

# 입자크기비에 따른 강-연성 혼합재의 공학적 특성

## Characteristics of Rigid-Soft Particle Mixtures with Size Ratio

이 창 호<sup>1</sup> Lee, Changho

윤 형 구<sup>2</sup> Yoon, Hyung-Koo

김 래 현<sup>3</sup> Kim, Raehyun

이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woojin

이 종 섭<sup>5</sup> Lee, Jong-Sub

### Abstract

Rigid-soft particle mixtures, which consist of sand and rubber, are investigated for the understanding of the stress-deformation and elastic moduli. Specimens are prepared with various size ratio  $sr$  between sand and rubber particles, and different volumetric sand fraction  $sf$ . Small strain shear waves are measured under  $K_0$ -loading condition incorporated with the stress-deformation test by using oedometer cell with bender elements. The stress-deformation and small strain shear wave characteristics of rigid-soft particle mixtures show the transition from a rigid particle behavior regime to a soft particle behavior regime under fixed size ratio. A sudden rise of  $\Lambda$  factor and the maximum value of the  $\zeta$  exponent in  $G_{max} = \Lambda(\sigma'_v/kPa)^\zeta$  are observed at  $sf \approx 0.4\sim 0.6$  regardless of the size ratio  $sr$ . Transition mixture shows high sensitivity to confining stress. The volume fraction for the minimum porosity may depend on the applied stress level in the rigid-soft particle mixtures because the soft rubber particles easily distort under load. In this experimental study, the size ratio and volumetric sand fraction are the important factors which determine the behavior of rigid and soft particle mixtures.

### 요 지

모래 입자와 연약한 고무 입자로 이루어진 강-연성 혼합재의 응력-변형 및 전단파 특성을 평가하기 위해 고무와 모래의 부피비( $sf$ )와 입자 크기비( $sr$ )를 달리하는 시료를 조성하였다. 벤더 엘리먼트가 설치된 압밀셀을 이용하여 응력-변형시험 및  $K_0$  상태에서의 미소변형 전단파 시험을 실시하였다. 일정한 입자 크기비를 가지는 강-연성 혼합재는 강성의 입자에서 연성의 입자로 거동이 전이되는 응력-변형 및 미소변형 전단파 특성을 보였다. 또한,  $G_{max} = \Lambda(\sigma'_v/kPa)^\zeta$  관계에서 모래의 부피비( $sf$ )가 0.4-0.6인 구간에서  $\Lambda$ 계수가 급격히 증가하며  $\zeta$  지수는 최대값을 보이는 것으로 관찰되었다. 전이 혼합재는 구속응력의 변화에 매우 민감한 거동을 보이며 연성인 고무입자는 재하 하중에 의해 쉽게 변형되므로 최소 간극율을 가지는 강-연성 혼합재의 부피비는 재하된 응력의 크기에 좌우된다. 실내시험을 이용한 본 연구에서는 입자 크기비와 모래 부피비가 강성입자와 연성입자의 혼합재료 거동을 결정하는 것으로 요인으로 분석되었다.

**Keywords :** Rigid-soft particles, Shear wave velocity, Size ratio, Stiffness, Stress-strain, Volume fraction

1 정회원, 조지아공대 토목공학과 박사 후 연구원 (Member, Post Doctoral Fellow, School of Civil and Environmental Eng., Georgia Institute of Technology)

2 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Department of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ.)

5 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Department of Civil, Environmental and Architectural Eng., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

페타이어(whole, slit, shred, chip, ground rubber or crumb rubber shapes)는 페타이어 자체 또는 흙과 혼합하여 고속도로 건설, 교대, 매립지, 경량 뒷채움재, 사면 안정 그리고 도로의 보조 기층 등 다양한 토목 공사에 활용된다(Ahmed and Lovell 1993; Humphrey and Eaton 1995; Poh and Broms 1995; Foose et al. 1996; Liang and Lee 1996; Bosscher et al. 1997; Tweedie et al. 1998; Zornberg et al. 1998; Lee et al. 1999; Garga and O'Shaughnessy 2000; Feng and Sutter 2001; Zornberg et al. 2004a; Rowe and McIsaac 2005; Aydilek et al. 2006). 이러한 페타이어의 활용은 새로운 건설 재료의 공급뿐 아니라 환경적, 경제적 문제 해결에 큰 도움이 될 수 있다. 그러나 현재까지는 페타이어 자체의 거동을 연구하거나 흙 입자의 크기보다 훨씬 큰 크기의 타이어 칩(chip)을 활용한 연구에 집중되고 있다.

타이어 칩의 경우 크기가 작아질수록 불균일한 모양을 가지나(Bosscher et al. 1997) 비중, 수분 흡수도와 같은 재료 물리적 특성은 입자 크기에 상관 없이 일정하다고 알려져 있다(Ahmed 1993; Wu et al. 1997; Yang et al. 2002; Moo-Young et al. 2003). 또한 조각 타이어의 전단 강도는 입자 크기에 무관하고, 선형적인 팽창 거동을 보이나 침투 강도를 나타내지는 않는다(Masad et al. 1996; Lee et al. 1999; Wu et al. 1997; Yang et al. 2002, Zornberg et al. 2004b). 한편 조각 타이어의 경우 상당한 크기의 압축성을 가지나 대부분의 압축은 초기 하중 재하 시 발생한다(Edil and Bosscher 1994; Bosscher et al. 1997).

모래-고무의 강-연성 혼합재는 강성재료인 모래의 함유량이 늘어날수록 혼합재의 변형량 및 탄성계수가 줄어들고(Ahmed 1993; Masad et al. 1996; Feng and Sutter 2000; Lee et al. 2007; Pamukcu and Akbulut 2006; Youwai and Bergado 2003), 강도 및 내부 마찰각은 증가하는 것으로 알려져 있다(Foose et al. 1996; Lee et al. 1999; Feng and Sutter 2000; Youwai and Bergado 2003; Zornberg et al. 2004b). 그러나 타이어 칩의 크기가 1cm 이상일 경우 타이어 칩이 혼합재 내에서 보강 물질로 작용하여 혼합재의 전단 강도는 순수한 모래의 전단 강도보다 더 큰 값을 가질 수도 있고(Ghazavi and Sakhi 2005; Lee et al. 2007), 이러한 전단 강도의 증가는 타이어 칩의 세장비(길이:너비)가 클수록 증가하는 경향을

보인다(Zornberg et al. 2004b; Ghazavi and Sakhi 2005).

본 연구에서는 단단한 모래입자와 다양한 입자크기 별로 선분류된 연성의 고무를 혼합한 강-연성 혼합재의  $K_0$  구속상태에서의 응력-변형 및 미소변형 거동특성을 분석하였다. 강성재료인 모래와 연성재료인 고무의 함유량에 따른 거동특성 파악을 위하여 다양한 모래부피비(sand volume fraction, sf)와 입자 크기비(size ratio, sr)를 가지는 시료를 준비하였다. 또한 선형 연구를 바탕으로 shredded tire 및 강-연성 혼합재의 특성을 간략하게 분석하였으며 실험 재료, 시료 준비, 실험 순서 및 결과를 정리하고 분석하였다.

## 2. 실험 개요

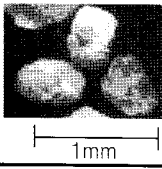
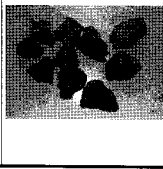



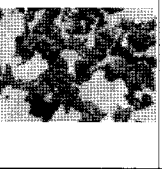
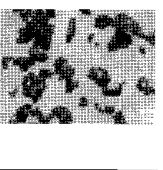
### 2.1 실험 재료

조각 타이어로부터 입자크기 별로 분류한 6종류의 고무와 단단하고 모나며 균등한 주문진 모래( $e_{min}=0.60$ ,  $e_{max}=0.87$ ,  $D_{50}=0.725mm$ )를 혼합하여 강-연성 혼합재를 준비하였다. 균질한 크기의 모래 입자를 얻기 위하여 사전에 수세식 체분석을 실시하여 일정한 크기의 입자만을 선별하고 완전히 건조시켰다. 모나고 불규칙한 모양의 고무 입자는 사전 건조 체분석을 실시하여 다양한 크기로 분류하였다( $D_{50}=3.375, 1.425, 0.725, 0.5125, 0.3625, 0.256mm$ ). 고무 입자 내의 steel fibers는 완전히 제거하였으나  $D_{50}=3.375mm$  고무 입자에는 약간의 나일론 섬유가 존재하였다. ASTM D854-05과 C77-40에 따라 측정된 고무 입자의 비중은 입자 크기에 상관 없이 1.15~1.17로 유사한 값을 보였다. 또한 주문진 모래와 고무 입자의 물리적 특성은 표 1과 같다.

### 2.2 시료 준비

시료는 고무-모래의 입자 크기비(size ratio, sr)와 모래 부피비(sand volume fraction, sf)에 따라 달라지게 되며 두 재료의 평균 입자 크기의 비( $D_{50r} / D_{50s}$ )로 정의되는 고무-모래의 입자 크기비에 따라 6가지 시료를 준비하였다. 모래 부피비는 전체 부피에 대한 모래의 부피로 정의하고 0~1.0까지 0.2의 간격으로 7가지 시료를 준비하였다. 시료의 모래 함유량은 무게비와 부피비로 표현할 수 있으나 응력 변화에 따른 변형 및 탄성계수의 변화는 압밀셀 내부 시료의 부피에 따른 변형률에 의존하므로

표 1. 시험 재료들의 물리적 특성

Material properties	Jumunjin Sand (20/30)	Rubber Particles					
		4.7	2.0	1.0	0.7	0.5	0.35
Sr	—	4.7	2.0	1.0	0.7	0.5	0.35
Specific gravity (D854-05 /C77-40)	2.62	1.16/1.17	1.15/1.16	1.16/1.16	1.15/1.17	1.16/1.16	1.15/1.15
D <sub>50</sub> [mm]	0.725	3.375	1.425	0.725	0.5125	0.3625	0.256
e <sub>max</sub>	0.87	—	—	—	—	—	—
e <sub>min</sub>	0.60	—	—	—	—	—	—
Sphericity	≈ 0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5
Roundness	≈ 0.7~0.9	0.3~0.4	0.5	0.3	0.1~0.3	0.1	0.1
Shear modulus [MPa]*	≈ 100	1					
Poisson's ratio*	0.3	0.49					
Photograph							

Note: \* values relevant to the material that makes the particles.

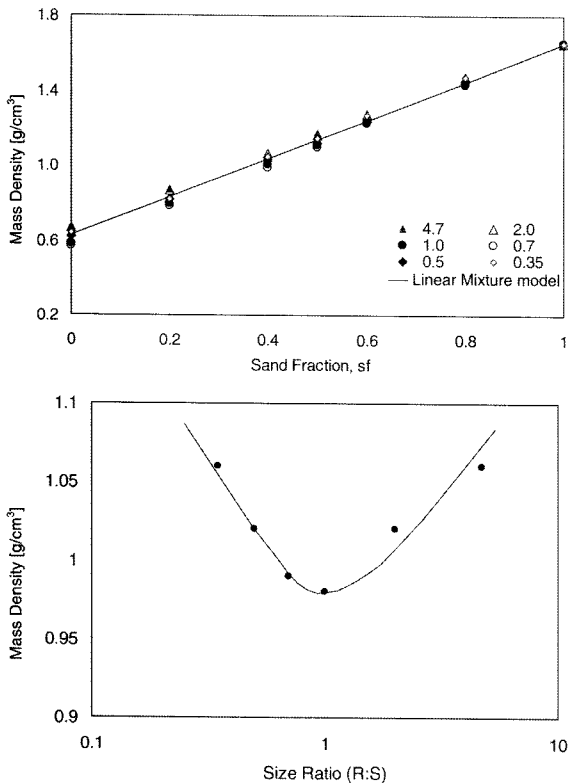


그림 1. 모래부피비에 따른 밀도

로 본 연구에서는 부피비를 적용하였다(Feng and Sutter 2000).

재료 분리에 유의하면서 고무-모래 혼합재를 5층으로

나누어 조성하였다. 각 층의 시료 무게는 동일하게 하였으며 탬핑 방법을 이용하여 각 층에 동일한 에너지가 전달되도록 하였다. 시료의 높이가 37mm가 되었을 때 상부캡을 설치하고 시료의 초기 높이를 측정하였다.

실험에 사용된 모든 시료의 모래부피비에 따른 밀도를 그림 1에 나타내었다. 고무-모래 혼합재의 밀도는 두 재료의 비중 차이로 모래부피비가 증가함에 따라 증가하였으며, 동일한 모래부피비의 시료는 고무-모래 크기가 달라도 유사한 밀도를 보였다. 또한 혼합재의 밀도는 Lee et al.(2007)가 제시한 선형 모델  $\rho_{mix} = (sf) \rho_{sand} + (1-sf) \rho_{rubber}$ 과 유사한 값을 보였다.

### 2.3 실험 장치 및 과정

압밀 시험과 동일하게 횡방향 변위가 구속된 경계면 조건에서 응력에 따른 침하량과 전단파 속도를 측정할 수 있는 직경 74mm, 높이 63mm, 두께 16mm의 황동 재질의 셀을 제작하여 실험에 이용하였다. 전단파의 발생과 감지를 위하여 토질 시험에 널리 사용되는 벤더 엘리먼트 중 11.0×4.0×0.6mm(길이×너비×두께)의 병렬 방식 벤더 엘리먼트를 적용하였다(Piezo systems PSI5H4E T226-H4-Y). 모든 벤더 엘리먼트는 방수 처리를 하였으

며 누화현상(crosstalk)을 방지하기 위하여 전도성 페인트로 차폐하고 접지를 실시하였다.

실험장치는 신호발생기(Agilent 33220A), 신호 필터-증폭기(Krohn-Hite 3364), 그리고 오실로스코프(Agilent 54624A) 등을 활용하였다. 신호발생기를 이용하여 발신 벤더 엘리먼트에서 생성된 전단파는 시료를 통하여 전파된 후 수신 벤더 엘리먼트에서 획득된다. 수신 벤더 엘리먼트에서 획득된 전기적 신호는 신호 필터-증폭기를 이용하여 신호의 잡음 제거와 증폭을 실시하였으며 디지털 오실로스코프로 저장하였다. 또한 임의의 부정확한 잡음(random and uncorrected noise)을 제거하기 위하여 1,024개의 신호를 평균하였으며 전단파의 이동 거리는 벤더 엘리먼트 끝단 간 거리(tip-to-tip distance)로 정의하였다(Viggiani and Atkinson 1995; Fernandez 2000).

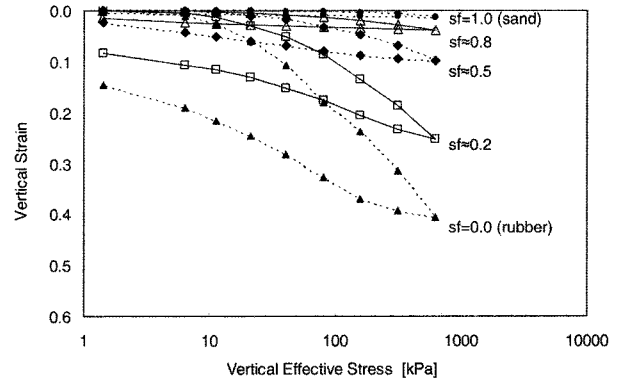
시료 준비가 완료된 시료에 연직방향 유효응력을 각 하중 단계별로 2배씩 증가시켜 630kPa까지 재하 하였으며 각 하중 단계에서 30분간 하중을 유지하였다. 각 하중 단계별로 시료의 간극비와 탄성파 트랜서듀서의 끝단 간 거리를 결정하기 위하여 시료의 연직 변위를 측정하고 전단파를 측정하였다. 하중의 재하와 제하를 반복 하면서 동일한 과정을 반복 수행하였다.

### 3. 실험 결과

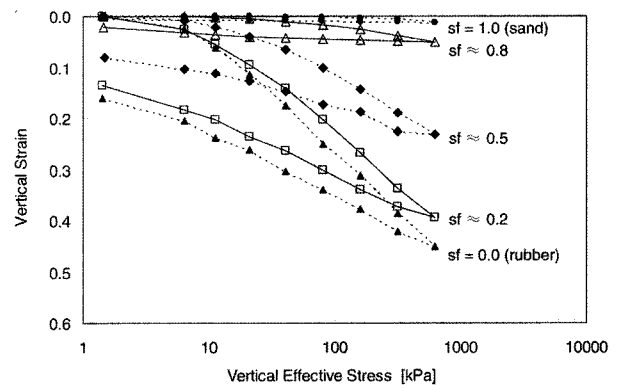
#### 3.1 횡방향 구속 상태에서 수직 응력-수직 변형률 관계( $K_0$ condition)

횡방향 구속 조건에서 응력에 따른 변형은 새로운 건설 재료의 적용을 위한 중요한 설계 변수 중 하나이다. 그림 2는 입자 크기비가 4.7 및 0.5의 시료에 대하여 모래부피비를 0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0로 변화 시킨 경우 측정된 응력과 연직 변형률의 관계를 나타낸다. 그림 2에 보는 바와 같이 입자 크기비가 서로 다름에도 불구하고 전체적으로 유사한 거동을 나타내고 있다. 시료의 연직 변형률은 모래부피비가 감소할수록 증가하며 모든 시료에서 하중을 제하한 이후에도 상당한 크기의 잔류 변형이 생기는 것으로 나타났다.

630kPa의 연직응력 하에서 발생하는 시료의 변형을 정규화된 연직 변형률( $\epsilon_{mixture}/\epsilon_{sand}$ )로 표현하면 그림 3과 같이 나타난다. 순수 고무 입자( $sf=0$ )의 변형은 순수 모래( $sf=1$ )의 변형보다 약 30~40배 더 큰 값을 보이며 작은 크기의 고무 입자일수록 더 큰 연직 변형을 보이는데 이는 고무 입자 크기가 작아질수록 모난 정도(angularity)



(a)



(b)

그림 2. 횡방향 구속 상태에서의 수직응력-수직 변형률 관계: (a) 크기비  $sr=4.7$ ; (b) 크기비  $sr=0.5$ . 그림 내 숫자는 모래부피비를 표시

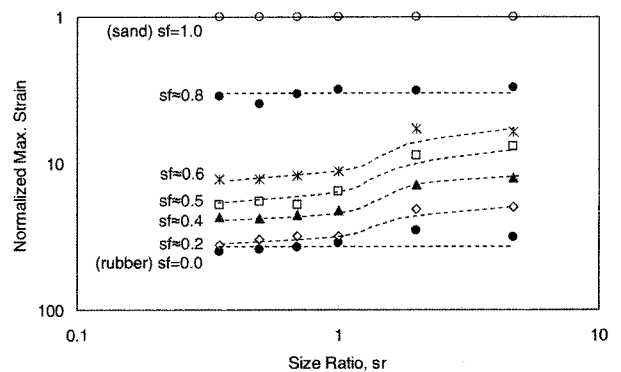
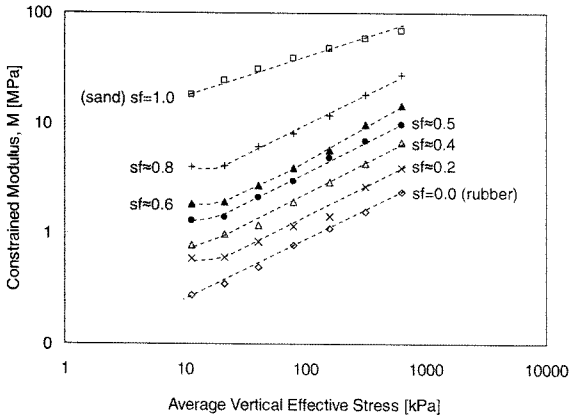


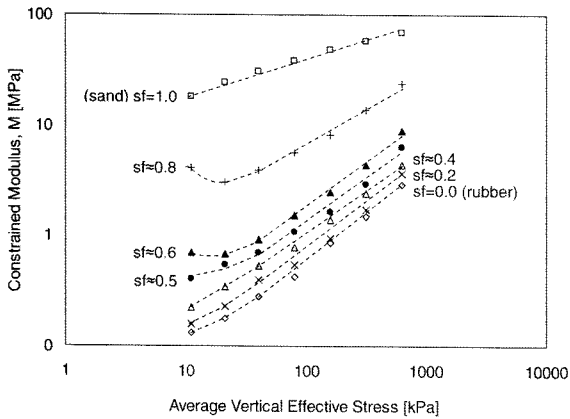
그림 3. 630kPa의 수직 응력에서 정규화된 수직 변형률( $\epsilon_{mixture}/\epsilon_{sand}$ ). 그림 내 숫자는 모래부피비를 표시

와 불균일성(irregularity)이 증가하기 때문이다(Bosscher et al. 1997). 모래부피비 0.8이상의 시료에서는 고무와 모래의 입자 크기비에 상관없이 정규화된 연직 변형률이 일정한 것으로 나타났다. 또한 정규화된 연직 변형률은 모래부피비와 크기비가 감소할수록 증가하는 경향을 보였다.

각 하중 단계에서 응력-변형의 기울기는 횡방향 구속 탄성계수(constrained modulus,  $M$ )로 나타나며 고무-모



(a)



(b)

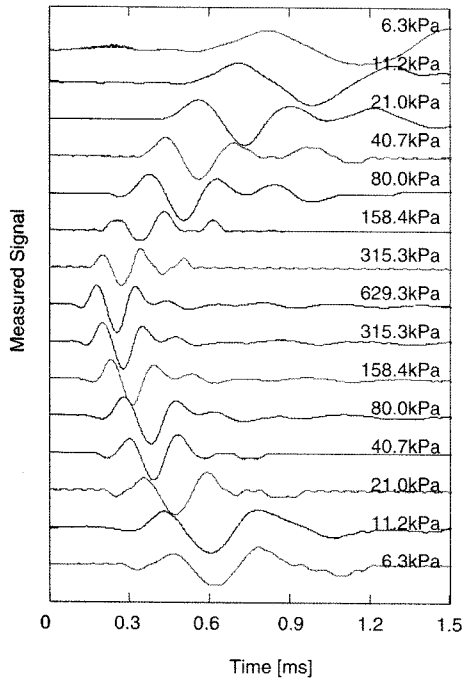
그림 4. 횡방향 구속탄성계수의 변화: (a) 크기비 sr=4.7; (b) 크기비 sr=0.5. 그림 내 숫자는 모래부피비를 표시

래 입자 크기비가 4.7과 0.5인 시료의 횡방향 구속탄성 계수의 변화를 그림 4에 도시하였다. 횡방향 구속탄성 계수는 모래부피비가 증가함에 따라 증가하였으며 특히 모래부피비 0.8이상에서는 급격한 증가를 보였다. 이와 같은 현상은 고무-모래 입자 크기비가 다른 시료에서도 유사한 결과를 보였다.

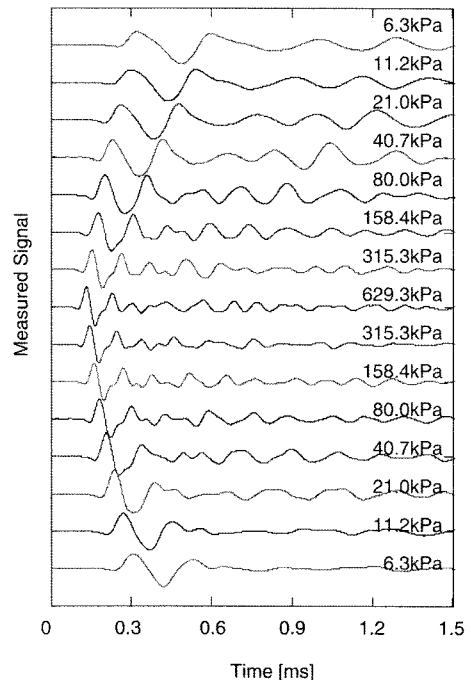
### 3.2 전단파 속도( $V_s$ )와 미소변형 전단탄성계수

고무-모래 입자 크기비가 4.7 및 0.5이며 모래부피비는 0.2 및 0.8인 시료에 대해 하중을 재하하거나 제하하는 동안 측정된 전단파 신호를 그림 5와 6에 각각 나타내었다. 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 고무-모래의 입자 크기비에 상관 없이 모래부피비가 큰 시료에서 높은 공진 주파수를 나타내었다.

측정된 전단파 신호로부터 계산한 전단파 속도( $V_s$ )를 연직방향 유효응력과 의 관계로 도시하면 그림 7과 같으며 다음과 같은 현상을 관찰할 수 있다. (1) 전단파 속도는 연직 유효 응력이 증가함에 따라 증가한다. (2) 높은 강성으로 인하여 동일한 연직 유효 응력 하에서는 모래부피비가 클수록 더 빠른 전단파 속도를 보인다. (3) 제하 단계의 전단파 속도는 횡방향 응력 구속 현상으로 인하여 재하 시 전단파 속도보다 더 큰 값을 가진다(Lee

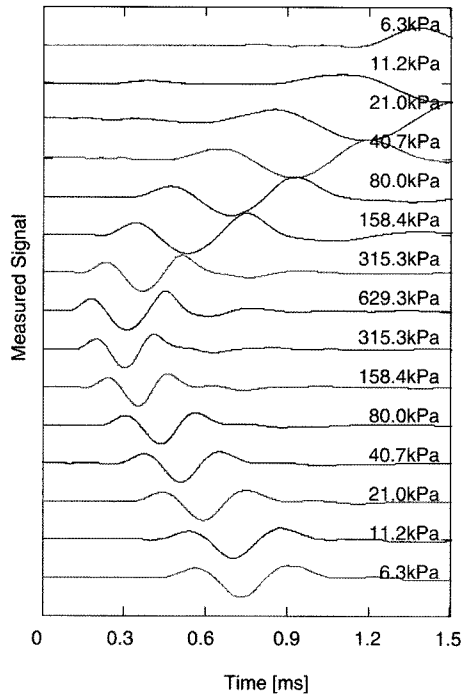


(a)

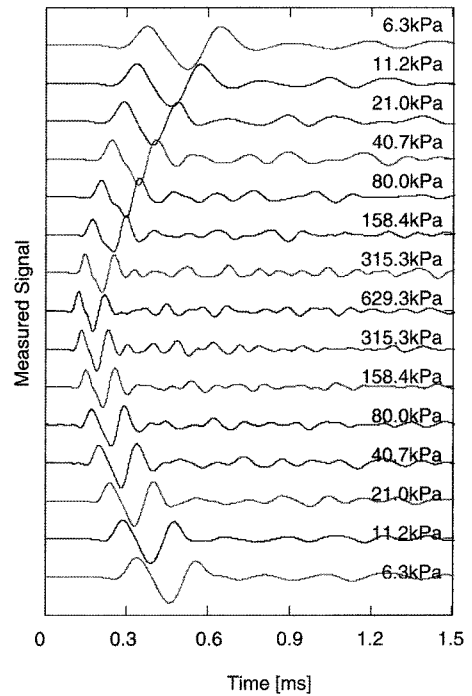


(b)

그림 5. 크기비 sr=4.7 시료의 하중 재하 및 제하 시 측정된 전단파 신호: (a) 모래부피비 sf=0.2; (b) 모래부피비 sf=0.8. 각 신호의 크기는 각 신호의 최대 크기로 정규화 하였음.

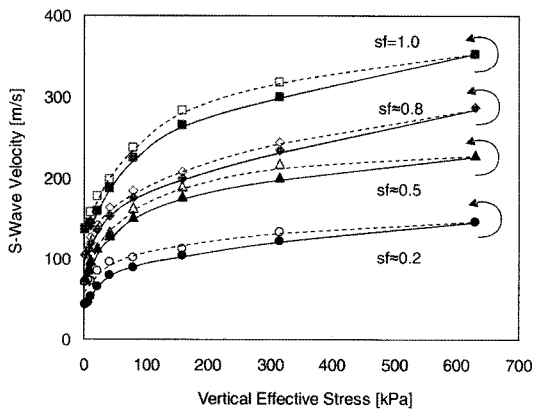


(a)

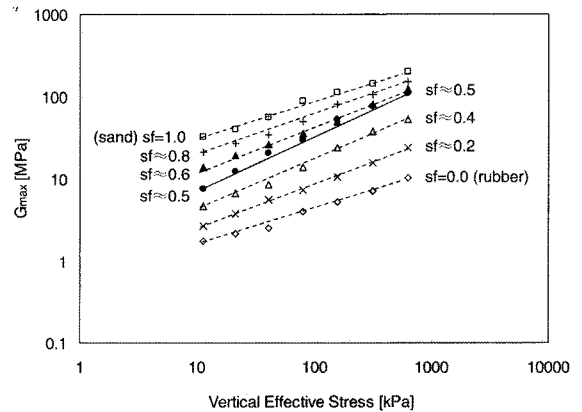


(b)

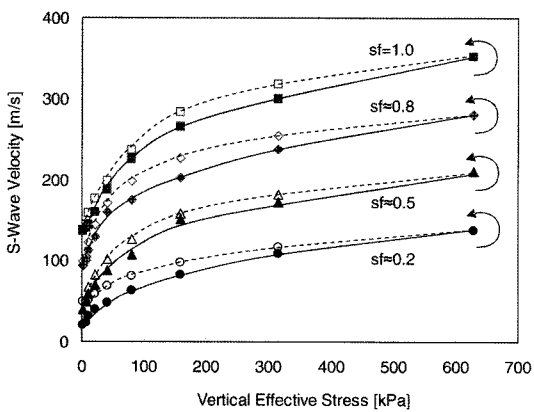
그림 6. 크기비  $sr=0.5$  시료의 하중 재하 및 제하 시 측정된 전단파 신호: (a) 모래부피비  $sf=0.2$ ; (b) 모래부피비  $sf=0.8$ . 각 신호의 크기는 각 신호의 최대 크기로 정규화 하였음



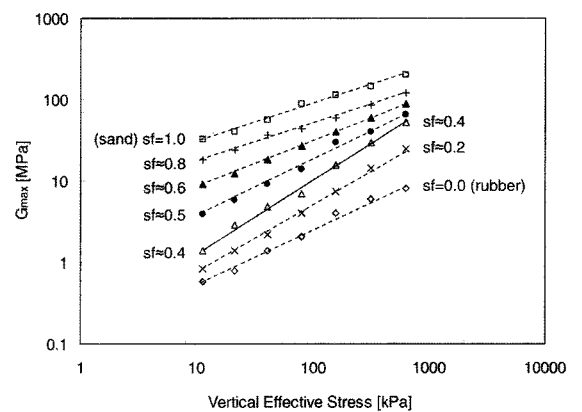
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 7. 수직 유효 응력에 따른 전단파 속도: (a) 크기비  $sr=4.7$ ; (b) 크기비  $sr=0.5$

그림 8. 하중 재하 시 수직 유효 응력에 따른 전단탄성계수  $G_{max}$ : (a) 크기비  $sr=4.7$ ; (b) 크기비  $sr=0.5$ . 그림 내 숫자는 모래부피비를 표시

et al. 2007).

미소변형 전단탄성계수( $G_{max}$ )는 다음 식 (1)과 같이 전단파 속도  $V_s$ 와 상응하는 밀도  $\rho$ 로부터 산정할 수 있다.

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

그림 8은 고무-모래 입자 크기비가 4.7 및 0.5이며 모래 부피비는 0.2 및 0.8인 시료에 대해 재하 동안 연직방향 유효응력에 따른 미소변형 전단탄성계수를 나타내었다. 측정된  $G_{max}$  값은 고무와 같이 작은 전단탄성계수를 가지고 유사고무거동(rubber-like behavior)을 보이는 집단 ( $sf=0.2$  이하)과 모래와 같이 큰 전단탄성계수로 유사모래 거동(sand-like behavior)을 나타내는 집단( $sf=0.8$  이상)으로 양분 된다. 또한 모래부피비가 0.4-0.6인 시료는 작용하는 유효응력에 따라 민감하게 반응하며 낮은 구속압에서는 고무와 비슷한 거동을, 높은 구속압에서는 모래와 유사한 거동을 보인다. 이와 같은 현상은 고무-모래의 입자 크기비가 다른 시료에서도 유사하게 관찰되었다.

#### 4. 분석 및 토의

##### 4.1 간극율

두 가지 입자로 이루어진 혼합재의 간극율은 두 입자의 크기비, 입자 모양, 그리고 각 입자들의 부피비에 의존적이다(Guyon et al. 1987; Dias et al. 2004). 혼합재 내 작은 입자의 양이 증가할수록 작은 입자가 큰 입자에 의해 형성된 간극을 채우게 되며 간극이 완전히 채워질 때까지 간극율은 감소하여 최소 간극율을 보이게 된다. 그러나 간극율의 감소는 두 입자의 크기비가 증가할수록 커지고 크기비가 클수록 작은 입자가 쉽게 간극을 채울 수 있기 때문에 실험적으로 이러한 최소 간극율을 얻기는 어렵다. 최소 간극율 도달 이후 작은 입자의 추가는 오히려 간극율의 증가를 가져오게 되며 이는 혼합재 내에서 작은 입자가 주를 이루어 큰 입자가 서로 분리되어 작은 입자 사이를 떠 다니는 형상이 되기 때문이다(Lee et al. 2007).

단단한 두 가지 입자로 구성된 혼합재에서 최소 간극율을 가지는 부피비(무게비)는 작용 응력에 상관 없이 일정한 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Vallejo 2001). 이는 단단한 입자의 경우 응력에 따른 입자 모양의 변화가 없어 입자의 이동이나 재배열에 의해서만 간극비의 변화가 발생하기 때문이다. 그러나 연약한 고무 입자는

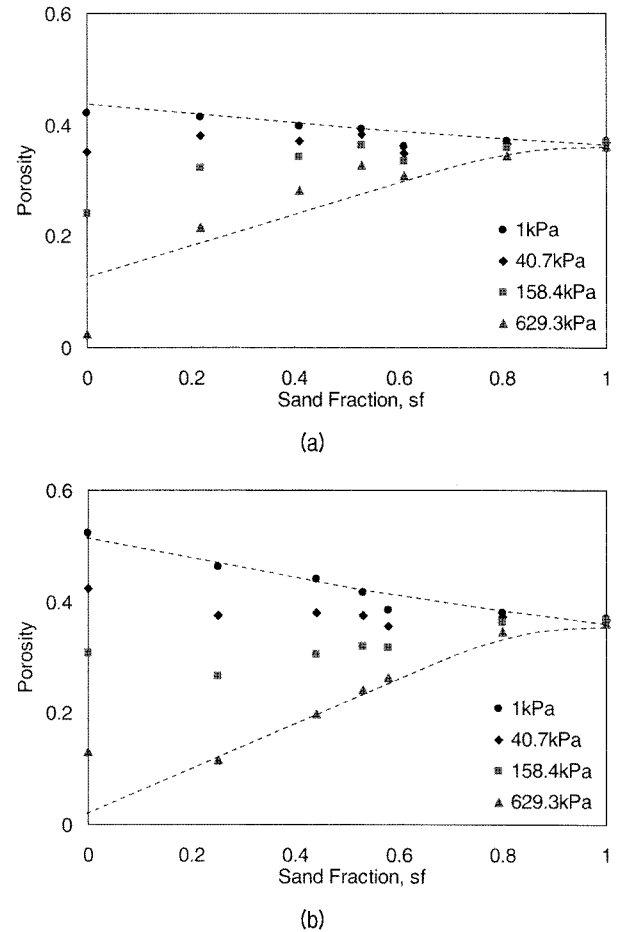
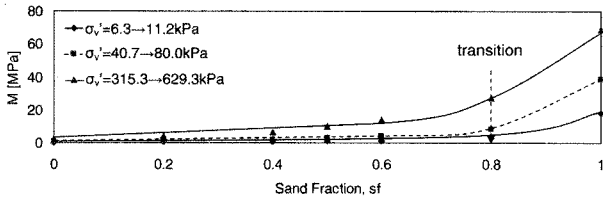


그림 9. 작용하중에 따른 간극비의 변화: (a) 크기비 sr=4.7; (b) 크기비 sr=0.5

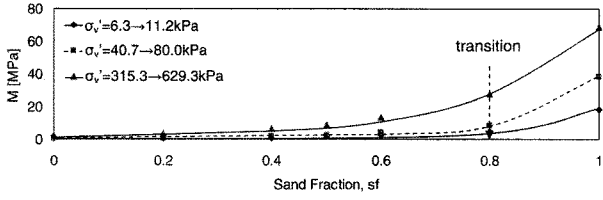
작용 하중에 의해 쉽게 찌그러지며 고무의 포아송비는 약 0.5로 수축으로 인한 고무 자체의 부피 변화는 거의 없다. 따라서 고무-모래 혼합재에서 최소 간극율을 가지는 두 입자의 부피비는 작용 응력에 따라 변화한다. 그림 9는 연직 유효 응력의 크기에 따른 모래 부피비가 각각 4.7과 0.5인 시료의 간극율 변화를 나타낸다. 최소 간극율을 보이는 모래부피비는 고무 입자의 찌그러짐과 모래 입자 사이의 간극 채움으로 인하여 연직방향 유효 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

##### 4.2 입자크기비에 따른 전이 거동

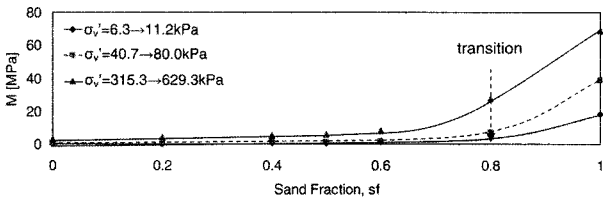
압밀 시험으로부터 얻은 중간 변형율의 응력변형 거동은 구조 변화(fabric change), 접촉 변형(contact deformation), 골격 변화(skeleton change) 등에 영향을 받는다. 모래부피비에 따른 횡방향 구속탄성계수(M)의 변화 및 응력 상태와 입자 접촉 특성에 따른 미소변형 전단탄성계수( $G_{max}$ )의 변화는 각각 그림 10 및 11에 도시하였다. 그림



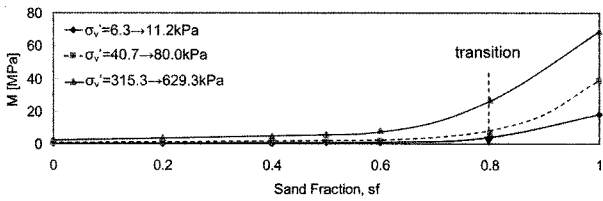
(a)



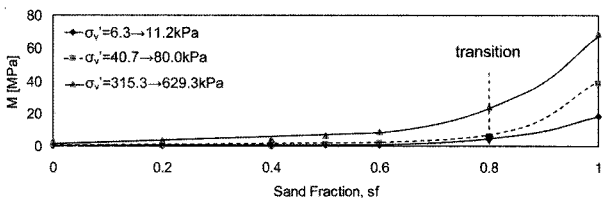
(b)



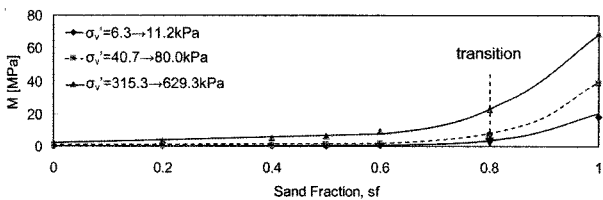
(c)



(d)



(e)

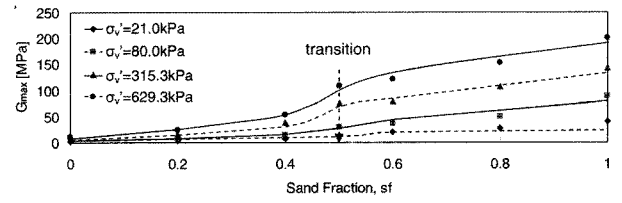


(f)

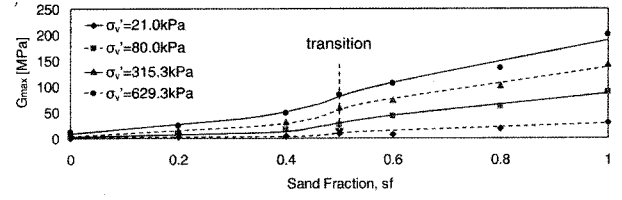
그림 10. 선택된 하중 단계에서의 모래부피비에 따른 횡방향 구속 탄성 계수 M: (a) 크기비 sr=4.7; (b) 크기비 sr=2.0; (c) 크기비 sr=1.0; (d) 크기비 sr=0.7; (e) 크기비 sr=0.5; (f) 크기비 sr=0.35

10과 11에 나타난 바와 같이 횡방향 구속탄성계수 및 미소변형 전단탄성계수의 전이 거동을 보이는 모래부피비는 0.8과 0.4~0.5인 것으로 나타났다.

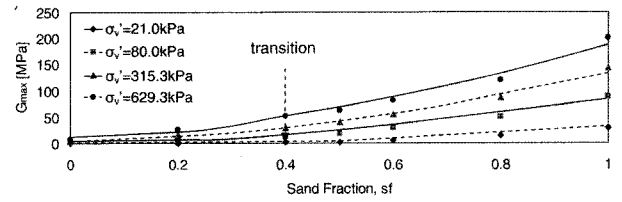
일반적으로 미소변형 강성은 다음 식 (2)와 같이 지수



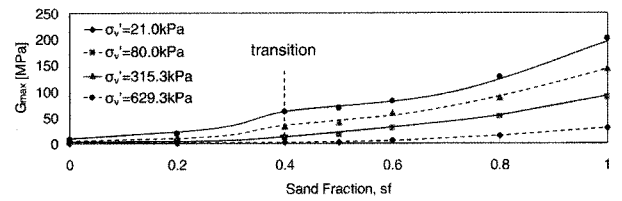
(a)



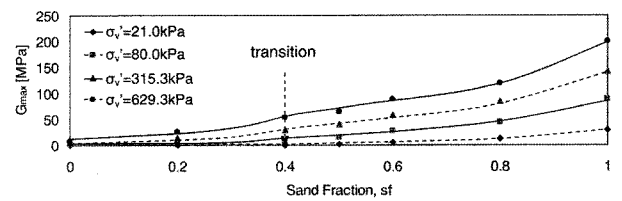
(b)



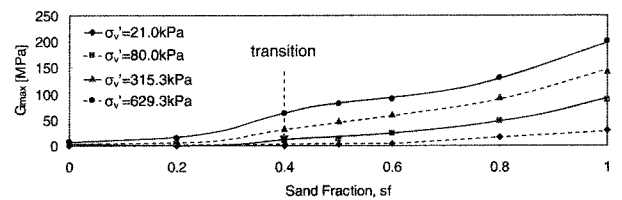
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 11. 선택된 하중 단계에서의 모래부피비에 따른 전단탄성계수  $G_{max}$ : (a) 크기비 sr=4.7; (b) 크기비 sr=2.0; (c) 크기비 sr=1.0; (d) 크기비 sr=0.7; (e) 크기비 sr=0.5; (f) 크기비 sr=0.35

식으로 표현할 수 있다:

$$G_{max} = \rho V_s^2 = \Lambda \left( \frac{\sigma'_v}{kPa} \right)^\zeta \quad (2)$$



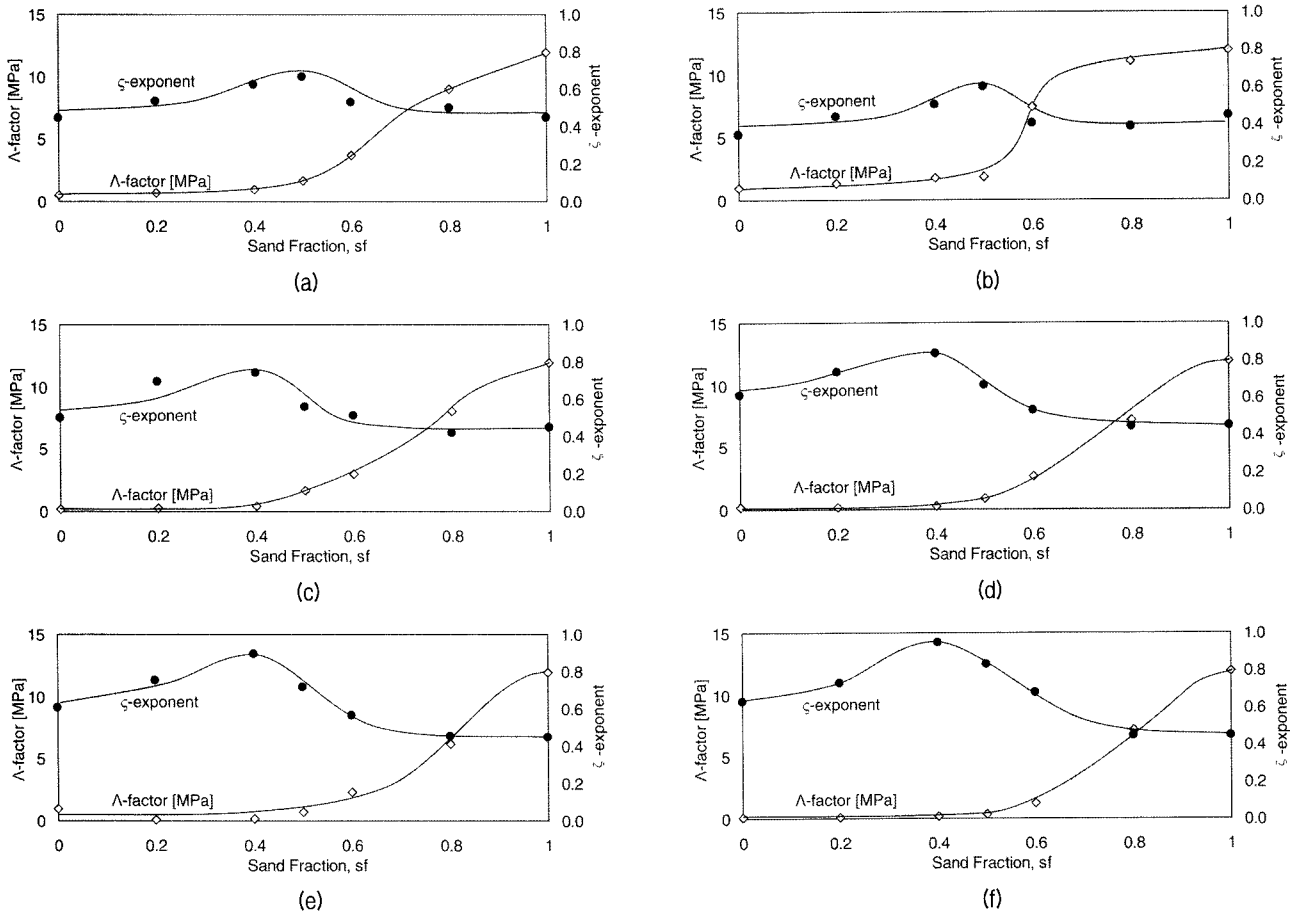


그림 12.  $G_{max} = \Lambda(\sigma'_v/kPa)^\zeta$ 의  $\Lambda$ 계수 및  $\zeta$  지수의 변화: (a) 크기비 sr=4.7; (b) 크기비 sr=2.0; (c) 크기비 sr=1.0; (d) 크기비 sr=0.7; (e) 크기비 sr=0.5; (f) 크기비 sr=0.35

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $V_s$ 는 전단파 속도,  $\Lambda$ 는 실험적으로 결정되는 1kPa에서의 최대전단탄성계수,  $\zeta$ 는 실험적으로 결정되는 지수, 그리고  $\sigma'_v$ 는 평균 유효 응력이다. 그림 12은 모든 시료의 모래부피비에 따른  $\Lambda$ 와  $\zeta$ 를 도시하였다.  $\Lambda$  계수는 접촉 거동, 입자 특성, 구조변화 등의 패킹 (packing) 특성의 변화에 영향 받으며 모래부피비에 따라 증가하는 경향을 보이고 특히 전이 부피비에서 갑작스런 증가를 보였다. 낮은 강성의 재료일수록  $\Lambda$  계수가 작으며  $\zeta$  지수는 전이 부피비에서 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 최대전단탄성계수는 전이 부피비 근처에서 응력의 변화에 가장 민감하게 변화함을 알 수 있다.

#### 4.3 고정된 모래부피비와 입자크기비에 따른 횡방향 구속 탄성계수 M

고무-모래 입자 크기비와 모래부피비는 횡방향 구속탄성계수에 영향을 주며, 그림 13은 313.5kPa에서 629.3kPa로 응력이 변화할 때의 횡방향 구속탄성계수

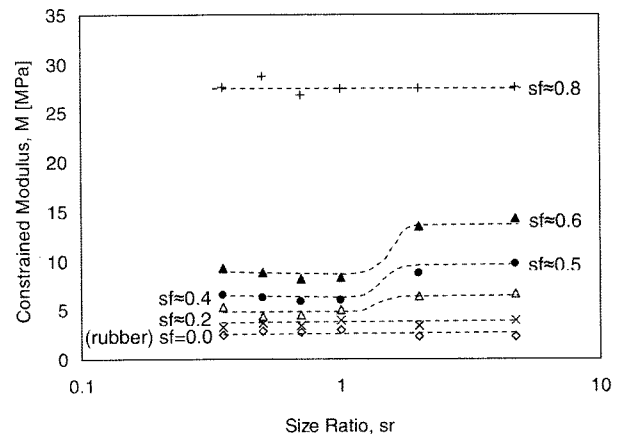


그림 13. 크기비 및 모래부피비에 따른 횡방향구속 탄성계수 M의 변화(313.5kPa→629.3kPa)

의 변화를 나타낸다. 횡방향 구속탄성계수는 일정한 값을 보이는 집단과 양분된 (bisected) 값을 보이는 집단으로 나누어진다: (1) 모래부피비가 0.2이하이거나 0.8인 시료는 유사고무거동과 유사모래거동을 보이므로 고무-모래 입자 크기비에 상관없이 횡방향 구속탄성계수는 일정한 값을 보였다. (2) 횡방향 구속탄성계수는

입자 크기비  $sr$  1을 경계로 서로 다른 값을 보였으며  $sr$  1이상에서 급격한 증가를 보였다. 이는 단단한 입자와 연약한 입자로 구성된 혼합재의 하중 전달이 두 입자의 크기비에 영향을 받기 때문이다. 큰 단단한 입자와 작은 연약한 입자로 이루어진 혼합재( $sr \geq 2.0$ )에서 주요 하중 전달은 연약한 입자가 변형을 일으키기 전에 단단한 입자를 통한 주요하중 전달 체계가 형성되는 반면에, 고무-모래 입자 크기비가 1.0이하의 혼합재는 고무 입자의 찌그러짐에 의한 큰 변형이 발생한 이후 모래 입자의 접촉에 의한 새로운 하중 전달 체계가 형성되기 때문이다.

#### 4.4 미소변형 전단 탄성계수에 대한 입자크기비 및 모래부피비 효과

그림 14는 연직방향 유효 응력 640kPa에서의 크기비에 따른 모든 시료의 전단탄성계수를 보여준다. 모래부피비가 0.2이하인 시료의 미소변형 전단탄성계수는 유사고무거동을 보이며 고무-모래 입자 크기비에 상관없이 거의 일정한 값을 보인다. 모래부피비가 증가함에 따라 미소변형 전단탄성계수는 크기비에 따라 아래로 옹골한 형태를 보인다. 입자 크기비 1 근처의 시료가 가장 느슨한 패킹(가장 낮은 강성)을 형성하여 가장 작은 미소변형 전단탄성계수 값을 보인다. 이는 고무-모래 입자 크기비가 감소하거나( $rubber\ size \ll sand\ size$ ) 증가함에 따라( $rubber\ size \gg sand\ size$ ) 접촉에 따른 강성이 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 모래부피비가 증가함에 따라 더욱 명확하게 나타난다.

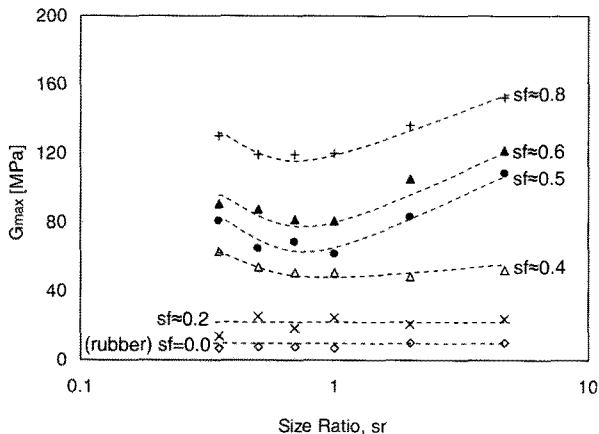


그림 14. 수직 유효 응력 640kPa에서의 크기비에 따른 전단탄성계수  $G_{max}$

## 5. 요약 및 결론

중간 변형 및 미소변형 수준에서의 강-연성 혼합재의 강성 특성을 분석하였다. 다양한 고무-모래 입자 크기비 및 모래부피비를 가지는 시료에 대하여 미소 변형의 전단파 전과 및  $K_0$  상태의 중간 응력 변형 시험을 실시하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 고무-모래 입자크기비에 상관 없이 강-연성 혼합재의 강성은 모래부피비가 증가함에 따라 증가하나 미소 및 중간 변형 강성은 모래부피비에 따라 선형 관계를 가지지는 않는다.
- (2) 강-연성 혼합재의 미소변형 거동은 모래부피비에 따라 유사고무거동과 유사모래거동 집단으로 나눌 수 있으며,  $G_{max} = \Lambda(\sigma'_{v0}/kPa)^\zeta$  관계에서 모든 입자크기비 시료에 대하여 모래부피비  $sf = 0.4 \sim 0.6$  시료에서  $\Lambda$  계수의 급격한 증가와  $\zeta$  지수의 최대값이 관찰되었다. 또한 전이 혼합재는 구속 응력에 매우 민감한 거동을 보였다.
- (3) 하중 재하에 따라 연약한 고무 입자는 쉽게 찌그러지기 때문에 강-연성 혼합재의 최소 간극율을 보이는 모래부피비는 작용 응력 크기에 영향을 받으며 연직방향 유효 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.
- (4) 미소 변형 전단탄성계수는 입자들의 접촉 특성에 의해 영향을 받으며 혼합재 내에 작은 입자의 양이 증가할수록 접촉점 수 또는 접촉면적이 늘어나게 된다. 따라서 고무 입자 및 모래 입자의 크기 차이가 증가할수록 미소변형 전단 탄성계수는 큰 값을 가지며 이러한 경향은 모래부피비가 증가할수록 더욱 명확해 진다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-042-D00315)임을 밝히며 깊이 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. Ahmed, I. (1993), "Laboratory study on properties of rubber-soils", *Final Rep., Indiana Dept. of Transp., Joint Hwy., Res. Proj., Rep. No. FHWA/IN/JHRP-93/4*, Purdue Univ., West Lafayette, IN.

2. 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.
3. Aydilek, A. h., Madden, E. T., and Demirkan, M. M. (2006), "Field evaluation of a leachate collection system constructed with scrap tires", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(8), 990-1000.
4. Bosscher, P. J., Edil, T. B., and Kuraoka, S. (1997), "Design of highway embankments using tire chips", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 123(4), 295-304.
5. Dias, R. P., Teixeira, J. A., Mota, M. G., and Yelshin, A. I. (2004), "Particulate binary mixtures: dependence of packing porosity on particle size ratio", *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, 7912-7919.
6. Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (1994), "Engineering properties of tire chips and soil mixtures", *Geotech. Test. J.*, 17(4), 453-464.
7. Feng, Z. Y. and Sutter, K. G. (2000), "Dynamic properties of granulated rubber sand mixtures", *Geotech. Test. J.*, 23(3), 338-344.
8. Fernandez, A. L. (2000), Tomographic imaging the state of stress. Ph.D. thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
9. Foose, G. J., Benson, C. H., and Bosscher, P. J. (1996), "Sand reinforced with shredded waste tires", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 122(9), 760-767.
10. 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.
11. Ghazavi, M. and Sakhi, M. A. (2005), "Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand", *Int. J. Geomechanics*, 5(1), 58-65.
12. Guyon, E., Oger, L., and Plona, T. J. (1987), "Transport properties in sintered porous media composed of two particle sizes", *Journal of Applied Physics D: Applied Physics*, 20(12), 1637-1644.
13. Humphrey, D. N. and Eaton, R. A. (1995), "Field performance of tire chips as subgrade insulation for rural roads", *Proc., 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Low-Volume Roads*, 2, Transportation Research Board, Washington D.C., 77-86.
14. Lee, J. H., Salgado R., Bernal, A., and Lovell, C. W. (1999), "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 125(2), 132-141.
15. Lee, J. S., Dodds, J., and Santamarina, J. C. (2007), "Behavior of rigid-soft particle mixtures", *J. Materials in Civil Eng.*, 19(2), 179-184.
16. Liang, R. Y. and Lee, S. (1996), "Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixture", *Recycled Rubber, Aggregate, and Filler in Asphalt paving mixtures*, Transportation Research Board, No. 1530, Washington D.C., 18-24.
17. Masad, E., Taha, R., Ho., C., and Papagiannakis, T. (1996), "Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material", *Geotech. Test. J.*, 19(3), 297-304.
18. Moo-Young, H., Sellasie, K., Zeroka, D., and Sabnis, G. (2003), "Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction", *J. Environ. Eng.*, 129(10), 921-929.
19. Pamukcu, S. and Akbulut, S. (2006), "Thermoelastic enhancement of damping of sand using synthetic ground rubber", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(4), 501-510.
20. Poh, P. S. H. and Broms, B. B. (1995), "Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 9(1), 76-80.
21. Rowe, R. K. and McIsaac, R. (2005), "Clogging of tire shreds and gravel permeated with landfill leachate", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(6), 682-693.
22. Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., and Sandford, T. C. (1998). "Tire shreds as lightweight retaining wall backfill: active conditions", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 124(11), 1061-1070.
23. Vallejo, L. E. (2001), "Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures", *Can. Geotech. J.*, 38(5), 1097-1104.
24. Viggiani, G. and Atkinson, J. H. (1995), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, 45(1), 149-154.
25. Wu, W. Y., Benda, C., and Cauley, R. F. (1997), "Triaxial determination of shear strength of tire chips", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(5), 479-482.
26. Yang, S., Lohnes, R. A., and Kjartanson, B. H. (2002), "Mechanical properties of shredded tires", *Geotech. Test. J.*, 25(1), 44-52.
27. Youwai, S. and Bergado, D. (2003), "Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures", *Can. Geotech. J.*, 40(2), 254-264.
28. Zornberg, J. G., Sitar, N., and Mitchell, J. K. (1998), "Limit equilibrium as a basis for design of geosynthetic reinforced slopes", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(8), 684-698.
29. Zornberg, J. G., Christopher, B. R., and LaRocque, C. J. (2004a), "Application of tire bales in transportation projects", *Recycled Materials in Geotechnics*, ASCE Geotechnical Special Publication No.127, ASCE, 42-60.
30. Zornberg, J. G., Cabral, A., and Viratjandr, C. (2004b), "Behaviour of Tire Shred-Soil Mixtures", *Can. Geotech. J.*, 41(2), 227-241.

(접수일자 2008. 6. 3, 심사완료일 2008. 8. 18)