

이산화탄소 농도에 따른 콘크리트 구조물의 탄산화 해석

Carbonation Analysis of Concrete Structures with Carbon Dioxide Concentration

양주경(Joo-Kyoung Yang)¹⁾

요 약

콘크리트의 탄산화를 진행시키는 가장 주요한 영향인자는 대기 중의 농도이다. 본 연구에서는 대기 중의 이산화탄소 농도에 따른 탄산화 진행 정도를 개발한 프로그램을 통하여 해석적으로 접근하였다. 또한 해석 프로그램을 통하여 이산화탄소 농도에 따른 내구수명을 산정하였다. 이산화탄소 표면농도가 0.1%인 경우도 탄산화 깊이가 50mm 정도로 나타났다. 콘크리트의 피복두께를 40mm를 유지한다면 이산화탄소 표면농도가 0.1%일 때 콘크리트의 내구수명은 67년으로 검토되었다.

Abstract

The major influence factor on carbonation of concrete structures is carbon dioxide concentration. In this study, carbonation analyses with carbon dioxide concentration were carried out by the developed program. Also, the service life of concrete structures was predicted. The carbonation depth was 50mm in case that carbon dioxide concentration was 0.1%. It was shown that the service life of concrete structures with 40mm cover depth was 67 years even though they had been exposed at carbon dioxide concentration 0.1% during 100 years.

Key Words : carbonation, carbon dioxide concentration, carbonation depth, service life

논문 접수 : 2008. 9. 5.

심사 완료 : 2008. 9. 15.

1) 정회원 : 청운대학교 교수

1. 서론

철근콘크리트 구조는 콘크리트의 높은 알칼리성으로 인해 철근 주위에 생성되는 부동태 피막이 철근의 부식을 효과적으로 막아주고 콘크리트의 낮은 인장강도를 철근이 보강해주는 상호보완적인 복합재료라 할 수 있다. 그러나 외기의 이산화탄소에 의해 콘크리트가 탄산화되면 콘크리트 내부 공극용액의 수산화이온이 소모되며 pH 값이 감소하는데, 이러한 조건에서는 철근 표면에 안정적으로 부동태 피막이 형성되지 않아 철근의 부식이 자유롭게 발생된다.

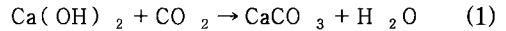
이산화탄소의 유입으로 인한 콘크리트 성질의 변화가 탄산화의 주요 원인이므로 환경요인에 따른 영향인자 중 가장 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 대기 중의 이산화탄소 농도에 따른 탄산화 진행 정도를 개발한 프로그램을 통하여 해석적으로 접근하였다. 또한 해석 프로그램을 통하여 이산화탄소 농도에 따른 내구수명을 산정하였다.

2. 탄산화의 열화 기구

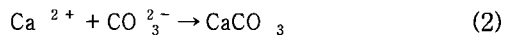
콘크리트 공극에 존재하는 세공용액 속에는 나트륨이온(Na⁺)과 칼륨이온(K⁺) 및 이들과 평형을 이루고 있는 수산화이온(OH⁻)이 해리되어 있는데, 이 때문에 콘크리트 공극용액의 pH는 대략 12.5~13.0 정도의 강알칼리성을 나타내며 이로 인해 철근표면에 부동태피막이 형성된다. 시멘트가 수화하면서 시멘트중량의 25~30%의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 생성되지만 세공용액과 같은 고알칼리 용액에는 거의 용해되지 않고 남아있다¹⁾.

그러나 콘크리트 속에 대기 중의 탄산가스가 침투하여 세공용액과 접촉하면 물에 용해하여 탄산이 되고, 이온 해리하여 탄산수소이온을 생성하는데 이 탄산이온은 세공용액내의 칼슘이온과 결합하여 탄산칼슘을 형성한다¹⁾. 식(1)은 이산화탄소의 유입을 통한 탄산칼슘의 생성

과정을 나타낸다.



식(1)에서 이산화탄소의 유입이 증가하면 이와 반응하는 수산화칼슘이 증가하게 되고 탄산칼슘을 형성하기위한 칼슘이온을 소비하므로 수산화칼슘의 용해를 필요로 한다. 식(2)는 소비된 칼슘이온이 탄산이온과 결합하는 과정을 나타낸 것으로 이로 인해 세공용액의 pH는 감소하기 시작한다^{1)~3)}.



탄산화는 콘크리트의 표면에서 점차 내부로 진행되며 탄산화 영역이 콘크리트 내부의 철근 근처까지 도달하면 강재 표면의 부동태 피막이 파괴되어 철근의 부식이 시작된다.

콘크리트의 탄산화 진행 속도는 콘크리트 내부의 상대습도, 즉 함수비에 크게 영향을 받는다. 상대습도가 너무 높으면 콘크리트를 통한 이산화탄소 확산속도가 감소하여 탄산화 진행 속도도 감소하며, 상대습도가 너무 낮으면 수산화칼슘과 이산화탄소의 반응속도가 감소하기 때문에, 상대습도 50~60% 수준일 때 탄산화 진행 속도가 가장 빠르다^{2),4)}.

환경요인에 따른 영향인자 중 가장 중요한 것은 대기 중의 이산화탄소 농도다. 대기 중의 이산화탄소의 농도는 대략 0.03%(300ppm)이지만 실내에서는 사람의 호흡으로 인한 이산화탄소의 농도 증가로 인해 0.1%(10,000ppm)에 이르는 경우도 있으므로 마감미 없는 실내의 경우는 일반적으로 탄산화의 피해가 크다. 특히 터널이나 배기구, 또는 장기간 정체된 배기가스가 모이는 곳에서는 이런 경향이 더욱 지배적이라고 할 수 있다.

탄산화의 경우에는 임계농도의 개념이 존재하지 않으며, 철근 위치의 콘크리트가 완전히 탄산화되면 철근의 부식이 시작되는 것으로 보는 것이 일반적이다. 실제적인 관점에서는 탄산화 여부를 공극용액의 pH 값을 기준으로 판별하여야 하나, 본 연구는 분석의 간편함을 위해 탄산화 반응에 의해 콘크리트에 축적된 초기 수산화칼슘의 90%가 소모되는 경우, 콘크

리트가 완전히 탄산화된 것으로 간주하였다5).

3. 탄산화 지배 방정식

콘크리트의 탄산화는 크게 이산화탄소 침투와 탄산화 반응의 2가지 과정에 의해 발생된다. 콘크리트 내부로의 이산화탄소 침투는 확산이론으로 설명될 수 있다. 즉, 질량보존과 확산이론으로부터 다음과 같은 이산화탄소 침투 지배방정식을 구성할 수 있다6)~8).

$$\frac{\partial}{\partial t} [p(1-S)[CO_2]] = \nabla [D_{CO_2} \nabla [CO_2]] - p S r_{CH} \quad (3)$$

여기서, p : 공극비

S : 함수비

$[CO_2]$: 이산화탄소 농도 (mol/m³)

D_{CO_2} : 이산화탄소 확산계수 (m²/s)

r_{CH} : 탄산화 반응 속도 (mol/s)

탄산화 반응 속도, r_{CH} 는 다음 식을 사용하여 모사하였다.

$$r_{CH} = - \frac{\partial [Ca(OH)_2]}{\partial t} = HRTk_2[OH^-]_{eq}[CO_2]f_{rCH,1}(RH)f_{rCH,2}(Ca[OH]_2) \quad (4)$$

여기서, $[Ca(OH)_2]$: 수산화칼슘 농도 (mol/m³)

H : Henry 상수

k_2 : 반응 상수

$[OH^-]_{eq}$: 포화상태 수산화이온 농도(43.2 mol/m³)

$$f_{rCH,1}(RH) = \begin{cases} 0 & 0 \leq RH \leq 50 \\ 2.5(RH/100-0.5) & 50 \leq RH \leq 90 \\ 1 & 90 \leq RH \end{cases}$$

$$f_{rCH,2}([Ca(OH)_2]) = \frac{[Ca(OH)_2]}{[Ca(OH)_2]_0}$$

$$[Ca(OH)_2]_0 = \frac{3}{2}[C_3S] + \frac{1}{2}[C_2S] - 4[C_4AF] - [C_3A]$$

초기수산화칼슘 농도 (mol/m³)

여기서 []는 각 시멘트 성분의 농도.

식(3)에 식(4)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 탄산화 지배 방정식을 유도할 수 있다8).

$$\frac{\partial [CO_2]}{\partial t} = \frac{D_{CO_2}}{C_1} \nabla^2 [CO_2] - C_2 [CO_2] \quad (5)$$

여기서, $C_1 = p(1-S)$

$$C_2 = \frac{pS \times HRTk_2 [OH^-]_{eq} f_{rCH,1} f_{rCH,2}}{C_1}$$

4. 유한요소 정식화

$[CO_2](x, y, z, t)$ 를 시간에 대한 함수인 $\{co_2(t)\}$ 와 형상함수 $N(x, y, z)$ 의 곱으로 표현하고 이를 식(5)에 대입하여 Galerkin법을 적용하면 다음과 같은 유한요소 방정식을 유도할 수 있다.

$$[k]\{co_2(t)\} + [c] \left\{ \frac{\partial co_2(t)}{\partial t} \right\} = \{q\} \quad (6)$$

여기서,

$$[k] = \int_V \frac{D_{CO_2}}{C_1} \left(\frac{\partial N^T}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N^T}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{\partial N^T}{\partial z} \frac{\partial N}{\partial z} \right) dV + \int_V C_2 [N]^T [N] dV$$

$$[c] = \int_V [N]^T [N] dV$$

$$\{q\} = \int_S [N]^T \frac{D_{CO_2}}{C_1} \frac{\partial [CO_2]}{\partial n} dS$$

식(4)에서 경계조건에 해당하는 $\{q\}$ 의 표면부 이산화탄소 유속항인 $\partial [CO_2] / \partial n$ 은 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{CO_2} \frac{\partial [CO_2]}{\partial n} = f_{CO_2} ([CO_2]_{en} - [CO_2]_s) \quad (7)$$

여기서, f_{CO_2} : 이산화탄소 표면계수 (m/s)

$[CO_2]_{en}$: 외기의 이산화탄소 농도 (mol/m³)

$[CO_2]_s$: 콘크리트 표면의 이산화탄소 농도 (mol/m³)

식(5)를 식(4)에 대입하면 식(4)의 $[k]$ 와 $\{q\}$ 가 다음과 같이 수정된다.

$$[k] = [k] + \int_S f_{CO_2} [N]^T [N] dS$$

$$\{q\} = \int_{\Omega} f_{CO_2} [N]^T [CO_2]_{en} dS$$

최종적으로는 각 요소별로 식(6)을 적용하여 유도된 유한요소 방정식을 전체 구조물에 대해 중첩하여 다음과 같이 전체 구조물에 대한 탄산화 유한요소 방정식을 구할 수 있다.

$$[K]\{CO_2\} + [C]\left\{\frac{\partial [CO_2]}{\partial t}\right\} = \{Q\} \quad (8)$$

여기서, $\{CO_2\} = \sum_e \{co_2(t)\}$

$$[K] = \sum_e [k]$$

$$[C] = \sum_e [c]$$

$$\{Q\} = \sum_e \{q\}$$

5. 이산화탄소 확산계수

이 연구에서 이산화탄소 확산계수는 Papadakis와 Saetta 등의 실험결과를 바탕으로 다음 수식과 같이 콘크리트의 공극비, 상대습도, 온도의 함수로 표현하였다(2~4),6),7).

$$D_{CO_2}(p_c, RH, T) = f_{CO_2,1}(p_c) f_{CO_2,2}(RH) f_{CO_2,3}(T) \quad (9)$$

여기서, $f_{CO_2,1}(p_c) = 1.64 \times 10^{-6} \times p_c^{1.8}$

p_c : 시멘트 페이스트의 공극비

$$f_{CO_2,2}(RH) = (1 - RH/100)^{2.2}$$

$$f_{CO_2,3}(T) = \exp\left[\frac{U}{R} \times \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

6. 해석 및 결과 분석

6.1 해석조건

1종포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트 강도 27MPa인 부분에 대하여 세 가지 이산화탄소 농도(0.035, 0.5%, 0.1 vol.)에 대해 탄산화 해석을 수행하고, 그 결과로부터 각각의 내구수

명을 산정하였다. 가정한 농도는 각각 일반적인 대기과 산업지대 대기의 이산화탄소 농도중 보통인 경우와 심한 경우에 해당된다(6). 이 때, 외기의 온도는 20℃, 상대습도는 75%로 가정하였다. 사용한 콘크리트의 배합 조건은 표 1과 같다.

표 1 사용한 콘크리트 배합

굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	단위수량 (kg)	굵은골재함수율 (%)	잔골재함수율 (%)
25	12	44	174	0.8	1.0

6.2 해석결과 및 분석

그림 1에서 그림 3은 구조물이 탄산화에 노출된 지 100년이 지났을 때, 콘크리트 내부의 수산화칼슘 농도 분포를 나타낸 것으로서 그림 1은 이산화탄소 표면 농도가 0.035% vol.일 때, 그림 2는 0.05% vol.일 때, 그림 3은 0.1% vol.일 때의 해석 결과이다.

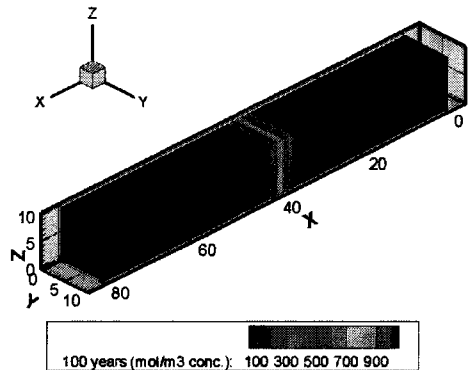


그림 1 수산화칼슘 농도 분포 (이산화탄소 표면농도 0.05%)

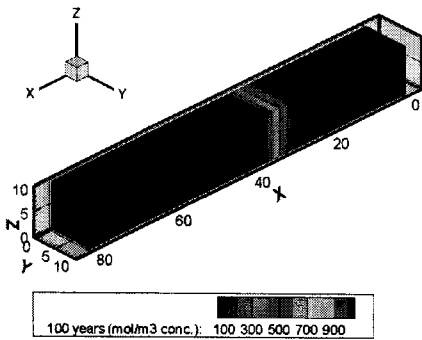


그림 2 수산화칼슘 농도 분포 (이산화탄소 표면농도 0.035%)

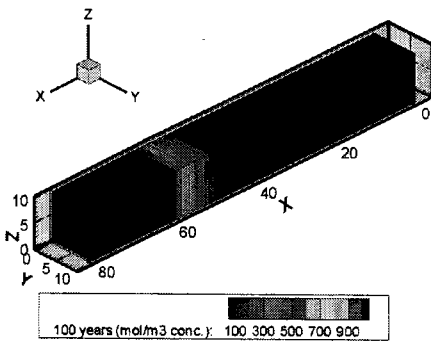


그림 3 수산화칼슘 농도 분포 (이산화탄소 표면농도 0.1%)

그림 4에서 그림 6은 구조물이 탄산화에 노출된 지 20, 50, 100년이 지났을 때, 콘크리트 내부의 수산화칼슘 농도 분포 이력을 나타낸 것으로서 그림4는 이산화탄소 표면 농도가 0.035% vol.일 때, 그림 5는 0.05% vol.일 때, 그림 6은 0.1% vol.일 때의 해석 결과이다. 그림에 나타난 탄산화 깊이는 초기 수산화칼슘 농도의 90% 이상 소모되는 것을 기준으로 계산되었다. 해석 결과를 살펴보면, 이산화탄소 표면농도가 0.035%, 0.05% 각각의 경우 100년간의 노출 이후에도 탄산화 깊이가 각각 29mm, 35mm에 머물고 있다. 이산화탄소 표면농도가 0.1%인 경우도 탄산화 깊이가 50mm

로 나타나서 콘크리트의 피복두께를 50mm를 초과에서 유지한다면 이산화탄소의 영향이 심각한 환경에서도 구조물은 100년 이상의 내구수명을 유지할 수 있다. 콘크리트의 피복두께를 40mm를 유지하고 주어진 환경 및 재료 조건에 대해 탄산화 해석을 수행하여 내구수명을 계산하였으며, 그 결과 이산화탄소 표면 농도가 0.035%일 때는 탄산화 내구수명이 약 188년, 0.05%일 때는 약 131년, 0.1%일 때는 67년으로 검토되었다.

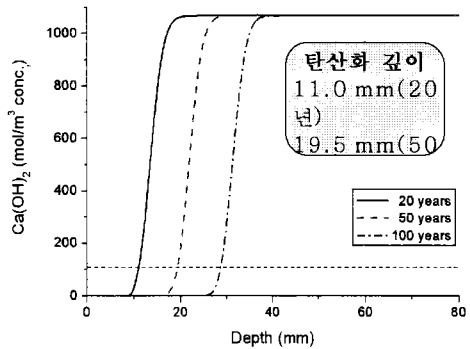


그림 4 수산화칼슘 농도 분포 이력 (이산화탄소 표면농도 0.035%)

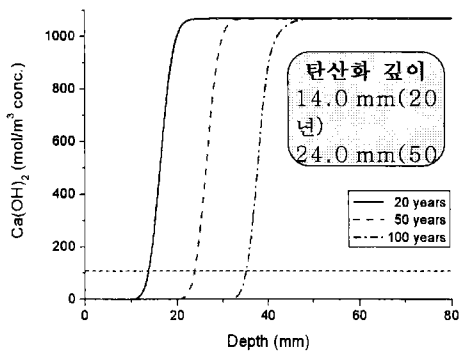


그림 5 수산화칼슘 농도 분포 이력 (이산화탄소 표면농도 0.05%)

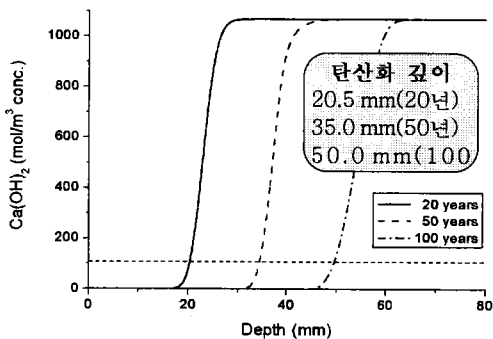


그림 6 수산화칼슘 농도 분포 이력
(이산화탄소 표면농도 0.1%)

7. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 탄산화 과정을 모사할 수 있는 해석프로그램을 개발하였으며 개발한 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.

이산화탄소 표면농도가 0.035%, 0.05%, 0.1%인 상태로 100년간 노출되면 탄산화 깊이가 각각 29mm, 35 mm, 50mm에 머물고 있다. 콘크리트의 피복두께를 40mm를 유지하고 주어진 환경 및 재료 조건에 대해 내구수명을 계산한 결과 이산화탄소 표면 농도가 0.035%일 때는 탄산화 내구수명이 약 188년, 0.05%일 때는 약 131년, 0.1%일 때는 67년으로 검토되었다.

참고문헌

1. Neville, A.M., "Properties of Concrete", John Wiley & Sons, Inc., pp. 497-506, Fourth Ed.
2. Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., and Fardis, M.N., "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete", ACI Materials Journal, Vol.88, No.2, pp. 186-196, 1991
3. Papadakis, V.G., Fardes M.N., and Vayenas, C.G., "Hydration and Carbonation of Pozzolan Cements", ACI Materials

Journal, Vol.89, No.2, pp. 119-130, 1992

4. Saetta, A.V., Schrefler, B.A., and Vitaliani, R.V., "The Carbonation of Concrete and the Mechanism of Moisture, Heat and Carbon Dioxide Flow through Porous Materials", Cement and Concrete Research, Vol.23, No.4, pp. 761-772, 1993

5. Houst, Y.F., and Wittmann, F.H., "Depth Profiles of Carbonates Formed During Natural Carbonation", Cement and Concrete Research, Vol.32, pp. 1923-1930, 2002

6. Saetta, A.V., and Vitaliani, R.V., "Experimental Investigation and Numerical Modeling of Carbonation Process in Reinforced Concrete Structures - Part I Theoretical Formulation", Cement and Concrete Research, Vol.34, No.4, pp. 571-579. 2004

7. Saetta, A.V., and Vitaliani, R.V., "Experimental Investigation and Numerical Modeling of Carbonation Process in Reinforced Concrete Structures - Part II Practical Applications", Cement and Concrete Research, Vol.35, No.5, pp. 958-967. 2005

8. Kim, C.Y., "Numerical Study on Steel Corrosion in Concrete Exposed to Carbonation and Chloride Attack", Doctoral Dissertation, KAIST, 2008

양주경



한국과학기술원 토목공학과 (공학박사)
현 청운대학교 철도행정토목학과 부교수
관심분야 : 콘크리트 구조 및 재료