

선박의 조종성능을 반영한 충돌위험도 추론에 관한 기초 연구(I)

안진형* · 이기표**

*한국해양연구원, **서울대학교 조선해양공학과 교수

A Basic Study on the Collision Risk Inference Reflecting Maneuverability of a Ship(I)

Jin-Hyeong Ahn* · Key-Pyo Rhee**

*KRISO/KORDI, Yuseong P.O. Box 23, Daejeon 305-600, Korea

**Dept. of Naval Arch & Ocean Eng., Seoul National Univ., Seoul 151-744, Korea

요약 : 선박의 충돌회피 문제에서 충돌위험도 모델은 보통 시뮬레이터 상에서 파라미터를 변화시켜 가며 수행한 전문가 인터뷰 결과를 이용하여 세우는 것이 일반적이며 이 때 파라미터로는 흔히 DCPA와 TCPA가 사용된다. 그런데 이 방법은 비용이 많이 들뿐더러 인터뷰 대상자와 운항 환경 등이 달라짐에 따라 다른 결과를 내게 된다는 단점이 있다. 본 연구에서는 운항자와의 인터뷰를 거치는 대신 시뮬레이션을 통해 확인된 자선의 조종성능을 반영한 퍼지 추론 시스템을 구성하기로 한다. 피항을 시작해야 하는 충돌 위험도 값에 대응하는 시간과 거리로는, 타선이 법규를 위반했을 때 자선이 피항을 시작해야만 하는 최소 여유 시간과 일반적으로 해상교통법 등에서 지시하는 최소 여유 거리를 각각 사용했다. 이렇게 구성된 퍼지 추론 시스템은 퍼지 소속 함수의 개수를 늘임으로써 비선형성이 강해진 충돌위험도 추론 시스템으로 재구성할 수 있다.

핵심용어 : 충돌위험도, 퍼지 추론 시스템, DCPA, TCPA

ABSTRACT : In collision avoidance problem of a ship, collision risk model is usually set up using the interview results from experts who sit on a simulator by varying parameters, in which DCPA and TCPA are commonly used. This method, however, has the weakness in that not only it is expensive but also it shows different results depending on the interviewees and other navigational parameters. In this study, a fuzzy inference system is designed based on own ship's maneuverability verified from simulation instead of interviewing navigators. The time and distance corresponding to the collision risk value on which avoidance maneuver should be started are set to the minimum marginal time at which own ship starts maneuvering and the minimum marginal distance suggested by marine traffic rules respectively. This system can be reconfigured as a nonlinearity-strengthened one by increasing the number of fuzzy membership functions.

KEY WORDS : collision risk, fuzzy inference system, DCPA, TCPA

1. 서 론

선박의 충돌 회피에 관한 연구는 충돌 위험도를 정의하는 것에서부터 출발한다. 충돌 위험도는 자선과 타선 사이의 충돌 가능성 정도를 뜻하며 일반적인 충돌 회피 행동의 기준이 되는 값이다. 어떤 피항 방법을 선택하든지 간에 자선의 행동은 결국 충돌 위험도를 기준으로 하여 이루어진다.

ARPA 장치를 통해 타선에 대한 DCPA와 TCPA 정보를 실시간으로 얻는 것이 가능해지면서부터 이를 파라미터로 해서 위험도를 나타낸 식들이 제안되기 시작했다. 이를 크게 분류하

면 두 파라미터를 이용해서 위험도를 대수식으로 표현한 모델과 퍼지 이론을 적용한 모델로 나눌 수 있다.

충돌 위험도 값은 파라미터를 무엇으로 잡느냐, 어떤 방법으로 표현하느냐와 관계없이 보통 시뮬레이터 앞에 앉은 운항자에 대한 질의-응답 과정을 거쳐서 구하는 것이 일반적이다. 그런데 충돌 위험도 모델을 만들기 위해서 매번 전문가와 인터뷰를 하는 것은 시간이 많이 걸릴뿐더러 귀찮고 복잡한 일이 되기 마련이다. 인터뷰 기반 모델의 더 심각한 문제는 운항자들이 인터뷰 대상으로서 대답하는 내용과 실제 운항을 할 때 판단하는 내용이 다르다는 데 있다[9]. 따라서 운항자의 판단과는 별개로

더 객관적인 판단 기준을 세우는 것이 필요하다.

본 연구에서는 Hasegawa 식의 위험도 추론 방식을 따라, 퍼지화된 DCPA와 TCPA 변수로 구성한 퍼지 추론 시스템에 의해서 위험도 추론 모델을 구성하고자 한다[5]. 이 때, 소속 함수 결정과 추론 규칙 작성은 운항자 인터뷰를 거쳐서 하지 않고 자선의 조종 성능을 반영한 시뮬레이션 결과를 적용해서 구한다.

2. 충돌위험도 퍼지 모델

일반적으로 퍼지 시스템 구성은 변수를 퍼지화하는 것에서 출발한다. 본 장에서는 자선의 조종운동 시뮬레이션을 거쳐 얻은 결과를 이용해서 DCPA와 TCPA에 대한 퍼지 집합을 구성한다. 충돌 위험도는 0에서 1 사이의 값을 가지는 것으로, 피항 기준이 되는 위험도 값은 0.6으로 정한 다음 이를 바탕으로 퍼지 추론 시스템을 구성한다. 한편, 원래의 항로로 복귀하는 위험도 기준 값은 0.4로 잡는다.

본 연구에서 사용한 선박의 제원은 다음 표와 같다.

Table 1 Own ship specification

길이(m)	200
폭(m)	40
K'	1.5
T'	3.2

2.1 TCPA에 대한 소속 함수 결정

자선이 운항 중 타선과 조우하는 상황에서 DCPA가 0인 대표적인 경우들을 나타내면 Fig. 1과 같다. 여기서 자선이 피항을 시작해야 하는 순간을 찾을 수 있다면 이 값을 이용해 충돌 위험도 0.6에 대응하는 TCPA의 값을 정할 수 있다.

그림에서 타선이 Ship A, B인 경우 자선은 의무선이 되며 Ship C인 경우는 자선이 유지선이 된다. 그림과 같은 상황에서 자선이 가장 위험한 상황에 빠지는 경우는 Ship A가 좌현 변침을 할 때이다.

자선은 Ship A와 조우할 때 의무선의 입장이기 때문에 충돌 위험이 존재할 때 우현 변침을 해야 한다. 이 때 타선이 법규를 어기고 좌현 변침을 했을 때 양 선박은 충돌 위험에 빠질 확률이 높아진다. 이 경우 충돌 여부를 판가름 하는 것은, 외부의 교란을 무시한다면 자선과 타선의 운항 속도, 타각, 조종 성능, 변침 시기가 된다.

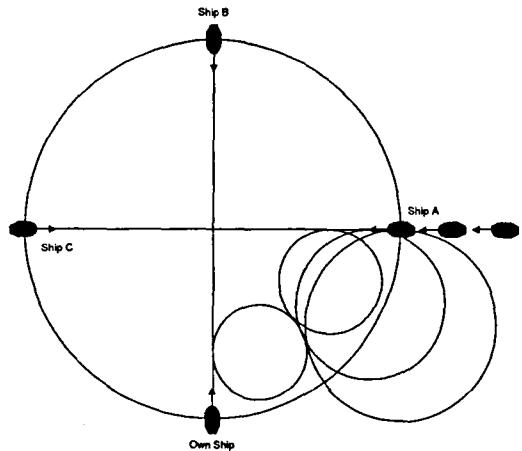


Fig. 1 Encounter status between own ship and target ships

우선 타선의 제원이 자선과 동일하다고 가정하고 각 선박의 속력을 달리 해가면서 조종운동 시뮬레이션을 수행하였다. 일반적으로 어떤 선박이 선회를 하면 선수방향 속력이 점점 떨어지지만 본 연구에서 사용한 K-T 방정식으로는 이를 표현할 수 없고, 여기서의 시뮬레이션 목적이 충돌을 막기 위해 변침해야 하는 최소 시간을 정하는 것이기 때문에 속력 변화도 없다고 가정하였다. 각 선박의 궤적은 무게 중심의 궤적이므로 시뮬레이션을 할 때는 양 선박의 거리가 각 선박의 폭의 절반을 합한 값, 즉 40m이상을 유지하도록 하는 최소 변침 시간을 기준으로 했다. 그럼에서 숫자로 나타낸 부분은 시뮬레이션 시간을 의미한다.

Fig. 2는 자선과 타선 모두 타각을 각각 10도로 해서 변침한 결과이며 이 때 얻어진 최소 TCPA는 500초이다. 즉, TCPA가 500초보다 클 때 양 선박이 변침을 하면 충돌을 피할 수 있지만 그보다 여유가 적을 때는 충돌에 이름을 의미한다.

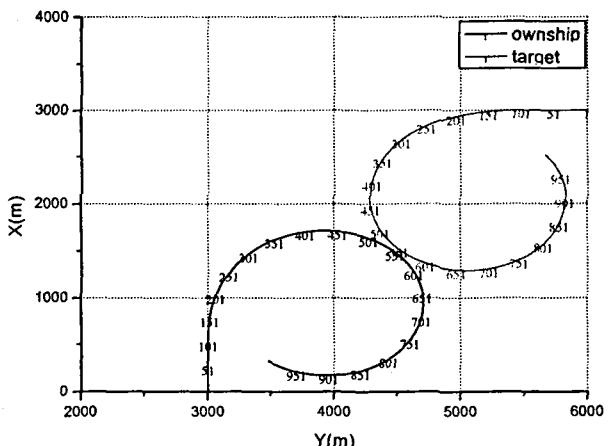


Fig. 2 Trajectories of own ship and target ship (10kts-10kts)

한편, DCPA가 0이 되는 조건은 타선의 상대 속도 벡터가 자

선을 가리키는 경우이므로 각 선박의 속력에 따라서 이를 만족하는 각각의 위치는 달라진다. 대표적인 예로 자선이 5kts, 타선이 10kts인 경우와 자선이 10kts, 타선이 5kts인 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 3 ~ Fig. 4와 같다.

Fig. 3은 자선이 5kts, 타선이 10kts인 경우를 나타낸다. 앞의 결과와 비교를 하기 위해서 TCPA가 500초일 때 양 선박 모두 타를 10도의 크기로 줘은 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 조타를 하기 전에는 두 선박이 DCPA=0인 상태를 계속 유지했으나, 조타 이후는 DCPA가 0이 아닌 값이 되므로 충돌 위험이 없어짐을 알 수 있다.

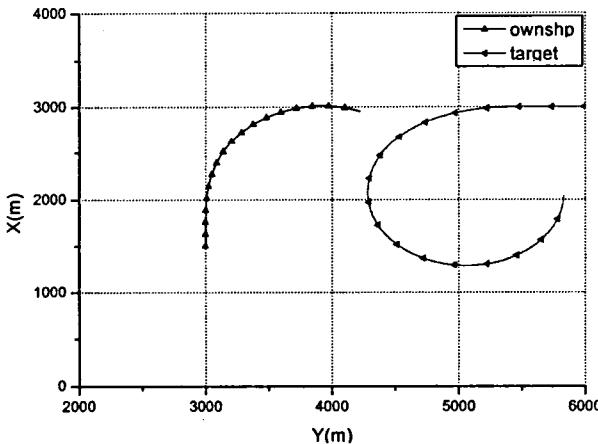


Fig. 3 Trajectories of own ship and target ship
(5kts-10kts)

선속이 각각 10kts와 5kts인 경우는 자선이 TCPA가 500초인 상황에서 조타를 하였을 경우 타선이 어떤 행동을 취해도 충돌 위험은 존재하지 않는다.

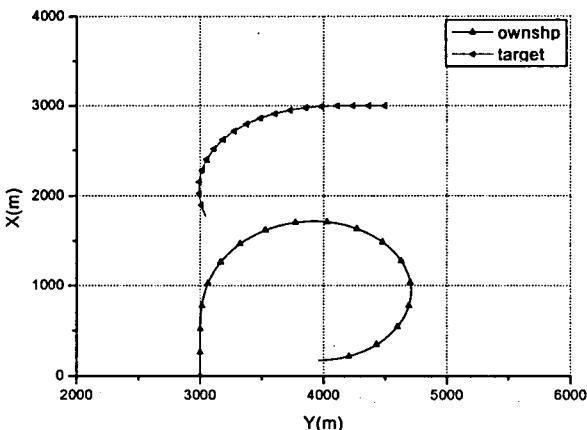


Fig. 4 Trajectories of own ship and target ship
(10kts-5kts)

이상에서 알 수 있듯이 똑같이 DCPA가 0인 경우에도 자선과

타선의 행동에 따라 전체적인 상황은 달라지기 마련이며 이 중 자선이 타선보다 빠른 경우는 충돌 위험이 존재하지 않는데, 자선이 타선보다 느린 경우는 타선의 행동에 관계없이 자선이 조타를 시작한 지점과 선수가 90도 돌아간 지점까지의 전진방향 거리에 의해 충돌이 좌우된다. 그런데 이 값은 자선의 조종특성에 의해 결정되는 값이며 선형 운동방정식을 사용할 경우 속도와는 상관없는 값이기도 하다.

이상과 같은 사항을 정리해서 자-타선의 선속이 각각 5, 10, 15, 20kts일 때 각각의 경우 조타를 10도, 20도, 30도로 했을 경우의 결과를 Table 2에 나타냈다. 타선의 상대 속도가 작으면 두 선박이 보다 근접한 거리에서 변침을 하게 될 것이고 상대 속도가 크면 두 선박이 더 멀리 떨어진 곳에서 변침을 해야 충돌을 피할 것이다. 나아가 조타를 크게 했을 경우에는 더 근접한 거리에서 변침을 해도 되는 것은 자명한 일이다.

Table 2 Minimum TCPA on speed and rudder angle

타각(deg) 속도(kts)	10	20	30
5	1010	626	484
10	500	314	244
15	337	209	163
20	253	158	122

한편 자선과 조종 성능이 다른 선박과 조우했을 경우에 대해서도 똑 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 양 선박의 속력이 모두 10kts로 같고 동시에 타각을 10도 변경하는 경우를 택했다. Fig. 5는 $K' = 0.8$, $T' = 0.5$ 인 경우이다. 그림은 충돌을 피하기 위해서 자선이 유지해야 하는 최소 TCPA를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 두 선박이 가장 가까워졌을 때 자선은 타선을 좌현에 둔 상태에서 교차한다. 이 때의 TCPA는 395초였다.

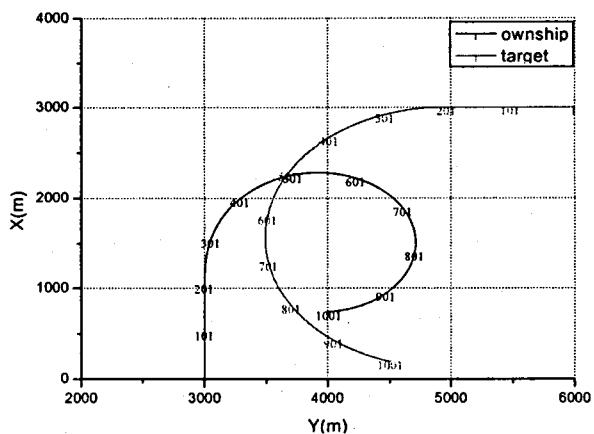


Fig. 5 Trajectory of target ship ($K' = 0.8$, $T' = 0.5$)

Fig. 6은 타선의 $K' = 6$, $T' = 15$ 인 경우이다. 이 때의 TCPA는 260초이다.

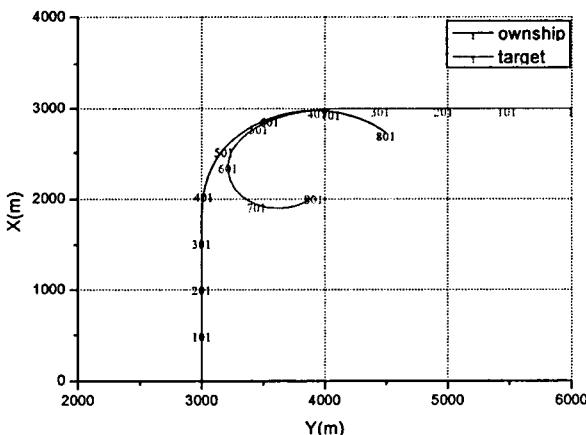


Fig. 6 Trajectory of target ship ($K'=6$, $T'=15$)

이상의 시뮬레이션 결과로부터, 자선과 타선이 동일 속력으로 운항 중 동일 시점에 동일한 타각으로 조타했을 때 여유 TCPA를 가장 크게 뛰어야 하는 경우는 자선과 동일한 조종 성능을 가진 선박을 만나는 경우라는 결론을 얻을 수 있다. 한편, 동일한 타각에서는 TCPA×속도의 값이 일정하도록 하는 TCPA를 피항의 기준이 되는 TCPA를 삼아야 한다는 것을 알 수 있다. TCPA×속도는 거리가 되므로 이는 결국 DCPA가 0일 때 두 선박이 일정한 거리만큼 떨어져 있을 때 피항해야 하는 것을 뜻한다. 자선이 변침을 하는 경우는 10도, 20도, 30도의 세 경우로 나눌 수 있는데, 충돌 위험도 0.6은 긴박한 상황을 뜻하는 것이 아니기 때문에 자선의 운항자는 일상적으로 변침할 때 사용하는 타각인 10도를 이용한다고 가정하고 TCPA를 정하기로 한다. 따라서 10kts일 때의 피항 기준이 되는 TCPA는 500초로 놓는 것이 타당하다.

2.2 DCPA에 대한 소속함수 결정

Fig. 7에서 자선 주위의 원은 선박 안전영역(ship domain)을 개념적으로 나타낸 것이다. 이것은 충돌을 막기 위해 타선의 침범을 허용하지 않아야 하는 최소영역이다. 충돌 회피 문제에 대한 초기 연구에서는 이 영역의 크기를 어떻게 정할 것인지에 관한 연구가 주로 이루어졌으며 타원이나 다각형 모양 등의 다양한 형태가 제안되었다[8, 10].

TCPA가 0일 때 위험도 0.6에 해당하는 DCPA를 정하기 위해서는 선박 안전영역에서 제시하는 값들 가운데 가장 큰 값을 기준으로 삼았다. Fig. 7에서 타선의 상대 속도 벡터의 연장선상에 있는 선박들은 모두 동일한 DCPA를 갖는다. 그럼에 서처럼 타선이 그 연장선상에서 CPA에 가까워질수록 TCPA는 작아지지만 DCPA는 동일하다. TCPA가 0이면 타선은 CPA 위에 있게 되며 이후에는 타선이 본선에서 다시 멀어지고 있으므로 TCPA는 음수 값을 갖게 된다. 따라서 타선이 자선과 가장 가까워졌을 때를 예상하고 이 거리가 기준 값보다 작다면 비록 자선과 만나지 않는다 하더라도 자선은 피항을

해야 한다.

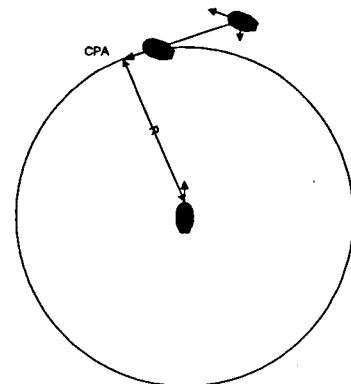


Fig. 7 Encounter status on TCPA=0

이 값은 크게 적절적인 거리로 나타내거나 자선의 길이에 대한 비로 나타낼 수 있는데, 어느 경우가 됐든 연구자들에 따른 편차가 매우 크다. 일반적인 해상교통법 해설서에는 상호시계일 때 1nm, 제한시계일 때는 2nm의 여유를 두고 피항할 것을 주문하고 있다[1]. Lloyd 1998년 보고서에도 이 값이 운무 중, 즉 제한 시계일 때는 2nm을, 상호 시계일 때에는 1nm이 된다고 나와 있다[3]. 만일 대상 선박이 소형 어선이나 레저선일 경우라면 이보다 작은 값을 사용할 수도 있겠지만 본 연구는 일반적인 규모의 상선을 대상으로 한 연구이므로 이러한 해상교통법 상의 권장 값인 1nm을 사용하기로 한다.

2.3 퍼지 추론 시스템 구성

2.1절과 2.2절의 결과를 종합하여 본 연구에서는 TCPA가 0일 때 DCPA는 약 1 nm을, DCPA가 0일 때 TCPA는 500초를 위험도 0.6에 대응하는 값으로 가정하고 문제를 풀기로 하였다. 자선 길이의 배수로 나타내기 위해서 DCPA는 자선 길이의 9배로 나타냈다.

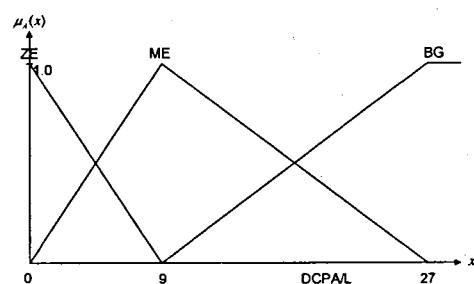


Fig. 8 Membership functions for DCPA

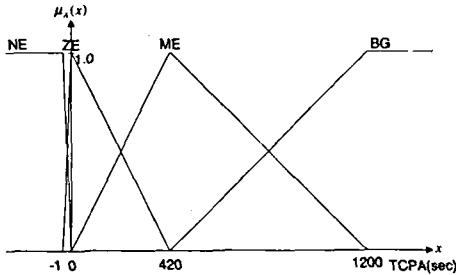


Fig. 9 Membership functions for TCPA

한편 위험도가 0이라고 생각되는 값, 즉 소속 함수 BG에 해당하는 값들도 결정해야 한다. DCPA의 경우는 레이더 주사 범위 가운데 한 값인 3nm을, TCPA는 Zhao의 연구와 일반적인 해상교통법 해설서를 기준으로 해서 20분의 시간 여유로 정했다[1, 3, 9]. 이와 같이 얻어진 기준 값을 사용한 DCPA와 TCPA에 대한 퍼지 소속 함수는 Fig. 8, 9와 같다.

위에서 정한 소속 함수를 기준으로 작성한 위험도 추론 테이블은 Table 3과 같다. 이 테이블을 구성하는 나머지 값들은 직관적으로 얻을 수 있다. 즉, DCPA, TCPA 모두 ZE일 때 위험도는 1.0일 것이며 모두 BG일 때 위험도는 0으로 놓을 수 있다. 테이블에서 약간 어둡게 나타나는 부분은 미리 알 수 있다고 판단되는 경우이다. 한편, DCPA는 ZE이고 TCPA는 BG인 경우와 TCPA는 ZE이고 DCPA는 BG인 경우는 0보다는 크고 0.6보다는 작은 값이어야 한다. 이 값은 0.2가 적당한 값이라고 판단되어 0.2로 잡았다.

Table 3 Fuzzy inference table

DCPA \ TCPA	NE	ZE	ME	BG
ZE	-1.0	1.0	0.6	0.2
ME	-1.0	0.6	0.3	0.1
BG	-1.0	0.2	0.1	0.0

여기서 문제가 되는 경우는 TCPA, DCPA 모두 ME일 경우이다. 이 경우의 위험도는 분명 0.2보다는 크고 0.6보다는 작은 값이어야 한다. 한편 이 값은 피항 여부에는 영향을 미치지 않고 언제 자선이 복귀할 것인가를 결정하는 데에 영향을 미칠 것이다. DCPA, TCPA 모두 ME인 경우는 정태권과 Liskowski의 연구결과를 보면 0.4보다는 작은 값이어야 한다[2, 7]. 또한 충돌 위험도 0.4는 자선이 피항을 했다가 다시 복귀할 때의 위험도 기준이 되는 값이므로 이 경우에 0.4가 돼서는 안 된다. 따라서 0.4보다는 작다는 조건을 만족하며 인접 경우의 값들과 부드럽게 연결 가능한 0.3이 적당하다고 판단했다. 한편 TCPA가 음수일 때는 타선이 이미 자선을 지나간 경우이기 때문에 위험이 없는 것으로 간주해서 위험도를 음수 값으로 정했다.

Hasegawa는 TCPA가 음수일 경우도 값을 차등을 뒤서 나타냈으나, 본 연구에서는 Kijima의 논문에서처럼 단일한 값 -1.0을 사용하기로 한다[6].

이상과 같이 작성한 퍼지 추론 테이블은 언제나 재사용이 가능하다. 전체 퍼지 시스템에서 바꿔야 할 부분은 소속 함수의 범위(universe of discourse)에서의 위치뿐이다. 즉, DCPA와 TCPA에 대한 ME와 BG에 해당하는 값들만 조정하면 된다.

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 10은 두 선박이 정면으로 조우하는 경우에 대해서 시뮬레이션한 결과이다. 자선과 타선은 20000m의 거리를 두고 마주 본 상태로 각각 10kts의 속도로 운항한다. 이 경우 두 선박 모두 의무선의 지위를 갖기 때문에 우현 변침을 해서 피항을 해야 하지만 자선의 피항 행동을 살펴보기 위해서 타선은 피항을 하지 않는 것으로 시뮬레이션 했다. 자선은 t=1460sec에서 위험도 0.6이 됐을 때 우현으로 변침을 한다. 한편 두 선박이 계속 운항하면서 TCPA가 음수가 되는 t=2060sec에는 위험이 사라졌다고 판단하기 때문에 자선은 원래의 경로에 복귀하게 된다. Fig. 11은 자선의 충돌 위험도 변화를 시간에 따라 그린 것이다. t=1460일 때의 충돌 위험도는 0.6에 접근했다가 자선의 변침 결과 위험도는 0.6 이하로 떨어진다. 위험도가 계속해서 떨어지다가 0.4 이하가 되면 이 값은 복귀 기준 위험도 이므로 자선은 다음 경로점을 향해서 침로를 바꿔 운항한다.

Fig. 12, 13은 타선이 자선의 선수를 횡단하는 경우를 보여주는데, 이 때는 자선이 의무선의 지위를 갖는다. 따라서 충돌 위험도 0.6을 넘었을 때 자선은 해상교통법을 준수하여 우현 변침한다.

Fig. 14, 15는 같은 횡단 상태이지만 자선이 유지선의 지위를 갖는 경우이다. 이 때는 타선이 피항을 해야 하지만 시뮬레이션 상에서는 타선이 조종 불가한 선박인 경우로 가정했다. 자선은 현재의 침로를 유지하다가 위험도가 0.8을 넘어섰을 경우 피항을 하기 시작한다.

이상의 경우에서 충돌 위험도는 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 특히 세 번째 경우 위험도가 0.6을 넘어서 자선이 피항을 하지 않은 경우는 이 점이 두드러지게 나타난다. 이는 음수 영역을 제외했을 때 각각의 소속 함수가 3개씩, 따라서 규칙수가 9개밖에 되지 않기 때문에 나타나는 현상이다. Hammer & Hara의 시뮬레이터 실험 결과에 따르면 운항자가 느끼는 충돌 위험도는 비선형적으로 부드럽게 변한다고 되어 있다[4]. 따라서 더 현실적인 위험도 추론을 위해서는 본 연구에서 작성된 추론 규칙을 좀 더 세분화된 형태로 설계해야 할 필요성이 제기된다.

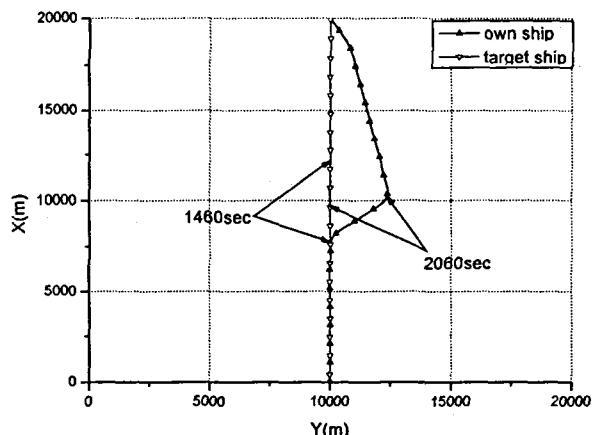


Fig. 10 Trajectories of burdened own ship and uncontrolled target ship in head-on situation

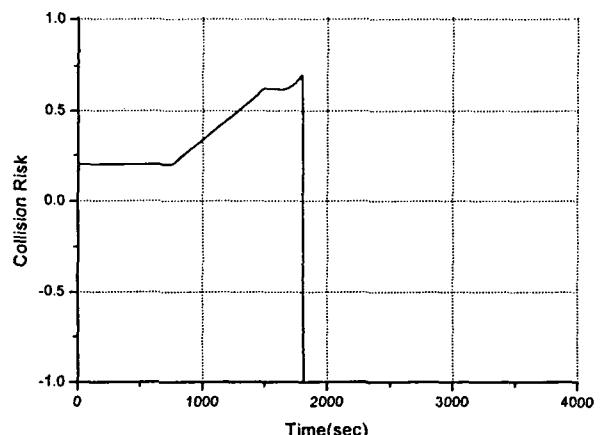


Fig. 13 Collision risk of own ship in crossing (burdened) situation

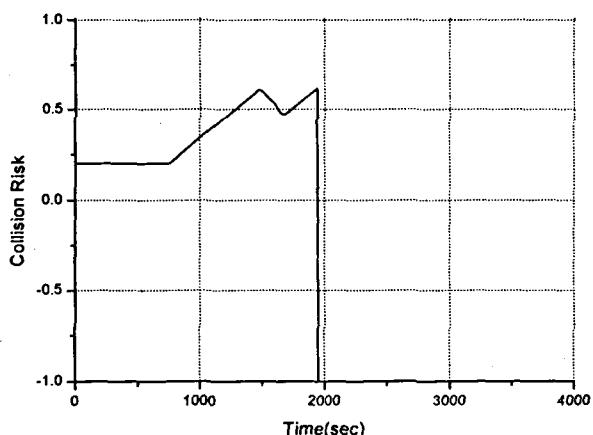


Fig. 11 Collision risk of own ship in head-on situation

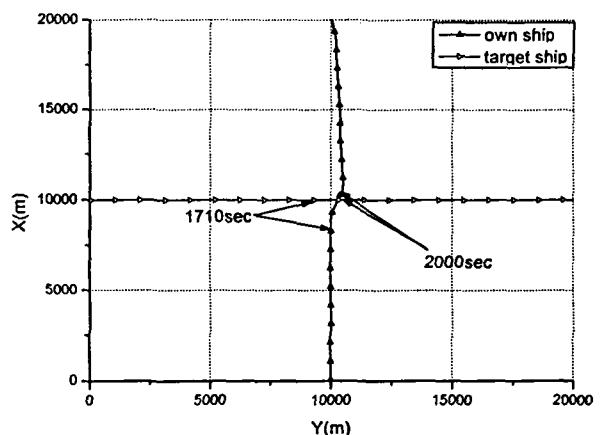


Fig. 14 Trajectories of privileged own ship and burdened target ship in crossing situation

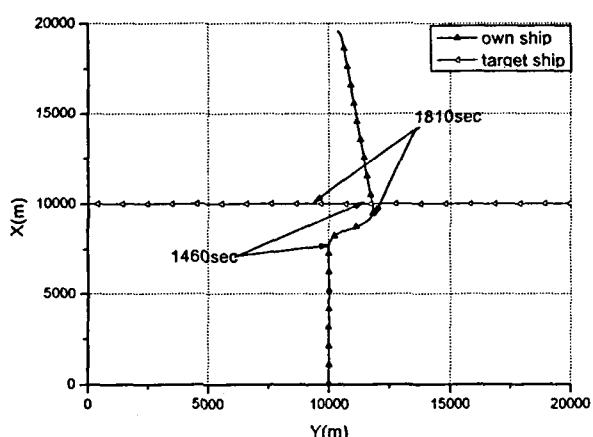


Fig. 12 Trajectories of burdened own ship and privileged target ship in crossing situation

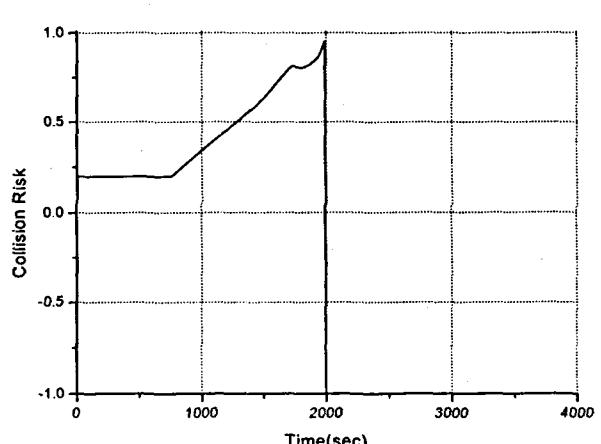


Fig. 15 Collision risk of own ship on crossing (privileged) situation

4. 결 론

본 연구에서는 충돌 위험도 모델을 세우기 위해 운항자와의

인터뷰를 거치는 대신 조종운동 시뮬레이션을 통해 확인된 자선의 조종성능을 반영한 퍼지 추론 시스템을 구현하였다. 피항을 시작해야 하는 충돌 위험도 값에 대응하는 시간과 거리로는, 타선이 법규를 위반했을 때 자선이 피항을 시작해야만 하는 최소 여유 시간과 일반적으로 해상교통법 등에서 지시하는 최소 여유 거리를 각각 사용했다.

본 연구에서 사용한 위험도 모델은 실제 운항자가 느끼는 위험을 모사하기에는 한계가 있다. 후속 연구에서는 소속 함수 개수를 늘임으로써 추론 규칙을 좀 더 세분화 된 형태로 설계하는 방법에 대해 다루고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 김인현, 해상교통법, 삼우사, 2003.
- [2] 정태권, "Sech 함수를 이용한 새로운 충돌 위험도 평가 법," 한국항해항만학회지 제27권 제2호, pp. 103-109, 2003.
- [3] Cockcroft, A. N. and Lameijer, J. N. F., A Guide to the Collision Avoidance Rules, 6th edition, Elsevier, 2001.
- [4] Hara, K. and Hammer, A., "A Safe Way of Collision Avoidance Maneuver based on Maneuvering Standard using Fuzzy Reasoning Model," MARSIM 93, St. John's, 1993.
- [5] Hasegawa, K., Kouzuki, A., Muramatsu, T., Komine, H. and Watabe, Y., "Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES)," Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 166, Nov., 1989.
- [6] Kijima, K and Furukawa, Y., "Design of Automatic collision Avoidance System using Fuzzy Inference," IFAC Control Applications in Marine Systems, Glasgow, Scotland, UK, 2001.
- [7] Lisowski, J., Rak, A., Czechowicz, W., "Neural Network Classifier for Ship Domain Assessment," Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 51, pp. 399-406, 2000.
- [8] Pietrzykowski, "The Analysis of a Ship Fuzzy Domain in a Restricted Area," IFAC Control Applications in Marine Systems, Glasgow, Scotland, UK, 2001.
- [9] Zhao, J., Price, W. G., Wilson, P. A. and Tan, M., "A Statistical Study of Mariner's Behaviour in Collision Avoidance at Sea," MARSIM'96, Balkema, Rotterdam, 1996.
- [10] Zhu, X., Xu H. and Lin, J., "Domain and Its Model Based on Neural Networks," Journal of Navigation, Vol. 54, pp. 97-102, 2001.