

## 메소모델을 사용한 비균질성을 고려한 콘크리트의 수축 해석

신경준<sup>1\*</sup>, 이도근<sup>2</sup>

### Heterogeneous Simulation on Concrete Shrinkage using Meso-model

Kyung-Joon Shin<sup>1\*</sup>, Do-Keun Lee<sup>2</sup>

**Abstract:** Shrinkage is one of typical characteristics of concrete with cement paste and aggregates. A lot of studies on this has been conducted with an assumption that the concrete is a homogeneous material. However, as shrinkage acts on only one of the components that consist of concrete, it is hard to be characterized only by the average effective properties. Therefore, in this paper, the concrete shrinkage, which is one of the typical characteristics and still has a lot of uncertainty, is simulated considering its heterogeneous properties. Using a meso model, concrete is modeled with the combination of mortar and aggregates, and the shrinkage is simulated by applying the shrinkage strain on the mortar only. According to the results, it is shown that the cracking of shrinking concrete is largely influenced by the types of aggregates and the degree of restraint. Also, the shrinkage cracking cannot be represented only by the single values such as tensile strength since the stiffness of aggregates and the degree of restraint influence the cracking.

**Keywords:** concrete shrinkage, meso model, heterogeneous material, degree of restraint

## 1. 서 론

콘크리트는 오래 동안 널리 사용되어온 주요 건설재료로써 시멘트, 물 그리고 골재의 조합으로 만들어지는 복합재료이다 (Neville, 1996). 콘크리트는 시멘트 수화물과 골재의 물리적 결합으로 만들어지기 때문에 비균질 재료로 간주할 수 있다. 그러나, 콘크리트가 적용되는 대상인 구조물의 크기가 내부 구성 성분인 골재보다 상대적으로 크기 때문에 공학적으로 균질재료로 가정할 수 있으며, 콘크리트 구조물의 설계와 시공은 콘크리트가 균질한 재료라는 가정으로 설계·시공 되어 왔다 (KCI, 2007). 콘크리트와 관련된 많은 연구들도 균질 재료라는 가정을 기본으로 수행되어 왔다.

비균질 재료의 거동을 균질재료로 단순화한 유효물성치는 콘크리트의 거동을 효과적으로 예측하고 평가하는데 유용하게 사용되어 왔다. 그러나, 측정되는 물성치의 값이 시험체나 구조물의 크기에 따라서 다른 특성을 보이는 것이 보고되어, 비균질성을 고려하고 보완하기 위한 노력도 동시에 수행되어 왔다 (Bazant et al., 1997).

한편, 콘크리트의 불균질성을 고려하여 재료의 거동을 분석하고 해석하는 연구도 수행되어져 왔다. 이의 한 방법으로

골재와 시멘트 페이스트 부분을 별도로 모델링하여 해석하는 불균질성을 고려한 메소모델 (heterogeneous meso model)을 이용한 해석 방법이 사용되어 왔다.

Lee et al. (2008)은 천이영역 (ITZ: interfacial transition zone)을 고려하여 콘크리트의 탄성계수를 추정하였고, Kwan et al. (1999)은 유한요소모델을 이용하여 콘크리트의 일축압축거동을 모사하였다. 또한, Agioutantis et al. (2000)은 단순화된 콘크리트 모델을 이용하여 압축거동을 모사하는 등 메소모델은 재료의 역학적 특성을 규명하는 연구에 주로 사용되어 왔다.

최근에는 메소모델을 콘크리트의 건조 수축 현상에 적용하는 시도가 이루어졌다. Moon et al. (2006)은 콘크리트의 메소 (Meso) 모델을 이용한 건조수축 해석을 통하여 건조수축 발생 시 골재의 내부구속으로 인하여 잔류응력(residual stress)이 발생함을 보였고, 메소모델이 콘크리트의 건조수축 현상을 규명하는 데 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 콘크리트의 특징적인 거동 중의 하나이고, 지금까지 많은 연구들이 수행되어 왔지만, 아직 불확실성이 많은 콘크리트의 수축 현상을 재료의 비균질성을 고려하여 전산해석을 통해 모사하였다. 골재의 종류와 콘크리트의 구속도를 주요 해석변수로 정하였으며, 해석을 통하여 기존의 균질재료 가정에서는 알 수 없었던 수축 거동에 대한 골재와 구속도의 영향을 확인할 수 있었다.

<sup>1</sup>정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수

<sup>2</sup>정회원, 충남대학교 박사수료

\*Corresponding author: kjshin@cnu.ac.kr

Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 해석 모델

### 2.1 해석 개요

본 연구에서는 콘크리트에 대한 이상화된 해석모델을 통하여 수축 현상을 해석하였으며, 기존의 해석 및 실험으로 규명하기 힘든 수축의 메커니즘과 골재와 구속도의 영향을 분석하고자 하였다.

콘크리트는 이상화된 원형의 골재로 모델링 되었으며, 재료물성치는 시간 의존성을 고려하지 않은 일정한 상수 값으로 가정하였다. 수축 현상은 콘크리트의 구성성분 중 모르타르 요소에만 생기는 것을 가정하였다.

콘크리트 수축에 대한 골재의 영향을 분석하기 위하여 5종류의 골재가 해석에 사용되었다. 자유수축(free shrinkage) 조건과 구속수축(restrained shrinkage) 조건을 모델링 하였으며, 콘크리트 외부 구속도에 의한 영향을 분석하기 위하여 지점의 구속도를 변화시켜 해석을 수행하였다.

### 2.2 해석 모델

지금까지 콘크리트와 같은 시멘트 복합재료의 비균질성(heterogeneous)을 모사하기 위하여 많은 방법이 사용되어 왔다. 단순화된 골재 모양을 채택한 해석모델을 사용하기도 하였으며 (Van Mier et al., 2003; Moon et al., 2005), 실제의 골재형상과 분포를 고려하기 위해 여러 방법이 제안되고 있다 (Häfner et al., 2006; Garboczi et al., 2006).

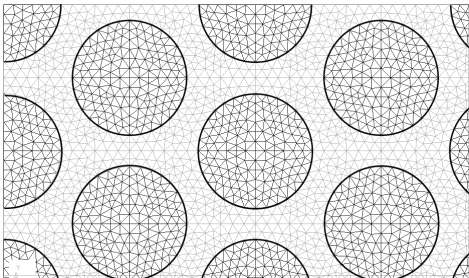


Fig. 1 Concrete modeled with idealized hexagonal units

단순화된 골재 형상과 분포를 사용하는 모델은 콘크리트를 효율적으로 모델링 할 수 있으며, 구성성분 또는 구성 성분 간의 상호작용에 의한 재료의 영향을 명확하게 분석할 수 있다. 반면, 실제 골재의 형상과 분포를 반영한 모델링 방법은 콘크리트의 복잡한 재료 형상과 거동을 보다 정확하게 해석하는데 적용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 특정 요소(또는 물성치)가 재료의 전체적인 거동에 미치는 영향을 평가하는 변수 해석(parametric analysis)을 주요 연구 목표로 하고 있다. 따라서, 이상화된 해석 모델

을 사용하여 구성 성분 간의 상호 영향을 분석하는데 초점을 두었다.

콘크리트는 모르타르와 골재 그리고 두 요소의 경계인 천이영역(ITZ)으로 구분하여 세 종류의 요소로 구성되는 것으로 모델링 하였다. 골재의 모양과 분포는 Fig. 1에 보인 것과 같이, Moon (2005)에 의해 제안된 동일한 지름을 가지는 원형 골재 모양을 채택한 hexagonal unit cell의 조합을 사용하였다 이러한 해석 모델은 골재간의 거리가 일정하게 유지되는 장점이 있다.

골재와 모르타르는 6절점을 가지는 2차(quadratic) 삼각형 요소로 나타내었고, 천이영역은 8절점을 가지는 2차 사각형 요소를 사용하였다. 골재의 면적은 40%로 가정하였으며, 골재의 크기는 9mm를 가정하였다. 균열 발생을 모델링하기 위하여 smeared crack 모델을 사용하였다 (Bazant et al. 1997). 해석은 상용해석 유한요소 프로그램을 사용하여 수행하였다.

### 2.3 재료 모델

해석에는 동일한 모르타르와 서로 다른 탄성계수를 가지는 5 종류의 골재를 가정하였다. Table 1에 해석에 사용한 변수명과 자세한 값들을 나타내었다.

재료의 물성치는 하나의 값을 가지는 것으로 가정하였다. 재료의 실제 조건을 반영하기 위하여 사용하는 물성을 정규 분포 등으로 실제 조건과 유사하게 가정하는 방법도 있으나, 본 연구에서는 이상적인 해석조건 및 응력분포를 구현하기 위하여 재료의 물성 분포를 고려하지 않은 단일 물성치를 사용하였다.

천이영역의 인장강도는 Monteiro et al. (1987)의 실험결과를 참고하여 모르타르 인장강도의 70%로 결정하였다. 한편, 천이영역은 차단-효과(wall effect)에 의하여 다공성(porosity)이 높은 것으로 보고되고 있기 때문에 (Mindess et al., 2003) 낮은 탄성계수를 가지고 있는 것으로 가정하였으며, 그 값은 모르타르의 70%로 가정하였다.

### 2.4 경계 조건

유한 요소 해석을 통하여 자유수축과 구속수축 거동을 분석하고자 하였다.

자유수축을 모사하기 위하여 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 한쪽면은 지점에 구속되어 있으나, 다른 한면은 구속되어 있지 않은 모델을 사용하였다.

구속수축을 모사하기 위하여 양쪽면이 구속된 경계 조건을 적용하였다. 해석 대상 시편의 구속도(degree of restraint)를 조절하기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 한쪽면의 경계는 1차원 트러스 요소와 연결되어 지점에 구속되도록 모델링 하였으며, 지점 트러스의 단면탄성계수 또는 면적을 조정하여 목표한

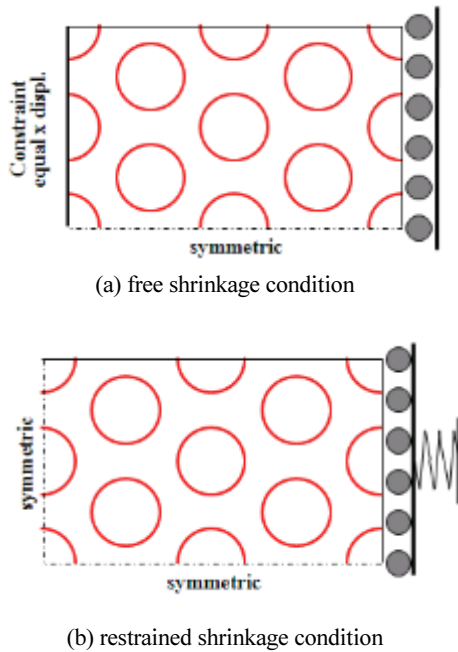


Fig. 2 Boundary conditions for analysis

구속도를 구현할 수 있도록 하였다.

구속도는 ( $\psi$ )는 다음 식 (1)과 같이 지점에 연결된 트러스와 콘크리트 시편의 강성비를 이용하여 계산하였다. Hossain et al. (2004)의 구속 수축 링테스트의 결과에 따르면 구속도는 콘크리트의 물성치에 따라 0.76~0.89의 값을 나타낸다고 보고하고 있으며, 해석에는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ( $\approx 0.999$ )의 구속도가 사용되었다.

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{A_c E_c / L_c}{A_R E_R / L_R}} \quad (1)$$

여기서  $A_c, E_c$  그리고  $L_c$ 은 콘크리트의 단면적(또는 높이), 탄성계수와 길이이며,  $A_R, E_R$ 과  $L_R$ 은 모델의 구속도를 결정하는 지점 트러스의 단면적, 탄성계수와 길이이다.

### 3. 해석 결과 및 분석

#### 3.1 자유 수축 해석 결과

골재의 면적이 40%인 유한요소 모델을 이용하여 모르타르 요소에 수축변형이 발생할 때, 콘크리트에 나타나는 부피변화 거동에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 골재와 모르타르를 별도로 모델링 하여 모르타르에만 수축이 발생하고

골재는 수축현상이 없는 것을 가정하는 방법으로 콘크리트의 수축현상을 모사하였다.

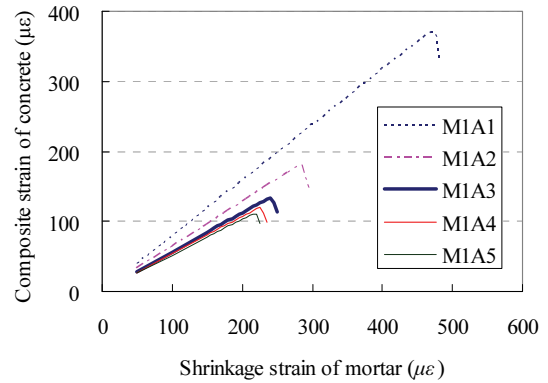


Fig. 3 Relationship between shrinkages of mortar constituent and concrete composite

Fig. 3에 콘크리트의 구성성분 중 모르타르에 가해진 수축 변형율 (shrinkage strain)과 전체시편에 발생하는 변형율 (concrete strain)의 관계를 나타내었다. 그림에 따르면 부피감소(수축 변형율)는 모르타르에만 발생하기 때문에 시편 전체에 발생하는 부피변화량은 모르타르에 가해진 수축 변형율보다 작은 경향을 나타내었다. 또한, 콘크리트의 수축 변형율은 콘크리트의 내부 구속도를 결정하는 골재의 탄성계수에 따라 변화하는 것을 알 수 있다.

모르타르의 수축량이 증가하면 골재가 받는 압축응력은 증가하게 되며 모르타르에는 인장응력이 발생하게 된다. 따라서, 수축 변형의 증가에 따라 인장응력이 발생하고, 응력 집중 현상에 의하여 가장 큰 응력이 발생하는 골재의 주변에 미세 균열이 먼저 발생하게 된다. 이어 계속해서 수축 변형이 증가하게 되면 골재 주변의 균열이 증가·발전하여 모르타르를 관통하는 균열이 발생하게 된다.

Moon et al. (2005)의 연구에서 보인 것과 같이 내부의 골재가 모르타르 매트릭스의 부피변화에 저항하는 내부 구속체로 역할을 하여 내부에 잔류 응력(residual stress)을 발생시키고 있었다. Fig. 3의 해석결과는 외부 구속이 없는 부재라도 수축이 과도하게 커지는 경우, 잔류응력에 의하여 균열이 발생할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

동일한 수축 변형율에 대하여 골재의 탄성계수가 낮을수록 전체 시편의 변형 (콘크리트 수축량)이 더 크게 발생하였다. 또한, 골재의 탄성계수가 낮을수록 구속도가 낮기 때문에 큰 수축 변형량이 발생한 이후에 균열이 발생하는 것으로 나타났다.

이는 콘크리트에 동일한 수축이 발생하더라도 내부구속체

인 골재의 탄성계수에 따라서 균열 여부가 다르게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들면, 물시멘트비가 동일하고 골재의 부피가 동일한 경량골재 콘크리트는 일반 콘크리트에 비교하여 수축은 더 크게 발생할 수 있지만, 수축에 의하여 균열이 발생할 가능성은 오히려 낮을 수 있다.

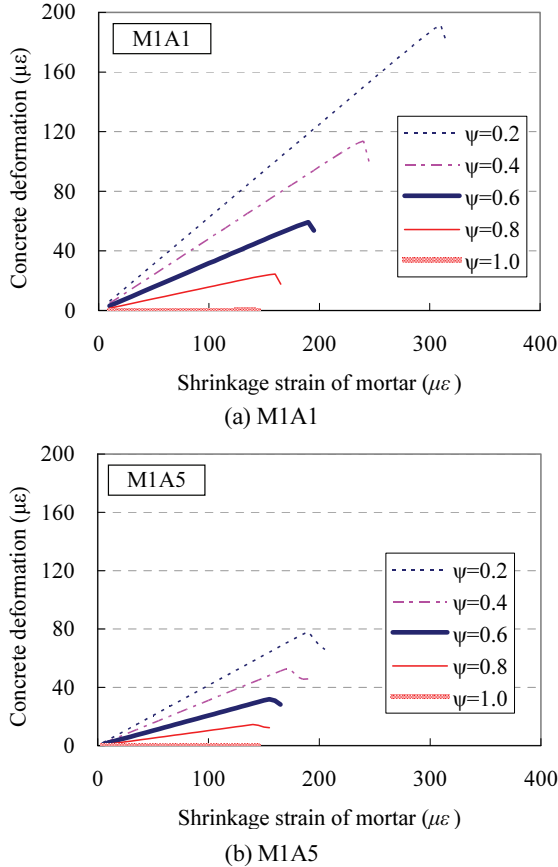


Fig. 4 Deformation of concrete regarding the type of aggregates and degree of restraint

### 3.2 구속 수축 해석 결과

#### 3.2.1 구속도에 따른 영향

구속이 있는 콘크리트 부재의 모르타르 요소에 수축이 가해진 경우에 대한 해석을 수행하여 수축과 이로 인한 균열발생에 대한 관계를 분석하였다.

구속이 있는 콘크리트는 자유수축과는 달리 수축이 발생함에 따라 외부 구속에 의한 응력이 발생하며, 최대응력 도달 이후 균열이 발생하면서 응력이 감소하게 된다. 해석은 최대응력에 도달한 이후 응력이 감소하는 경향을 보이는 단계까지 수행하였다.

Fig. 4에 모르타르에 수축변형이 가하여 졌을 때, 발생하는 구속된 콘크리트의 변형을 나타내었다. 콘크리트의 변형은

부재의 변위를 길이로 나누어 계산하였다. 결과에 따르면 모르타르의 부피가 감소함에 따라 콘크리트의 부피 역시 감소하는 것으로 나타났다.

모르타르 요소의 수축 변형량이 같은 경우, 콘크리트의 구속도가 높아짐에 따라 부재의 변형량이 감소하였다. 또한, 수축에 의한 부재의 최대변형량은 구속도가 감소함에 따라 증가하였다. 그러나, 구속도가 1.0 (완전구속)인 경우에는 수축이 작용하더라도 외부로 나타나는 부재의 변형은 없었다.

또한, 콘크리트 내부의 골재 종류도 콘크리트의 수축 변형량에 영향을 주었다. 낮은 탄성계수의 골재가 포함된 시편에 대한 결과인 Fig. 4(a)와 높은 탄성계수의 골재가 포함된 시편에 대한 결과인 Fig. 4(b)를 비교해 볼 때, 탄성계수가 낮은 골재를 사용할수록 주어진 모르타르의 수축량에 대한 콘크리트의 변형량이 증가하였으며, 구속도가 낮을수록 영향이 큰 것으로 나타났다.

외부 구속된 콘크리트 부재에 수축이 발생할 경우 수축에 의한 변형이 지점에 의하여 구속되면서 인장응력이 부재에 발생하게 된다. Fig. 5에 모르타르 요소의 수축 변형량과 구속에 의하여 유발된 콘크리트의 평균응력의 관계를 골재의 종류와 시편의 구속도에 따라 나타내었다. 응력은 지점부에 발생하는 반력을 면적으로 나누어 계산한 평균 유효응력을 나타낸다.

해석 결과에 의하면 모르타르에 가해진 수축 변형량이 증가함에 따라 외부 구속작용에 의한 응력이 비례하여 증가하였다. 응력이 계속하여 증가할 경우, 부재 내부의 인장응력이 인장강도를 초과하여 균열이 발생하며, 균열이 발생한 이후에는 수축 변형량이 증가하여도 부재에 작용하는 응력은 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 5에 의하면 부재에 발생하는 인장응력은 동일한 모르타르 수축 변형율에 대하여 구속도가 클수록 큰 응력이 발생하였다. 그러나, 구속도가 클수록 부재에 발생하는 균열이 발생하는 균열 수축량은 작아지는 반면, 균열 응력은 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 동일한 배합의 콘크리트임에도 불구하고 외부 구속도에 따라서 균열 강도가 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 6에 일반적으로 많이 사용되는 골재인 Limestone의 물성치를 적용한 M1A4 부재에 대하여, 최대 하중 상태에서의 주인장응력 분포를 구속도에 따라 비교하여 나타내었다.

자유수축상태 (Fig. 6(a))의 경우 골재를 중심으로 모르타르가 수축하기 때문에, 골재 주변의 모르타르에 최대인장응력이 분포하는 것을 나타내고 있다. 그러나, 완전구속부재 (Fig. 6(d))의 경우 수평방향의 구속응력에 의하여 골재의 아래·윗면에 최대 응력이 집중되는 것을 볼 수 있다. 부분구속부재 ( $0 < \psi < 1$ )의 경우 구속도에 따라서 무구속상태와 완전구속상태의 중간 응력분포를 가지는 것을 확인할 수 있다. 상대

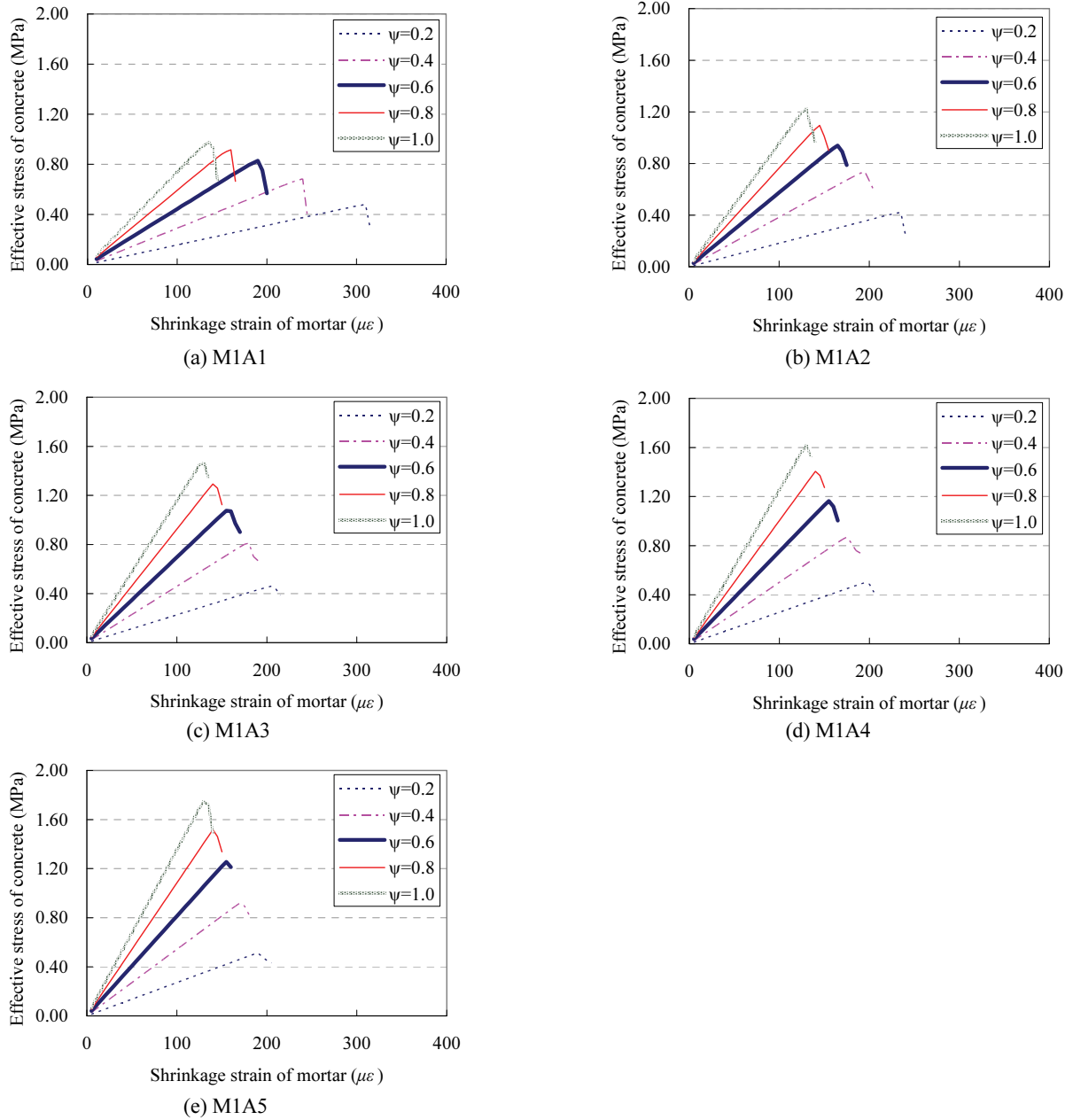


Fig. 5 Restrained stress of concrete subjected to shrinkage regarding aggregate types and restraint

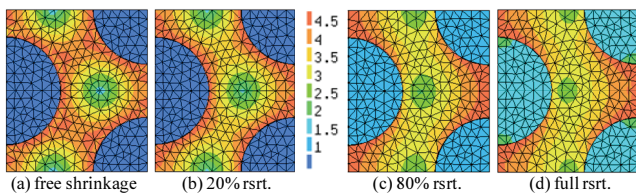


Fig. 6 Contour plot of principal stresses at the maximum stress stage with respect to the degree of restrained (M1A4)

적으로 구속도가 낮은 Fig. 6(b)의 경우 골재주변에 고른 최대 응력이 분포하지만, 구속도가 높은 Fig. 6(c)의 경우 골재 상하부에 응력 집중되었다.

한편, Fig. 6의 골재의 응력분포를 비교하여 볼 때, 구속도가 높은 경우 골재가 받는 압축응력의 크기도 높아지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2.2 골재에 따른 영향

Figs. 4와 5에 따르면 외부 구속도 뿐만 아니라 내부구속도를 결정하는 골재도 콘크리트의 수축 거동에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

탄성계수가 상대적으로 낮은 A1골재의 경우 구속도의 변화에 따른 최대응력 변화량은 다른 시험체에 비해 상대적으

로 작게 나타났다. 그러나, 균열이 발생하는 콘크리트 수축량은 구속도에 따라 큰 변화를 보였다. 반면 탄성계수가 큰 A5 골재의 경우 구속도의 변화에 따라 최대응력도 큰 변화를 보였으나, 최대응력이 발생하는 수축량은 다른 골재의 시험체에 비해 상대적으로 변화가 작았다.

Fig. 7에 골재의 종류에 따라 구속된 콘크리트 시편에 발생하는 최대응력(=균열응력)을 나타내었다. 그림에 따르면 골재의 탄성계수가 높을수록(A1→A5) 외부구속에 의하여 유발되는 최대평균인장응력 값이 커지는 것을 알 수 있으며, 그 변화량은 구속도가 높아질수록 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 8에는 최대응력이 발생하는 시점의 콘크리트의 수축량을 나타내었다. 그림에 의하면 강성이 높은 골재를 사용할수록(A1→A5) 균열이 발생하는 콘크리트 수축 변형율이 낮아지는 경향을 보였다.

따라서, 동일한 물시멘트비와 골재부피를 가지는 일반콘크리트와 경량골재콘크리트를 비교할 경우, 경량골재와 같은 낮은 강성의 골재를 사용한 콘크리트는 균열이 발생하는 수축량은 일반 콘크리트에 비하여 상대적으로 증가하지만, 균

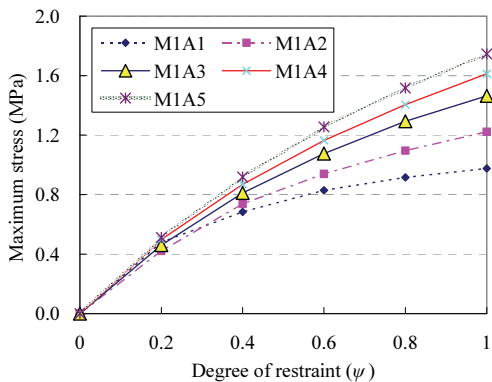


Fig. 7 Maximum restrained stress with respect to the type of aggregates

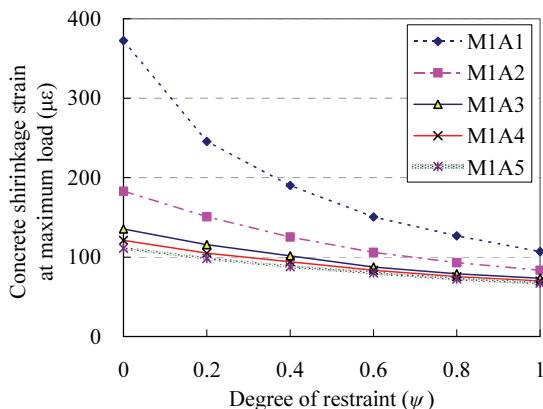


Fig. 8 Shrinkage strain of concrete when the maximum restrained stress occurs in relation to the degree of restraint

열 강도는 오히려 낮아질 수 있다는 것으로 해석할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 재료의 비균질 특성(heterogeneous properties)을 고려하여 콘크리트의 수축 현상에 대한 역학적 거동을 규명하고자 하였다. 재료거동을 부재의 구속도와 골재의 물성치에 따라 변수 해석하였으며, 이를 통하여 비균질성을 고려한 메소모델 해석이 콘크리트의 수축 거동과 균열 현상에 대한 분석에 유효하게 사용될 수 있음을 보였다.

- (1) 콘크리트를 모르타르, 골재 그리고 천이영역으로 구분하여 모델링 하였으며, 이를 이용하여 비균질특성을 고려한 해석 (heterogeneous simulation)을 수행하였다. 효율적인 해석 및 결과분석을 위하여 이상화(idealized)된 원형골재를 가정하였으며, 재료물성치 또한 시간의존성을 고려하지 않은 상수값을 사용하였다.
- (2) 자유 수축에 대한 해석을 통하여 동일한 모르타르를 사용한 경우 골재의 강성에 따라 콘크리트의 변형량이 결정되며, 강성이 높을수록 콘크리트의 변형이 적게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 콘크리트 내부의 골재가 수축작용에 대한 내부구속체로 작용하기 때문에, 과도한 수축이 작용할 경우 외부구속이 없는 상태라도 균열이 발생할 수 있다는 것을 확인 하였다.
- (3) 구속상태의 콘크리트에 수축작용에 의하여 발생하는 응력은 골재의 종류와 외부 구속도에 의해 크게 영향을 받았다. 골재의 강성은 콘크리트의 탄성계수에 직접적인 영향을 주었으며, 또한 모르타르 요소에 수축이 발생하였을 때 유발되는 콘크리트의 변형량에 영향을 주었다.
- (4) 콘크리트의 구속도는 수축에 의한 부재의 변형량과 응력발현에 영향을 주었다. 구속도가 낮을수록, 균열이 발생하는 수축량이 커지는 반면 부재가 받는 최대응력의 크기는 감소하였다.
- (5) 본 연구에서는 단순화된 모델을 사용하여 이상적인 조건에서 재료의 물성치와 경계조건의 변화에 따른 수축 거동을 분석하였다. 이러한 방법론은 정확한 거동의 예측에는 다소 부정확할 수 있지만, 골재 및 구속도의 변화에 따른 콘크리트의 수축 및 균열 특성을 파악하고 경향을 분석하는 것에는 효과적으로 적용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

## References

1. KCI (2007), Design specifications for concrete structure.
2. Agioutantis, Z., Chatzopoulou, E., Stavroulaki, M. (2000), A numerical investigation of the effect of the interfacial zone in concrete mixtures under uniaxial compression: the case of the dilute limit. *Cement and Concrete Research*, 30, 715-723.
3. Bazant, Z.P., Planas, J. (1997), *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC, 640.
4. Elices, M., Rocco, C., Rosello, C. (2007), Cohesive crack modelling of a simple concrete: Experimental and numerical results, *Engineering Fracture Mechanics*, 76(10), 1398-1410.
5. Garboczi, E.J., Cheok, G.S., Stone, W.C. (2006), Using LADAR to characterize the 3-D shape of aggregates: preliminary results. *Cement and Concrete Research*, 36, 1072-1075.
6. Hafner S, Eckardt S, Luther T, Konke C. (2006), Mesoscale modelling of concrete: geometry and numerics. *Computers & Structures*, 84, 450-461.
7. Hossain, A. B., and Weiss, W. J. (2004), Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens, *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 531-540.
8. Kwan, A.K.H., Wang, Z.M., Chan, H.C. (1999), Mesoscopic study of concrete II: nonlinear finite element analysis, *Computers & Structures*, 70(5), 545-556.
9. Lee, K.M, Park, J.H. (2008), A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone, *Cement and Concrete Research*, 38, 396-402.
10. Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2002), *Concrete*, Prentice Hall, 644.
11. Mohamed, A.R., Hansen, W. (1999), Micromechanical modeling of crack-aggregate interaction in concrete materials, *Cement and Concrete Composites*, 21(5-6), 349-359.
12. Monteiro, P.J.M., Andrade, W.P. (1987), Analysis of the Rock-Cement Paste Bond Using Probabilistic Treatment of Brittle Strength, *Cement and Concrete Research*, 17, 919-926.
13. Moon, J.H. (2006), Shrinkage, Residual Stress, and Cracking in Heterogeneous Materials, PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, May 2006, 244.
14. Moon, J.H., Rajabipour, F., Pease, B., Weiss, J. (2005), Autogenous Shrinkage, Residual Stress, and Cracking in Cementitious Composites: The Influence of Internal and External Restraint, *Fourth International Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, Maryland, USA, 1-21
15. Neville, A.M. (1996), *Properties of Concrete*, Wiley, New York, 844.
16. Van Mier, J.G.M., Van Vliet, M.R.A. (2003), Influence of microstructure of concrete on size/scale effects in the tensile fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(16), 2281-2306.

Received : 08/01/2019

Revised : 08/20/2019

Accepted : 08/28/2019

---

**요 지** : 콘크리트는 시멘트와 골재를 포함한 복합재료로써 건조 수축이라는 특성을 가지고 있으며, 이에 대하여 많은 연구가 콘크리트를 균질재료로 가정하여 수행되어 왔다. 그러나, 수축은 콘크리트를 구성하는 특정 구성 성분에만 작용하는 현상이기 때문에 기존의 평균화된 유효물성(effective properties)의 개념으로 규명하기에는 어려움이 있다. 따라서, 본 논문에서는 콘크리트의 특징적인 거동 중의 하나이며 지금까지 많은 연구들이 수행되어 왔지만, 아직 불확실성이 많은 콘크리트의 수축 현상을 비균질성을 고려한 전산해석(heterogeneous simulation)을 통해 분석하는 방법을 제안하였다. 골재와 모르타르를 별도로 모델링하는 메소모델을 이용하여 모르타르에만 수축 변형을 가하는 방법으로 콘크리트의 수축 해석을 수행하였다. 해석 결과에 따르면 콘크리트의 수축에 의한 균열 발생은 골재의 강성과 부재의 구속도에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한, 수축에 의한 콘크리트의 균열발생은 단순한 하나의 값으로 나타내지 못하는 현상이며, 골재의 강성과 부재의 구속도는 그에 큰 영향을 주는 요소들이었다.

**핵심용어** : 콘크리트 수축, 메소 모델, 비균일 재료, 구속도

---