

# 균열 폭 및 깊이가 염소이온 침투 및 탄산화에 미치는 영향에 대한 해석적 연구

## Analytical study of the influence of crack width and depth on the penetration of chloride ion and the carbonation

김진용\*      김진근\*\*  
Kim, Chin Yong      Kim, Jin Keun

### ABSTRACT

Chloride ion penetration and carbonation are the most important factors in the durability problems of reinforced concrete structures. Most of the existing studies on those subjects are focused on the no-crack concrete, though the existence of crack may strongly affect the chloride ion penetration and carbonation. To evaluate the influence of crack on the chloride ion penetration and carbonation and to assess the service life of reinforced concrete more accurately, finite volume analyses (FVA) were performed based on the FV mesh containing the ideal crack whose width is uniform along the depth. Analytical results show that the influence of crack width and depth is much more pronounced for the chloride ion penetration than for the carbonation.

### 1. 서론

철근 콘크리트 구조는 콘크리트의 높은 알칼리성이 철근을 부식으로부터 보호하고, 철근의 높은 인장강도가 콘크리트의 낮은 인장강도를 보완하는 내구성이 우수한 합성재료이다. 그러나 해양환경이나 제빙염에 노출되는 경우에는 외부로부터 유입된 염소이온이 철근 주위의 부동태 피막을 파괴하고, 외기 중의 이산화탄소가 콘크리트 내부의 수산화칼슘 및 C-S-H 겔과 반응하면 콘크리트 내부 공극수의 pH를 감소시켜 철근 콘크리트 내부에 매입된 철근의 부식이 유발된다. 이러한 현상을 각각 염소이온 침투, 탄산화 현상이라고 부르며, 이러한 두 가지 현상이 철근 콘크리트 구조의 내구수명을 결정하는 가장 큰 영향요인이 된다.

염소이온 침투와 탄산화 현상에서 가장 중요한 재료 특성은 외부로부터 유입되는 유해물질의 침투 속도, 즉 염소이온 침투의 경우에는 염소이온 확산계수, 탄산화의 경우에는 이산화탄소 확산계수라 할 수 있다. 기존의 연구들도 주로 이들 두 가지 재료 특성을 정량적으로 평가하거나 이를 측정하는 방법에 주로 초점을 맞추고 있다. 그러나 이러한 기존의 연구들은 균열이 없는 비균열 콘크리트를 대상으로 염소이온 확산계수나 이산화탄소 확산계수를 측정하고 있어, 균열이 발생한 콘크리트에 대해서 그

\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

\*\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

값을 그대로 적용하면 철근 콘크리트 구조의 내구수명을 과대평가하는 위험이 따를 수 있다. 따라서 실제 철근 콘크리트 구조의 내구수명을 정확하게 산정하기 위해서는 균열이 있는 콘크리트에서 발생하는 염소이온 침투 및 탄산화에 대한 정확한 평가가 우선적으로 이루어져야 하겠다. 이 연구에서는 균열 폭과 균열 깊이를 주요 변수로 하여 콘크리트에 발생한 균열이 염소이온 침투 및 탄산화에 미치는 영향을 수치해석을 통해 알아보려고 하였다.

## 2. 재료 모델

### 2.1 염소이온 침투 프로그램에 사용된 재료 모델

실제의 염소이온 침투 과정은 염소이온 확산뿐만 아니라 염소이온 고정화, 모세관 흡수 및 콘크리트 내부의 수분이동이 복합적으로 작용하여 발생하는 현상이다. 그러나 이 연구에서는 균열의 영향을 평가하는 것에 초점을 맞추고, 해석의 편의를 위해 완전 포화된 콘크리트를 대상으로 염소이온 침투 프로그램을 작성하였다. 주요 재료 모델은 ACI의 염소이온 침투 프로그램인 LIFE 365에서 채택된 모델을 사용하였다<sup>1)</sup>. 구체적인 모델은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1 염소이온 침투 프로그램에 사용된 재료 모델

재료 특성		사용된 재료 모델
염소이온 확산계수	물/결합재 비( $w/b$ )의 영향	$D_{Cl,28} = 1 \times 10^{(-12.06+2.4w/b)} \text{ m}^2/\text{s}$
	재령( $t$ )의 영향	$D_{Cl}(t) = D_{Cl,28} \times \left(\frac{28}{t}\right)^m$
	온도( $T$ )의 영향	$D_{Cl}(T) = D_{Cl}(293) \times \exp\left[\frac{U}{R} \times \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T}\right)\right]$

### 2.2 탄산화 프로그램에 사용된 재료 모델

탄산화는 이산화탄소 확산과 탄산화 반응이 복합적으로 발생하는 현상으로서, 이산화탄소 확산계수 뿐만 아니라 탄산화 반응 속도 및 탄산화 반응이 가능한 수화반응 생성물의 양이 탄산화 해석 결과에 많은 영향을 미친다. 이 연구에서는 Houst 등과 Papadakis 등에 의해 수행된 이산화탄소 확산계수 측정실험의 결과를 바탕으로 이산화탄소 확산계수 모델을 결정하였으며<sup>2), 3)</sup>, Papadakis 등이 제안한 모델을 바탕으로 탄산화 반응속도 및 탄산화 반응이 가능한 수화반응 생성물의 양을 결정하였다<sup>4)</sup>. 구체적인 모델은 표 2에 나타난 바와 같다.

표 2 탄산화 프로그램에 사용된 재료 모델

재료 특성		사용된 재료 모델
이산화탄소 확산계수	공극비( $\phi$ )의 영향	$D_{CO_2,ref} = 2.62 \times 10^{-6} \times \phi^{2.96} \text{ m}^2/\text{s}$
	상대습도( $RH$ ) 및 온도( $T$ )의 영향	$D_{CO_2}(RH,T) = D_{CO_2,ref} \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{0.15} \times \exp\left[\frac{U}{R} \times \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T}\right)\right]$
탄산화 반응 속도		$r_{CH} = HRTk_2[OH]_{eq}[CO_2]$
수산화칼슘 생성량		$[Ca(OH)_2]_b = \frac{3}{2}[C_3S] + \frac{1}{2}[C_2S] - 4[C_4AF] - [C_3A]$

### 2.3 해석 알고리즘

염소이온 침투 및 탄산화 해석 프로그램은 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 바탕으로 작성되었다<sup>5)</sup>. FVM은 미분방정식의 풀이에서 flow 값의 연속성을 유지할 수 있다는 장점이 있어 유체

나 열전달 문제에서 널리 사용되는 해석 방법이다.

### 3. 균열 영향 해석

모든 해석과정에서 균열 폭과 균열 깊이를 제외한 나머지 물성치는 동일한 값을 사용하였으며 구체적인 값은 표 3에 나타낸 바와 같다. 이 때 균열 내부에서의 염소이온 확산계수는 수중에서의 염소이온 확산계수인  $1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였으며<sup>6)</sup>, 균열 내부에서의 이산화탄소 확산계수는 이산화탄소 확산이 순수하게 이산화탄소 분자끼리의 브라운 운동에 의해서만 일어난다는 가정하에 계산된 값인  $5.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다<sup>2)</sup>.

표 3 해석에 사용된 물성치

염소이온 침투 해석	탄산화 해석
물/결합재 비 : 0.5	단위 수량 : 180 kgf/m <sup>2</sup>
외기 온도 : 20 ℃	단위 시멘트량 : 360 kgf/m <sup>2</sup>
염소이온 표면농도 : 0.3 % wt. conc.	외기 온도 : 20 ℃
염소이온 입계농도 : 0.05 % wt. conc.	상대습도 : 70 %
피복 두께 : 60 mm	이산화탄소 표면농도 : 0.07 % wt. vol.
실리카폼 대체율 : 10 %	피복 두께 : 40 mm

균열 폭과 깊이의 영향을 알아보기 위해 그림 1과 같이 염소이온과 이산화탄소가 1방향(위에서 아래 방향)으로 침투하면서 침투 방향에 평행하게 폭이 일정한 균열이 존재하는 유한체적 mesh를 구성하였다. 그림 2는 균열 폭 0.1 mm, 균열 깊이 30 mm인 경우에 대해 염소이온 침투 시작 10년 후의 염소이온 농도 분포를 나타낸 것이며, 그림 3은 균열 폭 0.1 mm, 균열 깊이 20 mm인 경우에 대해 이산화탄소 침투 시작 30년 후의 이산화탄소 농도 분포를 나타낸 것이다.

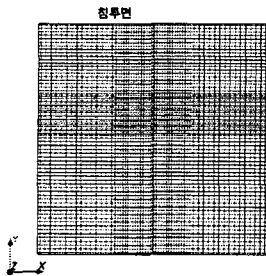


그림 1 FV mesh

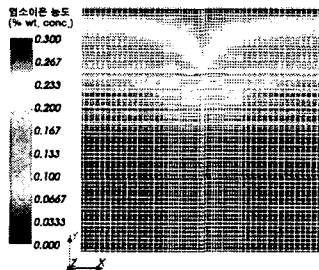


그림 2 염소이온 침투 해석 예

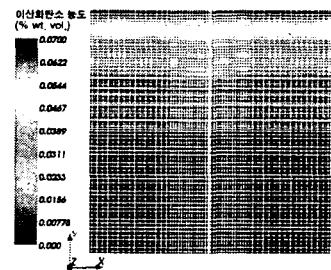


그림 3 탄산화 해석 예

그림 2와 3을 비교하면, 두 경우 모두 균열 폭이 0.1 mm로 동일하지만 염소이온 침투의 경우에 균열 부근에서 나타나는 유해 물질의 침투 가속 현상이 더 명확하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

그림 4는 균열 깊이를 피복 두께의 절반으로 일정하게 유지하면서 균열 폭을 0.05 mm에서 0.4 mm까지 변화시켰을 때, 염소이온 침투와 탄산화에 대한 상대 수명의 변화 추이를 나타낸 것이다. 상대 수명은 균열 폭이 0.1 mm인 경우의 사용 수명을 기준으로 하여 계산하였다. 그림 5는 균열 폭을 0.2 mm로 일정하게 유지하면서 (균열 깊이/피복 두께) 비(=  $d_{crk}/d_{cov}$ )를 0.2에서 0.8까지 변화시켰을 때, 염소이온 침투와 탄산화에 대한 상대 수명의 변화 추이를 나타낸 것이다. 이 때 상대 수명은  $d_{crk}/d_{cov} = 0.2$ 인 경우의 사용 수명을 기준으로 하여 계산하였다.

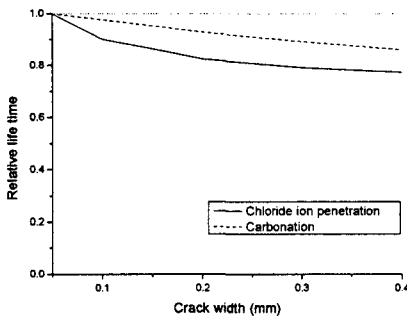


그림 4 균열 폭에 따른 상대 수명 변화

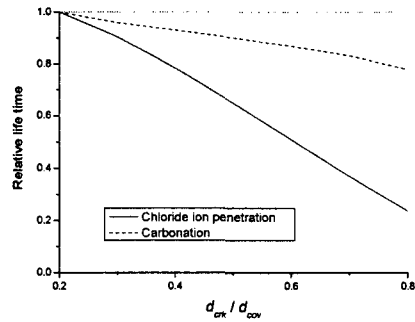


그림 5 균열 깊이비에 따른 상대 수명 변화

그림 4와 5를 통해서 염소이온 침투의 경우가 탄산화의 경우보다 균열의 영향, 특히 균열 깊이의 영향이 더 크게 작용함을 확인할 수 있는데, 이러한 경향은 Schutter가 실험을 통해 내린 결론과 잘 부합되고 있다<sup>7)</sup>.

#### 4. 결론

균열 폭과 깊이를 변화시키면서 균열 콘크리트에 대한 염소이온 침투와 탄산화 해석을 수행한 결과 염소이온 침투가 탄산화보다 균열의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 대림산업, GS건설(주), POSCO건설(주), VSL Korea의 콘크리트 균열제어 콘소시움 과제의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. M. D. Thomas, E. C. Bentz, "Life-365 : Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides", 2000
2. Y. F. Houst, F. H. Wittmann, "Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through hydrated cement paste", Cement and Concrete Research, Vol. 24, 1994, No. 6, pp. 1165-1176.
3. V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, M. N. Fardis, "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete", ACI Materials Journal, Vol. 88, 1991, No. 2, pp. 186-196.
4. V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, M. N. Fardis, "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation", ACI Materials Journal, Vol. 88, 1991, No. 4, pp. 363-373.
5. S. V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw-Hill Book Company.
6. E. J. Garboczi, D. P. Bentz, "Computer simulation of the diffusivity of cement-based materials", Journal of Materials Science, Vol. 27, 1992, pp. 2083-2092.
7. G. D. Schutter, "Quantification of the influence of cracks in concrete structures on carbonation and chloride penetration", Magazine of Concrete Research, Vol. 51, 1999, No. 6, pp. 427-435.