

# 용해성 지반혼합재의 입자 용해 영향

## Particle Dissolution Effects on Soluble Geo-Mixtures

판 명 과<sup>1)</sup> · 조 세 현<sup>1)</sup> · 변 용 훈<sup>2)</sup> · 신 호 성<sup>3)</sup> · 이 종 섭<sup>†</sup>

Tran, M. Khoa · Cho, Se-Hyun · Byun, Yong-Hoon · Shin, Ho-Sung · Lee, Jong-Sub

**ABSTRACT** : Macro- and micro-behaviors of soluble granular media during dissolution process is investigated by numerical analysis. Soluble media are represented by assemblies of non-soluble particles and soluble particles with the different soluble particles contents. Dissolutions of particles are implemented by reducing sizes of soluble particles. The numerical simulations results exhibit that the vertical displacements increase to certain times and become constant while the porosities still increase until no soluble particles are present. However, the porosities and vertical displacements increase with the increase of soluble particles content. The microscopic views show that the fabrics of media change during dissolution process until the certain times, the higher soluble particles contents, and the larger change in fabric.

**Keywords** : Anisotropy, DEM, Dissolution, Fabric, Numerical simulation, Soluble particle

**요 지** : 본 연구에서는 용해성 입자를 포함한 혼합재가 용해과정에서 발생하는 입자구조의 미시적 및 거시적 거동을 수치해석기법을 이용하여 조사하였다. 혼합재는 다양한 부피비의 용해성 입자와 비용해성 입자를 혼합하여 조성하였다. 용해성 입자의 용해과정은 입자의 크기를 감소시킴으로써 모사하였다. 수치해석 결과 일정한 시간까지 시료의 수직변형은 진행되며, 수직변형이 평형에 도달한 후에도 용해작용이 진행되어 간극률은 변화한다. 또한, 간극률과 수직변형은 용해성 입자의 함유량이 증가함에 따라 증가한다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 용해성 입자를 포함한 시료의 용해과정에서 입자구조의 변화는 특정 시간까지 진행되며, 용해성 입자의 부피가 클수록 구조 변화가 큰 결론을 얻었다.

**주요어** : 이방성, 개별요소법, 용해, 입자조직, 수치해석, 용해성 입자

## 1. 서 론

용해성 물질과 비용해성 물질로 이루어진 매질이 가지고 있는 초기의 입자구조는 전단 저항, 전단 거동 그리고 강성과 같은 입자의 역학적 거동에 상당한 영향을 끼친다. O'Sullivan 등(2004)의 쇠구슬로 이루어진 매질의 거동에 관한 연구는 각각의 입자 모델에서 유사한 밀도를 가진다 하더라도 구조적 형상의 차이에 따라 전단강도가 상당히 감소함을 보여주었다. 모래입자의 거동에서 구조적인 영향을 분석하기 위하여 삼축압축시험과 삼축인장시험에 대한 초기의 접촉면적을 다양하게 조성하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과, 수직접촉면 방향으로 전단을 수행한 시료가 수직접촉면과 직각이 되게 전단을 수행한 시료에 비해 강성과 강도가 크며, 팽창성이 큰 것으로 나타났다(Yimsiri 등, 2010).

용해성 흙 입자는 댐 제체를 포함한 다양한 지반에서 나타나는 경우가 있는 것으로 알려졌다(Craft, 2005; Mikheev

등, 1973). 용해성 지반은 용해성 입자가 용해되어 입자의 크기가 줄어들거나 입자 구조가 다른 형태로 변화하게 된다. 선행 연구들은 이러한 입자들의 용해현상이 발생한 이후에 나타나는 흙의 구조적 거동에 관해 수행되어 왔다(Azam, 2000; Fam 등, 2002; Shin 등, 2009; Truong 등, 2010). 그러나, 용해성 흙 입자의 용해에 주목한 역학적 거동 및 용해성 흙 입자의 구조 다양성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

Cundall과 Strack (1979)에 의해 소개된 개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 시료 내부입자의 거시적 및 미시적 거동에 관한 연구를 수행하기에 적절한 방법으로 알려져 있다. 개별요소법에서 흙 매질은 조립재의 입자들로 구성된 것으로 가정할 수 있다. 입자의 접촉에 따른 접촉력(contact force)과 입자들의 이동은 입자의 움직임에 대한 법칙과 각각의 접촉에 따른 힘-변위 법칙의 반복적 적용에 의해 각 시간 단계별로 계산된다. 입자간 거동으로부터 계산된 이러한 결과들은 거시적 거동에서 응력 및 변형률 등을 산정하

1) 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

2) 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

3) 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수

† 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수(E-mail : jongsub@korea.ac.kr)

는데 이용된다(Cundall 등, 1979; Ting, J. M 등, 1989; PFC2D Manual, 1998).

본 연구의 목적은 DEM 분석을 통해 용해성 혼합매질의 용해과정에서 발생하는 용해성 지반의 수직변형률, 간극률, 접촉점수, 그리고 이방성의 변화 등과 같은 물리적 거동을 파악하는 것이다. 시료는 용해성 입자의 부피비를 다양하게 조절하여 모델링하였으며, 용해과정은 시료를 조성하여 수직응력을 재하시킨 뒤, 용해성 입자의 크기를 시간 단계별로 일정하게 감소시킴으로써 모사하였다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 용해성 입자들이 흙 입자 구조에 미치는 영향을 이해하고, 미시적 및 거시적 관점에서 흙의 거동을 분석하였다.

## 2. 수치해석 모델링

### 2.1 시료상태 모델링

수치해석은 개별요소법을 이용한 상용 프로그램인 PFC (Particle Flow Code) 2D를 사용하여 수행되었다. 모델링한 상자의 크기는 폭 60mm, 높이 21mm로 설정하였다. 모든 벽은 서로를 간섭할 수 없으며, 평면이 움직일 수는 있지만 회전할 수 없도록 설정하였다. 모델링에 사용된 흙 입자들은 초기 직경이 0.45mm~0.60mm인 입자로 구성되었다. 각 시료는 용해성 입자의 부피비 0%, 2%, 5% 그리고 10%를 함유하고 있다. 여기서 용해성 입자의 부피비(%)는 용해성 입자의 면적을 비용해성 입자의 면적으로 나눈 값을 의미 ( $A_{\text{soluble}}/A_{\text{non-soluble}} \times 100\%$ )한다. 용해과정은 용해성 입자의 반지름에 1미만의 상수(0.9999)를 곱함으로써 입자의 크기를 점차 감소시키는 방법으로 모사하였다. 모형시료는 100kPa의 수직응력 하에서 압밀하였으며, 압밀이 완료된 후 초기 상태의 간극률은 0.126으로 설정하였다. 모델링에 사용된 비용해성 및 용해성 입자들의 입력상수들을 표 1에 나타내었다. 최종적으로, 용해성 입자들의 반경이 초기 반경의

표 1. 수치해석에 사용된 비용해성 및 용해성 입자의 입력상수

	Ball	Rigid wall
수직강성, $K_n$ (N/m)	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^9$
전단강성, $K_s$ (N/m)	$5 \times 10^6$	$1 \times 10^9$
최대입자반경, $r_{\text{max}}$ (m)	0.0003	
최소입자반경, $r_{\text{min}}$ (m)	0.000213	
비용해성입자밀도, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,620	
용해성입자밀도, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,160	
용해과정 시 마찰계수	1	0.9
시료조성 시 마찰계수	0.05	

8.2% 정도로 매우 작아졌을 때 용해과정이 완료된 것으로 판단하여 수치해석을 종료하였다.

## 2.2 거시적 거동

### 2.2.1 용해과정 시 용해된 입자의 반경

시료의 용해가 진행됨에 따라, 초기 입자의 반경을 기준으로 용해로 인하여 감소된 입자의 반경의 비를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 x축은 정규화시간(normalized time)으로써 용해성 입자가 완전히 녹는 시간을 기준으로 각 시간 단계별로 입자가 녹는 시간을 나눈값을 의미한다(Shin 등, 2009). 수치해석이 종료 되었을 때, 이 비율은 0.082였다. 수치해석이 종료되고 입자의 크기가 충분히 감소되면 용해성 입자의 크기와 입자 배열은 시료전체 구조에 영향을 끼치지 않는다. 따라서 수치해석이 종료된 시점에 용해성 입자를 제거하였다. 수치해석 수행 시 입자크기를 감소시키기 위한 감쇠계수는 매번 동일하게 적용되었으며, 이에 따라 용해과정동안 용해성 입자의 반경은 모두 동일하게 적용되었다.

### 2.2.2 수직변형률

시료 전체의 용해과정은 시료의 침하를 발생시키게 된다. 그림 2와 같이 시료의 수직변형률은 점차 증가하다가 일정 시간에 도달하면, 용해과정이 끝나지 않았음에도 일정한 값으로 수렴하여 평형상태에 도달하게 된다.

용해성 입자의 부피비가 증가하면 더 큰 수직변형률이 발생한다. 이때, 수직변형률이 일정한 값으로 수렴하기까지 걸리는 시간은 용해성 입자의 부피비가 2%, 5%인 경우, 용해성 입자가 완전히 녹는 시간을 기준으로 하는 정규화 시간(normalized time)이 0.2이내에 이루어지지만, 용해성 입자의 부피비가 10%의 경우에는 정규화 시간이 0.6이 될 때까지 시료의 수직변형률이 계속 증가하는 것으로 나타났다.

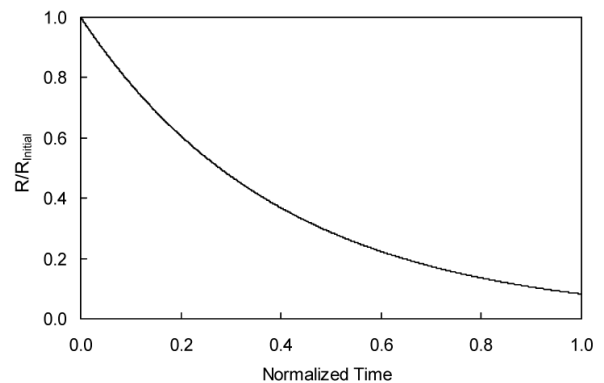


그림 1. 용해 시 시간에 따른 입자의 반경변화. R과  $R_{\text{initial}}$ 은 입자의 반경과 입자의 초기 반경을 의미한다. Normalized time은 용해성 입자가 완전히 녹는 시간을 기준으로 한다.

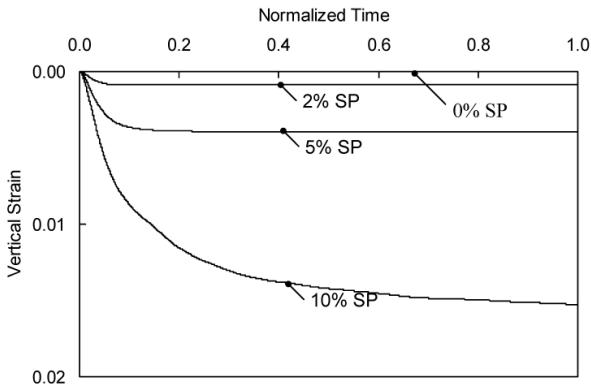


그림 2. 용해 시 시간에 따른 수직변형률. SP는 용해성 입자의 비율을 의미한다.

여기서, 정규화 시간 1은 용해성 입자의 용해가 완전히 이루어진 전체 시간을 의미한다. 각 시료의 구성에서 용해성 입자의 부피비는 단지 2~2.5배 차이(5%와 2%, 그리고 10%와 5%)였지만 최종적으로 용해가 완료되었을 때 시료의 전체 수직변형률은 3.8~4.5배의 차이가 발생하였다. 이것은 용해성 입자의 부피비가 용해과정에서 입자구조의 침하량에 큰 영향을 끼치는 것을 보여준다. Shin 과 Santamarina (2009)의 경우 흙 입자의 용해과정에 대해 최종 수직변형률 ( $\epsilon_z$ )을 식 (1)과 같이 예측하였다.

$$\epsilon_z = \frac{V_S}{V_T} \quad (1)$$

여기서,  $V_S$ 와  $V_T$ 는 각각 용해성 입자의 부피와 초기 전체 입자의 부피를 의미한다. 이론식을 적용하여 예측한 최종 수직변형률과 수치해석을 통해 구한 최종 수직변형률의 관계를 그림 3에 나타내었다. 수치해석을 통해 산정한 수직변형률은 용해된 입자들 간의 아칭효과(arching effect)로 인해 식 (1)을 통해 예측된 변형값보다 훨씬 작게 나타났다. 이 해석 결과는 Shin 과 Santamarina(2009)의 연구 결과와 유사

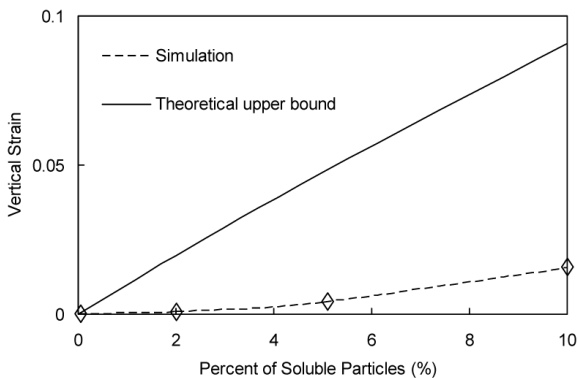


그림 3. 용해성 입자의 부피비에 따른 최종수직변형률

한 경향을 보여주었다.

### 2.2.3 간극률

그림 4는 용해과정이 진행되는 동안 발생한 간극률의 변화를 보여준다. 수치해석을 실시하는 동안 간극률의 변화는 초기에 급격히 증가하다가 일정 시간이 흐른 뒤 감소폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 전체 간극률의 증가는 용해성 입자들의 부피에 비례하며, 초기에 설정된 시료의 부피는 감소하지만 간극률은 증가하게 된다. 용해성 입자가 많이 포함될수록 시료가 용해되면서 수직변형률과 간극률의 증가가 더 크음을 알 수 있다.

## 2.3 미시적 거동

### 2.3.1 접촉점수(coordination number)

입자의 배열상태는 평균접촉점수(average coordination number)에 의해 특성화 될 수 있다(Rothenburg 등, 1989). 입자배열에서 평균접촉점수는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$CN = \frac{M}{N} \quad (2)$$

여기서,  $M$ 은 입자들이 물리적으로 접촉하고 있는 숫자에 2를 곱한 값이며,  $N$ 은 배열된 입자의 총 숫자를 의미한다. 위의 식은 식 (3)과 같이 재정리될 수 있다.

$$CN = \frac{2M_{pp} + M_{pw}}{N_p} \quad (3)$$

여기서,  $M_{pp}$ 는 입자의 배열 안에서 입자들의 총 접촉수를 의미하며,  $M_{pw}$ 는 배열된 범위 안에서 벽과 물리적으로 접촉하고 있는 수를 나타낸다. 그리고  $N_p$ 는 물리적 접촉에 기

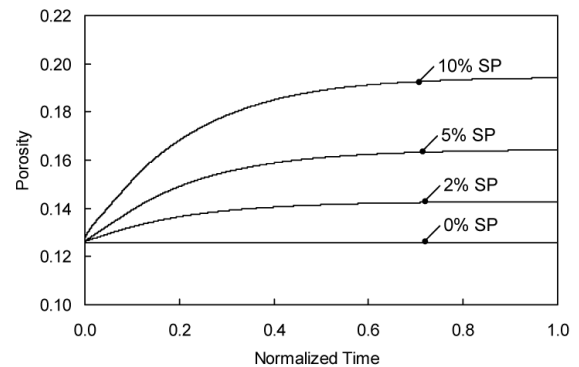


그림 4. 용해 시 시간에 따른 간극률 변화

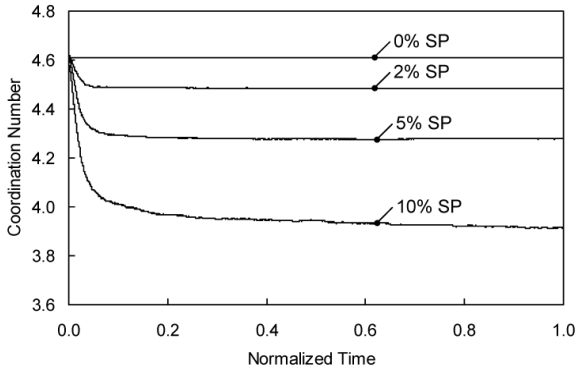


그림 5. 용해 시 시간에 따른 접촉점수 변화

여하는 입자의 총 수를 의미한다. 용해성 입자들의 크기가 줄어들면, 크기가 작아진 용해성 입자들은 비용해성 입자들 사이에 이동하게 되므로, 용해성 입자들은 시료전체의 입자 구조조직에 영향을 줄 수 없게 된다. 이러한 용해성 입자들은 다른 입자들과 한 부분의 접촉점만을 갖게 된다. 한 부분의 접촉점만을 갖게 되는 입자들은 위에서 설명한  $M_{PP}$ 에 포함되지 않는다.

용해과정에 따른 접촉점수의 변화를 그림 5에 나타내었다. 접촉점수의 감소는 주로 용해과정 초기에 발생한다. 접촉점수의 감소는 입자의 거시적 거동에서 수직변형률과 마찬가지로 용해성 입자의 파괴비가 2%와 5%인 시료는 정규화 시간 0.2까지 발생하며, 용해성 입자의 파괴비가 10%인 시료의 경우는 정규화 시간 0.6까지 일어난다. 용해성 입자의 파괴가 증가할수록 접촉점수는 더욱 감소한다. 용해과정이 완료된 후, 접촉점수는 용해성 입자의 파괴비가 2%, 5%, 그리고 10%인 시료에서 각각 4.49, 4.28 그리고 3.91로 나타났다. 용해성 입자가 10% 포함된 구조의 최종 접촉점수는 흙 입자가 가장 느슨한 경우의 접촉점수보다 더 작게 나타났다. 이는 용해과정이 접촉점수의 감소뿐 아니라 흙 입자의 구조적 불안정에도 영향을 끼침을 의미하는 것이다.

### 2.3.2 조직이방성 상수(fabric anisotropy coefficient)

흙의 입자조직에 작용하게 되는 평균 응력은 식 (4)로 표현된다(Bathurst 등, 1990).

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{\alpha} f_i^{\alpha} l_j^{\alpha} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

여기서,  $V$ 는 해석에 사용된 입자의 전면적을 의미하며,  $f_i^{\alpha}$ 는 입자와 입자사이의  $\alpha$ 번째 접촉점에서 작용하는 입자간 접촉력을 의미한다.  $l_j^{\alpha}$ 는 그림 6에 나타난 접촉점과 입자의 중심간을 연결하는  $j$ 번째 벡터요소를 의미한다.

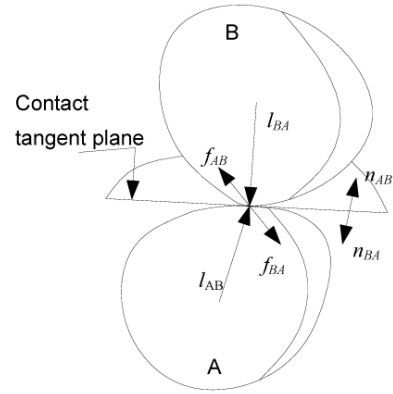


그림 6. 접촉방향성, 접촉벡터길이( $l$ ) 그리고 접촉력( $f$ )

위의 식 (4)는 접촉방향성(contact normal  $E(\theta)$ ), 평균접촉력(average contact force  $f_i(\theta)$ ), 평균접촉벡터길이(average contact vector length  $l_j(\theta)$ )를 이용하여 식 (5)로 바꿀 수 있다.

$$\sigma_{ij} = m_v \int_V \bar{f}_i(\theta) \bar{l}_j(\theta) E(\theta) d\theta \quad (5)$$

여기서,  $m_v = M/V$ 는 접촉 밀도를 나타내며, 또한  $M$ 은 접촉되어있는 입자의 전체 수를 의미한다. 평균접촉력은 평균연직력 요소(average normal force component,  $f_n(\theta)$ )와 평균접선력 요소(average tangential force component,  $f_t(\theta)$ )로 식 (6)과 같이 분리된다.

$$\bar{f}_i(\theta) = \bar{f}_n(\theta) n_i + \bar{f}_t(\theta) t_i \quad (6)$$

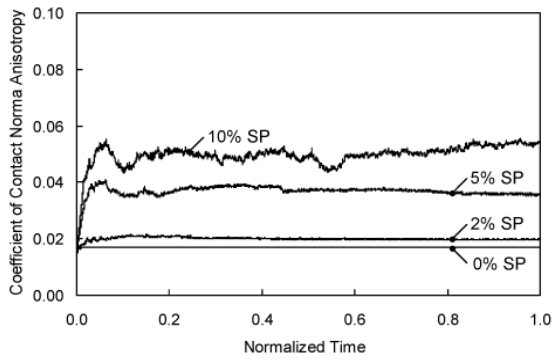
여기서,  $n = (\cos\theta, \sin\theta)$ ,  $t = -(\sin\theta, \cos\theta)$ 이다. 접촉방향성과 평균접촉력요소(average contact force components  $f_n(\theta)$ ,  $f_t(\theta)$ )는 Fourier series를 이용하여 표현할 수 있다(Rothenburg, 1980).

$$E(\theta) = \frac{1}{2\pi} (1 + a \cos 2(\theta - \theta_a)) \quad (7)$$

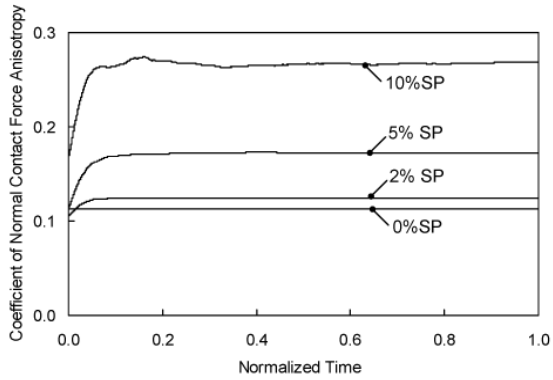
$$\bar{f}_n(\theta) = \bar{f}_0 (1 + a_n \cos 2(\theta - \theta_n)) \quad (8)$$

$$\bar{f}_t(\theta) = -\bar{f}_0 a_t \sin 2(\theta - \theta_t) \quad (9)$$

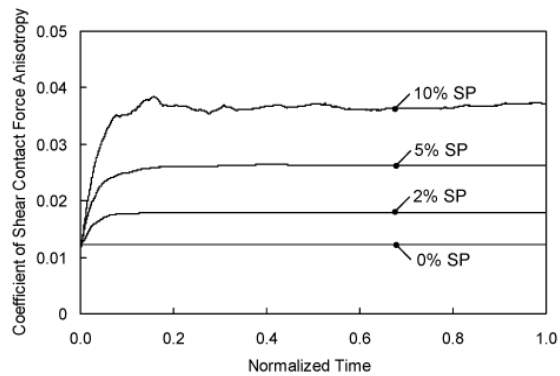
여기서, 상수  $a$ ,  $a_n$ ,  $a_t$ 는 접촉방향의 이방성상수, 평균연직접촉력의 이방성상수, 평균전단접촉력의 이방성상수를 각각 나타내며,  $\theta_a$ ,  $\theta_n$ ,  $\theta_t$ 는 접촉방향, 평균연직접촉력의 방향, 평균전단접촉력의 방향을 의미한다. 이방성 상수  $a$ ,  $a_n$ ,



(a) 접촉방향성의 이방성 상수



(b) 연직접촉력의 이방성 상수



(c) 전단접촉력의 이방성 상수

그림 7. 용해 시 시간에 이방성 상수의 따른 변화

$a_t$ 의 변화를 그림 7에 나타내었다.

수치해석 초기에는 이방성 상수의 차이가 작게 나타났지만 용해가 진행됨에 따라 이방성 정도가 커지는 것을 알 수 있다. 용해성 입자가 2%, 5%, 그리고 10% 포함된 시료 모

두에서 연직접촉력(normal contact force)과 전단접촉력이 수치해석 초기 정규화 시간 0.2이전까지 상당히 증가하는 것을 보여준다. 정규화 시간 0.2이후 접촉방향의 이방성은 여전히 변화를 보이지만, 연직접촉력과 전단접촉력의 이방성은 변화폭이 매우 좁다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 정규화 시간 0.2가 경과 한 후 입자의 용해는 전체 구조에 큰 영향을 끼치지 않는다는 것을 보여준다. 접촉력의 수치해석 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2는 통해 용해과정은 평균연직접촉력(average normal contact force)과 평균전단접촉력(average shear contact force)이 용해입자의 부피에 비례하여 증가하는 것을 보여준다. 연직 또는 전단접촉력(P)은 식 (10)을 이용해 계산되었고, 그 결과를 그림 8에 나타내고 있다.

$$P(\theta) = \sum N(\theta) \quad (10)$$

여기서,  $\sum N(\theta)$ 은 법선방향이  $\theta$ 일 때 접촉력을 의미한다. 그림 8과 같이 용해성 입자의 부피비가 0%인 경우는 접촉방향성과 연직접촉력의 극분포가 완전히 균질하여 이방성을 보이지 않는다. 단, 그림 8에 나타난 이방성은 벽의 영향 때문인 것으로 판단된다. 또한 전단접촉력의 극분포는 매우 작게 나타났다. 또한 용해 이후에, 용해성 입자의 부피비가 증가함에 따라, 접촉방향성과 연직접촉력은 감소하며, 전단접촉력은 증가하게 된다.

### 3. 분석 및 토의

#### 3.1 수직변형률, 간극률, 접촉점수 및 입자구조조직

용해성 입자들이 용해됨에 따라 수직변형률은 용해 초기에 급격히 진행된다. 용해입자의 부피비가 2%, 5%인 경우는 정규화 시간 0.2이전에 진행이 완료되며, 용해입자의 부피비가 10%인 경우는 정규화 시간 0.6에서 수직변형률이 평형상태를 이루게 된다. 접촉점수의 변화도 수직변형률의 변화와 유사하게 진행된다. 즉, 접촉점수의 감소는 용해초기에 급격히 진행되다가 일정 시간이 경과하면 평형상태에

표 2. 접촉력의 수치해석 결과

용해성 입자 부피비	용해 전			용해 후		
	접촉 수	평균연직접촉력(N)	평균전단접촉력(N)	접촉 수	평균연직접촉력(N)	평균전단접촉력(N)
0%	12,203	38.34	0.97	12,203	38.34	0.97
2%	12,230	38.86	0.85	11,682	38.78	2.49
5%	12,182	38.82	1.02	10,784	39.53	4.80
10%	12,136	38.08	1.01	9,200	40.81	8.09

도달한다. 그러나, 간극률의 증가는 용해과정이 끝날 때까지 진행된다.

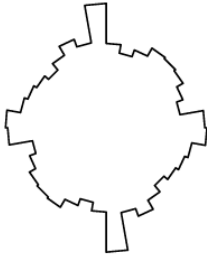
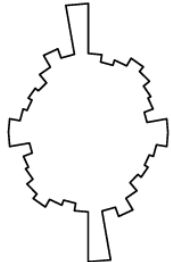

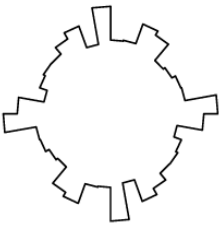
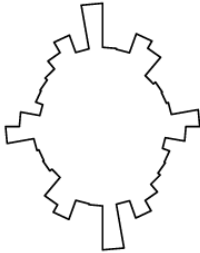
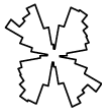
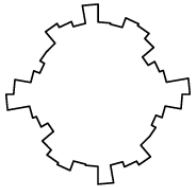
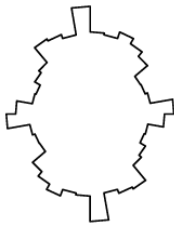
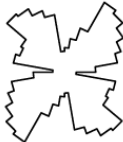
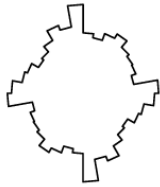
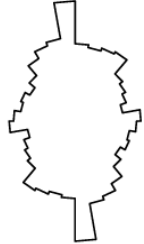
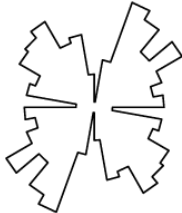
수직변형률의 변화는 다음과 같이 설명된다. 용해성 입자의 부피비가 2%와 5%인 경우 정규화 시간 0.2에서 용해된 입자의 반경은 초기 입자반경의 0.607배이다. 간극은 입자가 용해됨에 따라 커지게 되고, 용해성 입자들은 간극사이로 들어가게 된다. 용해성 입자들은 하나 혹은 둘만의 접촉점을 갖게 되고, 이렇게 접촉점을 하나 혹은 둘만 갖는 입자들은 수치해석 결과에 영향을 주지 못하게 된다. 일정 시간이 경과한 후 수직변형률은 평형상태에 도달하지만, 용해는 그 이후에도 계속 진행된다. 이와 같은 이유로 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 수직 변형률이 평형에 이르는 시간이 길어지게 된다. 즉, 용해성 입자의 부피비가 10%인 경우, 수직변형률이 평형에 이르는 시간이 가장 길게 된다. 정규화 시간 0.2가 경과한 이후에도 용해성 입자들은 여전히 입자의 구조에 영향을 주고, 이로 인해 용해성 입자의 부피

비가 2%와 5%인 시료보다 평형상태에 도달하는데 긴 시간이 필요하게 된다.

이방성 상수(anisotropy coefficient) 또한 정규화 시간 0.2 이전에 평형에 도달한다. 입자구조의 변화가 가장 큰 시료, 즉, 용해성 입자가 10% 포함된 시료에서도 정규화 시간 0.2 이후에는 이방성 상수의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이방성 상수의 변화는 용해성 입자가 2%와 5% 포함된 시료의 경우 용해과정 초기에 대부분 발생하며 그 이후에는 이방성 상수의 변화는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 용해성 입자가 10% 포함되어 있는 시료의 경우에도 정규화시간 0.2 이후에는 연직접촉력 및 전단접촉력의 이방성 상수는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 한편, 접촉점수와 이방성 상수의 변화는 수직변형률의 변화와 유사한 경향을 보인다.

Fam 등(2002)에 따르면, 5%의 용해성 입자를 갖는 시료에서 용해에 필요한 시간이 100여 분 정도 걸렸음에도 불구하고

그림 8. 용해과정 이후의 접촉방향성, 연직접촉력, 전단접촉력의 극분포

용해성 입자 부피비	접촉방향성	연직접촉력	전단접촉력
0%			
2%			
5%			
10%			

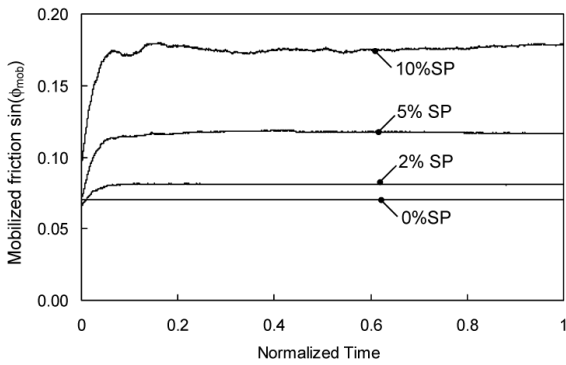


그림 9. 용해 시 시간에 따른 수정마찰각 변화

하고, 수직변형과 전단파 속도의 변화가 초기의 10분에 집중되는 것으로 나타났다. 이 결과는 입자의 용해는 용해 초기에 입자구조의 강성에 큰 영향을 미치는 것을 보여주며 본 연구의 결과와 유사함을 보여준다. 또한 용해가 일어나는 동안 접촉점수는 감소한다. Fam 등(2002)은 전단파 속도의 감소가 간극비, 접촉력, 단위중량의 영향뿐만 아니라 접촉점수의 감소에도 영향을 끼친다고 보고하였다.

시료의 용해가 진행될수록 입자의 구조는 더욱 이방성을 나타내며 불안정한 구조로 바뀌게 된다. Truong 등(2010)의 연구에 따르면, 용해가 발생한 후 시료의 수직변형률은 용해가 발생하지 않은 시료에 비하여 훨씬 크게 발생함을 보여주었다. 또한 용해가 진행된 시료의 경우, 전단파 속도가 느려짐을 보고하였다. 즉, 용해성 입자의 부피비가 클수록 용해된 후 동일한 하중 하에서 시료의 수직변형률은 커지게 되며, 전단파 속도는 느려지게 된다. 수직변형률과 전단파 속도는 시료의 구조변화를 간접적으로 설명하는 것으로 본 연구의 결과와 매우 유사한 경향을 나타낸다.

### 3.2 마찰저항

용해과정은 입자의 구조를 재배열하게 되고, 이 현상으로 인해 마찰저항이 일어난다. 조립체의 수정마찰각(mobilized friction angle  $\Phi_{mob}$ )은 이방성 상수를 사용하여 식 (11)과 같이 표현된다(Rothenburg 등, 1989).

$$\sin \Phi_{mob} = \frac{\frac{1}{2}(a + a_n + a_t)}{1 + \frac{a_n a}{2}} \quad (11)$$

여기서  $a$ ,  $a_n$ ,  $a_t$ 는 접촉방향의 이방성상수, 평균연직접촉력의 이방성상수, 평균전단접촉력의 이방성상수를 각각 나타낸다. 수치해석을 통한 수정마찰각의 평가를 그림 9에 나타

내었다. 수치해석 초기에 수정마찰각이 용해성 입자의 부피비에 따라 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

용해성 입자를 포함한 혼합재에서 용해과정에서 발생하는 물리적 거동을 조사하기 위하여 DEM을 이용한 수치해석을 수행하였다. 혼합재는 다양한 부피비의 용해성 입자를 갖는 것으로 모델링되었으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 입자의 용해과정에서 수직변형은 입자가 용해됨에 따라 증가하고, 용해성 입자의 부피비가 적은 혼합재의 경우 용해 초기에 대부분의 변형이 발생한다. 그리고 용해성 입자를 10%정도 함유하고 있는 혼합재의 경우는 장기간에 걸쳐 수직변형이 발생한다.
- (2) 용해성 입자의 부피비가 증가하게 되면 수직변형률도 증가한다. 용해성 입자의 부피가 2.5배 증가하면, 혼합재의 침하는 4.5배 정도 증가한다. 용해가 진행됨에 따라 간극률이 증가하고, 침하가 발생함에 따라 용해되는 입자의 구조에서 아칭효과가 발생한다.
- (3) 접촉점수의 감소는 용해 초기에 대부분 발생한다. 또한 접촉점수의 감소는 용해성 입자의 부피비에 비례한다. 10%의 용해성 입자를 포함한 혼합재의 접촉점수는 최종적으로 3.91에 도달하게 된다. 이 값은 매우 느슨한 상태의 시료가 갖는 접촉점수 보다 작은 값으로 입자의 용해가 발생함에 따라 흙 구조는 불안정하게 배열됨을 알 수 있다.
- (4) 용해가 진행됨에 따라 입자의 구조는 이방성을 나타내게 되며 내부전단 파괴는 용해가 진행되는 동안 발생할 수 있다. 이러한 미시적 관점에서의 변화는 수직변형률의 변화와 유사하게 발생한다.
- (5) 입자의 용해는 용해과정 초기에는 수직변형률, 접촉점수, 이방성등의 변화에 큰 영향을 주고, 이후에는 간극률의 변화에만 영향을 주는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년 및 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2010-0016605 및 2011-0018110)임을 밝히며 깊이 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Azam, S. (2000), Collapse and Compressibility Behaviour of Arid Calcureous Soil Formations, *B. Eng. Geol. Environ*, Vol. 59, No. 3, pp. 211~217.
2. Bathurst, R. J., and Rothenburg, L. (1990). Observations on Stress-force-fabric Relationships in Idealized Granular Materials, *Mechanics of Materials*, Vol. 9, pp. 65~80.
3. Cook, B. K., and Jensen, R. P. (2002), *Discrete Element Methods: Numerical Modeling of Discontinua*, Geotechnical Special Publication, No. 117, ASCE, pp. 1~427.
4. Craft Doug (2005), *Seepage chemistry manual*, US Department of the Interior, Buureau of Reclamation, Dam Safety Technology Development Program, Denver, Colorado, pp. 1~166
5. Cundall, P. A., and Strack, O. D. L. (1979), A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47~65.
6. Fam, M. A., Cascante, G., and Dusseault, M. B. (2002), Large and Small Strain Properties of Sands Subjected to Local Void Increase, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 12, pp. 1018~1025.
7. Mikheev, V. V., and Petrukhin, V. P. (1973), *Construction Properties of Saline Soils used as Foundation Beds in Industrial and Civil Construction, Construction under Special Soil Conditions*, Consultants Bureau, A Division of Plenum Publishing Corporation, 227 West 17<sup>th</sup> Street, New York, pp. 30~36.
8. O'Sullivan, C., Bray, J.D., and Riemer, M.(2004), Examination of the Response of the Regularly Packed Specimens of Spherical Particles Using Physical Tests and Discrete Element Simulation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 10, pp. 1140~1150.
9. PFC2D (1998), *User's manual*, Itasca Consulting Group, Inc, pp. 1~1425.
10. Rothenburg, L. (1980), *Micromechanics of Idealized Granular System*, Ph.D. Dissertation, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.
11. Rothenburg, L., and Bathurst, R. J. (1989), Analytical Study of Induced Anisotropy in Idealized Granular Materials, *Geotechnique*, Vol. 39, No. 4, pp. 601~614.
12. Shimizu, Y., Hart, R., and Cundall, P. (2004), Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods, *The 2nd International PFC Symposium*, Kyoto, Japan, pp. 1~435.
13. Shin, H., and Santamarina, J. C. (2009), Mineral Dissolution and the Evolution of  $k_0$ , *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 8, pp. 1141~1147.
14. Ting, J. M., Corkum, B. T., Kauffman, C. R., and Greco, C. (1989), Discrete Numerical Model for Soil Mechanics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 379~398.
15. Truong, Q. H., Eom, Y. H., and Lee, J. S. (2010), Stiffness Characteristics of Soluble Mixtures, *Geotechnique*, Vol. 60, No. 4, pp. 293~297.
16. Yimsiri, S., and Soga, K. (2010), DEM Analysis of Soil Fabric Effects on Behavior of Sand, *Geotechnique*, Vol. 60, No. 6, pp. 483~495.

(접수일: 2011. 5. 5 심사일: 2011. 6. 13 심사완료일: 2011. 10. 14)