



무기계 침투제를 적용한 콘크리트의 장기염해 실험을 통한 염해 내구성 평가

권성준^{1)*} · 박상순²⁾ · 노병철³⁾

¹⁾University of California, Irvine ²⁾한국건설자재시험연구원 ³⁾상지대학교 건설시스템공학과

Durability Evaluation of Inorganic-Impregnated Concrete Exposed to Long-Term Chloride Exposure Test

Seung-Jun Kwon,^{1)*} Sang-Soon Park,²⁾ and Byeong-Cheol Lho³⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, Irvine CA 92697, USA

²⁾Korea Institute of Construction Materials, Seoul 137-707, Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

ABSTRACT The repair technique using surface impregnation of reactive compound is so effective for deteriorated concrete structures that many researches are recently focused on these works. Particularly, inorganic impregnant is regarded as eco-friendly material because there is no air-pollution during manufacturing process as well as field coating works. Furthermore, The delamination between old concrete and impregnated surface does not occur, resulting from different material characteristics. In order to evaluate the durability performance of surface-impregnated concrete, durability evaluation through the long-term exposure tests is significant, however, experiments are usually limited to the temporary and qualitative laboratorial scope. In this study, durability characteristics for inorganic and organic/inorganic impregnated concrete specimens are evaluated through long-term chloride exposure test. The specimens with 21 MPa and 34 MPa strength have been prepared and exposed to chloride attack in the atmospheric, tidal, and submerged conditions. Evaluation for compressive strength, chloride penetration, and electrical potential (half cell potential) for steel corrosion are performed for the specimens exposed for 2 years. From the results, no distinct strength gaining is observed but the resistance to chloride penetration and steel corrosion is evaluated to be improved through surface impregnation. The more improved resistance to chloride attack is measured in the inorganic impregnated concrete and the results from atmospheric condition show more improved resistance to chloride attack than those from submerged and tidal condition.

Keywords : surface impregnation, inorganic impregnant, long-term chloride exposure test, durability evaluation

1. 서 론

콘크리트구조물은 사용기간의 증가에 따라 내구성이 저하되는 문제점을 보이는데, 이러한 문제는 구조안전성에 큰 영향을 준다. 콘크리트는 경제적이며, 내구적인 건설재료로 사용되어 왔으며, 해수, 지하구조물 등 다양한 환경에 노출되어 있다. 최근들어 경제적인 보수기법을 통하여 콘크리트구조물의 내구성을 개선하려는 연구가 시도되고 있는데, 이러한 보수기법 중 콘크리트 표면에 유기 또는 무기 침투제를 도포함으로써 열화저항성능을 개선하려는 연구가 진행되고 있다.¹⁻³⁾

이러한 연구는 크게 두 가지 측면에서 의미가 있는데, 첫 번째는 새로운 실리케이트 보수재료의 개발이라고 할

수 있다. 1980년대에는 주로 황화물을 기본으로 한 침투제를 이용하여 모재 콘크리트의 공극 구조를 치밀하게 하였으며 강도와 탄성계수의 증가를 유도하였다. 그러나 이와같이 황화물(modified sulphur)을 이용하여 에트린 자이트를 추가적으로 생성하고, 이를 통해 콘크리트의 물성치를 개선하려는 연구는 추가적인 양생 또는 고온의 온도를 적용해야 하므로, 광범위하게 사용되지 못하였다.⁴⁾ 그러나 최근에는 콘크리트 내부의 모세관 장력 또는 외부 가압 등을 이용하여 반응성 물질을 콘크리트 내부로 침투시키고 추가적인 수화물의 생성을 통해 콘크리트 표면을 경화시키는 보수기법이 개발되고 있다.⁵⁻⁷⁾ 침투된 실리케이트계 화합물은 콘크리트 내부에 잔존하는 수산화칼슘과 반응하여 추가적인 수화물(CSH)을 생성하게 되고 이에 따라 공극 구조의 치밀성 또는 미세균열의 회복이 침투층에서 발생하게 된다. 표면 침투제를 이용한 보수기법은 콘크리트 표면이 침투깊이만큼 개선되는 것

*Corresponding author E-mail: jjuni98@yonsei.ac.kr
Received July 4, 2007, Revised November 28, 2007, Accepted January 31, 2008
©2008 by Korea Concrete Institute

이므로 열화인자가 직접적으로 유입하는 것을 효과적으로 차단한다. 적절한 시공성이 확보된다면 열화인자에 대하여 효과적인 내구성 확보 방안으로 사용될 수 있다.^{2,3)}

두 번째는 개발된 침투제를 이용한 효과적인 보수 시스템의 개발이라고 할 수 있다. 현재 일반적으로 사용되는 유기계 침투제의 경우는 경제적인 장점을 가지고 있으며 방수 또는 열화인자의 침투 제어에 사용되고 있다. 그러나 모든 유기계 도료의 제조에서 볼 수 있듯이, 유기계 침투제는 휘발성 유기화합물을 방출시키며, 이러한 재료를 콘크리트에 도포할 경우에도 많은 환경적인 문제점이 발생하게 된다.⁸⁻¹¹⁾ 이러한 환경적인 문제점 이외에도, 콘크리트 구조는 공극을 가지고 있는 무기계이므로 장기적인 열화환경에 노출시, 구콘크리트와 표면 침투제 간의 박리가 발생하여 표면침투층 들뜸과 같은 시공불량 현상을 보이기도 한다.^{5,6,11-13)} 콘크리트 표면의 공극은 균열과 함께 유해인자의 주된 침투경로가 되며, 공극률의 감소를 통하여 많은 내구적인 문제점이 개선된다. 콘크리트에 혼화재료를 혼입함으로써 공극률이 감소되고 이에 따라 염화물 침투 저항성, 투수성 등의 내구성능이 개선되고 있음을 기존의 연구를 통해서 확인할 수 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 표면침투제를 도포한 콘크리트에 대한 연구는 주로 기초물성시험, 내화학적 실험, 내구성 실험 등 최근들어 다양하게 수행되고 있지만, 장기적인 노출 실험을 통하여 염해에 대한 내구성능을 평가한 연구는 매우 희박하다.

본 연구에서는 유무기계 및 무기계 침투제를 도포한 콘크리트 시편에 대하여 염해 저항성에 대한 장기폭로 실험을 수행하였으며, 그에 따른 내구적 저항성을 평가하였다. 표면침투제를 도포한 콘크리트 시편에 대하여 2년 경과 후의 장기 압축강도 평가, 염화물 침투깊이 평가, 철근부식 자연전위에 대한 평가가 본 논문에서 수행되었다.

2. 표면 침투제를 도포한 콘크리트의 성능 개선

2.1 무기계 표면 침투제의 특징 및 구성

2.1.1 무기계 표면 침투제

일반적인 표면 침투제는 소수성 물질을 용매에 포함시키는 형태로서, 수분 함량이 많은 콘크리트 표면에 브러쉬 또는 스프레이 방식으로 도포되면, 상호접착력이 약해지고 표면 침투제가 침투되는 과정에서 용매가 증발되어, 침투가 저하되는 단점이 있다.^{12,13)} 본 논문에서 사용한 무기계 표면 침투제는 이러한 영향을 개선하기 위해, 콘크리트 표면에 소수성 물질과 화학적 결합이 가능한 친수성의 물질을 동시에 포함하고, 액상의 표면장력을 낮추는 계면활성제를 추가로 첨가된 형태이다.

2.1.2 무기계 표면 침투제의 구성

1) 부분적으로 가수분해된 에틸실리케이트^{12,13)}

친수성 물질인 에틸실리케이트 (부분적으로 가수분해되어 조절된 에틸실리케이트 단량체)를 기본으로 사용한

다. 에틸실리케이트 $[Si(OC_2H_5)_4]$ 는 물에 의하여 완전하게 가수분해 되면, 콘크리트의 주성분이 실리카 (SiO_2)가 생성되지만, 본 침투제에서는 부분적으로 가수분해되어, 친수성기 $[(OC_2H_5)_{4-n}Si(OH)_n]$ 를 하나 이상 포함하게 된다. 특히 수산화칼슘은 부분적으로 가수분해된 에틸실리케이트와 반응하여, 칼슘유기계 실리케이트 염을 형성하게 되고, 이때 형성된 칼슘실리케이트 염은 콘크리트 페이스트 구조안으로 유입되어 미세공극을 충전하게 된다.

2) 소수성 실리콘 화합물의 선택

기존의 연구^{12,13)}에 의하면 무기계 침투제는 실리콘 화합물 (소수성인 실란, 올리고머 실록산, 저분자량의 폴리실록산)을 필요로 한다. 실리콘 화합물은 부분적으로 가수분해된 에틸실리케이트와의 칼슘실리케이트 염의 생성을 일부 억제하고 콘크리트 표면상에서 에틸실리케이트와 반응하여 소수성을 제공한다. 따라서 표면상에서 형성된 소수성은 콘크리트 내부로 수분의 침투를 억제하는 반면, 표면 침투제가 모세공극 및 계면사이에 미세균열 속으로 깊이 침투하도록 한다. 올리고머 실록산을 사용했을 경우의 분자식은 Fig. 1 (a)에 나타냈으며, 저분자량의 폴리실록산을 사용했을 경우는 Fig. 1 (b)에 나타내었다.¹²⁾

3) 화합물 생성기구^{12,13)}

앞에서 언급한 실리콘 화합물 중, 실란과 부분적으로 가수분해된 에틸실리케이트와의 반응을 살펴보면 Fig. 2와 같다. 먼저 실란 (①)은 물 (②)과 반응하여 소수성의 R^1 을 제외하고 $Si-OH$ 로 가수분해된 실란 화합물이 제조되고 (③) 실란화합물과 부분적으로 가수분해된 에틸실리케이트 (④)가 반응하여, 소수성이 부여된 화합물 (⑤)을 얻을 수 있다. 또한 가수분해된 실란 화합물 (⑥)은 수화된 콘크리트 생성물인 실리케이트 (⑦)와 반응하여 콘크리트 표면에 소수성이 부여된 화합물 (⑧)을 얻을 수 있다. 실란은 표면침투제에 소수성을 부여하여 표면상에서 장시간 머물러 외부로부터 수분침투를 억제하고, 동시에 표면 침투제가 콘크리트 페이스트 내부로 깊이 침투할 수 있도록 한다. Fig. 2에서는 무기계 침투제의 화합물 형성 기구를 나타내고 있다.

2.2 수화물 생성을 통한 콘크리트 구조의 성능 개선

2.2.1 콘크리트 구조의 표면 조직의 밀실화

콘크리트 구조를 강화시키는 물질로서는 규산염계 및 실리카계 등이 사용되고 있으며, 이들 중에 실리카계인

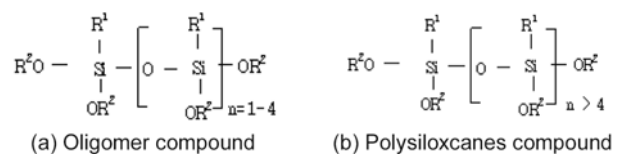


Fig. 1 Composition of ethyl silicate type

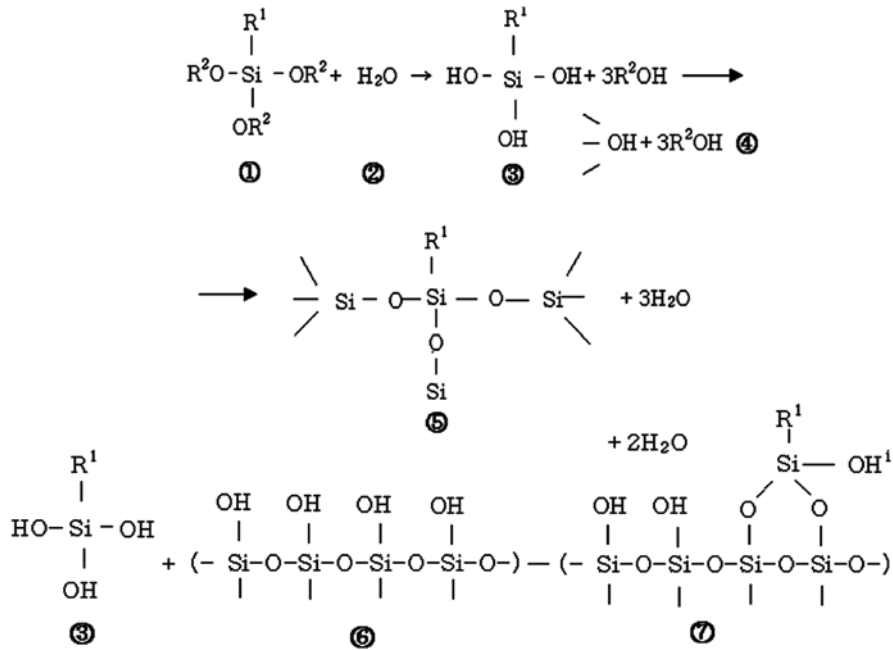
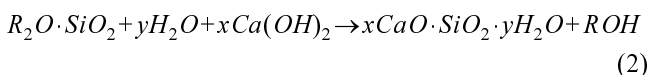
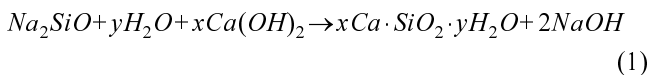


Fig. 2 Compound formation of Inorganic impregnant

실리케이트 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$) 가 많이 사용되고 있다.^{5,6,11,17} 실리케이트를 성능이 저하된 콘크리트 표면에 도포하면 침투가 된 후, 시멘트 수화반응에 의해 생성된 수산화칼슘 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 반응함으로써 불용성 규산칼슘계 ($n\text{Ca} \cdot \text{SiO}_2$)를 생성하여 콘크리트 구체 조직을 치밀하게 만든다. 형성된 CSH겔은 기존의 공극, 미세균열과 같은 열화 인자의 유입원을 충전시켜, 조직을 치밀하게 형성한다. 즉 기존의 수화과정 이후 일반적으로 수화물의 25~30% 정도 잔존해있는 수산화칼슘과 추가적인 수화반응을 수행하여 CSH겔을 형성하는 것이며, 이렇게 실리케이트의 침투로 인해 형성된 표면의 CSH겔층은 콘크리트 모재와 같은 역학적 성능을 확보하고 있으므로, 유기계 도료 또는 판점착방식의 보수시스템과 달리 보수층의 박리가 발생하지 않는다. 일반적인 판점착방식을 이용한 보수방법은 유기계 에폭시 등을 사용하여 콘크리트 모재에 접착하여 사용하는데,^{2,3} 장기간의 열화환경에 노출될 경우, 보수층과 기존의 콘크리트층이 서로 박리되므로, 열화 저항 성능을 확보하지 못하게 된다.

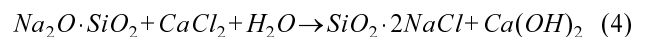
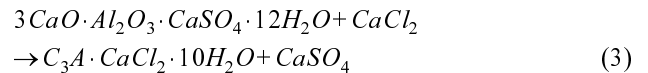
본 연구에서 사용한 무기계 침투제의 반응은 식 (1)에, 유/무기계 침투제 반응식은 식 (2)에 나타내었다.^{12,13,17}



2.2.2 염해에 노출된 콘크리트의 고정화 특성

경화된 콘크리트 내부의 염화물이온은 일반적으로 자유염화물과 고정염화물로 분류할 수 있다. 철근부식에 직접적으로 관여하는 자유 염화물이온과는 다르게 고정염

화물 (일반적으로 프리텔염)은 외부로부터 화학적인 침식 또는 탄산화와 같은 특수한 환경을 제외하면 화학적으로 안정적인 형태를 가지고 있다.^{18,19} 식 (3)에서는 염화물을 포함하고 있는 가용성의 염화칼슘과 monosulfate와의 반응을 통하여 프리텔염을 형성하여 염화물의 고정화를 나타내고 있다. 식 (3)과 마찬가지로 실리케이트가 콘크리트 내부로 침투하게 되면 가용성염을 식 (4)와 같이 불용성의 규산염겔 ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{NaCl}$)로 변화시킴으로써 염화물의 고정화를 수행할 수 있다.



한편 기존의 이론에 의하면,^{20,21} 콘크리트 내 공극수에 용해되어 있는 염화물 이온은 CSH겔에 흡착하여 고정염화물로 변화하는데, 물시멘트비에 관계없이 생성되는 CSH양에 관계하게 된다. 이러한 침투제의 도포를 통하여 추가적으로 생성되는 CSH의 존재는 기존의 연구¹⁵에서 확인할 수 있는데 CSH의 생성은 염화물 확산계수의 감소¹² 및 투수계수의 감소¹³를 통하여 염해에 대한 저항성을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 3에서는 무기계 침투제를 침투시킨 콘크리트에 대하여 발생하는 내구적 성능 개선 효과를 요약한 것이다.

3. 장기폭로실험을 통한 내구성 향상 평가

3.1 실험의 개요

본 연구에서는 장기폭로실험을 위하여 2가지 배합 (W/C:

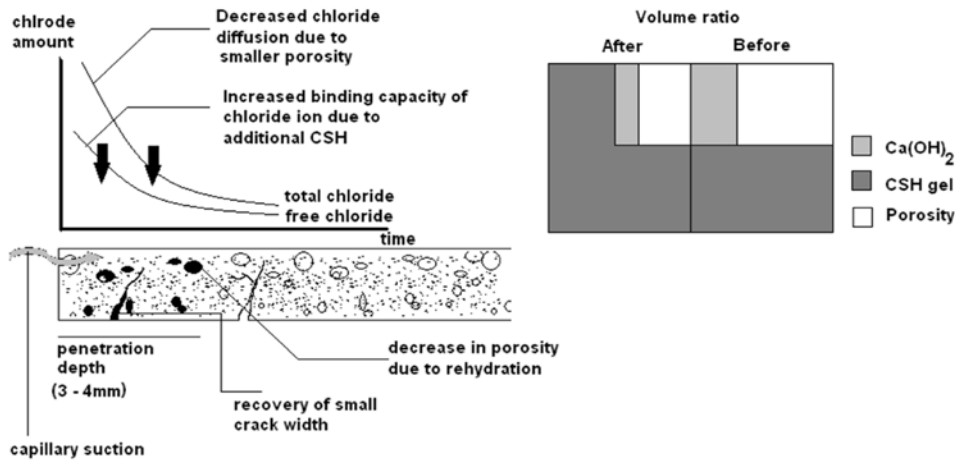


Fig. 3 Modified durability performance through surface impregnation

46.8%, 33.6%)을 사용하였으며, 압축강도, 염화물 침투깊이, 철근부식 자연전위를 평가하기 위하여 다양한 시편이 제작되었다. 각 시편은 일주일간 수중양생을 수행한 뒤, 표면 침투제를 도포하였으며, 일주일간 옥외폭로상태에서 침투를 유도하였다. 이후 2주간 수중양생을 추가로 수행하였다. 침투방식은 스프레이를 사용하여 위에서 아래로 3회 도포하였으며, 전체 표면이 완전히 젖음을 확인하고 중지하였다. Table 1에서는 사용된 배합을 나타내고 있으며, Table 2에서는 도포된 표면 침투제의 물성치의 특성을 요약하였다.

Table 2에서 알 수 있듯이, 각 표면 침투제는 실리케이트를 주성분으로 하고 있으며, 무기계의 경우, 낮은 점도와 표면장력으로 인해 침투가 더욱 용이하게 조성되어 있음을 알 수 있다. 한편 Table 3에서는 장기폭로실험을 위한 시편의 제작 현황을 노출환경과 함께 나타내었으며 관련 그림을 Fig. 4에 나타내었다.

3.2 장기폭로실험 평가

3.2.1 압축강도 평가

압축강도 시편은 21 MPa 및 34 MPa 공시체 시편에 대하여 재령 28일, 90일, 360일, 720일에 대하여 압축강도

Table 3 Condition of test specimens

Type	Size (mm)	Number of specimens		
		21 MPa	34 MPa	Sum
Cylinder	100 × 200	108	36	144
Steel-embedded Specimen	50 × 50 × 150	27	9	36
		· Cover depth : 19 mm		
Environmental condition	· 21 MPa			
	- Atmospheric : not directed exposed to sea water (salt sprayed zone) Temp : -1~25°C, R.H. : 69~83%			
		- Tidal : periodically submerged in the sea water		
		- Submerged : in the sea water		
	· 34 MPa			
	- Tidal : periodically submerged in the sea water			

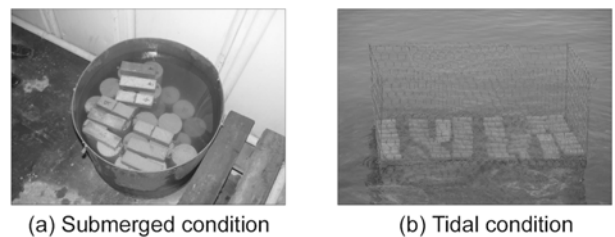


Fig. 4 Photos for concrete specimens

Table 1 Mix proportions for tests

MPa	Slump (mm)	W/C (%)	S/a	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
21	150	46.8	43.7	178	380	751	976
34		33.6	45.7		530	649	954

Table 2 Material properties of surface impregnant

Type	Main ingredient	Color	Viscosity (cp)	Surface tension (dyne/cm)	Solvent	
I	Inorganic	Silicate	Non	3.72	26	Alcohol
O/I	Organic/inorganic	Silicate + Sodium + Polymer	Sky-blue	4.13	38	Water

평가를 수행하였다. 각 재령에 대하여 3개씩의 압축강도 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 28일 경과시에는 침투제를 도포한 콘크리트가 도포하지 않은 콘크리트에 비하여 동등 이상의 강도증가를 나타내었으나, 장기재령시 압축강도 개선 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그 이유는 표면에서 침투가 시작하여 침투깊이만큼만 강도 증가가 발생하므로 강도 증가 영역이 전체 체적에 비하여 작은 수준이기 때문이다. 표면 침투제에 시편을 침지하지 않고 스프레이 도포를 통하여 일반 구조물에 도포하면 침투깊이는 3~12 mm 정도이므로¹²⁾, 강도 증가용으로 침투제를 사용하기는 어렵다.

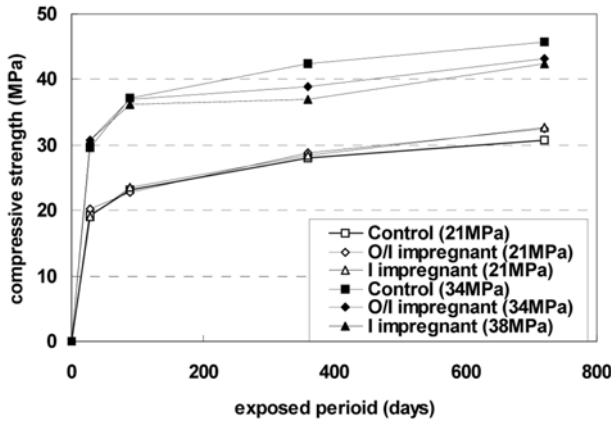


Fig. 5 Results for compressive strength (tidal condition)

동일한 침투제 (무기계, 유/무기계)를 도포한 콘크리트 시편의 경우, 25 MPa에서 30.3 MPa로, 29.8 MPa에서 34.6 MPa로 10% 이상 강도 증가가 발생한 연구 결과가 있지만,¹²⁾ 81일 경과한 시편에 대하여 침투제를 도포한 뒤, 이후 14일의 추가적인 양생기간을 거쳐서 평가한 것이므로 직접적인 비교는 어렵다. 침투제를 도포한 콘크리트의 보수설계시에는 안전한 설계를 위해서라도, 압축강도의 변화는 고려하지 않는 것이 바람직하다고 판단된다. Table 4에서는 720일 경과 후의 강도변화율을 나타내었는데, 21 MPa의 경우, 5.9%와 6.3%의 강도 증가를 보이고 있었으나, 34 MPa의 경우는 5.5%와 7.4%의 강도 감소를 나타내고 있었다. 물리-화학적 열화환경에 주기적으로 노출되는 조석대 환경이고, 시편의 개수가 충분하지 않았으므로, 각 침투제를 도포한 시편의 명확한 강도 증가를 확인할 수 없었다.

3.2.2 염화물 이온의 침투깊이 평가

염해의 경우, 다른 이온에 비하여 가장 침투속도가 빠르고 철근부식에 가장 직접적으로 관여하므로 매우 중요한 열화인자이다.^{1,14,15)} 본 실험의 목적은 침투제 도포 전후의 침투깊이 변화를 분석하는 것이다. 본 연구에서는 침투깊이는 기존의 연구 결과를 이용하여 0.1N AgNO₃ 용액분무에 따른 변색범위로 깊이를 측정하였다.²²⁾ 강도 21 MPa 시편에 대해서는 비말대, 조석대 및 해수중에 노출된 콘크리트 시편의 염화물 침투깊이를, 강도 34 MPa 시편에 대해서는 조석대를 노출환경으로 하여 실험을 수행하였다. 변색이 되는 침투깊이는 대략 수용성 염화물을 기준으로 0.15% (시멘트 중량)으로 고려되는데,^{22,23)} 본 실험에 사용된 배합을 사용하면 수용성 염화물 0.57 kg/m³을 나타낸다. 수용성 염화물과 전 염화물의 비는 대략 50~80% 정도로 가정할 수 있으므로 0.71~1.14 kg/m³의 전염화물량을 나타낸다고 할 수 있다.^{15,22,23)} Fig. 6에서는

Table 4 Strength ratio after 720 days

Exposed period	Strength ratio (21 MPa)			Strength ratio (34 MPa)		
	Control	O/I	I	Control	O/I	I
720 days	100.0	105.9	106.3	100.0	94.5	92.6

염화물 침투깊이 실험 사진을 나타내고 있으며, Fig. 7에서는 실험 결과를 나타내고 있다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 표면밀도의 개선을 통하여 대부분 염화물 침투깊이가 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 무기계 침투제의 경우, 유/무기계 침투제에 비하여 뚜렷한 내염해 저항성을 가지고 있었는데, 이러한 경향은 34 MPa 콘크리트 시편에 더욱 크게 나타났다. Fig. 7 (d)의 경우, 유/무기계 침투제를 도포한 시편의 경우 1년 경과시, 침투깊이의 감소가 평가되지 않은 반면, 무기계 침투제를 도포한 시편의 경우 뚜렷한 염화물 침투감소를 확인할 수 있었다. 시편의 개수는 3개의 평균값을 사용하였는데, 시편이 개수가 많았다면 더욱 신뢰성있는 결과를 제시할 수 있는 것으로 예상된다.

단위시멘트량이 많은 콘크리트의 경우, 수산화칼슘량이 더욱 많이 형성되는데, 이에 따라 추가적으로 CSH겔생성이 더욱 많아지고 공극 구조 또한 치밀해져서 열화 저항성 개선에 유리하게 작용하고 된다. W/C가 낮은 시편의 경우 (7d), 침투제를 도포하지 않은 시편과 무기계 침투제를 도포한 시편의 경우에서, 침투깊이가 감소하고 있음을 알 수 있다.

한편 2년 경과 후 조석대에서는 무기계 침투제를 도포한 34 MPa 시편에 대하여 43 mm의 측정깊이를 보이고 있었는데, 나머지 시편들은 모두 지름방향으로 침투깊이가 관통하였으므로 50 mm 이상의 침투깊이를 나타내고 있었다고 할 수 있다. 명확한 경향의 파악을 위하여 Fig. 7 (b)~(d)에서는 360일까지의 결과를 도시하였다. Table 5에서는 최종 존치 기간 (360일)에 대한 침투깊이 변화율을 나타내고 있다.

한편 동일한 침투제를 도포한 콘크리트 시편의 염해 저항성 실험에서도¹²⁾ 24 MPa 콘크리트 시편에 대해서는 62.5%의 침투깊이 저항성을, 30 MPa 콘크리트 시편에 대해서는 80.9%의 침투깊이 저항성을 보이고 있었다. 압축 강도 실험 결과와는 다르게, 장기 실험 결과에서도 비슷한 성능을 확보하고 있음을 알 수 있었다.

3.2.3 철근부식 자연전위 평가 (HCP : half cell potential)

본 장에서는 황산동 전극을 이용한 전위차측정 (ASTM C 876-80; Copper-Copper Sulfate Half Cell-CSE)을 이용하여,²⁴⁾ 철근이 매립된 시편의 철근부식 자연전위를 평가하도록 한다. 전위차 측정은 비파괴 시험법으로서 매립

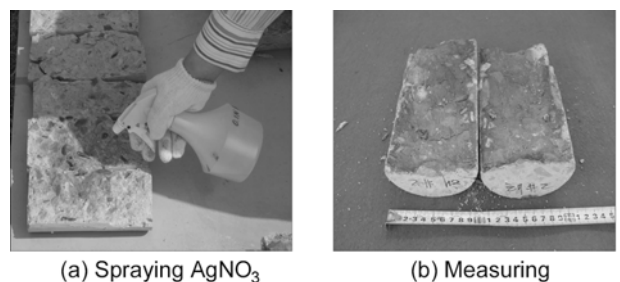


Fig. 6 Chloride penetration depth using AgNO₃ indicator

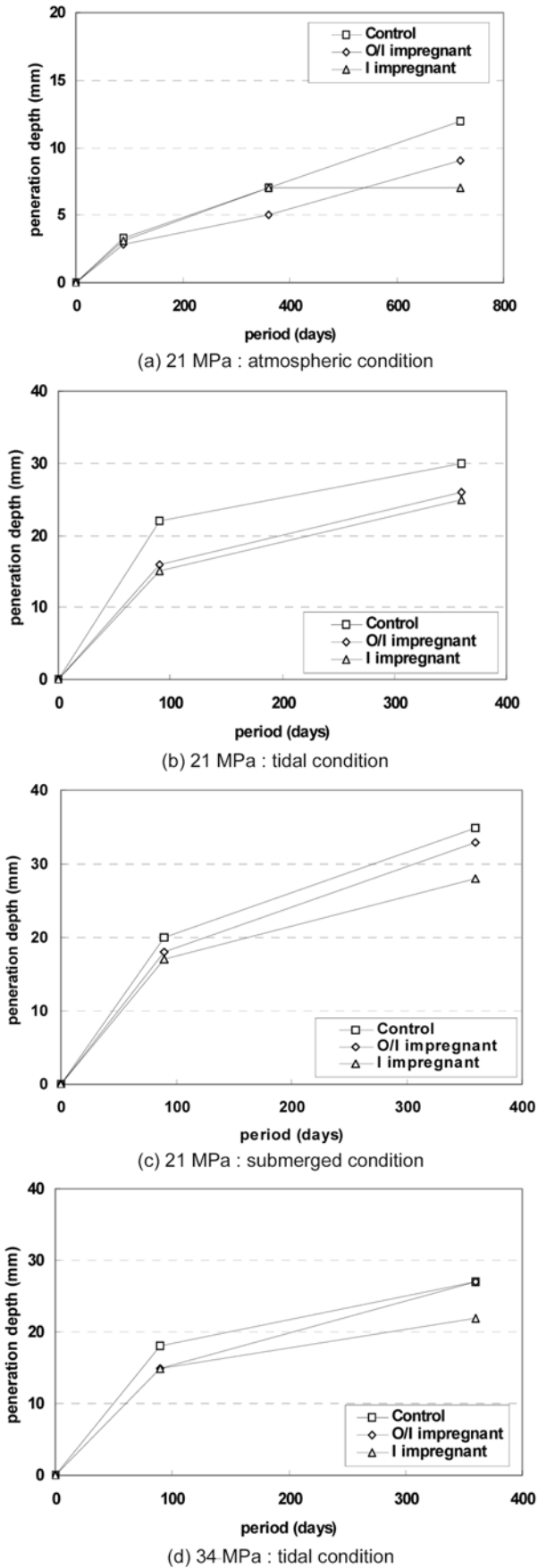


Fig. 7 Chloride penetration depth in concrete

된 철근과 콘크리트간의 전위차를 측정하여 부식가능성을 평가할 수 있는 기법이다. 즉 전위차가 크게 평가될

Table 5 Ratios of chloride penetration depth after 360days

Period (days)	Condition	Ratio of chloride penetration depth (21 MPa: %)		
		Control	O/I impregnant	I impregnant
360	Tidal	100.0	94.3	80.0
360	Submerged	100.0	86.7	83.3
720	Atmospheric	100.0	75.0	58.3
Period (days)	Condition	Ratio of chloride penetration depth (34 MPa: %)		
		Control	O/I impregnant	I impregnant
360	Tidal	100.0	100.0	81

수록 부식이 발생할 가능성이 높다고 할 수 있다. 본 시험에서는 급격한 전하의 변화를 보기위해, 피복두께를 작게 만든 시편 (19 mm)을 사용하였다. 본 철근매립 시편의 자연전위는 28일, 56일, 90일, 180일, 360, 720일에 측정되었는데 Fig. 8에서는 자연전위 측정 현황을, Fig. 9에서는 철근부식 자연전위 실험 결과를 나타내고 있다.

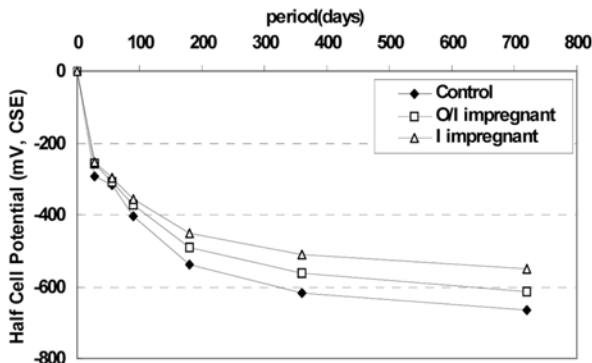
일반적으로 자연전위가 낮은 경우 부식가능성이 높게 평가되는데, Fig. 9에서 알 수 있듯이, 표면 침투제를 도포한 시편은 도포하지 않은 시편에 비해서 상대적으로 자연전위가 상승하고 있음을 알 수 있다. 특히 조석대 영역에서는 침투제를 도포하지 않은 34 MPa 시편의 자연전위와 침투제를 도포한 21 MPa의 자연전위가 비슷하게 평가되었다. 기존의 연구에 의하면,²⁵⁾ 측정된 자연전위가 -350 mV 이하의 경우, 부식이 발생할 확률이 90% 이상이라고 보고되고 있다. 수중부보다 조석대의 경우, 염화물량과 산소 침투가 더욱 활발하므로, 높은 자연전위치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 비말대에서 21 MPa 시편의 자연전위를 평가한 그림은 Fig. 10과 같다.

분극저항법을 이용하면 정량적인 부식속도를 계산하여, 내구수명과 직접적으로 연관시킬 수 있으나, 본 연구에서는 반전위 측정을 수행하였다. 그러나, 측정된 전위 (mV, CSE)가 감소할수록 부식이 발생할 가능성은 더욱 높아지므로 상대적인 부식저항성 평가는 가능하다고 판단된다.

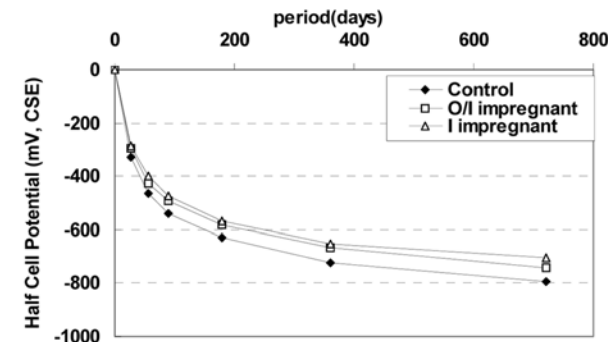
Fig. 9 (c)에서 침투제를 도포하지 않은 시편에 대해서는 1.8년 이후 -350 mV 이하의 값을 나타내었는데, 유/무기계 및 무기계를 적용한 시편에서는 2년 경과시 모두 -350 mV 이상의 자연전위값을 나타내고 있었다. 이 경우 역시, 무기계 침투제에서 더욱 개선된 염해저항성



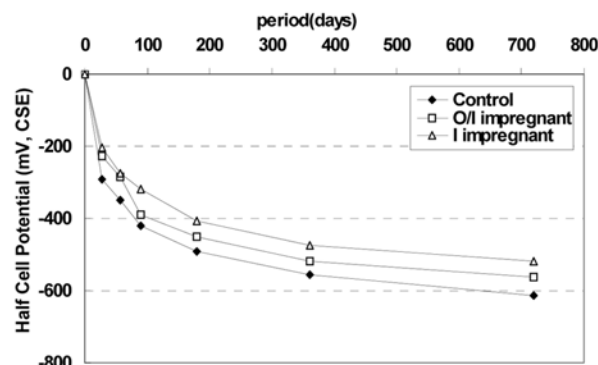
Fig. 8 Test of half cell potential



(a) Measured half cell potential with time (21 MPa, submerged condition)



(b) Measured half cell potential with time (21 MPa, tidal condition)



(c) Measured half cell potential with time (34 MPa, tidal condition)

Fig. 9 Result of half cell potential under tidal and submerged condition

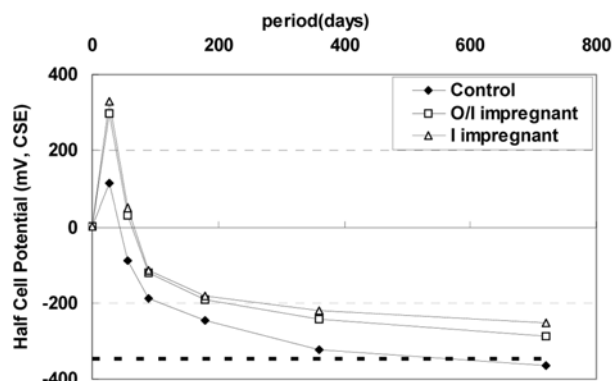


Fig. 10 Result of half cell potential with time under atmospheric condition

이 확보되었다.

침투제를 사용할 콘크리트구조물의 노출환경은 수중부, 조석대와 같은 노출환경보다는 비말대와 같이 해안가에 노출되어 있는 콘크리트 부재에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 보다 명확한 유/무기계 또는 유기계 침투제의 성능평가를 위해서는 많은 시편과 장기간의 염해노출 환경에 따른 염해저항성 평가가 필요하다고 할 수 있다.

4. 결 론

무기계 침투제를 적용한 콘크리트의 장기폭로실험을 통한 염해 내구성 평가를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 침투제를 적용한 콘크리트 시편에 대해 장기폭로 실험을 수행하였는데, 단기적으로는 압축강도의 증가를 평가할 수 있었으나, 2년간의 장기폭로실험 결과 뚜렷한 강도 증가 효과를 확인할 수 없었다. 보수 설계시 강도 증가 효과는 없는 것으로 설계하는 것이 바람직하다고 평가된다.
- 2) 염화물 침투깊이를 평가한 결과, 무기계 침투제가 유/무기계 침투제보다 개선된 성능을 나타내었다. 21 MPa 콘크리트 시편에 대해서는 침투제 적용 후 80.0~94.3% (조석대), 83.3~86.7% (해수중)의 수준으로 침투깊이가 감소하였다.
- 3) 자연전위 측정시 720일 경과 후 21 MPa 시편에 대해서는 침투제 적용시 해수중에서는 82.4~91.8% 수준으로, 조석대에서는 88.6~93.8% 수준으로, 비말대에서는 69.2~78.5% 수준으로 자연전위 수준이 감소되었다. 한편 34 MPa 시편에 대해서는 조석대에서 84.8~91.6% 수준으로 감소하였다. 철근부식 자연전위 측정에서도 무기계가 유/무기계 보다 개선된 성능을 확보하고 있었다.
- 4) 사용된 침투제는 수중환경 또는 조석대보다는 비말대영역에서 보다 개선된 염해저항성능을 확보하고 있었으며, 적절한 시공기법과 품질관리가 현장에서 이루어진다면, 효과적인 보수기법으로 활용될 것으로 평가된다.

참고문헌

1. CEB, General Task Group 20, *Durable Concrete Structure-Design Code*, CEB, Thomas Telford, 1989, pp. 25~40.
2. Emmons, P. H., *Concrete Repair and Maintenance Illustrated*, R.S. Means Company, 1994, pp. 5~16.
3. Ohama, Y., "Recent Progress in Concrete-Polymer Composites," *Advanced Cement Based Material*, Vol. 5, No. 2, 1997, pp. 31~40.
4. Beaudoin, J. J. and Feldman, R. F., "Durability of Porous Systems Impregnated with Dicyclopentadiene-Modified Sul-

- phurs,” *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 6, No. 1, pp. 13~18.
5. 양은익, 김명유, 노병철, 김정훈, “표면침투제에 따른 콘크리트의 염화물 침투와 동결융해 저항성에 대한 평가,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp.65~72.
 6. 유성원, 서정인, 하헌재, 이상민, 이상근, “고성능 표면침투제가 도포된 콘크리트의 물리 특성,” 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회논문집, 16권, 2호, 2004, pp. 233~236.
 7. (주)콘테크, 해조류추출물과 폴리실리케이트를 사용하여 R₂OrP 실리케이트의 반응성을 향상시킨 콘크리트 구조물의 방수성 방수공법, 신기술 신정보고서, (주)콘테크, 2003, pp. 103~118.
 8. 산업자원부, 옥외노출소재 (도료, 플라스틱, 고무)의 신뢰성 평가기술 및 표준화 개발에 관한 연구, 연구보고서, 산업자원부, 2002 pp. 102~118.
 9. 산업자원부, 공업재료의 촉진복합사이클 내식성 시험 및 평가방법 표준화기술 개발에 관한 연구, 연구보고서, 산업자원부, 2004, pp. 45~52.
 10. 유철, 조선소의 페인트 에어로졸 중 주석에 의한 토양오염 및 인근지역 주민의 노출 평가, 연세대학교, 환경공학과 공학석사, 2001, pp. 32~35.
 11. Moon, H. Y., Shin, D. G., and Choi, D. S., “Evaluation of the Durability of Mortar and Concrete Applied with Inorganic Coating Material and Surface Treatment System,” *Construction and Building Materials*, Vol. 21, 2007, pp. 362~369.
 12. 권성준, 박상순, 이상민, 김정훈, “표면침투제를 이용한 콘크리트의 내구성 향상에 대한 연구,” 한국구조물 진단학회, 11권, 4호, 2007, pp. 79~88.
 13. 권성준, 박상순, 이상민, 김중우, “내구성 실험을 통한 최적 표면침투제의 선정,” 한국구조물진단학회, 2007 (출판중).
 14. 송하원, 권성준, 이석원, 변근주, “고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 침투 저항성에 관한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003, pp. 400~408.
 15. 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, “혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 25권, 1A호, 2005, pp. 213~223.
 16. Song, H. W. and Kwon, S. J., “Permeability Characteristics of Carbonated Concrete considering Capillary Pore Structures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue6, 2007, pp. 909~915.
 17. 이용준, 표면 침투제를 적용한 기존 콘크리트의 내구성 향상, 상지대학교 석사학위논문, 2003, pp. 25~32.
 18. 小林一輔, 白木亮司, 河合研至, 炭酸化によって引き起こされるコンクリト中の鹽化物,硫黃化合物及アルカリ化合物の移動と濃縮, *コンクリト工學論文集*, 1990, pp. 69~82.
 19. 和泉意登志, 喜多達夫, 前田照信, 1986, 中性化, 技報堂出版, pp. 70~82.
 20. Tang, L. and Nilsson, L. O., “Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Paste and Mortar,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 2, 1993, pp. 347~353.
 21. Jang, S. Y, *Modeling of Chloride Transport and Carbonation in Concrete and Prediction of Service Life of Concrete Structures considering Corrosion of Steel Reinforcement*, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Korea, 2003, pp. 35~42.
 22. Otsuki, N., Nagatataki, S., and Nakashita, K, “Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials,” *ACI Material Journal*, Vol. 89, No. 6, 1992, pp. 587~592.
 23. Meck, E. and Sirivivatnanon, V., “Field indicator of chloride penetration depth,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2003, pp.1113~1117.
 24. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete: C 876-91, *Book of ASTM Standards*, Section 4, Philadelphia, PA, USA, 1999, pp. 1~6.
 25. Broomfield, J. P., *Corrosion of Steel in Concrete : Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1997, pp. 56~72.

요 약 표면 침투제를 이용한 보수기법은 열화된 콘크리트구조물에 대해서 효과적이므로, 최근들어 많은 연구가 수행되고 있다. 특히 무기계 표면 보호재를 제조할 경우나 현장에서 적용할 경우, 공기오염이 없으므로 환경친화적이며, 침투층과 구콘크리트간의 물리적 성능 차이에 의한 박리가 발생하지 않는다. 침투된 콘크리트의 내구성 평가를 위해서는 장기폭로실험에 의한 평가가 매우 중요하지만, 대부분의 내구성 실험이 일시적이고 정성적인 실내실험에 국한되어 있다. 본 연구에서는 무기계 및 유/무기계 침투제를 사용한 콘크리트 시편에 대하여 장기염해폭로실험을 수행하여 내구적 특성을 실험적으로 평가하였다. 21 MPa과 34 MPa로 제조된 2가지의 콘크리트 배합에 대하여, 2년간 해수중, 조석대, 비말대에 노출하였으며, 압축강도, 염화물 침투깊이, 철근부식 자연전위 등을 평가하였다. 평가 결과, 침투제를 적용한 시편은 강도 증가에서는 성능 개선 효과가 거의 없었으나, 염화물 침투깊이와 자연전위에 대해서는 내구성능이 개선된 것으로 평가되었다. 유/무기계 침투제 보다 무기계 침투제에서 염해저항성이 크게 평가되었으며 수중부, 조석대에 노출된 시편보다는 비말대에 노출된 시편에서 염해저항성이 높게 평가되었다.

핵심용어 : 표면 침투, 무기계 침투제, 장기염해폭로실험, 내구성 평가