

船舶의 耐航性能指標에 의한 航海 安全性 評價

공길영* · 金順甲**

Synthetic Evaluation of Navigational Safety Using the Seakeeping Performance Index of a Ship

Kong Gil-Young · Kim Soon-Kap

Abstract

A synthetic method of evaluating navigational safety is presented by means of the seakeeping performance index by measuring only vertical acceleration. The evaluation method presented in this thesis can be applied to the ships for any types and loading conditions. In developing the practical evaluation system of navigational safety, it is expected to be useful to solve the difficulties in measuring factors by sensors. The results are also useful for developing the optimum type of ship by applying at the initial design phase.

1. 서 론

파랑중을 항해하고 있는 선박의 운항자는 해상이 대단히 거칠 때 매우 고민스러운 판단을 해야만 하는 상황에 봉착하게 된다. 즉 어느 정도의 풍속과 파랑에서는 선박의 안전이 확보 되므로 현 침로, 현 속도로 계속 항해를 하고, 또 어느 정도 이상의 풍속과 파고에서는 위험하므로 피항 조치를 취해야 하는데, 이에 대한 선박 안전의 판단을 어떻게 하고, 또 어떻게 피항할 것인가 하는 것이 바로 그것이다.

파랑중을 항해하는 선박의 안전을 평가하는 일반적인 방법은 내항성능(Seakeeping Performance)을 그 지표로 이용하는 것이다. 내항성능은 '어떤 사명을 부여받은 선박이 예정된 취항 항로 혹은 해역을 항해함에 있어, 해상 조건에 관계없이 승무원의 안전은 물론이

* 박사과정 해사수송과학과 해사산업공학 전공

** 해사수송과학과 교수

고 선체에 탑재된 장비, 설비 등의 기능 및 성능의 저하없이, 그 사명을 수행하는데 요구되는 성능'이다.

파랑중을 항해하는 선박에서 항해 안전성을 평가할 수 있는 내항성능 평가요소는 선체 운동으로부터 발생하는 선수 갑판 침수(Deck wetness), 프로펠러 레이싱, 슬래밍(Slamming), 횡동요, 상하 가속도, 좌우 가속도 등이며, 이들에는 각각 한계치와 한계발생확률이 설정되어 있다. 일반적으로 통용되고 있는 각 내항성능 평가요소의 한계치와 한계발생확률은 표 1과 같다.

여기에서 각 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어 있는 것은 각 요소에 대한 연구가 따로 따로 행하여진 결과이기도 하고, 다른 한편으로는 항해 안전성 평가시 각 요소의 중요도를 달리 부여한 의미도 있다.

표 1. 내항성능 평가요소의 한계치와 한계발생확률

내항성능평가요소	한계치	한계발생확률
선수 갑판 침수 (deck wetness)	정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 F.P.의 유효 건현	2×10^{-2}
프로펠러 레이싱	정수중 항주시의 수위 상승을 포함하지 않고 프로펠러 반경의 $\frac{1}{2}$ 노출	10^{-1}
슬래밍	S.S.8½에서 선저 노출과 동시에 파에 돌입할 때 선저의 파면에 대한 상대 속도가 Threshold Velocity를 초과하는 것 단, Threshold Velocity = 0.09 /gL	10^{-2}
횡동요	선체중양부 weather side의 bulwark top 에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 정수중 흘수면에서 bulwark top까지 의 높이	10^{-3}
상하 가속도	0.8g 단, g는 중력가속도	10^{-3}
좌우 가속도	0.6g 단, g는 중력가속도	10^{-3}

각 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때 그 현상은 발생하고, 그 발생확률이 주어진 한계발생확률을 넘을 때 선박은 파랑중에서 그 기능을 잃거나 아니면 위험하게 된다. 그런데 각 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어 있고, 그 시스템적 결합은 직렬 결합이다. 따라서 기존의 내항성능 평가요소를 이용하여 선박의 항해 안전성을 평가하기 위해서는 모든 내항성능 평가요소를 계측하여야 한다. 그러나 각 요소의 특성상 계측을 위한 센서의 설치가 불가능한 것도 있고, 또 모든 요소에 센서를 설치하여 평가하는 것은 경제적인 면에서도 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 선박의 종류, 적재 상태(홀수 상태) 등에 관계없이, 어떠한 운항 상태에서도 선박 전체의 항해 안전성을 한 개의 내항성능 평가요소만을 개측하여 종합적으로 평가할 수 있는 내항성능지표(Seakeeping Performance Index)를 제안한다. 그리고 제안된 내항성능지표를 이용하여 선박의 항해 안전성을 해면 상태에 따라 침로별로 종합적으로 평가하여 화면으로 표시할 수 있는 평가도상에 나타낸다.

2. 내항성능의 평가치와 위험도

선박의 내항성능을 평가할 수 있는 지표로는 각 내항성능 평가요소가 그 한계치를 초과하는 발생 확률로부터 정의되는 평가치, 위험도, 상대 위험도를 적용한다.

2.1 평가치

임의 내항성능 평가요소의 발생확률을 $Q(\bar{X}_i)$ 라고 하면, 표준편차로써 무차원화한 한계치의 역수를 X_i 요소의 평가치 E_{X_i} 라 정의한다.

$$E_{X_i} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln\{Q(\bar{X}_i)\}}} = \left[\frac{\sigma_{X_i}}{\bar{X}_i} \right] \quad (1)$$

2.2 위험도와 최대 위험도

임의 X_i 요소의 주어진 한계발생확률에 관한 한계 평가치를 $E_{X_{ic}}$ 로 하고, 한계 평가치 $E_{X_{ic}}$ 에 대한 평가치 E_{X_i} 의 비를 X_i 요소의 위험도 μ_{X_i} 라 한다.

$$\mu_{X_i} = \frac{E_{X_i}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\{\bar{X}_i / \sigma_{X_i}\}}{\{\bar{X}_i / \sigma_{X_{ic}}\}} = \frac{\sigma_{X_{ic}}}{\sigma_{X_i}} \quad (2)$$

위험도 μ_{X_i} 는 파에 대한 만남각(χ), 선속(V) 및 해면상태(S)에 따라 변화한다. 여기서, $\mu_{X_i} \geq 1.0$ 인 경우 X_i 요소가 위험하고, $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다. 내항성능 평가요소의 위험도 μ_{X_i} 에서 최대치를 최대위험도 μ_m 이라 정의한다.

$$\mu_m(\chi, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(\chi, V, S)]$$

이 μ_m 은 어떤 상황하에서 μ_{X_i} 의 최고치인 값으로서, 그 값은 각 요소에 대한 상대치로 비교되는 값이다.

2.3 상대 위험도

임의의 X_i, X_j 요소의 위험도가 μ_i, μ_j 인 경우, X_i 요소를 기준으로 하여

나타낸 X_j 요소의 위험도의 비를 X_i 요소에 대한 X_j 요소의 상대 위험도 μ_{ij} 라 정의 한다.

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{\frac{X_i}{\sigma_{X_i}}}{a_{ij} \left[\frac{X_j}{\sigma_j} \right]} = \frac{\sigma_{X_k}}{\sigma_{X_c}} \cdot \frac{\sigma_{X_j}}{\sigma_{X_i}} \quad (3)$$

$$\text{단, } a_{ij} = \frac{E_{X_k}}{E_{X_c}} = \frac{\left[\frac{X_{ic}}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[\frac{X_{jc}}{\sigma_{X_{jc}}} \right]}$$

여기에서 $\mu_{ij} > 1.0$ 인 경우는 X_i 요소에 비해 X_j 요소가 더 위험하고, $\mu_{ij} < 1.0$ 인 경우는 그 반대의 의미를 갖는다.

3. 내항성능지표의 정의

기존의 각 내항성능 평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 가지는 요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 이것은 신뢰성 공학에서 시스템 요소의 고장 발생 확률이 같은 경우, 그 고장률이 동일하게 되는 것과 같은 의미를 가진다. 그러므로 각 내항성능 평가요소의 위험도가 같은 경우, 그 발생 확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 것으로 선박 시스템 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 내항성능지표를 개발할 수 있다.

이 내항성능지표는 임의 1개 내항성능 평가요소만을 계측하여도 6개 내항성능 평가요소 전체의 최대 위험도를 계산할 수 있다. 따라서 6개 요소를 모두 계측하지 않아도 전체 선박 시스템의 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 또한 이 지표는 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 모두 1보다 적은 경우 최대 위험도를 이용하면 전체 선박 시스템이 안전하게 평가되는 부분을 보완하여, 6개 내항성능 평가요소를 종합하여 보다 안전을 도모한 평가가 가능하다.

3.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치

현재까지 연구되어진 바에 따르면, 파랑중을 항해하는 선박 시스템의 내항성능을 평가할 수 있는 요소의 한계발생확률이 각각 다르게 설정되어 있다. 따라서 한계발생확률이 큰 요소에 비해서 작은 요소의 위험도가 전체 선박 시스템의 내항성능 평가에서 무시되어 위험한 상태가 안전한 상태로 평가되는 경우가 있다.

이것을 보완하기 위하여 각 내항성능 평가요소들이 한계발생확률에 도달하면,

그 위험도가 한계발생확률이 가장 큰 프로펠러 레이싱의 한계발생확률($Q_{Pc}=10^{-1}$)에 도달하는 것과 같은 값으로 변환하여 평가하는 것이다. 즉 각 내항성능 평가요소의 위험도가 프로펠러 레이싱의 위험도와 같은 경우, 그 발생 확률도 프로펠러 레이싱의 발생 확률과 동일하게 되는 각 요소의 평가치(E_i)에 대한 변환 평가치(\tilde{E}_i)를 다음과 같이 계산한다.

(1) 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치

$$\tilde{E}_P = \frac{E_P}{\alpha_{PP}} = E_P \cdot \frac{E_{Pc}}{E_{Pc}} = E_P \quad (4)$$

여기서,

$$E_P : \text{프로펠러 레이싱의 평가치} \quad \left(\frac{\sigma_P}{X_P} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(Q_P)}} \right)$$

\tilde{E}_P : 프로펠러 레이싱의 변환 평가치

$$E_{Pc} : \text{프로펠러 레이싱의 한계 평가치} \quad \left(\frac{\sigma_{Pc}}{X_{Pc}} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(0.1)}} \right)$$

(2) 프로펠러 레이싱 이외의 임의 요소에 대한 변환 평가치

$$\begin{aligned} \tilde{E}_i &= \frac{E_i}{\alpha_{Pi}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_i = \mu_i \cdot E_{Pc} \\ \tilde{E}_j &= \frac{E_j}{\alpha_{Pj}} = \frac{E_{Pc}}{E_{jc}} \cdot E_j = \mu_j \cdot E_{Pc} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\alpha_{Pi} : \text{프로펠러 레이싱과 } i \text{ 요소의 한계 평가치의 비} \quad \left(= \frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \right)$$

$$\mu_i : i \text{ 요소의 위험도} \quad \left(= \frac{E_i}{E_{ic}} \right)$$

3.2 내항성능지표의 정의

앞에서 제안한 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치를 이용하여, N개의 내항성능 평가요소로 구성되는 선박 전체 시스템의 변환 평가치(\tilde{E}_T)와 한계 평가치(E_{Tc})를 정리하고, 이를 이용하여 내항성능지표(μ_T)를 다음과 같이 정의한다.

선박 전체 시스템의 변환 평가치 \tilde{E}_T 는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{E}_T = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(1 - \widetilde{P}_T)}} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \widetilde{P}_T = \prod_{i=1}^n \widetilde{P}_i$$

내항 성능 신뢰도 함수 P_i 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\widetilde{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i}}{\widetilde{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} \cdot X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q(X_i)^{\alpha_{P_i}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } Q(X_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\}$$

그리고 선박 시스템의 한계 평가치 E_{Tc} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Tc} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(1 - P_{Tc})}} \quad (8)$$

여기서,

$$P_{Tc} = \prod_{i=1}^n P_{ic}$$

$$P_{ic} = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_{ic}}\right)^2\right\} = 1 - Q_{X_k}$$

P_{Tc} : 내항 성능 신뢰도 함수

Q_{X_k} : 각 요소의 한계발생 확률 (Rayleigh 분포)

따라서 선박 시스템 전체의 항해 안전성을 평가하기 위해서는 식 8의 한계 평

가치(E_{Tc})와 식 6의 변환 평가치(\widehat{E}_T)의 비를 내항성능지표 μ_T 로 정의하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_T = \frac{\widehat{E}_T}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{Tc})}{\ln(1 - \widehat{P}_T)}} \quad (9)$$

여기서 내항성능지표 μ_T 는 1보다 같으나 큰 경우 선박 시스템 전체는 위험하게 되고, μ_T 가 1보다 작은 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

또한 이 μ_T 는 내항성능 평가요소중 1개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우, μ_T 도 1보다 크게 되는 성질을 가지고 있다. 따라서 μ_T 는 내항성능 평가요소의 최대 위험도와 근사하는 값이 된다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능 평가요소의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있어, 간편하고 편리한 하드웨어 제작에 여러가지 이점이 있을 것으로 판단된다.

$$\mu_T \approx \mu_m(\chi, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(\chi, V, S)] \quad (10)$$

3.3 임의의 1개 요소에 의한 항해 안전성 평가

식 7의 \widehat{P}_i 는 상대 위험도(μ_{ij})를 매개로 하여 임의의 내항성능 평가요소 1개만을 계측하여 계산이 가능하며, 이것을 이용하여 파악중을 항해하는 선박의 항해 안전성을 평가할 수 있는 내항성능지표 μ_T 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{im}}{\beta_i \sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{im}}{\alpha_{P_i} \mu_{ij} \sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{ic}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{im}}{\mu_{ij} \sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i}}{\mu_{ij}} \cdot \frac{X_{im}}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q\left(X_{im}\right) \left(\frac{\alpha_{P_i}}{\mu_{ij}}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

X_{im} : 계측하는 임의의 내항성능 평가요소

$$\beta_i = \alpha_{ij} \cdot \mu_{ij}$$

μ_{ij} : 임의 i 요소에 대한 임의 j 요소의 상대 위험도

α_{P_i} : 프로펠러 레이싱에 대한 임의 i 요소의
한계평가치의 비

4. 상하 가속도를 계측한 항해 안전성 평가

전장에서 정의된 내항성능지표(μ_T)는 기존의 내항성능 평가요소중 한 개 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 본장에서는 기존의 내항성능 평가요소중 계측성이 편리하고, 화물의 안전과 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가한다. 식 7에서 선박 시스템의 신뢰도 함수 \tilde{P}_i 는 상하 가속도를 계측하여 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 평가 지표 μ_T 를 계산하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} \tilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\beta_i \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\alpha_{P_i} \mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{AVc}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \cdot \frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q(X_{AV}) \left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}}\right)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$Q(X_{AV}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\}$$

$$\beta_i = \alpha_{AVi} \cdot \mu_{AVi}$$

μ_{AVi} : 상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도

α_{PAV} : 프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의
한계평가치의 비

프로펠러 레이싱과 상하 가속도의 한계발생확률이 각각 $Q_{Pc} = 10^{-1}$, $Q_{AVc} = 10^{-3}$ 이므로, $\alpha_{PAV} = 1/\sqrt{3}$ 로 되는 값이다. 따라서 식 12은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\bar{P}_i = 1 - Q(X_{AV}) \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\mu_{AVi}} \right)^2 \quad (13)$$

4.1 수치 계산의 조건

수치 계산에 사용한 대상 선종은 만재 배수량 상태의 Lpp=175m 컨테이너선 (배수량 24,742톤), Lpp=93m 여객선 (배수량 4,274톤), Lpp=164m 자동차 전용선 (배수량 18,971톤), Lpp=259m 벌크선 (배수량 163,375톤)이다.

해면 상태는 Beaufort Scale Number 6, 7, 8, 9의 상태로 단파정 불규칙파중에서 계산을 행하였다. 각 해면 상태에 대한 평균 파 주기와 유의 파고($H_{1/3}$)는 표 2에 나타낸다. 단파정 불규칙파중의 선박의 만남각 α 는 선수 정향파로부터 30° 의 간격으로 선미 추파까지 7개의 상태에 대해서 계산을 행하였다.

선박의 속도는 Fn=0.275(컨테이너선 22.1노트, 여객선 16.1노트, 자동차 전용선 21.4노트), Fn=0.15(벌크선 14.7노트)로 구분하여 계산하였다.

표 2. 해면 상태에 따른 해양파의 특성

Beaufort No.	Mean Wave Period To (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
10	13.10	11.50

4.2. 선종별 항해 안전성 평가

그림 1, 2, 3, 4는 식 12를 식 8에 대입하여 계산한 수치 시뮬레이션 대상 선박인 컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선, 벌크선에 대한 내항성능지표(μ_T)와 내항성능 평가요소의 위험도(μ_i)를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 내항성능지표를 나타내며, 각 점선은 각 내항성능 평가요소의 위험도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 해면 상태나 선속에 관계없이 내항성능지표와 최대 위험도가 근사하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 사실은 다른 선속과 해면 상태에서도 같은 경향을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다.

또한 특이한 사항으로는 컨테이너선과 자동차 전용선의 경우 위험도를 이용하여 평가하는 경우, 정황과 부근에서 안전한 것으로 평가되고 있으나, 모든 요소의 위험도가 1에 근접해 있어 내항성능지표를 이용하는 경우 위험하게 평가되는 것이다. 이것은 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 1보다 작아 전체 선박이 안전한 것으로 평가되는 부분을 보완하고 있는 것이다. 다시 말해서, 각 내항성능 평



μ_{AV} : 상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도

α_{PAV} : 프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의
한계평가치의 비

프로펠러 레이싱과 상하 가속도의 한계발생확률이 각각 $Q_{PC} = 10^{-1}$, $Q_{AVc} = 10^{-3}$ 이므로, $\alpha_{PAV} = 1/\sqrt{3}$ 로 되는 값이다. 따라서 식 12은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\bar{P}_i = 1 - Q\left(X_{AV}\right)^{\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\mu_{AV}}\right)^2} \quad (13)$$

4.1 수치 계산의 조건

수치 계산에 사용한 대상 선종은 만재 배수량 상태의 Lpp=175m 컨테이너선 (배수량 24,742톤), Lpp=93m 여객선 (배수량 4,274톤), Lpp=164m 자동차 전용선 (배수량 18,971톤), Lpp=259m 벌크선 (배수량 163,375톤)이다.

해면 상태는 Beaufort Scale Number 6, 7, 8, 9의 상태로 단파정 불규칙파중에서 계산을 행하였다. 각 해면 상태에 대한 평균 파 주기와 유의 파고($H_{1/3}$)는 표 2에 나타낸다. 단파정 불규칙파중의 선박의 만남각 α 는 선수 정향파로부터 30° 의 간격으로 선미 추파까지 7개의 상태에 대해서 계산을 행하였다.

선박의 속도는 Fn=0.275(컨테이너선 22.1노트, 여객선 16.1노트, 자동차 전용선 21.4노트), Fn=0.15(벌크선 14.7노트)로 구분하여 계산하였다.

표 2. 해면 상태에 따른 해양파의 특성

Beaufort No.	Mean Wave Period To (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
10	13.10	11.50

4.2. 선종별 항해 안전성 평가

그림 1, 2, 3, 4는 식 12를 식 8에 대입하여 계산한 수치 시뮬레이션 대상 선박인 컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선, 벌크선에 대한 내항성능지표(μ_T)와 내항성능 평가요소의 위험도(μ_i)를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 내항성능지표를 나타내며, 각 점선은 각 내항성능 평가요소의 위험도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 해면 상태나 선속에 관계없이 내항성능지표와 최대 위험도가 근사하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 사실은 다른 선속과 해면 상태에서도 같은 경향을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다.

또한 특이한 사항으로는 컨테이너선과 자동차 전용선의 경우 위험도를 이용하여 평가하는 경우, 정횡과 부근에서 안전한 것으로 평가되고 있으나, 모든 요소의 위험도가 1에 근접해 있어 내항성능지표를 이용하는 경우 위험하게 평가되는 것이다. 이것은 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 1 보다 작아 전체 선박이 안전한 것으로 평가되는 부분을 보완하고 있는 것이다. 다시 말해서, 각 내항성능 평가요소의 위험도가 1 보다 적다고 하더라도 전체 요소의 위험도를 종합적으로 평가하면 반드시 안전하다고 할 수 없다는 것이다. 이러한 부분도 보완해 주는 것이 내항성능지표(μ_T)이다.

다음에서는 파랑중을 항해하는 선박의 항해 안전성을 상하 가속도 한 개만을 계측하여 계산한 내항성능지표(μ_T)를 이용하여 선종별로 평가한다.

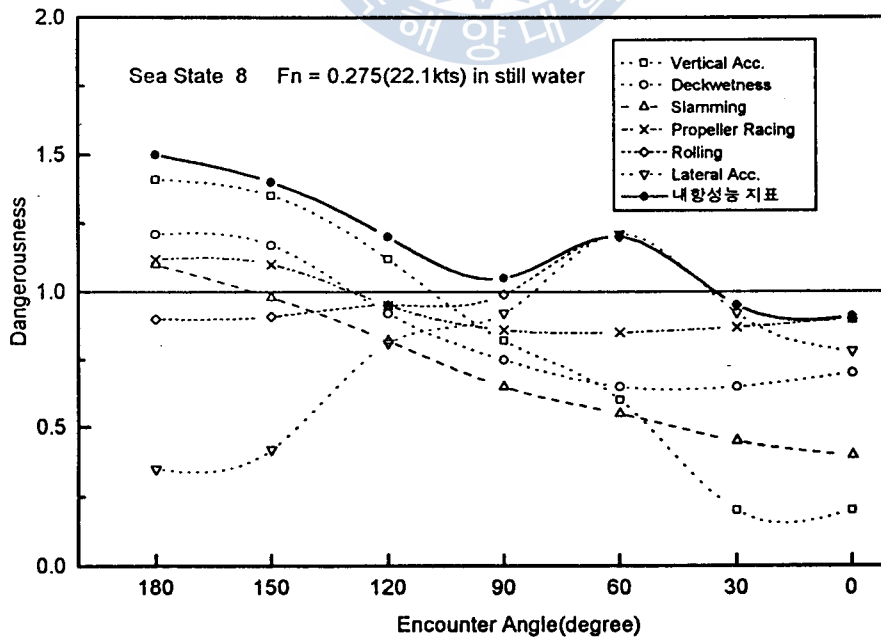


그림 1. 컨테이너선의 내항성능지표

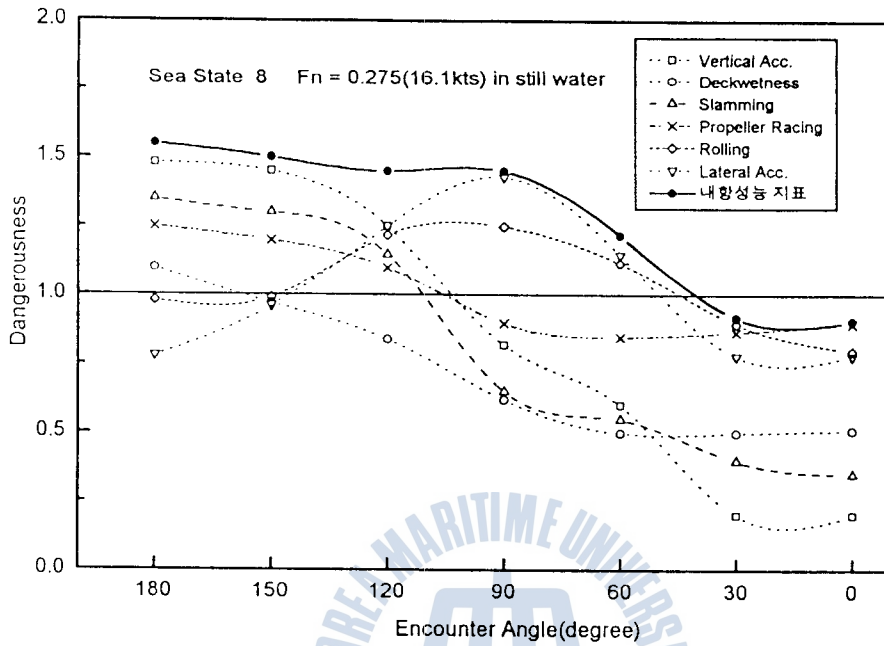


그림 2. 여객선의 내항성능지표

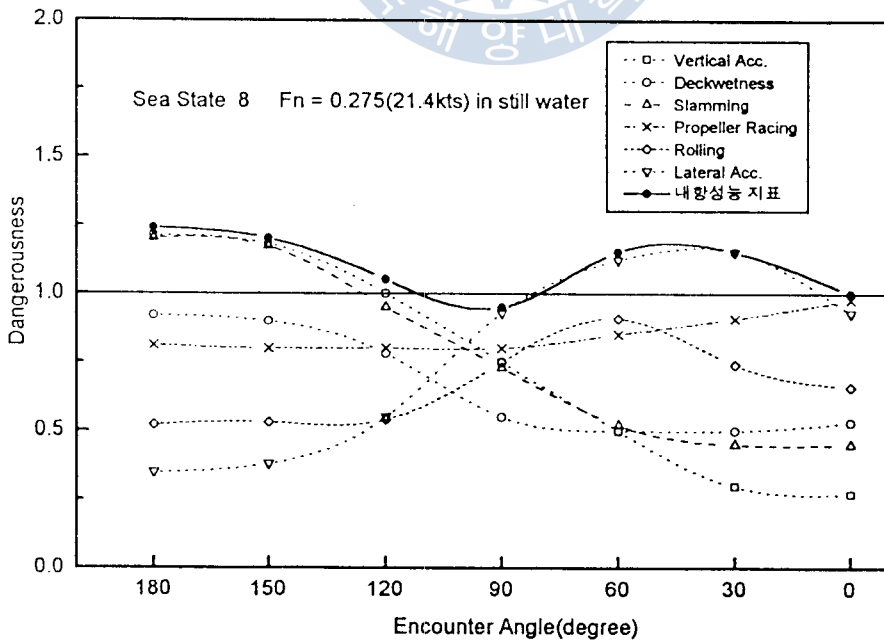


그림 3. 자동차 전용선의 내항성능지표

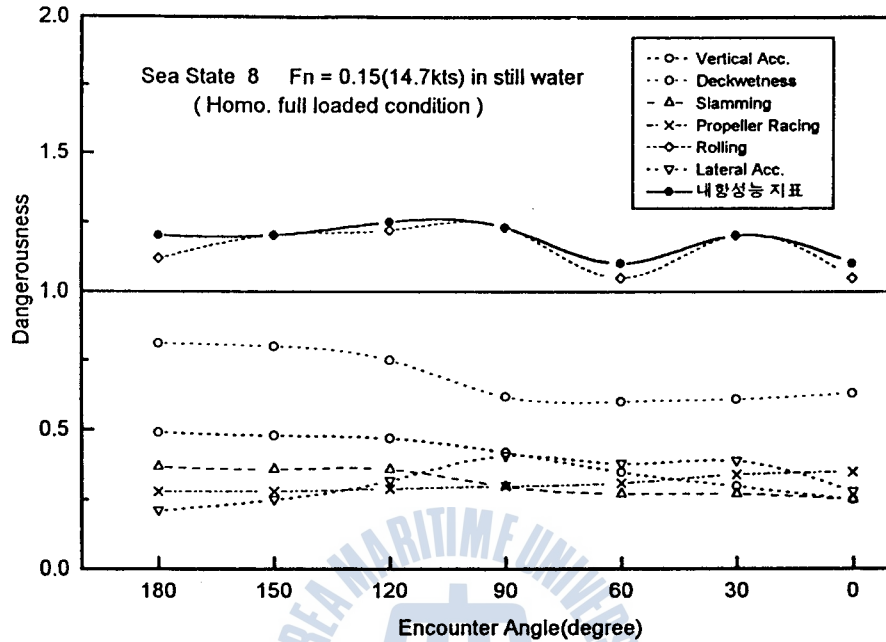


그림 4. 벌크선의 내항성능지표

그림 5, 6, 7, 8은 대상 선형인 컨테이너선, 여객선, 자동차 전용선, 벌크선이 만재 배수량 상태에서 일정한 속력으로 항해하는 경우, 각 해면 상태에 따른 침로별 내항성능지표(μ_T)를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 이 평가도는 컴퓨터 화면이나 레이더 스크opf 상에 화상 처리하여 편리하게 사용할 수 있도록 좌표의 원점을 위험도 0 으로 하여 시각적으로 쉽게 항해 안전성을 판정할 수 있도록 하였다. 그리고 선박 운항자가 이 평가도를 이용하여 다음 침로에 대한 항해 안전성을 쉽게 파악할 수 있어, 다음 침로 결정에 편리함을 더해 주고 있다.

그림에서 $\chi=180^\circ$ 는 선수파(head sea), $\chi=90^\circ$ 는 정횡파(beam sea), $\chi=0^\circ$ 는 선미파(following sea)를 나타낸다. 그리고 가는 실선의 반원중 $\mu_T=1$ 은 내항성능지표의 한계 위험치를 나타내고, 굵은 실선과 가는 실선은 각 침로별 내항성능지표를 나타낸다. 그 중 굵은 실선의 내항성능지표는 한계치인 $\mu_T=1$ 의 반원을 초과하는 경우로 이 상태에서의 선박은 위험하게 된다.

그림 5는 컨테이너선이 속력 $F_n=0.275$ (22.1kts)로 항해할 때, 침로별 자연적 감속을 고려하여 해면 상태에 따른 내항성능지표(μ_T)를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다.

해면 상태 6에서는 컨테이너선의 내항성능지표가 1보다 작아 전 만남각에서 안전한 것으로 평가된다. 해면 상태 7에서는 해면 상태 6에 비해 전 만남각에서 내항성능지표가 전반적으로 커지만 안전한 것으로 평가된다. 다만 $\chi=60^\circ$ 부근에서는

내항성능지표가 1에 접근하고 있으므로 주의 항해를 해야 할 것으로 판단된다. 해면 상태 8에서는 $\chi=180^\circ\sim40^\circ$ 에서 내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해면 상태 9에 이르면 그 위험 범위가 확대되어 전 만남각에서 위험한 상태가 된다.

그림 6은 속력 $F_n=0.275(16.1 \text{ kts})$ 로 항해하는 여객선의 내항성능지표(μ_T)를 자연적 감속을 고려한 상태에서 계산하여 해면 상태별로 항해 안전성을 나타낸 평가도이다.

해면 상태 6에서 여객선의 내항성능지표가 정황파 부근에서 1에 접근하고 있어서 주의 항해가 요구되지만, 그 밖의 만남각에서는 안전한 것으로 평가된다. 해면 상태 7에서는 해면 상태 6에 비해서 전반적으로 내항성능지표가 크고, 특히 $\chi=120^\circ\sim50^\circ$ 에서 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해면 상태 8에서는 그 위험 범위가 확대되어, $\chi=180^\circ\sim45^\circ$ 에서 내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해면 상태 9에 이르면 전 만남각에서 위험한 것으로 평가된다.

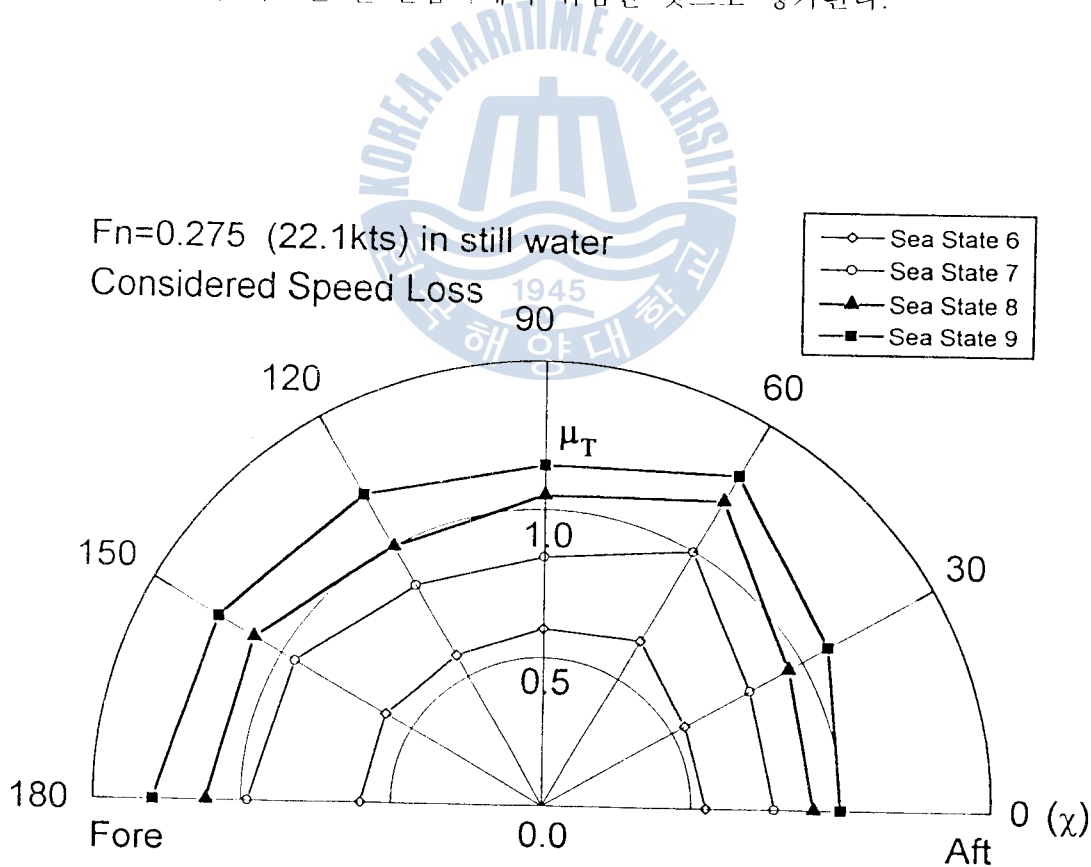


그림 5. 컨테이너선의 항해 안전성 평가도

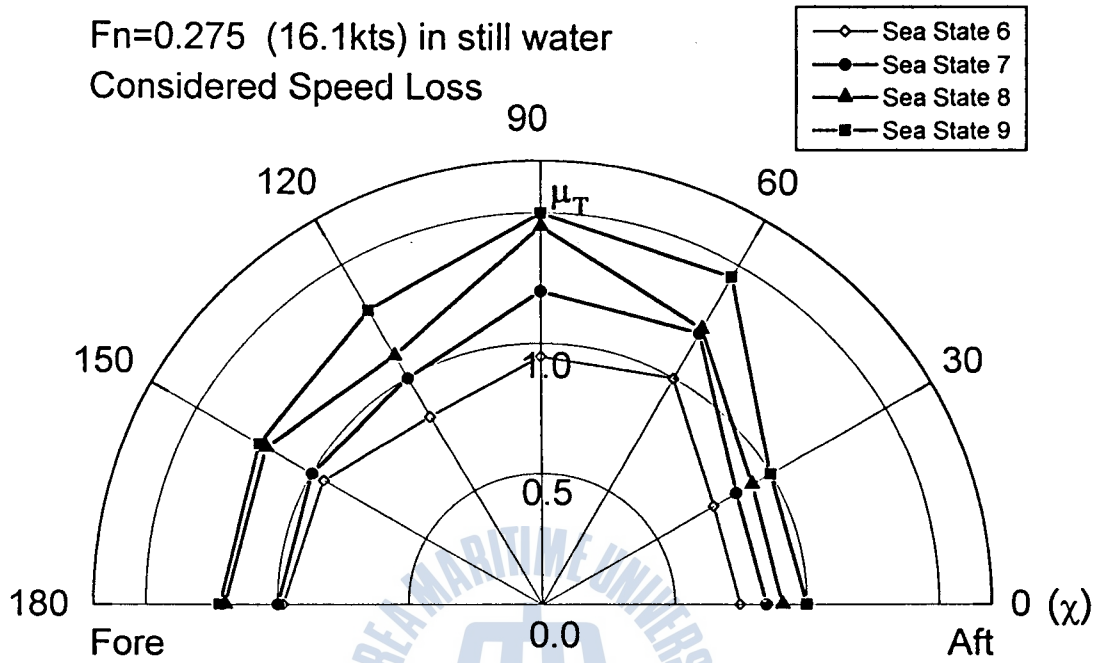


그림 6. 여객선의 항해 안전성 평가도

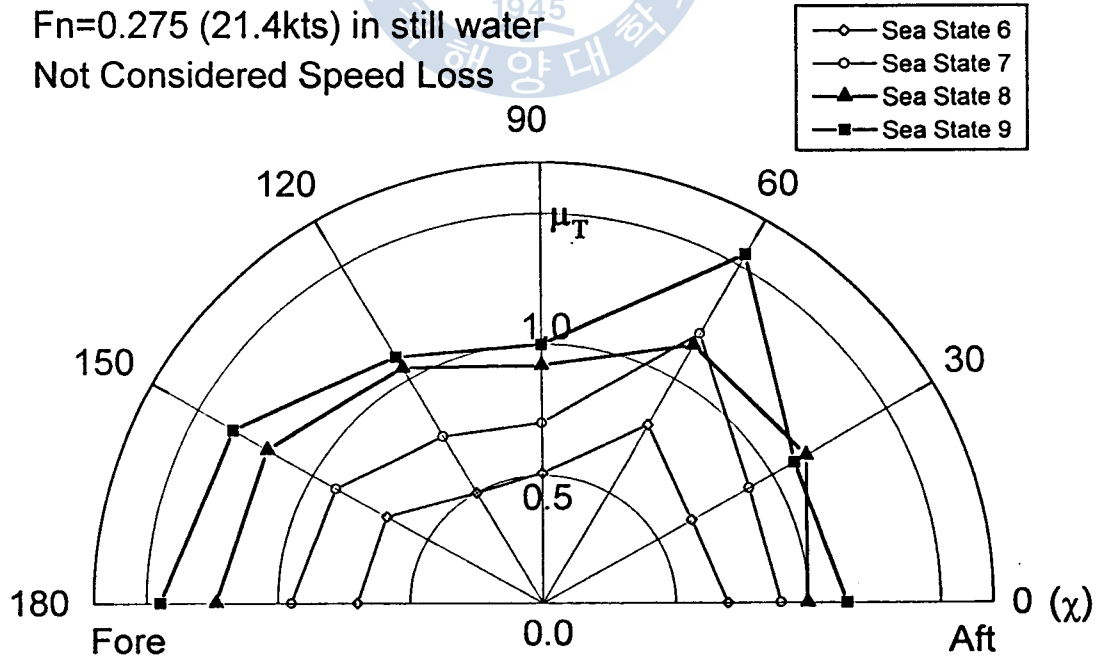


그림 7. 자동차 전용선의 항해 안전성 평가도

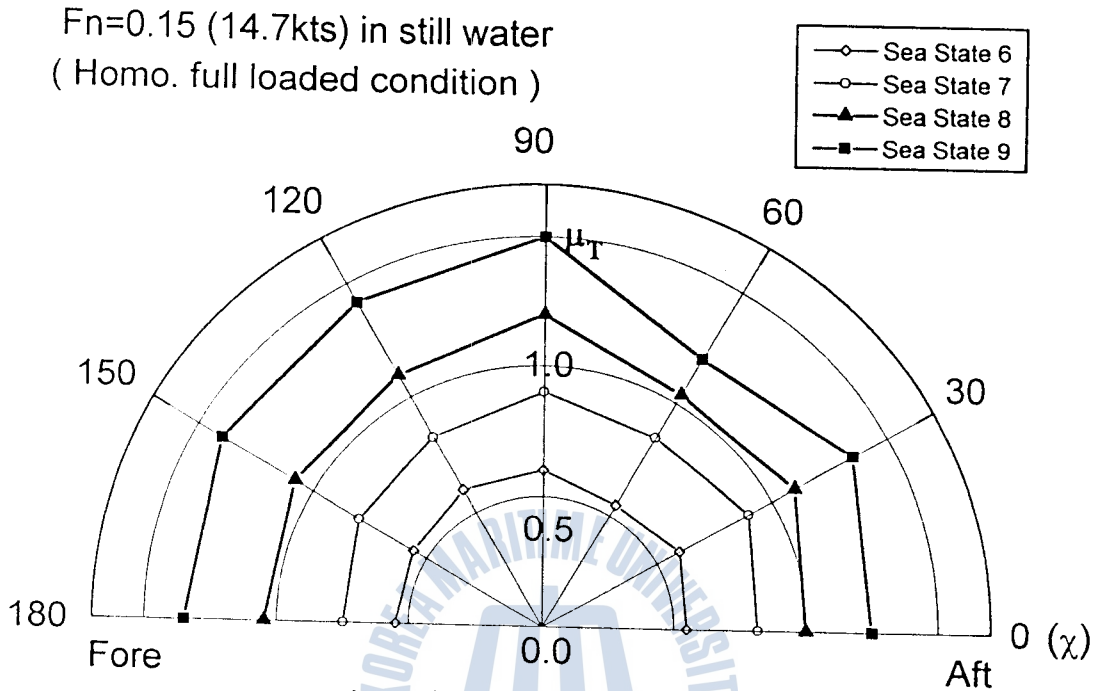


그림 8. 벌크선의 항해 안전성 평가도

그림 7은 속력 $Fn=0.275(21.4kts)$ 로 항해하는 자동차 전용선의 침로별 자연적 감속을 고려하지 않은 해면 상태에 따른 내항성능지표(μ_T)를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다.

해면 상태 6에서, 자동차 전용선의 내항성능지표는 전 만남각에서 안전한 것으로 평가된다. 해면 상태 7에서는 해면 상태 6에 비해서 전반적으로 내항성능지표가 커지고, $\chi=60^\circ$ 부근에서 위험도가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해면 상태 8에서는 $\chi=100^\circ \sim 75^\circ$ 를 제외한 전 만남각에서 내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해면 상태 9에 이르면 그 위험 범위가 확대되어 전 만남각에서 내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다.

그림 8은 벌크선이 만재 상태에서 자연적 감속을 고려하지 않은 속력 $Fn=0.15(14.7kts)$ 로 항해하는 경우의 내항성능지표(μ_T)를 이용한 해면 상태별 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 해면 상태 6, 7에서는 내항성능지표가 1을 초과하지 않아 안전한 영역에 있다. 그러나 해면 상태 8, 9에 이르면 전 만남각에서 내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 것으로 평가되었다.

이상을 종합해 보면, 컨테이너선은 해면 상태 8 이상이 되면 위험하다. 그리고 여객선은 해면 상태 7 이상이 되면 전반적으로 위험하고, 특히 황파 부근에서의 위험도가 대단히 높다는 것에 주의해야 할 것이다. 자동차 전용선과 벌크선은 해면

상태 8 이상이 되면 역시 위험하다. 여기에서 자동차 전용선과 벌크선의 경우, 자연적 감속을 고려하여 계산한다면 선수와 부근에서의 내항성능지표는 다소 줄어들 것으로 판단된다.

이상의 여러 가지 상황을 감안할 때, 파랑중을 항해하는 선박의 운항자는 안전 확보를 위한 피항 조치시 대각도의 변침만을 사용하는 것보다, 변침과 함께 적절한 속도 감속을 병행한다면 보다 효과적으로 선박의 항해 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 파랑중을 항해하는 선박의 항해 안전성을 자연적 감속을 고려한 선속에서 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 선종별로 내항성능지표를 이용하여 평가하였다. 이상의 연구 결과를 종합하여 보면, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 신뢰성 공학 이론을 응용하여 내항성능 평가지와 위험도를 정의하고, 이를 바탕으로 내항성능지표를 개발하여 선박 전체의 항해 안전성을 정량적으로 파악하였다.

(2) 기존 내항성능 평가요소중 상하 가속도 한 개만을 계측하여 상대 위험도를 매개로 선박 전체의 내항성능지표를 계산하였다. 이 평가 방법은 선종이나 적재 상태에 관계없이 종합적으로 적용 가능하다.

(3) 기존의 내항성능 평가요소중 상하 가속도만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 내항성능지표를 계산함으로써 계측상의 난제를 해결할 수 있는 계기를 마련했다.

(4) 본 논문의 연구 결과는, 의식적 감속을 고려한 최적 항로 결정, 항해 안전성 면에서 보다 우수한 선형 개발 등의 연구에 이용될 수 있을 것이라고 생각된다

참고 문헌

- 1) Peter B. Zahn · Michael Grim : Determination of Extreme Seas Encountered by Operational Ships, p197, May 1995
- 2) Edward N. Comstock · Robert G. Keane : Seakeeping by design, Naval Engineers Journal, p. 157, April 1980
- 3) 中村彰一 : 耐航性の諸要素, 第1回 耐航性に關するシンポジウム, 日本造船學會, 1969
- 4) 김순갑·박문수·공길영 : 선박 종류에 따른 내항성능 평가에 관한 연구, 한국항해학회지, 제18권, 제2호, 1994
- 5) 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.135(1984)
- 6) V.V.ボロチン : 構造設計の確率論的方法と信頼性問題, 培風館(1981, 小林繁夫, 他譯)
- 7) 김순갑·공길영 : 선박의 속도 저하를 고려한 내항성능 평가에 관한 연구, 해양안전학회지, 제2권, 제1호, 1996. 1



