

# 유동성 재료의 동적 거동 해석을 위한 입자확대법 기반 DEM의 적용

## Application of DEM with Coarse Graining Method to Fluidal Material Behavior Analysis

윤 태 영 Yun, Taeyoung | 정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : tyun@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** In this paper, the applicability of DEM to a coarse graining method was evaluated by simulating a series of minicone tests for cement paste.

**METHODS :** First, the fundamental physical quantities that are used in a static liquid bridge model were presented with three basic quantities based on the similarity principle and coarse graining method. Then, the scale factors and surface tensions for six different sizes of particles were determined using the relationship between the physical quantities and the basic quantities. Finally, the determined surface tensions and radii were utilized to simulate the fluidal behavior of cement paste under a minicone test condition, and the final shape of the cement paste with reference DEM particle radii was compared with the final shape of the others.

**RESULTS :** The simulations with adjusted surface tensions for five different radii of particles and surface tension showed acceptable agreement with the simulation with regard to the reference size of the particle, although disagreement increases as the sizes of the particle radii increase. It seems reasonable to increase the particle radii by at least 0.196 cm considering the computational time reduction of 162 min.

**CONCLUSIONS :** The coarse graining method based on the similarity principle is applicable for simulating the behavior of fluidal materials when the behavior of the materials can be described by a static liquid bridge model. However, the maximum particle radius should be suggested by considering not only the scale factor but also the relationship of the particle size and number with the radius of the curve of the boundary geometry.

### Keywords

DEM, similarity principle, coarse graining method, liquid bridge model, minicone test

Corresponding Author : Yun, Taeyoung, Senior Researcher  
Highway Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building  
Technology, 283, Goyangdae-ro, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea  
Tel : +82.31.910.0445 Fax : +82.31.910.0161  
E-mail : tyun@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Aug. 14, 2017 Revised Aug. 22, 2017 Accepted Nov. 22, 2017

## 1. 연구의 배경 및 목적

거시적으로 재료의 균질성(homogeneity)을 가정하는 전통적 연속체 역학(continuum mechanics) 기반의 구성방정식(constitutive equation)과 이를 이용한 수치해석 기법은 오랜 기간 동안 부재와 구조물의 거동을 예측하기 위한 합리적인 방법으로 평가되어 왔다. 그

러나 철이나 알루미늄과 같이 균질성이 매우 높아 상대적으로 고가인 자재를 사용하는 기계 장비와는 달리, 건설 구조물에는 시멘트 콘크리트 또는 아스팔트 콘크리트 등의 균질성을 가정하기 어려운 경우가 많은 자재가 활용되며, 이로 인한 문제들이 전체적인 역학적 해석기법 전체의 신뢰도를 낮추는 결과를 나타내기도 한다. 최근 균질성에 근거한 연속체 역학의 한계를 극복하고 재

료에 대한 보다 현실적인 평가를 위하여, 유한요소법 (finite element method, FEM) 기반의 멀티스케일 모형(multiscale modeling) 기법이 건설 분야에도 적용되고 있는데, 이는 전통적인 유한요소해석 기법에 수준별 물성을 정량화하여 복잡한 소재 또는 규모가 큰 부재의 거동을 순차적으로 또는 체계적으로 평가하는 기법으로 설명될 수 있다. 연속체 역학을 활용하지는 않으나, 멀티스케일 모형 기법과 개념적으로 유사한 방법으로서 입자와 접촉모형(contact model)을 부재의 정적인 거동과 파손 예측에 활용하는 이산요소법(discrete element method, DEM) 기반의 큰 입자 활용기술 또는 입자확대법(coarse graining method)도 고려할 수 있다. 이산요소법은 양생이 완료된 재료에서도 활용할 수 있으나, 뉴턴의 제 2법칙인 가속도의 법칙을 근간으로 제안된 것에서 알 수 있는 바와 같이, 하중이 재하되는 부재의 정적 응력 분포보다는 입자 또는 물체의 동적 거동 예측에 효율적이다. 또한 이산요소법은 일반적인 연속체 역학의 관점에서 설명이 불가능한 균열의 비규칙적 발생 양태에 대하여, 재료 특성뿐만 아니라 장비의 특성 및 재료와 장비의 상호작용에 의하여 발생하는 생산 및 시공과정을 고려하여 설명할 수 있다는 장점도 있다. 그러나 이산요소법은 일반적으로 상당히 큰 계산 자원을 요구하기 때문에, 이론에 의하여 합리적으로 해석에 대한 입자 수를 감소시킬 수 있다는 측면에서 이산요소법에서의 입자확대법 적용 가능성 평가는 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 입자확대법을 적용한 이산요소법을 시멘트 페이스트가 활용된 미니콘 슬럼프 실험에 적용하여 그 효율성과 상사성을 평가하였다. 이를 위하여 상사성 이론(similarity principle)에 근거한 입자확대법을 고찰하고 유도하였으며, 이를 입자 사이의 장력을 설명하는데 활용되는 정적 액체가교 모형(static liquid bridge model)에 적용하여 입자의 크기 증가에 따른 해석시간과 최종 슬럼프의 형태를 비교하였다.

## 2. 수치해석기법

### 2.1. 입자확대법

축소 또는 확대된 대상의 실물과의 역학적인 동일성을 의미하는 상사성은 기하학적(geometric) 상사성, 운동학적(kinematic) 상사성, 동적(dynamic) 상사성으로 구분될 수 있다. 공기나 물의 흐름과 같은 연속체의 이동을 다루는 분야에서는 위의 3가지 상사성을 모두 만족해야 하지만, 하중에 의한 부재 내의 응력 분포와

같이 정역학을 적용하는 경우에는 접지면적과 하중크기를 조정하여 기하학적 상사성과 동적 상사성만을 만족시켜도 역학적 동일성을 달성하는 경우도 있다(Cengel and Cimbala, 2014). 한편 역학기반으로 입자의 거동에 대한 상사성을 확보하기 위해서는 Feng and Owen(2014)의 제안을 고려할 수 있는데, 다음 Eq. (1)~Eq. (5)는 해당 제안을 활용하여 정적 액체가교 모형에서 사용된 부피( $V$ ), 질량( $m$ ), 가속도( $a$ ), 힘( $F$ ), 표면장력( $\gamma$ )과 같은 기본 단위를 밀도( $[\rho]$ ), 길이( $[L]$ ), 시간( $[T]$ )의 차원표시로 표현한 결과를 나타낸다. 상사성 이론의 개념, 유도과정 및 적용에 대한 구체적인 내용은 Yun and Park (2016)에서 확인할 수 있다.

$$V = [L]^3 \quad (1)$$

여기서,  $V$ =volume

$$m = \rho V = [\rho][L]^3 \quad (2)$$

여기서,  $m$ =mass

$$a = [L][T]^{-2} \quad (3)$$

여기서,  $a$ =acceleration

$$F = ma = [\rho][L]^4[T]^{-2} \quad (4)$$

여기서,  $F$ =force

$$\gamma = F/L = [\rho][L]^3[T]^{-2} \quad (5)$$

### 2.2. 정적 액체가교 모형

액체가교 모형은 작은 입자 사이의 유체의 표면장력에 의한 입자의 부착거동을 표현하기 위하여 활용된다. 따라서 골재의 맞물림이 재료의 거동을 지배되는 수분이 거의 없는 조건이나, 수분의 흐름이 재료의 거동을 지배하는 수분이 많은 조건 이외의 조건에서는 사용하지 않는 것이 합리적이다. 일반적으로 액체가교 모형은 액체가교의 점탄성(viscoelasticity)을 고려하지 않는 정적모형(Mikami et al., 1998)과 점탄성을 고려하는 동적모형(Tuck et al., 1997; Vincent et al., 2014)으로 구분될 수 있으며, 이들 모형은 입자의 건조와 혼합 등에 대한 정밀한 해석이 필요한 반응기(fluidized bed)나 원심 텀블링 입상화 장비(centrifugal tumbling granulator) 내의 수분을 포함하는 분말입자의 거동을 표현하기 위하여

많이 활용(Remy et al., 2012; Tsuji et al., 1993) 되었다. Lian et al.(1993)과 Mazzone et al.(1986)에 나타난 바와 같이, 라플라스-영 방정식(Laplace-Young equation)으로 정의되는 정적 액체가교 모형의 해는 일반적으로 근사적 해법(troidal approximation)을 활용하는 방법으로 구할 수 있다(Fisher, 1926; Alguacil and Gauckler, 2011). 그러나 이러한 방법을 활용하여 얻어진 해는 독립변수와 종속변수가 분리되지 않은 음함수(implicit function)의 형태로 나타내기 때문에, 수치 해석에서 시간에 증분마다 액체가교 부피(liquid bridge volume)와 입자사이의 떨어진 거리(separation distance)를 업데이트 할 수 없는 한계로 인하여 그 활용이 불가능하다. 따라서 Mikami et al.(1998)이 제안한 무차원(dimensionless) 회귀식을 고려할 수 있는데, 이는 다양한 조건에 대한 라플라스-영 방정식의 해를 회귀 분석한 결과로서 양함수(explicit function)의 형태를 나타내 수치해석에서 활용이 편리하기 때문이다. 다음 Eq. (6)은 Remy et al.(2012)에 의하여 활용된 무차원 액체가교력( $\hat{F}_C$ ), 입자의 반경( $R$ ), 표면장력( $\gamma$ ), 무차원 떨어진 거리( $\hat{h}$ )와 회귀계수( $A, B, C$ )의 함수로 표현된 정적 액체가교력( $F_C$ )을 나타내고 있으며, Eq. (7)은 입자사이의 액체가교의 손실이 발생하는 임계 떨어진 거리(critical separation distance)를 나타낸다.

$$F_C = \hat{F}_C 2\pi R \gamma \quad (6)$$

여기서,

$$\hat{F}_C = e^{(A\hat{h}+B)} + C,$$

$$A = -1.1 \hat{V}^{-0.53},$$

$$\hat{V} = V/R^3,$$

$$V = \phi m / \rho_{liq} (1 - \sqrt{3/4}),$$

$$\phi = \text{Liquid Volume Fraction},$$

$$m = \text{Mass of Particle},$$

$$\rho_{liq} = \text{Density of Liquid},$$

$$R = \text{Radius of Particle},$$

$$\hat{h} = h/R,$$

$$h = \text{Separation Distance},$$

$$B = (-0.34 \ln \hat{V} - 0.96) \theta^2 - 0.019 \ln \hat{V} + 0.48,$$

$$\theta = \text{Contact Angle},$$

$$C = 0.042 \ln \hat{V} + 0.078, \text{ and}$$

$$\gamma = \text{Surface Tension}.$$

$$\hat{h} = (0.62\theta + 0.99) \hat{V}^{0.34} \quad (7)$$

다음 Fig. 1은 세 가지의 다른 무차원 액체가교 부피(dimensionless liquid bridge volume) 또는 함수비 조건에 대하여 표현될 수 있는 무차원 액체가교력과 무차원 떨어진 거리와의 관계를 그래프로 나타내고 있다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이, 입자사이의 무차원 액체가교력은 입자 사이의 떨어진 거리가 증가하면서 감소하며, 동일한 입자 사이의 떨어진 거리에서는 무차원 액체가교 부피가 커질수록 무차원 액체가교력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 무차원 액체가교 부피가 서로 다른 세 가지 조건에 대하여 동일한 무차원 액체가교력을 나타내는 무차원 떨어진 거리도 결정할 수 있는 것을 Fig. 1의 점선을 통하여 알 수 있다. Fig. 1의 3개의 곡선을 도출하기 위하여 사용된 액체와 입자의 물성은 다음 Table 1에 나타난 바와 같은데, 접촉각은 액체가교 부피 등에 따라 변화하는 것이 합리적이거나 조건의 단순화를 위하여 0.272°로 가정하였다. Table 1의 물성은 일반적인 흡입자와 수분의 물성 범위 내에 있는 것으로 선정되었다.

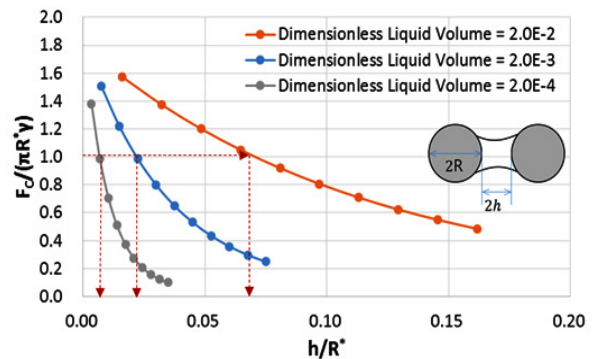


Fig. 1 Dimensionless Liquid Bridge Force vs. Dimensionless Separation Distance

Table 1. Properties of Liquid Bridge Model

Properties	Symbol	Value
Particle radius(mm)	$R$	0.928
Particle mass(g)	$m$	2.65
Liquid surface tension(N/m)	$\gamma$	0.074
Contact angle( )	$^\circ$	0.272
Liquid density(g/ml)	$\rho_{liq}$	1.00
Liquid volume fraction(%)	$\phi$	4.5%

### 2.3. 입자확대법을 적용한 정적 액체가교 모형

Eq. (6)에 나타난 바와 같이, 무차원 액체가교력은 무차원 떨어진 거리와 3개의 회귀계수의 함수로 표현될 수 있다. 또한 이들 회귀계수는 함수비( $\phi$ ), 입자의 질량

( $m$ ), 액체의 밀도( $\rho$ ), 접촉각( $\theta$ ) 및 입자의 반경( $R$ )의 함수로 정의되기 때문에, 함수비, 입자의 밀도, 액체의 밀도 및 접촉각을 상수로 가정할 수 있는 조건에서는 일정한 무차원 떨어진 거리에 대한 액체가교력이 결국 입자의 반경과 표면장력의 함수로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 기존의 문헌들에서 언급되지 않은 것으로서 매우 중요한 의미를 나타내는데, 입자 사이에 작용하는 표면장력을 상사성에 근거하여 결정함으로써, 이들 입자 무리의 거동이 다른 반경의 입자 무리가 동일한 형태적 또는 흐름적 특성을 나타낼 수 있도록 할 수 있다는 매우 중요한 가능성을 내포하기 때문이다. 다음 Fig. 2는 다양한 반경의 입자에 대하여 2.1절에서 기술된 상사성 이론에 근거한 입자확대법을 적용하여 표면장력을 결정하면 무차원 액체가교력과 무차원 떨어진 거리의 관계가 매끈한 하나의 곡선(mastercurve)으로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

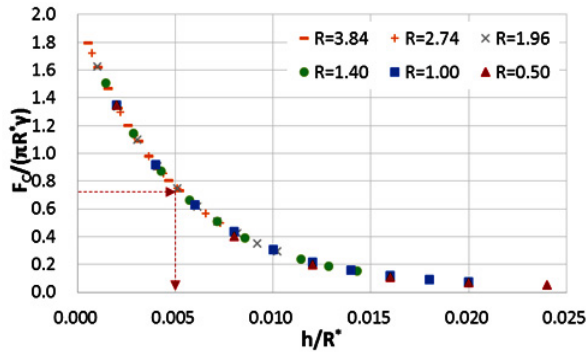


Fig. 2 Dimensionless Liquid Bridge Force Mastercurve

Eq. (8)과 Eq. (9)는 기준 반경의 입자( $R=1.00$ ) 이외에 다른 크기의 입자들에 대하여 상사성 이론에 근거한 입자확대법을 적용하여 조정된 질량과 부피를 계산하는데 활용되는 조정계수( $f_s$ )의 역할을 나타내고 있으며, Eq. (10)은 다른 반경의 입자들에 대하여 표면장력을 결정하기 위하여 적용되는 조정계수의 역할을 나타내고 있다. Table 2는 각각의 조정계수와 입자 반경에 대하여 결정된 질량과 표면장력을 나타내고 있다.

$$\bar{m} = \rho \bar{V} = \rho V f_s^3 = m f_s^3 \quad (8)$$

$$\bar{V} = 4\pi \bar{R}^3 / 3 = 4\pi R^3 f_s^3 / 3 = V f_s^3 \quad (9)$$

$$\bar{\gamma} = \rho \bar{L} / T^{-2} = \rho L f_s / T^{-2} = \gamma f_s \quad (10)$$

Table 2. Adjusted Mass and Surface Tension for Different Radius

Scale factor	Radius (cm)	Mass (g)	Surface tension (N/m)
0.50	0.050	0.001	0.037
1.00	0.100	0.009	0.074
1.40	0.140	0.025	0.104
1.96	0.196	0.069	0.145
2.74	0.274	0.190	0.203
3.84	0.384	0.522	0.284

표면장력이 작용하는 입자의 움직임과 입자 사이의 상호작용은 액체가교력과 떨어진 거리의 관계에 의하여 결정되지만, 한 입자 쌍과 다른 반경의 입자 쌍 사이의 역학적 상사성, 즉 크기는 다르지만 상사적 하중조건에 있는가에 대한 여부는 입자에 작용하는 응력이 동일한지의 여부를 통하여 확인할 수 있다(Feng and Owen, 2014; Yun and Park, 2016). Fig. 3은 입자의 액체가교력을 입자의 접촉면(contact area)이라고 가정된 입자의 중심부의 면적으로 나누어 계산한 액체가교응력(liquid bridge stress)과 무차원 떨어진 거리를 나타낸 것으로, Fig. 2의 무차원 액체가교력과 동일한 형태의 매끈한 하나의 곡선으로 표현되는 것을 알 수 있다. 이는 무차원 액체가교력이 상사성을 평가할 수 있는 응력과 동일한 지표로서의 역할을 할 수 있다는 의미로 해석된다. Fig. 4의 입자의 크기와 무관하게 기준 반경 입자에 적용한 표면장력 0.074N/m를 적용한 경우 액체가교응력과 무차원 떨어진 거리의 관계를 나타내고 있는데, Fig. 3의 경우와는 달리 의미있는 결과를 나타내지 못하고 있으며, 이는 역학적 상사성을 보장할 수 없다는 의미를 나타낸다.

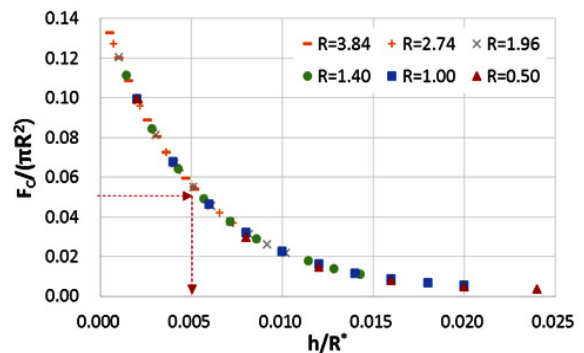


Fig. 3 Dimensionless Liquid Bridge Stress Mastercurve with Adjusted Surface Tension Force

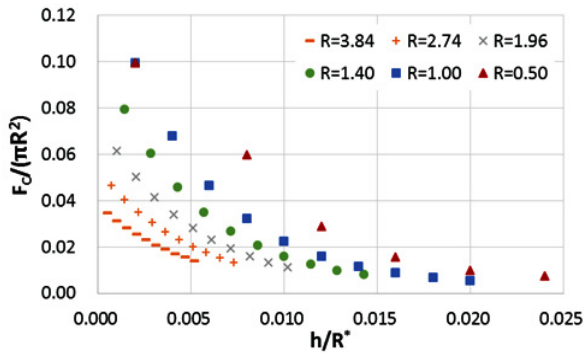


Fig. 4 Dimensionless Liquid Bridge Stress Curves with Reference Surface Tension Force

### 3. 모형의 검증

#### 3.1. 미니콘 실험

미니콘 실험은 일반적인 슬럼프 실험과는 달리 굵은 골재가 존재하지 않는 시멘트 페이스트나 모르타르에 대하여 흐름성(fluidity)을 평가하기 위한 방법으로 다양한 분야에서 활용된다. 미니콘 실험의 실험방법은 일반적인 시멘트 콘크리트에 대하여 수행되는 슬럼프 실험과 동일하지만, 비교적 균질한 재료를 활용하므로 다음 Table 3에 나타난 바와 같이 매우 작은 슬럼프 콘을 활용한다. 미니콘 실험에 따른 시멘트 페이스트의 거동 구분 및 특성은 분석적해, 연속체기반 수치해석, 이산요소법에 대한 상사성 이론의 적용성을 분석한 논문(Yun, 2016; Yun, 2017)에서 구체적으로 확인할 수 있다.

Table 3. Dimension of slump cone

Height (cm)	Radius of top (cm)	Radius of bottom (cm)
5.0	3.5	5.0

#### 3.2. DEM을 이용한 시뮬레이션 방법

이산요소법을 이용하여 미니콘 실험을 모사하기 위해서는 우선 미니콘 내에 입자를 채울 수 있다. 입자를 채우는 방법은 여러 가지가 있으나, 밀도를 높일 수 있는 방법은 최초 입자 사이의 접촉모형을 단순화하고, 정지 마찰력과 회전 마찰력을 0에 가깝게 가정하는 것이다. 본 연구에서는 입자가 발생하는 3초 동안에는 정지 마찰력과 회전 마찰력을 0.001로 가정하였다. 입자가 정지수준으로 안정화되면 실제 실험에서와 같이 미니콘을 수직방향으로 이동시켰다. 다음 Fig. 5는 이산요소법 기반 소프트웨어를 활용하여 입자를 생성하는 과정을 나타내고 있는데, 경계조건을 적절히 조정하여 입자가

상부 경계면까지 밀도 높게 생성된 것을 알 수 있다.

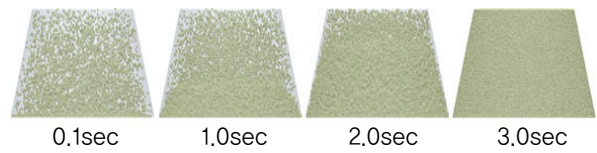


Fig. 5 Particle Generation in Minicone

6가지 입자 반경에 대하여 Eq. (5)와 Eq. (7)를 활용하여 표면장력과 임계 떨어진 거리가 계산된 집단을 Group 1로 정의하였으며, 입자의 크기가 다르더라도 동일한 크기의 표면장력 0.074N/m가 적용된 대조 집단을 Group 2로 정의하였다. 이를 통하여 입자의 크기와 미니콘 내의 입자의 구조가 동일한 조건에서 상사성 이론에 근거하여 결정된 Table 2의 표면장력이 유동의 상사성에 미치는 영향의 정도를 비교할 수 있다. Table 4는 주어진 6가지 입자의 반경에 대하여 미니콘을 채우기 위하여 활용된 총 입자의 수(total particle number), 총 입자의 무게(total mass of particle), 총 입자의 부피(total volume of particles)와 단일 입자의 평균 접촉 입자수(average number of contact between particles)를 나타내고 있으며, 접촉각, 함수비, 액체 밀도는 각각 0.272, 4.5% 1.0g/m<sup>3</sup>으로 가정하였다.

Table 3. Adjusted Mass and Surface Tension for Different Radius

Radius (cm)	Contact radius (cm)	Total particle number	Total mass of particles (g)	Total volume of particles (cm <sup>3</sup> ) V <sub>s</sub>	Average number of contact b/w particles
0.05	0.064	286,590	330.13	150.06	4.38
0.100	0.127	36,411	335.54	152.82	4.44
0.140	0.178	13,267	335.48	152.49	4.41
0.196	0.249	4,811	333.82	151.74	4.36
0.274	0.349	1,735	328.90	149.50	4.21
0.384	0.489	619	322.99	146.82	4.00

또한 유동과정에서의 입자의 반발력, 정지 마찰계수와 회전 마찰계수는 모두 0.1로 가정하여 액체가교력이 유동을 지배할 수 있도록 하였다. Table 4에서 알 수 있는 바와 같이, 입자반경이 감소함에 따라 미니콘을 채우기 위한 입자 수는 지수적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.3. DEM을 이용한 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 Table 4에 제시된 조건으로 미니콘 실험을 모사하여 유동이 멈춘 조건에서의 시멘트 페이스트의

최종 형상을 Group과 입자 반경에 따라 나타내고 있다. Group 2의 경우, 입자의 크기에 무관하게 동일한 표면장력이 적용되었으므로, 입자의 크기가 커짐에 따라서 입자들의 자중으로 인하여 발생하는 인장력이 증가하여 시멘트 페이스트의 최종 높이가 낮아지고 지름이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 입자의 반경이 일정 이상이 되면 입자에 의하여 발생하는 인장력이 임계 액체가교력보다 커지게 되는데, 특히 입자의 반경이 0.140cm보다 커지는 조건에서의 시멘트 페이스트는 마찰력에 의해서 운동이 지배되는 형태로 변화한다. 또한 입자의 크기가 가장 작은 0.050cm 조건에서는 시멘트 페이스트가 전단흐름(shear flow)보다는 신장흐름(elongational flow)의 경향을 나타내는 것을 알 수 있는데, 이는 입자에 의하여 발생하는 인장력보다 상대적으로 큰 임계 액체 가교력이 소성재료의 거동을 설명하는 소성론(plasticity)에서의 높은 항복응력(yield stress)과 유사한 역할을 하는 것으로 설명할 수도 있다 (Yun, 2017). 반면 상사성 이론을 적용하여 입자의 반경의 변화에 따라서 표면장력을 조정한 Group 1의 경우에는 반경과 표면장력이 각각 0.100cm와 0.074N/m로 가정한 기존 조건에 비하여, 입자의 반경이 작아지거나 커지더라도 최종 형상에서는 크게 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 한편 Group 1에서의 시멘트 페이스트와 대기와의 경계면을 나타내는 점선은 반경 0.100cm, 표면장력 0.074N/m인 기준 조건에서의 형상을 나타내는데, 입자의 반경이 더 작은 조건에서는 형상적 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 입자의 반경과 표면장력이 0.274cm와 0.203N/m 이상인 경우에서부터 퍼지는 폭에서 차이가 다소 발생하였으나, 이는 상사성 이론을 적용하여 계산된 표면장력이나 밀도에서 발생하기보다는 절대 입자수의 부족으로 발생한다고 판단하는 것이 합리적이며, 이에 대한 고찰은 4.2절에 나타나 있다. Fig. 6의 Group 1의 대부분의 입자 반경에 대한 최종 형상들이 입자의 크기에 무관하게 합리적인 오차 내에 있다고 가정한다면, 상사성 이론을 활용하여 입자를 키우고 그에 따라 재료의 물성을 변화시키는 입자확대법의 활용성은 해석시간을 비교함으로써 더욱 명확해진다. 최종 형상에서의 오차가 매우 작은 경우로 볼 수 있는 입자 반경 0.196cm, 0.140cm, 0.100cm와 0.050cm의 해석시간은 각각 3분, 6분, 32분, 165분으로 최대 50배 이상 발생하기 때문이다. 이는 입자확대법을 적용함으로써 해석시간을 합리적인 수준으로 감소시킬 수 있음을 의미하며, 다른 관점에서는 동일한 해석 자원으로 더 큰 부피의 시멘트 페이스트를 해석에서

고려할 수 있음을 의미하기도 한다.

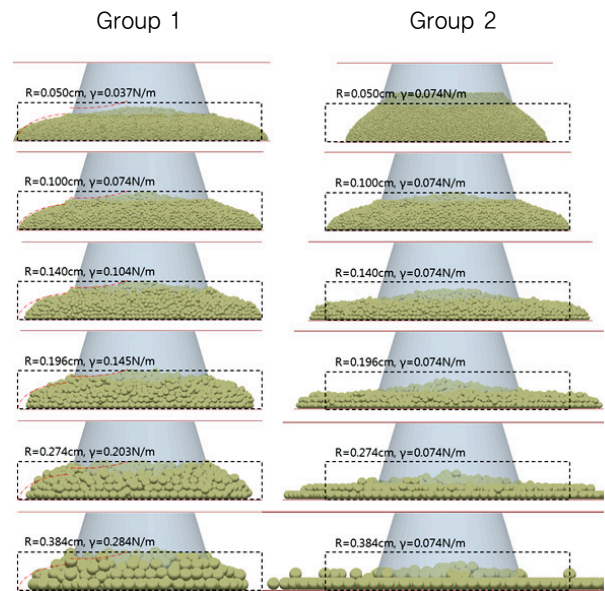


Fig. 6 Final Shape of Minicone Simulations

## 4. 결론 및 고찰

### 4.1. 결론 및 요약

유동재료의 거동 예측은 기존의 시공에 사용되는 건설재료의 초기 품질을 향상시키는데 활용될 수 있으며, 향후 일반적인 조건과 매우 다른 조건에서의 적층형 3D 프린팅 시공에서 재료의 물성 결정, 생산 장비 및 시공 장비 설계에도 활용될 수 있다는 점에서 큰 의미가 있다. 본 연구에서는 입자확대법을 적용한 이산요소법을 활용하여 액체가교력으로 표현될 수 있는 시멘트 페이스트의 흐름적 거동에 효과적으로 적용될 수 있는지를 평가했다. 이를 위하여 미니콘 실험에서의 시멘트 페이스트를 표현하는 6개의 다른 입자 반경을 고려하였으며, 상사성 이론에 따라 확대 또는 축소된 입자에 대한 표면장력을 결정하여 정적 액체가교모형에 적용한 후 수치해석을 수행하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 골재입자의 맞물림이나 유체의 유동에 의한 거동이 아닌 입자 사이의 표면장력이 거동을 지배하는 경우에는 표면장력을 활용하는 정적 액체가교모형을 활용하여 시멘트 페이스트의 미니콘 실험 거동을 효과적으로 모사할 수 있다.
2. 액체가교 모형을 적용한 이산요소해석을 수행하는 경우, 상사성 이론에 근거한 입자확대법은 입자의 크

기에 따라 표면장력을 재산정하는 방법으로 적용될 수 있다.

- 액체가교 모형으로 거동이 설명되는 재료의 표면장력은 상사성 이론에 근거하여 결정된 조정계수를 기준 반경의 입자에 대하여 사용된 표면장력에 곱하여 결정한다.
- 액체가교 모형을 통하여 무차원 액체가교력과 무차원 떨어진 거리를 나타내는 곡선은 입자의 반경과 무관하게 하나의 연속된 곡선으로 표현될 수 있으며, 흐름적 특성을 나타낼 수 있는 무차원 액체가교력을 표현할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖는다.
- 입자확대법을 적용한 미니콘 실험에 대한 이산요소 해석은 기준 조건보다 입자의 수가 약 1/60 이하로 줄어드는 조건에서도 충분히 적용이 가능하며, 이 경우의 해석시간은 기준 조건의 해석시간에 대하여 1/50 이하로 단축된다.
- 그러나 상사성 이론을 적용하여도 입자의 반경이 일정값을 넘는 경우에는 오차가 발생하며, 이에 대한 고려가 필요하다.

## 4.2. 고찰

앞선 결론 및 요약에서 상사성 이론을 적용한 입자확대법을 이산요소법에 적용하기 위해서는 이론적 물성의 보정이 필수적으로 수행되어야 하나, 이와 동시에 최대 입자의 반경과 경계조건 특성이 고려되어야 오차를 최소화할 수 있다. 이에 대한 고찰은 T형관 상부에서 유입되어 좌우 다른 양이 유출되는 과정을 나타낸 Fig. 7에 개념적으로 표현되어 있다.

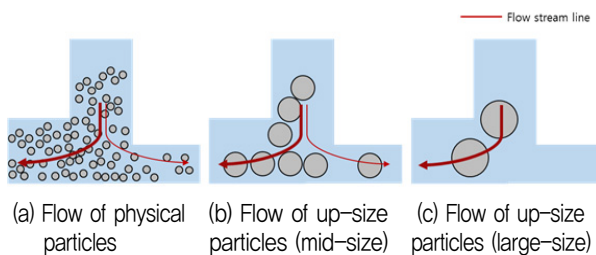


Fig. 7 Schematic Representation of Variation in Up-sized Particles

입자의 유출이 좌측으로 더 많이 되는 경우를 나타내는 실제의 조건 또는 기준 조건 (a)에 비하여, 입자확대법을 적용하여 다수의 입자가 그보다 큰 입자로 대체되는 (b)의 경우까지는 명확한 문제가 관찰되지 않는다. 그러나 (c)와 같이 대형 입자가 다수의 입자를 대체하는 극단적인 경우, (a)의 경우에서 나타나는 입자로 표현된

흐름선(flow stream line)의 길이나 양을 적절히 표현할 수 없음이 명확하다. 따라서 확대된 입자들의 거동에 대하여 보다 신뢰할 수 있는 결과를 도출하기 위해서는 상사성 이론을 적용할 수 있는 최대 입자반경과 기하구조의 형태적 특성을 반영할 필요가 있는 것을 알 수 있다. 최대 입자반경은 개별입자로서 연속체를 표현하는 이산요소법의 적용 한계와 유사한 것으로서 유체역학에서 연속체를 가정할 수 있는 기체와 그렇지 못한 희박기체를 정의하는 누센 수(Knudsen number)와 유사한 방법으로 정의될 가능성이 높으며, 경계조건 특성은 경계 물체의 곡선반경(radius of curve)와 입자의 수, 크기 및 유속의 함수로 표현될 가능성이 높다. 따라서 연속적 유체 또는 입자의 흐름을 표현하기 위하여 입자확대법을 적용하기 위해서는 이들 관계를 고려한 최대 입자의 제한에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Alguacil, M. D., and Gauckler, L. J. (2011). "Accuracy of the toroidal approximation for the calculus of concave and convex liquid bridges between particles." *Granular materials*, Vol. 13, pp.487-492.
- Cengel, Y. A., Cimbala J. M. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. Third Edition*, Mc Graw Hill.
- Feng, Y. T., Own, D. R. J., (2014). "Discrete element modeling of large scale particle systems-I: exact scaling laws." *Comp. part mec.*, Vol. 1, pp.159-168.
- Fisher, R. A. (1926). "On the capillary forces in an ideal soil; correction of formulae given by W. B. Haines." *Journal of agricultural science*, Vol. 16, Issue 3, pp.492-505.
- Lian, G., Thornton, C., Adams M. J. (1993). "A theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies." *Journal of colloid and interface science*, Vol. 161, pp.138-147.
- Mazzone, D. N., Tardos, G. I., and Pfeffer, R. (1986). "The effect of gravity on the shape and strength of a liquid bridge between two spheres." *Journal of colloid and interface science*, Vol. 113, pp.544-556.
- Mikami, T., Kamiya, H., Horio, M. (1998). "Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed." *Chemical engineering science*, Vol. 53, pp.1927-1998
- Remy, B., Khinast, J.G., Glasser, B.J. (2012). "Wet granular flows in a bladed mixer: Experiments and simulations of monodisperse spheres." *AIChE Journal*, Vol. 58, Issue 11, pp.3354-3369.

- Tsuji, Y., Kawaguchi, T., Tanaka, T. (1993). "Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed." *Powder technology*, Vol. 77, pp.79-87.
- Tuck, E. O., Stokes, Y. M., Schwartz, L. W. (1997). "Slow slumping of a very viscous liquid bridge." *Journal of engineering mathematics*, Vol. 32, pp.27-40.
- Vincent, L., Duchemin, L., and Dizes, S. L. (2014). "Forced dynamics of a short viscous liquid bridge." *Journal of fluid mechanics*, Vol. 761, pp.220-240.
- Yun, T. (2016). "Review on analytical solutions for slump flow of cement paste." *International journal of highway engineering*, Vol. 18, No. 3, pp.21-32.
- Yun, T., Park, H. M. (2016). "Feasibility study on similarity principle in discrete element method." *International journal of highway engineering*, Vol. 18, No. 2, pp.51-60.
- Yun, T. (2017). "Numerical analysis on flow of cement paste using 2D-CFD." *International journal of highway engineering*, Vol. 19, No. 4, pp.19-25.