

단면복구재로 보수된 콘크리트의 재탄산화 과정에 대한 분석적 모델링

Analytical Modelling for Recarbonation Process of Concrete Repaired with Patching Repair Material

도 정 윤^{1)*}

Do, Jeong Yun

김 두 기²⁾

Kim, Doo Kie

송 훈³⁾

Song, Hun

조 영 국⁴⁾

Jo, Young Kug

Abstract

This study presented the analytical evaluation model effective in the concrete structure repaired with a patching material. The model considered the effect of the repair material on carbon dioxide penetration into the repaired concrete as evaluating the remaining service life of the CO₂-deteriorated concrete structure after repair. The diffusion profiles of carbon dioxide as well as the carbonated concrete were effectively able to be modelled with analytical method based on Fick's 1st diffusion law. The evaluation of the model equation showed the good result and rational process quantitatively and numerically to evaluate the remaining service life of the repaired concrete structure after repair.

Keywords : Repaired Concrete, Dioxide Carbon, Recarbonation, Diffusion, Durability Design

1. 서론

국내에서 건설되는 다양한 구조물 중 60~70% 정도가 콘크리트를 구조재료로 사용한 구조물일 정도로 콘크리트라는 재료는 공학적으로 매우 우수한 성능과 장점을 가지고 있다. 여타의 다양한 공학재료들과 마찬가지로 콘크리트도 경년열화현상이 일어나는데 대표적인 것이 염화물 침투와 탄산화이다. 특히 콘크리트의 탄산화는 현대 건축 구조물이 건설되는 환경이 매우 가혹해지는 상황에서 중요하게 인식되고 있다. 보통 대기 중에는 약 0.035%의 이산화탄소가 존재하지만 이는 도심에서 벗어난 비교적 오염이나 산업화의 영향을 덜 받는 지역에서의 표준 농도이고 산업화와 도시화가 활발하게 진행된 대도시의 경우 0.3% 정도에 달하는 이산화탄소 농도를 보이기도 한다. 특히 환기가 잘 되지 않는 실험실, 주차장, 공동구터널, 지하철, 저장탱크는 이산화탄소농도가 매우 심하여 약 0.1% 내지 0.2% 정도를 보이기도 한다고 알려져 있다. 또한 대도시와 같은 대기의 오염이 심한 곳에서는 국부적으로 1.0%에 이르는 이산화탄소 농도를 보이기도 한다. 이러한 도심지 내에서의 높은 이산화탄소농도는 대부분의 콘크리트 구조물이 도심지 내에 건설된다는 점에서 매우 심

각하게 고려해야할 사항이다.

탄산화의 우려가 있는 환경에 건설되어질 콘크리트 구조물에 대하여 건설과정(construction process)중 기획 단계에서 설정되는 구조물의 목표수명(target service life), 즉 설계수명(designed service life)을 만족하는 구조물을 건설하기 위해서는 설계단계에서 탄산화 진행 속도 및 열화과정을 예측하기 위한 모델식이 필요하다. 지금까지 콘크리트 구조물의 설계단계에서 사용할 탄산화 열화예측 모델식은 크게 확산을 기반으로 하는 분석식과 실험과 계측을 통한 경험식의 형태로 수많은 연구자들에 의해 다양하게 개발되었으나 아무리 정교한 예측식이더라도 모델식 자체에 존재하는 고유한 불확실성(uncertainties)과 다양한 형태로 존재하는 애매함(fuzziness)으로 인하여 구조물의 설계수명 내 보수 및 보강작업이 필연적으로 수반되게 된다.

보수된 콘크리트 구조물의 부위는 다른 부위에 비하여 보수 후 같은 원인으로 인하여 재열화할 가능성이 매우 높기 때문에 보다 특별한 관리를 필요로 한다. 이를 위해서는 보수된 콘크리트 구조물(repaired concrete structure)의 부재에 대한 열화속도 및 과정을 예측할 수 있는 모델식이 필요한데 이 부분에 대한 연구가 아직은

1) 정회원, 군산대학교 산학협력단, 연구교수

2) 정회원, 군산대학교 토목공학과, 교수

3) 정회원, 한국세라믹기술원 에코소재센터, 선임연구원

4) 정회원, 청운대학교 건축공학과, 교수

* Corresponding author : arkido@gmail.com 063-469-4770

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

미진한 상태이다. 이에 본 연구에서는 탄산화에 의해 열화를 받은 콘크리트 부재의 보수 후 재열화과정을 Fick의 확산(diffusion) 제1법칙을 이용하여 모델링함으로써 보수된 콘크리트 부재의 독특한 상황을 고려한 합리적인 예측식을 제시하고자 한다.

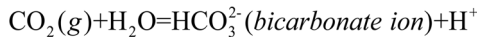
2. 콘크리트 보수 전후의 탄산화 침투 과정

2.1 콘크리트의 탄산화 과정 분석

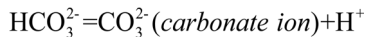
대기 중에 있는 이산화탄소는 콘크리트의 내부로 침투하여 페이스트 중의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)와 반응하여 탄산칼슘을 생성함으로써 콘크리트의 수소이온농도(pH)를 약 12.5에서 8.5 이하로 떨어뜨리는 화학반응을 일으킨다. 하지만 이산화탄소는 시멘트 페이스트 중의 수화물과 직접적인 반응을 할 수 없으므로 먼저 물에 용해되어 탄산이온(carbonate ions)으로 이온화 된 후 세공용액에 존재하는 칼슘이온과 침적반응을 함으로써 용해도가 낮은 탄산칼슘을 생성하게 된다. 이산화탄소에 의한 콘크리트 내부에서의 탄산화는 다음과 같은 화학식으로 설명될 수 있다.

(1) 이산화탄소의 이온화

① 중탄산염(bicarbonate)의 생성

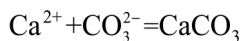


② 중탄산염의 이온 해리

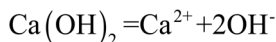


(2) 수산화칼슘의 이온화

콘크리트 내부로 이산화탄소가 유입되어 세공용액 속에서 탄산이온이 해리되면 세공용액의 pH가 감소하여 수산화칼슘이 이온화된다.



(3) 탄산칼슘의 생성



탄산칼슘의 생성은 세공용액 내에 칼슘이온의 농도를 낮추고 탄산칼슘에 비하여 용해도가 훨씬 높은 수산화칼슘의 용출을 초래한다. 따라서 수산화칼슘은 칼슘이온이 완전히 소모될 때까지 계속해서 소모되어 탄산칼슘을 침적시키게 된다. 한편 수산화칼슘이외에 시멘트 페이스트에는 규산칼슘수화물(C-S-H)과 에트링가이트와 모노설페이트의 수화물을 포함하고 있는데, 이들 수화물은 세공용액의 수소이온농도와 칼슘이온의 농도가 높은 경우에는 평형상태를 이루고 있다. 하지만, 수산화칼슘이 소모되면서 pH와 칼슘이온의 농도가 낮아짐에 따라 이들 수화물도 용해되어 세공용액 내에 부족한 칼슘이온을 공급하게 된다. 규산칼슘수화물(C-S-H)의 경우 칼슘의 해리로 인하여 보통 1.65정도의 비율을 보이는 Ca/Si의 비율이 1.0 미만으로 떨어지게 되며, 이때 pH는 약 10정도

가 된다. Bary 등의 연구에 따르면 완전히 탄산화가 된 시멘트 내에 남아있는 C-S-H수화물은 0.85 정도를 띤다고 한다(Bary and Seller, 2004).

보통 모노설페이트는 pH 11.6에서 에트링가이트와 알루미네이트 화합물로 분해되며, 에트링가이트는 pH 10.6에서 황산염 이온과 수산화알루미늄 화합물로 분해가 된다. 여기서 해리된 황산염 이온은 석고의 형태로 침적하거나 혹은 콘크리트 내부로 확산하여 모노설페이트로부터 분해되어 나온 알루미네이트와 반응하여 새로운 에트링가이트를 형성할 것이다. 결국 알루미네이트 상으로부터 나온 대부분의 칼슘이온은 탄산칼슘을 형성하며 소모될 것이며, 알루미네이트나 페라이트 상은 수산화알루미늄(Al(OH)₃)이나 수산화철(Al(Fe)₃) 형태의 안정적인 수산화금속을 형성한다(Chen et al., 2004).

2.2 이산화탄소의 고정화량

앞서 설명한 각 수화물로부터 해리되는 칼슘이온의 양을 토대로 한 가정을 바탕으로 탄산화된 콘크리트 부분의 이산화탄소의 고정화량을 계산할 수 있다. 즉, Tayler의 연구결과에 따르면 시멘트 내에 약 65.3wt% 존재하는 산화칼슘(CaO) 중 수화반응을 통해 약 절반인 31.4wt%가 규산칼슘수화물(C-S-H)을 형성하고, 나머지는 수산화칼슘과 에트링가이트나 모노설페이트 등의 수화물을 생성한다(Tayer, 1997). 또한 2.1절에서 설명한 바와 같이 C-S-H 수화물을 형성하는 CaO 중 약 50%가 해리되어 탄산화가 되고, 수산화칼슘과 에트링가이트, 모노설페이트 등의 수화물에 존재하는 CaO는 전량 해리되어 탄산칼슘을 생성한다면 콘크리트 내에 존재하는 전체 CaO 중 75% 정도만이 탄산화가 되고, 나머지 25%는 탄산화되지 않은 채 수화물의 형태로 콘크리트 내부에 존재하게 될 것이다. 요약하면 위의 가정을 근거로 이산화탄소의 고정화량은 다음과 같이 계산될 수 있을 것이다(Pade and Guimaraes, 2007; Stronnach and Glasser, 1997).

$$b_c (\text{kg CO}_2/\text{m}^3) = (0.75 \times \text{Cement}_{\text{unit}} \times \text{CaO}) \times \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}} \quad (2-a)$$

여기서,

b_c = 콘크리트의 이산화탄소 고정화량(kg CO₂/m³)

$\text{Cement}_{\text{unit}}$ = 콘크리트의 단위시멘트량(kg/m³)

CaO = 사용 시멘트 내의 산화칼슘의 비율

$\frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}}$ = 이산화탄소와 산화칼슘의 몰중량비

식 (2-a)에서 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리

트의 경우 전체 산화칼슘 중 약 75%가 이산화탄소에 의해 탄산화가 되지만, 폴리머 개질 시멘트 모르타르(PCM) 계통의 수지를 포함하고 있는 보수재는 수지에 의한 산화칼슘의 물리적 화학적 고정화가 존재하므로 보통 포틀랜드 시멘트모르타르보다 고정화율이 낮은 반면에 공극률(porosity)이 보통시멘트모르타르에 비하여 현저히 낮으므로 이산화탄소 확산계수가 매우 낮다. 즉 PCM의 촉진 탄산화에 대한 연구결과를 보면 약 50~80%의 탄산화억제효과가 있으므로 위의 보통 포틀랜드 시멘트의 산화칼슘 고정화율의 약 65%로 가정하여 단면복구재의 산화칼슘 고정화율을 약 50%정도로 가정한다(Chandra and Ohama, 1994). 따라서 PCM 계통의 단면복구재의 이산화탄소 고정화량의 계산은 다음과 같은 것으로 가정한다.

$$b_R(kg/m^3) = (0.5 \times Cement_{unit} \times CaO) \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (2-b)$$

여기서,

b_R = 보수재에 의한 이산화탄소 고정화량(kg/m^3)

2.3 콘크리트 보수 전후의 탄산화 프로파일 도해 (graphical solution)

2.3.1 보수 전 콘크리트의 탄산화 프로파일

보수 전 콘크리트는 콘크리트의 내부에 대기 중에 있는 이산화탄소의 침투로 인하여 Fig. 1과 같은 전형적인 형태의 이산화탄소 농도 프로파일을 보인다. 탄산화 깊이라는 것은 공용 중 외부 환경작용 즉 이산화탄소 농도에 대한 점검/계측 시점까지의 콘크리트의 응답이라고 볼 수 있다. 이는 환경작용의 형태, 기간, 크기와 콘크리트의 특징에 영향을 받아 다양하게 반응한다고 볼 수 있다.

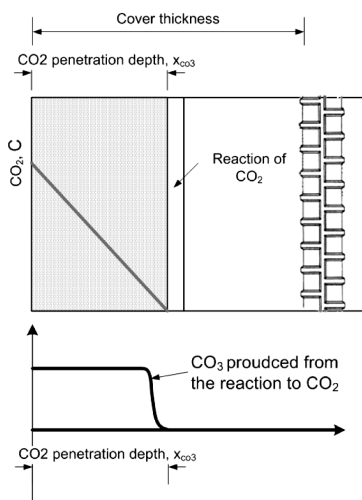


Fig. 1 General carbonation profile of concrete

탄산화된 콘크리트를 보수하기 위한 방법 중 단면복구재에 의한 보수 원리는 탄산화된 콘크리트 부위를 걷어내고 그 위에 탄산화 저항할 수 있는 추가적인 재료를 설치함으로써 새로운 내탄산화층을 형성하는 것이다. 이는 콘크리트 내부로 침투하는 이산화탄소와 수분의 확산을 더디게 하는 것으로 본 연구에서는 단면복구재에 의해 보수된 콘크리트의 재탄산화를 분석적으로 모델링하는 것을 연구대상으로 하였다.

2.3.2 보수 후 콘크리트의 탄산화 프로파일

보수된 콘크리트의 시간에 따른 침투깊이의 정도를 Fig. 2와 같이 도시적으로 설명할 수 있는 데, 탄산화속도는 각 그래프의 기울기라고 볼 수 있으며, 고분자 재료를 함유하고 있는 단면복구재가 구체콘크리트 보다 탄산화속도가 느리다고 볼 수 있다.

Fig. 3에는 단면복구재를 적용한 탄산화된 콘크리트의 보수 직후의 이산화탄소와 탄산칼슘의 프로파일이 도시적으로 풀이되어 있다. 단면복구재에 의한 보수 직후에는 구체콘크리트의 탄산화 침투는 멈추지만(a), 콘크리트의 표면에 설치된 단면복구재가 탄산화가 되면서 외기에 면하는 부분부터 콘크리트 내부 방향으로 서서히 탄산화가 일어날 것이다. 즉 보수 후 시간의 흐름에 따라 이산화탄소의 침투가 단면복구재에서 일어나 Fig. 2(b)와 같은 이산화탄소 침투 및 탄산칼슘 생성의 프로파일을 보이게 될 것이다. 시간이 더 흐르면 단면복구재는 완전히 탄산화가 되어버리겠지만(c), 탄산화에 의한 조직의 변화 등으로 인하여 구체콘크리트의 이산화탄소 표면농도를 낮추는 효과로 인하여 이산화탄소의 확산을 다소 낮추는 내탄산화의 역할을 어느 정도 수행할 것이다. 하지만 더욱 시간이 흐르면 탄산화의 침투깊이는 구체콘크리트 내부로 진행하게 되고 Fig. 2(c)에서처럼 구체콘크리트는 탄산화속도는 느리지만 다시 탄산화가 개시될 것이다. 결국에는 탄산화전면부(front)가 철근이 이르지만 그 과정은 기존 구체콘크리트의 탄산화에 비하여 지연되므로 잔존수명(remaining service life)을 증가시키는 효과를 내게 되는 것이다.

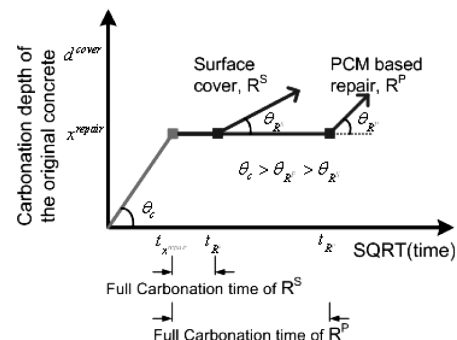
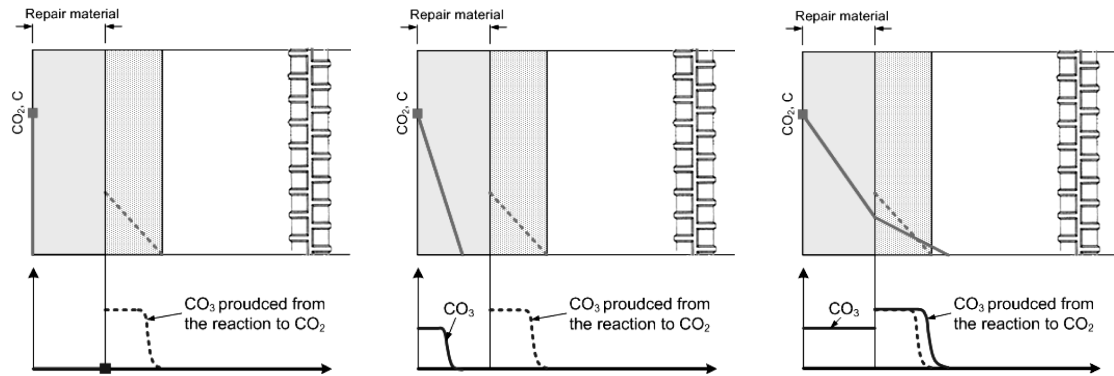
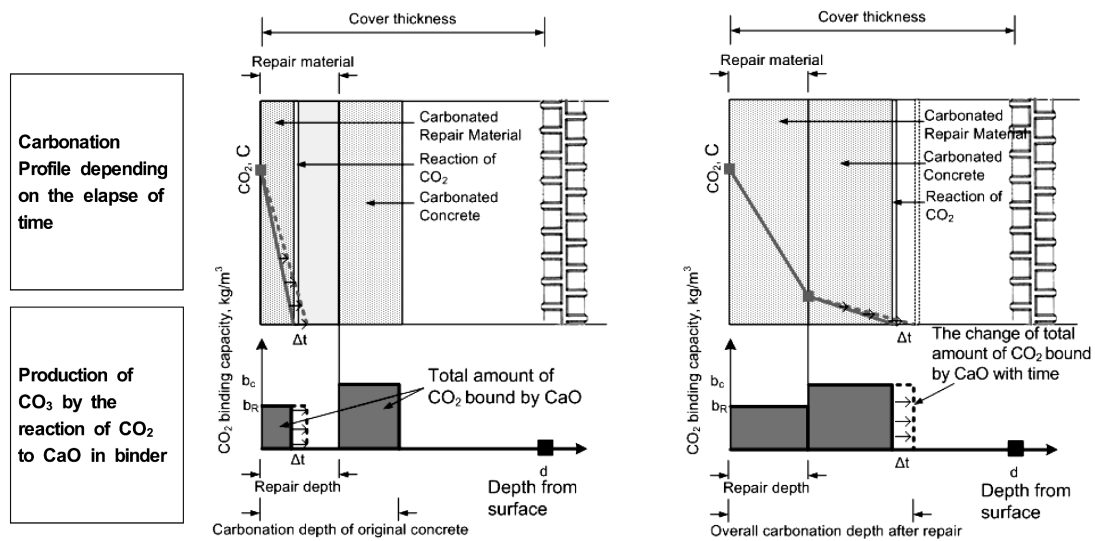


Fig. 2 Aged carbonation profiles and rates in carbonated concrete depending on repair materials



(a) immediately after repair (b) CO₂ penetration process in repaired place (c) CO₂ penetration process in repaired place after completely carbonated

Fig. 3 Carbon dioxide penetration profile of repaired concrete



(a) Carbonation process in repaired place (b) Carbonation process in repaired place after completely carbonated

Fig. 4 Recarbonation process of repaired concrete member

3. 보수된 콘크리트 탄산화 침투과정 모델링

3.1 해석을 위한 입력자료

확산된 이산화탄소는 탄산화면에서 모두 소비되므로 탄산화의 과정은 확산과 반응의 모델로 계산된다. 즉, 확산과정은 Fick's 1st 확산의 법칙에 따라 이뤄지며 확산 속도에 영향을 주는 확산계수의 경우 본 연구에서는 재료의 상대습도와 재료의 공극률(porosity)에 영향을 받는 것으로 가정하였다(Kropp and Hilsdorf, 1996).

- i) 보수과정 중 점검 및 평가에 의한 해석 입력값
 - a) 구체 콘크리트 탄산화깊이, x_{co_3}
 - b) 탄산화 노출기간 t_C
 - c) 노출 환경 하의 이산화탄소 농도, C
 - d) 구체콘크리트의 확산계수, D_C
 - e) 구체콘크리트의 이산화탄소 고정화능, b_C

f) 피복두께, d

ii) 보수재의 특성치

a) 보수재의 두께, x_R

b) 보수재의 확산계수, D_R

c) 보수재의 이산화탄소 고정화능, b_R

3.2 구체콘크리트의 확산 모델링

이산화탄소 침투과정은 콘크리트 내부의 이산화탄소 침투 깊이, 즉 이산화탄소 침투 전면부까지의 확산과 침투 전면부에서 일어나는 산화칼슘과 수산화칼슘의 이산화탄소와의 탄산화반응으로 설명될 수 있다. Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 아주 짧은 시간 간격, dt 에서 이산화탄소 전면부는 dx 만큼 이동한다.

전면부까지의 이산화탄소 유동, Q_{co_2} 는 x_{co_3} 만큼 이미 탄산화된 층을 거쳐서 확산이 이뤄지고 그 농도의 차이는

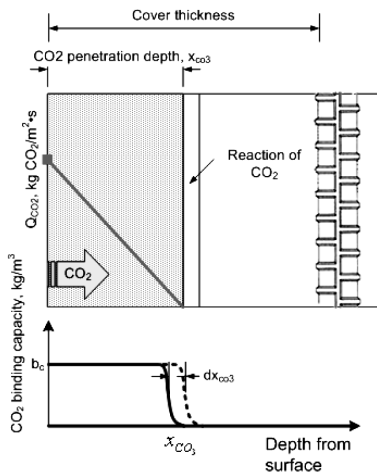


Fig. 5 Carbon dioxide penetration process of surface carbonated concrete layer

$C_2 - C_1 = \Delta C$ 이며, 농도의 구배는 $\Delta C/x_{CO_2}$ 이다. 탄산화된 콘크리트의 확산계수를 D_c 라고 하면, 이산화탄소의 유동량은 다음과 같을 것이다(Crank, 1975; CEB, 1997).

$$Q_{CO_2} = D_c \cdot \frac{\Delta C}{x_{CO_2}} \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad (3-a)$$

침투 전면부에 다다른 이산화탄소는 수산화칼슘과 반응을 하여 탄산칼슘을 생성하는 데 이를 이산화탄소의 고정화라 할 수 있으며, 그 양은 다음과 같을 것이다.

$$\text{구체 콘크리트에 의한 이산화탄소의 고정화량} = b_c \cdot dx_{CO_2} \quad (3-b)$$

여기서,

$$b_c = \text{구체콘크리트의 이산화탄소 고정화능}(kg/m^3)$$

시간 dt_c 동안 이동한 이산화탄소의 양은 침투 전면부에서 고정화된 이산화탄소의 양과 같으므로 그 양은 다음과 같다.

$$Q_{CO_2} \cdot dt_c = D_c \cdot \frac{\Delta C}{x_{CO_2}} \cdot dt_c = b_c \cdot dx_{CO_2} \quad (3-c1)$$

$$[kg/m^3]$$

$$D_c \cdot \Delta C \cdot dt_c = b_c \cdot x_{CO_2} \cdot dx_{CO_2} \quad (3-c2)$$

위의 식(3-c)의 좌변은 시간 t , 우변은 깊이 x 에 대해 적분하면 다음과 같은 탄산화깊이 예측식이 된다.

$$x_{CO_2} = \sqrt{\frac{2D_c \cdot \Delta C}{b_c}} \cdot \sqrt{t_c} = A_c \cdot \sqrt{t_c} \quad (3-d)$$

식(3-d)를 정리하면

$$\frac{D_c}{b_c} = \frac{x_c^2}{2 \cdot t_c \cdot \Delta C} = \frac{A_c^2}{2\Delta C} \quad (3-e)$$

식(3-e)를 이용하여 보수 후 콘크리트부위의 탄산화 깊이와 탄산화속도를 계산할 수 있을 뿐만 아니라 보수 작업 시 점검과 평가를 통해 3.5절의 a), b), c)의 입력변수를 통해 확산계수 혹은 이산화탄소 고정화능을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 확산계수는 상대습도와 공극률에 의해 결정되어지는 것으로 보고, 이산화탄소의 고정화능은 앞에서 기술한 식(2-a)를 이용하여 추정할 수 있다.

3.3 보수재의 확산모델링

탄산화된 구체 콘크리트는 임계 시점 t_c 에서 임의의 보수재 R 에 의해 보수가 이뤄진다. 여기서 구체 콘크리트에 설치된 보수재는 설치시점에서는 탄산칼슘의 생성량이 0이 될 것이다. 보수가 완료된 후부터 서서히 탄산화되기 시작하면서 탄산칼슘이 생성되는 데 보수재 R 의 이산화탄소 고정화능을 b_R 이라고 하면, 보수재가 완전히 탄산화되는 시점 t_R 은 식 (3-e)로부터 다음과 같이 추정된다.

$$t_R = \frac{x_R^2 \cdot b_R}{2 \cdot D_R \cdot \Delta C} \quad (3-f)$$

위의 식(3-f)에서 보수재의 확산계수가 수분과 공극률의 영향을 받는다는 점을 고려하면, 보수재의 확산계수 D_R 은 보수재의 상대습도와 공극률에 대한 함수로 $D_R(RH_R, \epsilon_R)$ 의 형태로 표현되어 식(3-f)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$t_R = \frac{x_R^2 \cdot b_R}{2 \cdot D_R(RH_R, \epsilon_R) \cdot \Delta C} \quad (3-g)$$

여기서,

x_R = 보수재의 두께

b_R = 보수재의 이산화탄소 구속능

RH_R = 보수재의 수분

$D_R(RH_R, \epsilon_R)$ = 보수재의 상대습도와 공극률에 따른 이산화탄소 확산계수

3.4 보수재의 완전 탄산화 후 확산 모델링

일단 보수재가 완전히 탄산화가 되면 잔존 사용수명은 구체콘크리트의 탄산화 과정을 모델링하는 방법과 같은 방법으로 유도될 수 있다. 여기서 보수재의 외기면에서

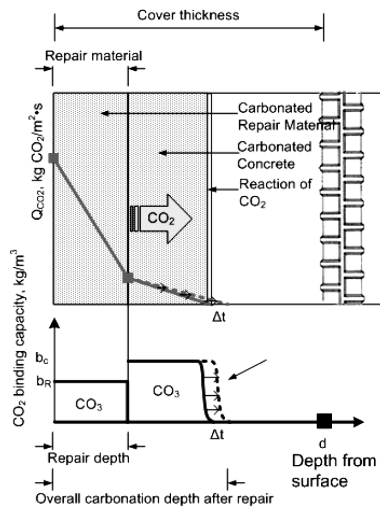


Fig. 6 Carbon dioxide diffusion profile in the carbonated concrete region after patching material completely carbonated

탄산화된 기존 콘크리트의 이산화탄소 침투 전면부(front)까지의 이산화탄소의 확산량은 식(3-h)에서처럼 농도차/확산저항의 형태로 나타낼 수 있다.

확산저항은 피침투재의 두께에는 비례하고 확산계수에 반비례하므로 보수재가 완전탄산화된 경우의 이산화탄소 확산저항은 식(3-i)에서처럼 보수재의 확산저항과 기존 콘크리트의 탄산화 전면부까지의 확산저항의 합으로 요약할 수 있다.

$$Q_{CO_2} = D_c \cdot \frac{\Delta C}{x_{CO_3}} = \frac{\Delta C}{\frac{x_{CO_3}}{D_c}} \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad (3-h)$$

$$Q_{CO_2} \cdot dt = \frac{\Delta C}{\frac{x_R}{D_R} + \frac{x_{CO_3}}{D_c}} \cdot dt \quad [kg/m^3] \quad (3-i)$$

$$Q_{CO_2} \cdot dt = \frac{\Delta C}{\frac{x_R}{D_R} + \frac{x_{CO_3}}{D_c}} \cdot dt = b_c \cdot dx_{CO_3} \quad (3-j)$$

여기서, 보수재와 구체 콘크리트의 확산계수가 다르기 때문에 보수된 부분과 구체콘크리트의 두 부분으로 구분되는 재료를 연속체로 해석할 필요가 있다. 식(3-h)에서의 이산화탄소 침투깊이를 확산계수로 나누는 값은 이산화탄소 확산저항계수(K)라 할 수 있는데, 보수재를 구체 콘크리트와 같은 확산계수를 가지면서 두께가 조정된 등가의 확산저항계수의 개념을 적용하여 식(3-k)로 환산함으로써 이질적인 두 재료의 탄산화 확산깊이를 연속적으로 해석할 수 있다.

$$K_{CO_2} = \frac{x_R}{D_R} = \frac{x_R^{eq}}{D_c} \quad (3-k)$$

여기서, K_{CO_2} 는 보수재의 확산저항계수

이산화탄소 확산의 수분과 공극률 의존적인 특징을 고려하면, 식(3-k)에서의 보수재의 등가 두께는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$x_R^{eq} = x_R \frac{D_c(RH_c, \epsilon_c)}{D_R} \quad (3-l)$$

식(3-l)의 $D_R(RH_R, \epsilon_R)$ 을 식(3-j)에 대입하면

$$Q_{CO_2} \cdot dt = \frac{\Delta C}{\frac{x_R}{x_R \cdot D_c(RH_c, \epsilon_c)} + \frac{x_{CO_3}}{D_c}} \cdot dt = b_c \cdot dx_{CO_3} \quad (3-m)$$

$$Q_{CO_2} \cdot dt = \frac{\Delta C}{\frac{x_R^{eq}}{D_c(RH_c, \epsilon_c)} + \frac{x_{CO_3}}{D_c}} \cdot dt = b_c \cdot dx_{CO_3} \quad (3-m)$$

$$\frac{\Delta C \cdot D_c(RH_c, \epsilon_c)}{b_c} \cdot dt = (x_R^{eq} + x_{CO_3}) \cdot dx_{CO_3}$$

식(3-m)의 양변을 각각 $0 \leq t \leq t_{d^{cover} - x^{repair}}$ 과 $x^{repair} \leq x \leq d^{cover}$ 의 영역에 대하여 적분을 하면

$$\frac{\Delta C \cdot D_c(RH_c, \epsilon_p)}{b_c} [t]_0^{t_{d^{cover} - x^{repair}}} = [x_R^{eq} \cdot x]_{x^{repair}}^{d^{cover}} + \left[\frac{1}{2} x_{CO_3}^2 \right]_{x^{repair}}^{d^{cover}} \quad (3-n)$$

$$t_{d^{cover} - x^{repair}} = \frac{(d^{cover} - x^{repair})(d^{cover} + x^{repair} + 2x_R^{eq})}{2D_c(RH_c, \epsilon_p) \frac{\Delta C}{b_c}}$$

결론적으로 보수된 콘크리트 구조물의 보수된 시점으로부터 남아있는 구조물의 잔존내구연한은 다음과 같이 유도된 식으로 추측할 수 있다.

$$t_{d^{cover}} - t_{x^{repair}} = t_R + t_{d^{cover} - x^{repair}} \quad (3-o)$$

$$= \frac{x_R^2 \cdot b_R}{2D_R \cdot \Delta C} + \frac{(d^{cover} - x^{repair})(d^{cover} + x^{repair} + 2x_R^{eq}) \cdot b_c}{2D_c(RH_c, \epsilon_p) \cdot \Delta C}$$

4. 적용예제

4.1 해석조건

본 연구에서 제시한 탄산화 침식을 받은 콘크리트 부재의 보수후 탄산화 모델을 통해 보수 후 잔존수명을 계산해본다. 먼저 대상 부재는 설계수명 50년의 주차장 구조

Table 1 Analysis condition of example

Variables		Content
Construction	Cover thickness	40mm
	Cement	OPC
	Unit cement	370kg/m ³
	Remicon	25-24-15
Environment	CO ₂ concentration	2000ppm
Concrete	Porosity	0.3
	R.H.	45%
	Diffusion coefficient	1.08×10 ⁻⁷ m ² /s
Patching repair material	Type	PCM
	Mix	C:S=1:3,P/C=25%,W/C=0.42
	Cement	Early strength cement
	Diffusion coefficient	1.2×10 ⁻⁸ m ² /s
	Unit cement	476kg/m ³

물의 지하층의 일부분이며, 보수시점은 건설 후 10년째 이뤄졌다고 가정한다. 해석을 위한 입력변수의 내용과 해당값이 Table 1에 나타나 있다.

4.2 잔존수명 평가

4.2.1 이산화탄소의 고정화량 산정(b_R 과 b_c)

보수재와 구체콘크리트에 의한 이산화탄소의 고정화량은 침투된 이산화탄소가 산화칼슘에 의해 고정화된다는 메커니즘을 이용하여 접근할 수 있다. 따라서 식(2-a)와 식(2-b)를 이용하여 계산하면 아래와 같다.

$$b_R = 0.5 \times 476 \times 0.6 \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} = 112(kg CO_2/m^3)$$

$$b_c = 0.75 \times 370 \times 0.62 \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} = 135(kg CO_2/m^3)$$

4.2.2 보수재의 내구연한 추정(t_R)

식(2-b)를 이용하여 보수재의 내구연한을 추정하면 각 변수의 값은 $x_R^2=0.002m$, $b_R=112kg/m^3$, $D_R=1.2 \times 10^{-8}m^2/s$, $\Delta C=0.3\% \times 1.977kg/m^3=0.006kg/m^3$ 이므로

$$t_R = \frac{x_R^2 \cdot b_R}{2 \cdot D_R \cdot \Delta C} = 10년$$

4.2.3 보수재의 완전 탄산화 후 추정($t_{d^{cover} - x^{repair}}$)

보수재가 완전히 탄산화된 후 구체콘크리트의 잔존수명을 판단하기 위해서는 우선 이를 결정하는 독립변수 중 확산계수를 결정할 필요가 있다. 그런데 콘크리트의 확산계수는 다양한 영향 인자 중 콘크리트의 상대습도와 공극

률에 크게 좌우되므로 Papadakis가 제시한 콘크리트 확산계수에 대한 상대습도와 공극률의 관계에 관한 경험식을 이용하면 콘크리트의 확산계수는 다음과 같이 얻을 수 있다(Papadakis and Vayenas, 1991).

$$D_c(RH_c, \epsilon_p) = D_{e, CO_2} = 1.64 \times 10^{-6} \times \epsilon_p \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{2.2}$$

$$\text{여기서, } \epsilon_p = \frac{\rho_c}{\rho_w} \left(\frac{W/C - 0.3}{1 + \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot W/C} \right)$$

ρ_c = 시멘트의 밀도(kg/m³), ρ_w = 물의 밀도(kg/m³)

W/C = 물시멘트비, ϵ_p = 경화한 시멘트 페이스트의 공극률, RH = 상대습도(%), $D_c(RH_c, \epsilon_p) = D_{e, CO_2}$ 이라 한다면, 구체 콘크리트의 잔존수명은 다음과 같이 계산되어진다.

$$t_{d^{cover} - x^{repair}} = \frac{(d^{cover} - x^{repair})(d^{cover} + x^{repair} + 2x_R^{eq})}{2D_c(RH_c, \epsilon_p) \frac{\Delta C}{b_c}} = 30년$$

4.2.4 보수후 콘크리트의 잔존수명($t_{d^{cover} - t_{x^{repair}}}$)

보수후 콘크리트의 잔존수명의 예측은 보수재의 탄산화후 구체콘크리트가 탄산화되는 시기이며, 본 연구의 가정에서처럼 그 임계점을 탄산화가 보강근에 이르렀을 때로 판단하면 식(3-h)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$t_{d^{cover} - t_{x^{repair}}} = t_R + t_{d^{cover} - x^{repair}} = \frac{x_R^2 \cdot b_R}{2D_R \cdot \Delta C} +$$

$$\frac{(d^{cover} - x^{repair})(d^{cover} + x^{repair} + 2x_R^{eq}) \cdot b_c}{2D_c(RH_c, \epsilon_p) \cdot \Delta C} = 40년$$

본 연구에서 제시한 탄산화침투모델에 의한 잔존수명의 예측은 이산화탄소가 철근에 이르렀을 때를 기준으로 하기 때문에 매우 안전 측의 보수적인 판단임을 감안하면 결론적으로 탄산화열화를 받은 콘크리트 부재의 PCM 단면복구재에 의한 보수는 목표수명을 충분히 만족시킬 수 있다고 판단내릴 수 있다.

5. 결론

본 연구는 보수된 콘크리트 부재의 보수 후 이산화탄소가 침투하는 과정을 분석적 방법으로 모델링함으로써 모델식은 보수재가 탄산화하는 과정과 탄산화된 콘크리트

부재가 재탄산화하는 과정으로 나뉘어져 모델링되었다. 본 연구에서 제시된 모델식은 보수된 콘크리트 구조물의 탄산화 열화 과정을 해석하고 평가하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 탄산화 열화를 받은 콘크리트 부재에 대한 다양한 보수재료 중 PCM계통의 단면복구재에 대한 적용예제를 통하여 본 연구에서의 방법론에 대하여 검증은 하였으나, 향후에는 실험을 통한 이론과 실험자료의 비교 검토가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서의 모델은 각 입력변수가 확정적인 값으로 처리되었으나 실제 입력변수들의 값은 확률적으로 분포하는 불확실 혹은 부정확한 특성을 보이므로 이를 확률변수(random variable)로 처리한 해석의 규모를 확장하여 모델식을 구성하는 것이 필요하여 보인다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단(KRF-2008-355-D00020)과 전력기반조성사업센터의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- Bary, B., Sellier, A., "Coupled-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete", *Cem. Concr. Res.* Vol. 34, 2004, pp.1859-1872.
- Pade C. and Guimaraes M., "The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective", *Cem. and Conc. Res.* Vol. 37, 2007, pp.1348-1356.
- Chen, J. J., Thomas, J. J., Taylor, H. W. F., Jennings, H. M., "Solubility and structure of calcium silicate hydrate", *Cem. Conc. Res.* Vol. 34, 2004, pp.1499-1521.
- Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*, 2nd edition, Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- Crank J., *The Mathematics of Diffusion*, 2nd Edition, Oxford university press, Bristol, 1975.
- Kropp J. and Hilsdorf H.K., *Performance Criteria for Concrete Durability-RILEM Report 12*, E&FN SPON, London, 1996, pp.97-111.
- New Approach to Durability Design*, CEB Bullitin d'information No. 238, May. 1997.
- Chandra, S., and Ohama, Y., *Polymers in Concrete*, CRC Press, 1994.
- Stronach, S.A., Glasser, F.P., "Modelling of the impact of abundant geochemical components on the phase stability and solubility of the CaO-SiO₂-H₂O system at 25°C", *Advances in Cement Research*, Vol. 9, No. 36, 1997, pp.167-181.
- Papadakis V. G., Vayenas C. G., and Fardis M. N., "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation", *ACI Material Journal*, Vol. 88, Issue 4, 1991, pp.363-37.
- Papadakis V.G., Vayenas C.G., and Fardis M.N., "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete", *ACI Material Journal*, Vol. 88, Issue 2, 1991, pp.186-196.

(접수일자 : 2009년 9월 23일)

(1차수정일자 : 2009년 11월 23일)

(심사완료일자 : 2009년 12월 11일)

요 지

이산화탄소에 의해 열화된 콘크리트 구조물의 보수 후 잔존수명을 평가할 때 보수재의 효과를 고려하기 위해 본 연구에서는 탄산화에 의해 열화를 받은 콘크리트 부재의 보수 후 재열화과정을 Fick's 확산(diffusion) 제1법칙을 이용하여 모델링함으로써 단면복구재에 의해 보수된 콘크리트 부재의 독특한 상황을 고려한 합리적인 예측식을 제시하였다. 연구결과는 보수재의 이산화탄소 확산 프로파일과 기존 구체콘크리트의 탄산화된 부분의 이산화탄소 확산 프로파일을 효과적으로 모델링할 수 있음을 보여줬다. 제시된 평가모델식에 대한 검증예제를 통해 보수재의 이산화탄소 확산지연효과를 확인할 수 있었으며 보수된 콘크리트 구조물의 보수 후 잔존수명을 객관적이고 수치계산적인 방법으로 평가할 수 있었다.

핵심 용어 : 보수된 콘크리트, 이산화탄소, 재탄산화, 확산, 내구성설계