

변형률에 따른 모래-고무 혼합재의 거동 특성: 실험적 관찰

Characteristics of Sand-Rubber Mixtures under Different Strain Levels: Experimental Observation

이 창 호¹ Lee, Changho
변 용 훈² Byun, Yong-Hoon
이 종 섭³ Lee, Jong-Sub

Abstract

Mixtures of sand and rubber particles ($D_{\text{sand}}/D_{\text{rubber}} = 1$) are investigated to explore their characteristics under different strain level. Mixtures are prepared with different volumetric sand fractions ($sf = V_{\text{sand}}/V_{\text{total}}$). Experimental data are gathered from a resonant column, an instrumented oedometer, and a direct shear tests. Results show that sand and rubber differently control the behavior of the whole mixture with strain level. Non-linear degradation of small strain stiffness is observed for the mixtures with $sf \geq 0.4$, while the mixtures with low sand fraction ($sf \leq 0.2$) show significantly high elastic threshold strain. Vertical stress-deformation increases dramatically when the rubber particle works as a member of force chain. The strength of the mixtures increases as the content of rubber particle decreases, and contractive behavior is observed in the mixtures with $sf \leq 0.8$. Rubber particle plays different roles with strain level in the mixture: it increases a coordination number and controls a plasticity of the mixture in small strain; it prevents a buckling of force chain in intermediate strain; it leads a contractive behavior in large strain.

요 지

다양한 모래부피비($sf = V_{\text{sand}}/V_{\text{total}}$)를 가지는 시료를 조성하여 변형률 크기에 따른 모래-고무 혼합재($D_{\text{sand}}/D_{\text{rubber}} = 1$)의 거동을 분석하였다. 공진주시험, 압밀시험, 그리고 직접전단시험을 실시하였다. 변형률 크기에 따라 모래와 고무는 혼합재 전체 거동을 서로 다르게 제어한다. $sf \geq 0.4$ 의 혼합재는 비선형 전단강성의 감소가 관찰되는 반면, $sf \leq 0.2$ 의 낮은 모래부피비를 가지는 혼합재는 상당히 높은 탄성한계변형률을 보인다. 고무 입자가 force chain의 역할을 수행할 때 수직변형은 급격한 증가를 보인다. 혼합재 내의 고무부피비가 감소함에 따라 혼합재의 강도는 증가하는 경향을 보이며 $sf \leq 0.8$ 의 혼합재는 전단변형에 따라 부피 수축 거동을 보인다. 고무 입자는 변형률 크기에 따라 혼합재 내에서 서로 다른 역할을 수행한다: 미소변형률 영역에서는 혼합재 내의 접촉수 증가 및 소성의 제어; 중간변형률 영역에서는 force chain의 좌굴 방지; 그리고 대변형률 영역에서는 혼합재의 부피수축 거동을 이끈다.

Keywords : Compressibility, Sand-rubber mixture, Shear modulus, Strain level, Strength, Transition

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수 (Member, Research Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (PhD Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

전세계적으로 삶의 질에 대한 열망이 증가함에 따라 대규모 토목 공사의 수는 점차 증가하고 있는 반면에 이러한 건설 활동에 사용할 수 있는 자연 재료의 양은 한정되어 있다. 게다가 시멘트 kilns, 원재료의 파쇄, 그리고 모래 준설 등 건설 재료의 처리 과정은 상당한 양의 이산화탄소를 대기 중으로 방출한다. 따라서, 다양한 물질 및 폐기물의 재활용과 재사용이 전세계적인 이슈가 되고 있다.

폐기물은 크게 고형폐기물, 유해 폐기물, 방사능 폐기물, 그리고 생/의학적 폐기물로 구분된다. 고형 폐기물은 에너지 관련 폐기물(fly and bottom ash), 준설 폐기물, 그리고 페타이어 등 일반적으로 건설 재료로 재사용되는 재료들을 포함하고 있다: 매년 미국에서만 fly and bottom ash를 포함한 석탄 연소 폐기물이 약 135 백만 톤 생산된다(ACAA 2008). 시멘트 생산 재료 (Pan et al. 2008) 및 건설 재료의 혼합물(Gabr and Bowders 2000; Pan et al. 2008; Kim and Prezzi 2008; Singh et al. 2008) 등으로의 fly ash의 이용은 fly ash 폐기물 양의 감소뿐 아니라 2008년 12월에 미국 테네시에서 발생한 Kingston Fossil Plant 사고와 같은 환경적 문제의 발생을 막을 수 있다. Bottom ash 역시 다양한 토목 공사에 굵은 골재로 재사용 되고 있다(Kumar and Stewart 2003); 준설토 역시 매년 미국에서만 약 200-300 백만 cubic yard가 발생하지만 약 30%정도가 다양한 목적으로 재사용 되고 있다(EPA 2007). 그러나 이러한 준설토의 경량뒤채움재료의 활용을 목적으로한 소수의 연구만이 진행된 실정이다(Tsuchida et al. 1996; Yoon et al. 2004; Kim et al. 2008&2010); 페타이어의 경우 매년 미국에서만 약 500 만개 이상이 버려진다(Rubber Manufacturers Association 2006). 파쇄 타이어는 혼합재의 동하중에 대한 감쇠를 증가시키고, 매립지 내의 유기물 협착 능력 증가, 그리고 성토재의 재하하중을 감소 시켜 혼합재의 경량토로의 활용이 가능하게 한다. 페타이어는 페타이어 자체 및 흙과 혼합하여 고속도로건설, 교대, 매립지, 경량 뒤채움재, 사면 안정, 그리고 도로의 subgrade insulation 등 다양한 토목 공사에 활용되고 있다(Ahmed and Lovell 1993; Humphrey and Eaton 1995; Poh and Broms 1995; Bosscher et al. 1997; Tweedie et al. 1998; Garga and O'Shaughnessy 2000; Rowe and Mclsaac 2005; Aydilek et al. 2006). 이러한 페타이어의 활용은 대형 고형 폐기물의 재활용이라는 측면에서 환경적 문제의 해결에 도

움이 되며 새로운 건설재료의 활용이라는 측면에서 경제적 문제 해결에 큰 도움이 될 수 있다. 이러한 새로운 건설 재료들은 시공 중 또는 운용 중에 다양한 변형률 수준을 경험하게 되고, 이러한 재료들의 거동은 변형률 크기에 따라 제어된다.

본 연구에서는 서로 다른 변형률 크기에서 모래-고무 혼합재의 거동 특성에 대하여 연구하였다. 모래부피비에 따른 거동을 확인하기 위하여 다양한 모래부피비를 가지는 시료를 조성하였다($sf = V_{sand}/V_{total}$): 0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0. 변형률 크기에 따른 거동을 확인하기 위하여 공진주시험, 압밀 시험, 그리고 직접 전단 시험을 실시하였다. 입상 매질의 변형률 크기에 따른 거동을 간략하게 분석하였으며, 실험 재료, 시료 준비, 실험 순서 등을 정리하였다. 그 후 변형률에 따른 전단탄성, 압축성, 그리고 강도 특성을 정리하고 분석하였다.

2. 변형률 수준에 따른 입상물질의 거동

흙에 작용하는 변형률 수준은 미소변형률($10^{-3}\%$ 이하)부터 대변형률(20% 이상)까지로 큰 범위를 지닌다: 동적 시험수준은 $10^{-2}\%$ 이하의 변형률 수준을 보이며, 일반적인 압밀 시험의 경우 $10^{-1}\%$ ~ 10% 수준을 만들고, 삼축시험, 직접전단시험, 링전단시험을 포함한 모든 강도시험 및 관입시험의 경우 1% ~ 20% 정도의 대변형 특성을 가진다. 그림 1과 같이 흙은 시공 중 또는 작용 하중 하에서 변형률 수준에 따라 서로 다른 특성을 보인다(Atkinson 2000).

변형률에 따른 입상 매질의 거동은 서로 다른 내부 변형 매커니즘을 반영한다(Santamarina et al. 2001). 미소변형 거동은 입자간의 접촉, 입자 패킹 분포, 물질의 탄성 강성, 그리고 응력 상태로 특징되는 constant fabric 상태에서의 거동이다. Hertz 및 Mindlin contact 등 몇 가지 접촉 거동들이 정규 또는 불규칙한 패킹에서 미소 변형 거동을 해석하기 위해 사용된다(Hertz 1882; Mindlin 1949). 미소변형상태에서는 각 입자들이 상대적으로 움직일수 없기 때문에 변형은 입자 수준에서 제어된다. 미소변형 영역에서는 최대 강성 및 선형 탄성 거동이 관찰된다. 선형 탄성 한계 변형률 γ_u 은 입자 구조(fabric)의 변화가 시작되는 비선형 탄성구간과 일정한 입자 구조를 가지는 탄성변형 구간을 구별해 준다.

비선형 거동은 작용하는 응력 또는 변형률이 커짐에 따라 시작된다. 비록 미소한 입자 구조의 변화가 발생하더라도, 비선형 탄성 구간에서 재하, 제하 및 재재하의

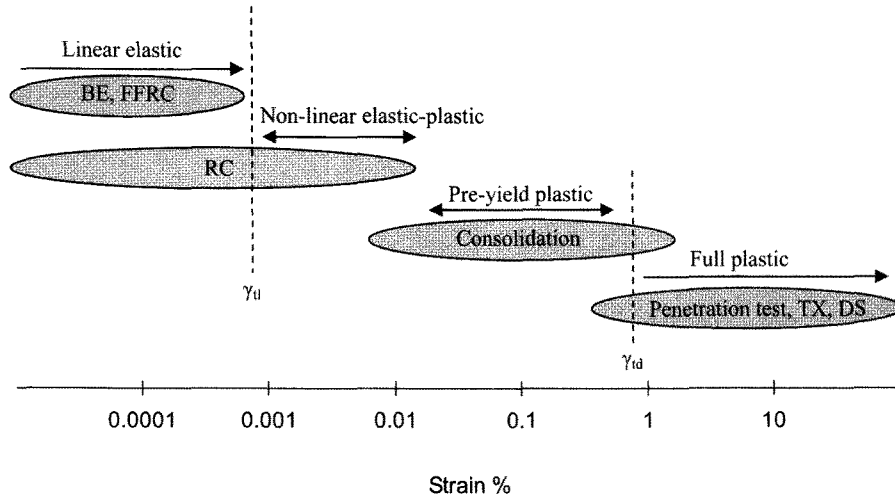
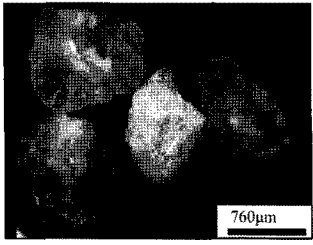
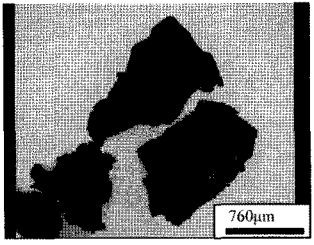


그림 1. 일반적 시험에 따른 흙 거동 특성(Atkinson 2000).

표기: BE: a bender element; FFRC: a free-free resonant column test; RC: a resonant column test; TX: a triaxial test, DS: a direct shear test, γ_{li} : the linear elastic threshold strain; γ_{td} : the degradation threshold strain.

표 1. 모래와 고무 입자의 물리적 특성

Index properties	Sand	Rubber	Device/Technique
Specific gravity G_s	2.62	1.15–1.16	Pycnomter (ASTM D854, C188)
Median particle size D_{50} [mm]	0.73	0.73	Sieve (ASTM D421)
Coefficient of Uniformity C_u	1.11	1.09	
Coefficient of Curvature C_{cur}	1.04	1.05	
Maximum void ratio e_{max}	0.87	–	ASTM D4254
Minimum void ratio e_{min}	0.6	–	
Sphericity S	~ 0.9	~ 0.7	Video microscope (SV-35), SOMETECH (Krumbein and Sloss, 1963; Santamarina et al., 2001)
Roundness R	~ 0.7–0.9	~ 0.3	
Photograph			

반복 하중에 따른 변형은 완전히 회복 가능하다(Mitchell and Soga 2005). pre-*yield plastic* 영역에서 응력 또는 변형률이 증가함에 따라 비회복성의 거동이 관찰된다. 제하 이후 영구적 부피 변화 또는 잔류 과잉간극 수압은 소성 변형의 시초를 나타낸다. 그림 1의 감소한계변형률 γ_{td} 는 중간변형률 영역과 대변형률 영역의 경계를 나타낸다. 감소한계변형률은 탄성한계변형률 γ_{li} 보다 10

배에서 100배정도 큰 것으로 알려져 있다(Vucetic 1994; Díaz-Rodríguez and Santamarina 2001).

대변형 영역에서 큰 입자 구조 파괴는 회복 불가능한 소성 전단 변형을 일으키며 지속적인 변형의 증가는 파괴를 발생시킨다. 대변형 영역에서 변형의 발생은 입자 구조의 큰 변화와 연관이 있다. 부피 수축, 팽창, 그리고 간극수압의 변화는 서로 다른 배수 상태에서 입자 구조

와 응력 상태의 상호 작용에 의해 좌우된다. 대변형 영역에서는 변형률의 증가에 따라 강성의 감소 및 큰 부피 변화가 관찰된다. 마찰적 손실이 크며, shear band와 같은 응력 또는 변형률 집중 현상이 발생한다.

3. 시험 개요

3.1 시험 재료 및 시료 준비

단단한 모래 입자와 연약한 고무 입자를 혼합하여 모래-고무 혼합재를 준비하였다. 모래 입자의 경우 단단하고 모나며 균등한 입자 분포를 가지는 주문진 20/30 모래 ($e_{min}=0.60$, $e_{max}=0.87$, $D_{50}=0.73mm$)를 이용하였다. 균등한 크기의 모래 입자를 얻기 위하여 시험 전 20/30번 체로 수세한 후 건조로를 이용하여 건조하였다. 불규칙한 모양을 가지는 고무 입자 역시 균등한 크기($D_{50}=0.73mm$)의 입자를 얻기 위해 시험 전 체가름을 실시하였다. 모래 입자와 고무 입자의 사진과 기본적인 물리적 특성은 표 1과 같다.

모래 입자 부피비에 따른 거동 양상을 파악하기 위하여 다양한 모래 부피비를 가지는 시료를 조성하였다: $sf=V_{sand}/V_{total}$: 0(rubber), 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0(sand). 2개의 입자로 이루어진 혼합재에서는 재료 분리가 발생할 가능성이 높으며, 이러한 재료 분리는 각 입자의 모양, 크기, 그리고 밀도 등 몇가지 효과에 의해 일어난다. 고무 입자와 모래 입자의 크기 비가 매우 클 경우($D_{rubber}/D_{sand} \gg 100$), 고무의 부피비가 큰 혼합재에서 재료 분리는 반드시 고려되어야 한다(Edil and Bosscher 1994). 본 연구에서는 시료의 조성 과정 중 입자 분리를 최소화하기 위하여 모래 입자와 고무 입자의 크기비(D_{sand}/D_{rubber})를 ≈ 1 로 하였다. 정해진 양의 모래 입자와 고무 입자를 용기에 넣고 약 5분 간 잘 혼합한 후, 재료 분리에 유의하면서 각 시험별 시료를 조성하였다. 모든 시료는 5단으로 조성되었으며, 각 단은 동일한 다짐에너지로 약하게 다짐을 실시하였다. 시료 조성 후 각 시료의 초기 상태 파악을 위하여 시료 높이를 측정하였다.

3.2 시험 장치 및 과정

변형률 크기에 따른 모래-고무 혼합재의 거동 특성을 분석하기 위하여 공진주시험(미소변형), 압밀시험(중간변형), 그리고 직접 전단시험(대변형)을 실시하였다. 모든 시험은 일반적인 시험 규정을 따라 실시하였다.

공진주시험용 시료는 초기 직경 50mm, 높이 100mm로 성형하였다. 순수한 고무입자로 이루어진 $sf=0$ 인 시료는 고무의 낮은 강성 때문에 시료를 조성할 수 없었다. 공진주시험은 평균 유효 구속응력 20kPa, 40kPa, 80kPa의 단계로 높여가며, 시료의 상단부를 자유 조건으로 유지하면서 비틀림하중을 재하하는 방식으로 시험하였다.

전단파 트랜서듀서가 설치된 직경 74mm의 황동재질의 압밀셀을 이용하여 모래-고무 혼합재의 중간변형 응력-변형의 관계를 측정하였다. 전단파 생성 및 측정을 위한 벤더 엘리먼트는 상부 캡과 하부 플레이트에 설치하였다. 입력 신호로는 $10V_{pp}$ (peak to peak)의 square 신호를 이용하였다. 하중단계는 각 단계별로 2배씩 증가하였으며, 모든 하중 단계는 고무의 시간의존적 거동 특성을 고려하여 동일하게 30분씩 지속하였다. 변형 및 전단파 속도는 각 하중 단계 별로 다음 하중 재하 및 재하 직전에 측정하였다.

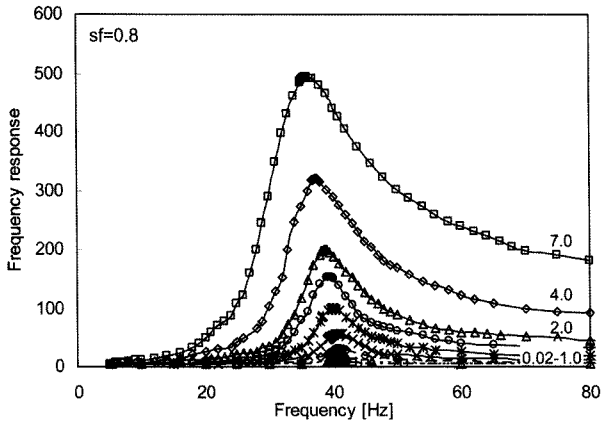
직접전단시험을 이용하여 모래-고무 혼합재의 대변형 특성을 분석하였다. 시험에 사용된 전단 상자의 직경은 60mm이며 초기 시료 높이는 30mm로 고정하였다. 모든 시험 실시 이전에 10kPa, 20kPa, 그리고 40kPa의 수직유효응력을 30분간 가한 후 전단 시험을 실시하였다. 시험 중 수평 및 수직 변위는 LVDT로 측정하였으며 1mm/min로 전단시험을 실시하였다.

4. 시험 결과

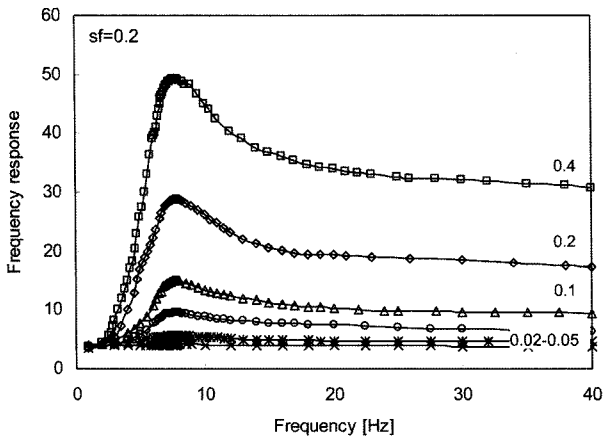
다양한 모래 부피비를 가지는 모래-고무 혼합재의 변형률 크기에 따른 거동 특성을 분석하였다. 시험한 모든 시료에 대하여 미소 변형 동적 특성, 중간 변형 응력-변형 관계, 그리고 대변형 강도 특성을 분석하였다.

4.1 미소 변형 동적 특성

그림 2는 구속응력 80kPa에서 얻은 모래부피비 0.2 및 0.8 시료의 주파수 응답곡선이다. 시험에 사용된 모든 시료에서 입력 신호의 크기가 증가함에 따라 측정 신호의 크기 역시 증가하였다. 혼합재 내에 고무 부피비가 증가함에 따라(sf 감소), 주파수 응답곡선은 점점 비대칭성을 보이며, 전단변형률이 증가함(입력 신호 크기의 증가)에 따라 주파수 응답곡선은 왼쪽으로 기울어지는 현상을 보였다. 모래부피비(sf) 0.8 시료의 경우, 저변형률 하에서는 좋은 좌우대칭관계를 보였으나, 변형률이 증가함에 따라 주파수 응답곡선의 대칭성을 상실하였으



(a) sf=0.8



(b) sf=0.2

그림 2. 구속응력 80kPa에서 주파수 응답곡선. 그림 내 숫자는 입력 신호의 크기(Voltage)

며, 고무 입자의 함유량이 높은 모래부피비(sf) 0.2 시료는 모든 변형률 영역에서 주파수 응답곡선의 비대칭성을 보였다. 재료의 감쇠비는 크게 무게(mass)에 비례하는 감쇠 및 감성(stiffness)에 비례하는 감쇠로 구성된다. 무게에 비례하는 감쇠의 경우 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며 강성에 비례하는 감쇠의 경우 주파수의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 낮은 모래부피비를 가지는 시료(sf=0.2)는 고무 재료 자체의 낮은 강성과 큰 감쇠의 특성에 의해 비선형적인 탄성 스프링의 특성을 보여 모든 변형률 영역에서 비대칭 주파수 응답곡선을 보인다. 반면에 높은 모래부피비를 가지는 시료(sf=0.8)의 경우 저변형률 영역에서는 모래의 선형적인 탄성 특성으로 인해 주파수 응답곡선의 대칭성이 보인다. 그러나, 고변형률에서는 모든 시료에서 주파수 응답곡선의 대칭성이 사라지게 된다.

공진주 시험을 통한 감쇠비의 결정은 자유진동감쇠법(free vibration decay method) 또는 하프-파워 대역폭

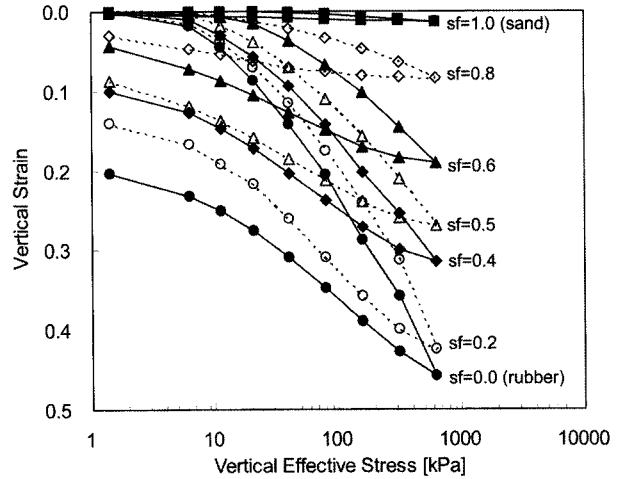


그림 3. K_0 상태에서의 하중-변형 거동

법(half-power bandwidth method)의 두 가지 방법을 사용한다. 그림 2와 같이 변형률에 따른 주파수 응답곡선의 비대칭성이 상당히 큰 모래-고무 혼합재의 경우 재료의 감쇠비 결정은 주파수 응답곡선의 좌우 대칭을 전제로 하는 하프-파워 대역폭법 보다는 자유진동감쇠법의 적용이 더 타당하다고 판단된다.

4.2 중간변형률 상태에서 압축성(K_0 상태)

시험한 모든 시료에 대하여 수직유�효응력의 변화에 따른 부피 변화를 그림 3에 나타내었다. 응력-변형의 관계는 모든 시료에서 유사한 관계를 보였다. 모래-고무 혼합재의 압축성은 모래부피비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 압축성은 $sf \geq 0.8$ 의 높은 모래부피비를 가지며 모래와 같이 낮은 압축성을 보이는 그룹, $sf \leq 0.2$ 의 낮은 모래부피비를 가지며 고무와 유사하게 큰 압축성을 보이는 그룹, 그리고 $0.4 \leq sf \leq 0.6$ 의 구속응력에 따라 유사 모래 및 유사 고무 거동을 보이는 전이그룹(낮은 구속응력에서는 유사 모래거동; 높은 구속응력에서는 유사 고무 거동)과 같이 3개의 그룹으로 구분지워진다. 또한 모든 모래-고무 혼합재는 제하 후 상당한 크기의 소성 변형을 보였다. Lee et al.(2007)와 Lee et al.(2010)의 연구에서도 유사한 결과를 보였다.

4.3 대변형 강도특성

입상 매질의 전단 강도 특성은 접촉점에서의 입자 미끄러짐 및 회전, 부피 변화에 대한 저항성, 그리고 전단 동안의 입자 재배열 등을 포함한 전단저항력에 의해 지

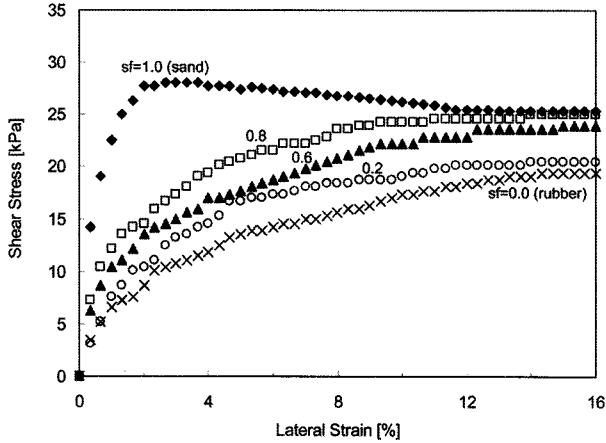


그림 4. 대변형 강도 특성

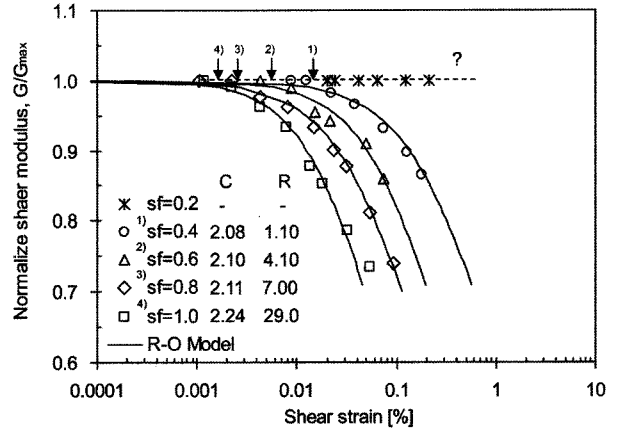


그림 5. 정규화 전단탄성계수 감소. 그림 내 화살표는 탄성한계변형률을 표시

배받는다. 입상 매질이 외력을 받으면, 일부의 입자들은 입자 접촉점에서 강한 force network를 형성하고 그 외의 입자들은 입자 접촉점에서 외력에 약한 cluster의 역할을 한다(Mitchell and Soga 2005).

모래-고무 혼합재의 전단 강도 특성을 직접전단시험을 통하여 평가하였다. 그림 4는 수직유효응력 40kPa에서의 모든 시료의 응력-변형률 관계를 보여준다. 모든 시료에서 응력-변형률의 비선형적 관계가 관찰되었다: 혼합재의 강성은 전단변형률이 증가함에 따라 감소한다. 높은 모래부피비를 가지는 시료의 경우, 모래입자가 입자 접촉점에서 전단에 저항하기 위한 강한 force network를 형성한다. 순수한 모래 시료(sf=1.0)는 첨두 강도와 dilative한 거동을 보였으나 $sf \leq 0.8$ 인 시료들은 모두 부피 수축에 따른 ductile한 거동을 보였다. 또한 응력-변형 곡선에서 첨두강도가 관찰되지 않았다. 삼축시험을 이용하여 얻은 모래-고무 혼합재의 응력-변형률 관계 역시 본 연구 결과와 유사한 결과를 보였다(Youwai and Bergado 2003; Lee et al. 2007).

5. 분석 및 토의

5.1 탄성한계변형률

전단강성 감소곡선은 구속압, 응력경로, 그리고 흙의 종류 및 구조 등 다양한 요소에 영향을 받는다. 전단변형률에 따라 실험에서 얻은 정규화된 전단강성 및 Ramberg-Osgood 모델(1943)을 그림 5에 나타내었다. Ramberg-Osgood 모델은 변형률 γ 에 따른 전단탄성계수 G 의 비선형성을 회귀분석하는 모델이다:

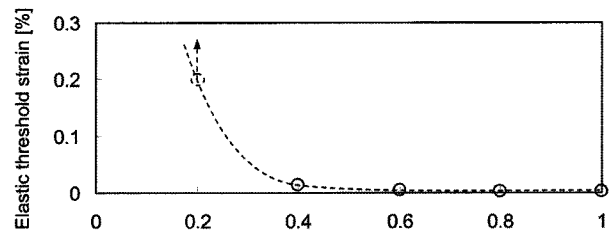


그림 6. 모래부피비에 따른 탄성한계변형률

$$\gamma = \left(\frac{G}{G_{max}} \right) \cdot \gamma + C \cdot \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^R \quad (1)$$

여기서 (G/G_{max}) 는 정규화된 전단탄성계수, 그리고 C 및 R 은 모델 상수이다. 모래부피비가 0.4 이상($sf \geq 0.4$)인 시료의 전단탄성계수는 전단변형에 따른 입자 구조의 변화로 인하여 전단변형률이 증가함에 따라 감소하며 모래부피비가 증가함에 따라 전단탄성계수 감소 곡선은 오른쪽으로 이동한다. 전단변형률의 증가에 따른 전단탄성계수의 감소는 탄성변형의 감소 및 소성 변형률의 증가 때문이다(Mitchell and Soga 2005). 그러나 모래부피비(sf) 0.2인 시료는 상당히 큰 전단변형률 영역 ($>10^{-1}\%$)까지 일정한 정규화 전단탄성계수를 보이는데 이는 고무 입자의 낮은 강성과 높은 탄성 때문이다.

그림 6은 모래부피비에 따른 탄성한계변형률을 보여준다. 탄성한계변형률은 $G=0.99G_{max}$ 일때의 변형률로 정의하였다(Santamarina et al. 2001). 모래부피비가 감소함에 따라 탄성한계변형률은 증가하는 경향을 보였으며 모래부피비(sf) 0.2 시료의 경우 탄성한계변형률의 상당한 증가를 보였다. 한계변형률은 구속응력 및 소성 지수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 알려져 있으며 (Vucetic and Dobry 1991; Vucetic 1994), 모래-고무 시

료의 경우 혼합재 내의 고무부피비가 증가함에 따라 전체 시료의 탄성영역이 증가하여 큰 탄성한계변형률을 가진다.

5.2 간극비에 따른 전단파 속도

K_0 상태에서 비고결화된 입상 매질의 전단파속도는 유효 응력의 함수로 표현 가능하다(Hardin and Richart 1963; Hardin and Drenevich 1972):

$$V_s = AF_e \left(\frac{\sigma'_v}{1kPa} \right)^\beta \quad (2)$$

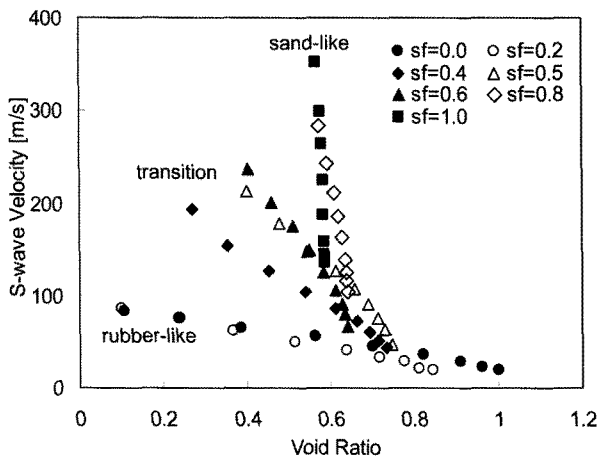
여기서, A 는 1kPa에서의 구속 응력에서 전단파속도, F_e 는 간극비 균질화 함수, 그리고 β 는 전단파 속도의 응력에 따른 민감도를 나타낸다. A 와 β 는 간극을 coordination

number 등 패킹 종류, 구조, 그리고 접촉 특성 등에 의해 실험적으로 결정된다(Santamarina et al. 2001). 그리고, F_e 는 입자 모양에 따른 간극비의 함수이다.

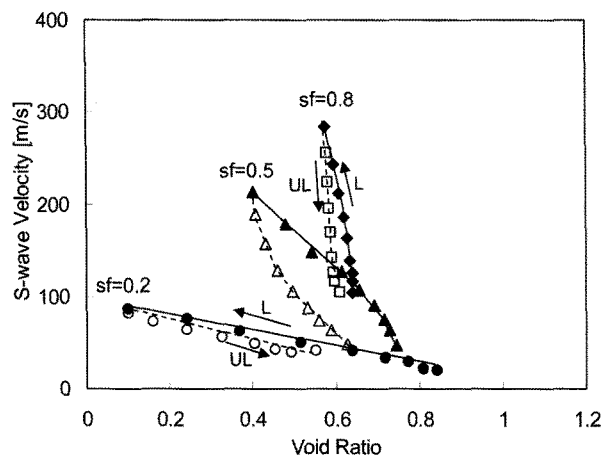
제하 시 간극비에 변화에 따른 전단파속도의 변화를 그림 7(a)에 나타내었다 간극비의 변화는 수직유효응력에 따른 수직변형에 의해 발생된다. 측정된 전단파 속도-간극비의 관계는 3개의 그룹으로 명확하게 구분된다(그림 3의 압축성과 일치).

고무-모래 혼합재의 전단파 속도-응력의 관계는 초기 입자배열에 영향을 받으며 모래 또는 유사 모래 거동을 보이는 모래-고무 혼합재($sf \geq 0.8$)는 응력에 따라 작은 간극비의 변화를 겪으며, 작은 β 지수를 가진다. 고무 또는 유사 고무 거동을 보이는 모래-고무 혼합재($sf \leq 0.2$)의 경우, 고무의 낮은 강성으로 인하여 수직 유효응력의 증가에 따라 상당한 크기의 간극비 감소가 관찰된다. 따라서, 점토 또는 고무와 같이 큰 변형성을 가지는 입상매질에서 직접적인 응력-변형의 관계를 가지며, F_e 자체가 응력의 함수가 된다(Santamarina et al. 2001). 따라서 구속응력이 전단파 속도의 변화를 지배하며, 응력의 변화에 따라 큰 전단파 속도의 변화를 보여 큰 β 지수를 가진다.

그림 7(b)는 선택된 혼합재의 재하 및 제하 시 전단파 속도의 변화를 보여준다. 동일한 구속응력에서 재하 시 횡방향 응력의 구속에 의하여 재하 시보다 더 큰 전단파 속도를 보인다. 제하 시 낮은 모래 부피비의 시료는 높은 모래 부피비 시료에 비해 큰 간극비의 비회복성을 보이이는데 이는 낮은 모래부피비 시료의 강성과 고무 입자의 형상 변화 때문이다. 수직응력의 재하 및 제하에 따라 고무 입자의 찌그러짐이 발생하고 이로 인해 입자 구조의 변화가 발생하게 된다. 따라서 제하 시에 찌그러진 고무 입자의 형상이 초기 형상과 동일하게 회복하지 못하게 되며 유사한 현상은 점토에서도 관찰된다(Santamarina et al. 2001).



(a) 재하 (L) 시 모든 혼합재



(b) 재하 (L) 및 제하 (UL) 시 선택된 혼합재

그림 7. 간극비에 따른 전단파 속도(solid symbols: 재하; hollow symbols: 제하)

5.3 침투 및 대변형 마찰각

침투 마찰각(ϕ_{peak}) 및 수평 변형 16%의 대변형 시 마찰각(ϕ_b)을 그림 8에 나타내었다. 침투 및 대변형 마찰각은 모래부피비가 증가함에 따라 증가한다. 고무-모래 혼합재의 마찰각은 모래부피비 0.6의 시료까지 모래부피비가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 순수 모래($sf=1.0$) 시료에서만 대변형 마찰각보다 큰 침투 마찰각이 관찰되며 나머지 시료의 경우 대변형 마찰각과 침투 마찰각은 동일하다.

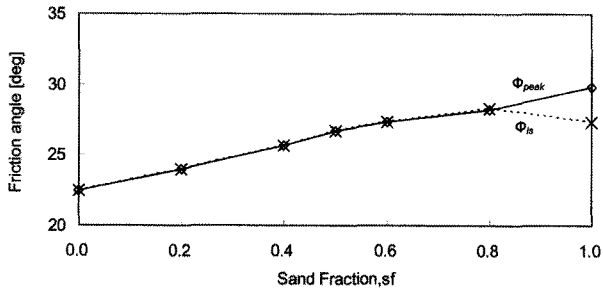


그림 8. 첨두 마찰각(ϕ_{peak}) 및 대변형 마찰각(ϕ_s)

5.4 변형률 크기에 따른 전이혼합재

표 2는 각 변형률 크기에서의 전이혼합재 및 혼합재 내 입자 수준에서 고무의 입자의 역할을 나타내었다. 각 혼합재에서 고무 입자는 변형률 크기에 따라 다른 역할을 수행한다. 고무 입자는 입자 모양의 높은 불규칙성 및 모남, 그리고 높은 탄성 및 낮은 강성을 가지고 있어 미소변형률에서 고무는 혼합재 내에서 모래 입자와의 접촉수를 증가시킬뿐만 아니라 혼합재의 전체 거동을 제어한다. 혼합재가 중간변형률의 변형을 겪으면, 모래 입자는 force chain을 형성한다. 고무 입자는 1차 입자인 force chain의 역할을 수행할 수 없으나 모래 입자로 구성된 force chain의 좌굴방지를 위한 2차 입자의 역할을 수행한다(Lee et al. 2007). 대변형률에서 혼합재 내 고무의 부피가 증가함에 따라 고무 역시 1차 입자의 역할을 수행하지만 고무 입자는 force network의 구성원으로 작용하기에는 어렵다. 전단동안 고무 입자는 지속적으로 쉽게 찌그러지며 압축되어 간극을 채우게 된다. 이러한 고무 입자의 거동은 모래 입자의 회전, 미끄러짐, 그리고 force chain의 좌굴을 억제하고, 혼합재의 contractive 한 거동을 이끈다. 혼합재 내에 고무 입자의 양이 계속적

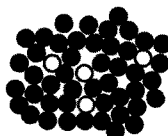
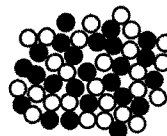
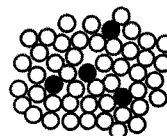
으로 증가하면, 모래 입자는 force chain형성이 어려워져 전단 저항에 기여하지 못하게 되고 변형을 연화(strain softening) 거동이 더욱 확연해진다.

6. 결론

변형률 수준에 따른 모래-고무 혼합재의 거동 특성을 연구하였다. 유사한 크기의 모래-고무 입자를 이용하여 다양한 모래부피비를 갖는 시료를 준비하였다. 주요한 관찰 사항은 다음과 같다:

- (1) 전단변형률이 증가함에 따라 정규화 전단탄성 곡선의 비선형성이 관찰되었다. 모래부피비가 감소함에 따라 전단탄성계수감소 곡선은 높은 전단변형률 영역으로 이동하였다. 낮은 모래부피비($sf \leq 0.2$)를 가지는 혼합재는 높은 변형률 영역까지 일정한 강성을 보였으며, 탄성한계변형률은 모래부피비가 감소함에 따라 증가하였다.
- (2) 중간변형률 영역의 수직 응력-변형의 관계는 3개의 그룹으로 구분되었다: 유사모래, 유사고무, 전이 거동 혼합재. 혼합재의 압축성은 모래부피비가 감소할수록 증가하였다.
- (3) 대변형 영역의 혼합재의 마찰각은 모래부피비가 증가할수록 증가하였으며, 순수한 모래 시료($sf=1.0$)을 제외한 나머지 혼합재는 모두 변형률의 증가에 따라 부피 수축(contractive) 거동을 보였다.
- (4) 모래-고무 혼합재는 변형률 크기에 따라 유사-모래에서 유사-고무 거동으로 전이되는 전이혼합재가 달랐다. 고무 입자는 혼합재 내에서 변형률 크기에 따라 서로 다른 역할을 수행하였다: 미소변형률 영

표 2. 변형률 크기에 따른 전이 혼합재 및 고무 입자의 역할

Strain level	Small strain	Intermediate strain	Large strain
Sand-like	$sf > 0.2$	$sf \geq 0.8$	$sf > 0.8$
Transition	$sf \leq 0.2$	$0.4 \leq sf \leq 0.6$	$sf \leq 0.8$
Rubber-like		$sf \leq 0.2$	
Role of rubber particle	 <ul style="list-style-type: none"> - Increase coordination number - High elasticity and low stiffness 	 <ul style="list-style-type: none"> - Prevent buckling of force chain - Secondary particle 	 <ul style="list-style-type: none"> - Leads a contractive behavior

Note. white and black circles denote sand and rubber particles, respectively.

역에서는 입자 접촉수의 증가 및 혼합재의 소성을 제어하고; 중간변형률에서는 force chain의 좌굴을 방지하며; 대변형률 영역에서는 전단에 따른 부피 수축 거동을 이끈다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 출연하고 한국연구재단에서 시행한 2단계 연구중심대학(BK21)육성사업에 의한 BK21 건설산업 글로벌리더 양성사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Ahmed, I. and Lovell, C. W. (1993), "Rubber soils as light weight geomaterials", *Transportation research record 1422*. Transportation Research Board, Washington D.C., 61-70.
- American Coal Ash Association (2008), 2008 Coal combustion product (CCP) production & use survey report.
- ASTM. (2006), "Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer", *ASTM D854-06e1*, West Conshohoken, Pa.
- ASTM. (2009), "Standard test method for density of hydraulic cement", *ASTM C188-05*, West Conshohoken, Pa.
- Atkinson, J. H. (2000), "Non-linear soil stiffness in routine design", *Geotechnique*, 50(5), 487-508.
- Aydilek, A. h., Madden, E. T., and Demirkan, M. M. (2006), "Field evaluation of a leachate collection system constructed with scrap tires", *J. of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 132(8), 990-1000.
- Bosscher, P. J., Edil, T. B., and Kuraoka, S. (1997), "Design of highway embankments using tire chips", *J. of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 123(4), 295-304.
- Díaz-Rodríguez, J. A. and Santamarina, J. C. (2001), "Mexico City Soil Behavior at Different Strains: Observations and Physical Interpretation", *J of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 127(9) 783-789.
- Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (1994), "Engineering properties of tire chips and soil mixtures", *Geotechnical Testing J.*, 17(4), 453-464.
- EPA (2007), Identifying, planning, and financing beneficial use projects using dredged material-Beneficial use planning manual, EPA842-B-07-001.
- Gabr, M.A. and Bowers, J. J. (2000), "Controlled low-strength material using fly ash and AMD sludge", *J. of Hazardous Materials*, 76 (2-3), 251-263.
- Garga, V. K. and O'Shaughnessy, V. (2000), "Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design", *Can. Geotech. J.*, 37(1). 75-96.
- Hardin, B. O. and Richart, F. E. (1963), "Elastic wave velocities in granular soils", *J. of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, 89(1), 33-65.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects", *J. of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 98(6), 603-624.
- Hertz, H. (1882), "Über die Berührung fester elastischer Körper", *J. Reine angewandte matematik*, 92, 156-171.
- Humphrey, D. N. and Eaton, R. A. (1995), "Field performance of tire chips as subgrade insulation for rural roads", *Proc., 6th Int. Conf. on Low-Volume Roads*, 2, Transportation Research Board, Washington D.C., 77-86.
- Kim, B. J. and Prezzi, M. (2008), "Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash", *Waste Management*, 28(3), 649-659.
- Kim, Y. T., Kim, H. J., and Lee, G. H. (2008), "Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net", *Geotextiles and Geomenbranes*, 26. 512-518.
- Kim, Y. T., Ahn, J., Han, W. J., and Gabr, M. A. (2010), "Experimental Evaluation of Strength Characteristics of Stabilized Dredged Soil", *J. of Materials in Civil Eng.* ASCE, 22(5). 539-544.
- Kumar, S. and Stewart, J. (2003), "Evaluation of Illinois pulverized coal combustion dry bottom ash for use in geotechnical engineering applications", *J. of Energy Engineering*, 129(2), 42-55.
- Krumbein, W. C., Sloss, L. L. (1963), *Stratigraphy and Sedimentation*, 2nd Edition, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Lee, J. S., Dodds, J., and Santamarina, J. C. (2007), "Behavior of rigid-soft particle mixtures", *J. of Materials in Civil Eng.*, ASCE, 19(2). 179-184.
- Lee, C., Truong, Q. H., Lee, W., and Lee, J. S. (2010), "Characteristics of Rubber-Sand Particle Mixtures according to Size Ratio", *J. of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 22(4), 323-331.
- Mindlin, R. D. (1949), "Compliance of elastic bodies in contact", *J. of applied mechanics*, September, 259-268.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), *Fundamentals of soil behavior*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Pan, J. R., Huang, C., Kuo, J. J., and Lin, S.H. (2008), "Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement", *Waste Management*, 28(7), 1113-1118.
- Poh, P. S. H. and Broms, B. B. (1995), "Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles", *J. of Performance of Constructed Facilities*, 9(1), 76-80.
- Ramberg, W. and Osgood, W. R. (1943), "Description of stress-strain curves by three parameters", *Technical Note No. 902*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC.
- Rowe, R. K. and Mclsaac, R. (2005), "Clogging of tire shreds and gravel permeated with landfill leachate", *J. of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 131(6), 682-693.
- Rubber Manufacturers Association (2006), *Scrap tire markets in the United States 2005 Edition*.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*. John Wiley & Sons. New York.
- Singh, S. P., Tripathy, D. P., and Ranjith, P. G. (2008), "Performance evaluation of cement stabilized fly ash-GBFS mixes as a highway construction material", *Waste Management*, 28(8), 1331-1337.
- Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T., and Kishida, T. (1996), "Development of lightweight fill from dredging", *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, 415-420.
- Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., and Sandford, T. C. (1998), "Tire shreds as lightweight retaining wall backfill: active conditions", *J. of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 124(11), 1061-1070.

35. Vucetic, M. (1994), "Cyclic threshold shear strains in soils", *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(12), 2208-2228.
36. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", *J. of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(1), 89-107.
37. Yoon, G. L., Jeon, S. S., and Kim, B. T. (2004), "Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged materials", *Marine Georesources & Geotechnology*, 22(4), 215-229.
38. Youwai, S. and Bergado, D. (2003), "Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures", *Can. Geotech. J.*, 40(2), 254-264.

(접수일자 2010. 12. 1, 심사완료일 2011. 1. 4)