

## 화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복을 위한 침투성 알칼리성부여제의 이용기술개발

김용로, 김재환, 장종호, 장재봉\*, 권영진\*\*, 김무한\*\*\*  
 충남대학교 대학원 건축공학과, 충남대학교 대학원 건축공학과\*,  
 호서대학교 환경안전 공학부 소방학과\*\*, 충남대학교 건축공학과\*\*\*

### The Technical Development of Using Impregnating Alkalization Agent to Recover Durability of Carbonated Reinforced Concrete Structures by Fire Damages

**Kim Yong Ro, Kim Jae Hwan, Jang Jong Ho, Jang Jea Bong\*,  
 Kwon Young Jin\*\*, Kim Moo Han\*\*\***

*Chungnam National University Doctor's Course of the Architectural Engineering, Chung Nam National University Master's Course of the Architectural Engineering\*, Hoseo University Professor of Department of Fire Protection Engineering\*\*, Chungnam National University Professor of the Architectural Engineering\*\*\**

#### 1. 서론

철근콘크리트구조물은 시간이 경과함에 따라 사용환경에 의해 서서히 성능이 저하하는 것으로 알려져 있다. 이중 대표적인 성능저하 기구인 중성화는 타설 직후 콘크리트의 pH가 12~13의 강알칼리성을 나타내게 되지만 대기 중 탄산가스의 침투, 산성비 등에 의해 pH 8.5~10 정도로 알칼리성을 소실하게 된다. 이러한 중성화가 콘크리트 표면으로부터 서서히 진행하여 철근에 도달하게 되면 철근의 부동태 피막이 파괴되어 철근의 부식이 진행되며 철근의 발청에 의한 피복콘크리트의 균열·박락 및 철근의 내력한계 도달 등과 같은 내구성저하를 초래하게 된다.

특히 철근콘크리트구조물에서 발생하는 화재는 콘크리트중의 시멘트경화체와 골재의 각기 다른 수축팽창으로 인하여 조직을 영성하게 하며 열응력에 의해 균열을 발생시켜 콘크리트의 성능을 저하시킨다. 그리고 500~580°C의 온도에서 콘크리트 중의 유리알칼리 부분에서 수산화칼슘이 열분해하여 알칼리성이 감소하는 화학적 피해를 일으켜 결과적으로 중성화가 촉진되어 철근콘크리트구조물의 내구성을 현저하게 저하시킨다.<sup>1)</sup>

최근 철근콘크리트구조물의 중성화 메커니즘에 관한 연구와 더불어 중성화된 구조물의 보수·보강 기술<sup>2)</sup>에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이미 외국에서는 중성화된 콘크

리트에 약품도포 및 전기화학적 방법을 이용하여 재알칼리화, 탈염 및 전기방식 등과 같은 공법을 실용화<sup>3)</sup>하고 있다. 그러나 국내의 경우 화재로 인해 중성화가 촉진되어 성능이 저하된 철근콘크리트구조물의 체계적인 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 성능저하현상을 파악한 후 내구성 회복을 위하여 침투성 알칼리성부여제의 성능을 평가하고 이용기술을 개발하고자 하였다.

## 2. 화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 성능저하현상

### 2.1 화재를 입은 철근콘크리트구조물의 성능저하<sup>1)</sup>

- ① 콘크리트중의 골재와 수화물의 화학적 성질이 변한다.
- ② 콘크리트중의 모세관공극내 자유수의 수분팽창으로 내부압력이 증가한다.
- ③ 콘크리트중의 시멘트페이스트는 수축을 하고 골재는 팽창을 하여 균열을 발생시킨다.
- ④ 콘크리트와 철근사이의 서로다른 팽창때문에 구속응력을 증가시켜 균열과 부착강도를 저하시킨다.
- ⑤ 콘크리트내부의 온도속도차이에 의한 내부열응력이 증가한다.
- ⑥ 정탄성계수의 감소에 의해 바닥슬래브나 보의 처짐이 증대한다.

### 2.2 중성화에 의한 철근콘크리트구조물의 성능저하

중성화에 의한 철근콘크리트구조물의 성능저하요인 중 철근의 부식이 가장 문제시되는데 콘크리트의 pH가 12.4~13.0의 영역으로 안정상태에 있다고 말할 수 있으나 중성화(pH: 10 이하)됨으로서 부식속도가 빠르게 된다. 그림 1은 pH와 철강의 부식관계를 나타낸 것으로 pH 10 이하에서는 상당히 빠르게 부식되지만 pH 12 이상이면 거의 부식되지 않는 것을 보여주고 있다.<sup>4)</sup>

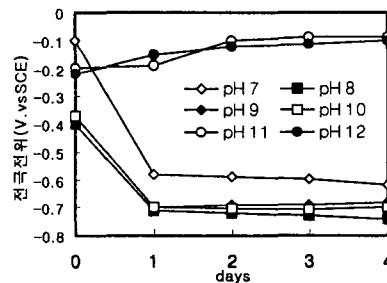


그림 1. 철근의 자연전위와 pH의 관계

## 3. 침투성 알칼리성부여제에 의한 중성화억제 기술개발

### 3.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1에 나타난 바와 같이 콘크리트에 침투성 알칼리성부여제를

도포함에 따른 알칼리성 회복성능을 평가하기 위하여 물시멘트비 35%, 45%, 55%의 3수준 및 알칼리성부여제 도포량을 400g/m<sup>2</sup>의 표준 및 초과 도포함에 따른 알칼리성 회복성능을 폭로재령별 사진촬영 및 ICP분석을 통해 평가하고자 하였다.

표 1. 실험계획

W/C (%)	28일 압축강도 (MPa)	알칼리성부여제 도포량 (g/m <sup>2</sup> )	회복조건	측정항목	중성화 촉진 조건
35	56.5	표준 : 400±20	욕외폭로	중성화깊이 사진촬영 ICP분석	온도 40℃ 습도 50% CO2농도15%
		초과 : 791			
45	43.5	표준 : 400±20			
		초과 : 861			
55	30.1	표준 : 400±20			
		초과 : 1076			

### 3.2 사용재료

본 실험에서 사용한 각 재료의 물리적 성질은 표 2에서 보는 바와 같이 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 잔골재는 비중 2.57의 강모래, 굵은골재는 비중 2.58의 부순 자갈을 사용하였으며 고성능감수제는 나프탈렌계를 사용하였다. 또한 중성화된 시험체에 알칼리성을 회복시키기 위하여 사용한 침투성 알칼리성부여제는 표 3에 나타난 바와 같이 규산리튬(Li<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)을 주성분으로 한 pH 11±0.5의 강알칼리성의 수용액을 사용하였으며 침투성 알칼리성부여제 도포시 물과 반응하여 수산화리튬 및 실리카고형분을 생성하는 반응식은 다음 식 1과 같다.

또한 규산리튬수용액(Li<sub>2</sub>O<sub>x</sub>SiO<sub>2</sub>aq)의 구조는 그림 2와 같이 폴리실리케이트의 형태를 갖고 있으며, 폴리실리케이트는 입경이 이온보다는 크나 콜로이드보다는 훨씬 작은 2~20m $\mu$ 정도이며, 점도도 10CPS정도로 낮기 때문에 콘크리트 및 모르타에 침투되기 쉬운 특성을 갖고 있다.<sup>5)</sup>

표 2. 사용재료의 물리적 성질

시멘트	O.P.C, 비중 : 3.15, 분말도 3,200cm <sup>2</sup> /g
잔골재	강모래, 입경 : 2.5mm, 비중 : 2.57
굵은골재	부순자갈, 입경 : 20mm, 비중 : 2.58
고성능 감수제	나프탈렌계, 비중 : 1.09±0.02

표 3. 알칼리성부여제의 물리적 성질

성분	pH	점도	빙결점	비중	색
Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	11±0.5	10CPS	0℃	1.09±0.02	갈색



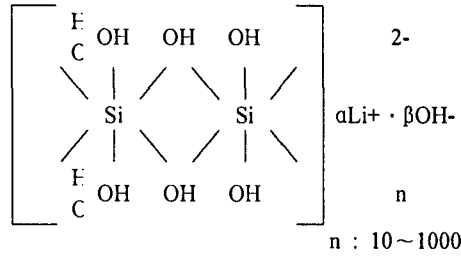


그림 2.  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ 의 화학적 구조

### 3.3 콘크리트배합 및 시험체 제작

본 실험의 배합은 표 4에서 보는 바와 같이 단위수량을  $170\text{kg/m}^3$ 으로 고정한 후 물시멘트비를 35, 45, 55%의 3수준으로 설정하고, 중성화 회복시험용 시험체는  $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주형 시험체로 제작하였으며 타설 24시간 후에 탈형하여 4주간 표준양생을 실시하였으며 표준양생 직후 시험체를 중성화시키기 위하여  $\text{CO}_2$  15%, 온도  $40^\circ\text{C}$ , 습도 50%의 환경하에서 6주간 중성화 축진을 실시하였다.

중성화 축진 직후 원주형 시험체를 길이방향으로 할렬하여 2개의 시험체로 나누었으며 각각의 표면을 그라인더로 연마한 후 침투성 알칼리성부여제를  $400 \pm 20\text{g/m}^2$ 를 표준도포, 침투성 알칼리성부여제가 더 이상 흡수되지 않을 때까지를 초과도포로 하여 2수준으로 도포하였다. 또한 표면마감재로서 시멘트페이스트를 도포하였다.

표 4. 콘크리트의 배합

W/C (%)	잔골재율 (%)	단위중량( $\text{kg/m}^3$ )			
		물	시멘트	잔골재	굵은 골재
35	42.0	170	486	694	967
45	42.0	170	378	731	1019
55	42.0	170	309	757	1051

### 3.4 시험방법

중성화깊이 측정은 시험체를 일정 두께로 절단하여 파단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하여 적색으로 착색하지 않은 부분까지의 거리를 측정하였으며 측정 후 절단면은 대기에 직접 노출되지 않도록 에폭시코팅을 행하였다.

또한 침투성 알칼리성부여제의 주성분인  $\text{Li}^+$ 의 침투량을 정량적으로 분석하기 위하여 ICP (Induced Coupled Plasma)분석을 실시하였다.

### 3.5 실험결과 및 분석

#### 1) 알콜용액법에 의한 평가

사진 1은 물시멘트비별 침투성 알칼리성부여제 도포전 시험체의 중성화깊이와 알칼리

성부여제 도포 직후의 회복성상, 도포후 옥외폭로재령 6주의 표준 및 초과도포 시험체의 중성화 회복성상을 나타낸 것이다.

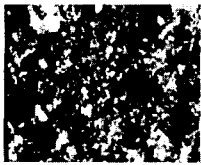



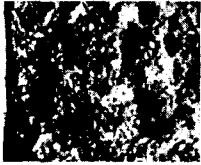



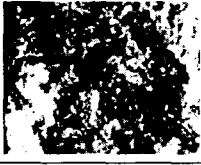
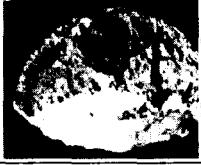


W/ C 35%				
W/ C 45%				
W/ C 55%				
	(a) 중성화 촉진 직후	(b) 알칼리성부여제 도포직후	(c) 옥외폭로 6주 (표준도포)	(d) 옥외폭로 6주 (초과도포)

사진 1. 알칼리성부여제 도포량에 따른 알칼리성 회복성상

침투성 알칼리성부여제 도포전 시험체의 중성화깊이는 물시멘트비 35%는 7.7mm, 45%는 12.7mm, 55%는 15.3mm로 물시멘트비가 클수록 중성화깊이는 크게 나타났으나 침투성 알칼리성부여제 표준도포를 행한 직후의 모든 시험체에서 전면이 착색되고 있어 알칼리성이 회복된 것으로 나타났다.

한편 침투성 알칼리성부여제를 표준 및 초과 도포한 후 옥외폭로를 실시한 시험체의 재령 6주 알칼리성 회복성상은 도포직후에 비하여 일부부위에서 희미하게 나타나고 있으나 모든 물시멘트비에 있어서 중성화되었던 부위에서 착색되고 있어 알칼리성이 유지되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 물시멘트비 및 표준·초과도포에 따른 알칼리성 회복 및 유지성상은 알콜용액법에 의한 발색의 정도를 육안관찰에 의한 측정만으로 판단하기에는 어려움이 있는 것으로 나타났다.

## 2) 성분분석결과

침투성 알칼리성부여제의 침투량을 정량적으로 파악하기 위하여 침투성 알칼리성부여제 도포후 침투성 알칼리성부여제의 주성분인 Li<sup>+</sup>을 측정된 ICP분석 결과는 그림 3에서 보는 바와 같다.

도포 직후의 Li<sup>+</sup>의 깊이별 농도는 콘크리트 표면으로부터 0~5mm에서 110.4ppm, 5~10mm에서 97.6ppm, 10~15mm에서 80.2ppm으로 측정되어 표면부의 침투성 알칼리성부여제 침투량이 가장 높았으며 침투깊이는 15mm 이상일 것으로 사료된다.

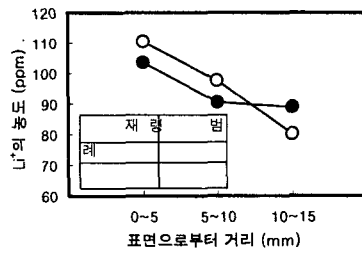


그림 3. 깊이에 따른 Li<sup>+</sup> 농도

한편 옥외폭로 30주에서는 깊이별로 각각 103.5ppm, 90.5ppm, 89ppm의 측정결과를 보여 도포직후의 침투량과 유사한 것으로 나타나 실제 구조물에 적용시 유효할 것으로 판단된다.

#### 4. 화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 보수기술 적용사례

##### 4.1 구조물의 이력 및 성능저하상태

본 연구에서 보수·보강한 구조물은 ○○광역시 ○○구 ○○○육교로서 표 5는 구조물의 이력 및 주위환경 등을 나타낸 것이고 표 6은 부재의 성능저하상태 및 원인분석을 나타내고 이에 대한 보수공사계획을 나타낸 것이다.

이 구조물은 표 5~6에서 나타낸 바와 같이 2회에 걸쳐 화재, 난방용 연탄사용에 따른 일산화탄소의 증가에 의해 구조물 전반에 걸쳐 중성화가 심각한 상태이며 여기에 빗물의 유입, 제설제의 유입 등 복합적인 요인에 의해 콘크리트의 누수, 백화, 들뜸, 철근의 부식 등이 전반에 걸쳐 나타났다.

표 5. ○○○육교의 이력 및 주위환경

구분	준공 년도	경과 연수	구조형식	유지관리실태	총교통 량	주위환경
내용	1970. 12	27년	RC슬래브보 (9경간) PC슬래브보 (3경관) 복합구조	· 설계도서, 시공 도면등의 미보존 · 유지관리 미비	평균 30,000대	· 슬래브 하부에 1층 또는 2층의 주거 건물이 1996년까지 100~200여 가구존재 · PC거더로 이루어진 경간 아래로 철도 통행 · 1997년 2회에 걸쳐 화재발생

표 6. ○○○육교의 주요 부재별 열화 상태·원인 분석 및 보수·보강방안

구분	성능저하상태	성능저하 원인	보수·보강 방안
상부 아스콘	· 신축이음부 균열발생	· 신축이음부를 무시하고 덧씌움 · 계절의 변화, 온도변화 등의 기상 작용	· 아스콘 제거 후 재포장 · 신축이음 설치
슬래브	상부	· 신축이음부 균열로 빗물 유입 · 시공시 콜드조인트 발생	· 콘크리트면 방수 · 들뜸·박락부 단면복구
	하부	· 신축이음부 균열 · 배수구의 막힘 · 제설제에 의한 염화물 유입 · 난방용 연탄사용, 화재에 의한 중성화 가속 · 교통량 증가	· 배수구 재설치 · 철근부식 억제 · 중성화 회복(재알칼리화) · 들뜸·박락부 단면복구 · 균열부 U커팅 후 단면복구
보	RC부	· 콘크리트 재료분리(하부) · 난방용 연탄사용, 화재에 의한 중성화 가속 · 교통량 증가에 의한 하중증가 및 충격하중	· 중성화 회복(재알칼리화) · 철근부식 억제 · 내하력 증가(탄소섬유부착)
	PC부		· 백화발생 및 유리석회 유출 · 철근부식 가능성 농후 · 보하부 휨균열 발생
기둥	· 콘크리트 들뜸 · 철근노출	· 피복두께 부족 · 난방용 연탄사용, 화재에 의한 중성화 가속	· 철근부식 억제 · 중성화 회복(재알칼리화) · 들뜸·박락부 단면복구

#### 4.2 화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복을 위한 보수공사

그림 4는 본 구조물을 성능저하상태에 따라 공사를 위한 플로우를 나타낸 것으로 특히 화재로 인해 콘크리트의 중성화가 촉진된 부분에 있어서 알칼리 회복을 위하여 침투성 알칼리성부여제 도포를 적용하였다.

한편 철근부식이 발생된 곳 및 부식 가능성이 많은 부분에서는 도포형 방청제의 도포에 의한 철근부식억제, 단면이 손실된 부분은 폴리머-시멘트계 재료를 사용한 단면복구 등을 통하여 콘크리트의 내구성 증진을 도모하였다. 또한 휨균열이 발생된 보의 경우 내하력 저하가 예상되어 RC부분에서는 탄소섬유보강, PC부분에서는 PC강선을 이용하여 내하력 증진을 도모하였다.

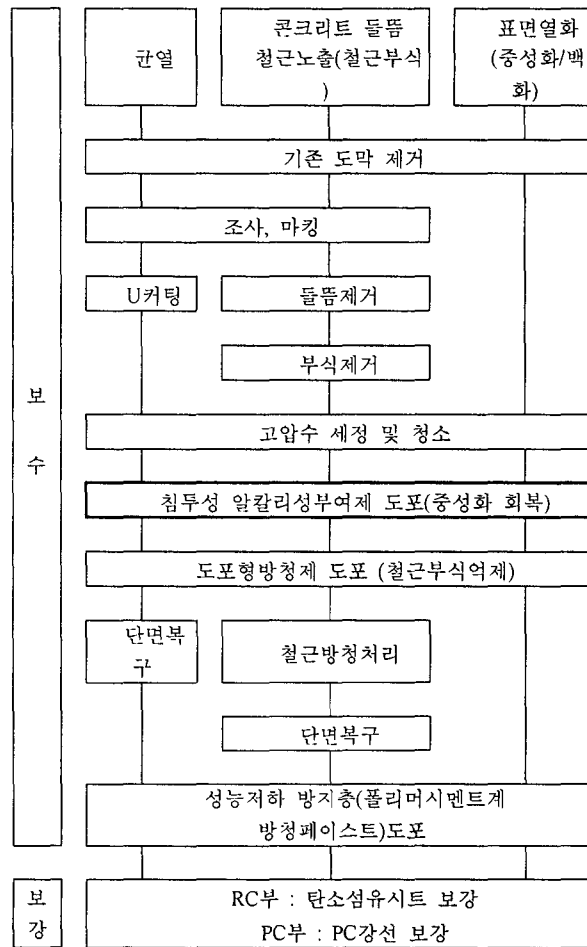


그림 4. 보수공사 플로우

## 5. 결론

화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복을 위하여 침투성 알칼리성부여제의 성능을 평가하고 실제구조물에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중성화된 콘크리트의 알칼리성 회복성능을 사진촬영 및 ICP분석을 통해 알칼리성부여제의 성능 평가를 한 결과 알칼리성 회복이 가능한 것으로 나타났다.

2) 화재로 인해 중성화된 철근콘크리트구조물의 내구성 회복을 위한 보수기술로서 침투성 알칼리성부여제를 실제구조물에 적용하였으며 본 보수기술의 실용화를 위해서는 장기적인 보수재료 및 기술에 대한 성능평가가 필요할 것으로 사료된다.



## 참고문헌

1. 콘크리트 診斷技術 '01 (基礎編), 日本콘크리트工學協會, 2001, pp.63-65.
2. 小林一輔外, 炭酸化研究委員會報告書, 日本콘크리트工學協會, 1993.
3. 日本建築學會, 鐵筋콘크리트造建築物의 耐久性調査・診斷および補修指針(案)・同解説, 1997.
4. 김무한 외, 중성화 및 화재를 입은 구조물의 내구성 향상을 위한 침투성 알칼리성부여제의 이용기술개발, 한국구조물진단학회, Vol. 1, No. 1, pp.205-208, 1997. 10.
5. Attimtay, E. : Chloride corrosion of reinforced, Texas Univ., 1971. 3.