



정수위 투수시험에 의해 측정된 균열 모르타르 시편의 유출수량과 균열폭의 상관관계

최슬우¹⁾ · 배원호²⁾ · 이광명^{2)*} · 신경준³⁾

¹⁾성균관대학교 자기치유친환경콘크리트 연구센터 ²⁾성균관대학교 건설환경시스템공학과 ³⁾충남대학교 토목공학과

Correlation between Crack Width and Water Flow of Cracked Mortar Specimens Measured by Constant Water Head Permeability Test

Seul-Woo Choi,¹⁾ Won-Ho Bae,²⁾ Kwang-Myong Lee,^{2)*} and Kyung-Joon Shin³⁾

¹⁾Self-healing Green Concrete Research Center, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

²⁾Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

³⁾Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

ABSTRACT Recently, the researches of self-healing concrete technology are being carried out actively due to the advent of importance for the maintenance of concrete structures. A water permeability test has been widely used for the evaluation of self-healing performance. However, it is difficult to compare tests results since there is no standard test method related to the self-healing. A standard method for measuring the crack width does not exist neither though the self-healing performance is significantly influenced by the initial crack width. In this study, the effect of water head and crack width on water flow was investigated using a constant water head permeability test equipment. The correlation equation between the initial crack width and water flow was suggested through the regression analysis of test data, and the predicted crack widths agree well with the real crack widths measured using microscopy.

Keywords : permeability test, mortar, crack width, water flow, self-healing

1. 서 론

콘크리트는 경제적이고 시공이 용이하여 널리 쓰이는 건설재료이지만, 타설 직후부터 수반되는 체적변화로 인해 균열 발생이 빈번하다는 단점이 있다. 이러한 균열은 콘크리트 구조물의 내구성 및 사용성을 저하시키기 때문에 초기재령부터 균열 제어 및 방지 대책이 요구된다. 최근에는 노후화된 콘크리트 구조물의 유지·보수의 중요성이 대두되면서 비용 절감 및 사용수명 증대를 위해 무기질 혼합재료,¹⁾ 박테리아,²⁾ 캡슐³⁾ 등을 사용하여 구조물에 발생하는 균열을 스스로 치유하는 자기치유(self-healing) 기술이 활발히 연구되고 있다. 최근까지 미세구조분석, 투수시험, 반복 하중 재하 시험, 이온확산 시험 등을 이용하여 자기치유 콘크리트의 치유 성능 평가가 수행되었으나,⁴⁾ 자기치유 콘크리트 기

술이 세계적으로 개발 초기 단계이기 때문에 국내·외에서 자기 치유 성능을 평가할 수 있는 표준화된 방법 및 평가 지표가 미흡한 실정이다.

한편, 현재의 자기치유 기술은 역학적 성능 회복보다 균열 채움(sealing)효과에 의한 콘크리트의 열화 방지에 그 목적이 있기 때문에 균열의 충전을 직접적으로 평가할 수 있는 투수시험이 널리 활용되고 있다. 하지만 연구자마다 기존의 시험방법을 목적 및 시험 환경에 맞게 변형하여 평가를 수행하기 때문에 시험 방법 및 시험체의 제원 등이 상이하여 시험 결과의 직접적인 비교가 힘든 실정이다. 또한 치유되는 과정에서 균열폭 측정이 어렵기 때문에 일반적으로 재령에 따른 유출수량을 초기 유출수량에 대한 비로 상대적 평가를 하게 되는데, 이때 치유성능은 초기 균열폭에 큰 영향을 받으므로 시편의 초기 균열폭 측정값의 정확도가 매우 중요하다.⁵⁾ 현재 초기 균열폭에 대한 표준화된 측정 방법이 없기 때문에 일반적으로 광학현미경 혹은 스트레인지지를 이용한 방법이 많이 적용되고 있다. 하지만 이러한 측정 방법은 측정 위치에 따른 편차를 내포하고 있을 뿐만 아니라 실제 시편 내부의 균열폭을 확인할 수 없기 때문에 측정된 균열폭

*Corresponding author E-mail : leekm79@skku.edu

Received December 12, 2016, Revised March 2, 2017,

Accepted March 17, 2017

©2017 by Korea Concrete Institute

과 실제 균열폭에 큰 차이가 있을 수 있다.

본 연구에서는 정수위 투수시험 장치를 이용하여 균열 모르타르 시편에 대해 투수시험을 수행하였다. 그리고 실험 결과로부터 수두차와 시편의 균열폭이 유출수량에 미치는 영향 분석을 통해 Poiseuille 식을 기반으로 유출수량과 균열 시편의 초기 균열폭의 상관관계식을 제안하였으며, 제안된 식을 통해 예측한 균열폭과 광학현미경을 사용하여 측정된 균열폭을 비교하여 관계식을 검증하였다.

2. 균열 콘크리트의 투수 시험 선행 연구 분석

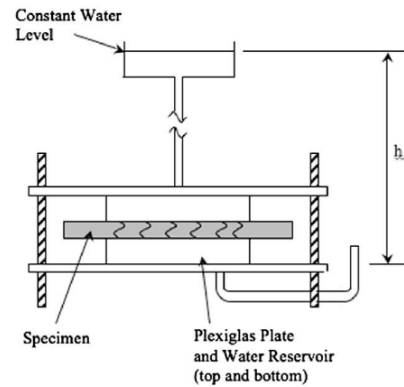
2.1 관련 기준

균열 콘크리트의 투수시험과 관련한 국내·외 기준은 현재 제정된 바 없다. 건설 재료와 관련하여 국내에 제정된 투수시험 관련 기준은 KS F 2322 “흙의 투수 시험 방법”, KS F 2494 “배수성 아스팔트 혼합물의 실내 투수 시험 방법”, KS F 2451 “건축용 시멘트 방수제 시험 방법” 등이 있다. KS F 2322 및 KS F 2494는 2.2절에 정리된 콘크리트 투수시험 방법과 동일한 개념으로 흙과 아스팔트 시료에 대한 투수시험 방법을 규정하고 있다.

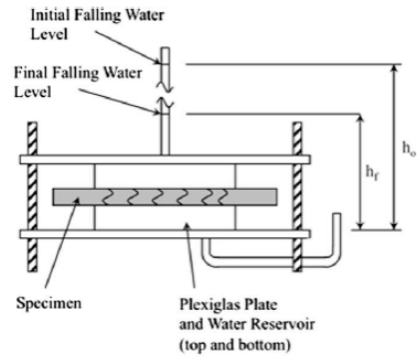
2.2 균열 콘크리트의 투수시험

기존 연구에서 균열 콘크리트의 성능평가에 적용한 투수 시험 방법은 정수위 투수시험법과 변수위 투수시험법으로 구분된다.^{6,9)} 정수위 투수시험은 수위차를 일정하게 유지한 상태에서 일정한 시간 내에 통과하는 수량을 측정하는 방법이며(Fig. 1(a)), 변수위 투수시험은 일정한 수위차를 초기 상태로 하여 콘크리트 내 균열을 통과할 때의 수위 강하량과 그 경과 시간을 측정하는 방법이다(Fig. 1(b)). 일반적으로 흙의 투수시험에서는 공극률이 높아 유출수량이 많은 사질 토에 정수위 시험법을 사용하며, 공극률이 낮은 점성토에 변수위 시험법을 사용한다. 하지만 콘크리트의 균열은 스스로 치유되기 때문에 재형에 따라 균열폭이 감소하여 유출수량도 감소하게 된다. 따라서 기존의 균열 콘크리트 투수시험은 균열폭 혹은 유출수량을 고려하기 보다는 시험 환경 및 시험의 용이성을 바탕으로 연구자들의 선호에 따라 선택된 것으로 사료된다.

국내에서는 지하수위가 영향을 미치는 콘크리트 구조물을 대상으로 압력 조절 장치를 구성하여 균열 시편에 대해 투수시험을 실시한 바 있다.¹⁰⁾ 이러한 압력 조절 장치가 구성된 투수시험 장치는 일정한 압력이 유지된다는 점에서 정수위 투수시험과 동일한 개념이지만, 수위차를 통해 높은 압력을 가하기 어렵기 때문에 고압 등 특수한 환경 조건을 도입하기 위해 고안되었다.¹¹⁾



(a) Constant head test



(b) Falling head test

Fig. 1 Schematic illustration of water permeability test⁹⁾

2.3 콘크리트 균열에서의 유체의 흐름

2.3.1 Darcy의 법칙

Darcy의 법칙은 유체로 포화된 다공성물질을 통과하는 유출수량이 시험체 단면적과 시험체 양쪽 끝의 수위 차이에 비례하고, 시험체 두께에 반비례한다는 것이다. 이러한 관계를 바탕으로 정수위 투수시험을 통해 식 (1)과 같이 콘크리트 균열면의 투수계수 $k(m/s)$ 를 산정할 수 있다.

$$k = \frac{Qd}{Aht} \quad (1)$$

여기서, Q 는 유출수량(m^3), d 는 시험체 두께(m), A 는 시험체 단면적(m^2), h 는 수위차(m), t 는 측정시간(s)이다.

변수위 투수시험에서는 측정된 초기 및 최종 수위차를 식 (2)에 대입하여 투수계수 $k(m/s)$ 를 산정할 수 있다.^{3,7,8)}

$$k = \frac{ad}{At} \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right) \quad (2)$$

여기서, a 는 수위차를 측정하는 파이프의 단면적(m^2), d 는 시험체 두께(m), A 는 시험체 단면적(m^2), t 는 측정시간(s), h_0 는 초기 수위차(m), h_f 는 최종 수위차(m)이다.

일반적으로 유속은 유량을 유체가 흐르는 단면적으로 나눈 것으로 정의되나, Darcy의 법칙에서 유속은 시험체 전체

단면적에 대한 값이므로 균열 콘크리트에서는 유체가 흐르는 균열뿐만 아니라 유체가 통과하지 못하는 콘크리트 면적을 포함하여 투수계수를 산정하게 된다. 따라서 일부 연구자는 균열 특성(길이, 폭 등)을 고려하여 투수계수를 산정하기 위해 식 (1) 또는 (2)에서의 A 를 흐름 단면적으로 정의하기도 하였다.⁹⁾

2.3.2 Poiseuille의 법칙

Poiseuille의 법칙은 가는 둥근 관을 통해 흐르는 물의 양이 관의 양끝의 압력차에 비례하고, 관의 길이에 반비례하며, 관의 반지름의 네제곱에 비례한다는 것이다. 콘크리트 시편 내 균열을 가는 관으로 가정할 경우 Poiseuille 식을 식 (3)과 같이 변형하여 균열 콘크리트의 유출수량(m^3/s)을 예측할 수 있다.¹²⁾

$$q = \xi \frac{\Delta P b w^3}{12 \eta d} = \alpha w^3 \quad (3)$$

여기서 q 는 유출수량(m^3/s), ΔP 는 유입 균열면과 유출 균열면의 수압차(N/m^2), b 는 균열 길이(m), w 는 균열 폭(m), d 는 시편체 두께(m), η 는 물의 점성계수($N \cdot s/m^2$), ξ 는 균열면 특성에 의한 감소 계수이다.

식 (3)을 이용하여 유출수량을 예측하기 위해서는 균열면의 상태를 나타내는 감소 계수(ξ)가 중요한 인자가 된다. 감소 계수(ξ)를 시편의 특성을 나타내는 특정한 값으로 결정할 수 있다면, 실험조건에 의한 $\Delta P, b, d, \eta$ 와 함께 상수(α)로 나타낼 수 있다. 하지만 타 연구자들에 의해 제안된 감소 계수(ξ)는 그 범위가 넓고 사용재료 및 배합에 대한 정보가 부족하여 제안된 감소계수를 실제 적용하는 데 제한이 있다.^{4,12)}

3. 실험 연구

3.1 사용 재료 및 시편 제작

콘크리트의 경우 굵은 골재로 인해 균열 형상 조절이 힘들기 때문에 물-시멘트비 0.4, 잔골재-시멘트비 1.5인 모르타르를 사용하여 $\Phi 100 \times 50$ mm 시편을 제작하였다. 배합에 사용된 재료는 밀도 3.15 g/cm^3 인 1종 시멘트와 밀도 2.61 g/cm^3 , 조립율 2.60인 해사이다.

균열 모르타르 시편의 준비를 위해 Fig. 2와 같이 쪼갬 인장시험방법으로 $\Phi 100 \times 50$ mm 시편을 1/2로 분할한 뒤, 공기압축기를 사용하여 균열면의 미세 먼지 등 불순물을 제거하였다. 분할된 시편의 쪼개진 면의 양 끝에 실리콘 시트를 삽입하여 시편의 지름 방향으로 균열을 생성한 뒤, 시편의 위·아래를 스틸밴드로 외부 구속하여 균열폭이 유지되도록 하였다.

균열 경로(직선 혹은 곡선형태)에 따라 균열 길이 및 균열 폭이 달라질 수 있으므로 균열 길이 및 균열폭을 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 균열 길이는 시편의 상·하면에서

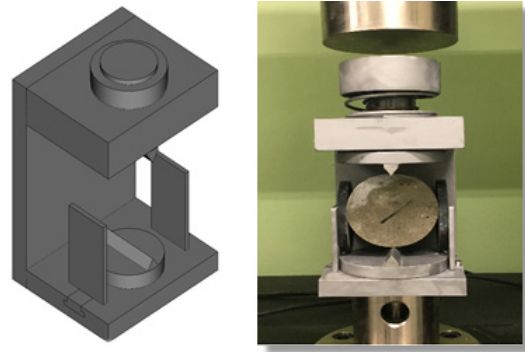


Fig. 2 Schematic illustration and crack inducing equipment

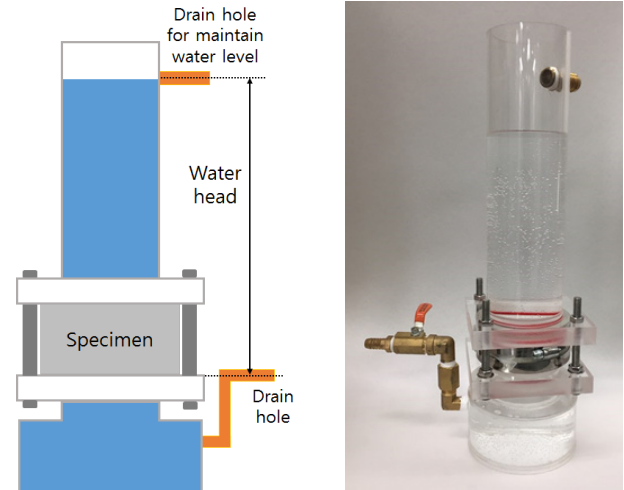


Fig. 3 Schematic illustration and permeability test equipment

각각 총 2회 측정하였으며, 균열폭은 상·하면 각각 3지점에서 6회, 총 12회 측정하여 평균값을 사용하였다.

3.2 정수위 투수시험

본 연구에서는 균열 시편의 유출수량을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 정수위 투수시험 장치를 고안하였다. 투수시험 장치에 균열 시편을 거치하고 시험 장치 상부에 물을 공급하여 목표로 하는 수두를 유지하였다. 이후 최소 5분 이상 시험체에 투수를 실시하여 시편 및 균열면에 있는 기포를 제거하고, 이후 1분 간격으로 총 5분 동안 유출수량을 측정하였다. 투수시험은 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 로 유지되는 항온항습실에서 실시하였으며, 동일한 시험 조건에 대해 3회 반복 수행하여 평균 유출수량을 구하였다.

3.3 실험 변수

본 연구에서는 균열 모르타르 시편의 투수시험을 위해 Table 1과 같이 수두차(h)와 균열폭(w)을 변수로 정하였다. 동일한 시편에 두께가 다른 5종류의 실리콘 시트를 각각 삽입하여 균열폭은 상이하고 동일한 균열면(균열 길이 방향의 분할면) 형상을 가진 시편을 제작하여 투수시험을 실시하였

Table 1 Test parameters

Classification	Level
Number of specimen	9 (S1~S9)
Crack width (mm)	0.05~0.15 (W1), 0.15~0.20 (W2) 0.20~0.30 (W3), 0.30~0.40 (W4) 0.40~0.50 (W5)
Water head (mm)	150, 300, 500, 700

다. 즉, 1개의 시편에 대해 5 종류의 균열폭을 생성한 뒤 4 수준의 수두차 조건에서 투수시험을 수행함으로써 총 20회의 투수시험을 실시하였으며, 9개의 시편에 대해 동일한 방법으로 반복 수행하였다.

4. 실험 결과 및 분석

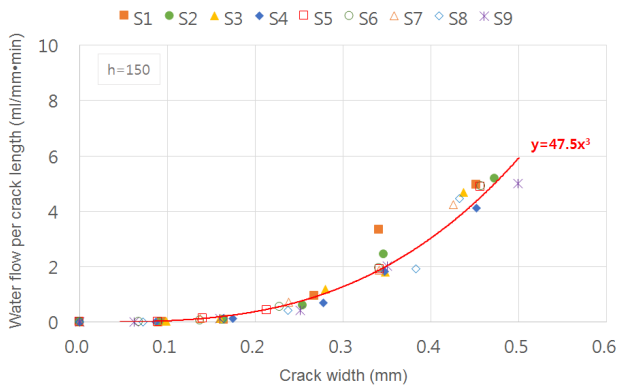
4.1 균열폭과 유출수량의 상관관계

실험에 사용한 시편의 평균 균열폭 및 표준오차를 균열 시편의 종류(S1~S9)와 실리콘 시트의 두께(W1~W5)에 따라 Table 2에 정리하였으며, 균열폭에 따른 유출수량을 수두차에 따라 Fig. 4에 나타내었다. 모든 수두 조건에서 단위 균열 길이당 유출수량(ml/mm·min)은 균열폭이 증가할수록 크게 증가하였다. Fig. 4에 표시된 실선은 식 (3)에 따라 유출수량(y축)을 균열폭(x축)에 대한 세제곱의 함수로 나타낸 것으로

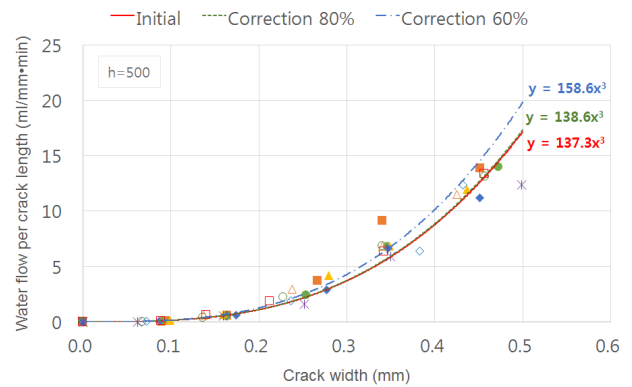
실험결과와 비교하면 균열폭(w)과 유출수량(q)의 관계가 Poiseuille 식에 부합하였다.

Table 2 Average and standard deviation of crack width (unit: μm)

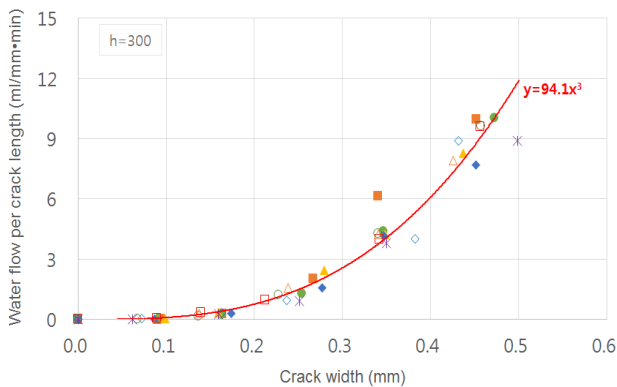
Classification	W1	W2	W3	W4	W5
S1	94.5 (28.7)	162.8 (23.2)	297.8 (120.1)	340.0 (29.7)	451.1 (34.7)
S2	91.1 (9.9)	163.4 (14.8)	248.1 (39.7)	341.1 (38.2)	469.5 (34.1)
S3	101.7 (32.9)	159.4 (25.6)	276.7 (32.4)	347.8 (26.4)	433.3 (25.1)
S4	86.1 (12.6)	180.6 (38.1)	279.4 (42.0)	341.1 (38.9)	452.8 (42.3)
S5	91.1 (13.7)	140.6 (28.7)	216.7 (39.2)	338.9 (36.6)	455.0 (23.4)
S6	69.5 (20.6)	135.6 (16.6)	230.0 (24.4)	343.3 (24.7)	456.7 (32.5)
S7	91.1 (16.6)	137.8 (12.6)	242.2 (29.2)	342.2 (26.6)	428.9 (63.3)
S8	71.7 (16.6)	162.8 (21.0)	240.5 (44.9)	386.1 (43.3)	427.8 (44.3)
S9	61.7 (15.9)	160.0 (12.8)	254.4 (34.4)	351.1 (28.8)	501.1 (51.1)



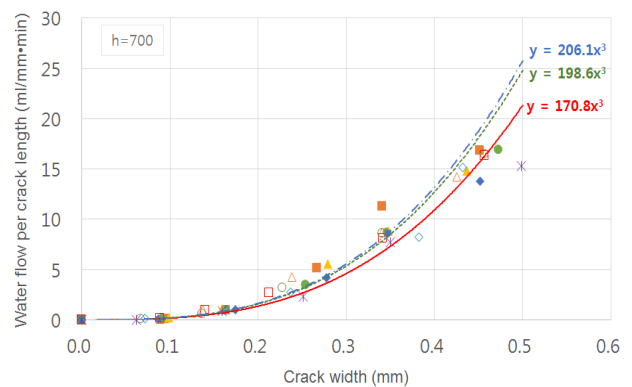
(a) h = 150 mm



(c) h = 500 mm



(b) h = 300 mm



(d) h = 700 mm

Fig. 4 Water flow vs. water head of cracked mortar specimens

Table 3 Relationship between water head and α

Classification		h=150	h=300	h=500	h=700
Initial	α	47.5	94.1	137.3	170.8
	h/α	3.16	3.18	3.64	4.10
Correction (80%)	$\alpha_{cor(80)}$	47.5	94.1	138.6	198.6
	$h/\alpha_{cor(80)}$	3.16	3.18	3.61	3.52
Correction (60%)	$\alpha_{cor(60)}$	47.5	94.1	158.6	206.1
	$h/\alpha_{cor(60)}$	3.16	3.18	3.15	3.40

4.2 수두차와 유출수량의 상관관계

Fig. 4(a)~(d)를 보면 균열폭과 무관하게 수두차가 증가할수록 단위 균열 길이당 유출수량(ml/mm·min)이 증가하는 것을 알 수 있다. 균열폭 0.25 mm에서 수두차가 150, 300, 500, 700 mm로 증가할수록 유출수량의 평균값은 각각 0.75, 1.53, 2.54, 3.75 ml/mm·min로 증가하였다. 또한 수두차가 커질수록 0.1~0.2 mm 범위의 작은 균열폭에서도 유출수량 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다.

식 (3)에서 유입 균열면과 유출 균열면의 수압차(ΔP)는 수두차(h)에 비례하므로 유출수량(q)은 수두차와 비례 관계를 가진다. Table 3의 Initial은 Fig. 4에 나타난 유출수량과 균열폭의 세제곱(w^3) 그래프의 기울기, 즉 식 (3)에서의 비례상수(α)를 수두차에 따라 정리한 것이다. 기울기는 수두차가 실제 실험에서 얻은 유출수량에 미친 영향을 포함한 값이므로 유출수량과 수두차가 비례관계를 가질 경우, 수두차와 기울기의 비(h/α)는 일정해야 한다. 하지만 수두차가 150, 300, 500, 700 mm로 증가함에 따라 수두차와 기울기의 비는 3.16, 3.19, 3.64, 4.10으로 증가하였다.

일반적으로 유체가 관 등을 흐를 때 점성으로 인한 접촉 벽면과의 외부 마찰이나 유체의 분자 간에 생기는 내부 마찰 때문에 에너지 손실이 발생한다. 이러한 에너지 손실은 유속의 제곱에 비례하므로 수두차와 균열폭이 커질수록 유속이 빨라지게 되어 수두손실이 크게 나타나게 된다.¹³⁾ 따라서 유출수량에 영향을 미친 실제 수두차가 Table 1에 나타난 수두차보다 작아지기 때문에 수두차/기울기의 비가 증가하는 것으로 사료된다.

수두차와 유출수량의 관계에서 수두손실의 영향을 최소화하기 위해 본 연구에서 얻은 최대 유출수량 16.9 ml/mm·min의 80, 60%인 13.5, 10.1 ml/mm·min를 각각 기준으로 하여, 기준값 이상의 유출수량이 측정된 시험 조건을 제외하고, 유출수량과 균열폭의 세제곱(w^3) 그래프의 기울기(α_{cor})와 수두차와 기울기의 비(h/α_{cor})를 Table 3에 정리하였다.

수두차 150, 300 mm 조건에서는 낮은 수두차로 인해 균열폭이 큰 W5 범위에서도 10.1 ml/mm·min 이상의 유출수량이 관찰되지 않았다. 반면, 수두차 500 mm 조건에서 13.5, 10.1 ml/mm·min를 각각 기준으로 한 경우, 수두차와 기울기의 비는 3.61, 3.15로 감소하였으며, 이러한 경향은 수두차 700 mm에서도 동일하게 나타났다. 특히 10.1 ml/mm·min를

기준으로 한 경우, 수두차와 기울기의 비($h/\alpha_{cor(60)}$)는 3.16~3.40로 초기값(h/α)과 13.5 ml/mm·min를 기준으로 한 경우($h/\alpha_{cor(80)}$)보다 좁은 변동폭을 나타냈다. 따라서 수두손실에 대한 보정을 통해 수두차(h)와 유출수량(q)에 Poiseuille 식의 비례 관계 적용이 가능할 것으로 사료된다.

4.3 유출수량을 통한 초기 균열폭 예측

앞 절에서 분석한 결과를 바탕으로 식 (3)을 이용하여 특정한 시험조건(수두차, 균열 시편의 종류, 시편의 두께, 균열 유발 방법 등) 하에서 유출수량에 따른 초기 균열폭을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 이때 유출수량은 균열폭의 세제곱에 비례하므로 유출수량이 10% 변동될 경우, 균열폭은 약 3.2% 변화하여 투수시험 과정에서 생긴 오차에 큰 영향을 받지 않을 것으로 사료된다.

이러한 가정을 확인하기 위해 Fig. 4의 시험에서 사용한

Table 4 Predicted crack width and measuring efficiency

Classification	Water flow (ml/mm·min)	Crack width				
		Measured w_m (mm)	Predicted w_p (mm)	$ w_m - w_p $	$\frac{ w_m - w_p }{w_m}$ (%)	
S10	W1	0.21	0.12	0.13	0.01	8.3
	W2	0.74	0.18	0.20	0.02	11.1
	W3	1.54	0.24	0.25	0.01	4.2
	W4	4.85	0.35	0.37	0.02	5.7
	W5	10.49	0.50	0.48	0.02	4.0
S11	W1	0.06	0.07	0.09	0.02	28.6
	W2	0.57	0.19	0.18	0.01	5.3
	W3	1.32	0.25	0.24	0.01	4.0
	W4	5.49	0.37	0.39	0.02	5.4
	W5	10.39	0.47	0.48	0.01	2.1
S12	W1	0.04	0.07	0.08	0.01	14.3
	W2	0.47	0.17	0.17	0.00	0.0
	W3	1.65	0.25	0.26	0.01	4.0
	W4	5.30	0.40	0.38	0.02	5.0
	W5	9.46	0.48	0.46	0.02	4.2
S13	W1	0.15	0.10	0.12	0.02	20.0
	W2	0.42	0.14	0.16	0.02	14.3
	W3	2.00	0.30	0.28	0.03	6.7
	W4	5.26	0.38	0.38	0.00	0.0
	W5	9.00	0.49	0.46	0.03	6.1
S14	W1	0.09	0.10	0.10	0.00	0.0
	W2	0.54	0.16	0.18	0.02	12.5
	W3	1.23	0.24	0.24	0.00	0.0
	W4	3.90	0.33	0.35	0.02	6.1
	W5	8.64	0.48	0.45	0.03	6.2

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(17SCIP-B103706-03)에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. Yang, Y., Yang, E. H., and Li, V. C., "Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 2, 2011, pp. 176-183.
2. Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., and Schlangen, E., "Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete", *Ecological Engineering*, Vol. 36, No. 2, 2010, pp. 230-235.
3. Tittelboom, K. V., Beile, N. D., Loo, D. V., and Jacobs, P., "Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 33, No. 4, 2011, pp. 497-505.
4. Rooij, M. D., Tittelboom, K. V., Belie, N. D., and Schlangen, E., *Self-healing phenomena in cement-based materials*, Springer, Netherlands, 2013, p. 37.
5. 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.
6. Kishi, T., "Development of crack self-healing concrete by cost beneficial semi-capsulation technique", *Proceedings of 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Kyoto Research Park, Kyoto, 2013, pp. 1-9.
7. Aldea, C. M., Shah, S. P., and Karr, A., "Permeability of cracked concrete", *Materials and Structures*, Vol. 32, No. 5, 1999, pp. 370-376.
8. Homma, D., Mihashi, H., and Nishiwaki, T., "Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 7, No. 2, 2009, pp. 217-228.
9. Lepech, M., and Li, V. C., "Water permeability of engineered cementitious composites", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, No. 10, 2009, pp. 744-753.
10. Hyun, T. Y., Kim, C. Y., and Kim, J. K., "Permeability of Cracked Concrete as a Function of Hydraulic Pressure and Crack Width", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 291-298.
11. El-Dieb, A. S., and Hooton, R. D., "A high pressure triaxial cell with improved measurement sensitivity for saturated water permeability of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 5, 1994, pp. 854-862.
12. Edvardsen, C., "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, 1999, pp. 448-454.

시편과 동일한 배합과 재료를 사용하여 추가 제작한 시편에 대해 상대적으로 수두손실이 작고 0.2 mm 이하의 작은 균열 폭에서도 균열폭 증가에 따른 유출수량의 차이가 크게 나타나는 수두차 300 mm 조건에서 투수시험을 수행하였다. Table 4에 광학현미경을 이용하여 측정된 균열폭(w_m)과 Table 3의 α 를 이용하여 예측한 초기 균열폭(w_p) 그리고 두 값의 차와 오차율이 정리되어 있다.

균열폭 측정값과 예측값의 차의 평균과 평균오차율은 각각 0.015 mm와 약 7.1%로 예측값과 측정값이 근사한 결과를 얻었다. W1에 해당하는 균열폭은 매우 작기 때문에 상대적으로 오차율이 크게 평가되었는데, S11-W1에서 예측 균열폭은 0.09 mm, 측정 균열폭은 0.07 mm로 차는 0.02 mm로 작은 수치에 해당하지만 오차율은 약 28.6%로 나타났다. 이러한 W1을 제외한 W2~W5에 해당하는 균열폭의 예측 오차율은 약 4.7%로 약 2.4% 낮아지는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 투수시험을 통한 균열 콘크리트의 자기치유 성능 평가의 기초 연구 단계로 균열 모르타르 시편을 사용하여 수두차와 균열폭을 변수로 투수시험을 수행하였으며, 시험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 균열 모르타르 시편의 유출수량은 Poiseuille의 법칙에 따라 수두차에 비례하고 균열폭의 세제곱과 비례하였다. 하지만 수두차와 균열폭이 큰 경우, 빠른 유속으로 인해 수두 손실이 큰 폭으로 나타나기 때문에 이에 대한 보정이 필요한 것으로 사료된다.
- 2) 균열 시편의 종류와 무관하게 수두차와 균열폭에 따라 일정한 유출수량을 얻을 수 있었다. 이는 균열 시편이 동일한 배합재료 및 배합비를 갖는 모르타르를 사용하여 제작되었기 때문에 균열면의 조도(roughness)가 유사하고 시편 상·하면 지름방향으로 유사한 균열 형상을 가진 시편을 사용하였기 때문으로 판단된다. 또한 유출수량을 균열 길이로 나누어 균열 경로에 따른 편차를 감소시켰기 때문으로 사료된다.
- 3) 동일한 배합 및 재료를 사용한 모르타르 시편에 대해 Poiseuille 식을 적용하여 균열 모르타르 시편의 유출수량으로부터 균열폭을 예측하였으며, 측정값과 예측값의 오차의 평균값은 약 7.1%이었다. 또한 작은 오차 범위에도 오차율이 크게 평가되는 W1 (0.5~0.15 mm)를 제외한 균열폭의 예측 오차율은 약 4.7%로 비교적 작게 나타났다.
- 4) 추후 배합 조건(물-결합재 비, 잔골재-결합재 비 등)과 사용 재료(잔골재 종류, 결합재 종류 등)가 유출수량 감소계수(ξ)에 미치는 영향을 규명한다면, 유출수량을 통한 균열 콘크리트 시편의 초기 균열폭 예측에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

13. Shin, K. J., Bae, W. H., Kim, S. W., and Lee, K. M.,
“Validation of permeability test for crack width assessment

of concrete”, healCON, TU Delft, Netherlands, 2016.

요 약 최근 콘크리트 구조물의 유지보수 문제가 대두되면서 구조물에 발생하는 균열을 스스로 치유하는 자기치유 기술이 활발히 연구되고 있다. 현재 자기치유 콘크리트의 치유 성능 평가에 투수시험이 널리 사용되지만, 이와 관련된 표준화된 방법이 없어 시험결과의 비교에 어려움이 있다. 또한 콘크리트의 자기치유 성능은 초기 균열폭에 큰 영향을 받는데, 콘크리트의 균열폭 측정을 위한 표준화된 방법도 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 정수위 투수시험 장치를 이용하여 수두차와 균열폭이 유출수량에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 투수 시험 결과의 회귀 분석을 통해 유출수량과 초기 균열폭의 상관관계식을 제안하였으며, 제안된 식을 이용하여 예측한 모르타르 시편의 균열폭이 광학현미경을 이용하여 측정한 실제 균열폭과 잘 일치하는 결과를 얻었다.

핵심용어 : 투수시험, 모르타르, 균열폭, 유출수량, 자기치유