

무기질 침투성 표면강화제에 의한 콘크리트 구조물의 표면보호 성능향상 방안

홍 성 윤 (한일시멘트(주) 중앙연구소, 이학박사)
 강 석 표 (한일시멘트(주) 중앙연구소, 공학박사)
 김 경 덕 (한일시멘트(주) 중앙연구소)
 정 시 영 (한일시멘트(주) 중앙연구소)

1. 서 론

19세기 이후 콘크리트는 구조재료로서 가장 광범위하게 사용되어지고 있으며, 철근콘크리트의 역학체계가 확립됨에 따라 콘크리트구조물은 그 내하성과 내구성에 관해서 공학적인 특성에 있어서 매우 높은 평가를 얻을 수 있었다. 그러나 국내에서는 10년전인 90년대 중반에 삼풍백화점 및 성수대교가 붕괴되는 등 콘크리트구조물의 조기열화와 내구성 저하의 사례가 다수 보고되면서 콘크리트구조물의 유지관리에 대한 국가사회적인 큰 반향을 일으키게 되었다.

콘크리트구조물 내구성저하 문제에 관한 사례증가의 원인으로서는 종래에 볼 수 없었던 다양한 형식의 콘크리트구조물이 다수 건설되어지고, 콘크리트의 내구성이 반영구적인 관점으로부터 설계·시공상에 있어서 내구성에 관한 적절한 조치를 행하지 못하였을 뿐만 아니라 유지관리의 중요성을 등한시 하였기 때문이다.

특히 최근 들어 산성비 및 대기오염의 증가에 따라서 일반 대기환경하에 있어서도 콘크리트 중성화

에 의한 콘크리트구조물의 내구성 저하현상이 빠르게 진행되고 있다. 이와 같은 콘크리트의 중성화는 대기중의 이산화탄소가 콘크리트내에 침입하여 탄산화반응을 일으킴으로서 세공용액의 pH가 저하하는 현상으로서 중성화에 의하여 콘크리트 내부의 강재에 부식 가능성이 높아지고 강재부식 진행에 의하여 균열의 발생, 피복의 박리·박락, 강재의 단면결손에 따른 내하력 저하 등 구조물 혹은 부재의 성능 저하가 발생하게 된다.

특히, 콘크리트의 중성화는 콘크리트 표면으로부터 탄산가스가 침투·확산됨에 따라 진행되기 때문에 콘크리트 표면상태에 따라서 중성화속도에 큰 영향을 미치게 된다. 이중에서도 콘크리트 표면에 마감재를 도포함으로써 중성화속도 및 투기성을 저감시키는 방안은 이미 수많은 연구결과가 발표되고 있으나, 마감재는 바탕 콘크리트와 완전히 일체화되지 못하고 시간이 경과함에 따라 도장재 자체에서 열화가 진행되는 단점을 지니고 있다.

따라서 본고에서는 표면보호제의 기능 및 성능에 대한 기본고찰을 행한 후 침투형 표면보호제에 의한 콘크리트표면에서의 성능개선 및 조직을 치밀화시

켜 콘크리트 중성화속도를 억제시킴으로서 콘크리트구조물의 내구성 향상을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 표면보호재의 기능 및 성능

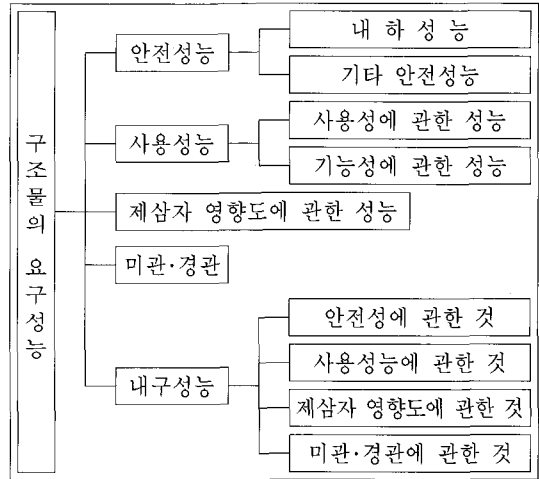
가. 표면보호공의 개요

표면보호공은 직접적인 의미로서는 콘크리트구조물의 표면을 보호하는 것이지만 그 목적은 단순히 표면을 보호하는 것만은 아니다. 표면보호에 의하여 그 내부에 있는 콘크리트 또는 철근 등의 강재 열화를 억제함으로써 콘크리트와 강재로 구성되어진 콘크리트 구조물의 성능저하를 억제시켜 콘크리트구조물을 보호하게 된다. 따라서 표면보호는 일본의 경우 콘크리트 표준시방서에서 신설구조물을 대상으로 하는 [시공편] 뿐만 아니라 기존 구조물을 주로 대상으로 하는 [유지관리편]에서도 기술되어져 있다.

일반적으로 콘크리트 표면에 있는 도막 및 시트에 의한 보호층 형성 또는 함침에 의한 표면층 개질 및 이들을 조합시킨 표면처리가 표면보호공사의 중심이 된다. 표면처리의 전단계로서 균열주입 및 열화부분의 단면복구를 포함하고 있지만 표면보호로서 기대되어지는 효과의 기본은 표면처리에 의한 것이다. 따라서 열화한 기존 구조물에 있어서 단면복구가 행하여지는 것이 일반적이며, 이 경우 표면보호공사로서는 표면처리와 단면복구의 양자가 포함되고 때로는 균열주입이 병용되어지는 것이다.

콘크리트구조물의 성능을 <그림-1>에 나타내었다. 표면보호에 의하여 저하억제가 기대되어지는 콘크리트구조물의 성능은 콘크리트와 철근의 열화를 억제하는 것으로부터 안전성능, 사용성능, 미관·경관, 제삼자영향도에 관한 성능, 내구성능 모두에 관계된다. 그러나 특히 내구성능 및 미관·경관의 유지, 회복 또는 향상을 기대하여 이용되어지는 경우가 많다.

[유지관리편]에서는 각 열화기구에 대한 보수·보



<그림-1> 구조물 성능의 분류

강공사의 일부로서 표면처리, 단면복구 및 균열주입을 포함하고 있으며, 그중 염해와 알칼리골재반응에 대한 예를 <표-1>에 나타내었다.

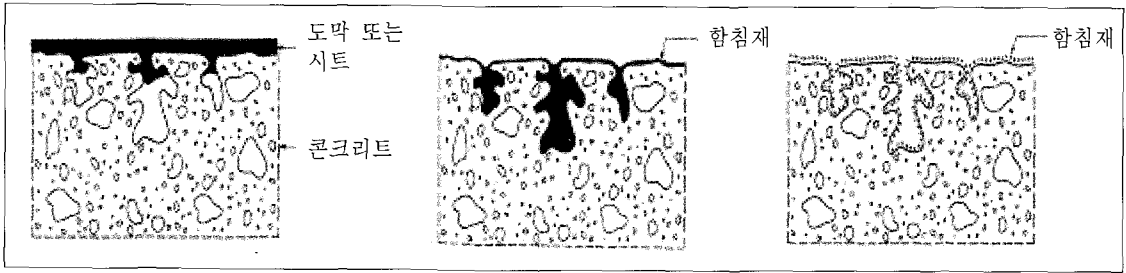
<표-1> 보수·보강에 기대하는 효과와 공법의 예

(a) 염 해

기대 효과	공법 예
강재 부식인자 공급량을 저감	표면처리
강재 부식인자의 제거	단면복구, 전기화학적 탈염
강재 부식진행을 억제	표면처리, 전기방식, 단면복구, 방청처리
내하력 향상	FRP접착, 단면복구, 외케이블, 증설

(b) 알칼리골재반응

기대 효과	공법 예
ASR 진행억제	표면처리(피복, 함침), 균열주입
ASR 팽창구속	프리스트레스 도입, 강판·PC·FRP보강, 증설
열화부 제거	단면복구
내하력 향상	강판, FRP접착, 프리스트레스 도입, 증설, 강판·PC·FRP보강, 외케이블



(a) 피복계

(b) 함침계(충진)

(c) 함침계(표면)

〈그림-2〉 구조물 성능의 분류

나. 표면보호공의 종류

표면보호공의 종류는 표면보호 효과를 얻기 위한 재료에 따라서 유기계 및 무기계로 구분하는 경우가 많다. 그러나 무기계로 불리어지는 것에 있어서도 폴리머시멘트페이스트 또는 폴리머시멘트몰탈을 이용하는 것이 대부분이며, 완전 무기계는 사용되지 않고 있는 것이 일반적이다. 또한 유기계 상부에 무기계가 중첩되거나 무기계 상부에 유기계가 중첩되는 시방도 있다. 타일과 석재를 붙이는 시공방법은 건축구조물에 비하여 토목구조물에서는 비교적 적지만 최근 미관·경관을 목적으로 이용하는 경우도 있다.

표면처리의 효과를 얻는 메카니즘은 독립의 피복층을 형성시키는 피복계와 콘크리트에 함침시켜 표면층의 성질을 변화시키는 함침계로 분류한다.

피복계는 도막계에 의하여 피복층을 형성시키는 도막계와 시트계 재료를 표면에 부착하여 피복층을 형성시키는 시트계로 분류한다. 또한 도막계는 가장 얇은 도장으로부터 코팅, 라이닝에 이르기까지 도막 두께에 따라서 명칭을 변경하는 경우도 있다.

한편 함침계는 콘크리트 표면층의 공극에 충전 혹은 생성물을 석출시켜 치밀한 층을 생성하는 충전계와 콘크리트 표면층의 외부 및 내부표면의 성질을 개선하는 표면계로 분류하며, 이것을 〈그림-2〉에 나타내었다.

표면보호공은 일반적으로 대상으로 하는 열화기

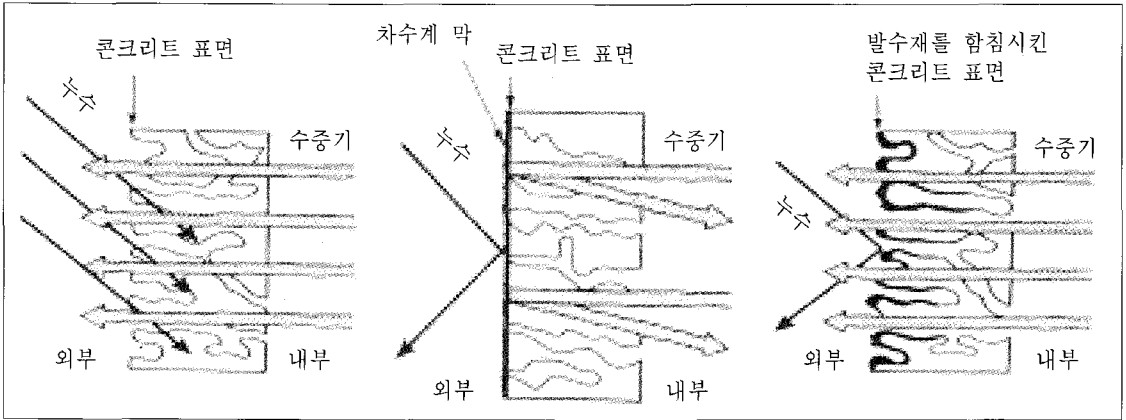
구에 있어서 콘크리트 중으로 침투하는 유해한 성질을 차단하는 효과가 있다. 이와 같은 메카니즘으로부터 표면보호공은 열화의 주요한 인자인 물을 차단하기 위한 방수공사로서 이용되어지는 경우가 많다. 방수공사는 〈그림-3〉과 같이 물을 차단하는 차수계와 외부로부터 액체상태의 물의 침입을 억제하고 내부로부터 기체상태의 수증기를 증발시키는 발수계로 구분되어진다.

다. 요구 기능 및 성능

표면보호공에 요구되어지는 역할 및 기능은 다양하다. 각종 열화기구로부터 콘크리트구조물의 보호, 경관·미관의 회복 또는 향상, 낙서·오염방지 등도 있지만 표면보호로 불리어지는 경우에는 열화방지가 주가 된다.

콘크리트구조물의 열화는 다양한 열화요인에 의하여 발생하기 때문에 그 열화기구에 따라서 표면보호공에 요구되어지는 기능은 다르게 되기 때문에 기능을 공학적으로 분석·정량화하여 나타내는 표면보호공의 요구성능도 다르게 된다. 중성화의 경우 산소, 이산화탄소 및 물, 염해의 경우 산소, 염화물이온 및 물, 알칼리골재반응의 경우 물과 알칼리, 화학적 침식의 경우 다양한 침식성 물질 등 다양한 요인의 억제가 요구되어진다.

표면보호공이 발휘하는 성능은 콘크리트와 마찬가지로 시공에 의하여 큰 영향을 받는다. 어느 정도



(a) 무처리

(b) 차수계 막

(c) 발수계

〈그림-3〉 구조물 성능의 분류

양호한 재료를 사용하여도 시공에 의하여 전혀 요구되어지는 성능을 발휘하지 못하고 부과되어진 기능을 발휘하는 것이 불가능한 경우도 있기 때문에 시공조건에 준수가 매우 요구되어진다. 더구나 표면보호공의 재료 및 품질의 변화는 매우 빠르게 발전하기 때문에 특히 내구성 등 장기 데이터를 대부분 얻지 못하는 경우가 많다.

이 W/C 60, 50, 40%의 콘크리트를 제작하여 28일간 표준수중양생을 실시한 후 표면강화제 도포 유무에 따른 표면성능개선을 압축강도, 표면경도, SEM, 세공용적 등을 통하여 검토한 후 물흡수계수 및 중성화 깊이를 각각의 재령에서 측정하였다.

3. 실험계획 및 방법

나. 콘크리트배합

가. 실험계획

본 연구에서의 콘크리트 배합은 〈표-3〉에 나타낸 바와 같으며, 본 연구에서 사용한 재료의 일반적 성질은 〈표-4〉에 나타내었다.

본 연구의 실험계획은 〈표-2〉에서 보는 바와 같

또한 본 연구에서 사용한 표면강화제는 규플로르화염(Fluorosilicate)을 주성분으로 하는 무기질계로서 콘크리트 표면에 빠르게 침투하여 수산화칼슘 및 탄산칼슘과 화학적으로 반응함으로써 표면의 미세기공에 물리·화학적으로 안정한 불용성 화합물을

〈표-2〉 실험계획

W/C (%)	표면강화제 도포	평가항목*
60	유무	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도(도포전, 28일) • 표면경도(1, 3, 7, 28일) • SEM(28일) • 세공용적(28일) • 물흡수계수(28일) • 중성화 깊이(1, 2, 3, 4주)
50		
40		

* 표면강화제 도포후 재령

〈표-3〉 콘크리트 배합

W/C (%)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)		
			시멘트	잔골재	굵은골재
60	48	180	300	849	955
50			360	825	929
40			450	789	889

〈표-4〉 사용재료의 일반적 성질

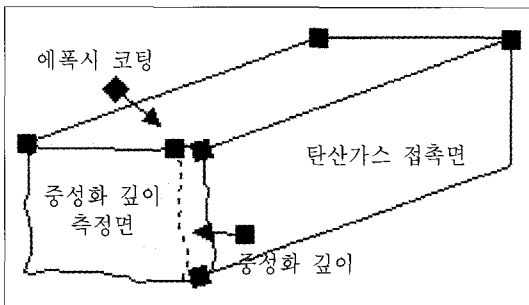
시멘트	종류: 보통포틀랜드시멘트 비중: 3.10, 분말도: 3,200cm ² /g
굵은골재	종류: 부순자갈, 비중: 2.62 최대치수: 25mm
잔골재	종류: 강모래, 비중: 2.55 최대치수: 5mm
표면강화제	종류: 무기질계, 비중: 1.2 ± 0.05 주성분: 규플로오르화염, 고형분: 25%

생성시킴으로써 조직을 치밀하게 한다.

다. 시험체 제작

본 연구에서의 콘크리트 압축강도 시험체는 KS F 2403에 준하여 제작하였으며, 콘크리트 표면경도 시험체는 콘크리트 비빔직후 굵은골재를 제거한 몰탈을 이용하여 4×4×4cm의 시험체를 제작하여 28일간 표준수중양생을 실시하였다.

물흡수계수 측정용 시험체는 28일 양생 종료 후 압축강도 측정용 시험체인 $\phi 10 \times 20$ cm의 원주형 공시체의 일정부위를 선정하여 두께 3cm로 절단하여 제작하였으며, 축진중성화시험은 10×10×10cm의 시험체를 제작하여 28일간 표준수중양생을 실시한 후 〈그림-4〉에서 보는 바와 같이 중성화 깊이 측정면을 제외한 나머지 면을 에폭시 코팅하여 축진중성화 시험시 탄산가스의 영향을 최소화하였다.



〈그림-4〉 중성화 깊이 측정 후의 시험체

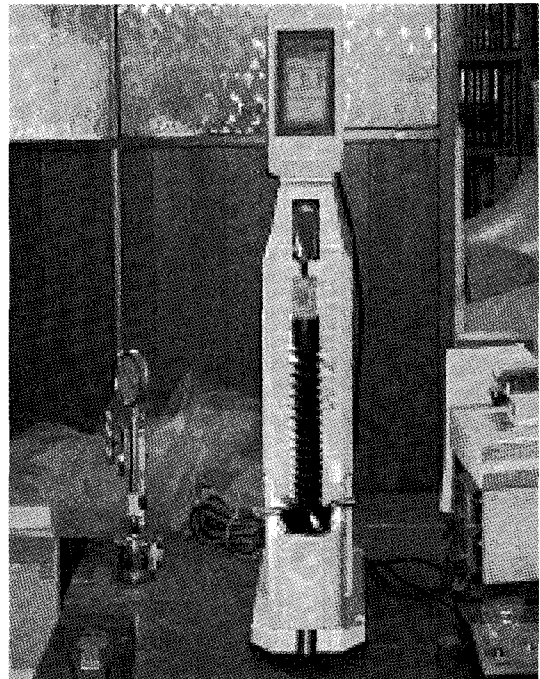
라. 측정방법

본 연구에서의 콘크리트 및 몰탈 압축강도 시험은 각각 KS F 2405 및 KS L 5220에 준하여 측정하였다.

콘크리트 표면경도 시험은 〈사진-1〉에서 보는 바와 같은 로크웰 경도기(Akashil, HR-521)의 L스케일을 이용하여 60kgf의 시험하중으로 직경 6.35mm의 압입자를 시험체 표면에 압입한 후 10kgf의 기준하중으로 되돌리면서 시험편의 경도를 측정하였다.

물흡수계수 시험은 표면강화제 도포 28일 후에 KS F 2609 「건축재료의 물 흡수계수 측정방법」에 준하여 약 20℃의 물에 2~10mm 정도의 깊이로 침지하여 침지시간 10분, 30분, 1시간, 6시간, 24시간에 시험체를 꺼내어 표면에 묻은 물을 짚은 형겅 등으로 제거한 후 시험체의 무게를 측정하였다.

축진중성화 시험은 양생이 종료한 시험체의 함수



〈사진-1〉 로크웰 경도기

상태가 중성화 촉진시험에 미치는 영향을 고려하여 1주간 기건양생을 실시한 후 온도 20℃, 습도 50%, CO₂농도 5%의 조건에서 중성화 촉진시험을 실시하였다.

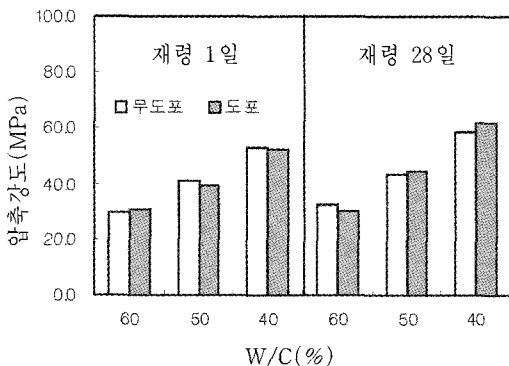
중성화 깊이 측정은 <그림-4>에서 나타난 바와 같이 만능재료시험기를 이용하여 시험체를 소정의 두께로 할렬한 후 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 적색으로 착색하지 않는 부분의 표면으로부터의 깊이를 중성화 깊이로 하여 측정하였으며, 5부위의 평균값으로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

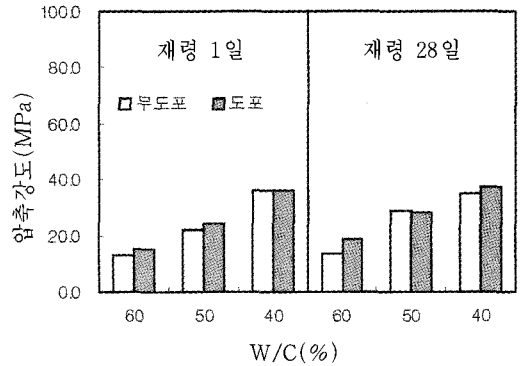
가. 표면성능 개선효과

표면강화제 도포 유무에 따른 몰탈 압축강도 결과는 <그림-5>에서 보는 바와 같이 W/C 60%에서 약 30MPa, W/C 50%에서 약 40MPa, W/C 40%에서 약 50MPa 수준을 보이고 있으며, 표면강화제 도포 유무 및 도포 후 재령에 따른 압축강도 증진은 나타나고 있지 않았다.

또한 콘크리트의 압축강도 결과는 <그림-6>에서 나타난 바와 같이 몰탈 압축강도와 유사하게 표면강화제 도포 유무 및 도포 후 재령에 따른 압축강도 증진은 나타나고 있지 않으며, 몰탈 압축강도와 비



<그림-5> 몰탈 압축강도 측정결과

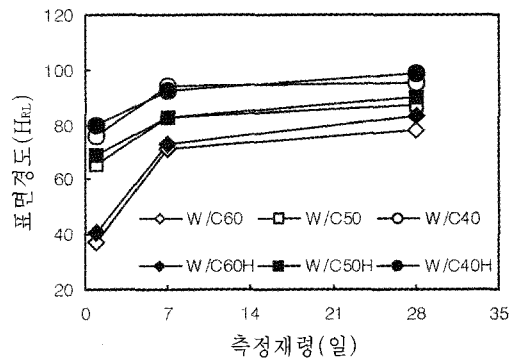


<그림-6> 콘크리트 압축강도 측정결과

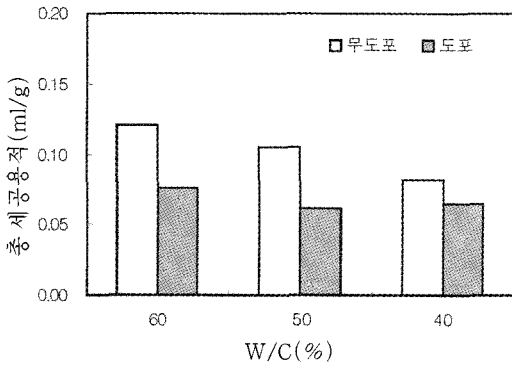
교하여 약 20MPa 정도 낮게 발현하고 있었다.

표면강화제 도포 유무에 따른 로크웰 표면경도 측정결과는 <그림-7>에 나타난 바와 같이 표면강화제 도포에 의하여 무도포 시험체와 비교하여 로크웰 표면경도는 증가하는 것으로 나타났다. 도포 후 측정 재령 7일까지는 표면강화제 도포에 따른 로크웰 표면경도는 무도포 시험체와 유사한 경향을 보이고 있으나, 측정재령 28일에서는 약 3HRL 정도 증가하는 것으로 나타났다.

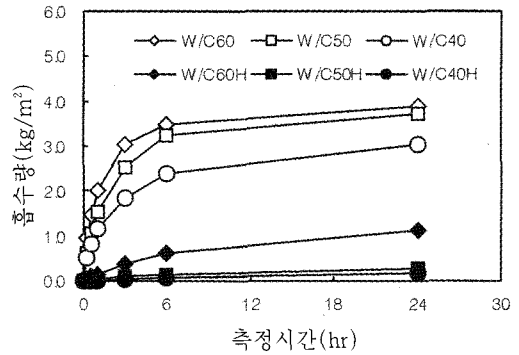
이는 표면강화제의 주성분인 규플르오르화염이 콘크리트 내부의 수산화칼슘과 화학반응하여 불용성의 불화금속염을 생성함으로써 콘크리트 표면의 미세공극을 충전하기 위해서는 어느 정도의 수화기



<그림-7> 로크웰 표면경도 측정결과



〈그림-8〉 세공용적 측정결과



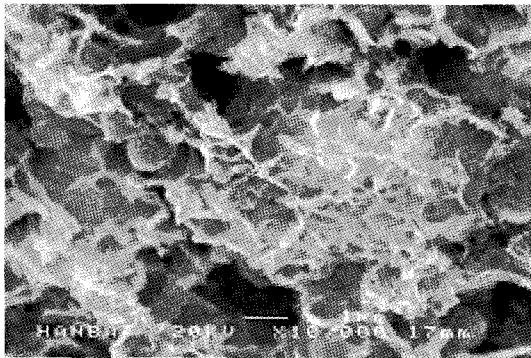
〈그림-9〉 물 흡수량 측정결과

간이 필요하기 때문인 것으로 사료된다.

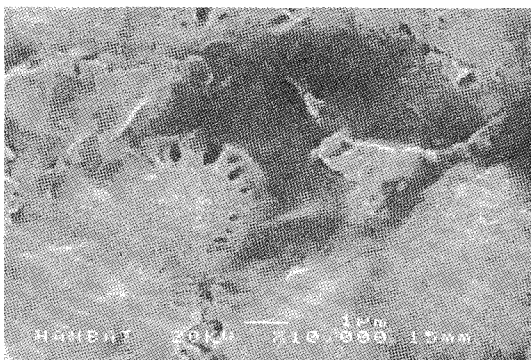
〈그림-8〉은 표면강화제 도포 28일 후에 측정된 콘크리트 표면의 총 세공용적을 나타낸 것으로 표면

강화제를 도포한 시험체의 총 세공용적이 무도포 시험체와 비교하여 W/C 60 및 50%에서 약 0.04ml/g, W/C 40%에서 약 0.02ml/g 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 표면강화제 도포에 따른 총 세공용적 감소폭은 W/C가 증가할수록 크게 나타났다.

〈사진-2〉는 표면강화제 도포 28일 후에 측정된 콘크리트 표면의 SEM 측정결과를 나타낸 것으로서 무도포 시험체에서의 표면공극이 표면강화제 도포에 의하여 불용성의 불화금속염이 생성됨으로서 표면의 미세공극이 충전된 것을 확인할 수 있었다.



(a) 무도포(W/C 60%)



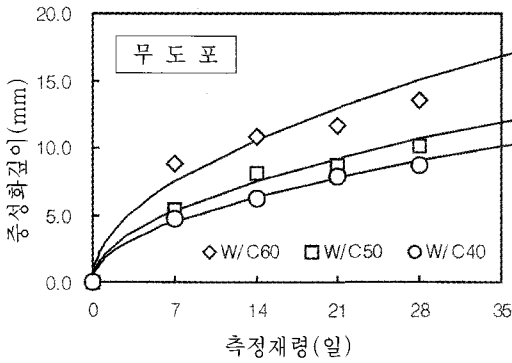
(b) 도포(W/C 60%)

〈사진-2〉 SEM 측정결과

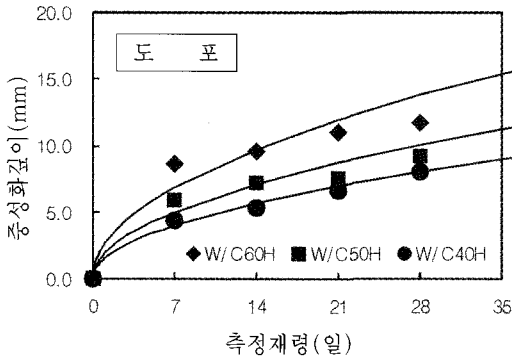
나. 물 흡수방지 효과

〈그림-9〉는 표면강화제 도포 28일 후에 측정된 물 흡수량 측정결과를 나타낸 것이다.

표면강화제 도포 시험체의 물 흡수량은 무도포 시험체와 비교하여 W/C 60%에서 2.74kg/m², W/C 50%에서 3.43kg/m², W/C 40%에서 2.87kg/m² 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 표면강화제에 함유되어 있는 실리카계 발수성분이 콘크리트 표면에 발수성 피막을 형성시켜 수분의 침투를 억제시킨 것으로 판단된다. 이와 같은 수분침투 억제효과로 인하여 콘크리트 내부로의 열화인자 침투를 억제시킬 뿐만 아니라 철근부식의 억제효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

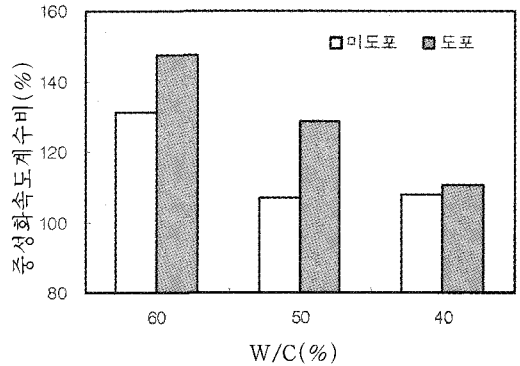


(a) 무도포



(b) 도포

〈그림-10〉 촉진 중성화시험 측정결과



〈그림-11〉 촉진재령 28일에 대한 7일의 중성화속도계수비

〈그림-11〉은 촉진재령 28일에 대한 7일에서의 중성화 속도계수비를 나타낸 것으로서 표면강화제를 도포한 시험체의 중성화속도계수비가 무도포 시험체와 비교하여 촉진재령 7일에서의 중성화속도계수가 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 표면강화제의 주성분인 규플로르화염이 콘크리트표면의 유리석회(Ca(OH)₂)와 반응하여 불용성 불화금속염을 생성하기 때문에 무도포 시험체와 비교하여 촉진재령 7일에서는 중성화 깊이가 다소 빠르거나 유사하게 나타난 것으로 사료된다.

5. 결 론

침투형 표면강화제 도포에 의한 콘크리트표면에서의 성능개선 및 조직을 치밀화시켜 콘크리트 중성화속도를 억제시킴으로서 콘크리트구조물의 내구성 향상을 위한 기초자료를 제시하고자 한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 규플로르화염을 주성분으로한 표면강화제를 도포함으로써 몰탈 및 콘크리트의 압축강도의 증가는 보여지지 않고 있으나 로크웰 표면경도를 측정할 결과 도포 후 28일 후에 표면강화제 도포에 의하여 표면경도가 증가하는 것으로 나타났다.

2) 콘크리트 표면에서의 총 세공용적 및 SEM 측정결과 콘크리트 표면의 수산화칼슘과 화학반응하

다. 중성화억제 효과

〈그림-10〉은 표면강화제 도포 28일 후에 측정한 촉진 중성화시험 측정결과를 나타낸 것으로 표면강화제 도포한 시험체의 중성화깊이는 무도포 시험체와 비교하여 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이를 일반적인 중성화속도식인

$$C = A \sqrt{t}$$

(C : 중성화 깊이, A : 중성화속도계수, t : 시간)

에 대입하여 중성화속도계수 A를 산출하면 표면강화제를 도포한 시험체의 평균 중성화속도계수는 약 0.2정도 작아지는 것으로 나타났다.

여 불용성의 불화금속염을 생성함으로써 콘크리트 표면의 미세공극을 충전하는 것으로 나타났다.

3) 표면강화제 도포 시험체는 무도포 시험체와 비교하여 뚜렷하게 물 흡수량이 감소하는 것으로 나타났으며 이로 인하여 콘크리트내부로의 열화인자 침투를 억제시킬 뿐만 아니라 철근부식의 억제효과를

얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4) 표면강화제 도포 시험체는 무도포 시험체와 비교하여 평균 중성화속도계수가 약 0.2정도 감소하는 것으로 나타났으나, 촉진재령 7일에서는 무도포 시험체와 비교하여 다소 빠르거나 유사하게 나타났다. ▲

시사 용어 해설

▶ BRICs

브라질(B)·러시아(R)·인도(I)·중국(C)을 말한다. 미국의 신용평가회사 폴드만 삭스는 2050년에 가면 이들 네 나라가 독일, 영국, 프랑스, 이탈리아를 제치고 세계 6대 경제강국(G6)에 들어갈 것으로 전망했다. 기존의 6대강국 중 그나마 자리를 유지하는 곳은 미국과 일본 정도. BRICs의 현재 경제규모는 6대강국의 15%에 불과하지만 2025년에는 50%를 넘어서며, 2040년에 가서는 이를 능가한다. 이 예측대로라면 2050년의 세계최대 경제대국은 미국이 아니다. 중국은 43조달러의 경제규모를 자랑하며, 35조달러의 미국을 추월한다. 이때의 부자나라 순서는 중국, 미국, 인도, 일본, 브라질, 러시아 순이다. 이들 네 나라는 영토가 넓고 자원과 노동력이 풍부하며 경제가 한결 같이 상승국면을 타고 있다. 정치도 옛날에 비해 상대적으로 안정돼 있다. 브라질의 톨라 대통령은 노동자 출신의 소수파였지만 급진 이미지를 불식하고 브라질 재건계획을 제시하는데 성공했다. 러시아의 푸틴 대통령은 '강력한 러시아'를 모토로 국정 장악력을 강화했다. 인도는 풍부한 IT 인프라를 바탕으로 고성장을 구가하고 있다. 중국 경제의 눈부신 비약은 새삼 재론할 필요조차 없다. 우리에게도 잘 알려진 미국의 역사학자 폴 케네디는 "지금의 세계 질서가 금세기 내내 지속되리라고 생각하는 서방정치인이 있다면, 진지하게 이를 재고해야 할 것"이라고 말한다. 강대국 흥망성쇠를 추적하고 있는 그의 말이기에 설득력이 더하다. 폴드만 삭스의 예측은 자연스럽게 2050년의 우리 처지를 생각하게 만든다. 세계 12위 규모를 자랑하는 우리의 경제적 위상이 그대로 유지될 가능성이 별로 없기 때문이다. 이들 네 나라가 상위그룹에 끼어든다면 우리의 설 땅이 뒤로 밀릴 것임은 물어보나 마나다. 중위권의 이들 나라가 우리에게 제공해온 틈새시장과 비교 우위부분은 대부분 사라질 것이다.