

항만수로의 정량적인 충돌확률 분석

A Quantitative Collision Probability Analysis in Port Waterway

정중식*[†] · 김광일** · 박계각*

Jung Sik Jeong[†], Kwang Il Kim, and Gyei-Kark Park

*목포해양대학교 국제수송과학부

**목포지방해양항만청 완도해양사무소

요 약

해상에서 위험성평가는 해양사고예방의 관점에서 안전한 항만수로를 설계하는데 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구는 IALA에서 권고하는 정량적인 충돌확률분석방법인 IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment)에 기초를 두고 목포항 진입수로의 충돌위험성을 분석하였다. 과거 AIS 및 레이더의 기록 데이터를 IWRAP 평가도구에 적용함으로써 선박의 조우상태별 충돌위험 확률을 계산하였다. 항로의 구간별로 위험도를 제공함으로써, VTS에서 섹터 관제의 관점에서 항로구간별로 해상교통의 특징과 개선책을 세우는데 기여할 것으로 사료된다.

키워드 : IWRAP, 해상충돌확률, 기하학적 충돌확률, 인과요소

Abstract

In terms of the maritime accident prevention, risk analysis at targeted waterways is important for planning safety waterways. This paper analyzes the maritime accidents probability in the Mokpo waterways, South Korea, based on the IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment) of the quantitative accident probability tool. Vessel collision probability rate is calculated by vessels meeting direction, using IWRAP. This paper contribute to advance improvement of vessel traffic service by VTS sector providing vessel fairway risk data.

Key Words : IWRAP, Maritime accidents probability, Geometric collision probability, Causation factor

1. 서 론

해상에서 선박의 충돌확률을 평가하는 것은 해당 해역의 잠재적인 해상교통 위험성을 평가하는데 있어 중요하다 [1]. 선박충돌확률을 평가하는 방법은 크게 정량적 방법과 정성적인 방법으로 나누어진다. IALA(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities)에서는 정량적인 평가방법으로 IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment)에 의한 평가방법론을 권고하고 있다[2][3]. 정량적인 평가에 의한 위험도 지수의 제공은 통항수로의 적정폭, 만곡부의 골물 정도, 적정속력 등 항만수로를 설계하는데 중요한 지표를 제시해 줄 수 있다는 점에서 가치를 지니고 있다. 또한 해양사고 예방의 관점에서 안전한 VTS의 효율적인 운영을 위한 항로별 잠재적인 충돌위험도 평가를 행함으로써 해상교통의 예측과 제어에 활용될 수 있다[1][3]. IWRAP에서는 Japan, Dover, Gibraltar 등 선박통항이 많은 해협과, Great Belt, Danish Waters, Dames Point Bridge FL, New Orleans

Bridge 등 전세계 여러 수역과 교량주변에 있어서 해상위험도 평가지수를 제시하고 있다. 국내의 경우 울산항에서 해상교통안정성 평가결과를 제시하고 있다. 김 등은 환경스트레스에 의한 실시간 위험도 평가모델과 IWRAP의 통계적인 위험도 평가결과와의 비교에 초점을 맞추고 있다[4].

본 연구는 국내 항만에 대하여 국제적으로 공인된 평가도구에 의한 위험도 평가지수를 제공하여 VTS의 효율적인 운영에 반영하는데 목적으로 두고 있다. 항만진입 수로를 대상으로 1년간 통항하는 선박들의 항로별, 조우상태별로 충돌확률을 분석하여 통항선박들의 위험성을 평가한다.

2. 정량적인 충돌확률의 계산

해상에서 선박 충돌확률의 정량적인 모델은 Fujii et al[5]과 Macduff[6]에 의해 기초작업이 수행되었다. 기본적인 선박의 충돌확률은 식 (1)와 같은 계산에 의해 얻어진다.

$$P = N_G \times P_C. \quad (1)$$

여기서 N_G 는 기하학적인 선박충돌확률(Geometrical Probability)로서 충돌빈도(Collision Candidates)라고도

접수일자: 2012년 4월 20일

심사(수정)일자: 2012년 6월 1일

게재확정일자 : 2012년 6월 1일

† 교신 저자

본 논문은 본 학회 2012년도 춘계 학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

한다. P_C 는 인과확률(Causation Probability)로서 충돌 또는 좌초에 이르는 침로에서 회피동작을 실패할 확률을 말한다.

2.1 마주치는 상태(Head-on)에서 충돌확률

그림 1은 항로상에서 서로 마주보며 항해하는 상황을 나타낸다. 이 경우의 N_G 값은 다음 식(2)에 의해 산출된다.

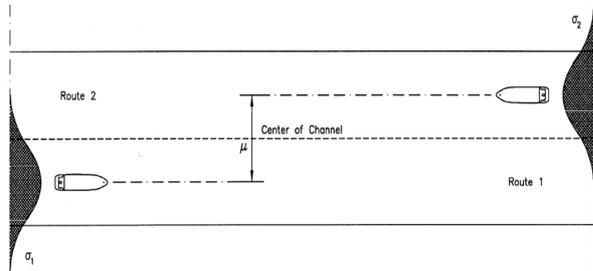


그림 1. 정면으로 조우되는 상황
Fig. 1. Head-on Collision Situation

정면으로 조우되는 상태에서의 N_G 값은 다음 식(2)에 의해 산출된다.

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

- 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.

$P_{G,i,j}$ 는 선박의 통항 분포데이터와 선폭으로 다음 식(3)에 의해 계산된다.

$$P_{G,i,j}^{head-on} = \Phi\left(\frac{B_{ij} - \mu_{ij}}{\delta_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{B_{ij} + \mu_{ij}}{\delta_{ij}}\right) \quad (3)$$

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

2.2 횡단상태(Crossing)에서 충돌확률

그림 2는 선박들의 통항분포가 Crossing 상태로 교차되는 구간을 나타내고 있다. Crossing 상태에서의 N_G 값은 선종이 i 인 항로 1의 선박과 선종이 j 인 항로 2의 선박들이 θ 의 교차각으로 횡단을 이룰 때, 다음 식 (4)에

의해서 계산된다.

$$N_G^{crossing} = \sum_{i,j} \frac{Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin\theta} \quad (4)$$

- Q_i : i 항로에서 선박통항량
- V_{ij} : 상대속력
- D_{ij} : 선박의 기하학적인 충돌반경.

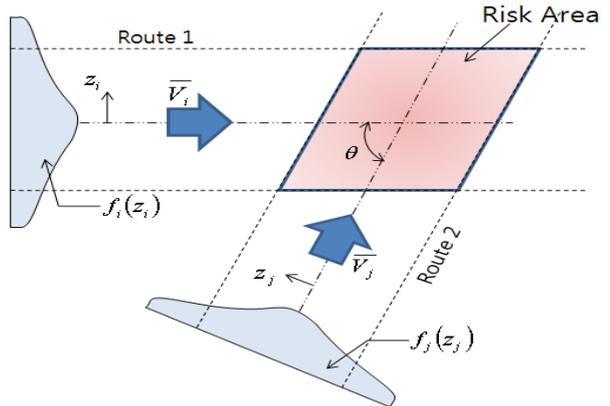


그림 2. 횡단상태로 조우되는 상황
Fig. 2. Crossing Collision Situation

V_{ij} 는 항로 1에서의 통항선과 항로 2 통항선들간의 상대속력이며, 식 (5)와 같다.

$$V_{ij} = \sqrt{(V_i^{(1)})^2 + (V_j^{(2)})^2 - 2V_i^{(1)} V_j^{(2)} \cos\theta} \quad (5)$$

그림 3 및 그림 4는 횡단관계에서 선박들간 기하학적인 충돌 반경(D_{ij} , Collision diameter)의 정의 및 계산이다.

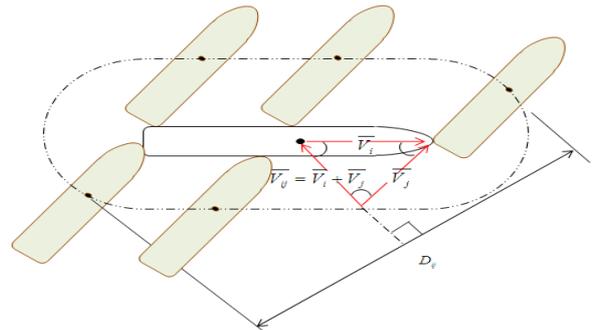


그림 3. 기하학적인 충돌 반경(D_{ij})
Fig. 3. Collision diameter(D_{ij})

D_{ij} 는 선박이 충돌시 이루어지는 반경이다. 그림 4와 같이 선박을 직사각형으로 가정을 하여 계산한다.

$$D_{ij} = \frac{L_i^{(1)} V_j^{(2)} + L_j^{(2)} V_i^{(1)}}{V_{ij}} \sin\theta + B_j^{(2)} \left\{ 1 - \left(\sin\theta \frac{V_i^{(1)}}{V_{ij}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + B_i^{(1)} \left\{ 1 - \left(\sin\theta \frac{V_j^{(2)}}{V_{ij}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

- $L_i^{(1)}$: 항로 1 구간에서 선종 i 선박길이 평균
- $L_j^{(2)}$: 항로 2 구간에서 선종 j 선박길이 평균
- B_i : 선종 i 선박 폭
- B_j : 선종 j 선박 폭
- θ : 양 항로간의 교차각

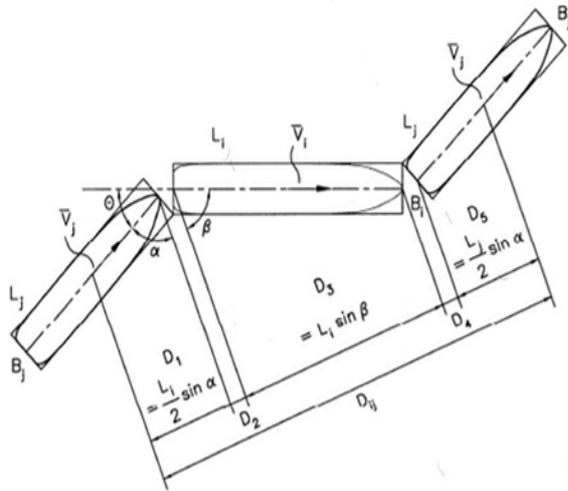


그림 4. 기하학적 충돌반경(D_{ij}) 계산
Fig. 4. Calculation of collision diameter(D_{ij})

2.3 P_C 값

P_c 는 인과요소(Casuation Factor)로서 충돌코스로 항해할 경우 충돌회피를 실패할 확률을 나타낸다. 현재 이 값은 유럽 몇몇 주요 항구에서 산출되어 있다[3].

표 1은 문헌적인 연구 결과를 기초로 한 기본적인 P_c 값이다.

표 1. IALA 기본 P_c
Table. 1 IALA default causation factor(P_c)

| Condition | Causation Factor |
|-----------------------------------|----------------------|
| Head on collisions | 0.5×10^{-4} |
| Overtaking Collisions | 1.1×10^{-4} |
| Crossing Collisions | 1.3×10^{-4} |
| Collisions in a bend situation | 1.3×10^{-4} |
| Collisions in a merging situation | 1.3×10^{-4} |
| Grounding - forgot to turn | 1.6×10^{-4} |

3. 대상해역의 통항선박 분포

분석대상해역은 목포항 진입수인 목포구를 대상으로 수행하였다. 목포구는 폭이 약 500m로서 목포항 입출항하는 대부분의 선박들이 통과 하고 있다. 그림 5는

분석 대상해역 및 최근 5년 동안 사고분포를 나타낸 것이다.



그림 5. 분석 대상 해역 및 사고 분포
Fig. 5. Target area and distribution of maritime accidents

3.1 통항 데이터

대상 해역의 통항 데이터는 여객선, 대형화물선, 소형화물선, 예부선, 잠종선, 쾌속선으로 분류하였다. 해당 선박의 속도, 길이, 폭은 각 선종별 평균 값이며, 예부선의 경우 부선을 끌고 가기 때문에 부선 길이와 예인줄의 길이를 감안한 150m를 적용하였다. 표 2는 목포구 통항 선박 데이터를 나타낸 값이다.

표 2. 목포구 통항 선박 데이터
Table. 2. Vessel traffic data of Mokpogu

| | 통항량 (년간 통항량) | 속력 (Knot) | 길이 (m) | 폭 (m) |
|-------|-----------------|--------------|-----------|----------|
| 여객선 | 17,520 | 11 | 50 | 11 |
| 대형화물선 | 8,600 | 12 | 200 | 25 |
| 소형화물선 | 18,623 | 12 | 70 | 8 |
| 예부선 | 7,200 | 6 | 150 | 12 |
| 잠종선 | 22,368 | 11 | 30 | 6 |
| 쾌속선 | 4,840 | 27 | 38 | 10 |

3.2 통항선박 분포

식(4)에서 평균, 표준편차 등 통항분포 데이터는 Head-on상태에서 충돌확률 산출에 적용된다. 그림 6은 45일간 실제 통항선박 VTS 항적자료를 IWRAP에 적용을 하여 통항분포데이터를 산출하였다. 각 항로의 파란색분포는 동쪽 방향-입항선-통항선박 분포이며, 녹색분포는 서쪽 방향-출항선-통항선박의 분포를 나타낸다.

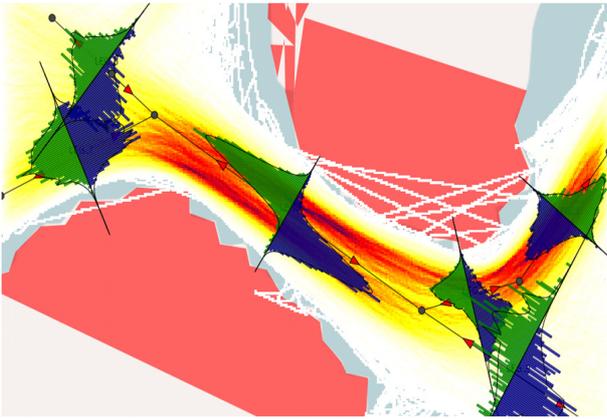


그림 6. 항만수로에서의 선박통행 분포
Fig. 6. Traffic Distribution in Port Waterway

4. 충돌 확률의 분석

3절에서 선박 통행데이터 및 통행분포 데이터를 식 (1)~(6)에 기초하여 목포항 진입수로 3번항로에서 통행선박들의 충돌확률을 IALA에서 권고하는 IWRAP 프로그램으로 산출하였다.

그림 7은 항로별 사고 위험도로서, 색이 짙을 수록 선박 충돌확이 높다. 표 3은 조우상태별로 연간 선박 충돌확률을 나타내었다.

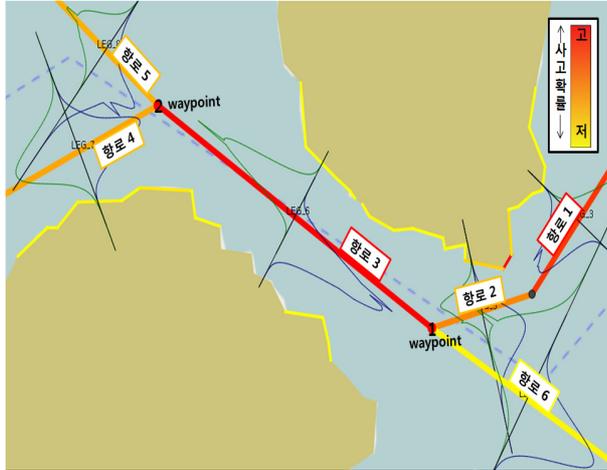


그림 7. 대상해역 충돌확률 분포
Fig. 7. Collision probability of analyzed waterways

표 3. 항만수로의 사고확률
Table. 3. Collision probability of the port waterways

| | HEAD ON | CROSSING | OVERTAKING | 합계 |
|------|---------|----------|------------|------|
| 항로 1 | 0.19 | - | 0.08 | 0.27 |
| 항로 2 | 0.06 | - | 0.05 | 0.11 |
| 항로 3 | 0.21 | - | 0.59 | 0.80 |

| | | | | |
|-------|------|------|------|------|
| 항로 4 | 0.10 | - | 0.04 | 0.14 |
| 항로 5 | 0.06 | - | 0.04 | 0.10 |
| 항로 6 | 0.01 | - | 0.01 | 0.02 |
| 교차점 1 | - | 0.29 | - | 0.29 |
| 교차점 2 | - | 0.52 | - | 0.52 |
| 합계 | 0.64 | 0.81 | 0.8 | 2.25 |

4.1 마주치는 상태에서 충돌 확률

표 3에 나타난 것처럼 Head-on 충돌확률은 항로 3이 가장 크며, 선종별로는 잠종선이 가장 크다. 잠종선은 통행량이 가장 많으며, 선박 입출항 항로를 명확히 구분하지 않고 항해하기 때문에 높은 충돌 확률을 가진다. 그림 8은 각 항로별로 선종별 충돌확률 분포를 나타낸다.

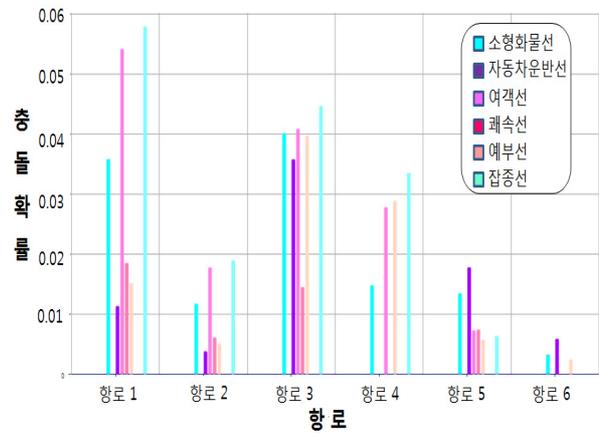


그림 8. 선종별 마주침 충돌확률
Fig. 8. Collision probability in head-on situation by ship type

4.2 횡단상태에서 충돌 확률

표 3에서 횡단상태의 충돌확률은 교차점 2에서 크게 나타났으며, 자동차운반선이 가장 크게 나타났다. 그림 9는 각 변침점별로 선종별 충돌확률 분포를 나타낸다.

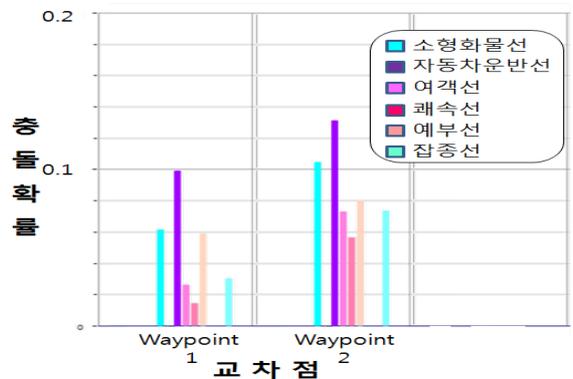


그림 9. 선종별 Crossing 충돌 확률
Fig. 9. Collision probability in Crossing situation by ship type

4.3 추월시(Overtaking)의 충돌확률

표 3에서 Overtaking 충돌확률은 항로 3에서 가장 크게 나타났으며, 선종별로는 속력이 빠른 쾌속선이 다른 선종보다 2배 정도 더 높다.

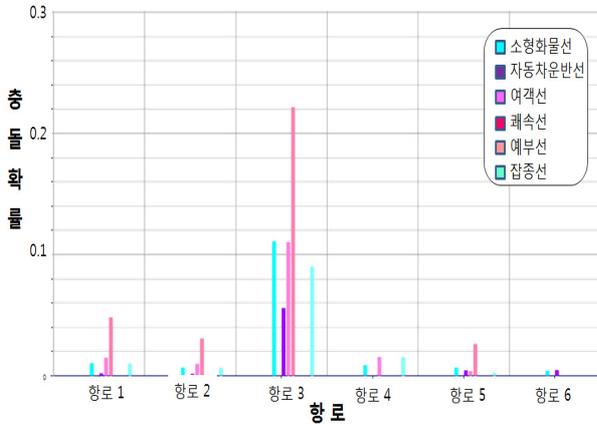


그림 10. Overtaking 충돌 확률

Fig. 10. Collision probability on Overtaking situation by ship type

4.4 실제 사고와 비교

표 3에는 목포항 진입수로에서 교차점별, 항로별로 선박 사고가 일어날 전체 확률을 나타내고 있다. 항만수역 전체적으로 1년간 2.25건임을 알 수 있다. 이 수치는 해상교통관제의 영향을 고려하지 않은 수치이다. 해상교통관제 설치 이후 사고가 약 23%정도 감소한 점을 감안하면, 해양사고 확률은 1년간 1.74로 산출할 수 있다[5]. 그림 5에 나타난 것처럼 해양안전심판원에서 재결된 과거 통계자료에 따르면 연간 1건으로 단순 계산할 수 있어 실제 해양사고가 정량적인 계산에 의한 사고확률보다 낮게 나타나고 있다.

실제 사고통계와 정량적인 분석에 의한 사고확률간의 차이는 식(1)에서 나타난 것처럼 인과확률 P_C 값에 의존적이며, 대상해역에 알맞은 P_C 값이 필요하다. 또한 사고통계는 해양안전심판원에서 재결된 사건들에 대한 것이므로 실제 해당해역에서 발생한 해양사고들 보다 적을 수 있다.

5. 결론

정량적인 해상안전 평가방법은 통항량, 선속, 길이, 선박의 통항분포로부터 해상에서 통항의 위험도를 평가하므로 인적, 지리적, 환경적 등 주관적인 요소들이 많은 정성적인 평가방법에 비해 적용이 간단하다.

본 연구는 해상에서 IALA에서 권고하는 정량적인 충돌 위험도 평가인 IWRAP 방법을 적용하여 목포항 진입수로의 연간 충돌위험도를 평가하였다. IWRAP의 평가결과는 항로별, 선종별, 선박의 조우 상황별로 위험도 지수를 제공한다. 본 연구결과는 VTS의 운영관점에서 항로별로 잠재적인 충돌위험도 평가함으로써 해상교통의 예측과 제어를 위하여 유효하게 활용할 수 있을 것이다. 그러나 항로항행 선박의 위험도 인식의 측면에서 도선사와 항해사들에 의한 정성적인 평가결과와 비교·검토는 추후 연구과제로 남는다.

참 고 문 헌

- [1] Kwang Il Kim, Gyei-Kark Park, Jung-Sik Jeong, "Analysis marine accident probability in Mokpo waterways," *International Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 35, No .9, pp. 729-733, Dec. 2011.
- [2] IALA-AISM, IALA Risk Management Tool for Port Restricted Waterways Ed.2, IALA Recommendation O-134, May 2009.
- [3] Peter Friis-Hansen, Basic Modelling Principles for Prediction of Collision and Grounding Frequencies, IWRAP Mk II Rev.4, Work Document, 2008.
- [4] Dae-Won Kim, Jin-Soo Park, Young-Soo Park, "Comparison Analysis between the IWRAP and the ES Model in Ulsan Waterway," *Journal of Navigation and Prot Research*, Vol. 35, No. 4, pp .281-287, 2011.
- [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.

저 자 소 개



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 : 061-240-7173

E-mail : jsjeong@mmu.ac.kr



김광일(Kwang-Il Kim)

2005년 : 목포해양대학교 해상운송시스템학과 학사 졸업
 2010년 8월 ~ 현재 : 동 대학교 대학원 해양정보시스템학과 석사과정
 2010년 1월 ~ 현재 : 국토해양부 목포지방 해양항만청 해상교통관제사

관심분야 : 선박충돌확률, 해상위험성평가, 해상교통시스템,
해상통신, VTS
Phone : 010-2799-9561
E-mail : setis0420@korea.kr

1995년~현재 : 목포해양대학교 교수
1995년~현재 : 한국지능시스템학회 이사, 부회장
2008년~현재 : 한국항만경제학회 이사
2009년~현재 : 한국해운물류학회 상임이사



박계각 (Gyei-Kark Park)

1982년 : 한국해양대학교 항해학과 졸업
(공학사)
1986년 : 동 대학원 수송공학과 졸업
(공학석사)
1993년 : 일본동경공업대학 시스템학과
(공학박사)
2010년 : 전남대학교 무역학과 경영학

박사 졸업

관심분야 : 지능형 물류관리, 의사결정론
Phone : 061-240-7164
E-mail : gkpark@mmu.ac.kr