

콘크리트 중으로의 CO₂ 확산에 관한 실험연구

The Experimental Study on CO₂ Diffusivity in Concrete

오 병 환* 정 상 화** 이 명 규***
Oh, Byung Hwan Jung, Sang Hwa Lee, Myung Gyu

ABSTRACT

Through the developing measuring system of gas diffusivity, the experiments on carbon dioxide diffusivity in concrete carry out. From this, some important results was achieved. First, the times of reaching the steady state condition don't depend on the water/cement ratio with linearity. But, for the 0.42 w/c ratio the duration of the non-steady state condition is long. Second, in constant relative humidity, the diffusion coefficient shows linearity for the w/c ratio. Third, for the same w/c ratio, the influence of relative humidity on the diffusivity is very large. This shows the importance of the environmental condition for the carbonation. This study on CO₂ diffusivity in concrete is the first attempt within a country and will be important data.

1. 서론

철근콘크리트 구조물에서 철근부식이 발생하는 경우 1차적으로는 철근의 유효단면적이 감소하여 구조물의 휨강도 등이 저하되며 심한 경우에는 철근의 팽창에 의한 콘크리트 탈락이 일어나기도 한다. 이 경우 철근의 부식은 염소이온이 침투하거나, 외부로부터 침입한 이산화탄소와 반응하여 콘크리트의 pH가 저하되는 경우에 일어나는 부동태피막의 파괴에 의해 발생한다.

탄산화는 탄산화 전면에서 CO₂의 확산에 의해 지배되는 현상이므로 탄산화 깊이는 콘크리트 덮개에서의 기체 침투성(air permeability)과 밀접한 관련이 있다. 이 경우 콘크리트 덮개의 기체침투저항성은 곧 이산화탄소(CO₂)의 확산계수(D_c)로 표현되는데 이 확산계수는 시멘트의 종류, 콘크리트의 배합 특성이나 양생조건 뿐만 아니라 기후의 변화(상대습도의 변화 등), 깊이와 재령에 따른 미세공극 구조의 변화 등에도 큰 영향을 받는다.⁽¹⁾ 그러므로 탄산화에 따른 철근의 부식정도를 예측하기 위해서 알칼리 물질의 양 및 대기중의 이산화탄소 농도 이외에 콘크리트 중으로의 이산화탄소 확산계수를 고려한 여러 가지 탄산화깊이 예측 모델이 개발되었으며, 이들로부터 이산화탄소 확산계수를 적절히 고려하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 현재까지 이산화탄소 확산계수를 구하기 위한 표준화된 방법은 제시되지 않고 있으며, 특히 국내의 경우 이에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 기체확산계수 측정장치를 개발하여 이산화탄소 확산계수 측정실험을 실시하였다.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사수료
*** 정회원, 전주대학교 토목공학과 교수

2. 실험개요

2.1 기체확산계수 실험장치

콘크리트 중으로의 기체확산계수를 측정하는 방법으로는 흡착제(sorbent)를 내포한 용기의 덮개를 콘크리트로 만든 후 정상상태에 도달할 때까지의 무게를 재는 중량법(gravimetric procedure)과 시편의 양쪽으로 서로 다른 두 가지 종류의 기체를 통과시킨 후 정상상태하의 유량 및 농도 차이를 측정하여 기체확산계수를 측정하는 Schwiete and Ludwig법(그림 1 참조) 및 비정상상태 하에서의 기체확산계수 측정방법 등이 있으며, 그 중에서도 Schwiete and Ludwig법은 원통형 형상의 콘크리트 시편에 대한 기체확산계수를 측정하는 데 알맞은 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 그러므로, 본 연구에서는 Schwiete and Ludwig법으로 알려진 정상상태하의 기체확산계수 측정방법을 이용하여 콘크리트의 기체확산계수 측정장치를 개발하였으며 이를 통해 콘크리트의 이산화탄소 확산계수 실험을 수행하였다.

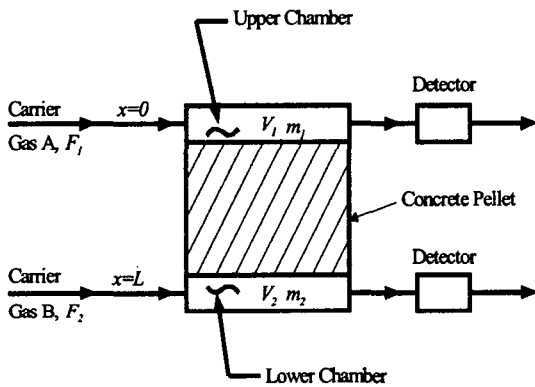


그림 1 Schwiete and Ludwig법에 의한 기체확산계수 측정장치 개념도

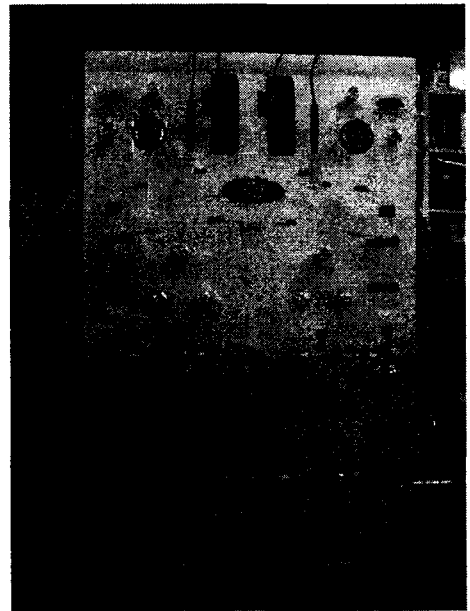


사진 1 기체확산계수 측정장치

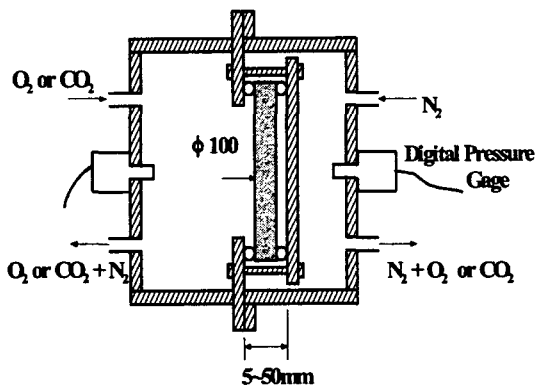


그림 2 기체확산 셀 개요도

그림 1, 그림 2 및 사진 1에 나타나있는 기체확산계수 측정장치는 가스 유·출입장치, 확산 셀 및 분석장치로 구성되어 있다. 세부적으로 가스 유입부분에는 유입가스의 상대습도를 조절하기 위한 장치가 설치되어 있으며 가스 유출부분에 가스농도 분석장치 및 유량측정기, 가스포집장치 등이 설치되어 있다.

2.2 실험변수 및 실험방법

실험은 1종 시멘트를 사용하여 수행하였으며 주요 실험변수로는 물/시멘트 비 0.42, 0.50, 0.58의 3종류로 선정하였으며, 이에 따른 콘크리트의 상세배합은 표1에 나타나있다. 또한, 시편 및 사용된 기체의 상대습도를 25% 및 55%로 일정하게 조절한 후 이에 따른 확산계수 실험을 실시하여 상대습도에 따른 확산계수 영향을 검토하였다.

표 1 상세배합

W/C	Binders, kg/m ³	Water, kg/m ³	Fine aggregate, kg/m ³	Coarse aggregate, kg/m ³
0.42	425	179	714	895
0.50	315	158	748	1076
0.58	277	161	726	1117

한편, 실험에 사용된 표준 실험시편은 지름 100mm, 두께 10mm의 원형시편으로 표준형 공시체 제작 후 절단하여 제작하였으며, 상대습도에 따른 확산계수 영향실험을 수행하기 위해서 ASTM E104-85에 제시된 방법에 따라 시편을 항량이 될 때까지 일정한 상대습도를 유지시켜 주는 염류를 내포한 진공데시게이터 내에 놓아두었다.⁽³⁾

2.1절에서 언급된 기체확산계수 측정장치를 이용하여 이산화탄소 확산계수를 측정하는 과정은 다음과 같다.

- i) 공시체의 한쪽 면에는 질소가스를 다른 한쪽 면에는 이산화탄소를 같은 압력으로 계속하여 일정량 흘러 보낸다.
- ii) 질소가스 속의 CO₂ 농도는 확산계수에 따라 시간이 흐름에 따라 거의 일정해진다. 이 시점을 정상 상태라고 판정하고 질소가스 속의 CO₂ 농도를 측정한다.
- iii) 양쪽 면을 통과하는 유량이 동일하고 기체의 확산이 정상상태에 도달한 경우 식(1)로 부터 콘크리트 중으로의 이산화탄소 확산계수를 결정한다.⁽⁴⁾

$$D_{CO_2} = \frac{Qy_{CO_2}L}{(1 - y_{CO_2})A} \quad (1)$$

이때, D_{CO_2} : CO₂ 확산계수 (m^2/s)

F : 공시체를 통한 N₂의 유량 (m^3/s)

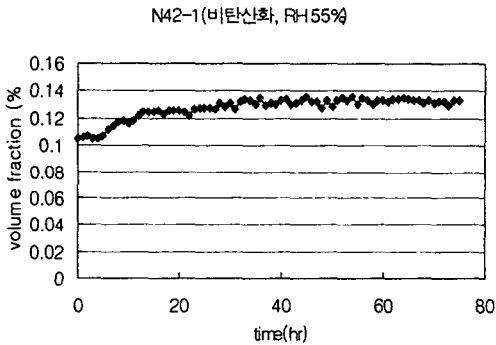
y_{CO_2} : 질소가스 중의 CO₂의 몰비

L : 공시체 두께 (m)

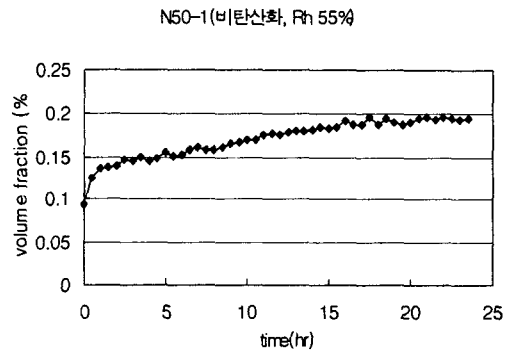
A : 공시체 단면적(m^2)

3. 실험결과 및 고찰

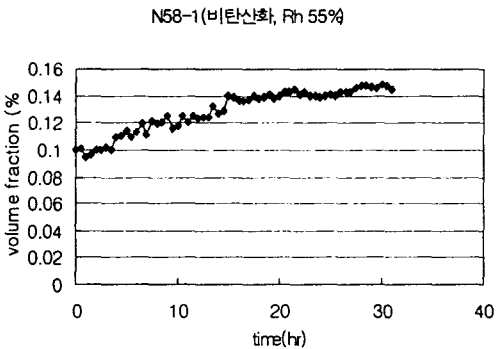
그림 3에는 시간이 흐름에 따라 콘크리트 시편을 통한 이산화탄소의 확산과정이 정상상태에 도달하는 것을 보여주고 있다. 특히 그림 3(a) 및 (d)에 보여지는 것처럼 물/시멘트 비가 42%인 경우 정상상태에 도달하는 시간이 많이 필요함을 알 수 있으며 상대적으로 물/시멘트 비가 50%와 58%인 경우에는 정상상태 도달시간이 많은 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적으로 물/시멘트 비가 45% 정도를 경계로 하여 콘크리트 조직의 치밀성이 많은 차이를 보이는 경향을 반영한 것으로 판단된다.



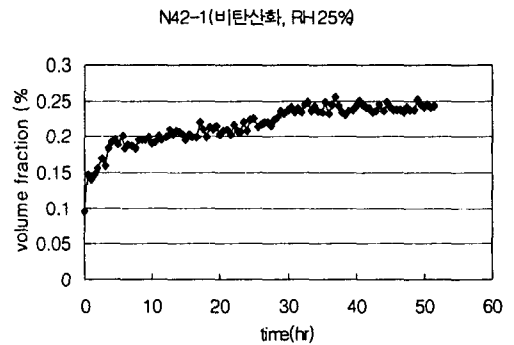
(a) 상대습도 55%, 물/시멘트 비 42%



(b) 상대습도 55%, 물/시멘트 비 50%



(c) 상대습도 55%, 물/시멘트 비 58%



(d) 상대습도 25%, 물/시멘트 비 42%

그림 3 정상상태 도달시간

그림 4 및 그림 5에는 콘크리트의 확산계수에 대한 물/시멘트 및 상대습도의 영향이 각각 나타나있다. 그림 4에 나타나 있는 정상상태에서의 이산화탄소 확산계수 평균값은 물/시멘트 비 0.42, 0.50, 0.58에 대해 각각 1.18×10^{-4} , 1.22×10^{-4} , $1.25 \times 10^{-4} \text{mm}^2/\text{s}$ 로서 물/시멘트 비에 따라 선형의 관계를 나타내고 있으며, 이것은 정상상태 도달시간과는 달리 최종적인 확산계수 값은 물/시멘트 비에 비례한다는 것을 보여주고 있다. 또한, 본 실험에서 구한 콘크리트의 이산화탄소 확산계수 값은 시멘트 페이스트와 몰탈에 대해 구한 기존의 연구결과와 비교하여 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 정도 낮은 차수를 나타내고 있으며^(4,5) 공기연행 콘크리트에 대해 실험한 결과와 비교하면 10^{-4} 정도나 확산계수 값이 작게 나타나고 있다⁽⁶⁾. 한편, 그림 5에 보여진 상대습도에 따른 확산계수 변화량은 물/시멘트 비에 따른 확산계수 변화량보다 크게 나타나고 있으며, 이로부터 콘크리트의 탄산화는 물/시멘트 비와 같은 콘크리트 자체의 품질적인 요인과 더불어 상대습도와 같은 환경적인 외부요인에 의해 많은 영향을 받을 것이라고 판단된다.

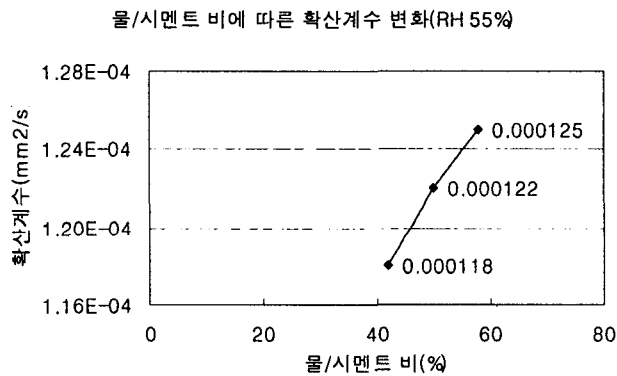


그림 4 상대습도가 일정한 경우 물/시멘트 비에 따른 확산계수 변화량

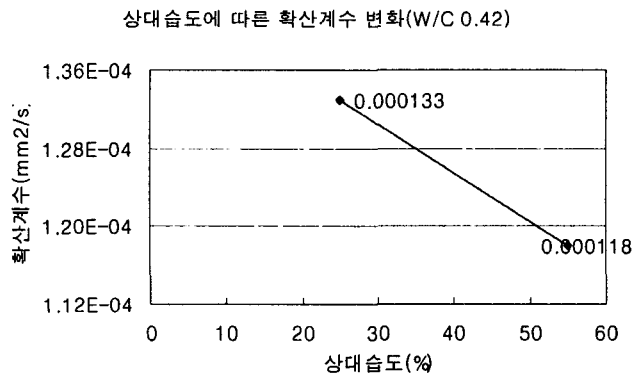


그림 5 상대습도에 따른 확산계수 변화량

4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 탄산화 과정에서 매우 중요한 요소인 이산화탄소 확산계수를 실험적으로 결정하기 위해 정상상태에 대한 기체확산계수 측정장치를 개발하였으며 이를 이용하여 국내에서 생산된 1종 시멘트를 사용한 콘크리트에 대해 물/시멘트 비 및 상대습도를 실험변수로 하여 이산화탄소 확산계수 측정실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행한 실험자료와 향후 지속적인 데이터의 축적을 통해 국내 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키는 데 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대되며 본 연구를 통한 세부적인 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트를 통한 이산화탄소 확산과정이 정상상태에 도달되는 시간은 동일한 물/시멘트 비에 대해 습도가 높은 경우가 길며, 물/시멘트 비에 비례하지는 않는 것으로 판단된다. 그러나, 물/시멘트 비가 42%인 경우에는 상대적으로 정상상태에 도달하기 위해 많은 시간이 필요했다.
- 2) 동일한 상대습도에 대해 실험한 경우 시편의 물/시멘트 비가 높을수록 확산계수는 증가하였으며 선형성을 나타내었다.
- 3) 물/시멘트 비가 동일한 시편의 경우 상대습도가 높을수록 확산계수가 감소하였으며, 상대습도에 따른 확산계수의 증감 폭은 물/시멘트 비에 따른 증감폭 보다 크게 나타났다. 이로부터 콘크리트 구조물의 탄산화 과정은 콘크리트 자체의 품질요인과 함께 구조물 주위의 환경요인에 의해 많은 영향을 받을 것이라고 판단된다.
- 4) 본 연구에서 측정된 이산화탄소 확산계수는 $10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ 정도의 차수를 가지며, 이것은 몰탈이나 페이스트에 대한 실험결과에 비해 매우 작은 결과이다.

참고문헌

1. R. F. M. Bakker, "Corrosion of steel in concrete," report of the technical committee 60-CSC, RILEM, 1988, pp 22~46.
2. Kdroff, J., Hilsdorf, H. K., "Performance Criteria for Concrete Durability," Rilem report 12, E & FN Spon, London, 1995.
3. ASTM E104-85 "Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solution," 1996.
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. Y. F. Houst and F. H. Wittmann, "Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO_2 and O_2 through hydrated cement paste," Cement and Concrete Research, 1994, pp1165~1176.
6. Y. F. Houst and F. H. Wittmann, "The diffusion of carbon dioxide and oxygen in aerated concrete," in Int. Coll. on Materials Science and Restoration, 1986, pp 629~634.