

# 섬유/모래로 보강된 미연소탄소탄소 고함량 플라이애쉬의 지반공학특성

## Geotechnical Characteristics of Fly Ash Containing High Content of Unburned Carbons Reinforced with Fibers and Sand

윤 보 영<sup>1</sup>      Yoon, Boyeong      이 창 호<sup>2</sup>      Lee, Changho  
추 현 욱<sup>3</sup>      Choo, Hyunwook      이 우 진<sup>4</sup>      Lee, Woojin

### Abstract

Most of high carbon fly ashes (HCFA) are discarded in landfills with high costs due to low recycling rate. This study aims to explore the geotechnical behaviors of HCFA mixtures reinforced with fiber and sand. A series of compaction test, unconfined compressive strength test and modified 1D consolidation test with bender element were performed. Specimens were prepared at their optimal moisture contents based on the results of compaction tests. The results of this study demonstrate that the inclusion of fibers to the matrix of HCFA increases unconfined compressive strength (UCS), strain at UCS, and maximum shear modulus ( $G_{max}$ ) at a given void ratio. Reinforcement with sand increases UCS of HCFA; while the strain at UCS is irrelevant with sand fractions. Sand particles may disrupt the direct contacts between HCFA particles at low sand content, resulting in a decrease in  $G_{max}$ . However, it can be expected that the mixtures with sand content larger than 20% are in dense state; thus,  $G_{max}$  of HCFA reinforced with sand shows greater value than that of unreinforced HCFA compacted with the same energy. Regardless of types of reinforcement, the compression index ( $C_c$ ) of both fiber and sand reinforced HCFA is mainly determined by initial void ratio.

### 요 지

미연소탄소 함량이 높은 플라이애쉬(High carbon contents fly ash, HCFA)는 콘크리트 혼화재로의 사용이 부적합하여 대부분 매립되고 있다. 이에 본 연구는 미연소탄소함량이 높은 플라이애쉬의 지반공학적 활용 방안을 모색하기 위하여 폴리프로필렌섬유(Polypropylene fiber, PP fiber)와 모래로 보강하여 일축압축시험과 벤더엘리먼트가 설치된 일차원 수정 압축실험을 진행하였다. 섬유의 보강효과로 섬유비가 증가함에 따라 일축압축강도(UCS), 일축압축강도 시의 변형률과 동일 간극비 상에서의 최대전단탄성계수(Maximum Shear Modulus,  $G_{max}$ )가 증가하였다. 모래로 보강된 경우 혼합물의 UCS는 다소 증가하였으나 UCS 시의 변형률은 모래비의 영향을 받지 않았으며, 모래입자는 HCFA 입자간의 접촉을 방해하여 혼합물의  $G_{max}$ 를 감소시켰다. 그러나 20% 이상의 모래비에 대하여 동일 에너지로 다짐하였을 시, 조밀한 상태로 조성되며 그로 인한 보강 효과를 기대할 수 있었다. 섬유나 모래로 보강된 HCFA의 압축지수(Compression index,  $C_c$ )는 보강재의 종류와 관계없이 주로 초기 간극비에 의해 결정되었다.

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 전남대학교 해양토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Marine and Civil Engrg., Chonnam National Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수 (Member, Research Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-921-2086, Fax: +82-2-928-7656, choohw@gmail.com, Corresponding author, 교신저자)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

**Keywords** : Reinforced fly ash, Synthetic fibers, Unconfined compressive strength, Maximum shear modulus, Compression index

## 1. 서론

플라이애쉬(Fly Ash, FA)는 화력발전소에서 회수되는 미분말의 석탄회로 전체 석탄회 중 70~80%를 차지한다. 국내의 석탄회는 연간 800만 톤 이상 배출되고 있으며 전력수요의 증가 및 다른 에너지원에 비해 저렴한 원가로 인해 향후에도 석탄회의 발생량은 증가할 것으로 예상된다(Yoo, 2013). 미연소탄소 함량이 6% 미만의 플라이애쉬는 포졸란 반응(pozzolanic activity) 특성으로 인하여 포틀랜드 시멘트(Portland cement)의 대체제로써 시멘트나 콘크리트 산업에서 재활용이 가능하다. 그러나 국내 플라이애쉬의 미연소탄소 함량은 2~20% 정도로 변동이 심하며, 미연소탄소 함량이 6% 이상의 플라이애쉬는 포졸란반응의 저하, 콘크리트의 변색, 재료분리, AE제 흡착 등의 부작용(Freeman et al., 1997; Minnick, 1959)으로 인하여 콘크리트 산업분야에서의 재활용이 어려워 대부분 매립되고 있는 실정이다. 따라서 추가적 처리 없이 미연소탄소 함량이 높은 플라이애쉬의 재활용률을 높인다면, 매립량의 저감에 따른 환경문제 완화 및 한정된 자연 자원 보존이라는 이득을 기대할 수 있으며, 동시에 플라이애쉬 재활용 시장의 활성화에 따른 경제적 이익이 기대된다.

지지력의 증가 또는 침하량 억제를 목적으로 하는 원지반 보강공법에는 배수건조공법, 혼합처리공법, 보강공법 등이 있다(Im et al., 2012). 이 중 보강공법은 첨가되는 재료의 물성치들로 인하여 지반의 지지력을 증대시키는 방법으로 최근에는 단순하게 섬유를 섞어 보강 효과를 확인할 수 있는 무작위적으로 배열된(randomly distributed) 섬유를 이용한 지반보강에 대한 관심이 증가하고 있다. 섬유의 보강은 섬유의 직경, 길이, 섬유와 흙의 마찰정도와 섬유비에 영향을 받으며(Consoli et al., 2005; Ibraim and Fourmont, 2007; Maher and Gray, 1990; Makiuchi and Minegishi, 2001; Michalowski and Cermák, 2003; Michalowski and Zhao, 1996; Sadek et al., 2010), 보강면에 평행하게 발생할 수 있는 파괴 취약면을 제거할 수 있는 장점이 있다(Kumar et al., 2007; Maher and Ho, 1994; Tang et al., 2007; Yetimoglu and Salbas, 2003). 플라이애쉬에 섬유를 섞어 진행한 대부

분의 선행연구에서 섬유는 미연소탄소 양이 적은 플라이애쉬와 혼합되어 플라이애쉬의 포졸란반응과 함께 시멘트와 석회 등의 고화강도 증가를 보조하는 역할을 하였다. 플라이애쉬에 폴리에스테르(polyester)섬유를 보강한 경우, 섬유비 0.5% 이하의 섬유비에서는 혼합물의 다짐거동에 영향을 주지 않았으나 섬유비가 1.0% 이상이면 섬유비가 증가함에 따라 혼합물은 연성적인 거동을 보였다(Kaniraj and Gayathri, 2003). 폴리프로필렌(Polypropylene)섬유가 보강된 경우 섬유의 혼합은 다짐특성에 영향을 주지 않았으며, 섬유비가 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하였으나 탄성계수(E, modulus of elasticity)는 섬유비와 비선형관계를 보인다(Kumar and Singh, 2008). 그러나 섬유로 보강된 미연소탄소함량이 높은 플라이애쉬에 대한 연구는 미비한 실정이다.

플라이애쉬를 모래와 같은 조립질의 흙(coarse-textured soil)과 혼합하는 경우 미립자와 조립자로 구성되어있는 이원혼합물로서의 거동을 보인다(Campbell et al., 1983). 그러나 플라이애쉬와 모래의 혼합물에 대한 선행 연구는 플라이애쉬비에 따른 보수력(water holding capacity) 혹은 투수계수(hydraulic conductivity)에 대해서만 진행되었을 뿐(Chang et al., 1977; Jala and Goyal, 2006; Pandey and Singh, 2010) 여타의 지반공학적 특성에 대한 연구는 부족하다.

본 연구에서는 미연소탄소함량이 높은 플라이애쉬를 폴리프로필렌 섬유(Polypropylene fiber, PP) 및 모래와 혼합한 후 다짐시험, 일축압축시험과 벤티엘리먼트가 설치된 수정압밀시험을 실시하여, 보강된 플라이애쉬의 지반공학적 특성을 조사하고 그 효과를 파악하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 보강재의 종류에 따른 혼합물의 간극비

#### 2.1.1 섬유-플라이애쉬 혼합물(FB-HCFA mixture) 간극비

섬유(FB)-플라이애쉬(HCFA) 혼합물의 경우 간극비는 다음과 같다(Shukla et al., 2015):

$$e_{mixture} = \frac{G_{s,mixture} \gamma_w}{\gamma_{dr}} - 1 \quad (1)$$

여기서  $e_{mixture}$ 는 혼합물의 간극비;  $\gamma_{dr}$ 은 혼합물의 건조 단위중량;  $G_{s,mixture}$ 는 혼합물의 비중이며, 다음 식과 같다:

$$G_{s,mixture} = (1 + FC) \times \left( \frac{1}{G_{s,FA}} + \frac{FC}{G_{s,FB}} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서 FC는 섬유비(Fiber Content);  $G_{s,FA}$ 는 플라이애쉬의 비중;  $G_{s,FB}$ 는 섬유의 비중이다.

### 2.2.2 모래-플라이애쉬 혼합물(Sand-HCFA mixture) 간극비

모래(Sand)-플라이애쉬(HCFA)혼합물은 조립토와 세립토로 이루어져있는 이원혼합물이다. 이원혼합물의 거동은 조립토 혹은 세립토의 비율에 따라 달라지기때문에, 아래와 같이 기준이 되는 세립비(weight fraction of small particles, FS)를 정의한다(Chang et al., 2015; Choo et al., 2016; Thevanayagam et al., 2002). 이 때 세립비(FS)와 조립비(weight fraction of large particles, FL)는  $FS+FL=1$ 의 관계를 만족한다.

#### (1) 임계세립비(Critical small particles content, FS\*)

FS\*는 세립자의 비율이 0%에서 점차 증가하여 혼합물 내에서의 거동이 세립자들의 영향을 받기 시작하는 세립비를 말한다. 즉 FS\*는 혼합물 내 FS가 점차 증가하여 모래 입자들의 공극에 HCFA 입자들이 모두 채워지는 순간의 세립비를 의미하며, FS\* 이상의 세립비에 대해서는 HCFA 입자들이 혼합물의 거동에 영향을 미치지 시작한다.

#### (2) 한계세립비(Limit small particle content, FSL)

FS가 증가함에 따라 혼합물의 거동은 점차 HCFA 입자들의 영향을 크게 받으며 특정한 FS에서부터는 혼합물의 거동은 HCFA 입자들에 의해서만 결정되며, 이 때의 세립비를 한계세립비(FSL)라 정의한다.

FS(또는 FL)에 따라 전체 혼합물의 거동이 달라지기 때문에, 기존 연구자들은 새로운 간극비를 정의하여 이원혼합물의 거동을 파악하고자 하였다. 임계세립비(FS\*)보다 적은 FS로 조성된 혼합물의 경우 세립토 입자들

은 조립토 입자들 사이의 공극에 위치한다. 따라서 혼합물의 거동은 주로 조립토에 의해 결정되며, 이 때의 간극비는 세립자들의 부피를 공극에 포함시켜 계산한다. 반대로 한계세립비(FSL)보다 큰 세립비로 조성된 혼합물의 거동은 주로 세립토에 의해 결정된다. 이때의 간극비는 모래의 부피를 무시하여 계산하며 세립분 간극비(interfine void raio)라 정의한다(Choo et al., 2016):

$$e_f = \left[ 1 + \left( \frac{1}{FS} - 1 \right) \times \frac{G_{s,FA}}{G_{s,Sand}} \right] \times e \quad (3)$$

여기서  $e_f$ 는 세립분간극비;  $G_{s,Sand}$ 는 모래의 비중;  $e$ 는 전체간극비를 의미한다.

세립비가 임계세립비와 한계세립비 사이에 있는 경우 ( $FS^* < FS < FSL$ ) 혼합물의 거동은 HCFA와 모래에 모두 영향을 받기에 각각의 간극을 고려하여 식 (4)와 같이 계산한다. 이때의 간극비는 등가세립분 간극비(equivalent interfine void ratio)로 정의한다(Choo et al., 2016; Thevanayagam et al., 2002).

$$e_{f(eq)} = \frac{e}{FS + (1 - FS) / R_d^m} \quad (4)$$

이 때  $e_{f(eq)}$ 는 등가세립분 간극비;  $R_d^m$ 은 두 입자크기의 차이를 나타내는 상수로, 큰 입자의 평균 입경을 작은 입자의 평균 입경으로 나눈 값;  $m$ 은 보정상수로  $0 < m < 1$ 의 값을 갖는다.  $e_{f(eq)}$ 는  $m=0$  일 때 전체간극비( $e$ )와 같으며  $m=1$ 일 때 세립분 간극비( $e_f$ )와 유사한 값을 갖는다. 즉  $m$ 의 값이 커질수록 전체 혼합토의 거동에 미치는 모래의 영향이 작아짐을 의미한다.

### 2.2 전단파속도(Shear wave velocity) 특성

일반적으로 전단파는 입자의 접촉을 통하여 전파되기에 입자들 간의 접촉수(interparticle coordination number)와 접촉강성(interparticle contact stiffness)에 큰 영향을 받으며 유효응력과 멱함수(power function)의 관계를 갖는다(Santamarina et al., 2001):

$$V_s = AF_e \left( \frac{\sigma'_0}{1kPa} \right)^\beta \quad (5)$$

여기서  $F_e$ 는 간극비( $e$ )의 함수로 구형의 입자(round particles)와 모난 입자(angular particles)에 대하여 각각 다음과 같다(Hardin and Drnevich, 1972; Hardin and Richart, 1963):

$$F_e = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \quad (\text{round particles});$$

$$F_e = \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \quad (\text{angular particles}) \quad (6)$$

### 3. 시료 조성

#### 3.1 실험 재료

본 연구에서는 국내 6곳의 화력발전소에서 플라이애쉬 시료를 채집한 후, 미연소탄소 함량이 높은 플라이애쉬(HCFA)를 사용하기 위하여 XRF시험을 선행하여 감열감량(Loss on ignition, LOI)이 가장 높은 플라이애쉬를 사용하였다. 실험에 사용한 플라이애쉬는 실험 중 일어날 수 있는 고결반응을 미연에 방지하기 위하여 증류수로 수 차례 씻은 뒤 사용하였다. 본 연구에 사용된 HCFA의 감열감량(LOI)은 23.11%로 측정되었으며, 높은 미연소 탄소함량으로 인하여 HCFA의 비중( $G_s$ )은 1.91의 값을 보였다. 입자 및 동공크기 분석장치(Microtrac-UPA150)를 이용하여 입도분석을 실시하였다. HCFA의 평균입경( $D_{50}$ )은 0.014mm였고, 플라이애쉬의 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_{cur}$ )는 각각 5.25, 0.67으로 빈입도 분포를 보였다. 통일분류법(ASTM D2488, 2009)에 따라 사용된 HCFA는 ML로 분류되었다(Table 1).

HCFA의 보강을 위하여 섬유 및 인공사를 사용하였으며, 각 보강재의 종류를 동일하게 하여 보강재의 비율

Table 1. Index Properties of HCFA and sand

Properties	HCFA	Sand
Specific Gravity, $G_s$	1.91	2.65
$D_{10}$ (mm)	0.004	0.58
$D_{30}$ (mm)	0.007	0.70
$D_{50}$ (mm)	0.014	0.80
$D_{60}$ (mm)	0.021	0.86
Coefficient of uniformity, $C_u$	5.25	1.49
Coefficient of curvature, $C_{cur}$	0.67	0.94
Liquid Limit, LL (%)	39.8	-
Loss on ignition (%)	23.11	-

에 따른 효과만을 고려하였다. 섬유는 길이 6mm의 폴리프로필렌 섬유(PP fiber)(쥬나이콘소재)를 사용하였다. PP섬유는 흙이나 시멘트 산업에서 가장 널리 사용되는 섬유로 화학적으로 안정하고 높은 녹는점으로 인하여 온도에 대하여 안정하며 경제적인 것으로 알려져있다 (Fatahi et al., 2013; Maher and Ho, 1994). 사용된 섬유는 직경 40 $\mu$ m, 세장비(직경/길이) 150, 인장강도 360MPa (KS K 0412, 2005), 탄성계수 3.9GPa(KS K 0412, 2005)이며 건조감량은 0.4%이다.

본 연구에서는 모암을 파괴하여 만든 인공사를 HCFA 보강용 모래로 사용하였다. 사용된 모래는 각진정도(angularity)가 매우 크며, 비중(ASTM D854, 2014)은 2.65였다. 체 분석(ASTM D422, 2007)을 통하여 입도분석을 실시하였으며, 모래의 평균입경( $D_{50}$ )은 0.798mm로 HCFA의 평균입경인 0.014mm보다 모래의 평균입경이 약 57배 크게 측정되었다. 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_{cur}$ )는 1.49, 0.49로 빈입도 분포를 보였다(Table 1).

#### 3.2 보강재에 따른 플라이애쉬-보강재 혼합물 조성

보강재의 종류와 비율에 따른 HCFA의 거동을 확인하기 위하여 섬유함유비(fiber content, FC)와 조립토 함유비(fraction of large particles, FL)를 다음과 같이 정의하였다. FC는 식 (7)과 같이 섬유와 플라이애쉬의 건조중량의 비로 정의하였다(Kaniraj and Gayathri, 2003; Maher and Woods, 1990; Yetimoglu and Salbas, 2003):

$$FC(\%) = \frac{w_{fiber}}{w_{flyash}} \times 100(\%) \quad (7)$$

여기서  $w_{fiber}$ 는 건조된 섬유의 무게;  $w_{flyash}$ 는 건조된 HCFA의 무게를 의미한다.

FL은 모래의 무게와 총 혼합 시료의 무게의 비로 다음과 같이 정의하였다(Choo et al., 2015; Thevanayagam et al., 2002):

$$FL(\%) = \frac{w_{sand}}{w_{flyash} + w_{sand}} \times 100(\%) \quad (8)$$

여기서  $w_{sand}$ 는 건조된 모래의 무게를 의미한다. 식 (7)의 경우 분모항이 플라이애쉬의 무게인 반면, 식 (8)의

경우 분모항이 전체무계로 다르며, 이는 선행 연구자들의 정의 방법을 준용하기 위함이다.

Table 2와 같이 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0%의 총 5가지 섬유비(FC) 및 0, 5, 10, 20%의 4가지 모래비(FL)로 시료를 조성하여 혼합물의 거동을 섬유비와 모래비에 따라 비교하였다. PP섬유 혹은 모래와 HCFA를 균질하게 혼합하기 위하여 건조상태에서 혼합한 후 목표한 함수비에 해당하는 증류수를 2~3번에 나누어 섞어 혼합물을 만들었다. 일축압축시험과 일차원 압축실험을 위하여 동일한 다짐에너지로 각 3층으로 다짐하여 시료를 조성하였다. 일축압축강도 시험의 시료는 분리 가능한 몰드(split cell)를 사용하여 조성하였으며, 시료와 몰드 간의 분리가 용이하도록 몰드 내부를 테플론테이프로 코팅하였다. 일차원 압축실험의 경우 압밀셀에 직접 시료를 조성하여 실험을 진행하였다. 조성된 시료의 균질성을 확인하기 위해, 일부 시료를 깊이 별로 4등분하여 플라이애쉬-모래 혼합물의 경우 체분석을 실시하였으며, 플라이애쉬-섬유 혼합물의 경우 함수비를 측정하였다. 깊이 별로 비슷한 입도분포와 함수비를 얻었으며, 이를 통해 조성된 시료의 균질성을 확인하였다.

## 4. 실험방법

### 4.1 다짐시험

섬유 및 모래 보강에 따른 HCFA의 다짐거동 특성(최대전단위중량과 최적함수비등)을 알아보기 위하여 표준다짐시험(ASTM D698)을 실시하였다. 측정된 각 혼합물의 최적함수비를 기준으로 일축압축시험과 일차원 압축실험을 위한 시료를 조성하였다.

Table 2. Test Matrix

Type	Fly ash (g)	Fiber (g)	Total (g)	Water (g)
Fiber-HCFA	1000	0	1000	370
FC=0.1%	1000	1	1001	370
FC=0.3%		3	1003	371
FC=0.6%		6	1006	372
FC=1.0%		10	1010	374
Sand-HCFA		Fly ash (g)	Sand (g)	Total (g)
FL= 5%	950	50	1000	357
FL=10%	900	100		352
FL=20%	800	200		315

Note: FC=fiber content; FL=sand content

### 4.2 일축압축시험

ASTM D2166을 따라 일축압축시험(unconfined compression test)을 실시하였다. 직경 70mm, 높이 140mm의 원통형 몰드를 이용하여 시료를 조성하였으며, 1mm/min의 속도로 하중을 재하하면서 0.1초 단위로 하중-변형률의 관계를 얻었다. 수정단면적을 사용하여 응력-변형률 곡선을 얻은 후, 최대 응력을 일축압축강도(unconfined compressive strength, UCS)로 정의하였다.

### 4.3 수정 일차원 압축실험

응력에 따른 시료의 전단파속도를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 상부 및 하부에 벤더엘리먼트(bender element)

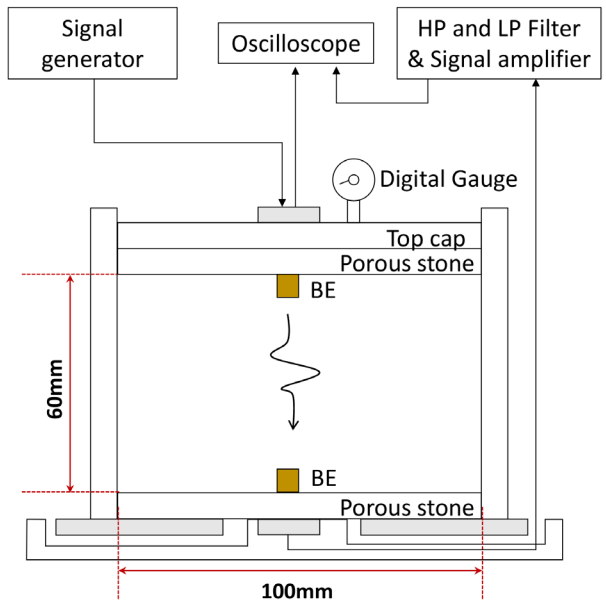


Fig. 1. Experimental setup for measuring both compressibility and shear wave velocity

가 설치된 수정압밀셀을 이용하여 일차원 압축실험을 실시하였다(Lee and Santamarina, 2005). 시료의 직경 및 높이는 각각 100mm, 60mm이다. 수직응력은 7-448kPa의 범위에서 재하하였으며, 각 단계별로 침하량과 전단파속도를 측정하였다. 파형발생기(33210A, Agilent)를 이용하여 주파수 20Hz, 진폭 10V의 구형파를 입력파로 사용하였다. 발생한 구형파는 시료를 통과한 후 필터(3364, Krohn-Hite)를 거쳐 오실로스코프(DSO5014A, Agilent)로 확인, 저장하였다. 측정된 전단파의 초동( $t_{arrival}$ )과 이동거리( $L_{tip-to-tip}$ )를 고려하여 전단파속도( $V_s=L_{tip-to-tip}/t_{arrival}$ )를 계산하였다. 계산된 전단파속도( $V_s$ ) 및 밀도( $\rho$ )를 이용하여 최대전단탄성계수( $G_{max}=\rho V_s^2$ )를 계산하였다.

## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 일축압축시험

Fig. 2는 일축압축시험으로 얻은 응력-변형률 관계이

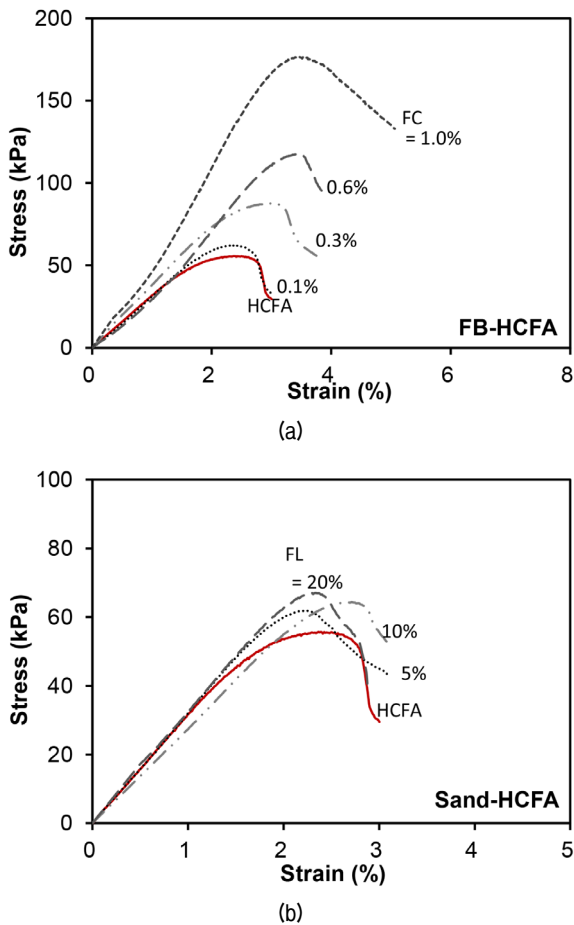


Fig. 2. Unconfined compression test results for (a) Fiber-HCFA mixture (b) Sand-HCFA mixture

다. Fig. 2(a)는 HCFA를 PP섬유로 보강한 경우이며(FB-HCFA), Fig. 2(b)는 모래로 보강한 경우이다(Sand-HCFA). 섬유로 보강한 경우, UCS(일축압축강도)는 섬유비가 증가함에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 모래로 보강한 경우, 모래의 첨가로 약간의 UCS 증가는 확인되나 섬유보강과 비교하여 그 증가량은 미비하다. 섬유비(FC)와 모래비(FL)에 따른 UCS와 UCS 시 변형률 값을 Table 3에 정리하였다. FC에 따라 UCS는 선형적으로 증가하였으며 FC=1.0%에서 미보강 HCFA 시료의 UCS와 비교하여 최대 약 3.2배 증가하였다. UCS에서의 변형률은 미보강 HCFA와 비교하여 FC=0.1%인 경우 다소 감소하였으나, 이후 증가하기 시작하여 FC=1.0%까지 증가하였다. 혼합물 내에서 섬유는: 1) PP섬유의 인장강도로 인하여, 혼합물이 견딜 수 있는 하중의 범위가 증가한다; 2) HCFA-HCFA의 마찰저항보다 FB-HCFA 사이의 마찰저항이 커, PP섬유와 HCFA가 접촉이 많을수록, 즉 섬유비가 증가함에 따라 섬유가 기여하는 마찰저항이 커진다; 3) PP섬유는 혼합물 내에서 하중을 분담해주는 다리(Bridge)역할을 하며, 파괴 이후 발생할 수 있는 2차적인 파괴와 변형에 저항하여 혼합물의 연성(ductility)이 증가한다(Harianto et al., 2008; Muntohar, 2009; Olgun, 2013; Tang et al., 2007). 따라서 이와 같은 이유로 섬유비가 증가함에 따라 UCS와 UCS 시의 변형률은 증가하게 된다.

모래로 보강된 경우, UCS는 미보강 HCFA와 비교하여 최대 1.2배정도 증가하였으며 모래비와 선형관계를 보인다. UCS 시의 변형률은 FL=10%일 때 다소 증가하였으나 전체적으로 UCS 시의 변형률은 2.22~2.65%로 비슷한 값을 보였다. 섬유의 길이와 강도에 영향을 받는 섬유 보강과는 다르게 모래 보강은 혼합물 내의 입자

Table 3. UCS and strain at UCS of FB-HCFA and Sand-HCFA mixtures

Mixture	UCS (kPa)	Strain at UCS (%)
Unreinforced HCFA	55.68	2.36
FC=0.1%	62.42	2.32
FC=0.3%	87.62	3.01
FC=0.6%	117.41	3.05
FC=1.0%	176.77	3.19
FL=5%	61.91	2.22
FL=10%	64.39	2.65
FL=20%	67.04	2.32

Note: UCS = unconfined compressive strength

배열과 입자간 마찰에 영향을 준다. 플라이애쉬에 바텀 애쉬(bottom ash)를 혼합한 경우와 유사하게(Kim et al., 2005), 모래 입자는 모난정도(angularity)가 상대적으로 커 입자 간의 마찰이 증가한다. 증가된 마찰저항은 입자의 재배열에 대한 저항을 증가시키나, 최대마찰저항이 작용한 이후에는 혼합물의 거동에 영향을 주지 않는다. 따라서 모래비가 증가함에 따라 UCS는 증가하나 그 때의 변형률에는 영향이 미비한 것으로 판단된다.

일반적으로 흙의 간극비가 작아질 수록, 입자간 접촉수의 증가로 인해 흙의 전단저항력 또는 강도는 증가하게 된다. 따라서 측정된 각 시료들의 UCS를 간극비의 함수로 Fig. 3에 나타내었다. PP섬유로 보강된 HCFA의 경우 섬유 첨가로 간극비가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 일반적인 흙의 결과와 달리 간극비가 증가함에도 불구하고 UCS가 섬유비에 따라 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 서술한 PP섬유의 인장강도 및 여러 효과들 때문인 것으로 판단된다. 반면, 모래로 보강된 HCFA의 경우 FL=5% 일 경우 간극비가 미보강 HCFA에 비해 다소 증가하였지만, UCS 역시 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 모래의 첨가로 인한 입자간 마찰저항 증대 때문인 것으로 판단되며, FL=10% 또는 20%의 경우 미보강 HCFA에 비해 마찰저항 증대 및 간극비 감소로 인한 UCS증가로 판단된다.

### 5.2 수정 일차원 압축실험 - 압축성(Compressibility)

하중 단계에서의  $e(\text{간극비})-\log \sigma(\text{수직응력})$ 의 관계를

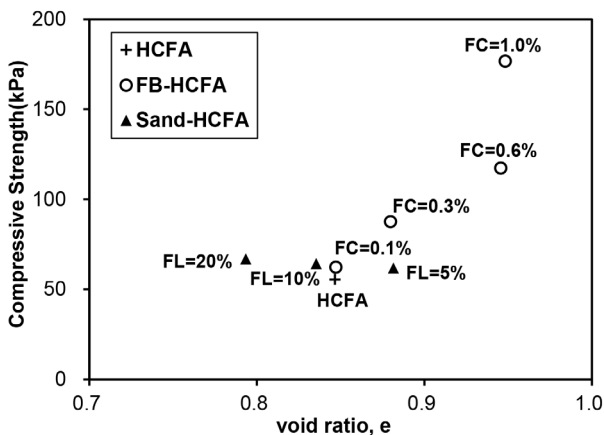


Fig. 3. Variation of compressive strength in void ratio: + symbol =Unreinforced HCFA; open symbols=FB-HCFA; closed symbols=Sand-HCFA

Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4와 같이 모든 시료의 초기 간극비가 모두 달라  $e-\log \sigma$ 의 관계로부터 각 혼합물의 압축성의 직접적 비교가 어렵다. 따라서 보강재의 종류에 따른 압축성을 비교하기 위하여 Fig. 5에 섬유비와 모래비에 따라 압축지수( $C_c$ )를 도시하였다. FC=0.1% 경우와 같이 절대적인 섬유혼합 양이 적을 경우, 미보강 HCFA의 압축지수와 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 추가적인 섬유비의 증가는 FB-HCFA 혼합물의 압축지수를 증가시켰다. 이는 섬유 첨가로 인하여 HCFA 입자 간 배열의 변화 및 섬유 자체의 높은 압축성 때문인 것으로 판단된다. Sand-HCFA 혼합물에서는 모래비가 증가함에 따라 압축지수는 증가하였다가 감소하는 경향을 보였다. 모래는 섬유와 다르게 입자 자체의 압축성이 작아 모래의 압축성이 전체 거동에 미치는 영향은 작을 것이다. 그러나 모래의 첨가는 혼합물 내에서 HCFA 입자 간 접촉 및 배열에 영향을 주므로 Sand-HCFA 혼합물의 압축성은 혼합물의 입자 배열 및 구조가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

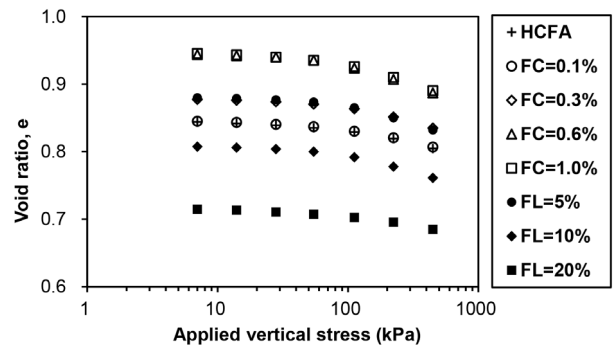


Fig. 4. Variation of global void ratio of tested HCFA reinforced with fibers and sand as a fraction of applied vertical stress. Note: + symbol=unreinforced HCFA; open symbols=FB-HCFA; closed symbols=Sand-HCFA

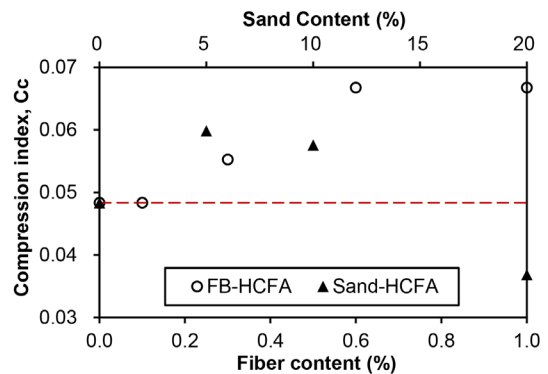


Fig. 5. Variation of compression index of tested materials according to fiber content and sand content. Note: open symbols=FB-HCFA; closed symbols=Sand-HCFA

일반적으로 흙의 압축성은 간극부피의 감소에 의한 것이므로 간극이 클수록 흙의 압축성은 증가하게 되며, 따라서 초기 간극비(Initial void ratio,  $e_0$ ) 혹은 초기 함수비에 큰 영향을 받는다 알려져 있다(Mitchell and Soga, 2005). 또한, 간극비는 입자배열에 대한 정보를 간접적으로 포함하고 있다. 따라서 각 혼합물의 압축지수를 초기 간극비의 함수로 Fig. 6(a)에 도시하였다. FB-HCFA 혼합물의 경우 섬유비가 증가함에 따라 초기 간극비 및 혼합물의 압축지수가 증가하였다. FC=0.1%의 경우 섬유 함유량이 미비하여 HCFA와 초기 간극비 및 압축성이 매우 유사하였다. 또한 FC=0.6%와 FC=1.0% 혼합물의 경우, 섬유 혼합비의 차이에도 불구하고, 초기 간극비가 같아 유사한 압축성을 보였다. 특히 Fig. 6(a)는 FB-HCFA 혼합물의 압축지수를 HCFA의 압축지수와 같이 도시하였을 경우 동일한 추세선으로 표현될 수 있음을 보여준다( $C_c=0.08e_0^{2.90}$ ,  $R^2=0.80$ ). 따라서 이 결과

는 섬유 자체의 압축성이 FB-HCFA 혼합물의 압축지수에 미치는 영향은 매우 작음을 의미하며 동시에, HCFA에 보강재를 첨가하였을 경우, 여타의 공학적 특성과는 달리 보강재의 첨가는 단순히 혼합물 전체의 간극비 또는 입자배열에 영향을 미쳐 압축성의 변화를 가져오는 것으로 판단된다. 또한 이로 인해 Fig. 5와 같은 섬유비에 따른 압축지수의 변화 양상을 보인 것으로 판단된다.

모래로 보강된 HCFA의 압축성은 섬유로 보강된 HCFA의 압축지수 결과와 유사하게 초기 간극비가 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 6(a)). HCFA에 모래가 첨가된 혼합물은 이원혼합물로 조립토비(FL) 또는 세립토비(FS)에 따라 혼합물의 거동에 주로 영향을 미치는 입자의 종류가 달라진다. 따라서 일반적인 간극비(global void ratio)로 도시된 Sand-HCFA 혼합물의 압축지수는 미보강 HCFA의 간극비에 대한 압축지수의 경향성과 다른 경향을 보일 수 있다. FL=5%와 10%의 경우 미보강 HCFA와 유사한 초기 간극비를 가짐에도 큰 압축지수의 차이를 보였다. 따라서 이원혼합물의 거동을 모래비에 따라 살펴보기 위하여 Sand-HCFA 혼합물의 압축지수를  $e_r$ (세립분 간극비) 및  $e_{r(eq)}$ (등가세립분 간극비)로 도시하였다(Fig. 6(b)). FL=5%(FS=95%)와 FL=10%(FS=90%)는 세립분 간극비이며 FL=20%(FS=80%)는 m의 값에 따라 달라지는 등가 세립분 간극비를 이용하여 표시하였다. FL=20%의 경우 m=0일 때 전체 혼합물의 간극비에 대한 압축지수의 경향성에 부합한다. 따라서 FL=20% 혼합물의 거동은 모래와 HCFA 입자에 모두 영향을 받는 것으로 판단된다. 반면 FL=5%와 FL=10%에 첨가된 모래들은 HCFA 입자들 사이에 떠있게 되는 불안정한(floating fabric)을 갖기에 혼합물의 거동은 HCFA 입자들로만 결정된다. 이로부터 Sand-HCFA 혼합물의 중간 변형률(intermediate strain) 수준의 거동에 대한 FS<sub>L</sub>(한계세립비)는 80-90%의 값을 갖는 것으로 판단할 수 있다.  $e_{f(eq)}$ 에 대하여 도시된 압축지수는 HCFA의 압축지수뿐 아니라 FB-HCFA의 압축지수와 간극비에 대하여 동일한 경향성을 갖는다( $C_c=0.08e_{0,f(eq)}^{3.21}$ ,  $R^2=0.98$ ). 즉 섬유와 모래의 보강은 혼합물 내에서 HCFA의 입자 배열에 영향을 주며, 압축지수는 보강재의 특성이 아닌 보강재의 첨가로 인해 달라지는 HCFA 입자들의 배열 및 거동에 의해 결정되는 것으로 판단된다. 따라서 보강된 HCFA의 압축성을 낮추기 위해서는 추가적인 다짐을 통한 초기 간극비를 낮춰야 할 것으로 판단된다.

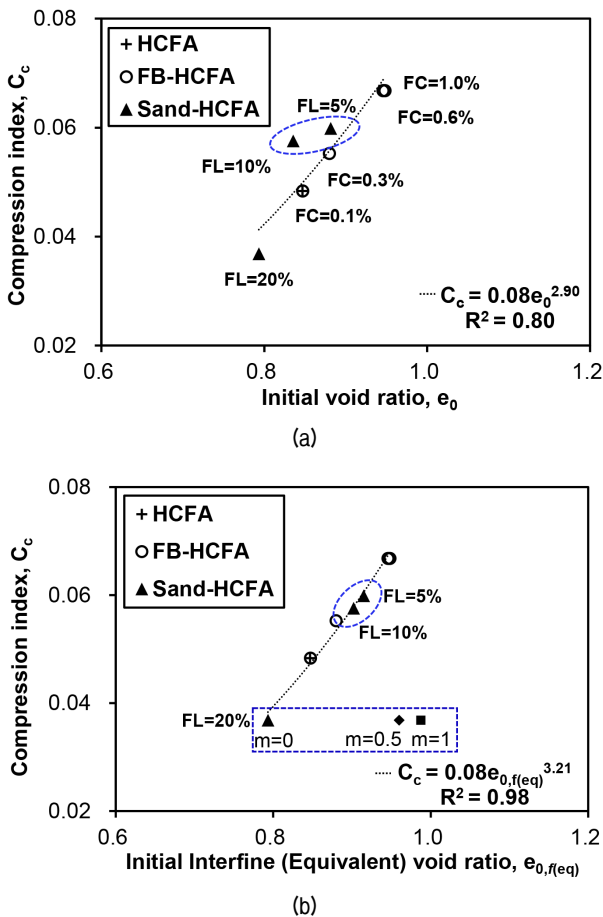


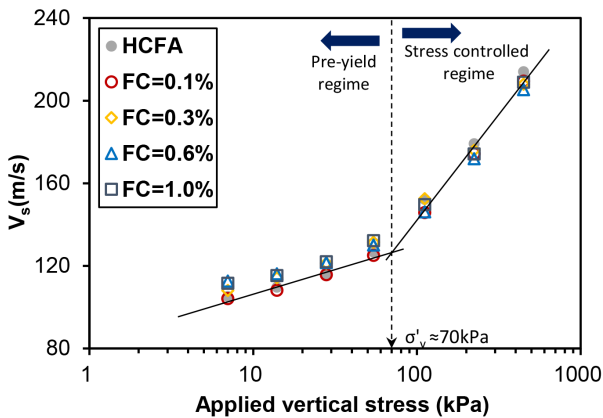
Fig. 6. Compression index of tested mixtures with (a) initial void ratio and (b) initial interfine (equivalent) void ratio. Note: initial void ratio,  $e_0$ =void ratio at vertical effective stress~0.96 kPa; + symbol=Unreinforced HCFA; open symbols=FB-HCFA; closed symbols=Sand-HCFA



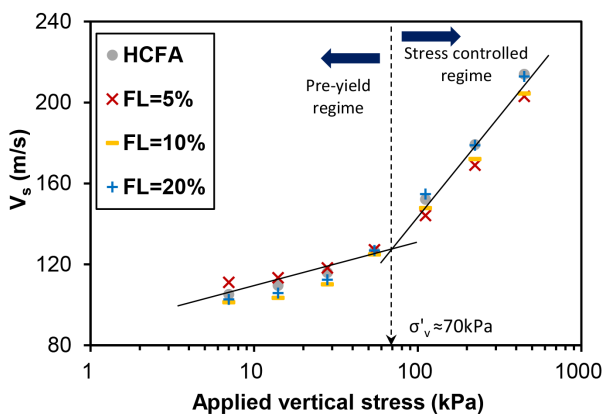
### 5.3 수정 일차원 압축실험 - 최대전단탄성계수 (Maximum shear modulus, $G_{max}$ )

Fig. 7은 수정압밀셀에 설치된 벤더 엘리먼트로 측정된 각 시료의 전단파속도( $V_s$ )와 유효응력 관계를 도시한 그래프이다. 하중이 증가함에 따라 전단파 속도는 항복 전(pre-yield regime)구간과 항복 후(post-yield regime) 구간으로 나누어짐을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 모든 시료들을 동일한 에너지의 다짐을 통하여 조성하였다. 따라서 다짐에너지로 인한 응력이력 효과를 전단파속도 거동으로 확인할 수 있었으며(Lee et al., 2008), 시료 조성 시 가해진 다짐에너지는 약 70kPa의 선행압밀 응력으로 작용하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 보강재의 혼합비에 따른  $G_{max}$ 를 도시한 그래프이다. FB-HCFA 혼합물의 경우 섬유비가 증가함에 따라  $G_{max}$ 는 감소하다 0.3% 이상의 FC에 대하여 다소 증가하거나 일정한 값을 나타냈다(Fig. 8(a)). Sand-HCFA 혼합물의 경우, FL=5%에서  $G_{max}$ 가 감소하였다가 FL이



(a)

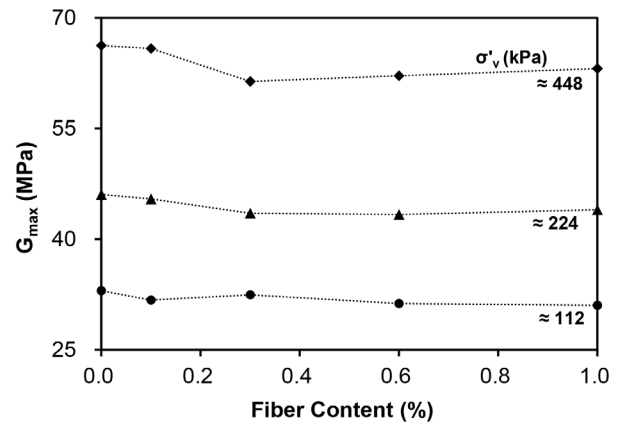


(b)

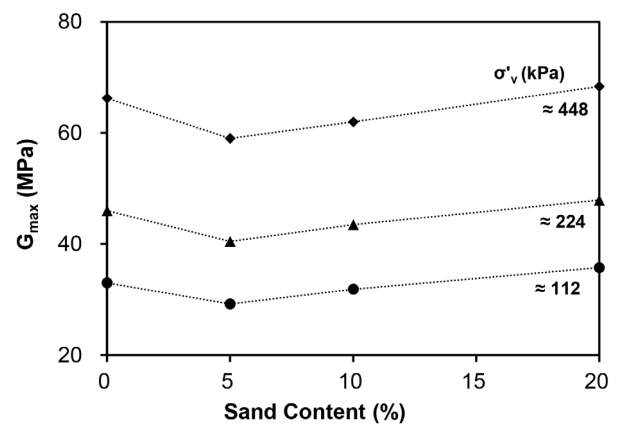
Fig. 7. Variation of shear wave velocity ( $V_s$ ) according to applied vertical stress: (a) FB-HCFA mixture (b) Sand-HCFA mixture

증가함에 따라  $G_{max}$ 가 증가하였다. 앞서 압축성 결과에서 설명했듯(Fig. 6), FL=5%와 FL=10%의 경우 미보강 플라이애쉬와 유사한 간극비를 가짐에도 더 큰 압축지수를 나타냈다. 이는 FL=5%와 FL=10%의 경우 모래 입자들이 플라이애쉬 입자들 사이에 떠있는 불안정한 구조를 의미하며, 따라서 모래입자들은 HCFA 입자간 접촉을 방해하는 역할을 한다. 이로 인하여  $G_{max}$ 는 감소하지만, 추가적인 FL이 증가함에 따라 모래 입자가 혼합물의 거동에 영향을 주면서  $G_{max}$ 는 증가하는 것으로 판단된다.

동일한 응력에서  $G_{max}$ 는 간극비의 함수로 도시되며 일반적으로 간극비가 작아짐에 따라 입자간의 접촉성이 향상되어  $G_{max}$ 는 증가한다.  $\sigma'_v \sim 224$ kPa일 때, 보강재의 종류에 따라  $G_{max}$ 를 간극비에 대하여 Fig. 9에 도시하였다. HCFA의 입자들은 대개 구형이나, 미연소탄소의 경우 형상이 불규칙적이므로(Kutchko and Kim, 2006; Openshaw, 1992) 구형의 입자와 모난 입자의 경



(a)



(b)

Fig. 8. Variation of  $G_{max}$  according to fiber and sand contents at varying vertical effective stresses: (a) FB-HCFA mixture; (b) Sand-HCFA mixture

우에 대하여 HCFA의  $G_{max}$ 를 추정하였다. 식 (6)으로 추정된  $G_{max-e}$ 의 관계가 미보강 HCFA의  $G_{max}$  거동을 잘 표현하는지 확인하기 기존의 다짐에너지의 85%에 해당하는 다짐에너지를 가하여 느슨한(loose) 상태의 시료를 조성하여 추가실험을 진행하였다(Fig. 9의 HCFA\*). 이를 통해 간극비에 따른 미보강 HCFA의  $G_{max}$ 는 구형의 입자형상의 추정식과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

FB-HCFA 혼합물에서 혼합비가 상대적으로 적은 FC=0.1%의 경우 HCFA의  $G_{max}$ 와 유사한 값을 갖는다(Fig. 9(a)). 그러나 FC가 증가할수록, 증가된 섬유로 인하여 동일한 구속응력에서 더 큰 간극비(i.e., 느슨한 상태)임에도 불구하고 유사한 간극비에서의 미보강 HCFA(또는 HCFA\*)의  $G_{max}$ 보다 큰 값을 갖는다. 이는 섬유가 HCFA 입자 간의 bridge 역할을 함으로써 혼합물 내의 입자간 접촉 수가 증가하여 보강효과를 보인 것으로 판

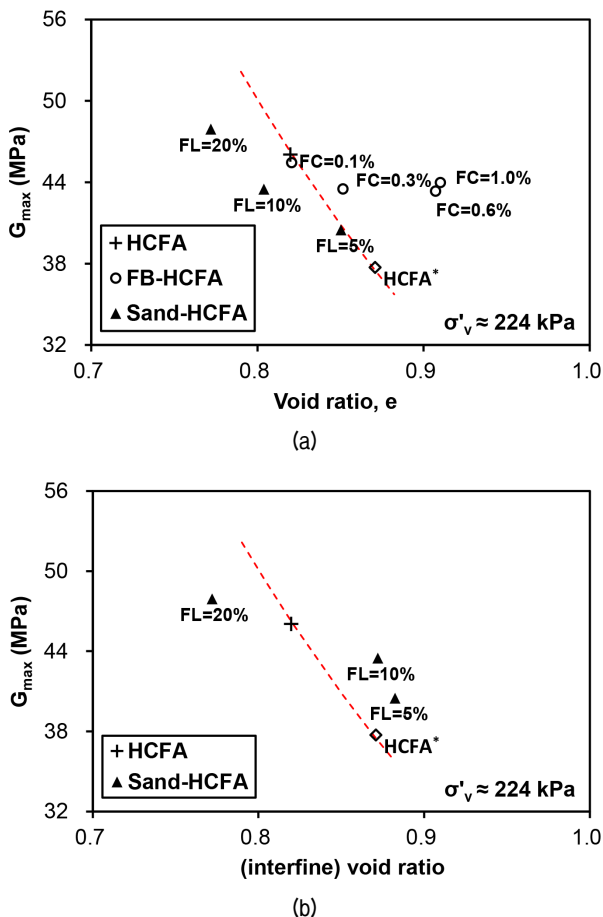


Fig. 9. Variation of  $G_{max}$  according to (a) void ratio for both FB-HCFA and sand-HCFA; and (b) interfine (equivalent) void ratio for sand-HCFA. Note: + symbol=Unreinforced HCFA; open symbols=FB-HCFA; closed symbols=Sand-HCFA; HCFA\*=result of HCFA prepared at 85% of compaction energy

단된다. 하지만 Fig. 8(a)에서 보여지듯, 동일한 에너지를 가하여 섬유로 보강된 HCFA를 조성하였을 경우, 미보강 HCFA보다 다소 감소된  $G_{max}$  값을 얻을 것으로 판단된다. 따라서 압축성 결과와 유사하게, HCFA의  $G_{max}$ 에 대한 섬유 보강효과를 얻기 위해서는 추가적인 다짐이 필요할 것으로 판단된다.

Sand-HCFA 혼합물의 경우, FL=5% 혼합물에 대하여 미보강 HCFA의  $G_{max}$  추정식과 유사한 값을 나타냈다(Fig. 9(a)). 따라서 Fig. 8(b)의 FL=5%에서의  $G_{max}$  감소는 전체 간극비의 증가에 따른 HCFA 입자 간 접촉 수 감소 때문인것으로 판단된다. 반면 FL=10%의 경우 미보강 HCFA에 비해 더 작은 간극비를 갖음에도 미보강 HCFA에 비해  $G_{max}$ 가 더 작음을 알 수 있다. 따라서 압축성 결과 분석과 유사하게(Fig. 6(b)), FL=5%와 FL=10%는 세립분 간극비(식 (3))를 FL=20%의 경우  $m=0$ 일 때의 등가세립분 간극비(식 (4))를 이용하여 Fig. 9(b)에 도시하였다. Fig. 9(b)와 같이 세립분 간극비를 이용하여 결과를 도시할 시, FL=5%와 FL=10% 혼합물의 경우 미보강 HCFA보다 더 큰 간극비를 갖음을 알 수 있으며, 이로 인해  $G_{max}$ 가 감소했음을 알 수 있다. 다시 말하면, 미소 변형률(small strain) 범위에서 FL=5, 10% 혼합물의 거동은 HCFA입자에 의해 주로 영향을 받으며, 모래 입자는 HCFA 입자 간의 접촉을 방해하여 미보강 HCFA의  $G_{max}$ 에 비해 감소된  $G_{max}$ 를 나타내는 것으로 판단된다. 하지만 FL=20% 혼합물의 경우 미보강 HCFA와 동일한 다짐 에너지를 가하여 시료를 조성하였을 시, 미보강 HCFA 보다 조밀한 상태로 조성되며 Fig. 6(b)의 압축성 결과와 유사하게 모래 입자 역시 전체 Sand-HCFA 혼합물의  $G_{max}$ 에 기여를 하게 되어 미보강 HCFA에 비해  $G_{max}$ 가 증가하는 효과가 있음을 알 수 있다. 즉, FL=20% 이상의 모래를 이용한 HCFA 보강은 동일한 에너지를 가하였을 시 미보강 HCFA에 비해 압축지수의 감소와 UCS 및  $G_{max}$ 가 증가하는 효과가 있음을 알 수 있다. 마지막으로, 위의 결과를 통해 본 연구에 사용된 Sand-HCFA 혼합물의 미소 변형률 수준의 거동에 대한 FS<sub>L</sub>(한계세립비)는 압축성 결과와 유사하게 80-90%의 값을 갖는 것으로 판단된다.

#### 5.4 모래보강과 섬유보강 비교

FB-HCFA 혼합물과 Sand-HCFA 혼합물에 대하여 일축압축시험과 벤더가 설치된 수정 일차원 압축실험을

진행하여 UCS, 압축성과 최대전단탄성계수를 측정하였다. FB-HCFA 혼합물의 경우 섬유비의 증가에 따라 UCS는 크게 증가하였으나,  $G_{max}$ 는 다소 감소하는 경향을 나타냈으며, 압축지수는 섬유비에 따라 증가하였다. 이는 섬유의 첨가로 인한 간극비 증가때문인 것으로 판단된다.

Sand-HCFA 혼합물의 경우 FL=5,10%에 대하여 불안정한 구조로 인하여 압축지수의 증가 및  $G_{max}$ 는 감소하였다. 그러나 FL=20%의 경우 미보강 HCFA와 동일한 에너지로 다짐하였을 시 조밀한 상태로 구성되어 압축지수의 감소 및  $G_{max}$ 가 증가하는 효과가 있었다. UCS 측면에서는 모래비가 증가함에 따라 다소 증가하는 경향을 나타냈다.

따라서 모래를 통한 HCFA의 보강 효과를 얻기 위해서는 적어도 20%의 모래를 첨가해야 하는 것을 알 수 있으나, 현재의 인공사의 시세(380원/kg, 효재씨엔씨)를 고려했을 시 경제적이지만 못한 보강방법일 것으로 판단되며, 섬유 보강에 비해 그 보강 효과도 크지 않음을 본 연구 결과를 통해 알 수 있다. 따라서 재활용율이 매우 낮은 HCFA의 효과적이며 경제적인 재활용을 위해서는 섬유를 통한 보강방법이 더 나을 것으로 판단되며, 추가적인 다짐을 통하여 섬유로 보강된 HCFA의 초기 간극비가 조정된다면 UCS의 추가적인 증가와 함께,  $G_{max}$ 의 증가, 압축성의 감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구는 향후 증가될 미연소탄소함량이 높은 플라이애쉬의 지반공학적인 활용을 평가하기 위하여 폴리프로필렌 섬유와 모래를 FC=0.1, 0.3, 0.6, 1.0%와 FL=5, 10, 20%의 비율로 첨가하여 다양한 실내실험을 실시하였다.

FB-HCFA 혼합물에서 섬유비가 증가함에 따라 UCS와 UCS 시의 변형률이 증가하였으며, 이는 섬유의 bridge 효과와 섬유 자체의 인장 강도가 영향을 미치기 때문이라 판단된다. 섬유의 첨가는 혼합물의 초기 간극비의 변화와 섬유의 물리적 특성으로 인하여 압축지수와  $G_{max}$ 에 영향을 준다. 그러나 혼합비가 상대적으로 적은 FC=0.1%는 미보강 HCFA와 유사한 거동을 보인다.

Sand-HCFA 혼합물의 경우 모래의 첨가로 인하여 혼합물 내의 입자 간의 마찰과 입자 배열에 영향을 주어

UCS가 증가하였으나 UCS 시의 변형률은 큰 변화가 없었다. FL=5,10% 혼합물은 모래입자가 HCFA 입자들 사이에 떠있게 되는 불안정한 구조를 가져 압축지수의 증가 및  $G_{max}$  감소가 발생하였다. 따라서 미소 및 중간변형률 수준에서의  $FS_L=80\sim90\%$ 로 추정된다. FL=20% 혼합물의 경우 HCFA와 동일한 에너지를 가하여 시료를 조성할 시 모래의 보강효과 및 간극비 감소로 미보강 HCFA에 비해 압축지수는 감소하며,  $G_{max}$ 는 증가하였다.

미연소탄소함량이 높은 플라이애쉬에 대한 섬유보강과 모래보강의 비교 결과, 본 연구에서 수행한 여러 지반공학적인 물성치 및 경제성을 고려하였을 시, 섬유를 통한 보강이 더 효과적이라 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2015R1A2A2A01006337)과 국토교통부 국토교통기술지역 특성화 사업 연구개발사업의 연구비 지원(17RDRP-BO76564-04)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. Im, E.S., Han, H.S., Park, M.C., and Shin, B.C. (2012), "Review of Shallow Soil Improvement Methods and Development of Electric Heating Method for Shallow Soil Improvement", *Geoenvironmental Engineering*, Vol.13, No.3, pp.40-55 (in Korean).
2. Bartoňová, L. (2015), "Unburned Carbon from Coal Combustion Ash: An Overview", *Fuel Processing Technology*, Vol.134, pp.136-158.
3. Campbell, D., Fox, W., Aitken, R., and Bell, L. (1983), "Physical Characteristics of Sands Amended with Fly Ash", *Soil Research*, Vol.21, No.2, pp.147-154.
4. Chang, A., Lund, L. J., Page, A. L., and Warneke, J. (1977), "Physical Properties of Fly Ash-Amended Soils", *Journal of Environmental Quality*, Vol.6, No.3, pp.267-270.
5. Chang, C. S., Wang, J.-Y., and Ge, L. (2015), "Modeling of Minimum Void Ratio for Sand-Silt Mixtures", *Engineering Geology*, Vol. 196, pp.293-304.
6. Choo, H., Lee, W., and Lee, C. (2016), "Compressibility and Small Strain Stiffness of Kaolin Clay Mixed with Varying Amounts of Sand", *KSCE Journal of Civil Engineering*, DOI:10.1007/s12205-016-1787-4, pp.1-10.
7. Choo, H., Yeboah, N., and Burns, S. (2015). "Small to Intermediate Strain Properties of Fly Ashes with Various Carbon and Biomass Contents", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.53, No.1, pp.35-48.
8. Consoli, N. C., Casagrande, M. D., and Coop, M. R. (2005), "Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand", *J Geotech Geoenviron*, Vol.131, No.11, pp.1434-1436.
9. Fatahi, B., Fatahi, B., Le, T., and Khabbaz, H. (2013), "Small-

- Strain Properties of Soft Clay Treated with Fibre and Cement”, *Geosynthetics International*, Vol.20, No.4, pp.286-300.
10. Freeman, E., Gao, Y. M., Hurt, R., and Suuberg, E. (1997), “Interactions of Carbon-Containing Fly Ash with Commercial Air-Entraining Admixtures for Concrete”, *Fuel*, Vol.76, No.8 SPEC. ISS., pp.761-765.
  11. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), “Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects”, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol.98, No.sm6.
  12. Hardin, B. O. and Richart, F. E. (1963), “Elastic Wave Velocities in Granular Soils”, *Journal of Soil Mechanics & Foundations*, Vol. 89, pp.33-65.
  13. Harianto, T., Hayashi, S., Du, Y., and Suetsugu, D. (2008), “Experimental Investigation on Strength and Mechanical Behavior of Compacted Soil-Fiber Mixtures”, *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*, Springer, pp.392-397.
  14. Ibrahim, E. and Fourmont, S. (2007), “Behaviour of Sand Reinforced with Fibres”, *Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis*, Springer, pp.807-818.
  15. Jala, S. and Goyal, D. (2006), “Fly Ash as a Soil Ameliorant for Improving Crop Production—a Review”, *Bioresource Technology*, Vol.97, No.9, pp.1136-1147.
  16. Kaniraj, S. R. and Gayathri, V. (2003), “Geotechnical Behavior of Fly Ash Mixed with Randomly Oriented Fiber Inclusions”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.21, No.3, pp.123-149.
  17. Kim, B., Prezzi, M., and Salgado, R. (2005), “Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments”, *J Geotech Geoenviron*, Vol.131, No.7, pp.914-924.
  18. Kumar, A., Walia, B. S., and Bajaj, A. (2007), “Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, No.3, pp.242-248.
  19. Kumar, P. and Singh, S. P. (2008), “Fiber-Reinforced Fly Ash Subbases in Rural Roads”, *Journal of transportation engineering*, Vol.134, No.4, pp.171-180.
  20. Kutchko, B. G. and Kim, A. G. (2006), “Fly Ash Characterization by Sem-Eds”, *Fuel*, Vol.85, No.17, pp.2537-2544.
  21. Lee, C., Lee, J. S., Lee, W., and Cho, T. H. (2008), “Experiment Setup for Shear Wave and Electrical Resistance Measurements in an Oedometer”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.31, No.2, pp. 149-156.
  22. Lee, J.-S. and Santamarina, J. C. (2005), “Bender Elements: Performance and Signal Interpretation”, *J Geotech Geoenviron*, Vol. 131, No.9, pp.1063-1070.
  23. Maher, M. H. and Gray, D. H. (1990), “Static Response of Sands Reinforced with Randomly Distributed Fibers”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116, No.11, pp.1661-1677.
  24. Maher, M. H. and Ho, Y. C. (1994), “Mechanical-Properties of Kaolinite Fiber Soil Composite”, *J Geotech Eng-Asce*, Vol.120, No.8, pp.1381-1393.
  25. Maher, M. H. and Woods, R. D. (1990), “Dynamic Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116, No.7, pp.1116-1131.
  26. Makiuchi, K. and Minegishi, K. (2001), “Strain-Induced Toughness and Shearing Characteristics of Short-Fiber Reinforced Soils”, *Proc., Landmarks in Earth Reinforcement: Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement: Fukuoka, Kyushu, Japan, 14-16 November, 2001*, Taylor & Francis US, 83.
  27. Michalowski, R. L. and Cermák, J. (2003), “Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers”, *J Geotech Geoenviron*, Vol.129, No.2, pp.125-136.
  28. Michalowski, R. L. and Zhao, A. (1996), “Failure of Fiber-Reinforced Granular Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.3, pp.226-234.
  29. Minnick, L. (1959), “Fundamental Characteristics of Pulverized Coal Fly Ashes”, *Proc., Proc. ASTM*, pp.1155-1177.
  30. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), “Fundamentals of Soil Behavior”.
  31. Muntohar, A. (2009), “Influence of Plastic Waste Fibers on the Strength of Lime-Rice Husk Ash Stabilized Clay Soil”, *Civil Engineering Dimension*, Vol.11, No.1, pp.32-40.
  32. Olgun, M. (2013), “Effects of Polypropylene Fiber Inclusion on the Strength and Volume Change Characteristics of Cement-Fly Ash Stabilized Clay Soil”, *Geosynthetics International*, Vol.20, No.4, pp.263-275.
  33. Openshaw, S. C. (1992), “Utilization of Coal Fly Ash”, Gainesville, Florida: University of Florida.
  34. Pandey, V. C. and Singh, N. (2010), “Impact of Fly Ash Incorporation in Soil Systems”, *Agriculture, ecosystems & environment*, Vol.136, No.1, pp.16-27.
  35. Pandian, N. (2013), “Fly Ash Characterization with Reference to Geotechnical Applications”, *Journal of the Indian Institute of Science*, Vol.84, No.6, pp.189.
  36. Sadek, S., Najjar, S. S., and Freiha, F. (2010), “Shear Strength of Fiber-Reinforced Sands”, *J Geotech Geoenviron*, Vol.136, No.3, pp.490-499.
  37. Santamarina, J. C., Klein, A., and Fam, M. A. (2001), “Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring”, *Journal of Soils and Sediments*, Vol.1, No.2, pp. 130-130.
  38. Shukla, S. K., Shahin, M. A., and Abu-Taleb, H. (2015), “A Note on Void Ratio of Fibre-Reinforced Soils”, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, Vol.1, No.3, pp.1-5.
  39. Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., and Cai, Y. (2007), “Strength and Mechanical Behavior of Short Polypropylene Fiber Reinforced and Cement Stabilized Clayey Soil”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.25, No.3, pp.194-202.
  40. Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S., and Liang, J. (2002), “Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts”, *J Geotech Geoenviron*, Vol.128, No.10, pp.849-859.
  41. Yetimoglu, T. and Salbas, O. (2003), “A Study on Shear Strength of Sands Reinforced with Randomly Distributed Discrete Fibers”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.21, No.2, pp.103-110.
  42. Yoo, S. W. (2013), “The Present State and Prospect of Fly Ash Quality of Domestic Thermal Power Plant”, *Magazine of RCR*, Vol.8, No.2, pp.8-12.

Received : February 27<sup>th</sup>, 2017

Revised : April 8<sup>th</sup>, 2017

Accepted : April 11<sup>th</sup>, 2017