

콘크리트 구조물의 균열 보수를 위한 나노 합성 무기계 보수 재료의 성능 평가

Evaluation on the Performance of Nano Mixed Inorganic Repair Material for Crack Repair of Concrete Structures

김 종 필* / 전 찬 기** / 정 훈*** / 김 홍 석****
Kim, Jong-Pil / Jeon, Chan-Ki / Chung, Hoon / Kim, Hong Seug

Abstract

This paper presents a detailed experimental study on the engineering and durability properties of nano mixed inorganic repair material with rehabilitation and enhancement of performance of concrete structure occur to crack. The performance of specimens was evaluated using bond strength, chloride ion ingress, carbonation and brine resistance. It was shown in the results of the experiments that it had a superior function in the bond strength under the standard and wet-dry condition of all the repair material. Moreover, it had a good function in the experiments for chloride ion ingress, carbonation and brine resistance. Judging from the above-mentioned results, it is expected to be used for the rehabilitation and enhancement of the performance of concrete structure.

key words : Concrete structures, Crack, Nano, Repair, Repair material

요 지

본 연구는 균열이 발생된 콘크리트 구조물의 성능 회복 및 성능 향상을 위하여 첨단 기술을 접목한 경제적이고 친환경적인 나노 합성 무기계 균열보수재를 균열이 발생된 콘크리트 구조물에 적용하기 위하여 나노 합성 무기계 균열보수재의 역학적 특성 및 내구 특성을 종합적으로 평가하였다. 균열 보수재의 역학적 특성을 평가한 결과 모든 균열보수재가 표준 및 건습반복 상태에서 우수한 부착성능을 나타내었으며, 염분침투확산, 탄산화 및 내염수성 실험결과도 매우 양호한 결과를 나타내었다. 따라서 균열에 의한 성능저하가 발생하여 콘크리트 구조물의 보수보강이 필요할 경우 본 연구에서 적용한 나노 합성 무기계 균열보수재를 이용하여 콘크리트 구조물의 성능 회복 및 성능 향상을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트 구조물, 균열, 나노, 보수, 보수 재료

1. 서 론

콘크리트는 시멘트·골재·물 및 기타 혼화재료의

혼합으로 이루어지는 불연속, 이방성 및 비균질성의 경화체로서 그 물리적·화학적 특성이 매우 다양하고 복잡하다. 이러한 콘크리트는 수화반응, 불리딩, 수화열, 소성수축 그리고 재료들의 서로 다른 특성으로 인

* 부천대학 토목과 겸임교수 (e-mail: kjp0307@hanyang.ac.kr)
** 정회원 · 인천시립전문대학 교수
*** (주)선한엠엔티 대표이사
**** 동부엔지니어링 부사장

해 제조 단계부터 많은 공극 또는 미세균열을 갖는다. 콘크리트가 경화되면 건조수축과 열응력 및 외부하중 등의 여러 요인에 의해 제조단계에서 발생된 미세균열은 균열로 성장하게 된다.

이러한 균열은 여러 가지 요인에 의하여 발생되며 구조물에 미치는 영향도 다양각색이다. 균열은 콘크리트 재료적 요인에 의한 균열, 설계오류로 인한 균열, 시공불량으로 인한 균열, 하중작용으로 인한 균열로 분류할 수 있으며, 이렇게 발생된 균열은 콘크리트 부재의 내구성, 철근부식에 의한 내하력저하, 수밀성 및 기밀성의 저하, 미관 등에 영향을 미치게 된다.

콘크리트 구조물에서 발생하는 균열은 심할 경우 콘크리트의 성능을 크게 저하시킬 뿐만 아니라, 나아가 구조체로서의 역할을 상실시켜 수명을 단축시키게 된다. 또한 구조물의 내력, 내구성 및 방수성 등 모든 기능을 저하시키는 주원인으로 구조물의 안전성과 사용성에 심각한 문제를 유발할 수 있으므로, 구조물의 내구성에 직접적인 영향을 주지 않는 미세한 균열이라고 소홀히 다루어서는 아니 된다(대한전문건설협회, 2005 ; 한국콘크리트학회, 1997).

콘크리트 구조물의 균열에 따른 성능저하는 보수보강, 우회도로의 건설 및 유지관리 등에 상당한 비용이 소요된다. 또한 구조물이 붕괴될 경우 그 파급효과는 경제적, 기술적 차원을 넘어 국가와 기술자에 대한 불안을 조장할 요인을 제공할 뿐만 아니라 국제사회에서의 경쟁력 약화와 신뢰성 상실로 이어지게 된다.

최근의 국내의 건설 환경은 신규투자보다는 기존시설의 유지관리와 성능향상을 위한 보수보강으로 변화되고 있으며, 기존 시설물의 효율적인 관리 및 예산의 중복투자를 막기 위하여 시설물에 대한 유지관리 및 수명연장 등에 대한 관심이 최근 급증하고 있다(Allen et al, 1993 ; Peter, 1994). 그러나 국내의 경우 콘크리트 구조물의 보수보강을 위한 보수재료 및 공법의 개발이 선진 외국에서 비해 매우 부족하며, 기존에 사용되고 있는 보수재료의 경우는 수입하여 사용함으로써 기술 종속도가 심화되고 불필요한 외화의 유출이 증가하고 있는 상태일 뿐만 아니라 최근 발전되고 있

는 ET, IT 및 메카트로닉스 기술 등과 같은 첨단 분야를 접목한 보수보강 재료 및 공법은 전혀 이루지 못하고 있는 상태이다(Al-Gahtani, 1999; Pogrebnyak, 2006).

따라서 본 연구에서는 첨단 기술을 접목한 경제적이고 친환경적인 나노 합성 무기계 균열보수재를 개발하여 건설 산업에 활용함으로써 국가 경쟁력에 기여하고자 나노 합성 무기계 균열보수재의 역학적 특성 및 내구 특성을 종합적으로 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 시멘트

국내의 S사에서 생산되는 비중 3.15, 비표면적 3,112cm²/g인 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였다.

2.2 골재

잔골재는 비중 2.50, 조립률 2.30인 강모래 및 굵은골재는 최대치수 25mm와 비중 2.62인 부순돌을 사용하였다.

2.3 나노 합성 무기계 균열보수재

본 연구에 사용된 균열보수재는 무기계 균열보수재이며, 바탕콘크리트와의 접착력 향상을 위하여 나노실리케이트 및 나노 폴리머 바인더를 사용하였다. 균열보수재의 주성분 및 물리적성질을 표 1에 나타내었으며, 시험체 제작 방법을 표 2에 나타내었다.

표 1. 균열보수재의 주성분 및 물리적 성질

크랙보수재	성상	성분	비중	고형분 (%)
균열보수재	분말	무기계	1.62	-
나노 실리케이트	액상	실리케이트	1.01	2.5
나노 폴리머바인더	액상	나노아크릴 에멀전	1.02	50

표 2. 균열보수재 시험체 제작 방법

균열보수재	성상	제조방법
NC		바탕콘크리트
S1	분말	균열보수재 1000g에 물200g을 넣고 혼합하여 사용하였다.
S2	분말 + 액상	나노 실리케이트를 일차도포 후 무기보수재를 사용하였다.
S3	분말 + 액상	균열보수재 1000g에 물을 200g과 나노실리케이트 바인더 10g를 넣고 잘 교반한 후 사용하였다.
S4	분말 + 액상	균열보수재 1000g에 물 180g과 나노폴리머 바인더 20g을 넣고 잘 교반한 후 사용하였다.

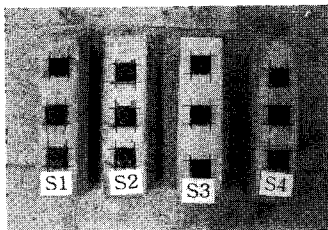
2.4 시험체 제작

균열보수재를 도포하기 위하여 사용된 바탕콘크리트의 물-시멘트비는 45%, 슬럼프 10±1.5, 공기량 4.5±1.5로 정하였다. 제작 후 28일간 양생한 후 3일간 기건 양생을 실시하였다. 이후 바탕콘크리트에 균열보수재를 도포한 후, 소정의 시간 동안 양생을 실시하였다.

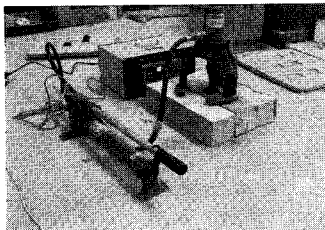
3. 실험방법

3.1 표준상태의 부착성능 평가

시험체의 표면에 균열보수재를 도포한 후 그림 1의 (a)와 같이 상부 인장용 강철제 지그를 올려놓고, 접착시킨 후 주위에 잉여분의 접착제를 제거한다. 강철제 지그 주변을 따라 홈을 내고 그림 1의 (b)에서와 같은 밑 인장용 강철제 지그와 강철제 받침판으로 시험체면에 대하여 연직방향으로 인장력을 가하여 최대 인장하중을 구하였다. 시험 후 평가는 측정 시 인장용 지그의 탈락상태 및 인발 접착강도에 따라 평가 하게 되며, 탈락상태의 경우 모체(바탕) 파괴, 바탕과 보수재층의 표면탈락, 보수재층의 파손탈락, 보수재층과 인장용 지그의 경계면 탈락 4단계로 구분 할 수 있다.



(a) 부착강도 측정용 공시체



(b) 부착강도 측정 장비

그림 1. 부착강도 측정 관경

3.2 건습반복 상태의 부착성능 평가

건습반복 부착강도 시험은 시험체의 성능저하를 촉진시키기 위해서 공시체 윗면에 틀을 만들고 용액 속에 2일간 침지하고, 2일간 건조시키는 과정을 1사이

클로 하는 침지시험을 실시하였으며, 표준상태의 부착력 실험과 같은 방법으로 시험을 시행하였다.

3.3 미세구조 분석

주사형 전자현미경(SEM)은 가느다란 전자빔을 샘플 표면에 주사시켜 2차 전자를 발생케 하여 입체감 있는 시료의 표면상을 얻게 하는 장치이다. 본 연구에 사용된 주사형 전자현미경은 XL30 ESEM이다.

3.4 염소이온 침투저항성 시험

3.4.1 통과전류 및 총통과전하량 산정

시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전 시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터로거를 이용하여 30분 간격으로 측정하였다. 전위차를 가한 후 30분 단위로 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분 값을 취하여 식 (1)에 의하여 총 통과전하량을 산정하였다.

$$Q_{total} = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{690} + I_{720}) \quad (1)$$

위의 식으로부터 계산된 총 통과전하량을 근거로 표 3에 제시된 범위구간과 비교하여 염소이온에 대한 침투저항성을 판단한다.

표 3. 총 통과전하량에 근거한 염소이온 침투 저항성 평가기준

Total passed charge (coulomb)	Chloride ions permeability
> 4000	High
2000 ~ 4000	Moderate
1000 ~ 2000	Low
100 ~ 1000	Very low
< 100	Negligible

3.4.2 촉진시험에 의한 확산계수의 추정방법

전위차 촉진시험법에 의한 비정상 상태의 염소이온 확산계수는 염소이온 침투깊이에 의한 확산계수(Dcpd)로 산정하였으며, 계산식은 식 (2)와 같다.

$$D_{cpd} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - ax_d^{0.5}}{t} \quad (2)$$

3.5 촉진탄산화 시험

제작된 시험체를 20±1℃의 수중에서 14일간 양생

후 한 면만을 남기고 경화체의 표면에 보수재를 도포하여 탄산화 촉진 시험을 실시하였다. 촉진시험 조건은 온도 30℃, 상대습도 60%, CO₂ 농도를 10%로 설정하였다. 촉진 시험 후 탄산화 깊이의 측정은 촉진개시부터 28일에 측정하였다. 탄산화 깊이 평가는 시험체를 할렬인장 후에 할렬면에 1% 페놀프탈레인 용액(KS M 0015)을 분무하고 분홍색으로 변색되지 않은 미착색의 탄산화 부분을 측정하였다.

3.6 내염수성 시험

내염수성시험은 해수와 유사한 농도인 염화나트륨(NaCl) 용액(3 w/v%)을 사용하여 상온 20℃에서 15일간 침지 후, 시편을 꺼내어 시험편을 깨끗이 세척한 다음 2시간 방치한 후 보수재의 부풀음, 벗겨짐, 연화, 구멍을 육안으로 관찰하고 기준 시험체와 비교하여 색상의 변화를 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 역학적 특성 및 미세구조 분석

4.1.1 표준 상태의 부착강도

콘크리트 균열보수재는 콘크리트 표면에 처리제를 붓 혹은 스프레이를 이용하여 보호막을 형성시킴으로써 외부로부터 침투하는 CO₂ 가스, 염화물 및 미세 균열로 인한 콘크리트의 성능 저하를 방지할 수 있는 수단이다. 따라서 균열보수재의 성능을 평가하는 가장 기본적인 것도 균열보수재가 기존의 콘크리트 구체에 얼마나 강하게 오래도록 접착하느냐 하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에 사용된 균열보수재의 부착성능을 평가하기 위하여 부착강도를 측정한 결과를 정리하여 그림 2에 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있듯이, 모든 시험체에서 재령이 증가할수록 부착강도가 증가함을 알 수 있었으며, 4종류의 균열보수재의 부착강도가 KS F 4936에 명시된 1MPa을 2배 정도 상회하여 부착성능이 우수함을 알 수 있었다.

또한, 균열보수재 중 가장 우수한 부착성능을 보인 S4의 경우는 모든 재령에서 모체와의 일체된 결합으로 모체가 파괴되는 현상을 보였으나, S1, S2 및 S3의 경우는 재령 7일에서 모체와의 계면에서 탈락이 일어나는 것으로 확인되었다. 이는 S4가 콘크리트 모체와 일체되는 결합을 하는 것으로 좋은 부착성능을 나타낸 것이라고 사료된다. 게다가 재령 28일에서는 모든 균열보수재의 탈락형상이 모체가 파괴되는 것으로 확인되었다.

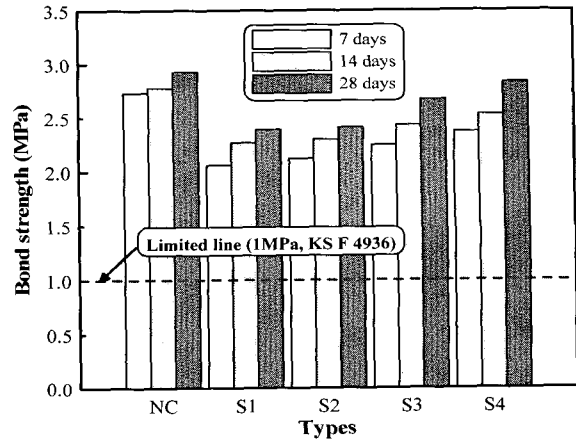


그림 2. 표준 상태의 부착강도

이처럼 동일한 결합재에서 전 재령에 걸쳐 모체탈락 현상이 일어나고 부착강도가 가장 크게 나타난 S4의 경우는 S4에 포함되어 있는 나노 폴리머바인더와 나노 세라믹이 모체 표면의 공극속으로 침투하여 일체화된 구조를 가지게 함으로써 부착력을 향상시켜 모체탈락 현상을 보이게 된 것으로 판단된다.

4.1.2 건습반복 상태의 부착강도

건습반복에 따른 가혹한 조건에서 균열보수재의 부착 성능을 평가하기 위하여 용액 속에 2일간 침지하고, 2일간 건조시키는 과정을 1사이클로 하는 침지시험을 실시한 후 15사이클까지의 결과를 그림 3에 나타내었다.

이 그림에서 알 수 있듯이, 건습반복 상태의 부착강도 크기는 S4 > S3 > S2 > S1 순으로 나타났다. 또한 4종류의 균열보수재의 부착강도가 KS F 4936에 명시된 1MPa을 모두 상회하여 부착성능이 우수함을 알 수 있었다.

도장재의 경우는 건습반복에 의한 부착강도는 감소하는 것이 일반적이지만, 본 연구에 사용된 균열보수재의 경우는 표준 상태의 28일 부착강도와 비교하여 15사이클의 건습반복 상태의 부착강도가 오히려 더 크게 나타났다. 이는 균열보수재의 수화반응으로 인하여 조직구조가 더 치밀하게 형성되어 부착강도가 증가된 것으로 생각된다.

또한 표준 상태의 부착강도 결과와 동일하게 건습반복 상태에서도 4종류의 균열보수재 중에서 S4가 가장 큰 부착강도 값을 나타내었다.

4.1.3 미세구조 분석

균열보수재의 조직구조 및 원소분석을 알아보기 위해서 본 연구에서는 28일 이상 양생시킨 시험체에 균열보수재를 도포하여 7일 이상의 재령이 지난 후

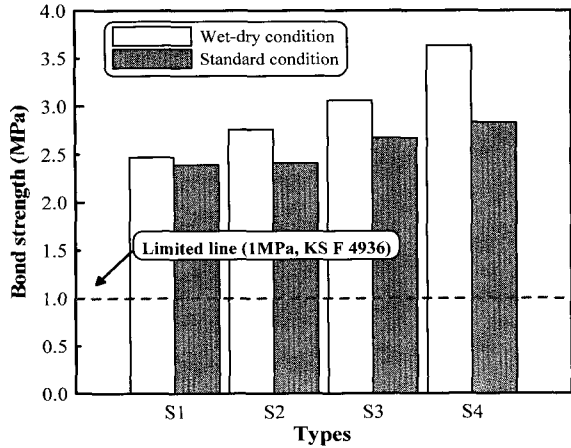


그림 3. 건습반복 상태의 부착강도

SEM 및 EDS 촬영을 통하여 얻은 결과를 그림 4에 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있듯이, 나노 합성 무기계 균열 보수재에서 육각판상의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 및 Type-III C-S-H가 다량으로 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 EDS profile에 의한 조사를 실시한 결과에서도 Ca 및 Si가 다량으로 분포되어 있음을 확인하였다.

또한, 일반 콘크리트에 비하여 매우 치밀한 조직

을 구성하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 경우 균열 보수재가 치밀한 조직을 구성하고 있기 때문에 생성된 공극 사이로 염소이온, 이산화탄소 등의 유해 성분의 성능저하 물질이 균열보수재에 침투 억제되어 콘크리트의 성능저하 저항성이 우수할 것으로 판단된다.

4.2 내구성에 대한 평가

4.2.1 염소이온 침투에 대한 저항성

균열보수재의 염소이온 침투확산에 대한 저항성을 평가하기 위하여 총 통과전하량 및 염소이온 침투깊이에 의한 확산계수의 측정 결과를 그림 5~그림 6에 나타내었다.

이들 결과에서 알 수 있듯이, 일반콘크리트(이하 NC로 약함)의 경우는 총 통과전하량이 2058 (Coulomb)로 표 3의 염소이온 침투성 평가기준에 의하면 Moderate 상태를 나타내었으나, 균열보수재를 도포한 시험체에서는 Low 및 Very low로 나타났다. 또한 균열보수재를 도포한 시험체에서는 NC에 비하여 30~50% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 S4의 경우는 총 통과전하량이 992(Coulomb)로서 NC에 비하여 50% 정도의 감소 효과가 있는 것으로 확인되었다.

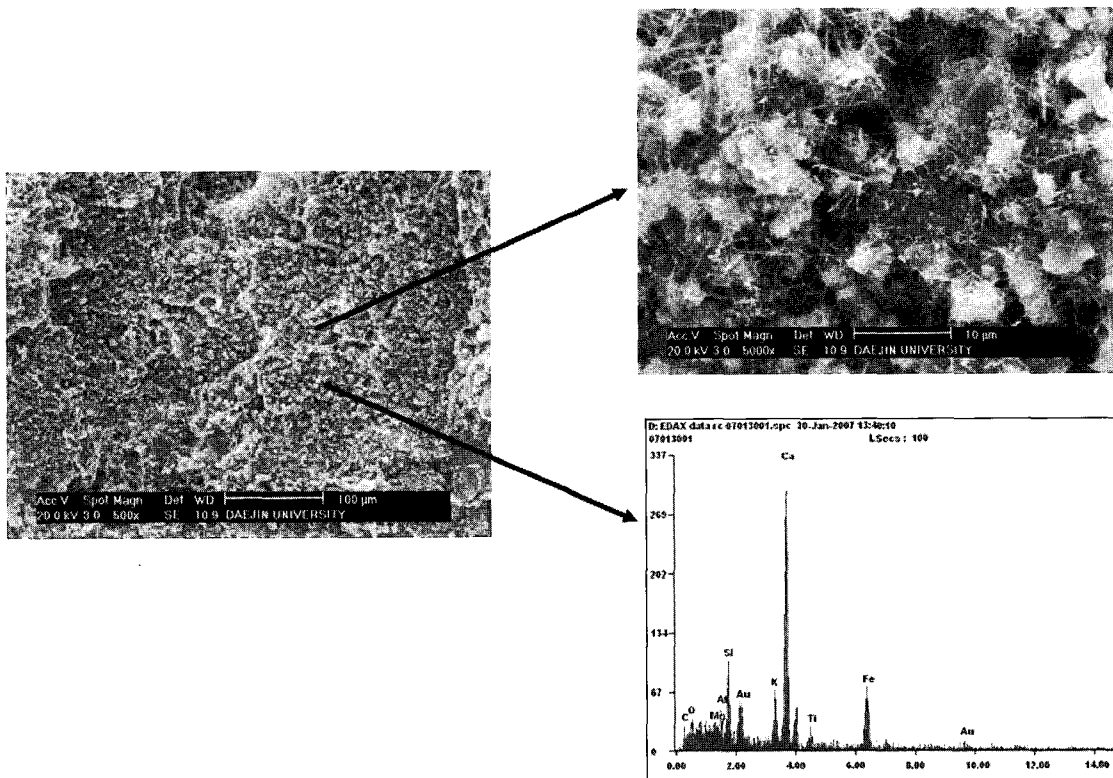


그림 4. SEM & EDS 분석 결과

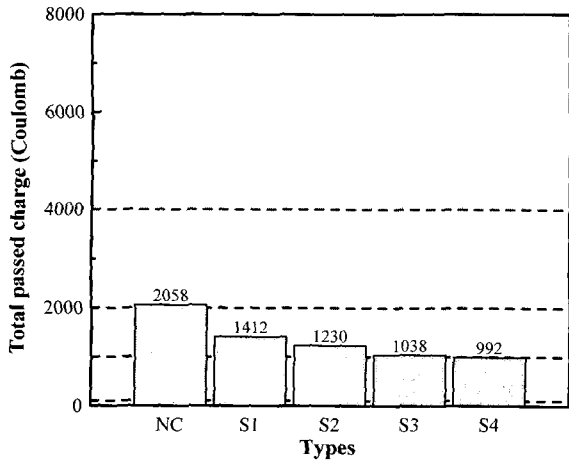


그림 5. 총 통과전하량

한편, 그림 6의 염소이온의 침투깊이에 의한 확산 계수 결과에서도 NC의 경우는 $6.56E-12$ 인 반면 균열보수재를 도포한 시험체에서는 확산계수가 약 54~78% 수준으로 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 S4 경우는 $3.57E-12$ 로서 약 54% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 부착강도 결과와도 유사하게 S4의 경우는 나노 폴리머 바인더와 나노 세라믹이 모체 표면의 공극속으로 침투하여 충전효과(micro-filler effect)에 의하여 공극속을 매우 치밀한 조직구조를 형성하므로 유해이온을 차단하여 염소이온 침투 저항성이 향상되는 것으로 사료된다.

4.2.2 탄산화에 대한 저항성

대기중의 이산화탄소의 농도는 약 0.03% 정도로 자연상태에서 탄산화실험을 할 경우 많은 측정시간이 소요된다. 따라서 이산화탄소농도를 높은 촉진 실험장치에서 실험적으로 탄산화 깊이를 구해 장기 재령 시 탄산화 깊이를 예측하는 방법이 주로 사용되고 있다.

본 연구에서도 촉진 탄산화 실험장치를 이용하여 탄산화 깊이를 측정한 결과를 그림 7에 정리하여 나타내었다.

이 결과에서 알 수 있듯이, 탄산화 깊이는 균열보수재를 도포하지 않은 시험체 NC의 경우가 촉진재령 14일에서는 가장 깊은 탄산화 깊이를 나타내었다. 한편 균열보수재를 도포한 시험체의 탄산화 깊이는 NC에 비하여 50~70% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 촉진재령 28일의 탄산화 깊이도 촉진재령 14일과 유사하게 NC에 비하여 균열보수재의 탄산화 저항성이 우수하게 나타났으며, 특히 S3 및 S4의 경우는 S1 및 S2에 비하여 탄산화 저항성이 다소 향상되는 것으로 확인되었다. 이런 결과는 S1, S2 및 S3의 경우는 나노 나노폴리머 바인더가 들어 있지 않는 크랙만을

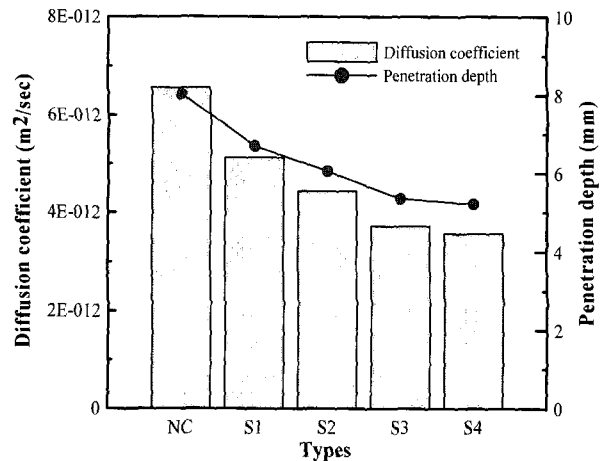


그림 6. 염소이온 침투깊이 및 확산계수

위한 보수재이고 및 S4의 경우는 나노폴리머 바인더와 나노 세라믹이 첨가된 것으로 염소이온 확산 특성과 유사하게 콘크리트의 미세 모세관 공극까지 침투하여 콘크리트 공극이 보다 치밀하게 변화되어 탄산화 저항성이 향상되는 것으로 사료된다.

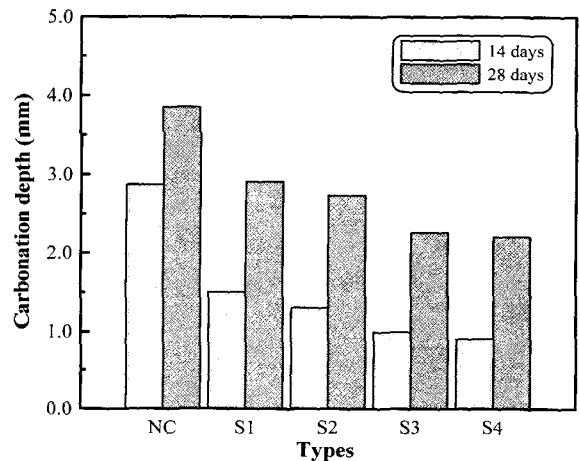


그림 7. 탄산화 깊이

4.2.3 내염수성

내염수성 실험을 위해 3% NaCl용액을 사용하여 상온 20°C에서 시험체를 15일간 침지시킨 후 시험체를 꺼내어 깨끗한 물로 세척하고 2시간 정도 방치한 후, 부풀음, 벗겨짐, 연화, 구멍, 기준시험체와 색상차이를 육안으로 관찰하였다. 내염수성에 대한 결과를 표 4 및 그림 8에 나타내었다.

이들 결과에서 알 수 있듯이, 균열보수재를 도포한 모든 시험체에서 부풀음, 벗겨짐, 연화, 구멍 및 색상 변화 등의 내염수성에 대하여 양호한 저항성을 나타내었으나 S1 및 S2에서는 약한 연화 현상이 나타났다. 또한 모든 종류의 균열보수재가 내염수성에 대하여 우

수한 저항성을 나타내었지만, 보다 다양한 약품 및 장기적인 시험의 필요성이 필요할 것으로 예상된다.

표 4. 내염수성 시험 결과

	부풀음	벗겨짐	연화	구멍	색상변화
S1	○	○	●	○	○
S2	○	○	●	○	○
S3	○	○	○	○	○
S4	○	○	○	○	○

○ 이상없음, ● 약간손상, □ 많이손상

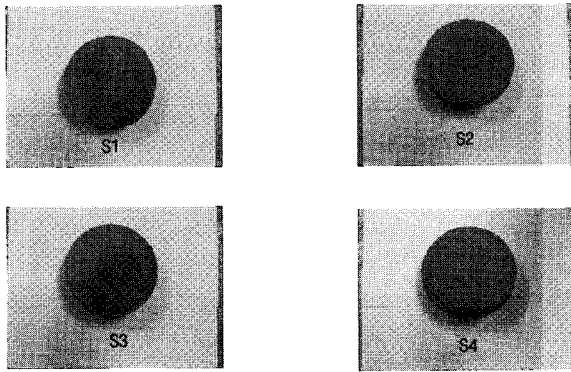


그림 8. 내염수성 시험 후의 공시체 광경

5. 결론

- (1) 균열보수재의 역학적 특성을 평가한 결과 표준 상태 및 건습반복 상태의 모든 시험체에서 KS F 4936에 명시된 1MPa를 상회하는 우수한 부착성능을 나타내었다.
- (2) 염분침투확산에 대한 저항성을 평가한 결과 균열보수재를 도포한 시험체에서는 Low 및 Very low로 나타났다. 또한 염소이온의 침투 깊이에 의한 확산계수는 일반콘크리트에 비해 약 54~78% 수준으로 감소하였다.
- (3) 탄산화 촉진시험을 실시한 후 탄산화 깊이를 측정된 결과, 일반콘크리트에 비하여 탄산화 저항성이 양호하게 나타났다.
- (4) 균열보수재의 조직구조 및 원소분석을 실시한 결과, 육각판상의 $Ca(OH)_2$ 및 Type-III C-S-H가 다량으로 분포되어 있는 것을 관찰할 수 있었다.

- (5) 내염수성 실험을 실시한 결과, 균열보수재를 도포한 모든 시험체에서 부풀음, 벗겨짐, 연화, 구멍 및 색상변화 등의 내염수성에 대하여 양호한 저항성을 나타내었다.

참고 문헌

건설교통부 (2003). 콘크리트 성능 회복을 위한 표면 처리 신재료 및 신공법 개발, 건설교통부

대한전문건설협회 (2005). 콘크리트 구조물의 균열과 하자문제, 대한전문건설협회 토공사업협의회

시설안전기술공단 (1999). 콘크리트 구조물의 균열평가기법 및 보수보강 전문시방서의 개발, 건설교통부.

한국콘크리트학회 (1997). 콘크리트 구조물의 균열, 한국콘크리트학회

宮川豊章 (2000). 土木コンクリート構造物の表面保護工に求められる役割, 콘크리트工學, Vol.41, No.9, pp.43-46.

Allen R. T., Edwards S. C. and Shaw J. D. N. (1993). The repair of concrete structures, Chapman & Hall

Al-Gahtani, A. S., Ibrahim, M., Maslehuddin, M., and Almusallam, A., A. (1999). Performance of Concrete Surface Treatment Systems, Concrete International, pp. 64-68

Peter H. E. (1994). Concrete repair and maintenance illustrated, R. S. Means company, INC

Pogrebniak, A. D. Yu. A. Kravchenko, S. B. Kislitsyn, Sh. M. Ruzimov, F. Noli, P. Misaelides and Hatzidimitriou, A. (2006). TiN/Cr/Al₂O₃ and TiN/Al₂O₃ hybrid coatings structure features and properties resulting from combined treatment, Surface and Coatings Technology, Volume 201, Issue 6, 4 pp. 2621-2632.

◎ 논문접수일 : 2007년 05월 25일
 ◎ 심사의뢰일 : 2007년 05월 29일
 ◎ 심사완료일 : 2007년 06월 22일