

바탕모르타르 균열부의 탄산화에 미치는 표면마감재의 CO₂ 투과성능의 영향

Effect of CO₂ Permeability of Building Coating Materials on Carbonation of Mortar Substrate Cracked Zone

미야우치 히로유키* 구 경 모** 최 경 철***
Miyachi Hiroyuki Koo, Kyung-Mo Choe, Gyeong-Choel
김 규 용**** 박 연 진***** 신 경 수**
Kim, Gyu-Yong Park, Yeun-Jin Shin, Kyoung-Su

Abstract

The purpose of this study is to investigate the carbonation resistance of building coating materials applied to the mortar or concrete substrate including their cracked zone. The testing parameters for this experiment were the three crack widths in the substrate including non-crack, and two types of the coating materials .

As results, the coating materials have good carbonation resistance against CO₂ penetration into mortar substrate even in cracked zone of substrate. Furthermore, the carbonation resistance of coating material was calculated by using their CO₂ permeability coefficient and discussed from viewpoint of durability design.

키워드 : 모르타르 균열부, 탄산화, 표면마감재, CO₂ 투과계수

Keywords : Cracked Zone of Mortar, Carbonation, Building Coating Materials, CO₂ Permeability Coefficient

1. 서 론

콘크리트의 탄산화는 표면으로부터 대기 중의 탄산가스가 침투·확산되어 발생하는 것으로, 철근의 부식과 콘크리트 균열과 관련하여 내구성 저하에 영향을 크게 미친다. 이에 많은 연구자들이 콘크리트의 탄산화를 억제하기 위한 대책으로서 다양한 공법과 재료를 연구·개발하고 있으며, 이 중 표면마감도료나 방수재료의 도포는 매우 유효한 것으로 보고되고 있다¹⁾.

한편, 『콘크리트 표준시방서』²⁾에서는 “탄산화에 관한 내구성 평가”로서 피복두께까지의 탄산화 한계깊이에 대해 환경계수 등을 고려한 안전계수를 제시하고 있지만, 초기재령에 있어 콘크리트의 재료특성, 또는 시공 상에서 발생하는 균열에 대해서는 안전율을 고려하고 있지 않다.

이는 내구성 평가의 일반사항으로서 콘크리트의 배합

설계단계 및 시공단계에서 균열이 제어된다는 것을 전제로 하고 있기 때문이다. 그러나 철근콘크리트 구조물에서 균열을 완전하게 제어하는 것은 매우 어려우며, 기존 연구에 의하면 발생된 균열은 탄산화의 진행에 영향을 미

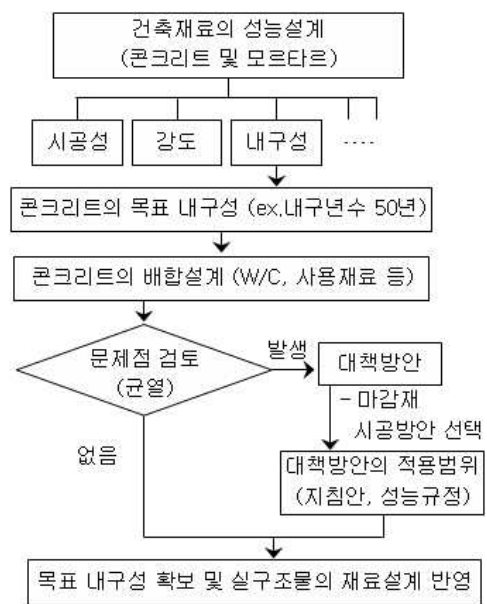


그림 1. 콘크리트 및 모르타르의 균열을 고려한 내구성 설계 프로세스

* 충남대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
** 충남대학교 대학원 건축공학과 박사과정
*** 충남대학교 대학원 건축공학과 석사과정
**** 충남대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
***** 충남대학교 대학원 건축공학과 박사과정

(교신저자, E-mail : parkyj88@naver.com)

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2009-0069919)이며, 연구자의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받은 바, 이에 감사드립니다.

표 1. 실험계획

실험요인				표면마감재의 종류	측정항목
모르타르 시험체					
W/C (%)	시험체 치수 (mm)	균열폭 (mm)			
61	φ100×100	1) 0.0 3) 0.5mm이하	2) 0.3mm이하 4) 1.0mm이하	1) 무도포 (Plain) 2) 우레탄계 (도포두께 2mm) 3) 아크릴계 (도포두께 2mm)	1) 모르타르의 탄산화 (mm) - 탄산화 깊이 - 탄산화 너비 2) 표면마감재의 CO ₂ 투과계수

표 2. 모르타르 배합

W/C (%)	C ¹⁾ : S ²⁾	Unit weight (kg/m ³)		
		W	C	S
61	1 : 3	293	481	1444

1) C : 시멘트 2) S : 잔골재

표 3. 사용재료의 물리적 성질

사용재료	물리적 성질	
시멘트	<ul style="list-style-type: none"> 보통 포틀랜드시멘트 밀도: 3.15g/cm³ 분말도: 3,770cm²/g 	
잔골재	<ul style="list-style-type: none"> 해사 최대크기: 5mm 조립율: 3.05 밀도: 2.54g/cm³ 흡수율: 1.01 	
표면 마감재	우레탄계	<ul style="list-style-type: none"> 인장강도 4.3N/mm² 신장율 550%
	아크릴계	<ul style="list-style-type: none"> 인장강도 2.5N/mm² 신장율 300%

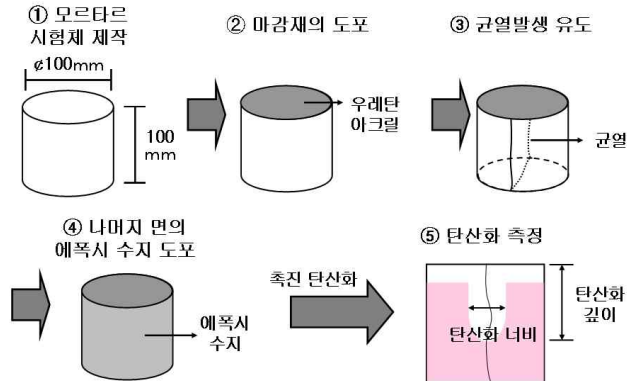


그림 2. 시험체의 제작 및 탄산화 평가 방법의 개념도



그림 3. 모르타르 시험체의 균열발생 유도

칠 가능성이 있고, 이에 균열을 고려한 탄산화 평가수법의 확립이 필요하다고 보고^{3)~5)}되고 있다.

이에 본 연구에서는 그림 1과 같이 콘크리트 및 모르타르의 균열을 고려한 내구성능 설계프로세스에 입각하여, 모르타르의 균열부에 대한 탄산화의 억제대책으로서 표면마감재의 요구성능을 정량적으로 제시하고자 하였다.

여기에서 표면마감재가 도포된 모르타르에 균열이 발생하면 마감재는 국부적으로 얇게되고, 탄산가스에 대한 차단능력이 저하된다. 이에 CO₂가스의 투과성능으로서 표면마감재의 CO₂투과계수 평가방법을 제시하고, 모르타르 균열부의 탄산화와 표면마감재의 CO₂투과계수와와의 상관성을 정량적으로 제시함으로써 모르타르 균열부에 대한 내구성 확보방안의 기초적 데이터를 구축하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

표 1은 모르타르의 균열 폭 및 표면마감재의 CO₂투과성능에 따른 모르타르의 탄산화를 평가하기 위한 실험계획이다. 본 연구에서는 탄산화에 대한 굵은 골재의 영향을 배제하기 위해 물시멘트비 61%의 모르타르를 대상으로, 시험체의 치수는 φ100×100mm로 설정하였다. 모르타르의 탄산화의 영향요인으로서 판통균열의 폭을 0.0, 0.3, 0.5 및 1.0mm이하로 설정하고, 탄산화의 억제성능 평가를 위해 표면마감재를 우레탄 및 아크릴계 도막으로 선정하였으며,

이에 대한 비교대상으로서 무도포 시험체(Plain)를 제작하였다. 여기에서 시험체의 균열은 유압식 압축 시험기를 이용하여 재하할 때에 크랙 스케일로 균열폭을 측정하면서 폭을 조절하였다.

또한 모르타르의 탄산화 측정은 건전부 및 균열부의 탄산화 깊이 뿐 아니라, 균열부에 대한 너비방향으로서의 탄산화 측정을 실시하였다.

한편 표면마감재가 도포된 모르타르에 균열이 발생하면, 인장에 의해 국부적으로 마감재의 두께가 얇아지고, CO₂투과계수가 커지게 된다. 이에 본 연구에서는 모르타르 균열부에 있어 우레탄 및 아크릴계 도막 두께변화에 따른 CO₂투과계수를 평가하고, 모르타르의 탄산화 속도계수와 비교·분석하고자 하였다.

2.2 콘크리트 배합 및 사용재료

표 2 및 표 3은 바탕모르타르의 배합과 사용재료의 종류 및 특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 표면마감재는 우레탄 및 아크릴계 도막으로서, 두께 2mm를 기준으로 모르타르 표면에 적용하였다.

2.3 시험체 제작 및 시험방법

본 연구에서 사용한 모르타르 시험체는 제작 후 재령 4



그림 4. CO₂ 투과시험기



그림 5. CO₂ 센서

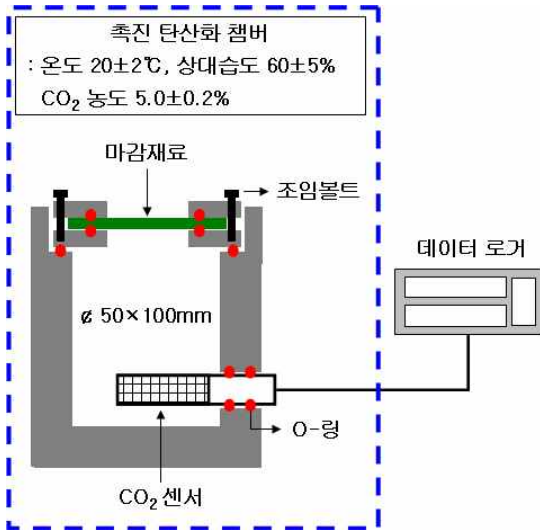


그림 6. CO₂ 투과시험 모식도

주까지 수중양생을 실시한 후, 재령 8주까지 상대습도 60±5%, 온도 20±2℃의 항온항습실에서 정치하였다. 양생이 완료된 모르타르 시험체는 그림 2와 같이 상단에 표면마감재를 도포한 후, 그림 3과 같은 목표 균열폭을 유도하였으며, 마감재가 도포되지 않은 면에 대해서는 에폭시 수지의 도포 및 알루미늄테이프를 이용하여 밀봉을 실시하였다.

모르타르의 탄산화 평가는 KS F 2584 및 KS F 2596에 준하여 실시하였다. 여기에서 모르타르 균열부의 탄산화에 따른 내구성 저하의 영향은 균열을 중심으로 깊이 방향 뿐만 아니라, 너비방향으로도 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 일반 건축구조물의 피복두께를 고려하여 표면으로부터 3cm 지점에 대해 균열의 너비방향에 대한 탄산화 깊이(탄산화 너비)를 측정하였으며, 모르타르 건전부 및 균열부에 대한 탄산화 속도계수를 다음 식 (1)에 준하여 도출하였다.

$$x = A\sqrt{t} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, x : 탄산화 깊이 및 너비 (mm)
 A : 탄산화 깊이 및 너비 속도계수 (mm/day^{0.5})
 t : 재령 (day)

한편, 기체의 투과계수의 평가방법은 확립되어 있지 않으며, 이에 대한 다양한 평가방법이 제안되고 있다. 본 연

구에서는 표면마감재를 도포한 모르타르 시험체의 탄산화 평가방법과 유사한 조건을 만족시키기 위해, 그림 4 및 그림 5의 CO₂투과장치 및 CO₂센서를 활용하여, 그림 6과 같이 상대습도60±5%, 온도 20±2℃, CO₂농도 5.0±0.2%의 탄산화 챔버에서 8주간 CO₂투과시험기 내부의 CO₂농도를 평가하였다.

여기에서 CO₂기체의 투과도는 평가시험체의 크기, 마감재의 면적, 챔버의 CO₂농도 등에 영향을 받는다. 이에 본 연구에서는 평가조건을 고려한 식 (2)에 준하여 CO₂투과계수를 도출하였다.

$$P = \frac{Q \times T_m \times V_s}{(C_q - Q) \times A \times t} \quad \text{식 (2)}$$

여기서, P : CO₂ 투과계수 (mm²/day)
 Q : CO₂ 투과농도 (%)
 T_m : 표면마감재료의 두께 (mm)
 V_s : 투과시험기 내부 용적 (mm³)
 C_q : 탄산화 챔버의 CO₂ 농도 (%)
 A : 표면마감재료의 면적 (mm²)
 t : 재령 (day)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열폭 및 표면마감재도포에 따른 모르타르의 탄산화

표 4는 모르타르 균열폭 0.3mm에 대한 표면마감재의 종류에 따른 탄산화 측정결과를 나타낸 것이다. 육안 관찰 결과 마감재가 도포되지 않은 Plain의 경우, 균열을 중심으로 V자 형태로 탄산화가 진행되었으며, 동시에 건전부에서

표 4. 모르타르 균열부의 탄산화 평가결과 (균열폭 0.3mm)

구 분	탄산화 측정재령 (week)		
	1	4	8
Plain			
우레탄계			
아크릴계			

도 탄산화가 급속하게 나타났다. 그러나 표면마감재가 도포된 시험체의 경우, 마감재의 종류 및 균열의 폭에 관계 없이 일정 재령이후부터 균열의 주변에만 탄산화가 진행될 뿐, 균열이 없는 건전부에는 탄산화가 13주까지 진행되지 않았다.

이러한 모르타르의 균열폭 및 표면마감재의 종류에 따른 탄산화 측정결과를 그림 7~9에 나타내었다. 그림 7은 무균열시험체의 표면마감재에 따른 탄산화 측정결과를 나타낸 것으로, 표면마감재가 없는 Plain의 경우, 재령 1주부터 모르타르의 탄산화반응이 시작되어 재령 13주에 있어 표면으로부터 15.8mm까지 탄산화가 진행되었다. 그러나 우레탄 및 아크릴계 도막을 도포한 시험체의 경우, 재령 13주까지 탄산화가 진행되지 않아, 내구성능 저하에 대한 뛰어난 억제성능을 확인하였다.

한편, 그림 8 및 그림 9는 모르타르 균열부에 대한 표면 마감재별 탄산화 깊이 및 너비의 측정결과를 나타낸 것이다. 표면마감재가 도포되지 않은 Plain의 경우, 모르타르

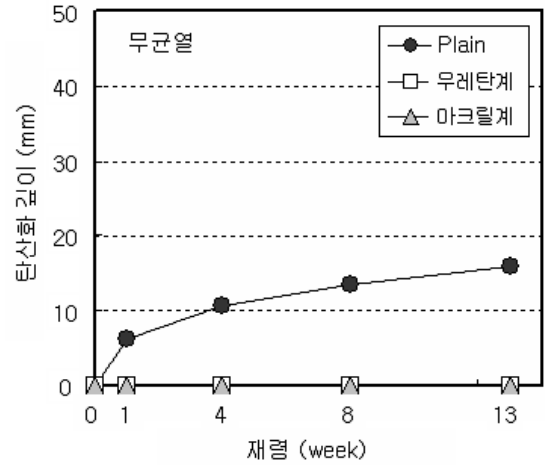


그림 7. 표면마감재에 따른 모르타르 건전부의 탄산화 깊이

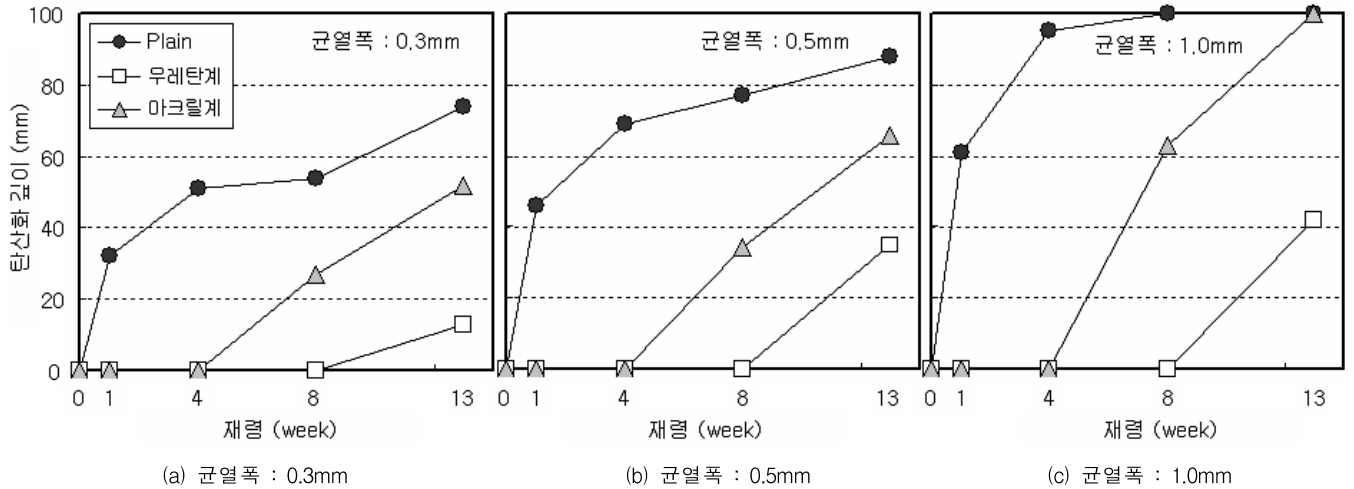


그림 8. 표면마감재에 따른 모르타르 균열부의 탄산화 깊이

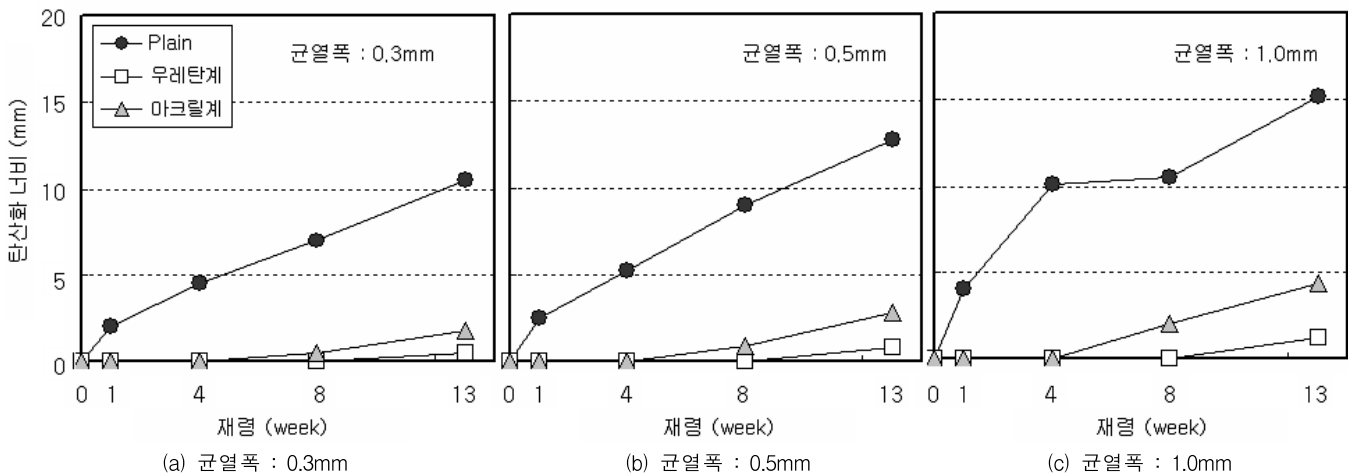


그림 9. 표면마감재에 따른 모르타르 균열부의 탄산화 너비

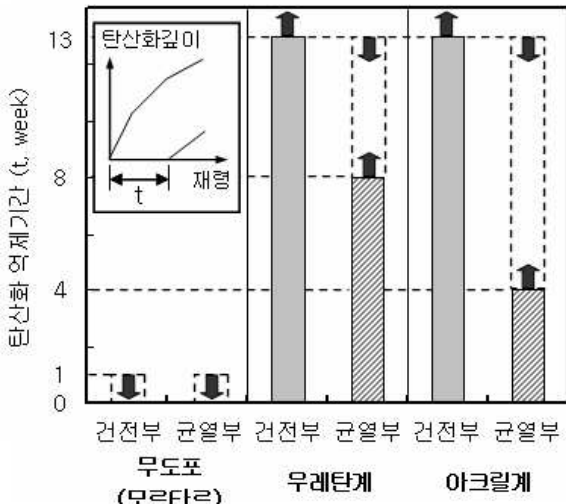


그림 10. 표면마감재에 따른 탄산화 억제기간

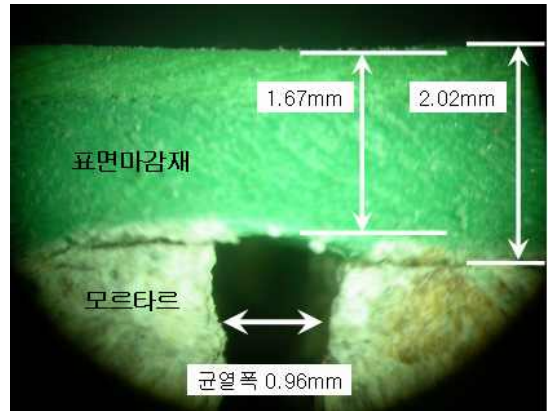
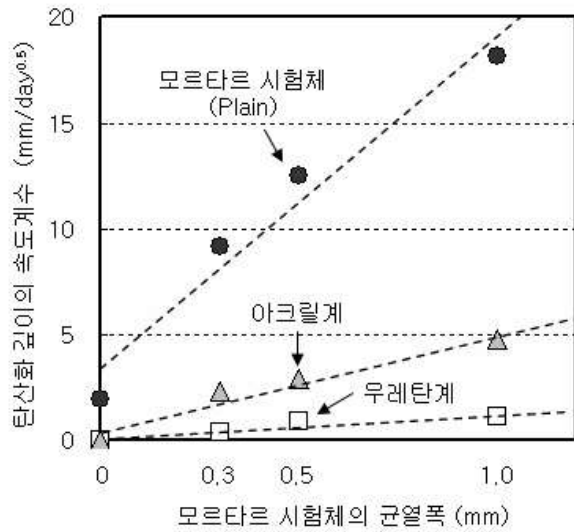
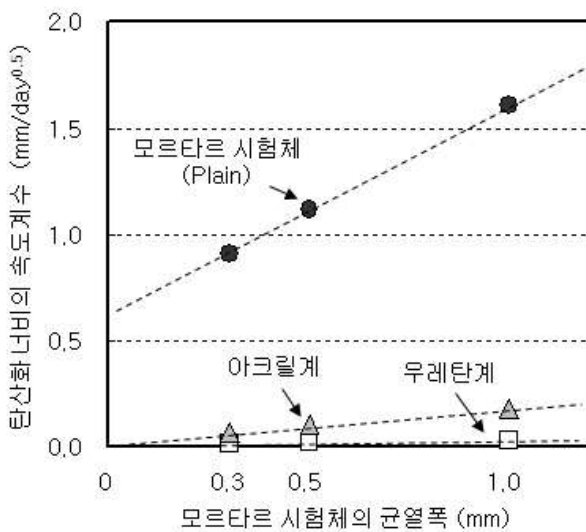


그림 12. 균열발생에 따른 표면마감재의 두께 변화



(a) 탄산화 깊이의 속도계수



(b) 탄산화 깊이의 속도계수

그림 11. 모르타르 균열폭에 따른 탄산화 속도계수

균열부에 대한 탄산화 깊이가 무균열시험체의 결과에 비해 4~9배 크게 나타났고, 이는 균열폭이 커질수록 더 빠르게 진행되었다. 또한 균열부에 대한 우레탄 및 아크릴계 마감재의 탄산화 억제 성능이 확인되었다. 표면마감재가 도포되는 경우 일정기간동안 모르타르 균열부에 대한 100% 탄산화 억제가 가능하였으며, 균열의 내부에서 탄산화가 진행될 지라도 균열너비방향의 탄산화, 즉 탄산화너비의 값이 Plain에 비해 10~25%로 감소되어 균열부에 대한 표면마감재의 탄산화 억제성능을 확인할 수 있었다.

표면마감재의 도포에 따른 탄산화 억제기간은 그림 10에서와 같이 Plain의 경우 탄산화 챔버에 폭포된 직후부터 표면에서의 탄산화가 진행되어 내부로 급격하게 확산된다. 그러나 마감재가 모르타르 표면에 도포되는 경우, 표면마감재에 대한 CO₂분자의 표면흡착, 도막내부로의 용해, 확산 및 외부로의 탈착현상의 과정에 의해 투과 시간이 걸리고, 모르타르와 반응하기 위한 균열내부의 CO₂농도가 초기에는 낮기 때문에 이러한 억제기간이 존재한다고 판단된다. 이는 표면마감재의 종류 및 투과도, 모르타르 균열의 크기 등에 따라 크게 다르며, 본 연구에서는 모르타르 균열부에 대한 탄산화 억제기간이 우레탄계 마감재의 경우 8~13주, 아크릴계 마감재의 경우 4~8주로 나타났다.

그림 11은 모르타르 균열폭 및 표면마감재에 따른 탄산화 깊이 및 너비의 속도계수를 도출한 것이다. 표면마감재에 관계없이 모든 시험체의 탄산화 깊이 및 너비의 속도계수가 모르타르의 균열폭이 증가함에 따라 비례적으로 커지는 경향을 나타내었다. 또한 탄산화 깊이의 속도계수는 Plain에 비하여 우레탄 및 아크릴계 마감재를 도포함에 따라 각각 75~95% 저감되었으며, 이러한 탄산화 저감효과는 탄산화 너비의 속도계수에서도 확인할 수 있었다.

3.2 모르타르 균열부를 고려한 표면마감재의 CO₂ 투과계수

표면의 마감재가 도포된 상태에서 모르타르에 균열이 발생하면 그림 12에서와 같이 모르타르 균열부의 마감재는 인장되어 두께가 감소하고, 이에 따른 CO₂투과성능이 저하하며, 결국 탄산화에 대한 억제성능이 급격하게 저하하게 된다. 이에 본 연구에서는 모르타르 균열부의 탄산화에 영

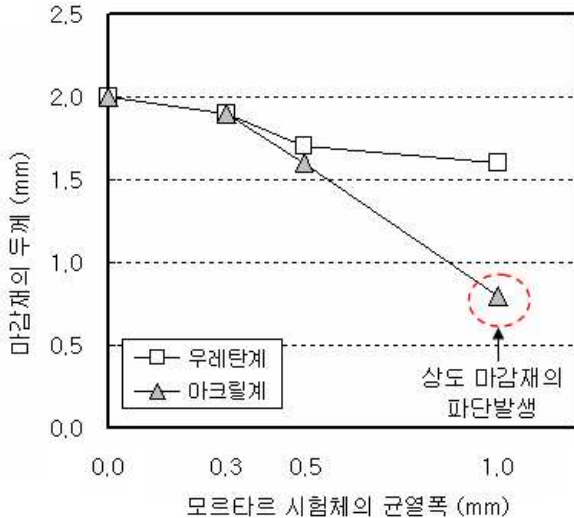


그림 13. 모르타르 시험체의 균열폭에 따른 마감재 두께 측정결과



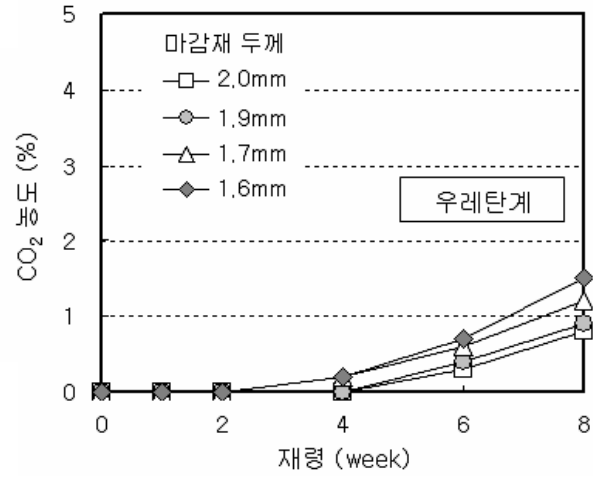
그림 14. 아크릴계 표면마감재에 있어 상부도막층의 파단현상 (모르타르 균열 1.0mm)

향을 미치는 표면마감재의 두께변화에 따라 CO₂투과계수를 도출하고자 하였다.

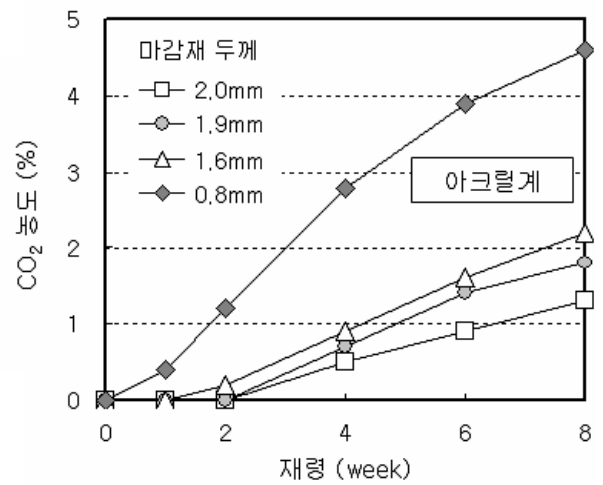
그림 13은 우레탄 및 아크릴계 마감재를 도포한 시험체에 대해 모르타르에 소정의 균열이 발생하였을 때 마감재의 두께변화를 측정하는 것이다. 모르타르의 균열폭이 증가함에 따라 표면마감재의 두께는 서서히 감소하는 경향을 나타내었으며, 특히 아크릴계 마감재를 도포한 모르타르에 1.0mm의 균열이 발생하는 경우 그림 14와 같이 상부도막이층 파단되는 현상이 발생하였다. 이는 그림 7(c)에서 제시된 바와 같이 아크릴계 마감재가 도포된 모르타르 균열 1.0mm 시험체가 다른 시험체에 비해 상대적으로 빠르게 탄산화 깊이를 크게 발생시키는 주된 원인이다.

그림 15는 CO₂ 투과시험에 따른 시험기 내부의 CO₂농도를 나타낸 것이다. 표면마감재의 두께가 얇을수록 시험기 내부의 CO₂농도 증가하고, 우레탄계 마감재에 비해 아크릴계 마감재가 동일한 두께조건에서 1.5~3.0배 빠르게 증가하였다. 또한 상부도막층이 파단된 아크릴계 마감재를 고려하여 하부 도막층 0.8mm에 대해 CO₂투과도를 평가한 결과 다른 마감재의 투과속도와 달리 재령 1주부터 급속하게 투과되었다.

표 5는 측정된 시험기 내부의 CO₂농도에 대해 환산된 CO₂투과계수를 나타낸 것으로, 표면마감재의 두께가 감소함에 따라 CO₂투과계수는 증가하였다. 또한 표면마감재의



(a) 우레탄계 마감재



(b) 아크릴계 마감재

그림 15. 표면마감재의 두께에 따른 투과시험기 내부의 CO₂농도

표 5. 마감재의 두께에 따른 CO₂ 투과계수

균열폭 (mm)	우레탄계		아크릴계	
	마감재의 두께 (mm)	투과계수 (mm ² /day)	마감재의 두께 (mm)	투과계수 (mm ² /day)
0.0	2.0	0.016	2.0	0.049
0.3	1.9	0.019	1.9	0.080
0.5	1.7	0.033	1.6	0.115
1.0	1.6	0.042	0.8	1.185

동일한 두께 조건에서는 우레탄계 마감재의 CO₂투과계수가 아크릴계 마감재의 CO₂투과계수에 비해 약 23~32%의 수준으로 낮게 평가되었다.

한편, 0.8mm 아크릴계 마감재를 제외한 모든 시험체에서 모르타르의 균열부 탄산화 평가결과와 유사하게 일정기간 동안 CO₂ 투과가 완전하게 억제되었다. 이를 그림 15와

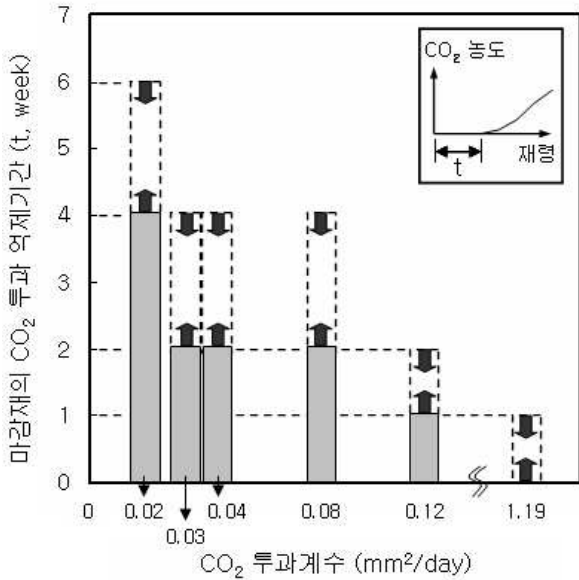


그림 16. CO₂투과계수에 따른 마감재의 CO₂투과 억제기간

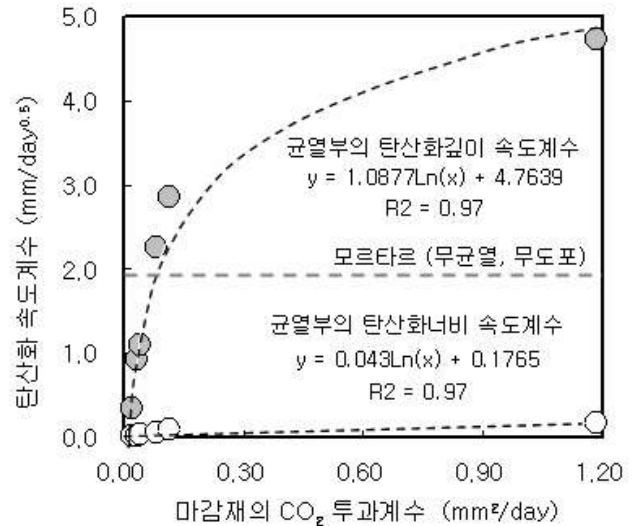


그림 18. 마감재의 CO₂투과계수에 따른 탄산화속도계수

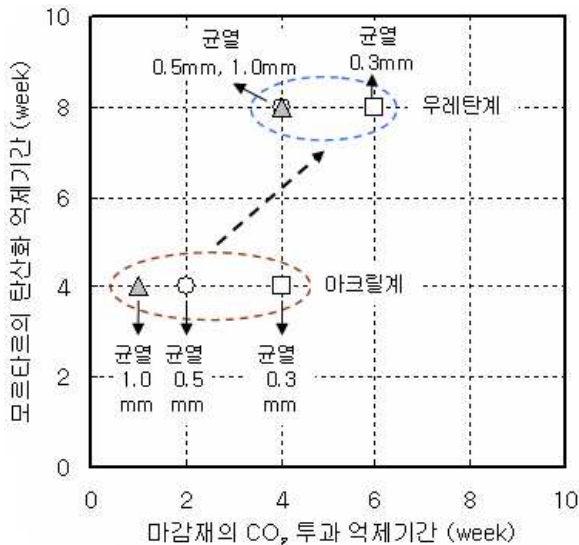


그림 17. 탄산화 억제기간 및 마감재의 CO₂투과 억제기간의 비교

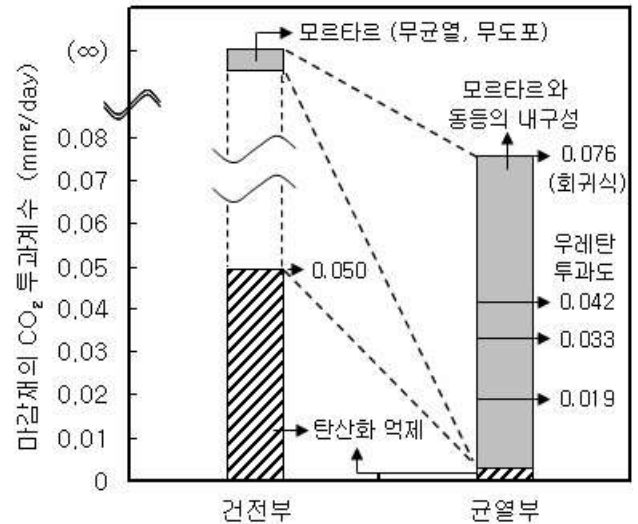


그림 19. 균열부에 대한 모르타르의 제성능 확보를 위한 마감재의 CO₂ 투과계수 확보 범위

같이 CO₂투과계수와 비교하여 나타내었다. 본 연구의 범위에서 CO₂투과계수가 0.02mm²/day 이하인 경우 4주 이상 CO₂투과를 완전하게 억제할 수 있다고 판단되며, 0.12mm²/day 이상의 CO₂투과계수에서는 1~2주 이하의 CO₂투과 억제기간을 갖는다고 판단되었다.

3.3 표면마감재의 CO₂ 투과계수와 균열부 모르타르 탄산화의 상관성

그림 17은 탄산화 억제기간 및 마감재의 CO₂투과 억제기간을 비교한 것이다. 동일한 모르타르의 균열폭에 대해 우레탄계 마감재가 아크릴계 마감재보다 CO₂ 투과 억제에 있어 우수한 것으로 나타났다. 또한 모르타르의 탄산화 억제기간은 균열 내부의 CO₂ 농도 증가 및 탄산화 반응시간에 의해 마감재의 CO₂ 투과 억제기간보다 길게 나타났다.

그림 18은 마감재의 CO₂ 투과계수에 따른 모르타르의 탄산화 속도계수를 나타낸 것이다. 표면마감재의 종류에 관계없이 마감재의 CO₂ 투과계수가 증가함에 따라 모르타르의 탄산화 속도계수도 증가하며, 이에 대한 일정한 상관관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A_d = 1.0877 \cdot \ln(P) + 1.7639 \quad \text{식 (3)}$$

$$A_w = 0.043 \cdot \ln(P) + 0.1765 \quad \text{식 (4)}$$

여기서, A_d : 탄산화 깊이의 속도계수 (mm/day^{0.5})
 A_w : 탄산화 너비의 속도계수 (mm/day^{0.5})
 P : CO₂ 투과계수 (mm²/day)

이러한 상관관계식으로부터 0.3~1.0mm의 균열부에 대해 모르타르의 제성능 확보를 위한 마감재의 CO₂ 투과계수 확보 범위는 그림 19에서와 같이 0.076mm²/day로 도출되었다. 즉 탄산화의 평가관점에서 콘크리트 또는 모르타르의 내구성 설계는 건전한 모르타르의 탄산화 속도계수를 기준으로 내구년수를 산정하게 되어있다. 그러나 구조체에 균열이 발생하는 경우, 본 연구의 결과에서와 같이 내구성이 급격하게 저하하게 된다. 이를 위해 초기 성능설계 단계에서는 균열의 발생가능성을 예측하고, 이에 대해 구조체의 제성능을 확보하기 위한 하나의 방안으로서 0.3~1.0mm의 균열부에 대해서는 0.076mm²/day이하의 CO₂ 투과계수를 갖는 표면마감재를 도포한다면, 설계했던 내구성을 확보할 것이라고 판단되는 바이다.

또한 본 연구의 범위에 있어서 건전한 모르타르에 0.050mm²/day이하의 CO₂ 투과계수를 갖는 표면마감재는 매우 유효한 탄산화 억제성능 및 내구성 향상이 기대된다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 모르타르 균열부에 대한 표면마감재의 탄산화 억제성능을 정량적으로 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 균열이 없는 모르타르 건전부에 대해 표면마감재로서 우레탄계 및 아크릴계 마감재의 도포는 매우 유효한 탄산화 억제성능을 나타냈다.

(2) 균열이 발생한 모르타르에 대해 표면마감재는 일정기간이후 탄산화 억제효과가 저감되지만, 탄산화 너비 및 탄산화 속도계수를 고려할 때 표면마감재는 균열부에 대해 충분한 탄산화 억제성능이 있다고 판단된다.

(3) 표면마감재의 탄산화 억제효과는 균열의 폭이 클수록 저감되었는데, 이는 모르타르 균열부의 표면마감재가 인장 및 두께가 감소함에 따라 CO₂ 차단성능이 저감되기 때문으로 나타났다.

(4) 표면마감재의 CO₂ 투과계수는 모르타르 균열부의 탄산화와 밀접한 상관관계가 있으며, 콘크리트 및 모르타르의 내구성능 설계의 단계에서 균열 0.3~1.0mm의 모르타르에 대해 제성능을 확보하기 위해서 본 연구의 범위에서는 0.0759mm²/day이하의 CO₂ 투과계수를 갖는 마감재의 도포가 매우 유효하다고 판단된다.

(5) 향후 모르타르 및 콘크리트의 내구성능설계시 탄산화에 대한 영향요인과 대책으로서 균열부의 폭과 표면마감재료의 CO₂ 투과성능이 면밀하게 고려될 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 塚越雅幸, 田中享二, 塗膜防水層下のコンクリートひび割れ部分の炭酸化, 日本建築學會構造系論文集 [606], pp.43~50, 2006

2. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서-내구성편, 건설교통부, pp.65~69, 2004

3. 唐澤智之, 梶田佳寛, 既存建物の仕上塗材の透氣係數と中性化深さの調査に基づく仕上塗材の中性化抑制効果, 日本建築學會構造系論文集,76(661), pp.449~454, 2011

4. 水上 翔太, 西村 次男, 加藤 佳孝, 勝木 太, ひび割れが中性化進行に及ぼす影響に關する實驗的檢討, コンクリート工學年次論文集, 32(1), 2010

5. 川西 泰一郎, 既存建築物の耐久性能評価について, セメント・コンクリート, No.762, 2010

6. Kobayashi, K. and Uno, Y., "Mechanism of Carbonation of Concrete, Concrete library of JSCE, No.16, pp.139~151, 1990

7. Glasser, F. P., Marchand, J., and Samson, E., Durability of Concrete-Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions, Cement and Concrete Research, 38(2), p. 226~246, 2008

8. Castellote, M. and Andrade, C., Modelling the Carbonation of Cementitious Matrixes by Means of the Unreacted-core Model, UR-CORE, Cement and Concrete Research, 38(12), pp. 1374~1384, 2008

9. 권영진, 김무한, 강석표, 유재강, 콘크리트의 중성화에 영향을 미치는 투기성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회, 13(3), pp.277~284, 2001

10. 강석표, 김영선, 송하원, 김규용, 콘크리트의 투기계수를 이용한 CO₂ 확산 탄산화진행 예측모델, 한국콘크리트학회, 22(2), pp.209~217, 2010

11. 이상현, 박원준, 이한승, 경제운, 변영모, 콘크리트 표면마감재의 탄산화 억제성능 평가를 위한 FEM 해석연구, 대한건축학회논문집 구조계, 23(9), 2007

12. 박동천, 도근영, 박기봉, 건축 외장용 도막의 콘크리트 탄산화 억제효과에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 24(10), 2008

(接受: 2012. 1. 4)