

# 반복하중 재하 시 모래-타이어칩 혼합토의 최대전단탄성계수 변화

## Maximum Shear Modulus of Sand - Tire Chip Mixtures under Repetitive $K_0$ Loading Conditions

류 병 옥<sup>1)</sup> · 박 정 희<sup>2)</sup> · 추 현 옥<sup>†</sup>

Byeonguk Ryu · Junghee Park · Hyunwook Choo

Received: November 4<sup>th</sup>, 2021; Revised: November 8<sup>th</sup>, 2021; Accepted: November 17<sup>th</sup>, 2021

**ABSTRACT** : This study investigated the changes in engineering characteristics of sand-tire chip mixtures during repetitive loading. To quantify the changes in the maximum shear modulus according to the tire chip content in the mixtures and the particle size ratio between sand particle and tire chip, the samples were prepared with tire chip content of TC = 0, 10, 20, 40, 60, and 100%, and the particle size ratios SR were also set to be SR = 0.44, 1.27, 1.87, and 4.00. The stress of the prepared sample was applied through a pneumatic cylinder. The experiment was conducted in the order of static loading (= 50 kPa), cyclic loading (= 50-150 kPa), static loading (= 400 kPa) and unloading. The stress applied to tested mixtures was controlled by a pressure panel and a pneumatic valve by using an air compressor. The shear wave velocity was measured during static and cyclic loadings by installing bender elements at the upper and lower caps of the mold. The results demonstrated that the change in maximum shear modulus of all tested materials with varying SR during repetitive loading is the most significant when TC ~ 40%. In addition, the mixture with smaller SR at a given TC shows greater increase in maximum shear modulus during repetitive loading.

**Keywords** : Rigid-soft mixture, Repetitive loading, Maximum shear modulus, Structural skeleton, Tire chip content

**요 지** : 본 연구의 목적은 모래와 타이어칩 혼합토의 반복하중조건 전후 공학적 특성 변화를 파악하는 것이다. 반복하중 시, 시료에 함유된 타이어칩 함량 및 모래와 타이어칩 입자 간의 크기비에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 정량화 하고자, 전체 중량 대비 타이어칩 중량을 0, 10, 20, 40, 60, 100%로 하여 시료를 조성하였으며, 타이어칩 평균입경 대비 모래의 평균입경(입자크기비)을 0.44, 1.27, 1.87, 4.00으로 설정하여 혼합토를 조성하였다. 초기 상대밀도 50%의 시료를 floating wall 형태의 몰드에 조성 후, 공기압 축기(air compressor), 압력 패널(pressure panel) 및 뉴메틱 밸브(pneumatic valve)를 이용하여 정하중 재하(=50kPa), 반복하중 재하(=50-150kPa), 정하중 재하(=400kPa) 및 제하 순으로 실험이 이루어 졌다. 위의 실험이 진행됨에 따라 시료의 침하량과 전단파속도를 측정하였다. 시험 결과, 모래-타이어칩 혼합토에 가해지는 반복하중은 시료를 이루는 입자 간 접촉을 타이어칩-타이어칩 또는 타이어칩-모래에서 모래-타이어칩 또는 모래-모래로 전환시켰으며, 이로 인해 타이어칩 함량 40%에서 가장 큰 최대전단탄성계수의 증가를 확인하였다. 또한 입자크기비가 감소함에 따라 동일 타이어칩 함량에서 반복하중 시 최대전단탄성계수 증가량은 증가하였다.

**주요어** : 강성-연성 혼합토, 반복하중, 최대전단탄성계수, 하중전달 구조, 타이어칩

## 1. 서 론

국내 자동차에 대한 수요는 2013년 84,000대에서 2019년 95,000대로 점진적으로 증가해왔다(Korea Automobile Manufacturers Association, 2020). 페타이어의 발생량 역시 이와 함께 증가하였으며, 2014년 약 340,000톤에서 2017년 기준 약 390,000톤으로 증가하였다(Korea Tire Manufacturers Association, 2017). 발생된 페타이어를 매립할 경우, 페타이어가 완전 분해될 때 까지 약 100년 이상의 기간이 걸린다. 또한 소각의 경우에도 아황산가스 및 일산화탄소 등 유독가

스가 배출될 위험성이 존재한다. 이러한 환경적 위험에 따라, 페타이어는 다른 자원으로써 재활용하는 것이 바람직하다.

타이어칩은 모래와 혼합되어 고속도로, 제방 등 토목 구조물 건설에 사용된다(Lee et al., 2010). 이러한 구조물은 다른 토목구조물과 마찬가지로 교통 하중, 바람 등 다양한 반복적인 하중 조건에 장기적으로 노출된다. 하지만 기존의 연구는 정적인 하중 조건에서 모래 - 타이어칩 혼합토의 공학적 거동 분석이 주를 이루었다. 일부 연구자에 의해 행해진 반복 하중 조건 하에서의 실험은 반복하중 횟수가 적고 실험 조건이 제한적이었으며, 그로 인해 시료의 장기적 거

1) Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyung Hee Univ.

2) Research Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.

† Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ. (Corresponding Author : choohw@hanyang.ac.kr)

동 특성을 파악하기에 한계가 있다(Sheikh et al., 2013; Anbazhagan et al., 2017). 정적인 응력 상태에서 행해진 선행 연구에 따르면, 모래-타이어칩 혼합토에서 타이어칩의 함량 및 입자크기비에 따라 시료의 공학적 특성이 변화하는 것으로 알려졌다(Rao & Dutta, 2006; Lee et al., 2010). 최대전단탄성계수는 실제 설계 정수로서 사용되며, 시료의 공학적 특성을 판단하는 중요한 인자이다. 또한 반복하중 조건에서 누적된 소성 변형률을 예측하는 것은 설계기준에 있어서 중요한 부분을 차지한다(Chong & Santamarina, 2016). 따라서 본 연구는 장기적 반복하중에 노출된 모래-타이어칩 혼합토의 변형률 및 최대전단탄성계수의 변화를 파악하고자 한다. 본 연구에 이용된 시료들의 타이어칩 함량을 0, 10, 20, 40, 60, 100%로 다양화 하였으며, 타이어칩 입자와 모래 입자 간의 입자크기비 역시 0.44, 1.27, 1.87, 4.00으로 설정하였다. 반복하중에 의한 시료들의 타이어칩 함량 및 입자크기비에 따른 공학적 특성 변화를 충분히 반영하기 위해, 시료에 가해지는 최대 반복하중의 횟수  $N = 10^4$ 로 설정하였다.

## 2. 선행 이론

모래 입자로 이루어진 시료는 타이어칩으로 이루어진 시료에 비해 높은 강성을 가지고 있다(Ghazavi, 2004; Masad et al., 1996). 따라서 모래-타이어칩 혼합토에서 타이어칩의 함량이 증가할수록 동일한 응력 조건에서 더 높은 변형률과 더 낮은 최대전단탄성계수를 가진다(Rouhanifar et al., 2021; Marto et al., 2013; Lee et al., 2010; Lee et al., 2007; Bergado et al., 2005; Feng & Sutter, 2000). 이러한 경향은 시료에 함유된 타이어칩 함량(TC, tire chip content)이 증가함에 따라, 타이어칩이 모래 입자 사이에 위치하여 모래 입자 간 직접 접촉을 방해할 확률이 증가하기 때문인 것으로 판단된다(Evans & Valdes, 2011). 따라서 타이어칩 함량이 비교적 낮을 때는 모래입자가 시료의 하중 전달구조의 주요한 역할을 하여, 비교적 모래입자와 유사한 거동을 보인다. 반면 타이어칩 함량이 비교적 높은 조건의 시료에서는 타이어칩이 시료의 하중 전달 구조의 대부분을 차지하고 있어, 타이어칩과 유사한 거동을 보이게 된다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2007). 추가적으로 시료의 타이어칩 함량이 40-60% 시료에서 하중의 증가에 따라 시료의 하중전달구조를 이루는 주요한 입자가 타이어칩에서 모래로 변화하는 전이지대를 보이며, 이러한 양상은 입자크기비와 상관없이 나타난다(Lee et al., 2010; Kim & Santamarina, 2008; Lee et al., 2007). 또한, 모래-타이어칩 혼합토를 이루는 타이어칩 입자크기가

모래 입자의 크기에 비해 클수록 모래 입자간 접촉수는 증가하는 양상을 보인다(Evans & Valdes, 2011). 따라서 동일한 타이어칩 함량이라도 입자크기비( $SR$  : diameter of tire chip / diameter of sand particle)가 큰 시료일수록 높은 강성을 가진다(Perez et al., 2017).

전단파속도는 시료의 강성이 클수록 높은 값을 가지며, 시료의 강성은 시료의 하중전달구조를 이루는 입자 간 접촉 양상 및 접촉 수에 영향을 받는다(Roesler, 1979; Choo & Burns, 2015). 시료의 접촉 양상과 접촉수는 시료의 초기 강성과 시료가 받는 하중에 따라 달라지며, 그에 따라 시료가 경험하는 하중에 의해 접촉 양상 및 접촉수 변화가 클수록 전단파속도의 변화 역시 크게 나타난다(Choo & Burns, 2015). 일반적으로 높은 강성을 가진 시료일수록 초기 전단파속도는 높은 값을 가지나 응력 증가에 의한 전단파속도의 변화량(증가량)은 낮은 초기 강성을 가진 시료에 비해 작다(Choo & Burns, 2015).

시료에 지속적으로 가해지는 반복하중은 시료의 소성변형을 야기시키며, 이는 시료의 접촉수 및 접촉 양상의 변화를 의미한다. 선행연구에 따르면 시료가 경험하는 반복하중의 횟수가 증가할수록, 시료의 소성변형은 축적된다(Kim et al., 2021; Park & Santamarina, 2020; Park dissertation, 2018; Madhusudhan et al., 2017). 특히 동일한 입자로 구성되며, 서로 다른 상대밀도를 가진 두 시료를 비교할 때, 낮은 상대밀도(또는 높은 간극비)를 가진 시료일수록 경험하는 반복하중의 횟수가 증가함에 따른 변형률 역시 크며, 전단파속도의 증가량 역시 크게 나타났다(Kim et al., 2021; Park dissertation, 2018; Kohji & Akihiko, 1990). 이러한 양상은 낮은 밀도를 가진 시료가 반복하중에 의해 모래입자간 접촉수의 증가량이 크게 나타난 것으로 판단할 수 있다.

## 3. 시료조성 및 실험방법

### 3.1 시험 시료 조성

시료의 조성은 서로 다른 입자 크기를 가진 네 종류의 모래(K2, K4, K5, K6)와 타이어칩을 이용하였다. 모래와 타이어칩의 물리적 특성은 Table 1에 정리하였다. Fig. 1(a)는 모래와 타이어칩의 입도분포곡선이다. 시료의 입자 크기비( $SR$ , Eq. (1))는 각각 0.44(K2-tire chip), 1.27(K4-tire chip), 1.87(K5-tire chip), 4.00(K6-tire chip)으로, 타이어칩 입자크기 대비 모래 입자의 크기가 작은 시료, 유사한 시료 그리고 큰 시료가 되도록 평균입경이 다양한 모래를 사용하였다.

Table 1. Physical properties of unmixed materials

Properties	Tire chip	K2 sand	K4 sand	K5 sand	K6 sand
$D_{50}$ (mm)	1.40	3.20	1.10	0.75	0.35
$C_u$	1.04	2.35	1.67	1.70	1.46
$G_s$	1.14	2.65	2.66	2.65	2.66
$e_{max}$	1.69	0.86	1.03	1.00	1.00
$e_{min}$	1.24	0.63	0.71 </tr		

Note:  $D_{50}$  = median grain size;  $C_u$  = coefficient of uniformity;  $G_s$  = specific gravity;  $e_{max}$  and  $e_{min}$  = maximum and minimum void ratios, respectively.

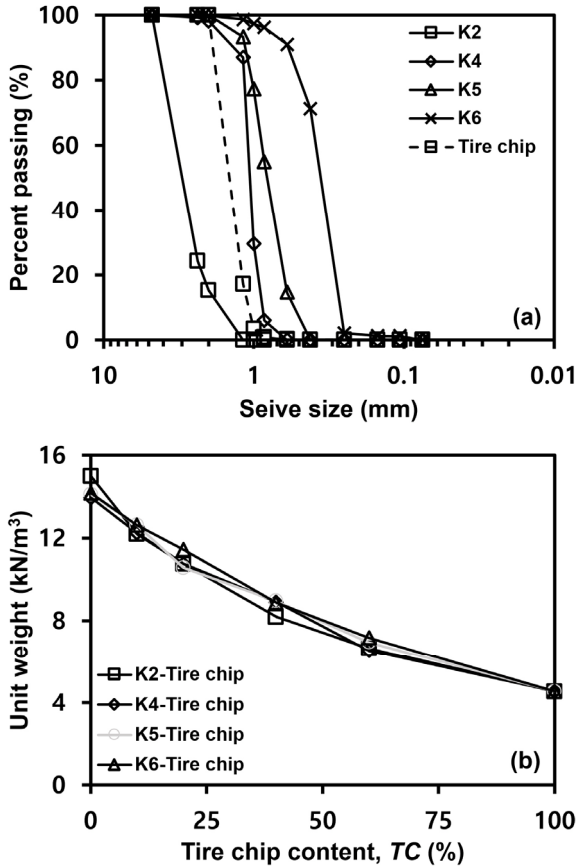


Fig. 1. (a) Particle distribution curve; and (b) variation of unit weight according to tire chip content

$$SR = \frac{\text{Median diameter sand}}{\text{Median diameter of tire chip}} \quad (1)$$

시료를 조성하는데 타이어칩 함량은 각각의 입자크기비에 따라서 0, 10, 20, 40, 60, 100%의 질량비로 조성하였다. 타이어칩 함량(TC)은 아래와 같이 정의된다.

$$TC = \frac{\text{Weight of tire chip}}{\text{Total specimen weight}} \quad (2)$$

초기 상대밀도( $D_r$ ) 50%가 되도록 낙사법을 이용해 모든 시료를 조성하였으며, Fig. 1(b)는 조성된 시료의 타이어칩 함량에 따른 단위중량 변화를 나타낸다. 타이어칩 함량이 증가함에 따라 단위중량이 감소함을 알 수 있으며, 동일한 타이어칩 함량에서 입자크기비와 관계없이 유사한 단위중량이 나타남을 알 수 있다(Fig. 1(b)).

### 3.2 시험 장치 및 방법

시료는 floating wall 형태의 몰드에 조성하였으며, 공기 압축기와 뉴메틱실린더를 이용하여 시료에 정하중 및 반복 하중을 가하였다(sample diameter = 47mm, sample height = 40mm). 몰드의 상하부 캡에 벤더엘리먼트를 설치하여 실험 중 전단파속도를 측정하였으며, 몰드에 LVDT를 설치하여 시료의 침하량을 측정하였다(Fig. 2).

실험은 다음과 같이 4단계로 이루어진다. 50kPa 까지 시료에 정하중( $\sigma_0 = 50kPa$ )을 가하였다. 이후 시료에 반복하중을 총  $10^4$ 회 가하였다. 반복하중 조건에서 시료에 가해지는 응력은 50-150kPa( $\Delta\sigma = 100kPa$ )로 설정하였다. 다음으로 400kPa까지 정하중 조건( $\sigma_f = 400kPa$ )에서 시료에 추가적으로 응력을 가하였다. 위의 실험이 진행됨에 따라 시료의 침하량과 전단파속도를 측정하였다.

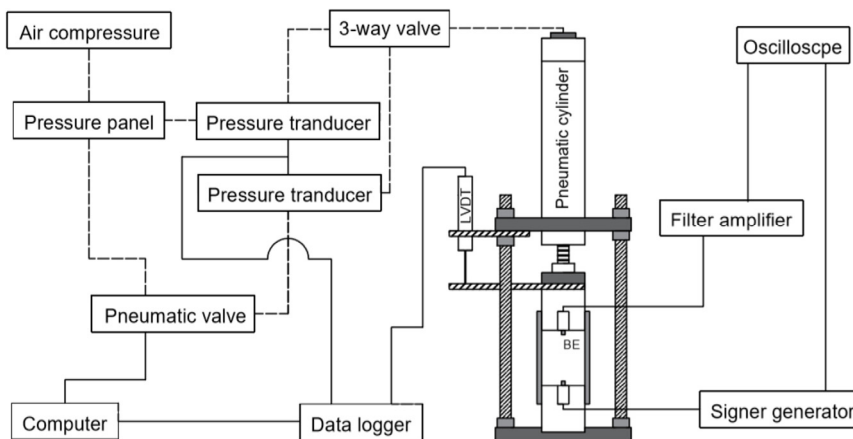


Fig. 2. Schematic drawing of test setup

## 4. 실험결과

### 4.1 정하중 및 반복하중에 따른 변형률의 변화

일반적으로 타이어칩은 모래에 비해 낮은 강성을 보인다 (Masad et al., 1996). 또한 시료에 함유된 타이어칩의 양이 증가함에 따라 하중전달구조에 참여하는 타이어칩이 증가하는 양상을 나타낸다(Lee et al., 2014). 따라서 타이어칩

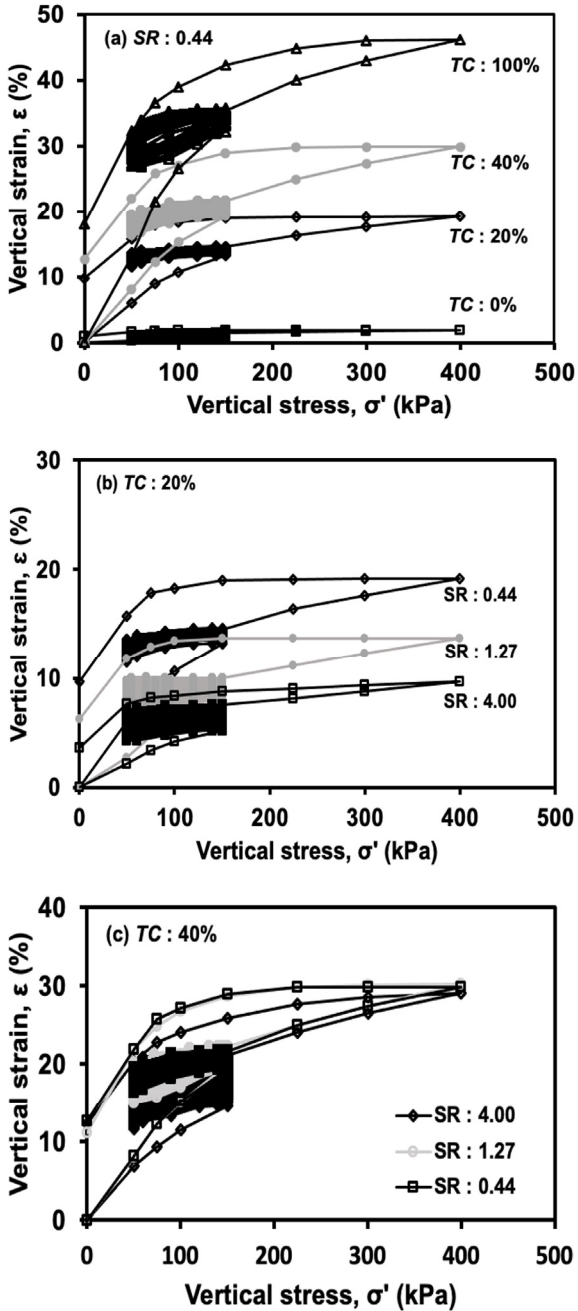


Fig. 3. Stress-strain curves of tested materials: (a) K4-tirechip mixture with varying tire chip content ( $TC$ ); (b) tested mixtures with size ratio ( $SR$ ) = 0.44, 1.27, and 4.00 at  $TC$  = 20%; and (c) mixtures at  $TC$  = 40%

함량( $TC$ )이 증가할수록, 동일한 정하중 조건에서 더 큰 변형률을 보인다(Fig. 3(a)). 타이어칩 함량 20% 조건에서 시료의 입자크기비( $SR$ )가 작을수록 동일 응력 하에서 더 큰 변형률을 보인다. 모래 입자에 비해 타이어칩 입자의 크기가 작을수록, 타이어칩이 모래입자 사이에 위치할 확률이 증가하며 따라서 모래입자 간의 직접접촉이 방해된다. 이로 인해 입자크기비가 작을수록 더 큰 변형률을 보인다(Fig. 3(b)). 하지만 타이어칩 함량 40%의 조건에서 변형률의 입자크기비에 따른 효과는 감소하는 양상을 보인다(Fig. 3(c)). 이러한 양상은 시료의 하중전달구조를 이루는 주요한 입자가 모래가 아닌 타이어칩으로 전환됐기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 3의 반복하중 시(50-150kPa,  $\Delta\sigma = 100kPa$ )의 변형률 변화를 바탕으로, Fig. 4는 입자크기비  $SR = 1.27$  및 4.00 시료의 반복하중 횟수에 따른 변형률을 타이어칩 함량에 따라 나타낸 그림이다. 반복하중의 횟수가 증가함에 따라 시료의 소성 변형은 증가하는 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 양상은 타이어칩 함량이 증가함에 따라 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

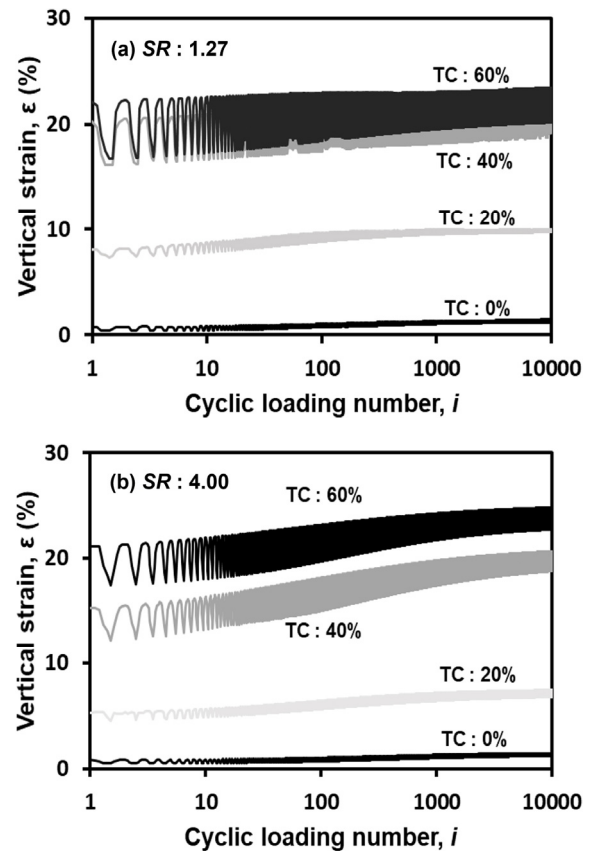


Fig. 4. Variation of vertical (or volumetric) strain according to cyclic loading number and tire chip content: (a) mixtures with size ratio = 1.27; and (b) mixtures with size ratio = 4.00

## 4.2 연직 응력에 따른 시료의 전단파속도의 변화

Fig. 5(a)는 실험 과정에 걸쳐서 입자크기비  $SR = 4.00$ 인 시료의 다양한 타이어칩 함량에 대하여 시료의 하중 조건(정하중( $\sigma_0 = 50kPa$ ), 반복하중( $\Delta\sigma = 100kPa$ ), 정하중( $\sigma_f = 400kPa$ ))에 따라 측정된 전단파속도 ( $V_s$ )를 나타낸 것이다. 정하중 조건에서 시료에 포함된 타이어칩 함량이 증가할수록 측정된 전단파속도는 감소하는 경향을 보였다(Kim & Santamarina, 2008; Lee et al., 2007). 시료의 전단파속도는 시료를 이루는 입자들의 특성, 입자간 접촉수 및 접촉 양상에 영향을 받는다(Lee et al., 2010; Lee et al., 2007). 일반적으로 시료의 강성이 클수록, 전단파속도는 빠르게 나타난다. 따라서 모래-타이어칩 혼합토의 강성은 하중전달구조에 참여하는 모래입자의 비율이 증가할수록 증가하는 양상을 보인다(Lee et al., 2010). 시료의 타이어칩 함량 증가에 따른 전단파속도의 감소는 따라서 시료에 함유된 타이어칩 함량이 증가함에 따라, 하중전달구조에 참여하는 모래입자의 비율이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

반복하중 재하 전 조건에서 동일한 타이어칩조건에서 입자크기비가 서로 다른 시료의 경우, 입자크기비가 클수록 전단파속도는 증가하는 양상을 보인다(Fig. 5(b)). 이는 앞

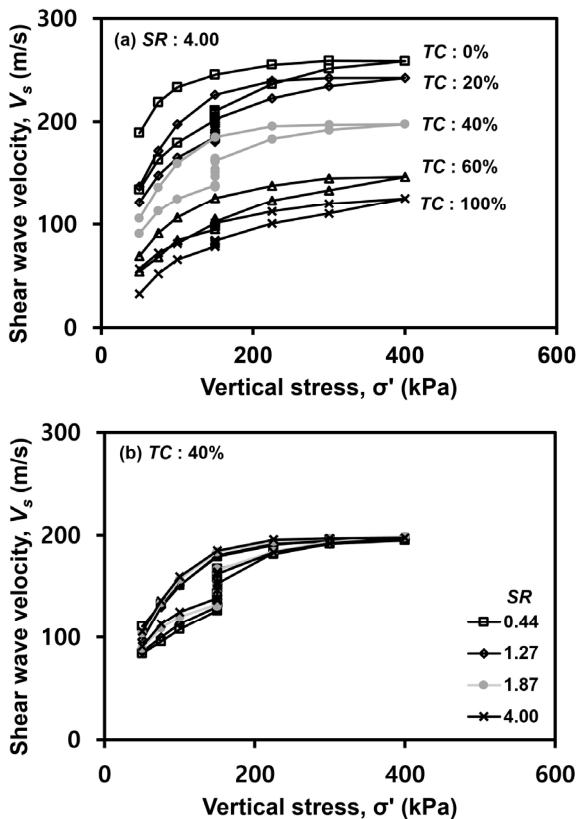


Fig. 5. Variation of Shear wave velocity according to vertical effective stress curves: (a) effect of different tire chip contents; and (b) effect of different size ratios

서 언급한 것처럼, 모래 입자에 비해 타이어칩의 입자 크기가 작을수록, 타이어칩 입자가 모래 입자간 접촉을 효과적으로 방해하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 입자크기비에 의한 효과는 반복하중이후 감소하는 것을 볼 수 있다(Fig. 5(b)).

## 4.3 반복하중 횟수에 따른 시료의 전단파속도 변화

Fig. 6은 다양한 타이어칩 함량을 지닌 입자크기비  $SR = 4.00$ 인 시료의 반복하중 횟수에 따른 전단파속도 변화를 나타낸 그림이다. 타이어칩 함량에 관계없이 반복하중 횟수가 증가함에 따라 시료의 전단파속도는 증가하는 양상을 보인다. 시료가 반복하중을 받는 동안 측정된 전단파속도는 모두 동일한 응력( $= 150kPa$ ) 하에서 측정되었으므로, 시료의 전단파속도 증가는 동일한 응력 조건 하에서 시료의 강성이 증가하였다는 것을 의미한다. 시료의 강성은 앞서 언급한 것처럼 시료를 구성하는 입자 간 접촉 양상 및 접촉수에 영향을 받음으로, 반복하중이 본 연구에서 사용된 모래-타이어칩 혼합토의 입자 간 접촉수 및 접촉 양상을 변화시키는 것으로 판단할 수 있다.

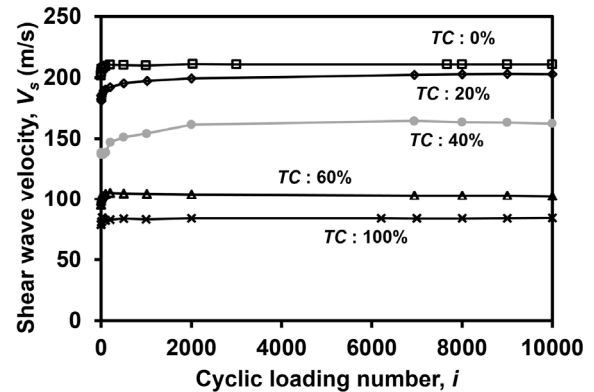


Fig. 6. Variation of shear wave velocity of  $SR = 4$  mixtures with varying tire chip contents according to cyclic loading number

## 5. 분석 및 고찰

### 5.1 타이어칩 함량 및 입자크기비에 따른 입자간 접촉 양상의 변화

시료의 강성은 시료의 압축계수( $C_c$ )에 영향을 끼치며, 일반적으로 높은 강성을 가진 시료일수록 더 낮은 압축계수를 가진다(Das & Bhowmik, 2020; Holtz et al., 2011; Mitchell & Soga, 2005). Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 반복하중 전후 조건에서 입자크기비  $SR = 0.44$ 와  $1.27$ 인 시료의 타이어칩 함량에 따른 압축계수를 나타낸다. 반복하중 조건 및 입자크기비에

관계없이 타이어칩 함량이 증가함에 따라 시료의 압축계수는 증가하는 양상을 보였다. 이는 모래 입자에 비해 낮은 강성을 지닌 타이어칩 함량 증가에 따른 입자 자체의 강성 감소 및 간극비 증가 때문인 것으로 판단된다. 또한, 타이어칩 함량이 증가할수록 상대적으로 큰 강성을 지닌 모래 입자 간 접촉을 타이어칩이 방해할 확률이 높아지고, 결국 시료의 전체적인 강성이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7(a)를 통해 반복하중 전 입자크기비(SR)가 상대적으로 큰 시료의 압축계수는 입자크기비가 상대적으로 작은 시료의 압축계수보다 크게 낮은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 타이어칩 입자보다 모래 입자의 크기가 클 경우, 동일 TC 기준 타이어칩 입자에 의한 모래 입자 간 접촉 방해가 더 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다(Evans & Valdes, 2011).

반복하중을 겪은 시료의 압축계수는 반복하중 이전보다 크게 감소함을 확인할 수 있다(Fig. 7(a)와 7(b) 비교). 이는 시료가 반복하중을 거치면서 간극비의 감소 및 타이어칩 입자 자체의 변형 및 수축으로 인한 모래-타이어칩 또는 모래-모래 간 접촉이 증가함을 의미한다. 또한 Fig. 7(b)를 통해, 반복하중 이후에는 입자크기비가 압축계수에 미치는 영향이 반복하중 이전보다 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 정하

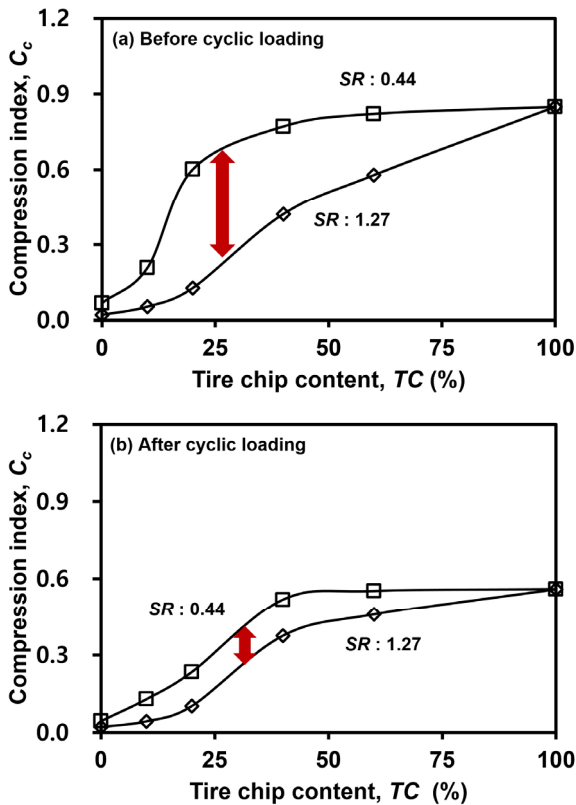


Fig. 7. Variation of compression index according to tire chip content: (a) compression index before cyclic loading; and (b) compression index after cyclic loading

중 조건 하에서 입자크기비가 작은 시료일수록 동일 타이어칩 하에서 하중전달구조에 참여하는 타이어칩 입자들이 많게 되며, 따라서 반복하중 동안 타이어칩 입자 자체의 변형 및 수축이 입자크기비가 작은 시료일수록 더 활발하게 발생하게 됨을 의미한다. 따라서 입자크기비가 작은 시료일수록 반복하중 시 타이어칩-타이어칩 또는 타이어칩-모래 접촉에서 모래-타이어칩 또는 모래-모래 입자로의 접촉 양상 변화가 더 많이 발생하는 것으로 판단 가능하다.

## 5.2 반복하중조건에서 타이어칩 함량 및 입자크기비에 따른 최대전단탄성계수의 변화

최대전단탄성계수( $G_{max}$ )는 시료의 밀도, 입자 간 접촉 및 시료가 받는 응력에 의해 영향을 받으며, 시료의 전단과속도( $V_s$ )와 밀도( $\rho$ )로, Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (3)$$

타이어칩 함량 및 입자크기비에 관계없이 시료에 가해지는 반복하중은 시료의 소성변형을 발생시키며, 이러한 소성변형은 시료의 밀도를 증가시킨다(Fig. 4). 또한, 반복하중은 입자 간 접촉수를 증가시키며 반복하중 횟수가 증가할수록 전단과속도가 증가하는 양상을 보였다(Fig. 6). 따라서 시료의 최대전단탄성계수는 반복하중 조건에서 증가하는 양상을 보인다. Fig. 8은 본 연구에 활용된 서로 다른 입자크기비(SR = 0.44, 1.27, 1.87, 4.00)를 갖는 시료에 대하여 타이어칩 함량에 따라 반복하중 횟수 1회 일 때 대비 반복하중 횟수  $10^4$ 일 때의 최대전단탄성계수의 증가 비율(Norm.  $\Delta G_{max}$ )을 나타낸 것이다. Norm.  $\Delta G_{max}$ 은 다음과 같이 정의된다.

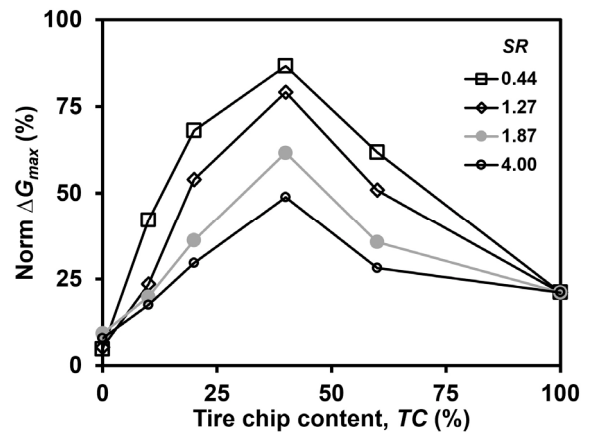


Fig. 8. Variation of norm.  $\Delta G_{max}$  of tested materials with varying SR according to tire chip content

$$Norm. \Delta G_{max} = \frac{G_{max at i = 10000} - G_{max at i = 1}}{G_{max at i = 1}} \times 100 \quad (4)$$

여기서  $i$ 는 반복하중 횟수를 의미한다. 입자크기비와 관계없이 타이어칩 함량 40% 조건의 시료에서 최대전단탄성계수 증가 비율이 최대값을 보였다(Fig. 8). 이는 반복하중 조건 전후의 타이어칩 함량에 따른 변형률 및 압축계수( $C_c$ )의 변화를 고려하여 판단 가능하다. 반복하중에 의해 시료의 압축계수는 감소하는 양상을 보였으며(Fig. 7), 이는 입자간 접촉 양상의 변화 및 입자 간 접촉수 증가를 의미한다. 앞서 서술하였듯, 모래-타이어칩 혼합토는 반복하중에 의해 타이어칩-타이어칩 접촉 또는 타이어칩-모래 접촉이 모래-타이어칩 접촉 또는 모래-모래 입자 간의 접촉으로 입자 간 주된 접촉 양상 변화가 발생한다. 모래 입자에 비해 타이어칩 입자 자체의 강성이 매우 작음으로, 시료의 하중전달구조를 이루는 입자 간 접촉 중 모래입자의 참여 비율이 높을수록 더 높은 최대전단탄성계수를 가진다. 최대전단탄성계수 증가비율이 40%에서 가장 높은 것은 타이어칩 함량 40%의 시료에서 타이어칩-타이어칩 또는 타이어칩-모래 접촉에서 모래-타이어칩 또는 모래-모래로의 접촉 양상 변화가 가장 많이 일어났기 때문인 것으로 보인다. 따라서 반복하중 조건에서 모래-타이어칩 혼합토의 강성 증가는 입자 간 접촉수 증가 보다 입자 간 접촉 양상의 변화인 것으로 판단된다(Perez et al., 2016).

기존 정적인 하중 조건에서 이뤄진 시험결과에 따르면(Lee et al., 2014; Lee et al., 2010; Kim & Santamarina, 2008; Lee et al., 2007), 모래-타이어칩 혼합토 하중전달구조의 전이지대(타이어칩 위주의 접촉(tire chip-tire chip and/or tire chip-sand)이 모래 입자 위주의 접촉(sand-tire chip and/or sand-sand)으로 변화)가 타이어칩 함량 40-60% 구간에서 발생한다고 하였다. 본 연구결과 역시, Norm.  $\Delta G_{max}$ 가 타이어칩 함량 40%에서 최고점을 보임으로, 선행 연구결과와 유사하다. 하지만 기존의 연구는 정적 응력 증가에 따른 접촉 양상의 변화인 반면, 본 연구의 결과는 동일 응력 조건 하에서 하중의 재하-제하 반복(반복하중) 과정에 의해 접촉 양상의 변화가 발생한다는 점에서 차이가 있다.

Norm.  $\Delta G_{max}$ 는 동일 타이어칩 함량비에서 입자크기비가 작을수록 더 큰 값을 보였다(Fig. 8). 앞서 Fig. 7의 압축계수 결과와 유사하게, 정하중 조건 하에서 입자크기비(SR)가 작을수록 타이어칩의 하중전달구조 참여율이 높게 된다. 따라서 반복하중 시, SR이 작은 시료의 경우 상대적으로 많은 하중을 분담하던 타이어칩 자체의 변형 및 수축이 활발해지며, 이로 인해 반복하중 시 하중전달구조에 참여하는 모래 입자 간 접촉수 증가 및 전단파속도 증가가 효과적으로 일

어나는 것으로 판단된다. 반면 SR이 상대적으로 큰 시료의 경우, 정적인 하중 조건에서 모래 입자 사이의 접촉수가 많아 반복하중에 의해 하중전달구조에 참여하는 모래 입자의 비율 증가가 크지 않는 것으로 판단된다. 이러한 이유로 측정된 전단파속도는 정적인 하중 조건에서 SR이 커질수록 증가한 반면, 반복하중 이후에는 SR의 효과가 사라진 것으로 판단된다(Fig. 5(b)).

### 5.3 반복하중 횟수에 따른 최대전단탄성계수 증가

반복하중 시의 최대전단탄성계수 증가량은 입자크기비가 작은 시료가 가장 컸으므로(Fig. 8), SR = 0.44 시료에 대해 순수 모래의 반복하중 시 최대전단탄성계수 증가량 대비 SR = 0.44 혼합토의 최대탄성계수 증가량의 변화량을 비교하였다(Fig. 9). 타이어칩 함량과 관계없이 모든 시료는 반복하중 시 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )가 증가하였다. 순수 모래에 비해 타이어칩이 혼입된 시료의 경우 반복하중 횟수 증가에 따른  $G_{max}$  증가가 확인하였으며, 특히 타이어칩 함량 10, 20% 조건의 시료의 경우 반복하중 횟수가 증가함에 따라 순수 모래의 최대전단탄성계수에 수렴하는 것을 확인할 수 있다: 1) 타이어칩 함량 10%인 시료의 경우, 시료가 500회의 반복하중을 경험하였을 때, 타이어칩 함량 0%의 최대전단탄성계수와 매우 유사한 값을 가진 것으로 나타났으며; 2) 타이어칩 함량 20%인 시료의 경우, 약 2,000회의 반복하중 이후, 순수 모래의  $G_{max}$ 와 매우 유사한 값을 나타냈다(Fig. 9). 이는 경성 재료인 모래와 연성 재료인 타이어칩을 혼입하여 만든 시료가 단단한 입자로 이루어진 시료보다 초기 낮은 강성을 가지고 있음에도 불구하고, 충분한 다짐에너지를 받는다면, 단단한 입자만으로 이루어진 시료의 최대전단탄성계수에 근접할 수 있다는 것을 보여 준다. 그러나 이러한 결과는 특정 입자크기비, 특정 상대밀도 및 일정한 반복하중 크기 등 제한된 상황에서 도출된 결과이

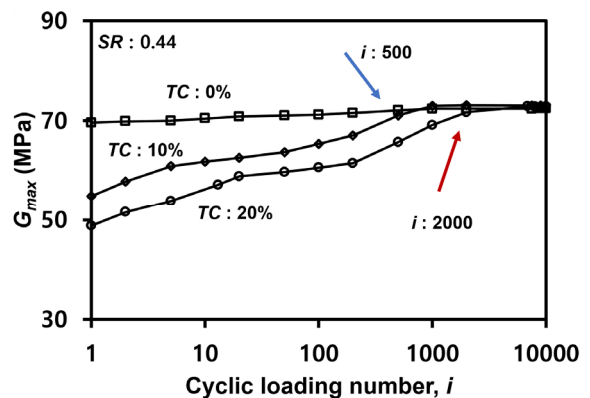


Fig. 9. Variation of maximum shear modulus of mixture with SR = 0.44 according to cyclic loading number

다. 따라서 모래-타이어칩 혼합토의 최대전단탄성계수의 증가는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 5.4 모래-타이어칩 혼합토의 전단파속도 보정계수 $\alpha$ , $\beta$ 간 관계

단단한 입자로만 이루어진 시료(일반 흙)에서 응력과 전단파속도( $V_s$ )는 아래의 관계를 가진다(Roesler, 1979; Santamarina et al., 2001; Choo & Burns, 2015).

$$V_s = \alpha \left( \frac{\sigma'}{1 \text{ kPa}} \right)^\beta \quad (5)$$

Eq. (5)에 나타난  $\sigma'$ 는 시료가 받는 연직 응력을 의미한다.  $\alpha$ 는 시료에 가해지는 유효응력이 1kPa 일 때 시료의 전단파속도를 의미하며,  $\beta$ 는 시료의 하중에 따른 시료의 민감한 정도를 의미한다.  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 시료의 입자간 접촉 방식에 영향을 받으며 일반적으로 강성이 높은 시료일수록 높은  $\alpha$ 와 낮은  $\beta$ 를 가진다. Fig. 10은 각각의 타이어칩 함량에 따른  $\alpha$ ,  $\beta$  간 관계를 입자크기비에 따라 나타낸 것이다. 입자크기 및 타이어칩 함량에 관계없이 반복하중을 경험한 시료가 경험하지 않은 시료에 비해 더 높은  $\alpha$ 와 더 낮은  $\beta$ 를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 양상은 반복하중이 시료의 입자간

접촉수 증가 및 입자간 접촉 양상의 변화를 통하여 시료의 강성이 증가되었기 때문인 것으로 판단가능하다. 각 그림에 포함된 점선들은 단단한 입자로 이루어진 시료의  $\alpha$ 에 대한  $\beta$ 의 관계를 나타낸 것이다(Ku et al., 2017; Santamarina et al., 2001). 입자크기비 및 타이어칩 함량과 관계없이 모래-타이어칩 혼합토는 단단한 입자로만 이루어진 시료와 유사한 경향성을 보임을 나타내었다. 또한 이러한 경향성은 반복하중 전 후로도 변하지 않음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구는 반복하중 조건에서 모래와 타이어칩 혼합토의 변형률과 최대전단탄성계수의 변화를 분석하기 위해 수행되었다. 모래와 타이어칩 간 입자크기비에 의한 효과를 고려하기 위해, 입자 크기비 SR = 4.00, 1.27, 1.87, 0.44의 시료를 조성하여 연구를 수행하였다. 또한 시료의 타이어칩 함량에 의한 영향을 고려하기 위해 타이어칩 함량을 TC = 0, 10, 20, 40, 60, 100%로 다양화하였다. 반복하중으로 인한 시료의 변형을 충분히 야기시키기 위해, 10<sup>4</sup>회의 반복하중을 시료에 가하였다. 실험 결과를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 모래-타이어칩 혼합토에 가해지는 반복하중은 시료를 이루는 입자간 접촉을 타이어칩-타이어칩 또는 타이어칩-모래에서 모래-타이어칩 그리고 모래-모래로 전환시킨다. 이러한 경향은 모래와 타이어칩의 입자크기비와 관계없이 타이어칩 함량 40%에서 가장 활발하게 일어나는 것으로 판단된다. 또한 입자간 접촉의 변화는 타이어칩에 비해 모래의 입자 크기가 클수록 효과적으로 일어난다.
- (2) 모래-타이어칩 혼합토가 반복하중에 의해 강성이 증가함에 따라 압축계수는 감소하는 경향을 보인다. 압축계수의 감소는 타이어칩에 비해 모래 입자의 크기가 작을수록 크게 발생하며, 이는 입자크기비가 작을수록 반복하중 시 모래 입자간의 접촉이 더 많이 증가함을 의미한다.
- (3) 모래와 타이어칩의 혼합토에 가해지는 반복하중의 횟수가 증가할수록 최대전단탄성계수 역시 증가하는 양상을 보인다. 특히 입자크기비 0.44, 타이어칩 함량 10%, 20% 및 반복하중의 크기 100kPa 등 특정 조건의 시료에서 혼합토의 최대전단탄성계수는 반복하중이 진행됨에 따라 모래입자로만 이루어진 시료의 최대전단탄성계수와 유사한 값으로 증가할 수 있다.

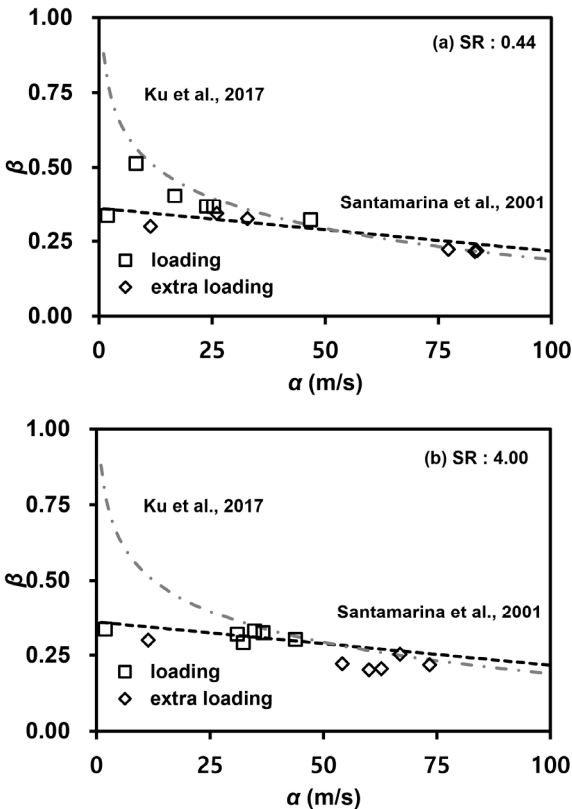


Fig. 10. Relationship between  $V_s$  model parameters: (a) mixture with SR = 0.44; and (b) mixture with SR = 4.00



- (4) 모래-타이어칩 혼합토에 가해지는 반복하중은 시료의 강성을 증가시켜, 반복하중 경험 전 시료에 비해 경험 후의 시료가 더 높은  $\alpha$ 와 낮은  $\beta$ 를 가진다. 또한 혼합토의 전단파속도 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 와의 관계는, 단단한 입자로 이루어진 일반적인 흙의  $\alpha$ ,  $\beta$ 와의 관계와 매우 유사한 경향을 가진다. 이러한 경향은 모래-타이어칩 혼합토의 입자크기비 및 타이어칩 함량, 반복하중 유무와 관계없이 나타난다.
- (5) 본 연구는 정하중( $\sigma_0$ )과 반복하중( $\Delta\sigma$ )의 크기를 각각 50kPa과 100kPa로 고정하여 다양한 실험을 진행하였다. 하지만 실제 모래-타이어칩 혼합토가 경험할 수 있는 현장의 응력 조건은 매우 다양하므로 추후 추가적인 실험 및 연구 진행이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(2019R1C1C1005310) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Anbazhagan, P., Manohar, D. R. and Rohit, D. (2017), Influence of size of granulated rubber and tyre chips on the shear strength characteristics of sand-rubber mix, *Geomechanics and Geoengineering : An International Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 266~278.
- Bergado, D. T., Youwai, S. and Rittirong, A. (2005), Strength and deformation characteristics of flat and cubical rubber tyre chip-sand mixtures, *Géotechnique*, Vol. 55, No. 8, pp. 603~606.
- Chong, S. H. and Santamarina, J. C. (2016), "Sands subjected to vertical repetitive loading under zero lateral strain: Accumulation models, Terminal densities, and Settelement", *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 2039~2046.
- Choo, H. and Burns, S. (2015), Shear wave velocity of granular mixtures of silica particles as a function of finer fraction, size ratios and void ratios, *Granular Matter*, Vol. 17, No. 5, pp. 567~578.
- Das, S. and Bhowmik, D. (2020), Small-strain dynamic behavior of sand and sand-crumbrubber mixture for different sizes of crumbrubber particle, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 33, No. 11, 04020334.
- Evans, T. and Valdes, J. (2011), The microstructure of particulate mixtures in one-dimensional compression: numerical studies, *Granular Matter*, Vol. 13, No. 5, pp. 657~669.
- Feng, Z. and Sutter, K. G. (2000), Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 338~344.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D. and Sheahan, T. C. (2011), *An introduction to geotechnical engineering* (2. ed., international ed. ed.). Upper Saddle River, NJ [u.a.], Pearson, pp. 357~359.
- Kim, H. - and Santamarina, J. C. (2008), Sand-rubber mixtures (large rubber chips). *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 10, pp. 1457~1466.
- Kim, S. Y., Park, J. and Lee, J. S. (2021), Coarse-fine mixtures subjected to repetitive Ko loading: Effects of fines fraction, particle shape, and size ratio, *Powder Technology*, Vol. 377, pp. 575~584.
- Kohji Tokimatus and Akihiko Uchida. (1990), Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity, *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 33~42.
- Ku, T., Subramanian, S., Moon, S. W. and Jung, J. (2017), Stress dependency of shear-wave velocity measurements in soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 143, No. 2. 04016092.
- Lee, C., Truong, Q. H., Lee, W. and Lee, J. (2010), Characteristics of Rubber-Sand Particle Mixtures according to Size Ratio, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(4), pp. 323~331.
- Lee, J. S., Dodds, J. and Santamarina, J. C. (2007), Behavior of rigid-soft particle mixtures, *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 19, No. 2, pp.179-184.
- Lee, C., Shin, H. and Lee, J. S. (2014), Behavior of sand-rubber particle mixtures: experimental observations and numerical simulations, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 38, No. 16, pp. 1651~1663.
- Madhusudhan, B. R., Boominathan, A. A. and Banerjee, S. (2017), Static and Large-Strain Dynamic Properties of Sand-Rubber Tire Shred Mixtures, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 10, 04017165.
- Marto, A., Latifi, N., Moradi, R., Oghabi, M. and Zolfeghari, S. Y. (2013), Shear properties of sand-tire chips mixtures, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 325~334.
- Masad, E., Taha, R., Ho, C. and Papagiannakis, T. (1996), Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a Lightweight Fill Material, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 19, No. 3, pp. 297~304.
- Ghazavi, M. (2004), Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber, *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 401~416.
- Mitchell, J.K. and Kenichi Soga, (2005), *Fundamentals of Soil Behavior* (third ed.), Hoboken, NJ, John Wiley & Sons Inc, pp. 325~335.
- Park, J. and Santamarina, J. C. (2020), Soil Response to Repetitive Changes in Pore-Water Pressure under Deviatoric Loading, *American Society of Civil Engineer*, Vol. 146, No. 5, 04020023.
- Park, J. (2017), Long-term response of soils subjected to repetitive mechanical load : Engineering implications, *Engineering Implication*, Ph D. disseration, Georgia Institute of Technology, Georgia, pp. 32~41.
- Perez, J. C., Kwok, C. Y. and Senetakis, K. (2016), Effect of rubber size on the behaviour of sand-rubber mixtures: A numerical investigation, *Computers and Geotechnics*, Vol. 80, pp. 199~214.

24. Perez, J. L., Kwok, C. Y. and Senetakis, K. (2017), Micro-mechanical analyses of the effect of rubber size and content on sand-rubber mixtures at the critical state, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 45, No. 2, pp. 81~97.
25. Rao, G. V. and Dutta, R. K. (2006), Compressibility and strength behavior of sand-tyre chip mixtures, *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 711~724.
26. Roesler, S. K. (1979), Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. 7, pp. 871~880.
27. Rouhanifar, S., Afrazi, M., Fakhimi, A. and Yazdani, M. (2021), Strength and deformation behaviour of sand-rubber mixture, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 1078~1099.
28. Santamarina, J. C., Kleinm K. A. and Fam. M. A. (2001), *Soils and Waves*, J. Wiley & Sons, Chichester; New York.
29. Sheikh, N. M., Mashiri, M. S., Vinod, J. S. and Tsang, H. (2013). Shear and compressibility behavior of sand-tire crumb mixtures, *American Society of Civil Engineers*, 25(10), pp. 1366~1374.
30. Korea Automobile Manufacturers Association (2020), [www.kama.or.kr](http://www.kama.or.kr)
31. Korea Tire Manufacturers Association (2017), <http://www.kotma.or.kr>