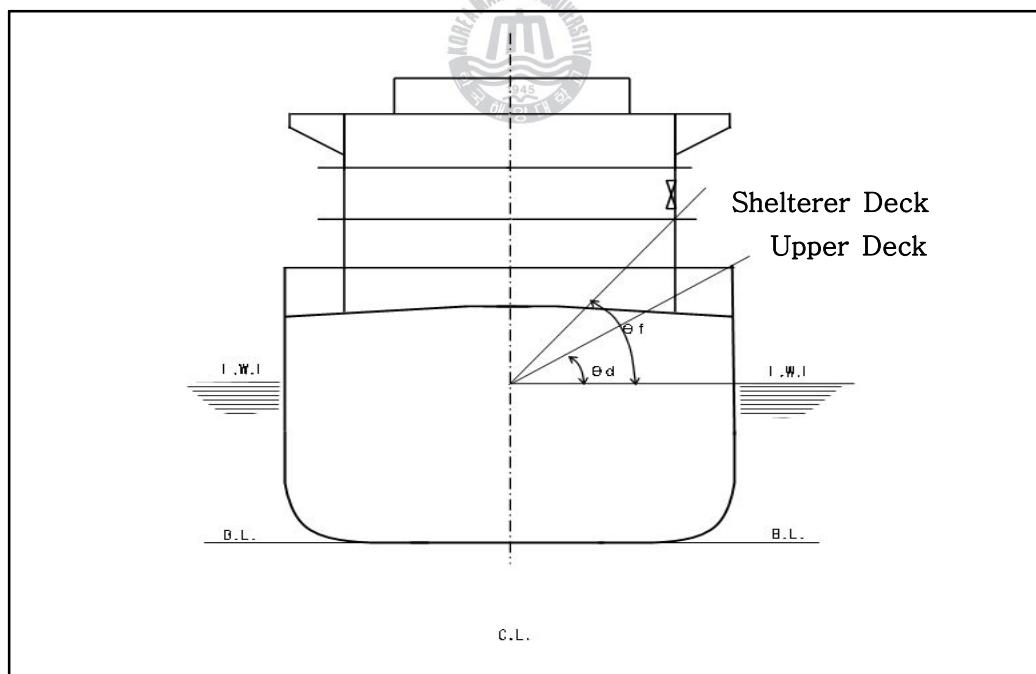


Figure 5.3 Angle of Downflooding

Table 5.3 Down Flooding & Deck Immersion Angle

POINT	FRAME	Y	Z
1	84.515	7.000	13.65 SQUARE WINDOW
2	71.573	8.900	10.9 DECK EDGE
Draft	Displacement	1	2
5.0	5160	51	34
5.2	5454	50	33
5.4	5647	50	32
5.6	6067	49	31
5.9	6434	48	29

* Y : Distance from Center Line

Z : Distance from Base Line

Point 1 : Down Flooding Angle (Shelter Deck)

Point 2 : Deck Immersion Angle (Upper Deck)

5.2 IMO 복원성 기준과 대상 선박의 복원성

IMO 복원성 기준인 Res. A. 749(18)의 내용을 우선 살펴보고, 실습선 한바다호의 주요 적하상태>Loading condition)별 복원성을 Loading computer를 이용하여 계산하고, 이를 IMO 기준과 상호 비교하였다.^{48),49)}

5.2.1 IMO 복원성 기준

1. 일반기준

- 가. 모든 적하상태는 IMO에서 적절하다고 인정하는 상태이어야 하며, 이 때 복원성은 3항 및 4항의 규정에 만족하여야 한다.
- 나. 착빙이 예상되는 해역을 항해하는 선박의 경우에는, 착빙에 의한 풍압면적의 증가 및 중심위치의 상승에 따른 영향을 고려하여야 한다.

2. 복원성 기준의 계산

복원성 기준의 계산은 다음의 조건에 따라 하여야 한다.

- 가. 선체중심의 위치는 경사시험 결과로부터 구하여야 한다.
- 나. 탱크 내 액체의 자유표면 영향은 해당 적하상태에서 소모성 액체탱크의 경우에는 각 용도별로 가장 큰 자유표면을 갖는 한 쌍의 탱크 또는 중앙 탱크의 자유표면효과를 최대값으로 고려하고, 비소모성 액체탱크의 경우에는 실제 값을 적용한다. 다만, 입항상태에서는 모든 액체탱크에 대하여 실제 값을 적용한다.
- 다. 횡요역제장치의 횡요역제효과는 없는 것으로 가정한다.

3. 일반 복원성 기준

- 가. 갑판상에 복재화물을 적재하지 않는 선박의 복원성은 다음의 기준에 적합하여야 한다.
 - (a) 복원력 곡선(GZ곡선) 아래의 면적은 횡경사각 $\Theta=30^\circ$ 까지는 0.055 m-rad 이상이어야 하며, 횡경사각 $\Theta=40^\circ$ 까지 또는 해수유입각이 40° 미만인 경우에는 해수유입각(Θ_f) 까지는 0.09 m-rad 이상이어야 한다. 또한, 횡경사각 30° 와 40° 의 사이 또는 Θ_f 가 40° 미만인 경우 30° 와 Θ_f 사이의 복원력곡선 아래의 면적은 0.03 m-rad 이상이어야 한다.
 - (b) 30° 이상의 횡경사각에서 복원정(G_oZ)은 0.2m 이상이어야 한다.
 - (c) 최대복원정은 30° 를 초과하는 횡경사각에서 나타나는 것이 바람직하고 25° 미만에서 나타나서는 안 된다.

(d) 자유표면효과에 의하여 수정된 초기 메타센터높이 G_oM 은 0.15m 이상이어야 한다. 다만, 어선의 경우에는 0.35m 이상이어야 한다.

(e) 해수유입각(Θ_f)이라 함은 신속하게 풍우밀로 폐쇄할 수 없는 선체, 선루 또는 갑판상의 개구가 침수를 시작할 때의 횡경사각(도)을 말한다.

나. 갑판상에 목재화물을 적재하는 선박의 복원성은 다음의 기준에 적합하여야 한다.

(a) 복원정 아래의 면적은 $\Theta=40^\circ$ 까지 또는 해수유입각이 40° 미만의 경우에는 해수유입각까지 0.08 m-rad 이상이어야 한다.

(b) 최대복원정(GZ)은 0.25m 이상이어야 한다.

(c) 항상 메타센터높이(G_oM)는 항해 중 갑판적재화물에 의한 물의 흡수 및 /또는 노출표면의 열음부착에 대한 수정을 한 후 0.10m 이상이어야 한다.

다. 상기 (나)의 기준에 따를 경우에는 다음 사항을 추가로 고려하여야 한다.

(a) 목재화물의 적재는 종방향으로는 선루단까지, 횡방향으로는 선박의 폭(B)의 4 %를 초과하지 않는 범위에서 등근 거널에 대한 적절한 여유를 고려하여 선박의 폭(B)에 달해야 하며, 큰 횡경사각에서도 견고하게 고정되도록 지지대(Stanchion)가 설치되어야 한다.

(b) 이 때 적용되는 침수율은 갑판상 목재화물이 차지하는 용적의 25%로 한다. 즉, 갑판상 목재 용적의 75%를 부력으로 고려할 수 있다.

(c) 입항상태에 있어서 갑판상 적재 목재의 중량은 물의 흡수에 의하여 10% 증가하는 것으로 가정하여야 하며, 결빙이 예상될 경우 입항상태에 대하여 적절한 추가 중량에 대한 여유를 고려하여야 한다.

4. 바람 및 파도에 대한 복원성 기준

어선을 제외한 선박 중 측면 풍압면적이 큰 선박 및 갑판적재 화물선의 복원성은 3항의 기준에 추가하여 다음의 기준에도 적합하여야 한다.

(a) Θ_0 는 16° 또는 현단 물입각(Angle of deck edge immersion)의 80%에 해당하는 각도 중에서 작은 것보다 작아야 한다.

(b) 면적 B는 면적 A 이상이어야 한다.

5.2.2 대상 선박의 복원성

Figure 5.4~5.8 및 Table 5.4~5.8은 실습선 한바다호의 대표적인 적하상태(Full loaded, 1/3 consumed, 2/3 consumed, 3/4 consumed, 90% consumed)에서의 복원성을 나타내고 있다. 만재상태(Full loaded)에서 90% 소모 상태(90% consumed)로 컨디션이 변해감에 따라 G_oM 은 점점 작아지고, 바람에 의한 경사각(Steady wind heel angle(Θ_0)))은 복원우력의 감소와 풍압면적의 확대로 그 각이 점차적으로 커져감을 알 수 있다. 그와는 반대로, 파도에 의한 경사각(Wave action roll angle(Θ_1)))은 배수량이 점점 작아져감에 따라 그 경사각도 작아졌다. 복원우력이 가장 크게 나타나는 경사각은 모든 경우에서 48° 정도 경사한 시점이었고, 바람에 의한 경사는 90% 소모 상태에서 7° 정도로 가장 크게 나타났다. 반면 파도에 의한 경사는 만재상태에서 21.8° 정도로 가장 크게 나타났다.

또한, 항해가 지속되면 일반적으로 중심의 상승으로 복원성이 나빠진다. 이러한 상황에서 황천항해가 예상되면, 1) Ballasting을 실시하여 충분한 GM을 확보하고(한바다호의 경우, 약 30일 정도의 원양항해를 마치고 부산에 입항 할 시점에서의 컨디션은 대략적으로 3/4 consumed condition에 해당되며, 기상악화가 예상되면 NO.2 & 3 W.B.T를 가득 채움($G_oM : 1.3m$ 정도)), 2) 갑판 현측의 물입이 발생되는 Upper Deck 상의 Weather Tight Door를 폐쇄함으로써 풍우밀 확보가 필요하며, 3) 갑판 현측의 해수 침입으로 인한 복원성 저하 및 동조횡요를 피할 수 있는 침로와 선속의 유지가 필요할 것으로 판단된다.

Figure 5.4 및 Table 5.4는 만재상태에서의 컨디션으로 G_oM 은 1.93m로 가장 크게 나타났다. 정상풍에 의한 횡경사각은 2.8° 로 가장 작고, 파도에 의한 횡경사각은 21.8° 로 가장 크게 나타났다.

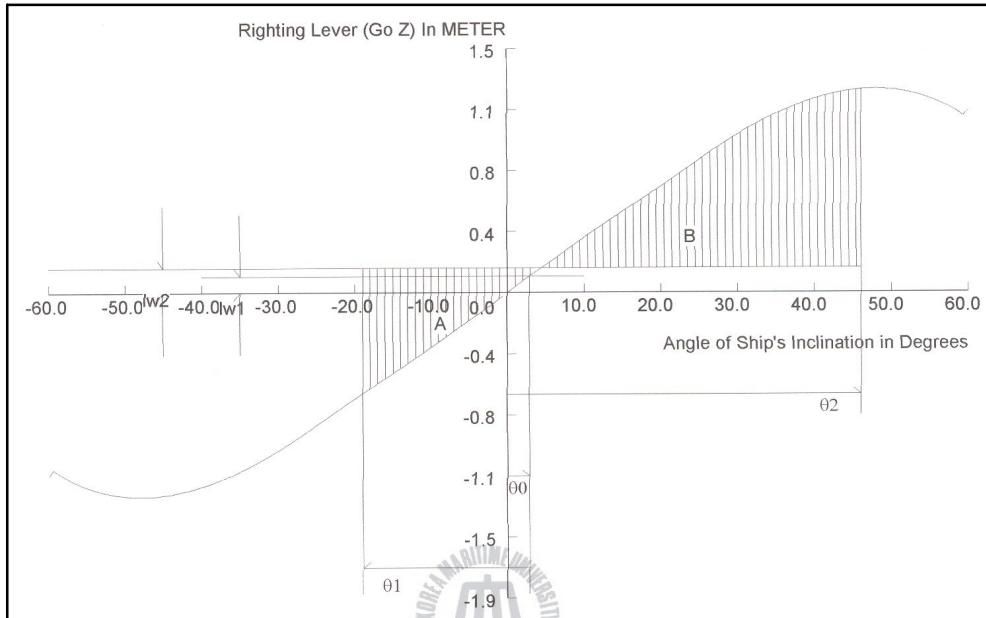


Figure 5.4 G_oZ Curve(Full Loaded Departure Condition)

Table 5.4 IMO Criteria(Full Loaded Departure Condition)

Items	Condition	IMO Criteria	Judgement
Area to $\Theta=30^\circ$	0.260	$\geq 0.055\text{m-rad}$	Yes
Area to $\Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.453	$\geq 0.090\text{m-rad}$	Yes
Area $\Theta=30^\circ \sim \Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.193	$\geq 0.030\text{m-rad}$	Yes
G_oZ at $\Theta=30^\circ$	0.977	$\geq 0.2\text{m}$	Yes
Angle at Max. G_oZ	48	$\geq 25^\circ$	Yes
Initial G_oM	1.935	$\geq 0.15\text{m}$	Yes
Steady wind heel angle(Θ_0)	2.8	$\leq 16^\circ$ or $\Theta_d \times 0.8$	Yes
Stability area[B] / Roll area[A]	2.936	≥ 1	Yes
Down flooding angle(Θ_d)	48		
Deck edge immersion angle(Θ_d)	29		
Wave action roll angle(Θ_1)	21.8		

Figure 5.5 및 Table 5.5는 1/3 consumed condition으로 G_oM 은 1.513m로 나타났다. 정상풍에 의한 횡경사각은 4.1° 이고, 파도에 의한 횡경사각은 20.3° 로 나타났다.

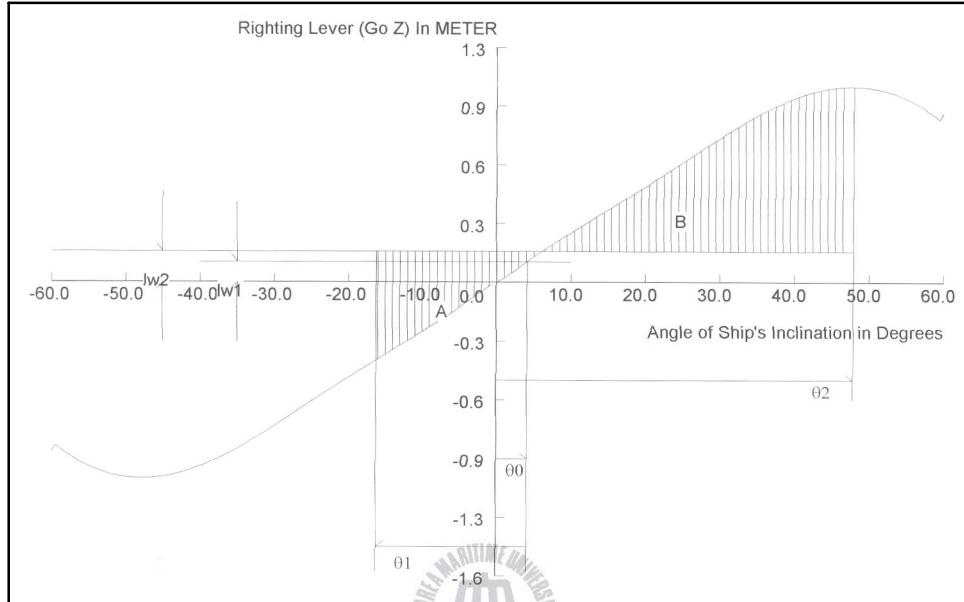


Figure 5.5 G_oZ Curve(1/3 Consumed Condition)

Table 5.5 IMO Criteria(1/3 Consumed Condition)

Items	Condition	IMO Criteria	Judgement
Area to $\Theta=30^\circ$	0.204	$\geq 0.055\text{m-rad}$	Yes
Area to $\Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.360	$\geq 0.090\text{m-rad}$	Yes
Area $\Theta=30^\circ \sim \Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.156	$\geq 0.030\text{m-rad}$	Yes
G_oZ at $\Theta=30^\circ$	0.775	$\geq 0.2\text{m}$	Yes
Angle at Max. G_oZ	48	$\geq 25^\circ$	Yes
Initial G_oM	1.513	$\geq 0.15\text{m}$	Yes
Steady wind heel angle(Θ_0)	4.1	$\leq 16^\circ$ or $\Theta_d \times 0.8$	Yes
Stability area[B] / Roll area[A]	3.265	≥ 1	Yes
Down flooding angle(Θ_f)	49		
Deck edge immersion angle(Θ_d)	31		
Wave action roll angle(Θ_1)	20.3		

Figure 5.6 및 Table 5.6은 2/3 consumed condition으로 G_oM 은 1.46m로 나타났다. 정상풍에 의한 횡경사각은 4.7° 이고, 파도에 의한 횡경사각은 19.9° 로 나타났다.

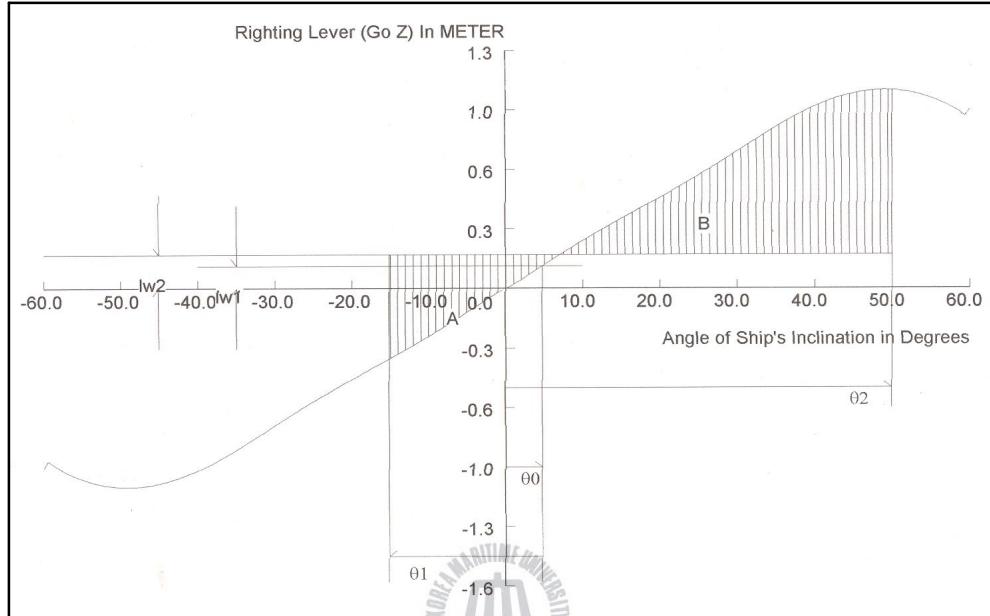


Figure 5.6 G_oZ Curve(2/3 Consumed Condition)

Table 5.6 IMO Criteria(2/3 Consumed Condition)

Items	Condition	IMO Criteria	Judgement
Area to $\Theta=30^\circ$	0.195	$\geq 0.055\text{m-rad}$	Yes
Area to $\Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.346	$\geq 0.090\text{m-rad}$	Yes
Area $\Theta=30^\circ \sim \Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.151	$\geq 0.030\text{m-rad}$	Yes
G_oZ at $\Theta=30^\circ$	0.738	$\geq 0.2\text{m}$	Yes
Angle at Max. G_oZ	49	$\geq 25^\circ$	Yes
Initial G_oM	1.460	$\geq 0.15\text{m}$	Yes
Steady wind heel angle(Θ_0)	4.7	$\leq 16^\circ$ or $\Theta_d \times 0.8$	Yes
Stability area[B] / Roll area[A]	3.502	≥ 1	Yes
Down flooding angle(Θ_f)	50		
Deck edge immersion angle(Θ_d)	32		
Wave action roll angle(Θ_1)	19.9		

Figure 5.7 및 Table 5.7은 3/4 consumed condition으로 G_oM 은 1.34m로 나타났다. 정상풍에 의한 횡경사각은 5.4° 이고, 파도에 의한 횡경사각은 19.3° 로 나타났다.

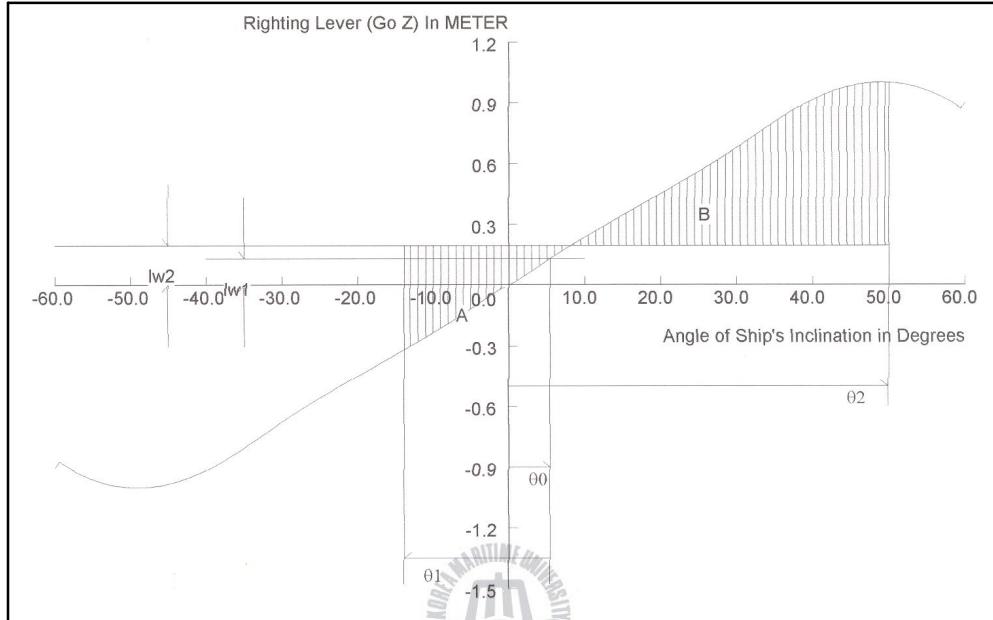


Figure 5.7 G_oZ Curve(3/4 Consumed Condition)

Table 5.7 IMO Criteria(3/4 Consumed Condition)

Items	Condition	IMO Criteria	Judgement
Area to $\Theta=30^\circ$	0.174	$\geq 0.055\text{m-rad}$	Yes
Area to $\Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.310	$\geq 0.090\text{m-rad}$	Yes
Area $\Theta=30^\circ \sim \Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.135	$\geq 0.030\text{m-rad}$	Yes
G_oZ at $\Theta=30^\circ$	0.659	$\geq 0.2\text{m}$	Yes
Angle at Max. G_oZ	49	$\geq 25^\circ$	Yes
Initial G_oM	1.340	$\geq 0.15\text{m}$	Yes
Steady wind heel angle(Θ_0)	5.4	$\leq 16^\circ$ or $\Theta_d \times 0.8$	Yes
Stability area[B] / Roll area[A]	3.354	≥ 1	Yes
Down flooding angle(Θ_f)	50		
Deck edge immersion angle(Θ_d)	33		
Wave action roll angle(Θ_1)	19.3		

Figure 5.8 및 Table 5.8은 90% consumed condition으로 G_oM 은 1.149m로 가장 작게 나타났다. 정상풍에 의한 횡경사각은 7.0° 로 가장 크고, 파도에 의한 횡경사각은 18.3° 로 가장 작게 나타났다.

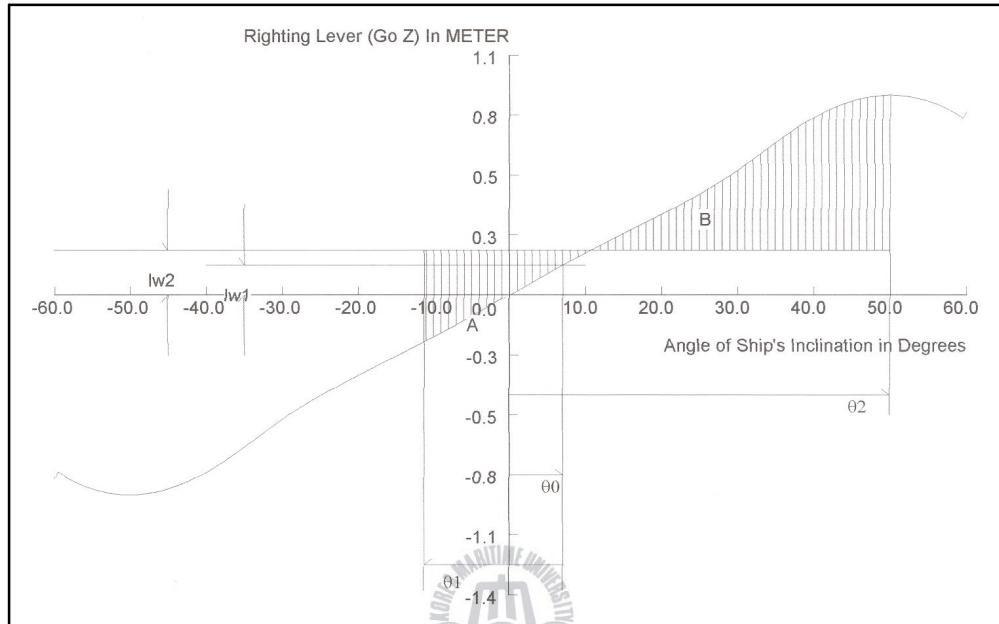


Figure 5.8 G_oZ Curve(90% Consumed Condition)

Table 5.8 IMO Criteria(90% Consumed Condition)

Items	Condition	IMO Criteria	Judgement
Area to $\Theta=30^\circ$	0.146	$\geq 0.055\text{m-rad}$	Yes
Area to $\Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.265	$\geq 0.090\text{m-rad}$	Yes
Area $\Theta=30^\circ \sim \Theta=40^\circ$ or Θ_f	0.119	$\geq 0.030\text{m-rad}$	Yes
G_oZ at $\Theta=30^\circ$	0.566	$\geq 0.2\text{m}$	Yes
Angle at Max. G_oZ	50	$\geq 25^\circ$	Yes
Initial G_oM	1.149	$\geq 0.15\text{m}$	Yes
Steady wind heel angle(Θ_0)	7.0	$\leq 16^\circ$ or $\Theta_d \times 0.8$	Yes
Stability area[B] / Roll area[A]	3.247	≥ 1	Yes
Down flooding angle(Θ_f)	51		
Deck edge immersion angle(Θ_d)	34		
Wave action roll angle(Θ_1)	18.3		

최대 횡 경사각은 풍압 경사모우멘트와 선박의 복원모우멘트와의 관계를 이용하여 다음과 같은 방법으로도 산출 가능하다.

$$G_0 M \sin \phi \Delta = \frac{1}{2} \rho_a C_y(\theta) A_L V_a^2 h \quad (5-1)$$

단, $G_0 M$: 유동수 영향을 고려한 GM,

ϕ : 횡경사각, Δ : 배수량, $C_y(\theta)$: 측면 풍압 계수

h : 수면 상부의 풍압 중심점과 수면 하부의 중심점과의 거리(m)

Figure 5.9는 한바다호의 훌수 $d=5.9m$ 에 대한 최대 횡 경사각을 풍속과 풍향에 따라 제시한 것이다. 정횡 방향에서 풍속이 10m/s, 20m/s, 30m/s로 작용할 경우 최대 횡경사는 각각 0.3° , 1.6° , 3.5° 로 계산되었고, 훌수 $d=5.35m$ (2/3 consumed condition)에서는 최대 횡경사가 각각 0.7° , 2.9° , 6.6° 로 계산되었다. 따라서, 선박 운항자는 실제 해상에서 풍속이 강하게 작용할 경우 바람에 의한 횡경사각을 충분히 고려하여 적절한 운항 상태를 유지해야 할 것이다.

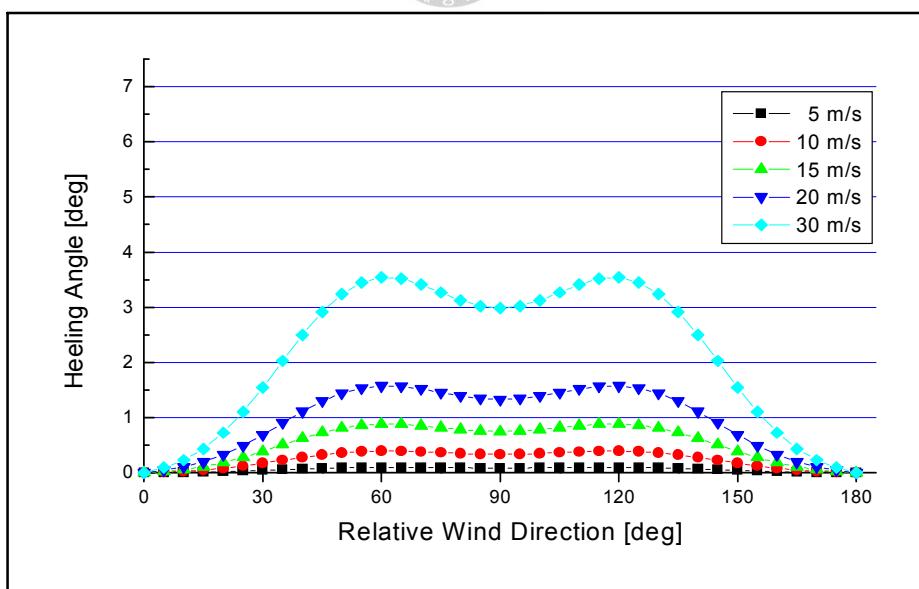


Figure 5.9 Maximum Heel Angle with Relative Wind Velocity & Direction

Figure 5.10은 선체응력 감시 장치를 이용하여 실측한 약 2년 동안의 횡요각에 대한 자료를 해상상태별로 분석한 결과이다. 해상상태 5이상에서 ITTC 내 항성능기준의 작업가능기준치 8° 를 초과하고 있으며, 최대값과 $1/3$ 유의 값이 4° 이상 큰 차이를 보이고 있어 항해 중 순간적으로 발생하는 최대횡요에 주의가 요구된다. Figure 5.11~5.13은 각각의 해상상태에서 최대횡요각(최대값)이 발생한 HMS 실측치를 나타내고, 그 중 Figure 5.11과 5.13는 사추파를 받으며 항해한 경우로 조사 되었다. 물론, 그 당시에 선박이 횡파를 받고 항해하였다면 횡요각이 더 크게 측정되었을 가능성도 있지만, “5.3 동조횡요운동”에서의 실습선 한바다호의 동조횡요 발생 조건이 횡파 또는 사추파인 점과 연관해서 보면 동조횡요 가능성을 완전히 배제할 수도 없다. 실습선 한바다호 인수 후 지금까지의 운항과정에서 최대횡요각이 측정된 것은 2006. 6. 2일의 해상상태 6이며, Figure 5.13에서와 같이 최대값이 17° 로 나타났다. 이는 $1/3$ consumed condition에서 파도에 의한 경사각(θ_1) 20.3° 에 가까운 수치이다.

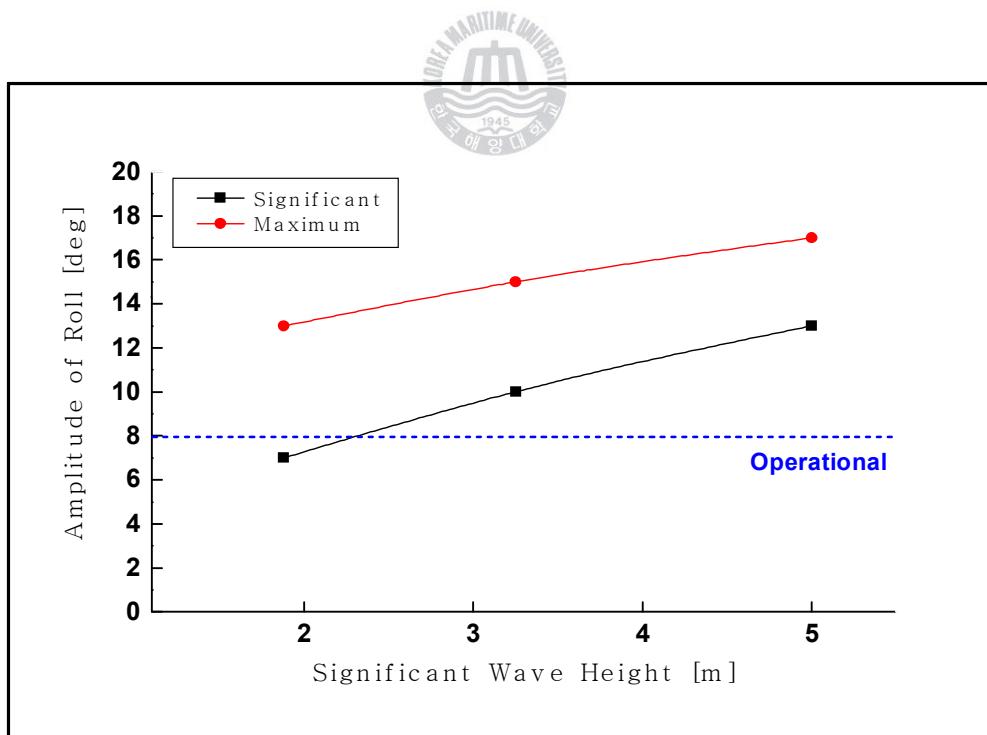


Figure 5.10 Variation of Roll with Wave Height(Beam Sea)

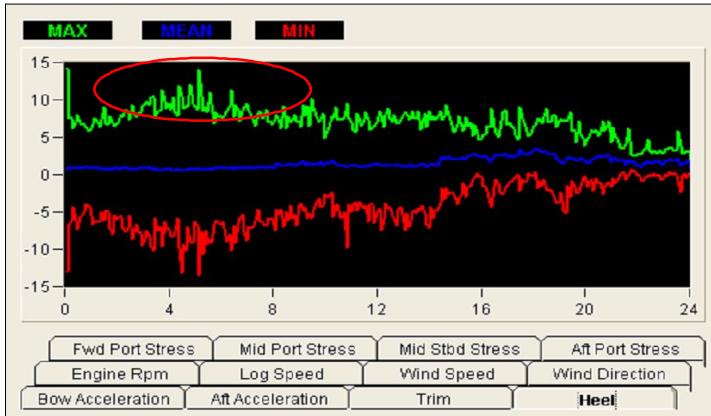


Figure 5.11 Rolling(2006. 6. 9)

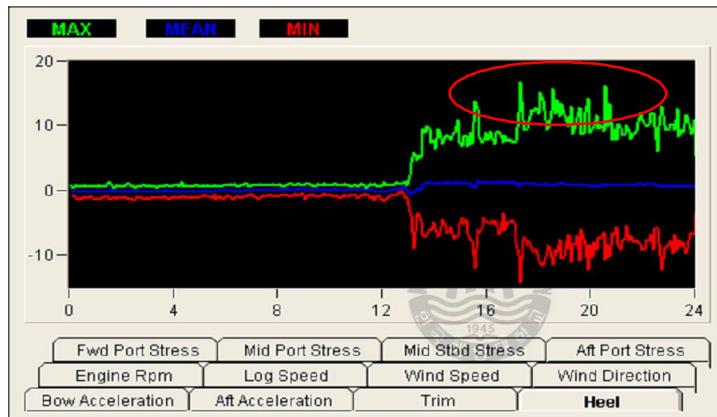


Figure 5.12 Rolling(2007.10.17)

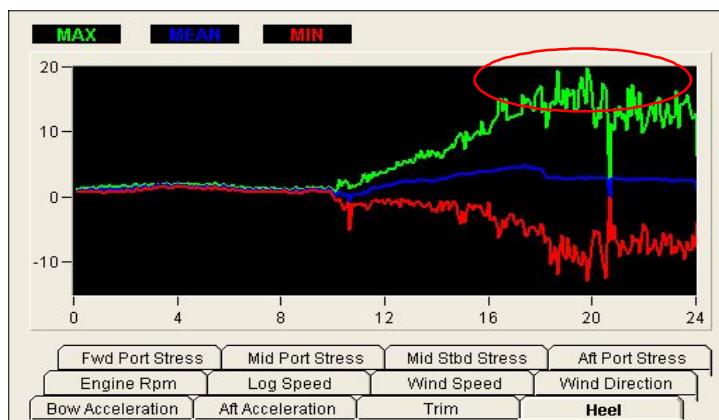


Figure 5.13 Rolling(2006. 6. 2)

Sea state 4
 -최대값 : 13°
 -1/3유의치 : 10°
 -Quartering sea

Sea state 5
 -최대값 : 15°
 -1/3유의치 : 12°
 -Beam sea

Sea state 6
 -최대값 : 17°
 -1/3유의치 : 13°
 -Quartering sea

5.3 동조 횡요 운동

해상에서는 다양한 파장과 주기의 파도를 접하게 된다. 또한 선박의 침로와 선속에 따라 선박과 파와의 만남주기가 달라진다. 만약 선박이 선수파(Head sea)를 받을 경우 연속적인 파도를 보다 빨리 접하게 될 것이고, 반대로 선미파(Following sea)를 받게 되면 주기가 보다 길어질 것이다. 또한 횡파(Beam sea)를 받으면 파주기와 동일한 주기(Period)로 선박에 접하게 된다. 따라서 선박과 만나게 되는 파도의 주기를 만남주기(Encounter period ; T_E)라 하면, 이는 파도의 주기(또는 파속), 선속 그리고 선박과 파도와의 만남각의 함수로 표현할 수 있다. 선박의 횡요운동은 선수방향(Ship's heading)을 바꿈으로써 그 정도를 상당히 줄일 수 있기 때문에, 만약 선박이 심하게 횡요를 하게 되면 해당 침로나 선속을 바꾸어 그 상황을 피할 수 있다.⁵⁰⁾ Figure 5.14는 선박과 파와의 만남각을 표시하고, 0° 는 선미파를 그리고 180° 는 선수파를 의미한다.

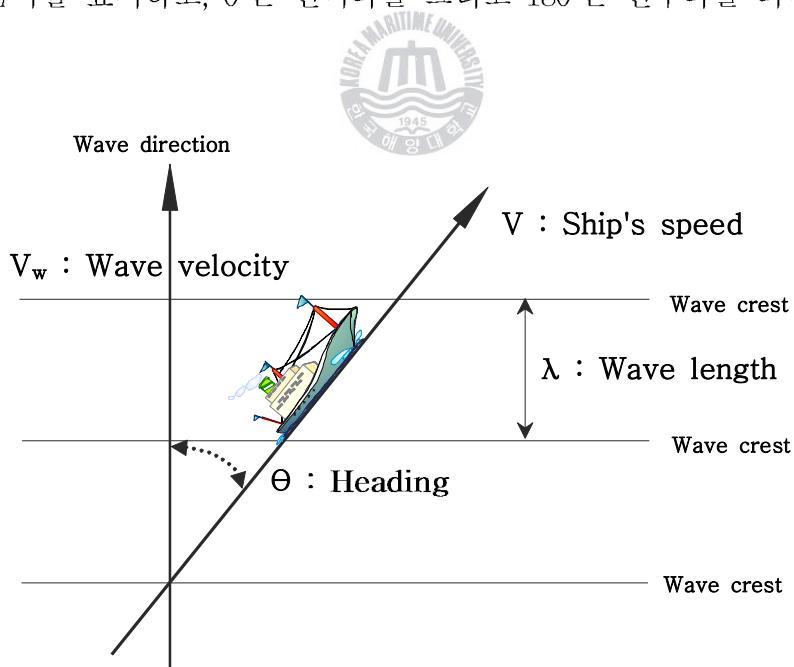


Figure 5.14 Co-ordinate System of Encounter Angle

$$T_E = \frac{\lambda}{V_w - V \cos\theta} = T_R \quad \text{단, } V_w = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = 1.25\sqrt{\lambda}$$

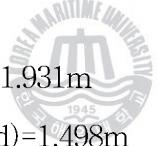
T_E : 만남주파수 T_R : 선박의 횡요 고유 주기 (5-2)

λ : 파장 V_w : 파속 V : 선속

θ : 선박과 파도와의 만남각

여기서, 선박이 접할 수 있는 다양한 해상상태에 해당하는 몇 가지 주요한 파장(파장 : 50~200m)을 대상으로, 선속 및 만남각 변화에 따른 파도와 선박 간의 만남주기(T_E)를 계산하였다. 또한 실습선 한바다호의 적화상태>Loading condition)에 따른 횡요주기(Rolling period ; T_R)를 식(5-3)에서 구할 수 있다.

$$T_R = \frac{0.802B}{\sqrt{G_o M}} \quad \text{여기서, 선폭}(B) = 17.8m \quad (5-3)$$

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

1), 2), 3) 조건을 대입하여 $T_R = 10.2\text{초}$ (Full loaded), 11.6초 (1/3 consumed), 13.4초 (90% consumed)를 얻을 수 있다. 선박의 고유횡요주기(T_R)와 선박과 파도의 만남주기(T_E)가 동일한 조건에서 동조횡요(Parametric rolling)가 발생되고, 이에 해당되는 선속 및 만남각을 확인 할 수 있다. 따라서 선박은 당시의 고유횡요주기와 파장을 고려하여 동조횡요가 발생되지 않도록 선속 및 만남각을 조정할 필요가 있다.

Figure 5.15~5.19에서 보면, 파장이 50m에서 200m로 점점 커져감에 따라 동조횡요가 발생되는 만남각의 범위가 점점 선수방향으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 파장이 120m이하인 경우에는 정횡 후방의 횡파 또는 사추파(Quartering

sea)에서 동조횡요가 일어나고, 파장이 150m이상으로 길어짐에 따라 사추파뿐만 아니라 횡파, 사향파(Bow sea)에서도 동조횡요가 일어남을 알 수 있다. 따라서 선박이 심하게 횡요를 하게 되면 항해사들은 당시 항해하고 있는 해상상태의 파장을 확인하여, 선속 또는 파와의 만남각을 변경함으로써 동조횡요로 인한 과도한 횡요를 피할 수 있다.

Figure 5.15는 파장이 50m인 경우로 선속에 따른 동조횡요 발생구간이 60° 부근으로 나타났다. 따라서 동조횡요를 피하기 위해서는 60° 전후의 사추파를 피해 항해하는 것이 타당하다.

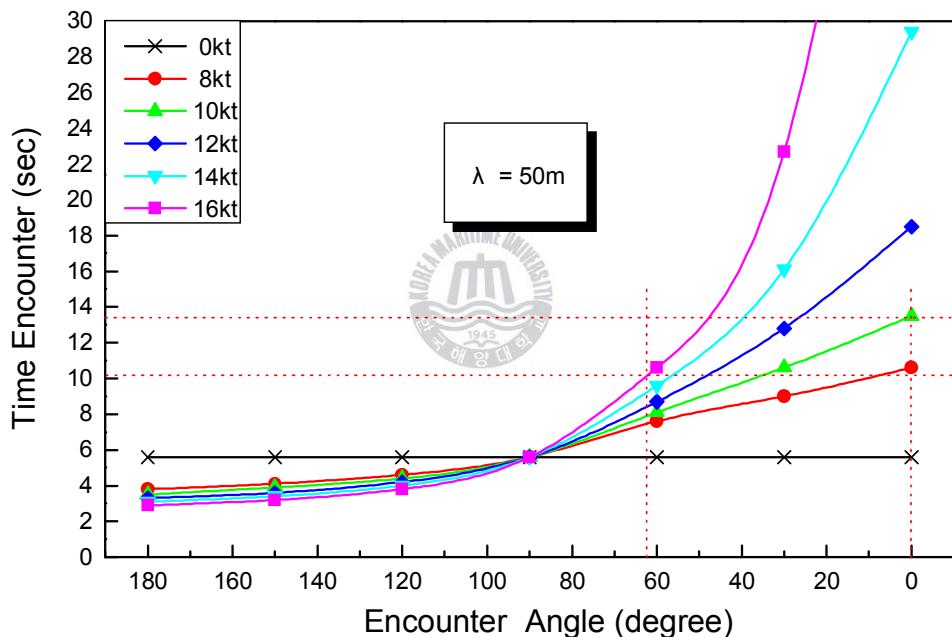


Figure 5.15 Parametric Rolling Area($\lambda=50m$)

Figure 5.16 및 5.17은 파장이 100m 및 120m인 경우로 동조횡요 발생구간이 80° 후방으로 나타났다. 따라서 동조횡요를 피하기 위해서는 80° 전후의 횡파 및 60° 전후의 사추파를 피해 항해하는 것이 바람직하다.

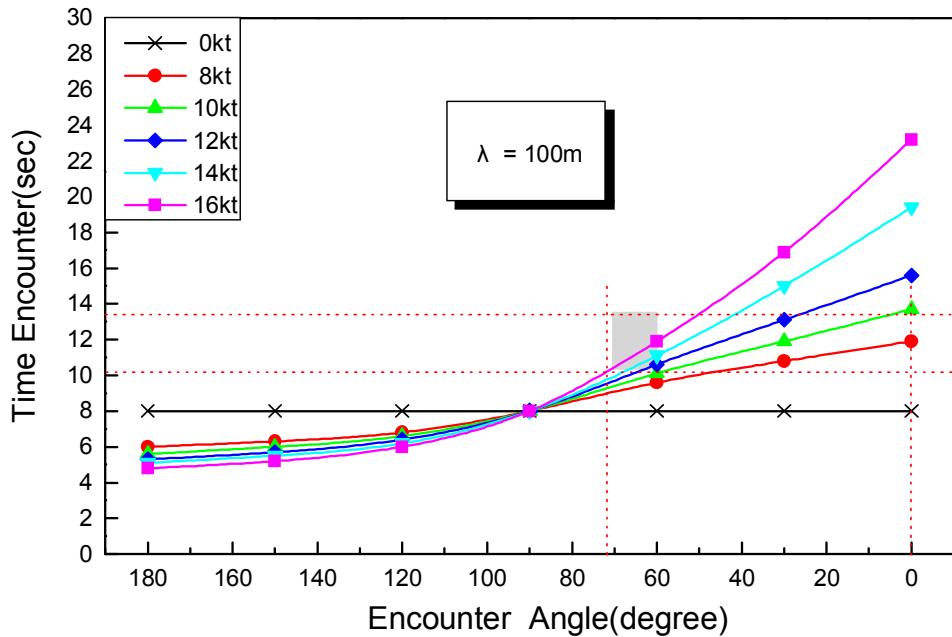


Figure 5.16 Parametric Rolling Area($\lambda=100\text{m}$)

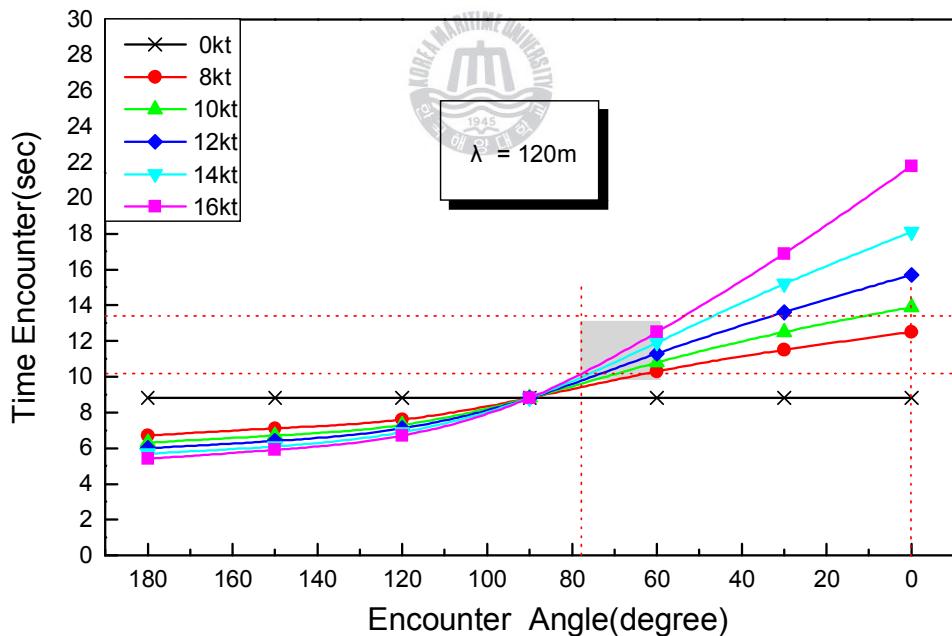


Figure 5.17 Parametric Rolling Area($\lambda=120\text{m}$)

Figure 5.18 및 5.19는 파장이 150m 및 200m인 경우로 동조횡요 발생구간이

120° 부근까지 나타났다. 따라서 동조횡요를 피하기 위해서는 사추파 뿐만 아니라 횡파, 사향파까지도 피해 항해하는 것이 좋다.

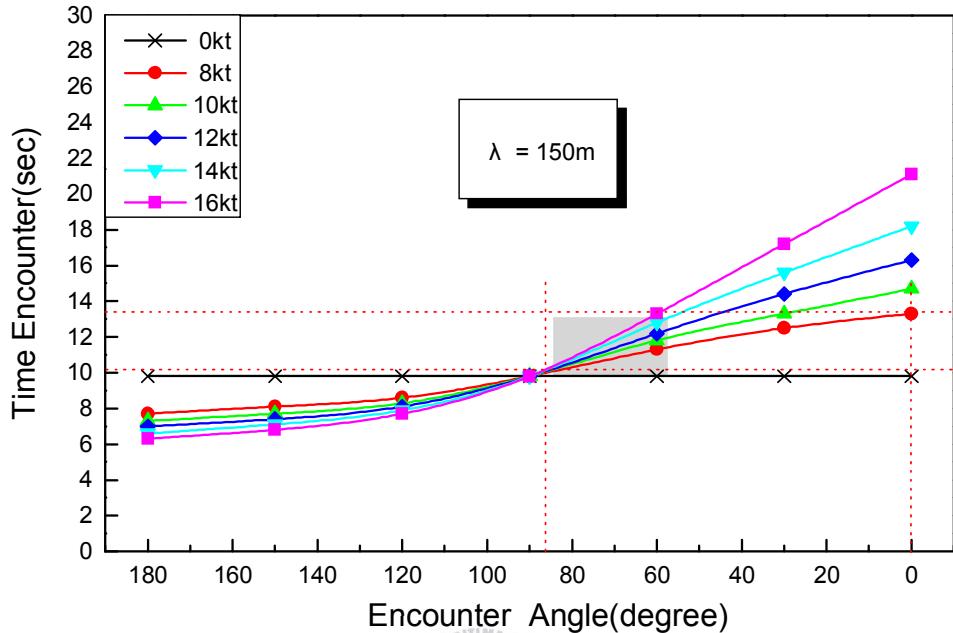


Figure 5.18 Parametric Rolling Area($\lambda=150\text{m}$)

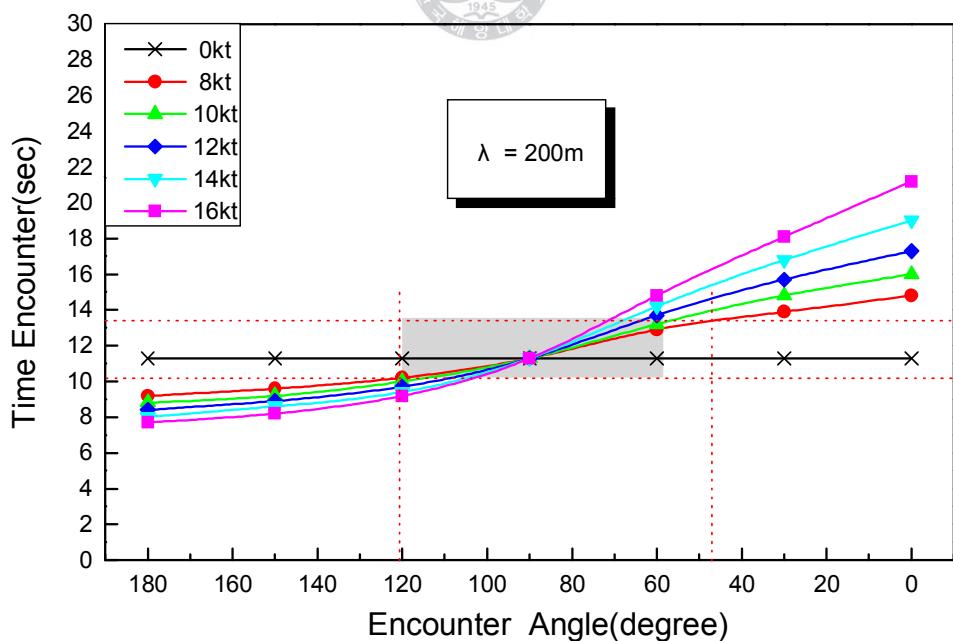


Figure 5.19 Parametric Rolling Area($\lambda=200\text{m}$)

또한, 식 (5-2)에서 $V = (V_w - \frac{\lambda}{T_R}) / \cos\theta$ 로 표현할 수 있으므로, 선박의 주요한 적화상태의 고유횡요주기를 대상으로, 다양한 해상상태의 파장별 동조횡요가 발생하는 선속 및 만남각을 Figure 5.20~5.22와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 보면, G_oM 이 점점 작아져 고유횡요주기가 10.2초에서 13.4초로 길어져감에 따라 동조횡요가 발생되는 구간이 횡파에서 점점 사추파 부근으로 옮겨감을 알 수 있다.

Figure 5.20은 만재상태($T_R=10.2$ 초)에서 파장이 50m~200m인 경우 동조횡요가 발생하는 선속 및 만남각을 나타내고 있다. 파장이 150m~200m인 경우에는 만남각 $120^\circ \sim 60^\circ$ 에 해당되는 선속구간이 넓으므로 항해 중 세심한 주의가 요구된다.

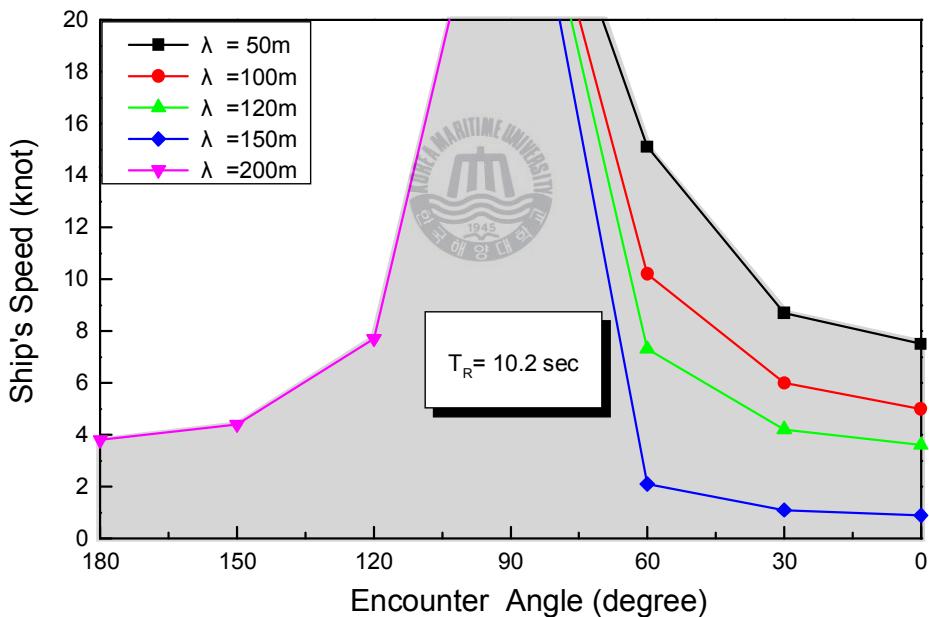


Figure 5.20 Parametric Rolling Area($T_R=10.2sec$)

Figure 5.21 및 5.22는 $T_R=11.6$ 초 및 13.4초인 경우 동조횡요가 발생하는 선속 및 만남각을 나타내고 있다. 파장이 50m~200m인 경우 동조횡요가 발생하는 구간이 정횡 후방으로 횡파 또는 사추파에 의한 동조횡요에 세심한 주의가

요구된다.

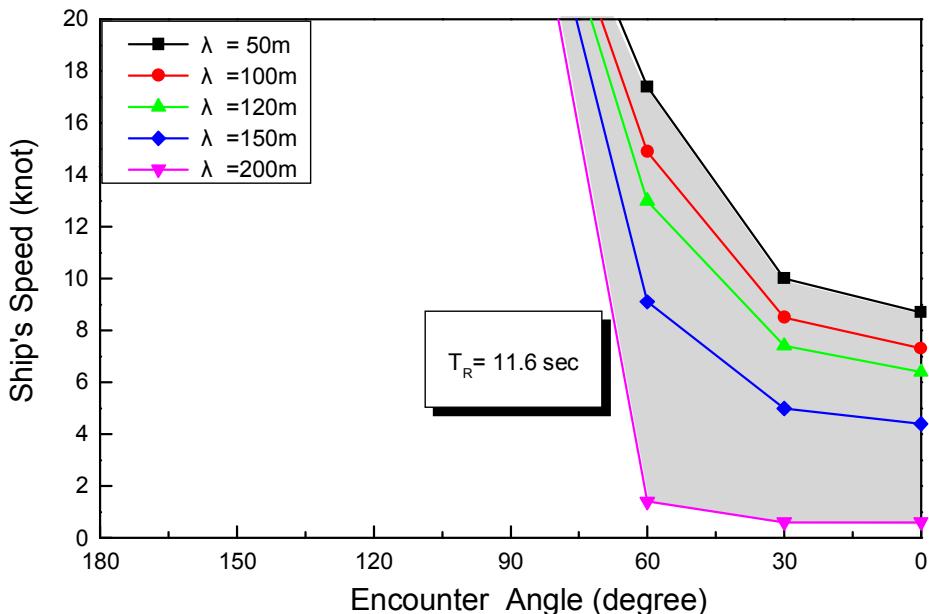


Figure 5.21 Parametric Rolling Area($T_R=11.6\text{sec}$)

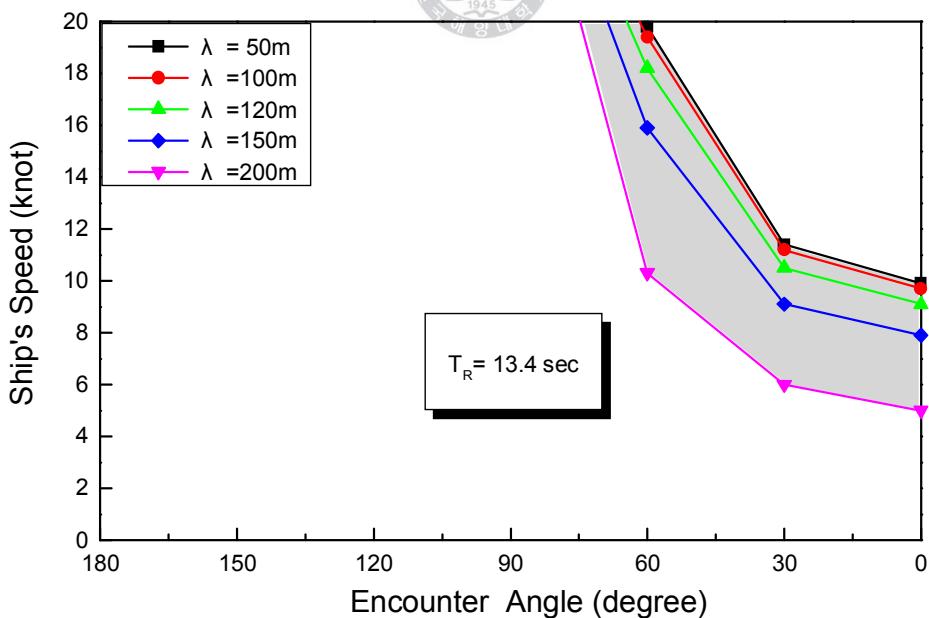


Figure 5.22 Parametric Rolling Area($T_R=13.4\text{sec}$)

5.4 요 약

실습선 한바다호의 주요 적하상태별 복원성을 계산하고, 이를 IMO 기준과 상호 비교하였다. 그리고 HMS를 이용하여 실측한 약 2년 동안의 횡요각에 대한 자료를 해상상태별로 분석하였다. 또한, 선박이 접할 수 있는 다양한 해상상태에 해당하는 파장을 대상으로, 선속 및 만남각 변화에 따른 파도와 선박간의 만남주기를 계산함으로써 동조횡요로 인한 과도한 횡요를 피할 수 있는 방안을 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 만재 상태에서 90%소모 상태로 컨디션이 변해감에 따라 G_oM 은 점점 작아지고, 바람에 의한 경사각은 복원우력의 감소와 풍압면적의 확대로 그 각이 점차적으로 커져감을 알 수 있었다. 그와는 반대로, 파도에 의한 경사각은 배수량이 점점 작아져감에 따라 그 경사각도 작아졌다. 복원우력이 가장 크게 나타난 경사각은 48° 정도이었고, 바람에 의한 경사는 90%소모 상태에서 7° 정도로 가장 크게 나타났다. 반면 파도에 의한 경사는 만재 상태에서 21.8° 정도로 가장 크게 나타났다.

둘째, 만재상태(흘수=5.9m)에서 정횡 방향 풍속이 10m/s, 20m/s, 30m/s로 작용할 경우 최대 횡경사는 각각 0.3° , 1.6° , 3.5° 로 계산되었고, 흘수 5.35m (2/3 consumed condition)에서는 최대 횡경사가 각각 0.7° , 2.9° , 6.6° 로 계산되었다.

셋째, 실습선 한바다호 운항과정에서 실측된 최대횡요각은 해상상태 6에서 사추파인 경우에 17° 로 나타났다. 그리고 해상상태 5이상에서 ITTC 내항성능 기준의 작업가능기준치인 8° 를 초과하였으며, 최대값과 $1/3$ 유의값과의 차이가 4° 이상 큰 차이를 보이고 있어 항해 중 순간적으로 발생하는 최대횡요에 세심한 주의가 요구된다.

마지막으로, 파장이 50m에서 200m로 점점 커져감에 따라 동조횡요가 발생되는 만남각의 범위가 점점 선수방향으로 확대되었다. 파장이 120m이하인 경우에는 정횡 후방의 횡파 또는 사추파에서 동조횡요가 일어나고, 파장이 150m이상

으로 길어짐에 따라 사추파 뿐만 아니라 횡파, 사향파에서도 동조횡요가 일어남을 알 수 있었다.

실측된 결과에서도 알 수 있듯이, 최대횡요가 사추파를 받으며 항해한 경우로 조사되어 동조횡요 가능성은 완전히 배제할 수 없으므로 항해 중 세심한 주의가 요구된다. 따라서, 선박이 심하게 횡요를 하게 되면 파장, 선속 및 파와의 만남각을 확인하여 동조횡요로 인한 과도한 횡요를 피해야 한다.



제 6 장 승선감 평가

해상 상태가 악화됨에 따라 선체의 동요가 점점 심해지면 인체는 피로, 인지 능력 감소, 멀미 그리고 활동성 및 숙련도 저하 등과 같은 좋지 않은 영향을 받게 된다. 그 중에서 멀미 증상은 피로와 유사하게 일단 증상이 나타나면 물리적, 심리적 측면에서 작업수행 능력이 급격히 떨어지고 정신적 활동의 지연이나 오류를 유발하며, 회복하는데 상당한 시간이 소요된다.

승선감은 인간이 감정으로 느낄 수 있는 다양한 요소(진동, 소음, 온도, 습도, 조도, 통풍, 시야 등)들이 복합적으로 결합되어 나타나지만, 이러한 제반 요소들을 모두 고려하여 정량적으로 평가하는 것은 대단히 어려운 일이다. 그러나 실제 선체동요가 일어나는 다양한 해상조건에서 항해 중인 선박에 승선 중인 승객 및 승무원의 활동과 작업 가능성을 분석하는 연구는 해상 근무환경 개선 및 작업기준 설정에 유용하게 활용될 수 있다. 또한, 여객선의 경우에는 승객의 안락함과 쾌적함에 영향을 주는 선체운동과 가속도의 영향 평가 및 승선감 향상을 위한 선박 설계기준 설정에도 이용될 수 있다.

일반적으로 내항성능은 선체운동에 기인한 해수 갑판 침입, 프로펠러 레이싱, 슬래밍, 횡요, 좌우가속도 및 상하가속도 등 내항성능 평가요소로 평가되어 왔으나, 최근에는 여객선의 경우 승객의 안락함과 쾌적함(Comfort & well-being)을 평가하는데 승객들의 멀미 발생률(Vomiting ratio) 또는 MSI(Motion Sickness Incidence) 등 다양한 기준들이 활용되고 있으며,^{51)~53)} 윤 등(2008)은 가속도를 계측하여 뱃멀미 지수(MSI)와 운동유발 작업방해회수(MII; Motion Induced Interrupt)를 계산할 수 있는 시스템을 개발하기도 하였다.⁵⁴⁾

해양사고의 80% 정도가 직·간접적으로 인적요인(Human factor)에 기인한 것으로 밝혀지면서, 1990년 초반부터 이러한 인적요인에 기인한 사고를 줄이기 위한 연구가 IMO를 비롯한 여러 연구기관에서 다양하게 진행되어 왔다. 김 등(2006)은 SCMS(Ship Control and Management System)에 항해사의 심리적인

특성을 반영한 인간공학적인 운항 알고리즘의 반영 필요성을 제기하였고,⁵⁵⁾ 김 등(2007)은 인지능력 평가시스템 개발로 인적요인에 의한 해양사고 예방 방안을 제시하였다.⁵⁶⁾

따라서, 본 논문에서는 실습선에 승선 중인 실습생들을 대상으로 설문조사를 실시하고, 멀미 증상을 호소할 당시의 해상상태 및 상하가속도와 상호 비교·분석함으로써 상하가속도가 승선감에 어떤 영향을 주는지 분석하였다. 또한, 침로와 속력을 변경하여 승선감을 향상 시킬 수 있는 운항 방안에 대하여도 검토하였다.

6.1 인체 진동에 대한 국제 표준안

ISO 9000 및 14000 Series 등 국제 표준안에 대한 관심이 산업계에 뿌리를 내리면서 사회 전반에 널리 통용되고 있다. 이러한 국제 표준안은 자동차, 철도, 항공기, 선박뿐만 아니라 휴대용 동력기구, 의자, 부품 등 산업 전반에 대해 다양한 표준을 제공하고 있다.^{57)~59)}

ISO 2631-1은 진동의 측정 방법, 고려되는 주파수 범위, 관련된 주된 인자들의 주파수 가중함수 및 진동이 건강, 안락도, 멀미에 주는 영향에 대한 지침을 제공한다. 그리고 ISO 2631-4는 도로 운송수단에서의 승차감에 영향을 주는 진동 및 회전운동의 영향 평가를 위한 지침을 제공한다. ISO 2631-5는 장기간의 진동 노출로 인한 건강 유해 작용에 대하여 규정하고, ISO 6954는 선박에서의 거주 편리성에 대한 진동의 측정 및 평가에 대한 지침을 제공한다. 그리고 ISO 9996은 진동과 저주파수 운동이 인체의 활동과 작업 수행에 주는 장애에 대하여 규정하고 있다.^{60)~64)} 이러한 멀미와 연관된 대표적인 표준안을 정리하면 Table 6.1과 같다.

Table 6.1 ISO Series concerning Motion Sickness

ISO 규정	한국산업규격(KS)	내 용
ISO 2631-1 (1997)	KS B 0710-1 (2001)	기계적 진동 및 충격 - 인체 피폭 전신 진동 의 평가 제1부 : 일반적 요구 사항
ISO 2631-4 (2001)	KS B ISO 2631-4 (2003)	기계적 진동 및 충격 - 인체 피폭 전신 진동 의 평가 제4부 : 고정된 안내 도로 수송 시스템의 승 객 및 승무원의 안락도에 미치는 진동 및 회 전운동의 영향 평가를 위한 지침
ISO 2631-5 (2004)	KS B ISO 2631-5 (2005)	기계적 진동 및 충격 - 온몸 진동에 대한 인 체 노출 평가 제5부 : 다중 충격이 포함된 진동 평가 방법
ISO 6954 (2000)	KS B ISO 6954 (2003)	기계 진동 - 승객 및 상선의 거주 편리성에 관한 진동의 측정, 기록 및 평가에 대한 지 침
ISO 9996 (1996)	KS B 0730 (2001)	기계적 진동 및 충격 - 인체 활동 및 작업 수행에 대한 장애 분류

인체에 영향을 주는 진동을 분류하는데 중요한 기준은 주파수이며, ISO 규격에서는 인체에 영향을 주는 거동을 저주파수 운동(1Hz 미만)과 진동(1~80Hz)으로 구분하고, 특히 0.1~0.5Hz의 저주파수 영역에서 멀미의 발생 가능성이 높은 것으로 분석하고 있다.⁶⁰⁾

멀미 증상(Motion sickness)은 비행기, 자동차, 선박 등 장시간 탑승하는 환경에서 많이 발생하고, 몸의 평형감각을 담당하는 귀의 전정기관과 눈으로 보는 주위 환경의 움직임(시각) 및 몸 전체에 분포된 지각에서 전달되는 정보가 서로 일치하지 않는 상황에서 저주파수 운동이 일정시간 지속되면 발생한다.

멀미발생과 연관된 변수로는 진동의 축, 진동 주파수, 진폭과 노출시간 등이 있다. 멀미 증상에 관한 진동의 평가에서 신체의 전후 또는 좌우방향의 회전운동이 멀미에 기여한다는 증거가 있지만, 0.1~0.5Hz 사이의 저주파수 영역에서는 사람을 지지하는 바닥의 상하방향 진동에 의해서 멀미의 발생이 결정된다.

멀미의 발생 가능성은 누워 있는 자세에서 감소하는데 이러한 점은 진동의 축이 신체의 상하방향이 아닌 전후방향에 있기 때문인지 혹은 누운 자세에서는 머리의 움직임이 감소하기 때문인지 그 이유는 분명하지 않다.⁶⁰⁾

그리고, 진동의 축 및 상하가속도의 진폭뿐만 아니라 주파수도 Vomiting ratio에 상당히 큰 영향을 주는데, ISO 2631-1에서는 건강, 안락함과 인지에 대하여 고려되는 주파수를 0.5~80Hz로, 멀미에 대해서는 0.1~0.5Hz로 규정하고 있다. 그리고 이러한 저주파수 운동이 가장 잘 나타나는 운송수단은 선박이며, Figure 6.1에서처럼 각 요소가 인체에 주는 영향을 주파수대에 따라 가중치로 제시하고 있다. 상하방향(Vertical)과 수평방향(Horizontal)의 가중치 곡선은 1Hz 이상에 해당되는 진동에서 가중치가 가장 높게 나타나고, 멀미와 연관이 있는 주파수 가중 곡선(Motion Sickness)은 0.125~0.25Hz의 저주파수에서 가중치가 가장 높게 나타나고 있다. 이와 같이 가중치가 가장 높게 나타나는 주파수 대역에서 멀미에 대한 영향이 가장 크고, 이를 주기(Period)로 계산해 보면 4~8초에 해당된다.

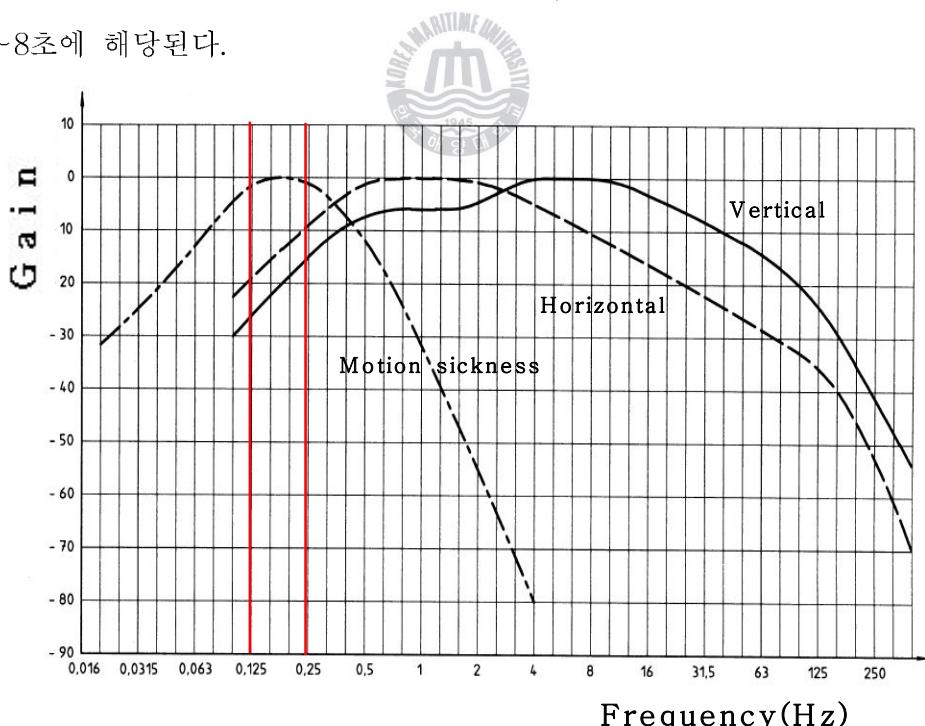


Figure 6.23 Gain Factor with Frequency Band

또한, 진동 노출시간이 증가함에 따라 멀미의 발생 가능성은 증가하고, 이에 대한 적응은 오랜 시일이 지나야 일어지며, 저주파 진동의 감수성은 개개인의 차이가 매우 크지만, 통계적으로 여성이 남성보다 멀미를 심하게 하고 나이가 많을수록 멀미의 빈도는 감소한다.⁶⁰⁾

0.5~80Hz까지의 주파수 영역에서 오랜 시간 큰 진동이 전신에 전달되면 척추와 척추신경계 및 요추부의 퇴화 등 건강손실 위험이 증가하고, 진동으로 인한 안락함과 활동성(독서, 글쓰기 등)이 저하된다. 반면, 0.5Hz 미만의 저주파수 운동에서는 인식기능과 주의력이 떨어지고 멀미가 발생함으로써 무기력함, 집중력 감소, 판단력 저하 등 작업수행에 심각한 장애를 유발하게 된다. 저주파수 운동과 진동에 기인한 인체의 활동 및 작업수행 장애의 발생 메커니즘에 대해 직접적인 간접과 간접적인 간접으로 나누어 살펴보면 다음과 같다.⁶⁴⁾

[직접적인 기계적 간접]

- 눈 내부 구조의 진동 변위에 의해 발생한 각각 입력의 감퇴(예, 눈금 읽기)
- 인체의 근육활동 출력의 방해(예, 물체의 이동)
- 건강 손실

(오랜 시간동안 높은 세기의 큰 진동이 전신에 전달되는 효과는 척추와 척추신경계의 건강 손실의 위험을 증가시킨다. 이러한 위험은 척추마디의 수평방향의 변위와 비틀림에 기인하고, 디스크 조직의 영양 공급 및 확산에 지나친 기계적인 스트레스나 장해 요인은 요추부의 퇴화를 초래할 수 있다. 일반적으로 누적 피폭량과 이를 영향은 미미한 관계가 있다고 간주되고 있지만, 현재 정량적인 관계는 아직 밝혀지지 못하고 있다. 이러한 전신진동에 의한 건강 상태의 변화는 수년이 지난 뒤 관찰된다.)

[간접적 또는 생리적 중추신경계에서의 간접]

- 시각 및 청각 기능의 감퇴
- 전정기관의 감퇴로 인한 자세 불안정 또는 방향 감지 능력 감퇴

- 근육과 같은 감지계통이나 관련된 신경통로의 장애
- 멀미증상과 같은 인지의 갈등과 주의력 산만에 의한 혼란
(비행기 멀미, 배 멀미 등과 같은 멀미증상은 흔하게 경험되지만, 때때로 생리적으로 회복되지 못 할 정도의 장애를 가져오는데, 이들은 보통 0.1Hz~1Hz 범위의 운동이나 진동에 피폭되었을 때 나타난다. 다양한 증상이 사람을 괴롭히고 심할 경우에는 개인 또는 단체에 대해 동기부여, 집중, 일반적인 활동과 작업수행에 대해 즉각적이고 심각한 장애를 유발한다. 그러나 지속적이거나 반복적인 자극에 피폭됨으로써 그 효과는 줄어들게 된다.)
- 졸음증상 또는 긴장수준의 변화
- 피로 증가
(피로는 인체의 다양한 수행능력을 떨어뜨리는 생리학적인 개념으로, 주의력을 감퇴시키고, 계산이나 추론에 있어서 정신적인 활동의 자연이나 오류를 유발시키고, 동기부여의 감소와 수행중인 작업의 포기 또는 무관심 등을 유발한다.)

6.2 가속도 변화에 따른 승선감 조사 · 분석



승선감 평가 시 고려할 사항은 선체운동에 기인한 가속도뿐만 아니라 당시의 소음, 진동, 온도, 습도 등의 주변 환경과 대상자의 출항 전 신체 컨디션 등을 종합적으로 분석해야 된다. 이를 수행하기 위한 하나의 방법으로 여러가지 어려움이 따르겠지만 개인의 신체 반응들을 직접적으로 계속 관측하는 것과 설문조사를 통하여 승선감을 평가하는 것이다.

6.2.1 승선감 조사

승선감과 가장 밀접한 관계가 있는 멀미증상이 어떤 요인에 의해 발생되고, 일단 멀미증상이 유발되면 어떤 현상이 초래되는지 설문조사를 통하여 분석하

였다. 설문조사 내용은 Table 6.2와 같다.

1차 설문조사는 2007년도 1학기 승선중인 해사대학 3학년 실습생 73명과 연안항해 중 함께 승선한 해운경영학부 학생 56명을 평가 대상자로 5월 1일 실시하였다. 다음으로 2차 및 3차 설문조사는 2007년도 2학기 승선중인 해사대학 3학년 실습생 91명을 대상으로 실시하였으며, 2차는 9월 19일 연안항해 중에 실시하였고, 3차는 10월 17일 원양항해 중에 실시하였다. 3차례에 걸쳐 실시한 설문조사 당시의 해상상태는 5~6(유의파고 3.25~5.0m)이었다. 당시의 상하가속도를 살펴보면, Figure 6.2에서와 같이 0.3~0.6g이었고, 이는 ‘3.1.1의 해상상태에 따른 가속도 비교’에서 분석된 결과와 유사하다. 해당 날짜의 HMS 상하가속도 측정 결과와 항해일지(Log book) 기록은 Figure 6.3~6.5 및 Table 6.3~6.5와 같다.

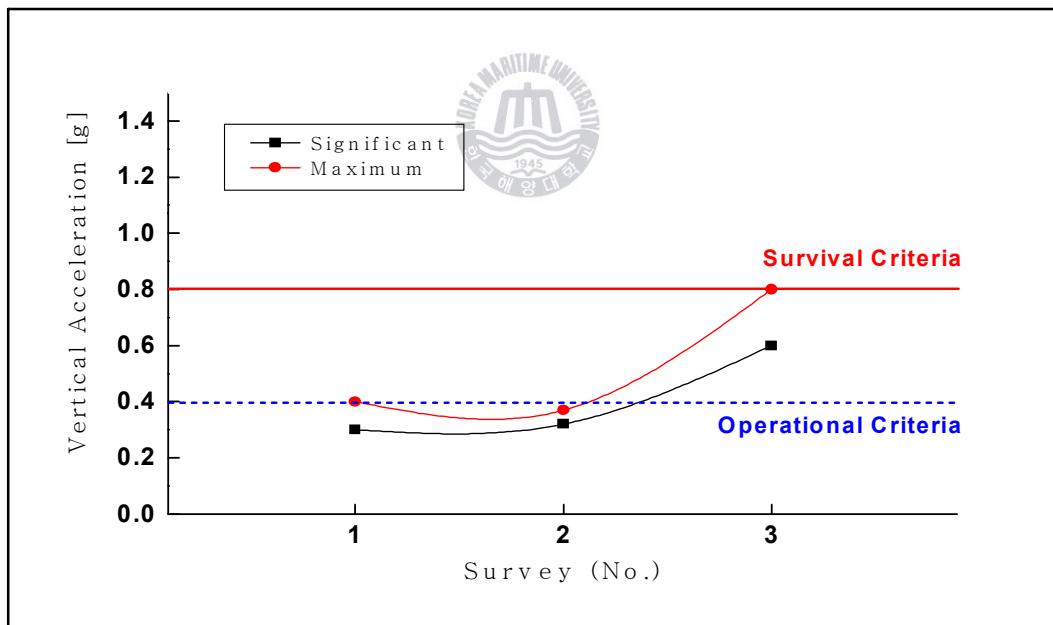


Figure 6.24 Vertical Acceleration on Survey

Table 6.2 Boarding Comfort Questionnaire

실습선 한바다호 승선감 조사

200 년 월 일 시

학 과		출생년월일		성 별	1) 남 2) 여
신체조건	신장: 체중: 혈액형:	안경 착용여부	1) 예 2) 아니오	평소 체력상태	1) 강함 2) 보통 3) 약함
		주 량	1) 소주 ()병 2) 전 혀 못함		
과거승선체험 (25m이상 선박)	1) 있다 (회) 2) 없다	멀미 경험 유무 (복수응답)	1) 차량 2) 비행기 3) 선박 4) 놀이기구 5) 없다 6) 기타()	1) 매우 좋다 2) 좋다 3) 보통 4) 좋지 않다 5) 매우 나쁘다	
자신의 평소 성격 (복수응답)	1) 급하다 2) 느긋하다 3) 환경에 민감하다 4) 친화력(적극적)이 있다 5) 소심(온순, 조용)하다 6) 기타 ()	승선하기 이전의 신체 컨디션	4), 5)번 응답자의 원인(복수응답) ① 음주 ② 수면부족 ③ 피로함 ④ 긴장함(두려움) ⑤ 감기(몸살) ⑥ 신체적 질병 ⑦ 기타 ()	1) 매우 좋다 2) 좋다 3) 보통 4) 좋지 않다 5) 매우 나쁘다	

1. 승선 중 체감하는 선내 온도는?	1) 덥다 2) 약간 덥다 3) 알맞다 4) 약간 춥다 5) 춥다
2. 선내 공기 환기에 대한 느낌은?	1) 매우 좋다 2) 좋다 3) 보통이다 4) 나쁘다 5) 매우 나쁘다
3. 멀미약 복용(착용) 여부는?	1) 복용(착용)하지 않았다 2) 복용(착용)했다 (회)
4. 항해중 멀미증상을 느꼈는가?	1) 예 2) 아니오
※ 만약 멀미증상을 느꼈다면 5항부터 9항까지 응답 요함.	
5. 멀미증상이 있는 경우 신체에 어떤 변화를 느꼈는가? (복수응답)	1) 두통(무기력함) 2) 복통(매스꺼움) 3) 식은 땀(땀이 남) 4) 졸립(하품) 5) 시각 장애 6) 청각 장애 7) 구토 8) 기타 ()
6. 멀미증상에 가장 영향을 미치는 요소는 어느 것이라고 생각하는가? (해당요소 우선순위 별로 번호를 아래에 기입) []	1) 자신의 건강상태 2) 선체좌우운동 (롤링) 3) 선체상하운동(괴칭) 4) 선내 온도/환기 5) 피로도/수면부족 6) 선내 식사 7) 선내 진동/소음 8) 기타 ()
7. 멀미 증상을 느끼기 시작한 시점은 언제부터인가?	1) 승선 직후 2) 출항 직후 3) 기상 악화(롤링, 괴칭) 이후 4) 식사 이후(음식 먹은 후) 5) 기타 ()
8. 멀미 증상이 회복되는 시점은?	1) 기상호전(선체동요 감소) 2) 멀미약 복용 3) 일정 휴식(수면, 침실 안정) 4) 입항 5) 기타 ()
9. 멀미증상이 초래하는 현상은? (복수응답)	1) 아무것도 하기 싫다(무기력함) 2) 판단력 저하(당직에 지장) 3) 집중력 감소(수업에 지장) 4) 움직임(활동)이 힘들다 5) 승선기피 현상 유발 6) 업무수행 불가 7) 기타 ()
10. 실습선 한바다호에 대한 금번항해의 전반적인 승선감(순수한 승선감을 의미함)을 평가한다면?	1) 매우 좋았다 2) 좋았다 3) 보통이다 4) 나쁘다 5) 아주 나쁘다

Figure 6.3 및 Table 6.3은 2007년 5월 1일 실시한 1차 설문조사 당시의 상하가속도 측정 결과와 항해일지의 기록을 나타낸다. 당시의 해상상태는 5이고, 측정된 상하가속도는 0.3g이다.

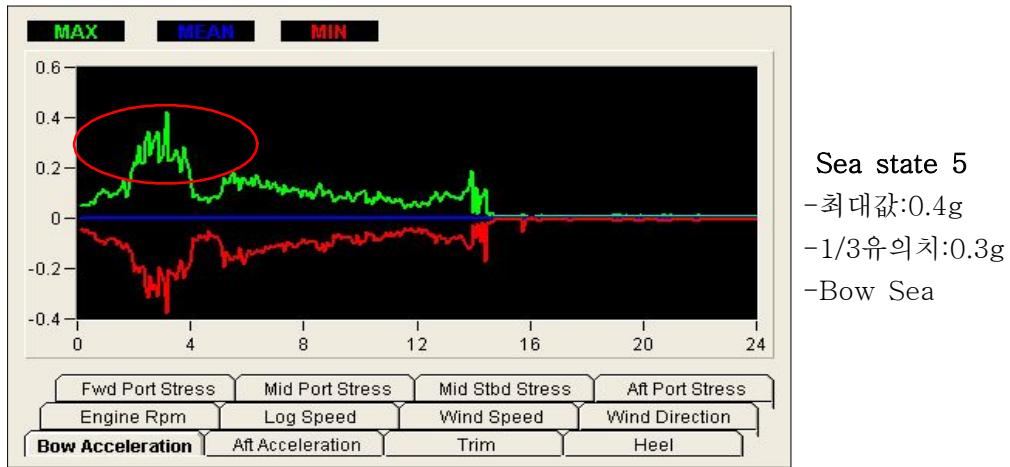


Figure 6.25 Vertical Acceleration(2007. 5. 1)

Table 6.3 Records of Log Book(2007. 5. 1)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Wr.	Temp.
07043016	34-20N 126-01E	247	16.00	SW	3	2	Rain	18
07043020	34-06N 126-45E	265	16.50	E	4	3	Rain	18
07043024	33-32N 126-00E	180	16.25	SW	6	5	O'cast	16
07050104	33-14N 126-53E	062	16.75	SW	6	5	O'cast	17
07050108	34-01N 127-50E	052	17.00	SW	5	5	O'cast	15
07050112	34-43N 128-54E	030	16.75	SW	5	5	O'cast	20

Figure 6.4 및 Table 6.4는 2007년 9월 19일 실시한 2차 설문조사 당시의 상하가속도 측정 결과와 항해일지의 기록을 나타낸다. 당시의 해상상태는 5이고, 측정된 상하가속도는 0.32g이다.



Sea State 5
 - 최대값 : 0.37g
 - 1/3유의값 : 0.32g
 - Head Sea

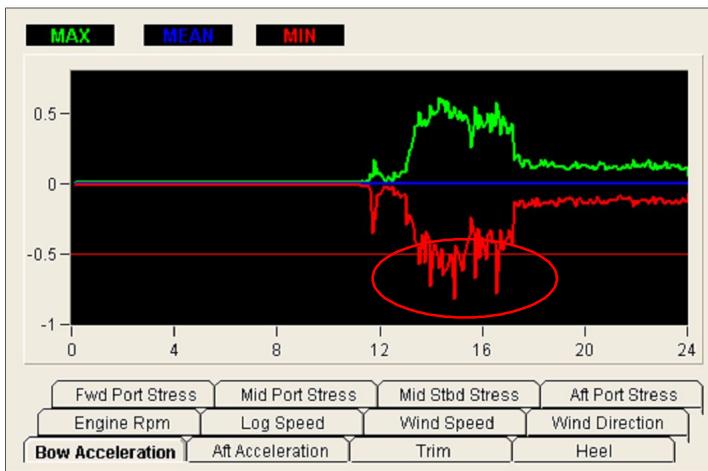
Figure 6.26 Vertical Acceleration(2007. 9. 19)

Table 6.4 Records of Log Book(2007. 9. 19)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Wr.	Temp.
07091816	34-08N 127-48E	072	10.75	E	7	6	O'cast	25
07091820	34-27N 128-30E	058	13.00	NE	7	5	O'cast	24
07091824	35-05N 129-15E	036	13.50	NE	6	5	O'cast	24
07091904	35-53N 129-40E	014	13.75	N	5	5	O'cast	24
07091908	35-13N 129-46E	222	14.50	S	3	4	O'cast	25

Figure 6.5 및 Table 6.5는 2007년 10월 17일 실시한 3차 설문조사 당시의 상하가속도 측정 결과와 항해일지의 기록을 나타낸다. 당시의 해상상태는 5(6)이

고, 측정된 상하가속도는 0.6g이다.



- Sea State 5(6)
- 최대값 : 0.8g
 - 1/3유의값 : 0.6g
 - Bow/Beam Sea

Figure 6.27 Vertical Acceleration(2007. 10. 17)

Table 6.5 Records of Log Book(2007. 10. 17)

Date	Position	True Course	Speed	Wind Direction	Wind Force	Sea State	Wr.	Temp.
07101712	16-10N 108-19E	117	12.00	NE	5	3	O'cast	26
07101716	15-52N 109-08E	165	14.25	NE	5	5(6)	O'cast	27
07101720	14-40N 109-20E	165	17.50	N	5	5(6)	O'cast	26
07101724	13-34N 109-46E	165	17.75	NNW	5	5(6)	Rain	27
07101804	12-25N 109-52E	175	18.00	N	4	4	O'cast	27

6.2.2 승선감 분석

Table 6.6에서 보듯이, 1차 및 2차 설문조사에서 멀미증상을 호소하는 전체 비율이 66% 및 65%로 거의 비슷하였고, 당시의 상하가속도를 분석한 결과 0.3 ~0.4g로 나타났다. 3차 설문조사에서는 멀미증상을 호소하는 비율이 73%로 다소 높게 나타났고, 당시의 상하가속도도 0.6~0.8g로 높게 관측되었다. 그리고

구토 비율도 멀미 비율이 높아짐에 따라 비례하여 높게 나타났으며, 남성보다는 여성이 멀미를 많이 하는 것으로 조사·분석되었다.

또한, 항해 중 해상상태 4(0.2g)이하에서는 멀미증상을 호소하는 학생들을 거의 볼 수 없었던 점으로 보아 멀미증상을 느끼기 시작하는 가속도의 크기가 해상상태 5(0.2~0.4g)부터임을 확인할 수 있었다. 이는 ITTC에서 제시하고 있는 작업가능 기준치인 0.4g와도 비슷한 결과이다.

Table 6.6 Percentage of Seasickness & Vomiting

No.	Date	Male	Female	Total	Remark
1	2007. 5. 1	56/95(59%)	29/34(85%)	85/129(66%)	sickness
		15/95(16%)	11/34(32%)	26/129(20%)	vomiting
2	2007. 9.19	38/68(56%)	17/17(100%)	55/85(65%)	sickness
		8/68(12%)	5/17(29%)	13/85(15%)	vomiting
3	2007. 10.17	47/71(66%)	19/19(100%)	66/90(73%)	sickness
		15/71(21%)	11/19(58%)	26/90(36%)	vomiting

설문조사 결과, 멀미증상을 느낀 사람(A)과 멀미증상을 느끼지 않은 사람(B)으로 나누어 항목별로 분석한 결과는 Figure 6.6 및 Figure 6.7과 같다. 평소의 체력상태, 승선하기 이전의 신체 컨디션, 선내 온도 및 환기, 멀미약 복용 여부 등을 항목별로 분석한 결과, A와 B가 크게 차이를 보이지 않는 것으로 보아 멀미증상을 일으키는 직접적인 요인이라기보다는 신체가 심하게 흔들리는 조건에서 멀미증상을 촉진시키는 보조적인 요인으로 사료된다. 하지만, 멀미경험 유무 항목에서는 큰 차이가 나타나는데, 차량 및 비행기를 비롯한 기타 운송수단에 의한 멀미 경험을 가진 사람이 선박에서도 멀미를 많이 하는 것으로 분석되었다.

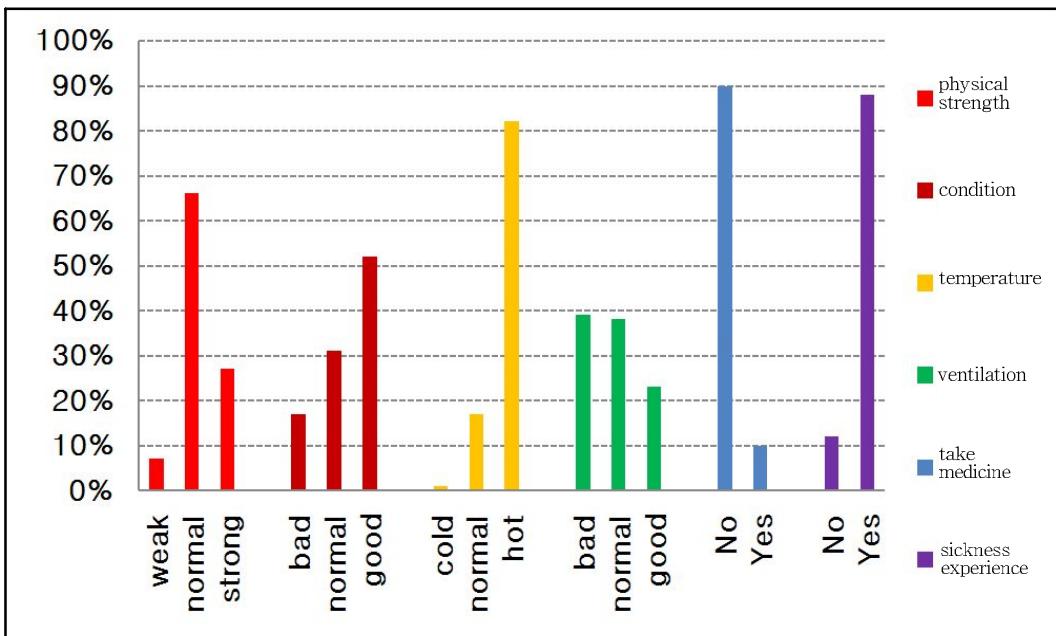


Fig.6.6 Cadets having Motion Sickness(A)

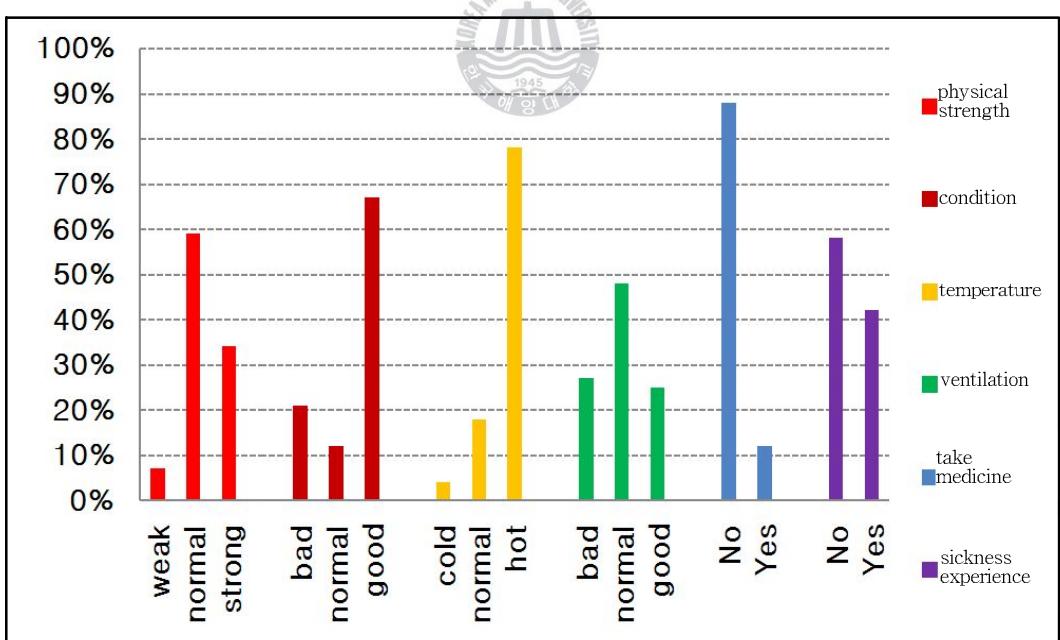


Fig.6.7 Cadets not having Motion Sickness(B)

Figure 6.8~6.10은 멀미증상을 유발시키는 요소(환경), 멀미증상으로 인하여 발생되는 생리적 현상 그리고 멀미증상이 초래하는 부정적인 영향을 멀미증상을 느낀 사람(A)을 대상으로 조사한 결과이다.

Figure 6.8에서 알 수 있듯이 멀미에 가장 많은 영향을 주는 요소는 롤링 및 피칭(상하가속도로 판단되지만, 쉽게 느낄 수 있는 롤링 및 피칭으로 설문조사 실시함)과 같은 선체동요(61%)로 확인되었다. 그리고 건강상태, 피로(수면부족), 선내온도/환기 등도 멀미를 유발하는 원인으로 조사되었다.

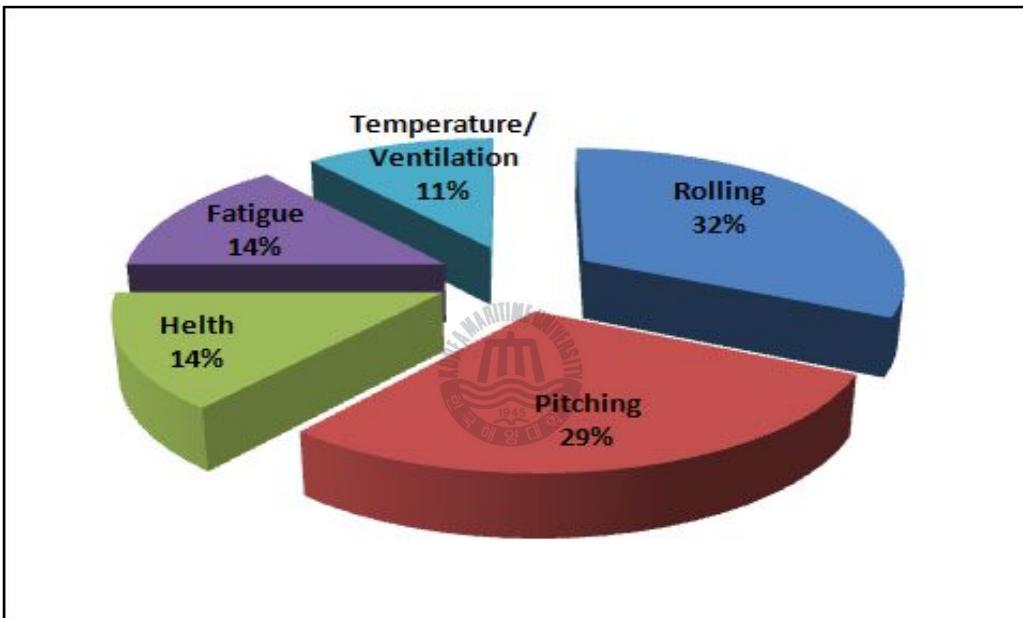


Figure 6.30 Influencing Factors to Motion Sickness

Figure 6.9는 멀미로 인하여 나타나는 생리적 현상을 나타내며, 복통(매스꺼움), 두통(무기력함), 졸립(하품), 식은땀(땀이 남) 등의 현상이 나타나는 것으로 조사되었다.

Figure 6.10은 멀미증상이 초래하는 부정적인 영향을 나타내며, 무기력함, 움직이기 불편함, 집중력 감소, 판단력 저하 등의 현상이 나타나는 것으로 조사되었다. 이러한 멀미로 인한 부정적인 현상은 항해당직을 수행하는 당직자에게 정신적 활동의 지연이나 오류 유발 가능성을 증대시킨다. 이는 인적요인에 의한 해양사고와

직접적인 연관이 있을 것으로 추정되며, 향후 보다 세심한 검토가 요구된다.

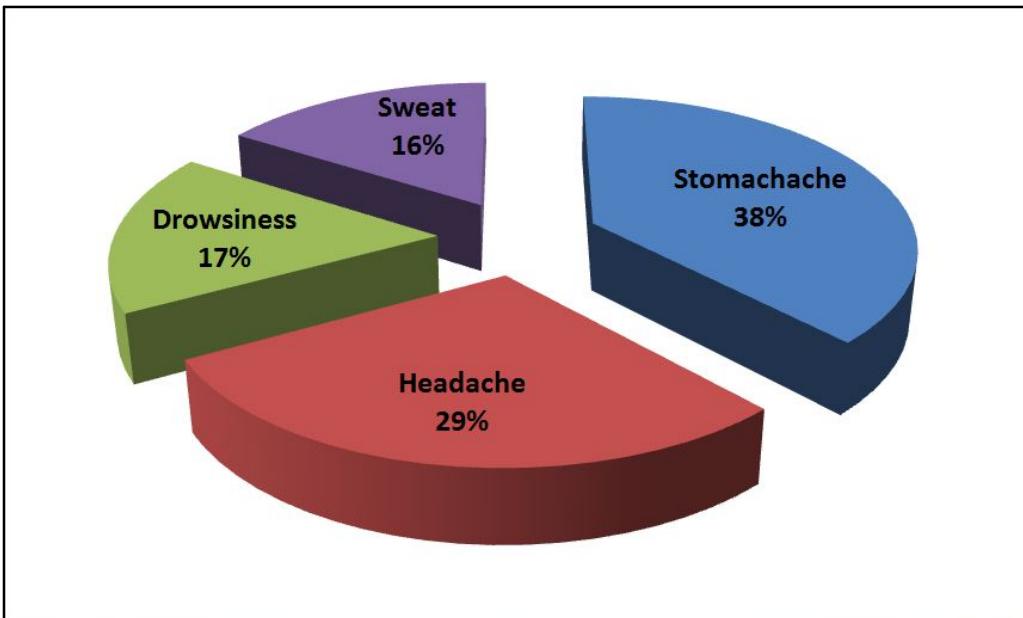


Figure 6.31 Symptoms with Motion Sickness

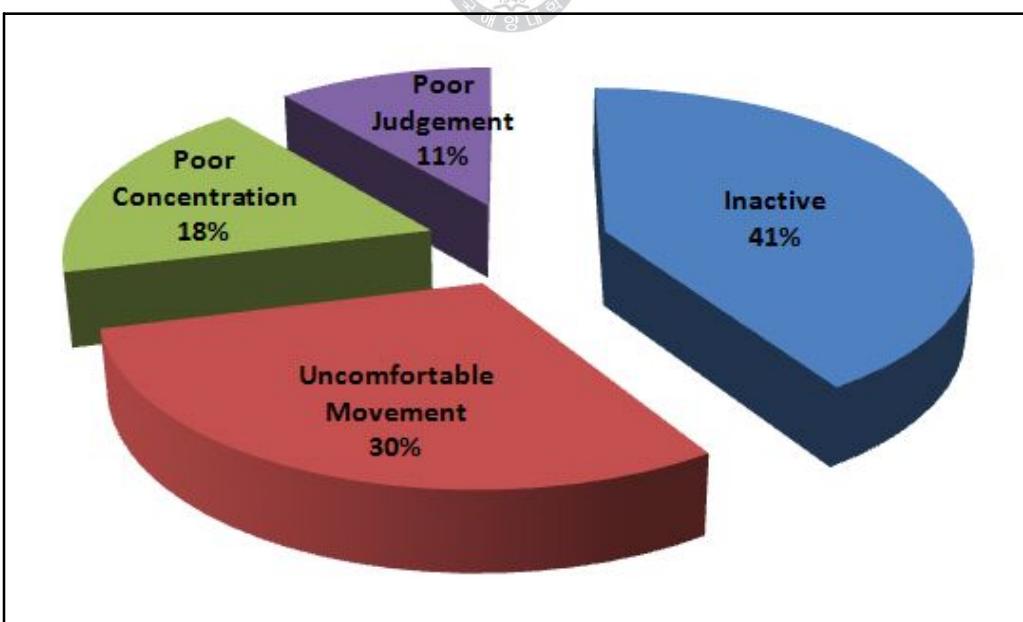


Figure 6.32 Undesirable Phenomena with Motion Sickness

6.3 승선감 향상을 위한 운항 방안

설문조사 결과에서도 알 수 있듯이, 멀미 증상이 시작되는 상하가속도의 크기는 약 0.3g이고, 또한 그 크기(진폭)가 커질수록 멀미의 발생률이 크게 조사되었으므로, 승선감을 향상시키기 위해서는 상하가속도를 최대한 낮추어 항해하는 것이 바람직하다.

특히, 여객선과 같이 승선감이 중요한 선박에서는 ‘3.1.2 선박과 파도의 만남 각에 따른 가속도 비교’에서와 같이 침로를 변경하여 파도와의 만남각을 조절함으로써 상하가속도를 상당히 줄일 수 있으므로 가속도의 크기에 의한 멀미의 발생을 감소시킬 수 있다.

또한, 주파수 가중곡선(Figure 6.1)에 나타난 바와 같이 4~8초 사이의 주기가 멀미 증상을 초래하는데 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서, 실제 해상에서 실습선 한바다호가 이와 동일한 주기로 동조하는 조건을 분석하여 이를 피함으로써 주파수에 의한 승선감 저하를 줄일 수 있다.

해상에서 발생 가능한 파장, 주기, 파도와 선박간의 만남각, 파속, 선속 등을 변수로 만남주기(T_E)를 산출하는 방법은 다음과 같다.

$$T_E = \frac{\lambda}{V_w - V \cos\theta} \quad \text{단, } V_w = 1.25 \sqrt{\lambda}$$

T_E : 만남주기 λ : 파장 V_w : 파속 V : 선속

θ : 선박과 파도와의 만남각 ($180^\circ = Head Sea$)

해상에서 접하기 쉬운 몇 가지 파장을 대상으로 선속 및 파와의 만남각에 대해 선박과 파도와의 만남주기를 산출하고, 선속과 침로를 어떻게 유지해야 멀미 발생을 줄일 수 있는지 파장별로 제시하면 Figure 6.11~6.14와 같다.

Figure 6.11은 파장이 50m인 경우로, 선박이 정지해 있거나 모든 선속에서 횡파(Beam sea)를 받으며 항해할 경우 선박과 파도와의 만남주기가 약 6초에 해당된다. 하지만, 여기서 논의되는 만남각은 선수방향에서 파도를 만남으로써 상하가속도가 크게 느껴지는 경우에 한정되며, 선박이 정지 중에 선수방향에서 파도를 접할 경우 만남주기가 4~8초로 멀미의 발생률이 다소 높게 나타날 것으로 판단된다.

이와 같은 해상에서는 전방에서 파도를 받으며 항해해야 할 경우 속력을 높여 항해함으로써 주파수에 의한 멀미 발생률을 줄일 수 있다.

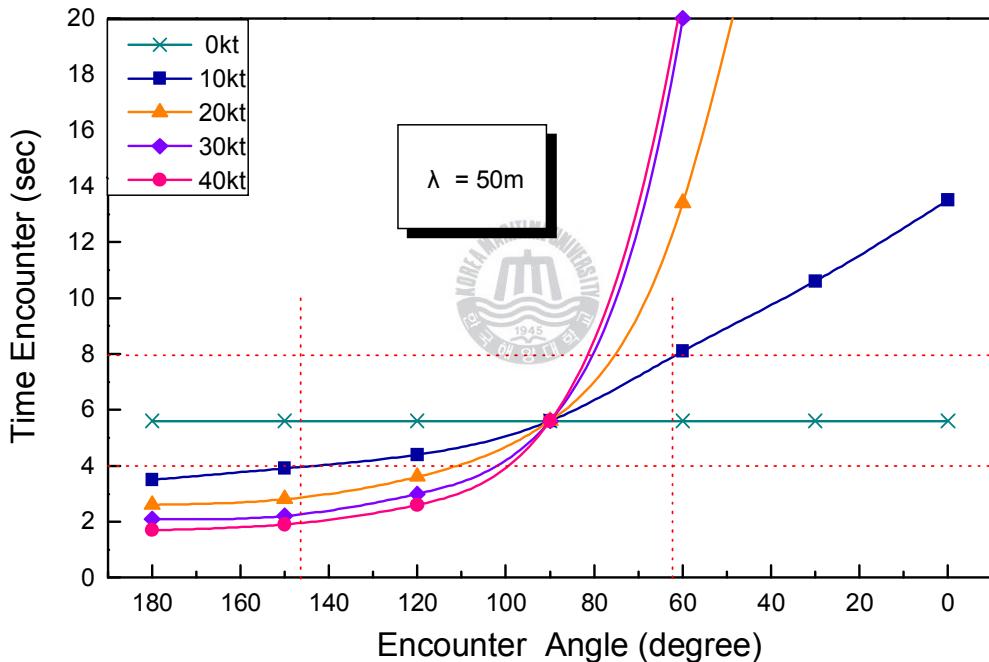


Figure 6.33 Encounter Period with Encounter Angle($\lambda=50m$)

Figure 6.12와 Figure 6.13은 파장이 각각 100m와 150m인 경우로, 전방에서 파도를 받으며 항해를 해야 하는 경우 선속을 높이거나 또는 낮추어도 만남 주기가 대부분 4~8초의 범위에 해당되므로 주파수에 의한 멀미의 발생률이 상당히 높을 것으로 판단된다.

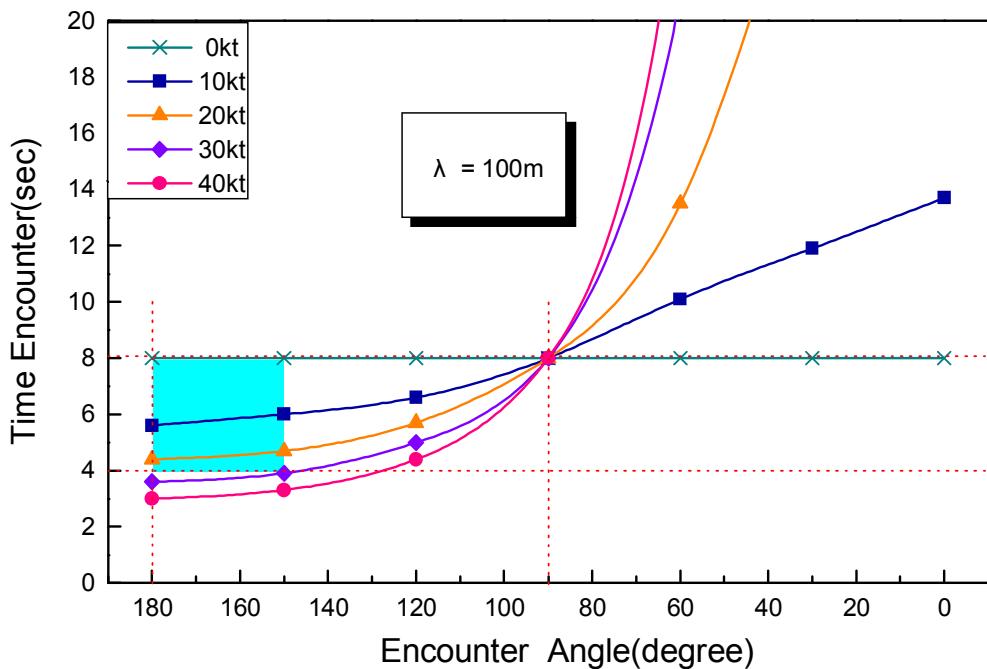


Figure 6.34 Encounter Period with Encounter Angle($\lambda=100\text{m}$)

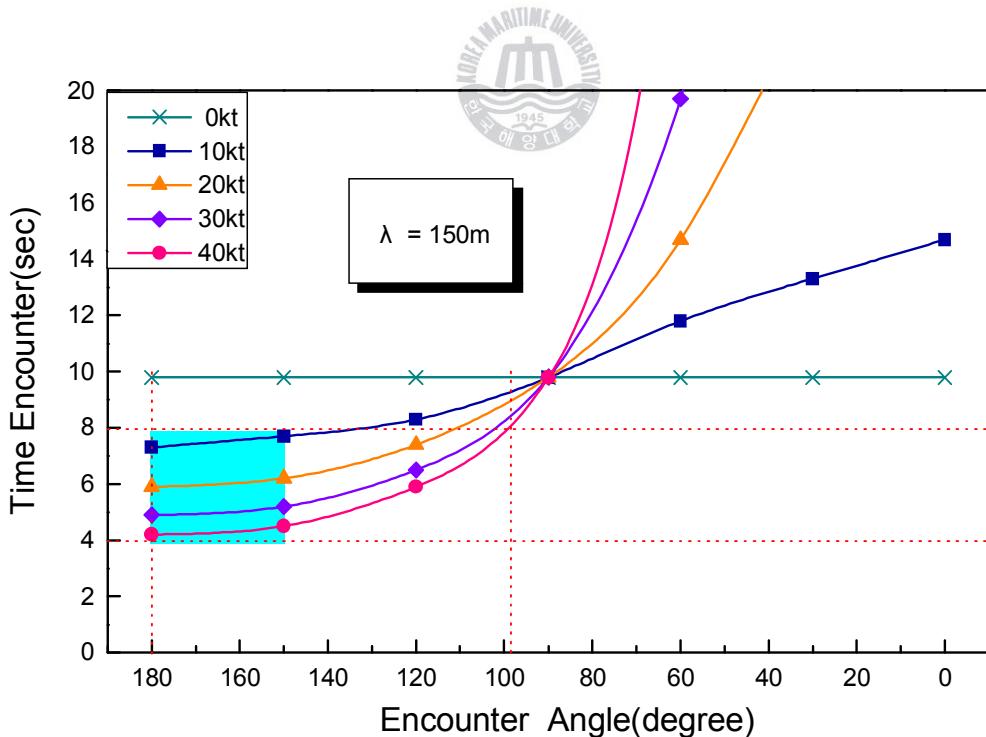


Figure 6.35 Encounter Period with Encounter Angle($\lambda=150\text{m}$)

그리고, Figure 6.14는 파장이 200m인 경우로 선수방향에서 파도를 받더라도 선속을 10knot 이하로 낮추게 되면 주파수에 의한 멀미 발생률을 줄일 수 있다.

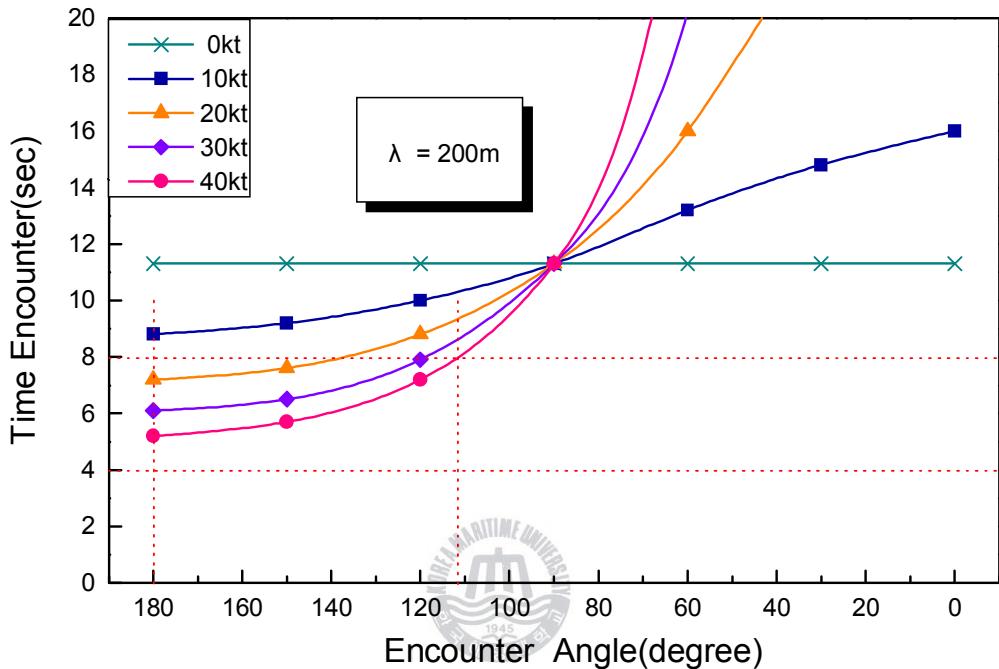


Figure 6.36 Encounter Period with Encounter Angle($\lambda=200m$)

따라서, 멀미 발생률 관점에서만 본다면 해상상태에 따라 파장이 50m이하로 짧으면 속력을 10knot 이상으로 가능한 고속 운항하고, 파장이 100~150m인 경우에는 가능한 정횡 후방에서 파를 받도록 침로를 유지하며, 파장이 200m 이상으로 길면 10knot 이하로 저속 운항하여 만남 주기가 4~8초의 범위에서 벗어나게 함으로써 멀미 발생률을 줄일 수 있다.

이와 동시에 여객선과 같이 승객의 안락함과 쾌적함을 중요시 하는 선박은 선박의 크기(톤수)를 증대하여 이를 보완할 수 있다.

6.4 요 약

승선감과 가장 밀접한 관계가 있는 멀미증상이 어떤 요인에 의해 발생되고, 멀미증상이 유발되면 어떤 현상이 초래되는지 확인하였다. 또한 멀미 현상을 억제하기 위한 운항 방안에 대하여 검토하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 멀미 발생률이 65%~73%를 보인 당시의 해상상태는 5~6(유의파고 3.25~5.0m)이었고, 당시의 상하가속도는 0.3~0.6g로 조사되었다. 하지만, 해상 상태 4(0.2g)이하에서는 멀미증상을 호소하는 학생이 거의 없었던 점으로 보아 멀미증상을 느끼기 시작하는 상하가속도의 크기는 해상상태 5(0.2~0.4g)이상으로 분석되었다.

둘째, 멀미에 가장 많은 영향을 주는 요소는 롤링 및 피칭 등 선체의 동요이며, 멀미로 인하여 나타나는 증상으로는 복통, 두통, 졸림, 식은땀 등이었고, 멀미증상이 초래하는 현상으로는 무기력함, 움직이기 불편함, 집중력 감소, 판단력 저하 순으로 분석되었다.

마지막으로, 가속도의 진폭뿐만 아니라 주파수도 멀미에 상당히 큰 영향을 주므로, 파장별로 선박과 파도와의 만남각 및 선속에 따른 만남주기를 계산하여, 주기가 4~8초의 범위에서 벗어나게 함으로써 멀미를 줄일 수 있는 운항 방안을 제시하였다. 실습선 한바다호는 파장이 100~150m인 해상을 선수에서 파도를 받으며 항해 할 경우 해당 저주파수 운동이 유발되어 멀미의 발생 가능성이 높을 것으로 확인되었다.

이러한 연구 결과는 여객선에서의 객실배치와도 연관되며, 운항중인 선박에서는 상하가속도를 실시간으로 측정하여 필요시 선속 또는 침로 변경으로 승선감 향상이 가능하다. 또한, 멀미증상으로 인한 다양한 신체적 기능 저하는 인적 요인에 의한 해양사고로 진전될 수 있으므로, 향후 멀미증상과 해양사고 또는 피로도와의 상관관계에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

제 7 장 결 론

본 논문에서는 선박의 운항성능을 종합적으로 판단하기 위하여 실습선 한바다호를 대상으로 내항성능, 조종성능, 복원성능 그리고 승선감에 대하여 검토하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

< 내항성능 평가 >

실습선 한바다호 인수 후 약 2년간의 연안항해와 원양항해를 통하여 측정한 가속도, 슬래밍, 횡요, 종요, 선속, 풍속, 파고 등 각종 자료를 분석하여 실습선 한바다호의 내항성능을 평가하였다. 내항성능 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 비교적 파장이 큰 대양에서의 상하가속도는 해상상태 4에서 0.2g이하로 계측되었고, 해상상태 7에 가까워 갈수록 0.8g를 넘어 1.3g에 이르렀다. 이는 ITTC에서 규정하고 있는 작업가능기준치 0.4g 및 생존가능 기준치 0.8g보다 다소 높은 결과이다.

둘째, 동일한 해상 조건에서는 선박이 파도를 선수방향에서 받으며 항해할 때 상하가속도가 가장 높게 측정되었으며, 선미에서 가장 낮게 측정되었다.

셋째, 연안항해보다는 대양항해에서의 상하가속도가 0.1g정도 높게 측정되었는데, 이는 대양에서 파장이 커기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 실측된 상하가속도를 선체운동 계산 프로그램에 적용하여 평가한 결과, 해상상태가 거칠어짐에 따라 위험도가 증가하는 경향을 보이고, 해상상태 7에서는 위험도가 1을 초과하여 위험함을 알 수 있었다. 특히, 선수파일 때의 프로펠러 레이싱과 슬래밍, 횡파일 때의 좌우가속도와 횡요가 다른 평가요소에 비하여 위험도가 큰 것으로 평가되었다. 따라서 해상상태 7이상에서는 적절한 침로 유지와 선속의 감소가 필요할 것으로 판단된다.

이러한 결과는 앞으로 경험할 수 있는 다양한 해상상태에서 선박의 항해위험도가 어느 정도인지 예측 가능함으로써 보다 안전한 선박운항이 가능하고, 초

기 설계과정에서부터 불필요한 부분을 제거함으로써 보다 우수한 성능의 선박을 건조하는데 이용 가능하다.

< 조종성능 평가 >

다양한 선회시험을 통하여 실습선 한바다호의 조종성능을 확인하고 이를 IMO 조종성 기준과 비교하였다. 그리고 선박을 안전하게 조종하는데 중요한 지표가 되고 있는 선박의 조종성지수인 선회성지수(K)와 추종성지수(T) 및 신침로거리를 산출하였다. 또한, 풍압력에 의한 표류각과 선수회두를 억제하기 위한 대용타각을 제시하였고, 안전 접·이안을 위한 Bow Thruster 및 예인선의 사용에 대해서도 제안하였다. 마지막으로, 태풍 등 강풍에 대비한 선박의 묘박 안전성 평가를 실시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 좌현(Port)으로 선회한 경우가 우현(Starboard)으로 선회한 경우보다 선회권이 작게 나타났으며, 이 값은 타각이 작아질수록 더욱 더 커져감을 알 수 있었다. 또한, 12.6kts로 속력이 작은 경우가 17.6kts로 속력이 큰 경우보다 선회권이 작게 나타났다. 따라서 타 선박과의 충돌상황이 아닌 전방의 장애물을 피하기 위한 상황에서는 속력을 낮추고 좌현으로 전타하는 것이 보다 유리할 것으로 판단된다.

둘째, 좌현으로 타각을 10° , 20° 및 35° 사용하여 조종성 지수를 산출하였다. 선회성 지수(K)는 각각 $0.1/\text{sec}$, $0.05/\text{sec}$ 및 $0.06/\text{sec}$ 이고, 추종성 지수(T)는 각각 20초, 17초 및 13초이다. 실습선 한바다호는 다른 선박과 비교하여 조타에 빨리 대응하는 능력이 다소 떨어지나(T' 가 상대적으로 큼), 일단 선회가 시작되면 빠른 각속도로 선회하는 능력이 비교적 우수한 것으로 조사되었다(K' 가 상대적으로 큼). 따라서 실습선 한바다호의 경우 선회과정에서 선회경은 다소 작아질 수 있으나, 전진거리(종거)가 길어질 수 있으므로 전방의 위험물 회피에 주의가 요구된다.

셋째, 원침로로부터 신침로가 각각 30° , 60° 및 90° 인 경우 우현으로 전타(35°)하여 변침하였을 때 신침로 거리는 각각 125m, 205m, 300m로 확인되었다. 타각

을 20° 로 사용하면 신침로 거리는 각각 200m, 300m, 425m 그리고, 타각을 10° 로 사용하면 신침로 거리는 각각 210m, 340m, 525m로 확인되었다. 이와 같은 신침로 거리는 충돌회피 조선 또는 일반적인 피항동작에 유용하게 이용될 수 있으며, 연안항해 시에는 변침점을 결정하고 변침동작을 취할 때 어느 정도의 신침로 거리만큼 여유를 두고 조타 명령을 내려야 할지 결정하는데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

넷째, 실습선 한바다호는 상대풍향 $\Theta = 60^{\circ}$ 및 120° 에서 풍속 10m/s, 15m/s, 20m/s가 작용하면 선체는 각각 8.82tonf, 19.84tonf, 35.27tonf(1tonf=9.8kN)의 풍압력을 받는 것으로 계산 되었다. 그리고 표류각은 상대풍향이 60° 에서 최대값을 나타내며, 풍속 · 선속비가 2, 3, 4일 경우 각각 1.3° , 3.0° , 5.4° 로 계산되었다. 반면, 대응타각의 경우 상대풍향이 120° 에서 최대값을 나타내는데, 풍속 · 선속비가 2, 3, 4일 경우 각각 4.5° , 10.3° , 18.3° 로 나타났다.

다섯째, 접 · 이안 작업이 부두와 평행하게 이루어진다고 가정할 때, 선수에 Bow Thruster를 사용하고 선미에 중마력 예인선 1척만을 사용하여 접 · 이안 가능한 풍속은 10m/s까지로 계산되었다. 만약 풍속이 10m/s를 초과하게 되면 선수에도 예인선을 1척 추가하여 운용하는 것이 바람직하다.

마지막으로, 진해만에서 단표박을 실시하였을 경우에는 파주력만으로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속은 약 30m/s이었고, 제진표를 사용한 경우에는 스윙 현상의 감소로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속은 약 30m/s보다 다소 커질 것으로 예상된다. 또한, 양현표쇄를 모두 9 Shackle 내어 주었을 때에는 파주력만으로 외력에 대항할 수 있는 한계풍속이 약 40m/s임을 알 수 있었다. 따라서, 실습선 한바다호가 양현표를 모두 사용하여 최대로 벼틸 수 있는 한계풍속이 40m/s임을 감안한다면 적정한 시기에 엔진의 사용을 고려해야 할 것이다.

< 복원성능 평가 >

실습선 한바다호의 주요 적하상태별 복원성을 계산하고, 이를 IMO 기준과 상호 비교하였다. 그리고 HMS를 이용하여 실측한 약 2년 동안의 횡요각에 대

한 자료를 해상상태별로 분석하였다. 또한, 선박이 접할 수 있는 다양한 해상상태에 해당하는 파장을 대상으로, 선속 및 만남각 변화에 따른 파도와 선박간의 만남주기를 계산함으로써 동조횡요로 인한 과도한 횡요를 피할 수 있는 방안을 제시하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 만재 상태에서 90%소모 상태로 컨디션이 변해감에 따라 G_oM 은 점점 작아지고, 바람에 의한 경사각은 복원우력의 감소와 풍압면적의 확대로 그 각이 점차적으로 커져감을 알 수 있었다. 그와는 반대로, 파도에 의한 경사각은 배수량이 점점 작아져감에 따라 그 경사각도 작아졌다. 복원우력이 가장 크게 나타난 경사각은 48° 정도였고, 바람에 의한 경사는 90%소모 상태에서 7° 정도로 가장 크게 나타났다. 반면 파도에 의한 경사는 만재 상태에서 21.8° 정도로 가장 크게 나타났다.

둘째, 만재상태(흘수=5.9m)에서 정횡 방향 풍속이 10m/s, 20m/s, 30m/s로 작용할 경우 최대 횡경사는 각각 0.3° , 1.6° , 3.5° 로 계산되었고, 흘수 5.35m (2/3 consumed condition)에서는 최대 횡경사가 각각 0.7° , 2.9° , 6.6° 로 계산되었다.

셋째, 실습선 한바다호 운항과정에서 실측된 최대횡요각은 해상상태 6에서 사추파인 경우에 17° 로 나타났다. 그리고 해상상태 5이상에서 ITTC 내항성능 기준의 작업가능기준치인 8° 를 초과하였으며, 최대값과 $1/3$ 유의값과의 차이가 4° 이상 큰 차이를 보이고 있어 항해 중 순간적으로 발생하는 최대횡요에 세심한 주의가 요구된다.

마지막으로, 파장이 50m에서 200m로 점점 커져감에 따라 동조횡요가 발생되는 만남각의 범위가 점점 선수방향으로 확대되었다. 파장이 120m이하인 경우에는 정횡 후방의 횡파 또는 사추파에서 동조횡요가 일어나고, 파장이 150m이상으로 길어짐에 따라 사추파 뿐만 아니라 횡파, 사향파에서도 동조횡요가 일어남을 알 수 있었다.

실측된 결과에서도 알 수 있듯이, 최대횡요가 사추파를 받으며 항해한 경우로 조사되어 동조횡요 가능성을 완전히 배제할 수 없으므로 항해 중 세심한 주의가 요구된다. 따라서 선박이 심하게 횡요를 하게 되면 파장, 선속 및 파와의

만남각을 확인하여 동조횡요로 인한 과도한 횡요를 피해야 한다.

< 승선감 평가 >

승선감과 가장 밀접한 관계가 있는 멀미증상이 어떤 요인에 의해 발생되고, 멀미증상이 유발되면 어떤 현상이 초래되는지 확인하였다. 또한 멀미 현상을 억제하기 위한 운항 방안에 대하여 검토하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 멀미 발생률이 65%~73%를 보인 당시의 해상상태는 5~6(유의파고 3.25~5.0m)이었고, 당시의 상하가속도는 0.3~0.6g로 조사되었다. 하지만, 해상 상태 4(0.2g)이하에서는 멀미증상을 호소하는 학생이 거의 없었던 점으로 보아 멀미증상을 느끼기 시작하는 상하가속도의 크기는 해상상태 5(0.2~0.4g)이상으로 분석되었다.

둘째, 멀미에 가장 많은 영향을 주는 요소는 롤링 및 피칭 등 선체의 동요이며, 멀미로 인하여 나타나는 증상으로는 복통, 두통, 졸림, 식은땀 등이었고, 멀미증상이 초래하는 현상으로는 무기력함, 움직이기 불편함, 집중력 감소, 판단력 저하 순으로 분석되었다.

마지막으로, 가속도의 진폭뿐만 아니라 주파수도 멀미에 상당히 큰 영향을 주므로, 파장별로 선박과 파도와의 만남각 및 선속에 따른 만남주기를 계산하여, 주기가 4~8초의 범위에서 벗어나게 함으로써 멀미를 줄일 수 있는 운항 방안을 제시하였다. 실습선 한바다호는 파장이 100~150m인 해상을 선수에서 파도를 받으며 항해 할 경우 해당 저주파수 운동이 유발되어 멀미의 발생 가능성이 높을 것으로 확인되었다.

이러한 연구 결과는 여객선에서의 객실배치와도 연관되며, 운항중인 선박에서는 상하가속도를 실시간으로 측정하여 필요시 선속 또는 침로 변경으로 승선감 향상이 가능하다.

< 후속 연구 >

이상의 연구 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구를 바탕으로 다음과 같은 후속 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

첫째, 선박에서의 가속도는 위치에 따라 그 크기가 다르고 선형 및 선박의 크기에 따라 다르므로 일률적으로 그 기준을 정하기 어렵겠지만, 다양한 실선시험을 통하여 확인 가능할 것이다. 따라서 ITTC 내항성능 기준도 실선계측 부분에서 미진했던 연구 부분을 보완할 필요성이 있고, 앞으로 보다 다양하고 충분한 실선시험을 실시함으로써 기존에 제시되어 왔던 기준치 및 측정위치에 대한 다각적인 연구·검토가 필요할 것으로 판단된다.

둘째, 선박이 최근 대형화되면서 수면상부의 구조물이 상대적으로 큰 선박들은 풍압력의 영향을 크게 받을 것으로 판단되나, 현재의 항만법에 따른 주요 항만의 예선 사용 세칙에서는 비교적 양호한 기상에서의 예선의 사용 척수 및 마력만을 제시하고 있다. 따라서 태풍 등 강풍이 예상될 때 이러한 대형선들의 안전 접·이안을 위한 예인선 사용 기준에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로, 멀미증상으로 인한 다양한 신체적 기능 저하는 인적요인에 의한 해양사고로 진전될 수 있으므로, 향후 멀미증상과 승무원의 작업가능성 또는 피로도 및 해양사고와의 상관관계에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

參 考 文 獻

- [1] Rameswar Bhattacharyya, “Dynamics of Marine Vehicles”, Jone Wiley & Sons, 1978
- [2] 해양안전심판원, “해양사고 통계 바다”, 인터넷자료(<http://www.kmst.go.kr>)
- [3] ITTC, “Report of Seakeeping Committee”, Proceedings of ITTC, 1981
- [4] 김순갑, “선박의 파랑중 내항성능 평가에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제11권 제1호, 1987
- [5] 김순갑·박문수·공길영, “선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제18권 제2호, 1994
- [6] 김순갑·공길영, “선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제21권 제2호, 1997
- [7] 김순갑·이상민·이충로, “실시간 기상정보를 이용한 선박의 종합내항성능 평가에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제22권 제2호, 1998
- [8] 조익순·이충로·김순갑, “선박 탑재용 종합내항성능 평가시스템 개발을 위한 기초적 연구”, 한국항해학회지, 제20권 제2호, 2000
- [9] 김순갑·이충로·공길영, “선박의 종합내항성능 평가정보제공시스템 개발에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제25권 제3호, 2001
- [10] 김철승·정창현·김순갑·공길영·설동일·이윤석, “연안 여객선의 내항성능 위험도를 이용한 항해 안전성 평가에 관한 연구”, 한국해양환경안전학회지, 제9권 제1호, 2003
- [11] 공길영·이상민·김철승, “선박 탑재형 내항성능 평가시스템 개발(I)”, 한국항해항만학회지, 제28권 제1호, 2004
- [12] 김병진, “선체가속도를 이용한 항해안전성 평가시스템 개발”, 한국해양대학교대학원 박사학위논문, 2006
- [13] 김철승·이윤석·공길영·정창현·김대해·조익순, “선체운동 평가를 위한 다목적 계측시스템 개발에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제29권 제10호, 2005
- [14] 김대해, “항해중인 선박의 내항성능평가를 위한 선체운동계측시스템 개발”, 한국해양대학교대학원 석사학위논문, 2006

- [15] 공길영 · 김철승, “황천항해중인 선수선교선의 내항성능평가기준 설정 방안에 관한 연구”, 한국해양환경안전학회지, 제7권 제3호, 2001
- [16] E.N. COMSTOCK · S.L. BALES · R.G. KEANE, “Seakeeping in Ships Operations”, Proc. 5th SNAME STAR Symp., 1980
- [17] E.N. COMSTOCK · R.G. KEANE, “Seakeeping by Design”, Naval Engineers Journal, Vol. 92, No. 2, 1980
- [18] 細田龍介·小山初見 等, “船舶の初期設計における耐航性能の総合的評價に関する研究”, 日本造船學會集, 第153号, 1983
- [19] A.R.J.M. LLOYD, “Seakeeping ; Ship Behaviour in Rough Weather”, Ellis Horwood Limited, 1989
- [20] ARJ.M LLOYD · R HOSODA · D.W. ROBINSON · K NICHOLSON · G. VICTORY, “Seakeeping”, Philosophical transactions of the Royal Society of London, 1991
- [21] 元良成三, “船體と海洋構造物の運動學”, 成山堂, 1992
- [22] 高木乾雄, “運動性能の研究動向-耐航性に関する研究”, 日本造船學會誌, 第756号, 1992
- [23] 溝口純敵, “運動性能の研究動向-耐航性に関する研究”, 日本造船學會誌, 第774号, 1993
- [24] 斎藤公男, “運動性能の研究動向-耐航性に関する研究”, 日本造船學會誌, 第788号, 1995
- [25] 平山次清, “運動性能の研究動向-耐航性に関する研究”, 日本造船學會誌, 第808号, 1996
- [26] K. SARIOZ · E. NARLI, “Effect of Criteria on Seakeeping Performance Assessment”, Ocean Engineering, 2005
- [27] 조권희 · 이형기 · 이진욱 · 김문상, “실습선 한바다”, 한국해양대학교, 2007
- [28] Global Maritime Engineering, “Hull Stress Monitoring System(Operational Manual)”
- [29] 三宅龍二 外, “大波高波浪中を航行する大型コンテナ船の波浪荷中にに関する研究”, 日本造船學會論文集, 第195号, 2004

- [30] S.G. TAN, "Advanced Experimental Facilities and Techniques for Seakeeping Research", Fourth Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, 2000
- [31] 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, "한국해양대학교 DWT 5,900톤급 실습선 선형 연구(이론성능해석, 운동성능시험, 선형추진시험)", 2003
- [32] 福地信義 外, "船舶の近代化における安全性・信頼性確保のための安全論とシステム設計", 西部造船學會 第99回 論文集, 2000
- [33] 이윤석, "실습선 한나라호에 작용하는 풍압력 및 풍압모우멘트 영향에 관한 연구", 한국항해항만학회지, 제31권 제3호, 2007
- [34] Gil-Yong KONG · Yun-Sok LEE · Sang-Min LEE, "A Study on the Modeling of Transitional Lateral Force Acting on the Berthing Ship by CFD", KSME International Journal, vol.18, 2004
- [35] E. SAMUELIDES · P. FRIEZE, "Experimental and Numerical Simulation of Ship Collisions", Proc. 3rd Int. Congress on Marine Technology, vol.1, 1984
- [36] 강창구, "IMO 조종성 기준 제정 및 대책", 대한조선학회지, 제29권 제2호, 1992
- [37] IMO Res. A.751(18), "Interim Standards for Ship Maneuverability", 1994
- [38] 이승진 · 김수정, "초기설계시 선박의 조종성능 추정에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제32권 제4호, 1995
- [39] K. KIJIMA · Y. NAKIRI, "On the Practical Method for Prediction of Ship Maneuvering Characteristics", Proc. of the Fource Conference for New Ship and Marine Technology, 2004
- [40] Ichiro AOKI · Katsuro KIJIMA · Yoshitaka FURUKAWA · Yasuaki NAKIRI, "On the Prediction Method for Maneuverability of a Full Scale Ship", Journal of Marine Science and Technology, vol.3, 2006
- [41] 윤점동, "선박조종의 이론과 실무", 세종출판사, 2002
- [42] Toshifumi FUJIWARA · Michio UENO · Yoshiho IKEDA, "Cruising Performance of Ships with Large Superstructures in Heavy Sea(I)", Journal of Marine Science and Technology, vol.2, 2005

- [43] Toshifumi FUJIWARA · Michio UENO · Yoshiho IKEDA, "Cruising Performance of Ships with Large Superstructures in Heavy Sea(II)", Journal of Marine Science and Technology, vol.3, 2006
- [44] Toshifumi FUJIWARA · Michio UENO · Tadashi NIMURA, "Estimation of Wind Forces and Moments acting on Ships", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.183, 1998
- [45] S. INOUE · M. HIRANO · K. KIJIMA, "Hydrodynamic Derivatives on Ship Maneuverability", ISP, vol.28, 1981
- [46] 공길영 · 김철승 · Hiroyuki Sadakane, "선회중 전복한 저건현 내항 맹커의 복원성에 관한 연구(1)", 한국항해항만학회지, 제26권 제1호, 2002
- [47] 김철승 · 공길영 · 김순갑, "선회중 전복한 저건현 내항 맹커의 복원성에 관한 연구(2)", 한국항해항만학회 2002년도 춘계학술대회논문집, 2002
- [48] IMO Res. A. 749(18), "Amendments to the Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments", 2006
- [49] 한국선급, "선급강선규칙 ; 부록 1-2 : 비손상시의 복원성 기준", 2007
- [50] M. LEVADOU · L. PALAZZI, "Assessment of Operational Risks of Parametric Roll", Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers, vol.111, 2004
- [51] J.F. O'HANLON · M.E. MCCUALEY, "Motion Sickness Incidence as a Function of the Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion", Aerospace Medicine, 1974
- [52] Yoshiho IKEDA · Takako KURODA, "Evaluation of Seakeeping Performance of a Passenger Ship from the Point of View of Seasickness", Fourth Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, 2000
- [53] Kimio SAITO · Katsuya MAEDA · Yasushi OHKURA · Isamu SATO, "Evaluation of Seakeeping Performance of a Passenger Ship from the Point of View of Seasickness", Fourth Osaka Colloquium on Seakeeping Performance of Ships, 2000

- [54] 윤현규 · 이경중 · 이동곤, “선박의 운동 운항환경 모니터링 시스템 개발”, 한국항해항만학회지, 제32권 제1호, 2008
- [55] 김비아 · 이재식 · 김종도 · 오진석, “선박조종과 안전항해를 위한 항해사와 SCMS의 상호작용”, 한국항해항만학회지, 제30권 제10호, 2006
- [56] 김홍태 · Mike Barnett · 양원재, “충돌시나리오 기반의 항해사 인지능력 평가시스템 개발”, 한국항해항만학회지, 제31권 제8호, 2007
- [57] 장한기, “저주파수 진동이 인체에 미치는 영향과 응용”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2001
- [58] 정완섭 · 권휴상, “인체 진동소음의 인체영향에 대한 국내외 기술조사”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2001
- [59] 정완섭 · 최재본, “인체진동에 대한 ISO와 KS 표준안의 비교 분석”, 한국소음진동공학회 창립 10주년 기념 소음진동 학술대회 논문집, 2000
- [60] ISO 2631-1, “Mechanical vibration and shock; Evaluation of human exposure to whole body vibration”, 1997
- [61] ISO 2631-4, “Mechanical vibration and shock; Evaluation of human exposure to whole body vibration”, 2001
- [62] ISO 2631-5, “Mechanical vibration and shock; Evaluation of human exposure to whole body vibration”, 2004
- [63] ISO 6954, “Mechanical vibration; Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships”, 2000
- [64] ISO 9996, “Mechanical vibration and shock; Disturbance to human activity and performance”, 1996