

선박의 충돌회피를 위한 자동제어에 관한 기초적 연구

이 승 건* · 권 배 준**

*부산대학교 조선해양공학과 교수, **부산대학교 대학원 조선해양공학과

A Study on the Automatic Control for Collision Avoidance of the Ships

Seung-Keon Lee* · Bae-Jun Kwon**

*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

**Graduate School, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,
Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

요 약 : 해난사고에 있어 어선의 사고율은 높은 비율을 차지한다. 특히, 소형어선의 사고율이 가장 높아, 이러한 사고를 예방할 수 있는 기술들이 필요한 실정이다. 본 논문에서는 충돌회피를 위한 자동제어를 두 가지 과정으로 구성하고 있다. 하나는 퍼지추론을 이용한 위험도의 추론이며, 나머지는 첫 번째 과정에서 계산된 위험도를 토대로 선박을 조종하는 과정이다. 위험도를 평가하기 위해서 선박의 위치와 충돌예상시점에 의한 정보(DCPA and TCPA)를 이용하였다. 이 방법의 실효성을 검증하기 위해, 어선의 충돌회피운동을 MMG 수학모델에 의해 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과는, 선박의 충돌회피에 유효함을 알았다.

핵심용어 : 충돌회피, 자동제어, 조종성

Abstract : The collisions of vessel at sea show high rate among the whole marine accidents. Especially, the accidents of fishing vessels take the largest portion of the collisions. Therefore, a technique to reduce these accidents should be developed. The automatic control for avoiding collision suggested in this study consists of two steps. The first is recognizing collision risk with fuzzy theory and the other is maneuvering the model ship on the basis of collision risk calculated from the first step. The information from the position and estimated time of collision point(DCPA and TCPA) is used to assess the collision risk. To verify this system, a fishing vessel was simulated according to MMG mathematical model. The simulations result shows quite good application in avoiding the collision of a ship.

Key words : Collision avoidance, Automatic control, Maneuverability

1. 서 론

선박의 충돌사고를 예방하는 재래의 수동적인 방법은 개별적인 인간의 시각 및 지각의 한계를 넘을 수가 없다. 이를 보완해 줄 수 있는 시스템이 있다면 이런 충돌사고를 줄일 수 있을 것이다. 이 논문에서는 소형어선의 충돌 사고사례분석을 통하여 이러한 충돌사고 방지와 운항의 안전성 향상을 도모하기 위한 기초연구로서 충돌예방 장치를 개발하였다.

이 논문의 충돌예방장치는 두 가지로 구성되어 있는데 첫 번째는 해상에서의 충돌에 대한 위험도 추정과정이고, 두 번째는 그 위험도에 따른 적절한 피항조종과정이다.

이 연구의 위험도추정은 여건상 레이더의 CPA 및 TCPA를 이용한 Hasegawa Fuzzy추론을 이용하고 선박조종을 위한 모

델식은 Inoue식을 이용하였다.

2. 충돌 위험도 추론

2.1 충돌위험도의 정의

충돌 위험도는 충돌회피 행동의 기준이 되는 값이라고 할 수 있다. 또 다른 표현으로는 항해자들의 위험 판단기준을 수치로 표현한 것이라고 할 수 있다. 항해자들이 느끼는 위험정도를 수치로 표현하고 그 충돌위험도에 따라 조타각을 결정하게 하는 것이 충돌위험도의 역할이다. 이 논문에서는 레이더에서 얻을 수 있는 자선과 타선의 위치정보 (좌표, 항속, 회두각)를 이용하여 위험도를 구하는 Hasegawa의 방법을 사용하였다 [1][2]. Hasegawa의 방법은 DCPA와 TCPA를 입력정보로 하여 Fuzzy 추론을 하여 위험도를 추정하는 것이다.

위험도를 추론하는 방법에 있어서 Fuzzy를 주로 이용하는

* 경희원, leesk@pusan.ac.kr, 051)510-2441

** 경희원, eric77@hanmail.net, 051)510-2755

이유는 소속함수, 추론규칙들을 경우에 따라 수정이 가능하다는 점과 전문적인 지식이 없이도 수정 할 수 있다는 장점이 있기 때문이다.

2.2 DCPA와 TCPA정의

Fuzzy 위험도 추론에 필요한 입력 데이터는 타선과 자선의 위치 정보(좌표, 선속, 회두각)에 의한 DCPA와 TCPA이다. DCPA (Distance of the Closest Point Approach)란 타선이 현재 상황을 그대로 유지했을 경우 타선이 자선과 가장 가까운 거리를 지나갈 때 타선까지의 거리를 나타내며 TCPA (Time of the Closest Point Approach)는 타선이 CPA(Closest Point Approach)점을 지나는 순간까지 걸리는 시간을 나타내는 것이다. Fig. 1은 이러한 DCPA와 TCPA의 개념을 설명한 그림이다.

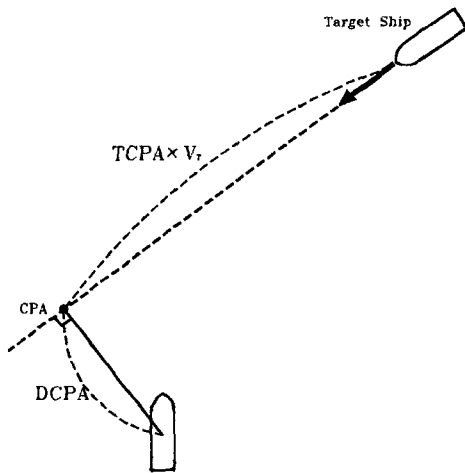


Fig. 1 DCPA와 TCPA

2.3 Membership Function

소속함수(Membership function)는 퍼지 집합의 각 원소들의 소속정도를 숫자로서 나타내주는 Fuzzy 집합이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 선박의 속도와 길이로 무차원화된 TCPA와 DCPA의 소속 함수이다. TCPA가 음수인 부분은 상대방 선박이 CPA점을 이미 지났음을 나타낸다. 각각 상대선과의 가장 가까웠던 순간을 지나 현재 멀어지고 있는 상황을 가리킨다. Fig. 2와 Fig. 3에서 각 소속 함수 위의 이름에 의미 같다[3].

2.4 위험도 추론

충돌 위험도의 추론 규칙은 Table 2와 같다. 이 추론규칙에 의해 출력되는 충돌 위험도는 -1에서 1 사이의 값을 가지게 되며 값이 클수록 충돌 위험도가 높은 것이고 음의 부호는 TCPA가 음수인 경우로 이미 조우 상황이 지난 것을 나타낸다. Hasegawa는 추론 규칙의 결론 부분인 충돌 위험도도

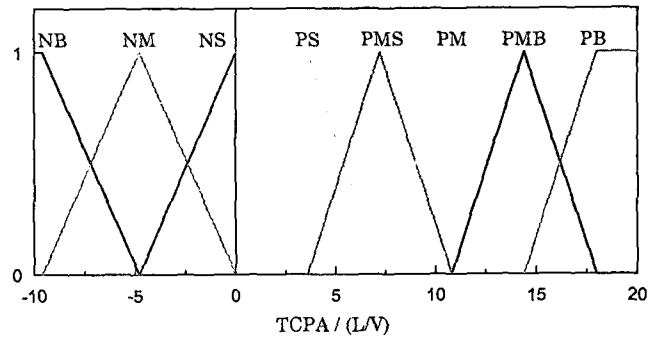


Fig. 2 Membership Function of TCPA/(L/V)

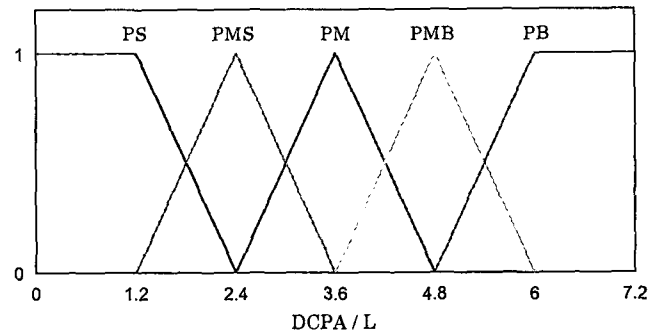


Fig. 3 Membership Function of DCPA/L

Table 1 Fuzzy Label

S	Small
M	Medium
B	Big
P	Positive
N	Negative

Table 2 Reasoning Rules of degree of Collision Risk

		T C P A							
		NB	NM	NS	PS	PMS	PM	PMB	PB
D	PS	-0.2	-0.6	-1.0	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
	PMS	-0.2	-0.2	-0.6	0.8	0.6	0.4	0.2	0.2
C	PM	-0.2	-0.2	-0.2	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2
	PMB	-0.2	-0.2	-0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2
P	PB	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

TCPA, DCPA의 경우와 마찬가지로 소속함수를 삼각형 형태로 주어 추론을 수행하였으나 이 논문에서는 결론의 추론 및 비퍼지화의 단순화를 위해 추론 규칙의 결론부에 singleton 형태의 소속 함수를 사용하였다. 다시 말하면 충돌 위험도 추론 규칙 표에 나타나 있는 숫자가 의미하는 것은 결론부의 소속 함

수가 그 숫자에서만 1이며 나머지 부분에서는 0 이라는 것이다
 이 논문에서는 추론 규칙의 조건부에서의 적합도를 구하는 부분에는 MIN 연산을, 결론부의 소속 함수를 재구성하는 부분에는 PRODUCT 연산을 하였다. 이 경우의 최종 출력을 구하는 방법은 전체 n개의 추론 규칙 중 i번째 추론 규칙의 조건부에 의해 결정된 적합도를 α_i 라 하고 이 때 위의 추론 규칙표에서 결론부의 충돌 위험도를 CR_i 라 하면 이 때 최종적으로 추론되는 충돌 위험도는 PRODUCT 연산자를 사용할 경우 식(1)과 같이 표현된다.

$$Collision Risk = \frac{\sum_{i=1}^n CR_i \cdot \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (1)$$

위 식에서 분자의 CR_i 와 α_i 의 곱은 각 추론 규칙의 결론부를 그 규칙의 적합도를 가지고 재구성하는 것을 의미하며 각각의 합을 적합도의 합으로 나누는 것은 면적 중심법을 이용하여 최종 퍼지 출력을 비퍼지화 하는 것을 나타낸다. 이 경우에 결론부의 소속 함수가 singleton 형태이기 때문에 최종 출력의 결정은 규칙의 적합도가 가중치로 나타나는 형태가 되는 것이다[2][3].

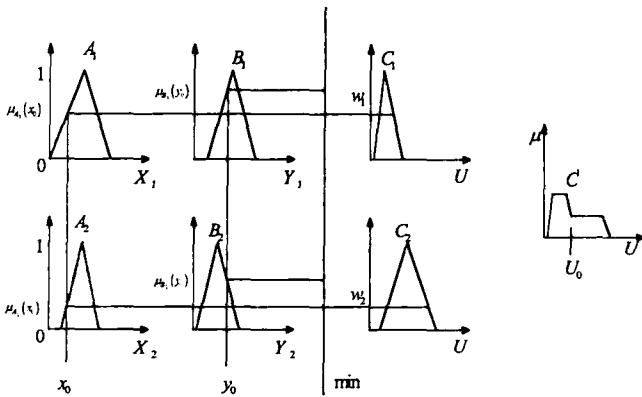


Fig. 4 위험도 Fuzzy 추론과정

3. 선박 조종운동의 적용

3.1 운동방정식

Fig. 5와 같은 좌표계를 사용해서, 선박의 Surge- Sway- Yaw 운동을 기술하였다[4].

$$Surge : m(\dot{u}_M - v_M \cdot r_M - x_G \cdot r_M^2) = X_M \quad (2)$$

$$Sway : m(\dot{v}_M + u_M \cdot r_M + x_G \dot{r}_M) = Y_M \quad (3)$$

$$Yaw : I_{ZZ,M} \cdot \dot{r}_M + m x_G (\dot{v}_M + u_M \cdot r_M) = N_M \quad (4)$$

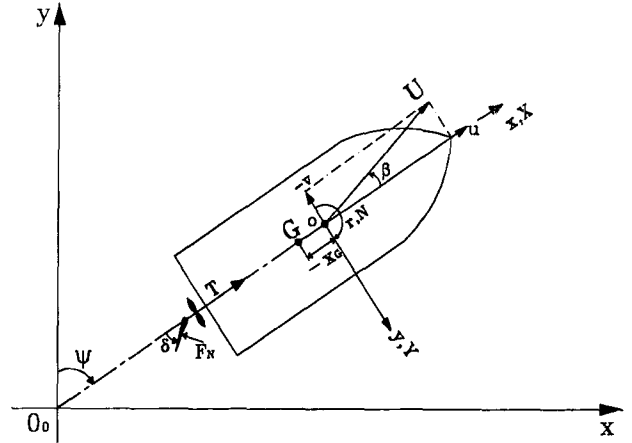


Fig. 5 Coordinate System

위 식 우변의 X, Y, Z는 선체에 작용하는 외력 및 모멘트로서, M.M.G.모델에서는 이것을 선체와 프로펠러와 타에 작용하는 성분으로 분리하는데, 먼저 각각의 단독시의 힘과 모멘트를 추정해서, 이들 사이의 간섭을 간단한 형태로 더하도록 하고 있다.

X, Y, N을 표현하면,

$$X = X_H + X_P + X_R \quad (5)$$

$$Y = Y_H + Y_P + Y_R \quad (6)$$

$$N = N_H + N_P + N_R \quad (7)$$

여기서, 첨자 H, P, R은 각각 Hull, Propeller, Rudder를 의미한다.

선체의 유체력 X_H, Y_H, N_H 에 관해서는 후에 언급하기로 한다. X_P, Y_P, N_P 와 X_R, Y_R, N_R 을 상세히 쓰면,

$$X_P = (1 - t) \cdot T \quad (8)$$

$$Y_P = 0 \quad (9)$$

$$N_P = 0 \quad (10)$$

$$X_R = -(1 - t_R) \cdot F_N \cdot \sin \delta \quad (11)$$

$$Y_R = -(1 + a_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \quad (12)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) \cdot F_N \cdot \cos \delta \quad (13)$$

3.2 공시선

충돌회피 Simulation에 사용된 선박의 주요제원은 Table 3과 같다

3.3 Hull 유체력의 추정(Inoue)

식(2),(3),(4)의 우변의 유체력중 Y, N에 대해서는 여러 가지 추정식이 제안되었으나, 어느 것도 구속모형시험을 대신할 만한 수준의 유체력을 제공하지는 못하므로, 가장 대표적인 Inoue의

Table 3 Particulars of No.52 Pyung-Ya

LBP	24.36m
B	4.55m
d	1.884m
Trim	0.69
U(m/s)	5.16m/s
C _B	0.551
C _P	0.607
C _w	0.766
LCB	-1.279
Propeller Pitch	1.9m
Propeller Diameter	0.95m
RPS	14.3
Rudder Area	0.51m ²
Aspect Ratio	1.96
Rudder Height	1.0m

추정식을 사용하기로 한다.[5]

한편, X력에 대해서는 다음과 같이 모델화 한다.

$$X = X(U) + X_u \dot{u} + (X_{vr} - Y_v)vr + X_P \quad (14)$$

위 식에서 저항 X(U)는 Holtrop의 추정법에 의하여 추정하였다[6].

또 X_u , Y_v 등은 Motora Chart로부터 추정하고 ($X_{vr} - Y_v$)항은 Hasegawa Chart를 직선으로 Fitting하여 다음과 같이 계산하였다[4].

$$\frac{X_{vr}' - Y_v'}{-Y_v'} = 1.613C_b - 0.471 \quad (15)$$

이와 같이 Hull 유체력을 추정하였다.

3.4 Propeller 推力の 추정

Propeller 추력은 다음과 같은 수확모델을 사용하였다.

$$X_P' = (1-t)n^2 D_p^4 K_T(J_P) / \frac{1}{2} L d U^2 \quad (16)$$

$$K_T(J_P) = C_1 + C_2 J_P + C_3 J_P^2 \quad (17)$$

$$J_P = \frac{U \cos \beta (1 - \omega_P)}{n \cdot D_P} \quad (18)$$

$$\omega_P = \omega_{P_0} \cdot \exp(-4.0 \beta_P'^2) \quad (19)$$

$$\beta_P' = \beta - x_P' \cdot r' \quad (20)$$

$$x_P' = -0.5 \quad (21)$$

$$\omega_{P_0} = 0.5 C_B - 0.05 \quad (22)$$

3.5 舵力の 추정

한편, 타력은 다음과 같이 추정하였다.

$$F_N' = \frac{A_R}{Ld} \cdot C_N \cdot U_R'^2 \cdot \sin \alpha_R \quad (23)$$

$$C_N = \frac{6.13A}{2.25 + A} \quad (24)$$

$$U_R'^2 = (1 - \omega_R)^2 (1 + C \cdot g(s)) \quad (25)$$

$$g(s) = \eta \cdot K \{ 2 - (2 - K)s \} / (1 - s)^2 \quad (26)$$

$$\eta = \frac{D_P}{H} \quad (27)$$

$$s = 1.0 - \frac{(1 - \omega_P) \cdot U \cos \beta}{n \cdot P} \quad (28)$$

단, 여기서 H는 Rudder Height, P는 Propeller Pitch 이다.

$$C = 1.065 \quad (\text{when } \delta \geq 0) \quad (29)$$

$$0.935 \quad (\text{when } \delta < 0) \quad (30)$$

$$\omega_R = \frac{\omega_P}{\omega_{P_0}} \times \omega_{R_0} \quad (31)$$

$$\alpha_R = \delta - \gamma \cdot \beta_R' \quad (32)$$

$$\beta_R' = \beta - x_R' \cdot r' \quad (33)$$

$$x_R' = -0.5 \quad (34)$$

$$X_R' = -(1 - t_R) F_N' \sin \delta \quad (35)$$

$$(1 - t_R) = 0.28 C_B + 0.55 \quad (36)$$

$$Y_R' = -(1 + a_H) F_N' \cdot \cos \delta \quad (37)$$

$$N_R' = -(x_R' + a_H \cdot x_H') F_N' \cos \delta \quad (38)$$

4. 충돌회피 제어 Simulation

4.1 충돌 회피 과정

충돌회피 과정은 피항항로의 특징을 분석하여 크게 네부분으로 나누었다. Fig. 6에서 ①지점은 피항을 위해 원침로를 이탈하는 점이고 ②은 안정영역임을 인지 원침로로 들어오는 과정이고 ③번은 원침로에 근접했음을 인지하고 완전한 원침로로의 보정작업에 들어가는 점이며 ④은 원침로를 찾은 점이다.

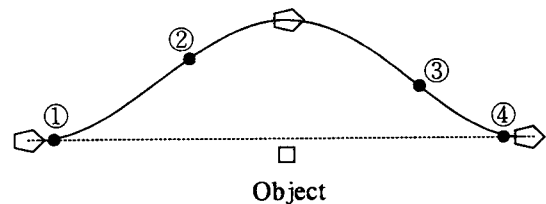


Fig. 6 Procedure of collision avoidance

4.2 피항결정 및 복귀

①번 포인트는 선박이 어떠한 대상으로부터 위험도를 느끼고 피항을 결정하는 곳으로 원침로로부터 이탈을 시작하는 점이다. 여기서 피항을 결정하는 위험도는 과도한 피항행동을 막기 위해 0.6으로 결정하였다. 그리고 안정영역까지 피항하는 동안 타각은 위험도에 비례하도록 하여 아래와 같은 식을 사용하였다.

$$\delta = \delta_{Min} + (\delta_{Max} - \delta_{Min}) \times \frac{CR - CR_{Min}}{CR_{Min}} \quad (39)$$

δ_{Min} : 최소타각

δ_{Max} : 최대타각

CR : 현상황에서의 위험도

CR_{Min} : 최소위험도

②번 포인트는 조선자가 안전하다고 판단 원침로로 복귀를 결정하는 곳이다. 위험도가 0 이하로 떨어지면 복귀를 결정하도록 하였다. 타각은 어선마다의 선회성능을 고려하여 과도하지 않은 변침을 하도록 하여 2.5°에서 10°사이의 값을 결정해주었다.

선박이 원침로와 근접한 영역으로 들어왔다고 판단되었을 시 회두각을 원침로에서의 회두각으로 조절을 하게 하였다. 원침로와 현재선박의 직선거리가 $2 \times L_{BP}$ 이내 일 때 원침로와 근접한 것으로 판단하게 하였고 원침로와 현재 회두각과의 차를 이용하여 타의 방향과 타각을 결정하도록 하였다.

선박이 원침로에 들어섰다고 판단, 충돌회피의 제어 과정을 종료한다. 이때 원침로와 회두각을 편차 및 회두각속도가 허용오차 이내일 경우 $\delta = 0^\circ$ 로 두도록 하였다.

4.3 Simulation 및 고찰

시뮬레이션 검토를 위하여 대표적인 3가지 경우의 시나리오에 대해 충돌 회피 시스템을 적용시켜 보았다.

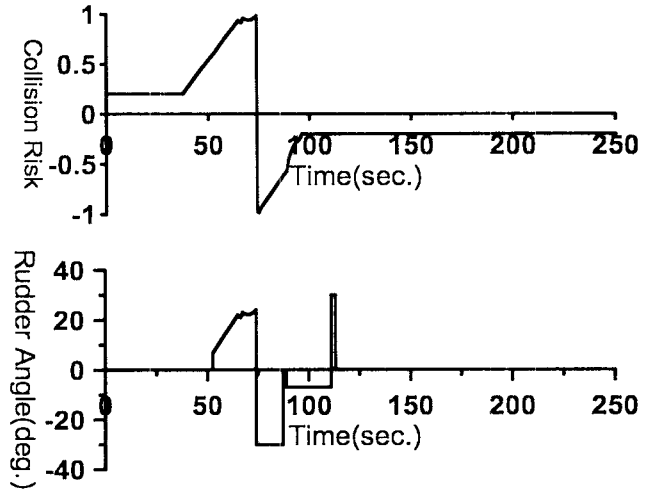


Fig. 8 Time histories of Scenario 1

Scenario 1은 자선과 타선 각각 회두각 45°, 225°로 전진시켜 서로 마주보고 오는 경우이다. 타선은 방위 불변으로 두었다. 위 그림에서 보는 바와 같이 각 배의 항적위에 나타나 있는 + 표시에서 위험도가 0.6 이상이 되어 위험도에 따른 피항을 위한 조타 명령을 하게 된다. 그리고 위험영역을 지난후 삼각형으로 표시되어 있는 $CR < 0$ 인 즉, 안전영역에서 다시 원침로로 복귀하는 조타 명령을 하여 원침로 복귀를 하고 있다.

Senario 2는 무리한 우현변침을 하는 경우 충돌의 위험이 있는 영역을 고려하여 좌현변침을 하는 경우이다. 위험도가 0.6을 넘는 지점에서 상대선박이 좌현변침을 하는 경우와 자선을 기준으로한 선체 고정좌표에서 타선이 자선의 우현으로 $1.5 \times B$ 이상 떨어져 항해하고 있을 경우는 좌현변침을 하도록 하였다. 선박은 피항시 우현변침을 원칙으로 하고 있으나 해양수산연수원 “RADAR 교육교재”에도 “대각도 우현변침하는 피항이 무난하지만 이것이 항상 최선책이라고는 할 수 없다.” 라고 명시되어 있다[7].

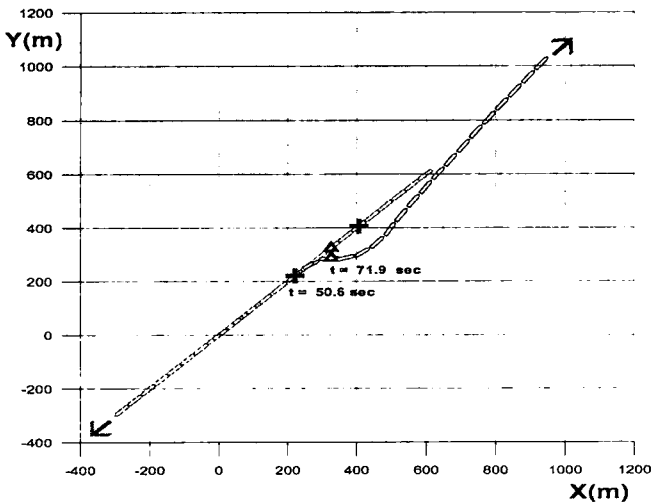


Fig. 7 Collision Avoidance Scenario 1

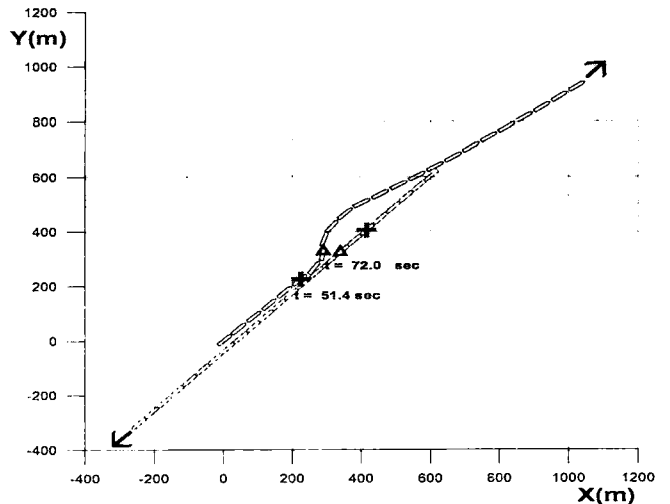


Fig. 9 Collision Avoidance Scenario 3

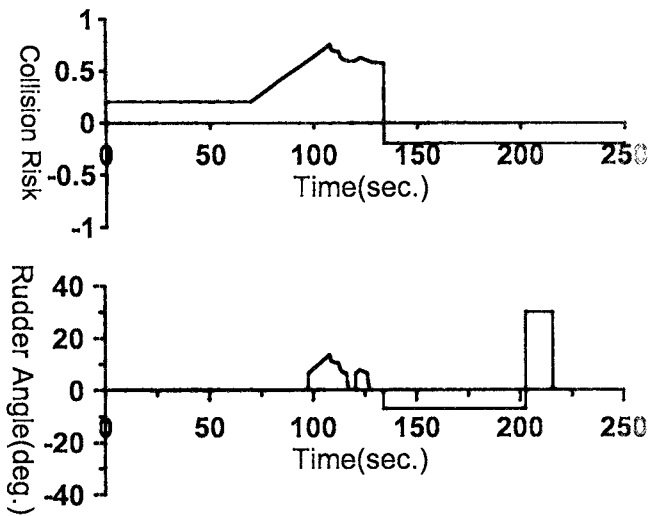


Fig. 10 Time histories of Scenario 2

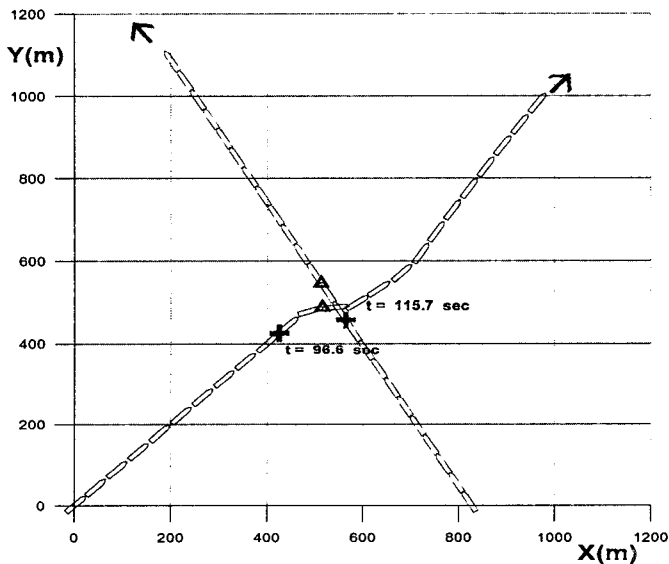


Fig. 11 Collision Avoidance Scenario 3

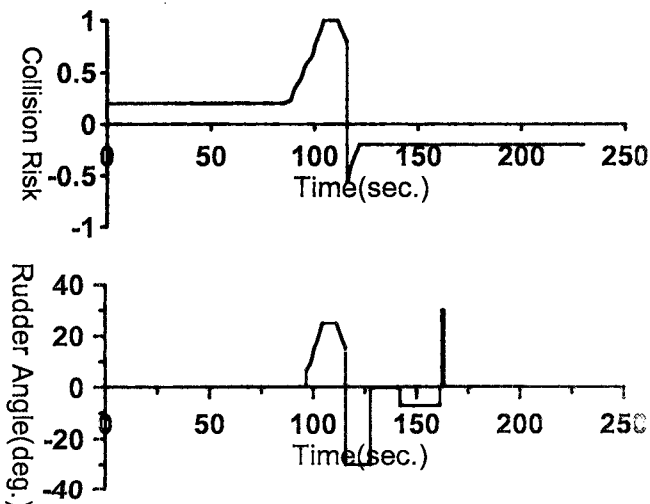


Fig. 12 Time histories of Scenario 3

Scenario 3에서는 타선이 자선의 측면으로 진행되는 상황을 Simulation하였다. 우현변침하여 타선의 진행방향과 반대방향이 뒤쪽으로 피항하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

이 연구는 어선충돌사고를 줄이기 위하여 Hasegawa의 Fuzzy 추론 및 Inoue조종모델식에 따라 충돌회피자동화 시스템을 구성하였다. 회피 제어규칙을 구성하는데 있어서 해상교통법을 기준으로 하였고 해상교통법을 완벽하게 적용할 수 없는 부분에서는 해상교통법을 벗어나더라도 안전한 방향으로 피항을 결정하도록 하였다.

이에 따라 실제로 어선에 적용하여 3가지 시나리오에 따라 시뮬레이션한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

- (1) Fuzzy 추론을 통하여 위험도를 추정하고 이에 따른 충돌 회피제어 규칙을 설정하고, 이러한 제어 규칙을 적용하여 대표적인 몇 가지 충돌 시나리오를 시뮬레이션 하였다. 그 결과 만족할만한 충돌회피가 가능하였다.
- (2) 이 논문의 연구결과는, 충돌 방지를 위한 경보시스템 등으로 활용 가능하다.

이 논문에서의 충돌 회피 상황은 제한적인 상황으로 자선이 전속으로 운항하는 경우만을 다루었고 감속이나 정지해야 하는 경우는 고려되어 있지 않다. 해상교통법상 속도를 줄이거나 정지해야 하는 경우에 대한 현실적 고려가 필요하고 지리적으로는 연근해나 대양을 대상으로 했기 때문에 항만 내에서나 폭주해역에서는 충돌 회피가 원활히 이루어지지 않을 수도 있다. 또, 현재 피항대상 선박이 한척인 경우만 고려하고 있으나, 여러척을 적용한 피항시스템도 연구되어야 할 것이다. 나아가서 충돌 회피 시스템이 실질적인 의미를 가질 수 있도록 지리적 특성, 기후등을 고려해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00320) 지원으로 수행되었음.

References

- [1] Hiroshi ISSHIKI : "Algorithm for Collision Avoidance of a Ship" (1994.8)
- [2] Kazuhiko Hasegawa & Akihiko Kouzuki & Tooru Muramatsu & Hirofumi Komine & Yuuji Watabe : "Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES)" (平成元年11月)
- [3] 이한진 : "Optimization of Collision Avoidance System

- by using Genetic Algorithm*"(1997)
- [4] 日本造船學會 : "第3回操縦性シンポジウム"(1981)
- [5] Inoue et al. : "*The hydrodynamic derivatives on ship maneuverability in even keel condition*", Journal of seibu zosen-kai(1978)
- [6] J.Holtrop & G.G.J.Mennen : "*A statistical power prediction method*", I.S.P. vol.25(1978)
- [7] 유명운, 이옥용, 우병구 : "*Radar 教育教材*"(1986), 한국해기연수원

원고접수일 : 2002년 01월 31일

원고채택일 : 2002년 03월 18일