

나노합성 무기질 폴리머계 표면처리제를 적용한 콘크리트의 내구성능 평가에 관한 실험적 연구

An experimental study on durability evaluation of the concrete applied nano level inorganic polymer based coatings

백종명* 김은겸**
Baek, Jong-Myeong Kim, Eun-Kyeum

ABSTRACT

In this study, durability of the nano-level inorganic polymer based coatings which can provide a barrier against the ingress of moisture or aggressive ions to concrete is discussed. For the durability evaluation of the coatings, chloride penetration test, accelerating carbonation test, freezing and thawing test, and sulfate ponding test are conducted.

As the result of this study, concrete applied nano-level inorganic polymer based coatings has a much higher resistance to the ingress of chloride ion, carbon dioxide, moisture and aggressive acid than plain concrete and epoxy resin based paint by means of crosslinking three-dimensional structure with concrete structure.

I. 서론

1.1 연구 목적

콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 인자로서 재료조건, 구조물의 용도, 외기 환경조건 등이 있으며, 이러한 열화 인자로 인해 콘크리트 구조물에서는 균열, 누수, 철근부식, 박리, 박락 등의 현상이 발생한다. 즉, 수분이나 기타 외부 유해 물질 등이 콘크리트 내부로 침투하여 콘크리트 자체를 연화 시키거나, 철근의 부식 등을 유발하여 콘크리트 구조물의 성능저하를 일으키게 되는데 이러한 콘크리트의 열화를 방지하기 위해서는 수분 및 외부 유해물질 등의 침투를 방지하는 것이 필요하다. 이를 위하여, 현재까지 콘크리트 구조물의 열화를 방지하고 열화된 콘크리트의 성능을 회복시키기 위해 여러 가지 표면 처리 및 보수 공법들이 개발되어 왔으며, 이들을 사용하여 수많은 신구 콘크리트 구조물을 대상으로 표면처리 및 보수 공사가 진행 중에 있다. 그러나, 기존 대부분의 방수 및 보수재료는 장기적으로 반복되는 열화 인자의 침투로 말미암아 원래의 기능을 상실하게 되기 때문에 재시공을 해야 하는 경우가 많고, 비록 외부 유해 물질 차단 성능이 뛰어난 재료라 하더라도 국산화가 이루어져 있지 않거나, 환경 부하물질을 배출하게 되어 환경오염을 유발하기도 한다. 본 연구에서는 기존 표면 처리제들의 문제점을 개선하고, 나노 수준에서 합성하여 콘크리트와 일체화된 화학결합을 나타내는 것으로 알려진 나노 합성 무기질계 폴리머(이하에서는 나노합성 폴리머라 부름) 표면 처리제에 대해 실험적 방법을 통한 내구성능 평가를 실시하고, 이를 통해 신 재료에 대한 표면 처리제로서의 적용성을 검증하도록 한다.

1.2 연구 방향

본 연구에서는 나노 합성 폴리머 표면 처리제를 적용한 콘크리트의 내구성능을 평가하기 위해 콘크리트 열화현상에 대한 메카니즘과 나노 합성 폴리머 표면 처리제의 기본개념을 이론적으로 고찰한 후, 내구성능에 대한 평가방법으로서 유사제품과의 비교실험을 실시하였다.

우선, 콘크리트에 대한 중성화, 염해, 동결융해 및 화학적 침식 등의 열화 현상을 방지하기 위해 도입되는 표면 처리제로서 나노 수준에서 합성되는 무기질 폴리머계를 이용한 표면 처리제의 기

* 정회원 · 서울시하천공사, 서울산업대학교 철도전문대학원 공학석사

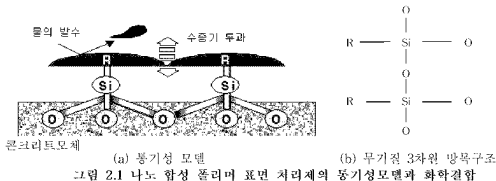
** 정회원 · 서울산업대학교 교수, 공학박사

본개념과 미세 공극으로의 침투 및 콘크리트 수화물과의 반응을 통한 모세관 공극 제어 원리에 대한 이론적 고찰을 실시한다. 다음으로 나노 합성 폴리머 표면 처리제를 도포한 콘크리트 시편에 대해 미세 조직 변화를 관찰하여 앞서 고찰한 이론적 개념들에 대한 검증을 실시하며, 중성화, 염해, 동결융해 및 화학적 침식 등에 대한 촉진실험을 통해 그의 내구성능을 평가하도록 한다. 이를 바탕으로 향후 나노 합성 폴리머 표면 처리제의 장기적 신뢰성을 예측하여 새로운 보수 재료로서의 적용성을 확립하도록 한다.

II. 나노 합성 폴리머 표면처리제의 고찰

2.1 열화인자의 침투역계 매카니즘

콘크리트 보호코팅을 목적으로 사용되어온 기존의 합성수지계 재료의 문제점을 보완하기 위하여, 나노 수준에서 합성되는 무기질계 폴리머를 이용한 표면 처리제를 사용하였는데, 이 재료는 다음 그림 2.1에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 모체와 일체화된 화학결합의 형태로 구성되며 3차원 망목구조로 인한 통기성 발현 등의 기능을 가지고 있고, 이러한 무기질계 폴리머는 콘크리트 조직에 침투하여 미세 기공을 가지게 되는데²⁾ 이 미세기공은 (1~2Å)보다 이온크기가 큰 염화인자(Cl⁻ : 3.68Å, H₂O : 2.8Å)를 근본적으로 차단할 수 있는 특성을 가지게 된다.

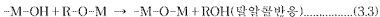


한편, 본 연구에 사용된 나노 합성 폴리머 표면 처리제의 합성 기구론 살펴보면 다음과 같다. 즉, 나노 합성 폴리머 표면 처리제는 다음의 식에서 나타낸 바와 같이 금속 알콕사이드(metal alkoxide) 라는 출발물질을 이용하여 가수분해와 중합반응을 통하여 단분자(monomer)에서 올리고머(oligomer), 폴리머(polymer) 형태로의 중합과정을 통하여 무기질계 폴리머 구조를 형성하게 된다³⁾.

① 가수분해반응(M:금속, R:알킬기)



② 중축합반응 \Rightarrow 3차원 망목상 구조 형성



이와 같이 알콕시 실란계 나노 합성 폴리머 표면 처리제는 기존 합성 수지계 표면 처리제의 경우와 같이 단순 혼합 공정에 의한 것이 아니고, 나노 수준에서 가수분해와 중합반응을 통하여 지분자량의 무기질계 폴리머를 합성함으로써 콘크리트 내의 CSA(Calcium Silicate Aluminate)나 CSH(Calcium Silicate Hydrate)와 같은 수화물과 직접 수소결합이 가능한 구조로 콘크리트 모체와 일체화되는 화학반응을 통하여 무기질 3차원 망목구조를 형성하기 때문에 기본적으로 불용성이며, 건조 후에 超疏水性을 나타내어 수분의 확산을 차단할 수 있어 장기적으로 부착력이 탁월한 동결 재료간의 화합물 형태를 유지할 수 있는 장점을 가지게 된다⁴⁾.

2.2 시멘트 수화물과의 반응 매커니즘

나노 합성 폴리머 표면 처리제 도포를 할 경우, 그림 2.2와 같이 나노 레벨에서의 가수분해와 중합반응을 통하여 합성된 지분자량의 무기질 폴리머가 콘크리트 내의 C-S-A나 C-S-H와 직접

수화반응을 일으켜 시멘트 경화제와 일체화되는 화학반응에 의하여 수소결합이 이루어지며⁶⁾, 이를 통해 무기질 3차원 망목구조(-O-Si-O-)를 형성하게되어 콘크리트 미세조직 내에 약 1~2Å 정도의 미세 기공이 형성된다¹²⁾. 이는 내부의 수분을 외부로 방출하면서 동시에 풍기성을 갖게 하는 결정구조로서 장기적으로 도막의 박리가 발생되지 않는 안정적인 결합이 이루어질 수 있는 이유이기도 하다.

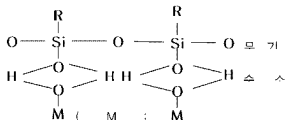


그림 2.2 콘크리트 수화물과의 수소결합 모델

폴리머의 침투는 콘크리트 미세 공극구조를 강화하여 표면 경도를 증가시킨다⁶⁾.

이로써 나노 합성 폴리머 표면 처리제는 기존의 합성 수지계 도막을 이용한 표면 처리제 등이 가지는 폐쇄 도막의 단점을 보완할 수 있게 된다.

그림 2.3에 나타난 개념도에서 알 수 있는 바와 같이 합성 수지계 도막은 장기적으로 볼 때 내부 수분의 팽창압에 의한 작용으로 부풀음 및 탈락 등이 발생하는 반면, 나노 합성 폴리머 표면처리제의 경우에는 콘크리트 내부의 모세관 공극에 안정하게 침투함과 동시에 풍기성을 나타내어 장기적으로 도막의 박리·탈락·변형 등의 문제점이 해결 될 수 있을 것으로 기대된다⁷⁾.

III. 실험 계획 및 방법

3.1 실험계획 및 시험체 제작

표 3.1은 나노 합성 폴리머 표면 처리제에 대한 콘크리트의 연화역계 효과를 평가하기 위한 실험계획을 나타낸 것이다. 각 내구성 평가 시험을 위해 제작된 시험체에 대하여는 일화 촉진 시험을 실시한 후, 콘크리트의 미세조직과 모세관 공극 변화를 관찰하여 이에 따른 내구성 평가를 실시하는 것으로 하였다.

표 3.1 실험계획

시험 항목	시편 제작	시험체 규격(cm)	갯 수
미세 조직	무르타르	-	7×20×2.5(cubic) 6
내구성	콘크리트	중성화	10×20 (cylindrical) 24
		염분침투	10×20 (cylindrical) 24
		동결융해	7.6×7.6×40 (cubic) 24
		화학적침식	5×5×5(cubic) 24

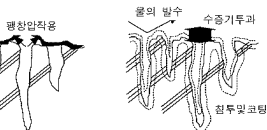
표 3.2 표면처리제 도포방법

시험 항목	도포제 종류	도포 방법	도포 횟수	도포두께 (침투깊이)
미세 조직	나노합성 폴리머 (무명형)	붓	2회	5 ±2(mm)
내구성	나노합성 폴리머 (칼라형)	붓	2회	50~80(μm)

표 3.2는 내구성 시험을 위한 콘크리트 시험체에 대하여 본 연구 대상 표면 처리제인 나노 합성 폴리머의 도포방법을 제시한 것이며, 표 3.3은 각 시험체의 배합 조건을 제시한 것이다. 내구성 시험에는 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 관찰계 및 색온계의 비중은 각각

나노 합성 폴리머 표면 처리제는 저분자량으로서 콘크리트의 공극에 대한 침투성이 우수하며 콘크리트 수화조직과 무기질 3차원 망목구조를 형성하게 된다. 이는 콘크리트와 동질 재료로서 가장 이상적인 결합모델인 풍기성을 확보할 수 있게 된다.

또한, 그림 2.2의 R group은 알킬기로서 발수성을 나타내어 외부의 수분이나 유해물질에 대한 장벽의 역할을 하게 되며, 이러한 무기질



(a) 합성수지계 도막 (선상고리구조) (b) 무기질 폴리머계 (3차원 망목구조)
그림 2.3 콘크리트 표면에 처리된 표면처리제의 형상 비교

2.62 및 2.78, 조립률은 각각 2.82 및 6.80, 흡수율은 각각 0.8% 및 0.5%이다. 또한 미세조직 관찰용에 시험체로서는 모르타르로 제작한 것을 사용하였다.

표 3.3 시험체의 배합표

배합비 시험 종류	굵은골재 최대치 mm	습입프 cm	공기량 %	W/C %	자골 계율 %	단위질량 (kg/m ³)			
						물	시멘트	잔골재	굵은 골재
내구성시험 (콘크리트)	25	15	4.5±1.5	50	46	188	376	802	925
미세 조직 (모르타르)	시멘트(C):잔골재(S) = 1:2 와 시멘트(C):물(W) = 50%의 중량비로 배합한 모르타								

3.2 미세조직 평가방법

본 연구에서는 나노 합성 폴리머 표면 처리제를 도입하여 콘크리트의 모세관 공극을 제어함으로써 각종 열화인자의 확산 및 이동은 억제하여 콘크리트의 내구성을 개선하고자 하며, 이에 대한 검증용 위해 나노 합성 폴리머 표면 처리제의 도포에 따른 모세관 공극의 형상 변화와 이에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

3.2.1 콘크리트의 공극 구조 측정

나노 합성 폴리머 표면 처리제를 도포한 콘크리트 시험체의 미세 공극량 변화를 평가하기 위하여 수은 압입식 포로시미터(최고압력 30000psi)를 사용해 세공용적을 측정하였다.

3.2.2 콘크리트 미세 조직 변화 동경

나노 합성 폴리머 표면 처리제를 도포한 모르타르 시험체의 미세 조직 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 사용하였으며, 도포면 및 단면에 대해 500배 및 5000배로 확대하여 관찰하였다. 시험체에 나노 합성 폴리머 표면 처리제를 도포하고 14일 경과한 후 시험편은 채취하였으며, 평가부위로서는 도포면인 표면에 대하여 500배로 확대하여 관찰하였고, 침투부위에 대한 평가로서는 도포면에 수직인 면으로 할필하여 단면부의 조직변화를 500배 및 5000배로 확대, 관찰하였다.

3.3 내구성 시험 방법

표 3.4는 콘크리트 시험체의 내구성능 평가를 위해 무처리한 시험체와 수성 예폭시 및 나노 합성 폴리머를 사용하여 표면 처리제를 실시한 3종류 시험체의 시험 항목을 나타낸 것이다.

표 3.4 내구성능 평가 실험개요 및 실험방법

시험 종류	표면처리 종류	W/C (%)	실험종류	실험환경	실험기간
A-1	무처리	50	염분침투저항성	20℃ NaCl 10% 용액 침지	28일
A-2	수성에폭시		중성화저항성	CO ₂ 5% 가스 분무, 건조반복	35일
A-3	나노 합성 폴리머		동결융해저항성	4℃ ~ -18℃ 온도주기 반복	300회
			화학침식저항성	H ₂ SO ₄ 5% 용액 침지	12일

IV. 실험결과 및 고찰

4.1 미세조직 평가

그림 4.1은 일반적인 콘크리트의 수화에 의해 형성되는 공극구조 특성을 나타낸 것이다. 이들 공극은 모세관 공극과 에트링자이트, 모노설피이트 공극 등으로 구성되어 있으며, 이 중 콘크리트의 공극은 10nm~1µm 범위에 분포되어 있는 모세관 공극이 가장 많이 차지하고 있다.

그림 4.2는 본 연구 대상 표면 피복재료인 나노 합성 폴리머를 모르타르에 도포한 경우, 공극 구조의 변화특성을 나타낸 것이다. 표면 처리제를 도포한 시험체의 경우, 공극분포곡선은 미세한

공극으로부터 비교적 큰 공극에 이르기까지 공극량이 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 이것은 표면 처리제가 저분자로 구성되어 콘크리트 내부로의 침투가 용이하고, 공극 내부에 막막 형태로 코팅되어 공극의 부피가 무도포 시험체에 비하여 전체적으로 감소하고 있었기 때문으로 생각된다.

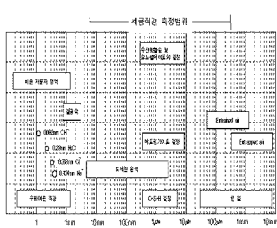


그림 4.1 콘크리트의 수화에 의해 형성되는 공극구조

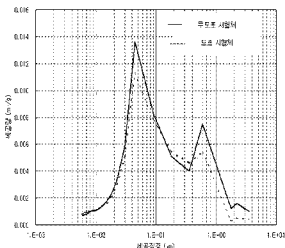


그림 4.2 나노합성폴리머 표면처리제 도포에 의한 세공구조 특성

또한, 0.3 μ m 이상의 공극과 0.1 μ m 이하의 공극영역에서는 세공량이 감소하는 경향을 나타내고 있으며 0.1 μ m~0.3 μ m 영역의 세공량은 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 나노 합성 폴리머 표면 처리제가 도포됨에 따라 0.3 μ m 이상의 세공 체적 및 0.1 μ m~0.3 μ m 사이의 세공 체적이 감소됨에 따라 상대적으로 크기가 유사한 공극이 균일하게 분포되었기 때문으로 생각된다.

한편, 0.1 μ m 이하의 공극영역에서도 세공량이 감소되어 나노 합성 폴리머 표면 처리제가 미세한 모세관 공극에까지 침투되고 있음을 알 수 있다.

또한, 나노 합성 폴리머 표면 처리제가 건조 후에 약 1~2 μ m 크기의 미세공극을 갖는 것은 화학 구조상 3차원 망목구조(-O-Si-O-)로 인하여 생성된 미세공극에 의해 내부의 수분을 외부로 방출하는 발수성과 통기성을 갖게 되기 때문에 내부수분의 증발로 인한 팽창압 작용으로 도막 박리가 발생되지 않는 주요 원인이 되는 것으로 판단된다. 또한 전자수사현미경에 의한 시험편의 미세조직 동성 결과, 나노 합성 폴리머를 도포한 시험체의 경우 콘크리트 수화조직이 무도포의 경우에 비해 지질하게 변화하고 있는 것으로 나타났다.

이러한 미세조직의 치밀화 진행은 결국 외부로부터의 수분 침투가 억제되고 콘크리트의 열화 원인이 염소이온이나 CO₂의 침투 및 확산이 어렵게 되어 콘크리트의 열화 저항성이 증진될 수 있을 것으로 고찰된다.

4.2. 염분침투 저항성

그림 4.3은 침지시간 경과에 따른 각 시험편들의 염분침투 깊이의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 28일간 염수 중에 침지한 후, 최종 염분 침투깊이는 부처리 경우 18.47mm, 수성 예폭시의 경우 7.15mm, 나노 합성 폴리머로 표면처리를 실시 경우 1.27mm로 측정되었다. 부처리 시험체에 비하여 표면처리를 실시한 시험체의 염분침투 저항성은 매우 크며, 특히 나노 합성 폴리머 시험체의 경우 매우 적은 염분침투를 나타내었다. 즉, 나노 합성

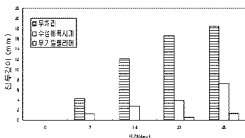


그림 4.3 28일 도포제 종류별 염분 침투 저항성

폴리머의 경우 무처리 시험체에 비해 90% 이상 염분침투 감소 효과를 나타내었으며, 수성예복시에 비해서도 50% 이상 염분침투를 감소시켜 염분침투에 대한 저항성이 탁월한 것으로 나타났다.

이와 같은 염분침투 저항성은 나노 합성 폴리머의 경우 작은 분자량을 갖기 때문에 콘크리트 내부의 미세공극까지 도포제가 침투되어 콘크리트 모재와 일체화된 화학결합을 만들므로써 염화 이온의 침투 및 확산을 억제하였기 때문으로 판단된다.

4.3 중성화 저항성

그림 4.4는 축진 중성화 시험을 통해 얻어진 각 시험체의 중성화 침투깊이 결과를 나타낸 것이다. 무처리 시험체에 비해 표면 처리제를 도포한 경우 중성화 깊이가 상당히 감소하는 것을 볼 수 있다. 35일간 축진 중성화를 실시한 경우, 중성화 깊이는 무처리의 경우 10.5mm, 수성예복시를 도포한 경우 5.8mm, 나노 합성 폴리머를 도포한 경우 1.0mm로 측정되었다. 수성예복시를 사용한 경우는 무처리 시험체에 비해 약 50%의 중성화 깊이 감소를 보였으며, 나노 합성 폴리머로 도포한 경우는 무처리에 비해 약 10% 정도의 중성화가 진행되었다.

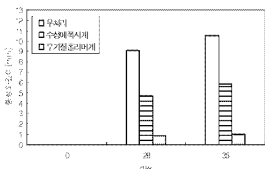


그림 4.4 중성화깊이의 시간적 변화

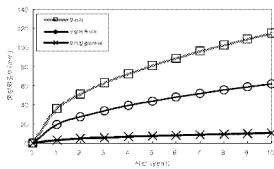


그림 4.5 중성화 진행 예측 (CO₂ 농도 5%, 상대습도 60% 조건)

그림 4.5는 본 축진시험 결과를 이용하여 중성화속도계수를 평가한 후 10년 간 중성화 진행 추이를 나타낸 것으로 축진 중성화 조건인 CO₂ 농도 5%, 상대습도 60% 에서 얻어진 것으로, 실제의 중성화 현상을 예측하는 것은 아니며, 중성화 진행 추이를 참고적으로 제시한 것이다.

4.4 동결융해 저항성

그림 4.6은 각 시험체에 대한 동결융해 시험결과를 나타낸 것이다. 300 cycle의 동결융해를 반복한 결과 상대동탄성계수는 무처리 시험체의 경우 53%, 수성예복시를 도포한 시험체의 경우, 75%, 나노 합성 폴리머를 도포한 시험체의 경우 92%를 나타내었다. 동결융해 시험결과, 콘크리트가 동해를 받지 않기 위해서는 300 cycle에서의 상대동탄성계수가 60% 이상이 되어야 한다. 무처리한 경우 300cycle에서 상대동탄성계수는 50%로서 위의 기준에 미달하고 있는 반면, 표면처리제를 도포한 경우에는 모두 동탄성계수가 60%를 초과함으로써 동해 저항성은 충분한 것으로 생각되며, 특히 나노 합성 폴리머를 도포한 시험체의 경우 300 cycle에서도 거의 동탄성계수가 저하되지 않는 것으로 나타나 탁월한 동해 저항성이 있음을 알 수 있다.

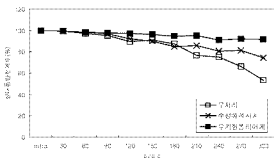


그림 4.6 상대동탄성계수의 시간적 변화

이와 같이 본 재료가 탁월한 동해저항성을 가지는 이유로서는 동결융해는 주로 수분의 이동과 이동하는 수분의 동결 팽창압 작용에 기인하므로, 나노 합성 폴리머 표면 처리제의 재료적 특성에 기인한 수분차단 효과 때문인 것으로 판단된다.

4.5 화학적침식 저항성

그림 4.7은 황산 5% 용액에 침지한 시험체의 계령에 따른 질량 변화율을 나타낸 것이다. 12일간 침지한 결과, 무처리리의 경우 +6에서 -4% 범위의 중량변화율을 나타내었으며, 수성 에폭시로 표면 처리한 경우 +4에서 -4% 범위의 중량변화율을 나타내었고, 나노 합성 폴리머로 표면 처리한 경우 +2에서 -2% 범위의 안정적인 중량변화율을 나타내었다.

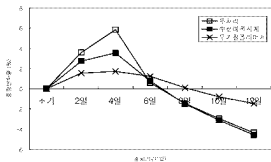


그림 4.7 H₂SO₄ 5% 용액에 침지한 시험체의 질량변화율

V. 결 론

본 논문은 나노 합성 폴리머 표면 처리제를 도포한 콘크리트 시험체의 내구성 평가를 실시하기 위해 수행한 시험적 연구로서 이들 결과론 요약하면 다음과 같다.

1. 나노 합성 폴리머 표면처리제의 도포함에 따라 모세관 공극영역중에서 0.3 μ m 이상의 공극과 0.1 μ m 이하의 공극 영역에서 세공량이 감소하는 경향을 보였으며, 0.1 μ m~0.3 μ m영역의 공극은 다소 증가하는 경향으로 나타나 표면처리제 도포에 따라 세공용적이 균일하게 감소된 것으로 판단된다.
2. 나노 합성 폴리머 표면처리제를 도포한 시편의 경우 무처리 시편에 비해 염분침투 및 중성화 역계에 탁월한 효과를 나타내었다.
3. 동결융해시험 결과 나노 합성 폴리머 표면 처리제를 사용할 경우, 무처리 시험체에 비해 상대 동탄성계수의 저하가 거의 발생하지 않았으며, 이는 콘크리트 수화물과 일체화된 화학 결합 구조로 인하여 외부로부터의 수분차단 효과에 의해 동결융해에 대한 저항성능이 향상된 것으로 판단된다.
4. 화학적침식 저항성 시험결과 나노 합성 폴리머 표면처리제로 처리한 시험체의 경우 무처리시편에 비해 매우 안정적인 중량변화율을 나타내어 외부로부터 침투되는 산에 대한 화학적 저항성이 뛰어난 것으로 평가되었다.
5. 이상의 결과로부터, 나노 합성 폴리머를 표면 콘크리트 표면에 도포할 경우, 콘크리트 수화물과 반응하여 모세관 공극이 치밀화되어 외부로부터의 수분 침투를 차단하고 콘크리트의 연화원인인 염소이온이나 CO₂ 가스의 침투 및 확산 역제는 물론, 동해 및 화학적 저항성도 크게 향상됨으로서 염화에 대한 저항성이 탁월한 재료가 판단된다.
6. 따라서, 본 연구 대상 표면도포제는 염해를 입기 쉬운 해안구조물, 지하수면과 접하게 되는 지하구조물, 각종 대기오염에 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 내·외벽 등에 대한 내구성 증진 용도로의 개발이 기대되며, 향후 고강도 콘크리트 및 염분을 함유한 콘크리트에 대하여 성능평가를 실시함으로써 다양한 적용성 검토가 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 오상근 (2000), "콘크리트 구조물의 방수 연구보고서(1)", *한국콘크리트학회 콘크리트방수 연구 소위원회 발표집*, KCI-M-00-007
2. Brinker, C. J. and Scherer, G. W. (1990), "*Sol-gel Science*", Academic Press, pp.852~853
3. 作花濟夫.(1988) "ゾル-ゲル法の科學", *アグネ承風社.*, pp.4~13
4. Bradley, D. C. and Mehrotra, R. C. (1978), "*Metal Alkoxides*", Academic Press, pp.336~337
5. Edwin P.Plueddemann, "*Silane Coupling Agents second edition*", plenum press, pp.222~223
6. 박창영, 조영일, 한학수 (1996), *기능 재료 공학*, 반도출판사, pp.48-49
7. 박홍욱, 송하원, 백종명, 우종태 · 남진원, "알콕시 실란계 나노 합성 Hybrid 폴리머 코팅제를 적용한 콘크리트의 내구성능 평가에 관한 실험적 연구", *2003년도 불학술발표회 논문집*, pp. 687-692