

荒天時の 航海安全 評價시스템 開發에 관한 研究

金 順 甲* · 李 忠 魯**

A Study on the Development of Navigational Safety Evaluation System in Rough Sea

Soon-Kap Kim · Choong-Ro Lee

〈목 차〉

| | |
|--------------------|--------------------------|
| Abstract | 3.4 내항성능 평가 |
| Nomenclature | 3.5 내항성능 평가에 의한 위험판정법 |
| 제1장 서 론 | 제4장 위험판정 시스템 |
| 제2장 태풍의 모델화 | 4.1 기준내항성 요소 |
| 2.1 태풍의 개념 | 4.2 위험판정 시스템 |
| 2.2 태풍의 근사표현 | 제5장 항해안전 평가시스템에 의한 시뮬레이션 |
| 2.3 좌표계 | 5.1 시뮬레이션의 실행 |
| 제3장 내항성능 평가 | 5.2 고 찰 |
| 3.1 내항성능 평가요소 | 제6장 결 론 |
| 3.2 해양파 스펙트럼 | 참고문헌 |
| 3.3 내항성능 평가요소의 분산치 | |

Abstract

It is of great importance for any vessel under way, especially in rough sea, to be maneuvered safely with proper seakeeping performance.

In this paper, the author aims to develop a navigational safety evaluation system in rough sea by analyzing ship's motion with the theory of wave spectrum using random process analysis and the theory of evaluating the seakeeping performance.

The scope and the method of this study are as follows :

(1) Modelized typhoon mathematically to represent the sea condition in rough sea.

* 正會員, 韓國海洋大學

** 正會員, 韓國海技研修院

- (2) Estimated sea condition by getting wave spectrum, supposing that the wave by typhoon is fully developed short crest irregular wave.
- (3) Defined evaluation factor of vessel's seakeeping performance and obtained response amplitude operators thereby.
- (4) Obtained the response spectrum of factors on seakeeping performance.
- (5) Defined and obtained evaluation index, dangerousness, relative and maximum dangerousness of factors on seakeeping performance.
- (6) Analyzed the calculated dangerousness of evaluation index and picked the vertical acceleration out of 7 factors as the representative factor on seakeeping performance.
- (7) Carried out the judgement of danger by obtaining dangerousness value according to steaming hour, course alteration and speed change.

By synthesizing the above items, the author suggests a computer model of navigational safety evaluation system and examined the validity of the model by computer simulation.

| Nomenclature | | | |
|--------------------------------------|--|------------------------|---|
| $A_T(t)$ | : S.S. 8 1/2 위치에서 선체중심선 상방에 거리 Z_p 인 점의 선체좌우가 속도 | R_m | : 태풍의 최대등압선 반경 |
| $A_V(t)$ | : F.P. 위치에서 선체중심선 상방에 거리 Z_p 인 점의 상하가속도 | $R_p(t)$ | : 선체중심선상 프로펠라 위치에서 파에 대한 선체의 상대변위 |
| B | : 선체의 폭 | $S_D(\omega_e)$ | : F.P. 위치에서 파에 대한 선체 상대변위의 스펙트럼 |
| b | : 선체의 반폭, $b=B/2$ | $S(t), \dot{S}(t)$ | : S.S. 8 1/2 위치에서 선저의 파에 대한 상대변위 및 상대속도 |
| D_t | : 태풍의 이동방향 | $S_\zeta(\omega)$ | : 해양파 스펙트럼 |
| D_w | : 태풍권내의 풍향 | V_m | : 태풍의 최대풍속 |
| D_{WR} | : 태풍의 이동을 고려한 풍향 | V_r | : 태풍권내의 평균풍속 |
| E_i | : 내항성능 평가요소의 평가치 | V_s | : 평수중의 선속 |
| g | : 중력가속도 | V_t | : 태풍의 이동속도 |
| $H_D(\omega_e)$ | : F.P. 위치에서 파에 대한 선체상대 변위의 주파수 응답함수 | V_{tr} | : 태풍의 이동에 의한 영향풍속 |
| $H_{xi}(\omega, V_s, \chi - \alpha)$ | : 내항성능 평가요소의 응답함수 | V_w | : 태풍의 이동을 고려한 평균풍속 |
| H_z | : 상하요의 진폭응답함수 | X, Y | : 공간고정 좌표 |
| H_0 | : 중요요의 진폭응답함수 | X_i | : 내항성능 평가요소 |
| L | : 선체의 길이 | X_t, Y_t | : 공간고정 좌표에 평행한 대풍좌표 |
| $L(t)$ | : 선체중양부 현측 상대수위의 변위 | Z_a, ϵ_z | : 상하요의 진폭과 위상 |
| $M_V(t)$ | : 선체중양부에 작용하는 파랑종급 힘 모멘트 | $Z(t)$ | : 상하요의 변위 |
| P_0 | : 태풍의 중심시도 | ζ_a | : 파의 진폭 |
| R | : 태풍중심으로부터 선박까지의 거리 | θ_a, ϵ_0 | : 중요요의 진폭과 위상 |
| | | $\theta(t)$ | : 중요각 |
| | | k | : 파수, $k=2\pi/\lambda$ |
| | | μ_i | : 내항성능 평가요소의 상대위험도 |
| | | μ_i | : 내항성능 평가요소의 위험도 |
| | | μ_m | : 내항성능 평가요소의 최대위험도 |

- ϕ_n, ϵ_n : 횡요의 진폭과 위상
- $\phi(t)$: 횡요각
- χ : 출회각
- ω, ω_c : 파의 주파수와 조우주파수
- $\sigma_i^2(V_w, V_s, \chi)$: 내항성능 평가요소의 분산치
- \overline{OG} : 선체중양과 선체중심과의 거리

제 1 장 서 론

황천시의 선박운항에 있어서, 안전성을 고려한 항해수행에 관한 위험판단과 그에 따른 피항조치는 선장의 경험에 의하여 실행되고 있다. 그러나, 그러한 판단과 조치의 실행은 경험적 판단보다는 해석적인 평가에 의한 방법이 필요하다.

또한 최근의 선박자동화 추세에 따라 고신뢰도 지능화선의 연구개발이 진행되고 있고, 이러한 선박에 있어서는 더욱 객관적인 운항성능의 평가 및 판단 시스템이 절실히 요구되는 실정이다.

따라서 황천시 안전항해를 위한 객관적이고 해석적인 방법으로서, 불규칙한 해상상태에서 선박의 내항성능을 이론적으로 평가할 수 있는 연구결과가 이용되고 있다.

파랑중 내항성능에 관한 연구성과는, 조선분야에 있어서는 선형개발 및 항해자동화에, 운항분야에서는 최적항로문제나 황천피항 등에 응용되고 있다.¹⁾

본 연구는 황천의 가장 가혹한 상태인 태풍에 대하여, 기상예보로부터의 태풍정보를 이용하여 항해중인 선박이 처해있는 상황에서 어떻게 안전하게 항해할 것인가에 관하여, 파랑중에서의 선체운동해석을 행하고 확률과정론적 스펙트럼이론과 내항성능평가이론 등을 이용하여 황천시의 항해안전 평가시스템을 개발하는데 그 목적이 있다.

연구의 범위와 방법은 다음과 같다.

- (1) 황천의 조건으로서 태풍을 모델화하여 시스템에 입력한다.
- (2) 태풍에 의한 파는 완전히 발달한 단파정 불규칙파로 가정하여 파 스펙트럼을 구하여 해상상태를 추정한다.
- (3) 길이 175m인 컨테이너선을 대상모델로 하여

선체의 내항성능 평가요소를 정의하고, 그 응답함수를 구한다.

- (4) 내항성능 평가요소의 응답 스펙트럼을 이용하여 선체의 안전상태를 추정한다.
- (5) 위험판정에 필요한 각 내항성능 평가요소의 평가치와 위험도, 상대위험도 및 최대위험도를 정의하여 구한다.
- (6) 내항성능 평가요소의 계산된 위험도를 분석하고, 그 계측의 편리성을 고려하여 상하가 속도를 기준내항성 요소로 한다. 그리고 항해시간, 침로변경 및 번속에 따른 위험판정치를 구하여 위험판정을 행한다.
- (7) 이상의 내용을 종합하여 황천시의 항해안전 평가시스템을 완성하고, 컴퓨터에 의하여 시뮬레이션을 행한다.

제 2 장 태풍의 모델화

2.1 태풍의 개념

2.1.1 태풍의 정의

열대해상에 발생하는 저기압을 열대성 저기압(Tropical cyclone)이라 하며, 열대저기압중 특히 발달한 것으로서, 북태평양서부와 남지나해에서 발생한 최대풍속 17m/sec(34Knot) 이상인 것을 태풍이라 한다. 태풍은 지역명칭이며, 기타 지역에서는 이에 상당하는 것으로서 허리케인, 사이클론 등으로 부른다.²⁾

열대저기압의 분류

| 천기도의 기호 | 국제용어 | 최대풍속 |
|-----------|-----------------------|------------------------|
| 열대저기압(TD) | Tropical depression | 34Knot 미만(풍력 7이하) |
| 태풍(TS) | Tropical storm | 34-48Knot 미만(풍력 8-9) |
| 태풍(STS) | Severe tropical storm | 48-64Knot 미만(풍력 10-11) |
| 태풍(T) | Typhoon | 64Knot 이상(풍력 12이상) |

2.1.2 태풍의 크기와 강도³⁾

(1) 태풍의 크기(2Rm [km])

일반적으로 태풍의 크기는, 1000mb 등압선의 직경으로 표시된다.

(2) 태풍의 강도(Po [mb])

일반적으로 태풍의 강도는, 중심부근의 최저

기압(중심시도)으로 나타낸다.

2.2 태풍의 근사표현

2.2.1 최대풍속과 태풍의 반경

중심부근의 최대풍속 V_m , 최대등압선의 반경 R_m , 중심시도 P_o 는 다음의 식으로 표시되고 있다.^{3), 4)}

$$V_m = 7\sqrt{1010 - P_o} \quad [\text{m/sec}] \cdots (1)$$

$$R_m = 12.1 \times (1010 - P_o) \quad [\text{km}] \cdots (2)$$

그런데, (1), (2) 식으로 부터

$$R_m = 0.247V_m^2 \quad [\text{km}] \cdots (3)$$

을 얻을 수 있다.

2.2.2 태풍권내의 풍속(V_r)

태풍의 등압선은 원을 이루고 있고, 태풍은 일단 정지하고 있다고 가정한다. 태풍중심으로부터 거리 $R[\text{Km}]$ 인 지점의 풍속 $V_r[\text{m/sec}]$ 은 경험적으로 다음과 같은 형으로 표현할 수 있다.

$$V_r(R) = (A/R^E) \exp(-B/R) \quad [\text{m/sec}] \cdots (4)$$

단, A, B, C는 계수

식 (4)에 다음의 조건을 가정한다.

- (1) 태풍권내(중심으로 부터 R_m 이내)의 풍속분포는 중심부근의 최대풍속으로 부터 거리에 반비례하여 감소하여, 태풍반경 R_m 에서의 풍속은, 태평양에서의 평년의 평균풍속이 7.6 $[\text{m/sec}]$ 이므로 8 $[\text{m/sec}]$ 로 한다.^{2), 5)}
- (2) 최대풍속 V_m 은 거리 $R_m/10$ 에서의 풍속으로 한다.³⁾
- (3) 태풍중심에서 거리 $R_m/10$ 까지의 풍속은 거리에 비례하여 단조 증가하는 것으로 한다.¹⁾
- (4) 태풍권외에서의 풍속은 태평양의 평년평균 풍속인 8 $[\text{m/sec}]$ 로 한다.³⁾

이상의 조건에 의해 식(4)를 다음과 같이 변형시켜 정의한다.

$$V_r(R) = (V_m/R_n^E) \exp(1 - 1/R_n) [\text{m/sec}] \cdots (5)$$

단, $E = 0.391 + \log_{10}(V_m/8)$

$$R_n = 10R_m/R_m$$

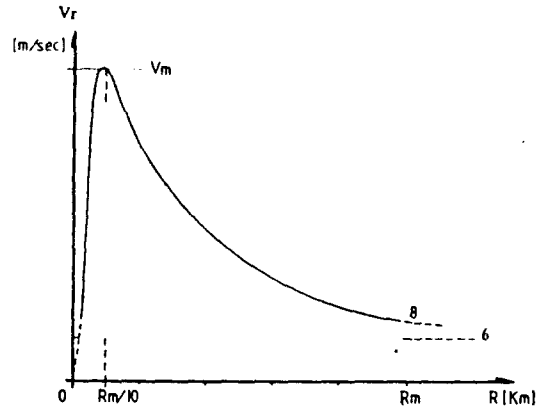


Fig. 1 태풍권내의 풍속분포

2.2.3 태풍의 이동에 의한 영향풍속(V_{tr})

태풍의 이동속도를 V_t 라 하면, 이동에 의한 영향풍속 V_{tr} 은 다음 식으로 구할 수 있다.⁴⁾

$$V_{tr}(R) = C \cdot V_t \cdot F(R)/F(R_o) \quad [\text{m/sec}] \cdots (6)$$

$$\text{단, } F(R) = -0.5 \cdot C_o \cdot R + \{P \cdot R_o / (\gamma^r) \cdot \exp(-R_o/R) + 0.25(C_o \cdot R)^2\}^{1/2}$$

$$F(R_o) = -0.5 \cdot C_o \cdot R_o + \{P \cdot R_o / (\gamma^r) \cdot \exp(-R_o/R_o) + 0.25(C_o \cdot R_o)^2\}^{1/2}$$

$$R_o = R_{1000} \cdot \ln\{(1010 - P_o) / (1000 - P_o)\} \quad [\text{km}]$$

여기서, C : 대략 0.6~0.7이며, 0.65로 한다.

V_t : 태풍의 이동속도 $[\text{m/sec}]$

P : $1010 - P_o$

P_o : 태풍의 중심기압 $[\text{mb}]$

γ : 건조대기의 단위 체적당의 중량 (기온 15°C, 기압 1010mb일때 1.22 $[\text{kg/m}^3]$)

C_o : Coriolis parameter ($2\beta \cdot \sin \text{Lat}$)

β : 지구자전의 각속도 ($7.292 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{sec}^{-1}$)

Lat: 풍속 측정지점의 위도 $[\text{deg}]$

R_{1000} : 1000mb 등압선의 곡률반경이며, $R_{1000} = R_m$ 으로 한다.

2.2.4 태풍의 이동을 고려한 풍속(V_w)

태풍의 이동을 고려하지 않을 때의 풍향을 D_w 로 하고, 태풍의 이동방향을 D_t 로 하면, 태풍의 이동을 고려한 풍속 V_w 는 다음 식으로 표시된다.⁶⁾

$$V_w(R) = \{Vr(R)^2 + Vtr(R)^2 - 2 \cdot Vr(R) \cdot Vtr(R) \cdot \cos(\pi + Dt - D_w)\}^{1/2} \quad [m/sec] \cdots (7)$$

2.2.5 태풍권내의 풍향(D_w)

정지하고 있는 태풍에서의 바람은, 관측 위치의 등압선의 접선에 대하여 20도의 각도를 가지고, 태풍 중심방향으로 분다고 가정한다. 태풍에 대한 선박의 방향을, 공간고정좌표의 X축을 기준으로 반시계방향으로 측정한 값으로 하여 D_{st}라 하면, 태풍권내의 풍향 D_w는 다음 식으로 표현될 수 있다.⁴⁾

$$D_w = D_{st} + (20 + 90) \cdot \pi / 180 \quad [rad] \cdots (8)$$

2.2.6 태풍의 이동을 고려한 풍향(D_{wR})

태풍의 이동을 고려한 풍향 D_{wR}은 다음 식으로 표현될 수 있다.⁶⁾

$$D_{wR} = \tan^{-1} \left[\frac{\{Vr(R) \cdot \cos(D_w) + Vtr \cdot \cos(Dt)\}}{\{Vr(R) \cdot \sin(D_w) + Vtr \cdot \sin(Dt)\}} \right] \quad [rad] \cdots (9)$$

2.2.7 태풍권외의 풍향(D_w)

태풍권외 (R>R_m)에서의 풍향은, 일반류의 방향으로 근사한다.

$$D_w = D_t \quad [rad] \cdots (10)$$

2.2.8 기상예보의 태풍정보

선박 운항자가 기상예보로 부터 얻을 수 있는 태풍정보는 일반적으로 다음과 같다.

- (1) 분류, 호수, 명칭
- (2) 중심시도(기압) P₀ [mb]
- (3) 태풍위치(위도, 경도) [deg, deg]
- (4) 평균 최대풍속 V_m [knot]
- (5) 이동방향(16방향) D_t [deg]
- (6) 이동속도 V_t [knot]
- (7) 강풍권(풍속, 영향반경) [knot, mile]

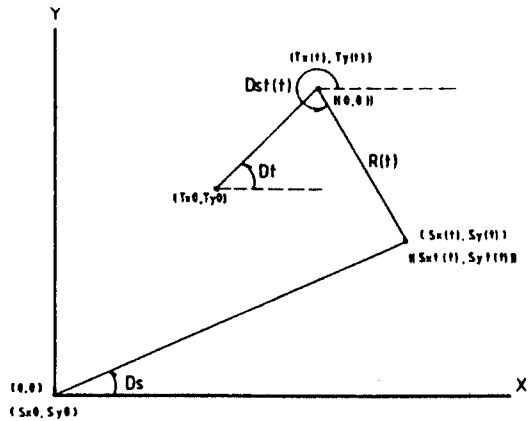
따라서, 태풍정보에 의해 해상의 풍향, 풍속을 현시점으로 부터 미래 8시간까지 추정할 수 있다.

2.3 좌표계

태풍 및 선박을 표시하는 좌표는 공간고정좌표 (X, Y)로써 근사표현하며, 선박의 현위치를 원점으

로 하고, 동서방향의 동을 X축의 +, 남북방향의 북을 Y축의 +로 한다. 또한, 태풍의 중심을 원점으로 하여, 공간 고정좌표에 평행한 태풍좌표(X_t, Y_t)와 극좌표(R, D_{st})도 사용한다.

이러한 좌표계에서, 선박은 방향을 가진 질점이라고 가정한다.



- 시간 t에서의 태풍위치 (Tx(t), Ty(t))
- 태풍의 이동속도와 그 방향 V_m
- 시간 t에서의 선박위치 (Sx(t), Sy(t))
- 선속과 그 방향 V_s, D_s
- 태풍에 대한 선박의 위치 (Sx(t), Sy(t))
- 태풍에 대한 선박위치의 극좌표 표시 (R(t), D_{st}(t))

Fig. 2 선박과 태풍의 좌표계

제 3 장 내항성능 평가

3.1 내항성능 평가요소

파랑중 선박의 내항성능을 평가하기 위해, 선체의 운동으로부터 생기는 다음과 같은 현상을 내항성능 평가요소로 한다.⁷⁾

- (1) Deck wetness(X₁)
- (2) Propeller racing(X₂)
- (3) Rolling(X₃)
- (4) F.P.의 상하 가속도(X₄)
- (5) S.S. 8 1/2의 좌우 가속도(X₅)
- (6) 선체 중앙부의 파랑충격힘 모멘트(X₆)
- (7) Slamming(X₇)

여기서, X_i(i=1, 2, ..., 7)은 후술에 있어서 설명의 편의상 나타낸 것이다.

3.2 해양파 스펙트럼

바람에 의해 발생하는 파를 완전발달파라 하면, 파 스펙트럼은 몇가지가 통용되고 있으나 풍속에 의한 해상상태를 표현하기 위하여 Pierson-Moskowitz에 의한 다음 식을 사용한다.⁸⁾

$$S_z(\omega) = 0.78\omega^5 \exp\{-0.74 (g/V_w \cdot \omega)^4\} \dots (11)$$

여기서, g : 중력가속도

V_w : 해면상 19.5m에서의 풍속
(여기서는, 일반적인 해상 풍속으로 가정한다.)

한편, 실제 해면에 가깝게 표현되는 단파정 불규칙파는 파 스펙트럼의 방향성 분포를 고려하여, 파의 평균진행방향에 대하여 $(-\pi/2)$ 로부터 $(\pi/2)$ 의 범위에 걸쳐 $(\cos^2 \alpha)$ 분포를 하고, 그외의 범위에서는 0으로 가정하면, 파 스펙트럼은 다음 식으로 주어진다.⁹⁾

$$S_z(\omega, \alpha) = 2/\pi \cdot S_z(\omega) \cos^2 \alpha; -\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$$

$$= 0 \quad ; \text{그 외의 경우}$$

..... (12)

여기서, α : 파의 평균진행방향과 요소파가 이루는 각도

3.3 내항성능 평가요소의 분산치

선박이 단파정 불규칙파중을 일정속도로, 파에 대하여 일정한 침로 (χ)를 유지하여 항해하고 있는 경우, 각 내항성 요소의 확률과정 $X_i(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{xi}(\omega, V_s, \chi - \alpha)$ 로 하면, $X_i(t)$ 의 스펙트럼 $S_{xi}(\omega, \chi)$ 는¹⁰⁾

$$S_{xi}(\omega, \chi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{xi}(\omega, V_s, \chi - \alpha)|^2 S_z(\omega, \alpha) d\alpha$$

..... (13)

이고, 그 분산치 $\sigma^2(\chi)$ 는 다음과 같이 된다.⁹⁾

$$\sigma^2(V_w, V_s, \chi) = \int_0^\infty S_{xi}(\omega, \chi) d\omega$$

..... (14)

(20)식에서 분산치를 결정하는 파라미터는 $S_z(\omega)$ 에서의 해상요소 즉 풍속(V_w), H_{xi} 에서의 선박의 속도(V_s), 선박과 파와의 출회각(χ)의 3개이다.

각 내항성능 평가요소의 분산치는 아래와 같이 구한다. 여기서의 좌표계는, 선박이 정지공간 좌표

계의 X축과 χ 의 각도로써 일정속력 V_s 로 항해하는 경우, 그림 3과 같이 정한다. 위상각에 관해서는 파정이 선체중앙의 선체중심선에 있을 때를 기준으로 잡고 위상전진을 “+”로 한다.

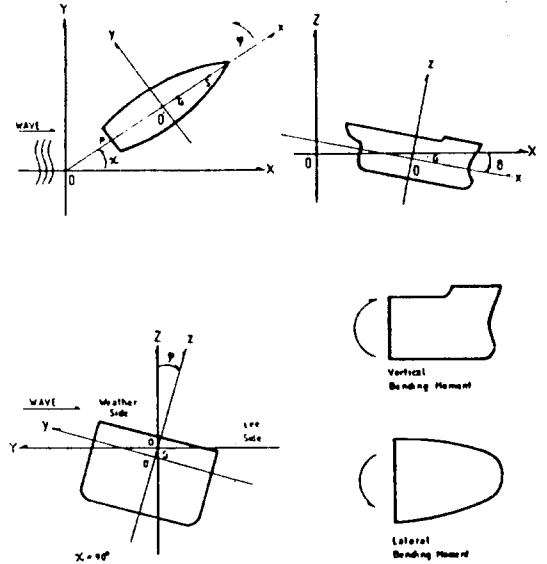


Fig. 3 내항성능 평가요소의 분산치를 구하기 위한 좌표계

3.3.1 Deck wetness

선체 중심선상 F.P. 위치에서의 선체 상대변위는 다음 식으로 표시된다.

$$D(t) = \zeta_w(t) - \{Z(t) - l_b \cdot \theta(t)\}$$

$$= D_o(t) \cos(\omega_e t + \epsilon_p) \dots \dots \dots (15)$$

단, $D_o(t) = \sqrt{D_c^2 + D_s^2}$

$$D_c = \zeta_a \cos(k \cdot l_b \cdot \cos \chi) - Z_a \cdot \cos \epsilon_z$$

$$+ l_b \cdot \theta_a \cdot \cos \epsilon_\theta$$

$$D_s = -\zeta_a \sin(k \cdot l_b \cdot \cos \chi) - Z_a \cdot \sin \epsilon_z$$

$$+ l_b \cdot \theta_a \cdot \cos \epsilon_\theta$$

$$\epsilon_p = \tan^{-1}(D_s/D_c)$$

$$l_b = L/2 - \overline{\overline{OG}}, \overline{\overline{OG}}; \text{선수방향이 “+”}$$

$$\epsilon_e = \text{조우주파수} (= \omega - (V_s/g) \cdot \omega^2 \cos \chi)$$

이때, 선수 상대변위 $D(t)$ 의 응답함수를 $H_D(t)$ 라 하면

$$H_D(t) = D(t)/\zeta_a = \sqrt{D_a^2 + D_b^2} \cos(\omega_e t + \epsilon_D) \dots (16)$$

단, $D_a = \cos(k \cdot l_D \cdot \cos \chi) - (Z_a/\zeta_a) \cdot \cos \epsilon_z$
 $+ k \cdot l_D \cdot \{\theta_a/(k \cdot \zeta_a)\} \cos \epsilon_\theta$
 $= \cos(k \cdot l_D \cdot \cos \chi) - H_z \cdot \cos \epsilon_z + k \cdot l_D$
 $\cdot H_\theta \cdot \cos \epsilon_\theta$
 $D_b = -\sin(k \cdot l_D \cdot \cos \chi) - H_z \cdot \sin \epsilon_z + k \cdot$
 $l_D \cdot H_\theta \cdot \sin \epsilon_\theta$
 $\epsilon_D = \tan^{-1}(D_b/D_a), H_z = Z_a/\zeta_a, H_\theta = \theta_a/(k \cdot \zeta_a)$

D(t)의 주파수 응답함수를 $H_D(\omega_e)$ 라 하면

D(t)의 스펙트럼 $S_D(\omega_e)$ 는

$$S_D(\omega_e) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H(\omega_e)|^2 S_\zeta(\omega_e, \alpha) d\alpha \dots (17)$$

이고, D(t)의 분산치 σ_D^2 은

$$\sigma_D^2 = \int_0^\infty S_D(\omega_e) d\omega_e \dots (18)$$

이 된다.

주파수 ω 와 조우주파수 ω_e 영역의 스펙트럼 계산시 변수변환관계는 다음과 같이 된다.

$$[J] \equiv \frac{\partial \omega}{\partial \omega_e} = 1/\{1 - (2\omega/g) \cdot V_s \cdot \cos \chi\}$$

$$S_\zeta(\omega) d\omega = S_\zeta(\omega_e) [J] d\omega_e$$

$$S_\zeta(\omega) d\omega = S_\zeta(\omega_e) d\omega_e \text{으로부터}$$

$$S_\zeta(\omega_e) = S_\zeta(\omega) [J] = S_\zeta(\omega) \cdot 1/\{1 - (2\omega/g) \cdot V_s \cdot \cos \chi\} \dots (19)$$

3.3.2 Propeller racing

선체 중심선상 프로펠러 위치에서의 선체의 상대변위는 다음 식으로 표시된다.

$$R_p(t) = \zeta_w(t) - \{Z(t) - l_D \cdot \theta(t)\}$$

$$= R_{po}(t) \cos(\omega_e t + \epsilon_R) \dots (20)$$

단, $R_{po}(t) = \sqrt{R_c^2 + R_s^2}$

$$R_c = \zeta_a \cos(k \cdot l_p \cdot \cos \chi) - Z_a \cdot \cos \epsilon_z + l_p \cdot \theta_a \cdot \cos \epsilon_\theta$$

$$R_s = -\zeta_a \sin(k \cdot l_p \cdot \cos \chi) - Z_a \cdot \sin \epsilon_z + l_p \cdot \theta_a \cdot \sin \epsilon_\theta$$

$$\epsilon_R = \tan^{-1}(R_s/R_c)$$

$$l_p = -(L/2 + \overline{MG}), \overline{MG} : \text{선수방향이 "+"}$$

이때, 파에 대한 진폭응답함수를 $H_R(t)$ 라 하면

$$H_R(t) = R_p(t)/\zeta_a = \sqrt{R_a^2 + R_b^2} \cos(\omega_e t + \epsilon_R) \dots (21)$$

단, $R_a = \cos(k \cdot l_p \cdot \cos \chi) - (Z_a/\zeta_a) \cdot \cos \epsilon_z$
 $+ k \cdot l_p \cdot \{\theta_a/(k \cdot \zeta_a)\} \cos \epsilon_\theta$
 $= \cos(k \cdot l_p \cdot \cos \chi) - H_z \cdot \cos \epsilon_z + k \cdot l_p \cdot$
 $H_\theta \cdot \cos \epsilon_\theta$
 $R_b = -\sin(k \cdot l_p \cdot \cos \chi) - H_z \cdot \sin \epsilon_z + k \cdot$
 $l_p \cdot H_\theta \cdot \sin \epsilon_\theta$
 $\epsilon_R = \tan^{-1}(R_b/R_a)$

R(t)의 주파수 응답함수를 $H_R(\omega_e)$ 라 하면

$R_p(t)$ 의 스펙트럼 $S_R(\omega_e)$ 는

$$S_R(\omega_e) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_R(\omega_e)|^2 S_\zeta(\omega_e, \alpha) d\alpha \dots (22)$$

이고, $R_p(t)$ 의 분산치 σ_R^2 은

$$\sigma_R^2 = \int_0^\infty S_R(\omega_e) d\omega_e \dots (23)$$

가 된다.

3.3.3 Rolling

선체 중앙부에서 현측 상대수위의 변위 L(t)는 다음 식으로 표시된다.

$$L(t) = \zeta_w(t) - Z(t) - l_G \cdot \theta(t) + b \cdot \phi(t)$$

$$= L_v(t) \cos(\omega_e t + \epsilon_L) \dots (24)$$

단, $L_v(t) = \sqrt{L_c^2 + L_s^2}$

$$L_c = \zeta_a \cos(k \cdot l_G \cdot \cos \chi - k \cdot b \cdot \sin \chi) - Z_a \cdot \cos \epsilon_z - l_G \cdot \theta_a \cdot \cos \epsilon_\theta + b \cdot \phi_a \cdot \cos \epsilon_\phi$$

$$L_s = -\zeta_a \sin(k \cdot l_G \cdot \cos \chi - k \cdot b \cdot \sin \chi) - Z_a \cdot \sin \epsilon_z - l_G \cdot \theta_a \cdot \sin \epsilon_\theta + b \cdot \phi_a \cdot \sin \epsilon_\phi$$

$$\epsilon_L = \tan^{-1}(L_s/L_c)$$

$$l_G = \overline{MG} \quad (G가 \overline{MG}보다 선수쪽이면 "+")$$

$$b = B/2 \quad (\text{반쪽 : Weather Side가 "+"})$$

이때, 파에 대한 진폭응답함수 $H_L(t)$ 는 다음 식이 된다.

$$H_L(t) = L(t)/\zeta_a = \sqrt{L_a^2 + L_b^2} \cos(\omega_e t + \epsilon_L) \dots (25)$$

단, $L_a = \cos(k \cdot l_G \cdot \cos \chi - k \cdot b \cdot \sin \chi) - H_z \cdot \cos \epsilon_z - k \cdot l_G \cdot H_\theta \cdot \cos \epsilon_\theta + k \cdot b \cdot$
 $H_\phi \cdot \cos \epsilon_\phi$

$$L_b = -\sin(k \cdot l_G \cdot \cos \chi - k \cdot b \cdot \sin \chi)$$

$$- H_z \cdot \sin \epsilon_z - k \cdot l_G \cdot H_\theta \cdot \sin \epsilon_\theta + k \cdot b \cdot H_\phi \cdot \sin \epsilon_\phi$$

$$\epsilon_L = \tan^{-1}(L_b/L_a)$$

L(t)의 주파수 응답함수를 $H_L(\omega_c)$ 라 하면
L(t)의 스펙트럼 $S_L(\omega_c)$ 는

$$S_L(\omega_c) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_L(\omega_c)|^2 \cdot S_\zeta(\omega_c, \alpha) d\alpha \quad (26)$$

이고, L(t)의 분산치 σ_L^2 은

$$\sigma_L^2 = \int_0^T S_L(\omega_c) d\omega_c \quad (27)$$

가 된다.

3.3.4 F.P.의 상하가속도

선체중심선상에서 F.P.의 상하가속도 $A_V(t)$ 는

$$A_V(t) = \ddot{Z}_{c,t}(t) - I_D \cdot \ddot{\theta}(t) \\ = A_{Vc}(t) \cos(\omega_c t + \epsilon_{AV}) \quad (28)$$

단, $A_{Vc}(t) = \sqrt{A_{Vc}^2 + A_{Vs}^2}$

$$A_{Vc} = -\omega_c^2 (Z_a \cdot \cos \epsilon_r - I_D \cdot \theta_a \cdot \cos \epsilon_0)$$

$$A_{Vs} = -\omega_c^2 (Z_a \cdot \sin \epsilon_r - I_D \cdot \theta_a \cdot \sin \epsilon_0)$$

$$\epsilon_{AV} = \tan^{-1}(-A_{Vs}/A_{Vc})$$

$A_V(t)$ 의 무차원화한 진폭응답함수 $H_{AV}(t)$ 는

$$H_{AV}(t) = A_V(t) / (\zeta_a \cdot g/L) = \sqrt{A_{Va}^2 + A_{Vb}^2} \cdot \cos(\omega_c t + \epsilon_{AV}) \quad (29)$$

단, $A_{Va} = \{-\omega_c^2 / (g/L)\} (H_z \cdot \cos \epsilon_r - k \cdot I_D \cdot H_0 \cdot \cos \epsilon_0)$

$$A_{Vb} = \{-\omega_c^2 / (g/L)\} (H_z \cdot \sin \epsilon_r - k \cdot I_D \cdot H_0 \cdot \sin \epsilon_0)$$

$$\epsilon_{AV} = \tan^{-1}(A_{Vb}/A_{Va}) = \tan^{-1}(A_{Vs}/A_{Vc})$$

가 된다. $A_V(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{AV}(\omega_c)$ 라 하면 $A_V(t)$ 의 스펙트럼 $S_{AV}(\omega_c)$ 는,

$$S_{AV}(\omega_c) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{AV}(\omega_c) \cdot (g/L)|^2 \cdot S_\zeta(\omega_c, \alpha) d\alpha \quad (30)$$

이고, $A_V(t)$ 의 분산치 σ_{AV}^2 은

$$\sigma_{AV}^2 = \int_0^T S_{AV}(\omega_c) d\omega_c \quad (31)$$

가 된다.

3.3.5 S.S. 8 1/2 좌우가속도

S.S. 8 1/2 위치에서 선체중심선 상방에 거리 Z_p 인 점의 선체좌우 가속도는 다음 식으로 계산된다.

$$A_T(t) = \ddot{Y}_G + I_s \cdot \ddot{\psi}(t) - I_z \cdot \ddot{\phi}(t) + g \cdot \phi(t) \\ = A_{Tn}(t) \cos(\omega_c t + \epsilon_{AT}) \quad (32)$$

단, $A_{Tn}(t) = \sqrt{A_{Tc}^2 + A_{Ts}^2}$

$$A_{Tc} = -\omega_c^2 \{ Y_a \cdot \cos \epsilon_y + I_s \cdot \psi_a \cdot \cos \epsilon_w \\ - I_z \cdot \phi_a \cdot \cos \epsilon_\phi - (g/\omega_c^2) \cdot \phi_a \cdot \cos \epsilon_\phi \}$$

$$A_{Ts} = -\omega_c^2 \{ Y_a \cdot \sin \epsilon_y + I_s \cdot \psi_a \cdot \sin \epsilon_w \\ - I_z \cdot \phi_a \cdot \sin \epsilon_\phi - (g/\omega_c^2) \cdot \phi_a \cdot \sin \epsilon_\phi \}$$

$$\epsilon_{AT} = \tan^{-1}(A_{Ts}/A_{Tc})$$

$$I_z = Z_p - Z_G, \psi(t) : \text{선수요 각}$$

$A_T(t)$ 의 진폭응답함수 $H_{AT}(t)$ 는,

$$H_{AT}(t) = A_T(t) / (\zeta_a \cdot g/L) = \sqrt{A_{Ta}^2 + A_{Tb}^2} \cdot \cos(\omega_c t + T) \quad (33)$$

단, $A_{Ta} = -\omega_c^2 / (g/L) \{ H_y \cdot \cos \epsilon_y + k \cdot I_s \cdot H_w \cdot \cos \epsilon_w - k \cdot H_\phi \cdot \cos \epsilon_\phi (I_z + g/\omega_c^2) \}$

$$A_{Tb} = -\omega_c^2 / (g/L) \{ H_y \cdot \sin \epsilon_y + k \cdot I_s \cdot H_w \cdot \sin \epsilon_w - k \cdot H_\phi \cdot \sin \epsilon_\phi (I_z + g/\omega_c^2) \}$$

$$\epsilon_{AT} = \tan^{-1}(A_{Tb}/A_{Ta})$$

H_y : 좌우요 진폭응답함수

H_w : 선수요 진폭응답함수

이다.

$A_T(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{AT}(\omega_c)$ 라 하면

$A_T(t)$ 의 스펙트럼 $S_{AT}(\omega_c)$ 는

$$S_{AT}(\omega_c) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{AT}(\omega_c) \cdot (g/L)|^2 \cdot S_\zeta(\omega_c, \alpha) d\alpha \quad (34)$$

이고, $A_T(t)$ 의 분산치 σ_{AT}^2 은

$$\sigma_{AT}^2 = \int_0^T S_{AT}(\omega_c) d\omega_c \quad (35)$$

가 된다.

3.3.6 선체 중앙부의 파랑 종굽힘 모멘트

선체중앙부에 작용하는 파랑 종굽힘 모멘트 $M_v(t)$ 는,

$$M_v(t) = M_a \cos(\omega_c t + \epsilon_{Mv}) \quad (36)$$

이다. 무차원화한 진폭응답함수 $H_{Mv}(t)$ 는

$$H_{Mv}(t) = M_v(t) / (\rho \cdot g \cdot L^2 \cdot B \cdot \zeta_a) \\ = \sqrt{M_{Va}^2 + M_{Vb}^2} \cos(\omega_c t + \epsilon_{Mv}) \quad (37)$$

$$\text{단, } M_{Va} = \frac{1}{\rho \cdot g \cdot L^2 \cdot B} \cdot \frac{M_a}{\zeta} \cos \epsilon_{Mv} \\ = H_{Mv} \cdot \cos \epsilon_{Mv}$$

$$M_{Vb} = \frac{1}{\rho \cdot g \cdot L^2 \cdot B} \cdot \frac{M_a}{\zeta} \sin \epsilon_{Mv} \\ = H_{Mv} \cdot \sin \epsilon_{Mv}$$

$$\epsilon_{Mv} = \tan^{-1}(M_{Vb}/M_{Va}) \quad \rho : \text{해수의 밀도}$$

이 된다. $M_V(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{Mv}(\omega_e)$ 라 하면, $M_V(t)$ 의 스펙트럼 $S_{Mv}(\omega_e)$ 는,

$$S_{Mv}(\omega_e) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{Mv}(\omega_e) \cdot \rho \cdot g \cdot L^2 \cdot B|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e, \alpha) d\alpha \dots\dots\dots (38)$$

이고, $M_V(t)$ 의 분산치 σ_{Mv}^2 은,

$$\sigma_{Mv}^2 = \int_0^{\infty} S_{Mv}(\omega_e) d\omega_e \dots\dots\dots (39)$$

이 된다.

3.3.7 Slamming

슬래밍은 S.S. 8 1/2 위치에서 선저가 수면으로부터 노출되는 동시에 상대속도가 어떤 한계를 넘을 때에 발생하는 현상이다.

이때, 상대변위와 상대속도를 $S(t)$, $\dot{S}(t)$ 라 하면, 다음과 같이 된다.

(1) S.S. 8 1/2 위치에서의 상대변위 $S(t)$ 의 파에 대한 진폭응답함수 $H_s(t)$ 는

$$H_s(t) = S(t)/\zeta_a = \sqrt{S_a^2 + S_b^2} \cos(\omega_e t + \epsilon_s) \dots (40)$$

$$\text{단, } S_a = \cos(k \cdot l_s \cos \chi) - H_z \cos \epsilon_z + k \cdot l_s \cdot H_{\theta} \cdot \cos \epsilon_{\theta}$$

$$H_{\theta} \cdot \cos \epsilon_{\theta}$$

$$S_b = -\sin(k \cdot l_s \cos \chi) - H_z \sin \epsilon_z + k \cdot l_s \cdot H_{\theta} \cdot \sin \epsilon_{\theta}$$

$$H_{\theta} \cdot \sin \epsilon_{\theta}$$

$$\epsilon_s = \tan^{-1}(S_b/S_a), \quad l_s = \overline{\overline{OS}} - \overline{\overline{OG}} = 0.35L - \overline{\overline{OG}}$$

이 된다. $S(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_s(\omega_e)$ 라 하면 $S(t)$ 의 스펙트럼 $S_s(\omega_e)$ 는

$$S_s(\omega_e) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_s(\omega_e)|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e, \alpha) d\alpha \dots\dots\dots (41)$$

이고, $R(t)$ 의 분산치 σ_s^2 은

$$\sigma_s^2 = \int_0^{\infty} S_s(\omega_e) d\omega_e \dots\dots\dots (42)$$

이 된다.

(2) S.S. 8 1/2 위치에서의 상대속도

상대변위 $S(t)$ 를 시간에 대하여 일차미분하므로써 상대속도 $\dot{S}(t)$ 를 구한다.

$$\dot{S}(t) = \dot{\zeta}_a(t) - [\dot{Z}_G(t) - l_s \cdot \dot{\theta}(t)] \\ = \dot{S}_a(t) \cos(\omega_e t + \epsilon_s) \dots\dots\dots (43)$$

$$\text{단, } \dot{S}_a(t) = \sqrt{\dot{S}_c^2 + \dot{S}_s^2}$$

$$\dot{S}_c = \omega_e \{-\zeta_a \sin(k \cdot l_s \cdot \cos \chi) - Z_a \cdot \sin \epsilon_z + l_s \cdot \theta_a \cdot \sin \epsilon_{\theta}\}$$

$$\dot{S}_s = -\omega_e \{\zeta_a \cos(k \cdot l_s \cdot \cos \chi) - Z_a \cdot \cos \epsilon_z + l_s \cdot \theta_a \cdot \cos \epsilon_{\theta}\}$$

$$\epsilon_s = \tan^{-1}(\dot{S}_s/\dot{S}_c) = \tan^{-1}(-\dot{S}_s/\dot{S}_c)$$

$\dot{S}(t)$ 의 파에 대한 진폭응답함수 $H_{\dot{s}}(t)$ 는,

$$H_{\dot{s}}(t) = \dot{S}(t)/\zeta_a \sqrt{g/L} = \sqrt{\dot{S}_a^2 + \dot{S}_b^2} \cos(\omega_e t + \epsilon_s) \\ = (\omega_e / \sqrt{g/L}) \sqrt{S_a^2 + S_b^2} \cos(\omega_e t + \epsilon_s) \dots\dots\dots (44)$$

$$\text{단, } \dot{S}_a = (\omega_e / \sqrt{g/L}) \{-\sin(k \cdot l_s \cdot \cos \chi) - H_z \cdot \sin \epsilon_z + k \cdot l_s \cdot H_{\theta} \cdot \sin \epsilon_{\theta}\}$$

$$= (\omega_e / \sqrt{g/L}) \cdot S_b$$

$$\dot{S}_b = (-\omega_e / \sqrt{g/L}) \{\cos(k \cdot l_s \cdot \cos \chi) - H_z \cdot \cos \epsilon_z + k \cdot l_s \cdot H_{\theta} \cdot \cos \epsilon_{\theta}\}$$

$$= (\omega_e / \sqrt{g/L}) \cdot S_a$$

$$\epsilon_s = \tan^{-1}(\dot{S}_b/\dot{S}_a) = \tan^{-1}(-S_a/S_b)$$

이 된다. $\dot{S}(t)$ 의 주파수 응답함수를 $H_{\dot{s}}(\omega_e)$ 라 하면 $\dot{S}(t)$ 의 스펙트럼 $S_{\dot{s}}(\omega_e)$ 는,

$$S_{\dot{s}}(\omega_e) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{\dot{s}}(\omega_e) \cdot \sqrt{g/L}|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e, \alpha) d\alpha \\ = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\omega_e \cdot H_s(\omega_e)|^2 \cdot S_{\zeta}(\omega_e, \alpha) d\alpha \dots (45)$$

이고, $\dot{S}(t)$ 의 분산치 $\sigma_{\dot{s}}^2$ 은,

$$\sigma_{\dot{s}}^2 = \int_0^{\infty} S_{\dot{s}}(\omega_e) \omega_e \dots\dots\dots (46)$$

가 된다.

3.4 내항성능 평가

선박의 내항성능 평가는 각 내항성능 요소가 그 한계치를 초과하는 발생확률로부터 정의되는 평가치, 위험도를 적용하는 방법을 사용한다.⁷⁾

3.4.1 내항성능 평가요소의 한계 표준편차

내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 는 Gauss분

포로, 그 극치분포는 Rayleigh 분포로 근사할 수 있다.⁹⁾

임의의 내항성능 평가요소의 분산치 σ_i^2 이 구해지면, 확률과정 $X_i(t)$ 의 극치가 어떤 일정값 X_i 을 초과할 확률 P_i 는 다음과 같이 구해진다.¹⁰⁾

$$P_i = \int_{X_i}^{\infty} (x/\sigma_i^2) \exp(-x^2/2\sigma_i^2) dx = \exp(-x_i^2/2\sigma_i^2) \dots (47)$$

이것을 표준편차 σ_i 에 관하여 풀면

$$\sigma_i = \sqrt{-x_i^2/(2 \cdot \ln P_i)} \dots (48)$$

(48) 식에 각 내항성능 평가요소의 한계치 X_{ic} , X_{ic} 를 넘을 확률인 한계확률 P_{ic} 를 고려하면, 위험치가 되는 표준편차 σ_{ic} 를 얻을 수 있다.

$$\sigma_{ic} = \sqrt{-x_{ic}^2/(2 \cdot \ln P_{ic})} \dots (49)$$

3.4.2 내항성능 평가요소의 평가치

임의의 내항성능 평가요소의 극치분포에서 그 발생확률을 $Q(X_i)$ 로 한다. 이때, 표준편차로써 무차원화한 한계치의 역수를 i 요소의 평가치 E_i 라 한다.⁷⁾

$$E_i = 1/\sqrt{-2 \cdot \ln \{Q(x_i)\}} = \sigma_i/x_i \dots (50)$$

3.4.3 내항성능 평가요소의 위험도

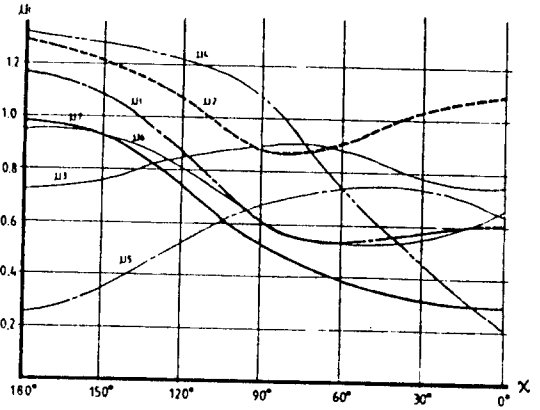
임의의 i 요소의 주어진 한계발생 확률에 관한 한계평가치를 E_{ic} 로 하고, 한계평가치 E_{ic} 에 대한 평가치 E_i 의 비를 i 요소의 위험도 μ_i 라 정의한다.⁷⁾ 즉,

$$\mu_i = \frac{E_i}{E_{ic}} = \frac{\{x_i/\sigma_{ic}\}}{\{x_i/\sigma_i\}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}} \dots (51)$$

여기서, σ_{ic} 는 X_i 가 위험하게 되는 표준편차이다. 위험도 μ_i 는 출회각(χ), 선속(V_s) 및 해상상태(V_w)에 따라 변화한다.

Fig. 4는 한 선속과 해상 상태하의 출회각에 대한 위험도를 구해서 표시한 그림이다.

또한, $\mu_i \geq 1.0$ 인 경우, i 요소가 위험하고, $\mu_i < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다.



- 풍속 18.8 m/sec (= B. F. 8)
- 선속 16.1 knot (= FN 0.2)
- μ_1 : Deck wetness
- μ_2 : Propeller rmcg
- μ_3 : Rolling
- μ_4 : F.P.의 상하가속도
- μ_5 : S.S 8 1/2의 최우가속도
- μ_6 : 선체중양부의 증균형모멘트
- μ_7 : Slamming

Fig. 4 출회각에 대한 위험도

3.4.4 최대 위험도

내항성 평가요소의 위험도 μ_i 에서 최대치를 최대위험도 μ_m 이라 정의한다.

$$\mu_m(V_w, V_s, \chi) = \text{Maximum}[\mu_i(V_w, V_s, \chi)] \dots (52)$$

Fig. 5는 선속 변화와 출회각에 대한 최대위험도를 파악하기 위한 계산예의 일부를 표시한 그림이다.

3.4.5 상대위험도

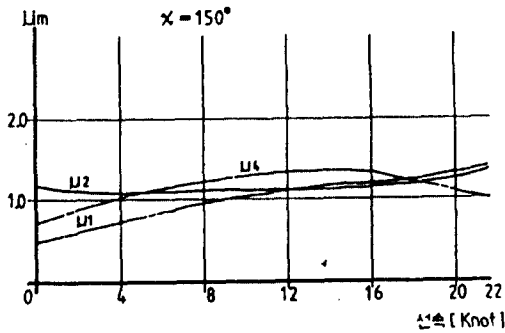
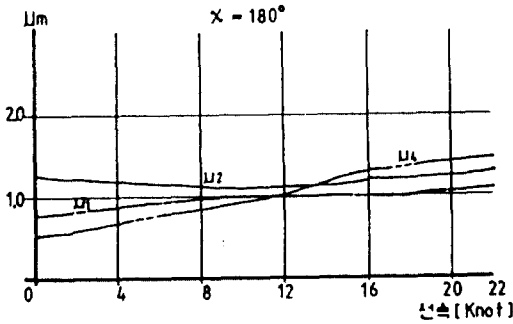
임의의 i, j 요소의 위험도가 μ_i, μ_j 인 경우, i 요소를 기준으로 하여 나타낸 i 요소의 위험도의 비를 i 요소에 대한 j 요소의 상대위험도 μ_{ij} 라 정의한다.⁷⁾ 즉,

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{x_i/\sigma_i}{\alpha_{ij}[\dot{X}_j/\sigma_j]} \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_i} \dots (53)$$

여기서, $\alpha_{ij} = E_{jc}/E_{ic} = [\dot{X}_i/\sigma_{ic}]/[\dot{X}_j/\sigma_{jc}]$ 이다.

상대위험도도 출회각(χ), 선속(V_s), 해상상태(V_w)에 따라 변화한다.

또, $\mu_{ij} > 1.0$ 인 경우는 i 요소에 비해 j 요소가 위험하게 되기 쉽고, $\mu_{ij} < 1.0$ 인 경우는 그 반대의 의



μ_1 : Deck wetness
 μ_2 : Propeller racing
 μ_3 : F.P.의 상가속도

Fig. 5 최대 위험도

미를 갖는다.

이러한 상대위험도 μ_m 를 정의하면, 기준으로 한 i 요소로서 임의의 j 요소의 상태를 평가할 수 있다.⁷⁾

3.5 내항성능 평가에 의한 위험판정법

내항성능 평가요소 중에서 어떤 한개의 요소 i 의 분산치 σ_i^2 를 구하여, 선체의 전반적인 위험을 추정하는 판정법을 고려한다. 이때, 요소 i 를 기준내항성능 평가요소라 정의한다.

먼저, 기준내항성능평가요소의 위험도에 대한 최대위험도의 비, 즉 상대위험도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\mu_m = \frac{\mu_m}{\mu_i} (\geq 1) \dots\dots\dots (54)$$

여기서, μ_m 에 대한 파라미터는 출회각(ν) 선속(V_s), 해상상태(V_w)이 3개이다.

다음으로, (53)식의 상대위험도와 기준내항성능 평가요소의 분산치 σ_i^2 를 이용하여 다음식에 의해 위험도를 판정한다. (54)식을 변형시켜서 다음식을 얻을 수 있다.

$$\mu_m = i\mu_m \cdot \mu_i = i\mu_m \cdot \sqrt{\sigma_i^2 / \sigma_{ic}^2} \dots\dots\dots (55)$$

여기서 $\mu_m \geq 1$ 인 경우는 위험하고, $\mu_m < 1$ 인 경우는 안전하다고 판정할 수 있으므로, 식 (55)의 우변에 의해서도 동일한 방법으로 판정할 수 있다.

제 4 장 위험판정 시스템

4.1 기준내항성 요소

7개의 내항성능 평가요소중, 어떤 요소를 기준내항성요소로 할 것인가를 고려한다.

여기서는, 7개 요소의 분산치를 태풍과 선박의 정보에 의해 이론적으로 계산하여 구하지만, 선박에 판정시스템을 제공하는데 있어서는 측정이 용이한 요소를 선택하여야 한다.

여기서는 가속도계의 설치에 의해 측정하는 것으로 하면, F.P.의 상가속도(X_4)와 S.S. 8 1/2의 좌우가속도(X_5)의 측정이 가능하지만, F.P.의 상가속도(X_4)를 기준내항성 요소로 선택한다.

따라서, 위험판정을 위한 (55)식에서 상대위험도 $i\mu_m$ 은 다음식으로 고려할 수 있다.

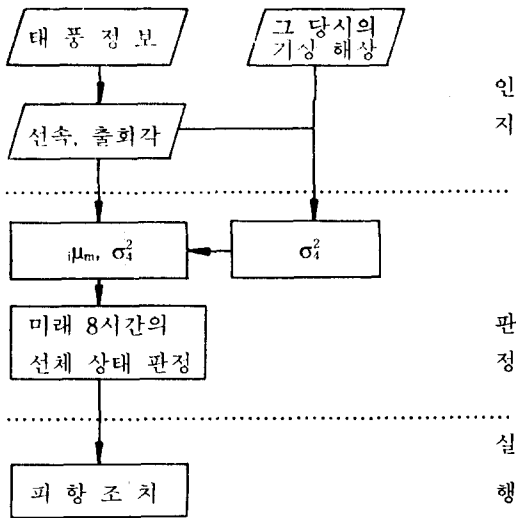
$$i\mu_m(V_w, V_s, \chi) = \frac{\mu_m(V_w, V_s, \chi)}{\mu_4(V_w, V_s, \chi)} \dots\dots\dots (56)$$

상대위험도 $i\mu_m$ 은 세계의 파라미터를 갖고 있지만, 선속을 일정하게 하면 다음과 같다.

$$i\mu_m(V_w, \chi) = \frac{\mu_m(V_w, \chi)}{\mu_4(V_w, \chi)} \dots\dots\dots (57)$$

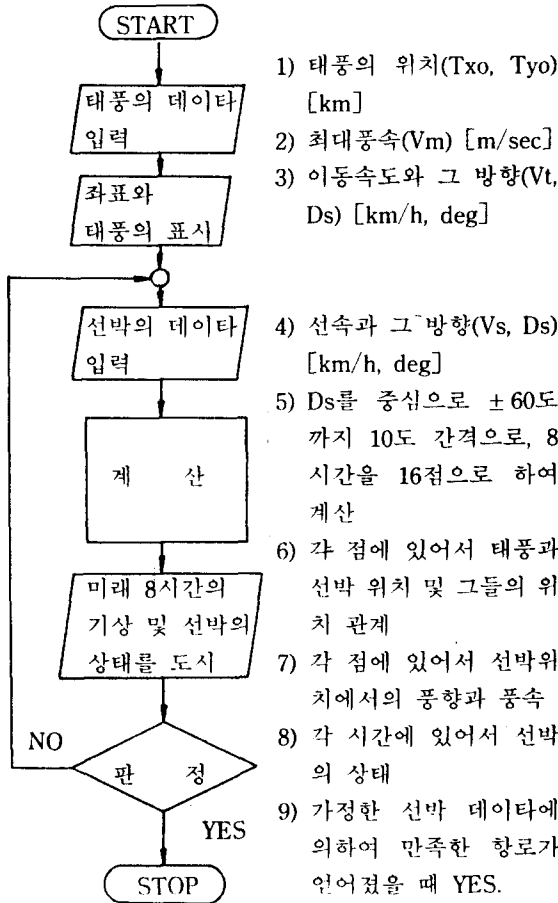
4.2 위험판정 시스템

위험판정 시스템은 기상예보에 의한 태풍정보와 선박의 침로, 속력에 의해, 현시점에서 부터 미래 8시가까지의 위험도를 현 침로를 기준으로 하여 10도 간격으로 좌우현 각각 60도까지 계산함으로써, 침로와 시각에 따라 위험성을 판정할 수 있도록 함과 동시에 선체, 해상상태에 대한 정보를 얻을 수 있도록 한다.



4.2.1 피항판정 시스템의 프로그램

(1) 프로그램의 흐름



- 1) 태풍의 위치(Txo, Tyo) [km]
- 2) 최대풍속(Vm) [m/sec]
- 3) 이동속도와 그 방향(Vt, Ds) [km/h, deg]
- 4) 선속과 그 방향(Vs, Ds) [km/h, deg]
- 5) Ds를 중심으로 ±60도 까지 10도 간격으로, 8시간을 16점으로 하여 계산
- 6) 각 점에 있어서 태풍과 선박 위치 및 그들의 위치 관계
- 7) 각 점에 있어서 선박 위치에서의 풍향과 풍속
- 8) 각 시간에 있어서 선박의 상태
- 9) 가정한 선박 데이터에 의하여 만족한 항로가 얻어졌을 때 YES.

(2) 프로그램의 계산

- 1) 시간 t에서의 태풍의 위치(Tx, Ty)

$$Tx(t) = Tx_0 + t \cdot V_t \cdot \cos Dt \text{ [km]}$$

$$Ty(t) = Ty_0 + t \cdot V_t \cdot \sin Dt \text{ [km]}$$
- 2) 시간 t에서의 선박의 위치(Sx, Sy)

$$Sx(t) = t \cdot V_t \cdot \cos Ds \text{ [km]}$$

$$Sy(t) = t \cdot V_t \cdot \sin Ds \text{ [km]}$$
- 3) 시간 t에 있어서, 태풍을 원점으로 한 선박의 위치(Sxt, Syt)

$$Sxt(t) = Sx(t) - Tx(t) \text{ [km]}$$

$$Syt(t) = Sy(t) - Ty(t) \text{ [km]}$$
- 4) 3)의 극좌표 표현(R, Dst)

$$R(t) = \{Sxt(t)^2 + Syt(t)^2\}^{1/2} \text{ [km]}$$

$$Dst(t) = \tan^{-1} \{Syt(t)/Sxt(t)\}$$
- 5) 태풍으로부터 거리 R 떨어진 지점에서의 풍속(Vr)

$$R_m = 0.247 \cdot V_m^2$$

$$E = 0.391 + \log_{10}(V_m/8)$$

$$R_n = 10R/R_m$$

$$V_r(R) = \frac{V_m \exp(1 - 1/R_n)}{R_n^E} : (V_r(R) > V_m) \text{ [m/sec]}$$

$$V_r(R) = V_m : (V_r(R) = V_m) \text{ [m/sec]}$$

$$V_r(R) = 6 : (V_r(R) < 6) \text{ [m/sec]}$$
- 6) 태풍으로부터 거리 R 떨어진 지점에서의, 태풍의 이동속도(Vt)에 의한 영향풍속(Vtr)

$$P_0 = 1010 - (V_m/7)^2 \text{ [mb]}$$

$$P = 1010 - P_0 \text{ [mb]}$$

$$R_0 = R_m \cdot \ln\{(1010 - P_0)/(1000 - P_0)\} \text{ [km]}$$

$$C_0 = 2 \times 7.292 \times 10^{-5} \cdot \sin 20^\circ \text{ [rad/sec]}$$

$$\gamma = 1.22 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$C = 0.65$$

$$F(R) = -0.5 \cdot C_0 \cdot R + \{P \cdot R_0 / (\gamma^2) \cdot \exp(-R_0/R) + 0.25(C_0 \cdot R)^2\}^{1/2}$$

$$F(R_0) = -0.5 \cdot C \cdot R_0 + \{P \cdot R_0 / (\gamma^2) \cdot \exp(-R_0/R) + 0.25(C_0 \cdot R)^2\}^{1/2}$$

$$V_{tr}(R) = C \cdot V_t \cdot F(R) / F(R_0) \text{ [m/sec]}$$
- 7) 시간 t일때, 태풍으로부터 거리 R 떨어진 지점의 풍향(Dw)

$$D_w(t) = Dst(t) + (20 - 90) \cdot \pi / 180 \text{ [rad]}$$

- 8) 태풍의 이동을 고려한, 시각 t에서의 태풍으로 부터 거리 R인 지점의 풍속(V_w)과 풍향(D_{WR})

$$V_w(t) = \{V_{tr}(R)^2 + V_r(R)^2 - 2 \cdot V_{tr}(R) \cdot V_r(R) \cdot \cos(\pi + Dt - D_w(t))\}^{1/2}$$

: $V_w(t) \geq 8$ [m/sec]

$V_w(t) = 6$: $(V_w(t) < 8)$ [m/sec]

$$D_{WR}(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_r(R) \cdot \sin(D_w(t)) + V_{tr}(R) \cdot \sin(Dt)}{V_r(R) \cdot \cos(D_w(t)) + V_{tr}(R) \cdot \cos(Dt)} \right\}$$

[rad]

- 9) 선수방향에 대한 풍향(D_{ws})과 이것에 선속을 고려한 상대풍향(D_{WSR})

$D_{ws}(t) = D_{wr}(t) - D_s$

$$D_{WSR}(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_w(t) \cdot \sin(D_{ws}(t))}{V_w(t) \cdot \cos(D_{ws}(t)) - (V_s/36)} \right\}$$

[rad]

- 10) 이 프로그램의 수치계산에서 이용하는 대상 선형은 SR 108인 Lpp=175mm컨테이너선이다.

선속은 선속저하를 고려하지 않은 평수중 항해속력 $F_n=0(0kt)$, $F_n=0.2(16.1kt)$, $F_n=0.275(22.1kt)$ 에 대하여 각각 구한다. 이 분산치를 출회각(χ)과 선속(V_s)에 대하여 보간함으로써 위험판정을 위한 분산치 ($Bun(t)$)를 얻는다.

$Bun_i(t) = Bun_i(V_w(t), V_s, \chi(t))$

$\chi(t)$ 는 다음식에 의해 구한다.

$\chi(t) = |D_{ws} - \pi| - \pi$ [rad]

- 11) 위험을 판정하기 위한 위험평가치(Eval) 분산치를 이용하여 각 내항성능 평가요소의 위험도를 구하여, 상대위험도($4\mu m$)을 구한다. 기준내항성 요소의 분산치는 선박에서의 계측에 의한 값이어야 하나, 여기서는 계산에 의한 값을 사용한다.

$Eval = 4\mu m \cdot \left[\frac{Bun_i(t)}{Bun_i^*} \right]^{1/2}$

Bun_i^* 는 $Bun_i(t)$ 가 위험하게 되는 값으로, 일정치로 주어진다.

$Bun_i^* = 4.455$ [n^2/sec^4]

- (3) 프로그램의 대상선박 선형
수치계산에 사용한 대상선형은 SR108의 Lpp=175m Container선이다. 그 주요목을 Table 1에 표시한다.
- (4) 수치계산에서의 한계치, 한계확률
내항성능 평가요소의 분산치를 계산할 때의 각 요소의 한계치 및 한계확률은 다음과 같이 취하였다.¹²⁾

1) F.P.의 Deck wetness

- 한계치 : 정수중 항주시의 수위상승을 고려한 F.P.의 유효건현을 한계치로 하였다.

○ 한계확률 : 2×10^{-2}

2) Propeller 노출

- 정수중 항주시의 수위상승을 고려하여, Propeller상단노출을 한계치로 하였다.
- 한계확률 : 2×10^{-1}

3) Rolling

- 선체중앙부 Weather side의 bulwark top에 해수가 유입하는 것을 한계상태로 생각하여, 정수중 : 출수면에서 bu'

Table 1. Principal particular of ship

| ITEMS | | DIMENSIONS |
|-----------------------|--------------|------------|
| Length P.P | Lpp(m) | 175.00 |
| Breadth | B(m) | 25.40 |
| Depth | D(m) | 15.40 |
| Mean Draft | d_m (m) | 9.50 |
| Displacement volume | (m^3) | 24,742 |
| Block coefficient | C_B | 0.572 |
| Length-breadth ratio | L/B | 6.89 |
| Breadth-draft ratio | B/D | 2.67 |
| Center of buoyancy | lcb(% Lpp) | 1.417 |
| Height of C.G. | KG(m) | 9.52 |
| Metacentric height | GM(m) | 1.00 |
| Rolling period | T_R (sec) | 18.00 |
| Radius of gyration | K_{yy}/Lpp | 0.24 |
| Propeller diameter | D_p (m) | 6.50 |
| Propeller pitch ratio | P | 1.055 |

내항성능평가요소의 분산치(Bun)는 응답 함수와 파스펙트럼에 의하여, 출회각(χ)은 선수파로부터 30도 간격으로 추과까지,

wark top까지의 높이를 한계치로 하였다.

○ 한계 확률 : 10^{-3}

4) F.P.의 상하가속도

○ 한계치 : $0.8g$ ……Container강도 JIS(Z 1618-1972)에 의함

g는 중력가속도이다.

○ 한계 확률 : 10^{-3}

5) S.S.8 1/2의 좌우가속도

○ 한계치 : $0.6g$ ……Container강도 JIS(Z 1618-1972)에 의함

g는 중력가속도이다.

○ 한계 확률 : 10^{-5}

6) 선체중앙부의 종 Bending moment

○ 한계치 : 허용과랑하중을 70,000 ton-m로 추정하였다.

○ 한계 확률 : 10^{-5}

7) Slamming

○ Threshold velocity는 $V_{th} = 0.09 \sqrt{gL}$ 로써 추정하였다.

g는 중력가속도이다.

○ 한계 확률 : 10^{-2}

제 5 장 항해안전 평가시스템에 의한 시뮬레이션.

5. 1 시뮬레이션의 실행

태풍에 대한 입력 데이터는 다음과 같다.

| | | |
|------|------------|---------|
| 위치 | (100, 200) | [km] |
| 중심시도 | 985 | [mb] |
| 최대풍속 | 35 | [m/sec] |
| 이동속도 | 10 | [km/h] |
| 이동방향 | 45 | [deg] |

선박에 관한 입력데이터는 다음과 같다.

| | | |
|------|--------|--------|
| 선속 | 30, 40 | [km/h] |
| 이동방향 | 45 | [deg] |

시뮬레이션 결과의 일부 Fig. 6~Fig. 10에 나타낸다.

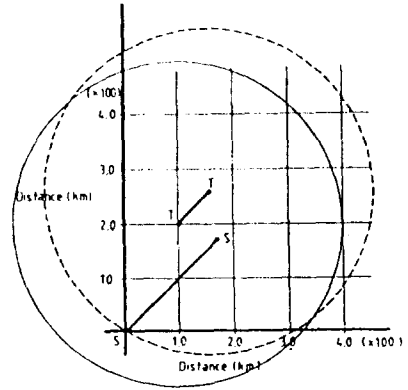


Fig. 6 좌표계에 의한 선박과 태풍의 위치표시

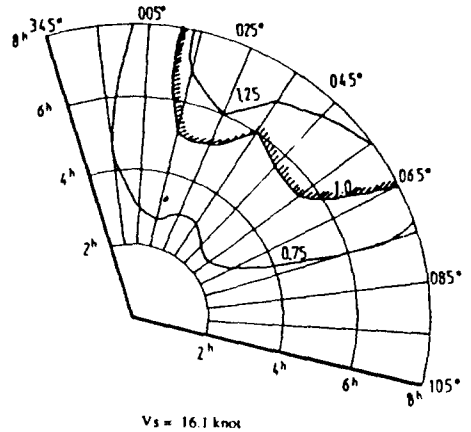


Fig. 7-1 위험평가치

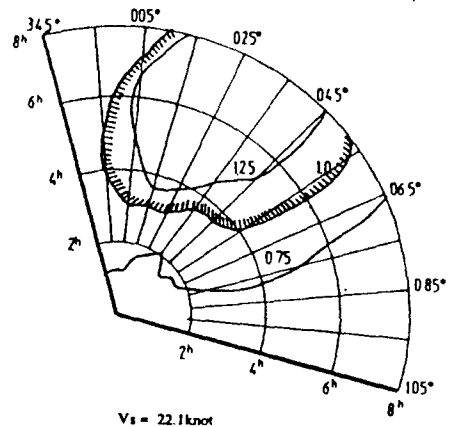


Fig. 7-2 위험평가치

Fig. 6에서 좌표계에 의한 선박과 태풍의 위치를 표시하였고 Fig. 7-1, 7-2에서는 현재의 침로와 시각을 기준으로 하여, 좌우현 각 60도, 미래 8시간까지의 위험판정치를 나타내고 있다. 따라서 위험판정과 피항의 실행은, 변침피항만 행한다면 Fig. 7-1에서, 변속피항을 행한다면 선속의 데이터를 다시 입력하여 Fig. 7-2와 같은 새로운 정보에 의해 실행할 수 있다.

Fig. 8~Fig. 10는 선체와 해상상태를 현침로에 대하여 미래 8시간까지 나타낸 것이다.

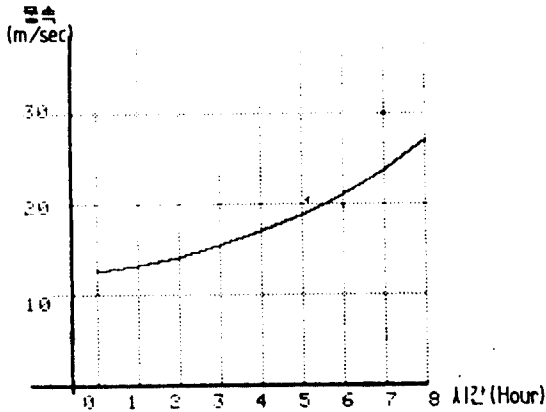


Fig. 8 풍속(Vw)

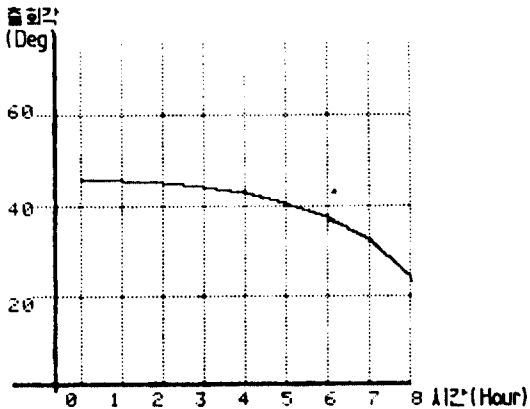


Fig. 9 출회각(χ)

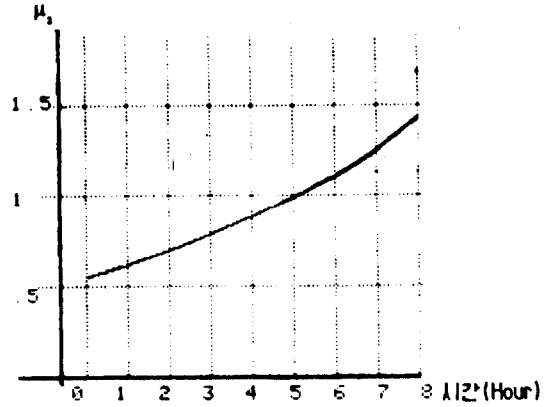


Fig. 10-1 Propeller Racing(μ₂)의 위험도

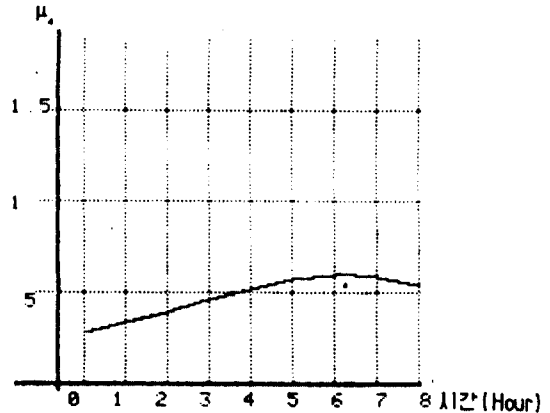


Fig. 10-2 F.P.상하가속도(μ)의 위험도

5.2 고찰

항천항해시 항해안전 평가시스템에 의한 선체의 위험평가는 Fig. 7을 이용하여, 위험평가가치가 1.0 이상인 구역에 있을 때는 위험한 것으로, 그렇지 않을 때는 위험하지 않은 것으로 판단할 수 있다. 또한, 위험평가치의 수치가 낮을수록 선체는 안전한 상태라고 평가할 수 있다.

항천위험으로부터의 피항방법은 변침, 변속, 변침변속의 동시실행의 3가지 방법이 있다.

변침피항의 경우는 위험평가치가 1.0 이상이 되는 구역을 피하도록 침로를 변경하면 안전하게 항해할 수 있을 것이다. 이것은 위험평가치가 침로,

즉 출회각을 파라미터로 가지므로, Fig. 5의 출회각에 의한 위험도에서도 알 수 있다. 즉, 침로에 의한 출회각이 180도에서 80도 사이에서는 F.P.의 상하가속도가 가장 위험하고 1.0보다 크며, 80도에서 40도 사이에서는 위험요소가 없으며, 40도에서 0도까지는 프로펠라 레이싱이 위험하므로, 위험하지 않는 출회각을 갖도록 변침한다는 의미이다.

변속피항의 경우는, Fig. 7-1과 Fig. 7-2에서와 같이 위험구역에 진입하는 시간의 차이가 있을 뿐이므로, 위험구역 진입전에 태풍의 강도나 이동방향이 변하지 않는 한 언젠가는 위험구역에 들어가게 된다. 그러나, 변속에 의하여 진입전까지 변속전보다는 안전한 상태로 항해할 수 있을 것이다. 즉, 감속에 의해 위험도 μ_g 가 일반적으로 감소하는 경향을 보이기 때문이다.

변침변속의 피항법은 변침피항에 의해 위험구역을 회피함과 동시에, 변속에 의해 좀 더 안전한 상태로 항해할 수 있을 것이다.

제 6 장 결 론

황천의 가장 가혹한 상태인 태풍에 대하여, 항해중인 선박이 처해있는 상황에서 어떻게 안전하게 항해할 것인가에 관한 항해안전 평가시스템을 완성하기 위하여 행한 연구의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 자동항해평가시스템에 태풍정보와 선박데이터를 입력함으로써, 현침로를 기준으로 하여 좌우현 각각 60도까지, 입력시점으로 부터 미래 8시간까지의 선박이 조우하는 해상상태와 선박의 황천에 대한 위험상태를, 선장의 경험에 의하지 않고 본 시스템에 의해 자동적으로 평가함으로써, 정량적인 판정에 의해, 피항조치를 취할 수 있게 하였다.

(2) 상하가속도계의 설치에 의해, F.P.의 상하가속도만을 측정하여, 선박의 황천위험을 평가할 수 있는 방법을 제시하였다.

(3) 선박의 항해자동화가 될 수 있는 황천피항의 한가지 방법을 제시 하였다.

(4) 본 시스템에서의 태풍표현을 가능한 한 실

제의 것과 근사시키고, 태풍이외의 어떠한 기상상태에도 대응할 수 있는 해상상태의 표현을 고려하여, 시스템의 일반성을 도모하여야 한다고 사료된다.

(5) 선속저하, 조타 가능성, 주기의 운전가능성 등을 포함하는 선박의 항해능력 평가¹⁰⁾도 고려하면, 일반적이고, 최적의 판정법이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) E. N. Comstock, S. L. Bales and R. G. Keane : Seakeeping in ship operation, Proc. of 5th STAR Symposium, SNAME, p.197, 1980.
- 2) 関内彦 : 海洋氣象學, 亞成出版社, pp.271~285, 1973.
- 3) 福地章 : 海洋氣象講座, 成山堂書店, pp.139~140, 1983.
- 4) 日本造船學會 海洋工學委員會 設計分析會 : 海洋構造物の 設計ガイド, 日本造船學會誌, 第669號, pp.152~154, 1985.
- 5) 日本造船研究協會 : 氣象海象および船舶の波浪中應答に關する統計解析 實船計測報告書, 第163 研究部會, pp.27~29, 1977.
- 6) 日本氣象協會 : 港灣氣象海象シリーズ①, 港灣氣象海象要覽, 東京灣, 1982.
- 7) 金順甲 : 船舶의 波浪중 耐航性能評價에 관한 研究, 韓國航海學會誌, 第11卷, 第1號, pp.69~74, pp.80~81, 1987.
- 8) W. G. Price, R. E. D. Bishop : Probabilistic Theory of Ship Dynamics, Chapman and Hall Ltd. pp.157~163, 1974.
- 9) 福田淳一 : 船體應答の 統計的豫測, 第1回 耐航性に關するシンポジウム, 日本造船學會, pp.99~109, 1969.
- 10) Rameswar Bhattacharyya : Dynamics of Marine Vehicles, John Wiley & Sons, p.119, 1978.
- 11) 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, pp.131~

136, 1969.

- 12) 日本造船研究協會, 第 125 研究部會: 超高速
コンテナ 船の耐航性に關する報告書, 研究資
料 No. 211, p. 31, 1975.

- 13) 金順甲: 船舶의 風波중 航海能力 및 推進性能
評價에 관한 研究, 韓國航海學會誌, 第 14卷,
第 2號, p. 16, 1990.