

유한요소해석에 기반한 콘크리트 균열 조건에 따른 수분흡수 현상 분석

김건수¹, 박기태², 김재환^{3*}

FEA Simulations on Water Absorption in Various Pre-Cracked Concretes

Kun-Soo Kim¹, Ki-Tae Park², Jaehwan, Kim^{3*}

Abstract: This study performed simulating water absorption in various pre-cracked concretes. 2D-Finite Element Analysis (2D-FEA) model was developed based on experimental results on the amount of absorbed water in concrete with the exposure time. Results from the 2D-FEA showed that both crack width and crack depth strongly affect the amount of absorbed water in cracked concrete. In addition, water absorption rate is introduced and a predictive equation is suggested to estimate the rate in order to quantify the amount of absorbed water in cracked concrete. It was confirmed that water absorption in concrete having less than 150 mm crack depth was dominated as a main transport factor regardless of crack width. Therefore, considering that steel corrosion caused by chlorides dissolved in water mainly occurs in reinforced concrete structures, it is necessary that crack depth as well as crack width should be investigated in reinforced concrete structures at the time of field-inspection.

Keywords: Water absorption, Finite element analysis, Crack conditions, Reinforced concrete, Absorbed amount

1. 서론

철근콘크리트는 건설 분야에서 가장 폭넓게 사용되는 대표적인 건설재료로서 국가 기능유지에 중요한 역할을 하는 대부분 사회기반시설(교량, 터널, 댐 등)에도 철근콘크리트를 사용하고 있다. 외부에 설치된 철근콘크리트 구조물은 다양한 열화인자들에 항상 노출되기 때문에 구조물 열화에 의한 성능 저하 가능성이 매우 크다. 그 중 철근 부식에 의한 열화가 대표적이고, 열화 물질(염화물, 이산화탄소 등)들이 피복 콘크리트를 통해 침투하여 발생하게 된다(Jones, 1997; Angst et al., 2012).

설계단계에 반영된 철근콘크리트의 성능을 지속적으로 유지하기 위해서는 우선적으로 철근 부식을 예방하는 것이 매우 중요하고, 이를 위해서는 피복 콘크리트로 유입되는 유해물질의 이동에 대한 이해가 필요하다. 그에 앞서 이러한 유해물질은 수분을 매개로하여 이동하기 때문에 피복 콘크리트내의 수분의 이동을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 공학적인 관점에서 볼 때, 일반적인 환경에서 콘크리트는 건조수축 등으로 인

하여 자연적으로 균열을 갖게 되며, 시설물안전법에 의해 수행되는 안전점검진단 세부지침에서도 균열 폭 0.1 mm 이하는 a 등급, 0.3 mm 이하는 b등급으로 분류하여 콘크리트 균열을 어느 정도 허용하고 있다(KALIS, 2019). 하지만 최근 연구결과에 따르면 건조한 상태의 콘크리트에서는 균열 폭 0.1 mm, 0.3 mm 일지라도 피복두께 이상으로 염화물이 함유된 수분이 급격하게 흡수할 수 있음을 알 수 있다(Kim et al., 2020). 따라서 철근콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 위해서는 열화가속 요인을 사전에 제거하여 시설물의 열화를 최대한 지연시키기 위한 다양한 예방적 유지관리가 필요하다.

콘크리트에 발생된 균열은 수분 또는 다양한 열화인자의 이동 통로로 우선적으로 이용되어 콘크리트 내부로 급속하게 침투할 수 있으며, 이로 인한 재료적 손상 또는 열화 발생 가능성에 대해서는 여러 연구 결과들에 의해 보고되고 있다. 그 중 에서 콘크리트 내부로 흡수되는 수분의 이동 현상을 관찰하기 위한 연구들이 진행되었으며, 대표적인 방법으로는 콘크리트 실험체에 X선을 투사하는 방법(Van Belleghem et al., 2016; Šavija et al., 2017), 중성자 빔 또는 EPMA(Electron Probe Micro Analysis, EPMA)을 이용하여 분석하는 연구(Hanžič and Ilić, 2003; Kanematsu et al., 2009; Ye et al., 2013)로 나눌 수 있다. 기존 연구결과에 따르면 콘크리트 표면을 통해 수분 또는 열화인자들이 균열 깊이 까지 빠르게 도달 할 수 있으며, 결과적으로 이러한 현상이 콘크리트 내구성에 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 실제 교량 현장에서

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원

*Corresponding author: jaehwankim@kict.re.kr

Korea Institute of Civil and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

는 보수보강 주기가 상대적으로 짧은 교량 바닥판의 경우에 염화물이 포함된 우수 침투가 주요 열화원인으로 지목되고 있다. 우수 침투에 의한 철근콘크리트 구조물의 손상 및 열화에 의한 피해를 줄이기 위해서는 이러한 현상에 대한 정량적 분석을 통해 침투 현상에 대한 사전적 예측이 수행될 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 기존 연구의 실험결과(Hanžič and Ilić, 2003; Van Belleghem et al., 2016; Kim et al., 2020)를 활용하여 유한요소모델을 개발하고, 이를 활용하여 다양한 균열 조건을 갖는 콘크리트의 수분 침투 현상을 해석적으로 분석하였다.

2. 콘크리트 수분 흡수 현상 유한요소해석

2.1 유한요소해석 방법 및 개요

콘크리트의 수분 흡수 현상을 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, 분석을 위하여 재료간의 질량 확산 해석이 가능한 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하였다(Roh et al., 2013; Jafarifar et al., 2014). 콘크리트에 존재하는 미세균열의 형상을 직접적으로 고려하지 않고 모델링을 하는 경우, 일반적인 확산 모델링을 적용하는 것이 효과적인 해석방법이 될 수 있다(Li et al., 2018). 또한 균열을 갖는 콘크리트에서 수분 흡수 현상을 해석하기 위해서는 콘크리트부와 균열부로 나누어 재료의 물성치를 다르게 고려해야 한다. 콘크리트 수분 흡수 현상은 일반적인 이온 확산과 달리 미세 모세관 현상에 의해 짧은 시간동안 발생하며, 콘크리트의 흡수 상태 또한 매우 중요한 변수가 된다. 하지만 국부적인 미세 흡수 현상을 분석하는 것이 아니라면, 콘크리트를 균질한 재료로 가정하고 동일한 물성치를 적용하여 수치해석을 수행해도 무방하다(Li et al., 2018). 본 연구의 수치해석에서 활용하고자 하는 기존 실험결과는 거시적인 수분 흡수 현상에 대한 연구결과이므로 미세 균열, 골재 분포, 공극 등의 국부적인 요인은 고려하지 않았다.

질량 확산 유한요소해석에 필요한 재료의 물성치는 확산성(Diffusivity), 용해도(Solubility) 두 가지이다. 콘크리트의 확산성은 단위 면적당 수분을 전달하는 속도를 의미하고, 용해도는 단위 부피당 흡수 할 수 있는 수분의 총량을 의미한다. 즉, 확산성은 주로 콘크리트 내부 공극의 연결성과 관련되고, 용해도는 콘크리트 내부의 공극양과 연관되어 있다. 두 물성치 모두 콘크리트의 물-시멘트비 또는 사용된 혼화재의 특성과 같은 재료적 성질과 밀접한 관련이 있으며(McCarter et al., 2000), 추가로 용해도의 경우는 콘크리트 내부에 함유된 습도에 의해 결정되는 물성치이다. 즉 콘크리트 수분 포화도가 높으면 흡수할 수 있는 수분의 양이 상대적으로 감소하므로, 용해도 값은 작아진다. 콘크리트의 확산성과 용해도에 의해 결정되는 지배 방정식은 아래 식 (1)과 같다. 식 (1)에 나타난 영

향 이외에 ABAQUS에서는 온도 및 압력의 변화에 의한 효과를 고려한 수치해석이 가능하지만, 본 연구에서는 동일한 온도, 수압을 갖는 조건으로 고려하였다.

$$J = -sD \cdot \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (1)$$

여기서, J 는 흡수된 수분의 총 량(Water Concentration Flux)을 의미하고 s 는 콘크리트의 용해도(Solubility), D 는 확산성(Diffusivity)을 의미한다. $\partial \phi / \partial x$ 는 임의의 위치 x 에서 흡수된 수분의 포화 수준을 의미한다.

2.2 유한요소 모델 및 재료 물성치

유한요소모델은 해석의 효율성을 고려하여 2차원으로 모델링하였다. 질량 확산해석이 가능한 4절점 솔리드 요소(DC2D4)를 사용하였고, 가로-세로 각각 1 mm 크기의 정밀한 요소망을 사용하였다. 물이 직접 접촉하는 부분의 요소면의 수분 농도(Water Concentration)을 1.0 으로 가정하고 흡수 시간동안 변하지 않도록 경계조건을 설정하였다. 콘크리트 재료의 정확한 확산성과 용해도 값을 얻는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이며, 기존 실험에서도 정확한 수치를 분석한 결과는 없다. 따라서 본 연구에서는 기존 실험결과와 유사한 결과를 나타내는 콘크리트의 확산성과 용해도를 역으로 추정하였다. Hanžič and Ilić(2003), Van Belleghem et al.(2016), Kim et al.(2020)이 수행한 실험결과를 통하여 콘크리트 및 균열부의 물성치를 추정하였으며, 사용된 값은 Table 1과 같다.

외부에 노출된 콘크리트의 수분 흡수현상은 균열조건 뿐만 아니라 온도, 습도, 콘크리트 수분포화 상태와 같은 환경조건에 의해 영향을 받는다(Castro, J. et al., 2011; Alasward, G. 2018). 하지만 외부 환경조건과 수분 흡수와의 관계를 정량적으로 분석한 실험적 연구는 아직 부족한 상황이며, 본 연구에서는 기존 실험결과들을 바탕으로 균열조건의 영향만을 변수로 하여 유한요소해석을 수행하였다.

Table 1 Material properties of finite element model

Finite Element Model	Diffusivity [mm ² /s]	Solubility [10 ⁻³ g/mm ³]
Concrete Zone	0.0492	0.1*
		0.073**
		0.0275***
Crack Zone	Width : 0.1mm	1
	Width : 0.3mm	1

* : Calculated Value by Results of Hanžič and Ilić(2003)

** : Calculated Value by Results of Van Belleghem et al.(2016)

*** : Calculated Value by Results of Kim et al.(2020)

3. 기존 실험 및 유한요소해석 결과

3.1 균열이 없는 조건의 수분 흡수 현상

Hanžič and Ilić(2003)은 균열이 없는 콘크리트 실험체를 혼화재의 종류에 따라 제작하고, 용액의 종류(물, 기름)에 따른 흡수 시간별 흡수량을 분석하였다. 실험결과 보통 포틀랜드 시멘트로 제작된 실험체의 수분 흡수속도가 가장 빨랐으며, 혼화재가 들어간 실험체에서는 흡수 지연 효과가 나타났다. 본 연구에서는 혼화재가 포함되지 않은 실험체의 침투시간에 따른 흡수량 실험결과와 추정식(식 (2))을 유한요소해석 결과와 비교하였다(Fig. 1 참조). Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 본 연구에서 사용한 유한요소모델은 비균열 조건(C00)에서 콘크리트의 수분 흡수현상을 정확하게 반영하였음을 알 수 있다. Hanžič and Ilić(2003)에 의해 제안된 추정식을 식 (2)에 나타내었다.

$$i = S \times \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, i 는 단위면적당 흡수된 액체의 체적(mm^3/mm^2)을 의미한다. S 는 흡수계수($\text{mm}/\text{h}^{0.5}$)로써 혼화재가 없는 실험체

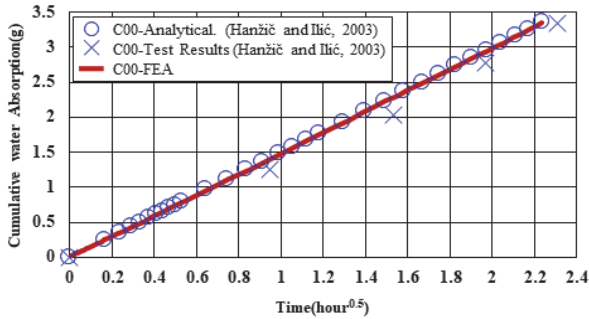


Fig. 1 Comparison of test results and FEA (Hanžič and Ilić, 2013)

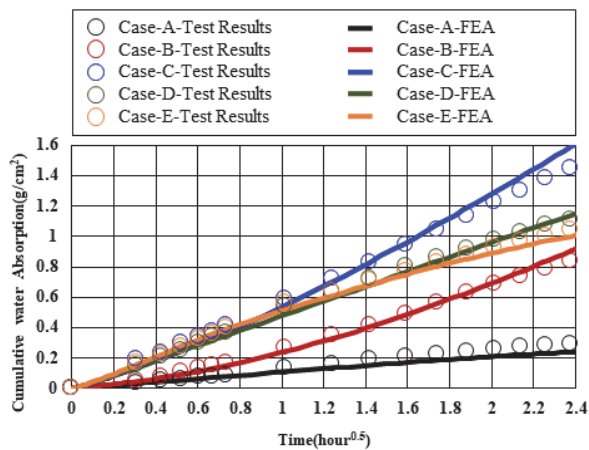


Fig. 2 Comparison of test results and FEA (Van Belleghem et al., 2016)

의 경우 1.5 를 사용하고 AE제가 사용된 경우 1.3, 가소제가 사용된 경우 1.0 을 사용한다. t 는 흡수시간(hour)을 의미한다.

3.2 균열 간격에 따른 수분 흡수 현상

Van Belleghem et al.(2016)은 0.3 mm 폭 박판을 사용하여 다양 균열 간격 및 개수를 갖는 실험체를 제작하고, 수분 흡수 실험을 실시하였다. 균열 조건별 단위 면적당 흡수량을 비교하였고, 실험체에 흡수된 수분의 분포형상을 시각적으로 확인하기 위하여 X선을 투사하여 흡수시간별 이미지 촬영을 수행하였다. Fig. 2에서는 흡수시간별 단위 면적당 흡수량에 대한 실험결과와 유한요소해석 결과를 함께 나타내었다. Van Belleghem et al.(2016)의 실험에서 Case-A 는 균열이 없는 실험체에 대하여 면적 전체에서 물을 흡수시킨 경우이며, Case-B 는 Case-A 와 마찬가지로 균열이 없으나, 일부 구간에서만 수분 흡수가 발생되도록 수행한 실험이다. Case-C 는 균열 1 개, Case-D 는 균열 2 개, Case-E 는 균열 3 개에 대한 흡수실험 결과이다.

3.3 균열 폭에 따른 수분 흡수 현상

Kim et al.(2020)은 100 mm × 100 mm × 400 mm 의 콘크리트 실험체에 휨 응력을 도입하여 폭 0.1 mm, 0.3 mm 의 균열을 갖는 실험체를 제작하였다. 해당 실험체에 대하여 물과 제설제 용액을 흡수시키는 실험을 실시하고, 흡수시간별 물과 염화물 흡수량을 분석하였다. 또한 염화물이 흡수된 균열부의 단면에 질산은을 분무하여 변화된 단면 색상에 대한 이미지 분석을 수행하였다. 이미지 분석결과 짧은 시간 내에 균열면을 통한 염화물질의 흡수가 가능함을 확인하였다. 특히 시설물 정밀안전진단 세부지침에서 균열부 a-b등급 기준인 0.1 mm 에서도 염화물이 철근까지 흡수하고 철근을 따라 확산될 수 있음을 확인하였다. Kim et al.(2020)의 실험결과를 유한요소해석 결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 균열폭

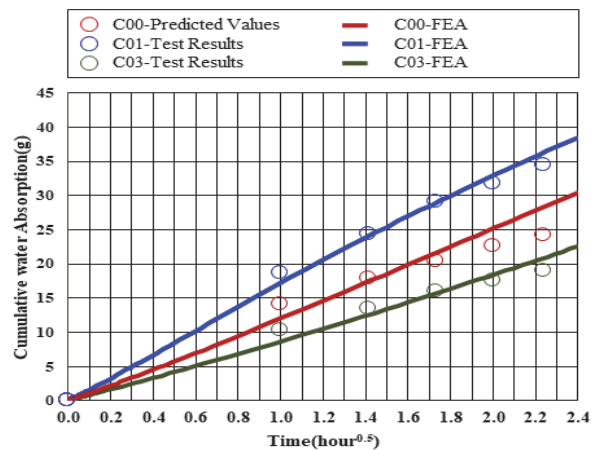


Fig. 3 Comparison of test results and FEA (Kim et al., 2020)

0.1 mm(범례: C01), 0.3 mm(범례: C03) 데이터는 Kim et al.(2020)이 직접 수행한 실험결과이며, 균열이 없는 조건(범례: C00)의 데이터는 Van Belleghem et al.(2016)의 결과를 바탕으로 예측한 값을 사용하였다. Kim et al.(2020)의 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교해 보면 앞서 비교한 Hanžič and Ilić(2003), Van Belleghem et al.(2016)의 실험결과에 비해 다소 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 인위적으로 균열의 폭, 깊이, 형상을 조정하여 균일한 균열조건을 갖도록 제작된 실험체를 사용한 Hanžič and Ilić(2003), Van Belleghem et al.(2016)의 실험과 달리, Kim et al.(2020)의 실험에서는 균열조건을 제어하기 어려운 휨 균열을 발생시킴으로써 균열깊이, 균열 형상 및 미세균열 등의 불확실성이 실험결과에 영향을 준 것으로 판단된다. 유지관리 실무적 관점에서 실제 균열형상을 정확하게 예측하고 이를 반영하는 것은 어려움이 있으며, 균열의 변동성이 매우 큼을 고려할 때 다소 비효율적이다. 따라서 실제 균열형상을 반영하여 수분 흡수 현상을 분석하기 위해서는 균열 폭 및 균열 깊이를 고려한 다양한 실험적 연구가 선행되어야 할 것으로 보인다.

4. 균열조건에 따른 수분 흡수량 분석

4.1 유한요소 모델 제원 및 형상

균열조건에 따른 영향을 분석하기 위한 유한요소 모델의 요소 크기, 물성치는 Table 1에서 Kim et al.(2020) 실험결과로 도출된 값을 사용하였다. 앞선 연구들에서 제시한 실험방법 및 결과를 보면 콘크리트의 함수 상태가 정량적으로 제공하지 않았지만(Hanžič and Ilić, 2003; Van Belleghem et al., 2016; Kim et al., 2020), 수분의 순간적인 이동에 의해 발생하는 흡수 현상에서는 콘크리트의 함수 상태가 흡수속도 및 흡수량을 결정하는 주요인자이다. ABAQUS를 이용한 수치해석에서는 용해도 물성치를 통하여 콘크리트의 함수 상태를 나타낼 수 있으며, 해석에 사용된 값은 모델링 과정에서 추정된 값들이다. Table 1에 나타낸 바와 같이 연구자의 실험조건에 따라 0.0275 ~ 0.1 까지 큰 폭의 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 Kim et al.(2020)의 연구결과와 유사한 결과를 나타낸 용해도 값인 0.0275 를 모든 모델에 사용하였다. 모델의 제원은 길이 1,500 mm, 높이 300 mm 의 2차원 모델이며, 1 mm × 1 mm (가로×세로)의 4절점 솔리드 요소 450,000 개로 이루어져 있다. 모델 하면 양단부로부터 각각 250 mm 떨어진 곳 까지를 제외한 1,000 mm 구간에서 수분 흡수가 발생하는 것으로 가정하였다. 균열 조건은 균열의 폭(W), 깊이(D), 간격(SP)을 변수로 하였으며, 모델별 균열조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Details of finite element model

Finite Element Model	Crack Conditions			
	No. of Cracks	Width [mm]	Depth [mm]	Spacing [mm]
W00-D000-SP000	0	0	0	0
W01-D025-SP000	1	0.1	25	0
W01-D050-SP000	1	0.1	50	0
W01-D075-SP000	1	0.1	75	0
W01-D100-SP000	1	0.1	100	0
W01-D150-SP000	1	0.1	150	0
W01-D200-SP000	1	0.1	200	0
W01-D250-SP000	1	0.1	250	0
W01-D050-SP010	2	0.1	25	10
W01-D050-SP020	2	0.1	50	20
W01-D050-SP030	2	0.1	75	30
W01-D050-SP040	2	0.1	100	40
W01-D050-SP050	2	0.1	150	50
W01-D050-SP100	2	0.1	200	100
W01-D050-SP150	2	0.1	250	150
W01-D050-SP200	2	0.1	200	250
W03-D025-SP000	1	0.3	25	0
W03-D050-SP000	1	0.3	50	0
W03-D075-SP000	1	0.3	75	0
W03-D100-SP000	1	0.3	100	0
W03-D150-SP000	1	0.3	150	0
W03-D200-SP000	1	0.3	200	0
W03-D250-SP000	1	0.3	250	0
W03-D050-SP010	2	0.3	25	10
W03-D050-SP020	2	0.3	50	20
W03-D050-SP030	2	0.3	75	30
W03-D050-SP040	2	0.3	100	40
W03-D050-SP050	2	0.3	150	50
W03-D050-SP100	2	0.3	200	100
W03-D050-SP150	2	0.3	250	150
W03-D050-SP200	2	0.3	150	200

4.2 비균열 조건의 단위면적당 흡수량

균열조건에 따른 수분 흡수량 변화를 분석하기 위해서는 우선 비균열 조건에서의 수분 흡수에 대한 분석이 수행되어야 한다. Fig. 4에서는 모델 W00-D000-SP000의 결과와 함께 W01-D250-SP000, W03-D250-SP000의 결과를 예시로 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 비균열 또는 균열조건 시의 수분 흡수량은 앞서 분석한 기존의 연구결과 및 유한요소해석 결과와 동일하게 시간 제곱근(time^{0.5})의 함수로 표현이 가

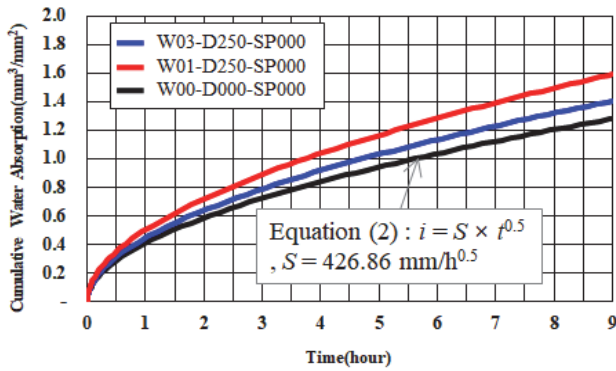


Fig. 4 Example of FEA results

능하다. 따라서 균열조건에 따라 추가적으로 흡수되는 수분의 양 역시 시간 제곱근($\text{time}^{0.5}$)의 함수로 표현이 가능하므로, 유한요소해석을 통해 얻은 각 조건별 함수의 계수와 W00-D000-SP000 모델의 계수($S=426.86$, Fig 4참조)의 차이를 분석하여 균열 깊이 및 균열 간격에 따른 흡수시간별 수분 흡수 증가량을 비교하였다.

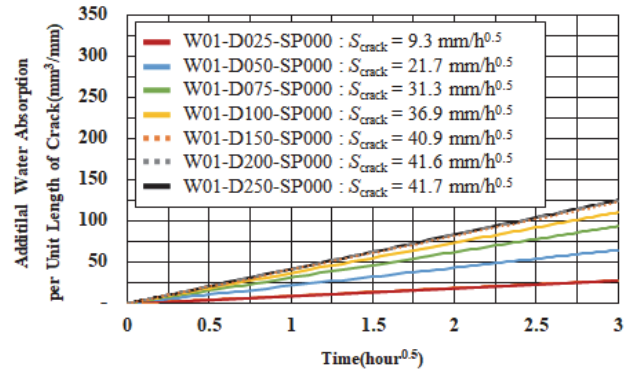
4.3 균열 깊이에 따른 흡수량 증가 효과

균열을 통한 수분의 급격한 흡수는 열화물질을 철근에 직접 전달시킬 수 있으며, 이는 철근콘크리트 부재의 손상 및 열화에 큰 영향을 준다. 특히 균열 폭과 균열 깊이는 매우 중요한 균열조건이다. 균열 폭이 커질수록 수분 흡수속도는 급격하게 증가하고, 균열 깊이가 깊어질수록 수분은 콘크리트 내부로 깊숙하게 흡수된다. 만약 균열 깊이가 철근의 피복두께 이상이면 철근의 열화 및 손상에 대한 위험에 직접적으로 노출되어 있다고 할 수 있다. 한편, 균열로 인해 추가적으로 발생하는 수분 흡수량을 고려하면 식(2)는 아래와 같이 식(3)으로 나타낼 수 있다.

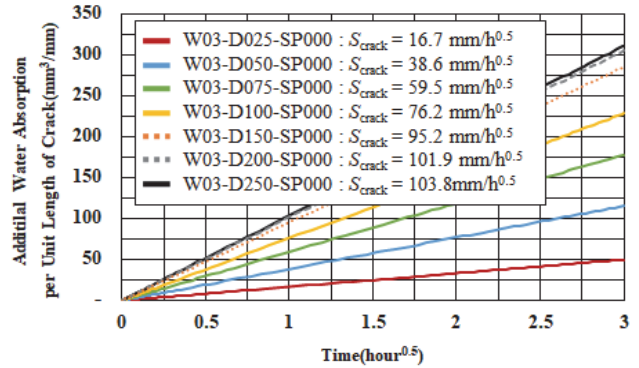
$$V_w = (A_w \cdot S_{concrete} + S_{crack} \cdot l_{crack}) \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

여기서, V_w 는 흡수된 수분의 총 양으로 비균열 상태 콘크리트의 흡수량과 균열부를 통한 흡수량의 합으로 나타낼 수 있다. 비균열 상태 콘크리트 표면으로부터 흡수되는 양은 흡수 계수($S_{concrete}$, $\text{mm}^3/\text{h}^{0.5}$) 와 흡수 면적(A_w , mm^2) 의 곱으로 결정된다. S_{crack} 은 균열부의 단위 길이 당 흡수계수($\text{mm}^3/\text{h}^{0.5} \cdot \text{mm}$) 이며, 균열 폭 및 균열 깊이의 영향을 받는다. l_{crack} 은 흡수면적(A_w)에 존재하는 총 균열길이(mm)를 의미하고, t 는 흡수시간(h)을 의미한다.

균열 폭 0.1 mm 및 0.3 mm 조건에서 균열 깊이가 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm 로 증가함



(a) Crack Width : 0.1 mm



(b) Crack Width : 0.3 mm

Fig. 5 Additional water absorption by crack depth

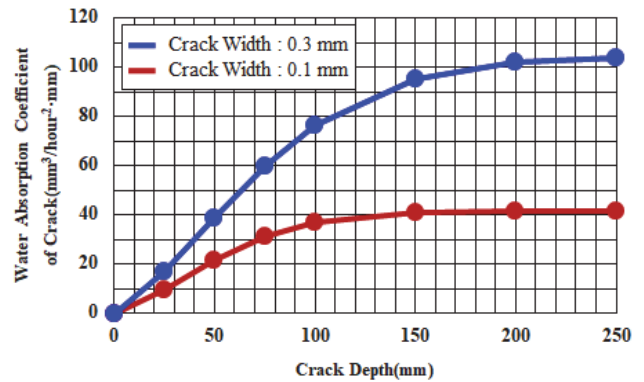


Fig. 6 Water absorption coefficient by crack depth

에 따라 균열부를 통해 추가로 흡수되는 수분의 양을 해석적으로 분석하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타난 균열 폭 0.1 mm 조건에 비해 Fig. 5(b)의 균열 폭 0.3 mm 조건에서 균열 깊이가 증가에 따른 수분 흡수량의 증가가 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 균열 깊이에 따른 균열부 단위 길이 당 흡수계수(S_{crack})의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 균열 깊이가 25 mm 에서 50 mm로 증가 할 때, 균열 폭 0.1 mm 에서 S_{crack} 는 $9.3 \text{ mm}^3/\text{h}^{0.5}$ 에서 $21.7 \text{ mm}^3/\text{h}^{0.5}$ 로 증가하고, 균열 폭

0.3 mm 에서 S_{crack} 는 $16.7 \text{ mm/h}^{0.5}$ 에서 $38.6 \text{ mm/h}^{0.5}$ 로 증가하여, 균열 깊이가 낮은 경우에는 균열 깊이의 증가 대비 S_{crack} 의 증가율이 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 균열 깊이가 매우 작은 경우에는 비균열 콘크리트의 수분 흡수량이 지배적일 수 있음을 의미한다. 일정 균열 깊이를 넘어서면서 S_{crack} 는 선형으로 증가하는 경향을 보이다가 S_{crack} 의 증가량은 점점 작아진다. 이러한 현상은 균열 폭 0.1 mm 에서는 균열 깊이 105 mm, 균열 폭 0.3 mm 에서는 균열 깊이 150 mm 수준 이후에는 거의 변화가 없어진다. 이러한 경향을 반영하여 균열 폭 및 균열 깊이의 수준에 따른 흡수량 변화를 예측할 수 있다. 식 (3) 의 균열 부의 단위 길이 당 흡수계수 $S_{crack}(\text{mm}^3/\text{h}^{0.5} \cdot \text{mm})$ 가 균열 폭 및 균열 깊이의 영향을 받는다고 가정하면, S_{crack} 는 식 (4)와 같이 α , β , D_{crack} 의 곱으로 표현된다. 식 (4)에 적용되는 변수 조건을 Table 3에 나타내었고, 식 (4)를 통해 추정된 S_{crack} 과, 유한요소해석을 통해 얻은 S_{crack} 을 Fig. 7에 나타내었다.

$$S_{crack} = \alpha \cdot \beta \cdot D_{crack}, D_{crack} \leq D_{max} \quad (4)$$

Table 3 Water absorption parameters of equation (4)

Equation Parameter	Crack Width	
	0.1 mm	0.3 mm
α	1	1.8
$\beta (\text{mm}^{-1})$	0.392 mm^{-1}	
$D_{crack} (\text{mm})^*$	$D_{crack} \leq D_{max}$	
$D_{max} (\text{mm})$	105 mm	145 mm

* D_{crack} : Crack Depth(unit : mm); When the value of D_{crack} is greater than D_{max} , the value of D_{max} is used instead of the D_{crack} .

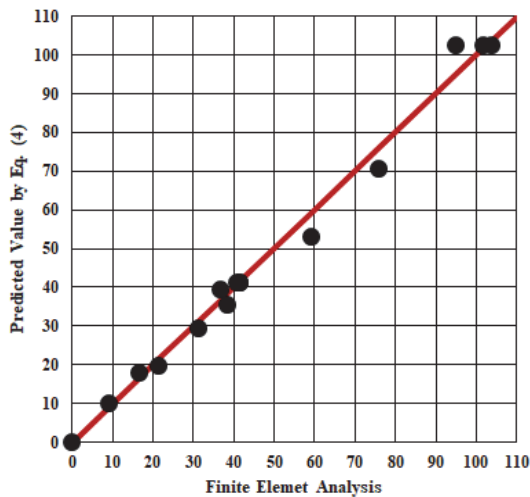


Fig. 7 Comparison of equation (4) and FEA

여기서, $S_{crack}(\text{mm}^3/\text{hour}^2 \cdot \text{mm})$ 은 균열부에서 추가로 흡수되는 수분에 대한 균열의 단위 길이 당 흡수계수이며(식 (3) 참조), α 는 균열 폭에 대한 보정계수 이고, $\beta(\text{mm}^{-1})$ 는 균열 깊이 변화에 따른 보정계수이다. D_{crack} 은 균열 깊이(mm)를 의미하고, $D_{max}(\text{mm})$ 를 초과할 수 없다.

4.4 균열 간격에 따른 흡수량 증가 효과

인접한 균열간격에 의한 수분 흡수량의 변화를 확인하기 위하여, 균열 깊이 50 mm 에 두 개의 균열이 있는 조건에 대하여 균열 간격 10 mm, 20 mm, 30mm, 40 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm 에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

균열 간격 증가에 따른 S_{crack} 의 증가량을 Fig. 8에 나타내었고, 균열 간격 증가에 따른 흡수계수 증가율의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8의 점선은 균열 개수 1개, 균열 깊이 50 mm 조건에서 유한요소해석을 통해 얻은 S_{crack} 값이고, 파선은 앞서 언급한 S_{crack} 의 2배 값이다. Fig. 8와 Fig. 9에서와 같이, 흡수량의 증가는 균열 폭에 의한 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다. 또한 약 10mm 수준의 좁은 균열 간격에서도 흡수계수는 1.5 배 이상 증가하였고, 균열 간격이 50 mm ~ 100

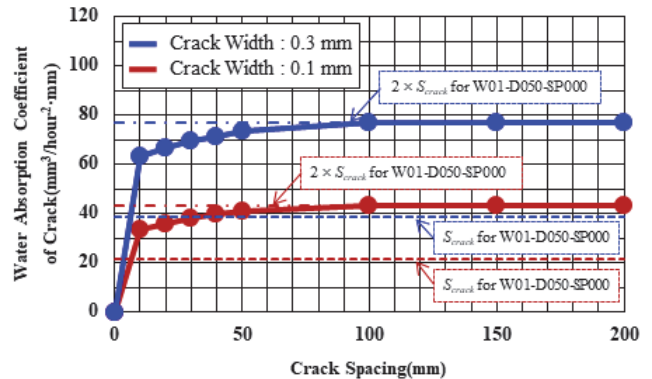


Fig. 8 Water absorption coefficient by crack spacing

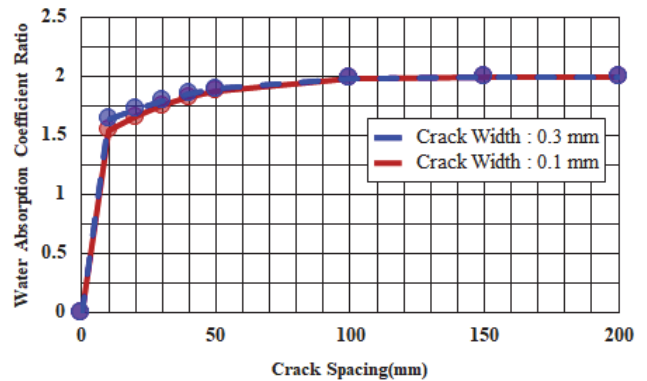


Fig. 9 Water absorption coefficient ratio by crack spacing

mm 사이에서 2배에 도달하는 것을 확인하였다. 따라서 100 mm 이상의 균열간격에서는 균열 상호간의 영향이 거의 없을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 표면으로부터 발생하는 수분 흡수 현상을 해석적으로 분석하였다. 기존 연구결과를 바탕으로 유한요소모델을 개발하고 실험결과와 이를 비교하였고, 검증된 유한요소모델을 기반으로 다양한 균열조건(균열 폭, 균열 깊이, 균열 간격)을 갖는 모델에 대한 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 표면의 직접적인 수분 흡수현상을 기존의 실험결과를 바탕으로 유한요소모델을 개발하였다. 변수로는 콘크리트 균열유무, 균열 간격, 균열 폭이다. 한편, 기존 실험결과에서는 콘크리트의 실험체의 건조 상태에 대한 정량적 수치가 제공되지 않아, 유한요소모델의 결과로부터 추정하였다. 결과를 보면, 일정한 폭과 깊이의 균열을 갖는 실험결과와 해석결과가 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용한 유한요소해석 기법은 비교적 거시적인 관점에서의 흡수 현상을 충분히 반영할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 기존 흡수면적에 기반 한 흡수량을 나타내는 지표는 선단위로 표현되는 균열부의 흡수량을 표현하는데 어려움이 있었다. 이를 보완하여, 균열의 단위길이 당 추가적으로 발생하는 수분 흡수량을 나타낼 수 있는 균열부 흡수 계수(S_{crack} , $\text{mm}^3/\text{h}^{0.5} \cdot \text{mm}$) 개념을 도입하여, 예측 식을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 식은 제한된 균열폭 및 균열 깊이에 대한 영향을 고려했기 때문에, 제안식의 정확도를 높이기 위해서 추가적인 실험 및 해석이 수행되어야 한다.
- 3) 균열 깊이와 흡수량과의 관계에서는 균열폭 크기와 관계없이 균열 깊이가 일정 수준 도달하기 전 (<150 mm)까지는 흡수량이 선형으로 증가되는 경향을 보였다. 이는 균열 깊이 150 mm 이하의 철근콘크리트 구조물에서는 흡수 현상으로 인한 철근의 손상 및 열화가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 실제 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 시설물의 점검 및 진단 시에 균열 폭 뿐만 아니라 균열 깊이에 대한 조사가 동시에 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 두 개의 균열이 존재 할 때, 균열 간격에 따른 흡수량의 변화에 대한 유한요소해석 결과 균열 폭에 따른 흡수량의 차이는 크지 않았다. 결과를 살펴보면, 균열 간격이 10 mm 와 100 mm 초과할 때, 흡수량이 단일 균열조건

약 1.5배와 2배로 각각 확인하였다. 이는 대형 철근콘크리트 구조물에서 구조적 영향을 미칠 수 있는 균열의 발생 간격을 고려할 때, 균열 간격으로 인한 흡수량 감소효과는 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

- 5) 본 연구에서 수행한 유한요소해석 모델은 실제 다양한 형상을 갖는 균열의 흡수현상을 반영하기에는 어려움이 있다. 이를 개선하기 위해서는 실제 균열을 고려한 다양한 실험이 수행되어야 하며, 균열 폭 및 깊이에 따른 수분 흡수의 변동성을 통계적으로 분석하는 연구가 향후 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발” 과제 (20210289-001)를 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Alasward, G., Suryanto, B., and McCarter, W.J. (2018), Moisture Movement Within Concrete Exposed to Simulated Hot Arid/Semi-arid Conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 171, 1-15.
2. Angst, U. M., Hooton, R. D., Marchand, J., Page, C. L., Flatt, R. J., Elsener, B., Gehlen, C., and Gulikers, J. (2012), Present and Future Durability Challenges for Reinforced Concrete Structures, *Materials and Corrosion*, 63(12), 1047-1051.
3. Castro J., Bentz, D., and Weiss J. (2011), Effect of Sample Conditioning on the Water Absorption of Concrete, *Cement and Concrete Composites*, 33, 805-813.
4. Hanžič, L., and Ilić, R. (2003), Relationship Between Liquid Sorptivity and Capillarity in Concrete, *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1385-1388.
5. Jafarifar, N., Pilakoutas, K., and Bennett, T. (2014), Moisture Transport and Drying Shrinkage Properties of Steel-Fibre-Reinforced-Concrete, *Construction and Building Materials*, 73, 41-50.
6. Jones, A. E. K. (1997), Development of an Holistic Approach to Ensure the Durability of New Concrete Construction, British Cement Association, UK.
7. KALIS (Korea Authority of Land & Infrastructure Safety). (2019), Facility Maintenance Guidelines, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
8. Kanematsu, M., Maruyama, I., Noguchi, T., Iikura, H., and Tsuchiya, N. (2009), Quantification of Water Penetration into Concrete through Cracks by Neutron Radiography, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 605(1-2), 154-158.
9. Kim, K., Park, K., and Kim, J. (2020), Evaluating Chloride Absorption of Reinforced Concrete Structures with Crack Widths, *Journal of*

the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 24(6), 10-16.

10. Li, X., Chen, S., Xu, Q., & Xu, Y. (2018), Modeling capillary Water Absorption in Concrete with Discrete Crack Network, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(1), 04017263.
11. McCarter, W. J., Starrs, G., Chrisp, T. (2000), Electrical Conductivity, Diffusion, and Permeability of Portland Cement-Based Mortars, *Cement and Concrete Research*, 30, 1395-1400.
12. Roe, N., Huo, Z., Chandrashekhara, K., Buchok, A., and Brack, R. A., (2013), Advanced Moisture Modeling of Polymer Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(7), 437-449.
13. Šavija, B., Luković, M., and Schlangen, E. (2017), Influence of Cracking on Moisture Uptake in Strain-Hardening Cementitious Composites, *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, 7(1), 04016010.
14. Van Belleghem, B., Montoya, R., Dewanckele, J., Van den Steen, N., De Graeve, I., Deconinck, J., Cnudde, V., Van Tittelboom, K., and De Belie, N. (2016), Capillary Water Absorption in Cracked and Uncracked Mortar – A Comparison between Experimental Study and Finite Element Analysis, *Construction and Building Materials*, 110, 154-162.
15. Ye, H., Tian, Y., Jin, N., Jin, X., and Fu, C. (2013), Influence of Cracking on Chloride Diffusivity and Moisture Influential Depth in Concrete Subjected to Simulated Environmental Conditions, *Construction and Building Materials*, 47, 66-79.

Received : 07/19/2021

Revised : 07/24/2021

Accepted : 09/08/2021

요 지 : 본 연구에서는 콘크리트의 균열조건에 따른 수분 흡수 현상을 해석적으로 분석하였다. 흡수 시간의 증가에 따라 콘크리트 표면을 통해 흡수되는 수분의 양을 실험적으로 분석한 기존 연구 결과들을 바탕으로 2차원 유한요소해석 모델을 개발하였다. 고려된 균열조건은 균열 폭(0.1 mm, 0.3 mm), 균열 깊이(0 ~ 250 mm), 균열 간격(0 ~ 200 mm)이며 총 30개 모델에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 수행한 결과, 콘크리트 균열부의 수분 흡수량 증가에 중요한 영향을 미치는 조건은 균열 폭 및 균열 깊이의 변화로 확인되었다. 또한 비균열 조건의 콘크리트에 비해 균열부에서 추가로 흡수되는 물의 양을 정량적으로 분석하기 위하여, 균열부 수분 흡수계수(S_{crack}) 개념을 도입하고 이를 추정하기 위한 예측식을 제안하였다. 균열 깊이에 대한 분석 결과, 콘크리트 균열 폭과 관계없이 균열 깊이 150 mm 이하에서는 균열로 인한 수분 흡수가 활발하게 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서 외부에 노출된 철근콘크리트 구조물은 제설제와 같은 수용액 등의 흡수로 인하여 철근 부식이 발생할 수 있음을 고려하면, 실제 시설물의 균열 조건을 파악하기 위해서는 시설물의 점검 및 진단 시에 기존 균열 폭에 대한 조사뿐만 아니라 균열 깊이에 대한 조사도 함께 수행되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수분 흡수, 유한요소해석, 균열, 철근콘크리트, 흡수량
