

論 文

# 선박의 적화 상태별 종합내항성능지표에 의한 항해 안전성 평가

김순갑\* · 김정만\* · 공길영\*\*

## Evaluation of Navigational Safety Using the Integrated Seakeeping Performance Index under Loading Conditions of a Ship

*Soon-Kap Kim\* · Jung-Man Kim\* · Gil-Young Kong\*\**

〈 목 차 〉

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| Abstract         | 항해 안전성 평가               |
| 1. 서 론           | 3.1 수치계산의 조건            |
| 2. 종합내항성능지표의 정의  | 3.2 상하가속도를 계측한 종합내항성능지표 |
| 2.1 평가치 및 변환 평가치 | 3.2 적재상태별 항해안전성 평가      |
| 2.2 종합내항성능지표     | 4. 결 론                  |
| 3. 종합내항성능지표를 이용한 | 참고문헌                    |

### Abstract

Generally, the navigational safety of a ship under various loading conditions is evaluated by a loading manual. However, the loading manual handles only static factors such as weight and buoyancy of ship without including any wave conditions. Practically ship's safety is much concerned with the occurrences on the rough sea as propeller racing, rolling, deck wetness, vertical acceleration, lateral acceleration, slamming and so on.

The purpose of this paper is to present a synthetic and practical evaluation method of navigational safety using the integrated seakeeping performance index(ISPI) under loading conditions of ship in seaways. The method is calculated by means of the ISPI by measuring only vertical acceleration. Judgement of dangerousness is carried out for four loading conditions : homogeneous full loaded, half loaded, heavy ballast loaded, and normal ballast loaded conditions.

\* 한국해양대학교 해사수송과학부 교수

\*\* 국방과학연구소 선임 연구원

In developing the practical evaluation system of navigational safety, it is useful to solve the difficulties in measuring factors by sensors. And by applying the evaluation diagrams, navigators are able to avoid dangerousness by keeping away of the danger encountering angle of wave direction which the diagram shows.

## 1. 서 론

항해를 준비하는 선장은 선박의 고유 능력과 운항 목적을 감안하여 출항지에서 기항지까지 최적의 항로와 속력으로 항해할 수 있도록 항해 계획을 세워야 한다. 이 항해 계획에 따라 화물을 적절히 적재하는데, 선박의 감항성을 유지하기 위해서는 기본적으로 다음과 같은 요건을 갖추어야 한다.

- (1) 적화량이 한계 홀수인 당해 항해 구역의 만재 홀수선을 넘지 않아야 한다.
- (2) 적당한 가로 메타센터 높이( $\overline{GM}$ )을 확보하여 복원성을 가져야 한다.
- (3) 적당한 트림의 조화가 있어야 한다.
- (4) 선박의 길이 방향 굽힘 모멘트의 허용 한계치를 넘지 않게 화물을 적재해야 한다.
- (5) 상시 횡경사(Constant List)가 발생하지 않도록 해야 한다.

그러나 이러한 모든 요건에 맞추어 화물을 적재하였다고 해도, 이것은 정수중의 감항성 확보만을 의미하는 것이다. 다시 말해서 기상 변화에 따른 불규칙한 해상에서 야기될 수 있는 여러 가지 위험 현상을 감안한 항해 안전성을 확보하였다고는 할 수가 없다. 대양을 항해하는 선박에서는 청파 현상(Deck wetness)에 의한 갑판, 화물, 구조물의 손상, 프로펠러 노출에 의한 주기의 레이싱, 대동요에 의한 화물의 붕괴, 슬래밍에 의한 선저의 손상, 대가속도에 의한 화물의 손상, 과대한 굽힘 모멘트에 의한 선체의 파손, 자연적 감속에 의한 조종의 불가능성 등의 위험 현상이 발생할 수 있기 때문이다<sup>1)</sup>. 이러한 파랑중 선박에서 야기될 수 있는 위험 현상을 고려하여 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표로는 종합내항성능지표가 있다. 이 종합내항성능지표는 선박 고유의 파랑중 성능만을 평가하는 것이 아니고,

승무원-선체 및 탑재기기(항해 장비, 추진 기관)로 된 인간-기계 시스템(Man-Machine System)으로서의 선박의 파랑중 성능을 평가할 수 있다<sup>2)</sup>.

따라서 본 연구에서는 파랑중을 항해하고 있는 선박의 항해 안전성을 적화 상태로 구분하여 종합내항성능지표를 이용하여 평가하였다. 본 고에 사용된 종합내항성능지표는 기존의 내항성능 평가요소중 계측이 편리한 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 계산하였다. 계산된 결과는 선박의 침로별, 선속별, 적화 상태별로 안전 범위와 위험 범위를 레이더 화면상에 표시할 수 있는 평가도에 해상 상태별로 나타내어 항해 안전성을 판정하였다.

## 2. 종합내항성능지표의 정의

현재까지 연구되어진 바에 따르면, 파랑중을 항해하는 선박 시스템의 내항성능을 평가할 수 있는 요소의 한계발생확률은 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( $Q_{Pr}=10^{-1}$ )에 도달하는 것과 같은 값으로 변환하여 평가한다. 즉, 각 내항성능 평가요소의 위험도가 프로펠러 레이싱의 발생 확률과 동일하게 되는 각 요소의 평가치( $E_i$ )에 대한 변환 평가치( $\overline{E}_i$ )를 다음과 같이 계산한다<sup>3),4)</sup>.

### 2.1 평가치 및 변환 평가치

파랑중을 항해하는 선박의 내항성능을 평가할

수 있는 현상의 발생은 임의 내항성능 평가요소인 확률 과정  $X_i(t)$ 가 어떤 한계치  $X_{ic}$ 를 초과할 때 일어난다. 이 확률 과정  $X_i(t)$ 의 시간적 변동은 정상 가우스 과정(Gaussian process)이며, 그 수학적 평균치는 0인 것으로 알려져 있다. 따라서 임의 내항성능 평가요소의 극치 분포는 Rayleigh 분포에 따르며, 그 발생 확률을  $Q(X_i)$ 라고 하면 임의 내항성능 평가요소의 평가치  $E_i$ 는 다음과 같이 정의된다<sup>5)~7)</sup>.

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

여기서,  $\sigma_i$  : 내항성능 평가요소(i)의 표준편차

그리고 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치 ( $\tilde{E}_P$ )는 다음과 같다.

$$\tilde{E}_P = \frac{E_P}{\alpha_{PP}} = E_P \cdot \frac{E_{Pc}}{E_{Pc}} = E_P \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $E_P$  : 프로펠러 레이싱의 평가치

$\tilde{E}_P$  : 프로펠러 레이싱의 변환 평가치

$E_{Pc}$  : 프로펠러 레이싱의 한계 평가치

$$\alpha_{ij} = \frac{E_{jc}}{E_{ic}} = \left[ \frac{X_{ic}}{\sigma_{ic}} \right] / \left[ \frac{X_{jc}}{\sigma_{jc}} \right]$$

프로펠러 레이싱 이외의 평가요소에 대한 변환 평가치( $\tilde{E}_i, \tilde{E}_j$ )는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \tilde{E}_i &= \frac{E_i}{\alpha_{pi}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_i = \mu_i \cdot E_{Pc} \\ \tilde{E}_j &= \frac{E_j}{\alpha_{pj}} = \frac{E_{Pc}}{E_{jc}} \cdot E_j = \mu_j \cdot E_{Pc} \end{aligned} \dots\dots (3)$$

여기서,  $\alpha_{pi}$  : 프로펠러 레이싱과 i 요소의 한계 평가치의 비

$\mu_i$  : i 요소의 위험도 (=  $E_i/E_{ic}$ )

## 2.2 종합내항성능지표의 정의

앞에서 제안한 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치를 이용하여, N개의 내항성능 평가요소로 구

성되는 선박 전체 시스템의 변환 평가치( $\tilde{E}_T$ )와 한계 평가치( $E_{Tc}$ )를 정리하고, 이를 이용하여 종합내항성능지표( $\mu_T$ )를 다음과 같이 정의한다<sup>8)~10)</sup>.

먼저, 선박 전체 시스템의 변환 평가치  $\tilde{E}_T$ 는 신뢰도 함수  $P_T$ 를 이용하여 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\tilde{E}_T = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(1 - \tilde{P}_T)}} \dots\dots\dots (4)$$

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

그런데, 각 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\tilde{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{pi}}{E_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{pi} \cdot X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q(X_i) \alpha_{pi}^2 \end{aligned} \dots\dots (5)$$

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

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

$$E_{Tc} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(1 - P_{Tc})}} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

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

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

$P_{Tc}$  : 내항성능 신뢰도 함수

$Q_{X_i}$  : 내항성능 평가요소(i)의 한계발생확률

따라서 선박 시스템 전체의 항해 안전성을 평가하기 위해서는 식 6의 한계 평가치( $E_{Tc}$ )와 식 4의 변환 평가치( $\tilde{E}_T$ )의 비를 종합내항성능지표  $\mu_T$ 로 정의하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_T = \frac{\widetilde{E}_T}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{Tc})}{\ln(1 - \widetilde{P}_T)}} \dots\dots\dots(7)$$

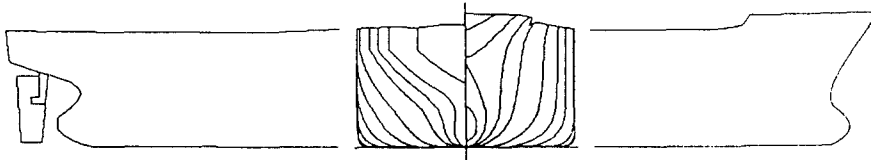
여기서, 종합내항성능지표  $\mu_T$ 가 1과 같으나 큰 경우 선박 시스템 전체는 위험하게 되고,  $\mu_T$ 가 1보다 작은 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다. 또한, 이  $\mu_T$ 는 내항성능 평가요소중 1개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우,  $\mu_T$ 도 1보다 크게 되는 성질을 가지고 있다. 따라서  $\mu_T$ 는 내항성능 평가요소의 최대 위험도와 근사하는 값이 된다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능 평가요소의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있어, 간편하고 편리한 하드웨어 제작에 여러가지 이점이 있을 것으로 판단된다.

### 3. 종합내항성능지표를 이용한 항해 안전성 평가

#### 3.1 수치 계산의 조건

본 연구의 수치 계산에 사용한 대상 선형은 Lpp=259m, 만재 배수량 170,000(ton)급 벌크선이며, 적재 상태는 하기만재 배수량 상태인 균질화물 만재상태(homogenous Loading Condition ; 99.99% 적재), 화물 반적재 상태(Half Loading Condition ; 66.48% 적재), 헤비 발라스트 상태(Heavy Ballast Condition ; 52.11% 적재), 정상 발라스트 상태(Normal Ballast Condition ; 40.26% 적재)로 구분하였다. 적재 상태별 주요목은 <표 1>에 나타난 바와 같다. 해상 상태는 Beaufort Scale 6, 7, 8, 9의 상태로

<표 1> 수치계산 대상선의 선도(Lines) 및 주요 제원



| ITEMS                  |                   | DIMENSION |          |         |         |
|------------------------|-------------------|-----------|----------|---------|---------|
|                        |                   | CASE 1    | CASE 2   | CASE 3  | CASE 4  |
| Length P.P             | Lpp (m)           | 259.0     | 259.0    | 259.0   | 259.0   |
| Breadth                | B (m)             | 43.0      | 43.0     | 43.0    | 43.0    |
| Depth                  | D (m)             | 23.80     | 23.80    | 23.80   | 23.80   |
| Mean Draft             | dm (m)            | 17.417    | 11.950   | 9.506   | 7.653   |
| Displacement Volume    | (m <sup>3</sup> ) | 163375.4  | 108605.5 | 85132.1 | 65777.6 |
| Block Coefficient      | CB                | 0.8411    | 0.8411   | 0.8411  | 0.8411  |
| Length-Breadth Ratio   | L/B               | 6.023     | 6.023    | 6.023   | 6.023   |
| Breadth-Draft Ratio    | B/D               | 2.469     | 3.598    | 4.523   | 5.619   |
| Center of Buoyancy     | lcb               | 3.236     | 4.232    | 4.550   | 4.725   |
| Height of C.G.         | KG(m)             | 13.55     | 10.28    | 11.84   | 12.13   |
| Metacentric Height     | GM(m)             | 4.16      | 6.52     | 8.24    | 10.45   |
| Rolling Period TR      | (sec)             | 16.908    | 13.506   | 12.014  | 10.668  |
| Propeller Diameter     | Dp(m)             | 8.00      | 8.00     | 8.00    | 8.00    |
| Propeller Pitch Ration | P                 | 0.7637    | 0.7637   | 0.7637  | 0.7637  |
| Propeller Immersion    | (%)               | 219.38    | 156.0    | 141.25  | 114.25  |

단파정 불규칙파중에서 계산을 행하였다. 각 해상 상태에 대한 평균 파 주기와 유의 파고( $H_{1/3}$ )는 <표 2>에 나타낸다. 단파정 불규칙파와 선박의 만남각  $\chi$ 는 선수 정향파로부터 30°의 간격으로 선미 추파까지 7개의 상태에 대해서 계산을 행하였다. 선속은  $F_n=0.125(12.2\text{kts})$ ,  $F_n=0.15(14.7\text{kts})$ 로 구분하여 계산하였으며, 해상 상태에 따른 자연적 감속은 고려치 않았다.

<표 2> Beaufort scale에 따른 평균파주기 및 유의 파고

| Beaufort Scale | 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                                 |

3.2 상하 가속도를 계측한 종합내항성능지표

식 7에서 정의된 종합내항성능지표는 기존의 내항성능 평가요소중 한 개의 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 기존 내항성능 평가요소중 계측성이 편리하고, 승무원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가한다. 식 5의  $\tilde{P}_i$ 는 상하 가속도를 계측하여 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 평가 지표  $\mu_T$ 를 계산하는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} \tilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{pi} X_{AV}}{\beta_i \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{AVi} X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic} E_{AVc}}{E_{Pc} E_{ic}} \cdot \frac{X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \cdot \frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q\left(X_{AV}\right) \left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}}\right)^2 \end{aligned} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

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

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

$\mu_{AVi}$  : 상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도

$\alpha_{PAV}$  : 프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의 한계평가치의 비

그런데 프로펠러 레이싱과 상하 가속도의 한계 발생확률이 각각  $Q_{Pc}=10^{-1}$ ,  $Q_{AVc}=10^{-3}$  이므로,  $\alpha_{PAV}=1/\sqrt{3}$ 된다. 따라서 식 8은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\tilde{P}_i = 1 - Q(X_{AV}) \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\mu_{AVi}}\right)^2 \dots\dots\dots (9)$$

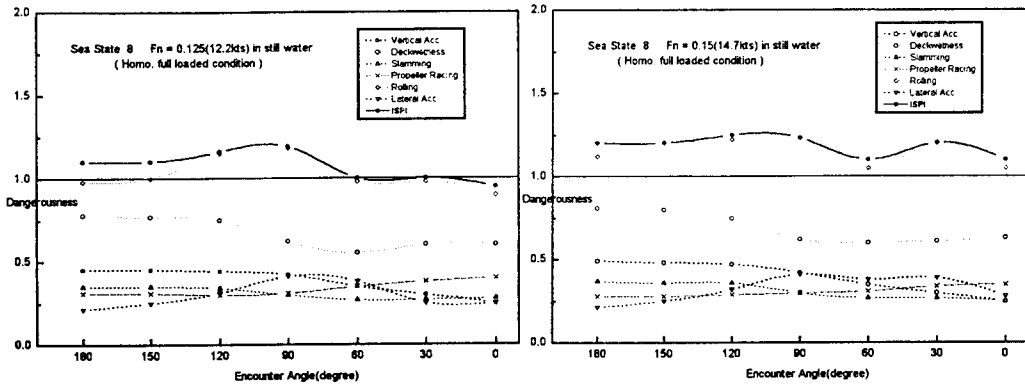
3.3 종합내항성능지표에 의한 적제 상태별 항해 안전성 평가

그림 1~4은 대상 선형인 벌크선이 적제 상태별로 일정한 속력으로 항해하는 경우, 각 해상 상태에 따른 침로별 종합내항성능지표( $\mu_T$ )를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 각 그림의 (a)는 내항성능 평가요소의 위험도( $\mu_i$ )와 종합내항성능지표( $\mu_T$ )를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 선박과 파의 만남각( $\chi$ )으로,  $\chi=180^\circ$ 은 선수 정향파,  $\chi=90^\circ$ 은 정횡파,  $\chi=0^\circ$ 은 선미 추파를 나타내고, Y축은 내항성능 위험도를 표시하였다. 그림의 실선은 종합내항성능지표를 나타내며, 각 점선은 각 내항성능 평가요소의 위험도를 나타내고 있다. 각 그림의 (b)는 해상 상태에 따른 항해 안전성을 컴퓨터 화면이나 레이더 스크로프 상에 화상 처리하여 편리하게 사용할 수 있도록 좌표의 원점을 위험도 0으로 하여 시각적으로 쉽게 판정할 수 있도록 개발한 평가도이다. 그리고 굵은 실선의 반원은  $\mu_T=1$ 로서 종합내항성능지표의 한계 위험치를 나타내고, 각 실선은 침로별 종합내항성능지표를 나타낸다. 각 그림에서 종합내항성능지표가 한계치인  $\mu_T=1$ 의 반원을 초과하는 경우 선박은 위험한 상태가 된다.

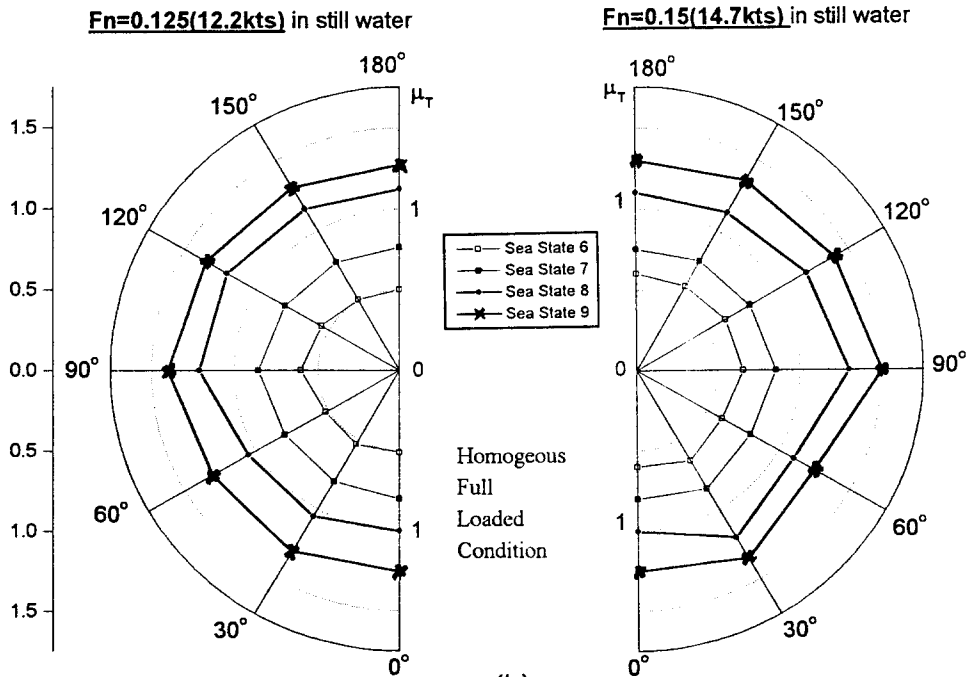
(1) Case I: 균질 화물 만재 상태 (99.99% 적재)

그림 1(a), (b)는 대상 선박인 벌크선이 적화 계수(stowage factor) 41.2인 화물을 만재한 상태로 속력  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$ 로 주어진 해상상태를 항해할 때, 식 7의 종합내항성능지표( $\mu_T$ )를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 그림 1의 (a)에서 해상 상태 8의 경우를 보면, 전 만남각에서 횡동요가 선박에 위험을 주는 주요소이며, 종합내항성능

지표가 대부분의 만남각에서 1를 초과하고 있어서 위험한 상태를 나타내고 있다. 그림 1(b)의 경우에는 해상 상태를 6, 7, 8, 9로 확대하여 계산하였는데, 해상 상태 6, 7에서는  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$  공히 종합내항성능지표가 1보다 작아 안전한 영역에 있다. 그러나 해면 상태 8, 9에 이르면 전 만남각에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 것으로 평가된다.



(a)



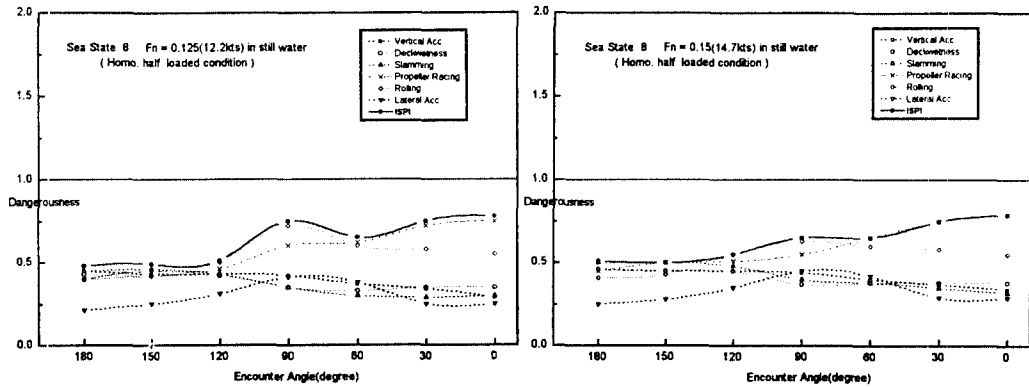
(b)

그림 1. 화물 만재 상태의 항해 안전성 평가도

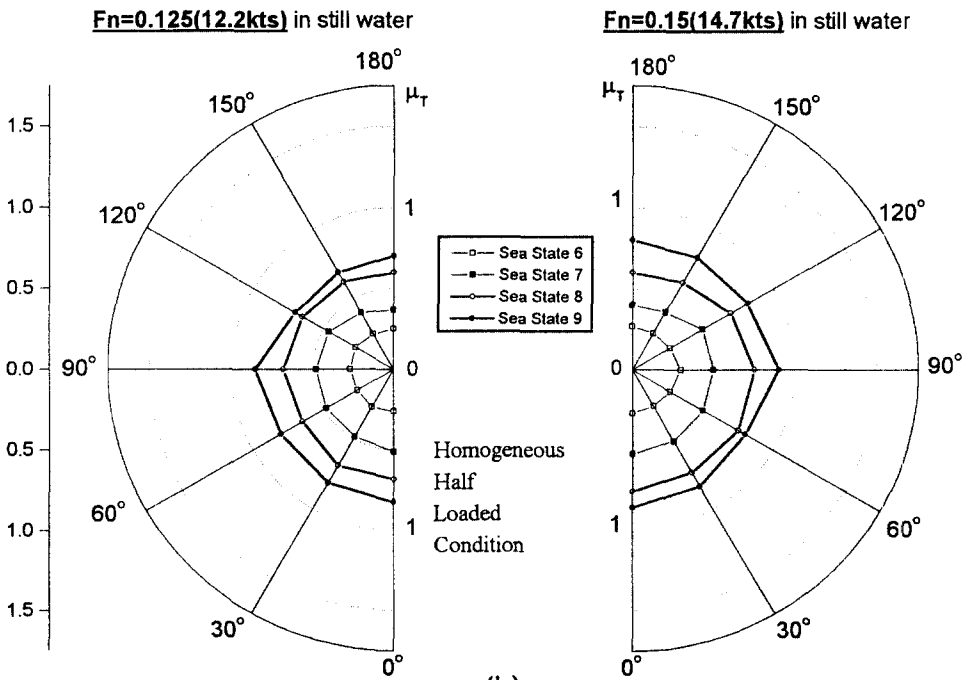
(2) Case II: 화물 반적재 상태 (66.48% 적재)

그림 2의 (a), (b)는 벌크선이 적화 계수 19인 화물을 부분 적재한 상태로 속력  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$ 로 주어진 해상 상태를 항행할 때의 종합내항성능지표를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 그림 2의 (a)에서 해상 상태 8의 경우를 보면, 선수파에서 정횡파 부근까지는 횡동요, 정횡파에서

선미파까지는 프로펠러 레이싱의 위험도가 크지만, 종합내항성능지표가 전 만남각에서 1보다 작아 안전한 상태임을 나타내고 있다. 그림 1의 (b) 경우 해상 상태를 6, 7, 8, 9로 확대하여 계산하였는데, 모든 해상 상태에서  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$  공히 종합내항성능지표가 1보다 작아 안전한 영역에 있음을 알 수 있다.



(a)



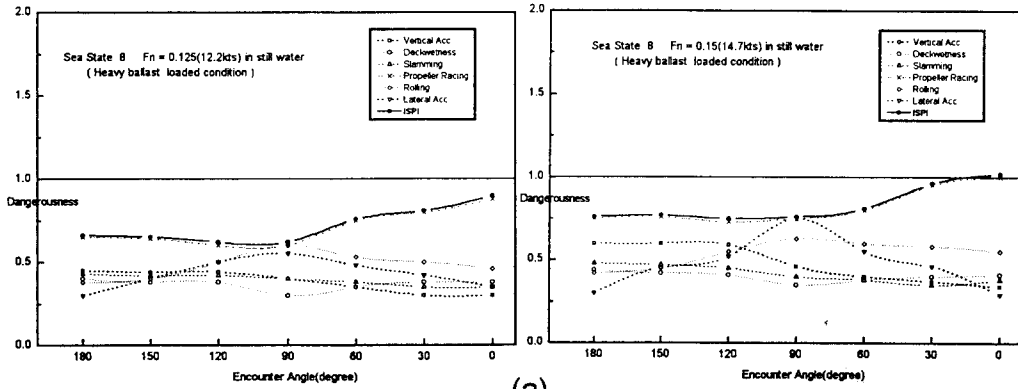
(b)

그림 2. 화물 반적재 상태의 항해 안전성 평가도

(3) Case III : 헤비 발라스트 상태 (52.11% 적재)

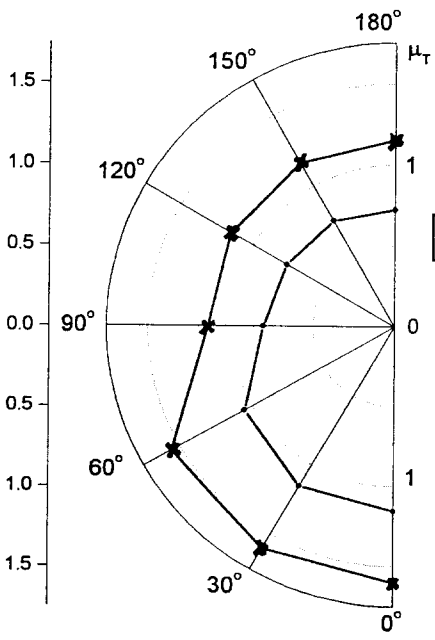
그림 3(a), (b)는 벌크선이 각 발라스트 탱크와 6번 화물창에 발라스트를 만재한 상태로 속력  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$ 로 항해할 때의 종합내항성능지표를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 그림 3(a)에서 해상 상태 8의 경우, 전 만남각에서 프로펠러 레이싱이 선박에 위험을 주는 주요 소이다. 선속  $F_n=0.125$ 에서는 종합내항성능지표가 전 만남각에서 1보다 작아 안전한 상태이나,  $F_n=0.15$ 가 되면 선미파 부근에서 종합내항성능지

표가 1을 초과하여 위험한 상태가 초래됨을 알 수 있다. 그림 3(b)의 경우 해상 상태를 6, 7, 8, 9로 확대하여 계산하였는데, 해상상태 6, 7, 8,  $F_n=0.15$ 의 경우, 해상 상태 8의 선미파 부근을 제외하고  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$  공히 종합내항성능지표가 1보다 작아 안전한 것으로 평가되었다. 그러나 해상 상태 9에 이르면,  $F_n=0.125$ 인 경우는  $\chi=45^\circ \sim 0^\circ$ 에서,  $F_n=0.15$ 인 경우는  $\chi=65^\circ \sim 0^\circ$ 에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 것으로 평가되었다.

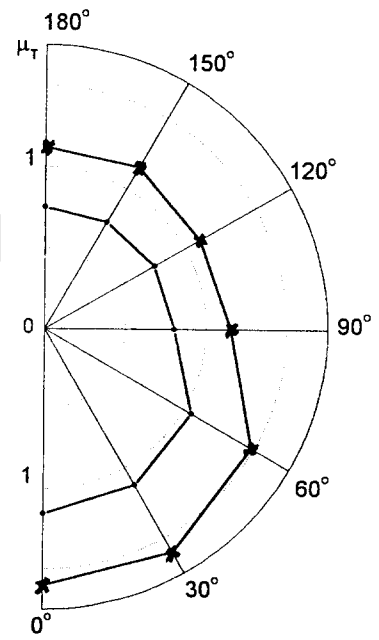


(a)

**$F_n=0.125(12.5kts)$  in still water**



**$F_n=0.15(14.7kts)$  in still water**



(b)

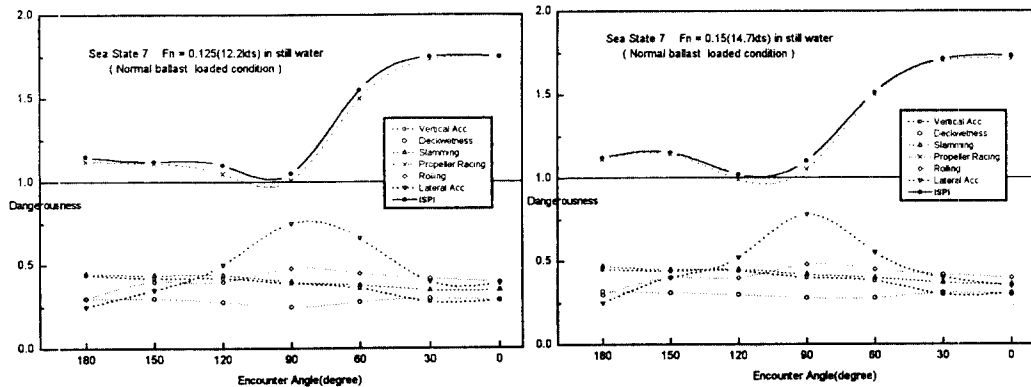
그림 3. 헤비 발라스트 상태의 항해 안전성 평가도.



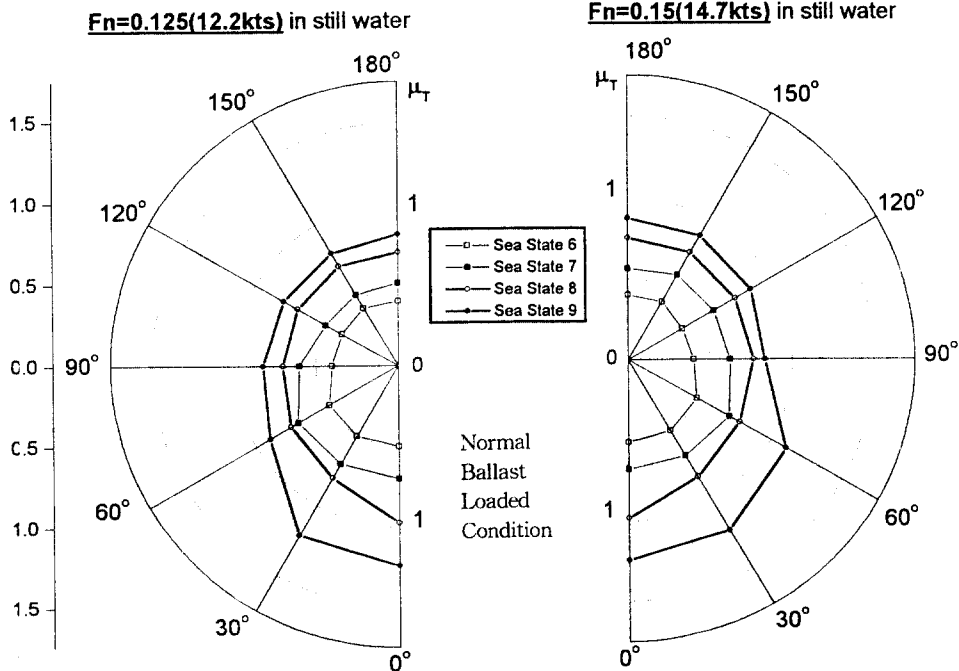
(4) Case IV : 정상 발라스트 상태 (40.26% 적재)

그림 4의 (a), (b)는 벌크선이 각 발라스트 탱크에 해수를 적재한 상태로 속력  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$ 로 해면 상태 6, 7을 항행할 때의 종합내항성능지표를 이용하여 항해 안전성을 나타낸 평가도이다. 그림 4의 (a)에서 해상 상태 7의 경우 전 만남각에서 프로펠러 레이싱이 선박에 위험을 주는 주요소임을 알 수 있다. 그리고 속도에 관계없이 전 만남

각에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태임을 나타내고 있다. 그림 1의 (b) 경우 해상 상태를 6, 7로 확대하여 계산하였는데, 해면 상태 6에서는  $F_n=0.125$ ,  $F_n=0.15$  공히  $\chi=60^\circ \sim 0^\circ$ 에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해면 상태 7에 이르면 그 위험 범위가 확대되어, 전 만남각에서 종합내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다.



(a)



(b)

그림 4. 정상 발라스트 상태의 항해 안전성 평가도

이상을 종합해 볼 때, 화물 적재 상태에 따라 달라지는 배수량의 차이에서 오는 항해 안전성 평가의 특징은 화물 반적재 상태(66.48% 적재)보다 균질 화물 만재 상태(99.99% 적재)에서의 종합내항 성능지표가 높다는 것이다. 그리고 헤비 발라스트 상태(52.11% 적재)로 항해하는 경우가 정상 발라스트 상태(40.26% 적재)인 경우보다 안전하다. 이것은 배수량이 증가함에 따라 종합내항성능지표가 감소하다가 다시 위험해지는 한계 배수량이 존재한다고 생각된다. 배수량이 하기 만재 배수량에 접근하면 상대적으로 건현이 줄어들게 되어 내항성능 평가요소중 횡방향 운동으로 인한 위험 현상의 발생 확률이 높고, 발라스트 항해의 경우에는 프로펠러 레이싱의 발생 확률이 높기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 여러 가지 상황을 감안할 때, 파랑을 항해하는 선박의 운항자는 주어진 적재 상태에서 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.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 파랑중을 항해하는 선박의 상하 가속도를 계측하여 종합내항성능지표를 계산하고, 이를 이용하여 적화 상태별로 항해 안전성을 평가하였다. 이상의 연구 결과를 종합하여 보면, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 기존의 내항성능 평가요소중 계측이 편리한 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 종합내항성능지표를 계산하였다. 이 평가 방법을 이용함으로써 적재 상태에 관계없이 종합적인 선박의 항해 안전성을 평가할 수 있다.
- (2) 기존의 내항성능 평가요소중 상하 가속도만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 종합내항성능지표를 제안함으로써 하드웨어 제작시 계측상의 어려움을 해결할 수 있는 계기를 마련하였다.
- (3) 적재 상태에 따른 항해 안전성을 평가해 본

결과, 화물 반적재 상태가 다른 경우보다 안전한 것으로 평가되었다. 이것은 배수량이 하기 만재 배수량에 접근하면 상대적으로 건현이 줄어들게 되어 내항성능 평가요소중 횡방향 운동으로 인한 위험 현상의 발생 확률이 높아지기 때문인 것으로 판단된다.

- (4) 선박의 운항자는 본 연구에서 개발된 평가도를 이용하여 침로별 항해 안전성을 쉽게 파악하고, 피항 침로를 신속히 결정할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- [1] 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
- [2] 김순갑·공길영：선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구，한국항해학회지，제21권，제2호，1997. 6
- [3] 關西造船協會編：造船設計便覽，海文堂，1983，pp.422-434
- [4] V.V.보로친：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)
- [5] 金順甲·內藤 林：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)
- [6] Edward N. Comstock·Robert G. Keane：Seakeeping by design, Naval Engineers Journal, p.157, April 1980
- [7] A.R.J.M. LLOYD：Seakeeping；Ship Behaviour in Rough Weather, Ellis Horwood Limited, 1989, pp.337-339
- [8] Edward V. Lewis：Principles of Naval Architecture(Vol. III), SNAME, 1989, pp.137-159
- [9] Lewis E.V.：The Status of Merchant Ship Seakeeping Reserch, Proc.19th ATTC, Vol.1, 1980.7
- [10] W.G. Price and R.E.D. Bishop：Probabilistic Theory of Ship Dynamics, London Chapman and Hall, 1974