

論 文

풍·파랑중에서 투망중인 트롤어선의 슬립웨이를 통한 갑판침수에 관한 연구

손 경 호*

On the Deck Wetness Through Slipway of a Stern Trawler in Wind and Waves

Kyoung-Ho Sohn *

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서언

2. 투망중인 트롤어선의 슬립웨이를
통한 선미갑판의 침수

3. 수치계산 예

4. 결론

참고문헌

Abstract

The slipway, which is one of stern construction, is necessary for stern trawler to let fishing implements, such as fishing net, otter board and warp, go out effectively. It may be doubtful whether there is any possibility for deckwetness to occur because the slipway is obliquely in contact with sea surface. The author discusses any possibility for deckwetness through slipway of stern trawler in wind and waves. A 350 G/T class, ocean-going stern trawler is adopted for the present study. The stern trawler is particularly assumed to drift with fishing implements hung down the slipway due to internal or external accident during fishing operation in real sea. The author considers two factors as possibility for deckwetness to occur through slipway. One is mooring effect of fishing implements hung down the slipway under wind pressure, and the other is relative ship motion in vertical direction in waves. Through the numerical calculation, the author clarifies that there is thin possibility for deckwetness to occur from above two points of view.

* 한국해양대학교 해양시스템공학부 교수

1. 서 언

선미트를 어선은 어로작업시에 어구를 선외로 원활하게 투하하기 위해서 선미 중앙부에 슬립웨이(slipway)를 두고 있다. 슬립웨이는 선미갑판으로부터 경사면을 따라 해수면과 직접 연결되어 있기 때문에, 황천 조업중 슬립웨이를 통한 갑판 침수(deck wetness) 발생 가능성이 우려될 수 있다. 본 연구에서는 선미트를 어선이 풍·파랑중에서 투망된 상태로 예망(曳網) 조업중 충돌, 좌초 등 원인에 의해 손상(damage)을 받거나 또는 화재, 기관고장 등 원인에 의해 조종불능(disabled) 상태가 되었을 때를 가상하고, 이때의 선미갑판 침수 가능성에 대해서 이론적으로 고찰해 보고자 한다. 검토 대상으로 삼은 공시선은 총톤수 350톤 급으로서, Falkland 어장을 주 조업해역으로 하고 있는 선미트를 어선이다.

2. 투망중인 트롤어선의 슬립웨이를 통한 선미갑판의 침수

본 연구에서는 선미트를 어선이 황천 조업중 어떤 원인에 의해 조종불능 상태가 되었을 때를 가정하고, 투망된 어구의 계류 효과에 기인하는 선미출수 변화와 선체운동에 기인하는 수직방향 상태변위가 유효조건을 초과함으로써 선미갑판 침수가 발생하는 것으로 간주한다.

2.1 투망된 어구의 계류 효과에 기인하는 선미출수 변화

선미트를 어선이 투망된 상태에서 조종불능이 되었을 때, 투망된 어구중 전개판(otter board)은 앵커의 역할, 끌줄(warp)은 계류사의 역할을 한다고 간주될 수 있다. 따라서 선체는 Fig. 1과 같이 선수가 풍하측(lee side)으로 향한 상태에서 계류된 것과 같은 효과를 나타낸다.

Fig. 1의 계류계(mooring system)를 해석하기 위해서, Fig. 2와 같이 미소길이 ds 의 끌줄 요소

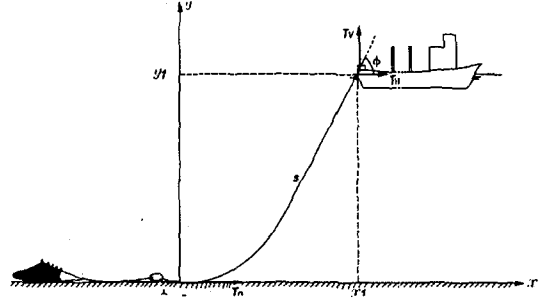


Fig. 1 Tension on fishing warp of disabled stern trawler

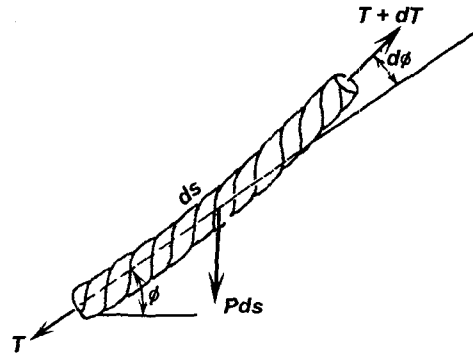


Fig. 2 Static forces on fishing warp element

에 작용하는 힘의 정역학적 평형조건을 다음과 같이 쓸 수 있다[1]. 단, 조류에 기인하는 유체항력(fluid drag)과 끌줄의 탄성력(elasticity)은 무시한다.

$$\begin{aligned} (T + dT) \sin d\phi - Pds \cos \phi &= 0 \\ -T + (T + dT) \cos d\phi & \\ - Pds \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

상기 평형조건에서 $d\phi \approx 0$, $dT \approx 0$ 를 가정하면

$$\begin{aligned} T d\phi &= Pds \cos \phi \\ dT &= Pds \sin \phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 T 는 끌줄의 장력(tension), dT 는 T 의 변화량(change of tension), P 는 끌줄 단위길이의 수중무게(gravity force), ϕ 는 끌줄이 수평면과 이루는 각, $d\phi$ 는 ϕ 의 변화량이다.

식(2)로부터 끌줄 임의 위치에서의 수평방향 장력 T_H 는 다음과 같이 구해진다.

$$T_H = T \cos \phi = T_0 \quad (3)$$

단, T_0 는 $\phi = 0^\circ$ 인 위치에서의 장력이다. 식(3)으로부터 수평장력 T_H 는 ϕ 에 상관없이 일정함을 알 수 있다. 그리고 식(3)을 식(2)의 첫 번째 식에 대입하여 $\phi = 0^\circ$ 로부터 $\phi = \phi'$ 까지 적분을 수행하면, 끌줄 임의 위치에서의 수직방향 장력 T_V 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_V = T \sin \phi = Ps \quad (4)$$

여기서 s 는 $\phi = 0^\circ$ 인 위치로부터 $\phi = \phi'$ 인 위치까지의 끌줄의 길이이다. 식(4)로부터 수직방향 장력 T_V 는 $\phi = 0^\circ$ 인 위치로부터 $\phi = \phi'$ 인 위치까지의 계류사의 수중무게와 같다는 것을 알 수 있다. Fig. 1은 $\phi = 0^\circ$ 인 위치를 좌표 원점으로 취하고 있다.

다음으로, Fig. 1에서 임의 위치($\phi = \phi'$ 인 위치)의 x, y 좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = \int_0^s dx = \frac{T_0}{P} \sinh^{-1}(Ps/T_0) \quad (5)$$

$$y = \int_0^s dy = \frac{T_0}{P} \left\{ \cosh\left(\frac{Px}{T_0}\right) - 1 \right\} \quad (6)$$

리고 식(5)에 의해 좌표 원점으로부터 $\phi = \phi'$ 의 끌줄의 길이 s 는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{T_0}{P} \sinh(Px/T_0) \quad (7)$$

검토한 바와 같이, Fig. 1의 끌줄 상단에

는 수직방향 장력 T_V 가 작용하는데, 이 줄의 원점 ($\phi = 0^\circ$)으로부터 상단까지의 계에 기인한다. 한편, 끌줄의 상단은 선박의 부와 연결되어 있기 때문에 장력 T_V 를 상키기 위해서 선체에는 선미트림이 발생한다. 이 선미트림량 t 는 다음과 같다.

$$t = \frac{T_V \times 0.5L}{MTC} \quad [cm] \quad (8)$$

여기서 L 는 수선간 선체길이, MTC 는 1 cm 트림변화모우멘트(moment to change trim 1 cm)이다. 그리고 끌줄 상단에 작용하는 수평방향 장력 T_H 는 수면 상부 선체에 작용하는 풍압력(wind force)에 기인하는 수평방향 장력과 서로 평형을 이루게 된다. 즉, T_H 는 다음과 같이 쓸 수 있다[2].

$$T_H = 0.76 \times 10^{-4} A_T U_T^2 \quad [tonf] \quad (9)$$

여기서 A_T 는 수면 상부 선체의 정면투시면적(m^2), U_T 는 평균풍속(m/sec)이다.

따라서 수심에 비해 투망된 끌줄이 길기 때문에 끌줄 하단 일부가 해저면에 접해 있다고 가정하면, Fig. 1의 좌표 원점을 해저면에 취할 수 있고, 이상 언급한 수식들을 이용하여 임의 해상상태에서의 선미트림량 t 를 계산할 수 있다.

2.2 파도와 선체 종운동에 기인하는 상대변위

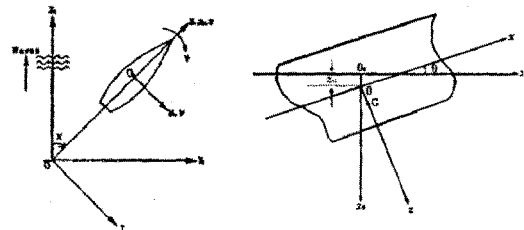


Fig. 3 Coordinate systems

규칙파중에서의 선체운동 해석에는 스트립이론이 실용적으로 이용되고 있다. Fig. 3과 같이 선체의 평균 진행속도 V 로써 이동하는 공간좌표계 $O_0-x_0y_0z_0$ 와 선체고정좌표계 $O-xyz$ 를 설정할 때, 등속이동 공간좌표계 $O_0-x_0y_0z_0$ 주위의 미소동요중 상하동요와 종동요의 연립운동방정식은 다음과 같이 표시된다. 단, 좌표원점 O_0 는 정지수선면과 일치시키며, O 는 무계중심 G 의 바로 위에 위치하도록 하며, 선체가 운동하고 있지 아니할 때의 O_0 와 일치시킨다.

$$\begin{aligned} (M + A_{33}) \ddot{z}_G + B_{33} \dot{z}_G + C_{33} z_G + A_{53} \ddot{\theta} \\ + B_{53} \dot{\theta} + C_{53} \theta = (F_{z_c} + iF_{z_s}) e^{i\omega_e t} \\ (I_{yy} + A_{55}) \ddot{\theta} + B_{55} \dot{\theta} + C_{55} \theta + A_{35} \ddot{z}_G \\ + B_{35} \dot{z}_G + C_{35} z_G = (M_{\theta_c} + iM_{\theta_s}) e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 M 과 I_{yy} 는 각각 선박의 질량과 y 축에 관한 관성모멘트를 나타내며, 계수 A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} 는 각각 i 모드 운동에 기인하는 j 모드의 부가질량, 감쇠력계수 및 복원력계수를 의미한다. 그리고 식(10) 우변은 파랑강제력을 나타내며, ω_e 는 선체와 파도의 만남주파수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_e = \omega - kV \cos \chi \quad (11)$$

여기서 ω 는 파도의 원주파수, k 는 파수, χ 는 선체와 파도의 만남각이다. 그리고 입사파의 파형은 선체고정좌표계로써 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\zeta_w = \zeta_0 \cos(ky \sin \chi - kx \cos \chi + \omega_e t) \quad (12)$$

여기서 ζ_0 는 파진폭이다.

식(12)에서 $x = 0$, $y = 0$ 일 때 즉, 선체중앙(midship) 위치에서의 ζ_w 는 다음과 같이 표시되며, 위상의 기준이 된다.

$$\zeta_w = \zeta_0 e^{i\omega_e t} \quad (13)$$

따라서 입사파에 대한 선체운동 응답은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$z_G = z_a e^{i(\omega_e t + \epsilon_z)} \quad (14)$$

$$\theta = \theta_a e^{i(\omega_e t + \epsilon_\theta)} \quad (15)$$

식(14), 식(15)를 식(10)에 대입하여 4×4 매트릭스의 연립방정식을 만들면 z_a/ζ_0 , θ_a/ζ_0 , ϵ_z , ϵ_θ 를 구할 수 있다. 단위 파진폭에 대한 선체운동 응답 z_a/ζ_0 , θ_a/ζ_0 를 RAO(Response Amplitude Operator)라 한다. θ_a/ζ_0 대신에 $\theta_a/k\zeta_0$ 를 쓰기도 한다.

한편, 본 연구에서는 식(10)의 유체력계수와 파랑강제력을, Tasai-Takagi[3][4]에 의해서 개발된 NSM(New Strip Method)을 사용하여 다음과 같이 표시한다. 단, 단말효과(end effect)는 무시한다.

$$A_{33} = \int_L M_H dx, \quad B_{33} = \int_L N_H dx$$

$$C_{33} = 2\rho g \int_L b(x) dx,$$

$$A_{53} = - \int_L x M_H dx - \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_H dx$$

$$B_{53} = - \int_L x N_H dx + V \int_L M_H dx$$

$$C_{53} = -2\rho g \int_L x b(x) dx$$

$$A_{55} = \int_L x^2 M_H dx + \frac{V^2}{\omega_e^2} \int_L M_H dx$$

$$B_{55} = \int_L x^2 N_H dx + \frac{V^2}{\omega_e^2} \int_L N_H dx$$

$$C_{55} = 2\rho g \int_L x^2 b(x) dx$$

$$A_{35} = - \int_L x M_H dx + \frac{V}{\omega_e^2} \int_L N_H dx + 2\rho g \zeta_0 \int_L x \sin(kx \cos \chi) \times \int_0^b e^{-kz} \cos(ky \sin \chi) dy dx \quad (16)$$

$$B_{35} = - \int_L x N_H dx - V \int_L M_H dx$$

$$C_{35} = - 2\rho g \int_L x b(x) dx$$

$$F_{zc} = \zeta_0 \omega \left\{ \int_L N_H e^{-kT_n} \sin(kx \cos \chi) dx - \omega_e \int_L M_H e^{-kT_n} \cos(kx \cos \chi) dx \right\} + 2\rho g \zeta_0 \int_L \cos(kx \cos \chi) \times \int_0^b e^{-kz} \cos(ky \sin \chi) dy dx$$

$$F_{zs} = \zeta_0 \omega \left\{ \int_L N_H e^{-kT_n} \cos(kx \cos \chi) dx + \omega_e \int_L M_H e^{-kT_n} \sin(kx \cos \chi) dx \right\}$$

$$- 2\rho g \zeta_0 \int_L \sin(kx \cos \chi) \times \int_0^b e^{-kz} \cos(ky \sin \chi) dy dx$$

$$M_{\theta c} = \zeta_0 \omega \left\{ - \int_L x N_H e^{-kT_n} \cos(kx \cos \chi) dx + \omega_e \int_L x M_H e^{-kT_n} \sin(kx \cos \chi) dx \right.$$

$$- V \int_L M_H e^{-kT_n} \cos(kx \cos \chi) dx - \frac{V}{\omega_e} \int_L N_H e^{-kT_n} \sin(kx \cos \chi) dx \left. \right\}$$

$$- 2\rho g \zeta_0 \int_L x \sin(kx \cos \chi) \times \int_0^b e^{-kz} \cos(ky \sin \chi) dy dx$$

$$M_{\theta s} = \zeta_0 \omega \left\{ - \int_L x N_H e^{-kT_n} \cos(kx \cos \chi) dx - \omega_e \int_L x M_H e^{-kT_n} \sin(kx \cos \chi) dx - V \int_L M_H e^{-kT_n} \cos(kx \cos \chi) dx + \frac{V}{\omega_e} \int_L N_H e^{-kT_n} \sin(kx \cos \chi) dx \right\}$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, $b(x)$ 는 반폭을 의미한다. 그리고 M_H, N_H 는 2차원 부가질량과 감쇠계수로서 본 연구에서는 Ursell-Tasai 방법[5]을 이용하여 이들을 계산한다.

파랑중 선체 중운동에 기인하여 슬립웨이를 통해 선미갑판으로 해수가 유입되기 위해서는 선미(AP)에서의 상하방향 상대변위(relative displacement)가 유효조건현보다 커야 한다. 즉, 다음 조건을 만족해야 한다(Fig. 4 참조). 단, 선미 후류에 기인하는 수선면 변화는 무시한다.

$$(z_r)_{AP} > (D_{AP} - d_a) \quad (17)$$

여기서 $(z_r)_{AP}$ 는 파면을 기준으로 한, AP 위치에서의 상하방향 상대변위로서, 이것을 dynamic swell-up이라고도 한다. D_{AP} 는 AP 위치에서의 폭로갑판 상부까지의 길이, d_a 는 선미흘수이다.

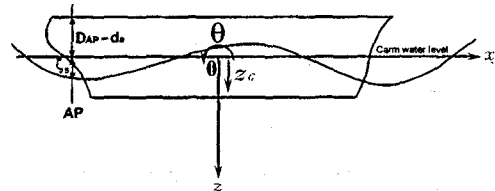


Fig. 4 Relative vertical displacement at AP

규칙파중에서 선체운동에 기인하는 상대변위는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$z_r = z_G - x\theta - \zeta_w \quad (18)$$

여기서 z_G 는 상하동요 변위, θ 는 중동요 각변위, x 는 선체고정좌표계에서의 x 좌표(선수방향

“+”), ζ_w 는 파형의 높낮이(연직하방향 “+”)를 나타낸다.

식(18)로부터 $(z_r)_{AP}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(z_r)_{AP} = z_G + \frac{L}{2} \theta - \zeta_S \quad (19)$$

여기서 ζ_S 는 AP 위치에서의 파형의 높낮이로서, 식(12)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \zeta_S &= [\zeta_w]_{AP} = \zeta_0 \cos(\omega_e t + kL/2) \\ &= \zeta_0 e^{i(\omega_e t + \pi L/\lambda)} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 λ 는 파장, L 은 선체길이 의미한다.

식(14),(15),(20)으로부터 다음 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} z_G / \zeta_0 &= \frac{z_a}{\zeta_0} e^{i\epsilon_z} e^{i\omega_e t} = |H_z| e^{i\epsilon_z} e^{i\omega_e t} \\ &= H_z e^{i\omega_e t} \\ \theta / k\zeta_0 &= \frac{\theta_a}{k\zeta_0} e^{i\epsilon_\theta} e^{i\omega_e t} = |H_\theta| e^{i\epsilon_\theta} e^{i\omega_e t} \\ &= H_\theta e^{i\omega_e t} \\ \zeta_S / \zeta_0 &= e^{i\pi L/\lambda} e^{i\omega_e t} = H_\zeta e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 H_z , H_θ , H_ζ 는 복소수이다.

따라서

$$\begin{aligned} (z_r)_{AP} &= \zeta_0 (H_z + \frac{\pi L}{\lambda} H_\theta - H_\zeta) e^{i\omega_e t} \\ &= \zeta_0 H_S e^{i\omega_e t} = \zeta_0 |H_S| e^{i\epsilon_s} e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (22)$$

단,

$$\begin{aligned} H_S &= H_z + \frac{\pi L}{\lambda} H_\theta - H_\zeta \\ &= |H_z| e^{i\epsilon_z} + \frac{\pi L}{\lambda} |H_\theta| e^{i\epsilon_\theta} - e^{i\pi L/\lambda} \\ &= |H_S| e^{i\epsilon_s} \end{aligned} \quad (23)$$

한편, 실제 해상상태는 불규칙하므로 스펙트럼을 이용하여 통계학적으로 상대변위를 구하여야

한다. 이때 불규칙 상대변위의 제곱평균치(mean square value) m_0 는 다음과 같이 표시된다.

$$m_0 = \int_0^\infty |H_S(\omega_e)|^2 S_\zeta(\omega_e) d\omega_e \quad (24)$$

여기서 $S_\zeta(\omega_e)$ 는 파도의 에너지 스펙트럼을 원주파수 ω 가 아니라 만남주파수 ω_e 에 대해 수정 표시한 것이다. 그리고 $|H_S(\omega_e)|$ 는 식(23)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} |H_S|^2 &= \left\{ |H_z| \cos \epsilon_z + \frac{\pi L}{\lambda} |H_\theta| \cos \epsilon_\theta \right. \\ &\quad \left. - \cos(\pi L/\lambda) \right\}^2 + \left\{ |H_z| \sin \epsilon_z \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi L}{\lambda} |H_\theta| \sin \epsilon_\theta - \sin(\pi L/\lambda) \right\}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

m_0 가 계산되면 확률통계학에서의 다음 식을 이용하여 상대변위 $(z_r)_{AP}$ 의 평균치(mean value), 유의치(significant value) 등을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} (\bar{z}_r)_{AP} &= 1.25 \sqrt{m_0} \\ (\bar{z}_r)_{AP1/3} &= 2.0 \sqrt{m_0} \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 $(\bar{z}_r)_{AP}$ 는 평균치, $(\bar{z}_r)_{AP1/3}$ 는 유의치를 의미한다. 그리고 상대변위 $(z_r)_{AP}$ 의 확률분포를 Rayleigh 분포라 가정하면, $(z_r)_{AP}$ 가 유효전현을 초과할 확률 즉, 감관침수의 확률은 다음 식으로 표시된다[6].

$$\begin{aligned} P\{(z_r)_{AP} > (D_{AP} - d_a)\} \\ = \exp\{-(D_{AP} - d_a)^2 / 2m_0\} \end{aligned} \quad (27)$$

3. 수치계산 예

3.1 공시선

본 연구에서 검토 대상으로 한 선박은 총톤수

350톤급 선미트롤 어선(stern trawler)으로서 선체 주요목은 Table 1과 같다. 그리고 선체 측면도(profile)는 Fig. 5에 보이고 있다.

Table 1 Principal dimensions of stern trawler

Items	Values
Length over all L_{OA}	55.06 m
Length between perpendiculars L_{BP}	49.70 m
Breadth(moulded) B	9.0 m
Depth to shelter deck D_S	5.69 m
Depth to upper deck D_U	3.54 m
Fore draft d_f	3.05 m
Aft draft d_a	4.05 m

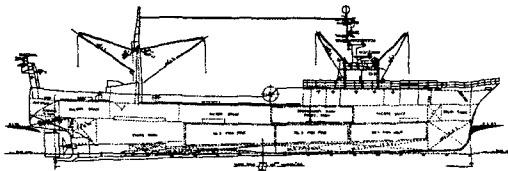


Fig. 5 Profile of 350 G/T class stern trawler

3.2 해상상태

일반적으로 실해역(real sea)의 해상상태(sea states)는 풍력등급을 나타내는 Beaufort No.에 따라 평균풍속 U_T 에 대응하는 유의파고(significant wave height) $\bar{H}_{1/3}$ 과 평균파주기(mean wave period) \bar{T} 의 값이 Table 2와 같이 주어진다[7]. Table 2는 유의파고와 평균파주기에 관한 Pierson-Moskowitz 식과 WMO(세계기상기구, World Meteorological Organization) code

Table 2 Sea states

Beaufort No.	U_T (m/sec)	$\bar{H}_{1/3}$ (m)	\bar{T} (sec)
1	0.95	0.1	1.22
2	2.50	0.2	1.73
3	4.45	0.6	2.99
4	6.75	1.0	3.86
5	9.40	2.0	5.46
6	12.35	3.0	6.69
7	15.55	4.0	7.72
8	19.00	5.5	9.05
9	22.65	7.0	10.21
10	26.50	9.0	11.58
11	30.60	11.5	13.09
12	34.85	14.0	14.44

1100 으로부터 작성된 것이다.

그리고 Table 2의 특성을 갖는 완전발달파(fully developed waves)의 장파정불규칙파(long-crested irregular waves)의 에너지 스펙트럼은 다음과 같이 표시되는 ITTC(1978) 표준스펙트럼을 이용한다[8].

$$S_{\zeta}(\omega) = A\omega^{-5} \exp(-B/\omega^4) \quad (28)$$

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

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

ω : 파도의 원주파수(circular frequency)

$S_{\zeta}(\omega)$: 파도의 에너지 스펙트럼

$$[m^2 \cdot sec]$$

식(28)의 계산결과를 Fig. 6에 나타낸다.

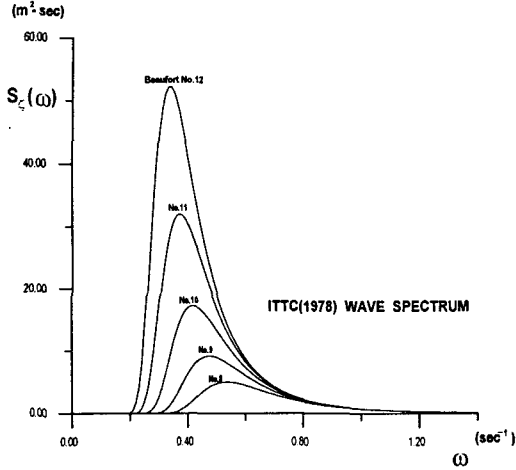


Fig. 6 ITTC(1978) standard spectra

3.3 수치계산 결과 및 고찰

(1) 투망된 어구의 계류 효과에 기인하는 선미 홀수 변화

본 연구에서 검토 대상으로 한 공시선은 투망된 상태에서 조종불능이 되었으며, 끌줄(warp)은 직경 28 mm의 와이어로프 재질(JIS 13호)로서, 선미로부터 선외로 투하된 길이는 약 700~800 m, 2 드럼(drum)이다. 이때 끌줄(2 drum)의 단위길 이당 수중무게는 $5.84 \times 10^{-3} \text{ tonf/m}$ 이다[9]. 그리고 공시선의 수면 상부 선체 측면적은 60.0 m^2 , 해역의 수심은 197 m이다. 수심에 비해 투망된 끌줄이 길기 때문에 끌줄 하단 일부가 해저면에 접해 있다고 가정하여, Fig. 1을 참조하면

$$T_H = T_0 = 0.76 \times 10^{-4} \times 60.0 \times U_T^2 \\ = 4.56 \times 10^{-3} U_T^2 \text{ tonf}$$

$$P = 5.84 \times 10^{-3} \text{ tonf/m}$$

$$y_1 = 197 \text{ m}$$

$T_0/P = a$ 라 두면 식(6)으로부터

$$y_1 = a \{ \cosh(x_1/a) - 1 \}$$

$y_1 = 197 \text{ m}$ 를 대입하고, x_1 에 대해서 풀면

$$x_1 = a \cosh^{-1}(1 + 197/a)$$

식(7)로부터

$$s = a \sinh(x_1/a)$$

식(4)로부터

$$T_V = Ps$$

따라서 T_V 의 값을 식(8)에 대입하면 트림(선미트림)량 t 가 구해진다. 단, 공시선의 $L = 49.7 \text{ m}$, 평균홀수 3.55 m에서의 $MTC = 15.25 \text{ tonf-m}$ 이다.

Table 2의 해상상태 등급에 따라 트림변화량 t 를 계산한 결과를 Table 3에 나타낸다. Table 3을 보면 투망된 어구의 계류 효과에 기인하는 선미트림 변화량은 해상상태가 거칠어질수록 커지기는 하지만 그 양은 굉장히 작은 값이라는 것을 알 수 있다. 참고로, Beaufort No. 12에서 $T_H = 5.54 \text{ tonf}$, $s = 642.7 \text{ m}$, $T_V = 3.75 \text{ tonf}$ 와 같이 계산되는데, 수직방향 무게 3.75 ton이 선미에 작용할 때의 선미트림 변화량은 미소한 값에 지나지 않는다.

Table 3 Change in trim at AP due to mooring effect of fishing implements

Beaufort No.	change in trim (cm)
1	1.88
2	1.92
3	2.01
4	2.18
5	2.44
6	2.78
7	3.20
8	3.68
9	4.22
10	4.80
11	5.44
12	6.11

(2) 파도와 선체 중운동에 기인하는 상대변위

먼저 규칙파중에서의 선체운동 응답을 구하기 위해, 본 연구에서 검토 대상으로 한 트롤어선의 Lewis form 근사한 횡단면은 Fig. 7과 같다.

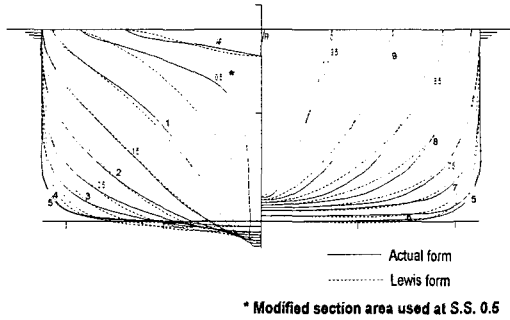


Fig. 7 Body plan and Lewis form representation of stern trawler

그리고 상하동요 및 종동요의 RAO와 위상각 ($\epsilon_z, \epsilon_\theta$)의 계산결과를 각각 Figs. 8~11에 나타낸다. 단, 트롤어선의 조종불능 상태에서의 선체운동 응답을 구하기 위해 선속 $V = 0$, 파도와 선체의 만남각 $\chi = 0$ 인 상태에서의 계산결과이다. 그리고 Figs. 8~11에서 횡축은 파도의 원주

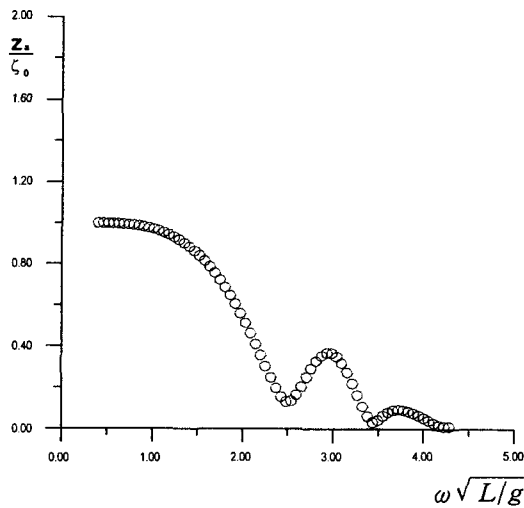


Fig. 8 Response amplitude operator of heaving motion ($V = 0 \text{ knot}, \chi = 0^\circ$)

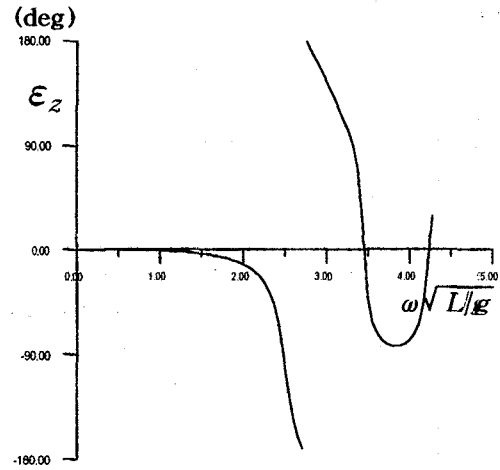


Fig. 9 Phase angle of heaving motion to wave ($V = 0 \text{ knot}, \chi = 0^\circ$)

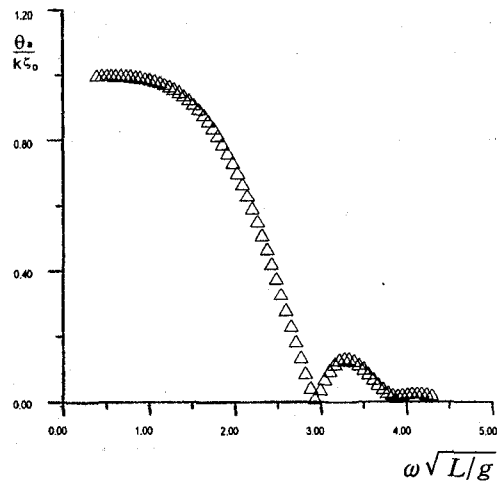


Fig. 10 Response amplitude operator of pitching motion ($V = 0 \text{ knot}, \chi = 0^\circ$)

파수 ω 에 $\sqrt{L/g}$ (단, L : 선체길이, g : 중력가속도)를 곱한 값(무차원치)을 나타내고 있다.

Table 2에 표시한 해상상태 등급에 따라 공시선의 상대변위의 유의치 $(z_r)_{AP1/3}$ 의 계산결과를 Table 4에 나타낸다. 아울러 Table 4에는 상대변위가 유효조건을 초과할 확률의 계산결과도 함께

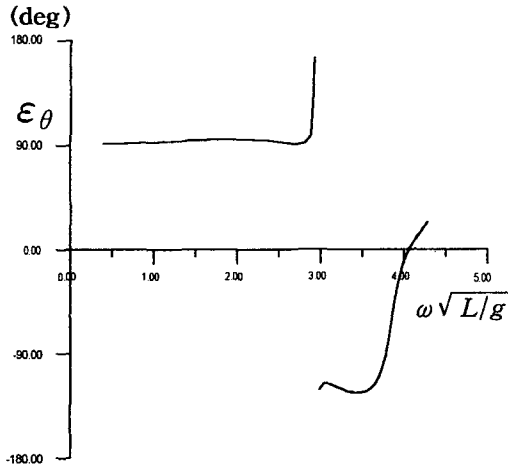


Fig. 11 Phase angle of pitching motion to wave
($V = 0 \text{ knot}, \alpha = 0^\circ$)

나타내고 있다. 단, 공시선의 경우 유효조건현은 다음과 같다.

$$D_{AP} = 6.20 \text{ m (기선으로부터 선미 슬러플웨이까지의 높이)}$$

$$d_a = 4.05 \text{ m (선미홀수)}$$

$$(D_{AP} - d_a) = 2.15 \text{ m (유효조건현)}$$

Table 4를 보면, 파도와 이로 인한 선체운동(상하동요 및 종동요)에 기인하는, AP위치에서의 상하방향 상대변위 $(z_r)_{AP}$ 는 해상상태가 아주 거칠 때(Beaufort Nos. 10~12)에도 선미 유효조건현보다는 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 슬러플웨이를 통한 선미갑판으로의 해수유입 가능성은 거의 없다.

참고로, Table 4를 보면 해상상태가 상당히 거칠어도 예를 들면, Beaufort No. 10 이상의 경우에도 AP위치에서의 상대변위는 Beaufort Nos. 5~6 정도에서와 비교하여 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 해상상태가 거칠어지면 상하동요, 종동요 및 파면의 높낮이는 당연히 커지겠지만, 이들이 서로 다른 위상차를 가지고 합성되는

Table 4 Relative vertical displacement at AP

Beaufort No.	Sig. relat. disp. due to ship motion (m)	Probability for exceeding effective freeboard (%)
1	0.000	0.000
2	0.001	0.000
3	0.215	0.000
4	0.496	0.000
5	1.001	0.010
6	1.253	0.277
7	1.392	0.846
8	1.505	1.690
9	1.567	2.315
10	1.613	2.865
11	1.646	3.293
12	1.665	3.567

경우에는 이들 각각의 값에 비례해서 합성된 값이 반드시 커진다고는 볼 수 없을 것이다. 예를 들어, 식(25)는 단위 파진폭에 대한 상대변위의 제곱 즉, RAO의 제곱을 나타내고 있는데, 해상상태가 아주 거친 상태에서 이 값이 어느 정도인가를 개략적으로 검토해 보기로 한다. Beaufort Nos. 10~12 에서 해양파의 에너지 스펙트럼 값이 피크치를 이루는 성분파의 원주파수 ω 는 대략 0.40 정도(Fig. 6 참조) 이고, 이에 대응하는 $\omega\sqrt{L/g}$ 의 값은 $0.4\sqrt{49.7/9.8} = 0.90$ 이다. Figs. 8~11로부터 $\omega\sqrt{L/g} = 0.9$ 에서의 $|H_z|, |H_\theta|, \epsilon_z, \epsilon_\theta$ 의 값을 읽으면 다음과 같다.

$$|H_z| \approx 1.0, \quad |H_\theta| \approx 1.0$$

$$\epsilon_z \approx 0^\circ, \quad \epsilon_\theta = 90^\circ$$

그리고 파수 k 는

$$k = \frac{\omega^2}{g} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{단, } \lambda : \text{파장})$$

의 관계가 성립되므로 $\omega = 0.4$ 일 때의 λ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} = 385 \text{ m}$$

따라서 식(25)로부터 $|H_S|^2$ 의 값을 구하면

$$\begin{aligned} |H_S|_{\omega=0.4}^2 &\approx \{ |H_z| - \cos(\pi L/\lambda) \}^2 \\ &\quad + \{ (\pi L/\lambda) |H_\theta| - \sin(\pi L/\lambda) \}^2 \\ &\approx (1 - 0.92)^2 + (0.41 - 0.39)^2 \\ &= 0.0068 \end{aligned}$$

즉, $\omega = 0.4$ 일 때 $|H_z|$ 의 값에 비해 $|H_S|$ 의 값은 아주 작다는 것을 알 수 있다. 이 작은 RAO의 값 때문에 식(24)의 m_0 값도 작아질 것이다. 이와 같이 해상상태가 거칠어도 AP에서의 상대변위는 작아질 것으로 예상된다. 그 원인은 해상상태가 거칠어지면 선체길이에 비해 주성분 파의 파장이 길어지며, 선체운동에 기인하는 상대변위가 파도에 의해 상쇄되기 때문으로 생각할 수 있다.

4. 결 언

총톤수 350톤급 선미트롤 어선이 투망된 상태로 황천 조업중 어떤 원인에 의해 손상 또는 조종 불능 상태가 되었을 때, 선미 슬립웨이를 통한 감판침수 가능성을 두가지 측면에서 각각 고찰하였으며, 공시선의 수치계산 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 투망된 어구중 전개판-끌줄-선체로 구성되는 계류시스템의 정적 평형조건으로부터 구한 선미홀수 변화량은 감판침수의 원인이 되지 아니

할 정도로 미소하다.

2) 선속 0 knot, 파도와 선체의 만남각 0° 인 상태에서 트롤어선의 파랑중 선체 중운동에 기인하는 선미 상대변위량은 감판침수의 원인이 되지 아니한다.

본 연구를 보다 더 효과적으로 진행시키기 위해서는 파랑중 선체 중운동 해석시 계류력을 외력항에 포함시켜 응답계산을 할 필요가 있으며, 선속의 영향 및 파도의 진행방향에 대한 고려도 요망된다.

참고문헌

- [1] Berteaux, H. O., "Buoy Engineering", A Willey-Interscience Publiation, page 102-103, 1976.
- [2] Koyama, T., et al., "船体と海洋構造物の運動學" 成山堂書店, page 30, 1982.
- [3] Tasai, F., et al., "規則波中の應答理論及び計算法", 第1回 耐航性 Symposium Text, 日本造船學會, page 31, 1969.
- [4] Takaishi, Y., et al., "波浪中船体運動の實用計算法", 第2回 耐航性 Symposium Text, 日本造船學會, page 110~116, 1977.
- [5] Tasai, F., "On the Damping Force and Added Mass of Ships Heaving and Pitching", Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Vol. VII, No. 26, 1959.
- [6] Nakamura, S., "耐航性の諸要表", 第1回 耐航性 Symposium Text, 日本造船學會, 1969.
- [7] 日本造船學會, "波浪中推進性能と波浪荷重", 運動性能研究委員會·第1回 Symposium Text, page 30, 1984.
- [8] 대한조선학회, "1978 ITTC Sea Spectrum", 대한조선학회지, 제16권 제1호, 1979.
- [9] 이병기, "현대트롤어법", 태화출판사, page 256, 1989.