

# 중성화된 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 유효확산계수 예측

## The Expectation of Effective Diffusion Coefficient of CO<sub>2</sub> on Carbonated Concrete

이 창 수\*  
Lee, Chang Soo

윤 인 석\*\*  
Yoon, In Seok

이 규 동\*\*  
Lee, Kyu Dong

권 재 근\*\*\*  
Kwon, Jae Keun

---

### ABSTRACT

Carbonation of concrete decreases durability of RC structures due to failure of passive film of rebar. Therefore, expecting carbonation depth is a governing parameter of service life prediction for RC structures. This study attempt to estimate carbonation depth quantitatively by using equivalent effective diffusion coefficient of CO<sub>2</sub>.

---

### 1. 서론

콘크리트 경화체는 시멘트와 배합수의 화학적 반응에 의해 생성되기 때문에 콘크리트 구조체의 내구성을 합리적으로 평가하기 위해서는 수화율과 외부 열화인자의 반응을 고려한 물리화학적인 고찰이 필요하다. 특히 콘크리트의 중성화 현상은 매입 철근의 부식을 간접적으로 평가할 수 있는 인자이기 때문에 지금 까지 국내외에서 많은 연구가 진행되어 왔다.

대기 중의 CO<sub>2</sub>가스는 콘크리트 구성성분과 반응하여 중성화 진행면과 콘크리트 표면사이에서 발생하는 농도차 인에 지속적으로 중성화 현상이 진행된다. 결과적으로 콘크리트의 열화현상을 정량적으로 평가하기 위해서는 콘크리트의 수화물 생성농도 및 시간, 열화인자의 반응속도, 유효확산계수 등을 고려해야만 한다. 본 연구에서는 물리화학적인 반응을 고찰하여 배합과 양생조건에 따라 일정한 물리적 특성을 갖는 등가의 유효확산계수를 역으로 산출하는 방법을 제시하고자 한다.

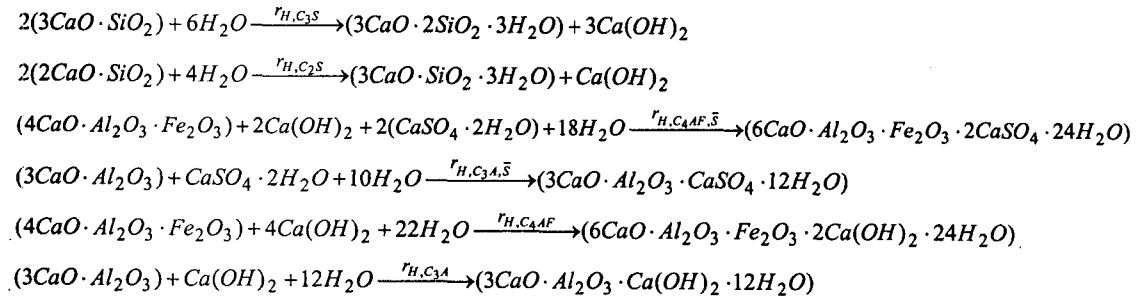
### 2. 콘크리트의 화학반응

#### 2.1 콘크리트의 수화반응과 화합물

보통 포틀랜드시멘트는 표 1과 같이 일정범위의 화합물로 구성되어 있으며 양생기간 중 각각의 혼합물은 배합수와 결합하여 수화반응을 일으키며 반응 원리는 다음과 같다. (Prunauer and Copeland, 1964; Bensted, 1983; Frigione, 1983; Taylor, 1986)

---

\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 서울특별시 토목사무관



위의 반응원리를 이용하여 식(1)과 (2)와 같이 CSH와 CH의 반응속도를 구할 수 있다.

$$r_{H,CSH} = (1/2)(r_{H,C_3S} + r_{H,C_2S}) \tag{1}$$

$$r_{H,CH} = (3/2)r_{H,C_3S} + (1/2)r_{H,C_2S} - 2r_{H,C_4AF,\bar{S}} - 4r_{H,C_4AF} - r_{H,C_3A} \tag{2}$$

표 1 보통 포틀랜드시멘트의 주요 화합 물량

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
보통 포틀랜드시멘트	50 %	25 %	9 %	9 %

## 2.2 콘크리트의 수화율과 화합물의 농도 변화

### 2.2.1 초기농도 및 수화율

초기 콘크리트 화합물의 농도와 시간에 따른 수화율의 변화는 콘크리트의 종류, 온도, 배합비에 따라 다양한 값을 가지게 되며 보통 포틀랜드시멘트의 경우는 표 2와 3과 같이 Taylor의 Power-law Kinetic Expression를 이용하여 계산할 수 있다.

표 2 보통 포틀랜드시멘트의 물성치 계산

항 목	계산식
반응속도	$r_{H,i} = (k_{H,i} / [i]_0^{n_i-1}) / [i]^{n_i}$
수화율	$F_i = 1 - [i] / [i]_0 = 1 - (1 - k_{H,i}(t_{cu} + t)(1 - n_i))^{1/(1-n_i)}$
초기농도	$[i]_0 = \frac{m_i \rho_c (1 - \epsilon_{air})}{MW_i \left( 1 + \frac{w}{c} \frac{\rho_c}{\rho_w} + \frac{a}{c} \frac{\rho_c}{\rho_a} \right)}$

표 3 보통 포틀랜드시멘트의 물성치

성 분 i	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	C $\bar{S}$ H <sub>2</sub>
지 수 n <sub>i</sub>	2.65	3.10	3.81	2.41	-
반 응 상 수 k <sub>H,i</sub>	1.17	0.16	1.00	2.46	-
물중량 MW <sub>i</sub> × 10 <sup>3</sup> , kg/mol	220.30	172.22	485.96	270.18	172.17

### 2.2.2 콘크리트 수화생성물의 농도 변화<sup>1)</sup>

포틀랜드 시멘트의 C<sub>3</sub>A와 C<sub>4</sub>AF는 초기 반응속도가 매우 크게 때문에 초기경화를 막고 작업시간을

확보하기 위해 약 3%내외의  $\overline{CSH}_2$ 가 첨가된다. 따라서 콘크리트의 경화반응은 식(3)과 같이  $\overline{CSH}_2$  소비시간을 계산하여  $\overline{CSH}_2$ 가 존재하는 시기와 완전히 소비된 이후로 나누어서 평가해야만 한다.

$$[C_3A]_0 F_{C_3A}(t^*) + 2[C_4AF]_0 F_{C_4AF}(t^*) = [\overline{CSH}_2]_0 \quad (3)$$

포틀랜드 시멘트의  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$ ,  $C_3A$ 는 반응시간이 지남에 따라 식(1)과 식(2)의 몰비에 따라 경화생성물질인 CH와 CSH로 전환된다.

$$[Ca(OH)_2] = \begin{cases} \frac{3}{2}[C_3S]_0 F_{C_3S} + \frac{1}{2}[C_2S]_0 F_{C_2S} - 2[C_4AF]_0 F_{C_4AF} & 0 \leq t \leq t^* \\ \frac{3}{2}[C_3S]_0 F_{C_3S} + \frac{1}{2}[C_2S]_0 F_{C_2S} - 4[C_4AF]_0 F_{C_4AF} - [C_3A]_0 F_{C_3A} + [\overline{CSH}_2]_0 & t > t^* \end{cases}$$

$$[CSH] = \frac{1}{2}[C_3S]_0 F_{C_3S} + \frac{1}{2}[C_2S]_0 F_{C_2S}$$

$$[C_3S] = [C_3S]_0 (1 - F_{C_3S})$$

$$[C_2S] = [C_2S]_0 (1 - F_{C_2S})$$

서울시 도심지 구조물의 중성화 깊이를 본 연구결과와 비교하기 위하여 현장시험 결과로부터 표 4와 같이 배합비를 가정하였으며 이를 바탕으로 재령에 따른 화합물의 농도변화를 그림 1과 같이 나타내었다.

표 4 콘크리트 배합비

w/c	$\rho_w$	$\rho_c$	$\rho_a$	a/c	$\epsilon_{air}$
0.6	1000	3100	2500	3	4.5(%)

### 3. 콘크리트의 중성화 반응<sup>2)</sup>

콘크리트의 중성화 반응은 식(4)와 같이 공극수에 용해된 칼슘이온과 외기로부터 유입되어 용해된 탄산이온의 화학반응으로 중성의 탄산칼슘을 생성하는 연속적인 반응이다.



결과적으로 콘크리트의 중성화 반응을 수치적으로 계산하기 위해서는 콘크리트 공극 내부에 존재하는  $CO_2$ ,  $Ca(OH)_2(s)$ ,  $Ca(OH)_2(aq)$ , CSH,  $C_3S$ ,  $C_2S$ 의 질량보존의 관계를 이용해야만 한다. 콘크리트의 수화물과 질량보존의 법칙을 이용하여 구한 중성화 속도식은 식(5)와 같다.

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO]_2^i}{[Ca(OH)_2]^i + 3[CSH]^i + 3[C_3S]^i + 2[C_2S]^i} t} \quad (5)$$

### 4. 해석결과 및 고찰

배합에 따른 유효확산계수를 계산하기 위하여 기존의 중성화 촉진시험 결과를 이용하였으며 최근 들어 대도시의 이산화탄소농도가 크게 증가하고 있음을 고려하여 대기 중의 이산화 탄소농도를 0.06%로 가정한 후 중성화 깊이를 예측하고 그림 2와 같이 키시다니 예측식의 결과와 비교하였다.

해석결과, 공용년수 30년을 기준으로 결과치가 약 10% 정도의 차이가 보였지만 해석모델의 배합비를 정확히 알 수 없는 상황을 고려해 보았을 때 상당히 유의한 결과를 보인 것으로 사료된다. 그리고 계산된 유효확산계수의 경우 많은 가정에 구해진 식이기 때문에 정확한 유효확산계수라고 하기에는

어려울 수 있지만 구조물의 배합비, 양생기간, 공용년수 등을 종합적으로 고려할 경우 일정한 함수관계를 가지며 중성화 촉진 시험 결과와 현장시험 결과를 정량적으로 비교 평가 할 수 있는 등가의 유효확산계수로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

- (1) 콘크리트의 중성화 현상을 정량적으로 평가하기 위해서는 수화율, 수화물 농도, 양생기간, 배합비, 이산화탄소농도 등을 종합적으로 고려해야만 한다.
- (2) 촉진시험결과로부터 유추한 등가의 유효확산계수는 현장시험결과와도 우수한 상관성을 보였다.
- (3) 국내 도심구조물의 실정에 맞는 중성화 속도식을 개발하기 위해서는 공용중인 콘크리트 구조물의 배합비와 초기 양생조건에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

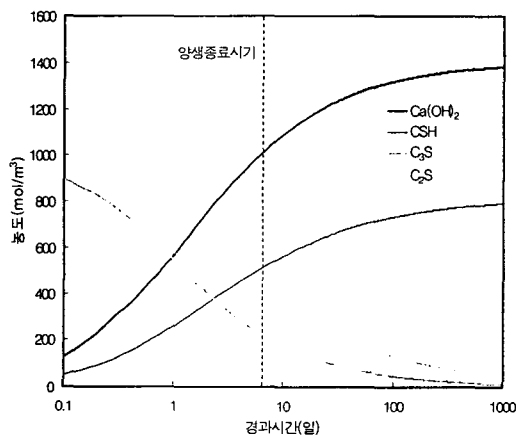


그림 1 콘크리트 수화생성물의 농도변화

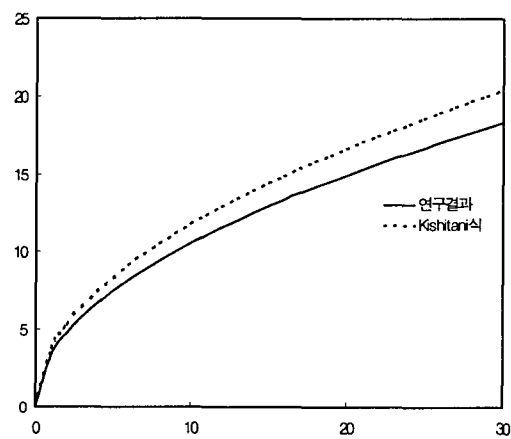


그림 2 콘크리트 구조물의 중성화 깊이

### 표 기

w/c	물시멘트비	C <sub>3</sub> S	3(CaO · SiO <sub>2</sub> )	$\overline{CSH}_2$	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O
a/c	골재시멘트비	C <sub>2</sub> S	2(CaO · SiO <sub>2</sub> )	[K] <sub>0</sub>	K수화물의 초기농도 (mol/m <sup>3</sup> )
ε <sub>air</sub>	초기공기량	C <sub>3</sub> A	3CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[K] <sup>i</sup>	K수화물의 양생 후 농도 (mol/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>c</sub>	시멘트밀도(kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>4</sub> AF	4CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$D_{e,CO_2}^c$	유효확산계수(m <sup>2</sup> /sec)
ρ <sub>w</sub>	배합수밀도(kg/m <sup>3</sup> )	CH	Ca(OH) <sub>2</sub>		
ρ <sub>a</sub>	골재밀도(kg/m <sup>3</sup> )	CSH	Calcium Silicate Hydrate		

### 참고문헌

1. G. Papadakis et. al, "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 88, No 2, pp. 186-196, 1991.
2. G. Papadakis et. al, "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation," ACI Materials Journal, Vol. 88, No 4, pp. 363-373, 1991.