

손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 동적 안정성

손경호*, 이상갑*, 최경식*, 김윤수**

Dynamic Stability of a Damaged Ship in Beam Wind and Waves

by

K.H. Sohn*, S.G. Lee*, K.S. Choi* and Y.S. Kim**

요 약

본 연구는 손상된 선박의 최종 평형 상태에서의 동적 안정성에 관한 내용을 담고 있다. 먼저 1 자유도 횡동요 운동방정식에 침입수의 영향과 횡풍·횡파의 영향을 적절히 고려하여 손상선박의 횡동요 응답을 구하였으며, 신뢰성공학적 수법을 이용하여 손상선박의 전복확률의 계산법을 정립 하였다. 연구결과 해상상태, 운항상태 그리고 손상상태에 따른 동적 안정성을 확률론적으로 평가할 수 있었다.

Abstract

This paper presents a brief outline of dynamic stability of a damaged ship at final stage of flooding in rough beam wind and waves. One degree-of-freedom, roll equation is adopted with effects of flooding water and external forces due to wind and waves, but without effect of sloshing. We discuss the dynamic stability of the damaged ship in terms of capsizing probability based on risk analysis, the method of which was firstly proposed by Umeda et al. [6] to high speed craft in intact condition. As a result, we can evaluate the dynamic stability of the damaged ship in probabilistic manner according to sea state, operating condition and damage situation.

발 표 : 1999년도 대한조선학회 춘계연구발표회('99. 4. 22)

접수일자 : 1999년 4월 30일, 재접수일자: 1999년 10월 25일

*정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

**정회원, 삼성중공업(주)

1. 서 언

선박의 전복사고는 정복원력의 부족에 의해서도 유발될 수 있지만, 황천항행중 동복원성의 부족에 의해서 유발되는 것이 대부분이다. 또한 동복원성 부족에 의해서 발생하는 전복사고는 횡파중에서와 추사파중에서의 운동학적 특성이 상이한 것으로 알려져 있다[1][2][3].

비손상 선박의 경우, 횡풍·횡파중에서의 동복원성 기준으로서는 IMO A.562(weather criterion)가 제정되어 있다[4]. 그러나 추사파중에서의 동복원성 기준은 아직 구체화된 국제 규정이 없으며, 단지 IMO에 의해서 운항지침(operating guidance)의 형태로써 권고되어 있다[5].

한편, 황천항행중인 선박이 충돌, 좌초 등에 의해 손상을 받았을 때, 보다 큰 해난사고라 할 수 있는 전복사고로의 진행을 막기 위해서는 손상선박의 동적 안정성에 관한 평가가 요구되고 있다. IMO A.562 규정에는 경험적으로 결정된 안전율이 고려되어 있는데, 경험 축적 자료가 불충분한 새로운 선형(船型)이나 손상선박에 이를 적용하기에는 불합리한 점이 있다. 이의 개선책으로서 신뢰성공학에 기초를 둔, 전복확률(capsizing probability)을 이용하여 비손상 선박의 동적 안정성을 평가하는 기법이 최근 Umeda[6], Belenky[7] 등에 의해서 제안되었다.

본 연구에서는 Umeda의 방법을 답습하여 횡풍·횡파중에서 표류하는 손상선박에 대해 전복확률을 이용한 동적 안정성 평가 기법에 관해서 고찰한다. 동적 안정성 평가를 위해서는 먼저 정적 복원성 자료가 필요한데, 손상선박의 정적 복원성 평가는 참고문헌[16]에 의한 연구결과를 이용한다.

2. 전복확률을 이용한 동적 안정성 평가법

2.1 해상상태의 설정

해상조건으로서, 바람은 평균풍속 U_T

(m/sec) 주위에서 시간적으로 불규칙하게 변화하는 변동풍속 $u(t)$ (m/sec)를 상정한다. 그리고 바람의 작용에 의해서 장파정불규칙파가 발생하여 유의파고 $\overline{H}_{1/3}$, 평균파주기 \overline{T} 가 Beaufort 풍력등급에 따라서 Table 1과 같이 주어지는 완전발달파(fully developed wave)를 상정한다[8].

Table 1 Sea states

Beaufort	U_T (m/sec)	$\overline{H}_{1/3}$ (m)	\overline{T} (sec)
1	0.95	0.1	1.2
2	2.50	0.2	1.7
3	4.45	0.6	3.0
4	6.75	1.0	3.9
5	9.40	2.0	5.5
6	12.35	3.0	6.7
7	15.55	4.0	7.7
8	19.00	5.5	9.1
9	22.65	7.0	10.2
10	26.50	9.0	11.6
11	30.60	11.5	13.1
12	34.85	14.0	14.4

바람의 변동풍속스펙트럼은 다음과 같이 표시되는 Davenport의 회귀식을 이용한다[9].

$$S_u(\omega) = 4.0a \frac{U_T^2}{\omega} \cdot \frac{b^2}{(1+b^2)^{4/3}} \quad (1)$$

여기서 $a = 0.003$ (해면의 마찰계수)

$$b = 600 \omega / (\pi U_T)$$

ω : 바람의 원주파수

$S_u(\omega)$: 평균풍속 주위의 변동풍 스펙트럼 (m^2/sec)

파도의 에너지스펙트럼은 다음과 같이 표시되는 ITTC(1978) 표준스펙트럼을 이용한다[10].

$$S_\zeta(\omega) = A \omega^{-5} \exp(-B/\omega^4) \quad (2)$$

여기서 $A = 172.75 \overline{H}_{1/3} / \overline{T}^4$

$$B = 691 / \overline{T}^4$$

ω : 파도의 원주파수

$S_{\zeta}(\omega)$: 파도의 스펙트럼 ($m^2 \cdot sec$)

2.2 정적 횡경사

손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 정적 횡경사는, 선내 임의 구획실의 비대칭 침수와 평균풍속에 의한 풍압모우멘트에 기인한다. 비대칭 침수에 기인하는 정적 횡경사각은 참고문헌[16]에서 저자들에 의해 연구되었으며, 손상시의 잔존 복원아암곡선(residual GZ curve)으로부터 구해진다. 그리고 여기에 추가하여 풍압모우멘트에 기인하는 정적 횡경사가 일어나는데, 이것은 다음의 평형조건으로부터 구해진다.

$$F_A (h_A + h_H) - WGZ(\phi_s) = 0 \quad (3)$$

여기서 F_A 는 수면 상부 선체에 작용하는 공기력, h_A 는 수면으로부터 F_A 의 작용점까지의 높이이다. 그리고 F_A 에 의해서 수면 하부에는 횡방향 유체 저항력(횡표류저항)이 F_A 와 크기가 같고 반대 방향으로 작용하는데, 수면으로부터 횡표류저항의 작용점까지의 수직거리가 h_H 이다. 그리고 W 는 손상된 선박의 배수량(손상전 배수량), GZ 는 손상된 선박의 잔존 복원아암, ϕ_s 는 정적 평형각(정적 횡경사각)이다. 공기력 F_A 는 다음 식에 의해서 추정된다.

$$F_A = \frac{1}{2} \rho_A A_A C_{DA} U_T^2 \quad (4)$$

여기서 ρ_A 는 공기의 밀도, A_A 는 수면 상부 선체의 측면적, C_{DA} 는 항력계수이다.

2.3 횡동요 운동방정식

횡경사된 선박의 횡파중 운동에 관한 Shin의 연구[11]에 의하면 상하동요와 횡동요의 상호간섭 영향은 무시될 수 있으므로, 손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 횡운동은 좌우동요, 횡동요, 선수동요의 복합운동으로서 나타낼 수 있을 것이다. 그러나 횡동요의 경우 파랑강제력의 diffraction 유체력 성분이 좌우동요에 기인하는 횡동요의 radiation 유체력 성분과 서로 상쇄되어, 파랑강제력으로서 Froude-Krylov 유체력 성분만을 생각한다고 하면, 손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 횡동요는 다음의 1자유도 운동방정식으로서 표시될 수 있다[12]. 단, 횡동요 거동에 미치는 침입수의 슬로싱(sloshing) 영향은 무시한다. 왜냐하면 손상의 최종단계에서는 구획실 폭에 대한 침입수의 깊이비(fluid fill ratio)가 커서, 횡동요 주기에 비해 슬로싱 고유주기가 비교적 짧다고 간주될 수 있기 때문이다[13].

$$(I_{xx} + J_{xx}) \ddot{\phi}_r + B_e \dot{\phi}_r + WGM_s \phi_r = WGM_s \gamma \Theta_w(t) + \tilde{K}_A(t) \quad (5)$$

여기서 I_{xx} 는 관성모우멘트, J_{xx} 는 부가관성모우멘트, B_e 는 등가선형감쇠계수, ϕ_r 는 정적 횡경사각 ϕ_s 를 기준으로 한 상대횡경사각($\phi_r = \phi - \phi_s$), GM_s 는 손상된 선박의 잔존 GZ 곡선의 ϕ_s 에서의 경사($GM_s = [dGZ/d\phi]_{\phi=\phi_s}$), γ 는 유효파경사계수이다. 그리고 $\Theta_w(t)$ 는 파면의 경사, $\tilde{K}_A(t)$ 는 바람의 변동성분에 기인하는 강제외력으로서 이들은 불규칙적이다. 비정상적인 풍속 $\{U_T + u(t)\}$ 에 기인하는 풍압모우멘트 $K_A(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$K_A(t) = \frac{1}{2} \rho_A A_A C_{DA} h_{AG} \{U_T + u(t)\}^2 \approx \frac{1}{2} \rho_A A_A C_{DA} h_{AG} U_T^2 + \rho_A A_A C_{DA} h_{AG} U_T u(t) \quad (6)$$

여기서 h_{AG} 는 무게중심으로부터 풍압측면적 중심까지의 높이이다. 그리고 우변 첫째항은 정상성분으로서 정적 횡경사를 유발하게 되며 이미 2.2절에서 다루었다. 우변 둘째항은 변동성분으로서 $\tilde{K}_A(t)$ 에 해당되며, 횡동요를 유발한다. $\tilde{K}_A(t)$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\tilde{K}_A(t) = \rho_A A_A C_{DA} h_{AG} U_T u(t) \quad (7)$$

식(7)을 식(5)에 대입하고, 양변을 $(I_{xx} + J_{xx})$ 로 나누어 간단화 하면

$$\ddot{\phi}_r + b_e \dot{\phi}_r + \omega_s^2 \phi_r = \omega_s^2 \gamma \theta_w(t) + k_A u(t) \quad (8)$$

여기서

$$\omega_s^2 = WGM_s / (I_{xx} + J_{xx}) \quad (9)$$

$$k_A = \rho_A A_A C_{DA} h_{AG} U_T / (I_{xx} + J_{xx}) \quad (10)$$

$$b_e = B_e / (I_{xx} + J_{xx}) \quad (11)$$

식(8)에서 파경사 $\theta_w(t)$ 와 변동풍속 $u(t)$ 가 불규칙 신호이므로 횡풍·횡파중에서의 횡동요 스펙트럼 $S_\phi(\omega)$ 는 다음 식으로 주어진다. 단, 횡파중에서는 파도의 원주파수와 만남주파수가 동일하다.

$$\begin{aligned} S_\phi(\omega) &= |G(j\omega)|^2 S_a(\omega) + |H(j\omega)|^2 S_u(\omega) \\ &= |G(j\omega)|^2 \cdot \left(\frac{\omega^4}{g^2}\right) S_\zeta(\omega) \\ &\quad + |H(j\omega)|^2 S_u(\omega) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 g 는 중력가속도이며, $S_a(\omega)$ 는 파경사 스펙트럼으로서 파에너지스펙트럼 $S_\zeta(\omega)$ 와 다음 관계가 성립된다.

$$S_a(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} \cdot S_\zeta(\omega) \quad (13)$$

그리고 $G(j\omega)$ 와 $H(j\omega)$ 는 각각 파경사 및 변동풍에 대한 주파수응답함수로서 다음과 같이 주어진다. 단, $j = \sqrt{-1}$ 이다.

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{\omega_s^4 \gamma^2}{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + b_e^2 \omega^2} \quad (14)$$

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{k_A^2}{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + b_e^2 \omega^2} \quad (15)$$

2.4 전복확률

손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 횡동요가 정규확률과정(Gaussian random process)이라고 가정하면 횡동요의 극대값(maxima)과 극소값(minima)의 확률밀도함수는 다음과 같다[14].

$$\begin{aligned} f_\pm(\phi_r) &= \frac{\epsilon}{\sqrt{2\pi m_0}} \exp\{-\phi_r^2 / (2m_0 \epsilon^2)\} \\ &\quad \pm \frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{m_0} \phi_r \cdot \exp\{-\phi_r^2 / (2m_0)\} \\ &\quad \times \left[0.5 \pm \operatorname{erf}\left\{ \frac{\phi_r}{\epsilon} \sqrt{\frac{1-\epsilon^2}{m_0}} \right\} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 “±”부호는 각각 극대값과 극소값에 해당된다. 그리고

$$\epsilon^2 = 1 - m_2^2 / (m_0 m_4) \quad (17)$$

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\phi(\omega) d\omega \quad (n=0,1,2,\dots) \quad (18)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-z^2/2) dz \quad (19)$$

다음으로 잔존 GZ곡선을 이용하여 동적 안정성 즉, 전복조건을 유도한다. 잔존 GZ곡선에 풍압모우멘트의 정상성분을 그려 넣으면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 ϕ_s 가 안정한 평형점(정적 횡경사각), ϕ_V 와 ϕ_U 는 각각 제 1, 제 2의 불안정한 평형점이다. ϕ_c 는 면적 a (바람에 의한 일량) = 면적 b (동복원력)가 되는 각도이다. 그리

고 제 1의 불안정 평형점이 해수유입각보다 크면 해수유입각을 ϕ_v 라 간주한다. Fig. 1에서 ϕ_c 또는 ϕ_v 의 바깥쪽 측, 불안정영역으로 대경사의 횡동요가 발생하면 안정영역으로 되돌아 오지 않고 전복에 이르게 된다.

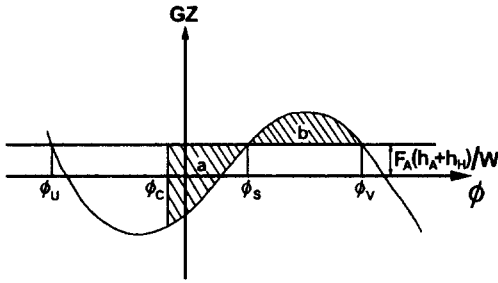


Fig. 1 Energy balance in roll

따라서 횡동요의 극값의 확률밀도함수를 나타내는 식(16)을 불안정영역에서 적분함으로써 횡동요 1사이클(주기) 동안의 전복확률 p 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p = \text{Max} \left\{ \int_{-\infty}^{\phi_c - \phi_s} f_-(\phi_r) d\phi_r, \int_{\phi_v - \phi_s}^{\infty} f_+(\phi_r) d\phi_r \right\} \quad (20)$$

횡동요 평균주기를 T_0 라 하면 동일한 해상상태가 지속되는 T_S 시간 동안의 전복확률 $P(T_S)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$P(T_S) = 1 - (1 - p)^{T_S/T_0} \quad (21)$$

3. 시계산

3.1 공시선형

본 연구에서 시계산에 이용한 선박의 주요목은 Table 2와 같고, 정면도는 Fig. 2와 같다. 이 선박은 저자들의 연구 [16]에서 다룬 동일한 선형

으로서 측면도와 선내 각 화물창(탱크)의 격벽 배치는 Fig. 3과 같다. 그리고 손상 상태를 나타내는 손상번호를 Table 3과 같이 정의한다.

Table 2 Principal dimensions of ship and model

Items	Ship	Model
Length between perpendiculars L (m)	167.0	2.385
Breadth B (m)	22.6	0.323
Depth D (m)	13.4	0.191
Mean draft(designed) d (m)	8.0	0.114
Displacement volume V (m^3)	23012.6	0.0671
Block coeff. C_b	0.76	0.76
Prismatic coeff. C_p	0.77	0.77
Waterplane coeff. C_w	0.83	0.83
Model scale		1/70

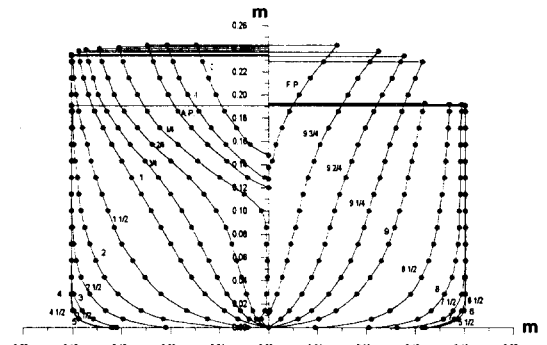


Fig. 2 Body plan (numerical value is expressed in model size)

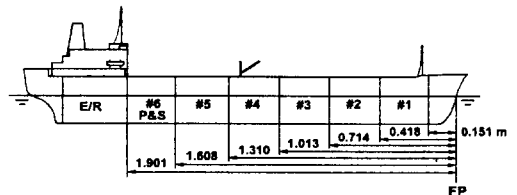


Fig. 3 Profile and tank arrangement (numerical value is expressed in model size)

Table 3 Definition of damage numbers

Damage No.	Damaged tank
-1	#6 port
1	#6 star.
2	#5
3	#4,
4	#3
5	#2
6	#1
7	#6 port & star.
8	#6 port & #5
9	#6 star. & #5
10	#5 & #4
11	#4 & #3
12	#3 & #2
13	#2 & #1

3.2 계산 조건

횡동요 운동방정식의 각 계수는 다음과 같이 결정되는 것으로 가정한다. 먼저 결보기 관성반경 k_{xx} 를 다음 식에 의해 추정한다[4].

$$k_{xx} / B = 0.373 + 0.023 (B/d) - 0.043 (L/100) \quad (22)$$

여기서 L, B, d 는 각각 수선간장, 선폭, 평균흘수를 의미한다. 그리고 횡동요 등가선형감쇠는 다음과 같이 Bertin의 N 계수에 의해서 추정된다[15].

$$b_e = 4N\phi_m / T_\phi \quad (23)$$

여기서 ϕ_m 은 평균횡동요진폭, T_ϕ 는 정적 횡경사각 ϕ_s 상태에서의 횡동요 고유주기로서 GM_s 로부터 결정된다. 그리고 파랑강제력항의 유효과경사계수 γ 는 다음 식에 의해서 추정된다[4].

$$\gamma = 0.73 \pm 0.6 \overline{OG} / d \quad (24)$$

여기서 \overline{OG} 는 수면으로부터 무게중심까지의 높이로서 무게중심이 수면 위에 있을 때 양(+)

다. 한편, 식[24]는 무게중심이 수면 부근에 있지 않을 때에는 오차가 심하므로 본 연구에서는 무게중심의 위치에 상관없이 $\gamma = 0.8$ 을 가정한다.

해상상태는 Beaufort No. 6, 8, 10, 11, 12 를 상정하며, 선박의 손상전 흘수와 메타센터높이는 참고문헌[16]에서 모형시험에 이용한 공선상태와 반재상태를 상정하며, 손상전 흘수, 메타센터높이, 침수율(체적침수율 μ , 면적침수율 μ_s)은 Table 4와 같고, 공선상태의 $GM = 3.1 m$ 일 때 비손상시 GZ 곡선은 Fig. 4와 같다. 단, Fig. 4는 모형선 스케일에서의 계산치와 실험치의 비교를 보이고 있다.

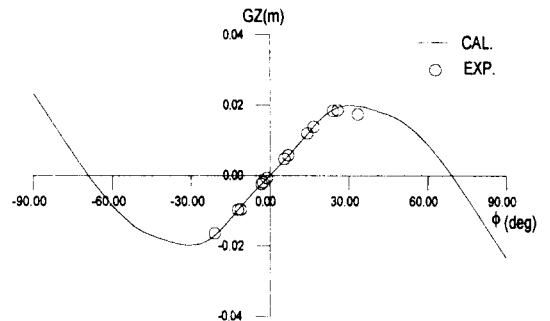


Fig. 4 Righting arm at intact condition(ballast condition, $GM=3.1 m$ in full size)

Table 4 Condition of intact ship

Ballast condition		
Draft fore	df	3.71 m
aft	da	4.41 m
Metacentric height	GM	3.1, 2.5, 2.0 m
Permeability	μ	0.95
	μ_s	0.97
Half load condition		
Draft fore	df	6.0 m
aft	da	7.0 m
Metacentric height	GM	1.0, 0.7 m
Permeability	μ	0.5
	μ_s	0.5

3.3 계산결과 및 고찰

Figs. 5, 6은 각각 ITTC(1978) 파에너지스펙트럼과 Davenport 변동풍스펙트럼의 계산 예를 보이고 있다. Figs. 7~9는 비손상시 및 손상시 횡풍·횡파중에서의 횡동요 응답스펙트럼의 계산 예를 보이고 있다. 이들 계산결과에 의하면 횡동요에 미치는 바람의 영향은 파도의 영향에 비해서 무시될 정도로 작다는 것을 알 수 있다. Figs. 10~14는 비손상시 및 손상시 횡풍·횡파중에서 1시간 이내에 선체가 전복할 확률을 계산한 것이다. 이들 계산결과에 의하면, 풍하측으로의 비대칭 침수시에 전복확률이 가장 높으며, 만재상태보다는 공선상태에서, 그리고 초기 GM 값이 작을수록, 그리고 해상상태가 거칠어질수록 선체전복의 위험이 높다는 것을 알 수 있다. 특히, 풍하측으로의 비대칭 침수시에 전복의 위험성이 높다는 것은, Fig. 1에서 동복원력을 나타내는 면적 b 의 축소로 인해서 풍상측에서의 불안정영역이 확대되기 때문이며, 이러한 상황을 피하는 것이 전복방지의 최선의 방법임을 알 수 있다.

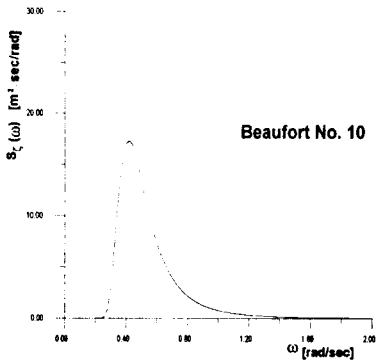


Fig. 5 ITTC(1978) wave spectrum

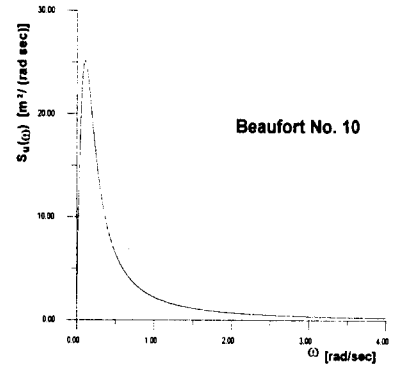


Fig. 6 Davenport wind spectrum

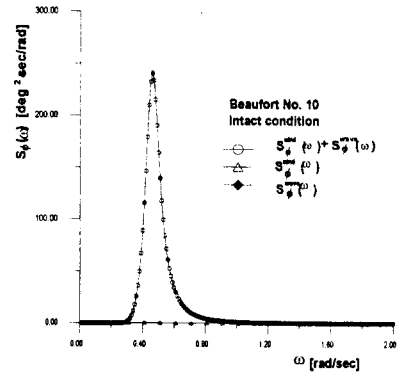


Fig. 7 Roll response spectrum(ballast condition, initial $GM=2.0 m$)

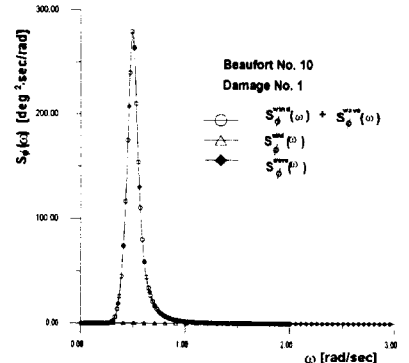


Fig. 8 Roll response spectrum(ballast condition, initial $GM=2.0 m$)

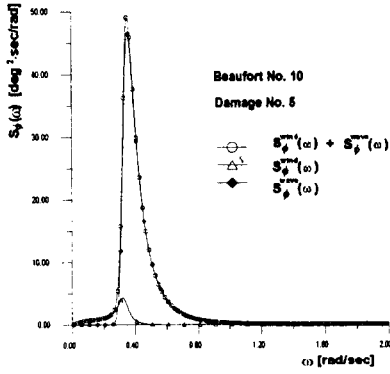


Fig. 9 Roll response spectrum(ballast condition, initial $GM=2.0\ m$)

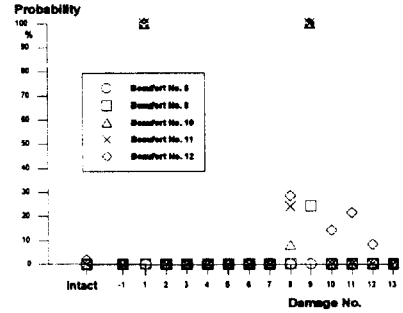


Fig. 12 Capsizing probability within an hour (ballast condition, initial $GM=2.0\ m$)

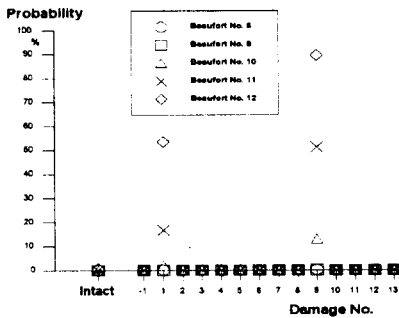


Fig. 10 Capsizing probability within an hour (ballast condition, initial $GM=3.1\ m$)

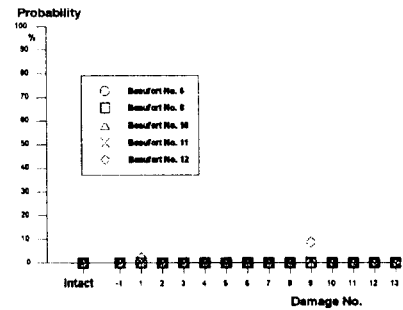


Fig. 13 Capsizing probability within an hour (half load condition, initial $GM=1.0\ m$)

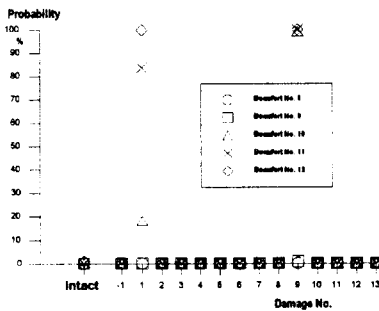


Fig. 11 Capsizing probability within an hour (ballast condition, initial $GM=2.5\ m$)

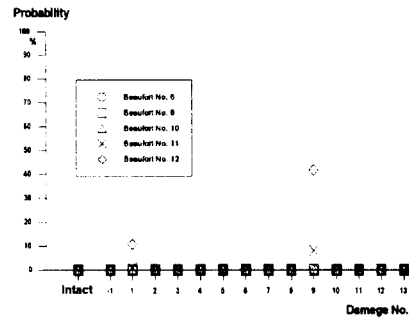


Fig. 14 Capsizing probability within an hour (half load condition, initial $GM=0.7\ m$)

4. 결론

IMO 복원성기준 A.562[4]의 물리적 개념을 이용하면서 신뢰성공학적 개념을 도입하여, 손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 동적 안정성을 전복확률로써 정량화하는 평가 기법을 제안하였으며, 이 방법에 의한 시계산 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 횡풍의 변동성분에 기인하는 응답스펙트럼은 횡파에 기인하는 응답스펙트럼에 비해서 무시될 정도로 미약하다.
- 2) 횡풍·횡파중에서 손상된 선박의 전복위험은 풍하측으로의 비대칭 침수시에 가장 높다. 따라서 풍하측 비대칭 침수의 조건(상황)을 피하는 것이 전복 방지의 최선 방법임을 알 수 있다.
- 3) 해상상태, 선박의 운항상태에 따른 전복확률을 정량적으로 평가할 수 있었다.

전복확률을 이용한 동적 안정성 평가 기법은 손상된 선박의 안전 대책 수립시에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

후 기

"이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제명 : 손상된 선박의 구난기술 및 안전예항에 관한 연구)"

참 고 문 헌

- [1]김윤수 등, "추파중을 항해하는 선박의 전복현상에 관한 연구(I) - 복원성 변동과 전복 -", 대한조선학회 1996년도 춘계학술대회논문집, page 451~456, 1996.
- [2]이현호 등, "파중 선박의 동적 안정성 해석을 위한 연구", 대한조선학회 1996년도 춘계학술대회 논문집, page 457~460, 1996.
- [3]박주성 등, "비선형 횡요운동에 있어서의 프렉탈과 혼돈현상", 대한조선학회 1999년도 춘계학술대회논문집, page 304~309, 1999.

- [4]IMO, "Recommendation on a Severe Wind and Rolling Criterion(Weather Criterion) for the Intact Stability of Passenger and Cargo Ships of 24 meters in Length and Over", Resolution A.562(14), 1985.
- [5]IMO/MSC/Circ.707, "Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Following and Quartering Seas", Oct. 1995.
- [6]Umeda, N., et al., "A Validation of Stability Standard Applied to Hard-Chine Craft Using the Risk Analysis on Capsizing", Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 219, 1993(in Japanese).
- [7]Belenky, V., "A Capsizing Probability Computation Method", Journal of Ship Research, Vol. 37, No. 3, SNAME, 1993.
- [8]일본조선학회, "파랑중 추진성능과 파랑하중", 운동성능연구위원회·제1회 심포지움 교재, page 30, 1984(in Japanese).
- [9]Davenport, A. G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 87, 1957.
- [10]대한조선학회, "1978 ITTC Sea Spectrum", 대한조선학회지 제 16 권 제 1호, 1979.
- [11]Shin, C., "On the Motions of Inclined Ships in Transverse Waves", Transaction of the WestJapan Society of Naval Architects, No. 63, 1981.
- [12]일본조선학회, "내항성에 관한 심포지움", page 40, 1969 (in Japanese).
- [13]Kat, J. O., "Dynamics of a Ship with Partially Flooded Compartment", Proceedings of 2nd Workshop on Stability and Operational Safety of Ships, page 107~118, Osaka, 1996.
- [14]Price, W. G., et al., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", Chapman and Hall Ltd, page 170, 1974.
- [15]Matora, S., "선체운동역학", 공립출판주식회사, page 75, 1957 (in Japanese).
- [16]손경호 등, "MARPOL 73/78에 의한 탱커선

형의 손상시 복원성 평가법에 관한 연구”, 대한
조선학회 1998년도 춘계학술대회논문집, page
57~60, 1998.