

나노합성 세라믹계 도장재를 도포한 콘크리트의 내구성능

김성수¹⁾ · 이정배^{1)*} · 한승우¹⁾

¹⁾대전대학교 토목공학과

Durability Characteristics of Concrete with Nano Level Ceramic Based Coating

Seong-Soo Kim¹⁾, Jeong-Bae Lee^{1)*}, and Seung-Woo Han¹⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Daejin University, Kyeonggi-Do 487-711, Korea

ABSTRACT This study performed several tests for the durability of the concrete coated with nano synthesis ceramics which do not contain volatile organic compounds harmful to environment. The tests were adhesion test on dry and humid concrete, SEM test, MIP analysis, carbonation, chloride diffusion by electronic facilitation, freezing-thawing resistance, alkaline resistance, and brine resistance test. In the adhesion test on dry and humid concrete, nano synthesis ceramics coating produced the highest results among all the coatings tested. Nano synthesis ceramics adhered solidly on the concrete surface. The adhesive strength seemed to result from the hydrogen bond between nano synthesis ceramics which are inorganic and generated by hydrolysis and re-condensation reaction and the concrete's hydrates such as calcium silicate aluminate or calcium silicate hydrate. SEM test and MIP analysis results show surface structure with finest crevices pore in the nano synthesis ceramics coating applied concretes. In the carbonation, chloride diffusion, and freezing-thawing resistance tests, the concretes with nano synthesis ceramics coating indicated the best results. Based on these test results, further progress in application of nano synthesis ceramics coatings to various concrete structures including costal structures and sewerage arrangements can be expected.

Keywords : nano synthesis ceramics, volatile organic compounds, adhesion strength, carbonation, chloride diffusion

1. 서 론

콘크리트는 건설시장에서 가장 많이 사용되고 있는 고 내구성의 재료로써 많은 종류의 시설물이 콘크리트를 사용하여 축조되고 있다. 그러나 콘크리트가 수분의 침투, 온도의 변화, 해양환경 및 제설제의 살포, 대기오염으로 인한 유해가스, 하수 시설물에 발생하는 유해 물질 등 다양한 종류의 환경에 따른 원인으로 인해 철근부식, 균열, 침식 등이 발생하고 있다. 이로 인해 구조물의 수명이 극도로 저하되어 구조물의 안전성이 우려되는 문제 및 막대한 경제적 손실이 발생되고 있다¹⁾. 따라서 최근 각종 구조물의 내구성에 관련하여 시설물에 대한 점검과 진단이 강화되고 있으며 각종 구조물의 보수 작업이 진행되고 있다²⁾.

현재 미국, 일본, 유럽 등 선진국의 경우 구조물의 유지관리를 위한 비용이 막대하며 우리나라의 경우에도 선진국에 근접하는 수준으로 점차 증가하고 있다. 특히 교량, 철도, 발전소, 항만시설 및 대형 구조물 등 공공 구조물의 경우 건전성과 공용성, 사용성이 중요하기 때문에 이들 구조물의 장기적인 내구성, 수밀성, 안전성을 보

장하기 위해 철근콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 여러 방안들이 제안되고 있다.

그 방안의 하나로 콘크리트 구조물 표면에 피복을 함으로써 내구성 저하 원인인 수분, 염분, 유해가스, 화학물질을 차단하여 콘크리트 구조물을 보호하는 방법이 가장 효율적인 방법으로 폭넓게 적용되고 있다³⁻⁵⁾. 그러나 현재 가장 많이 사용되고 있는 우레탄계, 에폭시계 등의 콘크리트 표면 도장재는 페놀, 포름알데히드, 톨루엔, 키틴 등의 휘발성 유기화합물 (VOC)이 함유되어있는 유기용매의 사용으로 환경오염 및 인체에 치명적인 영향을 줄 수 있어 전세계적으로 사용 원료 및 제조 공정을 엄격하게 규제하고 있다. 이에 따라 세계각국의 도장재업계에서는 중금속 및 유기화합물 (VOCs: volatile organic compounds)을 포함하지 않은 도장재의 개발에 박차를 가하고 있다⁷⁾.

이에 대한 대응 방안으로 도장재 중의 고형성분비를 높여 상대적인 용제 사용량을 감소시키는 방법이 연구되었으며 용제를 휘발성 유기화합물이 아닌 물로 대체하는 수성화 방법 및 무기질 재료를 주재료로 하는 방법이 연구되었다⁸⁾. 하지만 대응 방안으로 개발된 도료들이 초기의 성능이나 표면에 형성하는 막의 성능이 기존의 유기 도장재의 성능을 따라가지 못하는 문제점이 발생하게 되었다.

*Corresponding author E-mail: dlwjdo@lycos.co.kr
Received March 30, 2007, Accepted July 16, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 첨가제를 사용하여 도장재가 만들어 졌고 최근에는 화제가 되고 있는 나노기술의 발달로 인하여 나노수준의 첨가제를 도장재에 첨가함으로써 구조물의 내구성을 향상시키며 여러 가지 특성들을 보유하게 하는 연구가 진행되고 있다^{6,9)}.

본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 우레탄계, 유기무기계 혼합 및 무기계 도장재와 나노합성 세라믹계 도장재를 사용하여 염해 및 탄산화 방지 등 콘크리트의 내구성 증진의 효과를 평가하여 유기계 도장재를 대체하여 휘발성 유기화합물을 사용하지 않고 효과적으로 콘크리트 구조물의 내구성을 증진시킬 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

콘크리트용 표면 도장을 통해 콘크리트의 내구성 저하 방지를 위한 효과를 검증하기 위하여 내구성 시험 및 물리적 성능 시험을 실시하였다.

각 도장재의 물리적인 성능을 평가하기 위하여 부착강도 (표준 및 습윤상태)를 측정하였으며 알칼리 및 염해 환경에서의 적용성 및 콘크리트와의 장기 부착성능 평가를 위하여 내알칼리 시험 후 부착강도와 내염수성 시험 후 부착강도를 측정하였으며 SEM 촬영 및 MIP 측정을 통해 표면상태 및 각 재료들의 미세 공극 구조를 평가하였다. 또한 각 도장재의 콘크리트 내구성 증진 효과를 평가하기 위하여 탄산화에 대한 저항성, 동결융해에 대한 저항성, 염소이온 침투 저항성, 내알칼리성, 내염수성을

평가하여 콘크리트의 내구성 증진을 위한 도장재의 성능을 평가하였다.

2. 실험 연구

2.1 사용 재료

본 연구에 사용된 콘크리트 보호용 도장 재료 (S사-유기계 이하 SC라 약함, I사-나노합성세라믹계 이하 HB라 약함, E사-유·무기계 이하 EC라 약함, E사-무기계 이하 ES라 약함)의 물리적 성질 및 주요 성분은 Table 1과 같다.

사용된 시멘트는 보통포틀랜드시멘트 (이하 OPC로 약함)를 사용하였으며 사용된 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다.

잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 Table 3과 같고 도장재의 성능을 극대화하기 위해 열악한 상태의 콘크리트를 모사하였으며 이를 위해 사용된 콘크리트 배합은 Table 4와 같다.

2.2 시험 방법

2.2.1 부착강도 시험

600×600×100 mm 콘크리트 시험체를 제작하여 양생한 후 콘크리트 보호용 도장재료를 도포하여 7, 14, 28일 간격으로 40×40 mm 크기의 어태치먼트를 각각의 측정

Table 1 Physical properties and component of coatings

	SC	HB	EC	ES
Main component	Polyurethane	Silicon and ceramic	Collagen and acrylic	Ceramic
Composition	2 liquid type	1 liquid type	1 liquid type	1 powder type
Diluent	Thinner	Water	Water	Water
Coating frequency	3 Times	3 Times	2 Times	2 Times
Interval between coats (20°C)	Each 18 hr.	Each 4 hr.	Each 3 hr.	Each 3 hr.
Specific gravity	1.25	1.33	1.43	1.63

Table 2 Chemical composition and physical properties of OPC

Chemical composition (%)						I _g [*] , loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃			
21.95	6.59	2.81	60.1	3.32	2.11	1.3	3.15	3,112

*I_g: ignition

Table 3 Physical properties of aggregates

Items types	G _{max} [*]	Specific density	FM ^{**}	Organic impurities
Fine aggregate	-	2.66	2.15	OK
Coarse aggregate	25	2.52	6.78	-

*G_{max}: max. size (mm) **FM: fineness modulus

Table 4 Mix Proportion concrete

Test results			W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SP [*] (g)
Compressive strength at 28 days (MPa)	Slump (mm)	Air (%)			W	C	S	G	
29.5	140	1.8	40	27	184	460	421	1,184	52.5

*SP: superplasticizer

부위에 부착하여 KS F 4715 (얇은 마무리용 벽 바름재), JIS A 6909 (박층마감도재), JIS A 6910 (복층마감도재)의 부착력 시험 방법에 준하여 측정하였으며 다양한 환경에서의 부착력을 측정하기 위해 습윤상태, 내알칼리성 및 내염수성 시험 후의 부착강도를 측정하였다.

2.2.2 미세 구조 분석

공극 구조를 분석하기 위해 5 mm 정도의 시료를 채취하여 주사형 전자현미경 (scanning electron microscope : SEM)을 사용하여 각 도장 재료의 표면을 촬영하였으며 각 시험체 표면의 미세공극을 측정하기 위하여 수은압입법 (MIP)을 적용하였다. 평가 대상은 0.003 μm ~10 μm 영역의 모세관공극 크기로 한정하였다. 이때 수은의 최대압력은 480 MPa, 접촉각은 140°로 하였다. 본 시험을 통해 도장으로 인한 콘크리트의 미세 공극 구조의 변화를 관찰하였다.

2.2.3 염소이온 침투 저항성

염소이온 침투 저항성 시험은 전기화학적 염소이온 확산촉진시험법으로 시행하였으며 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ 원주형 공시체를 제조하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에서 28일 양생한 후 측면을 에폭시수지로 도포하여 콘크리트 절단기로 중앙 부위를 $\phi 100 \times 50 \text{ mm}$ 로 절단한 시편에 콘크리트 보호용 도장 재료를 도포한 후 Fig. 1과 같이 확산셀을 구성하였다.

시험 전 시험체를 18시간 이상 증류수에 침지시켜 완전히 포화가 되도록 하여 시험 장치에 고정시키고 음극 셀 (-)에는 0.5 M의 염화나트륨 (NaCl)용액을 사용하였으며, 양극 셀 (+)에는 포화수산화칼슘 (sat. $\text{Ca}(\text{OH})_2$)용액을 사용하였다.

시험체에 30 V의 직류 전원을 8시간 동안 통전시켜 매 30분마다 측정된 전류를 data logger로 측정하여 시간에 대한 적분으로 구한 통과전하량과 시험이 끝난 시험체를 절단하여 절단면에 질산은 (AgNO_3)용액을 분무하여 염소이온 침투 깊이를 측정하였다.

2.2.4 탄산화에 대한 저항성

$\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ 원주형 공시체를 제조하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수

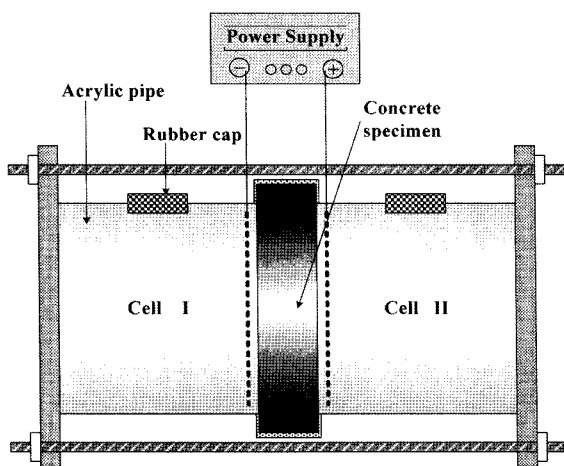


Fig. 1 Details of diffusion cell

중에서 28일간 양생한 콘크리트에 콘크리트 보호용 도장 재료를 도장한 공시체를 이산화탄소의 농도를 높인 탄산화 촉진시험기 안에 넣어 탄산화촉진시험을 실시하였다. 촉진 조건은 온도 20°C , 상대습도 60% 및 CO_2 농도 5%로 한다.

탄산화 깊이의 측정은 촉진 개시부터 1주, 2주, 4주, 5주에 측정하였으며, 탄산화 평가는 촉진 시험 후의 도장된 공시체를 KS F 2423에 의해 콘크리트 쪼갬 인장 후에 KS M 0015에 의한 1% 페놀프탈레인 용액을 분무해서 미착색 부분을 콘크리트 탄산화로 측정하였다. 공시체의 20곳을 측정하여 평균한 값을 사용하였다.

2.2.5 내알칼리성 시험

내알칼리성 시험은 포화 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액을 사용하여 상온 20°C 에서 시험체를 15일간 침지시킨 후 시험편을 꺼내어 깨끗한 물로 세척한 다음 2시간 정도 건조시켜 도막의 부풀음, 벗겨짐, 연화, 구멍의 발생 등을 육안 관찰하고 침지용액의 착색 및 혼탁 정도를 기준 시험체와 비교하여 색상의 변화를 관찰하였으며 침지 후 부착강도를 측정하여 알칼리 용액에 의한 부착력의 저하 정도를 측정하였다.

2.2.6 내염수성 시험

내염수성 시험은 해수와 유사한 농도인 염화나트륨 (NaCl) 용액 (3wt%)을 사용하여 Fig. 2와 같이 상온 20°C 에서 15일간 침지 후, 시험편을 깨끗이 세척한 다음 2시간 정도 건조시키고 도막의 부풀음, 벗겨짐, 연화, 구멍의 발생 등을 육안 관찰하고 침지 용액의 착색 및 혼탁 정도를 기준 시험체와 비교하여 색상의 변화를 관찰하였다. 또한 부착강도를 측정하여 염수에 의한 도막의 부착력 저하 여부를 판단하였다.

2.2.7 동결융해에 대한 저항성

Table 4에 나타난 콘크리트로 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 의 각주형 공시체를 제작하여 24시간 양생 후 탈형하여 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온 수조에서 28일간 수중양생 한 콘크리트 공시체에 도장을 실시한 다음 7일 후에 동결융해시험 장치에 투입하여 동결융해에 대한 저항성을 평가하였다.

동결융해 반복시험은 ASTM C 666의 기중동결 수중

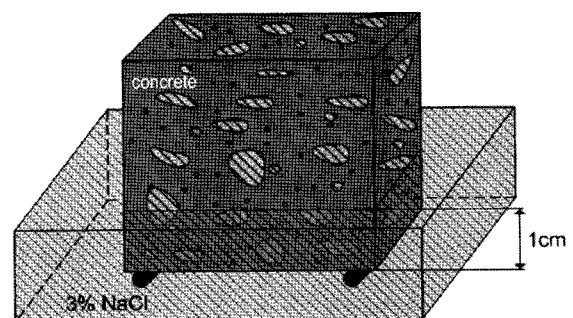


Fig. 2 Concrete specimens with coatings immersed in NaCl solution

융해 방법으로 실험을 실시하였다. -18°C 에서 4°C 까지를 1 cycle로 하여 시험을 실시하였고 매 30 cycle씩 동탄성계수를 측정하였다. 측정한 값은 동결융해 작용을 받은 콘크리트와 동결융해 작용을 받기 전의 콘크리트의 상대동탄성계수에 대한 소정의 cycle에서의 상대동탄성계수를 다음의 식 (1)과 같이 상대동탄성계수로 비교하였다.

$$E_d = \left(\frac{n_1}{n} \right)^2 \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서,

E_d = c 사이클에서 콘크리트의 상대동탄성계수 (%)

n_1 = c 사이클의 동결융해작용을 받은 콘크리트의 공명진동수 (Hz)

n = 동결융해작용을 받기 전 콘크리트의 공명진동수 (Hz)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 부착력

3.1.1 건조상태 부착강도 시험

건조상태의 부착강도 측정 결과 Fig. 3에서 알 수 있듯이 분말형 도료인 ES의 경우 약 2.0 MPa로 다른 도장재료에 비해 낮은 부착력을 보였으나 KS F 4936에서 정하고 있는 기준인 1.0 MPa는 초과하는 값이 측정되었다. ES를 제외한 모든 재료에서 28일 경과 후 모두 3.0 MPa 이상의 값을 나타내어 우수한 부착력을 보였다.

탈락의 형태를 각각 모체파괴 (indicates the fracture in the substrate)와 계면탈락 (indicates the fracture in the interface)으로 구분한 것이 Fig. 4이며 SC, HB의 경우 모든 측정에서 모체와의 일체된 결합으로 모체가 파괴되는 현상을 보여 더 이상의 강도를 측정할 수 없었으나 EC의 경우 3.5 MPa로서 측정값은 우수하였으나 모체와의 계면에서 탈락이 일어남을 보였다. 이와 같은 결과를 통해 SC와

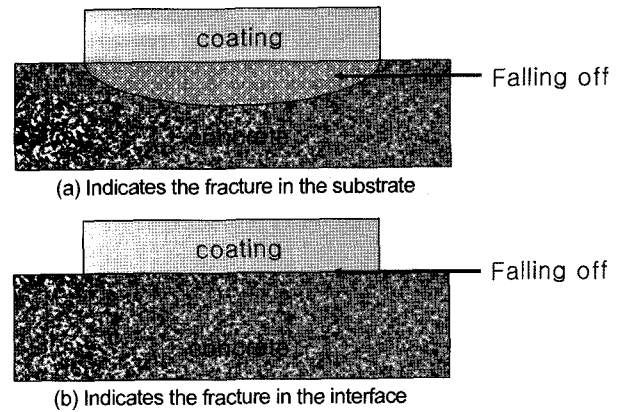


Fig. 4 Fracture mode in tensile adhesion

HB가 가장 우수한 부착력을 보였는데 SC의 경우 폴리우레탄 수지의 강한 부착 특성에 의한 결과로 판단되며 HB의 경우 가수분해와 중축합반응을 통하여 무기질계 세라믹 구조를 형성한 나노합성 세라믹이 콘크리트 내의 C-A-S (calcium silicate aluminate)나 C-S-H (calcium silicate hydrate)와 같은 수화물과의 수소결합을 통해 콘크리트 표면과 일체화 되어 콘크리트 표면 도장재로서 좋은 부착 성능을 보이는 것으로 사료된다¹¹⁾.

3.1.2 습윤상태 부착강도 시험

콘크리트 표면 도장재의 습윤 부착강도 측정 결과 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 ES의 경우 건조상태에서와 같이 가장 작은 부착강도 값을 나타내었다. 그러나 건조상태에서 좋은 부착력을 보였던 SC의 경우 유기계 도장재의 밀폐도막 특성상 흡수된 수분의 영향을 받아 부착강도의 감소폭이 큰 것을 알 수 있었다¹⁰⁾. 또한 EC의 경우에도 부착력 저하가 크게 나타났는데 이는 흡수된 수분에 의해 도막의 표면이 연화되는 현상에 의한 것으로 판단된다. 이 중 HB가 습윤상태의 부착에서 우수한 부착력을 보였는데 이는 통기성 도막의 특성으로 내부의 수분이 잘

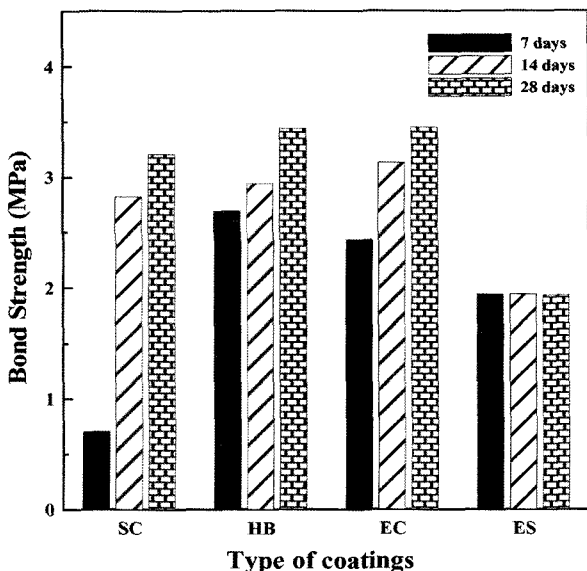


Fig. 3 Bond strength of concrete with coating (dry condition)

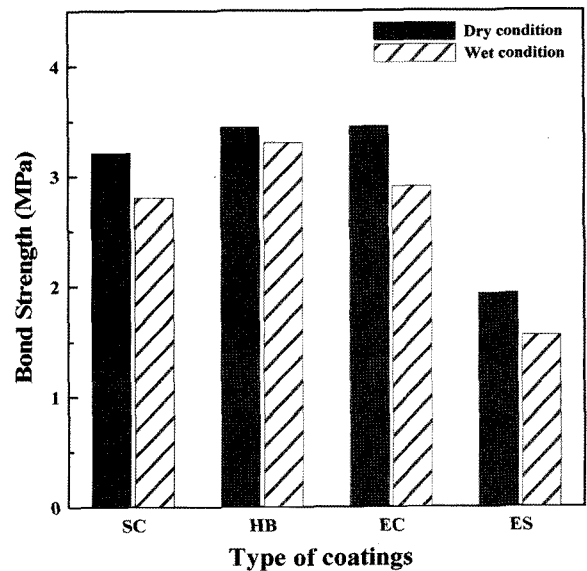


Fig. 5 Bond strength of concrete with coating (wet condition)

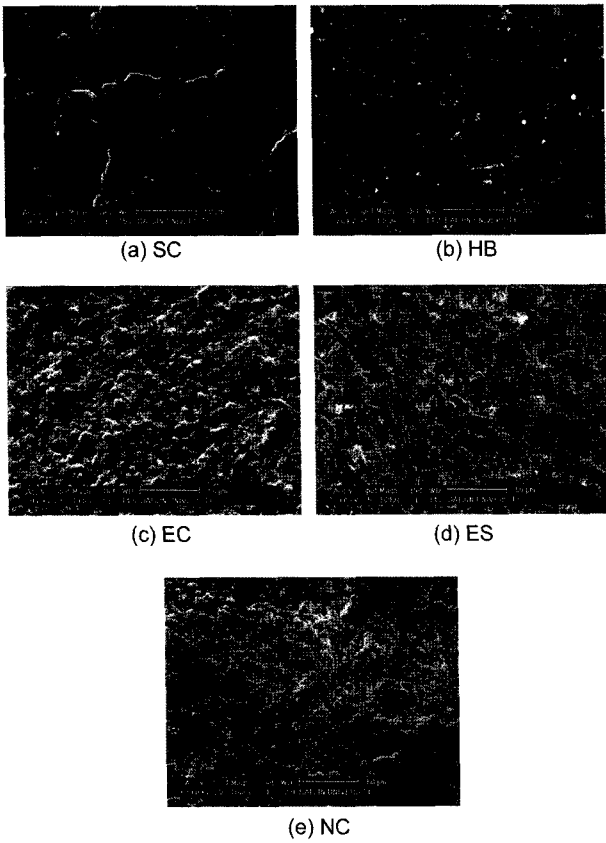


Fig. 6 SEM image of coatings and concrete surface (x1,000)

배출되었기 때문에 판단되며^{9,11)} 건조상태의 부착력과 유사한 부착력을 보여 현장 조건에 따른 적응력이 우수할 것으로 사료된다.

3.2 공극 구조 관찰

각 도장재로 도장을 실시한 시험체와 도장을 하지 않은 콘크리트의 표면을 주사형 전자현미경 (SEM)을 이용하여 1,000배 확대하여 촬영한 사진이 Fig. 6이고 수은 압입법 (MIP)을 적용하여 미세공극을 측정된 결과가 Fig. 7이다.

SEM 및 MIP 분석 결과 도장하지 않은 콘크리트 (NC)의 경우 큰 공극이 많이 분포하여 수분 및 유해이온의 침투가 용이할 것으로 판단된다. 또한 ES와 EC의 경우 콘크리트의 공극을 제대로 메우지 못하여 NC와 거의 유사하거나 큰 공극들이 많이 보이고 있다. 이러한 경우 도장재가 치밀한 구조를 형성하지 못하여 생성된 공극 사이로 염소이온 및 이산화탄소 등의 물질이 침투되어 콘크리트 구조물을 효과적으로 보호할 수 없어 콘크리트의 열화를 초래할 것으로 판단된다.

SC 및 HB의 경우 NC와 비교하여 치밀한 공극 구조를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경우 콘크리트 표면으로부터 침투하는 수분 및 유해이온의 침투가 어려워 열화물질의 효과적인 차단을 가져올 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 SC의 경우 Fig. 6의 (a)와 Fig. 7의 (a)에서 알 수 있듯이 공극이 거의 존재하지 않는 밀폐도막의 형성으로 콘크리트 내부의 수분이 빠져나갈 수 없어 내부 증기압에 의한 부풀음 및 탈락의 우려가 있을 것으로 판단된다. HB의 경우 Fig. 6의 (b)와 Fig. 7의 (b)에 나타난 것과 같이 미세 공극 구조를 가져 내부의 수분은 빠지고 외부의 수분은 침투할 수 없는 통기성 도막의 형성이 가능할 것으로 판단된다^{10,11)}.

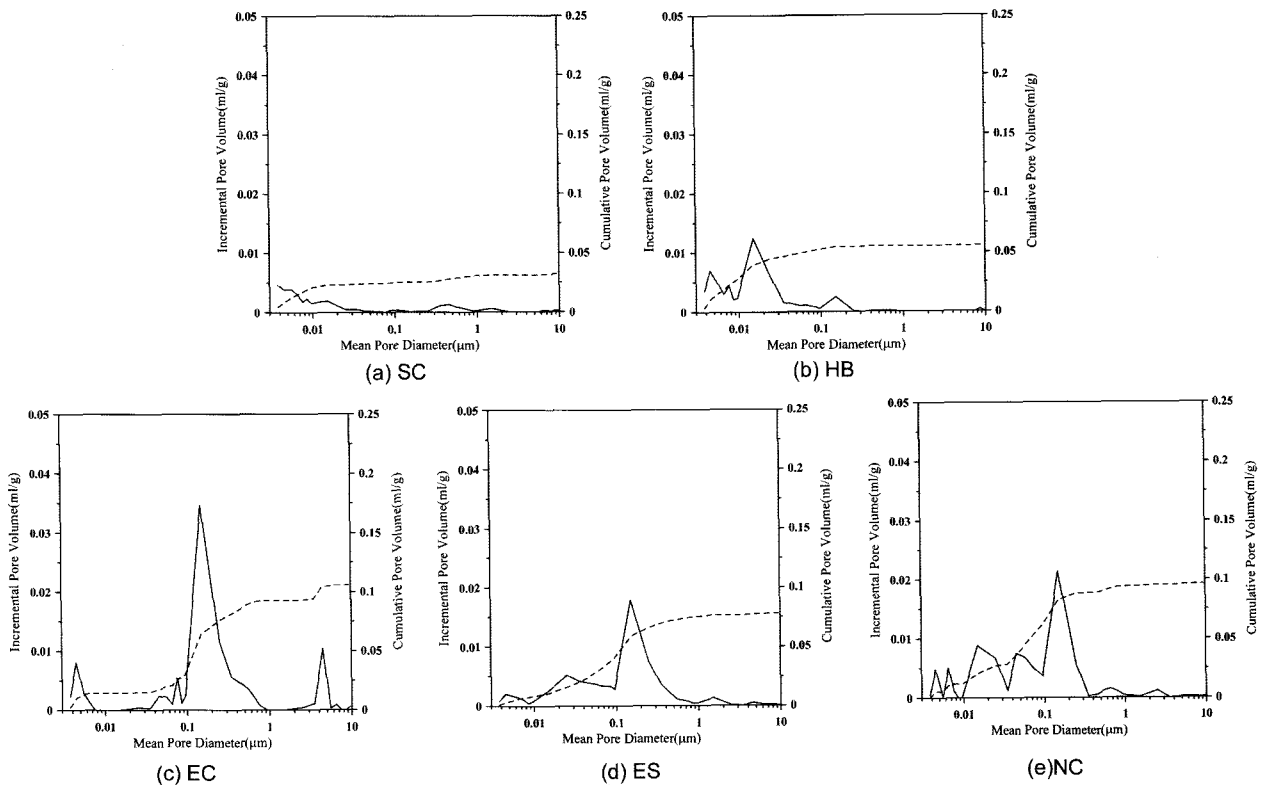


Fig. 7 Capillary pore size distribution of coatings

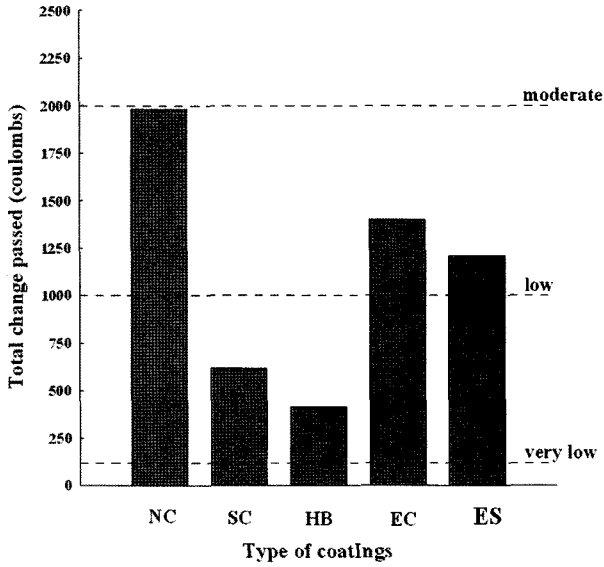


Fig. 8 Total charge passed of coatings

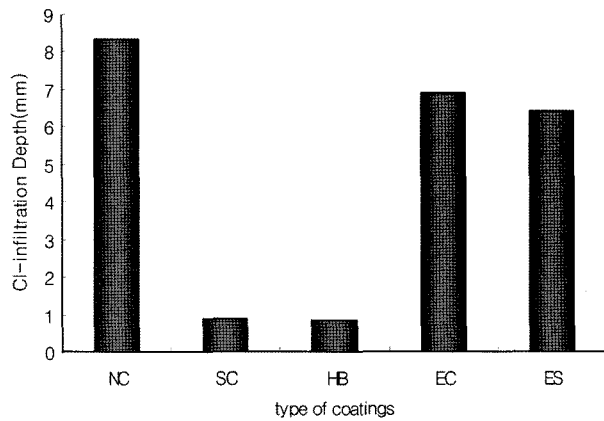


Fig. 9 Cl⁻ infiltration depth of coatings

3.3 염소이온 침투 저항성

Fig. 8에 각 도장재를 도포한 콘크리트의 총 통과전하량을 나타내었으며 Fig. 9에 염소이온 침투 깊이를 나타내었다.

시험 결과 EC와 ES의 경우 기준에 비추어 봤을 때 통과전하량이 보통 정도를 나타내고 있으나 염소이온의 침투 깊이가 커서 도장하지 않은 콘크리트 (NC) 공시체와 비교해서 약간의 침투 저항성 밖에 나타내지 못함을 알 수 있다.

ASTM C 1202의 기준으로 평가하였을 때 HB 및 SC의 경우 통과전하량이 413.64~619.20 coulomb으로 양호한 결과를 보였으며 염소이온의 침투 깊이에서도 1 mm 미만의 값을 보였다. 이러한 결과를 통해 HB 및 SC의 경우 염화물의 침투에 대한 저항성이 우수하여 염화물로부터 콘크리트를 보호하기에 적합한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과가 나타난 것은 HB 및 SC의 경우 콘크리트 표면에 치밀한 막을 형성하여 염소이온의 침투를 막아주었기 때문으로 사료된다.

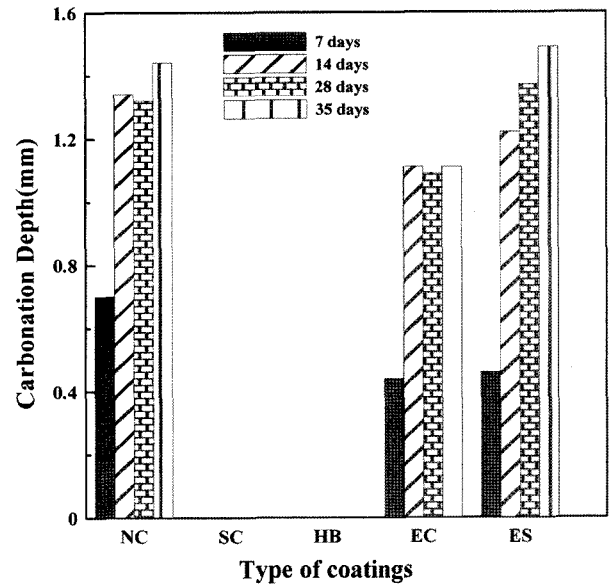


Fig. 10 Carbonation depth of coatings

3.4 탄산화에 대한 저항성

탄산화 촉진 시험 결과 Fig. 10에서 알 수 있듯이 ES와 EC의 경우는 초기에는 탄산화에 대한 저항성이 있으나 시간이 경과함에 따라 탄산화가 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 특히 ES의 경우 4주, 5주 후부터는 NC와 같은 탄산화 정도를 나타내어 탄산화에 대한 저항성이 없음을 알 수 있었고 EC의 경우 NC에 비하여 70% 정도의 탄산화 정도를 나타내어 약간의 탄산화 저항성을 가지고 있으나 미비한 정도임을 알 수 있다.

SC 및 HB의 경우 초기부터 5주까지 탄산화가 거의 진행되지 않는 우수한 저항성을 보여주었다. SC 및 HB가 탄산화에 대한 저항성이 우수한 것은 콘크리트 표면에 형성된 도막이 이산화탄소가 침투할 수 없는 치밀한 구조를 가지고 있기 때문으로 판단된다.

3.5 내알칼리성

포화 Ca(OH)₂ 용액에 15일간 침지시켜 콘크리트 표면 도장재의 변화를 관찰한 결과 도막의 부풀음, 벗겨짐, 구멍의 발생, 색상 변화 등이 관찰되지 않았다.

내알칼리 시험 후 부착력의 저하 정도를 판단하기 위해 부착강도를 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 SC, EC의 경우 건조상태의 부착력 비해 다소 저하된 부착강도가 측정되었으나 2.5 MPa 이상의 부착력을 보여 대체로 양호한 것으로 판단되며 ES의 경우 건조상태의 부착력이 낮아 내알칼리 시험 후의 부착강도에서도 2.0 MPa 이하의 부착력을 보였다. HB의 경우 건조상태의 부착력과 유사한 3.0 MPa 이상의 부착강도가 측정되어 알칼리 환경에서도 우수한 부착력을 나타내었다.

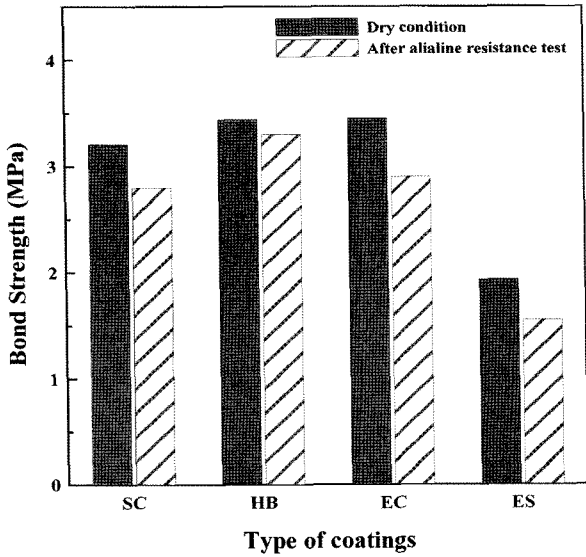


Fig. 11 Bond strength of coatings (after alkaline resistance test)

3.6 내염수성

해수와 유사한 농도인 염화나트륨 (NaCl) 용액 (3 wt%) 을 사용하여 15일간 침지시켜 콘크리트 표면 도장재의 변화를 관찰한 결과 도막의 부풀음, 벗겨짐, 구멍의 발생, 색상 변화 등이 관찰되지 않았다.

내염수성 시험 후 부착력의 저하 정도를 판단하기 위해 부착강도를 측정된 결과 Fig. 12에 나타난 것과 같이 SC, EC의 경우 건조상태의 부착력 비해 다소 저하된 부착강도가 측정되었으나 2.5 MPa 이상의 부착력을 보여 대체로 양호한 것으로 판단되며 ES의 경우 건조상태의 부착력이 낮아 내염수성 시험 후의 부착강도에서도 2.0 MPa 이하의 부착력을 보였다. HB의 경우 건조상태의 부착력과 유사한 3.0 MPa 이상의 부착강도가 측정되어 염해환경에서도 우수한 부착력을 보였다.

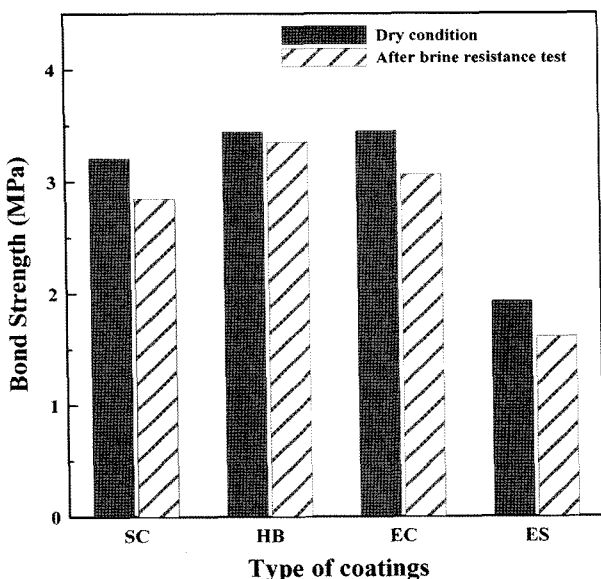


Fig. 12 Bond strength of coatings (after brine resistance test)

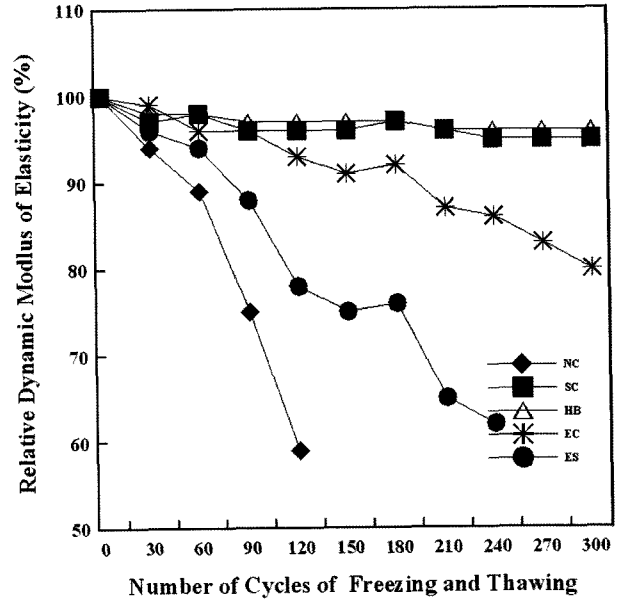


Fig. 13 Resistance to freezing-thawing of coatings

3.7 동결융해에 대한 저항성

동결융해 작용을 받은 콘크리트 표면 도장재의 동결융해에 대한 저항성을 평가하기 위하여 동결융해 반복 30 cycle 마다 동탄성계수를 측정된 후 상대동탄성계수비로 나타낸 것이 Fig. 13이다. 도장을 하지 않은 콘크리트 (NC)의 경우 120 cycle에서 상대동탄성계수비가 60% 이하로 측정되었으며 ES의 경우 240 cycle에서 상대동탄성계수비가 60% 정도로 측정된 것에 비해 EC, SC, HB의 경우 시험 종료 시점인 300 cycle까지 상대동탄성계수비가 80% 이상을 유지하였다. 특히 HB 및 SC의 경우 상대동탄성계수비가 90% 이상 유지되어 동결융해에 대한 저항성이 우수한 것으로 판단된다. 이는 밀실한 도막의 형성으로 동결융해가 진행되는 동안 물의 침투를 억제하였기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 휘발성 유기화합물 (VOC)을 사용하지 않는 나노 합성 세라믹계 도장재를 사용한 콘크리트의 내구성능 평가를 위한 연구로서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 부착성능 측정 결과 ES를 제외한 모든 도장재료의 28일 부착강도가 2.5 MPa 이상의 값이 측정되었다. 특히 HB 및 SC의 경우 3.0 MPa 이상의 값으로 모체탈락의 형상을 나타내어 부착력이 매우 우수하였다. SC의 경우 건조상태의 부착력은 우수하였으나 습윤 부착에서 큰 부착력 저하를 나타내었는데 이는 통기성이 없는 밀폐도막으로 인한 내부 수분에 의한 영향으로 판단된다.
- 2) SEM 및 MIP 분석 결과를 통해 나노합성 세라믹

도장재 (HB)가 EC 및 ES의 보다 치밀하고 SC보다 통기성 있는 공극구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 도막의 특성으로 인해 외부에서 침투하는 이산화탄소 및 염소이온은 차단하고 내부의 수분은 배출할 수 있는 구조를 가지고 있어 콘크리트 표면 도장재로 적절한 것으로 판단된다.

- 3) 내알칼리성 및 내염수성 시험 결과 각각의 용액에 침지된 시험체를 육안 관찰을 통해 피막의 부풀음, 탈락유무, 변색유무 등을 판단하였으나 모든 도장재료가 이상이 없는 것으로 나타났다. 또한 내알칼리성 시험 및 내염수성 시험 후 부착강도에서 HB가 가장 우수한 결과를 나타내었다.
- 4) 동결융해에 대한 저항성 평가 결과 HB 및 SC의 경우 300 cycle까지 90%이상의 상대동탄성계수가 측정되어 동결융해에 대한 저항성이 우수한 결과를 보였고, ES의 경우 300 cycle 이전에 60% 미만의 상대동탄성계수를 보여 동결융해에 대한 저항성이 떨어지는 결과를 보였다.
- 5) 이상의 결과를 통해 나노합성 세라믹 도장재 (HB)의 경우 콘크리트 보호용 재료로서 갖추어야 할 요건을 충족시키는 것으로 판단된다. 그러나 EC의 경우 환경적으로는 우수한 재료이나 성능 시험 결과 콘크리트 보호용 도장재로는 적합하지 않으며 SC의 경우 유기용제를 사용함으로써 작업자의 안전 및 환경문제를 유발할 수 있으며 폐쇄도막의 특성을 가지고 있어 장기적으로 도막의 부착력 및 내구성 저하 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김성수, 해양환경하에 방치한 콘크리트의 열화 및 철근 부식 방식에 대한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, 1994,

175pp.

2. 김인섭, 이종규, 추용식, 김태현, 심광보, “무기질 도료 및 표면처리 시스템을 적용한 시멘트 모르타르와 콘크리트의 내구성 평가”, 콘크리트학회 논문집, 15권, 4호, 2003, pp.522~528.
3. 김성수, 콘크리트 보호용 코팅제의 성능 평가, 도시철도공사, 2001, pp.3~6.
4. 유성원, 고성능 표면 침투제가 도포된 콘크리트 특성 평가, 석사학위논문, 우석대학교, 2005, 73pp.
5. 이태희, 표면피복재 종류에 따른 철근콘크리트의 염해 억제 성능에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 충남대학교, 2002, 76pp.
6. 김성우, 내마모성 박막 코팅제용 실리카/에폭시 하이브리드 물질의 제조 및 특성, 석사학위논문, 경기대학교, 2004, 87pp.
7. Bazant, Z. P. and Jennings, H. M., “Moisture Diffusion in Cementitious Materials : Adsorption Isotherm”, *Journal of Advanced Cement Based Materials*, Vol.1, 1994, pp.248~257.
8. Batis, G., Pantazopoulou P., and Routoulas, A., “Corrosion Protection Investigation of Reinforcement by Inorganic Coating in the Presence of Alkanolamine- Based Inhibitor”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.25, Issue3, 2003, pp.371~377.
9. Pogrebniak, A. D., Kravchenko, Yu. A., Kislitsyn, S. B., Ruzimov, Sh. M., Noli, F., Misaelides, P., and Hatzidimitriou, A., “TiN/Cr/Al₂O₃ and TiN/Al₂O₃ Hybrid Coatings Structure Features and Properties Resulting from Combined Treatment”, *Surface and Coatings Technology*, Vol.201, Issue6, 2006, pp.2621~2632.
10. Ibrahim, M., Al-Gahtani, A S., Maslehuddin, M., and Dakhil, F. H., “Use of Surface Treatment Materials to Improve Concrete Durability”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1999, pp.36~40.
11. Andrade, C., “Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements”, *Cement and Concrete Research*, Vol.23, No.5, 1993, pp.724~728.

요약 본 연구에서는 환경에 유해한 휘발성 유기화합물 (VOC)을 사용하지 않은 나노합성 세라믹 도장재를 도포한 콘크리트의 내구성 증진 효과를 평가하기 위하여 건조상태 부착강도 실험, 습윤상태 부착강도 실험, SEM 촬영, MIP 분석, 탄산화 촉진 실험, 전기적 촉진법에 의한 염소이온 확산실험, 동결융해에 대한 저항성, 내알칼리 실험 및 내염수성 실험을 실시하여 기존의 표면처리제와 비교·평가하였다. 부착강도 측정 결과 나노합성 세라믹 도장재가 건조상태 및 습윤상태에서 가장 이상적인 결과를 나타내었는데 이는 가수분해와 중축합반응을 통하여 무기질계 세라믹 구조를 형성한 나노합성 세라믹이 콘크리트 내의 C-A-S (calcium silicate aluminate)나 C-S-H (calcium silicate hydrate)와 같은 수화물과의 수소결합을 통해 콘크리트 표면과 일체화 되어 나타난 결과로 판단된다. 또한 SEM 및 MIP 분석의 결과를 통해 미세한 공극을 가진 표면 조직을 보여주었다. 그리고 탄산화 및 염소이온 확산 실험과 동결융해 저항성에서 기존의 유기도장재를 능가하는 결과를 보였으며 내알칼리성 및 내염수성 실험에서도 좋은 성능을 나타내었다. 이상의 결과를 통해 기존의 휘발성 유기화합물을 사용하는 유기도장재의 대안으로써 해안 구조물, 하수 처리장 등 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 나노합성 세라믹 도장재의 사용이 기대된다.

핵심용어 : 나노합성 세라믹, 휘발성 유기화합물, 부착강도, 탄산화, 염소이온 확산