

## 2축선의 프로펠러 레이싱 추정법에 관한 연구 Propeller Racing of Ocean-going Ships with Twin Screw Propellers

박 종 헌  
J. H. Park

**Key Words** : Propeller Racing(프로펠러 레이싱), Propeller Exposure(프로펠러노출), Exceeding Time Lasting(초과지속시간), Seakeeping Quality(내항성능), Long term Prediction(장기예측)

**Abstract** : This paper presents a statistical prediction procedure for the propeller racing of ships with twin screw propellers sailing in ocean waves. The propeller racing is one of the most important factors of seakeeping qualities in relation to the safety of main engine and shafting system. It is especially significant key word for designing the twin screw propeller type ship in view of allowable maximum propeller diameter etc.. In former studies, the propeller racing generally means the situation (propeller exposed) in which the relative motion amplitude between ship hull and wave surface would exceed a depth of point in rotary disk propeller. Therefore, it seems that the magnitude of the amplitude and its exceeding frequency have been examined as a principal subject of study as usual. However, the time during which the amplitude exceeds a depth of point must be also one of most important factor affecting the trend of propeller racing. This paper proposes a simply practical method for estimating the time lasting of exposed propeller related to twin screw propeller racing in rough confused seas on the basis of the statistics. Then, it is confirmed that the practical method is useful and convenience for considering the propeller racing in the stage of the basic design.

### 1. 서 론

대양의 격한 해상상태를 항해하는 선박이 격렬한 선체운동에 의해 프로펠러(Propeller) 일부 또는 전부가 파면에서 노출되어 프로펠러공전을 일으키는 현상을 프로펠러 레이싱(Propeller Racing)이라고 한다.<sup>1)</sup> 이 현상은 공중에 노출됨으로써 프로펠러가 이상회전을 일으켜 토크(Torque), 추력 등에 현저한 변동을 유발하여 주기 및 축계에 악영향을 미치기 때문에 배의 운항성능과 안전성을 좌우하는 중요한 내항성능인자로 간주되고 있다.<sup>2),3)</sup> 배의 승조원 입장에서는 황천 중에 추진기계를 기진원으로 하는 선체진동의 감지에서 프로펠러 레이싱을 이해하고 있지만,<sup>4)</sup> 일반적으로 판정의 명확성, 계산의 용이성 등에서 프로펠러노출로써 프로펠러 레이싱 발생을 판정하는 예가 가장 많다.<sup>5)</sup> Shinkai 등<sup>6)</sup>은 프로펠러

노출의 추정에 근거하여 프로펠러 레이싱 발생판정법을 확률·통계학의 입장에서 새로운 판정지원 알고리즘(Algorithm)을 제시하였다. 여기에서는 프로펠러노출로서 끝단노출, 1/3직경노출 등의 정의에 근거하여 노출발생시간비율에 주목하였다. 즉, 파랑 중의 프로펠러 단독성능의 변화<sup>3)</sup>에 관하여 프로펠러 노출시의 특성을 고려하면서 밝히고 있지만, 현상의 발생결과로서 야기되는 부하변동은 시각력적(時刻歷的) 변화이므로 불규칙비선형 현상에 대하여 간단한 해석알고리즘의 개발이 요구되고 있다. 따라서 통계적 예측의 관점에서 프로펠러 레이싱 발생 판정법은 현상의 시각력에 관한 지속시간<sup>7)9)</sup>의 확률 특성에 지배되고, 프로펠러노출 발생시간비율의 추정 알고리즘의 재구성을 시도하였다. 이 알고리즘은 Wan 등<sup>10)12)</sup>이 제안하고 있는 「Deck Wetness 지속 시간 추정알고리즘」을 원용하여 구축된 것이다.

본 논문에서는 Shinkai 등<sup>6)</sup>에서 제시한 「프로펠러노출 발생시간비율 추정알고리즘」을 구체적으로 설계에 이용할 때, 범용화의 가능성에 관하여 검토하는 것을 목적으로 하고 있다. 2축선의 프로펠러

접수일 : 2006년 12월 20일, 채택확정 : 2007년 1월 31일  
박종헌(책임저자) : 부경대학교 조선해양시스템공학과  
E-mail : kajetani@dreamwiz.com Tel. 051-620-6489

레이싱 문제를 검토대상으로 선택하여 알고리즘을 범용화 할 때의 문제점과 그 적용성에 관하여 상세히 검토하였다. 그리고 Roll on/off 컨테이너(Container) 선<sup>13),14)</sup>을 적용선형으로 선택하여 시리즈(Series) 계산을 하였다. 2축선의 프로펠러 레이싱 특성에 관하여 「최대 프로펠러직경의 검토」, 「프로펠러 레이싱 상 문제가 없는 홀수의 검토」 등의 입장에서 명백히 하였다. 특히 2축선의 프로펠러 레이싱 검토시, 설계지침의 구축이 용이할 수 있도록 방법을 제시하고, 알고리즘의 유효성에 관하여 검토한 몇 가지 고찰결과를 나타내었다.

## 2. 프로펠러노출의 운동학

### 2.1 규칙파 중의 응답

파의 평균진행방향에 대하여 일정한 만나는 각도  $\chi$ 와 일정한 선속  $V$ 을 유지하고, 선체운동(상하동요  $\zeta$ , 종동요  $\theta$ , 좌우동요  $\eta$ , 선수동요  $\psi$ , 횡동요  $\phi$ )을 하면서 항주하는 배를 상정한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 공간고정좌표계 O-XYZ(OX: 배의 진행방향)과 O-X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>(OX<sub>1</sub>: 파의 진행방향) 그리고 선체고정좌표계 o-xyz(ox: 배의 길이방향)를 정하였다.

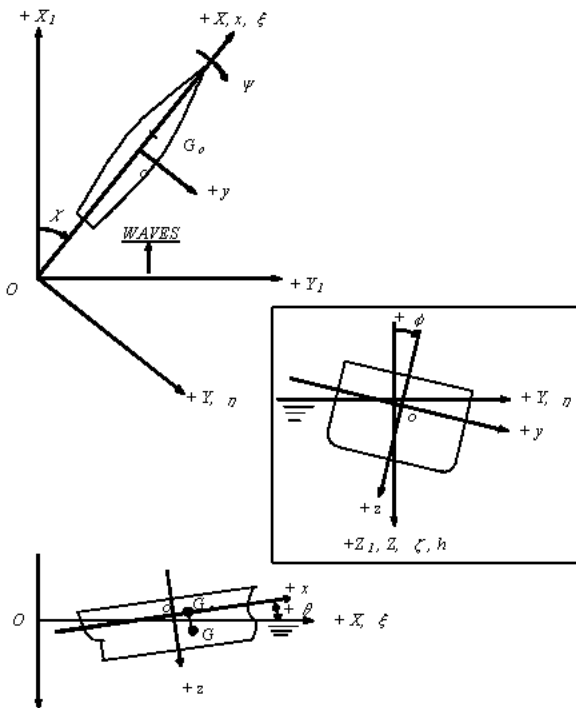


Fig. 1 Coordinate system in regular waves

파의 표면용기량(表面隆起量)  $h$ (아래방향을 +로 한다)의 해면에서 선형스트립(Strip)법을 적용하면

상하동요  $\zeta$ 와 종동요  $\theta$ 의 연성운동방정식 및 좌우동요  $\eta$ , 선수동요  $\psi$ , 횡동요  $\phi$ 의 연성운동방정식은 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$B_{11}\ddot{\zeta} + B_{12}\dot{\zeta} + B_{13}\zeta + B_{14}\ddot{\theta} + B_{15}\dot{\theta} + B_{16}\theta = F_{\zeta} \quad (1)$$

$$B_{21}\ddot{\zeta} + B_{22}\dot{\zeta} + B_{23}\zeta + B_{24}\ddot{\theta} + B_{25}\dot{\theta} + B_{26}\theta = M_{\theta}$$

$$C_{11}\ddot{\eta} + C_{12}\dot{\eta} + C_{13}\eta + C_{14}\ddot{\psi} + C_{15}\dot{\psi} + C_{16}\psi + C_{17}\ddot{\phi} + C_{18}\dot{\phi} + C_{19}\phi = F_{\eta}$$

$$C_{21}\ddot{\eta} + C_{22}\dot{\eta} + C_{23}\eta + C_{24}\ddot{\psi} + C_{25}\dot{\psi} + C_{26}\psi + C_{27}\ddot{\phi} + C_{28}\dot{\phi} + C_{29}\phi = M_{\psi} \quad (2)$$

$$C_{31}\ddot{\eta} + C_{32}\dot{\eta} + C_{33}\eta + C_{34}\ddot{\psi} + C_{35}\dot{\psi} + C_{36}\psi + C_{37}\ddot{\phi} + C_{38}\dot{\phi} + C_{39}\phi = M_{\phi}$$

여기서  $B_{ji} : i=1 \sim 6, j=1, 2$ 는 선체중운동방정식의 계수이고,  $F_{\zeta}, M_{\theta}$ 는 상하동요 파랑강제력과 종동요 파랑강제모멘트,  $F_{\eta}, M_{\psi}, M_{\phi}$ 는 각각 좌우동요 파랑강제력, 선수동요 파랑강제모멘트, 횡동요 파랑강제모멘트를 의미한다.

식 (1)과 (2)를 풀면 상하동요, 종동요, 좌우동요, 선수동요 그리고 횡동요의 해가 구해진다. 이러한 선체운동의 해를 가지고 전후방향위치  $x_G$ 에 있는 배의 중심에서 선수방향( $x - x_G$ )으로의 거리의 위치  $x$ , 선측폭방향  $y$ 에서 특별히 정해지는 선내 임의의 위치에서의 파의 표면용기량  $h$ 에 대한 수직방향상대운동(변위)은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Z = \zeta + y\phi - (x - x_G)\theta - h \quad (3)$$

$$h = h_0 \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \quad (4)$$

여기서  $h_0$ 는 표면용기량의 진폭,  $k$ 는 파수 ( $= \omega^2/g$ ,  $\omega$ : 파의 원주파수,  $g$ : 중력가속도),  $\omega_e$ 는 파와의 만남원주파수 ( $= \omega - kV \cos \chi$ ),  $t$ 는 시간을 의미한다.

프로펠러 레이싱 발생을 프로펠러 노출로써 판정할 때, 지금까지의 연구에서는 끝단노출, 1/3직경노출, 축노출 등의 정의가 이용되었다. 선체·2축 프로펠러와 표면파와의 상대위치관계의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 각 노출의 정의를 수식으로 명시하기 위하여 Fig. 3과 같이 정한다. 프로펠러직경을  $D$ (프로펠러 반경  $R \times 2$ ), 정수면에서 프로펠러축 중심까지의 깊이를  $I$ , 정수면에서 프로펠러 끝단까지 깊이를  $d_{pt}$ 라고 하면, 정수면에서 프로펠러 직경의

1/3위치까지의 깊이는  $d_{pr} = d_{pt} + D/3 = d_{pt} + 2R/3$ 로 얻을 수 있다. 따라서 끝단노출에 근거한 프로펠러 레이싱은 수직방향상대변위  $Z_r$ 의 크기가  $d_{pt}$ 을 초과하는 상태( $Z_r > d_{pt}$ )로써 판정하고, 1/3 프로펠러 직경노출에 근거한 프로펠러 레이싱은  $Z_r$ 의 크기가  $d_{pr}$ 을 초과하는 상태( $Z_r > d_{pr}$ )로써 판정한다. 측노출에 근거한 프로펠러 레이싱은 수직방향상대변위  $Z_r$ 의 크기가  $I$ 을 초과하는 상태( $Z_r > I$ )로써 판정함을 의미한다. 이상의 정의를 양현의 프로펠러 각각에 적용한다.

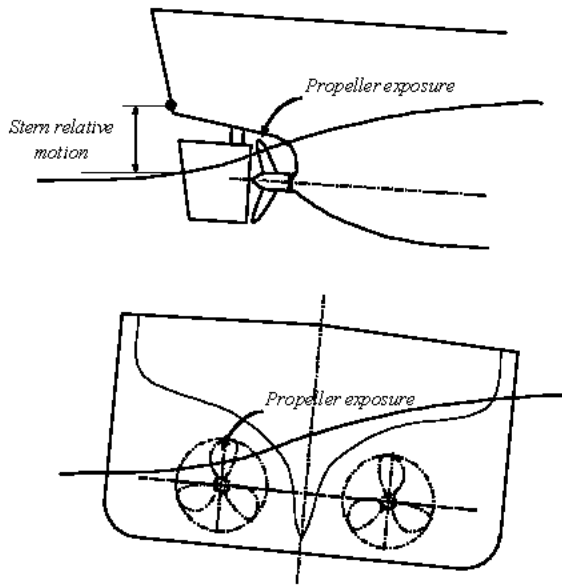


Fig. 2 Sketch showing typical propeller exposure by vertical relative motion at stern

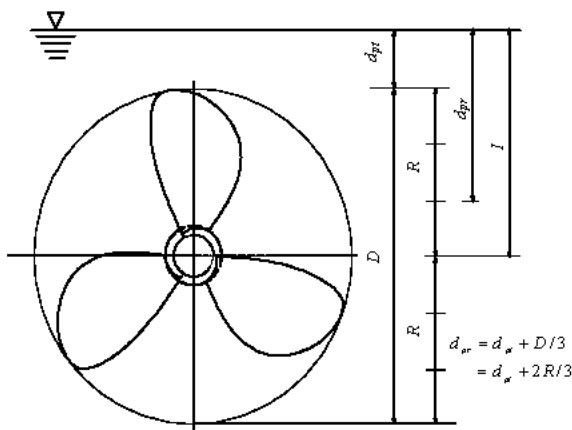


Fig. 3 Dimensions of propeller exposure calculations

이후부터는 프로펠러노출의 확률·통계적 특성을 기술할 때 모든 식을 간략화하기 위해서 수직방향상대변위  $Z_r$ 을  $r(t)$  또는 간단히  $r$ 로 표시하기로 한다.

$$r = r(t) = Z_r(t) \quad (5)$$

또한 시간에 관한 1계 미분을 다음과 같이 표시한다.

$$\dot{r} = \frac{dr(t)}{dt} = \frac{dZ_r(t)}{dt} = \dot{Z}_r(t) \quad (6)$$

### 2.2 단기불규칙파 중의 스펙트럼(Spectrum) 계산

단기불규칙파 중의 선체응답, 예를 들면 수직방향상대변위  $r$ , 1계 미분의 응답  $\dot{r}$  등의 분산  $\sigma^2$ 은 선형중첩이론<sup>15)</sup>에 근거한 스펙트럼 계산에 의하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma^2 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} [f(\omega)]^2 [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 \cos^2 \gamma d\omega d\gamma \quad (7)$$

여기서  $\sigma$ : standard deviation of a ship response in short crested irregular waves from the direction of  $\delta$  (for example,  $\sigma_r$  or  $\sigma_{\dot{r}}$ )

$[A(\omega, \delta - \gamma)]$ : response amplitude of a ship in regular waves from the direction of  $(\delta - \gamma)$

$\delta$ : average heading angle against the average wave direction

$\gamma$ : angle between the average wave direction and a component wave direction

$$[f(\omega)]^2 = 0.11 H^2 \omega_T^{-1} (\omega/\omega_T)^{-6} \exp[-0.44 (\omega/\omega_T)^{-4}] \quad (8)$$

여기서  $H$ 는 유의파고(significant wave height),  $\omega_T = 2\pi/T$ ,  $T$ 는 평균파주기이다.

또한 선체응답 스펙트럼의 원점 주위의 1차 모멘트에 해당하는 양  $m_1$ 을 다음 식과 같이 정의한다.

$$m_1 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} \omega [f(\omega)]^2 [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 \cos^2 \gamma d\omega d\gamma \quad (9)$$

단, 식 (7) 또는 식 (9)에서는 다음 식을 정의하고 있다.

$$[A(\omega, \delta - \gamma)] \equiv [\{Amplitude\ of\ r(t)\}/h_0] \quad (10)$$

## 3. 프로펠러노출의 확률특성

### 3.1 프로펠러노출의 발생지속시간

프로펠러 레이싱의 발생지속시간을 앞에서 기술한 프로펠러직경 상 임의의 위치가 노출되고 있는 시간으로써 정의된다면, 수직방향상대변위  $r$ 가 프로펠러직경 상 임의의 위치, 예를 들면  $d_{pr}$ 을 지속적으로 초과하고 있는 시간을 말한다. 이 현상을 수직방향상대변위  $r$ 의 시각력 표시로 개념도를 나타내면 Fig. 4와 같다. 그림에서는  $r$ 이 시각  $t_1$ 에서  $d_{pr}$ 을 초과하여 시각  $t_2$ 까지 초과를 지속하고  $t_2$ 의 시각이후  $d_{pr}$ 을 초과하고 있지 않음을 나타내고 있다.  $t_1 \leq t < t_2$ 의 시간간격을 초과지속시간(lasting time)이라 부른다. 프로펠러노출의 확률·통계적 특성을 기술하기 위하여 필요한 정상불규칙함수  $r$  및  $\dot{r}$ 에 관한 모든 식은 다음과 같다.<sup>13)~15)</sup>

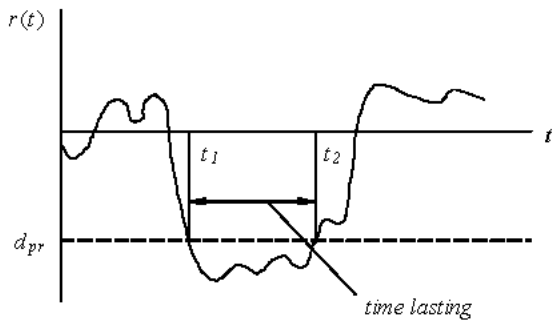


Fig. 4 The behavior of exceeding time lasting for relative motion to exceeding  $d_{pr}$

관측기간  $D$ 내에서 레벨(Level)  $r$ 의 초과회수 기대치는  $r$ 과  $\dot{r}$ 의 결합확률밀도함수  $p(r, \dot{r} | t)$  또는  $p(r, \dot{r})$ 을 이용하여 다음과 같은 식으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{n}_r &= E[N_r] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n f_+(r | t_j) dt_j \\ &= \int_0^D \int_0^\infty p(r, \dot{r} | t) \dot{r} dr dt = D \int_0^\infty p(r, \dot{r}) \dot{r} dr \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $f_+(r | t_j) dt_j$ 는  $dt_j$  동안 레벨  $r$ 을 초과할 확률이다.

$$D = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n dt_j = \int_0^D dt$$

관측기간  $D$ 내에서 레벨  $r$ 보다 초월할 때의 평균 합계초과지속시간은  $r$ 의 확률밀도함수  $p(r | t)$  또는

$p(r)$ 을 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\bar{t}_r = \int_0^D \int_r^\infty p(r | t) dr dt = D \int_r^\infty p(r) dr \quad (12)$$

또한 관측기간  $D$ 내에서 평균단위(초과회수 1회당)의 초과지속시간은 식 (11)과 (12)를 이용하여 다음 식으로 추정할 수 있다.

$$\bar{t}_r = \frac{\bar{t}_r}{\bar{n}_r} = \frac{\int_r^\infty p(r) dr}{\int_0^\infty p(r, \dot{r}) \dot{r} dr} \quad (13)$$

여기에서 정상불규칙함수  $r$  및  $\dot{r}$ 에 관해서는 일반적으로 정규성을 부여하는 것이 가능하기 때문에 각각의 확률밀도함수, 결합확률밀도함수 등을 식 (13)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$\bar{t}_r = \pi \frac{\sigma_r}{\sigma_{\dot{r}}} \exp\left\{-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right\} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma_r}\right)\right] \quad (14)$$

여기서,  $\operatorname{erf}(a)$ 은 다음의 의미를 가진다.

$$\operatorname{erf}(a) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-x^2) dx \quad (15)$$

따라서 프로펠러노출의 발생지속시간(발생비율)  $pr$ 은 [관측기간  $D$ ]에 대하여 [초과회수의 기대치  $\bar{n}_r \times$  발생지속시간의 대표치  $t^*$ ]의 비율로서 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} pr &= \bar{n}_r \times \left(\frac{t^*}{D}\right) \times 100 (\%) \\ &= t^* \frac{\sigma_r}{2\pi\sigma_{\dot{r}}} \exp\left\{-\frac{f^2}{2\sigma_r^2}\right\} \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서 식 (16)중 1회당 프로펠러노출의 발생지속시간의 대표치  $t^*$ 는  $t^* = \bar{t}_r |_{r=d_{pr} \text{ or } d_{pr}}$ 을 이용하여 배와 파가 만나는 각도  $\delta$ , 평균파주기  $T$ , 유의파고  $H$  등에 의해 변화하는 것으로서 취급한다.

또한 선체수직방향상대변위  $r$ 가 어떤 레벨 예를 들면  $d_{pr}$ 을 지속적으로 초과하고 있는 시간, 즉 초과지속시간(lasting time)은 확률변수이고, 확률밀도함수를 가지고 있다. Wan 등<sup>12)</sup>은 이 확률밀도함수의 근사해를 Sveshnikov의 방법<sup>3)</sup>을 확장·적용하여 유도하였고, 프로펠러 레이싱에도 적용가능하다. 보다 상세한 것은 Shinkai 등<sup>6)</sup>을 참조하기 바란다.

#### 4. 프로펠러노출의 장기예측

배가 어떤 해역을 장기간에 걸쳐 항상 일정한 속도를 유지하면서 좌의 평균진행방향에 대하여 항상 일정한 만나는 각도를 유지하며 항해하고 있다고 가정하면, 그 해역의 장기파랑발현확률  $p(H, T)dHdT$  을 이용하고 프로펠러노출의 단기발생비율  $pr$  에 근거하여 프로펠러노출의 장기발생비율(평균지속시간의 비율: 프로펠러 레이싱 발생률)은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$PR \equiv PR(H) = \int_{T=0}^{\infty} pr(T)p(T|H)dT \quad (17)$$

여기서  $p(T|H)$  는 좌고  $H$  가 주어졌을 때 좌주기의 조건 확률밀도함수이다.

그리고 프로펠러노출의 장기누적발생비율은 다음 식으로 얻어진다.

$$Q_{PR} = \int_{H=0}^{\infty} PR(H)p(H)dH \quad (18)$$

여기서  $p(H)$  는 좌고의 주변 확률밀도함수이다.

#### 5. 계산 및 고찰

##### 5.1 적용선형과 계산조건

계산대상으로서 배 길이  $L=150m$ 의 컨테이너선을 선정하여 규칙파 및 단기불규칙파 중의 선체운동과 수직방향상대변위, 프로펠러노출의 장기발생시간비율, 장기누적발생시간비율 등의 계산을 실시하였다. 이 선형은 Shinkai 등<sup>6)</sup>에서 계산대상 선형으로서 이용한 4척 중의 1척으로 보통의 컨테이너 선형보다 폭/흘수비를 같게 하여 폭광선(幅廣船)이 되었다. 이 선형의 주요목을 Table 1에 나타내었다. 표에는 65% 벨러스트(Ballast)상태의 주요목도 나타내고 있다. 이 선형은 1축선을 모형(母型)으로 하고 있지만 Table 2에 나타난 바와 같이 모든 측정치의 프로펠러를 기준으로서, Fig. 5에 개략도를 나타낸 바와 같은 방식으로 각도  $\alpha$ 를 파라메타(parameter)로서 설정하여 2축의 프로펠러위치 및 프로펠러측정치 등을 가정하였다. 그리고 모든 주요목, 측정치 등의 각 수치는 문헌<sup>13),14)</sup>의 데이터를 참고하여 본 논문의 목적에 맞도록 적절하게 설정한 것이다.

Table 1 Principal particulars

Ship No.	R013
$L_{pp}(m)$	150.000
$B(m)$	33.333
$d(m)$	9.800
$\nabla(m^3)$	26950.00
$L_{pp}/B$	4.5000
$B/d$	3.4013
$l_{cb}(\%L_{pp})$	1.9404
$C_b$	0.5497
$C_p$	0.5667
65% Ballast condition	
$d(m)$	6.850
$\nabla(m^3)$	17520.00
trim(m)	1.500
$l_{cb}(\%L_{pp})$	2.0228

Table 2 Propeller's conditions and dimensions

Ship No.	R013
Full load condition	
$I(m)$	6.1600
$R(m)$	2.5000
$d_{pr}(m)$	3.6600
$d_{pr}(m)$	5.3267
65% Ballast condition	
$I(m)$	3.9600
$R(m)$	2.5000
$d_{pr}(m)$	1.4600
$d_{pr}(m)$	3.1267

프로펠러의 선체에 대한 위치관계는 프로펠러노출의 특성에 미묘한 영향을 미치는 것으로 생각되지만, 여기에서는 Shinkai 등<sup>6)</sup>과 같은 형태로 간략화하기위해, 선미수선(A.P.)의 위치에서 프로펠러노출을 검토하였다.

계산조건으로서, 좌의 평균진행방향에 대한 배의 각도  $\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$  ( $\delta = 0^\circ$ : 추파상태) 및 모든 각도를 고려한 경우(All headings)의 10케이스(case), 그리고 선속은 프루드수(Froude number)  $F_n = 0.255$ 의 경우이다. 프로펠러위치, 측정치 설정을 위한 각도는  $\alpha = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 의 3케이스이고, 프로펠러폭방향 위치는  $y = \pm 0.274(B/2)$ ,

$\pm 0.322(B/2)$ ,  $\pm 0.370(B/2)$ ,  $\pm 0.418(B/2)$ ,  $\pm 0.466(B/2)$ ,  $\pm 0.532(B/2)$ 로 정하였다.

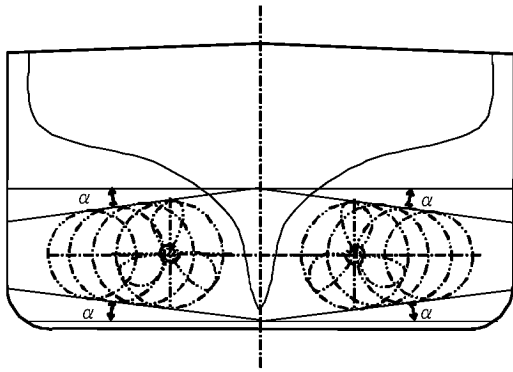


Fig. 5 Schematic decision plan for location of twin screw propellers

장기예측계산에 이용하는 장기의 파랑통계데이터는 복원수정<sup>16)</sup>한 목시관측통보(目視觀測通報) 데이터(GWS: Global wave statistics)<sup>17)</sup>의 전체년도, 전 파도 방향의 데이터를 이용하였다. 본 논문에서의 계산결과는 북태평양해역에서 항로1(North Pacific 1)[GWS의 소해역 No. 29, 30, 19, 20, 14, 13으로 구성되었다.]에 기초한 것으로, 북미서안항로의 북방향로를 상정하여 설정한 해역[해역1]로 Shinkai 등<sup>6)</sup>에서 이용한 해역과 동일하다. 또한 항로별 장기예측에서와 같은 해역의 중첩계수도 고려되었다.

5.2 수치계산 예

앞에서 언급한 계산조건과 계산방법을 바탕으로 시리즈계산을 하였으며, 그 주요한 수치계산 예를 Fig. 6~13에 나타내었다.

Fig. 6은 프로펠러 1/3직경노출의 장기발생비율 계산 예를 나타내고 있다. 해역 1, 선속  $F_n = 0.255$ 의 만재상태(Full load)에서 우현측 프로펠러위치  $y=0.274(B/2)$ 의 프로펠러노출 장기발생비율  $PR(\%)$ 을 유의파고  $H$ 의 함수로서 파와의 각도를 파라메타로 하여 나타내고 있다. 또한 프로펠러측정치는 각도  $\alpha = 0^\circ$  (Table 2에서 나타낸 측정치)로서 정하였다. 유의파고  $H$ 가 약 10m까지는 프로펠러노출의 장기발생비율이 거의 0에 가깝지만, 이것보다 파고가 높아짐에 따라 노출의 장기발생비율이 급격하게 큰 값을 나타내고 있다. 일반적으로 발생비율의 크기는 사추파(quartering seas)상태에서 특히 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 같은 계산 조건하에서 우현측 프로펠러위치  $y=0.370(B/2)$ 의 프로펠러 1/3직경노출의 장기누적발생비율의 계산 예

를 나타내고 있다. Fig. 6의 경우에 비해 프로펠러가 선체중심선보다 선측방향에 위치하고 있기 때문에 횡동요의 영향으로 발생비율 그 자체의 수치가 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 프로펠러노출발생비율에 대한 유의파고, 파와의 각도 등의 일반적 경향은 Fig. 6의 경우와 유사하다.

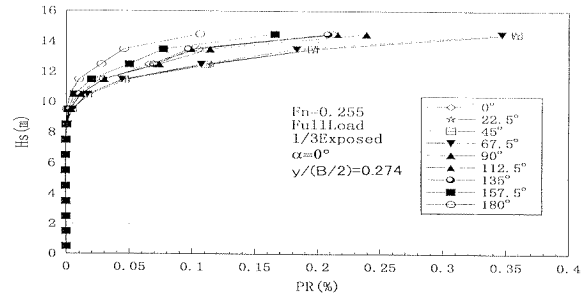


Fig. 6 Long-term exceeding lasting rate of propeller racing ( $\alpha = 0^\circ, y/(B/2) = 0.274$ )

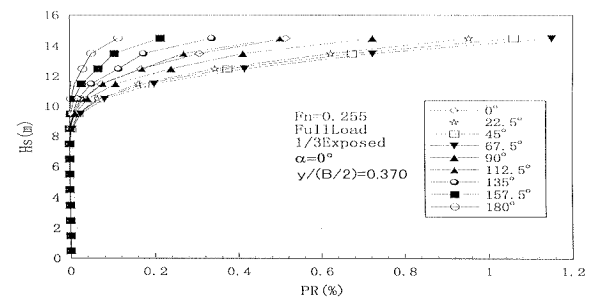


Fig. 7 Long-term exceeding lasting rate of propeller racing ( $\alpha = 0^\circ, y/(B/2) = 0.370$ )

Fig. 8과 9는 프로펠러측정치와 위치를 연속적으로 변화시킨 경우, 프로펠러 1/3직경노출의 장기발생비율 계산 예이다. 해역1, 선속  $F_n = 0.255$ 의 만재상태에서 우현 및 좌현측 프로펠러위치  $y=0.274(B/2)$ ,  $-0.274(B/2)$ 의 프로펠러노출 장기발생비율  $PR(\%)$ 을 유의파고  $H$ 의 함수로서 파와의 각도를 파라메타로 하여 나타내고 있다. 단, 프로펠러 측정치를 각도  $\alpha = 10^\circ$ 로 정하였기 때문에 프로펠러직경이 작게 설정되어 있다. Fig. 6과 Fig. 8을 비교해 보면, 프로펠러위치는 같고 프로펠러 측정치가 다른 경우의 프로펠러노출 장기발생비율의 경향을 추측할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교해 보면, 파와의 각도에 대해 풍상측(weather side)에 위치하는 프로펠러와 풍하측(leeward side)에 위치하는 프로펠러 각각의 프로펠러노출 장기발생비율의 특성을 비교·검토하는 것이 가능하다. 풍상측(weather side)에 위치하는 프로펠러의 노출장기발생비율이 크다. 이러한 특

성은 앞에서 설명한 프로펠러 노출의 운동학으로부터 유추하여 합리적인 경향을 얻을 수 있다.

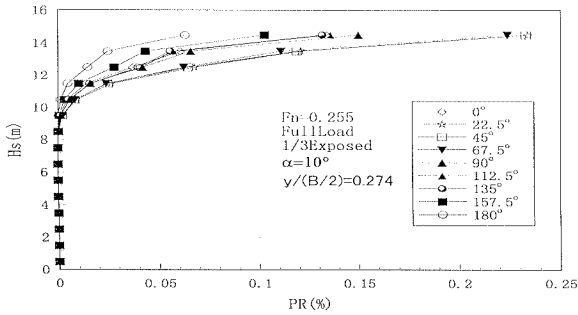


Fig. 8 Long-term exceeding lasting rate of propeller racing ( $\alpha = 10^\circ, y/(B/2) = 0.274$ )

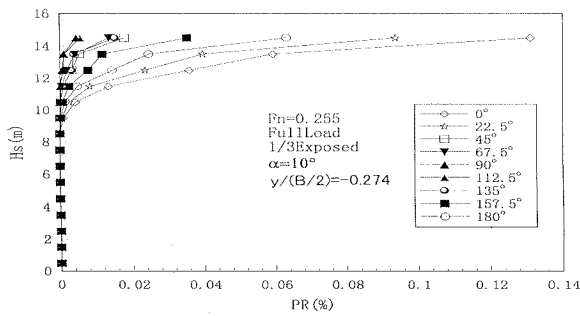


Fig. 9 Long-term exceeding lasting rate of propeller racing ( $\alpha = 10^\circ, y/(B/2) = -0.274$ )

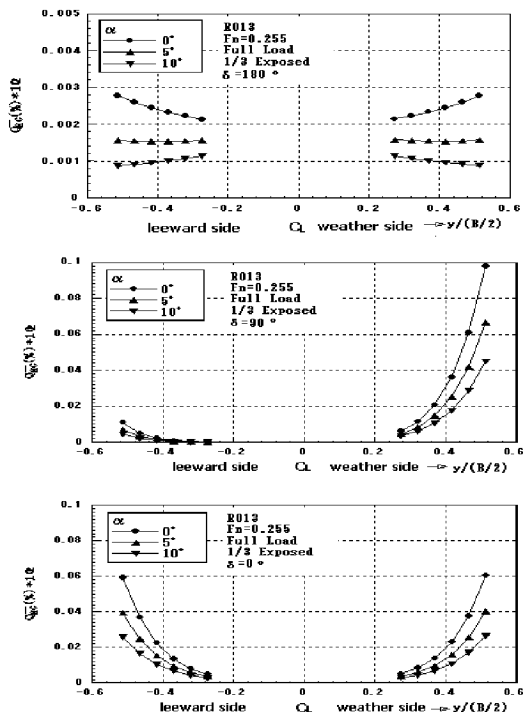


Fig. 10 Long-term accumulate time rate of 1/3 exposed propeller racing as a function of the distance between propellers ( $\delta = 180^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ )

프로펠러 1/3직경노출의 장기누적발생비율의 계산 예를 Fig. 10과 11에 나타내었다. Fig. 10은 해역1에서 만재상태로 향파(head seas)상태( $\delta = 180^\circ$ ), 횡파(beam seas)상태( $\delta = 90^\circ$ ), 추파(following seas)상태( $\delta = 0^\circ$ ) 각각에 대해 프로펠러노출의 장기누적발생비율  $Q_{PR}(\%)$ 을 프로펠러추정치를 결정하는 각도  $\alpha$ 을 파라메타로 하여 프로펠러의 선체횡방향위치  $y$ 의 함수로서 나타내고 있다. 이 그림을 포함한 시리즈계산결과에 의하면 다음의 특성을 알 수 있다. 즉, 일반적으로 프로펠러노출의 장기누적발생비율은 향파 및 사향파(bow seas)상태와 사추파 및 추파상태에서 큰 값을 나타내고, 횡파상태에서는 작은 값을 나타낸다. 이러한 경향은 Fukuda<sup>1)</sup>의 1축 컨테이너선에 대해서 얻어진 결과와 같지만, 2축선에 대한 계산결과에 의해 다음의 특성을 더 알 수 있다.  $\delta = 0^\circ$ 의 계산결과는 프로펠러추정치가 같고 프로펠러 폭방향위치가 다른 프로펠러노출의 특성을 나타내는 것이다. 일반적으로 프로펠러가 선체중심선보다 선측방향으로 떨어짐으로써 프로펠러노출 장기누적발생시간비율은 그 크기가 증가한다. 프로펠러 폭방향위치와 프로펠러추정치를 함께 변화시킨 경우에 향파상태에서  $\alpha = 5^\circ$ 의 경우, 프로펠러노출 장기누적발생시간비율은 거의 선폭방향으로 약간 균일하지만,  $\alpha = 10^\circ$ 의 경우에서는 선체중심선보다 프로펠러위치가 선측방향으로 떨어짐에 따라 약간 그 값이 감소한다. 횡파 및 추파상태에서는  $\alpha = 5^\circ$ 와  $10^\circ$ 의 두 경우 모두 선체중심선보다 프로펠러위치가 선측방향으로 떨어짐에 따라 그 값이 증가한다. Fig. 11은 모든 각도(All Headings)를 고려한 경우에 대해 프로펠러 1/3직경노출의 장기누적발생비율의 계산 예를 같은 조건하에서 나타내고 있다.

프로펠러 끝단노출의 장기누적발생비율의 계산 예를 Fig. 12에 나타내었다. 해역 1에서 만재상태로 모든 각도를 고려한 경우에 대하여 프로펠러 끝단노출의 장기누적발생비율  $Q_{PR}(\%)$ 을 프로펠러추정치를 결정하는 각도  $\alpha$ 을 파라메타로 하여 프로펠러의 선체횡방향위치  $y$ 의 함수로서 나타내고 있다. 모든 각도를 고려한 것이기 때문에 우현과 좌현에서 장기누적발생비율의 값이 같다. 그리고 프로펠러 1/3직경노출의 장기누적발생비율의 값에 비하여  $\alpha = 0^\circ$ 의 경우에는 프로펠러 끝단노출의 장기누적발생비율의 값이 약 15배정도 크다.

65% 밸러스트상태에서 프로펠러 1/3직경노출의 장기누적발생비율의 계산 예를 Fig. 13에 나타내었

다. 해역1에서 모든 각도를 고려한 경우에 대해 프로펠러 1/3직경노출의 장기누적발생비율  $Q_{PR}(\%)$ 을 프로펠러측정치를 결정하는 각도  $\alpha$ 을 파라메타로 하여 프로펠러의 선체횡방향위치  $y$ 의 함수로서 나타내고 있다. 이 경우도 마찬가지로 모든 각도를 고려하고 있기 때문에 우현과 좌현에서 장기누적발생비율의 값이 같다. 또한 만재상태에서 프로펠러 1/3 직경노출의 장기누적발생비율의 값에 비해  $\alpha = 0^\circ$ 의 경우에는 65% 밸러스트상태에서 장기누적발생비율의 값이 약 164배 크다.

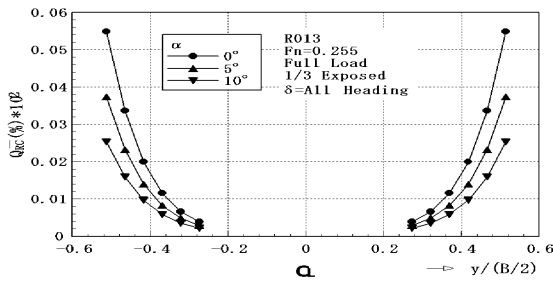


Fig. 11 Long-term accumulate time rate of 1/3 exposed propeller racing as a function of the distance between propellers (all headings)

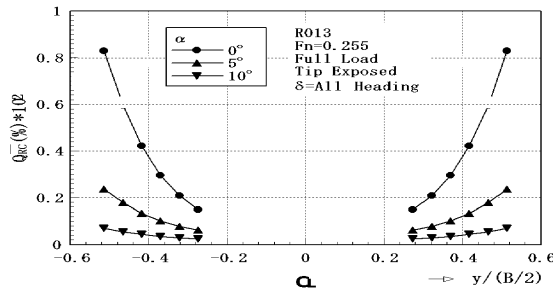


Fig. 12 Long-term accumulate time rate of tip exposed propeller racing as a function of the distance between propellers (all headings)

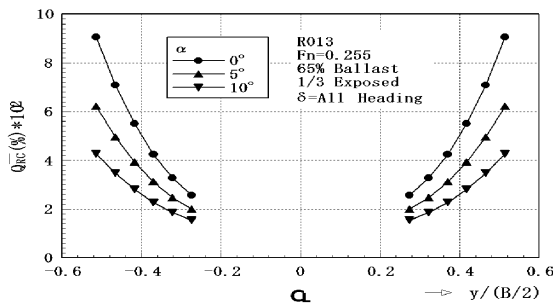


Fig. 13 Long-term accumulate time rate of 1/3 exposed propeller racing as a function of the distance between propellers (all headings, 65% ballast)

이상 얻어진 2축선의 프로펠러노출 특성의 일부 분, 특히 정성적 경향은 노출빈도를 기준으로 이용하여 검토된 종래의 연구에서 이미 보고된 결과를 재확인하는데 그친 것이 많지만, Shinkai 등<sup>6)</sup>에서 1축선의 프로펠러 레이싱의 검토에 대해 지적한 점과 같다. 그러나 종래의 연구에서 제시하고 있는 프로펠러 레이싱의 장기확률은 단기불규칙파랑해면에서 프로펠러노출의 발생확률이 어떤 값(예를 들면 1/10)을 초과하는 항해상태에 뜻하지 않게 만나게 되는 장기의 누적확률을 의미하는 것으로, 종래의 연구에서 나타나고 있는 확률의 수치는 직접적으로 프로펠러의 일부가 파면으로부터 노출되는 현상의 발생시간 혹은 확률을 나타내는 것이 아니다.

이에 반해 본 논문에서 제시한 프로펠러노출의 장기발생비율, 장기누적발생비율 등은 프로펠러 레이싱의 중요한 원인인 프로펠러노출 현상의 평균지속시간(프로펠러의 일부가 파면보다 노출되어 공기중에 있는 초과지속시간)의 비율을 의미하고, 이 발생비율에 항해시간을 곱하면 그 추정치는 직접적으로 배의 1항해 동안에 프로펠러가 노출되는 실시간을 구할 수 있다는 것이다. 시리즈계산을 하면서 이용한 파라메타, 즉 프로펠러측정치를 결정하는 각도  $\alpha$ 의 값을 좀더 작게 세분하여 설정하고, 본 논문에서 제시한 방법에 근거하여 Fig. 11~13과 같은 그림(chart)을 사전에 type ship으로 선정된 선형에 대하여 작성해둔다면, 그 결과를 참고로 기본계획단계에서도 추진성능의 검토와 더불어 2축선의 프로펠러 레이싱을 검토할 수 있다. 즉, 「최대 프로펠러 직경의 검토」, 「프로펠러 레이싱 상 문제가 없는 흘수의 검토」 등 본래의 선박설계 입장에서의 검토에 대해 프로펠러 레이싱의 발생 실시간을 상정하고, 현상(프로펠러노출)과 그 결과(프로펠러가 이상회전하는 시간, 토크, 추력이 현저하게 변동하는 시간)를 대응시켜 보다 직관적으로 확률·통계학에 근거하여 현상의 파악이 가능하게 되어, 설계지침의 구축이 용이할 것으로 생각된다.

## 6. 결 론

프로펠러 레이싱에 대하여 그 발생지속시간추정의 관점으로부터, 프로펠러노출의 통계적 예측법의 알고리즘을 재구성하고, 2축선의 프로펠러 레이싱 검토에 관한 설계지침의 구축이 용이하게 되는 하나의 방법을 제시하였다. 제시한 방법으로 2축선의



스크루(screw) 프로펠러위치, 프로펠러직경 등을 연속적으로 변화시켜 수치계산을 실시하여, 프로펠러 레이싱 검토에 이용하기 위한 그림(chart)을 작성하였다.

본 논문에서 제안한 프로펠러노출의 평균발생지속시간추정법은 프로펠러노출의 장기발생시간비율을 추정할 때에 프로펠러 레이싱의 단기초과확률을 파라메타에 포함하지 않기 위해 프로펠러노출 즉, 프로펠러 레이싱의 발생율의 해석이 용이하고, 기본계획단계에서의 프로펠러 레이싱의 문제검토에 있어서 간략하지만 유용한 설계판단기준을 얻을 수 있다는 것을 2축선의 문제에서 재확인하였다. 본 추정법을 「선속저하의 문제」, 「시마진(Sea margin)의 문제」 등에 적용하는 것이 이후의 과제이다.

### 참고 문헌

1. J. Fukuda, 1969, "Statistical Prediction of Ship Responses (in Japanese)", Symposium on Seakeeping Qualities, SNAJ, pp. 99-119.
2. R. Hosoda, Y. Kunitake and M. Miyamoto, 1988, "Seakeeping Evaluation and Criteria (in Japanese)", Ship Hull Forms and Seakeeping Qualities, 5th Marine Dynamics Symposium, SNAJ, pp. 157-176.
3. S. Naito and S. Nakamura, 1979, "Open-Water Characteristics and Load Fluctuations of Propeller at Racing Condition in Waves", Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 172, pp. 51-63.
4. I. Takanashi, 1984, "Application to Practical Ship Design, Present State and Problems in Design (in Japanese)", Ship Motion and Wave Loads, Propulsive Performance in a Seaway, 1st Marine Dynamics Symposium, SNAJ, pp. 257-266.
5. M. Takekawa, T. Ikebuchi and K. Matsumoto, 1994, "Ship Design and Seakeeping Research (in Japanese)", Application of Ship Motion Theory to Design, 11th Marine Dynamics Symposium, SNAJ, pp. 33-91.
6. A. Shinkai, S. Wan and Y. Konishi, 1997, "Propeller Racing of Ocean-going Ships (in Japanese)", Journal of the Society of Naval Architects, No. 182, pp. 435-444.
7. S. O. Rice, 1945, "Mathematical analysis of random noise", The Bell System Technical Journal, Vol. 24.
8. A. A. Sveshnikov, 1966, "Applied Methods of the Theory of Random Functions (First English edition)", Int. Series of Mono-grphs in Pure and Applied Mathematics, Pergamon Press, London.
9. N. Takaoka, 1975, "Applied Random Function for Engineering (in Japanese)", Kyoritsu Publishing Co., Japan.
10. A. Shinkai and S. Wan, 1996, "On Wet-deck Navigation of an Ocean-going Ship", Proc. of KOJAM 96, Third Korean-Japan Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics, Taejon, Korea, pp. 277-284.
11. S. Wan and A. Shinkai, 1996, "On the Prediction of Deck Wetness of Ocean-going Ships (in Japanese)", JSNAJ, Vol. 180.
12. S. Wan and A. Shinkai, 1997, "Appraisal for the Freeboard of ILLC 1966 Based on Estimating the Time Lasting Period of Deck Wetness (in Japanese)", JSNAJ, Vol. 181, pp. 161-168.
13. 日本造船研究協會 第200研究部會 第9分科會, 1981, "幅廣船型の開發に關する研究報告書", 日本造船研究協會報告 95号.
14. (社)日本造船技術センター, 1982, "船舶の馬力節減を目的とした多軸船に關する研究", 報告書.
15. M. St. Denis and W. J. Pierson Jr., 1953, "On the Motion of Ships in Confused Seas", Trans. SNAME, Vol. 61.
16. A. Shinkai and S. Wan, 1995, "The Statistical Characteristics of Wave Data and Long-term Predictions of the Ship Response (in Japanese)", Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 89, pp. 223-231.
17. N. Hogben, L. F. Dacunha and G. F. Olliver, 1986, "Global wave statistics", British Maritime Technology, Unwin Brothers Limited, London.