

국내 서/남해안 해상교량의 월별, 높이별 비래염분량 특성

정자혜¹, 민지영², 이빛나³, 이종석^{4*}

Properties on the Airborne Chlorides of Offshore Bridges on the Western/Southern Coast in South Korea

Jahe Jung¹, Jiyoung Min², Binna Lee³, Jong-Suk Lee⁴

Abstract: In this study, the monthly airborne chlorides flying into the offshore bridges were investigated depending on the sea level. The target structures were 9 bridges located on the western and southern coast of South Korea. The airborne chlorides were measured at different sea levels on each bridge every month during 1 year. The results showed that the strongest seasonal wind from the northwest in winter especially have led increase of the airborne chlorides, and its effect was more significant in the western coast than the southern coast. It was also found that the airborne chlorides declined with the increase of sea level. Three types of curves were suggested for analyzing the decrease trend with the sea level, based on the airborne chlorides at the lowest measurement height of main tower. The trend was varied depending on the sea area, and even in the same sea area, the local topographic condition affected the airborne chlorides. It means that the location and local topography should be considered simultaneously for durability management in the framework of the chloride source, and then the influence of the chloride source should be classified, e.g. safe and dangerous. From these results, it is expected that it could be used as baseline data for the evaluation of the deterioration environment in the Detailed guidelines for safety and maintenance of facilities [Performance evaluation]_Bridge.

Keywords: Airborne chlorides, Offshore bridge, Bridge height, Topographic characteristics, Decreasing rate of airborne chlorides

1. 서 론

해안부근의 콘크리트 구조물은 바다에서 발생한 비래염분이나 제설제 살포에 의한 비산입자(이하 제설염분)가 콘크리트 속으로 침투하면서 염해가 발생할 수 있으며, 이는 구조물 자체의 내구성에도 큰 영향을 미친다.

이때, 대기중 비래염분이 콘크리트에 부착된 후, 콘크리트 속으로 침투하는 침투염화물량은 콘크리트 표면으로부터 깊이 따라 일정하게 감소하지 않고 어느 깊이까지는 증가하다가 최대값을 보인 후, 오히려 감소하는 양상을 보인다(Meira et al., 2010; Lee and Ahn, 2012; Min and Lee, 2021). 이를 Meira et al.(2010)는 콘크리트 내부를 대류영역과 확산영역, 2영역으로 나누어 설명했다. 대류영역은 건설이 반복되는 콘크리트 표면을 포함한 염화물의 농도차이나 모세관 흡착으로 콘크리

트 내부로 염소이온이 이동하는 영역으로, Kim et al.(2009)는 콘크리트 표면의 건설 반복 주기에 따라 콘크리트 내부 깊이 별 총 염소이온량이 달라진다는 것을 수치해석을 통해 밝혀 내기도 하였다. 한편 대류영역에서 깊이가 깊어질수록 증가하는 염화물량이 최대값을 보인 후 감소하는데, 염화물량이 최대값을 보이는 지점부터 내부를 확산영역이라고 하였다. 이 확산영역에서는 높은 습도로 환경이 유지되고 있고 염화물량은 주로 확산의 형태로 더 깊은 콘크리트 내부로 이동하며, 깊이에 따라 총 염화물량은 감소하는 경향을 보인다. Meira(2010)는 대부분 노출 시험체들이 깊이 10 mm에서 대류영역과 확산영역의 경계를 보였다고 발표했다. 그러나 이 시험체들이 노출되었던 환경은 기온의 변화가 적고(20~30 °C), 긴 우기동안 비교적 습도가 높게(60~80 %) 유지되는 전형적인 열대기후를 보인다. 그러나 Lee and Ahn(2012)은 우리나라와 같이 가을, 겨울, 및 봄에 이르는 장기간 동안 매우 낮은 습도를 유지하는 경우의 비래염분 환경에서는 대류영역이 상대적으로 더 커질 수 있으며 3년 이상의 장기적인 측면에서는 점진적으로 더 깊어질 수 있는 가능성이 있다고 판단했다.

해수와 직접 접하지 않는 콘크리트 구조물의 염해는 주로 대기중의 염분, 특히 제설제의 영향이 없는 곳에서는 비래염

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원

*Corresponding author: jslee@kict.re.kr

Korea Institute of Civil and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

분에 의해 발생하게 된다. 이 비래염분은 파도에 의해 발생하여 바람에 의해 내륙으로 이동된다. 따라서 비래염분 발생과 이동, 양은 풍향이나 풍속에 영향을 크게 받는다(Sakihara et al., 2014). 교량의 비래염분의 이동량이나 분포에 관해서는 많은 조사나 연구가 수행되어 오고 있다. 예를 들어 일본 국토교통성에서는 교량 유지관리시스템(NILIM, 2009)에서 교량의 염해대책지구 및 염해열화 관리시스템을 시행하고 있다. 또, 다른 연구(Uda et al., 1992)에서는 도로교의 전국실태 조사데이터를 이용하여 해안지역의 비래염분 이동추정식을 고안해내었다. 그러나 앞의 선행연구들은 장기간의 실측 데이터를 고려하지는 않았다. 이에 Sakihara et al.(2014)는 실측데이터(풍향과 비래염분량)를 이용하여 해안인근의 내륙에 위치한 교량을 대상으로 풍향과 비래염분량과의 관계를 검토하였다. 그러나 이 연구에서는 해상교량이 아닌 해안으로부터 떨어진 내륙에 위치한 교량을 대상으로 하고 있고, 또한 데이터도 교량에서 측정된 것이 아니라, 해안으로부터의 거리와 표고를 달리하여 비래염분량을 조사한 데이터를 사용하였다.

본 연구에서는 9개의 해상교량에서 높이별로 직접 염분포집기를 설치하여 조사한 데이터를 사용하여 해상교량이 위치한 해역별로 월별, 높이별 비래염분량의 분포를 파악하고, 지형적 특성에 따라 비래염분량의 특징을 분석하였다.

2. 해상교량의 비래염분량 조사방법

해상교량의 열화환경을 파악하기 위하여 월별, 높이별 대기중 염분량을 조사하였으며, 대상은 해상교량이 많은 서해안과 남해안의 특수교들 중에서 선정하였다. 남해안에서는 거금대교, 소록대교, 돌산대교, 거북선대교, 노량대교를 선정하였으며, 서해안에서는 고군산대교, 목포대교, 영종대교, 서해대교를 선정하였다. 측정기간은 2017년 3월 ~ 2018년 4월, 총 1년으로 매월 1회 포집거즈를 회수하고 교체함으로써 1개월의 누적량을 측정하였으며 교량에 따라 측정개시 기간에 약 1개월의 시차가 있다. 각 교량의 높이별로 2~9개 지점에 염분포집장치를 설치하였다. 측정 높이는 각 교량을 대상으로 해수면을 기준으로 2~5 m 높이에 있는 주탑하단과 13~62 m 높이에 있는 차도를 기본으로 채택하였으며, 주탑하단에 접근이 어려운 교량의 경우, 해당 높이의 육지면에서 측정하였다. 또한 주탑 상부까지 접근이 가능한 경우는 최상단부에도 포집장치를 설치하여 측정하였다(노량대교, 영종대교, 서해대교). 각 교량에 설치한 포집기의 설치 정보는 Table 1과 같다.

비래염분을 측정하기 위한 염분포집장치와 분석방법은 선행연구(Lee et al., 2010)를 따랐다. 포집기의 개략적인 형상은 포집면적이 100 mm × 100 mm × 100 mm 이며, 박스 내부에

Table 1 The height of salinity measurement devices for each bridge

Coastal zone	Bridge name	No. of installation	Location	Height above sea level (m)
Southern Coast	Geobukseon brg.	7	Top of Pylon	25
				18
			Pylon	11
				4
			Land	1.5
			Pier	12
			Land	3
	Dolsan brg.	2	Roadway	13
			Pier	2
	Noryang brg.	5	Pylon	150
				100
			Roadway	50
			Pier	5
			Ground level	3
	Geogum brg.	3	Roadway	50
Land			43	
Sorok brg.	2	Roadway	50	
		Land	3	
Western Coast	Youngjong brg.	9	Top of Pylon	107
			Upper roadway	50
			Lower roadway	42
			Lower roadway (beneath)	42
				20
				13
			Pylon	8
				8
				4
	Seohae brg.	6	Pylon	124
			Roadway	62
			Land	18
				13
			Pylon	10
				5
Mokpo brg.	2	Roadway	53	
		Pier	5	
Gogunsan brg.	3	Pylon	44	
		Roadway	29	
		Land	12	



Fig. 1 The locations and photos of salinity measurement devices in the Youngjong Bridge

는 100 mm × 120 mm 포집관을 2개 설치하였으며, 포집된 비래염분이 비바람에 의하여 유실되지 않도록 20 mm 높이의 차단막이 설치되어 있다. 비래염분 포집기 거치대는 비래염분 포집기가 소정의 높이(2 m)에서 빗물 등 외기환경의 영향을 최소로 하면서 정량적인 포집이 이루어질 수 있도록 구성하였다(Lee et al., 2010). 본 연구를 위해 영종대교의 높이별 염분포집기 설치 위치와 실제 교각하단과 차도면에 설치한 사진은 Fig. 1과 같다.

3. 해상교량의 비래염분량 분석

3.1 해상교량의 월별 비래염분량 분석

Fig. 2와 Fig. 3에 각각 남해안과 서해안 해상교량들의 월별 비래염분량을 도시하였다. 여기에서는 교량마다 차이가 있는 겨울철 제설염분에 의한 대기중 염분량 증가분을 배제하고 순수한 월별 대기중 염분량, 즉 비래염분량을 비교하기 위하여 차도의 데이터를 제외하고, 해수면에서 높이 2~5 m의 교각 혹은 주탑 하단부에서 측정된 값만을 비교하였다.

Fig. 2에 도시한 남해안에 위치한 교량들의 월별 비래염분량은 $0.3 \text{ mg}/100\text{cm}^2/\text{day}$ (이하 mdd) ~ 17.4 mdd로 분포하고 있으며 6월과 7월에 다른 월과 비교하여 낮은 경향을 보이다가 8월 이후 상승하고 10월~2월의 겨울철에 높은 값을 보인다. 이전 연구(Lee et al., 2010)에 따르면 남해안의 해안가(해안에 가까운 내륙)에서는 여름철의 남동풍과 태풍의 영향으로 겨울철보다 높은 비래염분량을 보인다. 그러나 해안가가 아닌 섬과 섬을 연결하며 해상에 위치한 해상교량의 경우, 관측 위치의 남동쪽에 바다가 아닌 섬이 위치하고 있어 강도가 크지 않은 남동풍이 해상교량의 비래염분량 증가에 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 또한 여름철 비래염분량 증가에 기여하는 주요한 요인으로 태풍이 있으나, 조사기간의 여름철에 우리나라에 영향을 미친 태풍 3개는 모두 일본 큐슈 밑쪽으로 지나가는 경로를 보여(KMA, 2019) 우리나라에 크게 영향을 미치지 못한 것으로 나타났다. 따라서 측정기간 동안 태풍이 남해안의 여름철 비래염분 상승에 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 월별 평균값 중 가장 낮은 월인 7월과 가장 높은 달인 2월과 3월의 염분량은 각각 1.0 mdd,

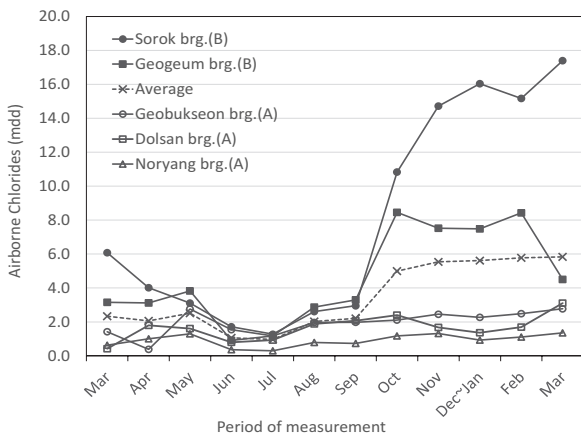


Fig. 2 Monthly average airborne chlorides of offshore bridges located on the Southern coast

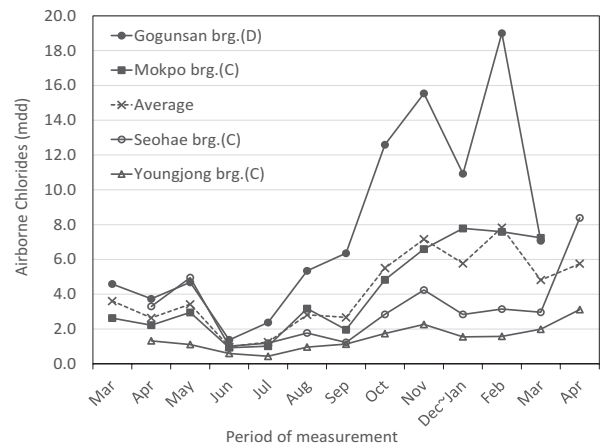


Fig. 3 Monthly average airborne chlorides of offshore bridges located in the Western coast

5.8 mdd로 5배 이상 차이가 났다. 이러한 전체적인 경향과는 별도로 남해안에 위치하는 교량들의 비래염분량 분포특징은 크게 두 부류로 분류할 수 있다. 첫 번째는 월별 비래염분량이 대체적으로 낮고, 월별 차이도 크지 않은 교량으로 이들은 0.3 ~ 3.1 mdd의 분포를 보이며 거북선대교, 노량대교, 돌산대교가 이에 속한다(이하 A군). 두 번째는 월별 비래염분량이 대체적으로 높으며, 그 차이도 크게 나는 교량으로 0.9 ~ 17.4 mdd의 분포를 보이며 거금대교와 소록대교가 이에 속한다(이하 B군). 국내 해역별 비래염분량을 조사한 이전 연구(Lee et al., 2010)에서 남해안의 비래염분 분포 특징은 전반적으로 0.7 ~ 3.5 mdd의 적은 비래염분량을 나타내며, 이는 남해안이 전반적으로 비래염분량이 적게 발생하는 환경이기 때문으로 분석하고 있다. 본 연구에서도 A군에 속하는 해상교량들의 비래염분량 분포 특징은 전형적으로 남해안에서 보이는 특징을 나타내고 있다고 볼 수 있으며, 이에 덧붙여 월별 차이도 크지 않은 특징도 보이고 있다. 이에 반해, B군에 속하는 해상교량의 비래염분 분포는 전체적으로 양도 많고, 월별 차이도 크다. 이는 이전 연구(이종석, 2010)에서도 동일 해안일지라도 해안선의 방향 및 형상 등 국부적인 비래염분 환경이 크게 다를 경우 비래염분량의 추정에는 추가적인 고려가 필요하다고 명시한 것처럼 교량이 위치한 국부적인 지리환경과 연관이 있을 것으로 보고 다음 절에서 살펴보도록 하겠다.

Fig. 3에는 서해안에 위치한 교량들의 월별 비래염분량을 표시하였다. 염분량은 0.4 ~ 19.0 mdd의 값으로 분포하고 있으며, 남해안과 같이 6월과 7월이 다른 달과 비교하여 낮은 값을 보이다가 8월 이후 상승하기 시작하며 10월~2월의 겨울철에 높은 값을 보였다. 월별 평균값 중 가장 낮은 달인 6월과 가장 높은 달인 2월의 염분량은 각각 1.0 mdd, 7.8 mdd로 7배 이상 차이가 났으며, 이 차는 남해안보다 크게 나타났다. 특히 겨울철에는 높은 비래염분량을 보이는데, 이는 서해안은 겨울철에 높은 비래염분이 측정된 이전 연구(Lee et al., 2010)와도 동일하다. 이유는 서해안의 경우 겨울철 북서계절풍의 영향으로 바다에서 발생한 비래염분량이 다량 대기중에 분포하기 때문으로 생각된다. 한편 여름철에는 겨울철에 비해 낮은 비래염분량을 보였다. 이는 겨울철 북서풍에 비해 여름철 남동풍은 풍속이 빠르지 않아 전반적으로 겨울철에 비하여 비래염분의 발생량과 이동이 상대적으로 제한되기 때문이다.

이상으로 볼 때, 남해안과 서해안의 교량 모두 여름철보다는 겨울철에 비래염분량이 높게 나타나는 이유는 강한 북서계절풍이 많은 비래염분을 발생시켜 멀리까지 이동시키기 때문으로 생각되며, 또한 여름철 잦은 강우로 인하여 대기중의 염분이 씻겨내려가는 영향도 있다고 판단된다.

서해안의 교량들도 남해안 교량과 같이 두 부류로 분류할 수 있다. 첫 번째는 월별 비래염분량이 비교적 낮고, 월별 차

이도 상대적으로 크지 않은 교량으로 이들은 0.4 ~ 7.8 mdd의 분포를 보이며 영종대교, 서해대교, 목포대교가 이에 속한다(이하 C군). 두 번째는 월별 비래염분량이 대체적으로 높으며, 그 차이도 크게 나는 교량으로 1.4 ~ 19 mdd의 분포를 보이며 고군산대교가 이에 속한다(이하 D군). 특히 D군은 5월을 제외하고 C군 교량들보다도 상당히 높은 비래염분량을 나타내고 있으며, 상대적으로 비래염분량이 적은 5월도 C군에 속하는 3개의 교량들의 최고점에 근접한 염분량이 측정되었다. 이는 남해안과 마찬가지로 고군산대교 주변의 지형적 특징이 높은 비래염분량에 영향을 미친 것으로 판단되며, 이 또한 다음절에서 살펴보도록 하겠다.

3.2 지형적 특성에 따른 해상교량의 비래염분량 특징

앞의 절에서 본 것과 같이 남해안의 거금대교와 소록대교, 서해안의 고군산대교는 같은 해역의 다른 해상교량보다 염분량이 높게 측정되었고, 이러한 현상은 겨울철에 더 뚜렷하게 나타났다. 이는 해당 교량의 지형적 영향과 북서풍이 부는 겨울철 바람의 방향에 기인한다고 생각된다. 북서 방향을 특정하는 이유는 겨울철 계절풍인 북서풍이 매우 강하게 부는 경향이 있고, 우리나라의 비래염분 발생과 이동에 있어 가장 큰 영향을 주는 인자이기 때문이다.

비래염분량에 영향을 미치는 주된 지형적 특성에는 ① 비래염분의 발생시점과의 거리, ② 발생량, ③ 장애물의 유무가 있다.

① 비래염분의 발생시점이란 파도에 의해 비래염분이 발생하는 지점을 의미하는 것으로, 해상교량 근처에 비래염분이 발생하는 바다가 존재하여야 하며, 특히 해상교량을 기준으로 바람이 불어오는 방향에 있어야 한다. 선행연구결과(KICT, 2006)를 보면, 해안(발생시점)에서 발생한 비래염분량이 10%까지 감소하는 거리는 해안으로부터 거리 1~2 km 이내이다. 따라서 해상교량을 기준으로 반경 1~2 km에는 바다가 있어야 유의미한 비래염분이 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

② 발생량은 발생시점에서 생겨난 비래염분량을 의미하는 것으로, 수심, 파도규모, 조수간만의 차 등의 요인으로 결정되는데, 이는 곧 지역이나 해역에 의해 좌우되는 특성이라고도 할 수 있다. 선행연구(PWRI, 1993; KICT, 2006)에서 실제 측정된 비래염분량을 조사한 결과, 지역적 특성을 확인하고 이를 이용하여 지역적 차이에 따른 지역계수를 산출한 바 있으며, 본 연구에서는 이를 참고하여 각 교량과 가까운 지역계수 또는 지형이 유사한 지역계수를 발생량으로 사용하였다.

③ 장애물은 발생시점과 해상교량 사이에 비래염분을 가로막는 가림막을 의미하는 것이다. 발생시점이 존재하고 여기에서 비래염분이 다량 생성되어도, 해상교량과의 사이에 높

은 장애물이 있다면 생성된 비래염분은 교량까지 도달하지 못한다. 그러나 장애물이 있더라도 해상교량보다 낮은 것은 장애물의 역할을 못할 뿐만 아니라, 반대로 파도를 발생시키는 원인이 되어 비래염분량을 더 많이 발생시키는 역할을 하기도 한다.

위와 같은 인자를 고려하여 각 교량별 비래염분량 특성을 보면 다음과 같다.

Fig. 4는 해상교량들의 위치와 겨울철 북서풍의 바람방향을 표시한 것이다.

지리적으로 볼 때, A군의 거북선대교, 돌산대교, 노량대교는 남해안에 위치하고 있어 겨울철에는 북서풍이 불 경우 내륙에서 해안방향으로 바람이 불기 때문에 해염입자에 의한 비래염분량이 적어, 여름과 크게 다르지 않는 특징을 보인다. 이 중 거북선대교와 돌산대교는 서로 가까이 위치하고 있어 발생량에는 크게 차이가 없을 것으로 생각된다. 그러나 거북선대교 측정 지점의 북서방향에 내륙이 위치하고 있어 발생시점이 존재하지 않아 낮은 비래염분량을 보인다고 생각된다. 돌산대교는 발생시점이 있지만, 북서방향에 장애물이 있어 낮은 비래염분량을 보인다. 한편 노량대교는 넓은 발생시점도 존재하고 장애물도 없으나, 좁은 만에 위치하고 있어 파도가 발생하지 않은 특징이 있어 낮은 비래염분량이 측정된 것으로 생각된다. 또한 앞 절에서 설명한 바와 같이 측정지점이 내륙안쪽에 위치하는 것도 그 이유가 된다.

반면 B군인 거금대교와 소록대교는 남해안에 위치하고 있어 발생량은 A군과 비슷하지만, 내륙과 교량사이에 직선거리 약 14 km 정도의 비교적 넓은 만이 위치하고 있어, 북서풍이 불 경우, 이 만에서 염분이 다량 발생하고, 또한 발생시점과 교량사이에 장애물이 없어 발생한 염분이 다량 이동해 와서 교량의 비래염분량 증가에 영향을 미쳤다고 분석된다.

한편, 서해안은 겨울철 북서풍이 불 때, 해안에서 내륙으로 바람이 불기 때문에 겨울철에는 비래염분량이 증가한다. 기상청 자료에 의하면 비래염분 조사기간 중 겨울철(2017년 12월~2018년 2월) 서해안의 풍향은 북서풍이 약 30% 정도로 우세하였으며, 해상교량이 놓여진 위치에서 비래염분량의 증가에 영향을 줄 수 있는 북풍과 서풍까지 포함하면 약 50%까지 차지한다. 그리고, 이 때 평균 풍속은 3.2 m/s로, 조사기간의 봄과 가을, 여름의 풍속인 2.9 m/s, 2.8 m/s, 2.6 m/s 보다 높게 나타났다. 이러한 이유로 앞의 Fig. 3에서 보듯이 모든 교량에서 여름철과 비교하여 겨울철에 염분량이 증가하고 있는 전형적인 서해안의 특징을 보이고 있다. 그러나, 이 중에서도 C군은 D군과 비교하여 다소 낮은 경향을 보이는데, C군에는 영종대교, 서해대교, 목포대교가 해당된다. 그러나 서해대교와 목포대교는 주위에 작은 섬들이나 인공구조물로 둘러싸여 있어 발생시점이 좁은 특징이 있으며, 북서방향에 장애물도 존재한다. 영종대교는 앞의 두 교량과 같은 지형적 특성 외에 교량 주위가 빨리 형성되어 있고 수심이 낮아 파도가 발생하

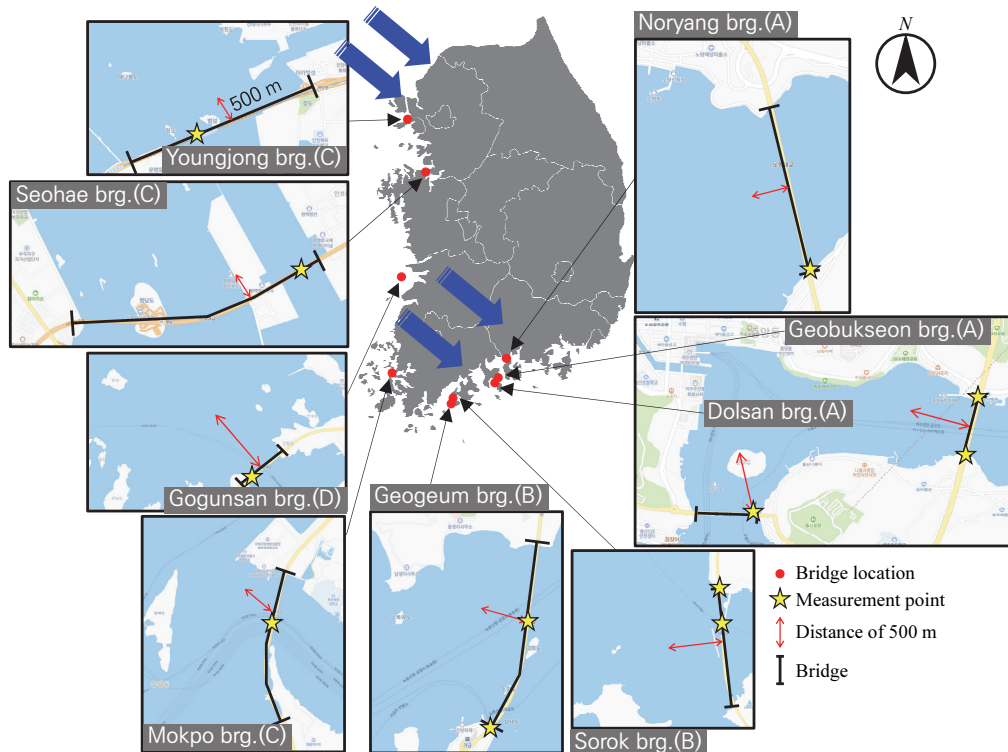


Fig. 4 Locations of Offshore bridges and wind direction in winter (Maps from <https://Vemap.com>, <https://www.naver.com/>)

Table 2 Topographic characteristics of each offshore bridges

Coastal zone	Bridge name	Airborne chlorides occurring point	Area index	Obstacles	Classification
Southern Coast	Geobukseon brg.	×	0.9	×	A
	Dolsan brg.	△	0.9	○	
	Noryang brg.	○	0.9	×	
	Geogeum brg.	○	1.0	×	B
	Sorok brg.	○	1.0	×	
Western Coast	Youngjong brg.	○	1.1	○	C
	Seohae brg.	△	1.0	○	
	Mokpo brg.	△	1.0	○	
	Gogunsan brg.	○	2.2	×	

기 어려운 환경이다. 이 같은 이유로 영종대교는 앞의 두 교량보다 1년 내내 더 낮은 비래염분량을 보이는 것으로 생각된다.

이에 반해 D군인 고군산대교는 겨울철에 강한 북서풍에 의해 넓은 발생시점에서 비래염분이 다량 발생하고, 북서방향에 장애물 역할을 할 지형이 없어 바다에서 발생한 염분이 다량 교량까지 도달하였기 때문에 C군에 비해서 겨울철 염분량이 크게 측정된 것으로 분석된다.

이상에 서술한 해상교량의 지형적 특성들을 정리하면 Table 2와 같다. 여기서 발생시점은 측정점을 기준으로 북서쪽에 바다가 있고 파도에 의해 비래염분이 잘 생성되는 환경인 경우 ○, 바다가 존재하지만 비래염분이 생성되는 시점이 측정지점과 다소 멀거나 만으로 둘러싸여 비래염분 생성이 많지 않은 경우 △, 그리고 북서쪽에 바다가 존재하지 않는 경우는 ×로 구분하였다.

이상으로 보아, 해상교량으로 날아 들어오는 비래염분량을 효과적으로 추정하기 위해서는 교량을 기준으로 북서 방향쪽에 비래염분이 발생하는 시점 존재 및 거리, 발생량 혹은 비래염분이 날아 들어오는데 지장을 주는 장애물이 있는지를 파악하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

3.3 해상교량의 높이별 비래염분량 분석

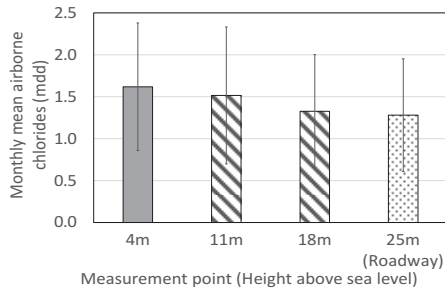
9개 해상교량의 높이에 따른 비래염분량을 분석하였다. 여기에서는 제설염분에 의한 대기중 염분량 증가분을 배제하고 높이에 따른 비래염분량만을 분석하기 위하여 기상청에 강설 일수가 기록되어 제설제가 살포된 기간(거북선대교, 돌산대교: 12월~3월, 영종대교, 목포대교, 고군산대교: 11월~3월)의 염분량 데이터는 제외하였다.

남해안에 위치한 5개 교량의 높이별 비래염분량 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 모든 교량에서 해수면에서부터 높이가 높아질수록 비래염분량은 감소했다. 파도에 의해 발생하는 해염입자는 바람에 의해 이동하며, 따라서 비래염분량은 해수면에서 가까운 주탑하단에서 가장 높게 측정되고 주탑상부

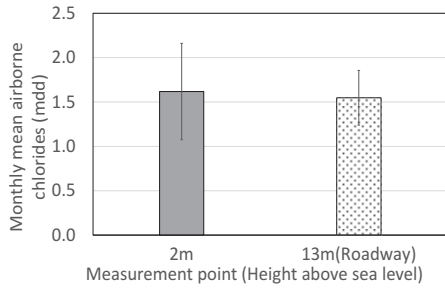
로 올라갈수록 낮은 값을 나타내었다. A군에 속하는 거북선대교와 돌산대교, 노량대교는 전체적인 경향은 높이가 높아질수록 비래염분량은 감소하지만 그 차이는 크지 않고 특히 노량대교는 높이 150 m의 최상단에서도 높이 5 m와 차이가 거의 없는 특징을 보인다. A군 교량들은 교각하단 기준 비래염분량이 2.0 mdd 이하로 낮은 값을 나타냈으며 특히, 노량대교의 경우 1.5 mdd보다 낮은 값으로 나타났다. B군에 속하는 거금대교와 소록대교도 높이가 높을수록 비래염분량은 감소하는 경향은 일치하지만 그 차이가 뚜렷이 나타나고, A군 교량보다 모든 높이에서 높은 염분량을 보이며, 교각하단 기준 비래염분량이 4.0 mdd로 높은 값을 나타내었다.

Fig. 6에 서해안에 위치한 4개 교량의 높이별 비래염분량 분포를 나타내었다. 서해대교와 고군산대교는 해수면으로부터 높이가 높아짐에 따라 비래염분량이 감소하는 경향이 남해안의 B군 교량과 유사하였으나, 영종대교와 목포대교는 높이에 따라 상대적으로 차이가 적게 나타났다. 또한 교각하단부 기준 비래염분량이 영종대교는 1.0 mdd 이하, 서해대교와 목포대교는 2.0~4.0 mdd, 고군산대교는 4.0 mdd 이상으로 측정되었다.

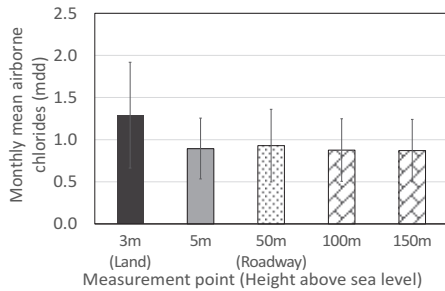
영종대교와 노량대교의 경우는 교각 하단부의 비래염분량이 각각 1.0과 1.5 mdd 이하로 4구간에 해당되고, 다른 교량들과 달리 독특한 비래염분 환경을 가진 교량으로서 높이에 따른 비래염분량 양상이 다른 교량들과는 다르게 나타났다. 높이에 따라 비래염분량이 감소하는 다른 교량들과 달리, 영종대교는 높이 50 m까지는 증가하다가 주탑 최상층에서는 크게 감소하는 경향을 보이며, 노량대교는 높이에 따른 비래염분량의 차이가 크게 나지 않는다. 일반적으로 해안가에서 비래염분량은 해수면에 가까운 높이일수록 높다고 보고되었는데 (Sasaki et al., 2016, Yamada et al., 1998), 영종대교와 노량대교의 경우에는 이러한 경향을 따르지 않았다. Yamada et al.,(1998)은 풍속에 따른 초기발생 염분량과 해염입자의 반경에 따른 초기 침강속도, 장애물에 의한 차폐정도가 높이에 따른 대기중 비래염분량에 영향을 미친다고 분석하였다.



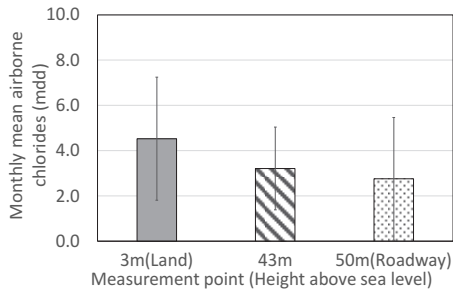
(a) Geobukseon brg.



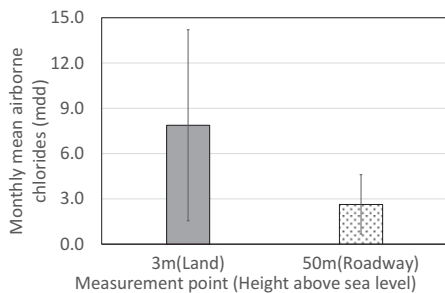
(b) Dolsan brg.



(c) Noryang brg.

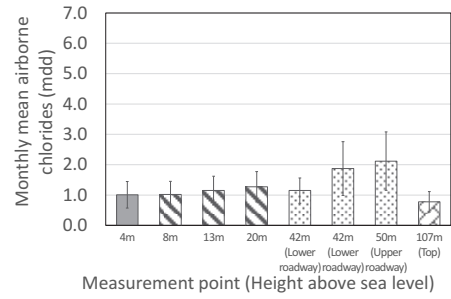


(d) Geogum brg.

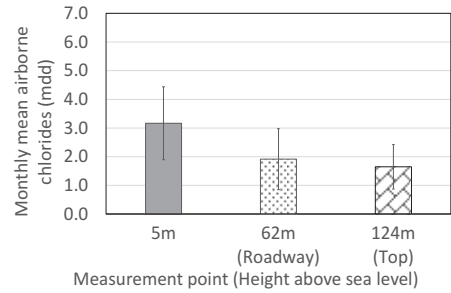


(e) Sorok brg.

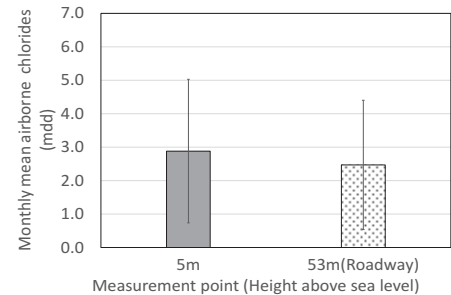
Fig. 5 Average airborne chlorides according to the height of offshore bridges located in the Southern coast



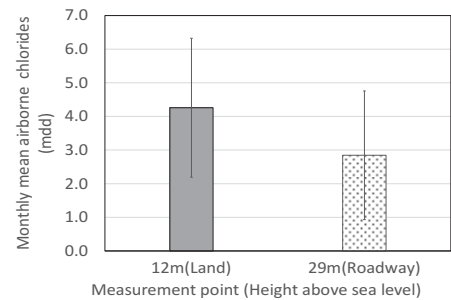
(a) Youngjong brg.



(b) Seohae brg.



(c) Mokpo brg.



(d) Gogunsan brg.

Fig. 6 Average airborne chlorides according to the height of offshore bridges located on the Western coast

발생 염분량이 매우 작은 경우 해염입자의 반경도 작아지고 무게도 가벼워지는데, 영종대교의 경우, 3.2절에서 설명한 바와 같이 주위에 뿔이 형성되어 있고 수심이 낮아 파도의 발생량이 적어 초기발생 비래염분량 자체가 적고, 해염입자가 매우 작을 것으로 추정된다. 실제 파도에 의해 가장 많은 비래염분이 도달하는 교각하단부에서의 비래염분량도 약 1.0 mdd로서 매우 적은 양을 나타내고 있다. 이와 같이 해수면과 인접

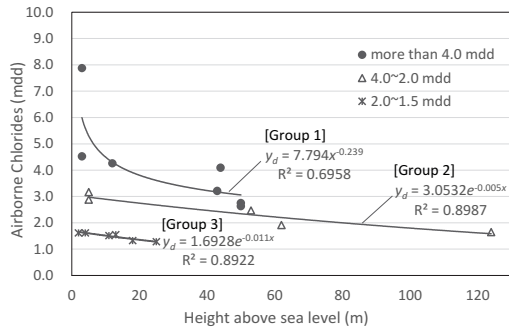


Fig. 7 Reduction of airborne chlorides according to the height above sea level

한 높이에서 비래염분량이 1.0 mdd 전후로 매우 적게 나타나는 경우는 높이에 따라 비래염분량이 감소하는 경향이 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

이상의 분석으로 볼 때, 해상교량의 높이별 비래염분 감소 경향은 교각 하단부의 비래염분량에 크게 좌우되는 것으로 판단된다. 이에, 교각 하단부 기준 비래염분량에 따라 4.0 mdd 이상(1구간), 4.0 ~ 2.0 mdd(2구간), 2.0 ~ 1.5 mdd(3구간), 1.5 mdd 미만(4구간)의 총 4개의 구간으로 나눌 수 있다. 이 중 1.5 mdd 미만의 환경을 제외하고 상기의 데이터를 기반으로 해상 높이에 따른 비래염분량 감소량에 대한 열화환경 모델을 Fig. 7에 나타내었다. 3구간(2.0 ~ 1.5 mdd)인 거북선대교와 돌산대교의 데이터로 도출해낸 비래염분 감소식은 식 (1), 2구간(4.0 ~ 2.0 mdd)인 서해대교와 목포대교의 비래염분 감소식은 식 (2), 1구간(4.0 mdd 이상)인 거금대교와 소록대교, 고군산대교의 비래염분 감소식은 식 (3)과 같다.

$$y_d = 1.6928e^{-0.011x} \quad (1)$$

$$y_d = 3.0532e^{-0.005x} \quad (2)$$

$$y_d = 7.794x^{-0.239} \quad (3)$$

여기에서 x : 높이(m), y_d : 높이(x)에서의 비래염분량(mdd)이다.

이들의 높이에 대한 감소율을 Fig. 8에 나타내었으며, 이는 3개의 열화환경 모델의 감소율에 대한 직접적인 비교를 위해 교각 높이에 따른 비래염분량의 감소량을 감소율로 환산하여 나타낸 것이다. 이 중 Fig. 7에서와 같이 2구간과 3구간은 감소선의 기울기가 유사하여 그 감소율에 차이가 없는 것으로 간주되므로 Fig. 8에서는 이 두 구간을 한 개의 모델로 나타내었다. 결과, 비래염분량이 4.0 mdd 이상인 모델은 높이 약 40~60 m까지는 급격히 감소하다가 그 이후에는 감소율이 완만해지는 양상을 보인다. 4.0 ~ 1.5 mdd인 모델에서는 감소율이 완만해지지 않고 계속 감소하는 경향을 보이며 높이 100 m 전후에

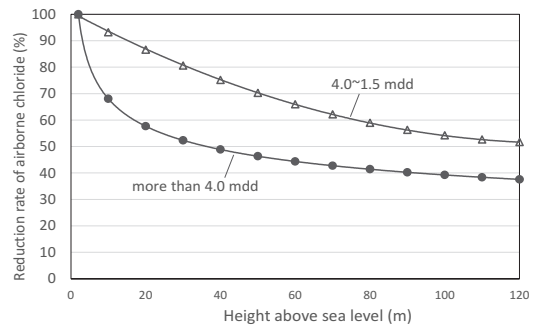


Fig. 8 Decreasing rate of airborne chlorides according to the height above sea level

서는 1구간의 감소율과 유사한 결과가 나타났다. 단, 이 결과에서 3구간은 비래염분량을 측정할 최대 높이가 25 m 이하의 데이터만으로 예측한 결과로 한정되며, 더 높은 높이에서는 2구간에 비해 감소율이 적어질 여지가 있다고 보여진다.

4. 결론

본 연구에서는 해상교량의 월별, 높이별 비래염분량 분포를 파악하기 위하여, 남해안과 서해안의 9개 해상교량을 대상으로 높이별로 1년 동안 비래염분량을 조사하여 월별, 높이별 특성을 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 월별 비래염분 분포는 남해안 교량의 경우 0.3 ~ 17.4 mdd, 서해안 교량의 경우 0.4 ~ 19.0 mdd로 분포하였으며, 특수한 지형적 위치에 있는 교량을 제외하면 남해안이 서해안보다 여름과 겨울철 모두 낮게 나타났다.
- 2) 남해안과 서해안 해상교량의 월별 비래염분은 겨울철 북서풍의 영향으로 모두 여름철보다는 겨울철에 높게 나타났는데, 겨울철 남해안과 서해안의 비래염분량 편차는 각각 15.1 mdd와 17.4 mdd이며, 여름철은 각각 2.6 mdd와 4.9 mdd이며, 이와 더불어 지역적 편차도 나타났다. 여름철보다 겨울철에 비래염분량이 높게 나타나는 이유는 강한 북서계절풍이 많은 비래염분을 발생시켜 멀리까지 이동시키기 때문으로 생각되며, 또한 여름철 잦은 강우로 인하여 대기중의 염분이 씻겨내려가는 영향과 더불어 측정 기간 동안 태풍이 지나가지 않은 영향도 있다고 판단된다.
- 3) 비래염분량에 영향을 미치는 지형적 특징으로는 비래염분의 발생지점 존재 및 거리, 발생량, 장애물이 중요한 역할을 하는 것으로 판단되며, 이에 따라 같은 해역이라도 지형적 위치에 따라서 높이별 경향도 크게 차이가 평균 3.0 mdd, 최고 19.0 mdd까지 발생하였다.
- 4) 남해안의 교량들 중 교량의 북서쪽에 바다가 있는 곳에 위치한 교량들은 그렇지 않은 교량들과 비교하여 비래염분량이 높게 측정되었고, 높이에 따른 감소율도 더 크

게 나타났으며, 서해안의 교량들 중에서는 북서쪽에 장애물이 없는 고군산대교가 서해안의 다른 교량들과 비교하여 모든 높이에서 가장 큰 비래염분량이 나타났다.

- 5) 교량 높이에 따른 비래염분 감소경향을 분석한 결과, 교각 하단부 기준 비래염분량으로 4.0 mdd 이상(1구간), 4.0~2.0 mdd(2구간), 2.0~1.5 mdd(3구간), 1.5 mdd 미만(4구간)의 4구간으로 분류하였으며, 각 구간별로 감소모형을 도출하였다.
- 6) 본 연구에서 획득된 자료는 해상교량의 비래염분에 의한 염해환경에서 상대적으로 안전한 구간과 열악한 환경구간을 구분하여 열악한 곳에 집중적인 유지관리 활동을 가능하게 할 것으로 판단되며, 또한 “시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)_교량편(MOLIT, 2021)”에서 열해환경의 내구성 평가항목 중 해상높이에 따른 환경평가 항목의 신설에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 2022-0217-001, DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발).

References

1. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2006), Long Term Measurement of Airborne Chlorides and Durability of Concrete Mixed with Sea Sand, 1-134.
2. Korea Meteorological Administration (KMA) (2018), Analysis Report of Typhoon Affecting the Korean Peninsula in 2017, Sejong, 1-54.
3. Lee, J. S., Ahn, K. H., Kim, D. G., and Park, J. J. (2010), Distribution Properties of Airborne Chlorides in Korea, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(6), 769-776.

4. Lee, J. S., and An, G. H. (2012) Penetration Properties of Airborne Chlorides on Concrete Exposed in Marine Environment. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(5), 553-558.
5. Meira, G. R., Andrade, C., Alonso, C., Borba Jr., J. C., and Padilha Jr., M. (2010), Durability of Concrete Structures in Marine Atmosphere Zones-The Use of Chloride Deposition Rate on the Wet Candle as an Environmental Indicator, *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 427-435.
6. Min, J., and Lee, J. S. (2021), Correlation Analysis between Airborne and Penetrated Chlorides into Concrete on the West Coast of Korea, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 3(1), 3-9.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2021), Detailed Guidelines for Safety and Maintenance of Facilities (Performance Evaluation), Sejong, 1-150.
8. National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) (2009), Research on highway bridges management - Bridge Management System (BMS) -, Technical note of National Institute for Land and Infrastructure Management, NILIM, No.523, 1-75.
9. Public Works Research Institute (PWRI) (1993), Nation-wide Investigation on Air-borne Chloride(4) -Relationship between Geographical Distribution of Air-borne Chloride and Wind -, PWRI, Tsukuba, 1-50.
10. Sakihara, K., Higa, K., and Yamada, Y. (2014), Basic Study on Estimation of Airborne Chlorides Transportation in the Main Island of Okinawa, *Japan Concrete Journal*, Japan Concrete Institute, 36(1), 970-975.
11. Sasaki, I., Sakuraba, H., and NiShizaki, I. (2016), Airborne Chlorides Distribution of Offshore structures, *Proceedings of 71st JSCE Symposium*, Japan Society of Civil Engineers, Japan Society of Civil Engineers, Sendai, 781-782.
12. Uda, T., Omata, A., and Konishi, M. (1992), Computational Model of Airborne Chlorides from Seashore, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. Be(Coastal Engineering)*, Japan Society of Civil Engineers, 39, 1051-1055.
13. Yamada, Y., Oshiro, T., and Masuda, Y. (1998), Analytical Study on Air Born Chloride-ions near Coastal Area, *Journal of Structural and Construction Engineering*, Architectural institute of Japan, 514, 21-26.

Received : 03/14/2022

Revised : 03/28/2022

Accepted : 04/26/2022

요 지 : 본 연구에서는 해상교량에서 해수와 직접 접하지 않은 부재로 날아 들어오는 비래염분 분포를 월별, 높이별로 파악하였다. 이를 위하여 한국의 남해안과 서해안의 9개 해상교량을 대상으로 다양한 높이에서 1년 동안 비래염분량을 측정하여 분석하였다. 그 결과, 측정된 월에 따라서는 서해안과 남해안 모두 겨울철 북서 계절풍의 풍향과 강한 풍속의 영향으로 겨울철(11월~2월)의 비래염분량이 크게 증가하였고 그 차이는 서해안이 더 크게 나타났다. 높이별로는 해수면에서 높아질수록 비래염분량이 감소하는 경향을 나타내었으며, 감소 경향에 따라 주탑 하단의 비래염분량을 기준으로 총 3개의 구간으로 분류하여 비래염분량 감소식을 도출하였다. 각 구간에 따른 감소경향 차이는 해역별로, 동일 해역내에서도 국부적인 지형적 특징에 따라 다르게 나타났다. 따라서 해상교량의 유지관리를 위한 비래염분자료 수립을 위해서는 해역별 특징과 함께, 그 주변의 국부적인 지형적 특징도 고려하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과로서, 해상 교량의 비래염분 염해환경에 대하여 안전한 구간과 열악한 구간을 구분할 수 있을 것으로 판단되며, 시설물 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가)_교량편의 열해환경 평가항목의 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 비래염분, 해상교량, 교량높이, 지형특성, 비래염분 감소율