



수압과 균열폭 변화에 따른 콘크리트 투수계수의 실험적 연구

현태양¹⁾ · 김진용²⁾ · 김진근^{2)*}

¹⁾현대건설(주) ²⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Permeability of Cracked Concrete as a Function of Hydraulic Pressure and Crack Width

Tae-Yang Hyun,¹⁾ Chin-Yong Kim,²⁾ and Jin-Keun Kim^{2)*}

¹⁾Material Division, Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin 446-716, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-338, Korea

ABSTRACT Cracks in concrete generally interconnect flow paths and increase concrete permeability. The increase in concrete permeability due to the progression of cracks allows more water or aggressive chemical ions to penetrate into concrete, facilitating deterioration. The goal of this research is to study the relationship between crack width and water permeability of cracked concrete. Tests have been carried out as a function of hydraulic pressure (0.1~2 bar) and crack width (30~100 μm). Splitting and reuniting method was used to manufacture cracked concrete specimens with controlled crack width. Crack widths are checked by using a microscope(×100). The results show a considerable increase of water transport with crack width and hydraulic pressure. When the crack width is smaller than 50μm, the crack width has little effect on concrete permeability. Due to the autogenous healing, the water flow through the crack gradually reduces with time. When crack width is 100 μm and hydraulic pressure increase from 0.1 bar to 0.25 bar, concrete permeability increases rapidly about 190 times according to the test results.

Keywords : crack, hydraulic pressure, permeability, leakage, cracked concrete, autogenous healing

1. 서 론

콘크리트의 균열은 하중이나 건조수축 등 여러 요인에 의해 발생한다. 균열 자체는 구조물의 사용성과 내구성에 직접적으로 악영향을 미치지 않지만, “균열 → 투수성 증가 → 성능 저하”의 주기를 가속함으로써 결과적으로 구조물의 성능 저하를 유발한다. 균열을 통한 누수의 경우 구조물의 내구성과 사용성뿐 아니라 외관을 훼손시키고 누수된 물로 인한 추가적인 문제를 발생시킨다. 특히 고층구조물의 깊은 지하층, 지하철, 터널 등과 같은 지하구조물과 해양구조물, 댐, 정수장 등 물을 저장하는 구조물과 같이 높은 수압이 작용하는 경우, 구조물의 균열로 인한 누수 문제는 더욱 심각해진다. 결과적으로 시공 전후 방수에 대한 보수 비용이 적지 않게 발생한다.¹⁾

현재 우리나라는 구조물 노출 조건과 사용 목적에 따른 균열폭 규정만 있을 뿐 누수량에 대한 규정과 균열이 있는 콘크리트의 투수계수 실험 방법이 확립되어 있지 않다. 그러나 균열폭만으로 구조물의 누수를 규정하는 것은 한계가 있기 때문에 콘크리트구조물의 투수계수

및 누수량에 대한 규정이 시급히 필요한 실정이다. 이를 뒷받침하기 위해서는 높은 수압에서 균열이 있는 콘크리트의 투수계수에 대한 연구가 필요하다.

지금까지 콘크리트의 투수계수는 염소이온의 확산계수를 측정하여 간접적으로 구하거나 콘크리트 실험체에 수압을 가해 시편 내에 물이 통과한 거리를 측정하여 계산해왔다. 그러나 콘크리트에 균열이 있는 경우, 누수되는 물의 대부분은 균열을 통한 것이기 때문에 균열이 있을 때의 투수계수 측정은 기존의 방법과 큰 차이가 있다. 기존의 균열이 있는 콘크리트의 투수계수는 저압투수실험(WPT)^{2,6)}을 통해서 주로 측정해왔으나 이는 실험장치의 특성상 큰 수압을 가하는데 어려움이 있어 고수압이 작용할 때의 균열을 통한 콘크리트 투수계수 특성을 직접적으로 파악하기 어렵다는 문제점이 있다. 또한 기존의 균열이 있는 콘크리트 투수 실험에 대한 연구는 대부분 균열을 피드백신호제어조검시험(feed-back controlled splitting test) 방법^{2,7)}으로 유발해 왔는데 이는 실험체 내부에 균열이 동일한 양상으로 유발되었는지 확인할 수 없는 어려움이 있다.

본 연구에서는 고수압을 직접 제어하고 실험체를 돌로 쪼개 후 다시 붙이는 방법으로 이러한 두 가지 문제를 해결하고자 하였으며, 이와 관련된 실험체 제작 방법과

*Corresponding author E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr
Received August 6, 2007, Revised February 26, 2008, Accepted February 28, 2008
©2008 by Korea Concrete Institute

실험 장치를 개발함으로써 균열이 있는 콘크리트의 투수 계수 특성을 구명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 콘크리트 투수 이론

콘크리트에 균열이 생기면 콘크리트 내의 투수 양상이 크게 달라진다. 콘크리트에 균열을 발생시키는 요인은 건조수축, 열응력, 철근부식, 시공 불량, 하중 등으로 다양하나, 일반적으로 구조물에 가해지는 하중 및 콘크리트의 부피변화로 인한 인장응력이 주요 원인이 된다. 초기에 불규칙하게 존재하는 균열들은 추가적인 균열에 의해 이어져서 큰 관통 균열이 되는데, 이러한 균열은 콘크리트 투수계수를 수백, 수천배 증가시키며 이 때의 투수계수는 균열에 의해 지배된다.⁸⁾

균열은 기하학적으로 단순하지 않으며, 보통의 경우 수 μm 범위에서 수 mm 범위까지 균열이 발생한다. 드물게 한 개의 균열만이 발생할 수도 있으며, 이러한 경우 균열을 통한 투수계수는 균열이 없는 콘크리트에 비해 큰 값을 갖는다. 이때는 상대적으로 작은 콘크리트 내의 전기적 효과나 흡착수 등의 영향을 무시할 수 있다.

2.2 Darcy 흐름 (Darcy flow)

콘크리트 투수의 기본적인 모델은 Darcy 흐름으로 설명된다. 콘크리트의 양면이 액체와 맞닿아 있으며 액체가 무한히 공급될 수 있다고 가정할 때, 액체는 압력 차이로 인해 콘크리트를 통해 이동한다. 콘크리트가 액체로 포화되어 있는 경우와 그렇지 않은 경우 콘크리트 내의 액체 흐름이 다르지만 콘크리트 투수의 경우 지반과 달리 두께가 얇은 편이고 지속적으로 압력이 작용하기 때문에 궁극적으로 포화된 상태의 투수가 중요하고 지배적이다.

식 (1)은 정수위로 수압을 가할 때 투수계수 K 를 단위 압력과 단위 시간에 대한 값으로 구한 것이다.

$$K = \frac{Ql}{Aht} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유출량 (ml), l 은 시편의 두께 (mm), A 는 투수되는 시편의 단면적 (mm^2), h 는 수두 (mm), t 는 유출 시간 (s), K 는 투수계수 (mm/s)이다.

2.3 Poiseuille 흐름 (Poiseuille flow)

균열을 통한 투수는 콘크리트 자체의 투수계수와 다르기 때문에 Darcy 흐름으로 해석할 수 없다. 콘크리트의 균열을 통한 물의 흐름은 평행관 이론과 유체역학으로부터 추론한 식을 사용한다. 이 모델은 유체가 비압축성이며 균열을 얇은 관 사이의 틈으로 가정한다. 그러나 이

는 자기 치유 등에 의한 유수량 감소 현상을 고려하지 못하기 때문에 자기 치유가 일어나기 전인 초기 누수에 대해서만 적용할 수 있다. 식 (2)는 평탄한 평행관 사이의 틈 (균열)을 통해 누수되는 유량을 나타낸다.

$$q_0 = \Delta P b w^3 / 12 \eta d \quad (2)$$

여기서

q_0 = 이상적으로 평탄한 균열을 통한 물의 흐름 (m^3/s)
 ΔP = 균열면 양 측의 압력 차이 (N/m^2)
 b = 균열면의 균열 길이 (m)
 w = 균열폭 (m)
 d = 콘크리트 시편두께 (m)
 η = 절대 점성도 (Ns/m^2)

식 (2)를 Poiseuille 법칙이라고 한다. 식 (2)에서 보듯이 누수량은 균열폭의 세제곱에 비례한다. 따라서 균열폭이 투수에 가장 큰 요인임을 알 수 있다. 그러나 실제 균열은 콘크리트 내의 굽은골재 주위로 발생되기 때문에 균열면은 거칠어질 수밖에 없다. 식 (2)는 균열면을 평탄하다고 가정하여 유도되었기 때문에 실험을 통한 투수계수 값보다 항상 큰 값을 갖는다. 또한 균열폭은 콘크리트 내에서 일정하지 않으며 물리적 흡착과 점착 등도 실제 투수계수에 영향을 미친다. 따라서 실제 투수계수는 더욱 작은 값을 가진다.

이러한 효과를 반영하기 위해 식 (2)에 감소계수 ξ 를 추가하면 아래 식이 유도된다.

$$q_r = \xi \Delta P b w^3 / 12 \eta d \quad (3)$$

여기서

q_r = 실제 거친 균열면의 물의 흐름
 ξ = 균열면의 거칠기를 보완하기 위한 감소계수

감소계수 ξ 는 철근콘크리트 슬래브의 투수실험 결과 0.02에서 0.17 사이의 값을 갖는 것으로 나타났다.⁹⁾

2.4 자기 치유 (autogenous healing)

콘크리트 내부의 미소한 균열은 하중이 작용하지 않는 경우에 다음과 같은 요인들에 의해 균열폭이 점차로 감소하는 자기 치유 현상이 발생된다.

- 시멘트페이스트의 수화와 팽창
- 탄산칼슘 결정의 침전
- 물의 불순물이 투수 통로를 막음
- 균열면의 부서진 콘크리트 파편이 투수 통로를 막음

이 중에서도 자기 치유에 가장 큰 영향을 미치는 것은 탄산칼슘 결정의 침전인데, 결정 성장 속도는 균열폭과 수압에 영향을 받는 반면, 콘크리트 배합과 물의 경도는 별 영향이 없는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 자기 치유 때문

에 균열을 통한 투수계수는 점진적으로 감소하고 극단적인 경우에는 균열이 완전히 닫혀서 균열을 통한 누수가 전혀 발생되지 않는다.

3. 투수계수 실험

3.1 개요

일반적으로 사용되는 30 MPa 강도의 콘크리트를 사용하였으며, 실험체의 형상은 지름이 150 mm, 두께가 50 mm 인 원주형을 사용하였다. 원주형 실험체를 사용하면 쉽게 인장력으로 균열을 유발할 수 있다는 장점이 있으며, 기존의 투수 실험에서 주로 원주형 실험체를 사용해왔기 때문에 실험의 용이함과 결과 비교의 편이를 위해 원주형 실험체를 사용하였다.

φ150 × 50 mm 실험체에 췌기를 이용하여 인장력으로 실험체를 둘로 쪼갠 후 다시 붙이는 방법을 사용하여 지름 방향으로 균열을 유발하였다. 예비 실험을 통하여 이 방법으로 실험체의 균열폭을 최소 30 μm까지 만들 수 있음을 확인하였다. Table 1의 균열폭 분류는 예비 실험의 결과를 바탕으로 실험 가능한 범위를 제안한 것으로, 균열의 최대값, 최소값, 평균값을 기준으로 정해진 허용 범위에 드는 실험체만 실험에 사용하였다. 실험체에 가해지는 수압은 5 bar의 상수도를 활용하여 감압계로 수압을 조절하고 압력계로 압력을 측정하는 방법으로 제어하였다. 또한 목표로 한 수압을 실험체의 윗면에 작용하고 아랫면으로 누수되는 물을 취수할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 최종적으로 누수되는 물의 양으로부터 Darcy 흐름의 기본적인 식을 사용하여 투수계수를 산정하였다.

3.2 실험 계획

실험 변수는 압력과 균열폭이다. 압력은 0.1 bar와 2 bar 사이를 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 bar의 5단계로 나누고 균열폭은 30, 50, 100 의 3단계로 구분하여 실험을 수행하였다. 실험체 제작 과정에서 오차가 발생할 수 있는 요소가 많으므로 각 변수당 3개 이상의 실험을 수행하였다. Table 2는 실험 계획을 나타낸 것으로 같은 번호의 실험은 같은 기

Table 1 Classification of crack categories

Crack width category (μm)	$w_{average}$	w_{min}	w_{max}
30	25~35	0	60
50	45~55	20	80
100	90~110	50	150

Table 2 Experiment schedule

	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar
30 μm	155	44	366	388	777
50 μm	1155	447	366	388	277
100 μm	155	44	366	388	22

간에 수행된 실험체를 나타낸다.

이후 결과에서 실험체명은 C-[균열폭(μm)]-[실험체 기호(A,B,C)] P-[수압(bar)]으로 표기하였다.

3.3 실험체 제작

실험을 위해 φ150 × 300 mm 원주형 몰드로 공시체를 제작하였다. 배합강도는 30 MPa로 설정하였다. Table 3은 공시체 제작에 사용된 배합설계를 나타낸 것이다.

투수 실험을 수행하는 동안, 수화 반응에 의한 콘크리트 자체의 투수계수 변화와 균열면에서 발생하는 시멘트 페이스트의 수화와 팽창에 의한 자기 치유의 영향을 최소화함으로써 줄이기 위해서, 실험 전에 공시체를 20°C에서 90일 이상 수중 양생하였다.

표면 영향 (wall effect)을 제거하기 위해 φ150 × 300 mm 공시체 중 위아래 각 25 mm를 잘라낸 나머지 부분만 투수 실험에 사용하였다. 순수 인장력만으로 균열을 유발할 수 있도록 췌기를 사용하는 방법을 고안하였다. 즉, Fig. 1과 같이 흠에 췌기를 끼운 상태로 하중을 가함으로써 인장력만을 집중적으로 가할 수 있으며, 이로 인해 균열이 위의 췌기로부터 시작하여 점차로 아래 끝까지 진전된다. 균열이 실험체의 아래까지 이어져 시편이 둘로 완전히 나누어지면 밴드를 사용하여 이를 다시 결합하여 관통 균열을 가진 실험체를 제작하였다. 균열폭이 큰 실험체의 경우에는 실험체를 다시 결합하기 전에 균열면에 적절한 양의 알루미늄 호일을 삽입하여 균열폭을 조절하였다.

Fig. 1과 같이 실험체 앞뒷면의 중앙과 중앙으로부터 40 mm 간격으로 기준선을 그리고 표시된 선과 균열이 만나는 곳에서 균열폭을 측정하였다. 균열폭은 100배 확대경을 사용하여 10 μm 단위로 측정하였다. 균열폭을 확대경으로 측정하는 작업은 매우 민감하며 오차가 발생할 여지가 많기 때문에, 모든 실험체에 대하여 동일한 실험자가 균열폭을 측정함으로써 주관에 의한 측정 오차를 줄이고자 하였다. 최소 균열폭을 30 μm로 하고 사전에 결정한 균열폭의 최소 값과 최대 값, 평균 값의 허용 범

Table 3 Mix proportion

Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	air (%)	Unit content (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SP
94	54	41	4	185	342	727	1012	1.026

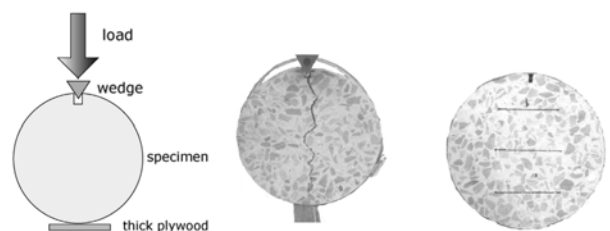


Fig. 1 Crack generation and measurement

위를 기준으로 그 범위에 드는 실험체를 각 분류기준에 따라 구분하여 실험에 사용하였다. 균열폭 분류는 Table 1과 같다.

목표한 균열폭을 갖는 실험체에 투수와 누수가 작용하는 면을 제외한 위아래 면과 옆면에 에폭시를 도포하였다. 에폭시가 굳은 후에는 그라인더로 실험체 면을 다듬고 실험 전까지 수침시켰다.

3.4 실험 장치

원주형 실험체의 위아래에 있는 나사를 조여 원통형관을 밀착시키고 위쪽으로는 수압을 가하고 아래쪽으로는 누수된 물을 취수하는 장치를 제작하였다. 실험 장치의 모습은 Fig. 2와 같으며 이후로는 개발된 장치를 투수 장치라고 통칭하였다. 실험체는 투수 장치의 윗통과 아랫통의 중간에 위치하며, 고무링을 사용해서 원주형 통과 실험체 사이 틈새에서 발생될 수 있는 누수를 방지하였다.

본 연구는 지하수위 20 m까지 구조물을 연구 대상으로 삼았다. 지하수위 10 m 마다 수압은 1 bar씩 증가하므로 지하수위 0~20 m를 모사하기 위해서는 0~2 bar의 수압을 실험체에 가해야 한다. 또한 압력을 일정하게 유지하여야 하는데, 이를 위해 필요한 압력보다 크고 공급도 많은 유체를 감압계로 필요한 만큼 줄여서 사용하는 방법을 사용하였다. 즉, 5 bar의 상수도를 취수하여 감압계로 감압하여 실험체에 가해지는 수압을 조절하였다. 이 방법은 기존의 시설인 상수도의 압력을 활용함으로써 압력 조절 장치가 압력계와 감압계, 여과기로 간소해지는 장점이 있다. 전체적인 압력 조절 장치의 구성은 Fig. 3과 같다.

3.5 실험 방법

실험 방법은 Fig. 4와 같다. 실험체는 투수 장치의 중간에 위치하며, 장치를 지탱하고 있는 4개의 나사선을 조여서 위아래 통과 실험체를 밀착시킨다. 오른쪽 화살표와 같이 약 5 bar의 물이 가해지면 이를 압력계로 확인하며 필요한 압력까지 감압계로 낮춘다. 압력계와 감압계 사이에는 여과기를 설치하여 유입되는 물의 불순물

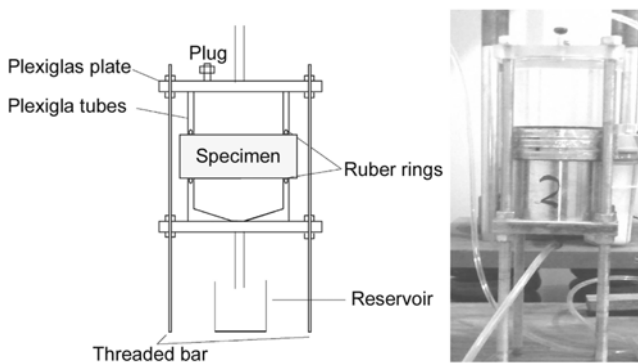


Fig. 2 Permeability apparatus

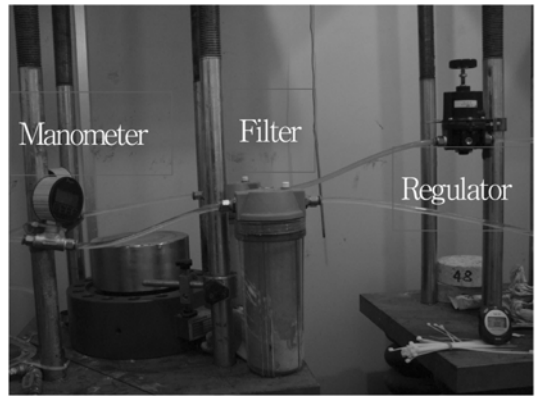


Fig. 3 Pressure control apparatus

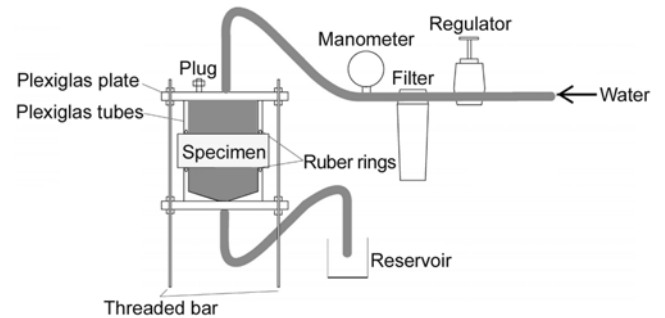


Fig. 4 Schematic view of water permeability apparatus

을 제거한다. 실험체의 균열을 통과한 물은 아래통으로 모여 관을 따라 수조로 향한다. 수조에 모인 물은 정기적으로 그 무게를 측정함으로써 시간당 누수량을 구한다. 모든 실험은 20°C 항온실에서 수행하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 투수 양상

앞에서 언급한 바와 같이 50 mm 두께의 콘크리트 실험체 윗면에 수압을 가하고 아랫면으로 누수되는 양을 측정함으로써 균열을 통한 시간당 투수량과 콘크리트의 투수계수를 구하였다. 실험체에 일정한 수압이 가해지기 때문에 콘크리트 내부는 포화상태가 유지되므로 식 (1)을 사용하여 콘크리트의 투수계수를 구할 수 있다.

균열이 있는 콘크리트의 투수 실험에서 투수량은 콘크리트 내부를 통한 것과 균열을 통한 것의 합이다. 균열이 없는 건전한 콘크리트의 시간당 투수량은 실험 초기에는 측정되지 않으며 시간에 따라 점차 일정한 값을 갖는다. 실험에 사용된 콘크리트의 투수계수는 3.74×10^{-10} mm/s로 측정되었다. 콘크리트 내부를 통한 투수는 실험 초기에는 일어나지 않기 때문에 초기 투수량에는 영향을 미치지 않으나, 압력에 따라 다르지만 약 4일 이후부터는 그 영향을 고려해 주어야 한다. 실험에서 측정된 투수량에 비균열 콘크리트의 투수계수로부터 계산된 투수량을 뺀으로써 순수하게 균열을 통해 발생한 투수량을 계산하

였다.

실험 전에는 콘크리트의 균열폭이 커짐에 따라 투수면적이 증가하므로 투수계수가 커질 것이라 예상하였고, 투수계수는 단위 압력에 대한 값이기 때문에 압력에 따른 투수계수 변화는 없을 것으로 예상하였다. 그러나 실제 실험 결과에 따르면 같은 압력일 때는 균열폭이 커질수록 투수계수가 커지는 것을 확인할 수 있었으나, 압력의 경우 예상과 달리 압력이 약간 증가하면 투수계수가 급격하게 증가하는 현상이 나타났다.

4.2 투수계수 실험 결과

균열폭 30, 50, 100 μm 와 압력 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2 bar에 대하여 실험을 수행하였다. 실험 결과는 Figs. 5,

6과 같다. 그래프의 가로축은 시간이며 세로축은 균열의 단위길이 (mm)당 투수량으로서 식 (4)를 사용해서 계산한 값을 log scale로 표시하였다.

$$K_e = \frac{Ql}{l_c ht} \quad (4)$$

여기서 Q 는 투수량 (ml), l 은 시편의 두께 (mm), l_c 는 균열의 길이 (mm), h 는 수두차 (mm), t 는 투수시간 (s), K_e 는 균열의 단위길이당 투수량 (ml/mm·s)이다. 실험 결과를 정리 할 때는 공칭길이 130 mm로 동일한 값을 사용하였다.

Figs. 5, 6은 각각 K_e 의 실험값을 압력과 균열폭에 따라 정리한 그래프이다. 모든 실험체에서 자기 치유에 의해 K_e 가 시간에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 실험은

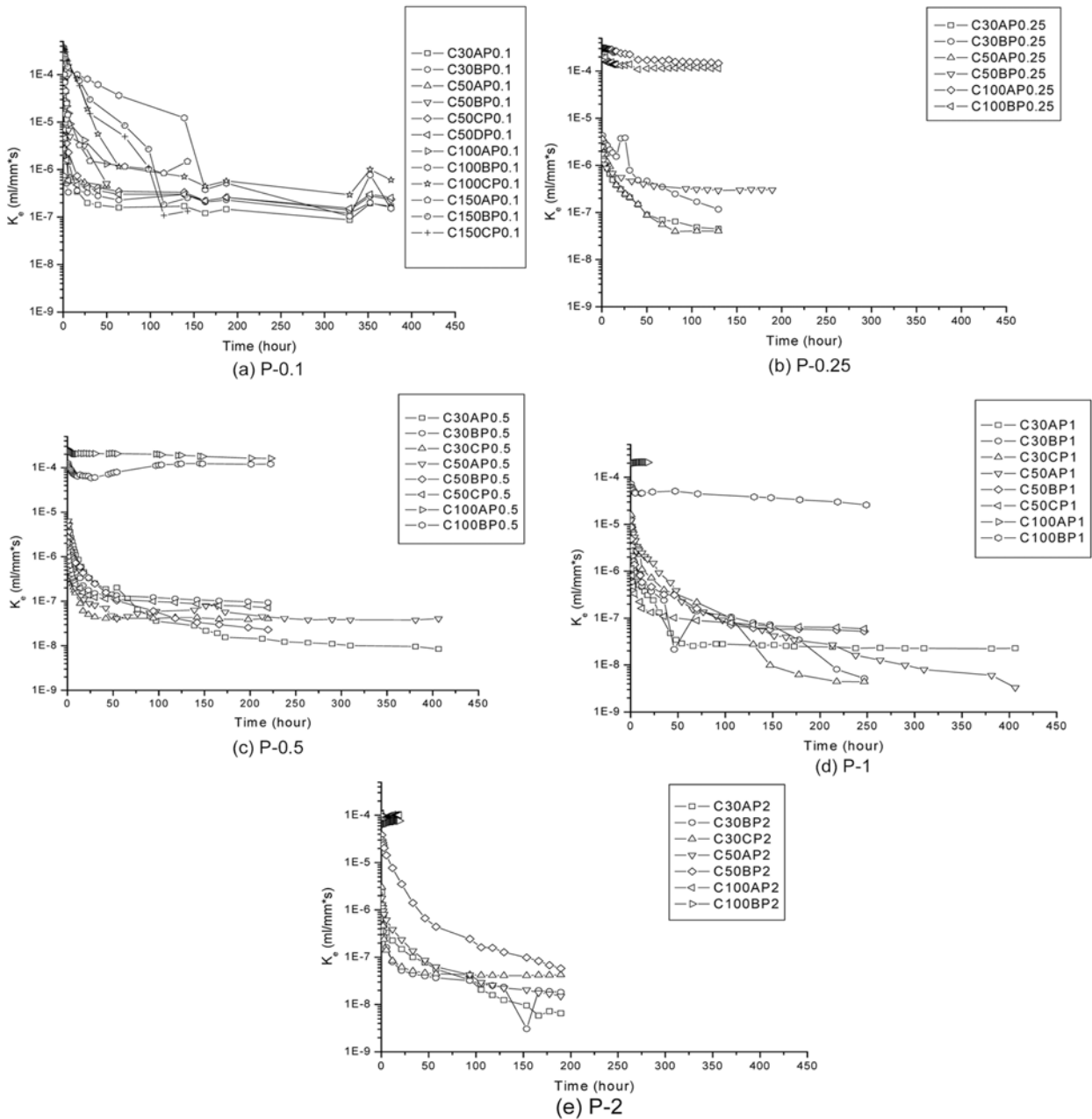


Fig. 5 Permeability with hydraulic pressure

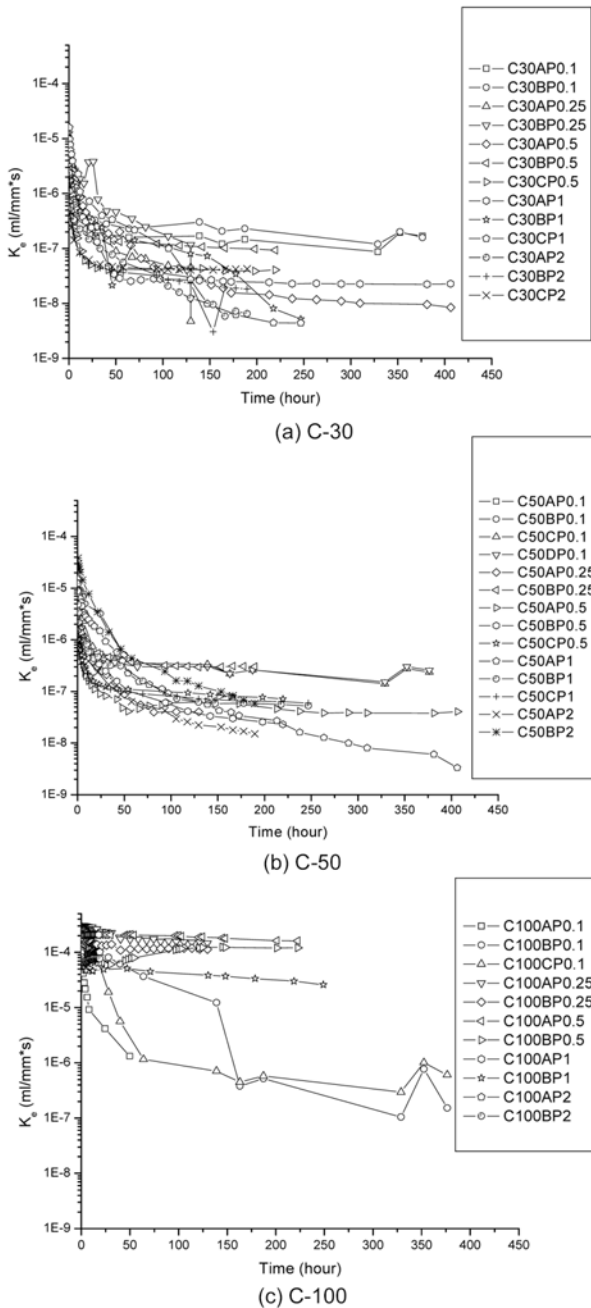


Fig. 6 Permeability with crack width

90일 이상 장기 재령의 콘크리트를 사용하여 수화반응에 의한 영향을 최소한으로 줄였으므로, 이러한 현상의 주요 원인은 탄산칼슘 생성에 의한 화학적인 막힘과 물의 불순물과 균열면 내 콘크리트 파편에 의한 물리적인 막힘인 것으로 판단된다.

Table 4는 실험 시간 50시간 후의 K_e 를 초기 K_e 에 대한 비율로 나타낸 것이다. 투수 실험시간이 50시간 경과 되었을 때, 균열폭 30 μm 이고 압력이 0.1, 0.25 bar인 실험체의 K_e 는 초기값의 약 10%까지 감소하며, 압력이 0.5, 1, 2 bar일 때는 약 5%까지 감소한다. 균열폭이 50 μm 일 때도 이와 유사한 경향을 보인다. 그러나 균열폭이 100 μm 일 때는 압력이 0.1 bar일 때만 약 2%까지 크게 감소할 뿐 그보다 큰 압력의 경우 약 70~80%까지 상대적으로

Table 4 Ratio K_e (50 hours) / initial K_e (unit : %)

	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar
30 μm	18	8	4	3	3
50 μm	8	8	3	3	3
100 μm	2	55	70	82	84

조금 감소하며, 오히려 실험 초기(실험시간 24시간 미만)에 K_e 가 증가하는 구간을 볼 수 있다. Table 4에 나타나듯이 균열폭이 30, 50 μm 일 때는 압력이 커질수록 상대적으로 K_e 가 더 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 K_e 가 감소하다 일정한 값이 되기까지 걸리는 시간은 균열폭이 작을수록 압력이 낮을수록 길어지는 경향을 보인다.

4.3 균열폭, 수압과 투수계수의 관계

Fig. 5에서 압력이 0.1 bar일 때는 모든 균열폭에 대해 최종적인 K_e 가 비슷한 값을 갖지만 압력이 0.25 bar 이상일 때는 균열폭이 100 μm 일 때 K_e 가 특히 큰 값을 갖는다. Fig. 6에서 균열폭이 30, 50 μm 일 때는 압력에 관계없이 시간에 따라 K_e 가 감소하는 경향이 비슷하며, 수렴되는 K_e 값도 비슷함을 알 수 있다. 그러나 균열폭이 100 μm 일 때는 압력에 따라 수렴되는 경향과 수렴되는 값이 달라진다.

Table 5는 초기 30분의 K_e 값을 압력과 균열폭에 따라 정리한 것이다. 압력에 관계없이 균열폭이 증가할수록 K_e 가 증가하는 것을 알 수 있다. 균열폭이 30 μm 일 때 K_e 값은 압력에 따라 큰 차이를 보이지 않으며, 그 평균 값은 약 $4.22 \times 10^{-6} \text{ ml/mm} \cdot \text{s}$ 이다. 균열폭이 50 μm 와 100 μm 일 때, K_e 의 평균 값은 각각 약 $8.79 \times 10^{-6} \text{ ml/mm} \cdot \text{s}$ 와 약 $165 \times 10^{-6} \text{ ml/mm} \cdot \text{s}$ 이다. 즉, 균열폭이 30 μm 에서 50 μm 로 약 1.7배 커질 때 K_e 값은 약 2.1배 커지지만, 균열폭이 50 μm 에서 100 μm 로 2배 커지면 K_e 는 약 18.7배 증가한다.

Table 6은 안정된 최종 K_e 값을 압력과 균열폭에 따라 정리한 것으로 초기 K_e 와 같이 균열폭이 증가할수록 K_e 가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 초기 K_e 보다는 균열폭의 영향이 약하며, 자기 치유의 영향으로 Table 5의 초기 K_e 보다 작은 값을 보인다. 균열폭이 30, 50 μm 일 때

Table 5 Initial K_e ($\times 10^{-6}$)

	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar	Average
30 μm	2.31	3.62	3.18	11.3	2.39	4.22
50 μm	9.60	3.91	3.64	8.56	21.8	8.79
100 μm	147	271	208	154	113	165

Table 6 Final K_e ($\times 10^{-8}$)

	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar
30 μm	20.0	8.09	4.74	1.08	2.25
50 μm	36.5	4.02	4.50	3.84	3.68
100 μm	69.1	13000	14100	11700	8910

는 압력에 따른 K_e 의 값이 거의 유사하지만 균열폭이 100 μm 일 때는 압력이 0.1 bar에서 0.25 bar로 증가할 때 K_e 가 약 190배 증가하는 것을 볼 수 있다. 균열폭이 30, 50 μm 이고 압력이 0.25~2 bar일 때 K_e 는 약 $4.0 \times 10^{-8} \text{ ml/mm} \cdot \text{s}$ 로 작은 값을 보인다. 균열폭이 30, 50 μm 이고 압력이 0.1 bar일 때는 K_e 값이 평균값보다 10배 정도 큰 것으로 나타났는데 이는 실험상의 오차에 의한 것으로 판단된다. 즉, 시간 관계상 K_e 가 1차로 일정해졌다는 판단이 서면 실험을 중단하였는데, 0.1 bar의 경우 더 오랜 시간에 걸쳐 2차, 3차로 K_e 가 감소할 가능성이 있다.

초기 30분의 K_e 값과 최종 K_e 값을 비교하면 Table 7과 같다. 균열폭이 30, 50 μm 이고 압력이 0.25 bar 이상일 때는 K_e 가 약 1%까지 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 자기 치유에 의해 균열이 닫히기 때문으로 각 균열폭에 대해서 가해지는 수압에 관계없이 누수량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 균열폭이 100 μm 이고 압력이 0.1 bar일 때는 K_e 가 1% 미만으로 크게 감소하지만 0.25 bar 이상의 압력에서는 약 48~78%로 약간 감소한다. 즉 균열폭이 어느 정도 증가하면 고압의 누수 조건에서는 자기 치유로 인한 누수 감소가 거의 발생되지 않는다는 사실을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인은 큰 균열폭으로 인해 물리적 막힘 현상이 감소되었거나 화학적인 치유 요인들 역시 빠른 투수와 함께 흘러 내려갔기 때문일 것으로 사료된다.

식 (2)에 균열폭과 실험체의 두께를 대입하여 초기 투수량을 계산할 수 있다. 식 (2)에서 투수량은 균열폭의 세제곱에 비례하므로 균열폭이 30, 50, 100 μm 일 때는 이론적으로 K_e 가 1 : 4.6 : 37의 비율을 가져야 한다. Tables 5와 6의 K_e 값을 균열폭 30 μm 일 때의 값을 기준으로 정규화하여 정리하면 Table 8과 같다.

초기 30분의 K_e 값은 최종 K_e 에 비해서 식 (2)에 의한 이론적인 비율과 잘 일치하고 있다. 즉, Poiseuille 식은 자기 치유의 영향을 고려할 수 없기 때문에 치유 효과

Table 7 Ratio final K_e / initial K_e (unit : %)

	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar
30 μm	8.64	2.23	1.49	0.10	0.94
50 μm	3.80	1.03	1.24	0.4	0.17
100 μm	0.47	47.87	67.69	75.85	78.79

Table 8 Normalized value of K_e

		Initial K_e					
Crack width	Theoretical ratio	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar	Average
30 mm	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50 mm	4.6	4.2	1.1	1.1	0.8	9.1	3.3
100 mm	37	63.7	74.9	65.2	13.7	47.4	53
		Final K_e					
Crack width	Theoretical ratio	0.1 bar	0.25 bar	0.5 bar	1 bar	2 bar	Average
30 mm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50 mm	4.6	1.8	0.5	0.9	3.6	1.6	1.7

가 나타나기 이전의 초기 투수계수는 어느 정도 잘 예측하지만, 이후의 최종 투수계수는 치유에 의한 균열폭 변화 등으로 인하여 그 경향을 예측하지 못함을 알 수 있다.

4.4 누수량에 근거한 허용 균열폭

Table 6에 따르면 수압이 0.1 bar 이하일 때는 균열폭 30~100 μm 범위에서 투수계수가 낮은 값으로 제어되지만, 수압이 0.25 bar 이상으로 증가하면 균열폭 30~50 μm 범위에서는 투수계수가 낮은 값을 유지하지만, 균열폭이 100 μm 일 때는 투수계수가 190배 정도로 급격하게 증가하여 누수량이 치명적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 0.1 bar 이하의 저수압에 노출되는 구조물에 관통 균열이 발생된 경우에는 100 μm 를 허용 균열폭으로 볼 수 있지만, 0.25 bar 이상의 고수압에 노출되는 구조물에 관통 균열이 발생된 경우에는 허용 균열폭이 50 μm 로 감소되어야 한다. 수압 0.25 bar에 대한 허용 균열폭은 엄밀하게는 50~100 μm 사이의 값이 되는데, 정확한 허용 균열폭은 추가 실험을 통해 밝혀낼 예정이다. 또한, 추가 실험을 통해 0.25 bar 이상의 수압이 가해지는 구조물의 허용 균열폭도 가해지는 수압의 크기에 따라 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 논문은 고수압 조건에서 일정한 균열폭을 가진 콘크리트 실험체를 대상으로 투수계수 실험을 수행함으로써, 균열폭, 수압에 따른 콘크리트 투수계수의 상관 관계를 파악하는 것을 목적으로 하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열폭과 수압에 관계없이 단위 압력, 단위 균열 길이당 투수량 (K_e)은 시간에 따라 감소한다. 이는 균열면 내의 화학적, 물리적 막힘에 의한 자기 치유 현상 때문으로 판단된다. 균열폭이 30, 50 μm 일 때 이러한 현상이 두드러지며 균열폭이 100 μm 이고 압력이 0.25 bar 이상일 때는 그 영향이 작다.
- 2) 균열폭이 30, 50 μm 일 때는 압력이 커질수록 상대

적으로 K_c 가 빠르게 감소한다.

- 3) 균열폭이 클수록 초기 K_c 값은 증가하는데, 그 증가량은 Poiseuille 식으로 예측한 결과와 비교적 잘 일치한다.
- 4) 최종 K_c 는 자기 치유의 영향으로 초기 K_c 보다 작은 값을 가지며, 균열폭이 클수록 증가하는 경향을 보인다. 그러나 초기 K_c 보다는 균열폭의 영향이 작으며 균열폭이 100 μm 인 경우에는 압력에 따라 그 값에 큰 차이를 보였다.
- 5) 예를 들어, 누수량에 근거하여 허용 균열폭을 결정하는 경우, 0.1 bar 이하의 저수압에 노출되는 구조물의 허용 균열폭은 100 μm 로 볼 수 있지만, 0.25 bar 이상의 고수압에 노출되는 구조물의 허용 균열폭은 50 μm 이하로 감소되어야 한다.

참고문헌

1. 오상근, “콘크리트 구조물의 누수와 대처 방안에 대한 견해,” 콘크리트학회지, 14권, 6호, 2002, pp. 14~19.
2. Wang, K., Janse, D., Shar, S., and Karr, A., “Permeability Study of Cracked Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 3, 1997, pp. 381~393.
3. Aldea, C. M., Shah, S. P., and Karr, A., “Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, 1999, pp. 181~187.
4. Aldea, C. M., Song, W. J., Popovics, J. S., and Shah, S. R., “Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 12, No. 1,

2000, pp. 92~96.

5. 권성준, 송하원, 박찬규, 변근주, “공극구조를 고려한 탄산화된 콘크리트의 투수특성에 대한 연구,” 대한토목학회논문집, 25권, 3A호, 2005, pp. 577~583.
6. Ludirdja, D., Berger, R. L., and Young, J. F., “Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete,” *ACI Material Journal*, Vol. 86, No. 5, 1989, pp.433~439.
7. Rapoport, J., Aldea, C. M., Shah, S. P., Ankenman, B., and Karr, A., “Permeability of Cracked Steel Fiber-Reinforced Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Technical Notes, 2002, pp. 355~358.
8. 한국콘크리트학회, “최신 콘크리트 공학,” 한국콘크리트학회, 1992, pp. 477~495.
9. Reinhardt, H. W. and Jooss, M., “Permeability and Self-healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 7, 2003, pp. 981~985.
10. Edvardsen, C., “Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, 1999, pp. 448~455.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호 : 04핵심기술C02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

요약 높은 수압에서 균열이 있는 콘크리트의 투수계수에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 위해 기존의 균열이 있는 콘크리트 투수실험의 균열 유발 방법과 압력 조절 방법을 개선하였다. 실험체를 쪼갠 후 다시 붙이는 방법으로 확실한 관통 균열을 유발하였으며, 압력계와 감압계를 사용하여 압력조절을 간소화하였다. 균열폭을 측정할 때 균열폭 분류를 정하여 범위에 드는 실험체만 실험을 수행하였다. 실험 변수는 수압 (0.1~2 bar)과 균열폭 (30~100 μm)이다. 실험 결과, 균열폭과 수압이 증가함에 따라 투수계수가 증가하는 경향을 보였으며, 자기 치유의 영향으로 시간에 따라 투수계수가 점차로 감소하는 것으로 나타났다. 실험 초기의 투수계수는 균열폭에 많은 영향을 받지만, 최종 투수계수는 균열폭에 의한 영향이 상대적으로 작았다. 균열폭이 100 μm 일 때는 균열폭이 30, 50 μm 일 때에 비해 압력에 따른 투수계수의 변화가 컸는데, 수압이 0.1 bar에서 0.25 bar로 증가하면 투수계수가 약 190배로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 균열, 수압, 투수계수, 누수, 균열 콘크리트, 자기 치유