

균열부 콘크리트의 중성화에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Carbonation in Cracked Concrete

권성준* 송하원** 변근주**
Kwon, Seung-Jun Song, Ha-Won Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

Major deterioration in concrete structures are salt attack and carbonation. Especially severe problems due to carbonation occur in the concrete structures of city, tunnel, underground structures. Cracks in concrete during service life including early age due to hydration heat and/or shrinkage accelerate the diffusion of concrete so that the deterioration is also accelerated.

In this study, carbonation depths of both non-cracked concrete and cracked concrete are evaluated and weight change test and TGA are carried out. Through the tests, a relation between water-cement ratio and carbonation depth is derived and also carbonation increase rate is derived in the function of crack width.

1. 서론

현재 콘크리트의 내구성 문제중 가장 심각하게 평가되고 있는 것이 염해와 중성화라고 할 수 있다. 그중 중성화는 도심지, 터널, 지하구조물 등에서 주로 심각하게 평가되고 있는데 이러한 중성화에 대한 현재의 연구수준은 거의 건전부에 대한 연구에 국한하고 있다. 그러나 콘크리트에서는 초기재령에서 발생한 수화열 또는 건조수축에 의한 균열 뿐 아니라 사용중의 균열이 발생하기도 하며 일부 구조물에서는 이를 허용하기도 한다.

건전부 콘크리트에서는 기상 및 액상의 이산화탄소의 확산을 통하여 내부의 콘크리트 조성이 변하게 되며 pH의 감소를 가져오게 된다. 그러나 일단 균열이 발생하게 되면 건전부에서의 이산화탄소의 확산 뿐 아니라 균열부에서의 기상 이산화탄소의 침투가 추가적으로 발생하게 되어 건전부보다 빠르게 이산화탄소의 확산이 발생하게 된다.

본 연구에서는 축진 중성화 실험을 통하여 건전부와 균열부의 중성화 깊이를 평가하였으며 중량변화시험과 TGA 분석을 수행하였다. 한편 콘크리트의 특성을 나타낼 수 있는 몰시멘트비와 중성화 깊이의 상관관계와 균열폭에 따른 중성화 깊이의 증가율을 정량적으로 도출하였다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 건전부 및 균열부의 중성화 특성

건전부와 균열부에 대한 이산화탄소의 확산문제를 정식화하기 위해서는 균열을 가진 콘크리트의 대표체적요소(Representative Elementary Volume: REV)를 그림 1과 같이 가정할 수 있다. 기존의 균열부에 대한 물질이동 연구에 의하면^{1),2)}, 아래의 그림 1과 같이 균열부와 건전부의 확산계수를 등가 확산계수로 평균화시킬 수 있다.

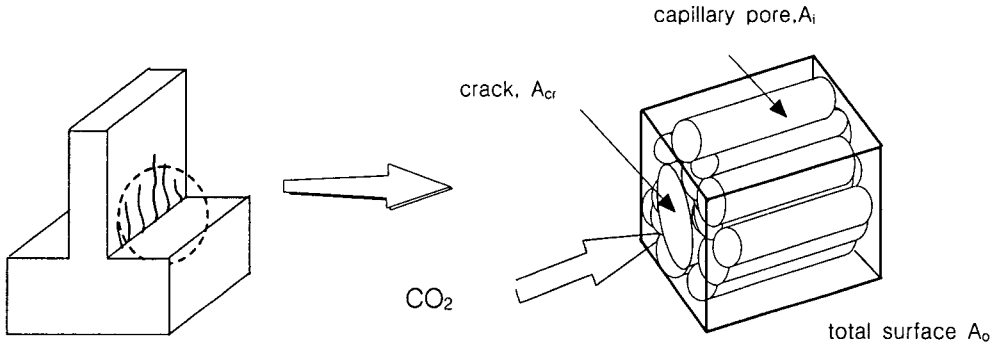


그림 1 균열을 가진 콘크리트의 REV

이러한 관계를 기초로 REV의 세공용액에 대한 이동이온의 평균 흐름비 \overline{Q}_i^L (mol/s)은 모세관을 통한 이온 평균 흐름비 \overline{Q}_{icp}^L 과 균열을 통한 이온의 평균 흐름비 \overline{Q}_{icr}^L 의 합으로 식(1)과 같이 나타난다.

$$\overline{Q}_i^L = \overline{Q}_{icp}^L + \overline{Q}_{icr}^L \quad (1)$$

식(1)에 대하여 모세관의 플럭스와 단면적의 곱으로 식(1)을 정리하면 다음의 식(2)와 같이 정리할 수 있으며 그중 건전부만의 유효확산계수를 도출하면 식(3)과 같다.

$$\overline{Q}_{icp}^L = \overline{J}_{cp}^L \sum A_i = -D_{co} \overline{F}^L A_{cp} \quad (2)$$

$$D_{co} = \left(\frac{\phi D_0^g}{\Omega} \cdot \frac{(1-S)^4}{1 + l_m/2(r_m - t_m)} \cdot K_{CO_2} + \phi \frac{S}{\Omega} \cdot D_0^d \right) \quad (3)$$

여기서, \overline{J}_{cp}^L (mol/m².s)과 A_i (m²)는 각각 공극 반경 r_i (m)를 가진 원통형관에서의 평균 이온 플럭스와 단면적, A_{cp} 는 모세관 단면적의 총합인 $\sum A_i$, \overline{F}^L (mol/m⁴)은 콘크리트내 세공용액에 대한 이온 농도 구배, D_{co} 는 이산화탄소의 확산계수이다³⁾. 식(1)에서 식(3)이외에 균열부에서의 이산화탄소의 확산을 고려하면 균열부의 확산계수는 아래와 같은 식(4)과 같이 도출될 수 있다.

$$D_{co_2}^{eq} = \left[\left(\frac{\phi D_0^g}{\Omega} \cdot \frac{(1-S)^4}{1+l_m/2(r_m-t_m)} \cdot K_{CO_2} + \phi \frac{S}{\Omega} \cdot D_0^d \right) + \frac{D_0^g \Omega}{\theta Ra} K_{CO_2} \cdot f(\omega) \right] \quad (4)$$

여기서, D_0^g 는 기체내에서의 이산화탄소 확산계수 1.34×10^{-5} (m²/s), D_0^d 는 용존이산화탄소 확산계수 1.0×10^{-9} (m²/s), Ω 는 굴곡상수 $(\pi/2)^2$, S는 포화도, ϕ 는 공극률, K_{CO_2} 는 액상 및 기상의 농도비, l_m 는 기체분자간의 자유거리(m), r_m 는 불포화공극의 평균반경(m), t_m 는 B.E.T 이론을 통한 흡착수두께(m), θ 는 포화도와 공극률의 곱, $f(\omega)$ 는 균열폭에 대한 이산화탄소의 유입함수를 나타낸다. 균열부에 대하여 추가로 유입된 $\frac{D_0^g \Omega}{\theta Ra} K_{CO_2} \cdot f(\omega)$ 가 중성화 깊이의 증가를 가져오는 직접적인 이유라 할 수 있다.

3. 중성화 실험에 따른 콘크리트의 거동 분석

3.1 중성화 실험의 개요

각 시편은 물시멘트비 W/C 45%, 55%, 65%를 기준으로 하였으며 제작 1일 후 탈형하여 4주간의 수중양생(20℃)을 거친 뒤 촉진중성화 실험을 수행하였다. 촉진 중성화 실험에 대해서는 1방향의 이산화탄소 유입을 유도하기 위해 각 시편의 측면은 밀봉되었으며, 콘크리트 균열부의 제작을 위해 일부 시편에 대하여 할렬인장시험을 수행하였다. 할렬시험은 UTM을 통하여 수행되었으며 발생된 균열폭의 측정을 위해 LVDT를 수평으로 설치하여 발생된 균열폭을 측정하였다. 균열폭은 하중제하시에 비하여 시험완료시의 균열폭이 감소하게 되는데 최종적인 균열폭을 실험대상으로 하였다.

아래의 표 1에서는 실험시편의 배합표를, 표 2에서는 중성화 실험사양을 나타내고 있으며 그림 2, 3은 균열도입과정과 중성화 실험기내의 시편존치현황을 나타내고 있다.

표 1 실험시편의 배합표

W/C	slump	W(kg)	C(kg)	잔골재(kg)	굵은 골재(kg) (G _{max} : 25mm)
45	15	191	424	668	1058
55	15	184	335	762	1058
65	15	182	280	829	1041

표 2 촉진 중성화 실험 사양

이산화탄소 농도	온도	습도	존치기간	측정기간
10%	25±5℃	65±5%	3달	1주

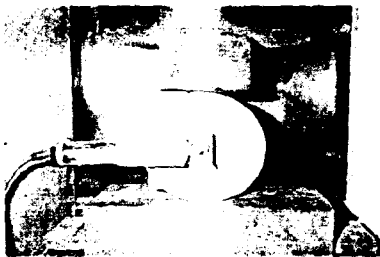


그림 2 UTM을 통한 균열도입과정

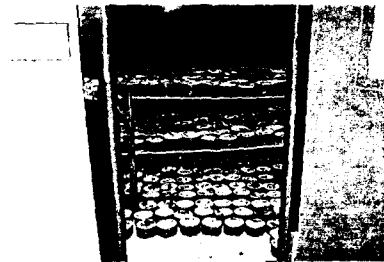


그림 3 중성화 시험기내의 시편존치현황

3.2 중성화 깊이의 분석

1주간격으로 페놀프탈레인 시약을 통하여 중성화 깊이를 측정하였는데, 균열부의 중성화 깊이는 건전부에 비하여 매우 크게 증가하였으며 이 영향은 물시멘트비의 영향보다 크게 평가되었다. 자료정리의 편의성을 위해 균열폭은 0.1mm간격으로 정리하였으며, 각 균열폭에 대한 중성화 속도계수의 회귀 분석 결과는 아래의 표 3에 정리하였다. 한편 0.4mm 이상의 균열폭의 경우는 시편상태의 양측에 균열이 발생한 경우가 많아서 1면 유입으로 가정하기 어려우므로 제외하였다. 이렇게 도출된 중성화 속도계수는 건전부에 대하여 어느정도의 증가를 갖는지에 대한 분석이 필요하므로 각 균열폭에 대한 중성화 속도계수를 건전부에 대한 중성화 속도계수로 나누어 속도증가율을 분석하여, 아래의 표 4와 같으며 이를 그림 4에 나타내었다.

표 3 균열폭에 따른 중성화 속도계수

W/C	균열폭(mm)의 변화에 따른 중성화 속도계수				
	0.0	0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
45%	2.992	8.481	12.820	17.208	24.577
55%	4.589	12.201	18.044	20.909	21.191
65%	5.860	17.255	21.379	26.413	26.255

표 4 균열폭에 따른 중성화 속도증가율

W/C	균열폭(mm)의 변화에 따른 속도증가율			
	0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
45%	2.835	4.285	5.751	8.214
55%	2.659	3.932	4.556	4.618
65%	2.944	3.651	4.507	4.484

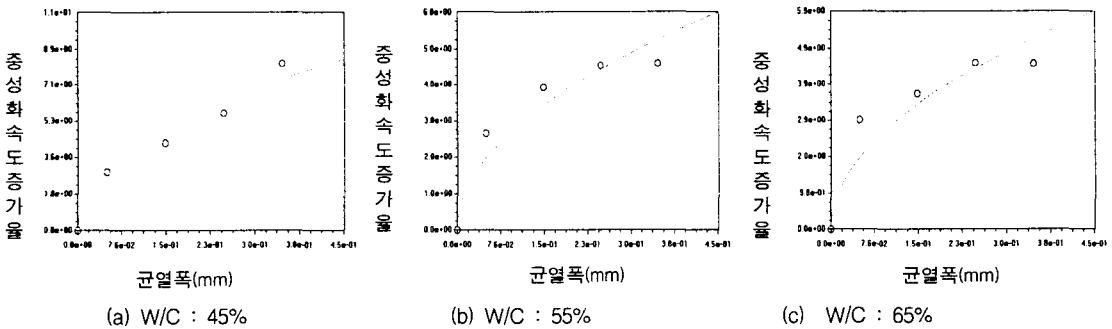


그림 4 균열폭과 중성화 속도증가율과의 관계

한편 기존의 연구결과⁴⁾에 의하면 균열부의 중성화 속도는 균열폭의 제곱근에 비례하며 중성화 면적은 균열폭에 비례한다고 보고되고 있으며 실태조사결과⁵⁾에서도 동일한 결과를 보이고 있다. 표 4에 대한 중성화 속도계수의 증가율을 균열폭의 제곱근에 회귀분석하였으며, 그 결과를 표 5와 그림 5에 나타내었다.

표 5 균열폭에 따른 중성화 속도증가율

W/C	중성화 속도증가율 (W : 균열폭, mm)
45%	$\alpha = 12.536 \cdot \sqrt{W}$
55%	$\alpha = 8.909 \cdot \sqrt{W}$
65%	$\alpha = 8.723 \cdot \sqrt{W}$

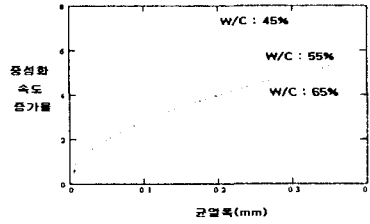


그림 5 균열폭에 따른 중성화 속도증가율 관계

중성화 속도 증가율이 물시멘트비가 낮을수록 큰 이유는 W/C 45%의 경우 건전부의 중성화 속도계수가 55% 또는 65%에 비하여 매우 낮은 수준이고 존치기간이 증가하면서 증가하는 중성화 깊이보다 균열에 의한 영향이 더 크므로 중성화 속도 증가율은 W/C 45%, 55%, 65% 순서로 감소하였다.

3.3 중량변화시험

중량변화율 시험에서는 4주양생후 시편을 각 경우당 3개씩 선정하여 4주 양생후 항온항습조(온도 $25 \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $65 \pm 5\%$)에 6주간 존치하였다. 항온항습조에 존치된 시편은 수분의 발산으로 인해 중량이 감소함을 알 수 있었으며 반대로 중성화 실험을 거친 시편은 콘크리트 내부의 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변하면서 중량이 증가함을 알 수 있었다. 실제로 수산화 칼슘이 탄산칼슘으로 변화하면서 11.7%정도의 중량증가가 발생하는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 한편 수분의 감소는 W/C가 큰 순서대로 발생하였으나 중성화에 따른 중량증가시험에서는 W/C 65%, 55%, 45%의 증가량 차이는 크게 발견되지 않았다. 그 이유는 양생시 W/C가 큰 시편은 생성된 수산화 칼슘양이 많으며 이로 인해 탄산칼슘으로 변화하면서 중량의 증가가 발생하기 때문이다.

3.4 TGA 실험 결과

수산화칼슘을 포함하고 있는 콘크리트 시편의 경우, 이산화탄소의 유입으로 새로운 물질인 탄산칼슘이 생성되게 된다. 수산화칼슘이 보통 440°C 정도에서 열분해하는것에 비하여 탄산칼슘의 탄산기 (CO_3^{2-})는 $850 \sim 880^\circ\text{C}$ 에서 분해하게 되므로 이 성질을 이용하여 새로 생성된 탄산칼슘량을 알 수 있다. 시편은 4주 중성화 실험을 수행한 W/C 55%의 시편을 대상으로 육안검사에 의해 골재가 없는 시멘트 페이스트를 선별한 뒤 미세한 분말로 제조하여 실험을 수행하였다. 채취된 시료 1500mg을 모집단으로 하였는데 소모된 질량을 전체 배합(kg/m^3)으로 바꾸어 나타내면 대략 $11\text{kg}/\text{m}^3$ 정도가 발생하였다. 실제로 이양은 중성화 영역에서는 다소 작게 평가되었으며 수산화 칼슘이 아직 중성화 영역에서도 남아있는 것으로 예상된다. 그림 6에서는 중량변화에 대한 실험결과를, 그림 7에서는 TGA 실험 결과를 나타내고 있다.

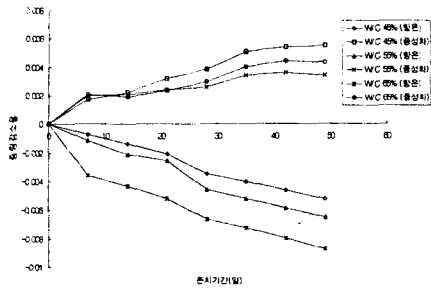


그림 6. 중량변화시험의 결과

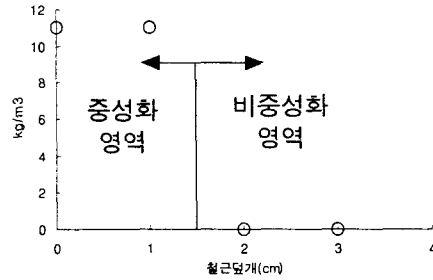


그림 7. TGA 시험 결과

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열부의 중성화 속도계수는 건전부에 비하여 매우 크게 평가되었으며 물시멘트비의 영향보다 균열폭에 더 큰 영향을 받는 것으로 평가되었다.
- 2) 물시멘트비 W/C가 클수록 중성화 속도증가율은 감소하였으며 균열폭의 제곱근에 대한 회귀분석결과, W/C 45%에서 대해서는 12.5, W/C 55%에 대해서는 8.9, W/C 65%에 대해서는 8.7의 중성화 속도증가율을 나타내고 있었다.
- 3) TGA 시험 결과 중성화 영역과 비중성화 영역에 따라 탄산칼슘의 변화량을 명확히 확인할 수 있었다.
- 4) 중량변화시험에서는 수분의 발산을 통하여 중량이 감소되는 항온항습상태의 시편들에 비하여 중성화 실험을 통한 시편은 중량의 증가를 나타내었으며 W/C가 65%로 가장 작은 경우라도 생성된 수산화칼슘의 증가에 따라 W/C 45%, 55%와 큰 차이를 보이지 않았다.

참고문헌

1. 송하원, 박상순, 변근주 (2001), "초기재령에서 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 침투 해석", **대한 토목학회 논문집**, 제 21권, 제 6-A호, pp. 925-936.
2. 박상순, 송하원, 변근주 (2001), "균열을 갖는 콘크리트의 염화물 확산 및 투수모델", **대한 토목학회 논문집**, 제 21권, 제 6-A호, pp. 915-924.
3. Tetsuya ISHIDA and Koichi Maekawa(2001), Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory, **Concrete library of JSCE**, No.37, pp.131-146.
4. 阿部保彦 (1998), ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文献調査結果, **コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集**
5. (사)한국콘크리트학회(1999), **고가의 내구성 확보기간 연장방안 및 향후대책에 관한 연구**, 서울특별시
6. Saeki, T., Ohga H., and Nagataki, S.(1991), "Mechanism of Carbonation and Prediction of Carbonation Process of Concrete", **Concrete library of JSCE**, No.17, pp.23-36