

해양환경에 위치한 국내 고속도로 교량의 비래염분량 측정결과

Air-borne Chloride Content of Highway Bridges Exposed to Marine Environment

정해문* 유환구** 류종현*** 안태송**** 김수만***** 오병환*****
Cheong, Hai Moon Yu, Hwan Gu Ryu, Jong Hyun Ahn, Tae Song Kim, Soo Man Oh, Byung Hwan

ABSTRACT

Chloride ingress into concrete followed by reinforcement corrosion and deterioration of concrete structures is a major problem for many structures under chloride attacks. Large-scale concrete structures directly exposed to seawater such as SeoHae Grand Bridge are increasingly constructed along the coast in Korea. It is necessary to investigate the environmental conditions of concrete structures exposed to chloride attacks. In this study, the air-borne chloride contents of highway bridges exposed to marine environment in Korea were measured.

1. 서론

최근 들어 해양 환경에 건설되는 콘크리트 구조물이 증가함에 따라 콘크리트 구조물의 구조적 성능 뿐만 아니라 장기적인 내구성에 대한 관심도 커지고 있는 실정이다. 콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 인자는 여러 가지를 들 수 있으나, 특별히 해양 환경에 건설되는 콘크리트 구조물의 경우 염화물 침투에 의한 철근부식이 내구성 저하에 가장 큰 요인이 되고 있다. 따라서 염화물의 침투에 의한 부식기구를 조사하여 이에 적절한 대책을 수립할 필요가 있으며, 부식의 근원인 염화물의 출처에 대한 조사가 필수적이다. 염화물은 콘크리트의 구성재료, 해수노출, 제설제, 화재 및 지하수 또는 토양으로부터 오염될 수 있으나, 이러한 염화물 침투요인 중 가장 광범위하게 영향을 미치는 해수노출에 대한 조사와 분석 및 이에 따른 대책이 무엇보다 시급하다고 하겠다.

일반적으로 해양환경에서 염화물이 공급되는 요인으로는 해수, 해수방울, 해염입자 등으로 분류할 수 있다. 해수 중에는 통상적으로 NaCl로 환산해 3~4% 정도의 염분이 존재하는데, 수용액으로 NaCl의 농도가 3.6%의 경우 강재의 부식속도가 최대로 된다고 알려져 있어, 해수 그 자체가 철근의 부식을 촉진시키는 작용이 크다고 할 수 있다. 해수방울은 파도가 부서지면서 생기는 지경 약 4mm 이하의

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연구원

***** 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 한국도로공사 대구-포항건설사업소 과장

**** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원

***** 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

물방울로서, 통상 해상에서 파도가 치는 비말대와 해안선으로부터 수십미터까지, 태풍이나 강한 계절풍이 있을 경우 수백미터 이상까지 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 해염입자는 바다수면에서 발생하는 해수기포가 부서지면서 대기중으로 방출되는 3~18 μ m 정도의 입자로서 해상 상승기류를 타고, 바람에 의해 육지까지 도달한다. 바람에 의해 날라 오는 도중, 증발, 분열 등이 반복되면서, 그 입자 크기가 점점 작게 되는 경향이 있다. 이와 같이 바람에 의해 날라오는 염분을 비래(飛來)염분이라고 한다¹⁾.

해수에 대해서는 거의 염분 농도가 일정하고, 그 영향범위가 어느 정도 명확하지만, 해수방울이나 해염입자와 같은 비래염분에 대해서는 지형, 차폐물 등에 의해 영향을 받으므로 비래하는 형태가 조금씩 차이가 나게 마련이다. 따라서 국내 해양환경에 놓여있는 콘크리트 구조물에 대한 염해 범위를 명확하게 하기 위해서는 비래 염분량을 측정하고, 비래염분이 콘크리트 표면염화물량에 미치는 영향을 파악하여 들 필요가 있고, 이를 바탕으로 해안지역 구조물에 대한 적절한 내염대책을 제시해야 한다. 이미 일본에서는 1984년부터 3년간 전국 266개 해양환경 지점에 대한 비래염분량을 조사해 염해지역 범위를 규정하기도 하였다^{1,2)}.

본 연구에서는 해양환경에 놓인 국내 고속도로 교량의 염해환경을 알아보기 위해, 전국 6개 교량을 대상으로 1년간 비래염분량을 측정하였고, 그 결과에 대해서 보고한다.

2. 실험 방법

2.1 비래염분 측정

비래염분을 측정하기 위해 해안지역에 위치한 고속도로 교량에 바다로부터 비래하는 대기중 염분을 채집하는 염분포집기를 제작해 설치하였다. 비래염분 포집을 위한 방법은 거즈법, 스테인레스 방식의 일본토목연구소법, deposit gauge법, dust jar법, wet candle법(ISO/TC 156) 등 많은 방법이 보고되고 있으나, 본 연구에서는 거즈방식(KS D 0060 옥외 폭로 시험방법 통칙, 참고 3 해염입자량 측정)과 스테인레스 방식(일본건설성 토목연구소식) 염분포집기를 이용해 비래염분량을 측정하였다. 일본 건설성 토목연구소 스테인레스 방식은, KS와 JIS에 규정되어 있는 거즈방식에 의한 방법이 비래염분량이 많은 지역의 경우 거즈 자체에 부착되는 염분량이 작아 과소평가될 우려가 있어 고안된 방법이다³⁾.

그림 1에 거즈방식과 스테인레스방식의 염분포집기를 나타내었고, 그림 2에 교각에 설치한 모습을 나타내었다. 두 방법은 각각 100×100mm크기의 거즈와 스테인레스에 일정기간동안 부착된 염분량을 측정하는 방법이다. 해염입자량의 산정방법은 일정기간 동안 해양환경에 노출시킨 후, 거즈에 포집된 염분량과 스테인레스판에 부착된 염분량을 화학분석에 의해 측정하여, 하루에 일정면적의 포집창에 부착된 NaCl의 양(mg)으로 산정하였다. 산정한 일평균 비래염분량을 통상 mdd라고 표시하는데, 이는 mg NaCl/dm²/day (1dm²=100cm²)를 나타내는 단위이다. 본 연구에서는 해염입자 포집기를 2000년 11월부터 노출시켰으며, 측정은 약 2개월단위로 행하였다.

2.2 비래염분 측정지역

해안에 위치한 우리공사 관리의 교량을 선정하였는데, 선정된 교량과 비래염분 포집기 설치장소를 표 1에 나타내었다. 영종대교, 소래교, 서해대교는 해상 위에 설치된 교량이고, 남해안의 섬진강교와 가화천교는 바닷물과 강물이 교차하는 지점에 놓여 있으며, 동해안의 주수천교는 해안선과 약 1.5km

정도 떨어진 곳에 위치한 교량이다. 염분포집기는 모두 바다를 정면으로 향하는 방향으로 설치하였다.

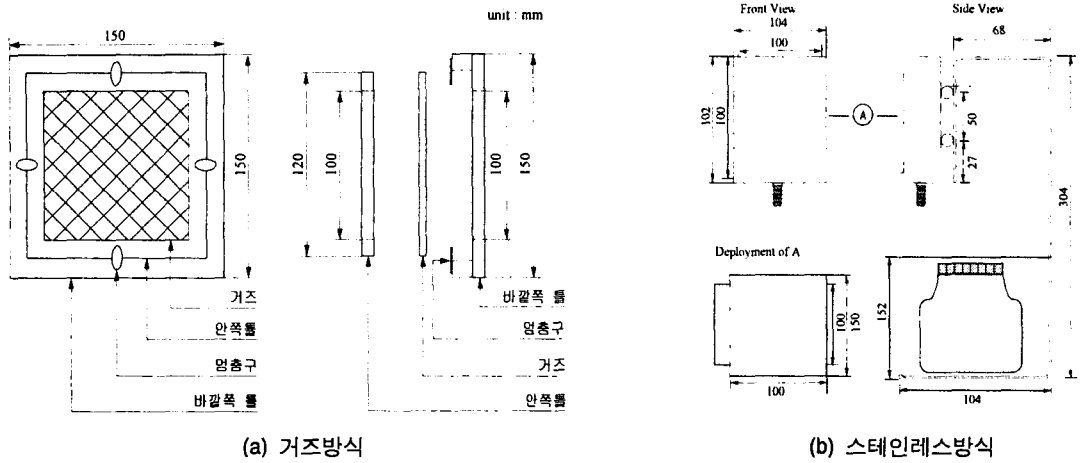


그림 1 비래염분 포집기 형상

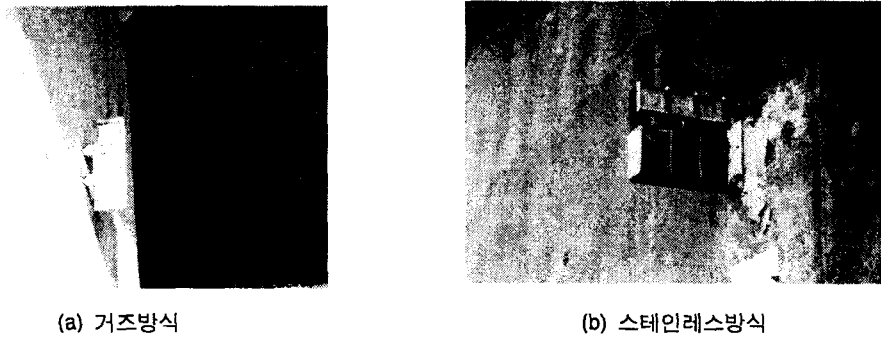


그림 2 비래염분 포집기 설치한 모습

표 1 전국 해안 지역의 염분포집기 설치장소

교량명	위 치	설치위치	설치시기	비고
영종대교	인천국제공항 고속도로 10.35km	주탑 슬래브하부	2000.11.	서해안
소래교	서해안 고속도로 13.51km	P1 상부	2000.11.	
서해대교	서해안 고속도로 71.50km	주탑 슬래브하부	2000.11.	
가화천교	남해고속도로 307.5km	P1 상부 점점로	2000.11.	남해안
섬진강교	남해고속도로 281.40km	P3 상부	2000.11.	
주수천교	동해고속도로 12.90km	P1 상부	2000.11.	동해안

3. 결과 및 고찰

그림 3에 각 지역별 교량에서 측정된 비래염분량의 월별 경시변화 결과를, 그림 4에 연평균결과를 나타내었다. 거즈식과 스테인레스식의 결과가 다소 차이를 나타내기는 하지만, 전체적으로 보았을 때, 서해대교와 영종대교의 비래염분량이 다른 지점에 비해 다소 많게 나왔다. 월별 비래염분량 측정결과를 보면, 영종대교와 서해대교가 겨울철에 비래염분량이 다소 많게 나왔고, 그 나머지 지점은 계절별 차이가 크게 나타나지 않았다.

서해대교의 경우에는 스테인레스식과 거즈식 모두 비슷한 포집량을 나타내는데 반해, 다른 지점에서는 거즈식에 의한 포집량이 스테인레스식에 비해 다소 높게 나타나는 경향을 보여주고 있다. 일본 보고에 의하면³⁾, 거즈방식 자체의 염분부착 용량이 작아 해안선에 근접한 비래염분량이 많은 지점에서는 포집이 잘 되지 않을 우려가 있다고 하였으나, 본 연구에서는 거즈방식에 의한 포집량이 더 많은 것으로 나타나, 이에 대한 검토가 더 필요하리라 보여진다.

일본에서 측정된 비래염분량 결과를 참고해 보면, 염해에 의한 피해가 비교적 많이 발생한 지역에서 비래염분량이 비교적 높게 나왔는데, 비래염분량이 1 mdd(mgNaCl/dm²/day) 이상, 매우 심한 곳의 경우에는 10 mdd 이상 관찰되었다고 보고하고 있다³⁾. 일본 측정결과와 비교해 보면, 본 연구에서 선택한 교량의 경우 그다지 비래염분량이 크지 않다고 생각되나, 본 결과는 1년동안 측정된 결과로서 비래염분량의 연변동 등을 고려하였을 때 더 장기간의 관찰이 필요하다고 하겠다.

비래염분량의 차이가 생기는 원인으로서는 해안선으로부터의 거리와 바람의 영향, 주위 차폐물 등의 지형의 영향 등이 알려져 있어 이에 대한 고찰을 하여 보았다. 본 연구에서는 선택한 지점이 6지점 밖에 안되므로, 해안선으로부터의 거리감쇠의 영향을 파악하기는 불가능하였으나, 해상교량인 영종대교

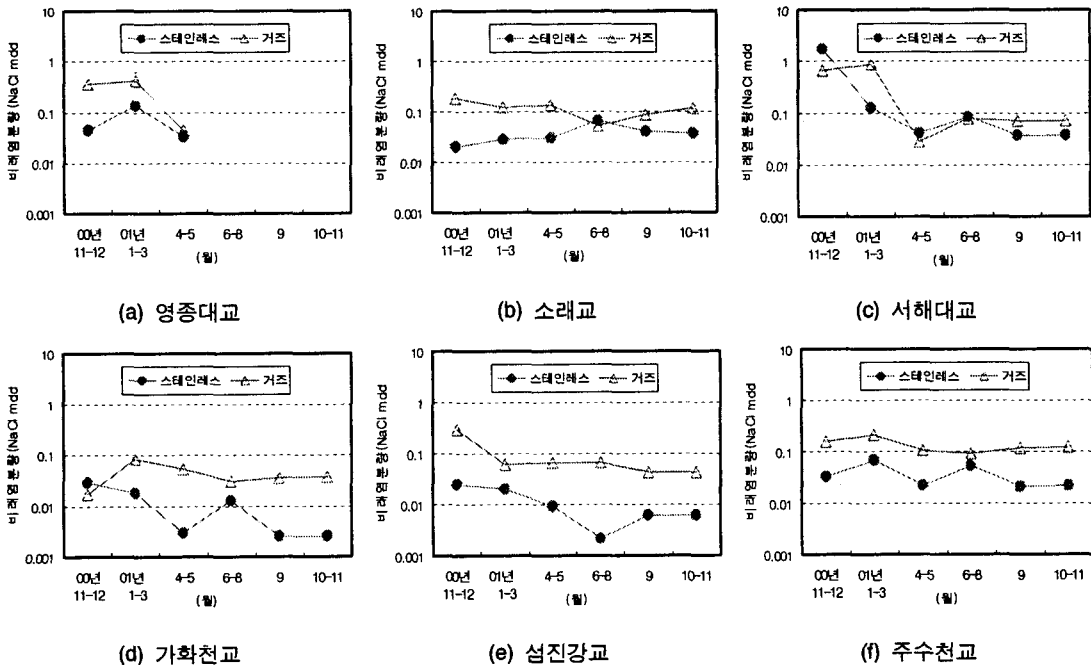


그림 3 각 교량별 비래염분량 측정결과

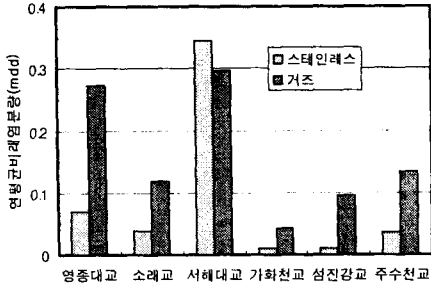


그림 4 연평균 비래염분량

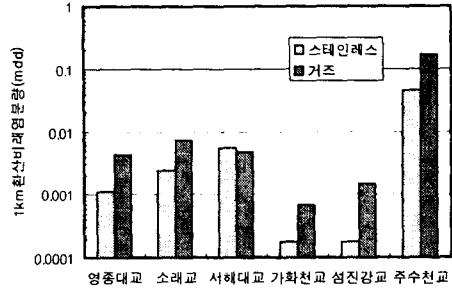


그림 5 1km 환산 비래염분량

와 서해대교가 비교적 비래염분량이 많은 것으로 나타나 해안선과 가까울수록 비래염분량이 많은 것으로 보인다. 그러나 해안선으로부터 약 1.5km 떨어진 동해안 주수천교의 비래염분량이 바다와 접하는 다른 교량과 유사한 수준으로 나타났다. 본 연구에서 선택한 지점이 모두 해안선으로부터 거리가 다르므로, 일본에서 제안한 비래염분량의 거리에 대한 감쇠 근사식⁴⁾ (1)을 이용해 해안선으로부터 1km거리에서의 비래염분량으로 환산하여 보았다.

$$C = C_{1km}X^b \quad (b = -0.6) \quad (1)$$

C : 비래염분량(mdd), C_{1km} : 1km 환산비래염분량(mdd) X : 해안선으로부터 거리(km)

그 환산결과를 그림 5에 나타내었는데, 동해안>서해안>남해안 교량의 순서로 나와, 동해안의 비래염분량이 다른 지역에 비해 다소 높게 나타났다. 가화천교와 섬진강교의 경우 비래염분량이 낮게 나왔는데, 이는 바다와 접해 있기는 하나, 바다방향으로 바람을 차폐하는 지형적 차폐물이 있는 위치이기 때문으로 보여진다. 동해안의 주수천교의 경우 서해나 남해에 비해 동해안의 경우가 파랑이 더 심하여 해염입자의 발생이 더 용이하고 또 많기 때문으로 보인다. 그러나 이러한 결과들도 일본 보고와 비교해 보았을 때 0.1mdd이하로서 비래염분량이 그다지 크지 않은 결과를 나타내었다.

비래염분량과 바람의 영향에 대해서 검토해 보았는데, 각 지점의 일별 풍향 및 풍속 데이터를 수집해 분석해 보았다. 서해대교와 영종대교의 경우, 교량관리를 위해 교량에서 직접 기상관측을 행하므로, 이 데이터를 이용하였고, 나머지 지점에 대해서는 선정교량과 가장 인접한 기상관측소의 기상데이터를 이용하였다. 풍속은 일최대풍속으로, 풍향은 최대풍속시의 풍향으로 하였고, 수집한 바람에 대한 데이터 중에서 바다에서 불어오는 바람만을 추려 분석하였다. 바다로부터 불어오는 바람은 해안선으로부터 45도 이상의 각도에서 불어오는 바람으로 정하였는데, 이는 염분포집기의 정면으로부터 ± 45 도 이내의 방향과 거의 일치한다.

그림 6에 풍속과 비래염분량(스테인레스법)과의 관계를 나타내었다. 여기에서 풍속은 바다에서 부는 바람의 월평균 풍속에 측정기간동안 전체바람중의 바다로부터 부는 바

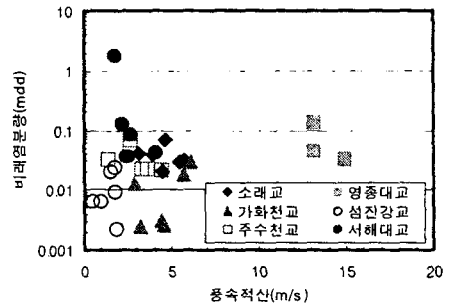


그림 6 풍속과 비래염분량과의 관계

람의 빈도%를 곱한 값(풍속적산치)이다. 다소 편차가 있기는 하나, 풍속이 클수록 비래염분량이 많은 경향을 나타내고 있으나, 그 상관성은 그다지 크지 않게 나타났다. 이는 각 측정지점의 표고가 모두 다르고, 비래염분량의 차이는 단순히 바람의 영향 뿐만이 아니라, 해염입자의 발생에 미치는 요인, 지형적 요인 등을 모두 종합적으로 판단해야 하므로, 이와 같은 결과가 나왔다고 보여진다. 비래염분량 측정데이터 수가 많지 않고 비래염분량에 미치는 요인을 모두 고려하지 못하였으므로 추후 더 많은 검토가 이루어져야 한다고 생각된다.

4. 결론

- (1) 해양환경에 놓인 국내 고속도로 교량의 염해환경을 알아보기 위해, 전국 6개 교량을 대상으로 거즈방식과 일본토목연구소의 스테인레스방식에 의해 1년간 비래염분량을 측정하였다.
- (2) 서해대교와 영종대교의 연평균 비래염분량이 다른 지점에 비해 다소 많게 나왔고, 영종대교와 서해대교가 겨울철에 비래염분량이 다소 많게 나왔으며, 그 나머지 지점은 계절별 차이가 크게 나타나지 않았다.
- (3) 서해대교의 경우에는 스테인레스식과 거즈식 모두 비슷한 포집량을 나타내는데 반해, 다른 지점에서는 거즈식에 의한 포집량이 스테인레스식에 비해 다소 높게 나타나는 경향을 보여주고 있다.
- (4) 일본 보고에 의한 비래염분량의 거리에 대한 감쇠 근사식을 이용해 해안선으로부터 1km거리에서의 비래염분량으로 환산하여 본 결과, 동해안>서해안>남해안 교량의 순서로 나와, 동해안의 비래염분량이 다른 지역에 비해 다소 높게 나타났다. 본 연구결과를 일본보고와 비교해 보았을 때, 비래염분량이 비교적 적은 것으로 나타났다.
- (5) 비래염분량의 차이는 파랑과 같은 해염입자 발생에 미치는 요인들, 해안선으로부터의 거리와 바람의 영향, 주위 차폐물 등의 지형의 영향 등의 해염입자 이동에 미치는 요인들이 복합적으로 작용하므로, 이러한 요인들을 고려한 장기적인 관찰이 필요하다고 보인다.

참고 문헌

1. 岸谷孝一, 西沢紀昭, “塩害,” 技報堂 1986.
2. 日本建設省総合技術開発プロジェクト, コンクリートの耐久性向上技術の開発, 日本建設省 1988.
3. 飛来塩分量全国調査(III), 土木研究所資料, 日本建設省土木研究所 1988.
4. 飛来塩分量全国調査(IV), 土木研究所資料, 日本建設省土木研究所 1993.