

벌크선의 積載狀態에 따른 航海安全性 評價에 관한 研究

김 순 갑* · 김 병 진** · 이 충 로***

A Study on the Navigational Safety Evaluation in accordance to Loading Condition in Bulk Carrier

Soon-Kap Kim · Byeong-Jin Kim** · Choong-Ro Lee****

〈目 次〉	
Abstract	3. 벌크선의 항해안전성 평가
Nomenclature	4. 적재상태에 따른 항해안전성 평가
1. 서 론	5. 결 론
2. 항해안전성 평가요소와 그 상관 관계	참고문헌

Abstract

A method for quantitative evaluation of the navigational safety of a bulk carrier according to different loading conditions is presented here.

Generally, the navigational safety of a ship in various loading condotions is evaluated by a loading manual. However, the loading manual of ship handles only statical factors such as weight and buoyancy of ship without including any wave conditions. Practically ship's safety is much concerned with ship's actions on the rough sea as propeller racing, rolling, deck wetness, vertical acceleration, lateral acceleration, and slamming. These phenomenonena are occurred not by wave or ship's conditions independently but by coreactions of wave and ship's conditions.

Response amplitude of ship's motion is manipulated by ordinary strip method(OSM) on a given bulk carrier of 170,000 deadweight tonnage under 6, 7, 8 and 9 Beaufort scale of sea states.

Author applied each response amplitude of ship's motion induced by OSM to short-crested and irregular waves for stochastic process of phenomenonena on navigational safety of the bulk carrier.

* 한국해양대학교 해사대학 해사수송과학과
** 부산해사고등학교
*** 한국해기연수원

And the occurrence probability of the phenomenon is calculated by Rayleigh's joint probability density function according to different speed and loading conditions of the ship. Utilizing the evaluation indices, the dangerousness, the maximum dangerousness and the evaluation diagram on the results, author depicted the general safety evaluation diagram.

In order to make evaluation simple and effective, author adopted propeller racing and ship's rolling as the representative factors on navigational safety in bulk carrier through clarifying the correlation of factors of stochastic process.

The simulation model of the study is 259.00m Lpp, 170,000 d.w.t, single screw, diesel engine operated bulk carrier. And the loading conditions adopted are four, homogeneous full loaded, half loaded, heavy ballast loaded, and normal ballast loaded conditions.

This study has presented some different results of dangerousness on ship's varied loading conditions. By applying the evaluation diagrams, navigators are able to avoid dangerousness by keeping away of the danger encountering angle of wave direction which the diagram shows.

This evaluation method may be useful for developing the practical safety evaluation system of ships as well as human beings and cargoes at sea.

Nomenclature

E_{X_i}	임의 요소의 평가치
$E_{X_{ic}}$	임의 요소의 한계평가치
g	중력가속도
GM	선체 횡경사시의 Metacentric Height
$H_{1/3}$	해양파의 $1/3$ 유의파고
$H_{X_i}(\omega, V, \chi - \theta)$	항해안전성 평가요소의 응답함수
$N_+(X_{ic}; 0 \leq \tau \leq t + \Delta t)$	한계치를 정(+)으로 횡단할 평균횟수
Q_{X_i}	확률 과정 X_i 가 일정값을 초과할 확률
$Q_{X_{ic}}$	한계치 X_{ic} 를 초과할 한계확률
$Q(X_{ijc})$	확률과정 $X_i(t), X_j(t)$ 가 독립인 경우에 동시에 한계치 X_{ic}, X_{jc} 를 초과할 확률
$q(X_i)$	Rayleigh분포의 1차원 확률밀도함수
$q(\bar{X}_i, \bar{X}_j)$	Rayleigh분포의 2차원 표준 결합확률밀도함수
S	해상상태
$S_{X_i}(\omega, \chi)$	항해안전성 평가요소의 스펙트럼

$S_{\zeta}(\omega)$	장파정 해양파 스펙트럼
$S_{\zeta}(\omega, \theta)$	단파정 해양파 스펙트럼
T_0	해양파의 평균파주기
V	선박의 속도
X_i	항해안전성 평가요소
X_{ic}	항해 안전성 평가요소의 한계치
\bar{X}_i	확률밀도를 표준편차로 무차원한 값
$X_i(t)$	항해안전성 평가요소의 확률과정
$\rho(X_i, X_j)$	항해안전성 평가요소의 상관계수
σ_{X_i}	항해안전성 평가요소의 표준편차
$\sigma^2_{X_i}$	항해안전성 평가요소의 분산치
μ_{X_i}	항해안전성 평가요소의 위험도
μ_m	항해안전성 평가요소의 최대위험도
$v_+(X_{ic}; \tau)$	단위시간당 한계치를 정(+)로 횡단할 평균횟수
ω	해양파의 주파수
χ	선박과 파와의 만남각

1. 서 론

인간과 기계가 유기적으로 결합하여 출항지에서 기항지까지 최적의 항로와 속력을 택하여 안전하고 경제적으로 운항되는 시스템인 선박이 대양을 항행중 야기될 수 있는 위험현상으로는 1) 타선과의 충돌 및 좌초의 위험 2) Deck wetness에 의한 갑판, 화물, 구조물의 손상 3) Propeller racing에 의한 주기관의 손상 4) 대동요에 의한 화물의 붕괴 및 복원성의 상실 5) 슬래밍에 의한 선저의 손상 6) 과대한 가속도에 의한 화물의 손상 7) 과대한 종굽힘 모우먼트에 의한 선체의 파손 8) 풍파로 인한 자연적 감속에 의한 조종의 불가능성 등이 있다.¹⁾

현재 선박의 운항자인 선장 또는 항해사가 확보하여야 할 선박의 항해안전 정도인 항해안전성의 지표로는 선급에서 인정한 적화지침서에 의한 견현, 정적복원력이나 전단력, 종굽힘모우먼트 등의 감항성이 있으나 감항성 평가만으로는 상기 1)~8)까지에서 제시한 위험현상에 대한 충분한 평가를 할 수 없으므로 선박의 운항목적과 적재상태에 따른 선박의 고유능력에 맞게 항해안전성 평가 될 것이 요구 되어진다.

본 연구에서는 항해안전성 평가를 위하여 파랑중에서의 운동응답치를 계산하고, 기존 내항성요소의 확률과정론적 상관관계를 규명하여, 선체 중형운동의 대표적 평가요소인 Propeller racing과 Rolling을 새로운 항해안전성 평가요소로 채택하였다. Rayleigh확률밀도함수를 이용하여 계산함으

로써 Bulk선의 적재상태에 따른 각 해상별, 선속별 최대위험도를 계산하여 인명, 선체, 화물의 안전을 고려한 항해안전성 평가를 실시하였다.

본 연구에 있어서 수치계산의 대상선으로서는 현재 운항되고 있는 Lpp=259(m), D.W.T 170,000 (ton)급인 Bulk선을 이용한다. 그리고, 적재상태는 하기만재배수량 상태인 Homo. Loading Condition, 화물 반적재상태인 Half Loading Condition과 Heavy Ballast Condition, Normal Ballast Condition의 네가지 경우에서 선속과 해상상태에 따른 항해안전성을 평가·검토하였다.

2. 항해안전성 평가요소와 그 상관관계

2.1. 해양파 스펙트럼과 평가요소의 분산치

2.1.1. 해양파 스펙트럼

해양파의 스펙트럼(Spectrum)으로는 몇가지가 통용되고 있으나, 여기에서는 국제선체구조회의 (ISSC)에서 채용한 장파정 해양파 스펙트럼인 Modified Pierson-Moskowitz형 스펙트럼을 사용한다.²⁾

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

단, $H_{1/3}$ 은 1/3유의파고의 크기, T_0 는 평균파주기

또한, 실제해면에 가깝게 표현되는 파 스펙트럼의 방향성 분포에 관해서는 파의 평균 진행방향에 대해 $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ 의 범위에서 $\cos^2\theta$ 분포하고 그 이외의 범위에서는 Zero로 가정하면 방향성분을 고려한 단파정 해양파 스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.³⁾

$$S_x(\omega, \theta) = \frac{2}{\pi} \cdot S(\omega) \cos^2\theta; \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

$$= 0 \quad ; \text{그 밖의 경우}$$

단, θ 는 파의 평균 진행방향과 요소파가 이루는 각도

2.1.2. 항해안전성 평가요소와 그 분산치

불규칙한 해상에서 인명, 선체, 화물의 안전을 고려하여 파랑, 하중등의 외력에 대한 선박의 항해안전성을 평가하기 위해, 선체의 운동으로부터 생기는 다음과 같은 현상을 항해안전성 평가요소로 하고 그 시스템적 결합은 Fig. 1과 같다.⁴⁾

선박이 단파정 불규칙 파중을 일정속도로 파에 대하여 일정한 침로(χ)를 유지하여 항해하고 있는 경우, 선체 운동응답 계산은 OSM(ordinary strip method)에 의해 구하여지며, 임의의 항해

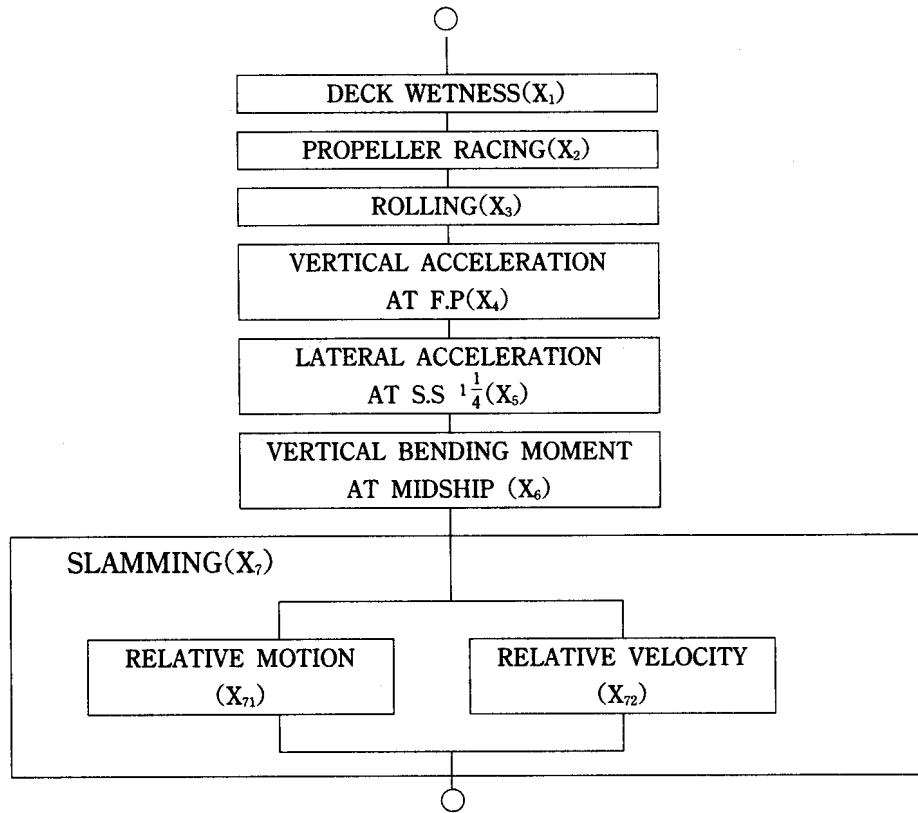


Fig. 1 항해안전성 평가요소의 시스템적 결합

안전성 평가요소의 확률과정 $X_{i(t)}$ 의 주파수응답함수를 $H_{xi}(\omega, V, \chi - \theta)$ 라 확률과정 $X_i(t)$ 의 Pierson-Moskowitz형 스펙트럼 $S_{xi}(\omega, \chi)$ 는 (3)식과 같이 표현된다.

$$S_{xi}(\omega, \chi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{xi}(\omega, V, \chi - \theta)|^2 S_c(\omega, \theta) d\theta \quad (3)$$

확률과정 $X_i(t)$ 의 분산치 $\sigma^2_{xi}(\chi)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma^2_{xi}(\omega, V, S) = \int_0^{\infty} S_{xi}(\omega, \chi) d\omega \quad (4)$$

그러므로 분산치를 변화시키는 Parameter로서는 선박과 파와의 만남각(χ), 선박의 속도(V), 해상상태(S)가 된다.

따라서, 항해안전성 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_i(t) = \int_0^{\infty} \sqrt{2S_{xi}(\omega, \chi)} d\omega \cdot \cos(\omega t + \psi_i) \quad (5)$$

(단, $\psi_i = \epsilon_i(\omega) + \gamma_i$, γ_i 는 $0 \sim 2\pi$ 까지 Random하게 일양분포하는 위상각)

2.2 항해안전성 평가요소의 상관관계

$X_i(t)$, $X_j(t)$ 가 평균치 Zero의 정상 ergodic 확률과정이라 가정하면, 그 상관계수 $\rho(X_i, X_j)$ 는 확률론적 정의로부터,

$$\rho(X_i, X_j) = \frac{E[\tilde{X}_i(t) \cdot X_j(t)]}{\sqrt{\sigma^2_{X_i} \sigma^2_{X_j}}} \quad (6)$$

단, $\tilde{X}_i(t)$ 는 $X_i(t)$ 의 공액 복소수, $E[\tilde{X}_i(t) \cdot X_j(t)] = C_{ij} = R_{ij}(0)$

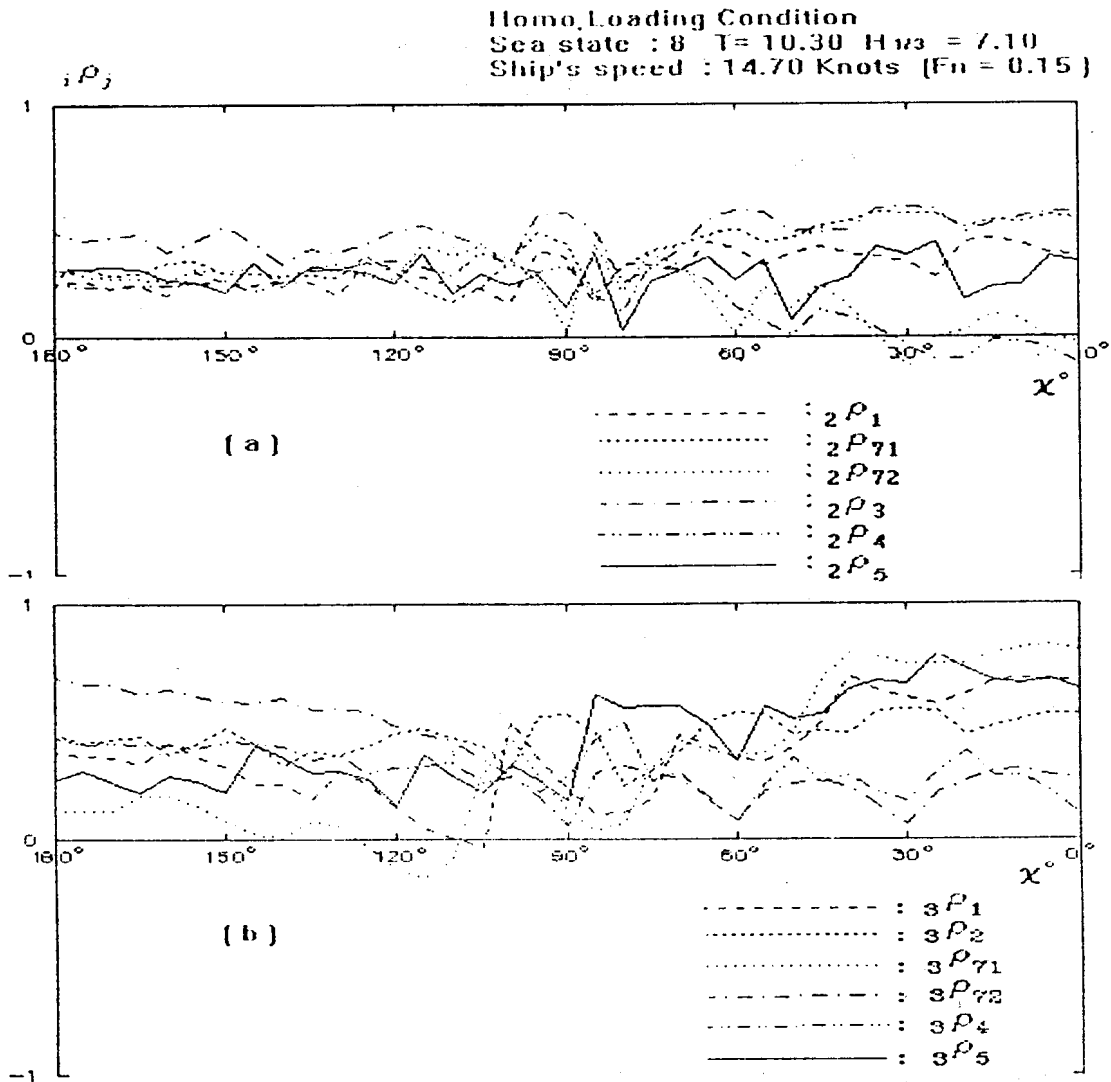


Fig. 2 항해안전성 평가요소의 상관계수

$$R_{ij}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tilde{X}_i(t) \cdot X_j(t) dt$$

$$= \int_0^{\infty} \sqrt{S_{X_i}(\omega, \chi) S_{X_j}(\omega, \chi)} \cos(\varepsilon_i - \varepsilon_j) d\omega$$

임의의 2개의 항해안전성 평가요소의 상관관계수 $\rho(X_i, X_j)$ 는

$$\rho(X_i, X_j) = \frac{\int_0^{\infty} \sqrt{S_{X_i}(\omega) S_{X_j}(\omega)} \cos(\varepsilon_i - \varepsilon_j) d\omega}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (7)$$

$\sigma_{X_i}, \sigma_{X_j}$ 는 $X_i(t), X_j(t)$ 의 표준편차이며, $|\rho(X_i, X_j)| \leq 1$, $X_i(t)$ 와 $X_j(t)$ 가 확률적으로 독립인 경우에는 $\rho(X_i, X_j) = 0$ 이다.

Fig. 2(a), (b)는 수치계산에서의 항해안전성 평가요소의 상관관계를 구한 계산중의 한 결과를 표현한 것으로, 대상선이 선속 14.7 Knots ($F_n=0.15$)로서, 해상상태가 Beaufort Scale 8인 단파정 불규칙파중을 적화계수 S.F(Stowage factor)가 41.2인 화물을 만재한 상태로 항주할 경우, Fig. 1에서 표시한 각 항해안전성 평가요소의 상관관계수를 파에 대한 만남각(χ)에 대하여 표시한 그림이다.

이 상태에서 프로펠러 레이싱(X_2)과 Slamming(X_n)은 파에 대한 만남각 전방위에 걸쳐서 상관관계가 높고, Deck wetness(X_1)는 파에 대한 만남각이 80° 부근의 횡파에서 부터 선미추파에 이르는 구간에서 높게 나타난다.

횡요운동에 의한 선체중양부의 상대 수위변동(X_3)은 선수정현파로 부터 120° 사이에서 상관관계가 높고, 90° 부근의 횡파에서 선미추파에 이르는 구간에서는 SS $1\frac{1}{4}$ 에서의 좌우가속도(X_5)와 프로펠러 레이싱(X_2), Deck wetness(X_1) 등이 모두 상관관계가 높게 나타난다.

따라서, 대상선의 경우에는 선체 중운동에 대하여 프로펠러 레이싱, 선체 횡운동에 대하여 횡요운동이 타 평가요소와의 상관관계가 크므로, 본 연구에서는 상관관계측면에서 프로펠러 레이싱과 횡요운동을 대표적인 항해안전성 평가요소로 채택할 수 있다.

2.3 항해 안전성 평가요소의 발생확률

2.3.1 1차원 항해안전성 평가요소의 발생확률

항해안전성을 평가할 수 있는 현상의 발생은 임의의 항해안전성 평가요소인 확률과정 $X_i(t)$ 의 시간적 변동은 정상 Gauss과정이며, 그 수학적 평균치는 Zero인 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 이 확률과정 $X_i(t)$ 가 시간 $0 \leq \tau \leq t$ 에서 한계치 X_{ic} 를 정(+)으로 횡단한다는 것은 $X_i(t)$ 가 한계치 X_{ic} 를 초과하는 동시에 $\dot{X}_i(t) > 0$ 이므로, 이 경우 동시결합확률밀도함수를 $q(X_i, \dot{X}_i; t)$ 로 표기할 수 있다.¹⁾ 이 $X_i(t)$ 의 시간에 대한 1차 미분을 $\dot{X}_i(t)$ 라 하면, $X_i(t)$ 와 $\dot{X}_i(t)$ 는 확률과정론적으로 독립이므로, $X_i(t)$ 가 한계치를 정(+)으로 횡단하는 확률을 구하기 위한 동시결합 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$q(X_i, \dot{X}_i) = q_1(X_i) q_2(\dot{X}_i) \quad (8)$$

$$\text{단, } q_1(X_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{X_i}}} \exp\left(-\frac{X_i^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right), \quad q_2(\dot{X}_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\dot{X}_i}}} \exp\left(-\frac{\dot{X}_i^2}{2\sigma_{\dot{X}_i}^2}\right)$$

협대역과정의 결보기 주기 T_a 사이에 한계치 X_{ic} 를 정(+)으로 횡단할 평균횡수는 다음과 같이 정의된다.

$$N_+(X_{ic}; 0 \leq \tau \leq T_a) = v_+(X_{ic})T_a = \exp\left(-\frac{X_{ic}^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right) = Q(t) \quad (9)$$

이 식(9)의 내용은 선박의 항해안전성 평가에 중요한 의미를 가진다. 즉, 1차원 Rayleigh확률밀도함수는

$$q(X_i) = \frac{X_i}{\sigma_{X_i}} \exp\left(-\frac{X_i^2}{2\sigma_{X_i}^2}\right) \quad (10)$$

이므로, 정상 Guass과정인 항해안전성 평가요소의 극치가 한계치 X_{ic} 를 정(+)으로 횡단할 평균횡수는 Rayleigh확률밀도함수에 의해서 구한 발생확률과 같고, 그것은 항해안전성 평가요소 $X_i(t)$ 의 극치가 한계치 X_{ic} 를 초과할 확률과 같아진다.

2.3.2 2차원 항해안전성 평가요소의 발생확률

항해안전성 평가시스템이 두 개의 항해안전성 평가요소인 확률과정 $X_i(t)$, $X_j(t)$ 로 구성되어 있을 경우에, 이 확률과정 $X_i(t)$, $X_j(t)$ 가 각각의 한계치 X_{ic} , X_{jc} 를 각각 또는 동시에 정(+)으로 횡단하는 평균횡수는 두 항해안전성 평가요소의 극치가 각각 또는 동시에 그 한계치를 초과할 확률과 같고, 그 발생확률은 1차원 및 2차원 Rayleigh결합확률밀도함수에 의하여 구할 수 있다.¹⁾

$$Q(X_{ijc}) \equiv \exp\left\{-\frac{(\overline{X_{ic}^2} + \overline{X_{jc}^2})}{2}\right\} \equiv Q(X_{ic}) \cdot Q(X_{jc}) \quad (11)$$

이며, 이 확률 $Q(X_{ijc})$ 는 $X_i(t)$, $X_j(t)$ 가 독립인 경우에 각각의 한계치 X_{ic} , X_{jc} 를 동시에 초과할 확률이다.

3. 벌크선의 항해안전성 평가

3.1 항해안전성 평가의 기준

3.1.1. 항해안전성 평가요소의 위험도

$$\mu_{X_i} = \frac{F_{X_i}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\{\overline{X_i}/\sigma_{X_{ic}}\}}{\{\overline{X_i}/\sigma_{X_i}\}} = \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_{X_{ic}}} \quad (12)$$

σ_{X_i} 는 X_i 가 위험하게 되는 표준편차. 위험도 μ_{X_i} 는 파에 대한 만남각(χ), 선속(V) 및 해상상태(S)에 따라 변화한다. 여기서, $\mu_{X_i} \geq 1.0$ 인 경우, X_i 요소가 위험하고, $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다.

3.1.2. 항해안전성 평가요소의 위험도

항해안전성 평가요소의 위험도 μ_{X_i} 에서 최대치를 최대위험도 μ_m 이라 정의한다.

$$\mu_m(\chi, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(\chi, V, S)] \quad (13)$$

이 μ_m 은 어떤 상황하에서 μ_{X_i} 의 최고치인 값으로서, 그 값은 각 요소에 대한 상대치로 비교되는 값이다.³⁾

3.2 항해안전성 평가를 위한 적용대상

수치계산에 사용한 대상선은 $L_{pp}=259.00m$ 벌크선이며, 그 주요목은 표. 1에 표시한다.

대상선박의 적재상태는 균질화물 만재상태(99.99% 적재), 화물 반적재상태(66.48% 적재), 헤비 발라스트상태(52.11% 적재), 정상 발라스트상태(40.26% 적재)의 네가지 경우로 표. 2, 3, 4, 5에 나타낸다.

해상상태는 Beaufort No 6, 7, 8, 9 상태의 단파정 불규칙 파중에서 계산을 실행하였다.

각 해상상태에서 대상선의 최대속력을 고려하여 실제 항진선속을 0.0 Knots($F_n=0.0$), 4.9

[표 1] 수치계산 대상선의 주요제원및 요목

ITEM	DIMENSION			
	CASE 1 Homo Load	CASE 2 Half Load	CASE 3 Heavy Ballast	CASE 4 Normal Ballast
Length P.P $L_{pp}(m)$	259.00	259.00	259.00	259.00
Breadth $B(m)$	43.00	43.00	43.00	43.00
Depth $D(m)$	23.80	23.80	23.80	23.80
Mean draft $d_m(m)$	17.417	11.950	9.506	7.653
Displacement volume(m^3)	163375.4	108605.5	85132.1	65777.6
Block coefficient C_B	0.8411	0.8411	0.8411	0.8411
Length-Breadth Ratio L/B	6.023	6.023	6.023	6.023
Breadth-Draft Ratio B/d	2.469	3.598	4.523	5.619
Center of Buoyancy l_{cb}	3.236	4.232	4.550	4.725
Height of C.G $KG(m)$	13.55	10.28	11.84	12.13
Metacentric height $GM(m)$	4.16	6.52	8.24	10.45
Rolling period $TR(sec)$	16.908	13.506	12.014	10.668
Propeller diameter $DP(m)$	8.00	8.00	8.00	8.00
Propeller pitch ratio P	0.7637	0.7637	0.7637	0.7637
Propeller Immersion (%)	219.38	156.0	141.25	114.25

〔표 2〕 Homo. Ballast Condition의 상세

Deaweight Items	Weight(MT)	L.C.G From L/2(M)	Moment About L/2(MT-M)	V.C.G From BL(M)	Moment About BL(MT-M)	Free Surface Moment (MT-M)
Bunkering Condition	5,154.2	-70.61	-363,938	11.48	59,170	14,792
No. 1 Hold	14,092.4	105.10	470,753	13.89	195,720	0
No. 2 Hold	16,557.4	82.39		341,609	13.21	218,778
No. 3 Hold	16,601.0	59.06	341,609	13.20	219,161	0
No. 4 Hold	16,603.1	35.66	113,546	13.20	219,167	0
No. 5 Hold	16,421.1	12.43	113,546	13.19	216,588	0
No. 6 Hold	16,407.5	-10.97	-101,209	13.23	217,132	0
No. 7 Hold	16,585.4	-34.45	-101,209	13.25	219,698	0
No. 8 Hold	16,299.7	-57.74	-296,202	13.34	217,434	0
No. 9 Hold	14,999.0	-81.16	-296,202	13.97	209,547	0
A.P.T TK(C)	0.0	-119.82	0	9.03	0	8,896
Deadweight	149,722.8	9.00	134,750	13.31	1,992,810	23,688
Light Ship Weight	17,739.0	-6.05	-115,836	15.64	277,438	
Displacement	167,459.8	7.36	1,232,504	13.55	2,269,080	23,688

〔표 3〕 Half Loading Condition의 상세

Deaweight Items	Weight(MT)	L.C.G From L/2(M)	Moment About L/2(MT-M)	V.C.G From BL(M)	Moment About BL(MT-M)	Free Surface Moment (MT-M)
Bunkering Condition	5,154.2	-70.61	-363,938	11.48	59,170	14,792
No. 3 Hold	21,773.3	59.08	1,286,398	9.14	199,067	0
No. 5 Hold	21,537.3	12.44	267,918	9.14	196,878	0
No. 7 Hold	21,752.7	-34.46	-749,505	9.21	200,316	0
No.1 DB & TSWB TK(C)	4,518.0	104.20	470,753	9.28	41,927	92,515
No.5 DB & TSWB TK(P)	4,518.0	104.20	470,753	9.28	41,927	92,515
No.5 DB & TSWB TK(S)	4,518.0	104.20	470,753	9.28	41,927	92,515
f. P. TK(C)	4,283.2	122.42	524,348	10.59	45,356	12,416
A. P. TK(C)	985.3	-124.65	-122,823	15.56	15,330	8,896
No.2 DB & TSWB TK(P)	2,490.0	69.05	171,929	1.52	3,795	220
No.2 DB & TSWB TK(S)	2,490.0	69.05	171,929	1.52	3,795	220
No.3 DB & TSWB TK(P)	0.0	22.07	0	0.51	0	30,183
No.3 DB & TSWB TK(S)	0.0	22.07	0	0.51	0	30,183
Deadweight	93,581.5	11.37	1,064,045	9.26	866,584	217,993
Light Ship Weight	17,739.0	-6.53	-115,836	15.64	277,438	
Displacement	111,320.5	8.52	948,450	10.28	1,144,374	217,993

[표 4] Heavy Ballast Condition의 상세

Deaweight Items	Weight(MT)	L.C.G From L/2(M)	Moment About L/2(MT-M)	V.C.G From BL(M)	Moment About BL(MT-M)	Free Surface Moment (MT-M)
Bunkering Condition	5,154.2	-70.61	-363,938	11.48	59,170	14,792
No.1 DB & TSWB TK(C)	4,518.0	104.20	470,753	9.28	41,927	0
No.2 DB & TSWB TK(P)	4,912.5	69.54	341,609	10.32	50,682	0
No.2 DB & TSWB TK(S)	4,912.5	69.54	341,609	10.32	50,682	0
No.3 DB & TSWB TK(P)	5,010.6	22.66	113,546	10.18	50,990	0
No.3 DB & TSWB TK(S)	5,010.6	22.66	113,546	10.18	50,990	0
No.4 DB & TSWB TK(P)	3,900.8	-25.95	-101,209	12.71	49,573	0
No.4 DB & TSWB TK(S)	3,900.8	-25.95	-101,209	12.71	49,573	0
No.5 DB & TSWB TK(P)	4,928.8	-68.90	-296,202	11.78	50,661	0
No.5 DB & TSWB TK(S)	4,928.8	-68.90	-296,202	11.78	50,661	0
No. 6 Hold	19,320.6	-10.97	-211,912	13.23	255,682	0
F. P. T TK(C)	4,283.2	122.42	524,348	10.59	445,356	0
A. P. T TK(C)	0.0	-199.82	0	9.03	0	8,896
Deadweight	69,521.3	7.69	534,641	11.59	805,946	23,688
Light Ship Weight	17,739.0	-6.53	-115,836	15.64	277,438	
Displacement	87,260.3	4.80	418,905	12.42	1,083,384	23,688

[표 5] Normal Ballast Condition의 상세

Deaweight Items	Weight(MT)	L.C.G From L/2(M)	Moment About L/2(MT-M)	V.C.G From BL(M)	Moment About BL(MT-M)	Free Surface Moment (MT-M)
Bunkering Condition	5,514.2	-70.61	-363,938	11.48	59,170	14,792
No.1 DB & TSWB TK(C)	4,518.0	104.20	470,753	9.28	41,927	0
No.2 DB & TSWB TK(P)	4,912.5	69.54	341,609	10.32	50,682	0
No.2 DB & TSWB TK(S)	4,912.5	69.54	341,609	10.32	50,682	0
No.3 DB & TSWB TK(P)	5,010.6	22.66	113,546	10.18	50,990	0
No.3 DB & TSWB TK(S)	5,010.6	22.66	113,546	10.18	50,990	0
No.4 DB & TSWB TK(P)	3,900.8	-25.95	-101,209	12.71	49,573	0
No.4 DB & TSWB TK(S)	3,900.8	-25.95	-101,209	12.71	49,573	0
No.5 DB & TSWB TK(P)	4,298.8	-68.90	-296,202	11.78	50,661	0
No.5 DB & TSWB TK(S)	4,298.8	-68.90	-296,202	11.78	50,661	0
A. P. T TK(C)	985.4	-124.65	-122,824	15.56	15,330	0
F. P. T TK(C)	2,780.0	122.56	340,715	7.31	2,317	12,416
Deadweight	49,682.9	8.86	440,197	10.88	540,535	27,208
Light Ship Weight	17,739.0	-6.53	-115,836	15.64	277,438	
Displacement	67,421.9	4.81	324,361	12.13	817,993	27,208

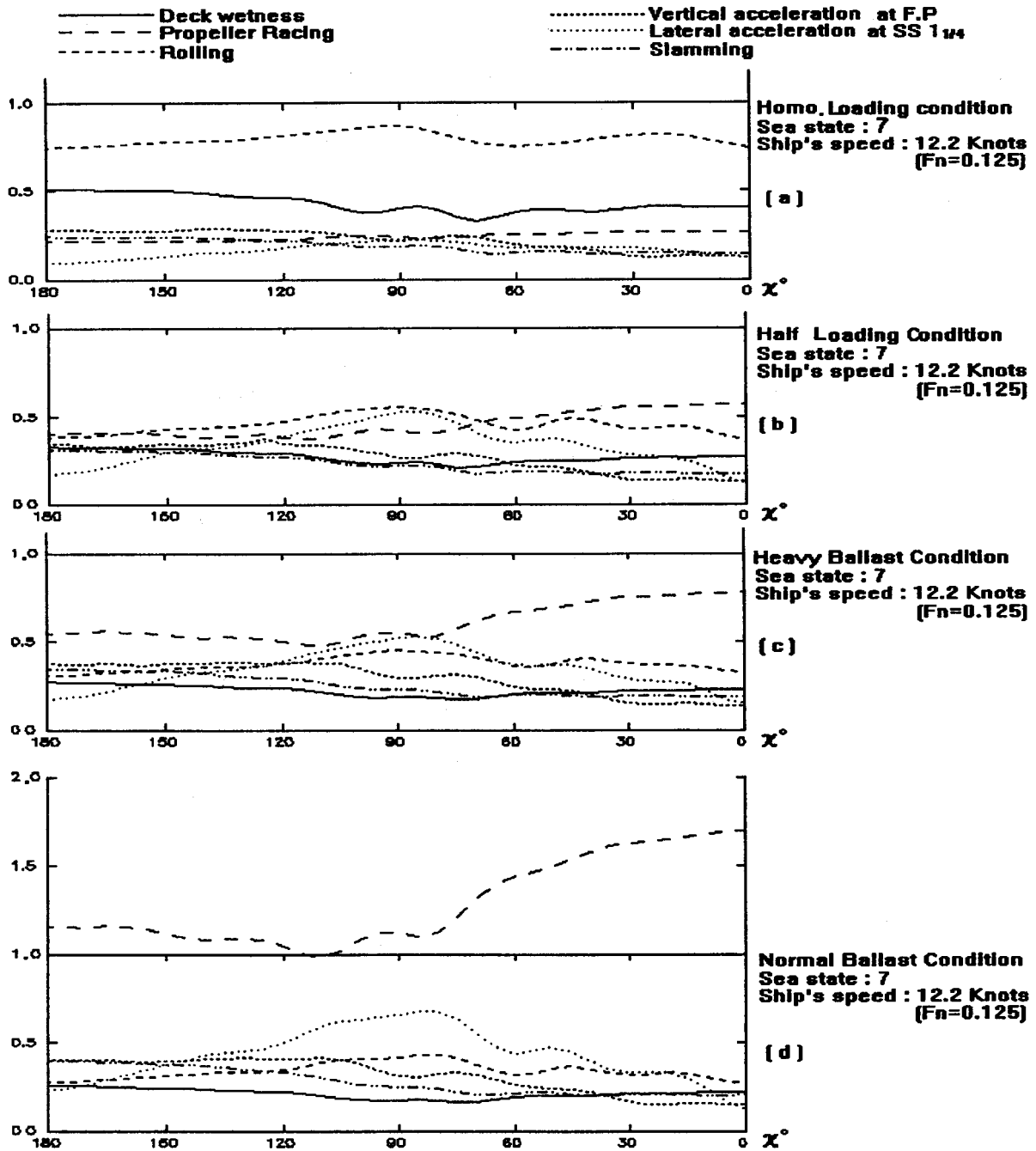


Fig. 3 각 적재상태별 파와의 만남각에 대한 위험도

Knots(Fn=0.05), 9.8 Knots(Fn=0.1), 12.2 Knots (Fn=0.125), 14.7 Knots(Fn=0.15)의 5종류로써 계산을 실행하였다.

항해안전성 평가요소의 분산치를 계산할 때의 각 요소의 한계치 및 한계발생확률은 참고문헌 3)에서 적용한 바와 같다.

3.3 최대위험도에의한 항해안전성 평가의 위험판정

기존의 평가에서는 평가요소의 상관관계에 따른 신뢰성공학적 평가치를 정의하여 신뢰성을 판정하거나, 한 기준 평가요소와 다른 평가요소와의 상대위험도에서 최대위험도를 도출하여 위험을 판정하거나, 선체 중형운동에서 선박운항자의 감각적으로 쉽게 판단될 수 있는 중요운동과 횡요운동을 대표적인 평가요소로 제안하여 신뢰도를 구하는 방법을 사용하였다.

Fig. 3(a), (b), (c), (d)는 대상 벌크선이 각 적재상태에서 항행속력중 한 상태인 12.2Knots (Fn=0.125)로써, 해상상태가 Beaufort Scale 7의 단파정 불규칙과 중을 항주할 경우, 각 항해안전성 평가요소의 위험도를 나타내는 그림이다.

여기에서 위험도는 기존에 제안되어 있는 한계확률에 대한 각 평가요소의 위험도를 나타낸 것이다. Fig. 3 (a), (b), (c), (d)에서 보면 정상 발라스트상태외의 적재상태에서는 위험도가 1.0을 넘지않으므로 안전하다고 평가할 수 있다. 균질화물 만재상태에서는 횡요운동의 위험이 비교적 크게 평가되며, 그외의 적재상태에서는 파에 대한 만남각이 선수정현파에서 160° 까지의 범위에서는 프로펠러 레이싱의 위험도가 제일 높고, 파에 대한 만남각이 160°에서 70°사이에는 횡요운동의 위험도가 제일 높으며, 70°로 부터 선미추파 사이에는 다시 프로펠러 레이싱의 위험도가 제일 높아지며, 횡파에서의 S.S 1¼ 좌우가속도의 위험도도 높아진다.

따라서, 선수정현파로 부터 선미추파까지 파에 대한 만남각 전방위에 있어서 프로펠러 레이싱과 횡요운동이 가장 위험한 요소인 것을 알 수 있다.

벌크선에 있어서, 항해안전성 평가요소의 위험도, 최대위험도의 정의에서 항해안전성 평가요소의 평가치와 위험도, 프로펠러 레이싱과 횡요운동에 의한 최대 위험도를 비교하면 다음과 같다.

식 (12)와 (13)을 이용하여 기존의 여섯가지 항해안전성 평가요소를 계산하여 구한 위험도, 프로펠러 레이싱과 횡요운동의 두가지 요소를 대표적 항해안전성 평가요소로 하여 구한 최대위험도를 각각 파에 대한 만남각(x)에 따라 비교하면 Fig. 4, 5와 같이 나타내어 진다.

Fig. 4, 5의 (a), (b)는 대상선이 정상 발라스트상태와 균질화물 만재상태로 항행속력 14.7 Knots(Fn=0.15)로 해상상태 Beaufort Scale 7, 8을 항해하는 경우이다.

항해안전성 평가의 시스템적인 결합에서 언급한 바와 같이 이것을 직렬결합 구조로서 한 요소라도 소요기능 이하로 되는 경우 시스템 전체로서의 기능이 정지되어 선박이 기능을 잃게 되는 것이다.

그러므로, 항해안전성 평가에 있어서 최대위험도를 지표로 할 때 여러 항해안전성 평가요소를

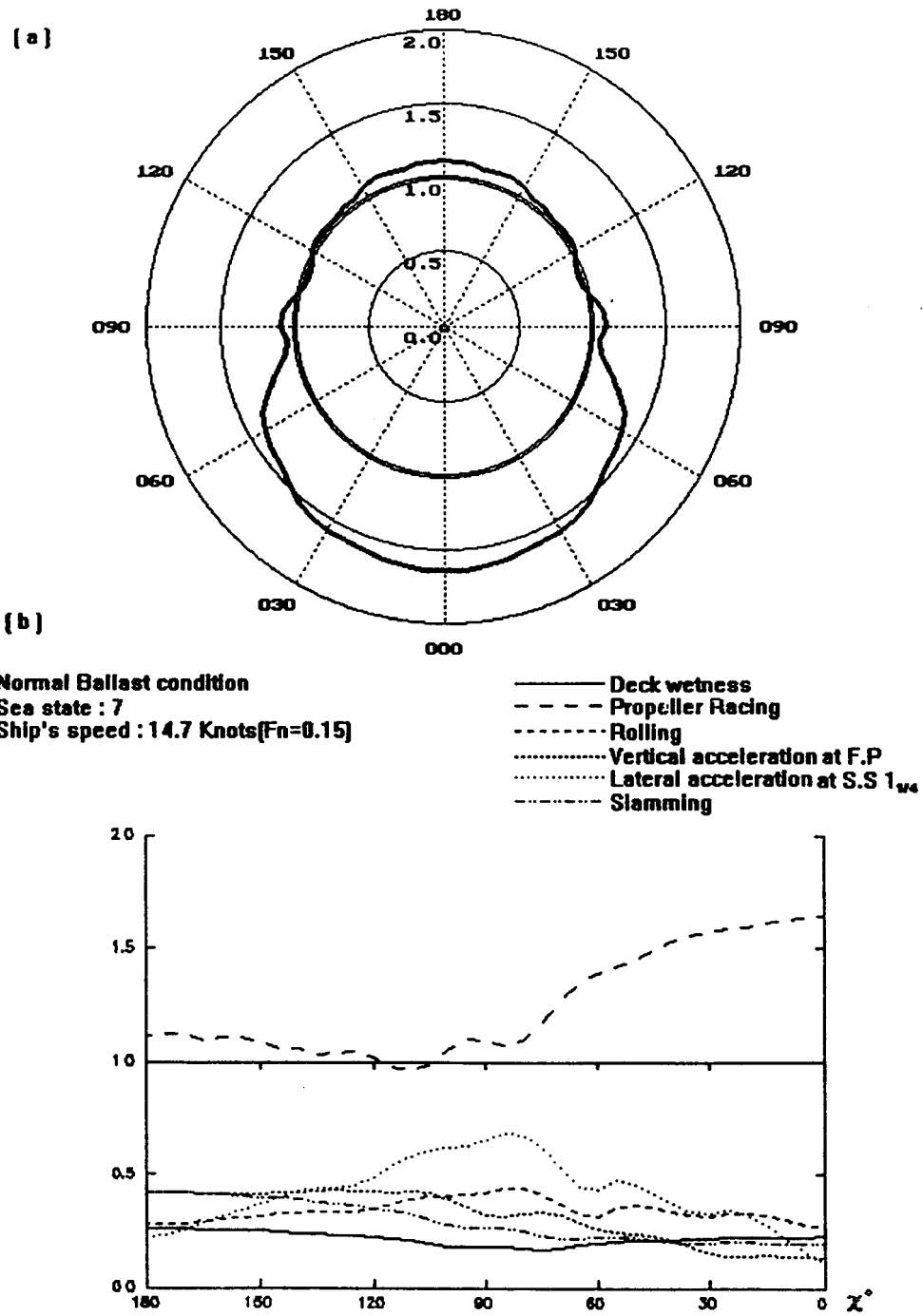


Fig. 4 (a) Propeller Racing과 Rolling의 최대위험도에 의한 평가도
 (b) 각 항해안전성 평가요소의 위험도

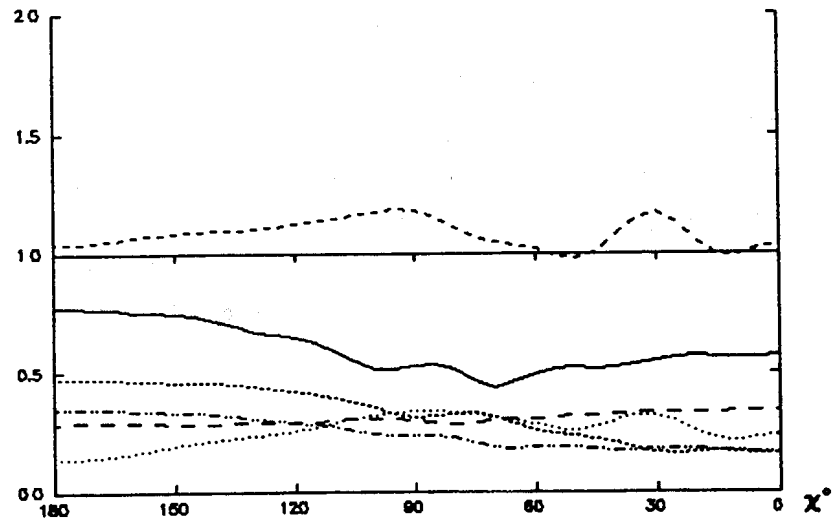
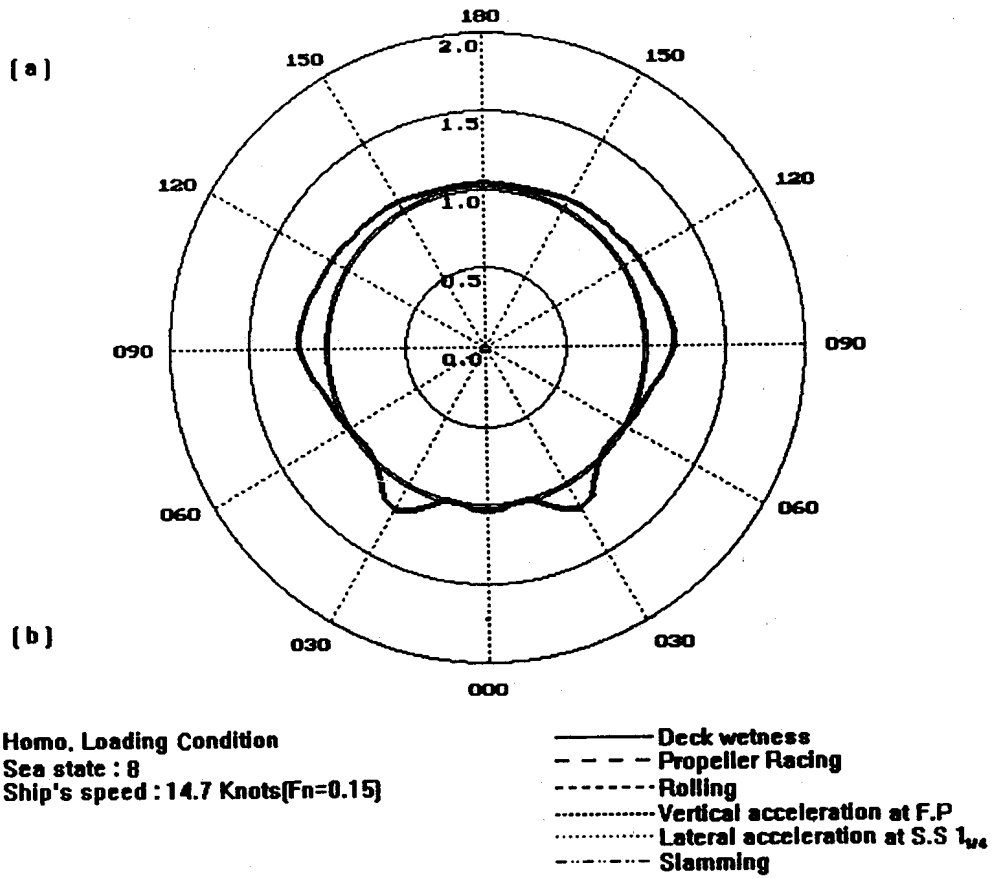


Fig. 5 (a) Propeller Racing과 Rolling의 최대위험도에 의한 평가도
 (b) 각 항해안전성 평가요소의 위험도

대신하여 선체중형운동의 대표적 평가요소를 그 선박에서 가장 극심하게 발생하는 요소로 벌크 선에서는 프로펠러 레이싱과 횡요운동을 새로운 항해안전 평가요소로 채택하여 최대위험도에 의하여 엄정한 평가를 할 수 있다.

본 연구에서는 Bulk선의 선박특성에 따른 선체의 중형운동에서의 대표적인 평가요소로 타 평가요소와 상관관계가 있고, 상대위험도 또한 높으며, 가장 극심하게 발생하는 Propeller racing과 Rolling으로 대표적인 평가요소로 채택하여 최대위험도로서 항해안전성 평가에 있어서 위험을 판정하기로 한다.

즉, $\mu_m(\chi, V, S) \geq 1.0$ 인 경우 위험하고, $\mu_m(\chi, V, S) < 1.0$ 인 경우는 안전하다고 판정한다.

단, 7가지의 항해안전성 평가요소중 선체 중앙부의 중급힘 모우먼트는 선급협회에서 규정한 정수중의 허용한계치를 초과하지 않는 것을 안전하다고 판정하였다.

4. 적재상태에 따른 항해안전성 평가

4.1 각 적재상태와 해상상태에 따른 항해안전성 평가특성

대상선이 항해속력 14.7 Knots ($F_n=0.15$)로 각 적재상태에서 Beaufort Scale 6, 7, 8, 9를 항주할 때의 프로펠러 레이싱과 횡요운동에 의한 최대위험도를 Fig. 6 (a), (b), (c), (d)로 나타낼 수 있다.

Fig. 6(a)에서 정상 발라스트상태는 선미추파와 사파에서 프로펠러 레이싱에 의해 위험도가 1.0 이상으로 위험해지고 타 적재상태는 위험현상이 발생치 않음을 나타낸다.

Fig. 6(b)에서 정상 발라스트상태는 파에 대한 만남각 전방위에서 프로펠러 레이싱의 영향으로 최대위험도 1.0이상으로 위험현상이 발생하게되어 항해불가능의 상태로 평가되어진다. Bueafort scale 7이상에서의 정상 발라스트상태는 화물창에 발라스트를 충수하여 헤비 발라스트상태로 배수량을 증가시킴으로써 프로펠러 레이싱에 의한 위험도를 감소시킬 수 있다.

Fig. 6 (a), (b), (c), (d)에서와 같이 각 배수량 상태에서 해상상태에 따른 위험도를 평가하여 보면 화물 반적재상태(66.48% 적재)보다 균질화물 만재상태(99.99% 적재)에서의 위험도가 높으며, 이 보다는 헤비 발라스트상태(52.11% 적재), 정상 발라스트상태(40.26% 적재)의 순서로 위험도가 증가하며, 배수량이 증가함에 따라 항해안전성 평가요소의 제반위험현상에 대하여 위험도가 감소하다가 다시 위험해지는 한계 배수량이 존재한다고 생각되며 이는 배수량이 하기만재배수량에 가깝게 증가되면 상대적으로 건현이 줄어들게되어 항해안전성 평가요소중 횡요운동으로 인한 위험현상의 발생확률이 높게 되고, 배수량이 경하상태에 가깝게되면 홀수가 감소하게되어 프로펠러 레이싱등의 영향이 커져서 위험도가 높아지게 된다. 또한, Fig. 7, 8, 9, 10은 각 배수량 상태에서의 해상상태에 따른 항해안전성 평가를 통하여 최대위험도로서 항해안전성을 평가한 것으로 대상선의 경우 Fig. 7의 균질화물 만재상태에서는 횡파에 의한 횡요운동과 선미추파에 의한 프로펠러 레이싱의 영향이 평가되어지나 파에 대한 만남각 전방위에서 최대위험도가 1.0을 넘지

않아 안전하게 평가되어진다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 각 발라스트상태에서는 선미추파와 사파에서의 프로펠러 레이싱의 영향으로 위험도가 Beaufort 8, 6에서 각각 위험도가 1.0이상으로 평가된다. 침로를 조정하여 위험을 회피할 때에는 파에 대한 만남각 150°에서 120°사이의 구간으로 변침해서 선미추파와 사파를 받지 않도록 침로를 선택하는 것이 좋을 것으로 평가 된다.

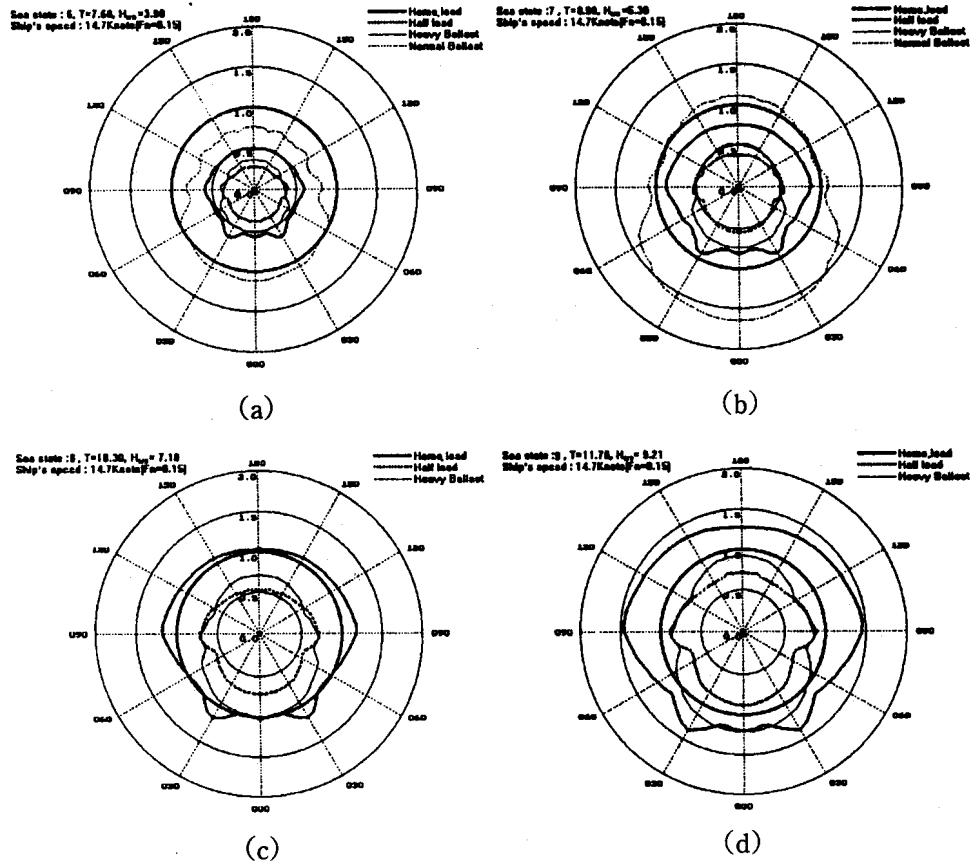


Fig. 6 Beaufort scale 6, 7, 8, 9에서의 각 적재상태에 따른 최대위험도에 의한 평가도

4. 2 각 적재상태와 선속별 항해안전성 평가특성

대상선이 건현의 감소로 횡요운동이 심하여지는 균질화물 만적상태(98.99% 적재)와 프로펠러 레이싱이 심하여지는 화물 반적적상태(66.48% 적재)에서의 각 선속별 위험도를 Fig. 11(a), (b)에 나타내었다.

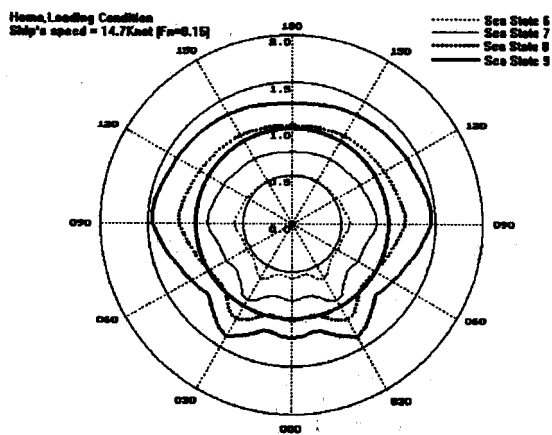


Fig. 7

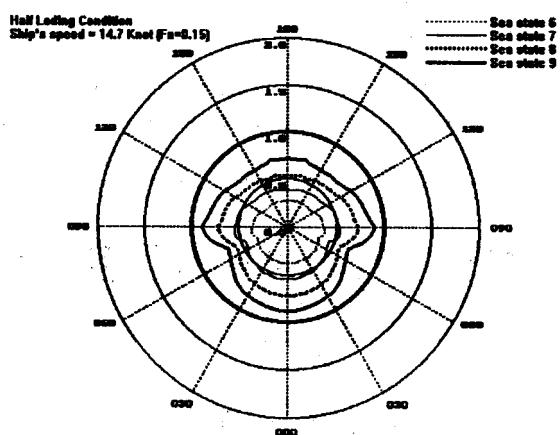


Fig. 8

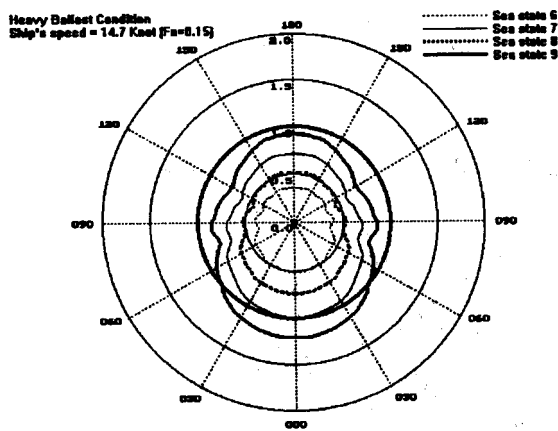


Fig. 9

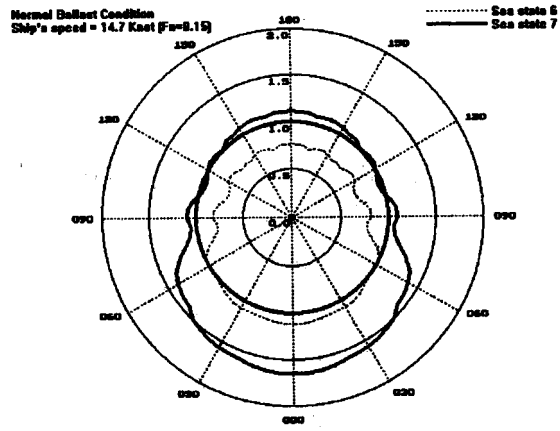


Fig. 10

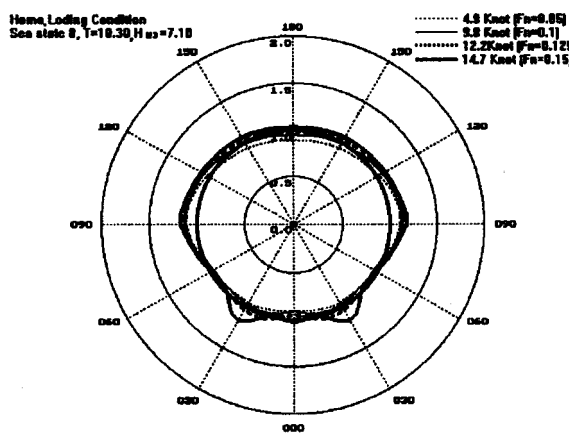


Fig. 11 (a)

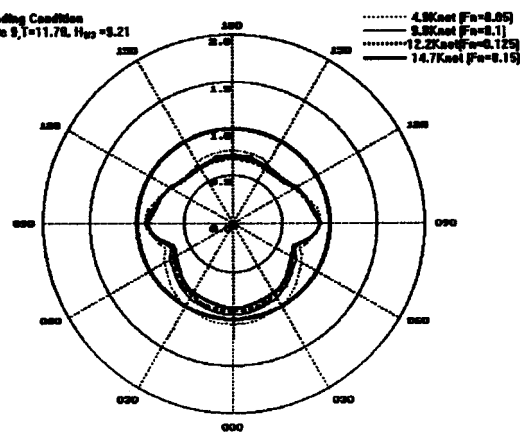


Fig. 11 (b)

Fig. 11(a)에서 횡요운동의 영향을 받게되는 균질화물 만재상태에서는 선속이 느린편이 안전하다. 또한, Fig. 11(b)의 화물 반적재상태에서는 횡파에서는 선속의 영향이 위험도에 큰 영향을 미치지 않지만 선미추파에서는 빠른편이 안전한 것으로 나타난다. 각 발라스트상태에서도 같은 경향으로 나타난다.

5. 결 론

벌크선의 적재상태에 따른 항해안전성평가를 행한 본연구의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 현재 운항되고 있는 벌크선을 수치계산의 대상선으로 하여 화물 적재상태에 따른 항해안전성을 평가하기 위해 선체 중횡운동의 대표적 평가요소인 프로펠러 레이싱과 횡요운동을 새로운 항해안전성 평가요소로 채택하였으며, 벌크선의 적재상태에 따라 최대위험도를 구하였다. 이 최대위험도에 의하여 인명, 선체, 화물의 안전을 고려한 항해안정성 평가를 정량적으로 행하였다.

(2) 불규칙 해상상태별 최대위험도에 의한 항해 안전성 평가에서 화물 반적재상태는 타 적재상태보다 각 해상상태에서 위험도가 적게 평가되어 타적재상태에서 보다 안전한 것으로 평가할 수 있다. 일반적으로 배수량이 증가함에 따라 항해안전성은 확보된다고 할 수 있지만 횡요운동이 주된 위험요소인 만재배수량 상태 보다 안전하게 평가되어지는 부분적재상태의 한계 배수량이 존재한다고 사료되며 이는 건현과 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다.

(3) 적재상태에 따라서 동일한 선박이지만 항해안전성 평가가 달라짐이 확인되었다. 각 적재상태별 최대위험도에 의한 항해안전성 평가결과 주된 위험 평가 요소와 현상이 발생하는 파에 대한 만남각방향의 파를 선박이 받으면서 항해하지 않음으로써 위험을 피할 수 있는 평가방법과 평가도를 제안하였다.

(4) 이 연구 결과를 바탕으로 선속저하, 조타가능성, 주기의 운전가능성등을 포함하는 선박의 항해능력 평가와 자연적 감속(Nominal speed loss)을 최소화할 수 있는 최적 트림을 포함한 선체자세제어 평가를 고려하면 선박운항자에게 있어 일반적이고 최적의 위험판정 평가 시스템으로 개발 될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 金順甲, 孔吉永 : 安全空間 設定에 의한 船舶 耐航性能의 評價시스템 開發에 관한 研究, 韓國航海學會誌, 第16券 1號, pp. 15-16, pp. 18-21.
- 2) 山内保文 : 不規則現象論, 海文堂(1986), pp. 129-149.
- 3) 金順甲 : 船舶의 波浪중 耐航性能評價에 관한 研究, 韓國航海學會誌 第11券 1號, pp. 69-78, pp. 80-81, 1987.
- 4) 金順甲, 李忠魯 : 황천시의 항해안전 평가시스템 개발에 관한 연구, 韓國航海學會誌, 第15券 1號, p. 54.
- 5) 中村彰一 : 船體應答의 統計的豫測, 第1回 耐航性に關するツンポジウム, 日本造船學會, pp. 99-109, 1969.
- 6) 金順甲 · 内藤 林 · 中村彰一 : 船舶의 波浪中 耐航性能評價에 關する 研究, 日本造船學會 論文集, No. 155(1984), p. 71.
- 7) M. K. Ochi and W. E. Bolton : Statistics for Prediction of Ship Performance in a Seaway, Inter. Shipbuilding Prog, Vol. 20(1973), p. 351.
- 8) W. G. Price and P. E. D. Bishop : Probabilistic Theory of Ship Dynamics, London Chapman and Hall (1974), pp. 32-76.
- 9) W. B. Davenport and W. L. Root : An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise, McGraw-Hill(1958), p. 161.
- 10) K. S. Miller : Multidimensional Gaussian Distribution, John Wiley and Soms(1986), pp. 129-149.
- 11) 中村彰一 : 耐航性의 諸要素, 第1回 耐航性에 關するツンポジウム, 日本造船學會, PP. 131-136, 1969.