

# 선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구

## A Study on the Evaluation of Seakeeping Performance with Ship types

김 순 갑\* · 박 문 수\*\* · 공 길 영\*\*\*

### 1. 서 론

- (1) 조선·항해 분야에서 해결해야 할 우선 과제는 황천 등 불규칙한 해상에서 선박의 안전도를 정량적으로 파악할 수 있는 평가 방법과 그 시스템의 개발임.
- (2) 선박의 성능 평가는, 과거에는 주로 조선학 및 항해학 각각의 입장에서 이루어짐. 조선학은 평수중에서의 저항 추진 성능 및 조종 성능으로 선박 고유의 성능을 평가하고, 항해학은 좁은 의미의 운항 성능이라고 할 수 있는 조선(操船) 성능을 평가함. 앞으로 선박 성능에 대한 평가는 조선학과 항해학의 경계가 무너지고, 구조의 안전, 내항 성능, 경제성 등이 가미된 종합적인 운항 성능을 평가함.
- (3) 파랑중을 항해하는 선박의 성능 평가에 내항 성능이 평가의 대상으로 떠오른 것은 최근의 일임. 내항 성능은 '어떤 사명을 부여받은 선박이 예정된 취항 항로, 혹은 해역을 항해함에 있어, 해상 조건에 관계없이 승무원의 안전은 물론이고, 선체에 탑재된 제 설비의 기능, 성능의 저하없이, 그 사명을 수행하는데 요구되는 성능'이라고 정의될 수 있음. 따라서, 내항 성능은 선박 고유의 파랑중 성능만을 말하는 것이 아니고, 승무원-선체 및 탑재 기기로 된 인간-기계(Man-Machanics) 시스템으로서의 선박의 파랑중 종합적인 성능을 말함.
- (3) 선박의 내항성능을 평가하기 위한 요소로서는 Deck wetness, Propeller Racing, Slamming, Rolling, 상하가속도, 좌우가속도, 선체중양부의 종굽힘Moment 등이고, 개개의 현상에 대한 한계치와 발생확률이 주어져 있어 그것이 평가지표들로 되고 있음.
- (4) 그러나 선종 및 선형에 따른 종합적인 내항성능의 평가지표가 없어, 선박의 특성에 맞는 평가 방법의 개발을 위하여 선종에 따른 평가가 요구됨.
- (5) 선종별 비교·평가에 의하여 내항성능 평가요소의 선종별 특성을 파악하고, 그 특성을 종합할 수 있는 대표적인 종·횡운동을 정의해 실용성 및 운용자의 활용성을 높임.
- (6) 본 연구에 있어서 수치 시뮬레이션의 대상선으로는 175m 컨테이너선형, 여객선형으로 길이 93m의 실습선 한나라호, 그리고 현재 운항하고 있는 259m벌크선형과 164m 자동차전용선형(PCC:Pure Car-carrier)을 적용함.

---

\* 정희원, 한국해양대학교

\*\* 한라중공업(주)

\*\*\* 정희원, 국방과학연구소

## 2. 내항성능 평가요소와 상관관계

### 2.1 내항성능 평가요소의 Spectrum과 분산치

Modified Pierson-Moskowitz형 Spectrum

$$S_{\zeta}(\omega) = 0.11H_{1/3}^2 \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^4 \omega^{-5} \times \exp\left\{-0.44\left(\frac{T_0\omega}{2\pi}\right)^{-4}\right\} \text{ m}^2 \cdot \text{sec} \quad \text{-----}(1)$$

방향성을 고려한 단파정 해양파 Spectrum

$$S_{\zeta}(\omega, \theta) = \frac{2}{\pi} S_{\zeta}(\omega) \cos^2 \theta : |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \\ = 0 : |\theta| > \frac{\pi}{2} \quad \text{-----}(2)$$

임의의 내항성능 평가요소  $X_i$ 의 확률과정  $X_i(t)$ 의 주파수 응답함수를  $H_{X_i}(\omega, \chi - \theta)$ 라고 하면, 확률과정  $X_i(t)$ 의 Spectrum  $S_{X_i}(\omega, \chi)$ 는

$$S_{X_i}(\omega, \chi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{X_i}(\omega, \chi - \theta)|^2 S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta \quad \text{-----}(3)$$

확률과정  $X_i(t)$ 는

$$X_i(t) = \int_0^{\infty} \sqrt{2 S_{X_i}(\omega, \chi)} d\omega \cos(\omega t + \psi_i) \quad \text{-----}(4)$$

단,  $\psi_i = \varepsilon_i(\omega) + \varphi_i$  ( $\varphi_i$ 는  $0 \sim 2\pi$ 에서 Random하게 일양분포하는 위상각)

### 2.2 내항성능 평가요소의 상관관계

임의 2개 요소의 확률과정  $X_i(t)$ ,  $X_j(t)$ 가 평균치 Zero의 정상 Ergodic 확률과정 이라고 하면, 그 상관계수  $\rho_{ij}$ 는

$$\rho_{ij} = \frac{E[\widehat{X}_i(t) \cdot X_j(t)]}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}} \quad \text{-----}(5)$$

단,  $\widehat{X}_i(t)$ 는  $X_i(t)$ 의 공액복소수

$$E[\widehat{X}_i(t) \cdot X_j(t)] = C_{ij} = R_{ij}(0) \quad \text{-----}(6)$$

$$\text{단, } R_{ij}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \widehat{X}_i(t) \cdot X_j(t) dt \\ = \int_0^{\infty} \sqrt{S_{X_i}(\omega, \chi) S_{X_j}(\omega, \chi)} \cos(\varepsilon_i - \varepsilon_j) d\omega$$

임의 두 요소의 상관계수  $\rho_{ij}(\chi)$ 는

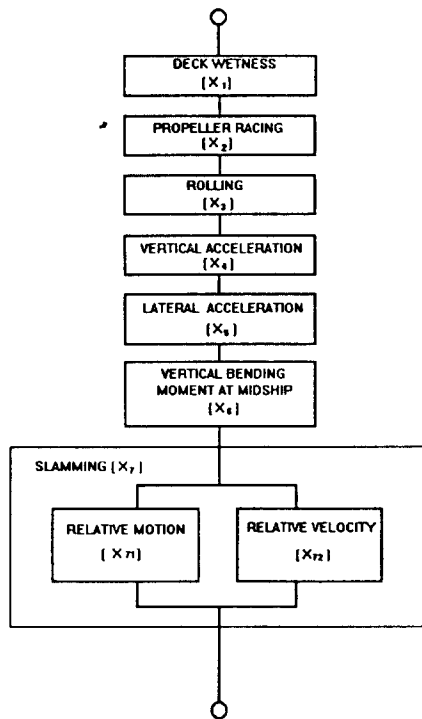
$$\rho_{ij}(\chi) = \frac{\int_0^\infty \sqrt{S_{X_i}(\omega, \chi) S_{X_j}(\omega, \chi)} \cos(\epsilon_i - \epsilon_j) d\omega}{\sigma_i(\chi) \cdot \sigma_j(\chi)} \quad \text{----(7)}$$

단,  $\sigma_i(\chi), \sigma_j(\chi) : X_i(t), X_j(t)$ 의 표준편차

상관계수  $\rho_{ij}$ 의 절대치는 1보다 작고, 두 요소가 독립인 경우에는  $\rho_{ij} = 0$ .

### 3. 내항성능 평가요소의 결합과 위험도

#### 3.1 시스템적 결합과 한계치



내항성능 평가요소	한계치 ( $\bar{X}_i$ )	한계발생확률
Deckwetness ( $X_1$ )	정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 F.P.의 유요 건현	$2 \times 10^{-2}$
Propeller racing ( $X_2$ )	정수중 항주시의 수위 상승을 포함하지 않고 Propeller 반경의 1/3 노출	$10^{-1}$
Rolling ( $X_3$ )	선체 중앙부 weather side의 bulwark top에 해수가 유입하는 것을 한계상태로 하여 정수중 흘수면에서 bulwark top까지의 높이.	$10^{-3}$
상하가속도 ( $X_4$ )	0.8g 단. g는 중력가속도 (Container 강도 JIS(Z1618-1972)에 의함)	$10^{-3}$
좌우가속도 ( $X_5$ )	0.6g 단. g는 중력가속도	$10^{-3}$
선체중앙부의 중급합Moment ( $X_6$ )	한국선급협회(KR)에서 규정한 정수중 중급합 Moment의 허용한계치	$10^{-5}$
Slamming ( $X_7$ )	S.S. 8 1/2에서 선저노출과 동시에 파에 돌입할 때의 선저의 파면에 대한 상대속도가 Threshold Velocity를 초과하는 것 단. threshold velocity = 0.09	$10^{-2}$

#### 3.2 평가치와 위험도

내항성능 평가요소  $X_i$ 의 발생확률  $Q(\bar{X}_i)$

$$Q(\bar{X}_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \quad \text{-----(8)}$$

평가치  $E_i$

$$E_i = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln \{ Q(\bar{X}_i) \}}} = \left[ \frac{\sigma_i}{\bar{X}_i} \right] \quad \text{-----(9)}$$

위험도  $\mu_i$

$$\mu_i = \frac{E_i}{E_{ic}} = \frac{\left[ \frac{\bar{X}_i}{\sigma_{ic}} \right]}{\left[ \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right]} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}} \quad \text{-----(10)}$$

최대위험도  $\mu_m$

$$\mu_m = \text{Maximum} [\mu_i] \quad \text{-----(11)}$$

상대위험도  $i\mu_j$

$$i\mu_j = \frac{\mu_j}{\mu_i} = \frac{\left[ \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right]}{A_{ij} \cdot \left[ \frac{\bar{X}_j}{\sigma_j} \right]} = \frac{\sigma_{ic}}{\sigma_j} \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_i} \quad \text{-----(12)}$$

$$\text{단, } A_{ij} = \frac{E_j}{E_{ic}} = \frac{\left[ \frac{\bar{X}_i}{\sigma_{ic}} \right]}{\left[ \frac{\bar{X}_j}{\sigma_{ic}} \right]}$$

## 4. 선종별 내항성능의 비교·평가

### 4.1 평가치에 의한 비교·평가

내항성 신뢰도  $P(\chi, V, S)$

임의  $i, j, k$  요소의 상관계수 :  $i\rho_j, i\rho_k, k\rho_i$

$i$  요소에 대한  $j, k$  요소의 상대위험도 :  $i\mu_j, i\mu_k$

$$\beta_j = A_{ij} \cdot i\mu_j \quad \text{-----(13)}$$

(1) 1차원 요소의 발생확률

$$Q(\bar{X}_i) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\}$$

$$Q(\bar{X}_j) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\bar{X}_j}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \right\} = Q(\bar{X}_i)^{\beta_j^2}$$

$$Q(\bar{X}_k) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\bar{X}_k}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \right\} = Q(\bar{X}_i)^{\beta_k^2} \quad \text{-----(14)}$$

(2) 2차원 요소의 동시발생확률

$$\begin{aligned}
 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j) &= Q(\bar{X}_i)Q(\bar{X}_j) \left\{ 1 + \frac{i\rho_j^2}{4} \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \left( \frac{\bar{X}_j^*}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_i)^{1+\beta_j^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^4 \left( \frac{i\rho_j}{\beta_j} \right)^2 \right\} \\
 Q(\bar{X}_j, \bar{X}_k) &= Q(\bar{X}_j)Q(\bar{X}_k) \left\{ 1 + \frac{j\rho_k^2}{4} \left( \frac{\bar{X}_j^*}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \left( \frac{\bar{X}_k^*}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_j)^{\beta_j^2+\beta_k^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{\bar{X}_j}{\sigma_j} \right)^2 \left( \frac{j\rho_k}{\beta_j \beta_k} \right)^2 \right\} \\
 Q(\bar{X}_k, \bar{X}_i) &= Q(\bar{X}_k)Q(\bar{X}_i) \left\{ 1 + \frac{k\rho_i^2}{4} \left( \frac{\bar{X}_k^*}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_i)^{1+\beta_k^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^4 \left( \frac{k\rho_i}{\beta_k} \right)^2 \right\} \quad \text{---- (15)}
 \end{aligned}$$

(3) 3차원 요소의 동시발생확률

$$\begin{aligned}
 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j, \bar{X}_k) &= Q(\bar{X}_i)Q(\bar{X}_j)Q(\bar{X}_k) \\
 &\quad \times \left\{ 1 + \frac{i\rho_j^2}{4} \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \left( \frac{\bar{X}_j^*}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \right. \\
 &\quad + \frac{j\rho_k^2}{4} \left( \frac{\bar{X}_j^*}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \left( \frac{\bar{X}_k^*}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \\
 &\quad \left. + \frac{k\rho_i^2}{4} \left( \frac{\bar{X}_k^*}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_i)^{\beta_j^2+\beta_k^2} \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^4 \left\{ \left( \frac{i\rho_j}{\beta_j} \right)^2 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left( \frac{j\rho_k}{\beta_j \beta_k} \right)^2 + \left( \frac{k\rho_i}{\beta_k} \right)^2 \right\} \right] \quad \text{----- (16)}
 \end{aligned}$$

내항성능 시스템이 기능을 잃게되는 확률  $Q(x, V, S)$

$$\begin{aligned}
 Q(x, V, S) = & \left[ \sum_{i=1}^7 Q(\overline{X_i}) - \sum_{\substack{i,j \\ i < j}}^7 Q(\overline{X_i}, \overline{X_j}) \right] \quad \text{-----(17)} \\
 & + \sum_{\substack{i,j,k \\ i < j < k}}^7 Q(\overline{X_i}, \overline{X_j}, \overline{X_k}) \\
 & - \sum_{\substack{i,j,k,l \\ i < j < k < l}}^7 Q(\overline{X_i}, \overline{X_j}, \overline{X_k}, \overline{X_l}) \\
 & + \sum_{\substack{i,j,k,l,m \\ i < j < k < l < m}}^7 Q(\overline{X_i}, \overline{X_j}, \overline{X_k}, \overline{X_l}, \overline{X_m}) \\
 & - \sum_{\substack{i,j,k,l,m,n \\ i < j < k < l < m < n}}^7 Q(\overline{X_i}, \overline{X_j}, \overline{X_k}, \overline{X_l}, \overline{X_m}, \overline{X_n}) \\
 & + Q(\overline{X_1}, \overline{X_2}, \overline{X_3}, \overline{X_4}, \overline{X_5}, \overline{X_6}, \overline{X_7})
 \end{aligned}$$

내항성 신뢰도  $P(x, V, S)$

$$P(x, V, S) = 1 - Q(x, V, S) \quad \text{-----(18)}$$

평가치  $E_T$

$$E_T = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln[1 - P(x, V, S)]}} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln[Q(x, V, S)]}} \quad \text{----(19)}$$

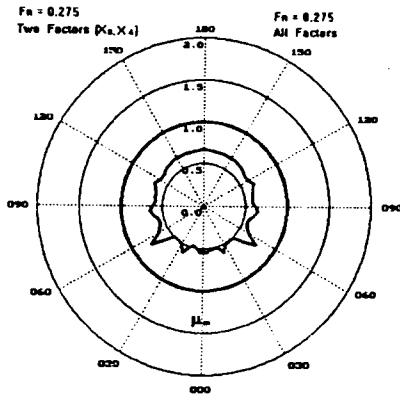
평가치  $E_T$ 는 내항성 신뢰도가 0일 때  $E_T \rightarrow \infty$ 이고 내항성 신뢰도가 1일 때  $E_T \rightarrow 0$ 로 되는 값.

한계평가치  $E_{TC}$

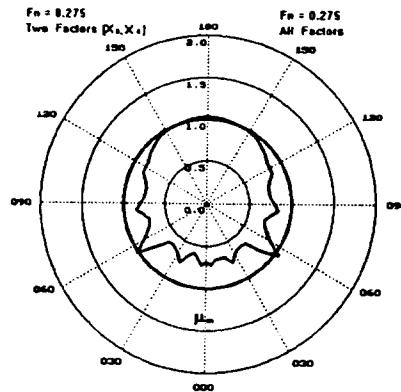
$$E_{TC} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln[Q_C(t)]}} \quad \text{-----(20)}$$

## 4.2 최대 위험도에 의한 비교 · 평가

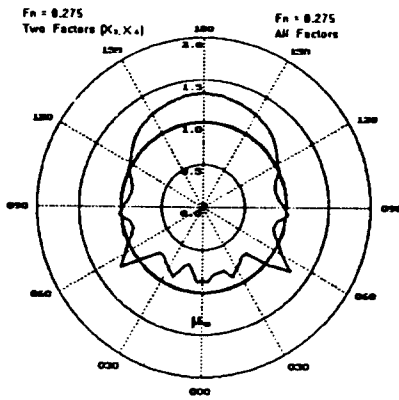
각 요소의 한계치와 한계발생확률이 달라도 개개의 위험도를 비교하여 적용하면 내항성능 평가에 미치는 각 요소의 영향을 대등하게 평가할 수 있음.



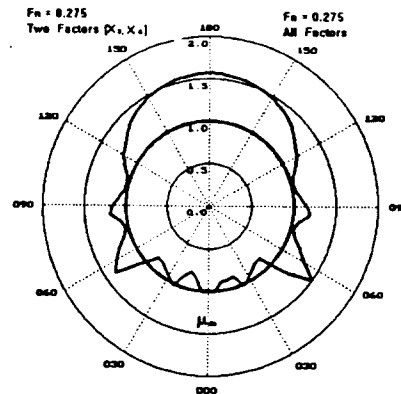
(a) SEA STATE 6



(b) SEA STATE 7



(c) SEA STATE 8



(d) SEA STATE 9

## Container선형

### 4.3 평가방법의 개선방안

#### 4.3.1 평가방법의 검토

##### 한계평가치 설정의 검토

(1) Bulk선형 : 한계평가치로 내항성 신뢰도 0.999

Loading상태의 변화 --> 새로운 한계평가치의 설정

(2) Container선형 : Rolling 영향의 반영이 미흡

모든 요소의 평가 : 계측성, 경제적인 면

#### 4.3.2 대표적인 종·횡운동의 채택

위험 범위로 채택

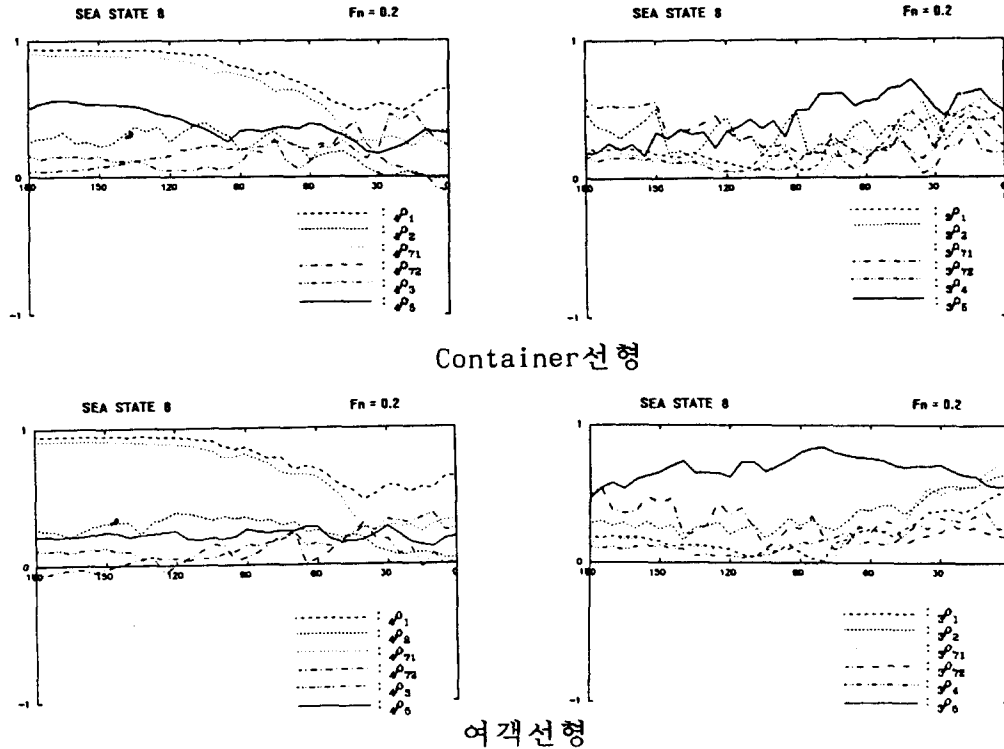
(1) Container선형 : 상하가속도, Rolling

(2) 여객선형 : 상하가속도, 좌우가속도

- (3) Bulk선형 : Rolling
- (4) PCC형 : 상하가속도, 좌우가속도

### 4.3.3 기존 내항성능 평가요소와 종·횡운동의 대표요소와의 상관관계

내항성능 평가요소가 그 특성상 선체의 종방향 운동과 횡방향 운동으로 구분됨을 파악하고, 상기에서 위협으로 되는 파와의 만남각이 가장 넓은 요소로 취한 대표적인 종·횡운동이 기존 내항성능 평가요소의 특성을 종합할 수 있는지의 여부를 상호의 상관관계를 분석함으로써 보다 명확하게 할 필요가 있음.



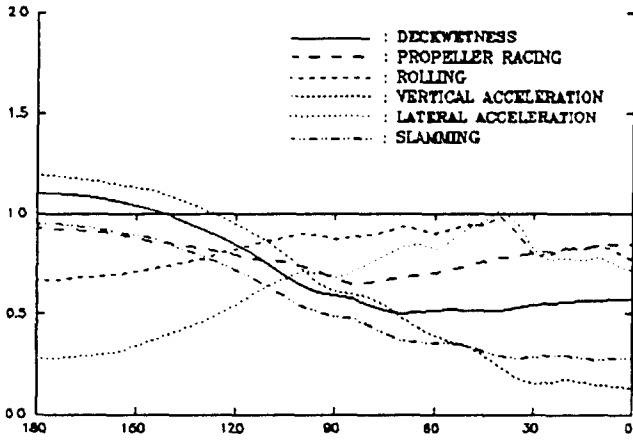
## 5. 선종별 내항성능 평가에 따른 특성

앞서 4종류의 선박에 대해 내항성능을 평가해 본 결과, 선박의 종류에 따라 각 내항성능 평가요소가 해당 선박의 내항성능에 미치는 영향의 크기가 다르고, 파와의 만남각에 따라서도 다르게 나타나는 것을 파악할 수 있음.

- (1) Container선형 : Rolling이  $\chi = 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$  부근에서 Peak를 이룸  
F.P.의 상하가속도와 Rolling의 영향이 대표
- (2) 여객선형 : 좌우가속도의 영향이 큼 (Yawing의 영향)  
F.P.의 상하가속도와 좌우가속도가 대표적
- (3) Bulk선형 : Rolling의 영향이 파와의 모든 만남각에서 크게 작용  
(홀수가 깊고, 무게중심이 아래에 있기 때문)
- (4) PCC형 : Container와 비슷한 양상(Rolling과 좌우가속도 Peak)  
Propeller racing이 Following sea에서 심함  
F.P.의 상하가속도와 좌우가속도가 대표

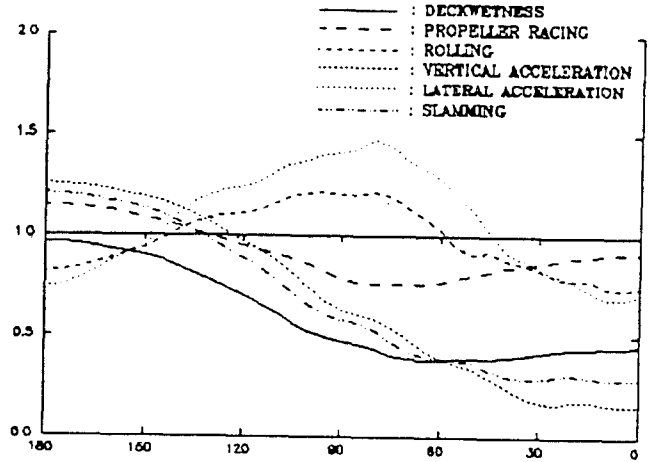


SEA STATE 8  
Fn = 0.2



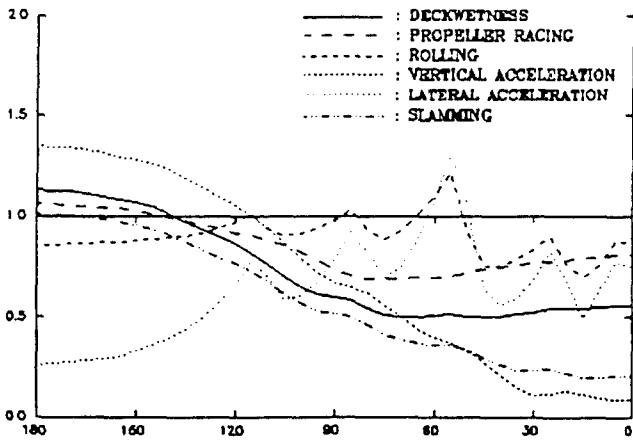
(a)

SEA STATE 8  
Fn = 0.2



(a)

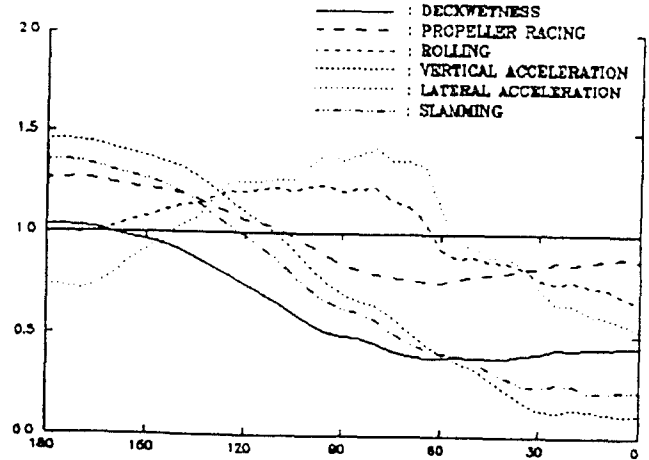
SEA STATE 8  
Fn = 0.275



(b)

Container선형

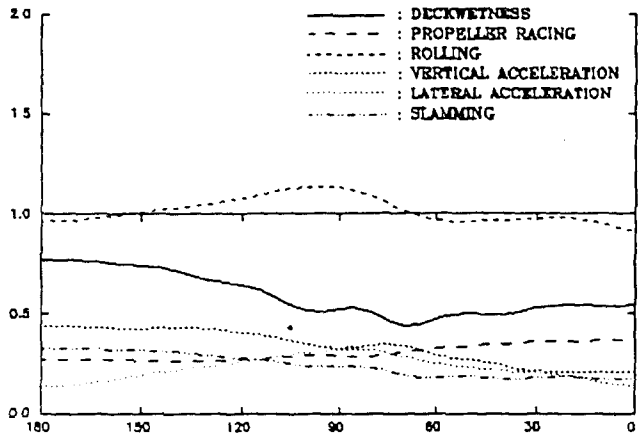
SEA STATE 8  
Fn = 0.275



(b)

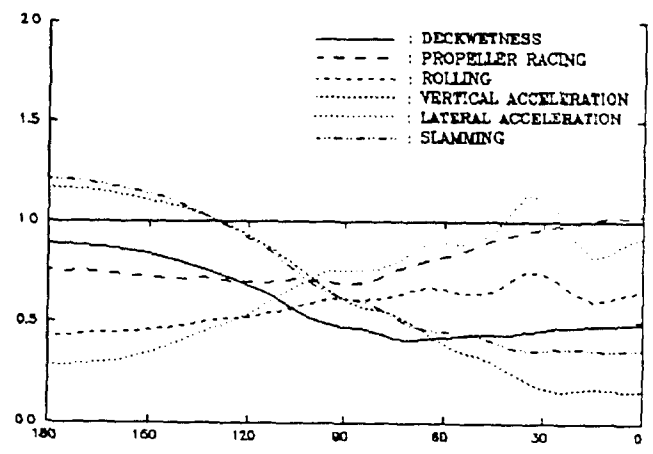
여객선형

SEA STATE 8  
 $F_n = 0.1$



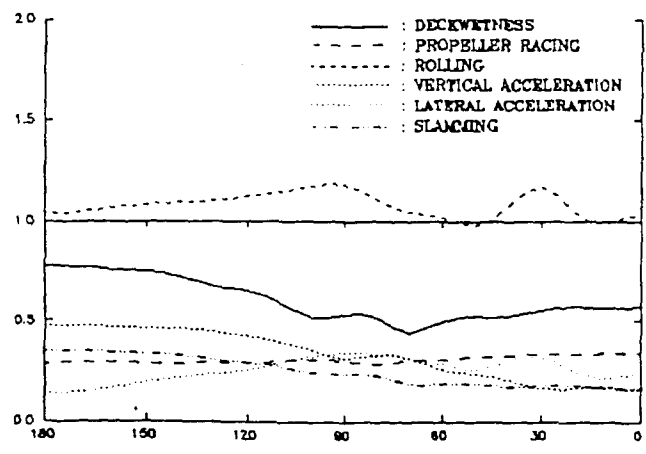
(a)

SEA STATE 8  
 $F_n = 0.2$



(a)

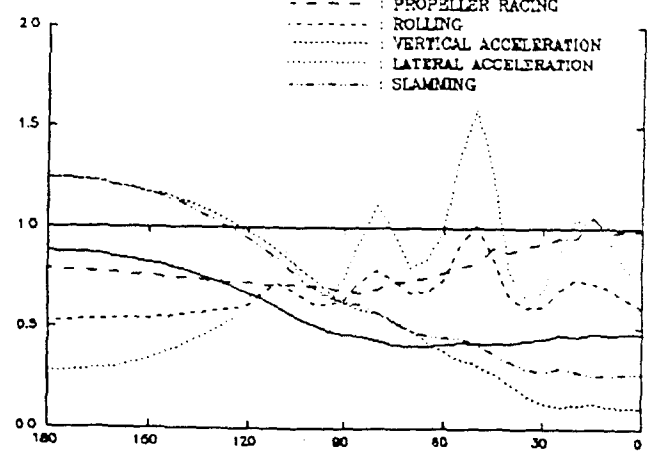
SEA STATE 8  
 $F_n = 0.15$



(b)

Bulk선형

SEA STATE 8  
 $F_n = 0.275$



(b)

PCC형

## 실제 선박 운항자의 관점

(1) PCC형은 자동차의 Lashing이, 여객선형은 여객들의 안락한 승선감이 주가 되므로 이러한 것들은 선체 운동에서 좌우가속도와 깊은 관계가 있고, 따라서 내항성능 평가요소로 좌우가속도를 취하는 것은 타당성을 가짐.

(2) 벌크선형과 컨테이너선형은 해수가 Bulkwark top을 넘어 들어와 화물이나 선체 구조물에 손상을 주고, 이러한 요인은 Rolling과 관계하고 있어 내항성능 평가요소로 취할 수 있는 타당성이 있음.

## 실선 적용의 제안

선박의 특성에 맞는 종운동과 횡운동의 각 한 요소, 즉 컨테이너선형과 벌크선형에서는 F.P의 상하가속도와 ROLLING, 여객선형과 PCC형에서는 F.P의 상하 가속도와 좌우가속도 등과 같이 대표할 수 있는 요소를 취하여, 평가함으로써 실선 적용이 보다 간편해질 것으로 생각됨.

## 6. 결 론

(1) 각 선종별 내항성능의 종합적인 경향을 파악하므로, 한계평가치의 설정이 객관적인 근거에 따라 다르게 되어야 함을 알 수 있음.

(2) 위험도에 의한 평가도를 개발함으로써 각 요소가 내항성능 평가에 미치는 영향을 대등하게 할 수 있고 실무 적용을 보다 용이하게 함.

(3) 대표적인 종·횡운동을 내항성능 평가요소로 하여 선박 전체의 내항성능을 종합적으로 평가할 수 있는 방안을 제안함.

(4) 종·횡운동에서 선박에 따른 대표적인 요소 각 한개를 채택함으로써 계측상의 난제를 해결할 수 있는 계기를 마련함.

(5) 선박의 종류에 따른 각 요소의 영향과 그 평가 특성을 밝힘으로써 실제 운항자가 평가하는데 참고로 하는 현상과 부합됨을 알 수 있었고, 정량적인 평가를 행함으로써 선박의 최적설계나 운항성 평가 등에 유용하게 이용할 수 있도록 함.