

항만 내 교통류 시뮬레이션에 기초한 혼잡도 평가

이한진⁽¹⁾, 공인영⁽²⁾

Assessment of Degree of Congestion based on Marine Traffic Flow Simulation for Harbor Area

by

Han-Jin Lee⁽¹⁾ and In-Young Gong⁽²⁾

요약

본 논문에서 저자들은 혼잡도의 관점에서 해상 교통 환경에 대한 평가를 시도하였다. 이를 위해서 우선 평가를 위한 정보를 얻기 위하여 해상 교통류에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션은 해상 교통 환경에 대한 광범위한 자료 조사를 바탕으로 하며 통계적인 방법들을 이용하여 이 조사 자료들을 시뮬레이션에 반영하였다. 다음으로 충돌 회피 시스템 개발을 위하여 제안된 충돌 위험도 추론 방법들을 이용하여 혼잡도 정의와 추론을 시도하였다. 이와 같이 정량화된 혼잡도는 해상 교통 환경의 설계 및 개선에 유용한 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, authors try to assess the marine traffic environment from the viewpoint of the degree of congestion. First, the marine traffic flow simulation is carried out to get the information related to the assessment. The simulation is performed based on the wide investigation of marine traffic environment and some statistical methods. Then the degree of congestion is reasoned by using the reasoning methods of the degree of collision risk made to develop collision avoidance system. The quantified degree of congestion reasoned by this method provides much information needed to the design and the evaluation of marine traffic environment.

Keywords: 충돌 위험도, 공간 폐색도, 혼잡도

1. 서론

해상 교통의 안전성에는 선박의 운동 성능이나 조선자의 숙련도 뿐만 아니라 항만 등의 항행 환경 자체의 특성도 큰 역할을 한다. 하지만 실제에 있어서 주변 자연

환경이나 교통량 등이 해상 교통의 안전성에 미치는 영향을 평가하는 것은 쉬운 일이 아니다. 해역 내 선박의 밀도나 도착 시간 분포 등의 단순한 통계 자료를 이용한 평가도 가능하지만 이것만으로는 선박간의 충돌 확률이나 항행의 곤란 정도, 항로의 적합성 등에 대한 해석을 할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 항만의 지형

(1) 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

(2) 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

적인 특성과 교통량 등이 해상 교통의 안전성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 교통류 시뮬레이션에 기초한 접근을 시도하였다.

이러한 시뮬레이션에서 가장 중요한 관건은 실제 현상과 얼마나 유사한 재현이 가능한가이다. 이를 위해서 본 연구에서는 우선 대상 영역에 대한 광범위한 자료 조사를 시도하였고 이를 바탕으로 선박들의 종류 별 발생 빈도 및 크기, 경로 등을 확률적으로 결정하였다. 또한 항행하는 선박들이 좀 더 현실적인 행동을 보일 수 있도록 기존의 충돌 회피 시스템 개발 분야의 연구 결과들을 시뮬레이션에 적용하여 각 선박들이 주어진 상황에 대해 어느 정도 조선자와 비슷한 행동 결정을 내릴 수 있도록 하였다.

이와 같은 과정을 거쳐 재현된 시뮬레이션 결과들로부터 각각의 선박이 조우하는 위험한 선박들의 수와 지수화된 위험도 등을 이용하여 주어진 영역의 혼잡도를 산출해 내었다. 이때 얻어지는 혼잡도는 대상 해역에 대한 분포도의 형태가 되며 이렇게 얻어진 결과는 기존 항만의 평가뿐만 아니라 새로운 항만 설계 시에도 항만의 안전성 검토에 충분히 활용될 수 있을 것으로 보인다.

2. 본론

시뮬레이션을 수행하기 위해서 먼저 고려할 것은 선박의 발생 조건이다. 어떤 선박이 어디에서 언제 발생할지, 그리고 어디를 향해 갈지를 실제 현상에 대한 충분한 자료 조사를 바탕으로 결정하여야 한다. 실제 세계에서 선박 발생은 매 순간 변화하며 그 변화를 모두 기록하고 재현하는 것은 불가능하다. 따라서 적절한 통계적 기법들을 이용하여 조사된 자료를 분석하고 재현하는 것이 필요하다. 결국 이렇게 통계적 기법을 사용해 발생시킨 선박들을 이용한 평가가 유의한 결과를 주기 위해서는 많은 횟수의 반복 시뮬레이션이 필요하다.

다음으로 이렇게 발생된 선박의 행동이 과연 어느 정도 현실성을 갖느냐가 중요하다. 이를 위해서 선박의 행동을 묘사할 수 있는 적절한 운동 방정식과, 어떤 행동을 취해야 할지를 결정할 피항 알고리즘이 필요하다. 이때 운동 방정식은 가능한 단순해야 한다. 어떤 해역을 항행하는 모든 선박의 행동을 묘사하는 것은 많은 계산 시간을 필요로 하며 더군다나 충돌을 피하며 목표를 향해 나아갈 적절한 행동을 결정하기 위해서는 더욱 많은 시간이 필요하다. 따라서 복잡한 운동 방정식은 앞서 언급한 충분한 횟수의 시뮬레이션 반복에 장애가 된다.

앞서 언급한 조건들을 만족시키면서 시뮬레이션을 수행한 다음, 주어진 해역의 어디가 혼잡하며 어디가 안전한지를 판단하기 위하여 혼잡도 평가를 실시하게 된다. 대상 해역의 문제점을 관찰하기 위해서 전체 영역을 작은 격자들로 나누어 각 격자에 대해 혼잡도 평가를 수행한다. 또 필요에 따라서는 전체 혼잡도의 평균값 등으로 주어진 해역을 대표하는 값을 추론할 수도 있다. 다음 절에서부터 이러한 과정을 좀더 자세히 살펴 보도록 하겠다.

2.1 선박의 발생

선박의 발생 조건을 결정하기 위해서 가장 먼저 고려해야 할 사항은 통항 경로대이다. 통항 경로대는 재현되는 선박이 어디를 출발점(Origin)으로 하고 또 어디를 도착 지점(Destination)으로 할 지를 기술하는 요소이다. 하나의 통항 경로대는 하나의 OD로 표현된다. 시뮬레이션 상에서 하나의 OD는 선박이 발생하는 출발선과 소멸되는 도착선 그리고 발생한 선박이 따라야 할 항로(Fairway)로 구성된다.

하나의 OD에 포함되는 정보로는 우선 출발선에서의 각 선종별 발생 빈도가 있다. 여기서 선종이라 함은 선박의 종류와 크기에 따라 나누어진 몇 개의 그룹을 의미한다. 어떤 항로를 가로지르는 임의의 경계선을 그었을 때 그 경계선을 통과하는 선박들의 통과 시간 간격은 일반적으로 지수 분포를 따르는 것으로 알려져 있다(Nakamura[1996]). 따라서 출발선에서의 선종별 선박 발생 간격도 미리 시뮬레이션 전에 결정한 평균값을 갖는 지수 분포를 따르도록 하였다. 이때 발생 간격의 평균값은 시뮬레이션을 수행하는 시간대에, 주어진 OD에 존재하는 선종별 선박 밀도로부터 결정한다. 선종별 선박 밀도는 대상 영역에 대한 기본적인 자료 조사를 통하여 얻을 수 있다. 한 OD에서 어떤 선종의 평균 발생 시간 간격이 T_m 이라 하면 발생 시간 간격 t 가 Δt 이상이 될 확률은 지수 분포의 확률 밀도 함수로부터 다음 식과 같이 주어진다.

$$P(t \geq \Delta t) = \int_{\Delta t}^{\infty} \frac{1}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} dt = e^{-\frac{\Delta t}{T_m}} \quad (1)$$

다음으로 결정해야 할 사항은 출발선에서의 선박 발생 위치가 있다. 하나의 OD에 대응하는 항적 분포를 실제 세계에서 관찰해 보면 대략적으로 정규 분포로 근사된다(Nakamura[1996]). 따라서 본 연구에서는 출발선에서의 선박 발생 위치 분포는 정규 분포를 따른다고 가정하였다. 이때 출발선의 중심을 발생 위치의 평균으로 하였으며 출발선의 폭 내에 발생 선박의 95%가 들

어울 수 있도록 표준 편차를 결정하였다. 출발선의 폭을 벗어나서 발생하는 선박은 무시하였다.

발생 위치가 결정되면 다음으로 선박의 크기와 속력을 결정해야 한다. 선박의 크기는 전체 길이로 대표되며 이 길이는 뒤에서 선박의 운동 특성이나 행동 결정의 주 요소가 된다. 본 연구에서는 선박의 길이와 속력도 정규 분포를 따르는 것으로 가정하였다. 이때 선종별 길이 및 속력의 평균값과 표준 편차는 실제 조사된 자료를 이용하여 결정한다. 그리고 역시 앞서와 마찬가지로 비정상적인 값을 갖는 선박을 제외시키기 위하여 95% 범위를 벗어나는 선박은 무시하였다. 마지막으로 선박은 발생과 함께 자신이 쫓아가야 할 침로를 갖는다. 하나의 OD에서 침로는 통항 경로대를 따른 변침점(Way Point)들의 배열로 나타난다. 각 선박은 발생 시에 자신에 가장 가까운 변침점 배열을 따르도록 하였다. 또 각 변침점은 자신의 규정 속력을 가지며 어떤 변침점을 통과한 선박은 그 점의 규정 속력을 목표 속력으로 취한다.

2.2 선박의 운동

운동 방정식

앞서 언급한 것처럼 가능한 단순한 형태로 선박의 운동을 묘사하기 위해서 여기서는 선박의 선회 운동을 일차적으로 근사할 수 있는 Nomoto의 KT 모델을 사용하였다. 선박의 선수각을 ϕ , 타각을 δ 로 나타내면 운동 방정식은 다음 식과 같다. 여기서 T , K 는 선박의 특성에 따라 결정되는 조종성 지수이다.

$$T \cdot \ddot{\phi} + \dot{\phi} = K \cdot \delta \quad (2)$$

선체의 운동 관성력과 선체에 작용하는 저항을 생각하면 현재 선속 u_0 에서 어떤 속도 u 로의 변속 운동 모델은 다음처럼 간단히 고려할 수 있다. 여기서 $(m+m_x)$ 는 선박의 겉보기 질량이며 C_T 는 선박의 저항 계수로서 선형 특성에 따라 결정되는 상수이다. 시뮬레이션에서는 변침점의 규정 속력 또는 피항을 위하여 감속을 시도할 경우의 목표 속력이 u_g 가 된다.

$$(m + m_x) \dot{u} = \frac{1}{2} \rho S_A C_T (u^2 - u_0^2) \quad (3)$$

단, ρ : 유체의 밀도
 S_A : 침수표면적

피항 모델

선박의 피항 모델에는 여러 가지 방법이 제시되고 있으나 그 대부분이 충돌 위험도 정의에서부터 시작하고 있다. 현재 상황의 위험 정도를 나타내는 충돌 위험도를

정의할 수 있으면 그 위험도를 이용하여 피항 행동을 선택할 수 있다. 즉 충돌 위험도가 높아지면 피항 행동을 시작하고 그 값이 충분히 낮아지면 행동을 종결짓는 것이다. 더 나아가 행동의 선택도 충돌 위험도가 낮아지는 방향으로 이루어지도록 위험도 정의를 활용할 수 있다. 충돌 위험도 추론은 조선자들의 경험적 지식과 직접적인 관련이 있다.

본 연구에서 사용된 피항 행동 결정을 위한 충돌 위험도 추론 방법은 Hasegawa의 연구를 기초로 한다. Hasegawa는 시뮬레이터 실험을 바탕으로 TCPA (Time of the Closest Point of Approach)와 DCPA (Distance of the Closest Point of Approach)를 입력 변수로 하는 충돌 위험도 추론 방법을 개발하였다 (Hasegawa[1987]). 퍼지 이론을 바탕으로 하며, 추론된 충돌 위험도는 0에서 1까지의 값을 갖는다. 값이 클수록 위험도가 높은 것이며 타선이 자선으로부터 멀어지고 있는 경우에는 충돌 위험도에 (-) 부호를 덧붙였다. 또한 타선이 여러 척인 경우에는 각각의 선박에 대한 위험도 중 가장 높은 충돌 위험도를 현재 행동의 위험도로 사용하였다.

실제로 본 연구에서 어떤 피항 행동을 선택할 때는 충돌 위험도뿐만 아니라 그 선택된 행동이 얼마나 큰 변침량과 변속량을 요구하는지도 함께 평가한다. 즉 행동 변화량이 작을수록 그 행동의 선호도는 높다. 만약 자선이 어느 정도의 안전성을 확보할 수 있다면 선호도가 높은 행동을 선택하도록 해야 한다. 본 연구에서는 Nakamura의 연구 결과를 사용하였으며 행동의 선호도는 변침량과 변속량이 작을수록 높으며 0에서 1 사이의 값을 갖는다. 또한 우변침인 경우가 좌변침인 경우보다 선호도가 높다. 이것은 일반적인 피항 규칙인 좌현 대 좌현의 피항 행동의 선호도를 반영한 것이다. Nakamura에 의해 제안된 행동 선호도는 다음 식에 의해 주어진다(Nakamura[1996]). 식에서 $Pb(X_i)$ 는 선택된 행동 X_i 의 선호도를 나타내며 ΔC 는 그 행동의 변침량을, ΔV 는 변속량을 나타낸다.

$$Pb(X_i) = e^{(-a_c \cdot \Delta C)} \cdot e^{(-a_v \cdot \Delta V)} \quad (4)$$

$$a_c = \begin{cases} 0.0190 & (\text{우변침}) \\ 0.0260 & (\text{좌변침}) \end{cases}$$

$$a_v = 0.0456$$

실제로 행동을 선택하는 기준은 충돌 위험도와 행동 선호도의 적절한 조합에 의해 이루어진다. 선택 가능한 여러 행동들 중 충돌 위험도가 주어진 기준값보다 작은 행동들이 존재하면 그 행동들 중 행동 선호도가 높은 행동을 선택한다. 만약 대상 행동 모두가 기준값 이상의 충돌 위험도를 가지면 그 중 위험도가 가장 낮은 행동을 선택한다(이한진[1997]). 또한 항로 경계선을

지키기 위해서 선박이 선택 가능한 행동들 중 주어진 제한 거리 이내로 경계선 근처에 접근할 가능성이 있는 행동들은 선택에서 제외시킨다.

2.3 혼잡도 평가

피항 조선 공간 폐색도(閉塞度)

대상 해역의 혼잡도는 여러 가지로 평가할 수 있다. 그 중 한가지는 조선자가 느끼는 잠재적인 충돌 위험도이다. 즉 조선자가 어떤 피항 행동을 선택하기 위해 수행한 현 상황에 대한 평가를 말한다. 이것은 역으로 조선자가 선택할 수 있는 피항 공간이 얼마나 제한되어 있는 지로 설명할 수 있다. 따라서 선박 주위에 형성되는 잠재적인 충돌 위험 정도를 표시하기 위하여 피항 조선 공간 폐색도(BC: Blocking Coefficient)를 다음 식과 같이 정의하였다(Nakamura[1996]).

$$BC = \frac{\sum_{i=1}^m R(X_i) \times Pb(X_i)}{\sum_{i=1}^m Pb(X_i)} \quad (5)$$

여기서 X_i 는 변침과 변속으로 이루어지는 피항 조선 공간 상의 한 행동을 나타내며 $R(X_i)$ 은 그 행동의 충돌 위험도, $Pb(X_i)$ 는 선호도를 나타낸다. 조선자가 느끼는 잠재적인 피항 어려움은 앞에서 설명한 피항 행동 선택을 위한 충돌 위험도로 나타낼 수 있다. 하지만 같은 위험도를 갖는 행동이라도 선호도가 낮은 행동은 그만큼 조선의 부담이 있음을 의미한다. 따라서 위의 식과 같이 행동 선호도가 충돌 위험도에 가중치로 작용하게 된다. 추가로 항로 경계선이 주는 조선 부담을 고려하기 위해서, 선택된 행동이 경계선의 제한 거리를 침범할 위험이 있으면 그 행동의 위험도가 1이 되도록 하였다. 일반적으로 BC가 0.6 이상이면 잠재적인 충돌 위험도가 높은 것으로 간주한다.

식 (5)를 이용해서 결정한 BC는 한 선박의 조선자가 임의의 순간에 느끼는 값이다. 따라서 BC를 이용하여 전체 해역의 혼잡도를 평가하기 위해서는 통계적인 방법이 필요하다. 본 연구에서 사용한 방법은 다음과 같다. 먼저 충분한 표본 집합을 얻기 위하여 시뮬레이션을 장시간에 걸쳐서 수행하며 일정한 시간 간격으로 모든 선박의 BC를 계산한다. 그리고 대상 해역을 격자로 나눈 후 각 격자에서 BC가 0.6 이상인 경우가 몇 번이나 발생했는지를 전체 평가 횟수에 대한 백분율(I_{BC})로 나타낸다. 한 격자의 BC로는 그 격자 안에 있는 선박들의 BC 중 가장 큰 값을 사용하였다.

현재화한 충돌 위험도

앞 절에서 설명한 BC는 피항 행동을 결정하기 전에 조선자가 현 상황에 대해서 느끼는 충돌 위험도이다. 대상 해역의 혼잡도를 평가하는 방법에는 이러한 잠재적인 충돌 위험도뿐만 아니라 각 선박이 피항 행동을 선택한 이후의 현실적으로 나타나는 충돌 위험도를 사용할 수도 있다.

본 연구에서는 이런 평가를 위해서 Hara가 제안한 충돌 위험도 정의(SJ: Subjective Judgement)를 사용하였다. 앞에서 Hasegawa가 충돌 위험도 추론을 위해 TCPA와 DCPA를 사용한 것에 반해 Hara는 상대 방위각 변화량과 상대 거리를 사용하였다(Hara[1993]). 만약 타선까지의 거리가 멀고 서로의 피항 행동으로 말미암아 상대 방위각의 변화가 크다면 충돌 위험도가 낮은 것이다. Hara의 추론 방법 역시 퍼지 이론에 기초하며 추론된 SJ는 -3에서 3까지의 값을 갖는다. 3은 충분히 안전한 경우를 의미하며 -3은 충돌 가능성이 가장 높은 경우를 나타낸다.

앞에서와 마찬가지로 해역의 혼잡도 평가를 위해서 각 격자에 대해서 이 위험도를 계산할 필요가 있다. 본 연구에서는 한 선박이 느끼는 위험도는 주변에 있는 타선들의 위험도를 모두 더한 값으로 나타내었다. 다만 충분한 안전을 확보한 타선의 경우는 그 값에서 제외시켰다. 실제로 혼잡도 평가 시에는 SJ가 -1이하인 경우만을 고려하였다. 이와 같이 각 타선의 위험도를 더한 이유는 각 선박의 위험도뿐만 아니라 주변에 존재하는 위험한 선박의 수도 평가에 반영키 위해서이다. 한 격자의 SJ는 그 격자 내에 있는 모든 선박의 SJ를 더한 값으로 하였다. 이 값을 어느 정도 정규화 하기 위해서 각 격자의 값을 매번 평가를 수행할 때마다 더한 후 전체 평가 횟수로 나누었다. 이것을 정리하면 다음과 같다(Hara[1995]). 식에서 SJ'은 SJ가 -1보다 작은 경우만 고려되었음을 나타낸다. 또한 n은 평가 수행 횟수, m은 주어진 격자에서 -1보다 작은 SJ를 계산한 전체 횟수를 나타낸다.

$$I_{SJ}(SJ \text{ value distribution}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |SJ'_{ij}|}{n} \quad (6)$$

참고로 BC의 경우에는 위험도를 추론하기 위하여 TCPA와 DCPA를 사용한다. 따라서 두 선박이 같은 방향으로 항행하는 경우에는 TCPA가 크게 나오기 쉬우므로 아무래도 위험도가 낮게 평가된다. 반면에 SJ의 경우에는 상대 방위각 변화량과 상대 거리를 위험도 추론에 사용한다. 상대 방위각 변화량이 크게 나오면 서로 충돌 회피를 위하여 적극적으로 행동을 취하는 것으로 보고 위험도를 낮게 평가한다. 따라서 두 선박이 같은 방향으로 항행하는 경우에는 상대 방위각 변화량이

작게 나오기 쉬우므로 위험도는 높게 평가된다. 두 지수의 이런 차이가 뒤의 결과에서 혼잡도가 높은 지역이 조금씩 다르게 나오는 한 원인이 된다. 또 BC의 경우에는 항로 경계선에 의해 행동이 제한되는 영향이 직접적으로 반영되지만 SJ는 오로지 다른 선박이 가까이 다가오는 행동을 통해서만 반영된다. 또 어떤 순간 한 격자 내에 있는 선박의 수는 SJ 분포도의 경우에는 모든 선박의 SJ 값을 더하는 방법을 사용함으로 곧바로 그 영향이 나타난다. 반면에 BC 분포도의 경우에는 각 격자의 최대값을 사용함으로 SJ에 비해서는 그 영향이 작게 나타난다.

3. 계산 결과 및 고찰

평가 대상 해역은 인천항의 팔미도 근처이다. 시뮬레이션을 수행한 시간대는 거의 모든 선박의 입출항이 가능한 주간 시간대이다. 평가 대상 선박은 위험물 운반선과 모래 운반선 및 기타 일반 선박들이다. 입출항이 짧은 시간대에 집중돼 있고 다른 시간대에는 존재하지 않는 어선과 발생 빈도가 매우 낮은 정기 여객선은 무시하였다.

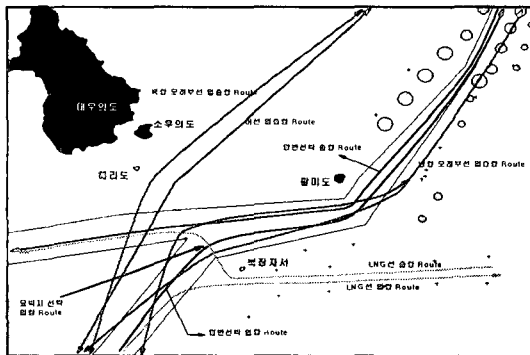


Fig. 1 OD definitions of Incheon harbor

Fig. 1은 대상 해역의 배치를 보여준다. 그림을 보면 대상 해역에 대한 OD는 남·북향 모래 운반선 입출항 항로, 일반 선박 입출항 항로, 묘박지 선박 입항 항로 등으로 나누어짐을 알 수 있다. 모래 운반선의 입출항 OD는 모래 운반선의 크기별로 분류된 선종에 대한 정보를 갖는다. 또 일반 선박의 입출항 OD는 위험물 운반선과 기타 선박들, 그리고 그 각각의 크기에 따라 분류된 선종의 정보를 갖는다. 앞서 언급한 대로 어선은 무시하였으며 LNG선의 경우는 시뮬레이션에 고려는 되었지만 그 발생 빈도가 다른 선박에 비해 매우 낮아 그 영향이 거의 없다. Fig. 1에서 회색으로 칠해진

원은 항로 주변의 묘박지를 나타낸다.

총 60시간에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 처음 10시간을 제외한 나머지 50시간에 대해 10초 단위로 혼잡도 평가를 수행하였다. Fig. 2는 50시간의 시뮬레이션 중 1시간 동안의 선박들의 운항 궤적을 보여주고 있다. 60시간의 시뮬레이션 동안 모래 운반선은 1005척, 위험물 운반선은 519척, LNG선은 22척 그리고 기타 선박은 103척 발생하였다. 즉 모래 운반선이 다른 선박들에 비해 거의 2배 가까이 발생 빈도가 높다. 이것은 Fig. 1에서도 모래 운반선, 특히 남향으로 입출항하는 모래 운반선의 궤적이 매우 많은데서 확인할 수 있다. Fig. 3은 임의의 한 순간 선박들의 분포를 보여준다. 그림에서 화살표는 선박의 크기와 방향을 나타내며 화살표 끝에 있는 원은 선박의 크기를 나타낸다. 원의 지름이 곧 해당 선박의 길이이다. 그림을 보면 항로 주변의 몇몇 묘박지에 대형선이 몇 척 있음을 알 수 있다.

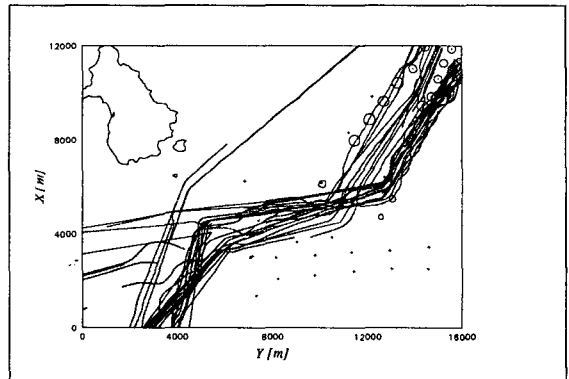


Fig. 2 Trajectories of ships during one hour

Fig. 4부터는 혼잡도 평가를 수행한 결과들을 보여주고 있다. 어떤 해역에 대해서 혼잡하다고 말할 때 어느 선박의 입장에서 판단한 것인지는 매우 중요하다. 즉 모래 운반선의 입장에서 평가했을 때의 혼잡도와 위험물 운반선의 입장에서 평가한 혼잡도는 같은 값이라도 조선자에게 주는 부담의 정도가 틀리다. 또 경우에 따라서는 특정 선박의 안전 확보가 매우 중요할 수도 있다. 따라서 여기서는 혼잡도 평가를 모래 운반선, 위험물 운반선, 기타 선박으로 나누어 수행하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 모래 운반선의 혼잡도 분포를 보여준다. Fig. 4는 각 격자의 전체 평가 횟수에 대한 BC 0.6 이상 발생 비율을 백분율로 나타낸 것이며 Fig. 5는 식 (6)에 의해서 구해진 SJ 분포값을 나타내고 있다. 일반적으로 모래 운반선의 경우에는 그 조종

성능이 매우 떨어진다. 따라서 보통 다른 선박들이 모래 운반선을 피하며 모래 운반선은 자신의 침로를 고수하는 것이 현실적이다. 본 연구에서는 이를 반영키 위해

서 Fig. 4의 값들은 다른 선박들보다는 모래 운반선 자신들끼리의 충돌 위험에 의한 영향이 훨씬 크다고 볼 수 있다. 그러나 SJ 를 추론하는 경우에는 이런 가중치를 사용하지 않으므로 모든 선박이 동등한 자격으로 고려된다. Fig. 4를 보면 BC 0.6 이상 발생 비율은 남쪽으로 입출항하는 모래 운반선이 모두 모여서 묘박지에 선박들이 존재하는 우측 상단 부분에서 제일 높게 나오고 있다. 또, 다른 선박들과 만나면서 항로의 굴곡부가 있는 팔미도 근방에서 높게 나오고 있다. 전체적으로 위험도가 높은 곳은 5%, 매우 높은 곳은 8~10% 정도의 값을 갖고 있다.

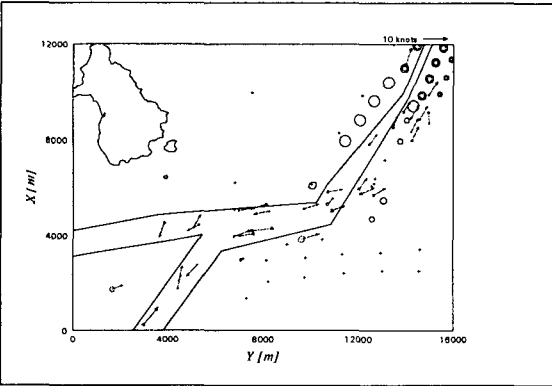


Fig. 3 Example of distribution of ships

Fig. 5에는 SJ 분포값이 나타나 있다. 그림을 보면 묘박지 근처는 Fig. 4와 마찬가지로 여전히 높게 나오고 있으나 팔미도 근처의 항로 굴곡부의 경우에는 다른 지역에 비해 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 또 항로가 갈라지고 넓어지는 아래쪽으로 갈수록 값이 작아지고 있음도 확인할 수 있다. SJ 의 경우에는 항로 경계선을 직접적으로 고려하지 않으므로 굴곡부의 영향이 크게 나타나지 않는다. 또한 굴곡부에서의 선박의 급격한 변침은 선박들간의 상대 방위각 변화량을 증가시켜 오히려 SJ 추론값을 낮출 수도 있다. 반면에 묘박지에 정지해 있는 선박은 상대 방위각 변화량이 매우 적다. 묘박지에 있는 선박에 대해서는 오로지 자신의 변침에 의해서만 방위각 변화가 일어나므로 같은 조건이라면 다른 영역에 비해 묘박지 부근이 훨씬 위험하게 나타난다. 또 SJ 분포값은 격자 내에 존재하는 모든 선박의 값의 합이므로 항로가 갈라지거나 넓어져서 주변에 존재하는 선박의 수가 줄어들면 그 영향이 직접적으로 나타난다.

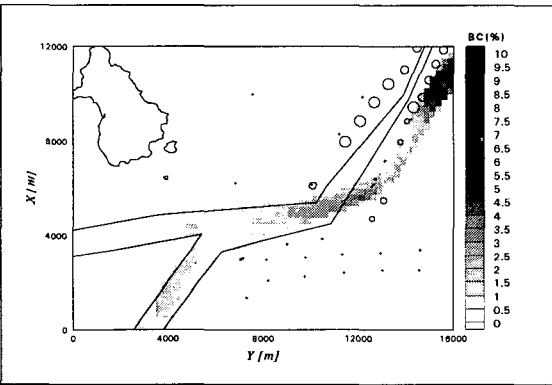


Fig. 4 BC distribution of barge

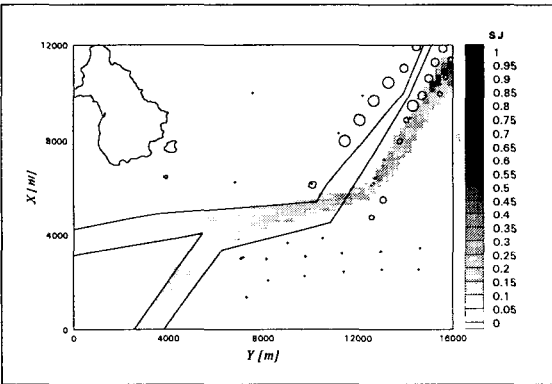


Fig. 5 SJ distribution of barge

Fig. 6과 Fig. 7은 위험물 운반선의 혼잡도 분포를 보여주고 있다. BC 0.6 이상 발생 비율을 보여주는 Fig. 6을 보면 모래 운반선의 경우와 마찬가지로 묘박지 근처와 팔미도 근방의 굴곡부에서 발생 비율이 높게 나오고 있다. 특히 굴곡부에서 매우 높은 값이 나타나고 있으며 굴곡부 아래로, 입항하는 위험물 운반선과 출항하는 위험물 운반선, 모래 운반선이 모두 만나는 경계면을 따라 발생 비율이 높게 나오고 있다. 또한 입항의 경우 그 항로가 모래 운반선의 항로와 인접해 있다. 따라서 전반적으로 출항 항로에 비해 높은 값이 나타나고 있다. 전체적으로 발생 비율이 높은 곳은 대략 3~4%의 값을 갖는다. 이것은 위험물 운반선이 모래 운반선에 비해 훨씬 적은 수가 발생한 것에 기인한다.

충돌 위험도 추론 시 모래 운반선이 다른 선박을 고려하는 경우에는 그 TCPA 및 DCPA에 가중치를 곱하여서 충돌 위험도가 좀더 낮게 나오도록 하였다. 따라

서 Fig. 7은 위험물 운반선의 SJ 분포값을 도시한 것이다. 모래 운반선의 경우와 마찬가지로 항로가 넓어지고 입출항이 갈라지는 아래로 갈수록 값이 작아지고 있

다. 역시 굴곡부의 영향은 거의 나타나고 있지 않으며 묘박지 근처에서 높은 값들을 보이고 있다. Fig. 6에서도 언급한 것처럼 모래 운반선 항로와 인접해 있는 입항 항로의 값이 출항의 경우에 비해 크게 나오고 있다. 묘박지 근처에서 대략 0.3 정도의 값을 보이고 있다.

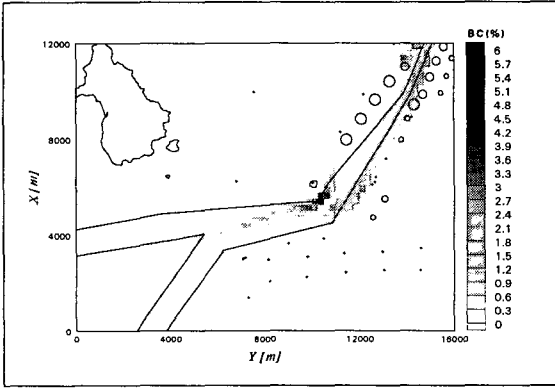


Fig. 6 I_{BC} distribution of dangerous goods carrier

Fig. 8과 Fig. 9는 기타 일반 선박의 혼잡도 분포를 도시한 것이다. 이 선박들은 위험물 운반선과 같은 OD를 갖는다. 다만 발생 빈도가 위험물 운반선의 20% 정도밖에 되지 않는다. 따라서 그림을 보면 전체적인 경향은 위험물 운반선과 거의 같게 나오며 단지 값의 크기만 작게 나온다. BC 0.6 이상 발생 비율이 높은 곳은 대략 1% 정도의 값을, SJ 분포값이 높은 곳은 0.08 정도의 값을 갖는다.

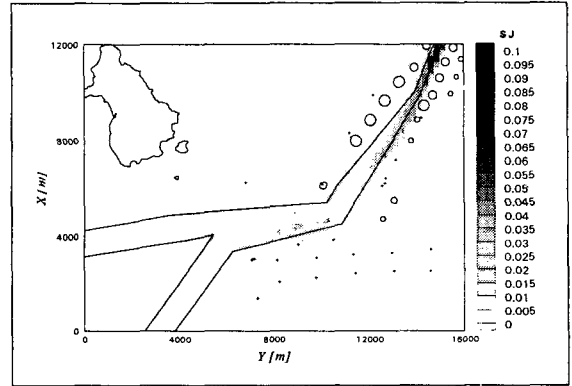


Fig. 9 I_{SJ} distribution of other ships

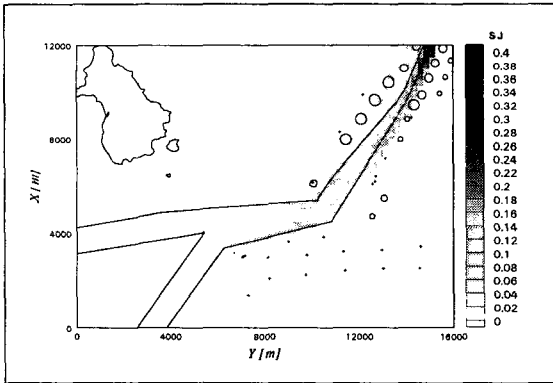


Fig. 7 I_{SJ} distribution of dangerous goods carrier

Fig. 10은 위험물 운반선 주변의 주의를 요하는 선박의 평균적인 수를 도시한 것이다. 여기서 주의를 요하는 선박이라 함은 그 선박의 SJ가 -1이하임을 의미한다. 한 격자의 값은 그 격자를 지난 위험물 운반선의 값들의 평균이다. 예를 들어 어떤 위험물 운반선이 입구의 한 격자를 지나는 동안 몇 차례의 혼잡도 평가를 수행했다고 하자. 그럼 주어진 선박이 그 격자를 지나 는 동안 주변에 존재하는 주의를 요하는 선박의 평균적인 수는 각각의 평가에서 얻은 값들을 평균하여 얻을 수 있다. 또 전체 시뮬레이션 시간 동안 그 격자를 여러 척의 위험물 운반선이 지날 것이다. 이때 위험물 운반선이 그 격자를 지나 는 동안 주변에 존재하는 주의를 요하는 선박의 평균적인 수는 각각의 위험물 운반선에 대해서 얻은 값들에 대한 평균으로 나타낼 수 있다. Fig. 10은 이와 같은 방법으로 구한 혼잡도를 도시한 것으로 SJ를 이용한 혼잡도 표현의 또 다른 방법이다. 앞에서 사용한 I_{SJ} 에 비해 SJ 값의 크기는 그렇게 큰 영향을 미치지 않는다. 대신에 누구나 쉽게 알 수 있는 선박의 수를 사용함으로써 그 값이 나타내는 물리적인 의미가 좀더 명확한 특징이 있다.

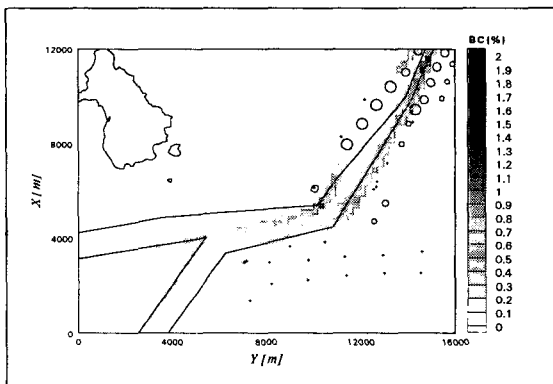


Fig. 8 I_{BC} distribution of other ships

혼잡도를 표현하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 아직까지는 어떤 것이 가장 적합하다고 결론을 내 리기가 쉽지 않다. 현재로는 목적에 따라서, 가능한 여

러 가지 방법으로 표현하고 그 결과들을 종합해서 판단을 내리는 것이 필요하다고 생각된다.

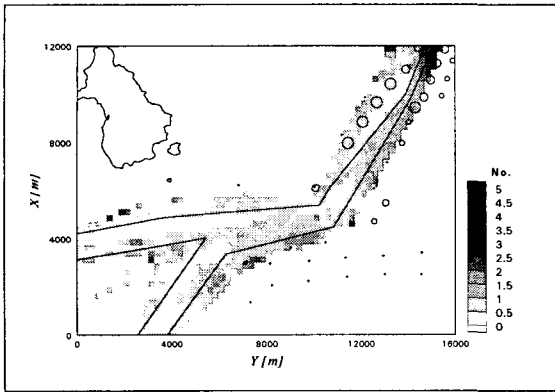


Fig. 10 Number of dangerous ships ($S_j \leq -1$) in the case of dangerous goods carrier

4. 결론

본 논문에서는 해상 교통 환경의 혼잡도를 수치화 할 수 있는 방법을 개발하였다. 수치화를 위한 전제 조건으로 시뮬레이션을 통한 실제 현상의 적절한 재현이 필요하다. 이를 위해서 대상 영역에 대한 광범위한 자료 조사와 적절한 통계적 기법을 이용한 재현을 시도하였다. 이렇게 시뮬레이션을 통해 재현된 현상에 대해서, 기존의 충돌 회피 시스템 개발을 위해 제안된 충돌 위험도 추론 방법들과 행동 선택 기준들을 적절히 조합하여 혼잡도를 산출하였다. 기존의 충돌 회피 시스템에서의 위험도 추론과의 차이점은, 기존의 시스템에서는 오로지 자신의 관점에서만 위험도를 문제 삼는데 반해 혼잡도의 경우에는 모든 선박에 대해 각각의 관점에서 위험도를 기술하고 어떤 정해진 영역 내에 있는 선박들의 위험도를 적절히 조합하여 그 영역의 조선 부담 정도를 나타내는데 있다.

앞장의 계산 결과들을 보면 이런 식으로 수치화한 혼잡도가 조선자들이 경험적으로 내리는 조선 부담에 대한 판단을 어느 정도 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 실제로 항로의 굴곡이 심해 큰 변침이 필요한 영역이나 폭이 좁고 묘박지에 있는 선박들이 많은 영역의 혼잡도가 다른 영역에 비해 높게 나오리라는 것은 일반적으로 쉽게 짐작할 수 있다. 하지만 그렇게 경험적으로 내리는 판단은 항로의 변경을 통한 개선 효과를 미리 예측한다든지 또는 항행 선박의 증가에 따른 위험 영역의 증가 정도를 판단한다든지 하는, 어느 정도의 정량화가 필요한 분야에서는 유의한 결론을 끄집어내기

가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서 시도한 혼잡도의 수치화는 전문가들의 경험에서 나오는 판단과 함께, 해상 교통 환경의 검토 및 개선에 많은 의미 있는 정보를 줄 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구를 통해 제안된 혼잡도들은 상대적인 비교에서는 충분히 활용 가능한 정보를 주고 있다. 하지만 그 값의 크기 자체가 주는 의미는 그 해석이 쉽지 않다. 예를 들어 BC 0.6 이상 발생 비율이 5%라고 했을 때 과연 그 상황이 매우 혼잡한 경우여서 반드시 해결책을 마련해야 하는 것인지 아니면 큰 무리 없이 받아들일 수 있는 것인지 판단하기가 쉽지 않다. 이런 판단의 기준은 대상 해역의 지리적인 조건, 항행하는 선박들의 종류 등에 따라 얼마든지 바뀔 수가 있다. 따라서 앞으로 좀더 현실과 연관 관계가 높은 판단 지수를 개발할 필요가 있다.

후기

본 연구는 97년도 과학기술처의 기관고유사업인 “유조선 항로 안전성 평가 핵심기술 개발” 과제의 일부분임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] 박용섭, 1988, *해상교통법론*, 한국선원선박문제연구소.
- [2] 이한진, 1997, *유전자 알고리즘을 이용한 충돌회피 시스템의 최적화*, 박사학위논문, 서울대학교.
- [3] Hammer, A. and Hara, K., 1990, "Knowledge Acquisition for Collision Avoidance Maneuver by Ship Handling Simulator", MARSIM & ICSM 90, Tokyo.
- [4] Hara, K. and Hammer, A., 1993, "A Safe Way of Collision Avoidance Maneuver based on Maneuvering Standard using Fuzzy Reasoning Model", MARSIM 93, St. John's.
- [5] Hara, K. and Nakamura, S., 1995, "A Comprehensive Assessment System for the Maritime Traffic Environment", Safety Science 19.
- [6] Hasegawa, K., 1987, "Automatic Collision Avoidance System for Ships using Fuzzy Control", 8th Ship Control System

- Symposium, Hague.
- [7] Hasegawa, K., Kouzuki, A., Muramatsu, T., Komine, H. and Watabe, Y., 1989, "Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES)", Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol 166, Nov.
 - [8] Imazu, H. and Koyama, T., 1984, "The Determination of Collision Avoidance Action", Journal of Japan Institute of Navigation, Vol. 70, Jan.
 - [9] Imazu, H. and Koyama, T., 1984, "The Optimization of the Criterion for Collision Avoidance Action", Journal of Japan Institute of Navigation, Vol. 71, Sep.
 - [10] Isshiki, H., 1994, "Algorithm for Collision Avoidance of a Ship", Journal of Kansai Society of Naval Architecture of Japan, No. 222, Sep.
 - [11] Koyama, T. and Yan, J., 1987, "An Expert System Approach to Collision Avoidance", 8th Ship Control System Symposium, Hague.
 - [12] Lee, H.J., Yoo, W.J. and Rhee, K.P., 1993, "Development of Collision Avoidance System by Fuzzy Theory", The Second Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics, Osaka.
 - [13] Nakamura, S., 1996, 해상 교통에 관한 안전성 평가 수법의 확립, 박사학위논문, Hiroshima University.
 - [14] Rhee, K.P. and Lee, H.J., 1996, "Development of a Collision Avoidance System considering the Navigation Plan", MAR SIM 96, Copenhagen.