

# 나노합성 나일론 섬유 무기질 폴리머 보강제를 적용한 콘크리트의 내구성 평가에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Durability Evaluation of Concrete Applied Nano-Composite Nylon Fiber Inorganic Polymer Reinforcing Agent

백종명\*                      장석재\*\*  
Baek, Jong-Myeong        Jang, Seog-Jae

### ABSTRACT

A concrete structure can be deteriorated by ingress of outside moisture and aggressive agents. To maintain the sound performance of concrete structure during the service life, it needs to protect concrete from ingress of outside moisture and aggressive agents before arising deterioration of concrete. The protection of concrete is possible by surface treatment. In this study, the nano-composite nylon fiber inorganic polymer reinforcing agent based coatings which can provide a barrier against the ingress of outside 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, the concrete applied the nano-composite nylon fiber inorganic polymer reinforcing agent based coatings has had a much higher resistance to the ingress of chloride ion, carbon dioxide, outside moisture and aggressive acid than plain concrete and concrete structure with epoxy resin based paint by means of cross-linking three-dimensional structure.

### 1. 서 론

콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 인자로서 재료조건, 구조물의 용도, 외기 환경조건 등이 있으며, 이중 외기 환경조건으로서는 콘크리트 구조물이 접하게 되는 수분에 의한 건조 반복, 염분의 침투에 의한 염해, 이산화탄소 등의 침투로 인한 콘크리트의 중성화, 외기 온도의 심한 변화로 인한 동결융해 및 각종 산 등의 침식에 의한 화학적 침식 등이 있다.

이러한 열화 인자로 인해 콘크리트 구조물에서 균열, 누수, 철근 부식, 박리, 박락 등의 현상이 발생한다. 즉, 수분이나 기타 외부 유해 물질 등이 콘크리트 내부로 침투하여 콘크리트 자체를 열화 시키거나, 철근의 부식 등을 유발하여 콘크리트 구조물의 성능 저하를 일으키게 되는데, 이러한 콘크리트의 열화를 방지하고 단면을 보강하기 위해서는 수분 및 외부 유해 물질 등의 침투 방지 및 단면을 보강하는 것이 필요하다.

이를 위해서, 현재까지 콘크리트 구조물의 열화를 방지하고 열화된 콘크리트의 성능을 회복시키기 위해서 여러 가지 단면 보강 및 보수 공법들이 개발되어 왔으며, 이를 사용하여 수많은 신·구 콘크리트의 구조물을 대상으로 단면 보강 및 보수 공사가 진행 중에 있다.

\* 책임저자 : 서울지하철공사, 과장, 정회원

\*\* 한국철도기술공사, 과장, 정회원

그러나 기존 대부분의 보강 및 보수 재료는 장기적으로 반복되는 열화 인자의 침투 및 재료의 물리적 물성 차이로 인하여, 원래의 기능을 상실하고 재시공을 해야 하는 경우가 많으며 비록, 외부 유해 물질 차단 성능이 우수한 재료더라도 국산화가 이루어져 있지 않거나, 환경 부하 물질을 배출하게 되어 환경오염을 유발하기도 한다.

따라서, 본 연구에서는 기존 단면 보강제들의 이러한 문제점이 개선될 수 있는 나노수준에서 합성하여 콘크리트와 일체화된 화학 결합을 나타내는 것으로 알려진, 나노합성 나일론 섬유 무기질 폴리머(이하 '나노 합성 나일론 섬유' 이라 한다.) 보강제에 대해 실험적 방법을 통해 내구성 평가를 실시하여, 이를 통해 신소재에 대한 단면 보강제로서의 적용 가능성을 파악하도록 한다.

## 2. 나노합성 나일론 섬유 보강제의 반응 메카니즘

콘크리트 구조물 보강을 목적으로 사용되어온 기존의 섬유계 재료의 문제점을 보완하기 위하여, 나노수준에서 합성되는 나일론 섬유계를 이용한 무기질 폴리머 보강제를 사용하였는데, 이 재료는 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 모체와 일체화된 화학 결합의 형태로 구성되며, 그림 2의 3차원 망목 구조로 인한 통기성 발현 등의 기능을 가지고 있고, 이러한 나일론 섬유를 이용한 무기질 폴리머는 콘크리트 조직에 침투하여 미세 기공을 가지게 되는데[9], 이 미세 기공은 (1~2 Å)보다 이온 크기가 큰 열화 인자( $Cl^-$  : 3.68 Å,  $H_2O$  : 2.8 Å,  $CO_2$  : 4.4 Å)를 근본적으로 차단할 수 있는 특성을 가지게 된다. 또한, 내부의 수분을 외부로 방출하면서 동시에 통기성을 갖는 결정 구조로서 장기적으로 도막의 박리·탈락·변형 등의 문제를 이룰 수 있다.

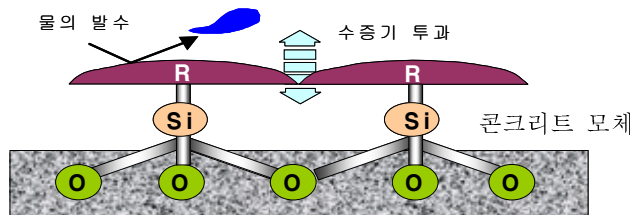


그림 1. 통기성 모델

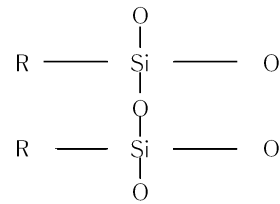
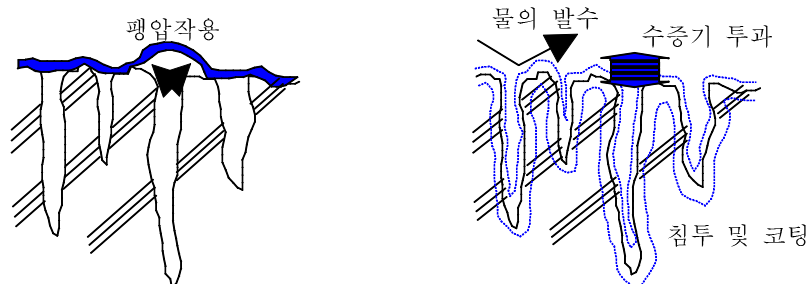


그림 2. 무기질 3차원 망목구조

이처럼 알록시 실란계 나노합성 나일론 섬유 보강제는 기존 섬유 보강제의 경우와 같이 단순 혼합 공정에 의한 것이 아니고, 나노수준에서 가수분해와 중합반응을 통하여 저분자량의 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 물에 불용성이며 건조 후에 초소수성을 나타내어 수분의 확산을 차단할 수 있어, 장기적으로 부착력이 탁월한 동질 재료간의 화학물 형태를 유지할 수 있는 장점을 가지게 된다[8].

그림 3은 콘크리트 표면에 도포된 일반합성 섬유계와 나노합성 나일론 섬유계의 도포에 따른 표면 형상을 나타낸 개념도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 일반합성 섬유계는 장기적으로 볼 때 내부 수분의 팽압 작용으로 인한 부풀음 및 탈락 등이 발생하는 반면, 나노합성 나일론 섬유 보강제의 경우에는 콘크리트 내부의 모세관 공극에 균질하게 침투함과 동시에 통기성을 나타내어, 장기적으로 도막의 박리·탈락·변형 등의 문제점이 해결 될 수 있을 것으로 기대된다[1].



(a) 일반합성 섬유계 도막(선상고리구조) (b) 나노합성 나일론 섬유계(3차원 망목구조)

그림 3. 콘크리트 표면에 처리된 보강제의 형상 비교

### 3. 실험 계획 및 방법

#### 3.1 실험 계획

본 연구의 실험 계획은 도표 1, 도표 2, 도표 3과 같다.

도표 1. 시험체의 제작

실험 항목	시험체 재질	시험체 규격(cm)		갯수
		중 성 화	10 × 20 (cylinder)	
내 구 성	콘크리트	염분 침투	10 × 20 (cylinder)	24
		동결융해	7.5 × 7.5 × 40 (cubic)	24
		화학적 침식	5 × 5 × 5 (cubic)	24
		-	7 × 20 × 2.5 (cubic)	6
미세조직	모르타르	-	7 × 20 × 2.5 (cubic)	6

도표 2. 시험체의 배합표

배합비 실험 종류	굵은골재 최대치 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	잔골 재율 (%)	단위량 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
						물	시멘트	잔골재	굵은골재
내구성시험 (콘크리트)	25	15	4.5±1.5	45	46	194	431	802	925
미세 조직 (모르타르)	· 1종 포틀랜드시멘트에 무기질 폴리머계 첨가(C×4.5%) · 잔골재 및 굵은 골재의 비중, 조립률, 흡수율(%) : (2.62, 2.78), (2.82, 6.80), (0.8, 0.5) · 시멘트(C) : 잔골재(S) = 1 : 2 · W/C 50%의 중량비로 배합한 모르타르								

도표 3. 표면 처리제 도포 방법

실험 항목	보강제 종류	도포 방법	도포 횟수	도포 두께
내 구 성	일반 합성 섬유제	붓	2	0.5~1.0 mm
	나노 합성 나일론 섬유	붓	2	0.5~1.0 mm
미세조직	나노 합성 나일론 섬유	붓	2	5±2 mm

#### 3.2 미세 조직 평가 방법

본 연구에서는 나노합성 나일론 섬유 보강제를 도입하여 콘크리트의 모세관 공극을 제어함으로써, 각종 열화 인자의 확산 및 이동을 억제하여 콘크리트의 내구성을 개선하고자 하며, 이에 대한 검증은 위해 나노합성 나일론 보강제의 도포에 따른 모세관 공극의 형상 변화와 이에 따른 미세 조직의 변화를 관찰하였다.

나노합성 나일론 섬유 보강제를 도포한 콘크리트 시험체의 미세 공극량 변화를 평가하기 위하여, 수은 압입식 포로시미터를 사용해 세공 용적을 측정하였다. 나노합성 나일론 섬유 보강제를 적용한 콘크리트의 미세 조직 변화를 확인하기 위하여, 주사 전자 현미경(SEM) 관찰을 실시하였다. 시험체에 나노합성 나일론 섬유 보강제를 도포하고 14일 경과후 시편을 채취하였으며, 평가부위로서 도포면인 표면에 대하여 500 배율로 관찰하였고, 침투부위에 대한 평가로서 도포면에 수직면으로 할렬하여 단면부의 조직 변화를 500 배율과 5000 배율로 관찰하였다.

#### 3.3 내구성 평가 방법

시험체는 W/C가 45 %로 무처리, 일반 합성 섬유제, 나노합성 나일론 섬유제 3종류로 제작하였다.

- (1) 염분 침투 저항성 시험은 시험체를 NaCl 10 % 용액에 28일간 침지시킨 후, 질산은 적정법에 의해 염화물 이온 침투 깊이에 대한 시간적 변화를 측정하였다.
- (2) 중성화 시험은 촉진 중성화 시험 장치를 사용하여 35일간 실시하였으며, 시험이 종료된 시점에서 할렬면에 페놀프탈레인 1 % 용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였다.
- (3) 동결융해 시험은 KS F 2456에 의해 +4~-18°C 온도 주기를 300회 반복하였으며, 정해진 횟수에서

그 때마다 상대동탄성계수를 측정하였다.

(4) 화학적 침식 저항성 시험은 강산인  $H_2SO_4$  5 % 용액에 12일간 침지하면서 콘크리트 시험체의 질량 변화를 측정하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

##### 4.1 미세조직 평가

그림 4는 콘크리트의 수화에 의해 형성되는 공극 구조 특성을 나타낸 것이다. 이들 공극은 모세관 공극과 에트링가이트, 모노설페이트 공극 등으로 구성되어 있으며, 이 중 콘크리트의 공극은 10 nm ~ 1 μm 범위에 분포되어 있는 모세관 공극이 가장 많이 차지하고 있다.

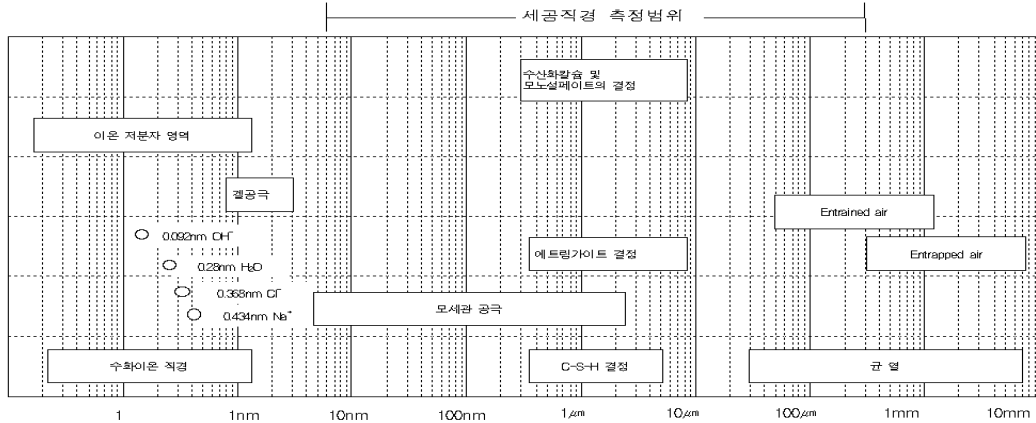


그림 4. 콘크리트의 수화에 의해 형성되는 공극 구조

그림 5는 본 연구 대상의 표면 피복 재료인 나노합성 나일론 섬유 보수·보강제를 모르타르에 도포한 경우 공극 구조의 변화 특성을 나타낸 것이다. 표면 처리제를 도포한 시험체의 경우, 공극 분포 곡선은 미세한 공극으로부터 비교적 큰 공극에 이르기까지 공극양이 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 이것은 표면 처리제가 저분자량으로 구성되어 콘크리트 내부로의 침투가 용이하고, 공극 내부에 박막 형태로 코팅되어 공극의 부피가 무도포 시험체에 비하여 전체적으로 감소하고 있었기 때문으로 생각된다. 또한, 세공은 0.3 μm 이상의 공극과 0.1 μm 이하의 공극 영역에서는 세공량이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 0.1 ~ 0.3 μm 영역의 세공량은 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 나노합성 나일론 섬유 표면처리제가 도포됨에 따라 0.3 μm 이상의 세공 체적 및 0.1 μm 이하의 세공 체적이 감소됨에 따라 상대적으로 크기가 유사한 공극이 균일하게 분포되었기 때문으로 생각된다. 한편, 0.1 μm 이하의 공극 영역에서도 세공량이 감소되어 나노합성 나일론 섬유 보강제가 미세한 모세관 공극에까지 침투되고 있음을 알 수 있다. 또한, 나노합성 나일론 섬유 보강제가 건조 후에 약 1~2 Å 크기의 미세 기공을 갖는 것은 화학 구조상 3차원 망목구조(-O-Si-O-)로 인하여 생성된 미세 기공에 의해 내부의 수분을 외부로 방출하는 발수성과 통기성을 갖게 되기 때문에, 내부 수분의 증발로 인해 팽압 작용으로 도막 박리가 발생되지 않는 주요 원인이라 판단된다.

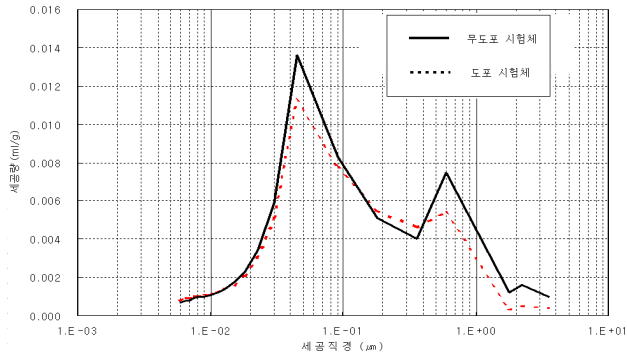


그림 5. 표면 처리제 도포에 의한 세공 구조의 변화 특성

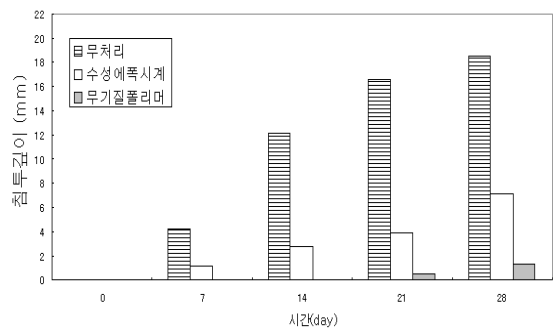


그림 6. 염분 침투 깊이의 경시 변화

## 4.2 염분 침투 저항성

그림 6은 침지 시간 경과에 따른 각 시험체의 염분 침투 깊이의 경시 변화를 나타낸 것이다. 나노합성 나일론 섬유 염유의 경우, 무처리 시험체에 비해 90 % 이상의 염분 침투 감소 효과를 나타내었으며, 일반합성 섬유 염유에 비해서도 50 % 이상의 염분 침투를 감소시켜 염분 침투에 대한 저항성이 탁월한 것으로 나타났다.

## 4.3 중성화 저항성

그림 7은 촉진 중성화 시험을 통해 얻어진 각 시험체의 중성화 침투 깊이 결과를 나타낸 것이다. 무처리 시험체에 비해 보강제를 도포할 경우 중성화 깊이가 상당히 감소하는 것을 볼 수 있다. 35일간 촉진 중성화를 실시한 경우, 중성화 깊이는 무처리의 경우 10.8 mm, 일반합성 섬유 염유 도포한 경우 5.5 mm, 나노합성 나일론 섬유 염유 보강제로 처리한 경우 0.9 mm로 측정되었다. 그림 8은 촉진 시험 결과를 이용하여 중성화 속도 계수를 평가한 후 10년간 중성화 진행 추이를 나타낸 것이다. 이 결과는 촉진 중성화 조건인 CO<sub>2</sub> 농도 5 %, 상대습도 60 %에서 얻어진 것으로 실제의 중성화 현상을 예측하는 것은 아니며, 단지 중성화 진행 추이를 참고적으로 제시한 것이다.

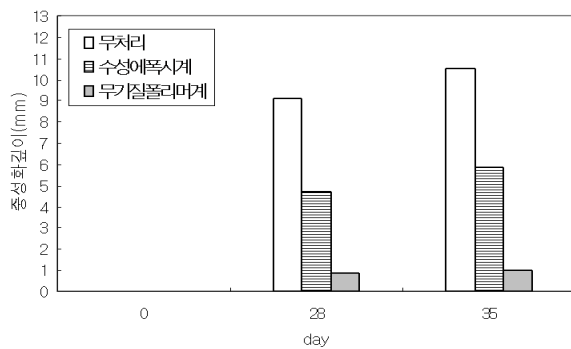


그림 7. 중성화 깊이의 경시 변화

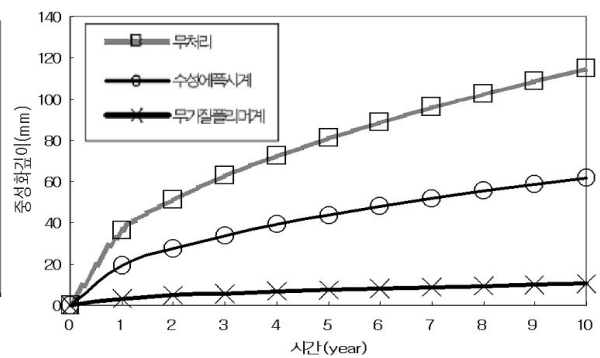


그림 8. 중성화 진행 예측 (CO<sub>2</sub> 5%, 상대습도 60% 조건)

## 4.4 동결융해 및 화학적 침식 저항성

그림 9는 각 시험체에 대하여 300 cycle의 동결융해 시험후의 시험 결과를 나타낸 것이다. 동결융해 시험 결과, 콘크리트가 동해를 받지 않기 위해서는 300 cycle에서의 상대동탄성계수가 60 % 이상이 되어야 한다. 무처리한 경우 300cycle에서 상대동탄성계수는 50 %로서 위의 기준에 미달하고 있는 반면, 보강제를 도포한 경우에는 모두 상대동탄성계수가 60 %를 초과함으로써 동해 저항성은 충분한 것으로 생각되며, 특히, 나노합성 나일론 섬유 염유를 도포한 시험체의 경우 300cycle에서도 상대동탄성계수가 거의 저하되지 않아 탁월한 동해 저항성이 있음을 알 수 있다.

그림 10은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 % 용액에 침지한 시험체의 재령에 따른 중량 변화율을 나타낸 것이다. 12일간 침지한 결과, 무처리의 경우 +6~-4 % 범위의 중량변화율을 나타내었으며, 일반합성 섬유 염유로 처리한 경우 +4~-4 % 범위의 중량변화율을 나타내었고, 나노합성 나일론 섬유 염유로 표면 처리한 경우 +2~-2 % 범위의 안정적인 중량변화율을 나타내었다.

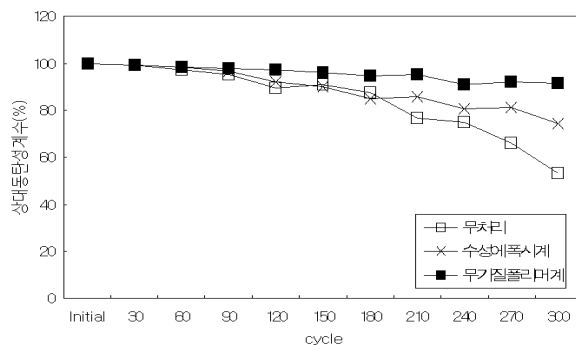


그림 9. 상대 동탄성 계수의 시간적 변화

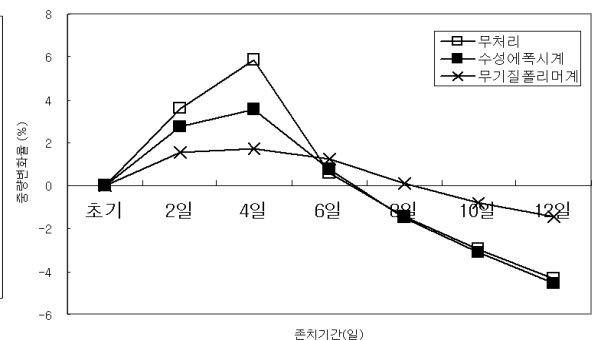


그림 10. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5% 용액에 침지한 시험체의 질량 변화율

## 5. 결 론

본 연구는 나노합성 나일론 섬유 보수·보강제를 도포한 콘크리트 시험체의 내구성 평가를 실시하기 위해 수행한 실험으로, 보수·보강제 도포에 따른 모세관 공극 제어, 열화 인자 차단에 대해 기존 재료와 비교 평가하여 신소재의 적용 가능성을 파악할 수 있었다.

본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 나노합성 나일론 섬유계 보수·보강제를 도포함에 따라, 모세관 공극 영역 중에서  $0.3 \mu\text{m}$  이상의 공극과  $0.1 \mu\text{m}$  이하의 공극 영역에서 세공양이 감소하는 경향을 보였으며,  $0.1\sim 0.3 \mu\text{m}$  영역의 공극은 다소 증가하는 경향으로 나타나, 보수·보강제 도포에 따라 세공 용적이 균일하게 감소되는 것으로 판단된다.
- (2) 나노합성 나일론 섬유계 보수·보강제를 도포한 시험체의 경우, 무처리 시험체에 비해 염분 침투 깊이 및 중성화 억제에 탁월한 효과를 나타내었다.
- (3) 동결융해 시험 결과 나노합성 나일론 섬유계를 사용할 경우, 무처리 시험편에 비해 상대동탄성계수의 저하가 거의 발생하지 않았으며, 이는 콘크리트 수화물과 일체화된 화학 결합 구조로 인한, 외부의 수분 차단 효과에 의해 동결융해에 대한 저항성이 향상된 것으로 판단된다.
- (4) 화학적 침식 저항성 시험 결과 나노합성 나일론 섬유계 보수·보강제로 처리한 시험체의 경우는 무처리 시험체에 비해 매우 안정적인 중량 변화율을 나타내어, 외부에서 침투되는 산에 대한 화학적 저항성이 뛰어난 것으로 평가되었다.

향후, 현장 적용성의 확대를 도모하고자 기초적인 물성 시험에 따른 공학적 특성에 대해 평가 및 해안구조물, 각종 대기오염에 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 내·외벽 등에 대한 내구성 증진을 위해서 다양한 용도 개발과 각종 열화인자에 노출되어 있는 콘크리트 구조물에 대한 성능 평가를 실시함으로써, 다양한 적용성의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 박홍욱, 송하원, 백종명, 우종태, 남진원 (2003), “알루미늄 실란계 나노합성 Hybrid 폴리머형 코팅제를 적용한 콘크리트의 내구성능 평가에 관한 실험적 연구”, 2003년도 봄 학술발표회 논문집, 한국철도학회, pp. 687-692.
2. 백종명, 김은겸 (2004), “나노합성 무기질 폴리머계 표면처리제를 적용한 콘크리트의 내구성능 평가에 관한 실험적 연구”, 2004년도 추계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp. 229.
3. 오병환 (1996), “섬유보강 콘크리트의 전망 및 필요성”, 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제8권, 4호
4. S. Kurtz and P. Balaguru. (2000), “Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, Pergamon Press Inc., pp.183-190.
5. Wei Ling Lin (1992), “Toughness Behavior of Fiber Reinforced Concrete”, Fiber Reinforced Cement and Concrete, Edited by R, N, Swamy, Rilem.
6. Balaguru, Perumalsamy N. and Shah, Surendra P. (1992) “Fiber-Reinforced Cement Composites”, McGraw-Hill Inc., New York.
7. Bentur, A. and Mindess, S. (1990), “Fiber Reinforced Cementitious Composites”, Elsevier Applied Science.
8. Bradley, D.C. and Mehrotra, R.C. (1978), “Metal Alkoxides”, Academic Press, New York, pp.336-337.
9. Brinker, C.J. and Scherer, G.W. (1990), “Sol-gel Science”, Academic Press, New York, pp.852-853.
10. Frank Papworth (1998), “ANCON beton's interim report on cores from fire tested concrete panels”.
11. ICBO Engineering Services Inc(ES), Acceptance Criteria(AC) (2000), “Effectiveness of Synthetic Fiber as Concrete Reinforcement”, Engineering Report.