

# 콘크리트 내 이산화탄소 확산계수 예측에 관한 연구

## Diffusivity of Carbon Dioxide in Concrete

오 병 환<sup>\*</sup>    정 상 화<sup>\*\*</sup>    이 명 규<sup>\*\*\*</sup>

Oh, Byung Hwan    Jung, Sang Hwa    Lee, Myung Gyu

### ABSTRACT

The purpose of this study is to identify the diffusion coefficients of carbon dioxide for various concrete mixtures. The test results indicate that the diffusion coefficient increases with the increase of water-cement ratio. The diffusion coefficient decreases with the increase of relative humidity at the same water-cement ratio. The diffusion of carbon dioxide reached the steady-state within about five hours after exposure. It was found that the diffusion coefficient of cement paste is larger than that of concrete or mortar. The quantitative values of diffusivity of carbon dioxide in this study will allow more realistic assessment of carbonation depth in concrete structures.

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물의 철근부식 현상은 대개 염해 및 탄산화 과정에 의해 지배되며 이들 두 가지 현상이 중첩되는 경우에는 철근부식이 가속된다. 이 경우 콘크리트 내부의 철근부식에 의해 1차적으로는 철근의 유효단면적이 감소하여 구조물의 휨강도 등이 저하되며 심한 경우에는 철근의 팽창에 의한 콘크리트 탈락이 일어나기도 한다. 이에 따라 현재까지 국내·외 적으로 콘크리트 구조물의 염해 및 탄산화와 관련된 내구성의 저하과정에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나, 콘크리트 중으로의 염소이온 확산과 관련해서는 확산계수, 시간에 따른 이온 침투 프로파일 및 부식임계 농도 등 여러 분야에 걸쳐서 연구가 이루어지고 있는 반면에 콘크리트의 탄산화 과정과 관련해서는 시간에 따른 축진 탄산화 깊이와 관련된 분야에 대한 연구만이 집중적으로 이루어지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 기 개발된 기체확산계수 측정장치를 이용하여 콘크리트를 통한 이산화탄소 확산계수 측정실험을 실시하였으며 이로부터 시간에 따른 탄산화 깊이를 예측하기 위해 중요한 요소 중의 하나인 콘크리트의 이산화탄소 확산계수를 예측할 수 있는 실험식을 제안하였다. 실제로 이산화탄소 확산계수는 중심부 수축모델(Shrinking Core Model)을<sup>1)</sup> 비롯한 대부분의 이론적인 탄산화 깊이 예측모델에서 시간과 더불어 중요한 매개변수이므로 보다 정확한 이산화탄소 확산계수를 예측하는 것은 탄산화에 의한 콘크리트 구조물의 내구성능 저하를 평가하기 위해 매우 중요한 요소인 것으로 판단된다.

\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 전주대학교 토목환경공학과 객원교수

\*\*\* 정희원, 전주대학교 토목환경공학과 교수

## 2. 개요

### 2.1 실험변수 및 재료

실험은 1종 시멘트를 사용하여 수행하였으며 주요 실험변수는 물/시멘트 비(0.42, 0.50, 0.58) 및 상대습도(10%, 45%, 75%, 90%)이다. 또한, 완전히 탄산화된 시편에 대한 이산화탄소 확산계수 측정실험을 수행하였다.

표 1 및 표 2에는 본 연구에서 사용한 골재의 물리적 성질 및 콘크리트 시방배합이 나타나있다. 본 연구에 사용된 표준시편은 표준형 공시체( $\phi 100 \times 200$ )를 만든 후 절단하여 지름 100mm, 두께 10mm의 원형시편으로 제작하였으며, 일 방향으로 확산을 유도하기 위해 둘레를 에폭시로 코팅하였다. 또한, 상대습도에 따른 확산계수 영향실험을 수행하기 위하여 ASTM E104-85에 제시된 방법에 따라 시편을 항량이 될 때까지 일정한 상대습도를 유지시켜 주는 염류를 담은 진공데시게이터 내에 놓아두었다.<sup>2)</sup>

표 3에는 ASTM 규정에 따라 상대습도를 유지하기 위해 선택한 염의 종류가 제시되어 있다. 단, 실리카겔의 경우는 직접 실험에 의한 결과이다.

### 2.2 기체확산계수 측정과정

본 연구에서는 콘크리트 중으로의 이산화탄소 확산계수를 측정하기 위해 그림 1에 나타나있는 것과 같은 기체확산계수 측정장치 사용하였으며, 이와 관련한 자세한 사항은 앞서 발표한 논문에 언급되어 있다.<sup>3)</sup> 한편, 이산화탄소의 확산이 정상상태에 도달한 경우 콘크리트를 통한 이산화탄소의 확산계수는 식(1)에 의해 구한다.<sup>4)</sup>

$$D_{CO_2} = \frac{Qf_{CO_2}L}{(1 - f_{CO_2})A} \quad (1)$$

식(1)에서  $D_{CO_2}$ 는  $CO_2$ 의 확산계수 ( $m^2/s$ ),  $Q$ 는 공시체를 통한  $N_2$ 의 유량 ( $m^3/s$ ),  $f_{CO_2}$ 는 질소가스 중의  $CO_2$ 의 몰비를 나타내며,  $L$  및  $A$ 는 각각 공시체 두께 ( $m$ ) 및 공시체 단면적 ( $m^2$ )을 나타낸다.

표 1 골재의 물리적 성질

골재 종류	비중	흡수율(%)	조립률(FA)
잔 골재	2.56	2.18	2.85
굵은 골재	2.60	0.94	6.51

표 2 물/시멘트 비에 따른 배합표

W/C	시멘트 kg/m <sup>3</sup>	물, kg/m <sup>3</sup>	잔 골재 kg/m <sup>3</sup>	굵은 골재 kg/m <sup>3</sup>
0.42	425	179	714	895
0.5	315	158	748	1076
0.58	277	161	726	1117

표 3 ASTM의 염에 따른 상대습도 규정

염 온도	Silica gel	Potassium Carbonate K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Sodium Chloride NaCl	Potassium Sulfate K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
25°C	10%±0.5	43.2±0.4	75.3±0.1	97.3±0.5

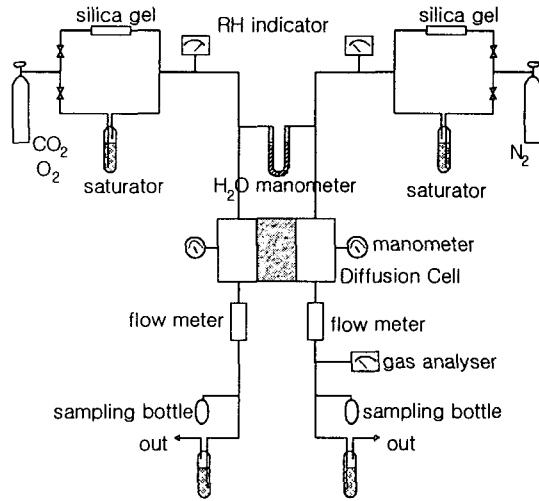
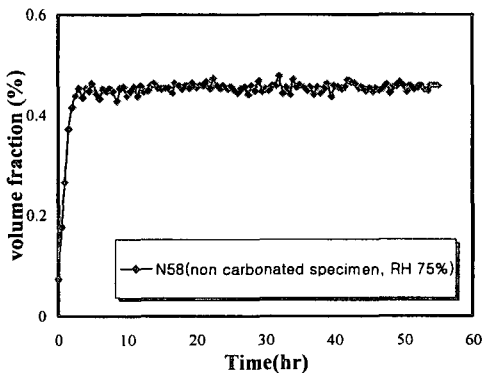


그림 4 기체확산계수 측정장치 계통도

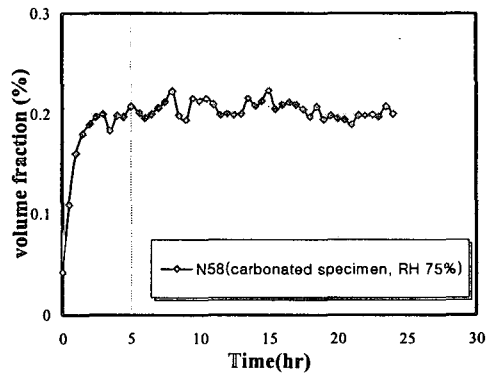
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 정상상태 도달시간

그림 2 (a), (b)에는 물/시멘트 비 0.58인 탄산화 되지 않은 콘크리트 시편 및 탄산화 된 콘크리트 시편의 상대습도 75%인 경우에 대한 정상상태 도달과정이 나타나있다. 그림 2를 통해 이산화탄소의 확산이 3~5시간 이내에 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 특히 탄산화 되지 않은 시편의 경우에도 시편이 완전히 탄산화 된 경우와 비교하여 이산화탄소의 확산이 정상상태에 도달하는 시간이 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.



(a) Non-carbonated specimen  
(w/c 0.58, RH 75%)

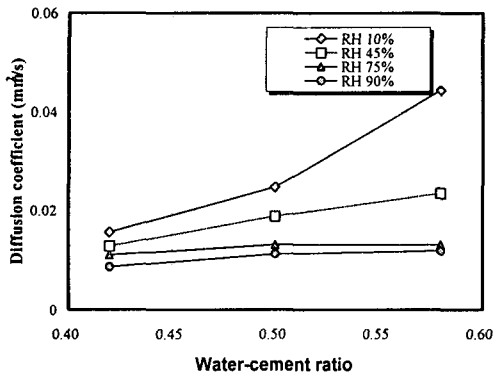


(b) Carbonated specimen  
(w/c 0.58, RH 75%)

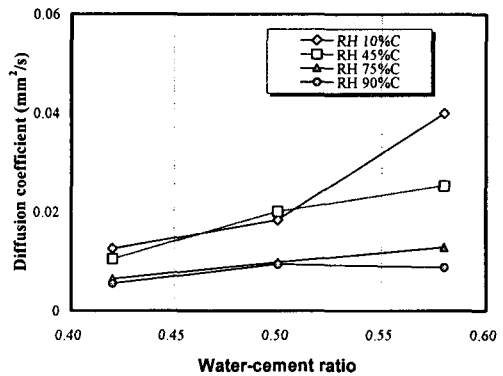
그림 2 콘크리트 시편을 통한 이산화탄소의 정상상태 도달시간

### 3.2 물-시멘트비에 따른 확산계수 변화

그림 3에는 물/시멘트 비에 따른 이산화탄소 확산계수의 변화가 나타나있다. 그림 3으로부터 이산화탄소 확산계수는 물/시멘트 비가 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있지만, 상대습도가 높은 경우에는 물/시멘트 비에 따른 확산계수 증가가 크지 않은 결과를 보였다. 이것은 상대습도가 높은 경우에는 공극의 많은 부분이 물로 포화되기 때문에 상대적으로 물/시멘트 비에 따른 콘크리트의 공극구조 차이에 따른 영향이 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 비탄산화 시편의 경우

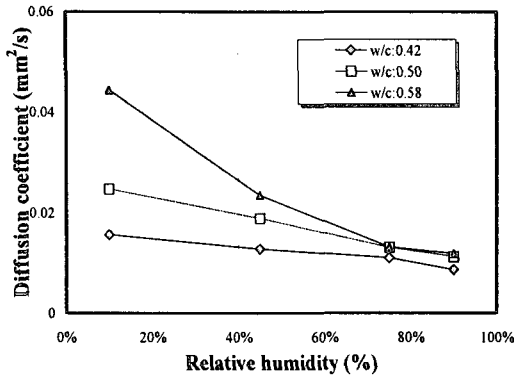


(b) 탄산화 시편의 경우

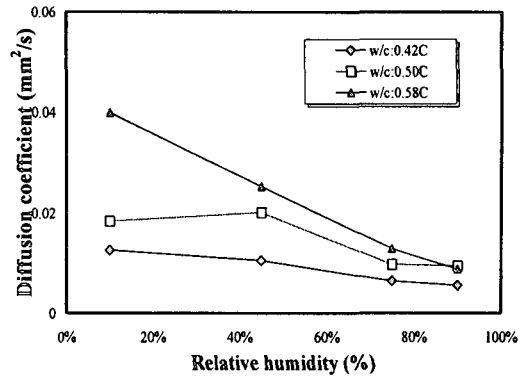
그림 3 물-시멘트비에 따른 콘크리트 중의 이산화탄소 확산계수 변화

### 3.3 상대습도에 따른 확산계수 변화

그림 4(a) 및 (b)에는 탄산화 되지 않은 시편 및 탄산화 된 콘크리트 시편에 대한 상대습도에 따른 이산화탄소 확산계수의 변화가 나타나있다. 이에 따르면 상대습도가 증가함에 따라 콘크리트 시편을 통한 이산화탄소 확산계수는 감소하지만 상대습도에 따른 이산화탄소 확산계수 변화정도는 물/시멘트 비가 낮은 콘크리트의 경우일수록 작게 나타나고 있다. 이것은 물/시멘트 비가 낮을수록 콘크리트의 조적이 치밀하기 때문에 상대적으로 기체의 확산이 가능한 열린공극(open porosity)구조가 많지 않고 이에 따라 상대습도의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 한편, 상대습도에 따른 확산계수의 변화량 및 경향은 시편의 탄산화 여부에 관계없이 유사하며, 다만 탄산화 시편의 경우 동일한 물/시멘트 비 및 상대습도에서 이산화탄소 확산계수가 다소 작은 것을 알 수 있다. 이것은 탄산화에 따라 공극 구조가 다소 치밀해지기 때문으로 판단된다.



(a) Non-carbonated specimen



(b) Carbonated specimen

그림 4 상대습도에 따른 이산화탄소 확산계수 변화

### 3.4 모르터 및 시멘트 페이스트에 대한 확산계수

그림 5 및 그림 6으로부터 시멘트 페이스트를 통한 이산화탄소 확산계수는 콘크리트 및 모르터를 통한 이산화탄소 확산계수보다 매우 큰 것을 알 수 있다. 이것은 동일한 물/시멘트 비의 경우 시멘트 페이스트가 콘크리트나 모르터에 비해 단위부피 당 공극률(porosity)이 월등히 크기 때문에 기체의 확산이 이루어지는 절대적인 공극량이 큰 결과로서 합리적이라고 판단된다.

한편, 그림 5로부터 모르터 통한 이산화탄소 확산계수는 상대습도 10%인 경우를 제외하고 콘크리트와 비교하여 약 20% 정도로 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 상대습도 60%인 경우 산소의 확산계수에 대한 Kobayashi의 연구결과와 매우 유사한 결과를 보이고 있다.<sup>5)</sup>

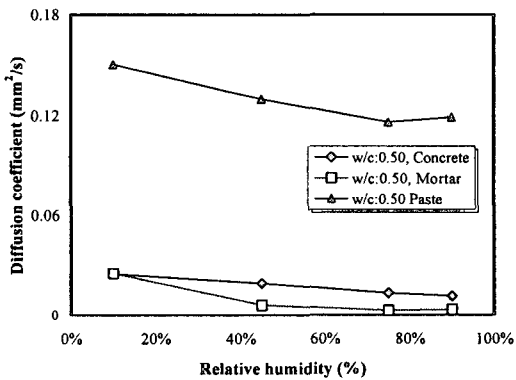


그림 9 재료에 따른 이산화탄소 확산계수 변화

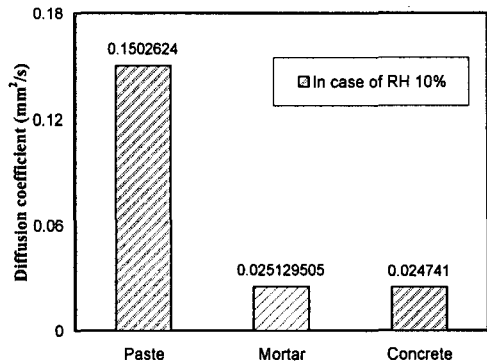


그림 10 상대습도 10%인 경우 CO<sub>2</sub> 확산계수

#### 4. 결론

본 연구로부터 도출된 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

1. 시멘트 페이스트, 몰탈 및 콘크리트를 통한 이산화탄소의 확산은 약 5시간 내에서 정상상태에 도달하였다. 특히 시편의 탄산화 정도에 따른 정상상태 도달시간에 따른 영향은 매우 미미함을 알 수 있었다.
2. 물-시멘트비가 커짐에 따라 이산화탄소 확산계수는 증가하였다. 그러나, 상대습도가 높을수록 물-시멘트비에 따른 이산화탄소 확산계수의 변화는 작았으며 이것은 상대습도가 높은 경우에는 공극의 많은 부분이 물로 포화되기 때문에 상대적으로 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 공극구조 차이에 따른 영향이 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.
3. 상대습도가 증가함에 따라 콘크리트 시편을 통한 이산화탄소 확산계수는 감소하지만 감소량은 물/시멘트 비가 낮은 콘크리트의 경우 작게 나타났다. 이것은 물-시멘트 비가 낮을수록 열린 공극(open porosity)이 작기 때문인 것으로 판단된다.
4. 탄산화 시편의 경우 비탄산화 시편의 경우에 비해 동일한 상대습도에서 이산화탄소 확산계수가 다소 작게 나타났으나, 이러한 차이는 물/시멘트 비가 클수록 줄어드는 것으로 나타났다.
5. 시멘트 페이스트를 통한 이산화탄소 확산계수는 콘크리트 및 몰탈을 통한 이산화탄소 확산계수보다 매우 크게 나타났으며, 상대습도 10%인 경우를 제외하고 몰탈의 이산화탄소 확산계수는 콘크리트의 이산화탄소 확산계수에 비해 매우 작은 결과를 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호 : R05-2001-000-01341-0)의 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. J. C. Walton, L. E. Plansky, and R. W. Smith, "Models for estimation of service life of concrete barriers in low-level radioactive waste disposal", U. S. Department of Energy, pp22~23.
2. "Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solution", ASTM E104-85, 1996.
3. 오병환, 정상화, 이명규, "콘크리트의 기체확산계수 측정장치 개발 및 응용" 대한토목학회 논문집 2003. 1, pp77~84.
4. V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, and M. N. Fardis, "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete", *ACI Material Journal*, March-April, 1991, pp186~196.
5. K. Kobayashi, "Oxygen diffusivity of various cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, 1990, pp 273~284.