

해역 및 지역에 따른 해안가 대기중 염분량의 계절적 변동

정자혜*, 이종석**

Jung, Jahe*, Lee, Jong-Suk**

Seasonal Variation of Airborne Chlorides in Coast by Sea Area and Region, South Korea

ABSTRACT

The first survey of the airborne chlorides along the nationwide coast of South Korea was conducted 18 years ago, and the area index of coastal airborne chlorides and salt attack environmental rating are being utilized in the design, construction, and maintenance of domestic structures. However, due to environmental changes such as climate change and coastal topography changes, changes of airborne chlorides along the coast are expected to occur regionally and by sea area. Therefore, the second survey has been conducted since 2021. In this paper, we analyzed the seasonal variations of airborne chlorides along the coast by region and sea area for one year of the second survey. Additionally, we compared the results with the survey results of Japan's coastal airborne chlorides, which is located close to South Korea and has a similar climate, to increase the objectivity of the analysis. The average airborne chlorides in the second survey was highest on the west coast, and the seasonal variation was also the largest on the west coast. Looking at the seasonal variations by sea area, the East Sea had high airborne chlorides in the summer and autumn, the West Sea in the autumn and winter, and the South Sea in the summer. In addition, compared to the first survey, all sea areas showed short periods of significantly higher coastal salinity and clearer seasonal variations.

Keywords : Seasonal variation of airborne chlorides, Salt attack, In-situ measurement

초 록

우리나라의 전국 해안가 대기중 염분량 1차 조사는 2003년에 3년 동안 실시되었으며, 그 결과인 해안가 비래염분 지역계수 및 염해환경 등급은 국내 구조물의 설계/시공/유지관리에 반영되어 활용되고 있다. 그러나 그 동안 기후 변화와 해안가 지형 변화 등에 의한 환경변화로 지역별, 해역별 해안가 대기중 염분량에도 변화가 예상되어 2021년부터 2차 조사를 실시 중이다. 본 논문에서는 2차 조사의 1년 동안의 지역별, 해역별로 해안가 대기중 염분량의 계절적 변동에 대한 특징을 분석하였다. 또한 우리나라와 가까이 위치해 있고, 기후가 비슷한 일본의 해안가 비래염분량 조사 결과와 비교하여 분석 결과의 객관성을 높이고자 하였다. 2차 조사 결과 평균 비래염분량은 서해안이 가장 높았으며, 계절적 변동 또한 서해안이 가장 크게 나타났다. 해역별 계절적 변동을 보면, 동해안은 여름과 가을철에, 서해안은 가을과 겨울철에, 남해안은 여름에 비래염분량이 높게 나타났으며, 1차 조사에 비해 모든 해역에서 비래염분량이 월등히 높은 기간이 짧게 나타나 계절적 변동이 더 뚜렷하게 나타났다.

검색어 : 비래염분량의 계절적 변동, 염해, 현지 측정

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (KICT · jhjung@kict.re.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원 (Corresponding Author · KICT · jslee@kict.re.kr)

Received May 4, 2023/ revised July 10, 2023/ accepted July 18, 2023

1. 서론

바다로부터 불어오는 바람이나 파도로 인한 비말에 의해 이동하는 비래염분 중에는 강재의 부식을 촉진시키는 인자인 염화(Cl) 이온이 포함되어 있다. 이로 인해 비래염분량이 높은 지역에서는 콘크리트 구조물의 염해나 강재의 현저한 열화가 발생한다. 이에 대한 유지관리 대책 마련을 위하여 국내에서는 2003년 7월~2006년 6월까지 총 3년 동안 비래염분 전국조사(KICT, 2006) (이하 1차 조사)를 실시하였으며, 이 연구결과는 국내 구조물의 기준/시방/점검지침 등에 활용되고 있다. Jung and Lee(2022)에 따르면 “시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)(MOLIT, 2021)”에서는 해안거리별 비래염분 환경 기준을 제시하고 있으며, “무도장내후성 강교량 적용 지침(Korean Society of Steel Construction, 2019)”에서는 지역별로 비래염분량 0.5 mg/100 cm²/day로 추정되는 해안선으로부터의 거리를 수록하여 필요 시 참고하도록 하고 있다. 또한 “항만 및 어항 설계기준(재료편)(MOF, 2023)”에서는 지역별 비래염분의 지역계수를 제시하여 특수환경에 노출되는 콘크리트 구조물의 경우 최소 피복두께의 규정에 비래염분 환경을 활용하도록 하고 있다. 이때, 동해안의 경우, 해안으로부터 거리 250m 이내, 서해안, 남해안의 경우 지역계수 2mdd를 초과하는 경우는 해안으로부터 250m 이내, 지역계수 2mdd 이하인 지역은 해안으로부터 100m 이내의 지역을 특수환경으로 규정하고 있다.

지리적·기상학적으로 우리나라와 유사한 일본에서는 1980년대 오키나와와 해안 지역에 위치한 도로교의 철근 콘크리트와 PC 부재에 손상이 다수 확인되어, 건설성 토목연구소(이하 PWRI)가 중심이 되어 1982년에 관계 기관에 의해 전국규모의 비래염분량 조사를 수행하였다(JARA, 1984). 이를 토대로 하여 일본에서는 처음으로 염해대책을 위해 도로교의 염해대책지침(안)·동해설(1984)을 일본도로협회(JARA)에서 발간하였다. 여기에서는 일본의 남북으로 긴 지형과 기상 특성 등을 고려하여 지역과 해안선으로부터 거리를 유효인자로 보고, 이에 따라 일본 해안가 전체를 3개의 지역으로 분류하여 대책을 제시하였다. 이후 PWRI(1993)에서는 비래염분 조사를 확대하여 1984년 12월부터 1987년 11월까지, 총 3년 동안 전국 266개 지점에서 “비래염분량 전국조사”를 실시하였다. 그 결과는 도로교 시방서·동해설(JARA, 2017)의 III. 콘크리트편과 IV. 하부구조편에 반영되어 염해 정도에 따라 4개의 지역 및 해안으로부터의 거리의 구분에 따라 콘크리트의 최소 피복두께를 정하도록 규정하고 있다.

이렇게 비래염분은 국내·외에서 구조물의 설계, 시공, 유지관리 분야에서 중요한 열화요인으로 취급되고 있는데, 국내에서는 1차 조사 이후 18년이 지난 현재, 그 사이 기후변화와 해안지형 변화

등에 따라 각 지역에서 측정되는 비래염분량에서도 변화가 있을 것으로 예상, 재조사하여 업데이트할 필요가 있다고 판단하였다. 본 연구에서는 1차 조사와 동일한 지역에서 1년 동안 측정된 비래염분량의 계절적 변동을 조사한 결과를 검토하였고, 이와 함께 우리나라와의 계절별 비래염분량 특징과의 비교를 위해 일본의 각 해역에 대한 비래염분량의 계절별 변동특성을 함께 기술하였다.

2. 해안가 비래염분 측정 개요

2.1 측정 지점 및 기간

국내 해안가 비래염분량을 측정하기 위해 동해안과 서해안, 남해안의 해역을 구분하여 각 해역별로 지역을 나누어 총 44개의 비래염분 포집장치를 설치하였다. 설치 위치는 Fig. 1과 같다. 동해안은 고성, 속초, 주문진, 삼척, 울진, 영덕, 포항, 울산, 부산의 9개 지역에, 서해안은 강화, 인천, 아산만, 태안, 천수만, 보령, 변산, 고창, 함평, 목포의 10개 지역에, 남해안은 해남, 장흥, 고흥, 광양, 사천, 마산, 거제, 진해의 8개 지역에 설치하였다. 이때 각 해역별 지역과 지역 사이의 거리는 약 50km이다. 지역별로 측정할 것과 더불어 해안으로부터 거리에 따른 비래염분량의 변화를 측정하기 위해 각 해역당 1개의 지역에서는 해안으로부터 거리에 따라 6-7개 지점에 포집장치를 설치하였다. 남해안의 장흥은 해안으로부터 거리 30, 100, 200, 500, 1000, 2000m의 6개 지점에, 동해안의 속초와 서해안의 고창은 앞의 6개 지점과 더불어 5000m에서 측정하여 각 7개 지점에서 측정하였다. 이들 측정지점의 데이터 중 해역별 해안으로부터 거리에 따라 측정된 데이터는 분석에서 제외하였다. 지역별로 해안가에 설치한 염분포집장치는 전면에 장애물이 없는 곳에 해안가를 마주보고 설치하였다. 거리별로 설치한 지역 중 해안으로부터 먼 지점에서는 위치에 따라 나무나 건물 등으로 가리는 위치를 피하여 설치하여 최대한 장애물에 대한 영향을 최소화하였다.

조사 기간은 2021년 7월~2022년 6월까지 1년 동안 수행하였으며, 매월 1회, 1개월간의 누적 비래염분량을 측정하였다.

2.2 염분량 분석

비래염분량을 측정하기 위한 염분포집장치와 분석방법은 선행 연구(Moon and Lee, 2004; Lee et al., 2010)를 따랐다. 포집기의 개략적인 형상은 포집면적이 100 mm × 100 mm × 100 mm이고, 박스 내부에는 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(2m)에서 빗물 등 외기환경의 영향을 최소화 하면서 정량적인 포집이 이루어질 수 있도록 구성하였다. 해안가

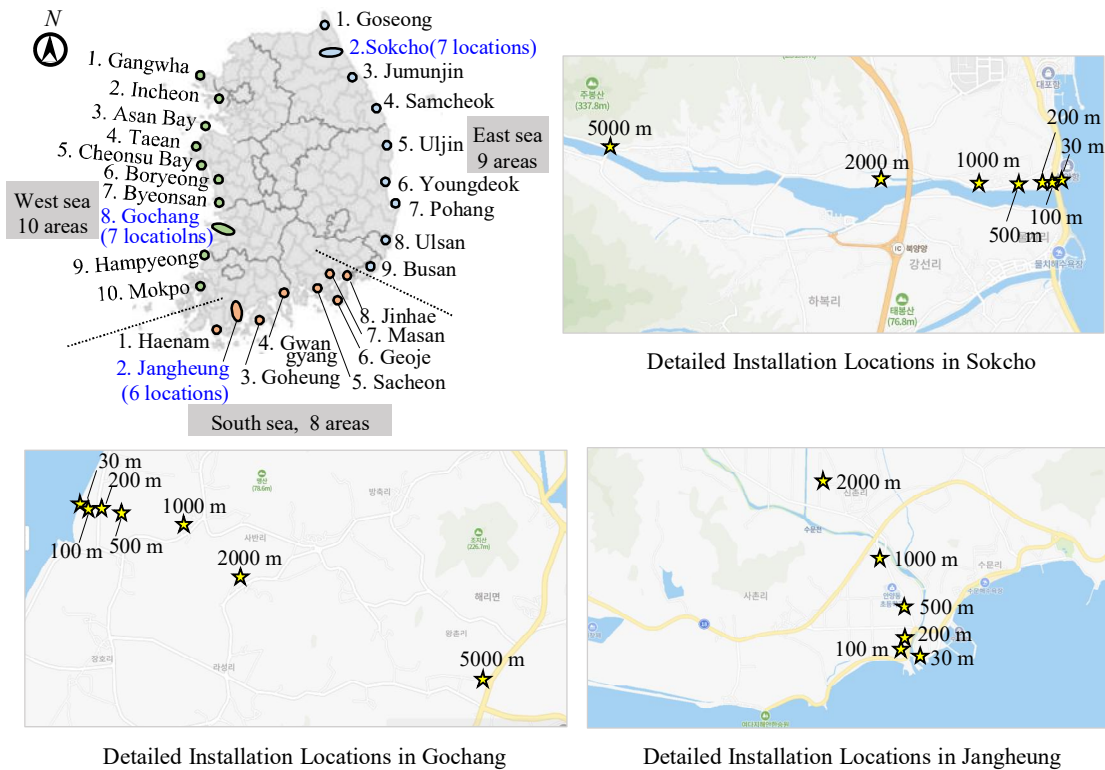


Fig. 1. The Installation Locations of Salinity Measurement Devices

대기중 비래염분량은 해안으로부터 거리와 지면으로부터 높이에 따라 분포량이 다르므로 염분포집장치의 측정 높이는 1차 전국조사 (2003년-2006년)에서 측정되었던 높이인 2m로 동일하게 설정하였으며, 또한 지면과의 마찰력에 의하여 바람의 강도가 약해지는 것을 방지하면서 설치 및 시료 샘플링의 편의성을 도모하였다. 본 연구를 위해 설치한 염분포집기의 개략도와 설치 사진은 Fig 2와 같다.

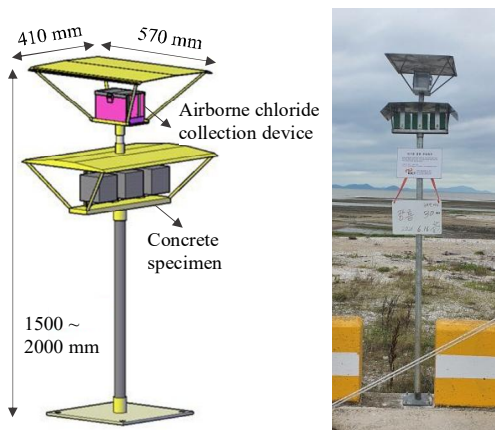


Fig. 2. The Salinity Measurement Devices

비래염분 포집에 사용되는 거즈는 의료용 거즈를 한달에 한번 회수하여 증류수에 1일 동안 침지하여 불순물을 제거한 후 사용하였으며, 1개월간의 포집이 끝난 거즈시료는 500 g 증류수가 담긴 비이커에 넣고 잘 저어 3시간 이상 방치한 후 약 5분 간격으로 3회 이상 휘저어준 다음 질산에 의한 침전 적정법을 사용하여 염화물을 측정하였다(Lee et al., 2010). 측정된 비래염분량은 100 mm × 100 mm의 면적에 한달 동안 누적된 NaCl 염분량이며, 이를 표시하는 단위는 KS D ISO9225(KSA, 2012)의 부속서 E 규정을 활용하여, 한달 동안의 비래염분량을 일수로 나눈 일평균 비래염분량인 mg/100 cm²/day(이하 mdd)를 사용하였다.

국내의 비래염분 1차 조사는 2차 조사가 시작된 날로부터 18년 전인 2003년에 실시되었다. 측정 위치는 기본적으로 2차 조사 지점과 동일하나, 해안가 방풍림 조성과 사유지 개발, 해안선 변동 등으로 인해 동일 지역내에서 조사지점이 이동된 지역도 있다.

2.3 일본의 비래염분 측정 개요

일본은 지리적으로는 우리나라와 비슷한 위치에 있고, 동해를 우리나라와 공유하며, 기후적으로는 겨울은 시베리아에서 북서풍이 강하게 불고, 여름은 남쪽에서 바람이 불며, 태풍이 오는 시기가 유사한 점 등, 대기중 비래염분량에 영향을 미치는 지리와 기후가

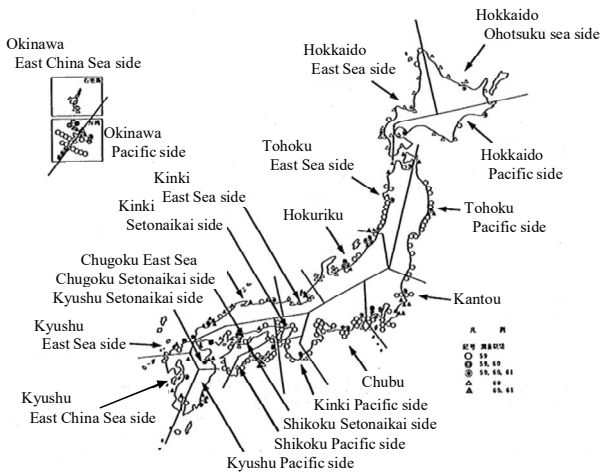


Fig. 3. Installation Locations of Salinity Measurement Devices and Area Dividing (Modified after PWRI, 1988)

유사한 점이 많다. 따라서 우리나라 보다 앞서 비래염분량 전국조사를 실시한 일본의 측정 결과를 살펴보고, 우리나라와의 측정 결과와 비교함으로써 분석결과에 객관성을 더하였다. 일본은 1984년 12월~1987년 11월까지, 지점에 따라 1년~3년 동안 비래염분량 전국조사를 수행하였다. 조사지점과 지역구분은 Fig 3과 같으며 총 266개 지점을 구축하였다. 지역구분은 북쪽의 홋카이도부터 남쪽의 오키나와 까지 21개 지역으로 구분하였다. 이때 일본의 동해는 우리나라 기준 동해(East Sea)를 의미한다.

3. 분석 결과

3.1 지역별 비래염분량의 계절 변동

분석에 사용된 데이터는 구축지점에서 측정된 실데이터이며, 측정지점은 대부분 해안으로부터 거리 90~100 m 사이에 위치하며, 예외로 서해안의 목포와 남해안의 진해는 측정하고자 하는 거리에 위치한 지점에 접근이 불가하여 각각 50m, 40m 지점에서 측정하였다. 이들 지점은 다른 지역보다 해안에 가까우나 측정 기간내 각 해역의 다른 지역들에 비해 낮은 측정값이 나타났으며 각 지점에서 계절별 변동도 크지 않아 분석결과에는 별다른 영향을 미치지 않았다.

3.1.1 동해안 지역

Fig. 4를 보면, 동해안의 모든 지역에서 측정된 비래염분량은 0.4~34.9 mdd의 값으로 분포하고 있고, 이들의 평균값은 3.4 mdd이다. 계절별로 보면 6월~10월, 즉 여름과 가을철에 비래염분량이 높은 지역이 많고 그 외의 계절에는 지역별로 크게 차이나지 않는다. 동해안에서 여름과 가을철 가장 높은 지역은 9월의

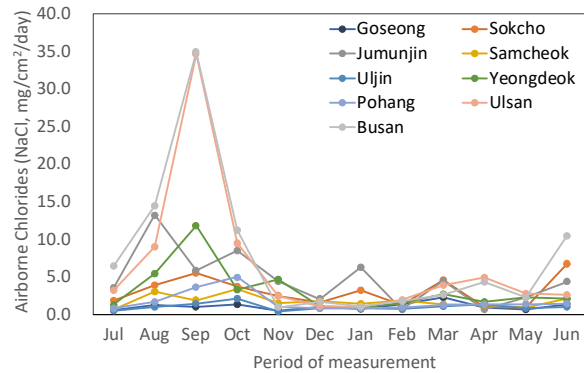


Fig. 4. Monthly Variation of Airborne Chlorides of at Each Measurement Location in Eastern Coast

부산이며, 비래염분량은 34.9 mdd까지 나타났다. 이 시기에 부산에서 비래염분량이 높은 이유는 태풍 “찬투(CHANTHU)”가 원인이라고 판단된다. 2021년 한반도 영향태풍 분석보고서(KMA, 2022)에 따르면, 찬투는 2021년 9월 7일에 괌에서 발생하여 18일에 일본에 상륙한 태풍으로, 우리나라에는 9월 13~17일까지 약 4일 동안 영향을 주었다. 이 태풍은 제주도보다 아래로 지나 우리나라를 통과하지는 않았으나, 이로 인해 제주도와 전라남도, 경상남도, 울산지역의 해안에 태풍경보와 태풍주의보가 발효되었다. 우리나라에 영향을 준 시기의 태풍의 최대풍속은 21~43 m/s, 강풍반경은 160~280 km, 폭풍반경은 40~100 km이며, 이때의 풍향은 북동풍과 북북동풍이 전체 풍향의 99%를 차지하고 있다. 제주도 아래로 통과하여 부산과는 거리가 있었지만, 강한 풍속과, 큰 강풍반경 및 폭풍반경, 그리고, 북동풍 계열의 풍향 등의 영향으로 9월에 부산지역의 비래염분량이 증가한 것으로 판단된다. 9월에는 근처인 울산도 34.6 mdd로 1년 중 가장 높아, 이 또한 태풍의 영향으로 판단된다. 한편 울산으로부터 북쪽으로 약 50 km 이상 떨어져 태풍의 폭풍반경에는 포함되지 않지만 강풍반경에는 포함되는 방향의 경우, 9월의 비래염분량은 3.6 mdd로 10월의 4.9 mdd 보다도 낮게 나타났다. 따라서 태풍의 폭풍반경이 비래염분량의 변동에 영향을 미친다고 판단된다. 또한 이는 태풍이 우리나라에 상륙하지 않고 지나가더라도 규모가 크다면 해안가 대기중 비래염분량이 증가할 수 있다는 것을 시사하고 있다.

동해안의 지역 중 1년 중 가장 낮은 값을 나타낸 지역은 부산이며 11월에 1.0 mdd로 측정되었다. 동해안의 겨울과 봄철의 경우, 주문진 지역의 1월달 비래염분량이 6.2 mdd로 가장 높은 값을 나타내었으며, 고성과 주문진이 각각 5월과 2월에 0.6 mdd로 가장 낮은 값을 나타내었다. 1년 동안 동해안의 지역별 평균 비래염분량은 울산이 6.4 mdd로 가장 높고, 울진이 1.0 mdd로 가장 낮았다.

3.1.2 서해안 지역

Fig 5에 서해안의 지역에서 측정된 비래염분량을 나타내었으며, 그 값은 0.3~70.0 mdd로 분포하고 있고, 이들의 평균값은 3.6 mdd이다. 계절별로 보면 10~12월, 즉 가을과 겨울철에 비래염분량이 높은 지역이 많고, 해당 지역 외에는 계절별 차이는 크게 나타나지 않는다. 서해안에서 가을과 겨울철 비래염분량이 가장 높은 지역은 11월의 고창으로 70.0 mdd이며 가장 낮은 지역은 12월의 목포로 0.6 mdd으로 측정되었다. 고창이 11월에 비래염분량이 높은 이유는 풍속 및 풍향과 관련이 있는 것으로 보인다. 이전 연구(Jeon et al., 2022; PWRI, 1993)에서 대기중 비래염분량의 계절변동은 최대순간풍속(maximum instantaneous wind speed) 또는 최대풍속(maximum wind speed)과 대체적으로 비례하는 경향이 있다고 보고되어 있다. 기상청의 기상자료개방포털 데이터의 자료(KMA, 2023)를 이용하여 2021년 7월~2022년 6월 사이 고창지역의 월 최대풍속과 그때의 풍향, 월 최대순간풍속과

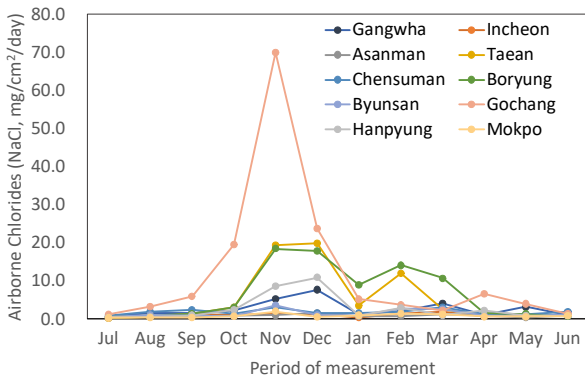


Fig. 5. Monthly Variation of Airborne Chlorides of at Each Measurement Location in Western Coast

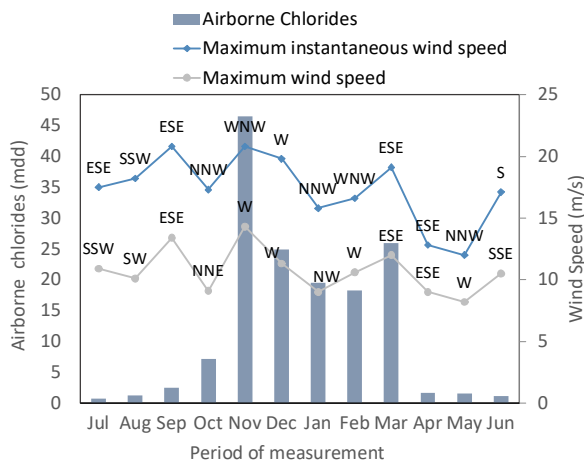


Fig. 6. Relationship between Seasonal Variety of Airborne Chlorides and Wind Environment in Gochang

그때의 풍향, 그리고 측정 비래염분량을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6을 보면, 고창 지역에서는 비래염분량이 높은 11월에는 최대순간풍속(10분 평균풍속 최댓값)과 최대풍속(1분 평균 풍속 최댓값)이 높고, 또한 그 때의 풍향도 각각 서북서풍과 서풍이 우세하게 나타났다. 고창지역의 경우 해안선이 북서쪽을 향하여 평행하게 형성되어 있어 겨울철 서해안의 주된 풍향(북서풍)을 정면으로 받을 수 있는 국지적 환경을 가지고 있어 상대적으로 높은 비래염분량이 측정되었다고 판단된다. 서해안의 다른 지역들도 이러한 로컬환경을 가지고 있는 경우도 있지만, 특히 고창의 경우는 앞바다에 섬이나 기타 장애물이 전혀 없고 수심이 깊은 환경의 영향인 것으로 판단된다.

한편 비래염분량이 높지 않은 4월~9월에는 최대순간풍속과 최대풍속이 낮거나 또는 풍향이 남풍 또는 동풍계열로 불어 대기염분량 증가에 기여하지 못한 것으로 보인다. 비래염분량이 상대적으로 낮은 봄과 여름철 비래염분량이 가장 높은 지역은 보령으로 이때 비래염분량은 3월에 10.7 mdd이고, 가장 낮은 지역은 목포로 7월에 0.3 mdd이다. 1년 동안 서해안의 지역별 평균 비래염분량은 고창이 12.2 mdd로 가장 높고, 당진과 목포가 0.8 mdd로 가장 낮았다.

3.1.3 남해안 지역

Fig 7에 남해안의 지역에서 측정된 비래염분량을 나타내었으며, 그 값은 0.3~24.7 mdd로 분포하고 있고, 이들의 평균값은 1.3 mdd이다. 계절별로 보면 8월, 즉 여름철에 비래염분량이 높은 지역이 많고, 그 외 계절에는 비슷한 양상을 보인다. 남해안에서 여름철에 비래염분량이 가장 높은 지역은 8월의 거제로 24.7 mdd이며, 동일 기간 가장 낮은 지역은 고흥과 광양으로 0.5 mdd로 측정되었다. 1차 조사 결과(Lee et al., 2010)에서 남해안의 경우는 수심이 얇고 만이 발달하여 비래염분이 발생하기 매우 어려운 조건인 것으로 분석되었다. 그러나 3년간 측정된 1차 조사 결과에서

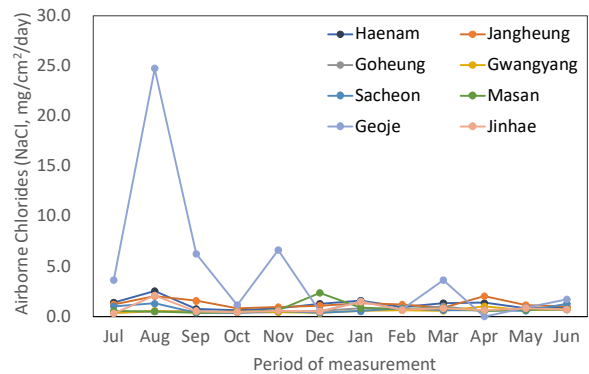


Fig. 7. Monthly Variation of Airborne Chlorides of at Each Measurement Location in Southern Coast

도 거제는 다른 남해안의 지역보다 비래염분량이 높게 측정되었는데, 특히 여름철이 높게 나타났다. 이는 여름철에 부는 남동풍과 태풍에 의해 비래염분이 바다에서 남해안으로 날아 들어와 비래염분량 증가에 기여하였기 때문이다. 2021년 8월에 있었던 태풍 루핏(LUPI)과 오마이스(OMAI)는 남해안에 영향을 주었으며, 특히 오마이스(OMAI)는 거제의 옆에 위치한 경상남도 고성에 상륙하여 포항으로 진출하는 경로를 보이며, 오른쪽에 위치한 거제에 남동풍을 야기시키며 비래염분량의 발생과 이동이 거제로 향하는데 기여를 한 것으로 보인다. 9월 태풍(찬투)의 경우, 북동풍과 동북동풍이 전체 풍향의 99% 이상을 차지하고 있어, 지리상 오른쪽에 바다가 위치한 부산과 울산의 비래염분량 증가에 크게 기여하였지만, 부산과 울산 인근지역임에도 불구하고 남해안의 지역들은 남쪽에 바다가 위치하고 있어 북동풍과 동북동풍의 풍향으로는 해안에서 내륙으로 비래염분의 이동이 용이하지 않기 때문에 남해안 지역들의 비래염분량은 증가하지 않은 것으로 판단된다.

남해안의 평균은 13 mdd로 낮은 값을 보이는데 반해 거제는 47 mdd로 높은 값을 보이는데, 이는 비래염분량이 큰 서해안의 평균인 36 mdd 보다도 높게 나타났다. 이는 일반적인 남해안의 지역은 대부분 수심이 얇고 모래해변으로 이루어져 비래염분의 발생이 적고, 섬이 발생한 염분이 날아들어오는 것을 막는 기립막 역할을 하여 비래염분 포집량이 극히 적은 것에 비해, 거제는 수심이 깊고, 측정 지점 앞에 막힌 장애물이 없고, 앞이 암석해변으로 형성되어 비래염분량의 발생량이 남해안의 지역 중에서는 많았기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 지역별 비래염분량의 특징을 종합해 보면, 서해안은 해안선의 방향이 지역에 따라 차이가 큰데, 겨울철 우세한 북서풍에 의해 비래염분량이 크게 누적될 수 있는 해안선 방향을 가진 지역과 그렇지 않은 지역으로 구분할 수 있다. 동해안은 해안선이 단조로워 지역적 차이가 크지는 않으나, 여름철 태풍의 영향으로 비래염분량이 월등히 높아 계절적 변동이 큰 남부지역(울산, 부산)과 그 외 지역으로 구분할 수 있다. 남해안은 모든 지역에서 높지 않고, 또한 계절적 변동도 크지 않은 특징이 있으나, 거제는 국지적으로 비래염분량이 큰 특징이 있을 뿐만 아니라 여름철 태풍에 의한 영향이 커 태풍의 유무에 따라 비래염분량의 차이가 큰 특징이 있는 것으로 나타났다.

3.2 해역별 비래염분량의 계절적 변동

Fig. 8-10에 해역별 비래염분량을 월별로 표시하였다. 이들 그래프들은 해당 해역의 지역에서 월별 측정된 비래염분량의 평균 값들을 도출한 후, 가장 높게 측정된 달의 값을 100%로 설정하고, 다른 지역들을 상대적인 비율로 표시하였다.

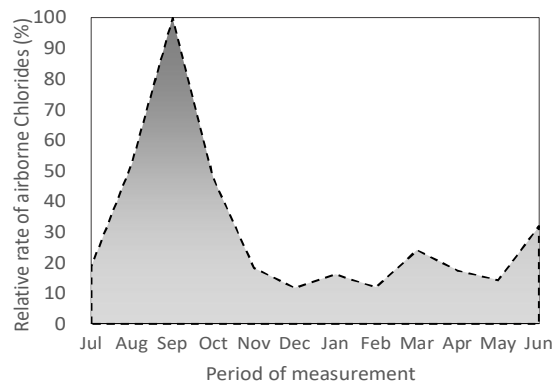


Fig. 8. Seasonal Variation of Airborne Chlorides in Eastern Coast

3.2.1 동해안의 계절적 변동

Fig 8의 동해안의 계절별 비래염분량의 변동을 보면, 6월부터 증가하기 시작하여 9월에 가장 많은 비래염분량을 나타낸 후 11월 까지 급격히 감소하였고, 이후는 크게 차이가 나지 않는 범위에서 증가와 감소가 반복되었다. 즉, 8월-10월에 해당하는 여름과 가을 철에 많은 비래염분량이 나타났고, 겨울과 봄에는 낮게 나타나는 경향이 있었다. 일본의 경우, 일본의 동쪽편의 태평양에 접한 지점의 비래염분량은 여름철이 높게 나타났으며, 연평균 비래염분량은 태풍이 많이 접근한 해와 그렇지 않은 해의 차이가 크게 발생하였다. 이는 우리나라의 동해안과 남해안에서 보이는 특징과 유사하다고 볼 수 있으며, 지리적, 기상학적으로 이들 해역과 유사하기 때문이라고 판단된다.

동해안의 경우, 특히 9월에 비래염분량이 높게 측정되었는데, 이는 해당기간에 제주도와 부산 지역에 영향을 미친 태풍의 영향이라고 판단된다. 이전 연구(Lee et al., 2010)에서 동해안은 여름철에 남풍의 영향으로 비래염분량의 증가가 크게 나타나지 못하였고, 겨울철은 우세풍인 북서풍이 태백산맥의 영향으로 태백산맥의 동편은 서남서 혹은 남서풍으로 작용하여 비래염분량이 낮게 나타나, 계절적 변동이 크게 나타나지 않는 해역이라고 보고하였다. 이러한 일반적인 해역별 특징이 있으나, 우리나라는 여름철과 초가을에 태풍이 있어, 동해안과 남해안은 태풍의 영향으로 일시적으로 비래염분량이 많아지는 경향도 보고하였다(Lee et al., 2010). 따라서 본 연구에서 동해안과 남해안의 여름철 비래염분량이 높은 이유도 계절풍과 함께 태풍의 영향이 있는 것으로 판단된다.

3.2.2 서해안의 계절적 변동

Fig 9의 서해안은, 11월에 최대 비래염분량을 나타낸 후, 1월에 는 11월의 약 10%까지 감소하였다. 이후, 2월에 일시적으로 11월의 30%에 해당될 만큼 소폭으로 증가한 후, 다시 감소하여 10월까지 낮게 나타났다. 11월-12월에 해당하는 늦가을과 초겨울에 많은

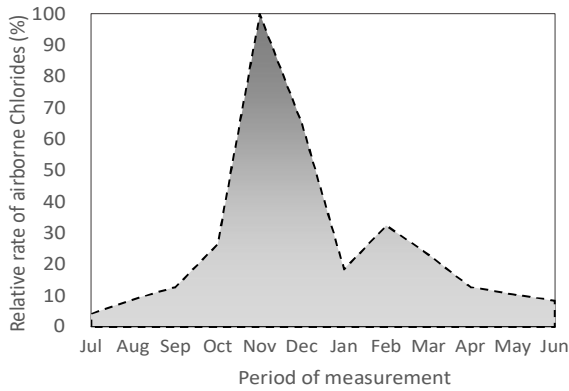


Fig. 9. Seasonal Variation of Airborne Chlorides in Western Coast

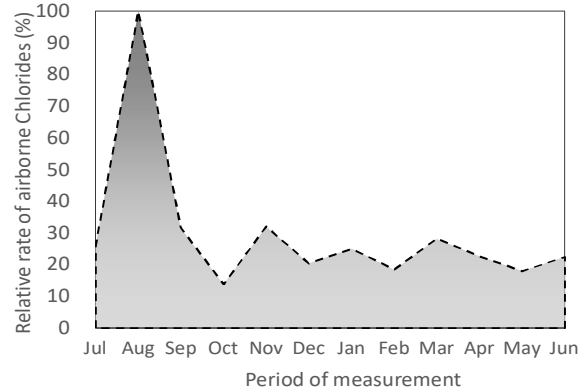


Fig. 10. Seasonal Variation of Airborne Chlorides in Southern Coast

비래염분량이 나타났고, 그 외의 기간에는 낮게 나타나 세 해역들 중에서 계절적 변동이 가장 크게 나타났다. 일본의 경우, 홋카이도와 도호쿠 지역 중 우리나라의 동해(East Sea) 방향으로 해안선이 위치한 지점에서 겨울철에 비래염분량이 높게 측정되었다. 이는 우리나라 서해안에서 측정된 비래염분량의 계절적 변동과 경향이 유사한 것으로, 지리적으로 이 지역은 서쪽에 바다가 위치하고 겨울철에 북서풍이 강하게 부는 등 우리나라의 서해안 지역과 지리적으로 또 기상학적으로 유사하기 때문인 것으로 판단된다.

이렇게 해역별로 비래염분량이 증가하고 감소하는 시기가 다른 것을 이전 연구(Lee et al., 2010)에서는 계절풍에 의한 것으로 분석하고 있다. 서해안에서 겨울철 비래염분량이 높은 이유로 우리나라는 겨울철에 북서풍이 강하게 불기 때문이라고 하였다. 즉, 서해안 지역의 왼쪽에 바다가 위치하고 있어, 발생한 비래염분량이 북서풍에 의해 해안가로 날아 들어와 대기중에 높게 분포하고 있다고 판단된다. 대한민국국가지도집Ⅱ2020(NGII and MOLIT, 2020)과 국립해양조사원(KHOA, 2023)에 따르면, 서해안은 평균 수심 45m, 최대 수심 103m 정도로 수심이 낮고, 전역이 완만하여 대체로 평탄하며, 우리나라와 중국으로부터 유입된 담수의 영향으로 평균 염분이 300-330‰로 낮고, 특히 장마철에는 담수 유입량이 증가하여 표층 해수의 염분은 더욱 낮아진다. 이에 반해 동해안은 상대적으로 깊어 평균수심은 1,684m, 최대수심은 3,762m이며, 염분은 34.0-34.1‰로 높다. 따라서 여름의 서해안 지역이 비래염분량이 낮은 이유는 남동풍이 우세한 이유도 있지만, 평균 염분 자체가 해역들 중에서 낮고, 또한 낮은 수심으로 비래염분의 발생량 자체가 적은 영향도 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 남해안의 계절적 변동

Fig. 10에 나타난 남해안의 경우, 8월에 최대 비래염분량을 나타내었으며, 그 외 기간에는 계절에 상관없이 8월 비래염분량의 20% 내에서 증가와 감소를 반복하였다. 그러나 앞선 지역적 분석에

서 남해안 중 특히 높은 거제를 제외하면 모든 지역에서 월별 비래염분량은 0.3-2.5 mdd로 분포하고 있어 실제 월별 변동은 크지 않다. 일본의 경우, 본섬과 류슈, 시코크 등으로 둘러싸여 있는 만의 형태로 이루어진 세토나이카이해역에 접한 지역들 중에서 추고크에 위치한 지점에서 비래염분량이 특히 낮게 나타났다. 이 지역은 또한 낮은 수심과 700개 이상의 작은 섬들로 이루어진 지역적 특성도 낮은 비래염분량 발생에 영향을 미쳤다고 보고하였다. 이는 우리나라의 남해안의 특징인 평균 수심이 낮아 이로 인해 비래염분량 발생 자체가 많지 않고, 또한 여기에 작은 섬들로 비래염분량 발생에 마이너스 요인으로 작용함과 동시에, 염분이 발생한다고 하더라도 내륙으로 날아 들어오는 것을 방해하는 역할을 하기 때문에, 비래염분량이 낮은 경향과 동일한 원인으로 인한 결과라고 생각한다.

남해안의 경우, 지리적으로 해안가의 북서방향이 내륙이므로 겨울철에 북서풍이 불어도, 해안가로 날아 들어오는 비래염분량이 적기 때문에, 겨울철에 낮다고 판단된다. 여름철에는 우세풍인 남동풍의 영향으로 비래염분량이 높게 나타났다. 남해안에서는 앞절에서 거제를 제외하면 대부분 지역에서 1년 동안 비래염분량의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 남해안은 개별 지역의 국소적인 특징보다는 남해안의 전체적인 특징이 비래염분량의 계절변동에 영향을 미친다고 생각된다. 남해안의 평균 수심은 71m, 최대수심은 약 198m로 서해안보다는 높지만 여전히 얇은 바다에 속하며, 여름철에는 동중국 해역에서 만들어진 저염의 해수가 상부에 분포하고, 겨울에는 상부의 저염 해수층이 없어진다(NGII and MOLIT, 2020). 따라서 여름에는 남동풍의 계절풍이 강하여 비래염분량이 높은 경향이 기대되나, 바다의 염분농도 자체가 낮고 얇은 수심이 비래염분 발생량이 적은 요인으로 작용하였고, 겨울에는 저염 해수층은 없어지지만 여전히 얇은 수심으로 비래염분 발생량이 적고 육지에서 바다로 부는 북서풍으로 인해 계절풍도 비래염분량의 증가에 마이너스 요인으로 작용하여 비래염분 증가

에 기여를 못하여 남해안의 1년 동안의 비래염분량 변화가 크지 않고, 평균 비래염분량도 세 해역들 중에서 낮은 것으로 판단된다.

이상 해역별 비래염분량의 특징을 보면, 동해안과 남해안은 여름과 초가을에 태풍으로 인해 비래염분량이 높게 나타났으며, 서해안은 여름철에는 저염 해수층과 남동풍의 영향으로 비래염분량이 낮게, 겨울철에는 북서풍에 의해 비래염분량이 높게 나타났다.

한편 2차 조사에 비해 18년 전의 1차 조사의 결과에서 비래염분량이 높은 시기를 보면, 동해안은 여름철, 서해안은 11월~3월, 남해안은 7월~9월로 나타나(Lee et al., 2010), 2차 조사와 비교하면 비래염분량이 높은 시기의 범위가 넓게 분포하는 특징이 있다. 그러나 이는 1차 조사에서는 3년간의 대기중 비래염분량의 평균치인 것에 비해, 2차 조사에서는 1년간의 측정치로만 분석하였으므로 조사기간에서 차이가 있어, 이것이 2차 조사에서 계절적인 영향이 크게 나타난 원인이 된 것으로 판단된다. 따라서 18년 동안의 기후 변화에 따른 비래염분량 변화는 앞으로 남은 1년간의 측정을 모두 완료 후 논의되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

국내 해안가의 비래염분량을 조사하기 위하여 전국에 총 44개의 대기중 염분량 포집장치를 설치하였고, 1년 동안에 획득된 데이터를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 해역에 위치한 지역에서 해안으로부터 동일한 위치에서의 1년 동안의 평균 비래염분량은 서>동>남해안의 순으로 나타났으며 서해안은 남해안의 약 2.6배이다.
- (2) 동해안은 8-10월에 해당하는 여름과 가을철에는 높게 나타났고, 태풍의 영향으로 9월에 최대치를 보였으며, 겨울과 봄에는 비래염분량이 낮게 나타났다. 동해안의 지역별 평균 비래염분량의 지역적 차이는 크지 않으나, 여름철 태풍의 영향으로 계절적 변동이 큰 지역과 그 외 지역으로 구분할 수 있으며 평균 비래염분량은 울산이 64mdd로 가장 높고, 울진이 1.0mdd로 가장 낮았다.
- (3) 서해안은 겨울철 북서풍의 영향으로 11월~12월에 해당하는 늦가을과 초겨울에 비래염분량이 높게 나타났고, 그 외의 기간에는 낮게 나타났으며, 세 해역들 중에서 계절적 변동이 가장 크게 나타났다. 또한 겨울철 북서풍이 비래염분량 증가의 원인 이므로 해안선의 방향에 따라 비래염분량의 지역적 차가 크게 나타났으며 평균 비래염분량은 고창이 122mdd로 가장 높고, 당진과 목포가 0.8mdd로 가장 낮았다.
- (4) 남해안은 우세풍인 남동풍과 태풍의 영향으로 여름인 8월에만 비래염분량이 높게 나타났고, 그 외의 기간에는 8월의 20% 내외에서 증가와 감소를 반복하였다. 남해안은 비래염분량이

대체적으로 낮고 지역적 차가 크지 않으나 거제의 경우 높은 특징이 있으며, 평균 비래염분량은 거제가 4.7mdd로 가장 높고, 고흥과 광양이 0.6mdd로 가장 낮았다.

- (5) 해안선이 복잡하면서 비래염분량의 편차가 큰 서해안의 계절별 비래염분량 변동을 분석한 결과, 해안가의 비래염분량은 최대 순간풍속과 최대풍속이 강하고, 동시에 우세풍의 풍향이 바다에서 해안가로 불어 올 수 있는 환경에서 증가하는 것으로 나타났다.
- (6) 우리나라의 해안가 비래염분량 증가에는 계절풍 외에 태풍이 영향을 미친다. 특히 약 40-100 km 정도의 태풍의 폭풍반경이 비래염분량 변동의 요인이라고 판단되며, 태풍의 폭풍반경에 포함되는 지역들은 비래염분량이 급증할 것으로 판단된다.
- (7) 비래염분량의 계절적 변동을 보면, 서해안은 여름에 낮고, 남해안은 연중 낮으며 또한 계절 변동이 크지 않는데, 이러한 특징은 동해안과 비교하여 바람 데이터 외에 서해안과 남해안의 얕은 수심과 낮은 해수의 염분 농도도 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

본 논문에서 획득된 자료는 유지관리 실무자에게 대기중 염분량 증가의 원인에 대한 정보를 제공함과 동시에 비래염분의 지역적 특성, 해안거리에 따른 특성 등의 추가적인 데이터와 더불어 해안가에서 비래염분의 염해에 대해 상대적으로 안전한 지역과 열악한 지역을 구분할 수 있는 기준 재개정에 활용하여 염해에 불필요한 염해 대책을 없애면서, 열악한 지역에 집중적인 유지관리를 가능하게 할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비 지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230073-001, DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발).

References

Japan Road Association (JARA) (1984). *Guidelines for Countermeasures against Salt Damage in Road Bridges · Commentary*, Tokyo, Japan (in Japanese).

Japan Road Association (JARA) (2017). *Road Bridges Specifications · Commentary*, Tokyo, Japan (in Japanese).

Jeon, D., Jung, J., Park, J., Min, J., Oh, J. E., Moon, J., Lee, J. S. and Yoon, S. (2022). "Predicting airborne chloride deposition in marine bridge structures using an artificial neural network model." *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol. 337, 127623, <https://doi.org/10.1016/>

- j.conbuildmat.2022.127623.
- Jung, J. and Lee, J. S. (2022). “Regional and seasonal distribution properties of airborne chlorides in Jeju island, South Korea.” *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, KRCRI, Vol. 10, No. 3, pp. 300-306, <https://doi.org/10.14190/JRCR.2022.10.3.300> (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA) (2023). *Summary of East Sea*, Available at: <https://www.khoa.go.kr/eng/kcom/cnt/selectContentsPage.do?cntId=31060100> (Accessed: March 29, 2023).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2006). *Long Term Measurement of Airborne Chlorides and Durability of Concrete Mixed with Sea Sand* (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022). *Analysis Report of Typhoon Affecting the Korean Peninsula in 2021* (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2023). *Open METdata Portal*, Available at: <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> (Accessed: February 15, 2023).
- Korean Society of Steel Construction (2019). *Guidelines for the use of Uncoated Weathering Steel in Bridges* (in Korean).
- Korean Standards Association (KSA) (2012). *Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres*, (KS D ISO 9225) (in Korean).
- 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*, KCI, Vol. 22, No. 6, pp. 769-776, <https://doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.6.769> (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2021). *Detailed Guidelines for Safety and Maintenance of Facilities (Performance Evaluation)* (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2023). *Korea Design Standard for Port and Harbour Facilities (KDS 64 10 20)* (in Korean).
- Moon, H. Y. and Lee, J. S. (2004). “A study on performance of devices for measuring the sea-salt flying to the concrete structures in the seashore.” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, KSCE, Vol. 24, No. 2A, pp. 417-422 (in Korean).
- National Geographic Information Institute (NGII) and Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2020). *The National Atlas of Korea II 2020* (in Korean).
- Public Works Research Institute (PWRI) (1988). *Survey on the Geographical Distribution of Chloride Particle Carried by the Sea Wind (3)*, Tsukuba, Japan (in Japanese).
- Public Works Research Institute (PWRI) (1993). *Nation-wide Investigation on Air-borne Chloride(4) — Relationship between Geographical Distribution of Air-borne Chloride and Wind — (4)*, Tsukuba, Japan (in Japanese).