

지반 소실 혼합재의 압축성 및 강성 특성

Compressibility and Stiffness Characteristics of Vanishing Mixtures

쫑 팡 흥¹ Truong, Q. Hung

엄 용 훈² Eom, Yong-Hun

윤 형 구³ Yoon, Hyung-Koo

이 중 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

Soils naturally contain grains of different minerals which may be dissolved under chemical or physical processes. The dissolution leads changes in microstructure of particulate media, such as an increase in local void or permeability, which affects the strength and deformation of soils. This study focuses on the small strain stiffness characteristics of vanishing mixtures, which consist of sand and salt particles at different volume fractions. Experiments are carried out in a conventional oedometer cell (Ko-loading) integrated with bender elements for the measurement of shear waves. Dissolutions of particles are implemented by saturating the mixtures at various confining stresses. Axial deformation and shear waves are recorded after each loading stage and during dissolution process. Experimental results show that after dissolution, the vertical strain and the void ratio increase, while the shear wave velocity and small strain shear modulus decrease. The decrease of the velocity results from the void ratio increase and particle contact decrease. The process monitoring during dissolution of the particles shows that the vertical strain dramatically increases at the beginning of the saturation process and converges after vanishing process finishes, and that the shear wave velocity decreases at the beginning and increases due to the particle reorientation. Specimens prepared by sand and salt particles are proved to be able to provide a valuable insight in macro structural behaviors of the vanishings mixtures.

요 지

지반은 화학적 및 물리적인 작용으로 인하여 지반 자체가 용해되어 지반 재료 자체가 자연적으로 소실(Vanishing)되는 입자를 포함하고 있다. 지반의 소실은 입자로 구성된 재질에서 국부적인 간극 및 투수계수의 증가와 같은 미소구조의 변화를 유발하여 지반의 강도와 변형에 영향을 미친다. 본 논문에서는 지반 재료의 소실 발생 시 대상지반의 국부적인 강성의 변화특성을 파악하기 위하여 소금과 모래를 여러 가지 부피비로 혼합하여 사용하였다. 실험은 전단파 측정용 벤더 엘리먼트가 설치된 압밀셀을 이용하여 수행하였다. 입자의 용해는 다양한 구속응력 하에서 시료를 포화시켜 수행하였다. 축방향 변형률과 전단파 신호를 매 하중 단계와 입자용해 시 측정하였다. 실험 결과, 입자 용해 후 축방향변형률과 간극비는 증가하였고, 전단파 속도와 최대전단탄성계수는 감소하는 것으로 나타났다. 입자 용해로 인한 간극비 증가와 입자간의 접촉이 감소하여 전단파 속도가 감소하였다. 입자가 용해되는 동안 수직변형률은 포화 시작점에서 급격히 증가하였으며 입자 용해가 완료되면서 수렴하였으며, 전단파속도는 시작 시 감소하였다가 입자가 재배열되면서 증가하는 것으로 나타났다. 모래와 소금으로 구성된 시료는 지반소실재의 거시적 구조 거동에 의미있는 결과를 보여줄 수 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Dissolution, Ko-loading, Local void, Shear waves, Vanishing

1 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반 속에는 소금, 석고, 경석고, 석회석, 백운석, 및 암염과 같은 지반 소실(Vanishing) 재료들이 포함되어 있어(Hillel et al. 2004; Bell 2007), 지반공학적 특성변화에 쉽게 영향을 받는다. 지반 소실 혼합재는 댐이나 저수지뿐만 아니라 다양한 지반공학 재료로 사용되어 오고 있다. 이는 용해시 입자간의 미소구조 변형을 야기시켜 대상지반의 강도 변화와 물의 투수성 등에 영향을 미쳐 구조물에 피해를 발생시킬 수 있다. Macmillan 제방, Clubbiedean(Blyth and Freitas 1984), 그리고 St. Francis Dam(Craft et al. 2006)의 붕괴가 대표적인 사례이며, 지반 소실 재료를 함유한 지반의 공학적 특성 파악을 위해 다양한 연구가 수행되고 있다(Azam 2000; Fam et al. 2002; Craft et al. 2005). 혼합재의 지반 소실 현상은 지반 내 응력변화 및 전단강도에 영향을 미치므로 이에 따른 합리적인 지반의 특성 평가 방법이 사용되어야 한다. 본 연구에서는 지반의 소실 발생 전·후 그리고 지속 시간 동안에 발생하는 축방향 변형률과 강도특성을 이용하여 지반의 소실 거동 특성을 평가하고자 하였다.

축방향 변형과 최대 전단탄성계수를 산정하기 위해서 전단파 측정이 가능한 압밀셀이 사용되었다. 축방향 변형률은 침하량을 이용하여 산정되었으며, 최대 전단탄성계수는 측정된 전단파 속도로 계산되었다. 전단파 속도는 흙의 특성파악에 많이 사용되고 있는 벤더 엘리먼트를 사용하여 효율적으로 측정되었다(Fam and Santamarina 1995; Yun and Santamarina 2005; Lee et al. 2007a; Lee et al. 2007b).

본 논문은 모래와 소금을 이용하여 다양한 부피비의 소실 혼합재를 조성하였으며, 변형률과 전단파 속도를

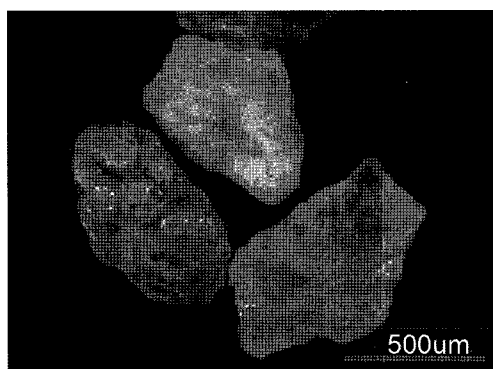
이용하여 지반 소실 특성을 평가하고자 하였다. 전단파 측정을 위해 사용된 압밀셀 장비와 실험 과정에 대해 설명한 후 하중의 재하, 제하, 재재하 과정에서 측정된 변위, 전단파의 분석방법 그리고 이를 이용하여 소실 혼합재의 거동특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

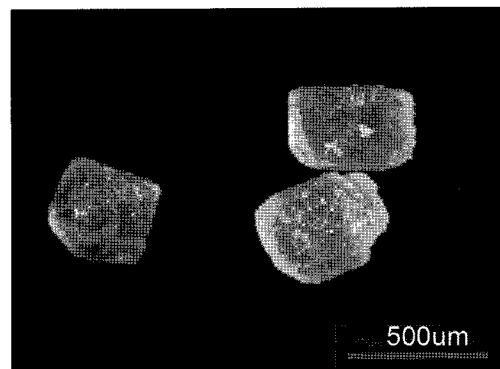
모래와 지반 소실 재료인 소금을 혼합하여 조성된 혼합재의 거동 특성은 횡방향 구속상태(K_0)에서 축하중 변화가 가능한 압밀셀을 이용하여 평가되었다. 실험에 사용된 시료 특성, 시료 조성 그리고 시험 과정은 다음과 같다.

2.1 시료특성

불순물을 제거하기 위해 모래는 증류수를 이용하여 세척 후 건조하였으며, 시료의 균질성을 위해 40/50번체(0.425/0.3mm)를 이용하여 체분석을 실시하였다. 조성된 모래시료는 그림 1(a)와 같으며, 고르고 모난 특성을 나타낸다. 소금의 경우도 마찬가지로 균질한 시료 조성을 위해 50/70번체(0.3/0.212mm)를 사용하였으며, 그림 1(b)와 같이 균질하며 모난 시료로 나타났다. 사용된 모래와 소금의 시료특성은 표 1과 같으며, 모래의 유효입경이($D_{50}=0.36\text{mm}$) 소금의 유효입경($D_{50}=0.25\text{mm}$)보다 약 1.5배 크게 사용되었다. 이는 상대적으로 입자크기가 큰 모래 입자 사이에 지반의 소실 재료인 소금을 위치시켜 혼합재의 거동을 효율적으로 평가하고자 하였으며, 지반의 소실 과정 중 시료 자체에 의해 발생하는 부피 변화를 최소화 시키고자 하였다.



(a) 모래



(b) 소금

그림 1. 모래와 소금의 입자 모양

표 1. 사용된 모래와 소금의 기본 물성치

특성	모래 (J 40/50 sand)	소금
비중	2.62	2.16
전단탄성계수[MPa]	≈100	≈15
포아송비	0.3	0.27*
입경D ₅₀ [mm]	0.36	0.25
최대간극비(e _{max})	1.04	1.44
최소간극비(e _{min})	0.62	0.71

* Jeremic (1994)

2.2 시료조성

혼합재는 소금의 부피비($V_{\text{salt}}/V_{\text{sand}} \times 100$)를 각각 0, 2, 5, 7, 10%로 조절하여 모래와 혼합한 후 조성되었으며, 균질한 시료 조성을 위해 5분간 혼합되었다. 조성된 혼합재는 재료분리에 유의하여 압밀셀에 다섯층으로 나누어 조성되었다. 각 층에 조성되는 혼합재의 무게는 동일하며, 탬핑은 매층 동일한 타격회수(20회)를 가하여 균질한 시료가 되도록 하였다. 시료조성 전후 현미경 관찰 결과 입자파쇄는 발견되지 않았다. K_0 조건을 만족시키기 위해 사용된 황동재질의 압밀셀은 내부직경이 74mm, 두께는 16mm, 그리고 높이는 63mm로 구성되어 있다. 조성된 혼합재의 초기 간극비(e_0)는 0.76으로 나타났다.

2.3 실험과정

지반의 소실 현상을 발생시키기 위해 조성된 시료는 NaCl 0.01M 전해질 용액을 압밀셀 밖의 실린더 용기에 주입하여 포화에 따른 용해 현상을 유발시켰다. 실린더 용기 내 수위는 흡입자의 재배열을 방지하기 위해 시료의 포화 방향이 아래에서 위로 이루어지도록 조절하면서 주입하였다. 주입완료 후 압밀셀 상부 캡까지 수위를 유지하였으며, 포화는 혼합재 내 지반 소실 재료인 소금이 모두 용해될 때까지 수행되었다.

하중은 건조상태일 때 가해졌으며, 재하와 제하의 하중 지속시간은 시료 포화 단계를 제외하고는 각 30분간을 유지하였다. 또한 실험은 혼합재의 소실 과정에 따른 전해질 용액의 변화를 최소화시키기 위해 온도(25°C)와 습도(60%)를 일정하게 유지하였다. 조성된 시료의 부피비와 구속하중에 따른 혼합재의 소실 특성을 평가하기 위해 다음과 같이 두가지 종류의 실험이 진행되었다. 첫번째는 모래와 소금의 부피비를 10%로 고정하고 구속하중을 40, 80, 160, 320kPa로 변화시키면서 실험을 수행하였으며,

두번째는 하중을 160kPa로 고정한 후 소금의 부피비를 0, 2, 5, 7, 10%로 변화시켜 실험을 진행하였다. 또한 기준값을 이용하여 측정값과의 비교를 위해 포화과정 없이 건조 시료를 이용해서 동일하게 실험을 실시하였다.

2.4 전단파 측정 장비

혼합재의 거동 특성은 그림 2와 같이 벤더 엘리먼트가 장착된 압밀셀을 이용하여 평가되었다. 벤더 엘리먼트(Piezo Systems, PSI5H4E)는 상·하부 캡에 설치되어 혼합재의 전단파신호가 측정되었으며, 흡과의 접촉면 증가에 따른 풍부한 에너지 발현을 위해 캔틸레버 형식으로 약 5mm가 돌출되도록 설치되었다. 발신 벤더 엘리먼트는 신호발생기(Agilent 33220A)를 이용하여 20Hz의 정방형의 신호를 전달하며, 시료를 통과한 신호는 수신 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 신호를 측정한다. 획득된 신호의 증폭 및 잡음 제거를 위하여 필터(Krohn-Hite 3364)를 이용하였으며, Nyquist 이론을 만족시키기 위해 로우패스 필터링(low pass filtering)은 항상 공진 주파수의 10배 이상을 적용하였다. 처리된 신호는 오실로스코프(Agilent 54624A)를 이용하여 디지털화 되었으며, 불규칙한 잡음(random noise)을 제거하기 위하여 1024개의 신호를 평균하여 저장하였다. 하지만, 포화 단계에서는 갑작스럽게 발생하는 특성을 정확하게 평가하기 위해 초기 30분 동안에는 신호의 평균을 적용하지 않고 측정하였다. 하중에 따라 변화하는 전단파 신호는 재하-제하에서 하중의 다음 단계 직전에 측정되었으며, 근접장 효과를 고려하여 산정된 초기 도달 시간과 발신 및 수신 벤더 엘리먼트의 끝단(tip-to-tip)거리를 이용하여 전단파 속도가 계산되었다(Lee and Santamarina 2005).

$$V_s = L_{\text{tip-to-tip}} / \Delta t \quad (1)$$

여기서, $L_{\text{tip-to-tip}}$ 은 벤더 엘리먼트의 tip-to-tip거리이며, Δt

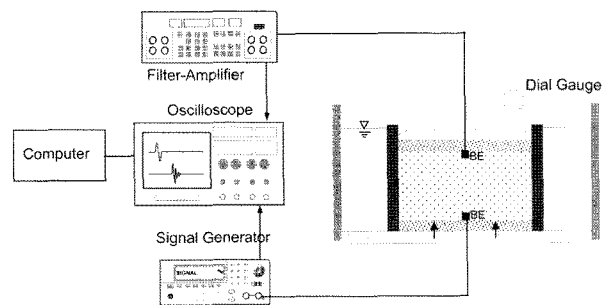
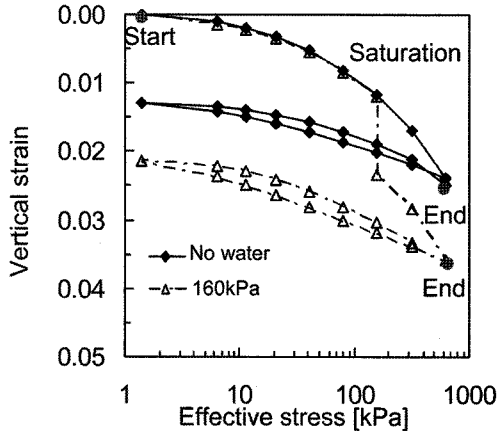


그림 2. 장비 구성(BE는 벤더엘리먼트를 나타냄)

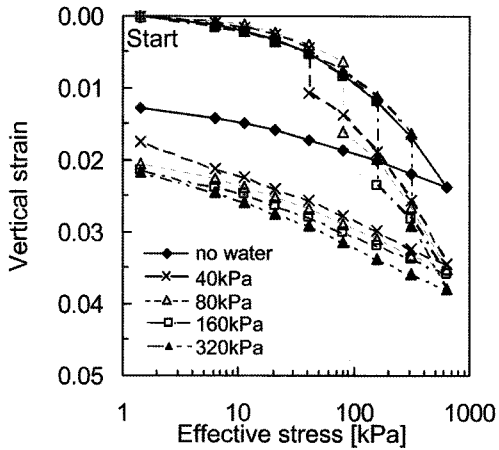
는 전단파 이동시간이다.

3. 실험결과

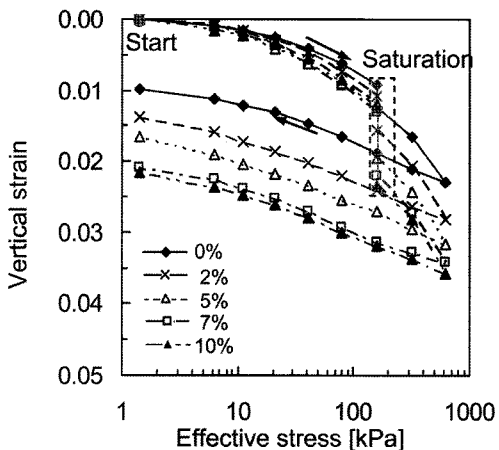
본 연구의 실험 결과는 횡방향 구속조건(K_0)에서 응



(a) 10%의 소금 부피비에서 재하-제하-재재하에 따른 거동



(b) 10%의 소금 부피비에서 수직응력의 변화($\sigma_v=40, 80, 160, 320$ kPa)에 따른 거동



(c) 160kPa의 수직응력 하에서 소금 부피비의 변화(%salt=0, 2, 5, 7, 10%)에 따른 거동

그림 3. 지반소실 혼합재의 수직 변형

력-변형률, 응력-간극비, 전단파 속도-시간, 혼합재의 소실 발생 시 전단파 속도의 변화 그리고 미소변형 구간의 전단탄성계수를 평가하여 나타내었다.

3.1 수직 변형률

수직하중이 160kPa일 때, 전해질 용액에 의해 혼합재의 소실이 발생한 시료와 단순 건조 시료를 이용하여 재하, 제하, 그리고 재재하에 따른 수직 변형의 특성은 그림 3(a)에 나타내었다. 두 시료는 포화 전까지 수직 변형률이 동일하지만, 포화시에는 지반의 소실 현상으로 수직 변형이 급격하게 증가하여 상이한 거동 특성을 보여준다. 이는 혼합재의 소실 발생 시 입자 사이의 공극이 증가하여 수직 변형률도 크게 발생하였기 때문으로 판단된다.

그림 3(b)는 모래와 소금의 혼합재 부피비를 10%로 고정하고 포화 시점의 하중을 변화시켜 측정된 변형률 결과를 보여준다. 포화되는 시점의 수직 하중이 높아짐에 따라서 최종 수직 변형이 증가하며, 이는 수직하중이 증가할수록 입자의 구조변화가 크게 발생하는 것을 나타내준다. 또한 동일한 부피비에서 혼합재의 최종 수직변형률은 수직 응력의 증가에 따라 일정하게 수렴하는 것으로 나타났다.

그림 3(c)는 수직 응력을 160kPa으로 고정하고 모래와 소금의 부피비를 변화시키며 지반의 소실 현상을 측정 한 결과이다. 소금의 부피비가 높아질수록 입자 사이의 간극이 증가하여 큰 수직 변형이 발생되었다. 다양한 응력 하에서 소금 부피비에 따른 혼합재의 소실 특성은 그림 4와 같으며, 각각의 수직 응력하에서 소금 부피비에 따른 혼합재의 수직 변형은 거의 선형으로 나타났다. 하중에 따른 혼합재의 소실은 입자 용해시 시료의 부피

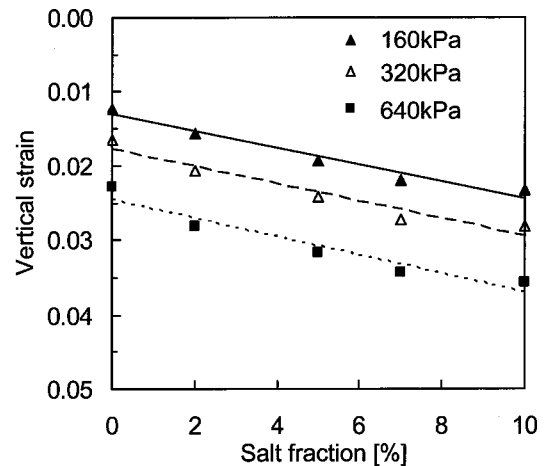
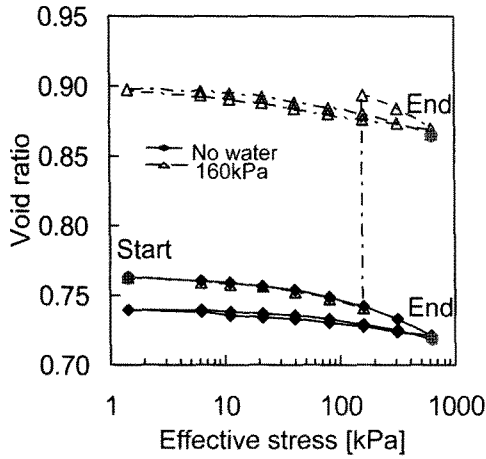


그림 4. 수직응력의 변화에 따른 소금 부피비와 수직 변형률 관계

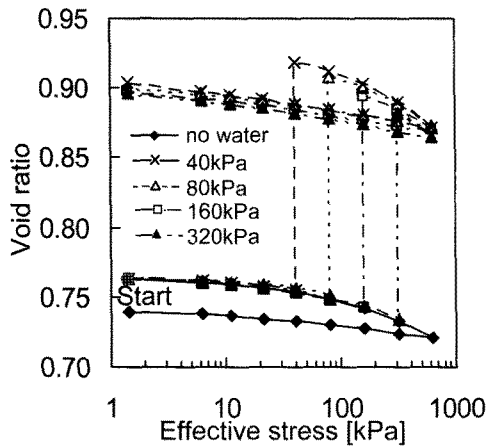
가 전체적으로 감소되는 것을 나타낸다.

3.2 간극비

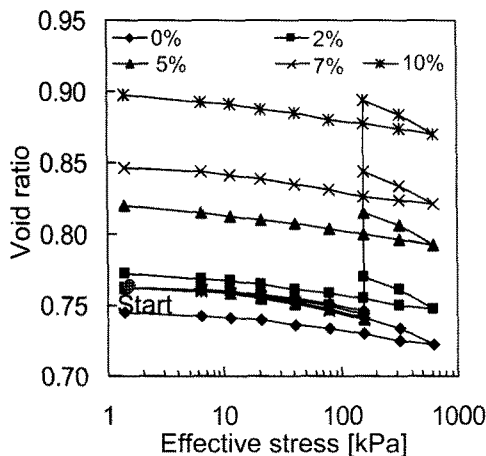
혼합재의 소실에 따른 간극비와 수직응력의 관계는 다



(a) 10%의 소금 부피비에서 재하-제하-재재하에 따른 거동



(b) 10%의 소금 부피비에서 수직응력의 변화($\sigma_v=40, 80, 160, 320$ kPa)에 따른 거동



(c) 160kPa의 수직응력 하에서 소금 부피비의 변화(%salt=0, 2, 5, 7, 10%)에 따른 거동

그림 5. 수직응력에 따른 간극비의 변화

양한 구속 조건에서 측정된 수직 변형을 간극비로 환산하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 수직하중 160kPa에서 포화를 시킨 시료와 불포화된 시료의 하중에 따른 간극비의 변화를 나타내며, 입자의 용해 발생 시 시료의 간극비가 급격하게 증가하는 것을 보여준다. 그림 5(b)는 소금의 부피비를 10%로 고정하고 다양한 하중($\sigma_v = 40, 80, 160, 320$ kPa)에 따라 지반의 소실 발생 시 혼합재의 간극비를 나타내며, 낮은 응력하에서 용해된 시료가 더 큰 간극비의 변화를 보여준다. 다양한 소금의 부피비로 조성된 혼합재의 용해 발생 시 측정된 간극비의 변화는 그림 5(c)에 나타내었다. 그림 3에서와 같이 시료 용해 후 변형률이 급격하게 증가하기 때문에 그림 5에서와 같이 간극비 또한 시료 용해 후 급격히 증가한다. 소금의 부피비가 증가할수록 간극비도 증가하였으며, 그림 6과 같이 소금의 부피비는 지반의 소실 후 간극비와 비례하는 것으로 나타났다.

3.3 전단파 속도

전단파는 다양한 소금의 부피비로 조성된 혼합재를 이용하여 160kPa의 구속압 상태에서 포화된 시료와 소금의 부피비가 0%로 조성된 불포화 시료에서 측정되었으며, 변화 양상은 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서와 같이 전단파의 초동시간과 전단파의 공진 주파수는 용해가 발생하기 전단계에서 수직응력이 증가됨에 따라 증가한다. 용해 후 하중에 따른 공진 주파수는 용해가 발생되지 않은 건조 시료의 공진 주파수보다 상대적으로 적게 나타났다. 즉, 지반재료의 소실에 따라 공진주파수는 높은 값에서 낮은 값으로, 그리고 다시 낮은 값에서 높은 값으로

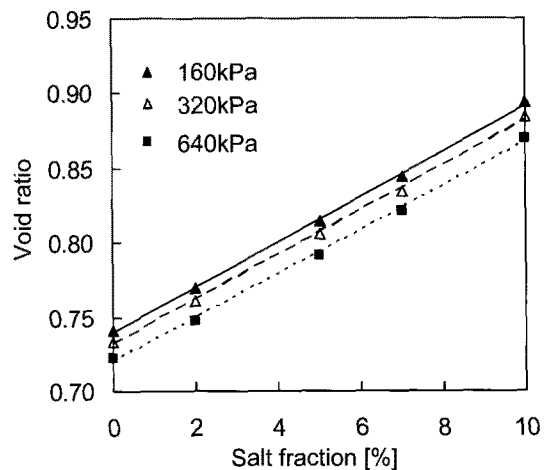
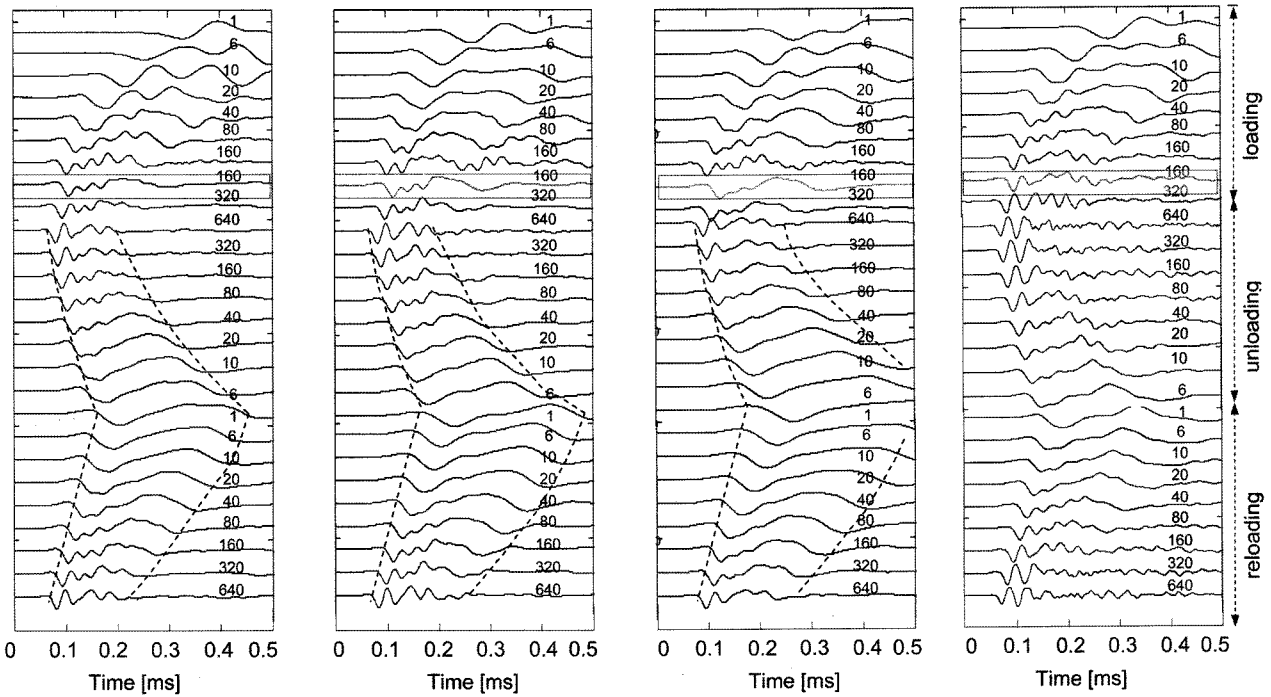


그림 6. 수직 응력에 따른 소금 부피비와 간극비의 관계



(a) 수직응력 160kPa에서 포화시킨 소금 부피비 0%인 혼합재 (b) 수직응력 160kPa에서 포화시킨 소금 부피비 5%인 혼합재 (c) 수직응력 160kPa에서 포화시킨 소금 부피비 10%인 혼합재 (d) 불포화된 소금 부피비 0%인 혼합재

그림 7. 동일한 구속응력하에서 소금 부피비의 변화에 따른 전단파의 변화 양상

로 변화하였다. 이는 입자가 용해되는 동안에 입자의 재배열을 의미하므로 용해 완료 후 다음 하중 단계에서의 공진 주파수는 혼합재와 거의 동일하게 나타났다. 소금 부피비가 증가함에 따라 용해 후 그림 7(a)~(c)에서와 같이 전단파의 공진 주파수는 감소한다. 전단파 속도는 초동 시간과 벤더 엘리먼트의 끝단 거리를 이용하여 식 (1)과 같이 산정하였다. 끝단 거리는 압밀셀의 상·하부 캡에 설치된 벤더 엘리먼트 간의 거리로 정의되며, 시료의 용해로 인하여 시료에서 침하가 발생하며 이로 인하여 벤더 엘리먼트간의 거리도 감소한다. 즉, 전단파의 이동거리가 감소하며 감소값은 그림 2와 같이 압밀셀의 상단에 설치된 다이얼게이지의 변화량에 해당한다. 계산된 전단파 속도는 그림 8과 같으며, 지반의 소실 현상이 일어나는 동안 전단파 속도가 급격하게 감소하는 것을 보여준다. 그림 8(a)는 소금의 부피비가 10%인 혼합재에서 소실 현상 발생 시 전단파 속도는 감소하고 경향성도 일치하는 것을 보여주며, 그림 8(b)는 전단파 속도가 소금의 부피비에 따라 감소함을 보여준다. 이에 따른 감소비는 그림 8(c)와 같이 소금부피비와 선형관계로 나타났다.

3.4 미소변형의 전단탄성계수

미소변형 전단탄성계수 즉 최대전단탄성계수(G_{max})

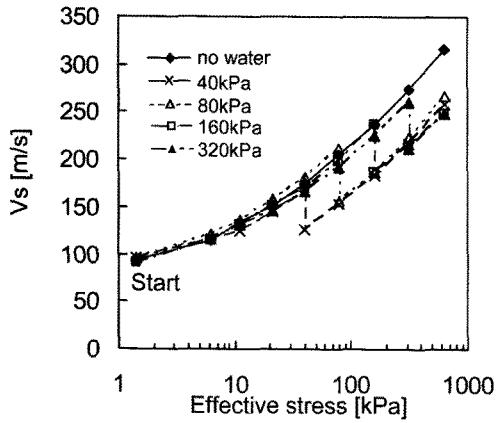
는 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (2)$$

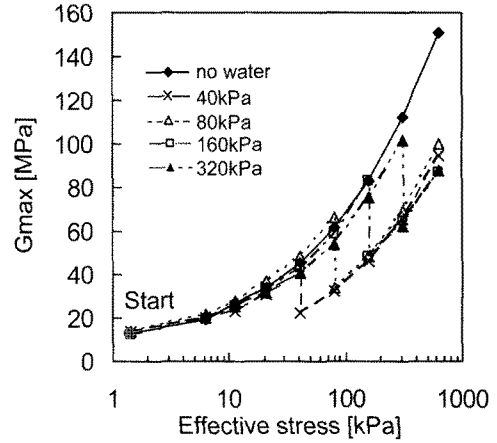
여기서, ρ 는 밀도를 나타내며 V_s 는 전단파 속도이다. 계산된 최대전단탄성계수와 유효응력의 관계는 그림 9와 같으며, 이는 지반재료의 소실이 발생한 시점에서 시료가 상대적으로 느슨해져 시료의 강성이 감소함을 보여준다. 그림 9(a), (b)는 전단파 속도 결과와 동일하게 용해 발생 시 급격하게 최대전단탄성계수의 값이 감소하는 것을 보여주며, 그 변화의 양상은 그림 9(c)와 같이 소금부피비와 선형관계가 있는 것으로 나타났다.

3.5 지반소실상태 모니터링

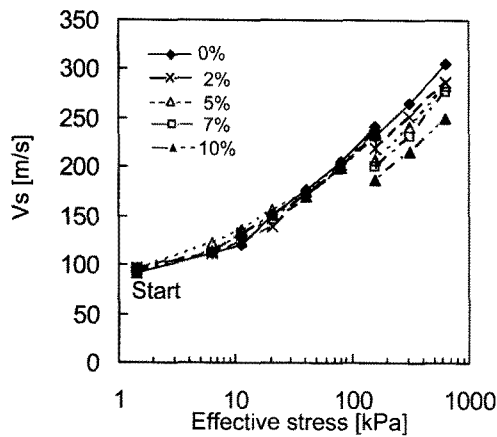
지반의 소실에 따른 국부적인 간극의 증가는 시료 내 투수성과 전단 저항에 큰 영향을 주는 요소이다. 전체적인 간극비의 값은 미리 결정된 무게를 이용하여 쉽게 계산되나, 용해에 의해 발생하는 국부 간극비의 변화 예측은 상당히 어렵다. 하지만, 전단파 속도는 대상 시료의 미소 변형 구간의 거동 특성을 평가할 수 있으므로(Lee and Santamarina 2007), 본 연구에서는 지반 소실에 따른 특성을 효율적으로 산정하기 위해 수직 변형과 전단파를 계속 모니터링하였다. 소금 부피비가 10%로 조성된 시료에서



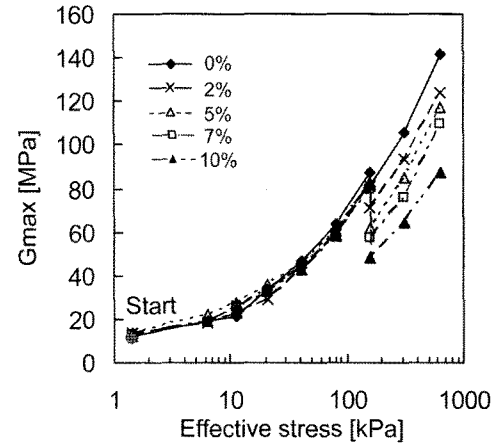
(a) 10%의 소금 부피비에서 수직응력의 변화($\sigma_v=40, 80, 160, 320$ kPa)에 따른 거동



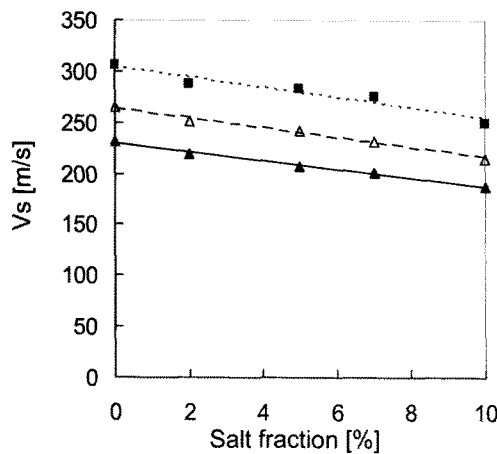
(a) 10%의 소금 부피비에서 수직응력의 변화($\sigma_v=40, 80, 160, 320$ kPa)에 따른 거동



(b) 160kPa의 수직응력 하에서 소금 부피비의 변화(%salt=0, 2, 5, 7, 10%)에 따른 거동

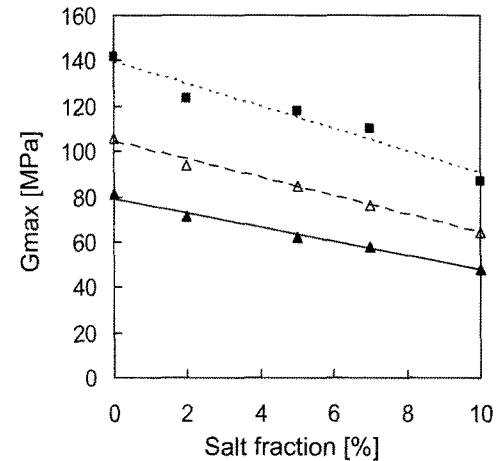


(b) 160kPa의 수직응력 하에서 소금 부피비의 변화(%salt=0, 2, 5, 7, 10%)에 따른 거동



(c) 소금부피비에 따른 전단파 속도 변화

그림 8. 유효응력의 변화에 따른 전단파 속도 변화



(c) 소금부피비에 따른 전단파 최대전단탄성계수 변화

그림 9. 유효응력에 따른 최대전단탄성계수 변화

다양한 수직 하중($\sigma_v = 80, 160, 320$ kPa)에 따라 측정된 수직변형과 전단파 속도는 그림 10과 같으며, 이를 통해 지반의 소실 거동은 3단계로 구성되는 것으로 나타났다.

첫번째 단계는 포화 직후 약 0~0.2분 사이에 발생되며

용해에 의해 수직 변형의 증가와 전단파 속도의 급격한 감소가 발생한다. 전단파 속도가 상대적으로 급격하게 감소하는 이유는 전단파 속도가 시료내 국부적인 변화를 효율적으로 반영하였기 때문으로 판단된다. 두번째 단계는 약

0.2~10분 사이에 발생되며 수직 변형률의 변화가 감소하며 전단파 속도는 최소값을 나타낸다. 용해 발생 시 수직 응력과 전단파 속도의 변화는 시료 내 입자의 용해와 수직 응력간의 상호작용에 인한 것이며, 시료가 포화되면서 입자들이 용해되어 부피가 감소해 상대적으로 변화 폭이 줄어드는 것으로 판단된다. 따라서 용해 효과는 시간에 따라 감소하고, 하중효과는 입자의 재배열 후 용해에 대한 범위를 벗어나 더 이상 영향을 받지 않게 된다. 이는 약 8분 경과 후 모래 입자의 재배열에 따라 시료의 강성이 증가되어 전단파 속도가 증가하는 양상으로 그 결과가 나타난다. 마지막 단계는 10분 이후에 나타내며, 수직 변형률과 전단파 속도가 거의 변화 없이 일정한 값으로 수렴하게 되며, 수직 변형률과 전단파 속도는 수직 응력에 의해 결정된다.

4. 분석 및 고찰

입자로 구성된 재료에서 전단파 속도는 식 (3)과 같이

유효 응력의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_p + \sigma'_m}{2kPa} \right)^\beta = AF(e) \left(\frac{(1+K_o)\sigma'_p}{2kPa} \right)^\beta \quad (3)$$

여기서, σ'_p 과 σ'_m 은 각각 파와 입자방향의 유효응력으로 본 연구에서 σ'_p 과 σ'_m 은 수직과 수평방향 응력을 의미하며, 정지토압계수(K_o)를 이용하여 표현할 수 있다. α 계수와 β 계수는 실험적으로 결정되어지며 α 계수는 패킹 형태와 미네랄의 특성, 접촉 거동 및 입자 구조 변화를 나타낸다(Santamarina et al. 2001). β 계수는 흙입자 재료의 접촉 거동과 관련되며 일반적으로 이상적인 물질일 때 $\beta=0$, 부드럽고 둥근 입자는 $\beta \approx 0.16 \sim 0.2$, 조밀한 모래는 $\beta \approx 0.25$, 모나고 느슨한 모래는 $\beta \approx 0.3$, 그리고 과압밀된 점토나 시멘트의 경우 $\beta \leq 0.15$ 의 값을 가진다. A계수 역시 실험으로 결정되며, F(e)는 간극비의 함수로 식 (4)와 같이 표현된다(Hardin and Drnevich 1972).

$$F(e) = \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \quad (4)$$

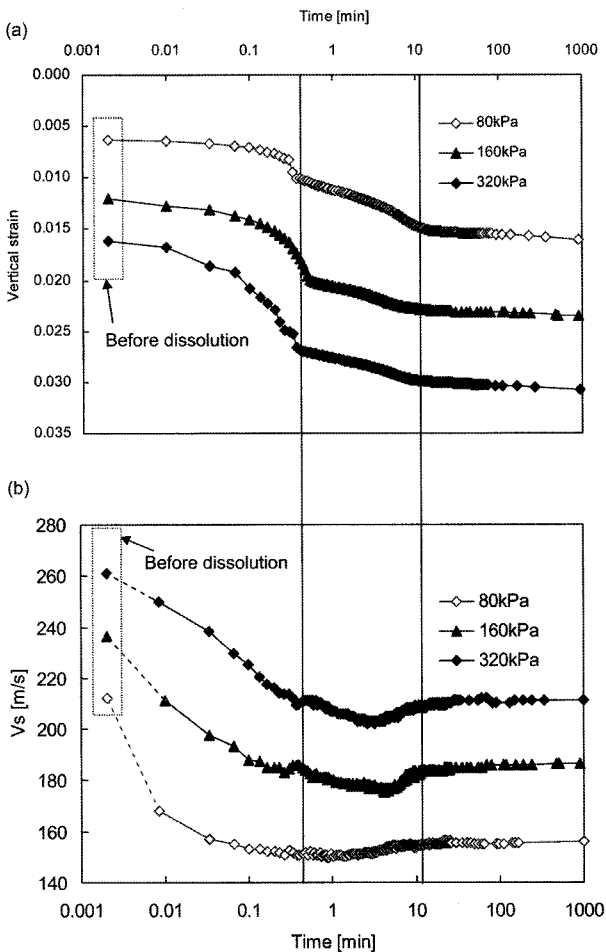


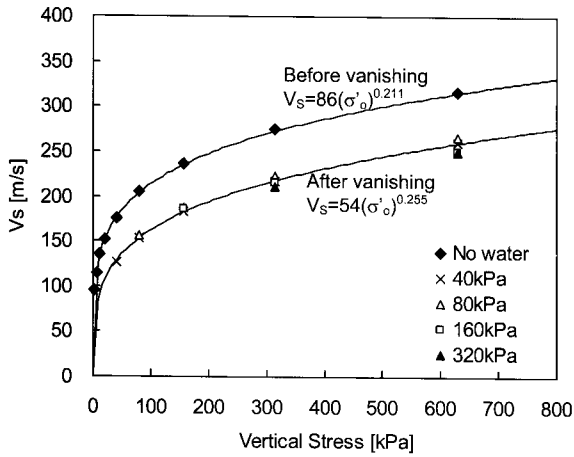
그림 10. 10%의 소금 부피비에서 시간경과에 따른 지반소실 혼합재의 용해과정: (a) 수직 변형률 변화; (b) 시간에 따른 전단파의 속도변화

그림 11은 동일한 소금의 부피비로 조성된 시료를 이용하여 하중에 따른 전단파 속도의 변화를 나타낸다. 지반의 소실 과정 이후 α 계수는 86에서 54로 감소하였으며 β 계수는 0.211에서 0.255로 증가하였다. 이와 같이 α 계수의 감소와 β 계수의 증가는 앞서 언급했듯이 지반의 소실에 의해 시료가 느슨해진 것을 나타낸다. 모래와 운모 혼합재에서 α 와 β 계수 관계는 그림 11(b)와 같다. 그림 11(b)는 운모의 함유량이 높아짐에 따라 시료는 점차 느슨해지는 것과 유사하게 모래와 소금의 혼합재가 지반의 소실과정 동안 점차 느슨해지는 과정을 보여준다.

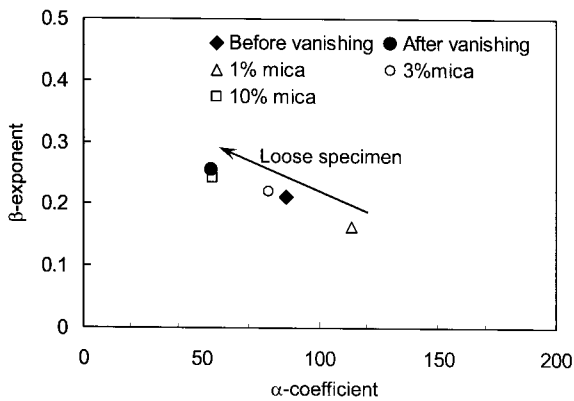
전단파 속도는 수직응력이 40kPa에서 포화되었을 때 약 26% 감소하였으며, 320kPa 구간에서는 19%의 감소량을 보였다. 간극비의 경우는 포화에 따라 수직하중에 관계없이 대체적으로 21% 증가하였으며, F(e)는 22%에서 20%로 감소되는 것으로 나타났다. 간극비 증가에 따른 전단파 속도의 변화는 거의 일정하지만 α 계수는 86에서 54로 감소하였다. 그리고 A계수가 20~22%정도 감소하는 것은 지반의 소실 이후 입자간의 접촉면이 감소하였음을 의미한다.

5. 결론

본 연구는 지반의 소실 발생 시 거동 특성을 평가하고자



(a) 수직응력에 따른 전단파 속도 변화



(b) α계수와 β계수의 관계(운모 측정결과는 Lee et al. 2007-a를 참조하였음)

그림 11. 전단파 속도 계수

인위적으로 모래와 소금을 혼합하여 실험을 수행하였다. 벤더 엘리먼트가 장착된 압밀셀을 이용하여 침하량 및 전단파 속도를 측정하였다. 소실 현상은 조성된 혼합재에 다양한 구속응력 하에서 포화를 실시하여 발생시켰다. 재료소실 이후 수직 변형과 간극비는 증가하였고, 전단파 속도와 미소변형 구간의 최대전단탄성계수는 감소하였다. 소금의 부피비가 고정된 경우는 시료 용해 시점의 수직응력이 증가함에 따라 수직 변형은 증가하였고, 간극비는 감소하였다. 그러나 전단파 속도와 미소변형률 구간의 최대 전단탄성계수는 비슷한 양상을 보였다. 또한 수직응력, 간극비, 전단파 속도 및 미소변형률 구간의 최대 전단탄성계수의 변화는 모두 시료 내 소금의 부피비에 비례하는 것으로 나타났다. 지반의 소실 현상이 발생하는 과정은 세 단계로 구분할 수 있으며 첫번째 단계는 수직변형이 급격하게 증가하고 전단파 속도가 급격하게 감소하는 구간, 두번째 단계는 수직변형의 변화가 감소하고 전단파 속도가 가장 작은 값을 나타내는 영역, 그리고 마지막 단계는 수직변형과 전단파 속도가 일정하게 수렴하는 구간이다. 전단파 속도의 감소와 간극비의

증가는 지반의 소실 현상의 발생 시 입자 접촉면의 감소효과로 인해 나타나는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 ‘2단계 BK21사업’의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Azam, S. (2000), "Collapse and compressibility behaviour of arid calcareous soil formations", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer Berlin, 59(3), pp.211-217.
2. Bell, F. G. (2004), *Engineering Geology - 2nd edition*. Elsevier. Great Britain.
3. Blyth, F.G.H. and de Freitas, M. H. (1984), *A Geology for Engineers*. Elsevier Butterworth. Oxford.
4. Craft, D., Cain, C. and Sullivan, C. (2006), "Seepage Geochemistry and Mineral Dissolution at Clark Canyon Dam, Pick-Sloan Missouri Basin Project, East Bench Unit, Montana," *Technical Memorandum 86-6829010*, U.S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, p.48.
5. Craft, D. (2005), "Seepage Chemistry Manual", *Report DSO-05-03, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Technology Development Program*, Denver, Colorado, p.76.
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*, ASCE, 128(12), pp.1018-1025.
7. Fam, M. A. and Santamarina, J. C. (1995), "Study of geoprocesses with complementary wave measurements in an oedometer", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM. 18(3), 307-314.
8. Hillel, D. (2004), "Encyclopedia of Soils in the Environment", *Academic Press*, Volume 1.
9. Hardin, B. O., and Drnevich, V. P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: Measurements and parameter effects", *Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 98 (6), pp.603-624.
10. Jeremic, M. J. (1994), *Rock Mechanics in Salt Mining*. Balkema, Rotterdam.
11. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), "Bender elements: performance and signal interpretation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(9), pp.1063-1070.
12. Lee, J.S., and Santamarina, J.C. (2007), "Seismic monitoring short-duration events - Liquefaction in lg models", *Canadian Geotechnical Journal*, 44(6), pp.659-672.
13. Lee, J.S., Guimaraes, M., and Santamarina, J. C. (2007-a), "Micaceous sand: Fabric, stiffness, and strength", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(9), pp.1136-1143.
14. Lee, J.S., Dodds, J., and Santamarina, J.C. (2007-b), "Behavior of rigid-soft particle mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 19(2), pp.179-184.
15. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, JohnWiley and Sons, New York.
16. Yun, T.S. and Santamarina, J.C. (2005), "Decementation, softening and collapse: Changes in small-strain shear stiffness in Ko-loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(3), pp.350-358.

(접수일자 2008. 10. 16, 심사완료일 2008. 12. 5)