

불규칙해면에서 선수부의 상대운동에 관한 연구

윤 점 동* · 김 종 훈** · 김 기 윤***

A Study on the Relative Bow Motion in Irregular Sea

Jeom-Dong Yoon · Jong-Hoon Kim · Ki-Yoon Kim

目 次

Abstract

기 호 설 명

1. 서 론

2. 이 론

2-1 좌표축의 선정

2-2 기본 방정식

3. 수 치 계 산

4. 결 론

참고문헌

Abstract

When a ship is sailing on the sea, she has the six-degrees of freedom of motion. It means that she meets a lot of dangerous situations.

Especially, when the VLCC is travelling in irregular sea, the slamming, the deck-wetness and the propeller racing are occurred with the sea state she is on.

These are the representative steps that a heave-to and a scudding are used for a ship building, but for a predominance in both.

The author intends to clarify this problem theoretically. The methods of statistical calculation are based with the ITTC spectral formulation and with the assumption that the wave height histogram follows the Rayleigh distribution.

In this study, the author gives an attention on the relative bow motion to a wave in the irregular sea.

* 正會員, 韓國海洋大學

** 海軍士官學校

*** 正會員, 釜山水產大學

It is verified that the relative displacement at the bow to sea level in the following sea is less than that in the head sea.

It is confirmed that, therefore, one have to sail with scudding when he is threatened to heave-to at a rough sea. But he must bear the propeller racing in mind in this case.

기 호 설 명

a_1 : Virtual mass for Heaving	$\dot{\theta}$: Angular Velocity in Pitching
a_2 : Virtual moment of inertia for Pitching	$\ddot{\theta}$: Angular acceleration of Pitching
b_1 : Damping force coefficient	θ_a : Dynamic Pitching amplitude
b_2 : Damping moment coefficient	θ_{st} : Static Pitching amplitude
$(B_r)_a$: Amplitude of relative bow motion	δ_z : Phase angle of Heaving
c_1 : Restoring force coefficient	δ_θ : Phase angle of Pitching
c_2 : Restoring moment coefficient	δ_{zb} : Phase angle of bow motion
F_o : Exciting force coefficient	δ_{or} : Phase angle of relative bow motion
g : Gravity acceleration	ζ_a : Wave amplitude
GM_L : Longitudinal metacentric height in calm water	K_z : Non-dimensional damping factor of Heaving
k' : Encountering wave number	K_θ : Non-dimensional damping factor of Pitching
L : Ship length	λ : Wave length
M : Ship mass	A_z : Tuning factor of Heaving
M_a : Added moment for Pitching	A_θ : Tuning factor of Pitching
M_o : Exciting moment for Pitching	μ : Encountering angle to wave propagation
M_z : Added mass for Heaving	μ_z : Magnification factor of Heaving
t : Time	μ_θ : Magnification factor of Pitching
V : Ship Velocity	v_z : Decaying constant of Heaving
z : Vertical displacement of C. G. of the ship	v_θ : Decaying constant of Pitching
\dot{z} : Vertical velocity in Heaving	ξ : Distance from C. G. of ship to wave trough
\ddot{z} : Vertical acceleration of Heaving	
Z_a : Dynamic Heaving amplitude	ω_e : Encountering wave frequency
$(Z_b)_a$: Bow motion amplitude	ω_w : Natural wave frequency
Z_{st} : Static Heaving amplitude	ω_z : Natural frequency of Heaving
θ : Angular displacement in Pitching	ω_θ : Natural frequency of Pitching
	Δ : Displacement

I. 서 론

대양을 항해하는 선박이 직면하게 되는 위험은 Rolling에 의한 소형선이나 Container선의 전복과 대형선에 있어서 Heaving 및 Pitching에 의한 선체손상으로 대별할 수 있을 것이다. 특히, 대형선이 대양항해시 당시 해상상태와 선체의 운동성능에 따라 Slamming과 Deck wetness, Propeller shaft emergence로 인한 Free racing등이 발생할 수 있다.

본 연구의 목적은 Slamming과 Deck wetness 또는 Green water flooding을 일으키는 원인을 선수부에서의 상·하동에 관해 고찰하여 보고, 이를 최소화하기 위한 선박조종법 등을 규명하는데 있다.

자력조선시 황천조선법으로는 Heave to와 Scudding이 있으나 선박설계를 위한 검토는 있었어도 안전조선을 위한 양자간의 우월성을 구체적으로 수치화한 검토는 없었다.

선수의 상·하동에 관한 문제를 해결하는데 있어, Heaving, Pitching 및 Rolling등의 영향을 고려해야 하지만, Rolling에 의한 영향은 그다지 크지 않으므로 본 연구에서 Rolling은 고려하지 않기로 한다.

선체운동은 Regular sea에서의 운동과 Irregular sea에서의 운동으로 구분하여 취급할 수 있지만, 실재문제로, Irregular sea에서 선수운동을 다루기로 한다. 선수의 동요운동은 Heaving과 Pitching 운동의 합이며 선수의 상·하동요운동과 관련하여 중요한 것은 선수와 수면과의 상대운동관계이다.

여기서는 선수의 상·하동요운동을 ITTC 기준 Wave spectrum을 이용하여 Beaufort scale 7인 불규칙해면에서의 Motion spectrum을 만들어 통계적으로 파악하

는 방법을 취하였다. 그리고, 이를 Head sea와 Following sea로 구별하여 처리하였으며, 선체의 길이·속력별로 R. A. O.를 적용하여 선수부에서의 Relative bow motion spectrum을 만들어 선수부 상·하동요운동을 계산하였다.

Head sea 때의 R. A. O.는 이미 나와 있는 자료를 사용하였고 Following sea의 R. A. O.는 필자가 해석적으로 계산하여 적용하였다.

Heaving운동은 지표고정축에 대한 선체 상·하동이며, Pitching운동은 이동선체에 잡은 횡 방향 수평축에 대한 동요운동이고, Relative bow motion은 수면에 대한 선수의 상대운동을 말한다.

II. 이 론

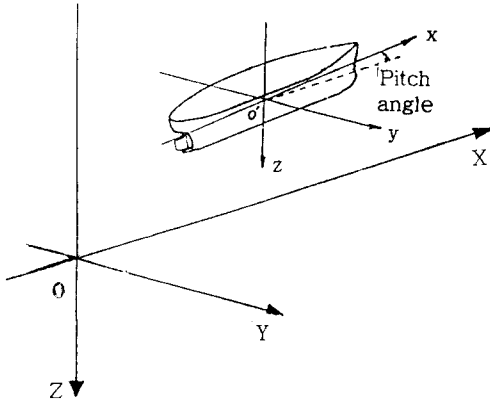
선체 선수부의 수면에 대한 상대적 위치는 공간 좌표계(Space axis)에 대한 Heaving운동으로 인한 상승·하강량, 선체 고정 좌표계(Body axis)에 대한 Pitching으로 인한 상·하동 변위량을 합성한 뒤 파로 인한 수면의 상하운동을 가감하여 산출할 수 있다.

1. 좌표축의 선정

Heaving운동에 대해서는 공간고정좌표계를 적용시키고 Pitching운동을 해석하기 위해서는 정지자유표면에 원점을 두고 선체에 고정된 이동좌표계를 사용한다. 또한, Wave에 대한 처리는 Heaving운동과 마찬가지로 공간고정좌표계에서 행한다.

공간고정좌표계 O-XYZ에서 수평면에 대한 선체중심(Ship center of gravity)의 수직변위(z)가 Heaving성분이 되고, x-z평면에서 중심 O'에 대한 각변위(θ)가 Pitching성분이 된다. 그리고 Wave는 공간고정좌

표계에서 원점 0를 출발하여 X축 방향으로 진행한다고 가정한다.



Coordinate Systems <그림 1>

따라서 Head sea라 하면 공간고정좌표계의 X축 방향과 이동좌표계의 x축이 반대 방향일 때를 말하는 것이고, Following sea는 양축의 방향이 일치할 때를 생각하면 된다.

2. 기본방정식

(1) Heaving 운동방정식

파랑중에서 Forced heaving 방정식은

$$a_1 \ddot{z} + b_1 \dot{z} + c_1 z = F_0 \cos \omega_e t \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 된다.

이 방정식의 정상해

$$Z(t) = Z_a \cos(\omega_e t - \delta_z) \dots\dots\dots (2)$$

를 구하면 된다. 여기서

$$Z_a = Z_{at} \cdot \mu_z \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_{at} = \frac{F_0}{c_1} \dots\dots\dots (3. a)$$

$$\mu_z = \frac{1}{\sqrt{(1 - A_z^2)^2 + 4K_z^2 A_z^2}} \dots\dots\dots (3. b)$$

$$A_z = \frac{\text{조우 주파수}}{\text{Heaving 고유 주파수}} = \frac{\omega_e}{\omega_z} \dots\dots\dots (3. c)$$

$$K_z = \frac{v_z}{\omega_z} \dots\dots\dots (3. d)$$

$$\omega_z = \sqrt{\frac{c_1}{a_1}}$$

$$v_z = \frac{b_1}{2a_1}$$

$$\delta_z = \tan^{-1} \frac{2K_z A_z}{1 - A_z^2} \dots\dots\dots (4)$$

로 계산되어 진다.

이때 μ_z 는 동 진폭과 정 진폭의 비(Z_a/Z_{st})를 나타내는 Magnification factor로 (3. b) 식과 같이 Tuning factor (A_z)와 Damping factor (K_z)의 함수로 결정지어 진다.

선체에 작용하는 힘은 선체질량과 가속도의 곱보다 크게 작용한다. 그 이유는 유체 (여기서는 해수)를 가속시키는 힘의 증분이 있기 때문이다. 따라서 이 힘의 증가분을 선체에 가해지는 가속도와 질량의 동일차원을 갖는 양 (quantity)과의 곱으로 정의할 수 있을 것이다. 즉,

$$(M + M_z) \ddot{z} = F \text{ (관성력)} \dots\dots\dots (5)$$

로 쓸 수 있으며, 여기서 M_z 를 부가질량 (Added mass), $(M + M_z)$ 를 겉보기 질량 (Virtual mass)이라 한다.

(2) Pitching 운동방정식

Heaving운동과 Pitching운동사이에는 정현파를 사용시 위상각(Phase angle)에 있어서 90°의 차이가 있지만 두 운동의 합성을 위해 수식전개시 운동방정식에서 같은 형태로 일치시켜 주어야 한다.

파랑중의 Forced pitching방정식은

$$a_2 \ddot{\theta} + b_2 \dot{\theta} + c_2 \theta = M_0 \sin \omega_e t \dots\dots\dots (6)$$

가 되고 이 방정식의 정상해는

$$\theta(t) = \theta_a \cos(\omega_e t + \delta_\theta) \dots\dots\dots (7)$$

이다. 여기서

$$\theta_a = \theta_{at} \cdot \mu_\theta \dots\dots\dots (8)$$

$$\theta_{at} = \frac{M_0}{c_2} = \frac{M_0}{\Delta GM_L} \dots\dots\dots (8. a)$$

$$\mu_\theta = \frac{1}{\sqrt{(1 - A_\theta^2)^2 + 4K_\theta^2 A_\theta^2}} \dots\dots\dots (8. b)$$

$$A_\theta = \frac{\text{조우 주파수}}{\text{Pitching 고유 주파수}} = \frac{\omega_e}{\omega_\theta} \dots\dots\dots (8. c)$$

$$K_\theta = \frac{v_\theta}{\omega_\theta} \dots\dots\dots (8. d)$$

$$\delta_e = \tan^{-1} \frac{1 - A_\theta}{2K_\theta A_\theta} \dots\dots\dots (9)$$

이다.

(3) Wave 운동 방정식

통상적으로 Wave spectrum을 적용시, Wave방정식이 필요하지 않으나, Follwing sea에서 R. A. O.를 해석적으로 산출하기 위하여 Wave 방정식을 세울 필요가 있다.

일반적인 Wave 방정식은

$$\zeta(t) = \zeta_a \cos(k'\zeta - \omega_e t) \dots\dots\dots (10)$$

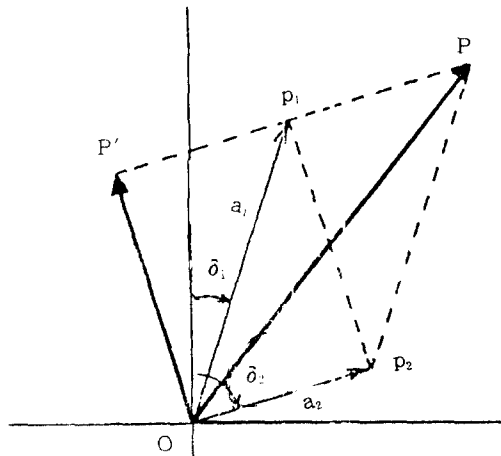
이고, 여기서 k'는 조우파수(Encounter-ing wave dnumber)로

$$k' = \frac{2\pi}{\lambda / \cos \mu} \dots\dots\dots (10. a)$$

이며, 따라서 선수부에 있어서 Wave운동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta_b(t) &= (\zeta_b)_a \cos\left(\omega_e t - \frac{\cos \mu \cdot L}{\lambda} \cdot \pi\right) \\ &= (\zeta_b)_a \cos(\omega_e t + \delta_{\zeta_b}) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

(4) 단순조화운동의 합성



Vector addition of two Simple harmonic motions <그림 2>

그림과 같이 두개의 단순조화운동 OP₁과 OP₂가 동일한 각주파수(ω)를 갖고 크기는 각각 a₁, a₂, 위상각은 δ₁, δ₂를 가질 때, 이 두 조화운동의 합을 P라 하면 cosine 법칙에 의해

$$\begin{aligned} P &= OP_1 + OP_2 \\ &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)} \\ &\quad \cdot \cos(\omega_e t + \delta) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{a_1 \sin \delta_1 + a_2 \sin \delta_2}{a_1 \cos \delta_1 + a_2 \cos \delta_2} \dots\dots\dots (12. a)$$

와 같이 쓸 수 있을 것이다.

또, 두 조화운동의 차를 P'라 하면 cosine 법칙을 이용하여

$$\begin{aligned} P' &= OP_1 - OP_2 \\ &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos(\delta_1 - \delta_2)} \\ &\quad \cdot \cos(\omega_e t + \delta') \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\delta' = \tan^{-1} \frac{a_1 \sin \delta_1 - a_2 \sin \delta_2}{a_1 \cos \delta_1 - a_2 \cos \delta_2} \dots\dots\dots (13. a)$$

로 표시할 수 있다.

(5) 선수수직운동 및 파에 대한 선수상대 수직운동

Heaving운동방정식과 Pitching운동 방정식의 합성은 (4)항에서 이론제시한 단순조화운동의 합성방법을 이용한다.

즉, 선수부의 수직운동을 Z_b(t)라 하면

$$Z_b(t) = Z(t) + \xi \cdot \sin(\theta(t)) \dots\dots\dots (14)$$

로 쓸 수 있으며 적은 Pitch각에서는

$$Z_b(t) = Z(t) + \xi \cdot \theta(t) \dots\dots\dots (14. a)$$

로 쓸 수 있다. 결국,

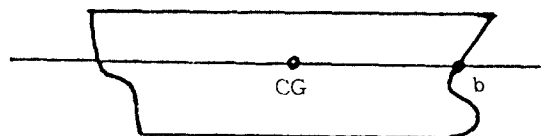
$$Z_b(t) = (Z_b)_a \cos(\omega_e t + \delta_{2b}) \dots\dots\dots (15)$$

라 하면 (2), (7)식에서 부터

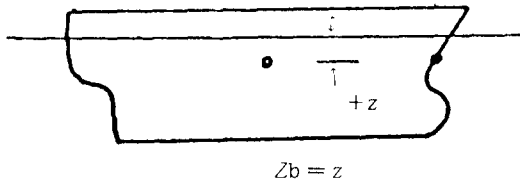
$$(Z_b)_a = \sqrt{(Z_a)^2 + (\xi \theta_a)^2 + 2 \cdot Z_a \cdot \xi \theta_a \cos((- \delta_2) - \delta_\theta)} \dots\dots\dots (16)$$

$$\delta_{2b} = \tan^{-1} \frac{Z_a \sin(-\delta_2) + \xi \theta_a \sin \delta_\theta}{Z_a \cos(-\delta_2) + \xi \theta_a \cos \delta_\theta} \dots\dots\dots (17)$$

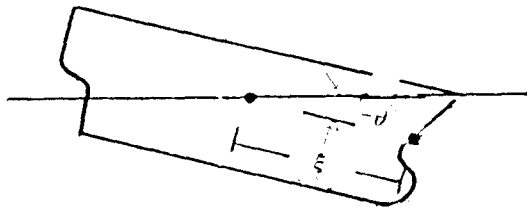
가 된다.



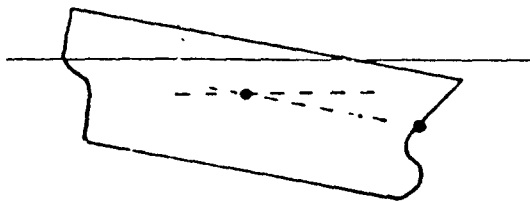
No motion
in Still-water



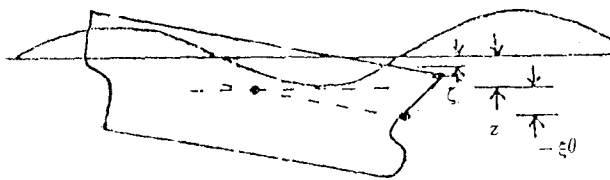
$Z_b = z$
Pure Heave
in Still-water



$Z_b = (-\xi\theta)$
Pure Pitch
in Still-water



$Z_b = z + (-\xi\theta)$
Heave and Pitch
in Still-water



$B_r = z + (-\xi\theta) - \zeta$
Heave and Pitch
in Waves
<그림 3>

다음으로, 파에 대한 선수상대수직운동은 Heaving과 Pitching으로 인한 선수수직운동과 파운동의 차이로 나타낼 수 있으며 (4) 항의 단순조화운동합성방법을 이용한다. 즉, 파에 대한 선수부의 상대수직운동을 $B_r(t)$ 라 하면

$$B_r(t) = Z_b(t) - \zeta_b(t) = (B_r)_a \cos(\omega_e t + \delta_{br}) \dots \dots \dots (18)$$

이고, (11)과 (15)식에서 부터

$$(B_r)_a = \sqrt{((Z_b)_a)^2 - 2((Z_b)_a)((\zeta_b)_a) \cos(\delta_{zb} - \delta_{\zeta_b}) + ((\zeta_b)_a)^2} \dots \dots \dots (19)$$

$$\delta_{br} = \tan^{-1} \frac{(Z_b)_a \sin \delta_{zb} - (\zeta_b)_a \sin \delta_{\zeta_b}}{(Z_b)_a \cos \delta_{zb} - (\zeta_b)_a \cos \delta_{\zeta_b}} \dots \dots \dots (20)$$

가 된다.

3. Motion Spectrum에 의한 통계적처리
(1) Spectrum Dencity

ω_w 로 부터 Wave Spectrum $S_\zeta(\omega_w)$ 를 만들고 이 때 ω_w 에 대응하는 ω_e 를 다음 식에 의해 계산하므로써 그 범위를 알 수 있게 된다. 즉,

$$\omega_e = \omega_w \left(1 - \frac{\omega_w \cdot V \cdot \cos \mu}{g} \right) \dots \dots \dots (21)$$

이 ω_e 의 범위 내에서 면적계산을 위한 Simpson's rule 적용을 위해 ω_e 의 간격을 구하고, 여기에 대응하는 ω_w 의 값을 계산한다.

$$\omega_w = \frac{g}{2V \cdot \cos \mu} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4V \cdot \cos \mu \cdot \omega_e}{g}} \right) \dots \dots \dots (22)$$

다시, ω_w 에 대한 Wave Spectrum, $S_\zeta(\omega_w)$ 를 만든다.

이 Wave Spectrum으로 부터 조우파(Encountering Wave) Spectrum 을 만든다.

$$S_\zeta(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} e^{-\frac{B}{\omega_w^4}} [ft^3 \cdot sec] \dots \dots \dots (23)$$

단, ω_w : 각 주파수 [rad/sec]

$$A : 8.10 \times 10^{-3} \cdot g^3$$

(g는 중력 가속도)

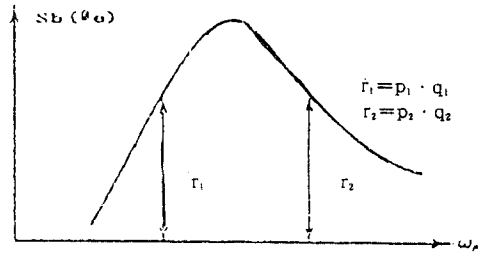
$$B : 33.56 / (H_\dagger)^3$$

(H_\dagger 은 유의파고 [ft])

$$S_{\zeta}(\omega_e) = \frac{S_{\zeta}(\omega_w)}{\sqrt{1 - \frac{4V \cdot \cos \mu \cdot \omega_e}{g}}} \dots\dots(23. a)$$

그런데 Head sea와 Following sea를 구분해서 고려해야 할 사항이 있다. 먼저 Head sea의 경우 $\cos \mu = -1$ 이므로 (22)식에서 ω_w 의 값은 취하지 않는다.

왜냐하면 ω_w 는 실제 (-)값이 존재하지 않기 때문이다.



Relative Bow Motion Spectrum

<그림4>

또, Following sea의 경우 $\cos \mu = 1$ 인데, (22)식과 (23)식에서 근호 안의 값은 (+)가 되어야 하므로 ω_e 의 범위가 Head sea의 경우와는 달리 한정되게 된다.

결국 Following sea에서는

$$1 - \frac{4V \cdot \cos \mu \cdot \omega_e}{g} > 0 \dots\dots(24)$$

을 만족시키는 ω_e 의 범위가 되어야 한다. 그리고, Following sea의 경우 ω_e 에 대응하는 ω_w 값이 두개가 취해지는데 이는 (22)식의 결과이다.

(2) R. A. O. (Response Amplitude Operator) 적용 및 통계적 선수상대운동계산

선수상대운동계산을 위해 (19)식에서 해수면에 대한 선수부의 상대운동크기 $(B_r)_{av}$ 로부터, 먼저

$$R. A. O. = \left(\frac{(B_r)_{av}}{\zeta_a} \right) \dots\dots(25)$$

를 구하고 선수상대운동 Spectrum $S_b(\omega_e)$ 를 만든다.

$$S_b(\omega_e) = R. A. O. \times S_{\zeta}(\omega_e) \dots\dots(26)$$

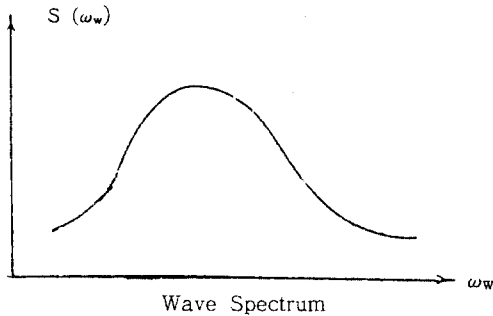
여기에 Simpson's rule을 적용시켜 면적 (m_0) 을 계산하고 Root Mean Square(RMS; $\sqrt{m_0}$)를 구한다.

평균 선수상대운동크기는

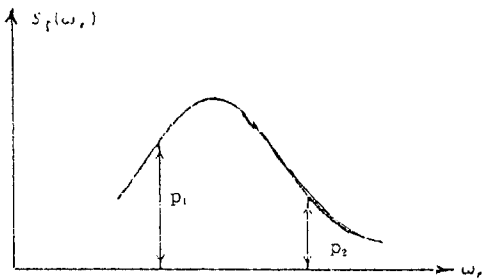
$$(B_r)_{av} = 1.253 \sqrt{m_0} \dots\dots(27)$$

이고, 1/3 선수상대운동크기는

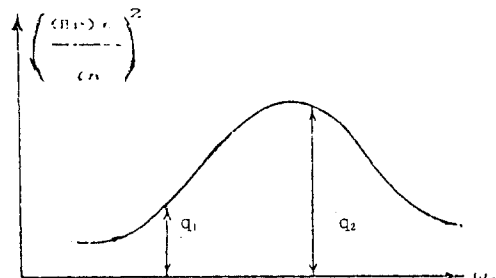
$$(B_r)_{1/3} = 2 \sqrt{m_0} \dots\dots(28)$$



Wave Spectrum



Encountering Wave Spectrum



Response Amplitude Operator

(of Relative Bow Motion)

이며, 1/10 선수상대운동크기는
 $(B_r)_{1/10} = 2.545 \sqrt{m_0} \dots \dots \dots (29)$
 로 산출하고, 1/100 선수상대운동크기는
 $(B_r)_{1/100} = 3.336 \sqrt{m_0} \dots \dots \dots (30)$
 로 계산한다.

Ⅲ. 수치 계산

(1) 불규칙해면상태

불규칙해면을 해석하기 위하여 정현파(Sine Wave)를 사용하였으며 파장(λ)을 1ft에서 ∞ 까지의 범위로 하였다. 또, 해면상태는 Beaufort Scale 7로, 풍속(Wind speed) 31 Knots로 하고 ITTC 기준 Spectrum식을 적용하며, 유의 파고는 18.5ft로 하였다.

(2) 선체계수

선체는 길이(L)를 100ft, 200ft, 300ft, 400ft로 하고, 폭(B)은 0.17L, 흘수(T)는 0.08L, C_{WP} 0.8, 중 메타센타높이(GM_i)는 1L로 하였으며, 각각의 무게(Δ)를 1,000ton, 2,000ton, 4,500ton, 12,000ton으로 구분하여 계산하였다.

선속(V)은 5knots, 10knots, 15knots, 20knots로 분류하여, 각각의 길이 및 선속에 따른 변화를 고찰 해 보았으며, 해수의 밀

도(ρ), 는 104.6 kg · sec/m³으로 하였다.

Heaving 운동에 있어서 부가질량(Added Mass : M_2)은 0.8M, 무차원 감쇄계수($b_1 \cdot gL/\Delta$)는 1.8, 무차원 외력계수($F_0 \cdot / \rho \cdot g \cdot \zeta_a \cdot L \cdot B$)는 0.19로 하여 계산하였고, Pitching 운동 계산에서, 부가관성모우먼트(Added Moment of Inertia : M_a)는 0.54, 무차원 감쇄계수($b_2 \cdot gL/\Delta W \cdot L^2$) 0.164, 무차원 외부모멘트계수($M_0 \cdot / (1/2 \rho \cdot g \cdot \zeta_a \cdot L^2 \cdot B)$)는 0.26, y축방향환동반경(K_{yy})은 0.25L로 하였다.

(3) Spectral Dencity 계산

Spectrum의 계산에 있어서 ITTC 기준 Spectrum식을 사용하였다.

(4) 면적계산

면적계산은 Simpson's rule을 이용하였으며, Following sea의 경우 (24)식의 좌변과 우변을 등호로 만족시키는 ω_e 값 부근은 계산에서 제외시키고 Simpson's rule을 적용시켰다.

또한, 수정계수(Correction factor : C.F)는 1로 하여 통계적 처리계산인 평균 $\cdot 1/3 \cdot 1/10 \cdot 1/100$ 상대운동진폭을 구하였다. 수정계수를 1로 한 것은 ITTC 기준 Spectrum식은 파고Histogram이 Rayleigh분포를 따른다고 가정하기 때문이다.

[圖 1] Head sea,

L = 400 (ft)

V = 5 (knots)

(m)	ω_w	$S_z(\omega_w)$	ω_e	$S_z(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
788	0.280	0.001	0.3	0.000	5.3885	0.0024
222	0.527	57.855	0.6	45.324	12.9893	588.7256
109	0.752	25.687	0.9	18.423	19.5955	361.0051
67	0.959	9.211	1.2	6.129	0.7938	4.8650
46	1.152	3.909	1.5	2.437	4.0140	9.7815
35	1.334	1.927	1.8	1.134	0.3543	0.4018
27	1.506	1.063	2.1	0.594	1.9609	1.1652
22	1.669	0.639	2.4	0.341	0.5865	0.1998
18	1.826	0.410	2.7	0.209	1.6972	0.3552
16	1.976	0.277	3.0	0.136	0.4942	0.0671
14	2.121	0.195	3.3	0.092	1.6567	0.1526
12	2.260	0.412	3.6	0.065	0.6889	0.0446
1	2.395	0.106	3.9	0.047	1.1027	0.0518
10	2.526	0.081	4.2	0.035	1.4207	0.0497
9	2.654	0.064	4.5	0.027	0.5638	0.0150
8	2.777	0.051	4.8	0.021	1.2774	0.0263
7	2.898	0.041	5.1	0.016	1.3463	0.0219
7	3.015	0.034	5.4	0.013	0.5896	0.0077
6	3.130	0.028	5.7	0.011	1.1122	0.0117

$RMS = \sqrt{m_0} = 14.4579 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 18.1157 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 28.9158 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{1/10} = 2.545\sqrt{m_0} = 36.7953 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 48.2315 \text{ (ft)}$

〔 丑 2 〕 Following sea,

L = 400 (ft)

v = 5 (Knots)

[m]	ω_w	$S_z(\omega_w)$	ω_e	$S_z(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
571	0.328	0.473	0.3	0.571	1.5118	0.8631
299	0.454	43.259	0.4	56.782	1.2302	69.8517
176	0.592	51.921	0.5	75.295	4.3406	326.8214
111	0.746	26.455	0.6	43.456	12.5369	544.7985
72	0.924	10.893	0.7	21.131	11.5660	244.4032
47	1.142	4.075	0.8	10.161	11.9650	121.5722
29	1.456	1.255	0.9	5.306	7.3137	38.8093
11	2.357	0.115	0.9	0.485	20.2203	9.8152
9	2.671	0.062	0.8	0.153	6.2204	0.9545
7	2.889	0.042	0.7	0.081	6.9324	0.5591
7	3.067	0.031	0.6	0.051	5.4267	0.2750
6	3.221	0.024	0.5	0.035	2.7142	0.0951
5	3.359	0.020	0.4	0.026	1.2336	0.0317
5	3.485	0.016	0.3	0.020	3.0044	0.0592
5	3.601	0.014	0.2	0.016	6.7719	0.1054
4	3.710	0.012	0.1	0.013	7.0176	0.0884

$$RMS = \sqrt{m_0} = 11.7527 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 14.7261 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 23.5055 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/10} = 2.545\sqrt{m_0} = 29.9107 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 39.5597 \text{ (ft)}$$

[표 3] Head sea,

L = 400 (ft)

V = 10 (Knots)

(m)	ω_w	$S_{\zeta}(\omega_w)$	ω_e	$S_{\zeta}(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
886	0.246	0.000	0.3	0.000	5.1828	0.0000
268	0.479	51.740	0.6	34.426	12.0684	415.4658
138	0.667	38.735	0.9	22.792	19.8663	452.8018
88	0.835	16.915	1.2	9.019	3.2550	29.3559
63	0.988	8.035	1.5	3.946	0.4544	1.7929
48	1.130	4.283	1.8	1.960	2.5711	5.0389
39	1.263	2.509	2.1	1.079	1.4965	1.6149
32	1.389	582	2.4	0.644	0.3640	0.2343
27	1.508	11.056	2.7	0.409	1.5471	0.6328
3	1.621	0.738	3.0	0.273	1.3206	0.3608
21	1.730	0.535	3.3	0.190	0.5222	0.0993
18	1.835	0.400	3.6	0.137	1.5237	0.2084
16	1.935	0.307	3.9	0.101	1.0096	0.1022
15	2.033	0.240	4.2	0.077	0.7472	0.0573
14	2.127	0.192	4.5	0.059	1.5588	0.0925
13	2.219	0.155	4.8	0.047	0.6375	0.0298
12	2.307	0.128	5.1	0.037	1.2331	0.0461
11	2.394	0.106	5.4	0.030	1.1843	0.0359
10	2.478	0.098	5.7	0.025	0.6930	0.0172

$RMS = \sqrt{m_0} = 15.2149 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 19.0643 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 30.4298 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{1/10} = 2.545\sqrt{m_0} = 38.7220 \text{ (ft)}$

$(B_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 50.7570 \text{ (ft)}$

〔 丑 4 〕 Following sea,

L = 400 (ft)

V = 10 (Knots)

[m]	ω_w	$S_{\zeta}(\omega_w)$	ω_e	$S_{\zeta}(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
2286	0.164	0.000	0.15	0.000	2.8074	0.0000
1195	0.227	0.000	0.20	0.000	2.3346	0.0000
703	0.296	0.010	0.25	0.015	1.7412	0.0261
443	0.373	7.312	0.30	12.011	1.1582	13.9118
289	0.462	46.257	0.35	89.738	1.0357	92.9376
189	0.571	54.915	0.40	136.938	2.6219	359.0441
116	0.728	28.939	0.45	122.381	8.3379	1020.4000
44	1.179	3.502	0.45	14.811	4.3759	64.8114
35	1.336	1.913	0.40	4.771	9.1176	43.4961
30	1.445	1.303	0.35	2.527	2.2472	5.6787
26	1.534	0.971	0.30	1.595	2.0554	3.2779
24	1.611	0.762	0.25	1.105	6.9224	7.6525
22	1.680	0.620	0.20	0.813	7.4536	6.0625
20	1.742	0.516	0.15	0.624	3.2462	2.0252
19	1.801	0.439	0.10	0.494	0.5647	0.5647
18	1.855	0.378	0.05	0.400	2.5941	1.0374

$$\text{RMS} = \sqrt{m_0} = 7.0795 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 8.8706 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 14.1590 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/10} = 2.454\sqrt{m_0} = 18.0174 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 23.8297 \text{ (ft)}$$

[丑 5] Head sea,

L = 400 (ft)

V = 15 (Knots)

[m]	ω_w	$S_{\zeta}(\omega_w)$	ω_e	$S_{\zeta}(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
981	0.251	0.000	0.3	0.000	5.0235	0.0000
312	0.445	39.210	0.6	23.072	11.2508	259.5793
166	0.609	49.139	0.9	25.101	18.1852	456.4740
108	0.753	25.477	1.2	11.657	6.1844	71.8613
79	0.885	13.196	1.5	5.517	0.2779	1.5334
61	1.005	7.424	1.8	2.876	0.6043	1.7379
49	1.118	4.518	2.1	1.638	1.9257	3.1541
41	1.223	2.932	2.4	1.003	1.8265	1.8312
35	1.323	2.004	2.7	0.650	0.7617	0.4952
31	1.418	1.427	3.0	0.442	0.5497	0.2428
27	1.509	1.052	3.3	0.312	1.3734	0.4282
24	1.596	0.798	3.6	0.227	1.5413	0.3501
22	1.680	0.619	3.9	0.170	0.7498	0.1273
20	1.761	0.490	4.2	0.130	0.6961	0.0905
18	1.839	0.395	4.5	0.101	1.4601	0.1482
17	1.915	0.323	4.8	0.081	1.2930	0.1041
16	1.989	0.268	5.1	0.065	0.5947	0.3586
15	2.060	0.225	5.4	0.053	1.0155	0.3538
14	2.130	0.190	5.7	0.044	1.5264	0.0667

$$RMS = \sqrt{m_0} = 15.0400 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 18.8451 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 30.0800 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/10} = 2.454\sqrt{m_0} = 38.2768 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 50.1735 \text{ (ft)}$$

〔 丑 6 〕 Following sea.

L = 400 (ft)

V = 15 (Knots)

[m]	ω_w	$S_{\zeta}(\omega_w)$	ω_e	$S_{\zeta}(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
1307	0.217	0.000	0.18	0.000	2.4112	0.0000
874	0.265	0.000	0.21	0.000	1.9949	0.0001
597	0.321	0.243	0.24	0.491	1.4999	0.7369
407	0.389	13.051	0.27	33.660	1.0040	33.7941
261	0.485	53.160	0.30	224.806	0.9474	212.9706
100	0.786	21.637	0.30	91.500	7.9994	731.9368
79	0.882	13.363	0.27	34.465	0.0282	276.6930
68	0.950	9.610	0.24	19.425	5.8739	114.1022
61	1.006	7.407	0.21	12.719	3.3787	42.9725
55	1.054	5.954	0.18	9.042	1.4954	13.5212
51	1.097	4.926	0.15	6.779	0.6397	4.3362
48	1.137	4.163	0.12	5.277	0.8422	4.4437
45	1.174	3.576	0.09	4.224	1.8787	7.9364
42	1.208	3.114	0.06	3.457	3.3905	11.7212

$$\text{RMS} = \sqrt{m_0} = 5.1819 \text{ (ft)}$$

$$(\text{Br})_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 6.4929 \text{ (ft)}$$

$$(\text{Br})_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 10.3637 \text{ (ft)}$$

$$(\text{Br})_{1/10} = 2.454\sqrt{m_0} = 13.1878 \text{ (ft)}$$

$$(\text{Br})_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 17.4421 \text{ (ft)}$$

[표 7] Head sea.

L = 400 (ft)

V = 20 (Knots)

[m]	ω_w	$S_z(\omega_w)$	ω_e	$S_z(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
1072	0.240	0.000	0.3	0.000	4.8957	0.0000
354	0.417	26.123	0.6	13.929	10.5771	147.3235
193	0.565	55.628	0.9	25.454	16.3938	417.2803
128	0.694	34.078	1.2	13.872	7.6242	105.7599
94	0.811	19.086	1.5	7.067	1.5104	10.6736
73	0.917	11.240	1.8	3.843	0.1241	0.4769
60	1.016	7.052	2.1	2.251	0.6814	1.5341
50	1.109	4.680	2.4	1.406	1.5814	2.2241
43	1.197	3.253	2.7	0.926	1.8148	1.6813
38	1.280	2.350	3.0	0.637	1.2429	0.7922
33	1.360	1.752	3.3	0.455	0.5939	0.2700
30	1.436	1.341	3.6	0.334	0.6524	0.2180
27	1.510	1.050	3.9	0.252	1.2835	0.3233
25	1.580	0.837	4.2	0.194	1.5738	0.3054
23	1.649	0.679	4.5	0.152	1.1020	0.1679
21	1.715	0.559	4.8	0.122	0.5888	0.0716
19	1.779	0.466	5.1	0.098	0.8283	0.0515
18	1.842	0.392	5.4	0.081	1.4306	0.1154
17	1.903	0.334	5.7	0.067	1.4141	0.0946

$$RMS = \sqrt{m_0} = 14.4766 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{av} = 1.253\sqrt{m_0} = 18.1392 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/3} = 2\sqrt{m_0} = 28.9532 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/10} = 2.454\sqrt{m_0} = 36.8430 \text{ (ft)}$$

$$(B_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{m_0} = 48.2940 \text{ (ft)}$$

〔 丑 8 〕 Following sea,

L = 400 (ft)

V = 20 (Knots)

[m]	ω_w	$S_z(\omega_w)$	ω_e	$S_z(\omega_e)$	RAO	$S_b(\omega_e)$
1061	0.241	0.000	0.18	0.000	2.2056	0.0000
755	0.286	0.002	0.20	0.004	1.8023	0.0077
519	0.344	1.634	0.22	5.893	1.2781	7.5316
166	0.609	49.099	0.22	177.056	2.3789	421.1976
138	0.668	38.560	0.20	96.154	3.8781	372.8986
121	0.712	31.219	0.18	63.106	5.1480	324.8695
109	0.750	25.930	0.16	45.230	6.1534	278.3197
100	0.783	21.968	0.14	34.202	6.8805	235.3255
93	0.813	18.908	0.12	26.834	7.3315	196.7331
87	0.840	16.483	0.10	21.635	7.5211	162.7209
82	0.865	14.522	0.08	17.817	7.4731	133.1452
78	0.889	12.909	0.06	14.923	7.2178	107.7133
74	0.911	11.563	0.04	12.676	6.7899	86.0690
71	0.933	10.427	0.02	10.894	6.2269	67.8382

$$\text{RMS} = \sqrt{\overline{m}_0} = 6.5455 \text{ (ft)}$$

$$(\text{B}_r)_{av} = 1.253\sqrt{\overline{m}_0} = 8.2015 \text{ (ft)}$$

$$(\text{B}_r)_{1/3} = 2\sqrt{\overline{m}_0} = 13.0915 \text{ (ft)}$$

$$(\text{B}_r)_{1/10} = 2.454\sqrt{\overline{m}_0} = 16.6583 \text{ (ft)}$$

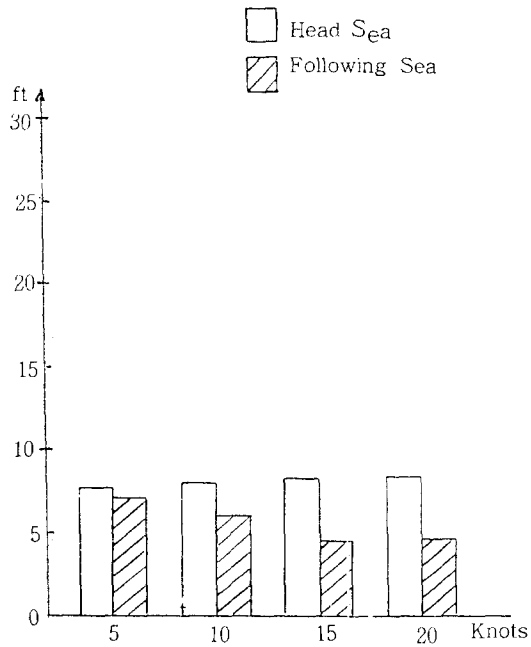
$$(\text{B}_r)_{1/100} = 3.336\sqrt{\overline{m}_0} = 22.0321 \text{ (ft)}$$

[표 9]

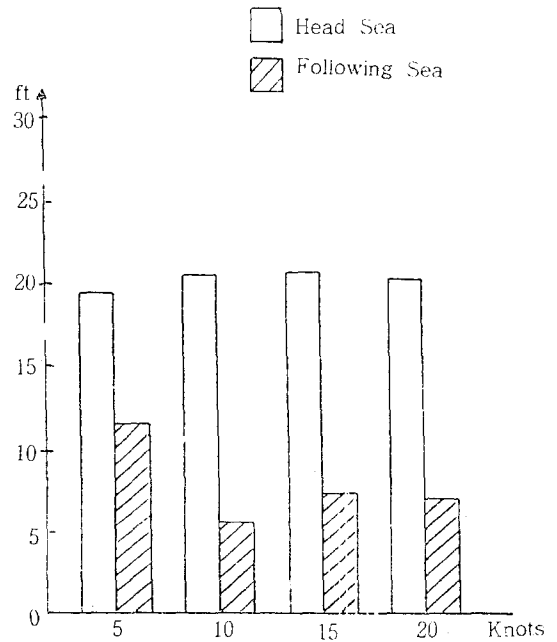
Comparison to Relative Bow Motion
with Ship's length & speed
at Head sea & Following sea

Ship			Relative Bow Motion				
Length	Speed		RMS	AVE	1/3	1/10	1/100
100 Feets	5 Knots	H	3.8048	4.7674	7.6098	9.6834	12.6931
		F	3.5860	4.4933	7.1720	9.1264	12.0705
	10 Knots	H	4.0023	5.0149	8.0046	10.1858	12.3516
		F	3.0486	3.8199	6.0927	7.7587	10.2616
	15 Knots	H	4.0980	5.1348	8.1960	10.4294	13.6709
		F	2.2338	2.7990	4.4679	5.6850	7.5189
	20 Knots	H	4.1384	5.1854	8.2769	10.5323	13.8058
		F	2.2354	2.7990	4.4707	5.6890	7.5242
200 Feets	5 Knots	H	6.1096	7.6553	12.2192	15.5490	20.3817
		F	3.5761	4.4809	7.1521	9.1011	12.0370
	10 Knots	H	6.4179	8.0416	12.8359	16.3337	21.4102
		F	2.2702	2.8446	4.5403	5.7775	7.6413
	15 Knots	H	5.4734	8.0416	12.9468	16.4748	21.5952
		F	2.5253	3.1041	5.0505	6.4267	8.4999
	20 Knots	H	6.4017	8.1112	12.8033	16.2922	21.3560
		F	2.0676	2.5907	4.1352	5.2620	6.9595
300 Feets	5 Knots	H	9.7646	12.2550	19.5291	24.8508	32.5746
		F	5.8646	7.3483	11.7292	14.9254	19.7403
	10 Knots	H	10.3288	12.9420	20.6576	26.2868	34.4569
		F	2.7651	3.4647	5.5301	7.0371	9.3072
	15 Knots	H	10.3799	13.0060	20.7599	26.4169	34.6275
		F	3.5512	4.5750	7.3024	9.2923	12.2900
	20 Knots	H	10.1682	12.7408	20.3363	25.8780	33.9210
		F	3.5102	4.3983	7.0205	8.9335	11.8154
400 Feets	5 Knots	H	11.4579	18.1157	28.9158	36.7953	48.2315
		F	11.7527	14.7261	23.5055	29.9107	39.5597
	10 Knots	H	15.2149	19.0643	30.4298	38.7220	50.7570
		F	7.0795	8.8706	14.1590	18.0174	23.8297
	15 Knots	H	15.0400	18.8451	30.0800	38.2768	50.1735
		F	5.1819	6.4929	10.3637	13.1878	17.4421
	20 Knots	H	14.4766	18.1392	28.9532	36.8430	48.2940
		F	6.5455	8.2015	13.0910	16.6583	22.0321

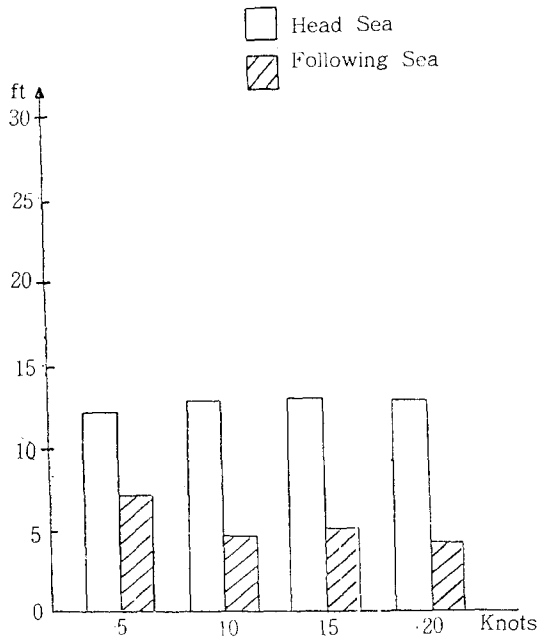
<REMARKS> H : at Head sea F : at Following sea
 RMS : Root Mean Square of Motion AVE : Average
 1/3 : Mean of One-Third(Significant) 1/10 : Mean of One-Tel/1
 1/100 : Mean of One-Hundredth



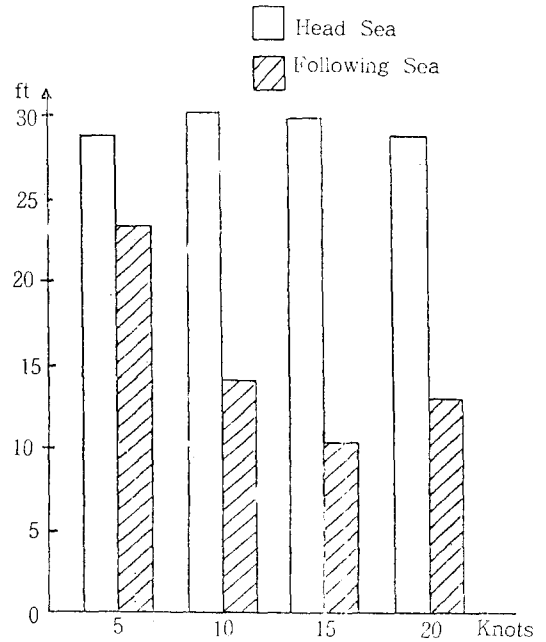
길이 100ft 선박의 선수부 유효상대운동크기 <그림 5>



길이 300ft 선박의 선수부 유효상대운동크기 <그림 7>



길이 200ft 선박의 선수부 유효상대운동크기 <그림 6>



길이 400ft 선박의 선수부 유효상대운동크기 <그림 8>

IV. 결 론

황천항해시 대형선이 Pitching을 크게하여 Green Water flooding을 일으키게 되면, 절손파괴의 위험에 직면하기 시작함을 나타낸다. 그 이유는 중요로 인한 가속도의 크기가 지구중력가속도인 g 에 거의 육박하기 때문이다.

예를들면, 500ton의 Green Water Flooding이 생겼을 때, 이 무게는 1,000ton이 될 수 있고, 이것은 큰 파괴응력을 일으킬 수 있다.

(1) 일정길이의 선박이 일정속력을 가지고 항주시 해수면에 대한 선수상대변위는 Head sea 보다는 Following sea 에서 적게 나타난다.

(2) 따라서 황천돌파시 Heave to로 본선의 안전이 위협을 받을 때에는 당연히 Scudding을 실시하여야 한다.

(3) Following sea의 경우 속력이 증가됨에 따라 대체적으로 선수상대 변위가 감소되므로 선수상대변위를 줄이고자 할 때에

는 고속으로 회전하는 Propeller shaft emergence로 인한 Free racing을 고려해야 한다.

(4) 동일한 속력에서는 신체의 길이가 길어짐에 따라 Head sea나 Following sea 모두 선수상대변위는 증가한다.

(5) 동일선체길이에 대한 속력변화시 Heda sea 에서의 선수상대변위는 적어도 계산상으로는 큰 차이를 보이지 않았다.

참 고 문 헌

1. Rameswar Bhattacharyya ; "Dynamics of Marine Vehiches", John Wiley & Sons Inc., New York (1978), pp 35~75, 101~153.
2. Edward V. Lewis ; "Principles of Naval Architecture", SNAME, New York(1967), pp 628~669.
3. 윤점동 ; "선박운용의 이론과 실무(조종편)", 제일문화사, 부산(1982), pp 143~208.