

최적 교통분포를 고려한 해상교량의 안전 통행 폭에 관한 연구

손우주* · 문지하* · 구정민* · † 조익순

*세이프테크리서치 연구원, † 한국해양대학교 해사인공지능·보안학부 교수

A Study on the Safety Navigational Width of Bridges Across Waterways Considering Optimal Traffic Distribution

Woo-Ju Son* · Ji-Ha Mun* · Jung-Min Gu* · † Ik-Soon Cho

*Researcher, Safetech Research Co., Ltd., Daejeon 34050, Korea.

† Professor, Division of Maritime AI & Cyber Security, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 해상교량은 선박의 통행 안전성 관점에서 가항수역을 줄이는 간섭요인으로 작용한다. 본 연구에서는 선박의 안전한 통행을 위해 최적 통행분포에 기반한 안전 통행폭을 분석하였다. 해상교량을 통행하는 선박의 안전 통행 폭에 대한 분석을 위해 AIS data에 기반한 선박 교통분포를 조사하여 K-means clustering을 통해 선박을 크기에 따라 분류하였다. 군집화된 데이터에 대하여 최적분포 분석을 한 결과, 인천대교와 부산항대교에서는 대수정규분포, 목포대교와 마창대교에서는 정규분포가 최적분포에 가까운 것으로 분석되었다. 대수정규분포와 정규분포를 기준으로 선박 안전 통행 범위를 신뢰구간의 95%로 가정하여 분석한 결과, 인천대교의 경우 정규분포와 대수정규분포 간의 차이가 64~97m로 가장 큰 것으로 나타났으며, 최소 차이는 10m로 마창대교에서 나타났다. 이에 따라, 인천대교의 경우에는 정규분포보다 대수정규분포로 안전 통행 폭을 제시하는 것이 적합한 것으로 분석되었다. 타 교량의 경우에는 정규분포와 대수정규분포 간의 통행 폭 차이가 크지 않기 때문에 둘 중 어떤 분포를 사용해도 유사한 결과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다. 위 결과를 토대로, 해상교량의 안전통행 범위를 제시한다면 선박의 안전한 운항 및 사고 예방에 도움이 될 것이다.

핵심용어 : 안전 통행 폭, 최적분포 분석, K-means clustering, AIS data, 해상교량

Abstract : Bridges across waterways act as interference factors, that reduce the navigable water area from the perspective of navigation safety. To analyze the safety navigational width of ships navigating bridges across waterways, the optimal traffic distribution based on AIS data was investigated, and ships were classified according to size through k-means clustering. As a result of the goodness-of-fit analysis of the clustered data, the lognormal distribution was found to be close to the optimal distribution for Incheon Bridge and Busan Harbor Bridge. Also, the normal distributions for Mokpo Bridge and Machang Bridge were analyzed. Based on the lognormal and normal distribution, the analysis results assumed that the safe passage range of the vessel was 95% of the confidence interval. As a result, regarding the Incheon Bridge, the difference between the normal distribution and the lognormal distribution was the largest, at 64m to 98m. The minimum difference was 10m, which was revealed for Machang Bridge. Accordingly, regarding Incheon Bridge, it was analyzed that it is more appropriate to present a safety width of traffic by assuming a lognormal distribution, rather than suggesting a safety navigation width by assuming a normal distribution. Regarding other bridges, it was analyzed that similar results could be obtained using any of the two distributions, because of the similarity in width between the normal and lognormal distributions. Based on the above results, it is judged that if a safe navigational range is presented, it will contribute to the safe operation of ships as well as the prevention of accidents.

Key words : safety navigational width, goodness-of-fit, K-means clustering, AIS data, bridge across waterways

1. 서 론

선박 통행 안전성 관점에 있어 교량은 가항수역 폭을 감소시키며 운항자의 심리적 부담을 주는 직접적인 원인으로 작용한다(Son et al., 2020a). 전 세계적으로 교량과 선박 간의 심각한 접촉 사고는 1년에 한 번 이상 발생하는 것으로 보고되었다(Larson, 1993). 또한 1990년대 이후, 선박과 교량의 접촉

사고는 평균 9.7건 발생했다(Gluver and Olsen, 1998). Park et al. (2008)은 항만횡단 해상교량과 관련된 해상 사고의 약 90%가 주경간 길이가 500m 이하인 교량에서 발생한다고 밝혔다. 2009년 완공된 인천대교의 경우 주경간 길이에 대한 다양한 견해로 인해 사회적 비용이 발생하였다(Song and Kim, 2018). Lee et al.(2008)은 선박조종시물레이션을 통한 인천대교의 안전 통행폭을 분석하였으며, Lee et al.(2009)는 63명의

† Corresponding author : 중신회원, ischo@kmou.ac.kr 051)410-5072

* 정회원, wooju@strkorea.co.kr 042)364-5653

도선사와 46명의 선장 및 항해사를 대상으로 설문조사를 통해 교량과 선박 사이의 심리적 안전거리를 조사하였고, 85% 이상이 선폭의 3배를 안전거리로 제안하였다. 이에 관한 후속 연구로 Son et al.(2020a)은 인천대교의 통행분포를 정규분포로 가정하여 신뢰구간에 따른 안전 이격거리를 분석하였으며, 그 결과, 교행통행 시 선폭의 3.4배, 단독통행 시 선폭의 2.8배가 적절한 안전 이격범위인 것으로 분석하였다. 하지만, 선행 연구는 안전 통행폭을 정성적 기준으로 분류하였으며, 선박의 통행분포를 정규분포에 국한하여 분석한 한계가 있었다. 본 연구에서는 대상 교량에 적합한 최적 통행분포를 Cullen and Frey(1998) graph와 Goodness-of-fit 검정을 통해 분석하고 이를 기반으로 신뢰구간에 따른 안전 통행 폭을 도출하였다.

해상교통조사 기간은 교통량의 주간 변동을 고려하여 6-7 일 이상의 표본조사 데이터를 활용하여야 한다(Tsuji, 1996). 본 연구에서는 더욱 정확한 통행분포의 조사를 위해 대한민국에 존재하는 사장교 형식의 항만횡단 해상교량 중 선박이 통행하는 교량인 인천대교, 부산항대교, 목포대교, 마창대교의 통행분포를 대상으로 한 달 간의 Automatic Identification System(AIS) Data를 수집하였다. 인천대교와 부산항대교의 경우 '19년 6월, 목포대교와 마창대교의 경우 '20년 6월에 수집된 AIS Data를 기반으로 분석을 수행하였다. 데이터는 전처리하여 분석에 적합하도록 정제되었다(García et al., 2015). 또한, 주탑으로부터의 이격거리 정보에 선박의 접촉(grounding)에 직접적으로 연관되는 길이변수와 중량변수를 기준으로 K-means clustering 분석을 하여 유사한 특성을 가진 그룹끼리 분류하였다. 본 연구의 Flow chart는 Fig. 1과 같다.

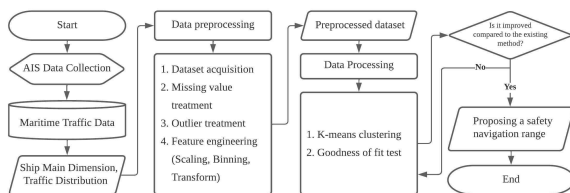


Fig. 1 Flow chart of this study

2. 해상교통 특성분석

2.1 대상 교량의 위치 및 특징

본 연구의 대상 교량은 대한민국의 무역항 인근에 있는 사장교 형식의 인천대교, 부산항대교, 목포대교, 마창대교로, 각각 인천항, 부산 북항, 목포항, 마산항에 위치한다. 교량들이 위치한 각 항만은 교통량과 선적량이 많은 한국의 대표적인 무역항이다. 이들의 한반도 지리적 위치는 Fig. 2와 같다. 인천대교는 주경간장이 800m로 국내 최대 규모의 교량이다(Incheon Bridge. Co, Ltd., 2010). 주경간 하부를 항행하는 선박은 주로 상선이고, 측면을 이용하는 선박은 주로 어선 및 기

타 저속여객선으로 분류된다. 인천대교의 경우 항로와 교량 아래의 가항수로 배치가 거의 대칭을 나타낸다. 부산 북항의 동쪽은 서쪽보다 접안능력이 크며, 더 큰 선박이 이용한다. 제4차 전국 항만기본계획에 따르면, 현재 부산 북항은 서쪽(1~4부두)을 도심시설로 전환하는 항만 재개발 사업 1단계를 진행 중이다(Ministry of Ocean and Fisheries, 2021). 그러므로 현재는 실질적으로 항만의 동측이 화물 운송의 주요 허브이다. 이러한 특성을 반영하여 부산항대교의 항로는 교량을 기준으로 동쪽 교각으로부터 떨어진 비대칭 형태로 배치되어 있으며, 주경간장은 540m이다(Jang et al., 2012). 목포대교는 주경간장이 500m이나, 항로가 600m이며, 항로 내에 주탑 두개가 포함된 독특한 구조를 지닌다(Park et al., 2004). 마창대교는 다른 교량에 비해 주경간장이 400m로 가장 작다(Bae et al., 2008). 마산항은 마창대교를 지나가면 항내의 섬에 의해 크게 제1항로와 제2항로로 구분된다. 그로 인해 입항 시의 통행 분포가 출항 시보다 넓은 분포를 가지는 특징을 보인다.

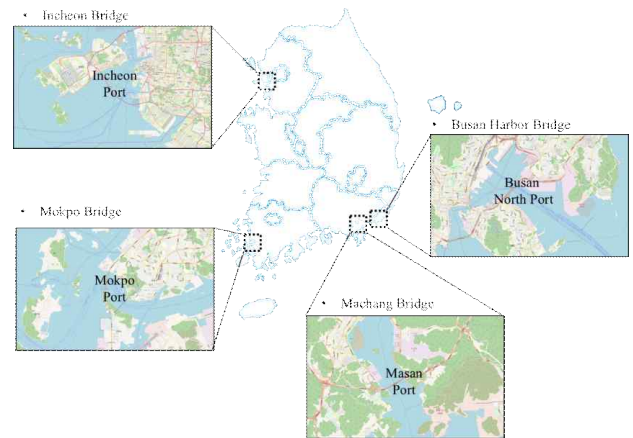


Fig. 2 Geographical locations of the target bridges

2.2 데이터 전처리

본 연구에서는 대상 교량의 주경간 하부를 통행하는 선박에 대한 AIS 데이터를 수집하여 교통특성을 분석하였다. AIS 데이터를 활용한 항만의 교통특성을 분석하는 것은 대상지역의 선박의 흐름을 조사하고 데이터를 수집·분석하는 기본적인 과정이다. 이를 통해 선박이 이용하는 항로 및 시설물의 배치가 안전에 미치는 영향을 예측할 수 있어 교통량의 정량적 평가를 위한 중요한 기초자료가 된다. 데이터 전처리는 데이터를 알고리즘에 적용하기 전에 분석에 적합한 상태로 변환하는 단계이다(Lee et al., 2020). 본 연구에서는 전체 데이터셋에서 분석에 필요한 변수를 분류하고 나머지 변수를 제거하였다. 접촉(grounding)에 직접적으로 관여하는 변수인 Length Overall과 Breadth와 같은 선박의 주요 치수에 대해 결측값 또는 값이 0인 모든 데이터는 삭제했다(목록별 삭제). Table 1은 데이터 전처리를 통해 분류된 데이터 포인트의 수를 나타낸다.

Table 1 Result of missing values treatment

Bridge	Collected Data	Missing values	Target values
Incheon Bridge	982	22	960
Busan harbor Bridge	840	24	816
Mokpo Bridge	410	0	410
Machang Bridge	302	0	302

Kim(2018)은 선박을 크기별로 분류하여 통항분포를 분석하였으며, 소형선박 그룹은 대형선박 그룹에 비해 표준편차가 2 배 가량 크며, 정규분포를 따르지 않는 비율이 가장 높은 것으로 분석되었다. 이는 선박의 크기가 작을수록 상대적으로 큰 선박에 비해 통항이 자유로운 것을 의미한다. Table 2는 해상교통공학에서 제시하는 선박 크기의 분류 기준이다(Fujii et al., 1981).

Table 2 Ship size according to marine traffic engineering

Classification		Length overall(m)	Standard Deviation
Size	Gross Tonnage(GT)		
Small	0~1,000	48	±20
Medium	1,000~10,000	104	±20
Large	10,000~	240	±50

본 연구에서는 규칙적인 통항을 하는 선박을 활용하기 위하여 해상교통공학의 소형선 그룹에 해당하는 1,000GT 이하의 선박을 분석에서 제외하였다(Son et al., 2020b). 본 연구에서 사용된 선박의 총 척수는 Table 3과 같다.

Table 3 The number of ships used during data collection

Bridge	Status	Number of ships (Over 1,000 GT)
Incheon Bridge	Arrival	517
	Departure	443
Busan harbor Bridge	Arrival	409
	Departure	407
Mokpo Bridge	Arrival	207
	Departure	203
Machang Bridge	Arrival	151
	Departure	151

2.3 K-means clustering 분석

K-means clustering 분석은 계층적이지 않은 데이터를 클러스터링하고 유사한 경향을 가진 데이터 간의 클러스터를 나타내는 클러스터링 방법이다. 이 방법은 가장 널리 사용되는 비계층적 클러스터 분류 방법으로 많은 데이터를 빠르고 쉽게 분류할 수 있는 장점이 있다. Son and Cho(2022)는 컨테이너 선박의 길이변수와 톤수변수 간의 상관관계를 분석하고 K-means clustering를 활용하여 선박을 크기에 따라 정량적으로 분류하였다. Kim(2018)에 따르면, 통항분포는 소형선일수록 대형선에 비해 크고 넓게 나타나는 특징이 있다. 이러한

점을 고려하여 본 연구에서는 선박을 크기별로 정량적 방식을 통해 분류하여 통항분포를 분석하고자 K-means clustering을 활용하였다. Inoue(1977)는 항로를 통항하는 교행통항, 단독통항의 해상교통에 대한 확률분포가 정규 분포임을 입증했으며, 선박은 항로 중앙에서부터 항로넓이의 0.1배만큼 선박의 진행 방향의 오른쪽으로 편위하여 통항한다고 하였다. 이러한 선박의 통항 특성을 고려하여 선박과 우측 교각 사이의 거리값을 분석했다. 또한 선박의 접촉에 직접적으로 연관이 있는 변수인 주탑과의 이격거리(선박 진행방향의 우측에 위치한 주탑을 기준으로 함), 선박 길이와 선폭을 기본 데이터 구성요소로 설정하고 중량변수는 Gross tonnage(GT)를 기준으로 구성하여 분석을 수행하였다. 클러스터 분석은 초기 데이터 세트를 분류하고 숨겨진 패턴을 찾는 방법이다(Huang Z., 1998). 각 클러스터의 중심값을 기준으로 각 객체는 유클리드 거리를 이용하여 가장 가까운 중심에 할당하고, 데이터 객체는 가장 가까운 k-mean 값을 기준으로 클러스터링을 한다(Hastie et al., 2009). 이러한 프로세스는 k-means clustering 분할에 대한 평균 거리를 재조정하여 특정 k 값에 수렴할 때까지 반복한다. 이 프로세스는 이상값에 민감하다. 따라서 데이터 전처리를 거쳐야 하며, 입력 파라미터로 적절한 수의 클러스터 k를 지정해야만 효과적인 결과를 얻을 수 있다. $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, p$ 특성을 갖는 변수가 x_{ij} 일 때, i 번째 속성값에 따른 i 와 \bar{i} 사이의 거리는 식 (1)과 같이 유도된다.

$$d(x_i, x_{\bar{i}}) = \sum_{j=1}^p d_j(x_{ij}, x_{\bar{i}j}) \tag{1}$$

$$= \sum_{j=1}^p d_j(x_{ij} - x_{\bar{i}j})^2 = \|x_{ij} - x_{\bar{i}j}\|^2$$

위 알고리즘은 클러스터의 $k = 1, 2, \dots, K$ 를 무작위로 설정한다. k 번째 클러스터의 중심은 μ_k 로 정의된다. 이 경우 데이터에서 클러스터 중심까지의 거리 D 는 식 (2)와 같다.

$$D = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N a_{ik} \|x_i - \mu_k\|^2 \tag{2}$$

이 경우 a_{ik} 은 값이 1 또는 0인 이진 변수이다. K-means clustering의 공식은 식 (3)과 같다.

$$\operatorname{argmin}_{a, \mu} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N a_{ik} \|x_i - \mu_k\|^2 \tag{3}$$

본 연구에서는 R 프로그램 버전 4.1.1의 NbClust 패키지를 이용하여 적절한 수의 클러스터 k 를 도출하여 클러스터링에 적용하였다(Charrad et al., 2014). NbClust 패키지는 데이터 세트의 클러스터 수를 결정하는 인덱스를 제공하며, 다양한

방법의 결과로부터 최적의 k 를 제공한다. 이를 통해 관심 데이터 세트에 가장 적합한 k를 결정하기 위해 여러 클러스터링 체계를 동시에 평가할 수 있다. Table 4는 본 연구의 최적 k 값에 대한 NbClust 분석 결과를 나타낸다.

Table 4 Results appropriate number of k value

Bridges	appropriate k value
Incheon Bridge	3
Busan harbor Bridge	3
Mokpo Bridge	2
Machang Bridge	2

본 연구의 클러스터링 결과는 Table 5와 같다. 전체 교량에 대하여 Cluster 1의 경우에는 약 1,000~27,000 GT, Cluster 2의 경우에는 약 12,000~75,000 GT, Cluster 3의 경우에는 약 52,000~166,000 GT 수준인 것으로 분석되었다. 이 중, 인천대교의 경우, 50,000 GT 이상의 선박은 인천항 경인항 통항규칙에 의해 통항할 때 단독통항을 수행해야 하는데, 본 연구에서 인천대교의 Cluster 1은 100% 교행통항, Cluster 2는 98.3%가 교행통항이며, 1.7%가 단독통항, Cluster 3은 100% 단독통항으로 구분되었다. 단, 부산항대교의 Cluster 3의 경우, 총 5척의 선박으로 분류되어 데이터의 수가 적기 때문에 본 연구의 통항분포 분석에는 제외하였다.

Table 5 Results of k-means clustering the passing vessels of the target bridge

Classification		Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3	
		Gross Tonnage	Count	Gross Tonnage	Count	Gross Tonnage	Count
Incheon Bridge	Arrival	1,000~20,000	369	20,000~52,000	120	52,000~166,000	28
	Departure	1,000~20,000	308	20,000~52,000	106	52,000~166,000	29
Busan harbor Bridge	Arrival	1,000~15,000	293	15,000~58,000	111	116,000~166,000	5
	Departure	1,000~15,000	292	15,000~58,000	110	116,000~166,000	5
Mokpo Bridge	Arrival	1,000~12,000	129	12,000~30,000	80	/	
	Departure	1,000~12,000	124	12,000~30,000	79		
Machang Bridge	Arrival	1,000~27,000	129	27,000~75,000	22		
	Departure	1,000~27,000	129	27,000~75,000	22		

Table 6 Goodness-of-fit statistics defined by Stephens(D'Agostino and Stephens, 1986)

Statistics test	General formula	Computational formula
KS	$sup F_n(x) - F(x) $	$\max(D^+, D^-)$ with $D^+ = \max_{i=1, \dots, n} (\frac{i}{n} - F_i)$ $D^- = \max_{i=1, \dots, n} (F_i - \frac{i}{n})$
AD	$n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(F_n(x) - F(x))^2}{F(x)(1-F(x))} dx$	$-n - \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (2i-1) \log(F_i(1-F_{n+1-i}))$
CvM	$n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(F_n(x) - F(x))^2}{F(x)(1-F(x))} dx$	$\frac{1}{12n} \sum_{n=1}^n (F_i - \frac{2i-1}{2n}) LSUP2$

3. 최적 분포분석

본 연구에서는 선박의 통항 특성을 고려하여 선박과 우측

교각 사이의 거리값을 기준으로 클러스터별 통항분포를 분석했다. 본 연구에서는 통계분석에 자주 활용되는 R studio 4.1.1 version을 활용하여 최적 확률분포를 추정하였다. R Package는 fitdistrplus를 이용하였다(Delignette-Muller and Dutang, 2015). Cullen and Frey(1999)는 첨도와 왜도를 통해 확률분포의 형태를 추정하였다. 본 연구에서는 Cullen and Frey graph를 활용하여 관측값에 대한 최적분포 후보군을 선정하였으며 부트스트랩을 통해 관측값 중 임의의 난수를 1,000회 복원추출하여 평가하였다. Fig. 3은 각 대상교량의 클러스터별 Cullen and Frey graph 결과를 나타낸다. 그 결과, 본 연구에서는 와이블 분포, 감마분포, 대수정규분포, 정규분포를 최적 분포 후보군으로 설정하였다(베타분포는 (0, 1) 구간에서 정의된 연속형 확률변수의 분포이므로 제외함). 일반적으로 통계적 기법에서의 적합성 검정에는 Kolmogorov-Smirnov test(KS test), Anderson-Darling test(AD test), Cramer-von Mises test(CvM test)와 같은 검정방법이 활용된다. 통계량은 그 값이 작을수록 확률분포모형에 더욱 가깝다. Table 6은 KS test, AD test, CvM test의 3가지 검정방법에 대하여 Stephen이 정의한 식을 보여준다. 여기서 $F(x)$ 는 연속확률 분포함수, n 은 데이터의 수, F_i 는 연속확률분포함수 $F_i(x)$, D^+, D^- 는 KS test의 D 통계량을 나타낸다. (D'Agostino and Stephens, 1986) Akaike's Information Criterion(AIC)

(Akaike, H., 1974), Bayesian Information Criterion (BIC)(Schwarz, G., 1978)은 여러 분포모형 중 데이터에 맞는 최적 모형을 찾는 지표 중 하나이다. AIC와 BIC가 작아진다

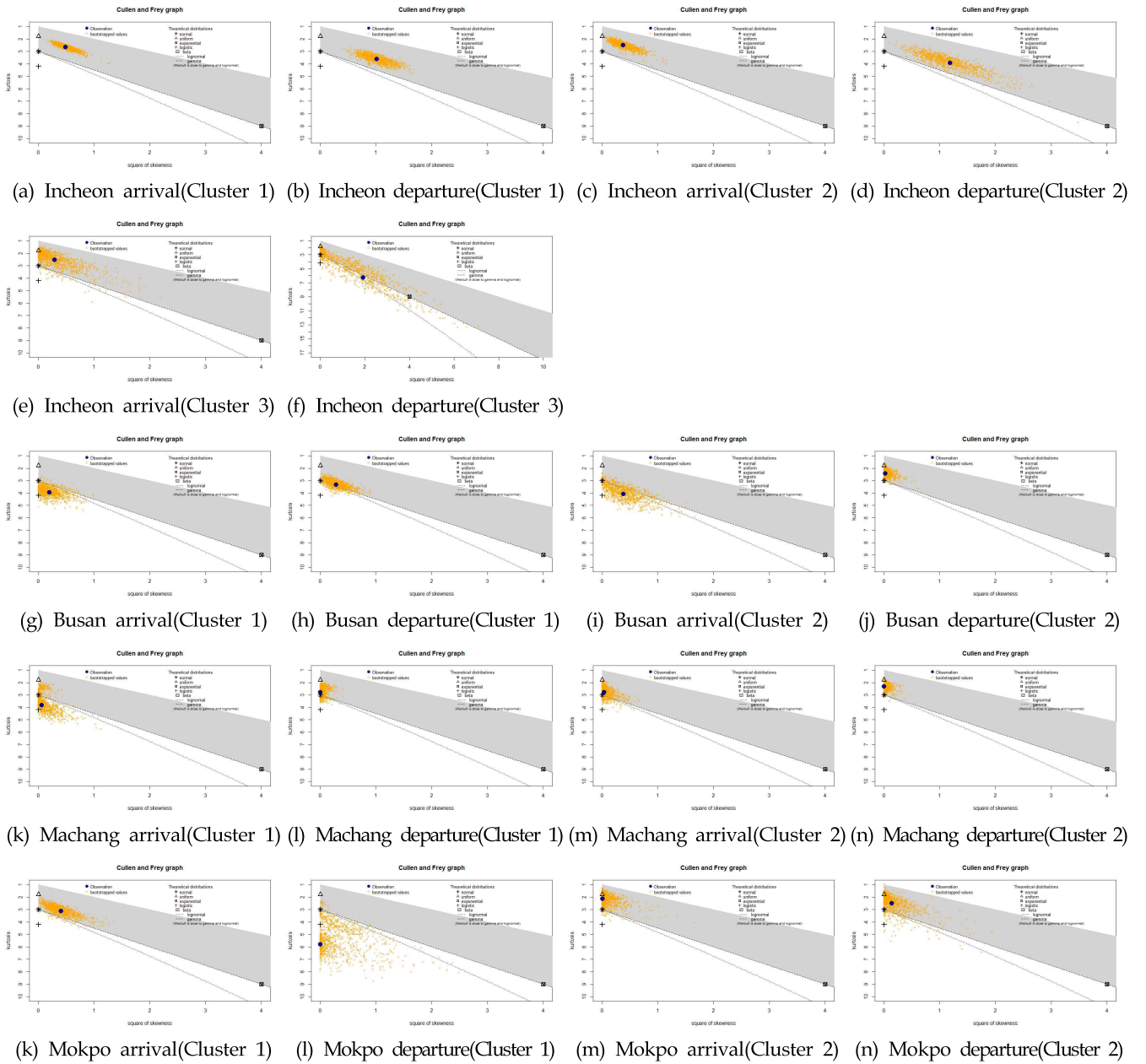


Fig. 3 Cullen and Frey graph in each target bridge according to K-means clustering.

는 의미는 우도를 가장 크게 하는 동시에 변수 개수는 가장 적은 최적의 분포모형이라는 것을 나타낸다. AIC 방법은 가장 최소의 정보 손실(Information loss)을 갖는 모델이 가장 데이터와 적합한 모델로 선택된다는 이론하에 만들어진 지표이다. 즉, 가장 최소의 정보 손실을 갖는 모델은 가장 낮은 AIC값을 갖게 되므로 최소의 AIC값을 갖는 모델이 최적의 모델로 선택된다. BIC 방법은 베이지안 이론에서 우도 함수와 사전분포를 이용하여 계산된 사후분포를 근사하여 유도된 통계량이다. BIC 역시 최소의 BIC 값을 갖는 모델이 가장 적합한 모형으로 선택되게 된다. Table 7은 AIC, BIC에 대한 식을 나타낸

다. 여기서 $f_k(x_i | \theta)$ 는 i 번째 데이터 x_i 에서 k 번째 모델의 확률밀도 함수이며, n 은 데이터의 수, k 는 후보모델의 파라미터 수이다.

Table 7 Equations of AIC and BIC

Classification	General formula
AIC	$-2\ln\left(\prod_i^n f_k(x_i \theta)\right) + 2k$
BIC	$-2\ln\left(\prod_i^n f_k(x_i \theta)\right) + k\ln(n)$

Table 8 Best fit distribution scores according to Goodness-of-fit test

Classification			Cluster 1						Cluster 2						Cluster 3							
			K S	A D	C v M	A I C	B I C	To tal	K S	A D	C v M	A I C	B I C	To tal	K S	A D	C v M	A I C	B I C	To tal		
Incheon	Arr	W	1	1	1	1	1	5	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
		LN	3	3	3	3	3	15	3	3	3	3	3	15	3	3	3	3	3	3	15	
		G	2	2	2	2	2	10	2	2	2	2	2	10	2	2	2	2	2	2	10	
		N	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	5	
	Dep	W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		LN	3	3	3	3	3	15	3	3	3	3	3	15	3	3	3	3	3	3	15	
		G	2	2	2	2	2	10	2	2	2	2	2	10	2	2	2	2	2	2	10	
		N	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	5	
	Busanharbor	Arr	W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			LN	3	3	3	2	2	13	3	2	2	3	3	13	3	2	2	3	3	3	13
			G	2	2	2	3	3	12	2	3	3	2	2	12	2	3	3	2	2	2	12
			N	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	5
Dep		W	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	
		LN	3	3	3	3	3	15	0	2	1	2	2	7	0	2	1	2	2	2	7	
		G	2	2	2	2	2	10	2	3	3	3	3	14	2	3	3	3	3	3	14	
		N	1	1	1	1	1	5	1	1	2	1	1	6	1	1	2	1	1	1	6	
Mokpo		Arr	W	2	2	2	0	0	6	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	
			LN	0	0	0	1	1	2	1	1	2	2	2	8	1	1	2	2	2	8	
			G	1	1	1	2	2	7	3	3	3	3	3	15	3	3	3	3	3	15	
			N	3	3	3	3	3	15	2	2	1	1	1	7	2	2	1	1	1	7	
	Dep	W	3	3	3	3	3	13	0	2	3	1	1	7	0	2	3	1	1	7		
		LN	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3		
		G	1	1	1	1	1	5	2	1	1	2	2	8	2	1	1	2	2	8		
		N	2	2	2	3	3	12	1	3	2	3	3	12	1	3	2	3	3	12		
Machang	Arr	W	1	0	0	0	0	1	3	2	3	0	0	8	3	2	3	0	0	8		
		LN	2	3	3	3	3	14	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	2		
		G	3	2	2	2	2	11	1	1	1	3	3	9	1	1	1	3	3	9		
		N	0	1	1	1	1	4	2	3	2	2	2	11	2	3	2	2	2	11		
	Dep	W	3	3	3	2	2	13	0	2	3	1	1	7	0	2	3	1	1	7		
		LN	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3		
		G	1	1	1	1	1	5	1	1	1	2	2	7	1	1	1	2	2	7		
		N	2	2	2	3	3	12	2	3	2	3	3	13	2	3	2	3	3	13		

Abbreviation
W : Weibull
LN : Lognormal
G : Gamma
N : Normal
Arr : Arrival
Dep : Departure

본 연구에서는 KS test, AD test, CvM test, AIC, BIC 를 통해 각각의 점수(Good-3, Moderate-2, Poor-1, Bad-0)를 매겨 최적 분포를 추정하고자 하였다. Table 8은 최적 확률분포 추정 점수 결과를 나타낸다. 그 결과, 인천대교의 경우 최적 분포의 형태는 입항, 출항 시에 대수정규분포와 가장 유사한 것으로 분석되었다. 다음으로 감마분포, 정규분포, 와이블분포 순으로 분석되었다. 부산항대교의 경우 입항 시에 대수정규분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 출항 시에는 Cluster 1의 경우 대수정규분포, Cluster 2의 경우 감마분포와 가장 유사한 것으로 분석되었다. 다만, Cluster 2 출항의 경우, 점수 차이에 비해 실제 통계량의 차이는 크지 않아서 각 분포의 특징을 고루 가지는 것으로 분석되었다. 목포대교의 경우, 감마분포, 정규분포, 와이블분포를 고루 따르는 것으로 분석되었다. 각 점수를 평균 내어보면 정규분포가 11.5점, 감마분포가 8.8점, 와이블분포가 6.5점으로 정규분포에 가장 가까운 것으로 분석되

었다. 마지막으로 마창대교의 경우, 정규분포에 가장 가까운 것으로 분석되었다.

4. 선박 안전 통행 폭

최적 분포분석 결과를 종합하면, 인천대교와 부산항대교의 경우, 대수정규분포와 유사한 분포형태를 가지며, 목포대교와 마창대교의 경우 정규분포와 유사한 분포형태를 가지는 것으로 분석되었다. 이를 고려하여 각 교량의 통행분포를 정규분포와 대수정규분포를 기반으로 각 분포의 신뢰구간 95%에 따른 중첩 범위를 안전 통행 폭으로 설정하였다. 대상 교량의 클러스터별 통행분포는 Fig. 4와 같다.

본 연구에서는 일반적으로 정규성 검증에 많이 활용되는 KS test 를 활용하여 유의수준 0.05를 기준으로 정규분포 검

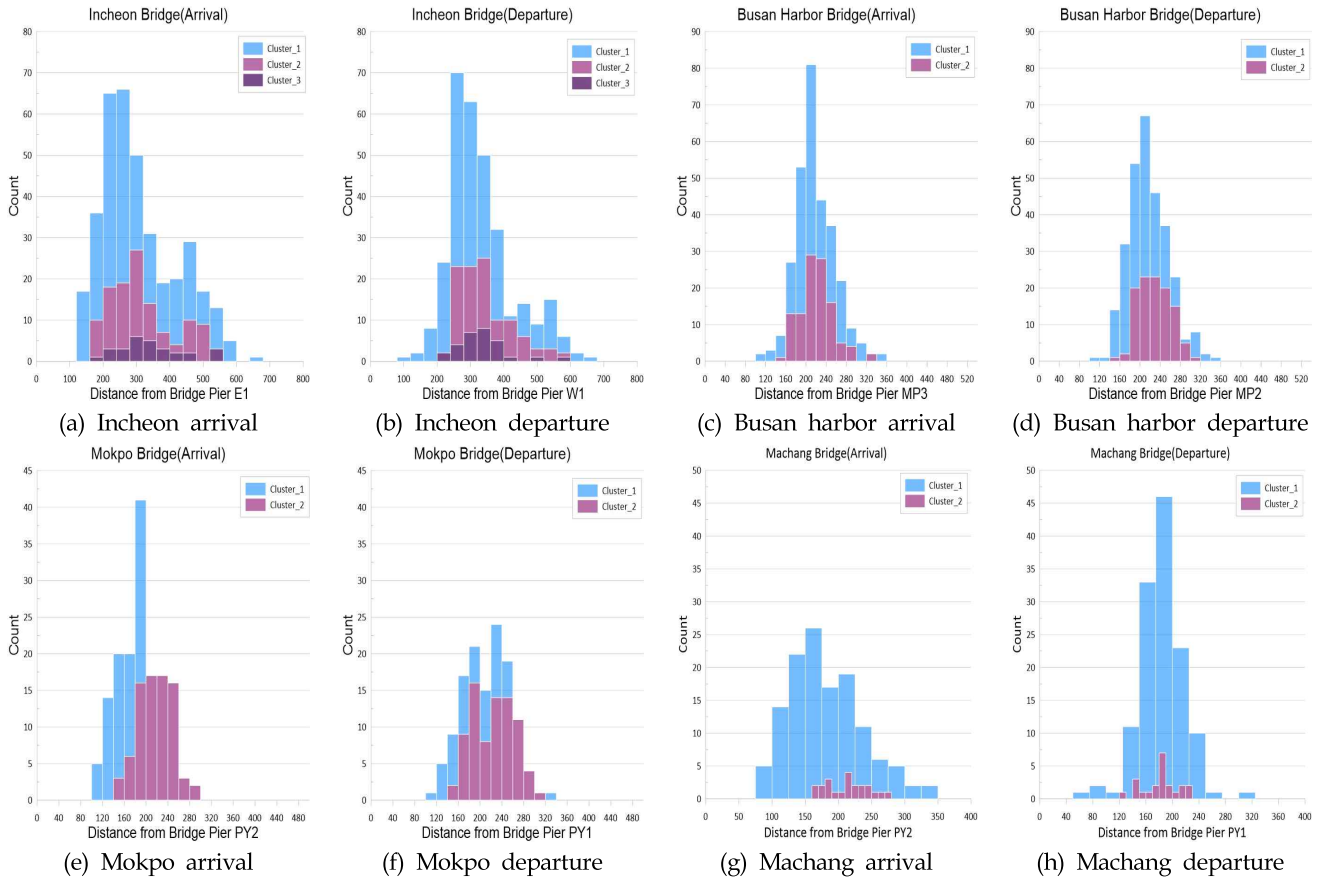


Fig. 4 Traffic distribution of target bridge

정, 교량과의 이격거리 및 통행척수를 자연로그로 변환한 후 대수정규분포 검정을 수행하였다. 그 결과는 Table 9와 같으며, 모든 경우에서 주경간 하부를 통행하는 선박의 통행분포는 대수정규분포를 따르는 것으로 분석되었다. 정규분포의 경우에는 인천대교 입항 Cluster 1 및 출항 Cluster 1, 2를 제외한 모든 경우에서 정규분포를 따르는 것으로 분석되었다. 유의수준의 경우, 인천대교와 부산항대교는 대수정규분포가 정규분포에 비해 평균적으로 유의성이 높은 것으로 분석되었으며, 목포대교와 마창대교의 경우 대수정규분포에 비해 정규분

포의 유의성이 높은 것으로 분석되었다.

Son et al.(2020b)은 인천대교와 부산항대교의 통행분포를 정규분포로 가정하고 신뢰구간의 95%를 교량의 주탑과 선박 간 안전 이격거리로 제시하였다. 본 연구에서는 이를 참고하여 대수정규분포와 정규분포의 신뢰구간 95%($\mu \pm 1.96\sigma$)에 따른 입항과 출항의 통행분포가 중첩된 범위를 안전 통행 폭으로 설정하고 그 결과를 비교하였다. Fig 5 및 Table 10은 대상 교량의 통행분포에 대한 신뢰구간 95%에 따른 통행 범위 및 폭을 보여준다(목포대교의 경우, 교량 주탑이 항로의 범

Table 9 Results of kolmogorov-smirnov test for traffic distributions

Classification		Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3	
		Normal KS-test (p-value)	Lognormal KS-test (p-value)	Normal KS-test (p-value)	Lognormal KS-test (p-value)	Normal KS-test (p-value)	Lognormal KS-test (p-value)
Incheon	Arrival	0.0029	0.1611	0.1153	0.5439	0.9335	1.0000
	Departure	0.0001	0.0852	0.0431	0.3549	0.4087	0.7957
Busan harbor	Arrival	0.0543	0.6027	0.3867	0.6048	/	
	Departure	0.1521	0.9387	0.5807	0.4016		
Mokpo	Arrival	0.6904	0.1841	0.8308	0.7826		
	Departure	0.4784	0.1914	0.2793	0.4621		
Machang	Arrival	0.2789	0.6463	0.9562	0.7979		
	Departure	0.7580	0.2691	0.4861	0.2907		

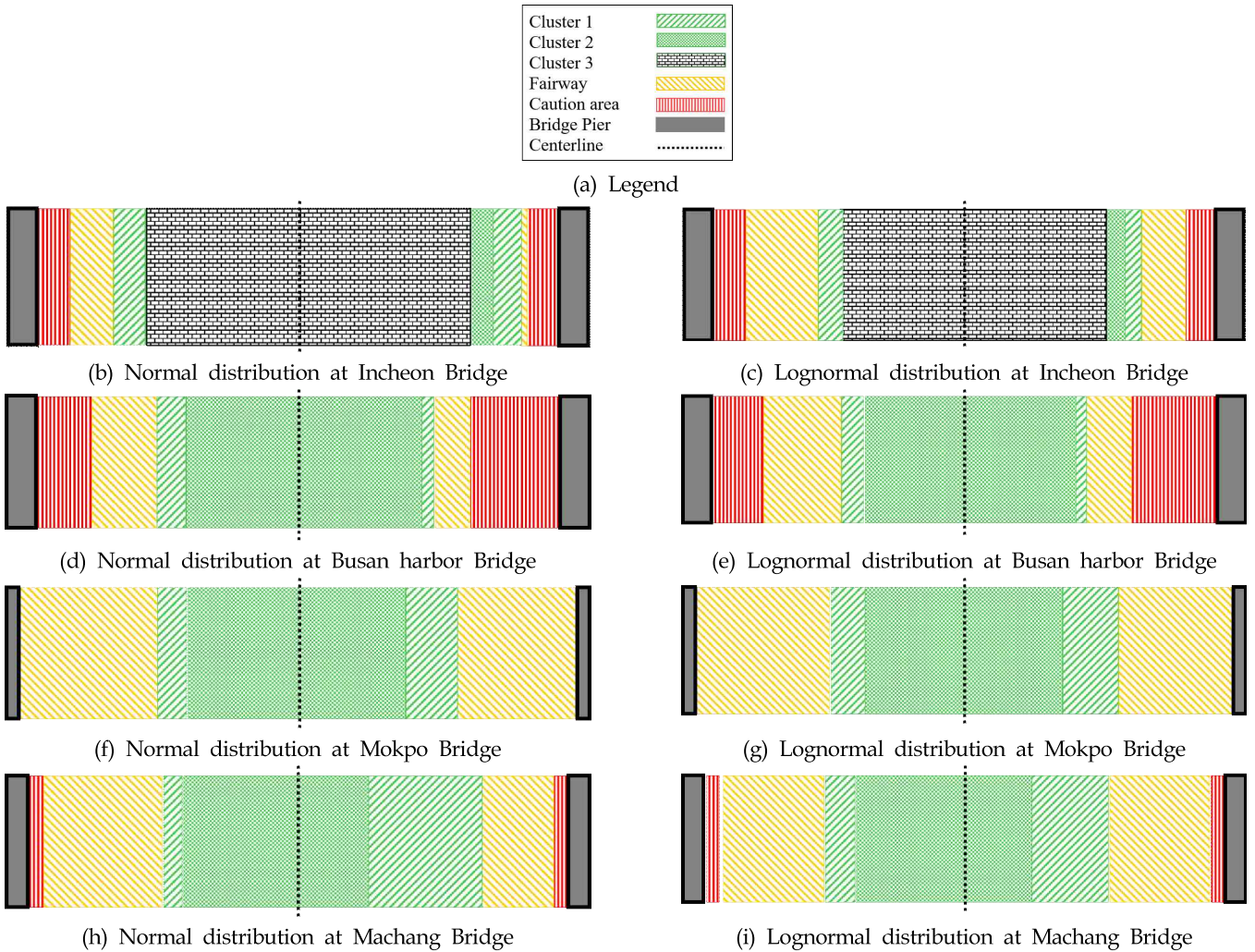


Fig. 5 Safety navigation width of target bridges according to traffic distribution

Table 10 Safety Navigation Width for traffic distributions

Classification	Cluster 1		Cluster 2		Cluster 3	
	N	LN	N	LN	N	LN
Incheon	486m	389m	400m	329m	369m	305m
Busan	206m	187m	168m	154m	Abbreviation N : Normal LN : Lognormal	
Mokpo	237m	222m	168m	155m		
Machang	181m	154m	90m	80m		

위에 포함되어 있으므로, Caution area가 없음). 그 결과, 인천대교 입항 Cluster 1에서 정규분포와 대수정규분포 간의 차이가 최대 97m로 가장 큰 것으로 나타났으며, 최소 차이는 10m로 마창대교 Cluster 2에서 나타났다. 본 연구의 분석 결과에 따라, 일반적으로 정규분포를 따르지 않고 대수정규분포를 따르며 통행하는 인천대교의 경우에는 정규분포보다 대수정규분포로 분포를 가정하여 통행 안전범위를 제시하는 것이 적합한 것으로 분석되었다. 정규분포와 대수정규분포에 따른 항행

폭 차이가 가장 큰 인천대교의 클러스터별 안전 항행 범위를 Fig 6과 같이 나타내었다. 그 결과, 정규분포에서 대수정규분포에 비해 통행범위가 넓었으며, Cluster 1의 경우 44m에서 53m, Cluster 2의 경우 31m에서 40m, Cluster 3의 경우 29m에서 35m 가장 주경간 중심에서 우측으로 치우친 것으로 분석되었다. 그러므로 정규분포를 따르지 않는 경우에는 최적 분포분석을 통해 적합한 분포를 찾고, 그에 따른 안전통행 범위를 제시할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 항만횡단 해상교량을 통행하는 선박의 안전 통행 폭에 대한 분석을 위해 인천대교, 부산항대교, 목포대교, 마창대교의 AIS data에 기반한 선박 통행분포를 조사하여 K-means clustering를 통해 선박을 크기에 따라 분류하였다. 클러스터링된 데이터에 대하여 KS test, AD test, CvM test, AIC, BIC를 통해 최적분포 분석을 한 결과, 인천대교와 부산항대교에서는 대수정규분포, 목포대교와 마창대교에서는 정규

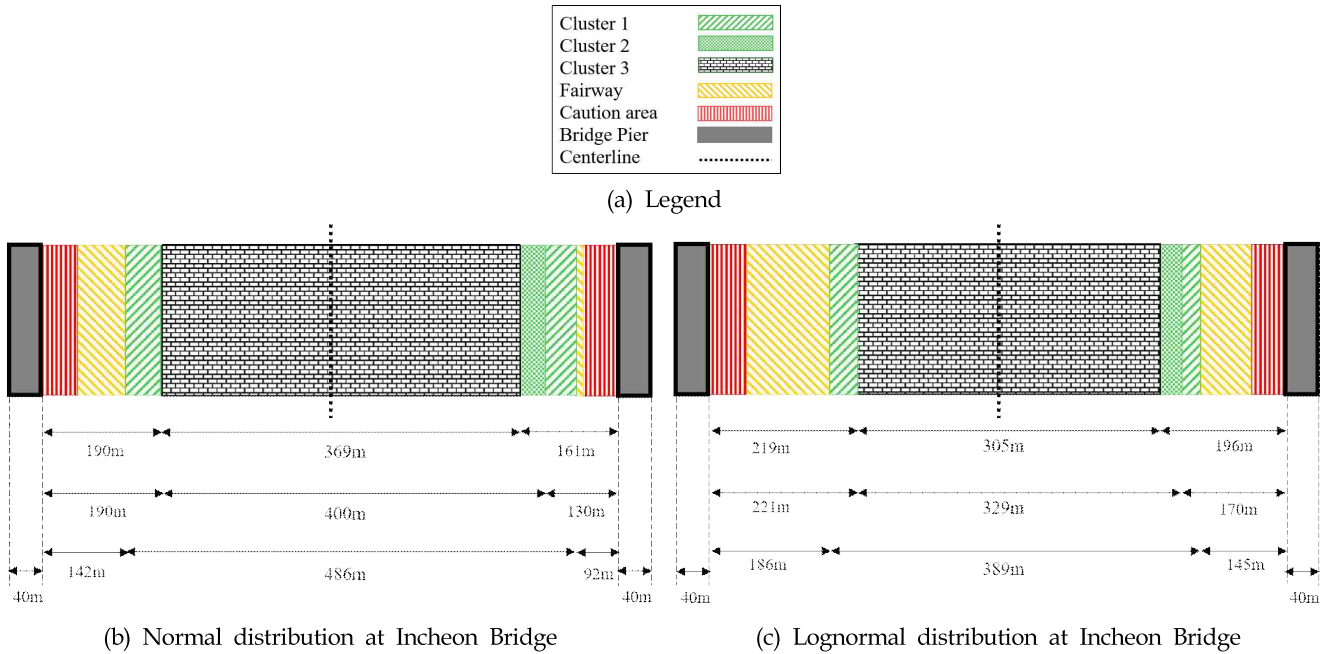


Fig. 6 Safety navigation width of Incheon Bridge according to traffic distribution.

분포가 최적분포에 가까운 것으로 분석되었다. 대상 분포의 KS 검정을 통한 정규성 검정 결과, 인천대교의 입항 Cluster 1, 출항 Cluster 1, 2를 제외한 모든 경우에서 정규분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 모든 경우에서 대수정규분포를 따르는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 Son et al.(2020b)에서 제시한 교량의 주탑과 선박간 안전 이격거리를 참고하여 각 분포의 신뢰구간 95% 범위를 측정하고 비교분석 하였다. 그 결과, 인천대교의 경우 정규분포와 대수정규분포 간의 차이가 64~97m로 가장 큰 것으로 나타났으며, 최소 차이는 10m로 마창대교 Cluster 2에서 나타났다. 이에 따라, 일반적으로 정규분포를 따르지 않고 대수정규분포를 따르며 통항하는 인천대교의 경우에는 정규분포로 통항분포를 가정하여 통항 안전범위를 제시하는 것보다 대수정규분포로 분포를 가정하여 통항 안전범위를 제시하는 것이 적합한 것으로 분석되었다. 인천대교의 경우 다른 교량에 비해 가항수역의 범위가 가장 넓어 표준편차가 높고 교통량이 많아 작은 크기의 Cluster에서는 좀더 우측으로 편위하려는 특성이 반영된 결과로 판단된다.

이 연구의 성과는 다음과 같다.

첫째, 안전 통항 폭을 통해 더욱 안전한 해양환경을 조성할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 국내 법령 및 규정상 항만횡단 해상교량과 선박 간의 안전이격거리에 대한 직접적인 기준은 없다. 본 연구를 통해 실제 선박 운항자의 운항 패턴을 통한 분석으로 더욱 신뢰할 수 있는 통항 범위에 대한 기준을 제시하여 해운 분야의 안전한 운항 및 사고 예방에 도움이 되리라 판단된다. 특히 이는 선박 관제사와 운항자에게도 적절한 안전기준으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

둘째, 본 연구의 결과를 자율운항 선박의 안전 통항 범위 및 충돌, 접촉 회피 알고리즘 설계 연구에 활용할 수 있을 것

으로 판단된다. 한국선급의 자율운항선박 지침에 따르면 (Korean Register, 2022), 자율운항선박은 안전하게 운항할 수 있도록 충돌 및 환경과 관련된 외부 상황과 선박의 운항 및 운동과 관련된 상황을 적절히 인지하여야 한다. 본 연구는 실제 AIS 항적정보를 바탕으로 분석된 결과로서, 교량 하부를 통항하는 자율운항시스템 중 충돌회피시스템 및 항적제어시스템의 항로 설정 알고리즘 설계에 도움이 될 것이다.

마지막으로, 이번 연구에서는 해상교량을 통항하는 선박을 대상으로 정규분포, 감마분포, 대수정규분포, 와이블분포와 같은 4가지 분포만을 가정하여 연구를 수행하였으며 여러 가지 고급 분포를 고려하지 못한 한계점이 있었다. 향후 연구에서는 교량에 국한되지 않은 모든 해역을 대상으로 여러 가지 고급 분포를 적용한다면 더욱 정확한 통항 안전범위를 얻을 수 있으리라 기대한다.

References

- [1] Akaike, H.(1974), "A new look at the statistical model identification". IEEE transactions on automatic control, Vol. 19, No. 6, pp. 716-723.
- [2] Bae, E. H., Kim, S. Y., Kim, R. G., Song, J. H. and Lee T. K.(2008), "Planning, Design and Construction of Machang Grand Bridge", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 1, pp. 41-51.
- [3] Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V. and Niknafs, A. (2014), "NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set". Journal of statistical software, Vol. 61, pp. 1-36.

- [4] Cullen, A. C. and Frey, H. C.(1999). Probabilistic Techniques in Exposure Assessment: A Handbook for Dealing with Variability and Uncertainty in Models and Inputs. Springer Science & Business Media, pp. 1-335.
- [5] D'Agostino, R. B. and Stephens, M. A.(1986), Goodness-of-fit techniques. Statistics: Textbooks and Monographs.
- [6] Delignette-Muller, M. L. and Dutang, C.(2015), "fitdistrplus: An R package for fitting distributions. Journal of statistical software", Vol. 64, No. 4, pp. 1-34.
- [7] García, S., Luengo, J. and Herrera, F.(2015), Data preprocessing in data mining (Vol. 72), Springer International Publishing, pp. 1-320.
- [8] Gluver, H. and Olsen, D.(1998), Ship Collision Analysis: Proceedings of the international symposium on advances in the ship collision analysis, Copenhagen, Denmark, CRC press, pp. 3-11.
- [9] Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H. and Friedman, J. H.(2009), The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction (Vol. 2). Springer., pp. 1-758.
- [10] Huang, Z.(1998), "Extensions to the K-means Algorithm for Clustering large data sets with categorical values". Data Mining and Knowledge Discovery, Vol. 2, No. 3, pp. 283-304.
- [11] Incheon Bridge. Co, Ltd.(2010), Incheon Bridge Construction Note. pp. 2-443.
- [12] Inoue, K.(1977), "On the separation of traffic at straight waterway by distribution model of ship". Japan Institute of Navigation, Vol 56, pp. 103-115.
- [13] Jang, S. J., Sim, S. B., Han, C. and Kim, M. B.(2012), "Design and Construction of Underground Continuous Wall for Construction of Tower Foundation of North Busan Bridge", Korean Geotechnical Society, Vol. 11, pp. 12-23.
- [14] Kim, J. K.(2018), "A Study on the Analysis of Traffic Distribution and Traffic Pattern on Traffic Route using ND-K-S", Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 42, No. 6, pp. 446-452.
- [15] Korean Register(2022), Guidelines for Maritime Autonomous Surface Ship, Korean Register, pp. 1-27.
- [16] Larson, O. D.(1993) Ship Collision with Bridge, IABSE, pp. 1-6.
- [17] Lee, H. T., Lee, J. S., Cho, J. W., Yang, H. and Cho, I. S.(2020), "A Study on the Pattern of Pilot's Maneuvering using K-means Clustering of Ship's Berthing Velocity". Journal of Coastal Disaster Prevention, Vol. 7, No. 4, pp. 221-232.
- [18] Lee, Y. S., Cho, I. S., Cho, J. H. and Song, C. U.(2008), "A Study on the Analysis of Ship Handling Simulation about Domestic Sea Bridge over the Harbor". Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 5, pp. 321-326.
- [19] Lee, Y. S., Park, Y. S., Lee, U., Jeong, C. H. and Park, J. S.(2009), "A study on the Proper Location and Scale of Bridges Crossing Navigable Waterways Considering the Safety of Marine Traffic". Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 33, No. 5, pp. 295-301.
- [20] Ministry of Ocean and Fisheries(2021), The Fourth National Port Basic Plan. pp. 17-18.
- [21] Park, K. H., Kim, H. S., Kim, Y. S. and Kim, C. S.(2004), "Planning & Design of KOHA Grand Bridge", Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 16, No. 1, pp. 71-82.
- [22] Park, Y. S., Lee, Y. S., Park, J. S. Cho, I. S. and Lee, U.(2008), "A proposal of Bridge Design Guideline by Analysis of Marine Accident Parameters occurred at Bridge Crossing Navigable Waterways", Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 10, pp. 743-750.
- [23] Schwarz, G.(1978), "Estimating the dimension of a model". The annals of statistics, pp. 461-464.
- [24] Son, W. J. and Cho, I. S.(2022). "Analysis of Trends in Mega-Sized Container Ships Using the K-Means Clustering Algorithm". Applied Sciences, Vol. 12, No. 4, p. 2115
- [25] Son, W. J., Lee, H. T. and Cho, I. S.(2020a), "A study on the Standard of Ship Safety Distance on Bridge Crossing Navigable Waterways based on Traffic Distribution" Journal of Coastal Disaster Prevention. Vol. 7, No. 1, pp. 29-37.
- [26] Son, W. J., Lee, J. S., Lee, H. T. and Cho, I. S.(2020b), "An Investigation of the Ship Safety Distance for Bridges Across Waterways based on Traffic Distribution". Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 8, No. 5, p. 331.
- [27] Song, T. H. and Kim, Y. D.(2018), "A Study on the Marine Traffic Safety Audit Scheme through Case Analysis" Journal of Coastal Disaster Prevention. Vol. 5, No. 4, pp. 193-201.
- [28] Tsuji, K.(1996), "Methods of Survey for Marine Traffic" Japan Institute of Navigation, No. 129, pp. 8-18.
- [29] Fujii, Y., Makishima, T., and Hara, K.(1981), Marine Traffic Engineering, Kaibundo, pp. 119-129.

Received 01 July 2022

Revised 17 July 2022

Accepted 02 August 2022