

論 文

황천항해중인 선수선교선의 내항성능 평가기준 설정 방안에 관한 연구
- 해난사고 실례를 통한 갑판침수 평가기준치 설정에 대한 개선방안 고찰 -

공길영*·김철승**

A Methodology to Provide the Criterion for the Seakeeping Performance of a Fore-Bridge-Ship in Rough Seas

- The Problem on the Application of the Past Deckwetness Criterion Based on the Accident of a Fore-Bridge-Ship -

Gil-Young Kong · Chol-Seong Kim***

〈 목 차 〉

Abstract	3. 수치 시뮬레이션 방법
1. 서론	3.1 내항성능평가요소와 기준치의 설정
2. 종합내항성능지표에 항해안전성 평가	3.2 계산항목 및 계산조건
2.1 내항성능평가요소의 분산치	4. 수치 시뮬레이션 결과 분석
2.2 내항성능평가요소의 발생확률 및 한계 표준편차	5. 선수선교선에 대한 갑판침수 평가기준치 설정에 대한 개선방안
2.3 내항성능평가요소의 평가치 및 위험도	6. 결 론
2.4 종합내항성능지표	참고문헌

Abstract

The wheelhouse front glass of a Fore-Bridge-Ship (Ro-Ro Ship) was broken by the shipping of water in rough seas, and then the flooding of seawater into the wheelhouse caused the uncontrollable condition of the ship. The hull which was entered into the floating condition rolled severely, and the

* 한국해양대학교 운항시스템공학부

** 고베상선대학 상선학부 해사시스템과학전공

heavy rolling caused secondary damage such as the collapse of a lot of cargo. It was an incredible accident because the height of bow freeboard was about 2.5 times higher than the standard height of minimum bow freeboard regulated by the International Load Line Convention(1966). And it would be also difficult for navigators to imagine a great deal of seawater flooding into the wheelhouse because the front glass was positioned at about 20m height above the sea surface.

In this paper, we carried out the evaluation for the safety navigation of the Fore-Bridge-Ship numerically against ship's speed and encountering angle to the wave in each sea state of rough sea, by using the integrated seakeeping performance index (ISPI) which is able to evaluate synthetically the safety operation of ships. And then the problem on the application of the past criteria proposed as the safety navigation of a merchant ship was clarified by inquiring the dangerousness of the shipping of water at her bow deck, which caused the breakage of the wheelhouse front glass.

1. 서론

황천중을 선수 정향파를 받으며 미속 항해중이던 선수선교선(Ro-Ro선)에서 조타실 전면 창유리가 선수 갑판상의 침수현상(Deck wetness)으로 인하여 파손되는 사고가 발생하였다. 이 사고는 단순히 창유리의 파손으로 끝나지 않고 조타실로 대량의 해수가 유입되어 조타실내의 전기 계통의 마비를 초래하였다. 이로 인하여 선박은 조종불능 상태로 이어지고, 결국 표류상태로 된 선체는 격심한 횡동요가 발생하여 조타실내 각종 항해장비의 파손과 화물창 내 적재 화물의 붕괴 등 이차적인 피해를 입었다. 이 사고 선박의 특징은 사고 당시 수면상 선수 건현의 높이가 약 14.7m로 현재 규칙의 개정 작업이 진행되고 있는 1966년 국제만재출수선조약에서 정하고 있는 최소 선수 건현 기준치의 약 2.5배 정도였다¹⁾. 그리고 조타실 창유리는 선수 갑판에서 약 5m의 높이에 설치되어 있어 조타실 창유리의 실제 수면상 높이는 약 20m였다.

일반적으로 선수선교선은 선미선교선에 비하여 선수부에서의 파랑충격과 격심한 갑판상 해수 침수로 인하여 운항자에게 정신적인 스트레스를 보다 강하게 줄뿐 아니라, 통상 선체는 선수부분이 선미부분보다 상가속도의 변동량이 크게 발생하므로 운항자는 물리적인 부담을 강하게 받고 있다. 더불어 선체중에서 가장 높은 위치의 조타실에 대량의 해수 침입이 발생하는 현상은 운항자가 예상하기 어려운 사고이므로

이러한 종류의 선체 갑판상 침수에 대한 평가기준은 이것에 직면하는 운항자의 입장에서 충분한 연구 조사를 할 필요가 있다고 생각되어진다.

따라서 본 연구에서는 선수선교선의 내항성능평가 요소중 Deckwetness에 대한 한계치 설정을 위한 기초 연구로서, 먼저 황천 항해중인 선박의 안전운항을 종합적으로 평가할 수 있는 종합내항성능 평가법을 이용하여 사고 선박의 항해안전성을 정량적으로 평가한다. 그리고 이 평가결과와 해난사고 실례와의 비교를 통하여 항해안전성 평가기준의 합리적 설정 방안에 대하여 논한다. 단파장 불규칙파중 각종 해상상태에서 선속 및 파와의 만남각에 대한 선수선교선의 항해안전성을 정량적으로 평가하여, 특히 조타실 창유리 파손을 초래한 선수 갑판상 해수 침수에 관한 평가결과 및 해수 침수로 인한 선박운항의 위험도가 종합내항성능지표에 미치는 영향을 조사함으로써 선수선교선에 대한 기존의 평가기준 적용상의 문제점을 파악하고자 한다.

2. 종합내항성능지표에 의한 항해안전성 평가

2.1 내항성능 평가요소의 분산치

해면의 파 에너지 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼을, 방향 성분포는 입사파의 평균진행방향에 대해서 $\pm 90^\circ$ 의 범위에서 방향성파의 성분이 분포하고 그 이외의 범

위에서는 0으로 가정하면 방향 성분을 고려한 단파정 해양파 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다²⁾.

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

$$= 0, \text{ 그 밖의 경우} \quad (1)$$

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

여기서 $H_{1/3}$ 는 유의파고, T 는 평균 파주기이며, ω 는 파의 원주파수, θ 는 파의 평균 진행 방향과 성분파가 이루는 각도이다. 또한 선박이 파랑 중을 일정속도 V_s 로 항해하고 있는 경우, 선박과 파의 만남 주파수 ω_e 는 선속에 의해서 파의 원주파수 ω 와 식 (3)과 같으므로, 만남 주파수에 대한 파의 에너지 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega_e)$ 는 파 에너지 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega)$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 변환할 수 있다.

$$\omega_e = \omega - \omega^2 V_s \cos(\chi - \theta) / g \quad (3)$$

$$S_{\zeta}(\omega_e, \chi - \theta) = S_{\zeta}(\omega) / |1 - 2\omega V_s \cos(\chi - \theta) / g| \quad (4)$$

한편, 선박이 단파정 불규칙파 중을 일정속도 V_s 로, 파에 대해서 일정 침로 x 를 유지하면서 항행하고 있는 경우, 선체운동 응답함수로부터 계산된 임의의 내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 의 주파수응답함수를 $H_{X_i}(\omega_e, V_s, \chi - \theta)$ 라 하면, $X_i(t)$ 의 스펙트럼 $S_{X_i}(\omega_e, \chi)$ 는 다음과 같다³⁾.

$$S_{X_i}(\omega_e, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |H_{X_i}(\omega_e, V_s, \chi - \theta)|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e, \chi - \theta) d\theta \quad (5)$$

또한 분산치 $\sigma_{X_i}^2$ 는 다음과 같다.

$$\sigma_{X_i}^2(\chi, V_s, S) = \int_0^{\infty} S_{X_i}(\omega_e, \chi) d\omega_e \quad (6)$$

식 (6)의 분산치를 변화시키는 변수는 선박과 파도와의 만남각 (χ), 선속 (V_s), 해상상태 (S)가 된다.

2.2 내항성능 평가요소의 발생확률과 한계표준편차

내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 가 평균치 제로의 정상 가우스 과정이라고 가정하면, 그 극치 분포는 Rayleigh 분포로 근사할 수 있다. 따라서 임의의 평가요소의 분산치 $\sigma_{X_i}^2$ 이 구해지면, 확률과정 $X_i(t)$ 의 극치가 어떤 일정치 X_1 을 초과할 발생확률 Q_{X_i} 는 다음과 같다⁴⁾.

$$Q_{X_i} = \int_{X_1}^{\infty} \left(\frac{X}{\sigma_{X_i}} \right) \exp \left(-\frac{X^2}{2\sigma_{X_i}^2} \right) dX \quad (7)$$

이것을 표준편차 σ_{X_i} 에 관하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{X_i} = \sqrt{\frac{-X_1^2}{2 \ln Q_{X_i}}} \quad (8)$$

한편, 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때에 그 현상이 발생하고, 그 발생확률이 주어진 한계 발생확률을 초과할 때 선박은 파랑중에서 그 기능을 잃거나 위험하게 된다. 이와 같은 각 내항성능 평가요소의 시스템적 결함은 직렬 결함 구조로서, 한 개의 요소라도 그 발생확률이 한계발생확률을 초과할 경우 선박은 내항성능 면에서 위험한 상태가 된다. 따라서 식 (8)의 X_1 에 각 평가요소의 한계치 X_{ic} 를, 발생확률 Q_{X_i} 에 한계발생확률 $Q_{X_{ic}}$ 를 적용하면, 각 평가요소가 위험하게 되는 한계표준편차 $\sigma_{X_{ic}}$ 를 구할 수 있다.

$$\sigma_{X_{ic}} = \sqrt{\frac{-X_{ic}^2}{2 \ln Q_{X_{ic}}}} \quad (9)$$

2.3 내항성능 평가요소의 평가치와 위험도

임의의 내항성능 평가요소의 극치 분포는 Rayleigh 분포로서, 그 발생확률을 Q_{X_i} 라고 하면, 이 경우 표준편차로서 무차원화한 한계치의 역수를 X_i 요소의 평가

치 E_{X_i} 라 정의한다⁵⁾.

$$E_{X_i} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln Q_{X_i}}} = \left[\frac{\sigma_{X_i}}{X_{ic}} \right] \quad (10)$$

식 (10)에서 평가치 E_{X_i} 가 0이 되면 X_i 요소의 신뢰도는 1이 되고, E_{X_i} 가 무한대가 되면 X_i 요소의 신뢰도는 0이 되는 것을 의미한다.

한편, 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 정의한다.

$$\mu_{X_i} = \frac{E_{X_i}}{E_{X_{ic}}} = \frac{[X_{ic}/\sigma_{X_i}]}{[X_{ic}/\sigma_{X_i}]} = \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_{X_{ic}}} \quad (11)$$

위험도 μ_{X_i} 는 파에 대한 만남각 (x), 선속 (V_s), 해상상태 (s)에 따라 변화한다. 한편, $\mu_{X_i} \geq 1.0$ 인 경우 X_i 요소가 위험하고, $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다.

2.4 종합내항성능지표

기존의 각 내항성능 평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 가지는 평가요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 여기에서 선박시스템 전체의 항해안전성을 평가할 수 있는 종합내항성능지표 μ_T (ISPI ; Integrated Seakeeping Performance Index)는 각 평가요소의 위험도가 같은 경우, 그 발생확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 선박 전체 시스템의 변환 평가치와 선박 전체 시스템의 한계 평가치를 사용하여 다음과 같이 정의된다⁶⁾.

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

여기서, \tilde{E}_T : 선박 전체 시스템의 변환 평가치
 E_{Tc} : 선박 전체 시스템의 한계 평가치

여기에서 종합내항성능지표 μ_T 는, $\mu_T \geq 1.0$ 인 경우

선박 시스템 전체는 위험하게 되고, $\mu_T < 1.0$ 인 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다. 또한 이 μ_T 는 내항성능 평가요소중 한 개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우, μ_T 도 1보다 크게 되는 성질을 가지고 있다.

3. 수치 시뮬레이션 방법

3.1 평가요소와 그 기준치의 설정

2장에서 정의한 종합내항성능지표는 선박의 운항면에서의 안전성을 종합적으로 평가할 수 있는 내항성능 평가법으로서, 항해중인 선박의 안전성을 위협하는 선체운동 응답의 제 현상을 평가요소로 하고, 이러한 평가요소에 대한 운항한계의 정도를 나타내는 수치, 즉 기준치 (한계치 및 한계발생확률)의 설정이 필요하다.

항해 안전성을 종합적으로 평가하기 위한 평가요소의 선정에 있어서, 항파중 갑판상 해수 침입, 슬래밍, 프로펠러 레이싱, 상하 가속도, 중 굽힘 모멘트 등의 선체운동 응답의 제 현상뿐만 아니라, 횡파중 횡동요, 좌우 가속도, 비틀림 모멘트 등의 고려도 필요하다. 그리고, 이러한 평가요소들의 중요도는 선박의 종류 및 파와의 만남각에 따라서 달라지므로, 본 수치 시뮬레이션에서는 선박의 종류에 의한 중요도의 차이를 조사하여 일례를 표시한 문헌을 참고로 하여 표 1과 같이 6개의 평가요소를 선택하였다⁷⁾.

각 평가요소의 기준치 설정은 선박의 종류, 크기 및 적재상태 등에 의해서 달라지므로 평가대상 선박인 선수선교선에 적합한 기준치를 따로 정하는 것은 상당히 곤란한 문제이다. 하지만, 본 연구는 수치 시뮬레이션을 실시하여 기존에 제안된 평가기준의 적용상의 문제점을 추출하는 것이 주요한 목적이므로, 지금까지 제안되어 있는 운항한계에 관한 기준치를 참고로 하여 6개 각 평가요소에 대한 기준치를 설정하였다⁸⁾. 더욱이 선수선교선에 대한 특정한 기준치는 제안되어 있지 않기 때문에 본 수치 시뮬레이션에서는 일반 상선을 대상으로 제안된 기준치를 이용했다. 각 평가요소의 기준치 (한계치 및 한계발생확률)는 Table 1에

Table 1. Seakeeping Criteria

내항성능 평가요소	한계치	한계발생확률	참고문헌
선수 갑판상에의 해수 침입 (X_D)	선수단 건현 높이 (단, 정적 수위상승과 동적 수위상승은 무시)	5×10^{-2}	NORDFOSRK ⁹⁾ "The Nordic Cooperative Project" (1987)
프로펠러 레이싱 (X_P)	프로펠러 Blade Tip가 수면에 노출하는 경우 ¹⁰⁾	10^{-1}	Kitazawa ¹¹⁾ (1975)
슬래밍 (X_S)	S.S.8 _{1/2} 에서 노출된 선저의 파면에 대한 상대속도가 Threshold Velocity를 초과하는 경우 단, $V_{Th} = 0.09\sqrt{gL}$ ¹²⁾	2.5×10^{-2}	NORDFOSRK ⁹⁾ (1987)
상하가속도(X_{Av})	0.56g (선교)	10^{-3}	NORDFOSRK (1987)
횡 동요 (X_R)	22.5°(선체중심)	10^{-3}	NORDFOSRK ⁹⁾ (1987)
좌우가속도 (X_{Al})	0.38g (선교)	10^{-3}	Comstock ¹³⁾ (1980)

주 : g는 중력가속도, L은 수선간장을 나타낸다.

표시하였다. 단, 참고문헌에 따라서 기준치의 표현에는 다소 차이가 있고, 특히 상하 가속도, 좌우 가속도, 횡 동요 등이 유의치 또는 표준편차를 사용하여 설정되어 있다. 그래서 이러한 요소들에 대해서는 한계발생확률을 설정하고, 각각의 유의치 또는 표준편차를 역산해서 한계치로 적용하여 사용했다.

3.2 계산항목과 계산조건

수치 시뮬레이션에 사용한 대상 선박의 주요목은 Table 2에 표시한다. 사고당시 이 선박은 거의 만재 상태였고, 선수 흘수는 4.55m 이었다. 그리고 각 내항성능 평가요소의 위험도 및 종합내항성능지표를 변화시키는 변수는 선속, 만남각 및 해상상태이므로, 이것들에 관해서는 Table 3에 나타낸 계산조건에 따라서 수치 시뮬레이션을 행하였다.

Table 2. Principal Particulars of the Fore-Bridge-Ship

ITEMS	DIMENSION
L_{bb} (m)	142.20
B (m)	24.00
D (Upper Deck) (m)	15.15
d_f (m)	4.55
d_a (m)	6.70
Δ (ton)	10,700.00
KG (m)	9.40

Table 3. The Calculating Conditions Regarding to the Items Used Numerical Simulation

계산항목	계산조건
선속 (Knots)	0, 5, 10, 15 ($Fn^* = 0, 0.075, 0.15, 0.205$)
만남각 (Degree)	180~0° (30° 간격으로 총 7방향의 만남각)
해상상태 (B. F. No.)	B. F. No.7, 8, 9, 10, 11 (총 5상태)

주 : Fn (Froude Number)

여기에서 선박과 파도와의 만남각 α 는 선수 정향파를 180°로 설정하였다. 또한, 해상상태 B. F. No.10, 11 (Beaufort Wind Scale)의 경우에는 황천중 의식적 감속을 고려하여 선속 $Fn=0, 0.075$ 의 조건에서만 계산을 하였다. 그리고 파 에너지 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼을 사용했고, 이 경우 해상상태를 표시하는 Beaufort Wind Scale과 유기파고 및 평균 파주기와의 관계는 Table 4에 보인 WMO (World Meteorological Organization) 1100 Code에 따라서 설정하였다.

Table 4. Beaufort Wind Scale and Wave Characteristics

B. F. No.	유기파고 $H_{1/3}$ (m)	평균 파주기 T (Sec)
7	4.0	7.7
8	5.5	9.1
9	7.0	10.2
10	9.0	11.6
11	11.5	13.1

4. 수치 시뮬레이션 결과

본 장에서는 각 내항성능 평가요소의 위험도 및 종합내항성능지표의 계산결과를 이용하여 선수선교선의 항해안전성을 평가한다.

그림 1~5는 각 해상상태에서 선박과 파와의 만남 각 x 에 대한 각 평가요소의 위험도 μ_{xi} 와 종합내항성능지표 μ_T 의 계산결과를 나타낸 평가도이다. 각 그림의 (a)가 $F_n=0$, (b)가 $F_n=0.075$, (c)가 $F_n=0.15$, 그리고 (d)가 $F_n=0.205$ 경우의 계산 결과이다. 또한 각 평가요소의 위험도를 나타내는 기호는 다음과 같다. μ_D 가 선수 갑판상 해수 침입(Deck wetness)을, μ_P 가 프로펠러 레이싱을, μ_S 가 슬레밍을, μ_R 가 횡 동요를, μ_{Av} 가 선교에서의 상하가속도를, μ_{At} 가 선교에서의 좌우가속도의 위험도를 나타낸다. 그리고 그림 중 굵은 실선은 μ_{xi} 와 μ_T 가 위험하게 되는 경계를 나타낸다.

그림 1은 해상상태 B. F. No.7에서 선속 및 만남각에 대한 μ_{xi} 와 μ_T 의 변화를 나타낸 것이다. 그림 (a) $F_n=0$ 과 (b) $F_n=0.075$ 의 경우에는 모든 만남각 x 에 대해서 μ_{xi} 는 1이하로 되고, 이 조건에서는 선박운항에 위험을 초래하는 요소는 없는 것으로 평가되었다. 또한, μ_T 도 모든 만남각 x 에 대해서 1이하로 되고, μ_{xi} 중의 최대치에 가까운 정도로 평가되었다. 만남각 x 에 대한 μ_{xi} 의 변화를 상세하게 분석하면, $x=180^\circ$ 의 경우에 μ_S 가 그림 (a)에서 0.6, (b)에서 0.75로 최대치로 나타나고, μ_P 도 큰 값으로 평가되었다. 이 요소들의 위험도는 정횡파 상태 $x=90^\circ$ 로 되면서 감소하는 경향이 나타나는 반면에, μ_{At} 의 값이 크게 평가되어 그림 (b)에서는 거의 1에 접근하고 있다. 그리고 추파 상태 $x=0^\circ$ 로 되면, μ_S 와 μ_P 가 다시 큰 값으로 평가되지만, 그림 (b)에서는 추파상태임에도 불구하고 μ_{At} 의 값이 최대로 평가되는 특징이 나타났다. 그러나, 선속

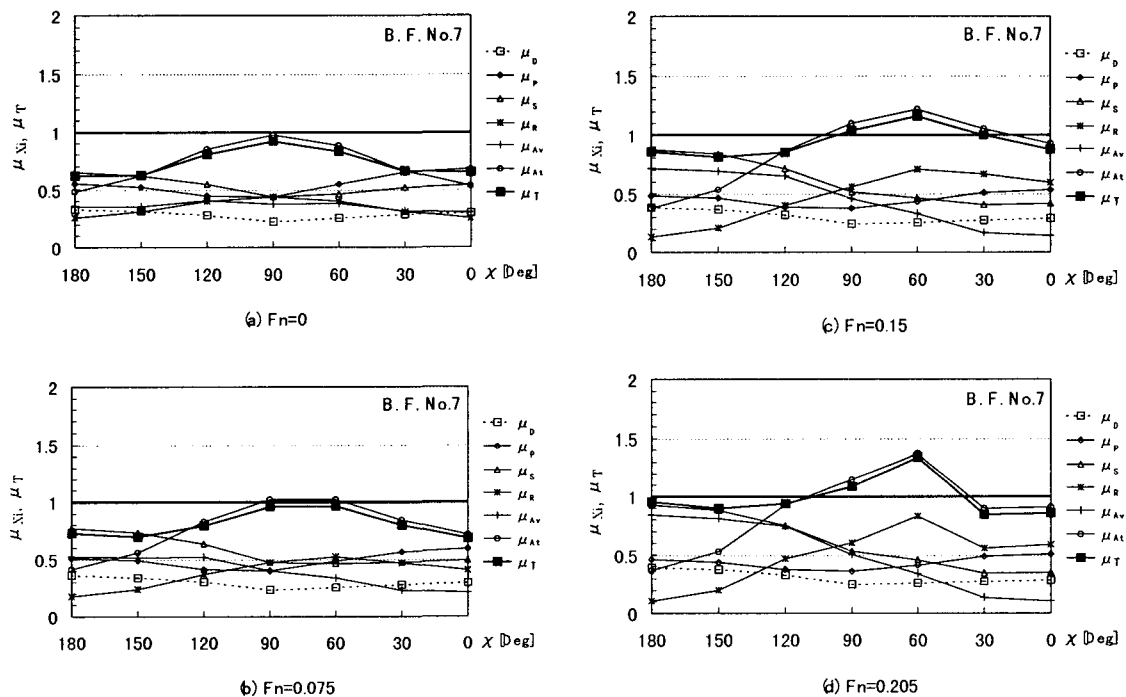


Fig.1 Dangerousness (μ_{xi}) of the Factors on Seakeeping Performance and Integrated Seakeeping Performance Index (μ_T) against the encountering angle in B. F. No.7

이 이 보다 빠른 상태인 그림 (c)와 (d)에서는 $x=90\sim 30^\circ$ 에서 μ_{At} 가 1을 초과하고, 이에 따라 μ_T 도 μ_{At} 에 가까운 값으로 되어 이 조건에서 항해하는 것은 위험한 것으로 평가되었다. 선속이 증가함에 따라 선속과 상태에서 μ_S 와 μ_{Av} 가 점차 크게 되는 경향이 나타나고, 추사와 상태에서는 μ_R 에서 그러한 경향이 명료하게 나타났다. 한편, 사고의 직접적인 원인인 선수 갑판상 해수 침입에 대한 위험도 μ_D 는 그림 (d)의 $x=180^\circ$ 의 경우에 약 0.4의 값이 최대치로 평가되었고, 선속 및 만남각에 따라서 그다지 민감하게 변화하지 않는 결과가 얻어졌다.

그림 2의 해상상태 B. F. No.8에 있어서 선속 및 만남각에 의한 μ_{Xi} 와 μ_T 의 변화를 살펴본다. 그림 (a)의 $F_n=0$ 의 경우, $x=150\sim 30^\circ$ 사이에서 μ_T 는 1을 초과하고 있고, 그 원인은 역시 μ_{At} 가 높게 나타난 것에 있다. 또한, 선속이 증가함에 따라 위험하게 되는 만남각은 확대되고, 그림 (b)에서는 $x=150\sim 0^\circ$ 까지 확대

되며, (c)의 $F_n=0.15$ 이상으로 되면 모든 만남각에서 μ_T 는 1을 초과하여 위험하게 된다. 단, 선속과 상태 $x=180\sim 150^\circ$ 에서는 μ_S 와 μ_{Av} 가, 그 밖의 만남각에서는 μ_{At} 와 μ_R 이 그 원인인 것으로 분석할 수 있다. 그러나 이 해상상태에 있어서도 μ_D 는 모든 선속 및 만남각에서 낮은 수치로 평가되고 있는 것을 알 수 있다.

해상상태가 더욱 격화되는 그림 3의 B. F. No.9의 경우에는 선속 제로의 조건에서도 모든 만남각에 대해서 μ_T 는 1을 초과하고 그 값도 한층 크게 평가되었다. 그 원인은 그림 2의 해상상태의 결과와 거의 일치하고 있지만, 그림 (c)와 (d)에 나타난 바와 같이 위험한 상태로 되는 평가요소가 2개 이상일 경우에는 μ_T 는 μ_{Xi} 중의 최대치보다 훨씬 큰 값으로 평가되는 특징이 나타났다

마지막으로 그림 4(B. F. No.10)와 그림 5(B. F. No.11)에서는 황천중 의식적 감속을 고려하여 그림 (a) $F_n=0$, (b) $F_n=0.075$ 만의 결과를 나타내었다. 그림

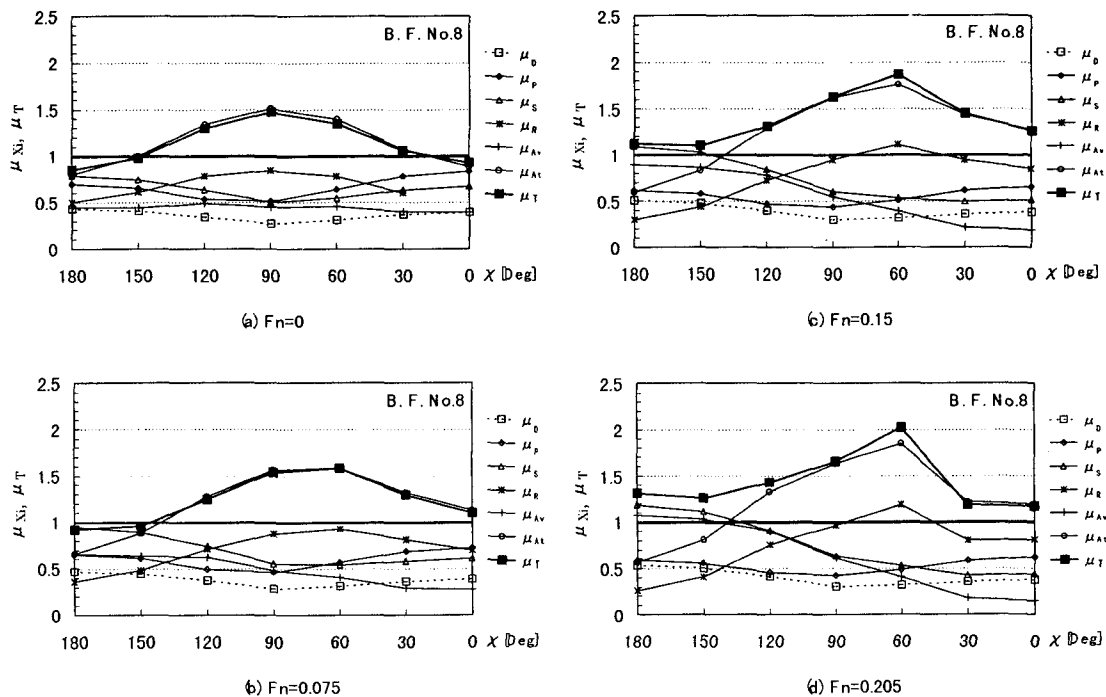


Fig.2 Dangerousness (μ_{Xi}) of the Factors on Seakeeping Performance and Integrated Seakeeping Performance Index (μ_T) against the encountering angle in B. F. No.8

에서 μ_T 는 모든 만남각에서 1을 훨씬 초과하였고, 이들 해상상태에서는 선박은 위험한 것으로 평가되었다. 그러나, 이러한 해상상태에 있어서도 μ_D 는 그림 5 (b)의 $x=180^\circ$ 에서 약 0.6 정도가 최대치로 나타나고 있다.

이상의 수치 시뮬레이션 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

B. F. No.7에서는 정횡파에서 추사파상태까지 위험영역이 나타난다. 그 원인은 선교에서의 좌우가속도가 기준치를 초과하여 발생하는, 즉 μ_{A1} 가 1을 초과한 것이다. 이 만남각을 유지하면서 항해하는 경우에는, 이 해상상태가 황천 피항을 개시하는 시점으로 되는 것을 알 수 있다. 그 밖의 만남각에서는 μ_T 는 안전하게 평가되었으므로 안전운항을 위해서는 변침을 통하여 파와의 만남각을 적절히 조종하여야 할 것이다. 또한 정횡파에서 추사파 상태로 항해하는 경우에는 항해 안전을 위하여 선속을 $Fn=0.075$ 까지 감속할 필요가

있는 것을 알 수 있다. 이 보다 해상상태가 악화되어 B. F. No.8로 되면 모든 만남각에서 μ_T 는 위험하게 평가되고, 그 원인은 선수파에서 추사파 상태까지는 좌우가속도와 횡 동요가, 선수 정향파에서는 프로펠러 레이싱과 상하가속도 등을 들 수 있다. 이 경우 안전 운항을 하기 위해서는 변침뿐만 아니라 변속도 하지 않으면 안 된다는 것을 알 수 있다. 즉, 이 해상상태가 운항자에 있어서 의식적 선속 감소를 행하는 시기로 평가된다. 해상상태가 더욱 악화되어 B. F. No.9 이상이 되면 모든 선속 및 만남각에 대하여 μ_T 는 위험하게 평가되었다. 그러나, 사고당시 해상상태에 가까운 B. F. No.10에서도 사고의 직접적인 원인인 갑판상 해수 침입에 대한 위험도 μ_D 는 낮은 수치로 평가되어 종합내항성능지표에 미치는 μ_D 의 중요도는 그다지 크지 않아, 선수선교선의 갑판상 해수 침입으로 인한 사고를 예견하기에는 다소 미흡한 점이 있다

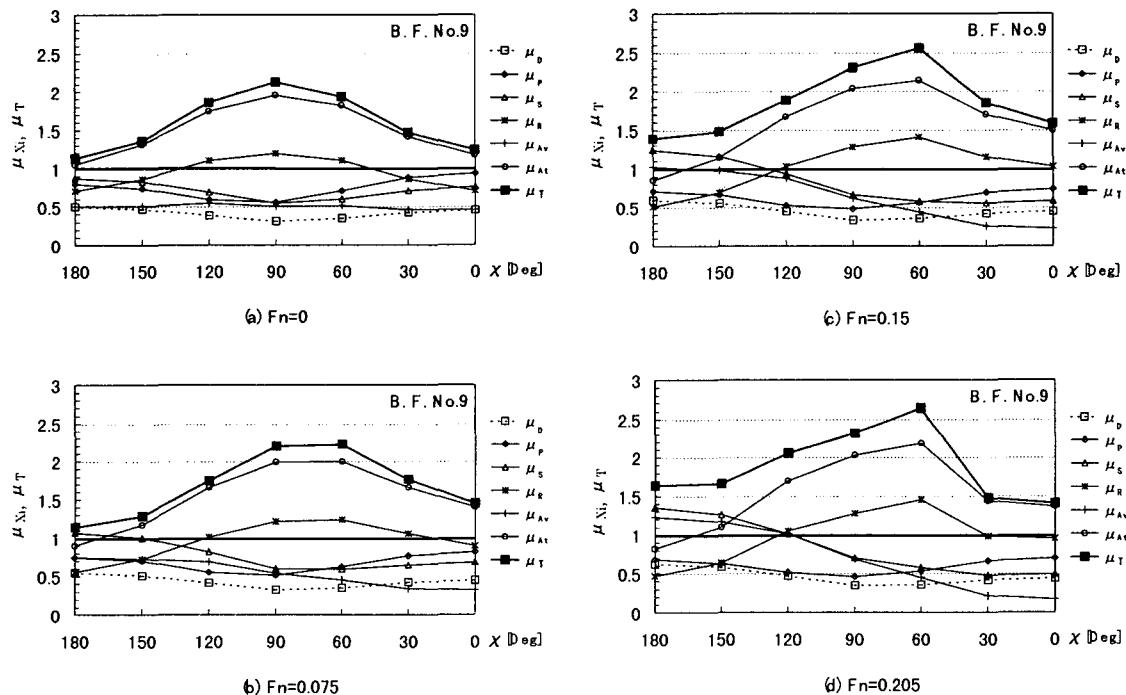
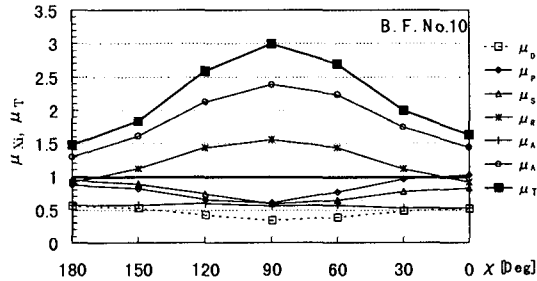
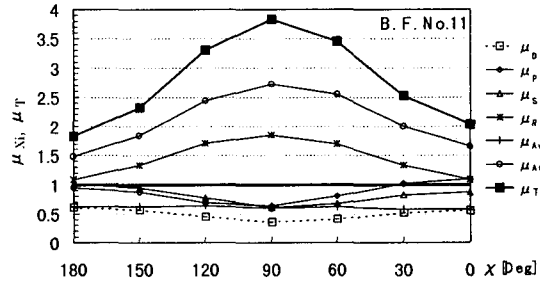


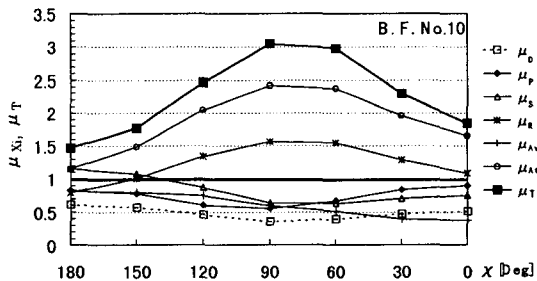
Fig.3 Dangerousness (μ_{xi}) of the Factors on Seakeeping Performance and Integrated Seakeeping Performance Index (μ_T) against the encountering angle in B. F. No.9



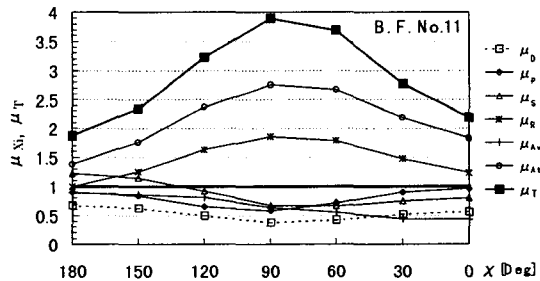
(a) Fn=0



(a) Fn=0



(b) Fn=0.075



(b) Fn=0.075

Fig.4 Dangerousness (μ_{xi}) of the Factors on Seakeeping Performance and Integrated Seakeeping Performance Index (μ_T) against the encountering angle in B. F. No.10

Fig.5 Dangerousness (μ_{xi}) of the Factors on Seakeeping Performance and Integrated Seakeeping Performance Index (μ_T) against the encountering angle in B. F. No.11

5. 선수선교선에 대한 Deckwetness 평가기준치 설정에 대한 개선방안

대형선을 대상으로 선장의 조선 판단에 관한 연구 결과에 의하면, 운항자가 황천 피항을 개시하는 풍력 계급은 B. F. No.8 정도이다¹⁴⁾. 이 연구의 조사대상 선박과 본 연구의 대상선박인 선수선교선은 선종 및 크기 등이 달라서 직접 비교하기는 다소 곤란한 점이 있지만, 수치 시뮬레이션을 행하여 얻어진 대상 선박의 항해안전성 평가결과는 황천항해중인 운항자가 해상상태에 대하여 느끼는 위험감과 정성적으로는 상당히 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 황천항해중인 운항자가 조선의 패턴으로서 이용하는 방법(풍력 계급에 따른 선속의 변화, 파와의 만남각)과 수치 시

뮬레이션에서 얻은 평가결과를 비교하면, 평가요소 중에서 선교 주변의 좌우가속도로 인한 위험도를 제외하면 큰 차이는 발견되지 않는다.

한편 선수선교선의 실제 사고 원인인 선수 갑판 상 해수 침입의 평가결과를 보면, 그 위험도 μ_D 는 모든 계산조건에서 낮은 수치로 평가되었다. 따라서 항해안전성 평가에 있어서 갑판상 해수 침입의 중요도가 무시되고, 결국 이것으로 인하여 선수선교선의 사고를 예견할 수 없는 문제점을 발견하였다. 갑판상 해수 침입에 관한 연구 결과에 의하면, 선수 건현 높이가 갑판상 해수 침입의 발생확률 또는 이로 인하여 발생하는 갑판 하중 및 갑판 침수량의 초과확률에 미치는 영향이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 사고 당시 이 선수선교선의 선수 건현 높이는 수면상 약 14.7m 이었고, 이것은 1966년 국제 만재 흡수선

조약에서 정하고 있는 최소 선수 건현의 기준치보다 약 2.5배 높은 것임을 고려하면, 이러한 결과가 얻어진 주원인은 갑판상 해수 침입의 발생확률이 낮게 나타나는 대상선박의 특징을 들 수 있다.

그러나 실제 사고 원인을 고려하면, 갑판상 해수 침입의 위험도를 크게 좌우하는 기준치 (한계치, 한계 발생확률)의 설정에 본질적인 문제가 있다고 판단된다. 그 근거로서는 먼저, 본 수치 시뮬레이션에서는 갑판상 해수 침입에 관한 기준치로서 선박의 길이를 변수로 제안한 일반 상선의 기준치를 적용하였는데, 이 기준치는 주로 선미선교선을 대상으로 설정된 것이므로 선수선교선의 특징에 적합하지 않다는 점이다. 해수 침입에 관한 기존 선미선교선의 평가대상은 주로 선수 갑판에 작용하는 침입 해수의 하중이었고, 이로 인한 선수 갑판의 손상 회피가 기준치 설정의 근거로 되어 있지만, 사고 선박이 항해안전상 현실적으로 먼저 직면한 현상은 선교 창유리의 파손이었기 때문에 다른 평가대상에 상기의 기준치를 적용한 것이 결정적인 원인인 것으로 분석된다. 이와 같이 기준치를 결정하는데 있어서 그 값이 선체 또는 의장품의 안전성, 개구부에서의 침수 방지 또는 폭로 갑판상의 구조설비의 강도 등과 어떠한 관계에 있는가를 역학적으로 충분히 검토한 후에 적용하여야 할 것이다. 예를 들면 선수선교선 사고의 경우에 선수 갑판상 해수 침입에 의한 조타실 창유리의 파손이 선박의 조종불능상태를 초래하였고, 결국 이것으로 인하여 선박은 막대한 피해를 입었다. 이 경우 조타실 창유리 파손을 초래한 해수 침입이 어떠한 경과를 가지고 발생하는가를 조사한 후, 그 발생 메커니즘을 근거로 하여 선수 건현 높이와 선수 상대 수위변동의 관계로부터 유도할 수 있는 침입 해수의 선수 갑판상 높이 또는 해수 침입의 빈도 등과 창유리 파손과의 역학적인 관계를 파악할 수 있으면, 갑판상 해수 침입 현상이 선박의 안전운항에 미치는 영향을 직접적으로 이해할 수 있고, 이러한 합리적 수법에 의해서 정해지는 항해안전성 평가기준은 황천항해중인 선수선교선의 운항자에 있어서 유용한 평가기준으로 사용될 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 종합내항성능 평가법을 이용하여 사고 선박인 선수선교선에 대한 수치 시뮬레이션을 함으로써 황천항해중 각종 해상상태에 있어서 선속, 파와의 만남각에 대한 항해안전성을 정량적으로 평가하였다. 이 계산 결과에서 밝혀진 주요한 내용은 다음과 같다.

(1) 기존 연구 결과를 참고로 하여 설정한 평가요소와 그 기준치를 사용하여 계산된 선수 선교선의 종합내항성능지표는, 대형선을 대상으로 선장의 조선판단에 관하여 연구 결과에서 보여지는 황천항해중인 운항자가 해상상태 (풍력계급)에 대해서 느끼는 위험감 및 황천조선의 패턴으로서 이용하는 방법(선속 감소, 파와의 만남각 조종)과 정성적으로 어느 정도 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 그러나, 실제 선수선교선의 사고 원인인 선수 갑판상 해수 침입에 대한 위험도는 각 해상상태에서 모든 선속, 파와의 만남각에서 낮은 레벨로 평가되었다. 결국 운항자의 항해안전성 판단에 있어서 갑판상 해수 침입에 의한 사고를 예견할 수 있는 근거를 제시해 주지 못했다.

(3) 상기 원인으로서, 먼저 대상선박의 선수 건현 높이가 기준치보다도 상당히 높아서 선수 갑판상 해수 침입의 발생빈도가 낮게 나타나고, 위험도를 크게 좌우하는 갑판상 해수 침입의 한계발생확률의 설정도 선수선교선의 특징에 적합하지 않다.

(4) 이상의 수치 시뮬레이션 계산 결과를 바탕으로 선수선교선의 항해안전성 평가기준 결정은 선수갑판상 침입 해수의 거동 및 조타실 창유리에 충돌하는 침입수의 발생 메커니즘을 파악하여, 선교 창유리 등에 충돌하는 침입수의 상승 유속에 대한 정량적 검토와 수피의 충돌충격압력 및 창유리의 파손 조건 등을 비교, 검토하여야 할 것이다.

본 연구와 관련하여 선수선교선에 유입되는 해수의 침입속도, 충돌충격압력 등을 고려한 갑판침수의 한계치 및 한계발생확률 기준 설정에 대한 연구가 계속될 것이다.

참고문헌

- [1] 國際規則と船舶設計等との関連に関する調査研究, 日本造船研究協會研究資料 No.218R, pp. 206-236, 1995.
- [2] 福田淳一 “船體應答の統計的豫測”, 第1回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船學會, p.99, 1969.
- [3] 山内保文 “海洋波中の應答”, 第1回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船學會, pp.53-97, 1969.
- [4] Rice, S. O., "Mathematical Analysis of Random Noise", The Bell System Technical Journal, Vol.24, 1945.
- [5] 金順甲, 内藤林, 中村彰一 “船舶の波浪中耐航性能評價に関する研究”, 日本造船學會論文集, 第155号, pp.71-83, 1984.
- [6] 金順甲, 孔吉永 “선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제21권 제2호, 1997.
- [7] Lindemann, L., "Summary of a Course in Shiphandling in Rough Weather", DnV Report 81-0782, Det Norske Veritas, 1981.
- [8] Kishev, R., "General Considerations on Ship Seakeeping Optimization in Design", Osaka Meeting on Seakeeping Performance, Japan, pp.217-241, 1992.
- [9] NORDFORSK, "Assessment of Ship Performance in a Seaway", The Nordic Cooperative Project, ISBN87-982637.
- [10] 日本造船研究協會 제125 研究部會, “超高速コンテナ船の耐航性に関する研究”, 研究資料, No.211, 1975.
- [11] 北澤孝宗, 黒井昌明, 高木又男 “コンテナ船の波浪中での限界速度”, 日本造船學會論文集, 第138号, pp.269-273, 1975.
- [12] Ochi, M. K., "Extreme Behavior of a Ship in Rough Seas -Slamming and Shipping of Green Water", Trans. SNAME, Vol.72, 1964.
- [13] Comstock, E. K., Keane, R. G., "Seakeeping by Design", Naval Engineers Journal, Vol.92, No.2, pp.157-178, 1980.
- [14] 鞠谷宏士 “荒天運航の實狀 -大型専用船のログブックの解析-”, 船舶の荒天運航に関するシンポジウム, 日本航海學會, pp.43-98, 1973.
- [15] 小川剛孝, 田口晴邦, 石田茂資 “靑波による甲板荷重及び甲板水量の豫測法に関する研究”, 日本造船學會論文集, 第185号, pp.61-73, 1999.