

콘크리트 구조물의 염해도장을 통한 내구성능 향상 및 경제적 효과분석

채원규[†] · 김성현* · 손영현* · 박주원* · 이증빈*

신구대학 건설정보과, *(주)서림
(2010. 10. 11. 접수 / 2010. 12. 3. 채택)

Analysis on Durability Performance Enhancement and Economical Efficiency through Chloride Protection for Concrete Structures

Won-Kyu Chai[†] · Seong-Heon Kim* · Young-Hyun Son* · Ju-Won Park* · Cheung-Bin Lee*

Department of Construction Information, Shingu University

*SUHRIM Institute of Construction Technology

(Received October 11, 2010 / Accepted December 3, 2010)

Abstract : In this study, detailed assessment for durability performance were performed on the chloride protected concrete structures to investigate the effectiveness of chloride protection. And economical efficiency for the chloride protected concrete structures were studied by LCC(Life Cycle Cost) analysis. In the comparison result of the first section repair time, it was found that the chloride protected concrete structures was economical better than the non-protected concrete structures in the long term. According to the analysis result of the accumulated chloride concentration by used time and chloride ion concentration by depth, it can be seen that the permeation through time from chloride has increased two times in the chloride protected concrete structures.

Key Words : chloride protection, durability performance, economical efficiency

1. 서론

콘크리트 구조물은 화학적으로 매우 안정하여 반영구적인 재료라고 인식되어져 왔으나 최근 들어 해안 및 해양과 같은 환경하에서 조기에 성능이 저하되는 현상이 발견되면서 콘크리트 구조물의 “내구성”이라는 측면에 대한 관심이 높아져 가고 있다. 즉, 완벽하게 설계, 시공되었다 하더라도 구조물의 사용환경을 고려하지 못할 경우, 사용기간 경과에 따른 외부 환경하중에 의한 열화(deterioration)로 “내구성능”에 문제점이 나타나게 되며, 결국에는 구조적인 문제점을 유발하여 목표 성능을 수행하지 못하게 된다¹⁻³⁾.

특히 3면이 바다로 둘러싸인 한반도의 특성상 철도 콘크리트 시설물, 고속국도 및 지방도 상의 일반 콘크리트 시설물뿐만 아니라 항만 및 해상 콘크리트 구조물 등이 해안가에 위치하거나 해수에 접하는 경우가 빈번하게 되어 시공단계에서부터 염

해에 노출되게 되며, 이로 인한 철근부식으로 미관 저하에서부터 구조적인 문제까지 다양한 성능저하를 나타내게 되어 심각한 사회적 문제로 부각되기도 한다.

콘크리트구조물에 대한 염해 대책으로는 콘크리트중의 염소이온량을 적게 하는 방법, 밀실한 콘크리트로 하는 방법, 피복콘크리트를 충분히 취해 균열폭을 작게 제어하는 방법, 수지도장철근을 사용하는 방법 등이 있으며, 이에 대한 연구가 진행되어 왔다⁴⁾.

종래에는 콘크리트 자체의 알칼리성에 의해 내부 철근의 부식을 방지한다는 생각으로 대개는 도장 등의 방식처리를 할 필요가 없다고 판단, 강구조물에 비해 콘크리트 구조물의 유지관리가 용이하다고 간주되어 왔으나, 염분의 영향을 받는 구조물에 있어서는 최근 콘크리트의 열화 및 철근의 부식이 두드러지고 있어 세계적으로 그 현상에 관한 전반적인 조사와 아울러 그 대책을 강구하여 설계에 반영하는 추세이다.

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 염해손상 메

[†] To whom correspondence should be addressed.
ewk@shingu.ac.kr

커니즘과 그에 대한 대책으로서의 염해도장 방법에 대하여 서술하고, 시공 단계에서 예방 유지관리 적 차원의 염해도장을 실시하는 경우와 실시하지 않는 경우에 대한 내구성능 상세평가를 통해 그 효과를 분석하여 보았다. 또한 콘크리트 구조물에 염해도장을 실시하는 경우와 실시하지 않는 경우에 대한 생애주기비용(LCC; Life Cycle Cost) 분석을 통해 염해도장의 경제적 효과를 고찰하여 보고자 한다⁵⁻¹⁰⁾.

2. 콘크리트 구조물의 염해손상 및 대책

2.1. 콘크리트 구조물의 염해손상 메커니즘

염해 손상의 메커니즘은 시멘트의 주요구성 성분인 $3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$ 가 물과 수화반응하여 규산칼슘 수화물과 다량의 수산화칼슘을 생성하는데 기인한다. 따라서 콘크리트 내의 연속된 모세공극 내에는 수산화칼슘의 포화수용액인 pH 12~13의 알칼리용액으로 충전되어 있으며, 이와 같은 알칼리성 환경에서 철근 표면은 얇은 부동태피막이라고 불리는 보호피막으로 덮여 있어 부식으로부터 보호되어 있다. 그러나 염화물의 침입에 의한 경우와 콘크리트의 중성화 현상에 의한 알칼리성 저하의 경우 염소이온은 부동태피막을 파괴시켜 부식을 일으킨다¹¹⁾.

주로 유산염을 포함한 염분이 콘크리트의 모세공이나 공극으로 침투해서 콘크리트 성분과 팽창성 결정을 만들고 동시에 철근이 녹슬어 팽창함으로써 콘크리트 구조물을 손상시키는 것이 염해손상이다. 피해 현상은 주로 해안에 인접한 구조물에서 많이 나타나며, 추운 산간지방과 도심지역에서는 제설용 염화칼슘의 영향을 받아 구조물이 손상되



Fig. 1. Front view of damaged bridge's superstructure by salt-attack.

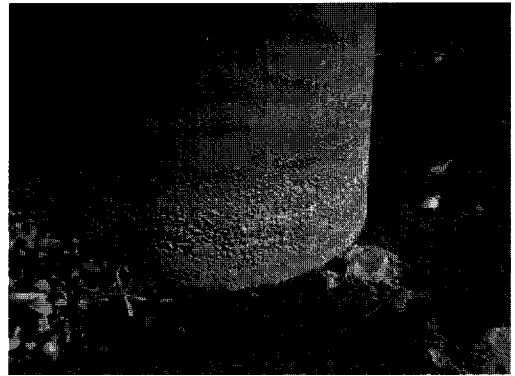


Fig. 2. Front view of damaged bridge's substructure by salt-attack.

기도 한다. 한편, 표면염분량은 해안으로부터의 거리에 크게 영향을 받아서 해안으로부터 근 거리에서 크게 나타나며, 대기온도는 1월에 가장 적게 나타나므로 염해에 대한 손상도 이러한 환경조건에서 크게 발생할 것으로 사료된다.

Fig. 1과 2는 염해손상이 발생한 콘크리트 교량의 상부 및 하부 상태를 보여 주고 있다.

2.2. 표면보호 도장을 통한 콘크리트 구조물의 염해대책

콘크리트 도장을 통한 표면보호는 콘크리트로 침투될 수 있는 각종의 유해물질을 일차적으로 콘크리트 표면에서 차단하는 것으로 염해 방지대책으로 상당히 유효하다. 콘크리트의 표면보호 도장은 유지관리가 가능한 것이 유리하다. 이러한 표면보호 도장재료 및 도장방법에 대해서는 최근 다양하게 연구 개발되고 있으며, 차염성 뿐만 아니라 내후성, 방수성, 내알칼리성, 콘크리트와의 부착성, 균열대응성 및 시공성 등에 대한 종합적인 검토가 필요하다. 다음의 Fig. 3은 콘크리트 염해도장의 일반적인 시공순서를 보여 주고 있다.

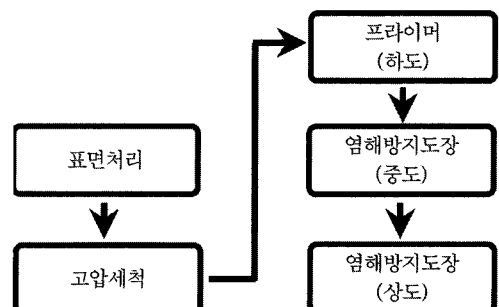


Fig. 3. Construction order of chloride protection

3. 염해에 대한 내구성능 세부평가

3.1. 상세평가 방법

본 연구에서는 콘크리트구조물의 염해에 대한 내구성능 상세평가에 있어 ACI Life-365 프로그램을 이용하였다. 염소이온의 침투와 내구성능 저하 추정에 관하여 일반적으로는 다음 식 (1)로 나타내는 확산 방정식(Fick의 제 2법칙)을 사용하는 경우가 많다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, D : 콘크리트 중의 겔보기 염소이온 확산 계수(m^2/sec), t : 시간(sec), C : 콘크리트 중의 염소 이온농도(kg/m^3), x : 콘크리트 표면에서의 거리(m)이다.

한편, 콘크리트 표면의 염소 이온 농도와 염소 이온 확산계수가 일정한 조건하에서는 다음 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$C(x,t) = C_o(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (2)$$

여기서, $C(x,t)$: 시간 t 에 있어서 철근 위치 x 의 염소 이온 농도, C_o : 콘크리트 표면에서의 염소 이온 농도(kg/m^3)이다.

또한 콘크리트의 염소 이온의 침입에 대한 저항성을 평가하기 위한 지표는 확산계수의 설정으로서, 본 검토에서 사용한 ACI Life-365에서는 시간과 온도에 따른 변동성을 갖는 염화물 확산계수 D 를 다음의 식 (3) 및 식 (4)와 같이 고려하고 있다.

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (3)$$

여기서, $D(t)$: 시간 t 에서의 확산 계수, D_{ref} : 기준시간 t_{ref} 에서의 확산 계수, m : 확산계수 감소 상수, t_{ref} : 기준시간, t : 경과시간이다.

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp \frac{U}{R} \cdot \left[\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

여기서, $D(T)$: 시간 t , 절대 온도 T 에서의 확산 계수, D_{ref} : 기준 시간(t_{ref})와 기준 온도(절대 온도, T_{ref})에서의 확산 계수, U : 확산 과정에서의 활성화 에

너지($35,000J/mol$), R : 기체상수이다.

3.2. 상세평가 결과

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구성능 상세평가에 있어 Table 1과 같은 조건하에 검토를 수행하였다. 또한 Fig. 4와 5는 표면 염분량 분포 및 대기온도 조건을 나타내고 있다.

염해에 대한 손상은 주로 해안에 인접한 구조물에서 많이 나타나며, 추운 산간지방과 도심지역에서는 제설용 염화칼슘의 영향을 받아 구조물이 손상되기도 하는데, Fig. 4에서 표면염분량은 해안으로부터의 거리에 크게 영향을 받고 있음을 알 수

Table 1. Detail evaluation condition of durability performance for the salt-attack of reinforced concrete structures

구분	내용
W/C	46%(슬래브 바닥판)
콘크리트 단면 및 피복두께	30cm, 4cm(바닥판)
주철근	H16@125
콘크리트 종류	25-27-12
사용 시멘트	보통포틀랜드시멘트
거주집 탈형 시기	타설 후 7일

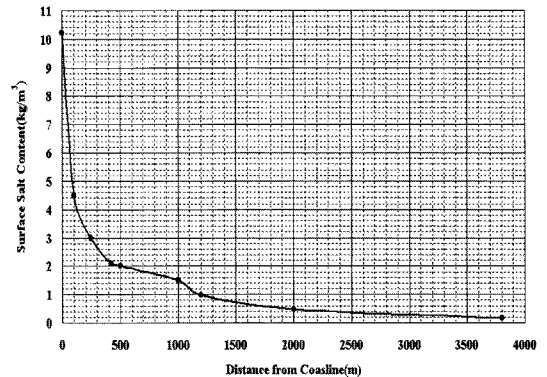


Fig. 4. Distribution of surface salt quantity.

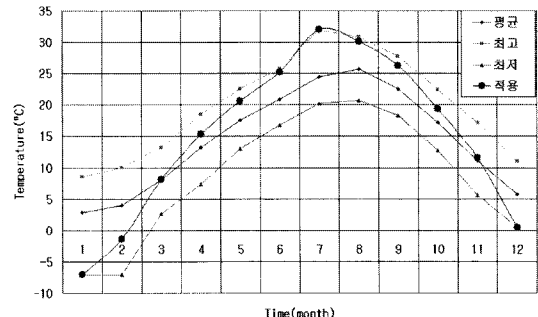


Fig. 5. Air temperature condition.

있으며, Fig. 5는 대기온도 조건이 염화물침투에 영향을 미치게 됨을 고려하여 남해안 YS시의 연간 평균기온이력을 참조하여 나타낸 것이다.

다음의 Fig. 6은 콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구성능 상세평가에 따른 최초 단면보수시기 추정 결과를 보여 주고 있다. Fig. 6에서와 같이 도장을 하지 않은 경우의 최초 단면보수시기가 7.4년인데 비하여 도장을 한 경우의 최초 단면보수시기는 20.5년을 나타내어 서로 13년 정도의 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 결과를 볼 때 장기적인 유지관리 측면에서 염해도장을 실시한 경우에 훨씬 유리함을 알 수 있으며, 내구 성능 향상 측면에서도 큰 효과가 발휘됨을 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 7은 공용년한 20년 기준에 따른 누적 염화물농도 분포를 나타내고 있고, Fig. 8은 깊이 따른 염화물 이온 농도를 나타내고 있다.

Fig. 7에서와 같이 도장을 하지 않은 경우의 염화물 농도는 공용 후 7년 후에 1kg/m³를 나타내는 반면에 도장을 한 경우의 염화물 농도는 공용 후

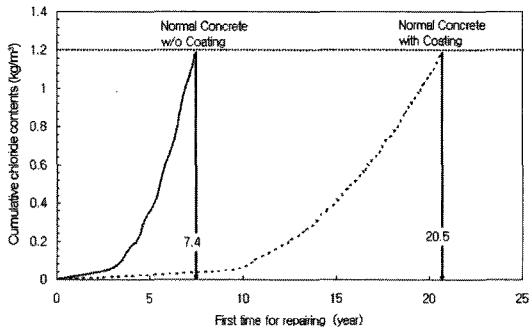


Fig. 6. Comparison of first section repair time by detail evaluation of durability performance for the salt-attack.

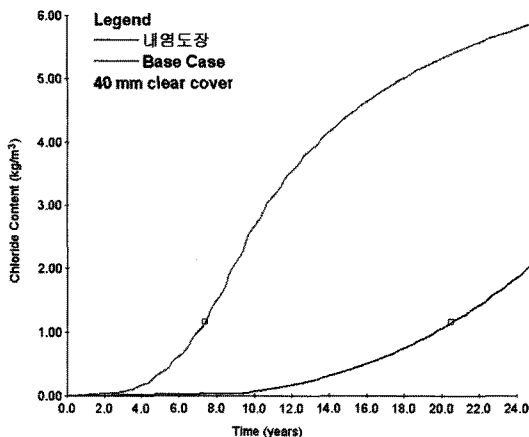


Fig. 7. Accumulated chloride concentration by used time.

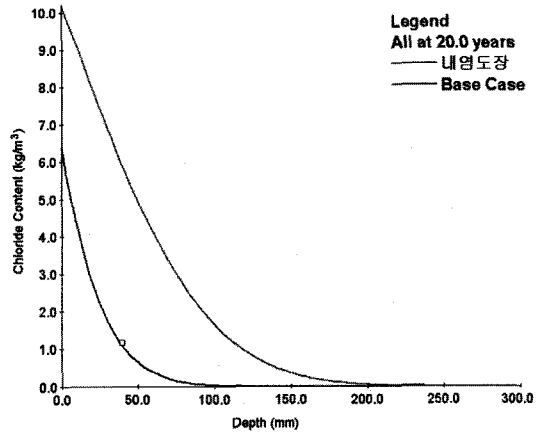


Fig. 8. Chloride ion concentration by depth.

20년 후에 1kg/m³를 나타냄으로써 큰 차이를 보여 주고 있다. 또한 Fig. 8에서 보는 바와 같이 공용기간 20년 후의 염화물 농도 1kg/m³를 나타내는 깊이는 도장을 하지 않은 경우에 약 110cm인 반면에 도장을 하는 경우는 약 45cm 정도를 나타내고 있다. 이와 같은 결과를 종합해 보면 염해도장을 실시하는 경우 염화물의 침투시간을 2배 이상 늘출 수 있을 뿐만 아니라 염화물의 침투 깊이 또한 절반 이상 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 염해도장에 따른 경제성 분석

4.1. LCC 분석 조건

건설공사는 공사의 계획부터 설계, 시공, 유지관리, 해체 및 폐기처리에 이르기까지 공통적인 단계를 거치게 되며 이러한 일련의 단계로 구성된 전체과정을 프로젝트의 생애주기라 정의하는데, 각 단계별로 발생하는 모든 비용의 합을 생애주기비용으로 지칭한다. 즉, LCC(Life Cycle Cost) 분석이란 시설물의 설계 및 시공 그리고 유지관리와 해체 및 폐기단계에 이르는 전체공용년수 동안 발생하는 총 비용을 산출해 내고 이에 근거하여 경제성을 평가하는 방법으로서 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$LCC = \text{계획비용} + \text{설계비용} + \text{시공비용} + \text{유지관리비용} + \text{해체비용} \quad (5)$$

본 연구에서는 염해에 따른 내구성능의 저하로 인하여 80년의 목표 내구수명을 확보하기 곤란한 점을 고려한 대책으로서의 “표면도장공법”을 적용하는 경우에 대한 경제성을 분석하기 위하여 생애

Table 2. Fundamental condition for LCC analysis

구분	내용
분석모델	• NIST BridgeLCC 프로그램의 LCC 분석모델 적용(Ehlen & Marshall,1996) $PVLCC = IC + PVOMR$ 여기서, $PVLCC$ = 현재가치의 생애주기비용, IC = 초기비용 $PVOMR$ = 유지관리비용의 현재가치 = $\sum_{k=0}^N \frac{C_k}{(1+i)^k}$ C_k = k년에 발생하는 모든 비용, i = 할인율, N = 분석기간
	• ASTM의 표준화 방법인 현재가치화법 적용 • 할인율 7.5% 적용 • 불가상승율 3% 적용
분석기준	• 분석기간 80년 기준

주기비용 산출방법으로 평가를 수행하였으며, “무도장인 경우”와 “표면도장인 경우” 등 2가지 경우에 대하여 비교분석하였다. 다음의 Table 2는 생애주기비용분석을 위한 기본조건을 나타낸 것이다.

한편 본 연구에서는 생애주기비용분석을 위한 기본조건 중 할인율은 일반적으로 사용되는 7.5%를 그리고 불가상승률은 최근 불가상승률인 3%를 적용하였다.

4.2. LCC 분석 결과

다음의 Table 3과 Fig. 9는 “무도장인 경우”와 “표면도장인 경우” 등 2가지 경우에 대하여 생애주기비용 분석 결과를 정리한 것이다.

본 연구에서는 염해에 따른 내구성능의 저하로 인하여 80년의 목표 내구수명을 확보하기 곤란한 점을 고려한 대책으로써 염해도장을 적용하는 경우에 대한 경제성을 분석하기 위하여 LCC 분석을 수행하였다.

무도장인 경우와 염해도장을 실시한 두 가지 경우에 대한 생애주기비용 분석결과, 염해도장을 실

Table 3. Results of LCC analysis

구분	무도장 처리 (원/m ²)	염해도장 처리 (원/m ²)	적용기준
초기공사비	0	53,000	하도, 중도, 상도기준
유지관리비	516,000	256,000	1) 무도장처리(20년마다 10mm 단면보수) : 129,000원/m ² *4회 2) 염해도장처리(10년마다 청소 및 상도 1회 시행) : 32,000원/m ² *8회
LCC	516,000	309,000	
상대LCC 지수	1.67	1.00	

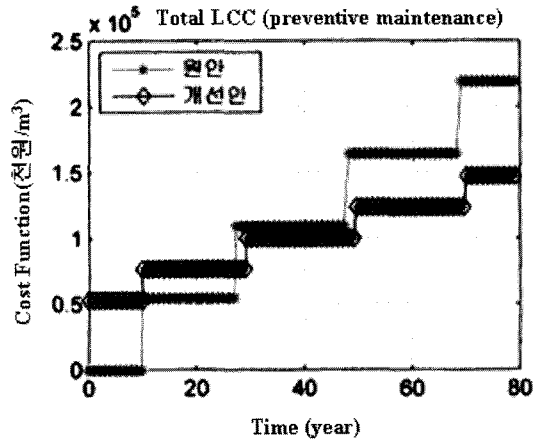


Fig. 9. Results of LCC analysis.

시하는 경우 초기공사비 53,000원/m²을 고려한 총 생애주기비용은 309,000원/m²으로 나타났으며, 이는 무도장인 경우의 516,000원/m²과 비교하여 약 60% 수준으로 높은 경제성을 갖는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 시공 단계에서 예방 유지관리적 차원의 염해도장을 실시하는 경우와 실시하지 않는 경우에 대한 내구성능 상세 평가를 통해 그 효과를 분석하여 보았고, 또한 LCC 분석을 통해 염해도장의 경제적 효과를 고찰하여 보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 염해도장을 하지 않은 경우의 최초 단면보수 시기가 7.4년인데 비하여 염해도장을 한 경우는 20.5년을 나타내어 장기적인 유지관리 측면에서 염해도장을 실시함이 훨씬 유리함을 확인할 수 있었다.

2) 염해도장을 실시하는 경우 염화물의 침투시간을 2배 이상 늦출 수 있을 뿐만 아니라 염화물의 침투 깊이 또한 절반 이상 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

3) 염해도장을 실시하는 경우의 LCC가 309,000원/m²으로, 무도장인 경우의 516,000원/m²과 비교하여 약 60% 수준으로 높은 경제성을 갖는 것으로 평가되었다.

4) 해양환경의 영향을 받는 콘크리트 구조물에 있어서는 시공 단계에서 염해도장을 실시함이 내구성능 측면과 경제성 측면에서 보다 합리적인 것으

로 판단된다.

감사의 글 : 이 연구는 신구대학 2010학년도 교원연구역량강화사업의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 김규덕, 손영현, 박주원, 최미라, 이증빈, “철근콘크리트구조물의 신뢰성 기반 내구성 해석 및 설계”, 한국구조물진단학회 2007년도 봄 학술발표논문집, 제11권, 제1호, pp.115~122, 2007. 5.
- 2) 김영근, 조병영, “염해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능 설계”, 한국콘크리트학회, 제18권, 제4호, pp. 32~40, 2006. 7.
- 3) 김성수 외 2명, “해양환경하에 방치한 콘크리트 중의 철근의 부식추정에 대한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제6권, 제6호, 1994. 7.
- 4) 한국콘크리트학회, “최신콘크리트공학”, pp. 464~467, 1993.
- 5) 한국콘크리트학회, “콘크리트 구조설계기준”, 2007.
- 6) 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서”, 2003.
- 7) 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서, 내구성편”, 2004.
- 8) 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서, 유지관리편, 2004.
- 9) 한국콘크리트학회, “철도설계기준 철도교편”, 2004.
- 10) 한국콘크리트학회, 염해 및 탄산화에 대한 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계, 시공, 유지관리 지침(안), 2002. 11.
- 11) 한국콘크리트학회, “최신콘크리트공학”, pp. 394~395, 2007.