

FEM 해석을 통한 콘크리트 표면마감재의 탄산화 억제성능 평가

Evaluation for Restrain-Performance of Concrete Surface-Finishes against Carbonation with using a FEM Analysis

이한승* 이상현** 정해문***

Lee, Han Seoung Lee, Sang Hyun Jung, Hae Moon

ABSTRACT

A carbonation shortens the endurance life of RC structure. So, to lengthen endurance life of RC structure, we use some kinds of surface-finishes. Because surface-finishes have abilities such as restraint against penetration and diffusion of CO₂. In this study, we wanted to know whether we can evaluate the restrain effect of each surface-finish against carbonation with using FEM analysis. After study, we found that it is possible and we also evaluate the restrain effect of any other surface-finishes against carbonation through this process.

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

토목구조물과 달리 건축구조물은 대부분 마감재가 시공되어 있으며, 탄산화 억제성능은 표면마감재의 종류에 따라 매우 상이하다.¹⁾ 특히, 탄산화에 대한 내구성 설계시에는 표면마감재 자체만의 확산계수의 산정이 필요하며 이를 산정하는 방법으로 표면마감재와 콘크리트를 2상으로 취급하여 해석한 FEM방법이 유효하다고 판단된다. 따라서 본 연구는 FEM해석으로 표면마감재의 탄산화 억제성능을 평가하고, 이를 기초로 표면마감재에 따른 LCC 산정을 검토하였다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구는 표면마감재의 종류에 따른 탄산화 억제효과를 FEM 해석을 통하여 검토하였다. FEM해석에서는 CO₂의 확산과 반응을 고려하였으며, 해석시 입력데이터는 그림 1의 ①,②,③,④이다. ①, ②값은 기존 자료를 참고²⁾하였고, 표면마감재에 따른 ③, ④값은 종류도 많고 다양한 미정값이다. 미정

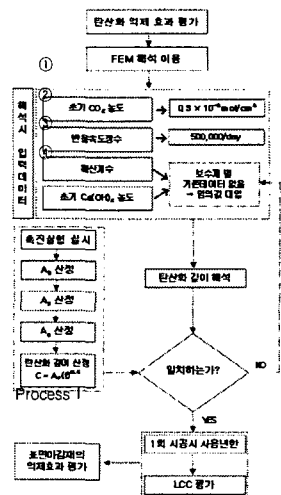


그림1. 연구흐름도

*정회원, 한양대학교 공학대학 건축학부 조교수, 공학박사

**정회원, 한양대학교 대학원 건축환경공학과, 석사과정

***정회원, 한국도로공사 도로교통기술연구원 재료환경연구그룹 책임연구원, 공학박사

값을 결정하기 위해, 대상 표면마감재를 그림 1-프로세스 I 를 통해 촉진실험을 하여 식(3)을 이용하여 시간에 따른 탄산화 깊이를 계산한다.(연구내용 2.1참고) 그 후 그림 1의 I 프로세스를 통해 산정한 탄산화 깊이 결과와 미정값에 임의의 값을 대입하여 해석한 결과와의 일치여부를 통해 미정값을 결정하였다. 두 해석결과가 비슷하면, 각 표면마감재의 1회 시공 시 사용년한을 이용하여 100년 사용시 LCC를 계산하여 표면마감재의 억제효과를 비교, 평가하였다.

2. 연구내용 및 실험개요

2.1 촉진탄산화 실험을 통한 일반 대기중에서의 탄산화 깊이 산정^{3),4)}

탄산화 깊이의 단기적인 평가를 위해 촉진 탄산화 실험을 하였다. 그림 1-프로세스 I 로 촉진 탄산화 속도계수(A_h)를 구하고, 이 계수를 표준상태에서의 탄산화속도계수(A_s)로 환산한 후, 다시 일반 대기 중에서의 속도계수로(A_a)환산 하여, 시간에 따른 탄산화 깊이를 계산하였다. 표 1은 각 탄산화 속도계수산정의 조건 및 계산식을 나타낸다. 식(2)의 환산계수는 촉진 탄산화 조건이 다른 경우 속도계수를 보정하는 식이다.(표준 촉진 탄산화 조건: 단면 100mm×100mm의 공시체, 표준양생(28일), 온도 20℃, 상대습도 60%로 기건양생(28일), 탄산가스농도: 5%로 촉진실험)

표 1. 각 탄산화 속도계수의 탄산화 조건 및 계산식

탄산화 속도계수의 종류	단위	탄산화 조건			계산식
		온도	습도	CO ₂ 농도	
촉진탄산화 속도계수 (A_h)	$\frac{mm}{\sqrt{day}}$	20℃	40%	10%	$C = A_h \cdot \sqrt{t}$ (1) C: 탄산화깊이(mm), A_h : 탄산화속도계수, t: 제령(주)
표준촉진탄산화 속도계수 (A_s)	$\frac{mm}{\sqrt{day}}$	20℃	60%	5%	$A_s = A_{size} \cdot A_{mcure} \cdot A_{icure} \cdot A_{tdry} \cdot A_{Tem} \cdot A_{co_2} \cdot A_{hu}$ (2)
일반 대기중에서의 속도계수 (A_a)	$\frac{mm}{\sqrt{year}}$	20℃	60%	0.03%	$C = A_a \sqrt{CO_2/5} \cdot \sqrt{t}$ (3) C: 탄산화깊이(mm), A: 계수, CO ₂ : 대기중의 CO ₂ 농도(%), t: 제령(주)

A_{size} : 단면 150mm×150mm의 경우, 0.94 $A_{tdry} = (tdry+157)/185$, $tdry$: 건조기간(일) A_{mcure} : 밀봉양생의 경우, 1.08
 A_{icure} : 0.97(0.8/ $t_{cure}+1$), t_{cure} : 양생기간(일) $A_{Tem} = (Tem-27.3)/47.3$, Tem : 촉진실험온도(℃) $A_{co_2} = (CO_2/5)/0.5$, CO₂: 탄산가스농도(%)
 $A_{hu} = Hu(100-Hu)/(140-Hu)/192000$, Hu : 촉진실험습도(%RH) 이상, 식.2의 보정계수

2.2 FEM 해석을 통한 탄산화 깊이 산정 및 LCC 평가 개요

FEM 해석을 위한 콘크리트의 탄산화 진행 모델은 그림 2와 같다. 이 모델은 1차원 모델로, 수평방향으로의 확산만을 고려하였고 재료는 균질 등방성으로 가정하였다. 해석 시 콘크리트에서 이산화탄소, 수산화칼슘의 초기농도와 반응속도 정수는 아래와 같이 고정하였다.²⁾ 보수시기의 판정은 철근 매입깊이보다 20mm 얇은 위치에서 Ca(OH)₂의 농도가 초기치의 70%까지 감소한 때로 가정하였다. LCC계산은 초기 건설비용(Z_I)과 내용기간중의 보수비용($\sum Z_m$)을 합한 식(4)를 이용하였다.

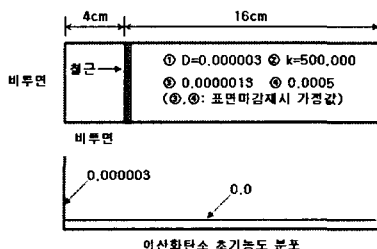


그림 2. 탄산화 진행 모델

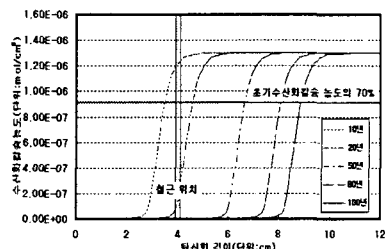


그림 3. FEM해석(무도포)

$$LCC = Z_I + \sum_{i=1}^n Z_{M_i} \quad (4)$$

3. 실험 개요

변수인 표면마감재의 종류는 표 2와 같으며, 100mm×100mm×400mm 콘크리트 시험체 표면에, 소요 피복두께로 시공을 하였다. 사용된 골재의 특성과 콘크리트의 배합은 표 3, 4과 같다. 탄산화 촉진 시 탄산가스가 일방향으로만 침투할 수 있도록 시험체의 양면에 표면마감재를 시공하고, 나머지면은 에폭 시로 도포하였다. 완성된 시험체는 표 2의 촉진수준에 맞춰 실시, 측정재령일에 KS F 2596에 준하여 시험체들의 탄산화 깊이를 측정하였다.

표 2. 실험 인자 및 개요

번호	표면마감재	피복두께 (mm)	측정 재령	촉진 수준
1	무도포	×	7일	CO ₂ 농도: 10% 상대습도: 40% 온도: 20℃
2	발수제	0.1	14일	
3	수성페인트	0.2	14일	
4	표면피복재	0.5	28일	
5	단면수복재	10	42일	
6	레미탈	10	42일	
7	본타일	0.5	70일	

표 3. 골재의 특성

골재 종류	입경 (mm)	절건 비중	흡수율 (%)	단위용적 중량(kg/m ³)	실적율 (%)	조립율 (F.M)
잔골재	5	2.57	0.04	1,580	-	2.89
굵은골재	25	2.63	0.81	1,520	57.8	7.08

표 4. 콘크리트 배합표

W/C (%)	S/a (%)	단위 중량 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AD
55.6	50.5	181	326	895	890	1.63

4. 실험 결과 및 분석

재령별 촉진탄산화 후 표면마감재에 따른 탄산화 깊이와 산정한 각 속도계수는 그림 4, 표 5와 같다. 이 속도계수 중 Aa와 식.3을 사용하여 100년 경과 후 표면마감재에 따른 탄산화 침투깊이를 산정하여, 표 5에 나타냈다.(그림 1-프로세스 I) 그림 3, 5, 6은 FEM 해석에 필요한 ③, ④의 값을 가정하여 해석을 실시한 결과로 프로세스 I을 통하여 산정한 탄산화 깊이와 비슷한 결과를 갖는다. 이 때의 확산계수를 표. 6에 나타냈다. 내구수명이 90년인 본타일의 경우 확산계수가 0.83으로 가장 작지만, 발수제, 수성페인트는 확산계수가 3.5, 6.5로 작지만, 내구수명은 8년으로 짧다. 일반적으로 확산계수는 탄산화 억제 효과에 반비례하여, 확산계수가 크면 억제효과가 작고, 확산계수가 작으면 억제효과가 클 것으로 생각되나 그렇지 않은 것이다.(표 6) 확산계수가 52, 58로 큰 단면수복재나, 표면피복재의 경우 11년 이상으로 비교적 긴 것도 같은 예이다. 이는 단면수복재, 표면피복재가 콘크리트와 비슷하게 탄산화 시 화학작용에 의하여 조직을 치밀하게 하고 그 결과 탄산가스의 침투를 억제하기 때문인 것으로 생각된다. 반면 수성페인트, 발수제는 확산계수가 상당히 작지만, 억제효과가 그리 크지 않은데, 이

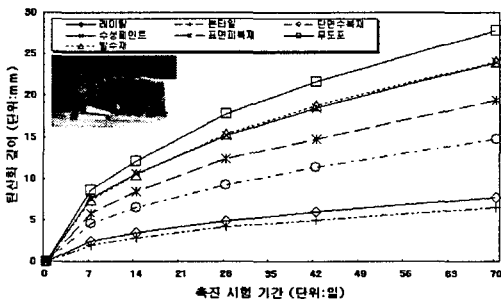


그림 4. 표면마감재별 재령에 따른 탄산화 깊이

표 5. 속도계수 산정

	무도포	본타일	레미탈	단면수복재	표면피복재	수성페인트	발수제	단 위
촉진탄산화시 속도계수 (Aa)	3.33	0.78	0.93	1.76	2.31	2.87	2.88	$\frac{mm}{\sqrt{day}}$
표준촉진탄산화시 속도계수 (As)	5.89	1.38	1.64	3.11	4.08	5.07	5.09	$\frac{mm}{\sqrt{day}}$
일반 대기 중에서의 속도계수 (Aa)	1.21	0.28	0.34	0.64	0.84	1.04	1.04	$\frac{mm}{\sqrt{year}}$
100년 경과 시 탄산화 깊이	87.3	20.2	24.5	46.2	60.6	75.0	75.0	mm

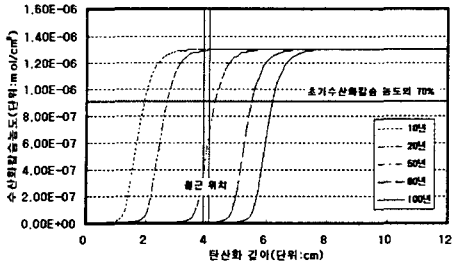


그림 5. FEM해석(표면피복재)

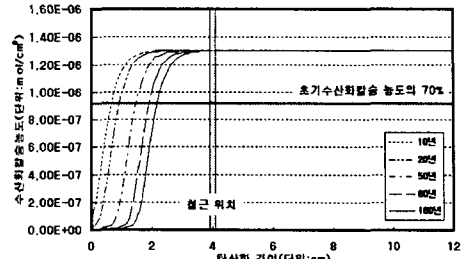


그림 6. FEM해석(본타일)

표 6. 표면 마감재별 확산계수 및 100간 LCC 평가

	내구수명(년)	확산계수 ($10^{-5} \text{mm}^2/\text{day}$)	초기건설비용(만원)			탄산화수복비용(만원)			총비용 LCC (만원)
			RC벽	마감재	계	보수회수	보수비용	계	
무도포	4	50	167	4	171	24	78	1872	2043
본타일	90	0.83		92	259	1	171	171	430
레미탈	65	18		23	190	1	102	102	292
단면수복재	20	52		374	541	5	452	2260	2801
표면피복재	11	58		52	219	9	131	1179	1398
수성페인트	8	6.5		11	178	12	89	1068	1246
발수제	8	3.5		6	173	12	85	1020	1193

(RC 벽체의 두께×길이×높이는 20cm×800cm×280cm에 대한 견적을 계산)

것은 표면마감재의 피복두께가 얇고, 조직을 치밀하게 하는 화학작용이 없기 때문인 것으로 생각된다. 본타일은 억제효과가 상당히 큰데 이는 본타일의 표면이 수분의 침투도 일어나지 않을 만큼 치밀하여 탄산가스의 침입이 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 억제효과만으로 봤을 때 본타일이 가장 우수한 표면마감재로 생각되나 100년의 목표사용기간 동안 LCC비용을 산출하여 비교한 결과 레미탈이 가장 경제적인 마감재임을 알 수 있다.

5. 결론

표면마감재의 탄산화에 대한 억제효과를 FEM으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트 표면마감재의 탄산화 억제효과는 표면에서의 초기 CO₂농도, 반응속도정수, 재료내 CO₂의 확산계수, 초기 Ca(OH)₂의 농도를 이용하여 FEM으로 평가할 수 있다.
- 2) 표면마감재의 확산계수는 촉진 실험 결과를 FEM역해석으로 산정할 수 있다.
- 3) FEM 해석을 통해 표면마감재별 내구수명을 예측할 수 있고, LCC평가를 이용하면, 경제적이며 효율적인 표면 마감재를 선택할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업 지원으로 수행되었음.(# R11-2005-056-04003)

참고문헌

- 1) 森永 繁, 콘크리트 중성화 및 철근의 발에 관한 연구(そのり), 日本建築學會大會, 1977.
- 2) 콘크리트 공학論文集, pp.125~133, 第2卷, 第1号, 1991, 1.
- 3) 日本建築學會, “高耐久成鐵筋 콘크리트 造設計施工指針(案)·同解説”, pp.86-88, 183-184.
- 4) 阿部道彦·梶田佳寛·田中 齊·柳 啓·和泉意登志·友澤史紀: 콘크리트의促進中성화試驗方法의 評價に關する研究、日本建築學會構造系論文報告集, 第409, pp.1~10, 1990, 3.