

손상된 선박의 구난 기술 및 안전 예항에 관한 연구(4)

- 손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 동적 안정성-

손경호* · 이상갑* · 최경식* · 김용기**

A Study on Rescue Technique and Safe Tow of Damaged Ship(4)
- Dynamic Stability of Damaged Ship in Beam Wind and Waves -

K.H. Sohn* · S.G. Lee* · K.S. Choi* · Y.K. Kim**

(목 차)	
Abstract	3. 시계산
1. 서 언	4. 결 론
2. 전복률을 이용한 동적 안정성 평가법	참고문헌

Abstract

This paper presents a brief outline of dynamic stability of damaged ship in rough, beam wind and waves. The one degree-of-freedom, linear roll equation is adopted with the effects of damage fluid and external forces, but without the effect of sloshing. We evaluate the dynamic stability in terms of capsizing probability based on energy balance mechanics and risk analysis, the method of which was proposed by Umeda [2] to the high speed crafts. As a result, we can predict the dynamic stability quantitatively according to sea state, operating and damage conditions.

1. 서 언

선박의 풍·파랑중 동적 안정성을 평가하는 수단으로서 IMO 복원성기준 A.562(weather criterion) [1] 가 있다. 이것은 에너지 평형과 관련한 전복 현상의 물리적 개념에 경험적 안전율을 고려한 형태로서, 경험 축적 자료가 불충분한 새로운 선형이나

손상된 선박에 적용하기에는 불합리한 점이 있다. 이의 개선책으로서 전복률을 이용하여 동적 안정성을 평가하는 방법이 최근 Umeda [2], Belenky [3] 등에 의해서 제안되었다.

Umeda의 방법은 IMO 복원성기준 A.562의 물리적 개념을 그대로 이용하면서 신뢰성공학적 개념을 도입한 것으로서 전복의 물리적 현상을 쉽게

* 정희원, 한국해양대학교

** 한국해양대학교 대학원

이해할 수 있다. Belenky의 방법은 복원력상실각 부근에서의 횡동요 운동방정식의 선형해(線型解)의 특성과 신뢰성공학을 이용하여 전복확률을 계산하는 방법이다.

본 연구에서는 Umeda의 방법을 답습하여, 횡풍·횡파중에서 표류하는 손상선박에 대해 전복확률을 이용한 동적 안정성 평가 기법에 관하여 고찰한다.

2. 전복확률을 이용한 동적 안정성 평가법

2.1 해상상태의 설정

해상조건으로서, 바람은 평균풍속 U_T (m/sec) 주위에서 시간적으로 불규칙하게 변화하는 변동풍 속 $u(t)$ (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 [4].

〈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 변동풍스펙트럼은 다음과 같이 표시되는 Davenport의 회귀식을 이용한다 [5].

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

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 [6].

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

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

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

ω : 파도의 원주파수

$S_\xi(\omega)$: 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 [7]에서 저자들에 의해 연구되었으며, 손상시의 잔존 복원아암곡선(residual GZ curve)으로부터 구해진다. 그리고 여기에 추가하여 풍압모우멘트에 기인하는 정적 횡경사가 일어나는데, 이것은 다음의 평형조건으로부터 구해진다.

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

여기서 F_A 는 수면 상부 선체에 작용하는 공기력, h_A 는 수면으로부터 F_A 의 착력점까지의 높이이다. 그리고 F_A 에 대해서 수면 하부에는 횡방향 유체 저항력(횡표류저항)이 F_A 와 크기가 같고 반대 방향으로 작용하는데, 수면으로부터 횡표류저항

의 착력점까지의 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 의해 추정된다.

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

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 [8]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 좌우동요와 횡동요의 상호간섭 유체력 성분과 서로 상쇄되어, 파랑강제력으로서 Froude-Krylov 유체력 성분만을 생각한다고 하면, 손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 횡동요는 다음의 1자 유도 운동방정식으로서 표시될 수 있다 [9]. 단, 횡동요 거동에 미치는 침입수의 슬로싱(sloshing) 영향은 무시한다 [10].

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

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

표시된다.

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}_r + b_e \dot{\phi}_r + \omega_s^2 \phi_r &= \omega_s^2 \gamma \Theta_u(t) + k_A u(t) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (8)$$

여기서

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

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

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

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

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

여기서 g 는 중력가속도이며, $S_a(\omega)$ 는 파경사스 펙트럼으로서 파에너지스펙트럼 $S_e(\omega)$ 와 다음 관계가 성립된다.

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

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

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

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

2.4 전복률

손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 횡동요가 정규화를 과정(Gaussian random process)이라고 가정하면 횡동요의 극대값(maxima)과 극소값(minima)의 확률밀도함수는 다음과 같다 [11].

$$f_{\pm}(\phi_r) = \frac{\epsilon}{\sqrt{2\pi m_0}} \exp\left\{-\phi_r^2/(2m_0\epsilon^2)\right\} \\ \pm \frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{m_0} \phi_r \cdot \exp\left\{-\phi_r^2/(2m_0)\right\} \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$\times \left[0.5 \pm \text{erf}\left\{\frac{\phi_r}{\epsilon} \sqrt{\frac{1-\epsilon^2}{m_0}}\right\} \right]$$

여기서 “±”부호는 각각 극대값과 극소값에 해당된다. 그리고

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

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

$$\text{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-Z^2/2) dZ \quad \dots \dots \dots (19)$$

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. 그리고 제 2의 불안정평형점이 해수유입각보다 크면 해수유입각을 ϕ_V 라 간주한다. Fig. 1에서 ϕ_c 또는 ϕ_V 의 바깥 쪽 즉, 불안정영역으로 대경사의 횡동요가 발생하면 안정영역으로 되돌아 오지 않고 전복에 이르게 된다.

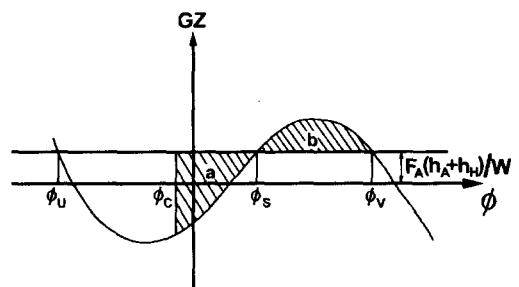


Fig. 1 Energy balance in roll

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

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

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

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

3. 시계산

3.1 공시선형

본 연구에서 시계산에 이용한 선박의 주요목은

〈Table 2〉 Principal particulars of ship and model

Items	Ship	Model
Length between perpendiculars L (m)	167.0	2.385
Breadth	B (m)	22.6
Depth	D (m)	13.4
Mean draft(designed)	d (m)	9.0
Displacement volume	V (m ³)	26186.0
Block coeff.	C_b	0.77
Prismatic coeff.	C_p	0.778
Waterline coeff.	C_w	0.849
Model scale		1/70

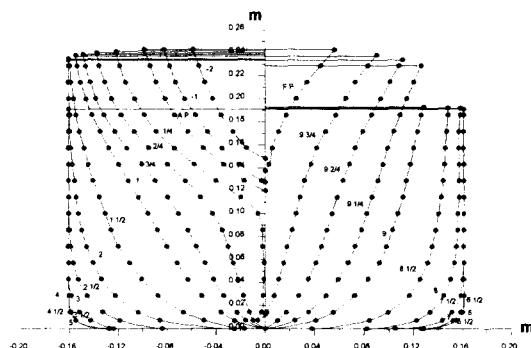


Fig. 2 Body plan of model

〈Table 2〉와 같고, 정면도는 Fig. 2와 같다. 이 선박은 저자들의 연구 [7]에서 다룬 동일한 선형으로서 선내 각 화물창(탱크)의 격벽 배치는 Fig. 3과 같다. 그리고 손상 상태를 나타내는 손상번호를 〈Table 3〉과 같이 정의한다.

〈Table 3〉 Definition of damage number

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

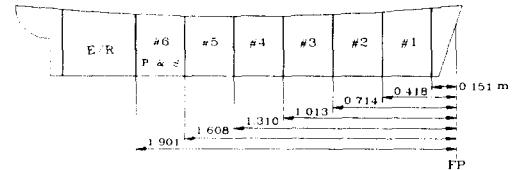


Fig. 3 Tank arrangement of model

3.2 계산 조건

횡동요 운동방정식의 각 계수는 다음과 같이 결정되는 것으로 가정한다. 먼저 결보기 관성반경 k_{xx} 를 다음 식에 의해 추정한다 [1].

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

여기서 L, B, d 는 각각 수선간장, 선폭, 평균흘수를 의미한다. 그리고 횡동요감쇠모우멘트계수는 다음과 같이 Bertin의 N 계수에 의해서 추정된다.

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

여기서 ϕ_m 은 평균 횡동요진폭으로서 $\phi_m = 20^\circ$ $N = 0.02$ 의 값을 취하는 것으로 한다. T_ϕ 는 정적횡경사각 ϕ_s 상태에서의 횡동요 고유주기로서 GM_s 로부터 결정된다. 그리고 파랑강제력항의 유효파경사계수 γ 는 다음 식에 의해서 추정된다 [1].

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

여기서 \overline{OG} 는 수면으로부터 무게중심까지의 높이로서 무게중심이 수면 위에 있을 때 양 (+)이다. 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, 12를 상정하며, 선박의 손상전 흘수와 메타센터높이는 참고문헌 [7]에서 모형시험에 이용한 공선상태와 반재상태를 상정하며, 손상전 흘수, 메타센터높이, 침수율(체적침수율 μ , 면적침수율 μ_s)은 <Table 4>와 같고, 공선상태의 $GM = 3.1 m$ 일 때 비손상시 GZ 곡선은 Fig. 4와 같다. 단, Fig. 4는 모형선 스케일에서의 계산치와 실험치의 비교를 보이고 있다.

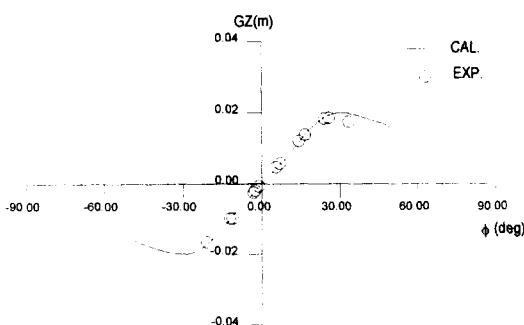


Fig. 4 Righting arm at intact condition

<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, 반재상태보다는 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 동북원력을 나타내는 면적 b 의 축소로 인해서 풍상측에서의 불안정영역이 확대되기 때문이며, 이러한 상황을 피하는 것이 전복방지의 최선의 방법임을 알 수 있다.

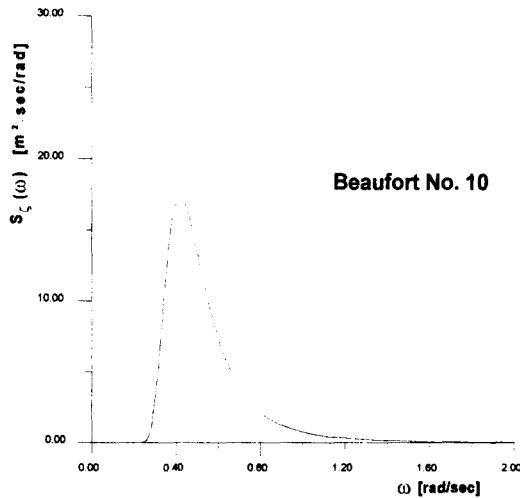


Fig. 5 ITTC(1978) wave spectrum

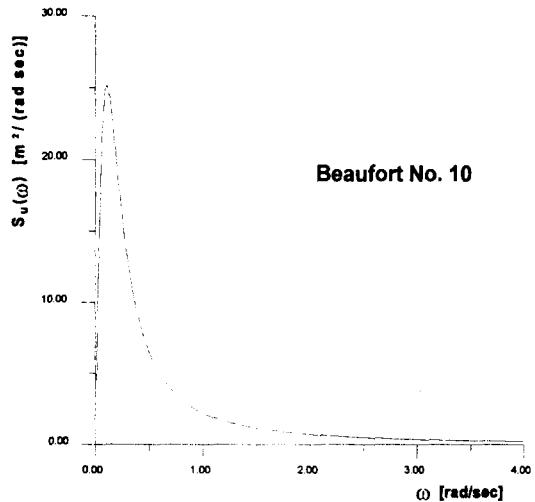


Fig. 6 Davenport wind spectrum

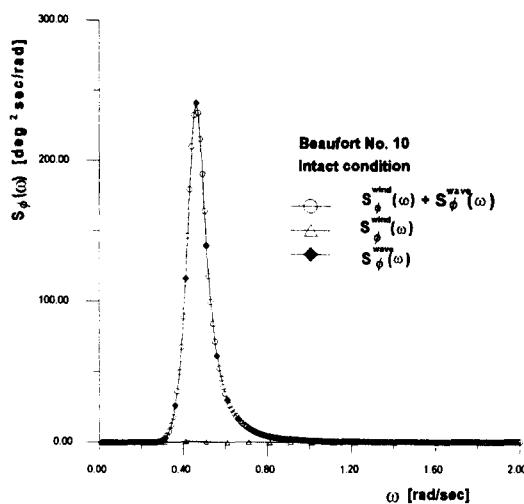


Fig. 7 Roll Spectrum

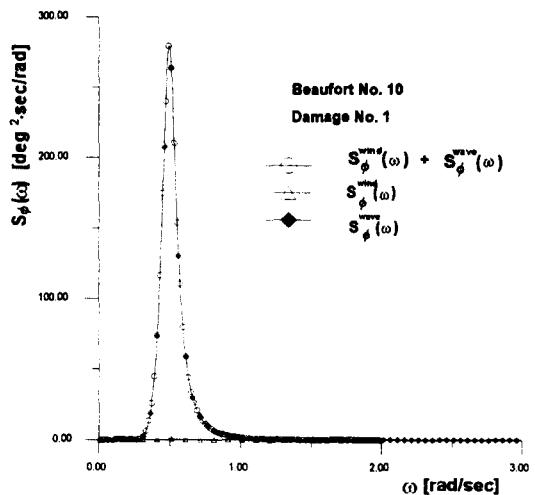


Fig. 8 Roll Spectrum

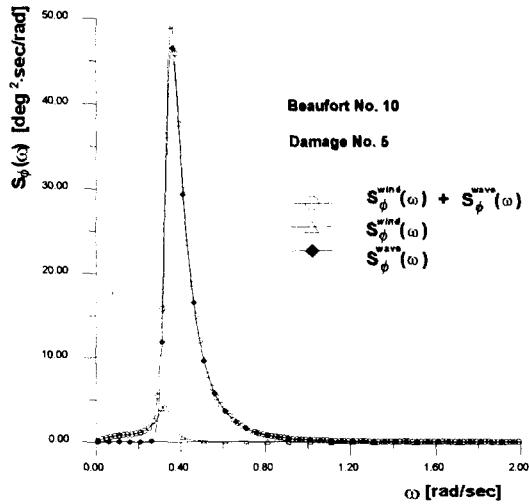


Fig. 9 Roll Spectrum

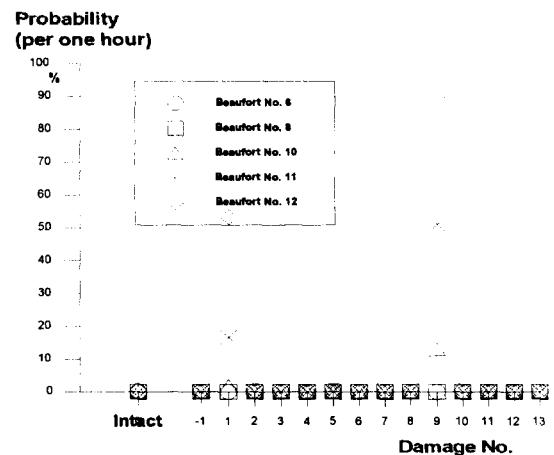


Fig. 10 Probability of capsizing per one hour
(ballast condition, initial GM = 3.1 m)

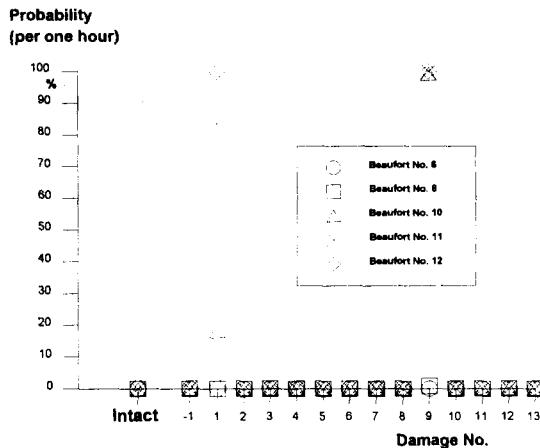


Fig. 11 Probability of capsizing per one hour
(ballast condition, initial GM = 2.5 m)

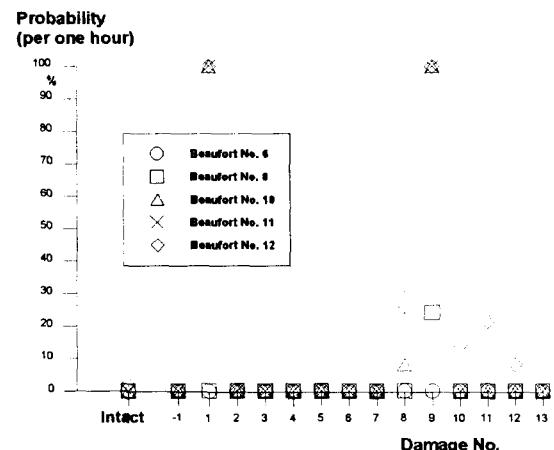


Fig. 12 Probability of capsizing per one hour
(ballast condition, initial GM = 2.0 m)

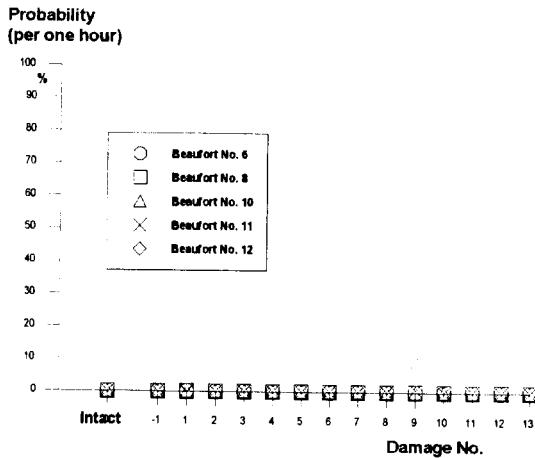


Fig. 13 Probability of capsizing per one hour
(half load condition, initial GM = 1.0 m)

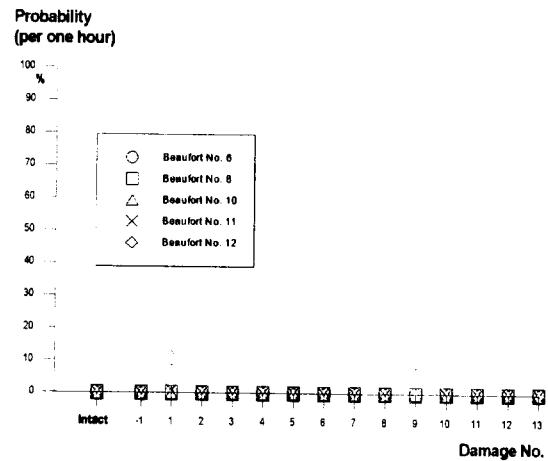


Fig. 14 Probability of capsizing per one hour
(half load condition, initial GM = 0.7 m)

4. 결 론

IMO 복원성기준 A.562 [1]의 물리적 개념을 이용하면서 신뢰성공학적 개념을 도입하여, 손상된 선박의 횡풍·횡파중에서의 동적 안정성을 전복화률로써 정량화하는 평가 기법을 제안하였으며, 이 방법에 의한 시계산 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 횡동요 응답에 미치는 횡풍의 영향은 횡파의 영향에 비해서 무시될 정도로 미약하다.
- 2) 횡풍·횡파중에서 손상된 선박의 전복 위험은 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 전복화률을 정량적으로 평가할 수 있었다.

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

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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).
- [3] Belenky, V., "A Capsizing Probability Computation Method", Journal of Ship Research, Vol. 37, No. 3, SNAME, 1993.
- [4] 일본조선학회, "파랑중 추진성능과 파랑하중", 운동성능연구위원회 · 제1회 심포지움 교재, page 30, 1984(in Japanese).
- [5] Davenport, A. G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 87, 1957.

- [6] Lloyd, A. R. J. M., "Seakeeping : Ship Behaviour in Rough Weather", Ellis Horwood Ltd, page 107, 1989.
- [7] 손경호 et al., "손상된 선박의 구난 기술 및 안전 예항에 관한 연구(1) - 손상시의 선체자세 및 잔존 복원성 평가법-", 한국항해학회지, 제21권 제3호, 1997.
- [8] Shin, C., "On the Motions of Inclined Ships in Transverse Waves", Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 63, 1981.
- [9] 일본조선학회, "내항성에 관한 심포지움", page 40, 1969(in Japanese).
- [10] Kat, J. O., "Dynamics of a Ship with Partially Flooded Compartment", Proceedings of 2nd Workshop on Stability and Operational Safety of Ships, Osaka, 1996.
- [11] Price, W. G., et al., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", Chapman and Hall Ltd, page 170, 1974.