

## 선박항로 위험도 평가 시뮬레이터 개발에 관한 연구

### A Study on the Development of Ship's Passage Risk Assessment Simulator

김광일\* · 정중식\*\*† · 박계각\*\*  
Kwang-Il Kim\* · Jung Sik Jeong\*\*† · Gyei-Kark Park\*\*

\*목포해양대학교 대학원 해상운송시스템 학부, \*\*목포해양대학교 국제해사수송과학부

\*Division of Maritime Transportation system, Mokpo Maritime University

† \*\*Division of International Maritime Transportation Science, Mokpo Maritime University

#### 요 약

항구 등 선박교통이 밀집된 구역에서 선박의 사고는 빈번하게 발생한다. 해양사고는 한번 발생하면 대형사고로 이어질 확률이 높으므로, 철저한 해상교통관리가 필요하다. 본 연구에서는 실 해역의 통계적인 해상교통정보와 실시간 선박 통행분포를 바탕으로 항로 위험도를 정량적으로 평가하기 위한 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 항로 위험도 평가 시뮬레이터는 항로정보 입력부, 통행분포 분석부, 알고리즘 실행부로 구성하였다. 또한 완도해역의 해상교통정보를 시뮬레이터에 적용하여 항로의 정량적인 항로 위험도를 산출하고자 한다.

**키워드** : 선박항로 위험도 평가 시뮬레이터, 통계적 해상교통정보, 통행분포, 기하학적 충돌빈도, VTS

#### Abstract

Accidents between ships occur frequently at the traffic congestion area. Once a maritime accidents occur, it is likely to end up with critical damaged accidents. This paper develop a simulator for assessing quantitative risk based on stational maritime traffic data and realtime traffic distribution. Ship's passage risk assessment simulator consist of import of division of passage data, traffic distribution analysis and passage risk assessment analysis. Maritime traffic data of WANDO waterway apply to simulator for calculation of quantitative risk rate of waterway.

**Key Words** : Simulator of Ship's Passage Risk Assessment, Statistic Marine Traffic Data, Traffic Distribution, Geometric Collision Candidates, VTS

#### 1. 서 론

해역의 정량적인 위험도 평가지수는 해역의 객관적인 평가기준이 되므로, 통행수로의 적정 폭 및 만곡부 조절, 적정 속력 조절 등 항만수로를 설계 또는 변경하는데 중요한 지표를 제시한다[3].

지금까지 해상에서 해역의 위험도 평가는 선박 통행량, 해양사고 통계를 토대로 위험수준을 결정하였다. 하지만 이러한 방법은 선박의 속력, 길이 등 운항특성 및 통행분포가 반영되지 못하였다.

이러한 한계를 보완하기 위해 선행연구[3,4]에서 기하학

적인 충돌빈도(Geometric Collision Candidates) 및 항로상 선박통행분포를 분석하였으며, 선박항로 위험도의 정량적인 평가를 수행하여 객관적인 해상교통 위험성을 파악할 수 있었다.

관련 선행연구로서 정 등[3] 선행연구에서는 IWRAP (IALA Waterway Risk Assessment Program)을 활용한 각 조우상황별 충돌빈도를 산출하였다. 또한 김 등[4] 연구에서는 해상교통류 평가모델 개발에 대해 제안하였다.

하지만 기존의 IWRAP에 의한 연구방법은 교차해역에서의 충분한 MDTC(Minimum Distance To Collision)가 고려되지 않았으며, IWRAP은 VTS 데이터를 엑셀데이터로 변환하여도 직접적인 인터페이스가 가능하지 않다.

본 연구에서는 기존 선행연구에 대한 보완으로 선박의 범퍼영역(Bumper Area)이론을 적용하여 교차해역에 대한 충분한 MDTC를 반영하고 VTS 데이터로부터 직접적인 입력이 가능한 시뮬레이터를 개발하고자 한다.

#### 2. 충돌위험도 평가 지수

본 논문에서 항로상 충돌 위험도 평가는 항로상 교통류를 바탕으로 산출되어지는 기하학적인 충돌빈도(Geometric Collision Candidates)를 기초로 하였다[2].

기하학적 충돌빈도는 통행량, 선속, 선박길이, 통행분포

접수일자: 2013년 3월 31일

심사(수정)일자: 2013년 4월 7일

게재확정일자: 2013년 5월 12일

† Corresponding author

본 논문은 2013년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(지능형 해양사고 예방 및 구난기술 개발).

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

등 통계적인 데이터를 바탕으로 산출이 된다. 산출된 기하학적 충돌반도는 충돌회피를 실패할 확률, 즉 인과확률(Causation Factor)과의 곱으로 대상해역 충돌위험도를 계산할 수 있다[4,5]. 문헌[6]에서는 베이시안(Bayesian) 방법을 이용하여 인과확률을 계산함으로써 충돌위험도를 산출하고 있다. 그러나 인과확률은 선박운항자의 행동, 항해선박의 내적·외적 조건에 따라 선박의 움직임이 결정되는 불확실성이 높기 때문에 인과확률에 의하여 최종적으로 계산된 정량적인 충돌위험도를 해상교통관제에 직접 활용하는 것은 추가적인 연구가 필요하다.

따라서 충돌위험도를 직접사용하기 보다는 실시간으로 수집되는 교통관측 데이터로부터 기하학적 충돌 위험도에 의하여 해상교통류의 흐름상태를 이해하는 것이 보다 현실적이다. 기하학적인 충돌반도는 선박의 조우관계에 따라 마주치는 상태(Head-on), 횡단 상태(Crossing), 추월상태(Overtaking)에 대하여 계산할 수 있다.

### 2.1 마주치는 상태 및 추월상태

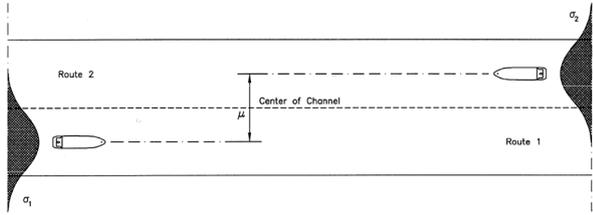


그림 1. 정면으로 조우되는 상황  
Fig. 1. Head-on Collision Situation

그림 1은 항로상에서 서로 마주보며 항해하는 상황을 상태를 나타낸다. 이 경우의  $N_G$ 값은 다음 식 (1)에 의해 산출된다[5].

$$N_G = Lw \sum_{i,j} P_{G_{i,j}}^{head-on} \frac{V_{ij}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} (Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}) \quad (1)$$

- $L_w$  : 항로폭
- $V_{ij}$  : 상대 속도 ( $V_{ij} = V_i^{(1)} + V_j^{(2)}$ )
- $V_i^{(1)}$  :  $i$  선종 선박들이 항로1 (Route 1)에서 통항하는 선박의 평균속력
- $V_j^{(2)}$  :  $j$  선종 선박들이 항로2 (Route 2)에서 통항하는 선박의 평균속력
- $Q_i^{(1)}$  : 항로 1 구간에서 선종  $i$  선박 통항량
- $Q_j^{(2)}$  : 항로 2 구간에서 선종  $j$  선박 통항량.

$P_G$ 는 선박의 통항 분포데이터와 선폭으로 다음 식 (2)에 의해 계산된다[5].

$$P_{G_{i,j}}^{head-on} = \Phi\left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\delta_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\delta_{ij}}\right) \quad (2)$$

- $\Phi(x)$  : 표준정규분포함수
- $\mu_i$  : 통항하는 분포의 평균치 ( $\mu_{ij} = \mu_i + \mu_j$ )
- $\sigma_i$  : 표준 편차 ( $\sigma_{ij} = \sqrt{\sigma_i + \sigma_j}$ )
- $B_i$  : 선박 폭의 평균값. ( $B_{ij} = \frac{B_i + B_j}{2}$ ).

추월(Overtaking)의 경우 양 선박 교통류가 같은방향으로 통항하므로, 상대속력( $V_{ij}$ )은  $V_{ij} = V_i^{(1)} - V_j^{(2)}$ 을 적용하며, 선박 통항분포 평균치( $\mu_{ij}$ )는  $\mu_{ij} = \mu_i - \mu_j$ 가 된다.

### 2.2 횡단상태

그림 2는 선박들의 통항분포가 횡단(Crossing) 상태로 나타나는 구간을 나타내고 있다. 횡단 상태에서의 기하학적 충돌반도인  $N_G$ 는 선종이  $i$ 인 항로 1의 선박과 선종이  $j$ 인 항로 2의 선박들이  $\theta$ 의 교차각으로 횡단을 이룰 때, 다음 식 (3)에 의해서 계산된다[5].

$$N_G = \sum_{i,j} \frac{Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin\theta} \quad (3)$$

- $Q_i$  :  $i$  항로에서 선박통항량
- $V_{ij}$  : 상대속력 ( $\sqrt{(V_i^{(1)})^2 + (V_j^{(2)})^2 - 2V_i^{(1)} V_j^{(2)} \cos\theta}$ )
- $D_{ij}$  : 선박의 충돌반경

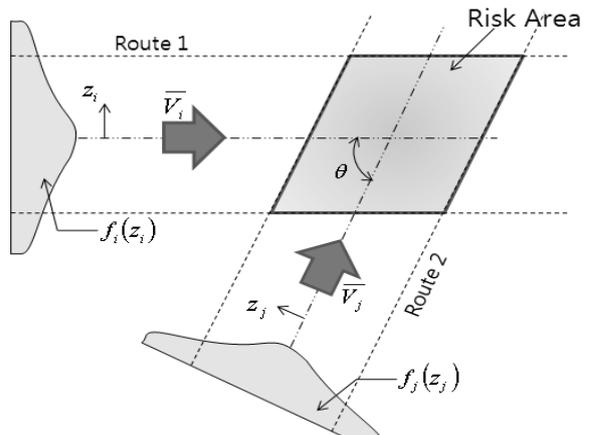


그림 2. 횡단상태로 조우되는 상황  
Fig. 2. Crossing Collision Situation

식(3)에서 충돌 반경( $D_{ij}$ , Collision diameter)은 양 선박이 충돌시 이루어지는 반경을 나타낸다. 그림 3와 같이 선박을 직사각형으로 가정하여 산출하였다.

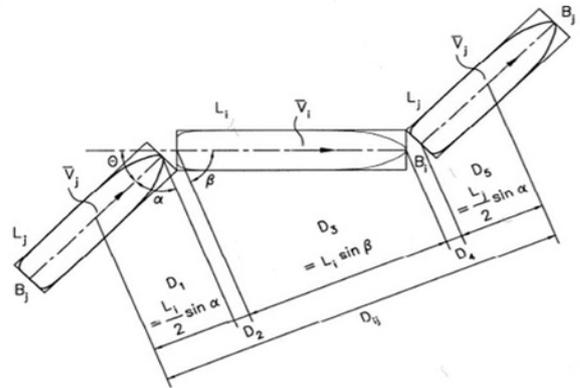


그림 3. 기하학적 충돌반경( $D_{ij}$ ) 계산  
Fig. 3. Calculation of collision diameter( $D_{ij}$ )

2.3 범퍼영역 이론을 이용한 충돌반경 적용

항해중인 선박은 타선박, 위험물 등으로부터 일정한 이격 거리를 유지하려고 노력한다. 이 이격거리는 선박의 조종성 능인 선회권(Turning Circle)에 의해 영향을 많이 받는다.

3.2절의  $D_{ij}$ 값은 실제로 양 선박이 충돌상황에 있을 때 직접적인 충돌반경을 계산하였다. 하지만 실제 선박은 충돌 회피를 하기 위해서 최소한 선회권이상의 충분한 여유수역이 필요하며, 특히 교차점에서는 여러항로의 선박통항류가 합쳐지므로 교통상황에 따라 수시로 침로를 변경해야 한다. 일반적으로 이 선회권은 선수방향으로 4~5배이며, 횡방향으로는 3~4배로 산출된다[7].

본 연구에서는 적절한 MDTC(Minimum Distance To Collision)를 산출하기 위해 기존의  $D_{ij}$  대신 Bumper영역에 의한 선박의 안전영역을 적용하여 시뮬레이터에 적용하였다. 범퍼영역 이론은 Fuji 등[8]의 연구에 의하면 본선 길이의 7배인 장축과 3배인 단축으로 구성된 타원으로 정의된다. 이는 양 선박의 선회권의 요소를 고려 한다.

범퍼영역 이론에 기초한 상대선과의 거리(r)계산은 교차 항로에서 한 선박이 다른선박의 영역에 침범하였을 때 양선박간 거리를 적용하였다. 여기서 r값은 기존연구의  $D_{ij}$ 보다 3~4배 크게되어, 교차항로에서의 적절한 위험도를 적용할 수 있다. 그림 4는 범퍼영역에 의한 MDTC를 시뮬레이터에 적용한 그림을 나타낸다.

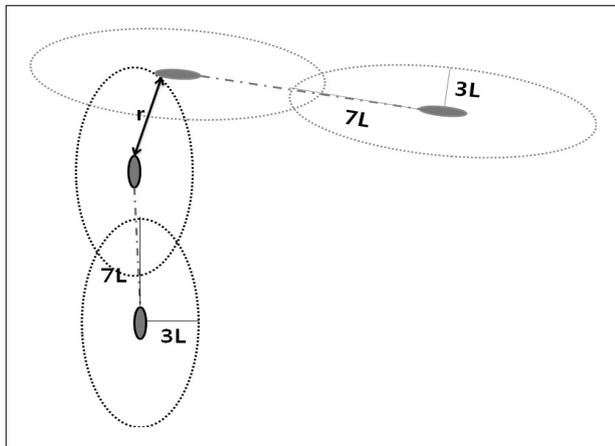


그림 4. 범퍼영역에 의한 MDTC 계산

Fig. 4. Calculation MDTC using Bumper Area

3. 항로 위험도 평가 시뮬레이터 개요

2절의 선박충돌위험도지수 산출방법을 토대로 실해역의 위험도를 파악할 수 있는 시뮬레이터를 구현하였다. 선박충돌위험도 평가 시뮬레이터의 통항정보 및 항적데이터는 완도해상교통관제센터에서 수집된 선박 GPS위치, 속도, 침로 정보, 시간 등을 포함한 데이터를 적용하였다.

항로 위험도 평가 시뮬레이터는 데이터 입·출력부, 통항분포 분석, 항로 위험도분석 실행부로 구성된다.

3.1 항로정보 입력부

항로정보 입력부는 시뮬레이터 실행을 위한 기본 데이터로서 항로의 경위도, 통계적인 선박 통항량, 평균속력, 평균

선박길이 및 폭, 관측기간이 입력된다. 입력되는 정보는 해역 통항류의 각 변침점(Waypoint)별로 작성하여 엑셀데이터 파일을 불러들이는 형식으로 초기 데이터를 입력하였다.

그림 5는 작성된 항로정보를 불러들여 시뮬레이터에 저장된 화면이다.

그림 5. 항로정보 입력부

Fig. 5. Division of Import of Passage Data

3.2 통항분포 분석부

통항분포 분석부에서 해당해역의 항로상 실제 통항선박의 분포는 김 등[4]의 선행연구 평가틀에 의한 알고리즘을 구현하였다. 항적데이터는 VTS에서 수집된 AIS(Automatic Identification System)데이터를 입력하여 분석하였다.

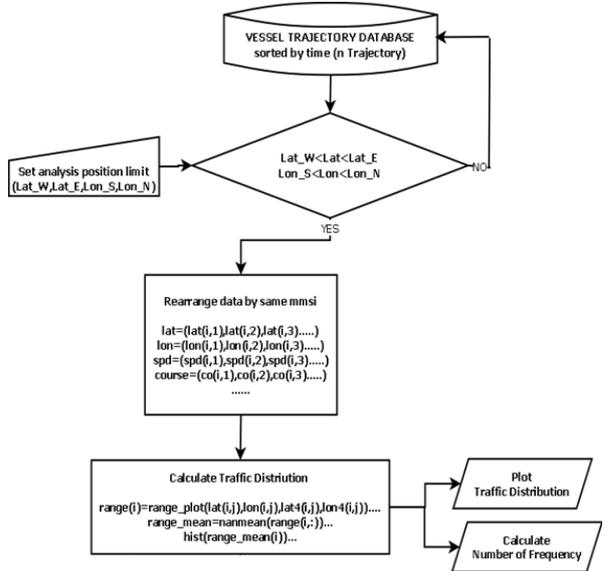


그림 5. 통항분포 분석부 알고리즘 플로우차트

Fig. 5. Flow-Chart for Traffic Distribution Analysis

항적 데이터는 선박에서 실시간으로 항적데이터를 전송하므로, 선명, 위도, 경도, 선속, 침로 등이 시간순으로 저장되어 있으며, 그림 5의 Flow-chart에 의해서 통항분포가 산출된다. 통항분포를 산출하기 위해 입력된 선박항적자료

를 대상으로 수행한다. 그 후 시간순으로 정렬된 데이터를 선박기준으로 재 정렬하여, 각 선박에 대한 통행분포를 계산하였다. 계산된 결과값은 통행분포 그래프와 알고리즘 연산 실행부로 전달된다. 그림 6은 통행분포 분석 알고리즘에 의한 통행분포 분석부이다.

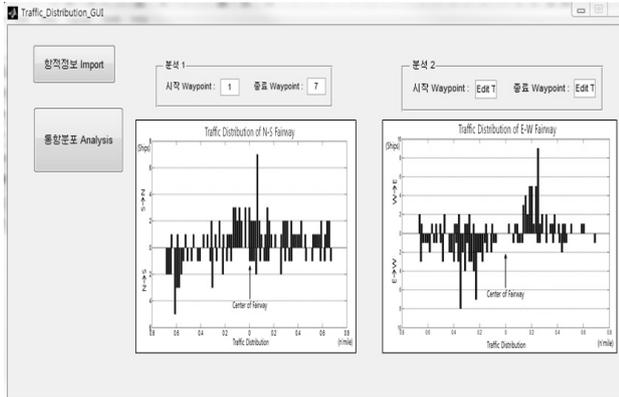


그림 6. 통행분포 분석부  
Fig. 6. Division of Traffic Distribution Analysis

### 3.3 항로 위험도분석 실행부

항로 위험도분석 실행부는 3.1장 및 3.2장에서 입력된 데이터를 토대로 2장의 충돌위험도 평가지수 산식에 의한 결과를 각 항로 및 교차점별로 나타내었다. 본 시뮬레이터에서 MDTC (Meanimum Distance To Collision)는 3.3장의 Bumper영역에 의한 결과값을 적용하였다. 그림 7은 알고리즘 연산 실행 Flow-chart이다.

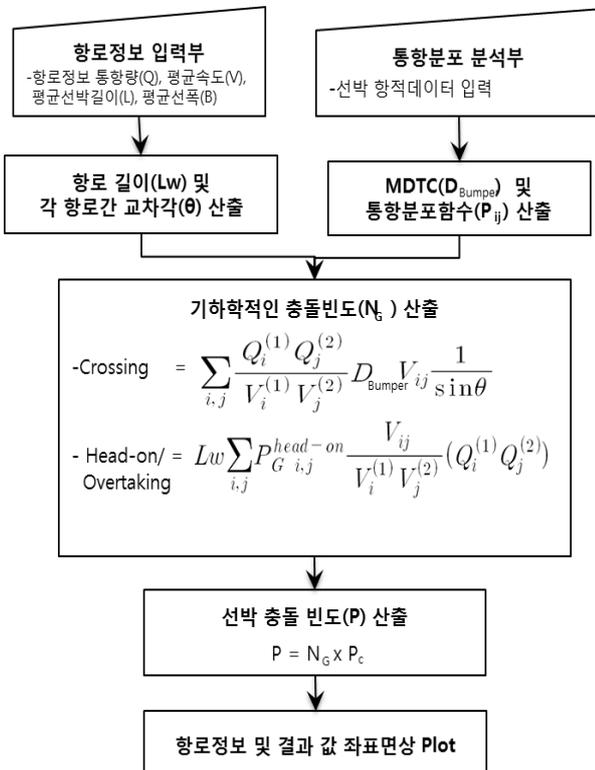


그림 7. 항로 위험도분석 실행부  
Fig. 7. Division of Passage Risk Assessment Analysis

## 4. 항로 위험도 시뮬레이터의 실 해역 적용

### 4.1 대상해역 개요

분석대상인 완도해상교통관제구역은 다도해 지역을 항해하는 여객선과 중소형 연안화물선 및 연안예부선이 대상해역을 통과하여 항행을 하고 있다. 이 해역은 항로 중앙에 선박 통행류를 분리하는 부표가 설치되어 각각침로에서 우측으로 항행을 하여야 하는 통행분리방식(TSS, Traffic Separation Scheme)이 시행 중이다[4].

또한 주변에 많은 섬으로 인해 항로가 협소하며, 강조류의 영향이 크다. 특히 완도항 입구 부근 교차해역은 남북 통행류와 동서 통행류가 교차되는 지역으로 해양사고가 빈번한 구역이다. 그림 8은 완도해역 분석대상 해역 및 선박 항적분포이다.

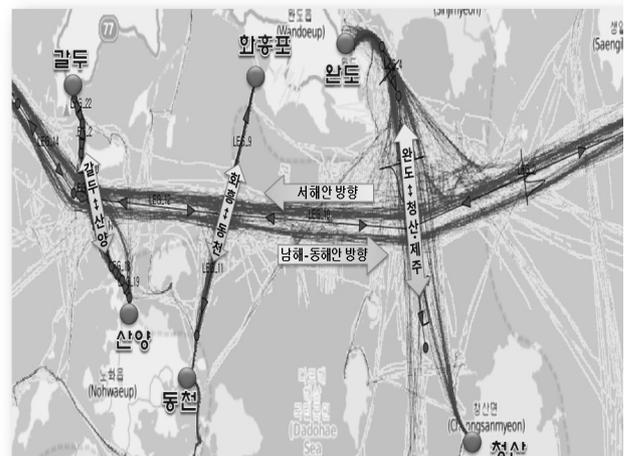


그림 8. 대상해역 해상교통분포  
Fig. 8. Target area

대상 해역의 통행 데이터는 여객선, 화물선, 예부선, 잠종선으로 분류하였으며, 본 시뮬레이터에는 해당 선박의 속력, 길이는 각 선종별 평균값을 적용하였다. 표 1은 완도해역 연간 선박 통행 데이터이다[4].

표 1. 완도해역 통행 선박 데이터  
Table 1. Vessel traffic data of WANDO waterway

	통행량 (연간 통행량)	속력 (Knot)	길이 (m)
여객선	27,740	10~12	50~75
화물선	17,503	10~12	75~100
예부선	16,000	5~7	150~200
잠종선	35,000	9~12	0~25

또한 대상해역 최근 5년간 선박조우형태별 해상교통관련 사고는 Head-on시 3건, Crossing시 5건, Overtaking시 2건의 해양사고가 발생하였으며, Crossing구역에서의 사고빈도가 가장 높다.

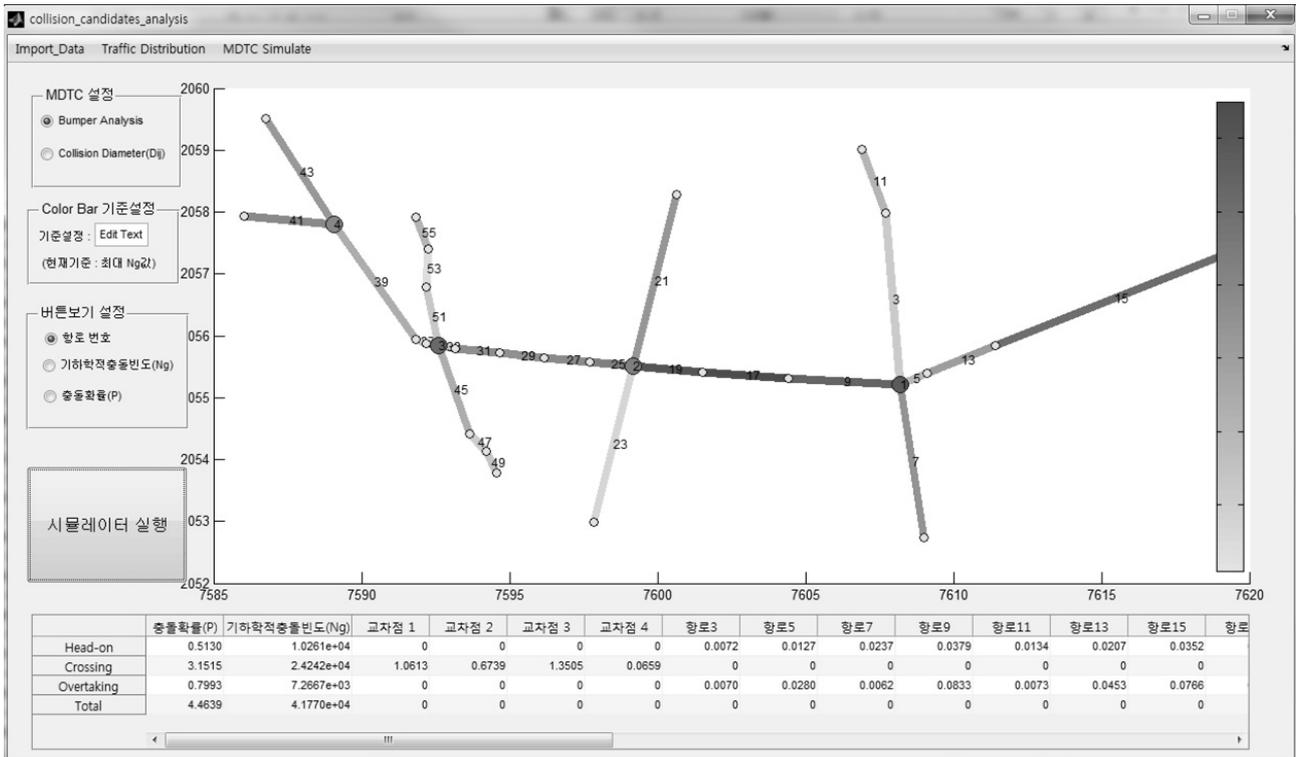


그림 9. 항로위험도 평가 시뮬레이터의 완도해역 적용 결과  
 Fig. 9. Results of Passage Risk Assessment Simulation at WANDO Waterway

4.2 시뮬레이터 적용 결과

항로 및 항적데이터를 시뮬레이터 적용하여 그림 9와 같이 결과가 산출되었다. 산출결과 Crossing시의 선박충돌확률이 다른 조우형태(Head-on, Overtaking)보다 높다. 또한  $P_C$  값은 각 선박 조우형태별로 입력을 하며, 국제항로표지 협회(IALA) default 값을 적용하였다. 표 2는 시뮬레이터 적용 결과를 나타낸다.

표 2. 완도해역 항로 위험도 분석 결과  
 Table 2. Results of Risk Assessment at WANDO waterway

선박 조우형태	$N_G$	$P_C$	P
Head-on	10,261	$0.5 \times 10^{-4}$	0.513
Crossing	24,242	$1.3 \times 10^{-4}$	3.1515
Overtaking	7,267	$1.1 \times 10^{-4}$	0.7993
Total	44,639		4.4639

4. 결 론

항로의 선박 충돌 위험도 평가는 해상교통관제(VTS) 및 관련 당국에서 안전한 선박운항을 위한 차원에서 중요하다. 특히 정량적인 평가툴에 의한 방법은 객관적인 해역의 선박 충돌 위험도를 제시할 수 있다.

본 연구에서는 항로의 통계적인 해상교통정보와 실시간 선박 통항분포를 적용하여 정량적인 항로의 위험도 파악을 위한 시뮬레이터 개발에 그 의의가 있다. 또한 기존의 IWRAP에 의한 산출방법 중  $D_{ij}$ 에 의한 선박 충돌반경을 Bumper 영역에 의한 MDTC를 적용하여 교차항로에서 적절한 위험도 평가방법을 제안하였다. 이러한 연구 결과는 항로별로 잠재적인 충돌위험도를 예측할 수 있으므로 유효하게 활용할 수 있을 것이다.

본 연구의 활용은 해상교통관제사가 VTS에서 해상교통의 특성을 정확하게 파악하여 선박의 속도제한, 통항로 및 통항용량 관리와 같은 보다 효과적이고 체계화된 교통관제 서비스를 제공하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 그러나 실시간 교통상황을 정확하고 현실성있게 반영할 수 있는 정량적인 충돌위험도의 계산은 향후 과제도 남는다.

References

[1] IALA-AISM, IALA Risk Management Tool for Port Restricted Waterways Ed.2, IALA Recommendation O-134, May 2009.  
 [2] Jutta Ylitalo, "Modelling Marine Accident Frequency", *Alto University School of Science and Technology Faculty of Information and Natural Science*, Finland, 2010

[3] J. S. Jeong, K. I. Kim, K. K. Park, "A quantitative collision probability analysis in port waterway", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 373-378, 2012.

[4] K. I. Kim, J. S. Jeong, K. K. Park, "A study on development of maritime traffic assessment model", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 761-767p, 2012.

[5] Fujii Y, Yamanouchi H, Mizuki N. "Some factors affecting the frequency of accidents in marine traffic.", *Journal of Navigation*, pp.239-247, 1974.

[6] Macduff T. "The probability of vessel collisions.", Ocean Industry, pp.144-148, 1974.

[7] J. D. Yun, "Theory and practice of Ship's handling ", Sejong, pp. 52-67, 2013.

[8] Fuji J., Tanaka K., "Traffic capacity", *The journal of Navigation*, vol 24, pp.543-552, 1971.

저 자 소 개



**김광일(Kwang-II Kim)**  
 2005년 : 목포해양대학교 해상운송시스템학과 학사 졸업  
 2012년 : 동대학교 대학원 해상운송시스템학부 졸업(공학석사)  
 2012년8월 ~ 현재 : 동대학교 대학원 해상운송시스템학부 박사과정  
 2010년 1월 ~ 현재 : 국토해양부 목포지방해양항만청 해상교통관계사

관심분야 : 선박충돌확률, 해상위험성평가, 해상교통시스템, 해상통신, VTS  
 Phone : +82-61-555-5496  
 E-mail : setis0420@korea.kr



**정중식(Jung Sik Jeong)**  
 1987년 : 한국해양대학교 항해학과 졸업(공학사).  
 1993년 : 동대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)  
 2001년 : 일본동경공업대학 대학원 이공학연구과전기전자 전공(공학박사)  
 2002년 ~ 현재 : 목포해양대학교 교수

관심분야 : 해양정보통신망, 해양안전시스템, 해상교통시스템, 선박충돌회피, 통계적 파라미터 추정  
 Phone : +82-61-240-7173  
 E-mail : jsjeong@mmu.ac.kr



**박계각 (Gyei-Kark Park)**  
 1982년 : 한국해양대학교 항해학과 졸업(공학사)  
 1986년 : 동 대학교 수송공학과 졸업(공학석사)  
 1993년 : 일본동경공업대학 시스템학과(공학박사)  
 2010년 : 전남대학교 무역학과 경영학박사 졸업

1995년 ~ 현재 : 목포해양대학교 교수  
 1995년 ~ 현재 : 한국지능시스템학회 이사, 부회장  
 2008년 ~ 현재 : 한국항만경제학회 이사  
 2009년 ~ 현재 : 한국해운물류학회 상임이사  
 관심분야 : 지능형 물류관리, 의사결정론  
 Phone : +82-61-240-7164  
 E-mail : gkpark@mmu.ac.kr