

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 **

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 author suggests a computer model of navigational safety evaluation system and examined the validity of the model by computer simulation.

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.

본 연구는 황천의 가장 가혹한 상태인 태풍에 대하여, 기상예보로 부터의 태풍정보를 이용하여 항해중인 선박이 처해있는 상황에서 어떻게 안전하게 항해할 것인가에 관하여, 파랑중에서의 선체운동해석을 행하고 확률과정론적 스펙트럼이론과 내항성능평가이론 등을 이용하여 황천시의 항해안전 평가시스템을 개발하는 데 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 175m 인 컨테이너선을 대상모델로 하여 선체의 내항성능 평가요소를 정의하고, 그 응답함수를 구한다.
- (4) 내항성능 평가요소의 응답 스펙트럼을 이용하여 선체의 안전상태를 추정한다.

* 한국해양대학

** 한국해기연수원

- (5) 위험판정에 필요한 각 내항성능 평가요소의 평가치와 위험도, 상대위험도 및 최대위험도를 정의하여 구한다.
- (6) 내항성능 평가요소의 계산된 위험도를 분석하고, 그 계측의 편리성을 고려하여 상하가속도를 기준내항성요소로 한다. 그리고 항해시간, 침로변경 및 변속에 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 근사표현

2.1.1 태풍권내의 풍속 (V_r)

태풍의 등압선은 원을 이루고 있고, 태풍은 일단 정지하고 있다고 가정한다. 태풍중심으로부터 거리 R [Km] 인 지점의 풍속 V_r [m/sec]은 다음식으로 표현할 수 있다.

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

단, $E = 0.391 + \log_{10}(V_m/8)$

$R_n = 10 R / R_m$

V_m : 최대풍속

R_m : 최대 등압선의 반경

2.1.2 태풍의 이동에 의한 영향풍속 (V_{tr})

태풍의 이동속도를 V_t 라 하면, 이동에 의한 영향풍속 V_{tr} 은 다음 식으로 구할 수 있다.²⁾

$$V_{tr}(R) = C \cdot V_t \cdot F(R) / F(R_o) \quad [\text{m/sec}] \quad \text{-----}(2)$$

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

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

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

여기서, C : 대략 0.6~0.7이며, 0.65로 한다.

V_t : 태풍의 이동속도

[m/sec]

P : 1010 - P_o

P_o : 태풍의 중심기압

[mb]

γ : 건조대기의 단위 체적당의 중량

(기온 15°C, 기압 1010mb일때 1.22 [kg/m³])

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

ω : 지구자전의 각속도 (7.292×10^{-5} [rad · sec⁻¹])

Lat : 풍속 측정지점의 위도

[deg]

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

2.1.3 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 다음식으로 표시된다.⁶⁾

$$V_w(R) = \{ V_r(R)^2 + V_{tr}(R)^2 - 2 \cdot V_r(R) \cdot V_{tr}(R) \cdot \cos(\pi + D_t - D_w) \}^{1/2} \quad [\text{m/sec}] \quad \text{-----}(3)$$

2.1.4 태풍권내의 풍향 (D_w)

태풍에 대한 선박의 방향을, 공간고정좌표의 X축을 기준으로 반시계 방향으로 측정하여 D_{st} 라 하면, 다음식으로 표현될 수 있다.²⁾

$$D_w = D_{st} + (20 + 90) \cdot \pi / 180 \quad [\text{rad}] \quad \text{-----}(4)$$

2.1.5 태풍의 이동을 고려한 풍향(D_{WR})

태풍의 이동을 고려한 풍향 D_{WR} 은 다음식으로 표현될 수 있다. ³⁾

$$D_{WR} = \tan^{-1} \{ [Vr(R) \cdot \cos(D_w) + Vtr \cdot \cos(Dt)] / [Vr(R) \cdot \sin(D_w) + Vtr \cdot \sin(Dt)] \}$$
[rad] ----- (5)

2.1.6 태풍권외의 풍향(D_w)

태풍권외 ($R > R_m$)에서의 풍향은, 일반류의 방향으로 근사한다.

$$D_w = Dt$$
[rad] ----- (6)

제 3 장 내항성능 평가

3.1 내항성능 평가요소

파랑중 선박의 내항성능을 평가하기 위해, 선체의 운동으로부터 생기는 다음과 같은 현상을 내항성능 평가요소로 한다. ⁴⁾

- (1) Deck Wetness (X_1)
- (2) Propeller racing (X_2)
- (3) Rolling (X_3)
- (4) F. P. 의 상하 가속도(X_4)
- (5) S. S. 8 1/2의 좌우 가속도 (X_5)
- (6) 선체 중앙부의 파랑종급힘 모멘트(X_6)
- (7) Slamming (X_7)

3.2 해양파 스펙트럼

바람에 의해 발생하는 파를 완전발달파라 하면, 파 스펙트럼은 몇가지가 통용되고 있으나 풍속에 의한 해상상태를 표현하기 위하여 Pierson - Moskowitz에 의한 다음식을 사용한다. ⁵⁾

$$S_{\zeta}(\omega) = 0.78 \omega^5 \exp \{ (-0.74) (g/V_w \cdot \omega)^4 \} \quad \text{-----}(7)$$

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 ($-\pi/2$)로 부터 ($\pi/2$)의 범위에 걸쳐 ($\cos^2 \theta$) 분포를 하고, 그외의 범위에서는 0으로 가정하면, 파 스펙트럼은 다음 식으로 주어진다.

$$S_{\zeta}(\omega, \theta) = \frac{2}{\pi} \cdot S_{\zeta}(\omega) \cos^2 \theta \quad ; \quad -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2 \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$= 0 \quad ; \quad \text{그 외의 경우}$$

여기서, θ : 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 $H_{xi}(\omega, V_s, \chi - \theta)$ 라 하면, $X_i(t)$ 의 스펙트럼 $S_{xi}(\omega, \chi)$ 는

$$S_{xi}(\omega, \chi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |H_{xi}(\omega, V_s, \chi - \theta)|^2 S_{\zeta}(\omega, \theta) d\theta \quad \text{-----}(9)$$

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

$$\sigma_i^2(V_w, V_s, \chi) = \int_0^{\infty} S_{xi}(\omega, \chi) d\omega \quad \text{-----}(10)$$

3.4 내항성능 평가

선박의 내항성능 평가는 각 내항성능 요소가 그 한계치를 초과하는 발생확률로부터 정의되는 평가치, 위험도를 적용하는 방법을 사용한다.⁴⁾

3.4.1 내항성능 평가요소의 한계 표준편차

내항성능 평가요소의 확률과정 $X_i(t)$ 는 Gauss분포로, 그 극치분포는 Rayleigh 분포로 근사할 수 있다.

임의의 내항성능 평가요소의 분산치 σ_i^2 이 구해지면, 확률과정 $X_i(t)$ 의 극치가 어떤 일정값 X_1 을 초과할 확률 P_i 는 다음과 같이 구해진다.⁹⁾

$$P_i = \int_{X_1}^{\infty} (x / \sigma_i^2) \exp(-x^2 / 2 \sigma_i^2) dx = \exp(-x_1^2 / 2 \sigma_i^2) \quad \text{-----}(11)$$

이것을 표준편차 σ_i 에 관하여 풀면

$$\sigma_i = \sqrt{-x_1^2 / (2 \cdot \ln P_i)} \quad \text{-----}(12)$$

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.

$$\sigma_{ic} = \sqrt{-x_{ic}^2 / (2 \cdot \ln P_{ic})} \quad \text{-----}(13)$$

3.4.2 내항성능 평가요소의 평가치

임의의 내항성능 평가요소의 극치분포에서 그 발생확률을 $Q(X_i)$ 로 한다. 이 때, 표준편차로써 무차원화한 한계치의 역수를 i요소의 평가치 E_i 라 한다.⁴⁾

$$E_i = 1 / \sqrt{-2 \cdot \ln \{Q(\dot{x}_i)\}} = \sigma_i / \dot{x}_i \quad \text{-----}(14)$$

3.4.3 내항성능 평가요소의 위험도

임의의 i요소의 주어진 한계발생확률에 관한 한계평가치를 E_{ic} 로 하고, 한계평가치 E_{ic} 에 대한 평가치 E_i 의 비를 i요소의 위험도 μ_i 라 정의한다.⁴⁾

즉,

$$\mu_i = \frac{E_i}{E_{ic}} = \frac{\{\dot{x}_i / \sigma_{ic}\}}{\{\dot{x}_i / \sigma_i\}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ic}} \quad \text{-----}(15)$$

$\mu_i \geq 1.0$ 인 경우, i요소가 위험하고, $\mu_i < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다.

3.4.4 최대 위험도

내항성 평가요소의 위험도 μ_i 에서 최대치를 최대위험도 μ_m 이라 정의한다.

$$\mu_m(V_w, V_s, \chi) = \text{Maximum} [\mu_i(V_w, V_s, \chi)] \quad \text{-----}(16)$$

3.4.5 상대위험도

임의의 i, j요소의 위험도가 μ_i, μ_j 인 경우, i요소를 기준으로 하여 나눈 j요소의 위험도의 비를 i요소에 대한 j요소의 상대위험도 $i\mu_j$ 라 정의한다.⁴⁾

$$i\mu_j = \frac{\mu_j}{\mu_i} = \frac{\dot{x}_i / \sigma_i}{\alpha_{ij} [\dot{x}_j / \sigma_j]} = \frac{\sigma_{ic}}{\sigma_{jc}} \cdot \frac{\sigma_j}{\sigma_i} \quad \text{-----}(17)$$

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

3.5 내항성능 평가에 의한 위험판정법

내항성능 평가요소중에서 어떤 한개의 요소 i의 분산치 σ_i^2 을 구하여, 선체의 전반적인 위험을 추정하는 판정법을 고려한다. 이때, 요소 i를 기준내항성능 평가요소라 정의한다.

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

$$i\mu_m = \mu_m / \mu_i \quad \text{-----}(18)$$

(17)식의 상대위험도와 기준내항성능 평가요소의 분산치 σ_i^2 를 이용하여 다음식에 의해 위험도를 판정한다.

$$\mu_m = i\mu_m \cdot \mu_i = i\mu_m \cdot \sqrt{\sigma_i^2 / \sigma_{ic}^2} \quad \text{-----}(19)$$

여기서 $\mu_m \geq 1$ 인 경우는 위험하고, $\mu_m < 1$ 인 경우는 안전하다고 판정할 수 있으므로, 식(19)의 우변에 의해서도 동일한 방법으로 판정할 수 있다.

제 4 장 위험판정 시스템

4.1 기준내항성 요소

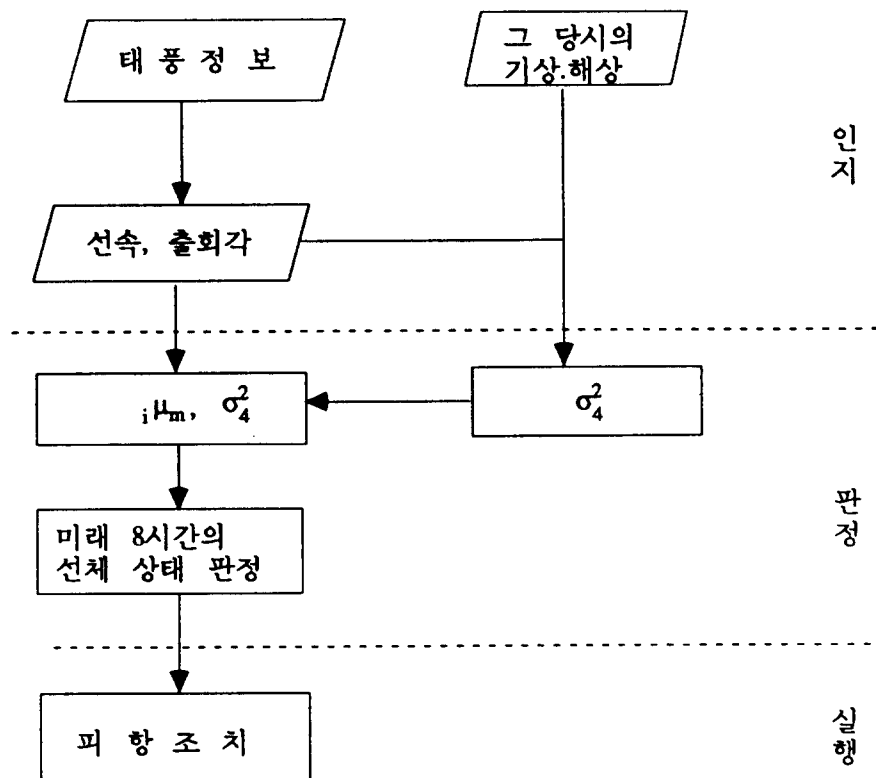
7개의 내항성능 평가요소중, F.P의 상하가속도(X_4)를 기준내항성 요소로 선택한다.

따라서, 위험판정을 위한 상대위험도 $i\mu_m$ 은 다음식으로 고려할 수 있다.

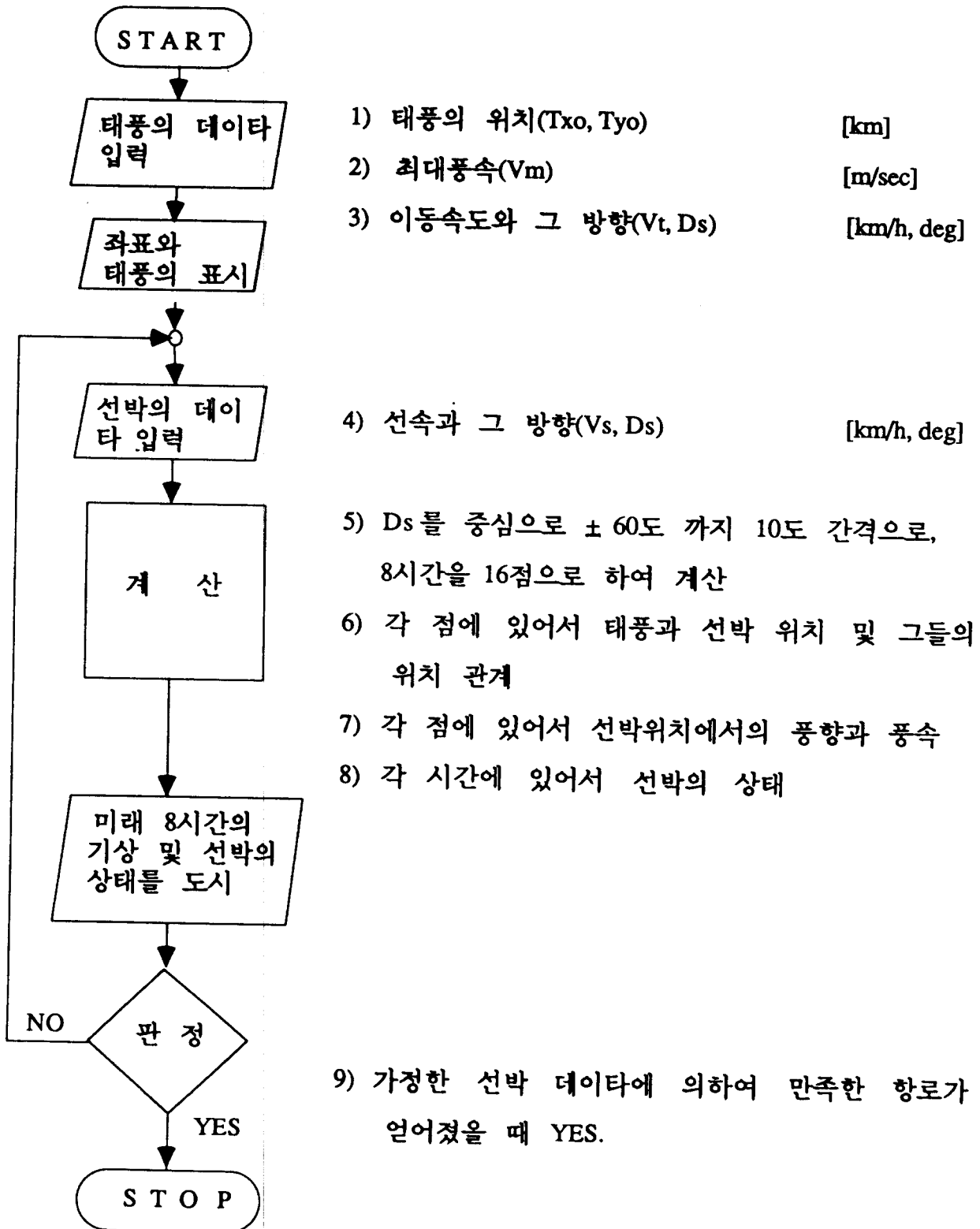
$$i\mu_m(V_w, \chi) = \frac{\mu_m(V_w, \chi)}{\mu_4(V_w, \chi)} \quad \text{-----}(20)$$

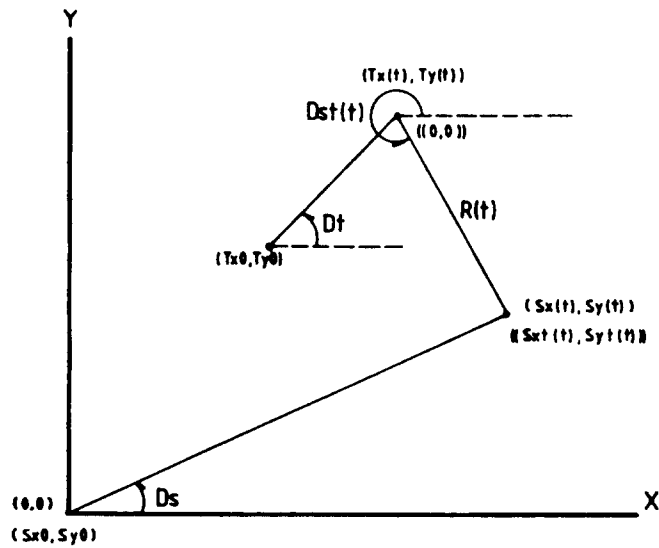
4.2 위험판정 시스템

위험판정시스템은 기상예보에 의한 태풍정보와 선박의 침로, 속력에 의해, 현시점으로 부터 미래 8시간까지의 위험도를 현 침로를 기준으로 하여 10도간격으로 좌우현 각각 60도까지 계산함으로써, 침로와 시각에 따라 위험성을 판정할 수 있도록 함과 동시에 선체, 해상상태에 대한 정보를 얻을 수 있도록 한다.



4.3 피항판정 시스템의 흐름





- o 시간 t 에서의 태풍위치 $(Tx(t), Ty(t))$
- o 태풍의 이동속도와 그 방향 V_m
- o 시간 t 에서의 선박위치 $(Sx(t), Sy(t))$
- o 선속과 그 방향 V_s, D_s
- o 태풍에 대한 선박의 위치 $(Sxu(t), Syu(t))$
- o 태풍에 대한 선박위치의 극좌표 표시 $(R(t), Dst(t))$

Fig. 1 선박과 태풍의 좌표계

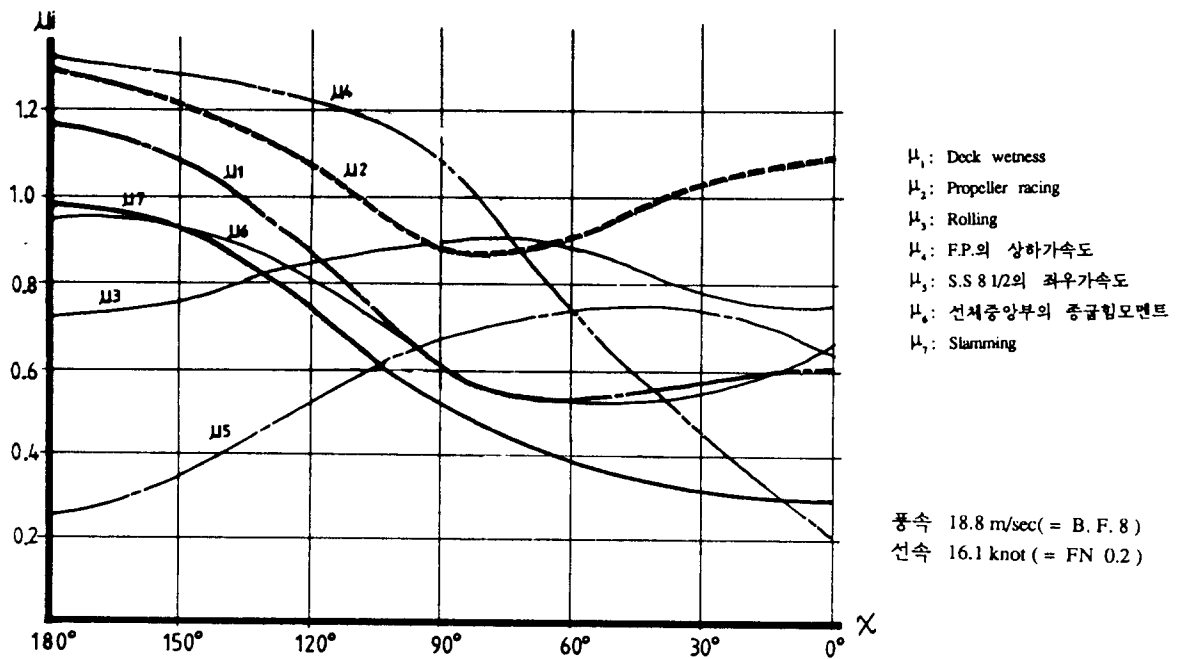
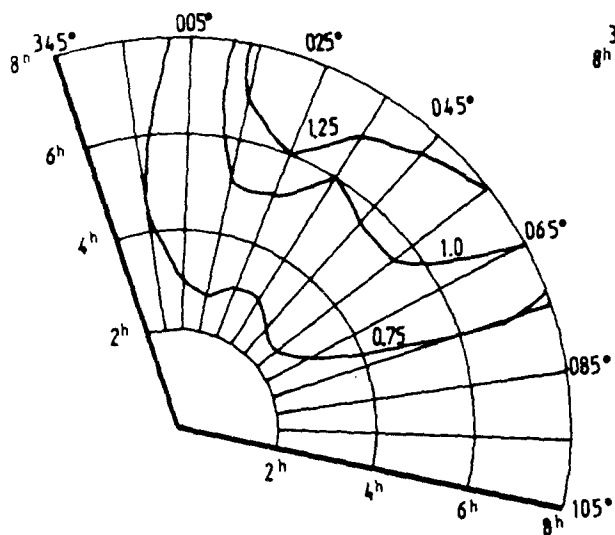
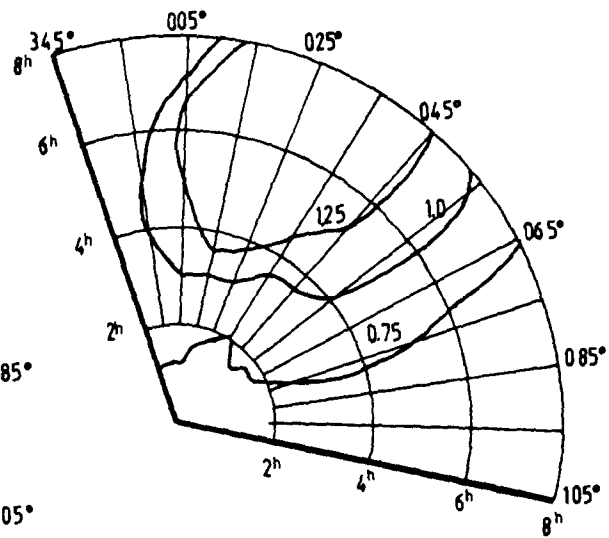


Fig. 2 출회각(X)에 의한 위험도



$V_s = 16.1 \text{ knot}$

Fig. 3 위험평가치



$V_s = 22.1 \text{ knot}$

Fig. 4 위험평가치

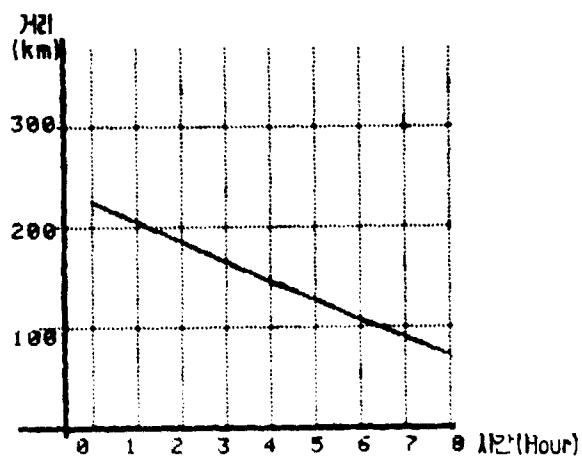


Fig. 5 선박과 태풍과의 거리(R)

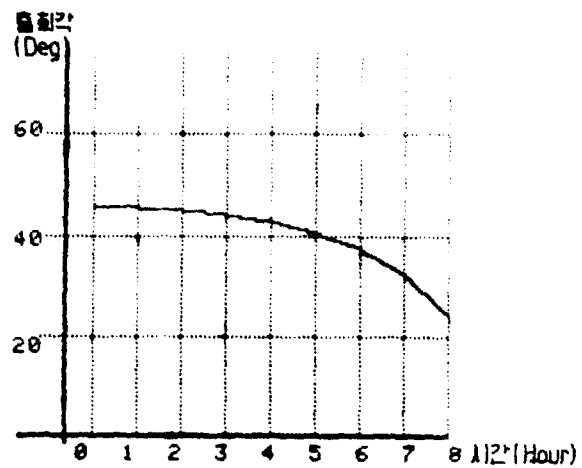


Fig. 6 출회각(α)

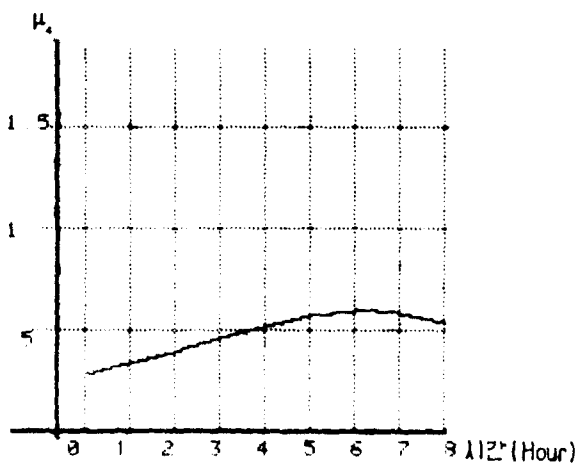


Fig. 7 F. P. 상하가속도 (μ_s)의 위험도

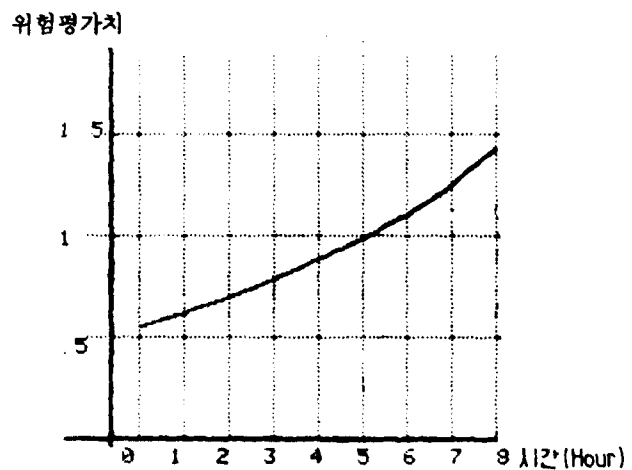


Fig. 8 위험평가치

제 5 장 항해안전 평가시스템에 의한 시뮬레이션

5.1 고 찰

황천항해시 항해안전 평가시스템에 의한 선체의 위험평가는 위험평가치가 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.

황천위험으로 부터의 피항방법은 변침, 변속, 변침변속의 동시실행의 3가지 방법이 있다.

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

변속피항의 경우는 그림에서와 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.

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 제시하였다.
- (4) 본 시스템에서의 태풍표현을 가능한 한 실제의 것과 근사시키고, 태풍이 외의 어떠한 기상상태에도 대응할 수 있는 해상상태의 표현을 고려하여, 시스템의 일반성을 도모하여야 한다고 사료된다.
- (5) 선속저하, 조타 가능성, 주기의 운전가능성 등을 포함하는 선박의 항해능력 평가도 고려하면, 일반적이고, 최적의 판정법이 될것으로 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. 187, 1980
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 金順甲 : 船舶의 波浪중 耐航行性能評價에 관한 研究, 韓國航海學會誌, 第 11 卷, 第 1 號, PP. 69~74, PP. 80~81, 1987
- 5) W. G. Price . R. E. D. Bishop: Probabilistic Theory of Ship Dynamics, Chapman and Hall Ltd. PP. 157~163, 1974
- 6) 中村彰一 : 耐航行 諸要素, 第1回 耐航行に 關するシンポジウム, 日本造船學會, PP. 131~136, 1969