

선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구

김순갑* · 박문수** · 공길영***

A Study on the Evaluation of Seakeeping Performance with Ship Types

Soon-Kap Kim · Moon-Su Park · Gil-Young Kong

〈目 次〉	
Abstract	3.2 최대 위험도에 의한 비교·평가
Nomenclature	3.3 평가방법의 개선방안
1. 서 론	4. 선종별 내항성능 평가에 따른 특성
2. 내항성능 평가요소	4.1 수치 계산의 조건
2.1 평가요소의 스펙트럼과 분산치	4.2 선종별 내항성능 평가 특성
2.2 평가치와 위험도	4.3 실선 적용을 위한 제안
3. 선종별 내항성능의 비교·평가	5. 결 론
3.1 평가치에 의한 비교·평가	참고문헌

Abstract

Several factors can be chosen for evaluating seakeeping performance, such as deck wetness, propeller racing, slamming, rolling, vertical acceleration, lateral acceleration and vertical bending moment, in consideration of the safety of human being, cargo and ship. In fact, there are few developments for an evaluation method of seakeeping performance corresponding with each ship's characteristics.

The purpose of this paper is to develop an quantitative evaluation method of seakeeping performance according to ship types. The scope and the method of this study are as follow.

(1) Obtain each response amplitude of ship's motion in waves by Ordinary Strip Method and apply it to short-crested, irregular wave for random process of the factors on seakeeping performance.

(2) Define the evaluation index, the dangerousness, the maximum dangerousness and the evaluation

* 정회원, 한국해양대학교 해사대학

** 한라 중공업(주)

*** 정회원, 국방과학연구소

diagram.

(3) Figure out the different characteristics according to ship types by computer simulation of evaluating seakeeping performance.

(4) Adopt vertical acceleration and one of rolling or lateral acceleration as the factors on seakeeping performance by clarifying the correlation of stochastic process.

This study developed an evaluation method coincident with each ship's characteristics, and suggested a device for application to actual ship. This method might be useful in developing the practical system of seakeeping performance in accordance with ship types. The ship models for computer simulation are 175m container ship type, 93m training ship HANARA as passenger ship type, 259m bulk-carrier type and 164m pure car-carrier type.

Nomenclature

B	선체의 폭	μ_i	내항성능 평가요소의 상대 위험도
C_{ij}	공분산	μ_m	내항성능 평가요소의 최대 위험도
E_i	내항성능 평가요소의 평가치	$\sigma_i(\chi)$	내항성능 평가요소의 표준편차
E_{ic}	내항성능 평가요소의 한계평가치	$\sigma_i^2(\chi)$	확률과정 $X_i(t)$ 의 분산치
E_T	선박의 내항성능 평가치	σ_{ic}	내항성능 평가요소가 한계발생확률에 도달하는 표준편차
E_{TC}	선박의 내항성능 한계평가치	$\varphi(t)$	황요각
$H_{1/3}$	해양파의 1/3 유의 파고	ω	파의 주파수
$H_n(\omega, \chi - \theta)$	내항성능 평가요소의 주파수 응답 함수		
$L(t)$	선체 중앙부 현측 상대 수위의 변위		
LCG	선체 길이의 중앙과 선체중심과의 거리		
$Q(\bar{X}_i)$	내항성능 평가요소의 발생확률		
$Q_c(t)$	선박의 내항성능이 위험하게 될 한계발생확률		
$R_{ij}(0)$	두 확률과정의 곱의 시간평균		
$S_n(\omega, \chi)$	내항성능 평가요소의 스펙트럼		
$S_\zeta(\omega)$	해양파 스펙트럼		
χ	선박과 파와의 만남각		
$S_\zeta(\omega, \theta)$	방향성을 고려한 해양파 스펙트럼		
T_n	평균파 주기		
X_i	내항성능 평가요소		
$X_i(t)$	내항성능 평가요소의 확률과정		
\bar{X}_i	내항성능 평가요소의 한계치		
$Z(t)$	상하요의 변위		
$\theta(t)$	종요각		
μ	내항성능 평가요소의 위험도		

1. 서 론

최근, 전자공학, 우주·통신기술, 시스템·제어 기술 등 첨단적 요소기술의 발전에 힘입어, 지금까지 선박 운항자의 경험, 판단, 기량에 의존하던 부분을 센서와 전문가시스템(Expert System)이 대행하는 등 선박 운항기술의 비약적인 고도화가 이루어 지고 있다.

그러나, 고도의 완전자동화 선박을 개발하기 위해서는 대양을 항행하는 선박의 황천 등 불규칙한 해상속에서 안전도를 정량적으로 파악할 수 있는 평가방법 및 시스템의 개발이 필요하다.

현재까지의 연구에 의하면, 파랑중에서 인명, 선체 및 화물 등을 포함한 선박의 내항성능을 평가하기 위한 요소로서는 불규칙 해상에서 항행중인 선체의 운동에 기인한 갑판침수(Deck wetness), 프로펠러 공진(Racing), 슬래밍, 횡동요, 상하가속도, 좌우가속도, 선체중앙부의 종굽힘모멘트 등 개개의 현상에 대한 한계치와 발생확률이 주어져 있

어 그것이 평가지표로 되고 있다.^{1)~3)}

그러나, 이러한 모든 요소를 고려한 내항성능 평가는 각 요소에 대한 기존의 한계치와 한계발생 확률이 각각 달리 제안되어 있어, 실제 운항자가 판단하는 데에는 평가상의 유용성이 적다. 또한 그 평가시스템도 각 요소의 특성에 따라 현재 개발된 센서 기술로서는 측정이 불가능한 것도 있어서 실용화 되지 못하고 있는 실정이다.

한편, 기존의 각 내항성능 평가요소 사이의 상관관계를 밝혀 한 요소를 기준요소로 하여 내항성능을 종합적으로 평가할 수 있는 방법도 있지만,¹⁰⁾ 평가시스템에 상관계수 등 사전에 계산된 많은 양의 데이터베이스의 구축이 필요하므로 실용상 번거로움이 예상되며, 그 적용대상도 특정선형인 콘테이너선형에만 적용하고 있었어 선형에 따른 특성과 그 평가가 필요하다. 그리고 Bales⁴⁾의 선형 파라미터에 의한 평가나 細田⁵⁾ 등의 「Mission Effectiveness」의 개념을 순시선형에 도입한 것 등 극소수를 제외하고, 단일 대상선에 대한 시뮬레이션에 그쳐 선형과 밀접한 관계가 있는 선체운동의 허용한계 및 한계발생확률을 적절히 결정하는 것에 의한 선종 및 선형에 따른 종합적인 내항성능의 평가지표가 없다고 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 콘테이너선형, 여객선형, 벌크선형, 자동차전용선형 등 선박을 4개의 종류별로 기존에 제안된 모든 내항성능 평가요소로 평가를 행하여 종합적인 내항성능의 경향을 파악하고, 각 선박의 특성 및 기존 내항성능 평가요소들의 영향을 파악하므로써, 각 선박에 부합되고 보다 용이한 평가방법을 개발하고자 한다.

먼저, 파랑중에서의 각종 선체운동의 응답함수치를 O.S.M.(Ordinary Strip Method)으로써 구하여 이를 불규칙 해상상태에 적용하여 내항성능 평가요소의 확률과정을 구한다. 그리고, 내항성능 평가를 위해 신뢰성 공학적 이론을 응용하여 내항성능 평가치와 평가도를 정의하고, 수치 시뮬레이션을 행하여 선종별 내항성능의 종합적인 경향을 파악한다. 또, 기존의 한계치 및 한계발생확률로 위험도를 설정하고 이를 도입한 위험도에 의한 평가공간에서 각 요소가 내항성능에 미치는 영향을 대

등하게 하여 선종별 내항성능을 정량적으로 평가를 할 수 있도록 한다.

그리고, 선종별 비교·평가에 따른 내항성능의 변화를 조사하여 기존 내항성능 평가요소의 특성을 파악하고, 각 내항성능 평가요소의 특성을 종합할 수 있는 대표적인 종·횡운동을 정의해 새로운 내항성능 평가요소로 제안하여, 실용성 및 운용자의 활용성을 높일 수 있도록 한다. 마지막으로, 기존의 한계치 및 한계발생확률이 각 상황에 맞게 내항성능을 잘 평가하고 있는지에 관해서도 검토해 보고자 한다.

본 연구에 있어서 수치 시뮬레이션의 대상선은 SR108의 길이 175m의 콘테이너선형, 여객선형으로 길이 93m의 실습선 한나라호, 길이 259m의 벌크선형, 그리고 길이 164m의 자동차전용선형(PCC: Pure Car-carrier)이다.

2. 내항성능 평가요소

2.1 내항성능 평가요소의 스펙트럼과 분산치

지금까지의 선박 내항성능에 관한 연구에 의하면, 파랑중을 항행하는 선박에서 인명, 선체, 화물 등의 안전을 포함한 내항성능을 평가하기 위한 평가요소와 그 한계치는 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

또, 해양파 스펙트럼으로는 몇가지가 통용되고 있으나 여기서는 국제선체구조회의(ISSC)에서 제안된 다음식을 사용한다.^{6),7)}

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

여기서, $H_{1/3}$: 해양파의 1/3 유의 파고

T_0 : 평균파 주기

ω : 파의 주파수

위 식은 장파정 해양파 스펙트럼이며, 방향성을 고려한 단파정 해양파 스펙트럼은 다음과 같이 표현되는 식을 이용한다.

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

$$= 0 : |\theta| > \frac{\pi}{2}$$

..... (2)

여기서, $\theta = \alpha - \alpha_v$

α = 성분파의 진행방향

α_v = 목시관측에 의한 파의 평균진행방향

선박이 단파정 불규칙파에 대하여 일정의 침로 (χ)와 속도로 항해하고 있는 경우, 임의의 내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{X_i}(\omega, \chi - \theta)$ 라고 하면, 확률과정 $X_i(t)$ 의 스펙트럼 $S_{X_i}(\omega, \chi)$ 는

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

..... (3)

이고, 그 분산치 $\sigma_i^2(\chi)$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_i^2(\chi) = \int_0^{\infty} S_{X_i}(\omega, \chi) d\omega$$

..... (4)

스펙트럼이 (3)식과 같이 표현될 경우 각 내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$X_i(t) = \int_0^{\infty} \sqrt{2S_{X_i}(\omega, \chi)} d\omega \cos(\omega t + \phi_i) \dots\dots (5)$$

단, $\phi_i = \epsilon_i(\omega) + \phi_0$

(ϕ_0 는 $0 \sim 2\pi$ 에서 Random하게 일양분포하는 위상각)

2.2 평가치와 위험도

임의의 내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 의 시간적 진폭치 변동은 정상 Gauss과정이며, 그 수학적 평균치는 0인 것으로 알려져 있다. 이 정상 Gauss과정인 임의의 내항성능 평가요소 X_i 의 극치 분포는 Rayleigh 분포로 표현되고⁸⁾, 그 발생확률을 $Q(\bar{X}_i)$ 라고 하면 표준편차로써 무차원화한 한계치의 역수를 i 요소의 평가치 E_i 라고 정의하고, 다음과 같이 표현한다.

Table 1. Factors presently adopted for evaluating seakeeping performance and their critical values

내항성능 평가요소	한 계 치 (\bar{X}_i)	한계발생확률
Deckwetness(X_1)	정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 F.P.의 유효 건현	2×10^{-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 홀수면에서 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^{-1}
선체중앙부의 종굽힘 Moment (X_6)	한국선급협회(KR)에서 규정한 정수중 종굽힘 Moment의 허용한계치	10^{-5}
Slamming (X_7)	S.S. 8 1/2에서 선저노출과 동시에 파에 들입할때의 선저의 파면에 대한 상대 속도가 Threshold Velocity를 초과하는 것. 단, threshold velocity=0.09	2×10^{-2}

단, $X_i(i=1, 2, \dots, 7)$ 는 후술할 설명의 편의상 표기한 것임.

$$E_i = \frac{1}{\sqrt{-2\ln\{Q(\bar{X}_i)\}}} = \left[\frac{\sigma_i}{\bar{X}_i} \right] \dots\dots\dots (6)$$

평가치 E_i 가 0가 되면 내항성능에 대한 i 요소의 신뢰도는 1이 되고, E_i 가 무한대가 되면 i 요소의 신뢰도는 0으로 된다.

임의 i 요소의 주어진 한계발생확률에 관한 평가치를 한계평가치 E_{ic} 로 표시하고, 한계평가치 E_{ic} 에 평가치 E_i 의 비를 i 요소의 위험도 μ_i 라고 정의하면

$$\mu_i = \frac{E_j}{E_{ic}} = \frac{\left[\frac{\bar{X}_i}{\sigma_{ic}} \right]}{\left[\frac{\bar{X}_i}{\sigma_{ic}} \right]} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}} \dots\dots\dots (7)$$

와 같이 표현할 수 있다.

여기서, σ_{ic} 는 요소 X_i 가 위험하게 되는 경계의 표준편차이고, 위험도 μ_i 는 파와의 만남각(χ), 선속(V) 및 해상(S)에 따라서 변화한다. 그리고 $\mu_i > 1$ 인 경우에 i 요소는 위험하게 되고, $\mu_i < 1$ 인 경우에는 안전함을 표시하는 것이기도 하다.

또한, 내항성능 평가요소의 위험도 μ_i 중에서 최대치를 최대위험도 μ_m 이라 정의하면⁹⁾,

$$\mu_m = \text{Maximum}[\mu_i] \dots\dots\dots (8)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 이것은 각 요소에 대한 상대치로 비교되는 값이다.

임의 i, j 요소의 위험도가 μ_i, μ_j 인 경우, i 요소를 기준으로 하여 표현한 위험도의 비를 i 요소에 대한 j 요소의 상대위험도 μ_{ij} 라고 정의하면,

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_j}{\mu_i} = \frac{\left[\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right]}{A_{ij} \cdot \left[\frac{\bar{X}_i}{\sigma_j} \right]} = \frac{\sigma_{ic}}{\sigma_{jc}} \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_i} \dots\dots\dots (9)$$

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

와 같이 표현되고, 이 상대위험도도 파와의 만남

각, 선속, 해상에 따라서 변화한다. 또한, $\mu_i > 1$ 의 경우에는 i 요소에 비해 j 요소가 위험하게 되기 쉽고, $\mu_i < 1$ 의 경우는 그 반대의 의미를 가진다.

이와 같이 상대위험도를 정의하면 내항성능을 평가함에 기준으로 하는 i 요소와 임의의 j 요소는 상대적으로 동등하게 성능을 평가할 수 있게 된다. 그것은 j 요소의 한계치를 $A_{ij} \cdot \mu_i$ 배 한 값이 j 요소의 겉보기한계치 ($\frac{\bar{X}_j}{\sigma_{jc}}$)로 되기 때문이다.

3. 선종별 내항성능의 비교

3.1 평가치에 의한 비교

내항성능 평가요소의 극치가 각각의 한계치를 초과하지 않아서 내항성능을 잃지않을 확률을 선박의 내항성 신뢰도로 정의한다. 이것은 선박과 파와의 만남각, 속도 및 해상에 따라 변화하기 때문에 $P(\chi, V, S)$ 로 표기한다. 앞장에서 정의한 바와 같이 임의 i, j, k 요소의 상관계수가 $\rho_{ij}, \rho_{jk}, \rho_{ki}$ 이고, 계측성 등을 고려하여 하나의 기준요소를 가지고 각 요소의 상관관계를 이용하여 선박 전체의 내항성능을 파악하기 위하여 i 요소를 기준요소로 하였을 때의 j, k 요소의 상대위험도를 μ_{ij}, μ_{ik} 라고 하고, 각 요소의 상대위험도를 고려하여 한개의 기준요소를 사용한 1-3차원 요소의 동시발생확률을 구하기 위하여 다차원 Rayleigh 분포함수의 근사식¹⁰⁾을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 우선, (9)식의 $A_{ij} \cdot \mu_i$ 를 식의 간이화를 위해 하나의 식을 사용하여 다음과 같이 표기한다.

$$\beta_j = A_{ij} \cdot \mu_i \dots\dots\dots (10)$$

(1) 1차원 요소의 발생확률

$$\begin{aligned} Q(\bar{X}_i) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ Q(\bar{X}_j) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{X}_j}{\beta_j \sigma_j}\right)^2\right\} = Q(\bar{X}_i)^{\beta_j^{-2}} \\ Q(\bar{X}_k) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{X}_k}{\beta_k \sigma_k}\right)^2\right\} = Q(\bar{X}_i)^{\beta_k^{-2}} \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

(2) 2차원 요소의 동시발생확률

$$\begin{aligned}
 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j) &= Q(\bar{X}_i)Q(\bar{X}_j) \left\{ 1 + \frac{\rho_{ij}^2}{4} \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \left(\frac{\bar{X}_j}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_i)^{1+\beta_j^{-2}} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^4 \left(\frac{\rho_{ij}}{\beta_j} \right)^2 \right\} \\
 Q(\bar{X}_j, \bar{X}_k) &= Q(\bar{X}_j)Q(\bar{X}_k) \left\{ 1 + \frac{\rho_{jk}^2}{4} \left(\frac{\bar{X}_j}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \left(\frac{\bar{X}_k}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_j)^{\beta_j^{-2} + \beta_k^{-2}} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{X}_j}{\sigma_j} \right)^2 \left(\frac{\rho_{jk}}{\beta_k} \right)^2 \right\} \\
 Q(\bar{X}_k, \bar{X}_i) &= Q(\bar{X}_k)Q(\bar{X}_i) \left\{ 1 + \frac{\rho_{ki}^2}{4} \left(\frac{\bar{X}_k}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_i)^{1+\beta_k^{-2}} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^4 \left(\frac{\rho_{ki}}{\beta_k} \right)^2 \right\} \\
 \dots\dots\dots & \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

(3) 3차원 요소의 동시발생확률

$$\begin{aligned}
 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j, \bar{X}_k) &= Q(\bar{X}_i)Q(\bar{X}_j)Q(\bar{X}_k) \\
 &\times \left\{ 1 + \frac{\rho_{ij}^2}{4} \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \left(\frac{\bar{X}_j}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \right. \\
 &+ \left\{ 1 + \frac{\rho_{jk}^2}{4} \left(\frac{\bar{X}_j}{\beta_j \sigma_j} \right)^2 \left(\frac{\bar{X}_k}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \right. \\
 &\left. \left. + \left\{ 1 + \frac{\rho_{ki}^2}{4} \left(\frac{\bar{X}_k}{\beta_k \sigma_k} \right)^2 \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\} \right\} \right\} \\
 &= Q(\bar{X}_i)^{\beta_j^{-2} + \beta_k^{-2}} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{X}_i}{\sigma_i} \right)^4 \left\{ \left(\frac{\rho_{ij}}{\beta_j} \right)^2 \right. \right. \\
 &\left. \left. + \left(\frac{\rho_{ki}}{\sigma_k} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{jk}}{\beta_k} \right)^2 \right\} \right] \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

위와 같이 기준한 i 요소의 발생확률만 알면 그 이외의 하나 또는 두 세개의 각각 또는 동시발생 확률을 계산할 수 있게 된다.

내항성능 평가요소가 그 요소의 한계치를 초과할 확률, 즉 내항성능 시스템이 기능을 잃게되는 확률 $Q(x, V, S)$ 는 (11), (12), (13)식의 표현을 이

용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 Q(x, V, S) &= \left[\sum_{i=1}^7 Q(\bar{X}_i) - \sum_{\substack{ij=1 \\ i < j}}^7 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j) \right] \dots\dots\dots (14) \\
 &+ \sum_{\substack{ijk=1 \\ i < j < k}}^7 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j, \bar{X}_k) - \sum_{\substack{ijkl=1 \\ i < j < k < l}}^7 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j, \bar{X}_k, \bar{X}_l) \\
 &+ \sum_{\substack{ijklm=1 \\ i < j < k < l < m}}^7 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j, \bar{X}_k, \bar{X}_l, \bar{X}_m) \\
 &- \sum_{\substack{ijklmn=1 \\ i < j < k < l < m < n}}^7 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j, \bar{X}_k, \bar{X}_l, \bar{X}_m, \bar{X}_n) \\
 &+ Q(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \bar{X}_4, \bar{X}_5, \bar{X}_6, \bar{X}_7)
 \end{aligned}$$

(14)식은 7차원의 결합밀도함수에 해당되는 것 이나 3차원 이상의 요소가 동시에 발생하는 3차원 이상의 항은 0에 가깝다고 생각되어 우변의 첫째, 둘째항까지의([]부분) 2차원 요소의 항까지 취하여 근사시킨다. 만약, 갑판침수(X_i)를 기준으로 할 경우 $Q(x, V, S)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q(x, V, S) &= \sum_{i=1}^7 Q(\bar{X}_i) - \sum_{\substack{ij=1 \\ i < j}}^7 Q(\bar{X}_i, \bar{X}_j) \dots\dots\dots (15) \\
 &= \sum_{i=1}^7 Q(\bar{X}_i)^{\beta_i^{-2}} \left\{ 1 - \sum_{j=i+1}^7 Q(\bar{X}_i)^{\beta_j^{-2}} \right\} \\
 &- \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{X}_1}{\sigma_1} \right)^4 \sum_{k=1}^6 Q(\bar{X}_1)^{\beta_k^{-2}} \left[\sum_{j=k+1}^6 Q(\bar{X}_1) \left(\frac{\rho_{1j}}{\beta_k \beta_j} \right)^2 \right. \\
 &\left. + Q(\bar{X}_1)^{\beta_7^{-2}} \left\{ \left(\frac{\rho_{17}}{\beta_k \beta_7} \right)^2 + \left(\frac{\rho_{72}}{\beta_k \beta_7} \right)^2 \right\} \right] \\
 \text{단, } & \beta_1 = 1 \\
 & \beta_i^{-2} = \beta_{i1}^{-2} + \beta_{i2}^{-2}
 \end{aligned}$$

이것은 기존의 각 내항성능 평가요소 사이의 상관관계를 밝혀 한 기준요소에 대한 요소의 상대위험도를 계산할 수 있으면, 기준요소만 계속하므로써 (15)식으로 부터 선박의 내항성 신뢰도를 구할 수 있다. 따라서 정의한 내항성 신뢰도 $P(x, V, S)$ 는 다음과 같이 된다.

$$P(x, V, S) = 1 - Q(x, V, S) \dots\dots\dots (16)$$

또한, 내항성 신뢰도는 다차원 Rayleigh분포로부터 구해진 확률이지만 선박 내항성의 안전여부를 판단하는 데 있어서, 이 내항성 신뢰도 함수를

지표로 할 경우에 내항성능이 안전할수록 내항성 신뢰도가 1로 되고, 내항성능이 위험할수록 내항성 신뢰도는 0으로 되므로 좌표의 원점을 0로 하는 공간에 표현되는 내항성능 평가도로서 시스템을 구성하여 실용화할 경우, 선박 운항자가 정량적으로 식별하는데 어려움이 있다. 따라서 내항성 신뢰도의 크기가 작아져 선박이 내항성능 면에서 위험해지면 그 값이 안전공간을 벗어나는 것으로 운항자가 정량적으로 모니터 화면 등을 통하여 쉽게 판단할 수 있도록 하는 평가도를 작성하기 위하여 신뢰성공학 등에서 적용하는 내용을 응용해 내항성 신뢰도를 평가치 E_T 라 정의했다.

$$E_T = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln [1 - P\{x, V, S\}]}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{-2 \ln [Q\{x, V, S\}]}} \dots\dots\dots (17)$$

발생확률 Q 를 1개의 고장이 발생하는 확률로 할 때 신뢰공학에서는 통상, 신뢰성 지표¹¹⁾

$$\gamma = \log_{10} \frac{1}{Q} = -\log_{10}(1 - P) \dots\dots\dots (18)$$

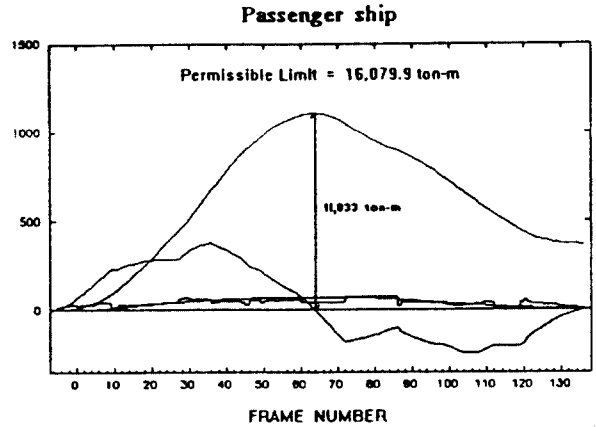
로 표현해 신뢰도의 지표로 하고 있는데 이 γ 과 (17)식의 E_T 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E_T = \sqrt{\frac{\log_{10} e}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma}} = 0.466 \gamma^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (19)$$

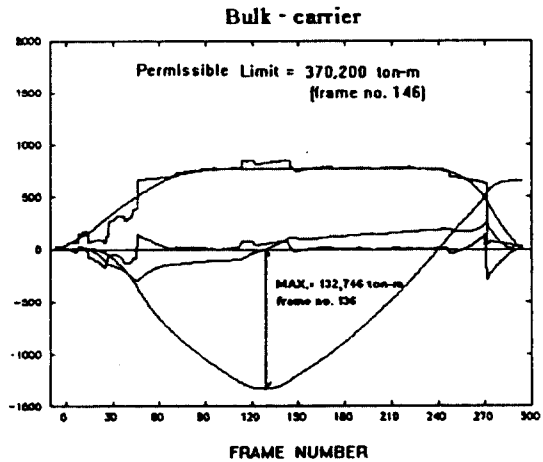
상기와 같이 정의하여 표현한 내항성능 평가치 E_T 는 내항성 신뢰도가 0일 때 $E_T \rightarrow \infty$ 이고 내항성 신뢰도가 1일 때 $E_T \rightarrow 0$ 로 되는 값으로, 이것을 이용해 선박과 파와의 만남각, 속도 및 해상과 E_T 의 관계를 나타내는 평가도를 작성하여 내항성능을 종합적으로 평가한다.

단, 기존 내항성능 평가요소 중에서 선체 중앙부의 종굽힘모멘트에 대해서는 선급 협회에서 규정한 정수종의 허용한계치를 초과하지 않는 것으로 하고, 계산결과는 Fig. 1과 같다.¹²⁾

한편, 실제 선박의 운항상황에서 내항성능을 평가하기 위하여서는 내항성능 평가치가 일정한 값



(a)



(b)

Fig. 1. Calculation of actual vertical bending moment in still water

이상의 상태에 도달할 때 위험하다는 판단을 내릴 수 있어야 하고, 이를 기준으로 위험회피를 위한 변침이나 감속 등의 조치를 내려야 한다. 따라서 앞에서 정의한 내항성능 평가치 E_T 에 한계치를 정할 필요가 있고, 이것을 한계평가치 E_{TC} 라고 정의한다.

즉, 내항성능의 한계발생확률을 $Q_c(t)$ 라고 하면 E_{TC} 는 다음과 같다.

$$E_{TC} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln [1 - Qc(t)]}} \dots\dots\dots (20)$$

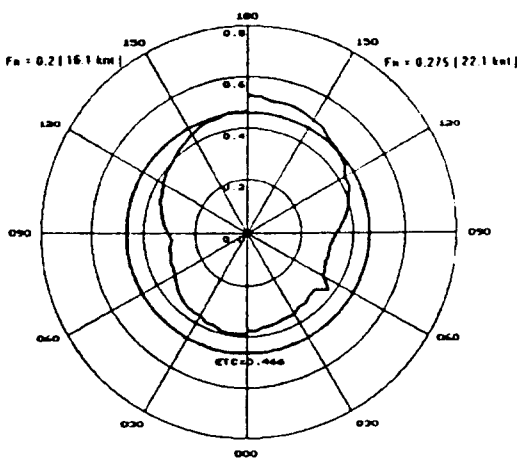
여기서, (14)식에서 기존 내항성능 평가요소들의 한계발생확률을 이용하여 2차원 요소의 항까지 취해 근사시킨 확률이 프로펠러 공전의 한계발생 확률에 근사하므로 이것을 내항성능의 한계발생 확률로 하여 내항성능 한계평가치 E_{TC} 를 정하였다. 그러므로, 내항성능 평가치 E_T 가 한계평가치 E_{TC} 를 초과하는 것은 프로펠러 공전의 한계발생확률 10^{-1} 으로부터 내항성능 면에서 선박이 안전하게 될 확률이 0.9이하로 되는 것을 나타낸다. 이와 같은 평가치에 의한 평가는 기존 내항성능 평가요소의 한계치 및 한계발생확률을 이용하여 모든 요소가 내항성능에 미치는 영향을 종합하므로써, 파와의 만남각에 따라 내항성능의 종합적인 경향을 정량적으로 파악할 수 있다.

이하의 내항성능 평가에 있어, 대상선의 선종별 선형특성과 주요치수가 Table 2에 표시한 것과 같은 콘테이너선형, 여객선형, PCC선형 및 벌크선형을 적용하여 선속에 대해 각 단계별로 구분하여 계산을 행하였으며, 본 논문에서는 대표적으로 $F_n = 0.2, 0.275$ 와 $F_n = 0.1, 0.15$ 상태의 계산 결과를 표시하였다. 또한 내항성능은 선박과 파와의 만남

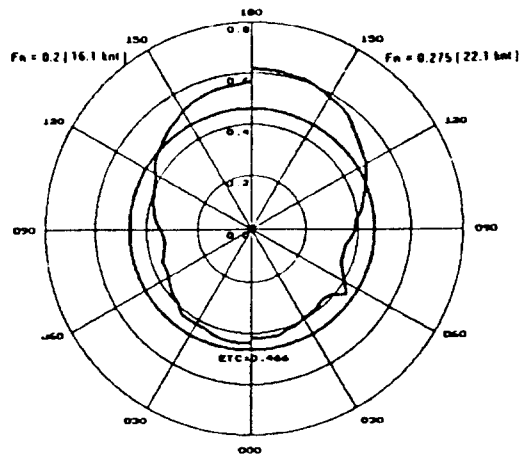
각에 대해 좌우대칭의 현상을 가짐으로 하나의 평가도 상에 두 속도별 계산결과를 나타내었다.

Fig. 2 (a)~(b)는 항행속력이 $F_n=0.2$ (16.1 Knt)와 $F_n=0.275$ (22.14Knt)의 경우, 콘테이너선형의 내항성 신뢰도가 파와의 만남각 및 Table 3에 나타낸 것 같이 Beaufort 등급 8, 9에 해당하는 해상상태에 따라서 변화하는 모양을 평가도상에 표현하여 선박의 안전한제공간을 평가치가 벗어나는 것을 판단함으로써 선박운항자가 시각적으로 쉽게 위험판정을 할 수 있게 했다.

해상상태 Beaufort 등급 8에서는 선속이 $F_n=0.2$ 인 경우에 선수파($\chi=180^\circ$) 부근에서 E_{TC} 를 초과하려 하고 있고, 선속이 $F_n=0.275$ 인 경우는 $\chi=180^\circ \sim 135^\circ$ 부근에서 평가치 E_T 가 한계평가치 E_{TC} 를 초과하여 위험한 상태인 것으로 평가된다. 해상상태 Beaufort 등급 9에서는 선속이 $F_n=0.2$ 인 경우에도 $\chi=180^\circ \sim 130^\circ$ 에서 E_T 가 E_{TC} 를 초과하고, 선속이 $F_n=0.275$ 에서는 위험범위가 보다 커져 $\chi=180^\circ \sim 100^\circ$ 부근까지 위험한 것으로 평가된다. 따라서 같은 해상상태인 경우라도 선속이 빠른 쪽이 위험에 도달하기 쉬운 경향을 보이므로, 선수 쪽에서 파를 받고 진행할 때에는 속도를 감소시키는 것이 보다 안전함을 알 수 있다.



(a) SEA STATE 8

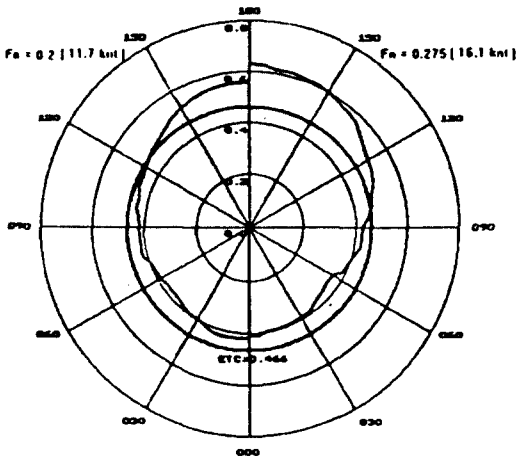


(b) SEA STATE 9

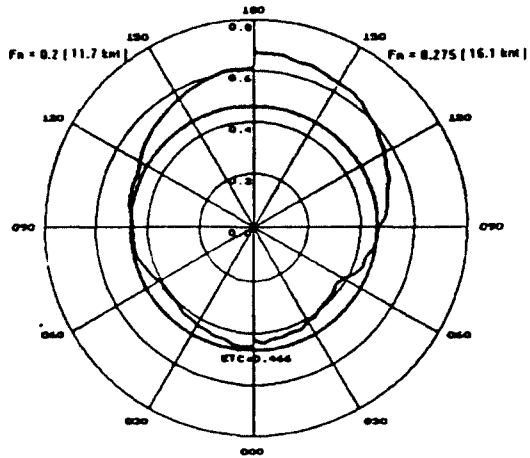
Fig. 2. Evaluation diagram of the seakeeping performance of container ship

Fig. 3 (a)~(b)는 항행속력이 $F_n=0.2$ (11.7 Knt)와 $F_n=0.275$ (16.1Knt)인 여객선형의 평가도이다. 해상 상태 Beaufort 등급 8부터 위험범위가

나타나는데 해상상태가 거칠게 됨에 따라 그 범위가 커져 해상상태 Beaufort 등급 9에서는 횡파에서 선수과까지 위협하게 나타나고 있다.



(a) SEA STATE 8

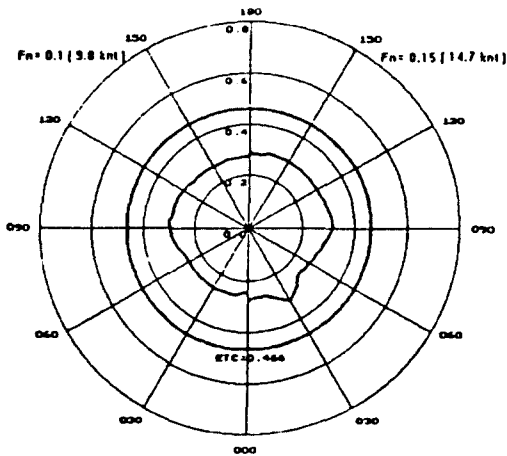


(b) SEA STATE 9

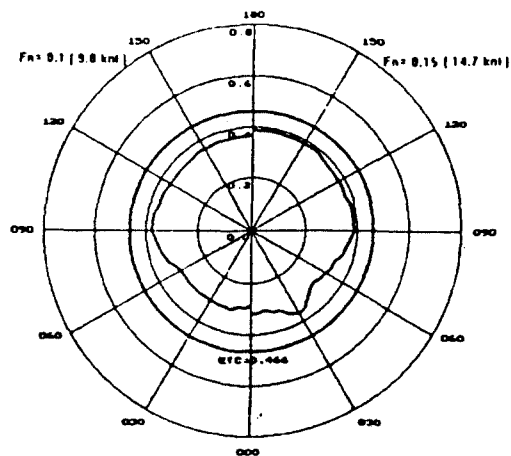
Fig. 3. Evaluation diagram of the seakeeping performance of passenger ship

Fig. 4 (a)~(b)는 벌크선형의 항행속력이 $F_n=0.1$ (9.8Knt)와 $F_n=0.15$ (14.7Knt)의 경우이다. 평가도에서 알 수 있듯이 해상상태 Beaufort 등급 9까지 파와의 모든 만남각에 있어서 E_T 가 E_{TC} 를 초과하지 않고, 다만 타 선박에 비해 횡파 부근의

횡방향과 $\chi=30^\circ$ 부근의 선미사파에서 다소 높게 나타나고 있다. 이것은 각 요소의 위험도를 참조하면 흘수가 깊어 한계발생확률이 큰 프로펠러 공전이 거의 일어나지 않는 반면, 횡운동인 횡동요의 영향이 큰 것으로 분석된다.



(a) SEA STATE 8



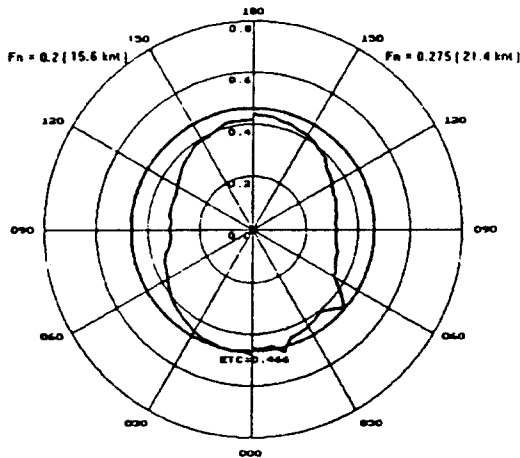
(b) SEA STATE 9

Fig. 4. Evaluation diagram of the seakeeping performance of bulk-carrier

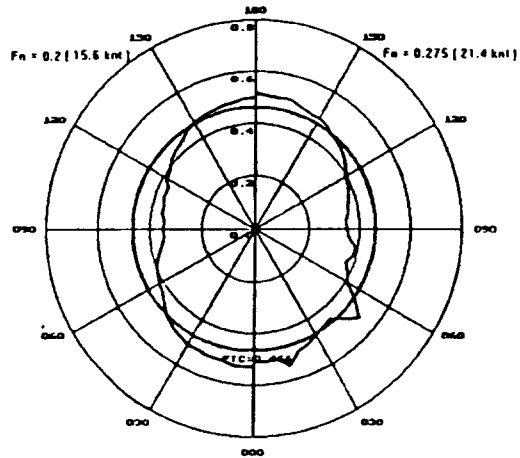
Fig. 5 (a)~(b)는 PCC선형의 항행속력이 $F_n = 0.2$ (15.6Knt)와 $F_n = 0.275$ (21.4Knt)의 경우이다. 해상상태 Beaufort 등급 8에서는 타선박이 선수와 부근에서 위험범위가 나타나는데 비해 이 선형은 안전범위에 있고, 추파와 $\chi = 50^\circ$ 와 15° 부근인 선미사파 상태에서 한계공간을 초과하여 위험해지는 것으로 나타나고 있다. 이런 현상은 각 요소의 위험도로써 분석해 볼 때 타 선박은 선수와 부근에서 프로펠러 공전이 일어나고 있는데 비해 PCC선형은 선미파 상태에서 프로펠러 공전이 일어나는 것을 알 수 있었다. 해상상태 Beaufort 등급 9에서는

Beaufort 등급 8과 마찬가지로 선미파와 선미사파 상태에서 위험하고 또 슬래밍이 크게 작용하므로 해서 선수와 부근 ($\chi = 180^\circ \sim 140^\circ$)에서 E_T 가 E_{TC} 를 초과하고 있다.

일반적으로, 선속이 빠른 편이 선수와 부근에서 내항성 신뢰도가 낮고 선미와 부근에서 조금 높게 평가되는데, 벌크선은 파와의 모든 만남각에 걸쳐 선속이 낮은 편이 내항성능이 다소 좋게 평가된다. 따라서 내항성능 면에서 위험을 회피하려면 감속과 평가도상에서 안전하다고 판단되는 방향으로 변침을 병행하여 항행하는 것이 바람직함을 알 수 있다.



(a) SEA STATE 8



(b) SEA STATE 9

Fig. 5. Evaluation diagram of the seakeeping performance of pure car-carrier

3.2 최대 위험도에 의한 비교·평가

내항성능 평가요소의 시스템적 결합은 직렬결합으로써 어느 한 요소만 위험하게 되어도 선박은 내항성능 면에서 위험하게 되므로 각 요소의 한계치와 한계발생확률이 달라도 개개의 위험도를 비교하여 적용하면 내항성능 평가에 미치는 각 요소의 영향을 대등하게 평가할 수 있다. 따라서 내항성능 평가요소의 위험도 μ_i 중에서 최대위험도 μ_m 을 구하여 적용하는 평가방법을 도입하여 각종 선박

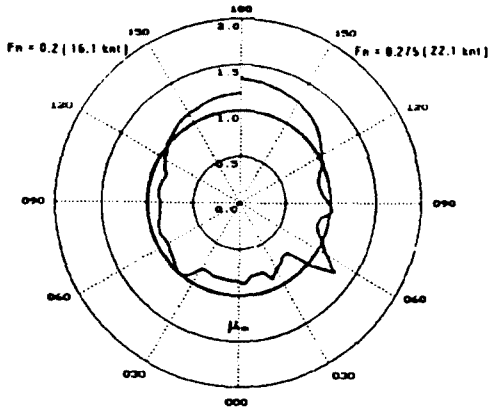
에 대해 전술한 평가치에 의한 평가에서와 같은 조건하에서 위험도로서 각 내항성능 평가요소를 같은 비중을 두고 평가한다.

Fig. 6 (a)~(b)는 컨테이너선형의 위험도에 의한 평가도이다. 해상상태가 거칠게 됨에 따라 위험범위가 커져 해상상태 Beaufort 등급 9에서는 선미파 부근에서 다소 안전할 뿐 파와의 모든 만남각에서 μ 가 1을 초과한다. 이러한 현상은 중운동인 F.P.의 상하가속도와 횡운동인 횡동요가 대

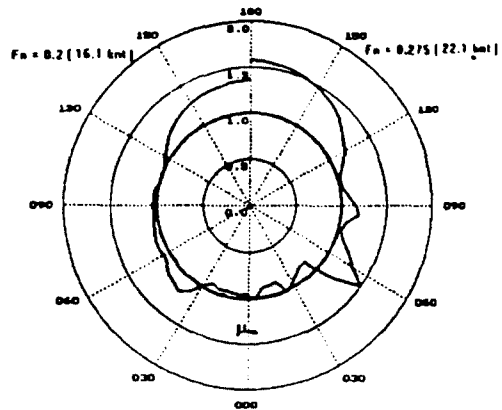
표적으로 크게 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7 (a)~(b)는 여객선형의 경우로 해상상태 Beaufort 등급 8에서부터 선수파 부근에서 μ 가 1을 초과하고 있고, 해상상태가 높아 감에 따라 $\chi =$

$50^\circ \sim 0^\circ$ 부근을 제외하고는 파와의 모든 만남각에서 μ 가 1일 훨씬 넘어 위험한 상태임을 나타내고 있다. 이러한 현상의 대표적인 원인은 종운동인 F.P.의 상하가속도와 횡운동인 좌우가속도의 영향으로 판단된다.

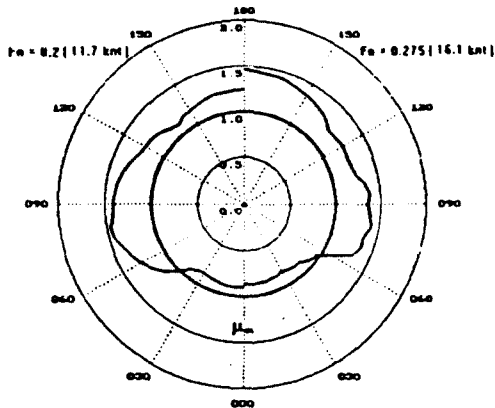


(a) SEA STATE 8

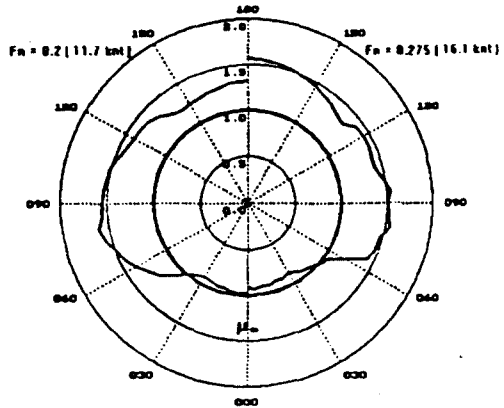


(b) SEA STATE 9

Fig. 6. The maximum dangerousness diagram for evaluating seakeeping performance of container ship



(a) SEA STATE 8



(b) SEA STATE 9

Fig. 7. The maximum dangerousness diagram for evaluating seakeeping performance of passenger ship

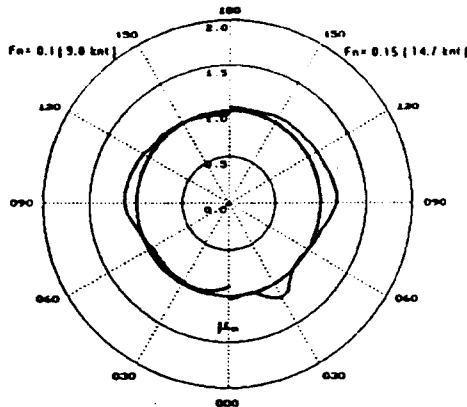
Fig. 8 (a)~(b)는 벌크선형의 경우로 해상상태 Beaufort 등급 8, 9에서는 모든 만남각에 걸쳐 $\mu > 1$ 인 상태로 위험함을 나타낸다. 이것은 타 요소에 의한 영향은 거의 없고 단지 횡동요가 선수파를 포함한 파와의 모든 만남각에서 크게 나타나기 때문인데, 아래 횡동요의 선체 중앙부에서 현측 상대

수위 변위를 나타낸 (21)식에서 알 수 있듯이 선체 중앙부의 Bulwark top이 물에 잠기는 변위 $L(t)$ 는 상하요와 종동요의 작용도 있기 때문이다.

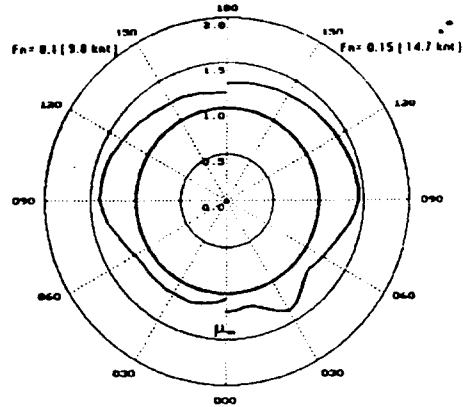
$$L(t) = \zeta w(t) - Z(t) - l_c \cdot \theta(t) + b \cdot \varphi(t) \dots\dots (21)$$

단, $l_c = LCG$

$$b = \frac{B}{2}$$



(a) SEA STATE 8

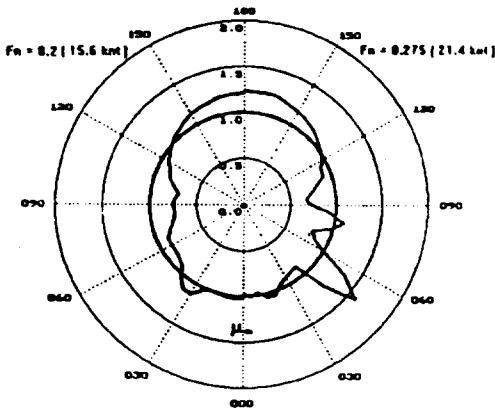


(b) SEA STATE 9

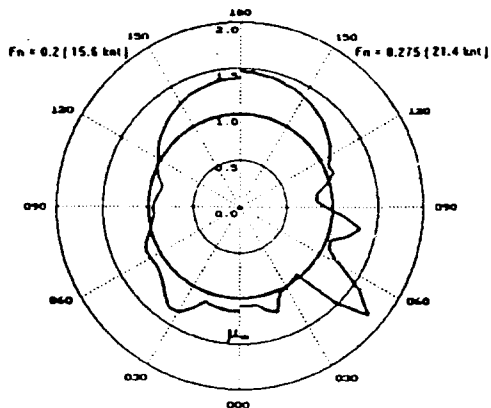
Fig. 8. The maximum dangerousness diagram for evaluating seakeeping performance of bulk-carrier

Fig. 9 (a)~(d)는 PCC선형의 평가도로 해상상태 Beaufort 등급 8, 9에서는 횡파 부근을 제외하고는 파와의 모든 만남각에서 μ 가 1을 초과하고,

선속이 빠른 경우에는 $\chi = 50^\circ$ 부근이 특히 크게 평가되고 있다. 이것은 종운동의 F.P.의 상가속도와 횡운동인 좌우가속도의 영향인 것으로 판단된다.



(a) SEA STATE 8



(b) SEA STATE 9

Fig. 9. The maximum dangerousness diagram for evaluating seakeeping performance of carcarrier

전반적으로는 전술한 바와 같은 평가치에 의한 평가도에서와 마찬가지로 선속이 낮은 쪽이 좀 더 안전한 것으로 평가되고 있고, 선체의 정황을 기준으로 선수쪽 파와의 만남각은 중운동의 영향이 강하고 선미쪽 파와의 만남각에서는 횡운동의 영향이 큰 것으로 나타나고 있다. 단, 프로펠러 공전은 PCC선형을 제외한 선박에서는 선수와 부근에서 일어나고, PCC선형은 선미와 부근에서 크게 일어나고 있음을 알 수 있다.

3.3 평가방법의 개선방안

3.3.1 평가방법의 검토

지금까지 내항성능을 평가하는 방법으로서 평가치에 의한 방법과 최대위험도에 의한 방법을 보였고, 그 각각에 대해 선종별로 비교·평가를 행하였다.

전자에 의한 평가에서는 내항성 신뢰도를 정의하고, 신뢰성공학에서 적용하는 내용을 응용해 평가치를 정의했다. 그리고 내항성신뢰도 0.9에 상당하는 영역을 한계평가치로 두고 평가를 행하였다. 이 한계평가치는 10척의 선박 중 1척이 위험하게 되는 의미를 가지는 평가이므로, 선박운항자의 관점에서 그 신뢰도를 더 크게 할 수도 있고, 작게도 할 수 있다. 그러나, 선박운항자의 주관적인 관점에 앞서 객관적인 근거가 필요하다.

예를들어 벌크선형의 경우 해상상태 Beaufort 등급 9까지 파와의 모든 만남각에 대해 안전하게 평가되는데, 각 요소의 위험도로 보면 횡동요는 해상상태 Beaufort 등급 8에서부터 파와의 모든 만남각에서 위험하게 되고 있다. 이것은 기존 내항성능 평가요소의 한계발생확률이 달리 제안되어 있어, 한계발생확률이 작은 횡동요가 위험하게 나타나도 전체적인 평가치에는 그 영향을 그다지 미치지 못하기 때문이다. 그러나, 내항성능 평가요소 중 한 요소만이 위험하게 되어도 선박이 위험하게 되므로 이러한 요인을 반영하기 위해서는 신뢰도를 더 크게 즉, 평가치를 작게해야 하고, 이 경우에는 횡동요의 한계 발생확률에 맞춰 내항성 신뢰도 0.999에 상당하는 영역을 한계평가치로 두고 평가를 행해야 한다.

한편, 컨테이너선형의 경우에서도 Fig. 2(b)와 Fig. 6(b)에서와 같이 횡동요와 좌우가속도가 위험하게 되어도 그 영향의 반응이 미흡한 것으로 됨을 알 수 있고, 벌크선형의 경우에도 재화상태가 달라져 출수가 변하면 Fig. 10에서와 같이 한계발생확률이 큰 프로펠러 공전과 같은 요소의 영향이 커지게 되고, 그로 인해 한계평가치를 다시 정해 주어야 하는 번거로움이 있다. 그러므로, 한계평가치를 정하는 것은 선박의 특성과 재화상태 등에 따라서 행해야 하므로 여러 경우에 대해 사전에 계산된 많은 양의 데이터 베이스의 구축이 필요해져 실용상 어려움이 예상된다.

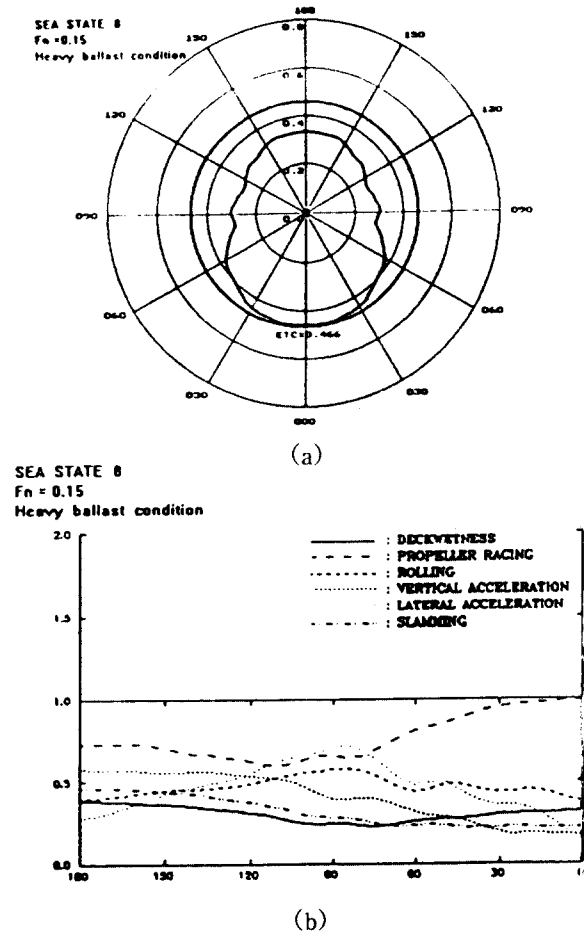


Fig. 10. Evaluation diagram of the seakeeping performance of bulk-carrier

후자의 평가방법에 따르면 한계발생확률이 각 요소에 따라 다르게 제안되어 있어도 개개의 위험도를 이용하므로 내항성능 평가에 미치는 각 요소의 영향에 대해 대등하게 평가할 수 있고, 어느 한 요소가 위험하게 되어도 최대위험도가 1을 초과하여 선박 운항자가 평가도 상에서 쉽게 판별할 수 있다. 그러나, 이 방법 또한 모든 내항성능 평가요소를 계측해야 하는데 그 요소의 특성상 계측이 힘든 것도 있고 모든 요소에 대해 센서를 설치하여 평가하는 것은 경제적인 면에서도 많은 비용을 요한다.

이상을 고려할 때 평가치에 의한 방법은 위험도, 상대위험도, 상관계수 등을 이용하여 내항성능을 시스템적으로 규명하여 한 기준요소로 선박 전체에 대해 평가하도록 한 것은 긍정적으로 그 유용성이 있고, 그 방법에서 적용된 상관관계와 위험도를 좀더 면밀히 분석함으로써 내항성능에 큰 영향을 미치는 중·횡운동의 대표적 현상인 내항성능 평가요소의 최대위험도를 계산하여 평가하는 방법을 제시함으로써 보다 용이함을 기할 수 있다.

3.3.2 대표적인 중·횡운동의 채택

기존의 평가치에 의한 내항성능 평가방법 중에 선박 운항자의 감각적인 면에서 정량화된 평가기준으로 쉽게 채택할 수 있는 중·횡운동의 대표요소로 횡동요와 종동요를 채택한 방법이 있다.¹³⁾ 그러나, 횡동요와 종동요의 한계치를 각으로 정할 경우 기존에 연구된 한계치를 기준으로 볼 때 파와의 만남각, 속도 및 해상에 따라 달리 적용해야 하는 어려운 문제가 있으므로, 여기서는 새로운 중·횡운동의 대표요소를 제시하고자 한다.

최대위험도에 의한 평가에서 선체의 정횡을 기준으로 선수쪽 파와의 만남각은 종운동의 영향이 강하고, 선미쪽 파와의 만남각에서는 횡운동의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

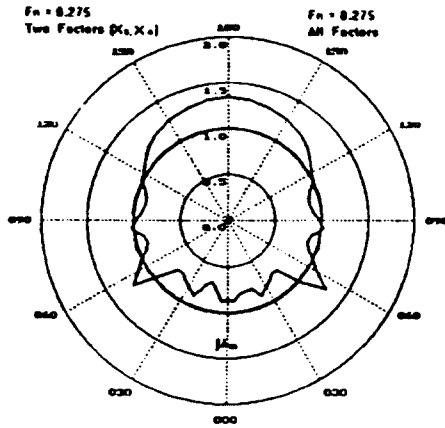
그리고, 위험도 μ 의 값이 1보다 크면 그 크기에 관계없이 위험하게 되므로, 내항성능 평가요소의 위험도 중에서 위험하게 되는 파와의 만남각 즉, 위험 범위가 넓은 대표적인 중·횡운동 각 한 요소를 택하여 평가하므로써, 기존 내항성능 평가요소를 대표할 수 있을 것이다.

Fig. 11 (a)~(b)는 항행속력 $F_n=0.275$ 인 경우 콘테이너선형에서 종운동으로 F.P.의 상하가속도와 횡운동으로 횡동요를 택한 위험도와 기존의 평가요소 모두에 대한 최대 위험도를 비교한 평가도이다. 모든 해상상태와 파와의 모든 만남각에 있어 위험도의 크기가 조금 다를 뿐 거의 일치하고 있음이 판단된다. Fig. 11 (c)~(d)는 항행속력 $F_n=0.15$ 의 벌크선형의 경우로 콘테이너선형과 같게 비교한 평가도이다. 벌크선형은 횡동요만이 크게 작용하므로 좌우대칭을 나타내고 있다.

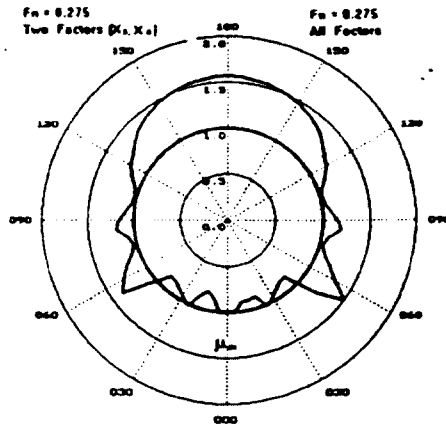
Fig. 12 (a)~(b)는 항행속력 $F_n=0.275$ 의 PCC 선형에서 종운동으로 F.P.의 상하가속도와 횡운동으로 좌우가속도를 택한 경우를 비교한 평가도이다. 여기서도 모든 해상상태 및 선미파 부근을 제외한 파와의 모든 만남각에 있어 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12 (c)~(d)는 항행속력 $F_n=0.275$ 의 여객선형의 경우로 PCC선형과 같게 비교한 평가도이다. 선미파 상태에서 조금 작게 평가될 뿐 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

실제 선박 운항자의 관점에서 PCC선형과 여객선형을 그 선형 특성 및 선박의 임무로 볼 때 PCC선형은 자동차의 Lashing이, 여객선형은 여객들의 안락한 승선감이 주가 되므로 이러한 것들은 선체 운동에서 좌우가속도와 깊은 관계가 있고, 따라서 내항성능 평가요소로 좌우가속도를 취하는 것은 타당성을 가진다 하겠다. 또한 벌크선형과 콘테이너선형은 해수가 Bulkwark top을 넘어 들어와 화물이나 선체 구조물에 손상을 주고, 이러한 요인은 횡동요와 관계하고 있어 내항성능 평가요소로 취할 수 있는 타당성이 있다.

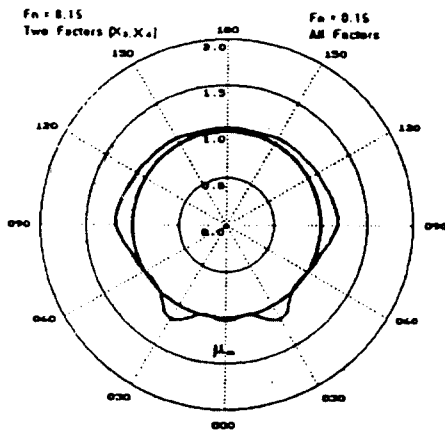
따라서, 선박의 내항성능 평가요소 중 위험하게 되는 파와의 만남각이 넓은 중·횡운동 각 한 요소를 택하여 평가하여도 기존 내항성능 평가요소를 대표할 수 있고 내항성능 평가가 보다 간결하고 편리하게 됨을 알 수 있다.



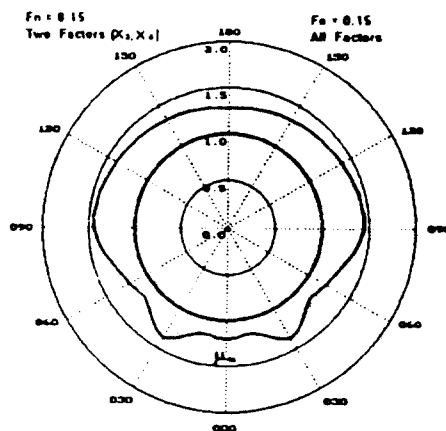
(a) SEA STATE 8



(b) SEA STATE 9

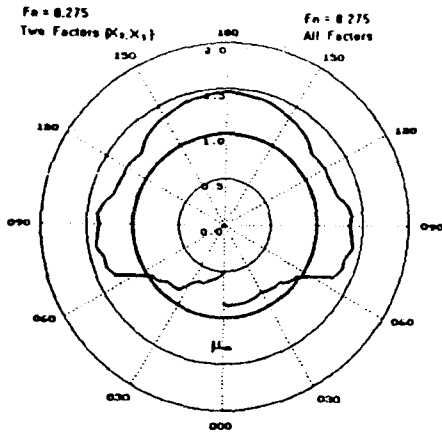


(c) SEA STATE 9

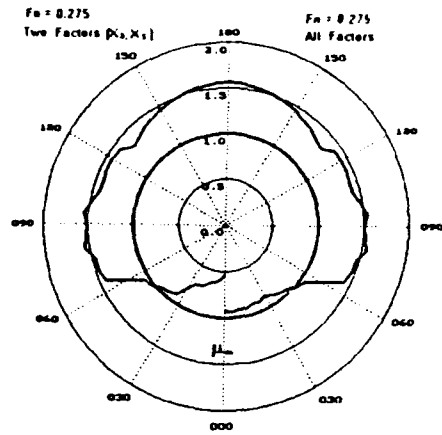


(d) SEA STATE 9

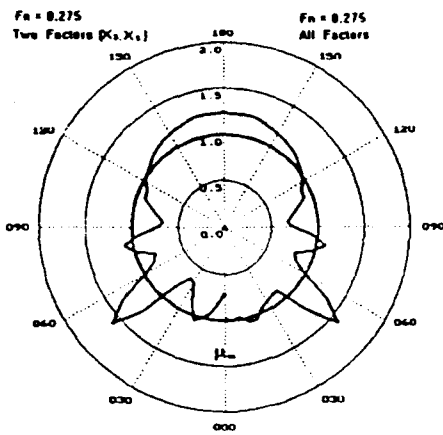
Fig. 11. Comparison diagram between rolling-vertical acceleration and the factors presently adopted for evaluating seakeeping performance of container ship and bulk-carrier



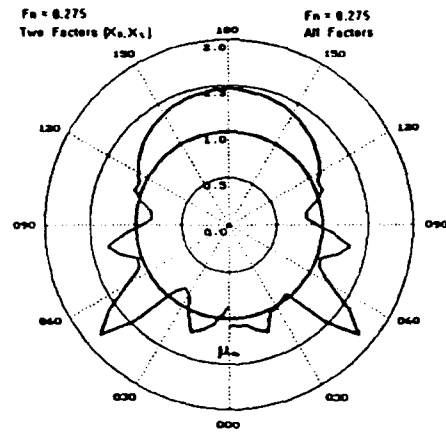
(a) SEA STATE 8



(b) SEA STATE 9



(c) SEA STATE 9



(d) SEA STATE 9

Fig. 12. Comparison diagram between lateral acceleration-vertical acceleration the factors presently adopted for evaluating seakeeping performance of pure car-carrier and passenger ship

4. 선종별 내항성능 평가에 따른 특성

4.1 수치계산의 조건

수치계산에 사용한 대상선은 Lpp=175m 컨테이너선, Lpp=93m의 여객선, Lpp=259m의 벌크선과 Lpp=164m의 PCC이며, 그 주요목은 Table 2와 같다.

Table 2. Principal particulars of ships

ITEMS	DEMANSIONS			
	Container	여객선	Bulk선	PCC
Length P.P. Lpp(m)	175.00	93	259	164
Breadth B (m)	25.40	14.5	43	28
Depth D (m)	15.40	7	23.8	27.35
Mean Draft d _M (m)	9.50	5.155	17.42	7.83
Block Coefficient C _B	0.572	0.6028	0.8407	0.5177
Displacement Volume(m ³)	24,742	4,274.82	167,459.81	18,971.5
Propeller Diameter D _P (m)	6.50	3.55	8	6

해상은 Beaufort등급 6, 7, 8, 9의 상태로 단파정 불규칙파 중에서 계산을 행하였고, 각 해상에 대한 평균과 주기와 유의파고(H_{1/3})를 Table 3에 표시한다.

Table 3. Beaufort scale and wave characteristics.

Beaufort Scale	Mean Wave Period T ₀ (sec)	Significant Wave Height H _{1/3} (m)
6	7.60	3.90
7	8.90	5.30
8	10.30	7.10
9	11.70	9.21

단파정 불규칙파중의 선박과 파와의 만남각은 선수 정향파로부터 5°의 간격으로 선미 추파까지 37개의 상태에 대해서 계산을 행해 파와의 만남각에 대해 보다 세밀함을 기했고, 선속은 선종별로 각 단계별 즉, 컨테이너선형, 여객선형 및 PCC선형은 Fn=0.0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.275 등으로 구분하였고, 벌크선형은 Fn=0.0, 0.05, 0.1, 0.125, 0.15 등으로 구분하여 각 선박의 특성에 맞추어 계산을 행하였다.

한계치의 설정에 있어 가속도에 대해서 콘테이너선형은 Table 1과 같이 콘테이너강도에 의해 정할 수 있으나 앞서 기술한 내항성능 평가요소 중 승조원의 피로, 업무능력 등 인간의 업무수행능력의 감소와 관련이 많은 상하가속도와 좌우가속도는 주파수가 높은 진폭(1Hz이상)에 대해서는 인간에 대한 영향이 조사되어 있지만 선체동요와 같은 저주파수 영역의 가속도에 관해서의 조사는 적다. 따라서 여기서는 그 한계치를 다음과 같이 취했다.

(1) 상하가속도

F.P.위치에는 선박의 위험에 크게 영향을 주는 것은 없지만 보다 안전함을 기하기 위해 선체에서 통상 상하가속도가 가장 심하게 일어나는 F.P.에서, Aertssen¹⁴⁾이 설계단계에서 제안한 Fig. 13과 같은 선박의 길이에 따른 가속도의 한계치를 이용했다.

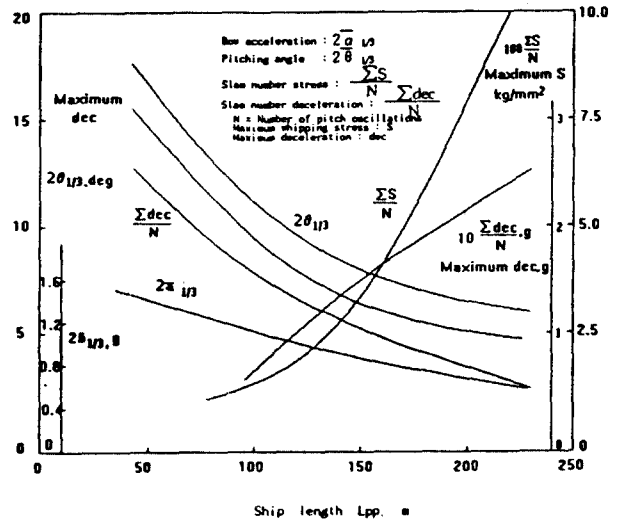


Fig. 13. Design plots for various ship lengths

(2) 좌우가속도

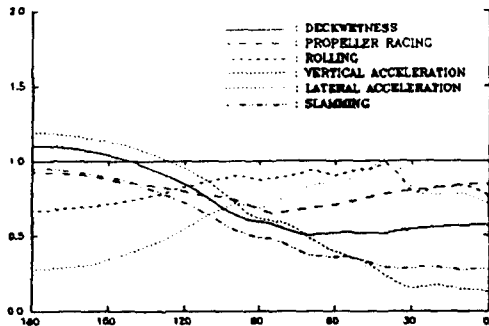
횡가속도에 관해서 인간은 더욱 민감한 것을 고려하여 조타실, 통신실 등에서의 경작업을 기준으로 운항자의 작업성을 평가한 細田 등의 이론에서 그 한계치를 추정하고, 모든 선박에 같이 적용했다.

4.2 선종별 내항성능 평가특성

앞서 4종류의 선박에 대해 평가치와 위험도를 가지고 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 있었다.

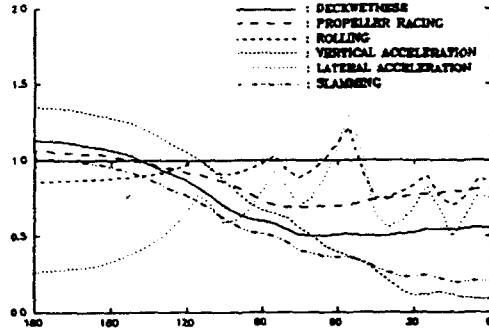
컨테이너선형의 경우 Fig. 14 (a)~(b)와 같이 파와의 만남각(χ) = 120°, 90°, 60° 부근에서 횡동요의 영향이 타 부분에 비해 위험하게 되기 쉬운 것으로 나타나고, 특히, χ = 55° 부근에서 심하게 나타나고 있고, 해상상태와는 관계없이 속도가 증가함에 따라 그 현상도 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 또 선수파 상태일 때 프로펠러 공전의 영향이 크게 나타나는데 해상상태 Beaufort 등급 9에서 Fn = 0.275일 때는 χ = 180°~120° 범위까지 위험하

SEA STATE 8
Fn = 0.2



(a)

SEA STATE 8
Fn = 0.275



(b)

Fig. 14. Dangerousness of the factors on seakeeping performance of container ship

게 나타나고 있다. 그리고, 선수와 부근에서는 좌우가속도를 제외하고 모든 요소가 내항성능에 크게 영향을 주고 있는 반면, 선미파 부근에서는 대체로 안전한 것으로 판단된다. 전반적으로는 F.P.의 상하가속도와 횡동요의 영향이 큰 것을 나타낸다.

여객선형의 경우 Fig. 15 (a)~(b)에 보인 것처럼 선수와 부근에서는 컨테이너선형에 비해 좌우가속도의 영향이 다소 크게 나타나는데, 이것은 선교의 위치가 타선박에 비해 선수쪽에 있어 선수요의 영향이 좀 더 심하게 작용하는 것으로 판단된다. 또 횡동요와 좌우가속도는 횡파 부근에서 가장 위험하게 되기 쉬운 것으로 나타나고 선미파에서 선미사파까지 타선박에 비해 꽤 안전하게 나타남을 알 수 있다. 또, χ = 0°~30° 부근을 제외하고는 F.P.의 상하가속도와 좌우가속도가 대표적이고, χ = 0°~30° 부근은 모든 요소가 위험하지 않기 때문에 파와의 모든 만남각에서 대표할 수 있다.

Fig. 16 (a)~(b)는 벌크선형의 경우로 앞서 밝힌 바와 같이 타요소의 영향은 미소한데 비해 횡동요의 영향이 파와의 모든 만남각에서 크게 작용한다. 특히 속력이 증가함에 따라 횡파와 χ = 30° 부근에서 위험하게 되기 쉬운 것으로 나타난다.

이러한 현상은 타선박에 비해 흘수가 깊고, 무게 중심이 아래에 있기 때문에 판단된다. 또, 선수와 부근에서는 선속이 빠른 편이 선미와 부근에서

는 선속이 느린 편이 좀 더 위험하게 평가되는 타선박들에 비해, 벌크선은 파와의 모든 만남각에서 선속이 느린 편이 좀 더 안전하게 나타나고 있다.

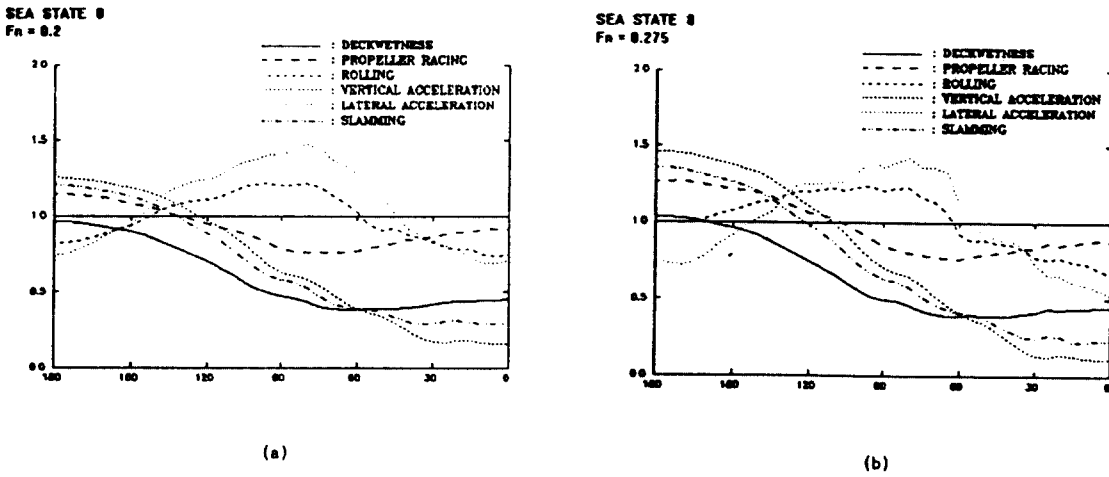


Fig. 15. Dangerousness of the factors on seakee ping performance of passenger ship

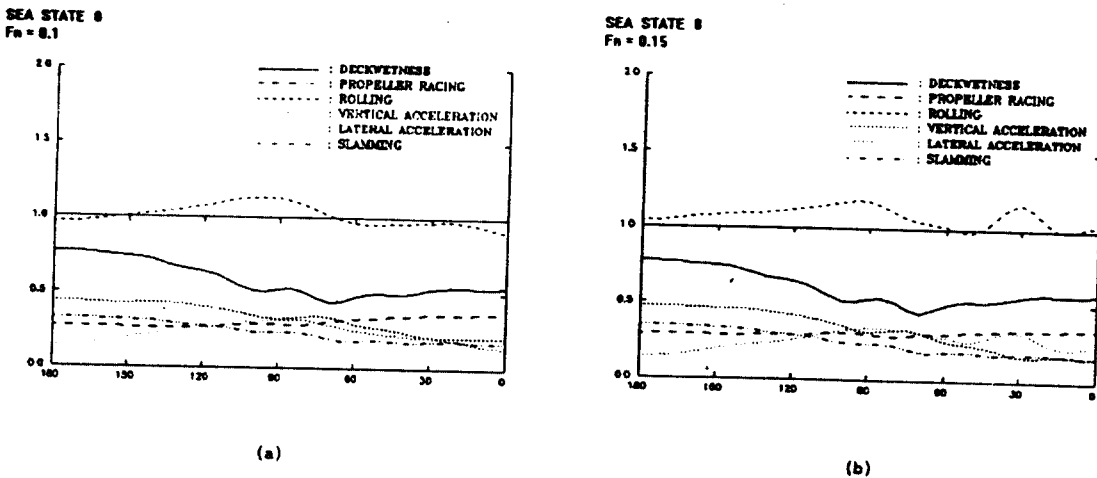


Fig. 16. Dangerousness of the factors on seakee ping performance of bulk-carrier

Fig. 17 (a)~(b)는 PCC선형의 경우로 횡동요와 좌우가속도가 $\chi=120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$ 부근에서 위험하게 되기 쉬운 것으로 나타나는 등, 전반적으로 콘테이너와 비슷한 양상을 보이고, 선수와 부근에서 콘테이너에 비해 슬래밍의 영향이 크게 작용하는 것으로 판단된다. 또한, 횡동요가 위험하게 나타나는 부분이 거의 없는 반면 좌우가속도가 심하게 일어나고 있는데, 이것은 횡동요의 한계치인 Bulwark top의 높이로 No.9 Deck를 취했는데 그 높이가 타 선박에 비해 큰 것으로 보인다. 그리고, 프로펠러 공전이 선수와 부근에서 크게 일어나는 타 선박에 비해, PCC선형은 선미과 부근에서 심

하게 발생하고, $\chi=110^\circ\sim 90^\circ$ 부근이 오히려 안전하게 나타나고 있다. 선수쪽 파와의 만남각에서 슬래밍이 가장 크게 일어나지만 위험범위로 보면 F.P.의 상하가속도가 대표될 수 있고, $\chi=0^\circ\sim 15^\circ$ 부근을 제외하고는 선미쪽 파와의 만남각에서 좌우가속도가 대표될 수 있다.

이상을 고려할 때 전반적으로 선수쪽 파와의 만남각에서는 F.P.의 상하가속도가 그 영향의 범위가 크고, 선미쪽에서는 횡동요나 좌우가속도의 영향이 대표됨으로 전술한 것과 같이 종·횡운동의 대표요소로 채택하여 내항성능을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

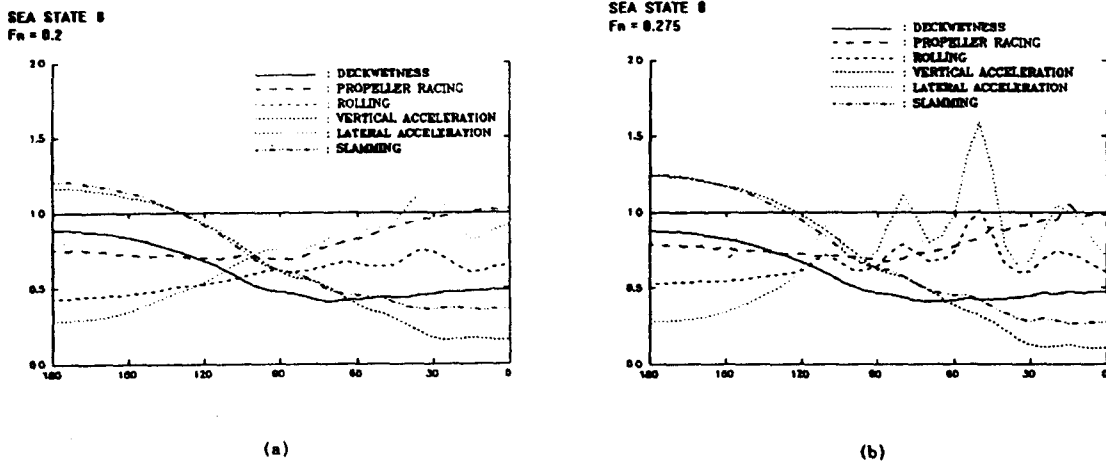


Fig. 17. Dangerousness of the factors on seakee ping performance of pure car-carrier

4.3 실선 적용을 위한 제안

이제까지의 많은 내항성능 분야의 연구들이 이론적 발전에 비해, 초기 설계단계나 실제 운항하는 사람들이 쉽게 이용할 수 있는 단계에는 아직 미비한 것으로 생각된다.

선박 운항자들이 항해중에 정량화된 평가방법에 의해 내항성능을 평가하고 있지 못하고 감각적이고 경험적인 판단에 의존하고 있는 현실속에서 보

다 용이한 내항성능 평가 방법이 필요하다.

상술한 것과 같이 평가치에 의한 방법은 기존의 모든 내항성능 평가요소의 영향이 종합되어 파와의 만남각에 따라 내항성능의 총합적인 경향을 정량적으로 파악할 수 있는 이론을 제시함으로써, 기준이 되는 한 요소로서 선박의 내항성능을 파악케한 중요한 연구 결과이지만, 실선 적용에 있어서는 선박과 재화상태에 따라서 그 한계 평가치를

다르게 설정해야 하는 등의 어려움이 있었다. 또, 모든 내항성능 평가요소의 계측에 있어서도 센서의 설치, 경제적인 면 등의 어려움과, 상관관계를 이용할 때의 많은 양의 데이터베이스 구축 등 실용상 번거로움이 있다.

따라서 선박의 특성에 맞는 중운동과 횡운동의 각 한 요소, 즉 컨테이너선형과 벌크선형에서는 F.P.의 상하가속도와 횡동요, 여객선형과 PCC선형에서는 F.P.의 상하 가속도와 좌우가속도 등과 같이 대표할 수 있는 요소를 취하여, 평가함으로써 실선 적용이 보다 간편해질 것으로 생각된다.

그리고, PCC선형의 횡동요와 같이 선박의 종류에 따라 추정된 한계치에 의해서도 그 요소의 영향이 크게 좌우됨을 알 수 있었는데, 이러한 점을 고려할 때 실선 적용을 위해서는 선박의 종류별 각 요소의 한계치 및 한계발생확률에 대한 보다 기준화 될 수 있는 연구의 필요가 선행되어야 할 것이다.

5. 결 론

파랑중을 항해하는 선박의 종류별 내항성능을 평가하고, 그 특성을 파악함으로써, 실선 적용의 한 방안을 제안하기 위해서 행한 본 연구의 결과를 종합하여 보면, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

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

(2) 위험도에 의한 평가도를 개발함으로써 각 요소가 내항성능 평가에 미치는 영향을 대등하게 할 수 있고 운항자들이 쉽게 판별 할 수 있어 실무적용을 보다 용이하게 하였다.

(3) 기존 내항성능 평가요소의 특성을 파악하고 그 상관관계를 규명함으로써 대표적인 종 횡운동 즉, 컨테이너선형과 벌크선형에서는 F.P.의 상하가속도와 횡동요, 여객선형과 PCC선형에서는 F.P.의 상하 가속도와 좌우가속도 등을 내항성능 평가요소로 하여 선박 전체의 내항성능을 종합적으로 평

가할 수 있는 방안을 제안하였다.

(4) 기존 요소중 종·횡운동에서 선박에 따른 대표적인 요소 각 한계를 채택함으로써 계측상의 난제를 해결할 수 있는 계기를 마련하였다.

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

그리고, 앞으로의 과제로는 한계치 및 한계발생 확률이 각 선박에 따라 보다 기준화 될 수 있는 연구가 선행되어야 하겠다.

參 考 文 獻

- 1) 中村彰一：耐航性の諸要素, 第1回 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船學會(1969), p. 121.
- 2) 日本造船研究協會, 第125研究部會：超高速コンテナ船の耐航性に関する報告書, 研究資料 No. 211 (1975), pp. 3~31.
- 3) 關西造船協會編：造船設計便覽(第4版), 昭58, p. 410.
- 4) N. K. Balss : Optimizing the Seakeeping Performance of Destroyer-Type Hulls, Proc. of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR(1980), p. 479.
- 5) 細田龍介, 他：船舶の初期設計における耐航性の総合的評價に関する研究(第1報), 日本造船學會論文集, 第153號(1983), p. 151, (第2報), 日本造船學會論文集, 第154號(1983), p. 253, (第3報), 日本造船學會論文集, 第156號(1984), p. 151.
- 6) 日根野 元裕・山内保文：海洋波のスペクトル, 日本造船學會誌, 第609號(1980), p. 78.
- 7) 山内保文：不規則現象論, 海文堂(1986), pp. 129~149.
- 8) W. G. Price and R. E. D. Bishop : Probabilistic Theory of Ship Dynamics, London Chapman and Hall(1974), pp.32~76.

- 9) 김순갑·이충로: 황천시의 항해안전 평가시스템 개발에 관한 연구, 한국항해학회지, 제15권, 제1호, p. 67.
- 10) 金順甲·内藤 林·中村彰一: 船舶の波浪中耐航性能評價に關する研究, 日本造船學會論文集, No. 155 (1984), p. 71.
- 11) V. V. 보로친: 構造設計의 確率論的方法と信賴性問題, 培風館(1981, 小林繁夫, 他譯), pp. 145~209.
- 12) 寺澤一雄, 他: 船體構造力學, 海文堂(1971), pp. 361~389.
- 13) 김순갑·공길영: 안전공간 설정에 의한 선박 내항성능의 평가시스템 개발에 관한 연구, 한국항해학회지, 제16권, 제1호, p. 13.
- 14) Rameswar Bhattacharyya: Dynamics of Marine Vehicles, John Wiley & sons(1978), p. 370.