

## 섬유보강 실트질 모래의 동적 변형특성

### Dynamic Deformation Characteristics of Fiber Mixed Silty Sand

허 준\* · 장 병 옥\*\*

Heo, Joon · Chang, Pyoung Wuck

#### Abstract

A series of resonant column test was performed to investigate the dynamic deformation characteristics of silty sand soils mixed with polypropylene fibrillated type fiber.

Results show that optimum mixing ratios were 0.2% for 19 mm of cut fiber for shear modulus and 0.1% for 60 mm cut fiber for damping ratio.

As shear strain was increased, normalized values of shear modulus ( $G(\text{Reinforced})/G(\text{Unreinforced})$ ) of fiber reinforced soil were increased up to  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$  ranges. However, normalized damping ratio ( $D(\text{Reinforced})/D(\text{Unreinforced})$ ) was diminished with an increase in strain beyond  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$  for the damping capacity of soils mixed with fiber. Normalized shear modulus ( $G/G_{\max}$ ) obtained from the test was plotted in the chart suggested by Seed and Idriss. The shear modulus of silty sand was located between sand and gravel curves.

*Keywords* : Polypropylene fiber, Fiber reinforced soil, Shear modulus, Shear strain, Damping ratio

#### I. 서 론

흙의 보강은 흙의 강도 및 안정성을 증가시키는 데 효과적이고 신뢰성 있는 기술이다. 이 기술은 옹벽의 뒷채움재, 철도 노반의 성토재, 제방에서부터 구조물의 기초, 도로포장의 노상 안정처리에 이

르기까지 여러 분야에서 이용되고 있다. 흙의 보강에 이용되는 보강재는 형태, 조직, 상대적인 강성 등에 따라 여러 가지로 나눌 수 있지만 크게 탄성계수가 높은 금속 띠장, 금속 막대 등의 보강재와 탄성계수가 낮은 천연섬유, 합성섬유, 합성직물, 식물의 뿌리 등의 보강재로 분류된다(Gray & Ohashi, 1983). 이중 짧은 길이의 합성섬유를 무작위로 배열하여 흙을 보강할 경우 기존의 보강재와 마찬가지로 사질토 및 점토의 전단강도를 증진시킬 뿐만 아니라 강도의 등방성과 지속성이 우수하며, 정렬된 토목섬유, 강철막대 및 띠장 등에서 보강재를

\* 서울대학교 대학원

\*\* 서울대학교 지역시스템공학과

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: jheo01@sun.ac.kr

따라 평형하게 발생될 수 있는 잠재적인 취약 면이 없다는 장점을 가지고 있다(박영곤, 1999).

흙의 보강에 관한 연구는 보강재 종류에 대한 연구와 더불어 강도 및 파괴 예측 규명과 같은 정적 거동에 관한 실험적 연구가 많이 진행되어 왔으며(Gray & Al-Refeai, 1986), 최근 진동에 대한 관심이 고조되면서 비보강토의 동적 거동에 대한 연구뿐만 아니라 단섬유로 보강된 흙의 동적 거동에 대한 연구가 진행되고 있다. 실제로 열차 및 차량과 같은 충격하중이나 반복하중 하에 놓인 지반의 거동은 정적인 하중에서의 거동과는 많은 차이를 보인다. 기존의 섬유혼합토 동적 거동 특성 연구는 모래에 섬유를 혼합하여 동적 변형 특성을 연구한 바 있으나(Maher, 1988), 실트질 모래와 같은 현장 지반의 시료에 단섬유를 혼합한 보강토의 동적 거동 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 단섬유로 보강된 실트질 모래의 선형영역 및 비선형영역에서의 동적 변형 특성을 평가하기 위하여, 비혼합토 및 섬유혼합토에 대해 공진주 시험을 수행하였으며, 섬유혼합토의 동적 변형특성을 분석하고 동적변형특성 개선에 적합한 섬유길이, 혼합비를 연구 하였다.

## II. 이론적 배경

본 연구에서 사용한 Stokoe식 고정단-자유단 공진주 시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀 자극(전단)을 가하여 1차 모드의 공진주파수와 진동의 크기를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 탄성파전달이론을 바탕으로 전단파 속도, 시료의 전단탄성계수와 전단변형률을 구하는 동적 특성 시험방법이다. 고정단-자유단 공진주 시험의 개략적인 형상은 Fig. 1과 같으며 시험에서 획득한 주파수응답곡선은 Fig. 2와 같다(Hwang, 1997).

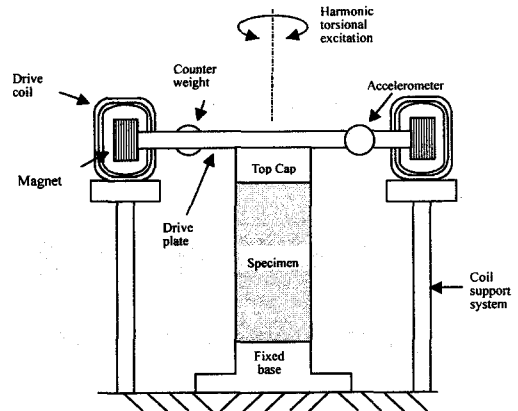


Fig. 1 Schematic diagram of resonant column equipment

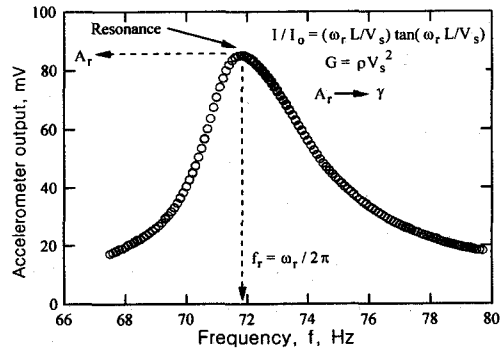


Fig. 2 Typical material damping ratio measurement from frequency response curve in the resonant column test

### 1. 전단탄성계수

탄성파전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주 시험의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega l}{V_s} \cdot \tan\left(\frac{\omega l}{V_s}\right) \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서,  $I$  = 공시체의 질량관성모멘트,
- $I_0$  = 진동시스템의 질량관성모멘트,
- $\omega$  = 공시체-진동시스템의 고유진동수,
- $l$  = 공시체의 길이,  $V_s$  = 전단파 속도

식(1)에 의해 전단파 속도( $V_s$ )가 구해지면 전단 탄성계수(G)를 식 (2)로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \dots \dots \dots (2)$$

여기서,  $\rho$  = 밀도,  $V_s$  = 전단파 속도

## 2. 감쇠비

재료감쇠비는 주파수 반응곡선을 이용하는 방법(half-power bandwidth method)과 자유진동 감쇠법(free vibration decay method)을 이용하여 구한다. 본 연구에서는 주파수 반응곡선의 대칭성이 유지되는  $10^{-3}\%$ 이하의 변형률에서는 하프-파우어 대역폭 법을 이용하였으며,  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ 의 변형률에서는 시료의 주파수반응곡선의 대칭이 유지되지 않아 하프-파우어 대역폭 법을 이용할 경우 감쇠비가 과대평가되기 때문에 자유진동 감쇠법을 적용하여 각 시료별 재료 감쇠비를 결정하였다.

### 가. 주파수 반응곡선을 이용하는 방법(half-power bandwidth method)

주파수 반응곡선을 이용하는 방법은 공진점 근처에서 주파수 응답곡선의 폭을 측정함으로써 이루어진다. Fig. 3의 주파수 반응곡선에서 대수적 감소  $\delta$ (logarithmic decrement)를 식 (3)과 같이 결정할 수 있다.

$$\delta = \frac{\pi}{2} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_r^2} \sqrt{\frac{A^2}{A_{\max}^2 - A^2}} \frac{\sqrt{1 - 2D^2}}{1 - D^2} \quad (3)$$

여기서,  $f_1, f_2$ : 변형률 진폭이 A인 공진 바로 전, 후의 진동수,  $f_r$ : 공진주파수,  $D$ : 감쇠비

감쇠비(D)가 매우 작고 식 (3)에서 A를 half-power point( $0.707A_{\max}$ )로 하면, 식 (3)은 식 (4)와 같이 간단히 표현되고 감쇠비는 식 (5)로부터 구할 수 있다.

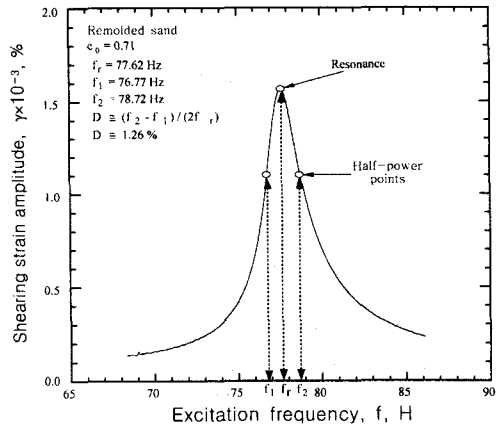


Fig. 3 Typical material damping ratio measurement from frequency response curve in the resonant column test using the half-power bandwidth method

$$\delta \approx \pi \frac{f_2 - f_1}{f_r} \dots \dots \dots (4)$$

$$D \approx \frac{f_2 - f_1}{2f_r} \dots \dots \dots (5)$$

나. 자유진동 감쇠법(free vibration decay method)  
 시료가 공진주파수로 진동하는 동안 가진력을 차단하면 자유진동 감쇠곡선이 오실로스코프에 기록된다(Fig. 4(a)). Free-vibration decay curve를 이용하여 재료의 감쇠비를 측정할 일례를 Fig. 4(b)에 나타냈다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 각 사이클의 진폭을 측정하여 대수적 감소,  $\delta$ (logarithmic decrement)를 구한 후 감쇠비(D)를 얻는다.

$$\delta = \ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \frac{2\pi D}{\sqrt{1 - D^2}} \dots \dots \dots (6)$$

여기서,  $z_1, z_2$  = 두개의 연속된 변형률 진폭,

$D$  = 감쇠비

식 (6)을 통하여  $\delta$ 를 계산하면 감쇠비를 식 (7)과 같이 결정한다.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \dots \dots \dots (7)$$

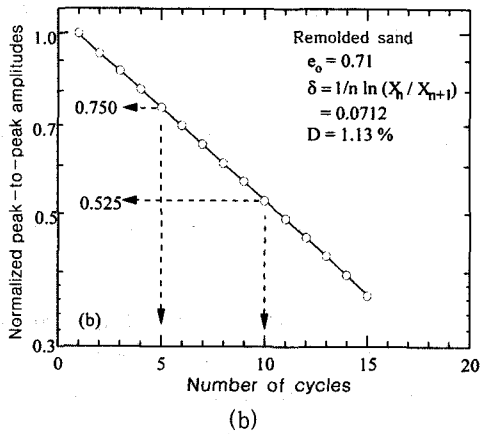
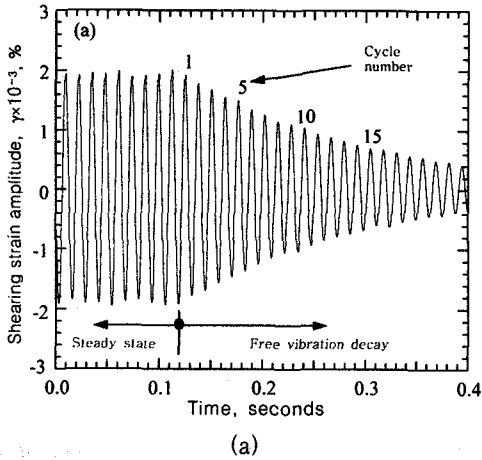


Fig. 4 Typical free-vibration decay curve (a) and examples of material damping measurement (b)

### III. 시험재료 및 방법

#### 1. 시험재료

##### 가. 흙 시료

본 연구에서 사용한 흙은 수원지역에서 모래질

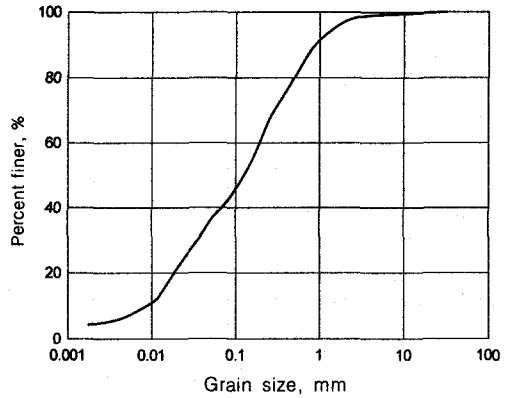


Fig. 5 Grain size distribution curve of soil

Table 1 Physical properties of soil

Specific gravity	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	U.S.C.S	O.M.C (%)
2.75	N.P	N.P	SM	23.0

흙을 채취하였으며, 실트 및 점토가 41.17%에 해당하며 통일분류법상 SM으로 분류되는 비소성의 실트질 모래이다. 시험에 사용한 흙의 입도분포곡선은 Fig. 5와 같고 물리적인 특성은 Table 1과 같다.

##### 나. 토목 섬유

섬유의 매개변수(길이, 혼합비)가 실트질 모래의 동적 거동에 미치는 영향을 연구하기 위해 보강용 재료로 사용되고 있는 3개의 서로 다른 길이(19 mm, 38 mm, 60 mm)의 폴리프로필렌 망사(fibrillated fiber)를 선정하였다(Fig. 6). Table 2에 섬유의 물리적인 특성을 요약하였다.

Table 2 Physical properties of fiber

Specific gravity	Tensile strength (MPa)	Melting point (°C)	Young's modulus (MPa)	Diameter (mm)	Denier (g/9000 m)
0.91	350~770	164	3500	0.082	45

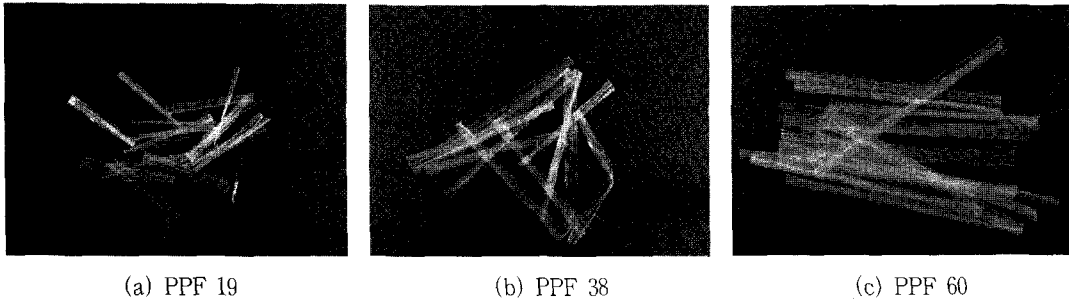


Fig. 6 Photo of fibrillated type polypropylene fiber

Table 3 Schedule for compaction test and resonant column test

Soil type	Fiber length	Mixing ratio				Remarks
		0%	0.2%	0.2%	0.3%	
UR-Soil	-	C/RC	-	-	-	Unreinforced
PPF 19	19 mm	-	C/RC	C/RC	C/RC	Reinforced
PPF 38	38 mm	-	C/RC	C/RC	C/RC	"
PPF 60	60 mm	-	C/RC	C/RC	C/RC	"

Note) UR-Soil: Unreinforced Soil, C: Compaction Test, RC: Resonant Column Test

## 2. 시험방법

### 가. 시험 계획

섬유를 혼합함에 있어서 혼합한 양(혼합비)은 흙 전체의 노건조 중량에 대한 섬유의 중량비로 정의하였으며, 혼합비를 3단계(0.1%, 0.2%, 0.3%)로 하였다. 시험과정에서 0.5% 이상의 혼합비에서는 많은 양의 단섬유가 혼합되므로 공시체에 섬유 층이 생겨서 시료를 성형할 수 없었다. 이와 같은 이유로 최대 섬유 혼합비를 0.3%로 결정하였다. Table 3은 혼합비와 섬유 길이 조건에 대한 시험 결과이다.

### 나. 시료의 성형 및 절차

재료의 혼합은 예비실험으로 각 혼합비와 섬유 길이별로 섬유혼합토의 다짐시험(KSF 2312)을 실시하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 결정하였

다. 시료의 성형조건은 최대건조단위중량 ( $\gamma_{d,max}$ )의 90%의 단위중량으로 성형하였고, 함수비는 최적함수비(OMC)로 성형하였다. 각각의 섬유길이와 혼합비에 따른 최대건조밀도와 최적함수비와의 관계는 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 그림에서와 같이 섬유의 양이 증가함에 따라 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비의 경우에는 섬유를 혼합하지 않은 경우보다 최적함수비가 크게 나타났다. 최적함수비가 증가하는 이유로 김(1999)은 흙 입자와 섬유의 형상이 상이하여 섬유의 신축성에 의한 스펀지현상이 크게 증대하기 때문이라고 하였다.

시험에 사용한 다짐에너지는 표준다짐에너지의 90%로 결정하였으며 이는 구조물 뒤체흙 다짐 규정을 참조하여 결정하였다. 공진주 시험 공시체는 시료 입자 크기의 영향을 제거하기 위해 시료의 최

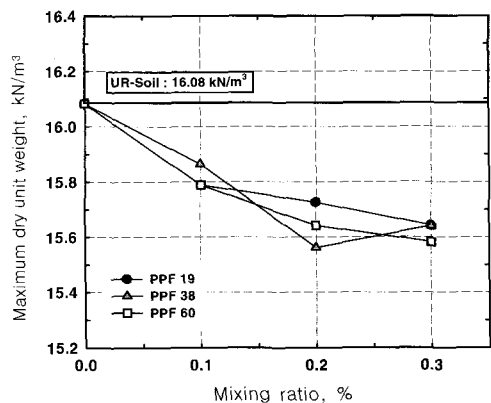


Fig. 7 Maximum dry unit weight of soil mixed with polypropylene fiber

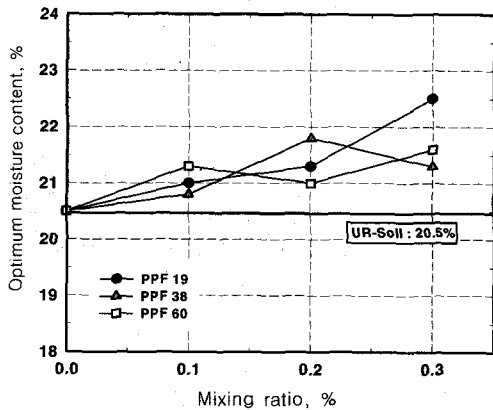


Fig. 8 Optimum moisture content of soil mixed with polypropylene fiber

Table 4 Compaction test results of fiber reinforced soils for resonant column test

Fiber type	Mixing ratio (%)	Dry max. density ( $kN/m^3$ )	O.M.C (%)	90% of $\gamma_{d,max}$ ( $kN/m^3$ )
UR-Soil	-	16.08	20.5	14.47
PPF 19	0.1	15.79	21.0	14.21
	0.2	15.73	21.3	14.15
	0.3	15.64	22.5	14.08
PPF 38	0.1	15.86	20.8	14.28
	0.2	15.56	21.8	14.01
	0.3	15.64	21.3	14.08
PPF 60	0.1	15.79	21.3	14.21
	0.2	15.64	21.0	14.08
	0.3	15.58	21.6	14.02

대입자크기가 시료직경의 1/5 이하가 되도록 4.76 mm체로 쳐서 제작하였다. 계량된 섬유, 흙, 물을 충분히 혼합한 후 직경 50 mm, 높이 100 mm의 몰드에서 시료를 성형하였다.

시험 공시체 내의 섬유 배열방법은 섬유를 무작위로 배열하는 방법을 사용하였다. 섬유 혼합 시에 무작위 배열된 섬유(randomly distributed fiber)는 섬유의 혼합이 용이하고 일정한 방향성을 가지고 배열된 섬유(oriented fiber)에 비해 잠재적인

취약 면이 없다는 장점이 있기 때문이다(박영근, 1999). 제작된 시료의 성형조건은 Table 4와 같다. 다져진 시료를 공진주 시험기에 거치 하고 진공압을 이용하여 시료에 구속응력(25 kPa, 50 kPa, 100 kPa)을 가하여 시험을 수행하였다.

시료의 공진주파수는 일정한 입력전압에서 하중 주파수를 바꾸어 가면서 시료의 반응을 측정 한 주파수 반응곡선으로부터 결정하였다. 공진주 시험에서 비틀 전단에 의해 발생하는 손상은 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 하나의 시료에 구속하중을 변화시켜가며 시험을 실시하는 단계별시험법을 채택하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

섬유혼합 실트질 모래의 동적변형특성을 분석하기 위하여 비혼합토와 섬유 혼합토에 대한 공진주 시험 결과를 비교·분석하였다. 섬유의 혼합 조건과 섬유의 길이에 따른 전단변형률에 의한 전단탄성계수와 재료감쇠비의 변화를 검토하였으며, Fig. 9와 Fig. 10은 공진주시험에서 얻어진 전형적인 결과 일례이다. 이와 같은 결과를 이용하여 섬유혼합토의 구속압, 전단변형률, 섬유혼합비와 길이의 변화에 따른 보강 효과를 알아보고, 정규화 전단탄성계수 ( $G/G_{max}$ ) 감소곡선을 제시하고자한다.

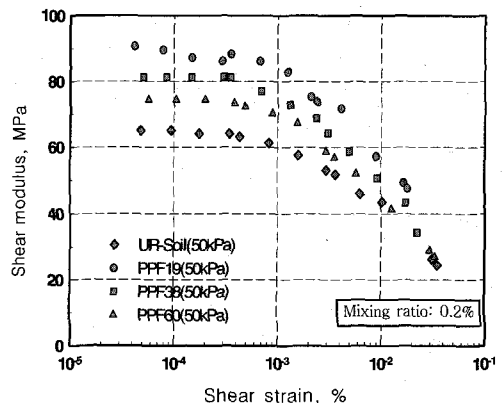


Fig. 9 Results of resonant column test (shear modulus)

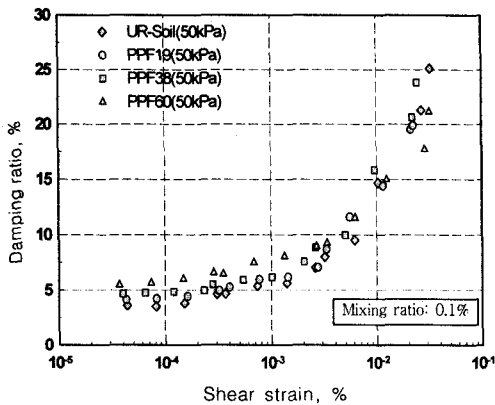


Fig. 10 Results of resonant column test (damping ratio)

Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 섬유혼합토의 전단탄성계수와 재료감쇠비는 일반적인 흙과 유사하게  $10^{-5}\% \sim 10^{-3}\%$ 의 저변형률영역에서 선형적인 거동을 하며, 선형한계변형률 ( $10^{-3}\%$ )을 초과한  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ 의 중간변형률영역에서는 비선형 거동을 한다.

### 1. 섬유길이 및 혼합비의 영향

섬유길이와 혼합비에 따른 최대전단탄성계수( $G_{max}(Reinforced)/G_{max}(Unreinforced)$ )와 최소감쇠비의 변화( $D_{min}(Reinforced)/D_{min}(Unreinforced)$ )를 Fig. 11에

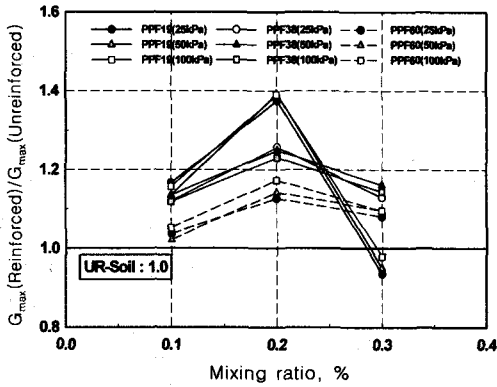
나타냈다. Table 5에 섬유의 길이와 혼합비 변화에 따른 최대전단탄성계수와 최소감쇠비의 결과를 정리하였다.

Fig. 11(a)와 같이 최대전단탄성계수는 PPF19에서 최대 39%, PPF38에서 26%, PPF60에서 17%의 증가가 나타났으며, 최소감쇠비는 PPF19, PPF38, PPF60에서 최대 41%, 29%, 53%가 증가하는 것으로 나타났다. 섬유의 길이가 증가할수록 최대전단탄성계수 측면에서 보강 효과가 작은 이유로는 섬유의 길이가 길어지면 흙과 섬유의 마찰력 보다는 섬유 자체의 접촉면 증대로 인해 보강 효과가 감소한다고 판단된다.

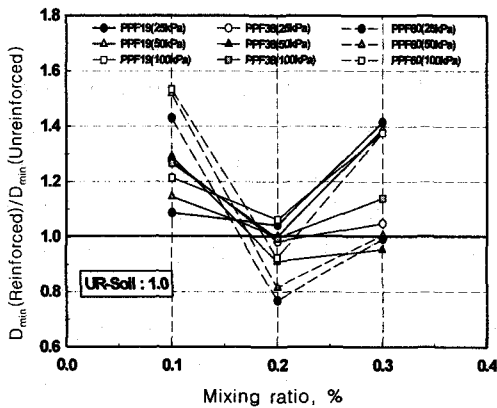
혼합비에 따른 보강효과에서 최대전단탄성계수의 최대 증가는 혼합비 0.2%에서 나타났다. 시험 결과 섬유의 혼합비가 증가함에 따라 최대전단탄성계수는 비혼합토 보다 증가하여 섬유 혼합에 의한 보강효과를 발견하였으나 혼합비가 0.3%에서는 최대전단탄성계수의 감소가 나타났다. 이러한 이유로는 섬유의 양이 많아 혼합할 때 분산성이 좋지 않고, 섬유 자체가 엉겨 있는 경우가 많아 시험 시료의 최대전단탄성계수 감소를 가져온다고 판단된다. 또한 섬유 혼합비가 증가할수록 섬유혼합토의 밀도가 감소하고 입자 사이의 마찰력 감소로 인해 강도와 보강 효과가 감소되는 것으로 사료된다.

Table 5 Summary of shear modulus and damping ratio value

Fiber type	Mixing ratio (%)	Shear modulus ( $G_{max}$ ), (MPa)			Damping ratio ( $D_{min}$ ), (%)		
		25 kPa	50 kPa	100 kPa	25 kPa	50 kPa	100 kPa
UR-Soil	-	65.11	65.11	66.08	4.12	4.09	4.06
PPF19	0.1	75.94	73.92	76.45	4.14	4.13	4.08
	0.2	89.55	90.70	91.85	4.39	4.23	4.16
	0.3	60.94	61.88	64.74	2.96	2.21	1.69
PPF38	0.1	72.92	73.92	73.92	4.71	4.51	4.36
	0.2	81.84	81.30	81.30	3.74	3.28	2.74
	0.3	73.54	75.58	75.58	3.99	2.24	3.92
PPF60	0.1	67.52	66.54	69.50	5.44	5.47	5.27
	0.2	73.33	74.36	77.51	2.92	2.94	3.18
	0.3	70.37	71.37	72.38	3.78	3.63	4.74



(a)



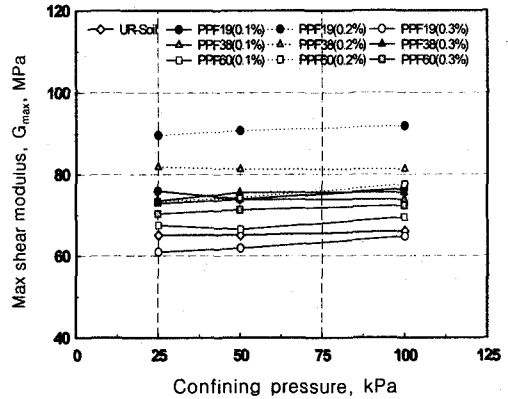
(b)

Fig. 11 Influence of mixing ratio to normalized shear modulus(a) and damping ratio(b)

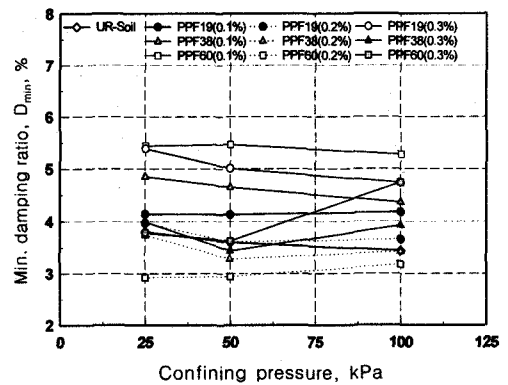
Fig. 11(b)와 같이 섬유의 혼합비에 따른 최소 감쇠비의 변화는 0.1%에서 비혼합토 보다 증가하고, 0.2%는 섬유 혼합에 의한 개선효과가 작거나 비혼합토와 같은 결과가 나타났다. 이러한 이유는 섬유 보강으로 인한 강도 증진으로 재료의 강성이 증가하여 최소감쇠비가 감소된다고 판단된다. 또한, 섬유 0.3% 혼합시 최소감쇠비가 커지는 현상은 증가된 섬유 양이 흙 입자보다 비틀 에너지를 흡수하는데 효과가 크기 때문이라고 사료된다. 이는 섬유의 혼합으로 비혼합토보다 비틀 저항이 개선되었음을 알 수 있다.

## 2. 구속압의 변화에 따른 영향

선형영역 변형률 ( $10^{-3}\%$  이하)에서 얻어진 구속압의 변화에 따른 최대전단탄성계수와 최소감쇠비의 변화를 Fig. 12에 도시하였다. 기존의 연구결과에서 구속압의 증가에 따라 최대전단탄성계수는 증가하고, 최소감쇠비는 감소하는 경향을 보여준다. 또한 재료 감쇠비 보다는 전단탄성계수가 구속압 변화에 더 큰 영향을 받는다고 하였다. 본 연구에서 구속압 증가에 따른 최대전단탄성계수는 증가하는 경향을 보이지만 변화량은 작게 나타났다. 이는 다짐에 의한 시료에 작용 구속압이 시험 재하 구속



(a) Shear modulus



(b) Damping ratio

Fig. 12 Influence of confining pressure to maximum shear modulus and minimum damping ratio



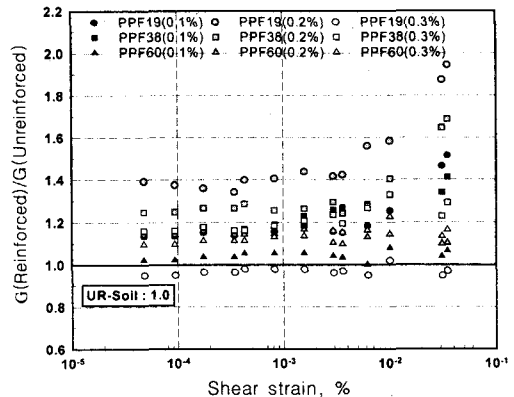
압을 극복하지 못하기 때문에 판단된다. 이러한 결과는 재료감쇠비의 변화에서도 같은 결과가 나타났다.

### 3. 변형률의 변화에 의한 영향

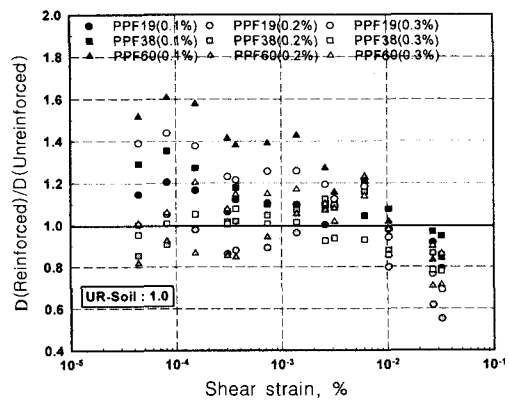
섬유혼합토에서의 섬유는 동적하중이 작용하는 곳에서 전단변형률의 크기에 따라 동적응답성에 중요한 영향으로 작용한다. Fig. 13의 (a)에 전단변형률 크기에 따라 정규화된 전단탄성계수( $G(Reinforced)/G(Unreinforced)$ )의 변화를 나타냈다.

전단변형률이 증가할수록 섬유 혼합비 0.1%와 0.2%는 PPF19와 PPF38에서 보강 효과가 높아지고 있으며, 혼합비 0.3%는 PPF38과 PPF60에서 비선형영역( $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ )의 전단변형률에서 선형영역( $10^{-3}\%$ 이하)의 전단변형률보다 섬유 혼합으로 인한 보강 효과가 크게 나타났다. PPF19의 혼합비 0.2%에서 선형영역이하의 변형률에서 최대 전단탄성계수 증가는 39%이며 비선형영역의 변형률에서 최대 증가는 94%로 증가비가 가장 크게 나타났다. 전단변형률 변화에 의한 정규화된 전단탄성계수를 정리하면 Table 6과 같다.

섬유의 영향은 선형한계변형률 ( $10^{-3}\%$ ) 이하의 보강효과보다  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ 의 전단변형률에서



(a) Normalized shear modulus



(b) Normalized damping ratio

Fig. 13 Variation of normalized shear modulus and damping ratio with shear strain increase (confining pressure 50 kPa)

Table 6 Summary of normalized shear modulus value (confining pressure 50 kPa)

Fiber type	Mixing ratio (%)	Small shear strain ( $10^{-5}\% \sim 10^{-3}\%$ )	Medium shear strain ( $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ )
PPF 19	0.1	1.14	1.51
	0.2	1.39	1.94
	0.3	0.95	0.97
PPF 38	0.1	1.14	1.41
	0.2	1.25	1.69
	0.3	1.16	1.29
PPF 60	0.1	1.02	1.07
	0.2	1.14	1.10
	0.3	1.10	1.17

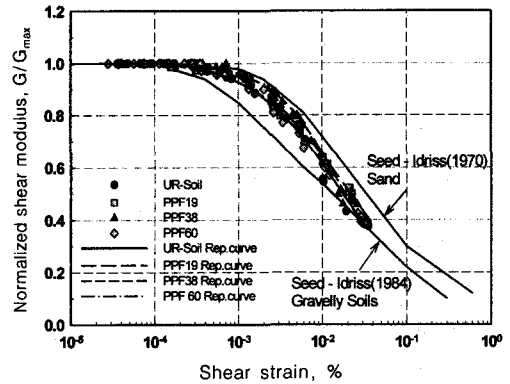
섬유 혼합으로 인한 보강효과가 크게 나타났다. 이는  $10^{-3}\%$  ~  $10^{-1}\%$ 의 비선형영역 변형을 하에서 섬유의 높은 인장력에 대한 저항 효과로 인해 시료의 변형을 구속하고 강도를 증진시킨다고 판단되며 섬유의 인장변형에 대한 저항력을 크게 하여 섬유 혼합토의 동적 강도가 증가된다고 판단된다.

전단변형률에 따른 정규화된 재료감쇠비( $D(Reinforced)/D(Unreinforced)$ )는 Fig. 13의 (b)와 같다. 전단변형률이 증가할수록 재료감쇠비의 증가가 감소한다. 이와 같은 이유로는 앞서 기술한 바와 같이 비선형 영역의 변형률에서 시료의 강성이 상대적으로 커지므로 감쇠비가 감소된다고 판단된다.

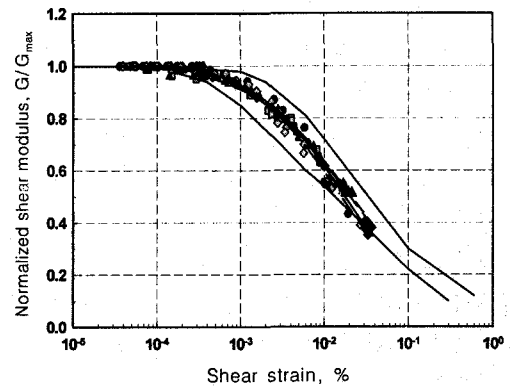
#### 4. 정규화 전단탄성계수 감소곡선

시험 결과 구속압에 관계없이 유사한 경향을 보이며, 이 결과를 종합하여 지반응답해석을 위한 섬유혼합토의 혼합비별 정규화 전단탄성계수의 대표곡선을 결정하였다. 지반의 전단탄성계수-변형률의 관계는 지반의 종류, 함수비, 구속응력, 하중주파수 등 다양한 조건에 따라서 매우 상이하게 나타나게 된다. 그러나 전단탄성계수를 변형률  $10^{-3}\%$  이하의 선형거동에 해당하는 최대전단탄성계수로 정규화한 전단탄성계수와 전단변형률 크기의 관계는 시료의 교란, 하중 주파수 등에 무관하게 일정하게 나타나며, 시료의 종류(모래, 점토, 자갈 등)에 따라서 일정한 범위에서 결정되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 일반적으로 중간변형률에서의 전단탄성계수에 대한 연구는 정규화전단탄성계수에 대한 연구로 수행된다(김동수, 1995).

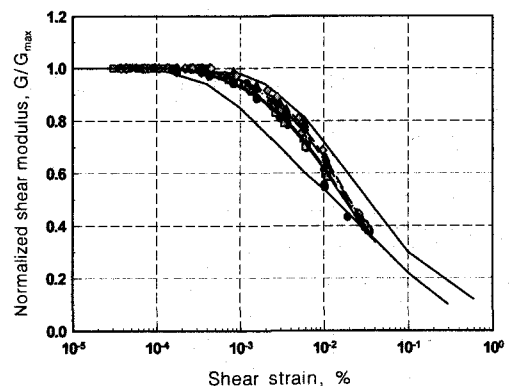
정규화 전단탄성계수 감소곡선 ( $G/G_{max}$ )에 대하여 비선형 곡선의 가장 일반적인 모형인 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 Best Fit 곡선을 결정하였다. Fig. 14는 각 섬유의 길이, 혼합비와 전단변형률 크기 변화에 따른 정규화 전단탄성계수의 감소 대표곡선(Representative curve)을 보여주고 있다. 각각의 10종의 시료에 대해 획득한 정규화



(a) Mixing ratio 0.1%



(b) Mixing ratio 0.2%



(c) Mixing ratio 0.3%

Fig. 14 Influence of mixing ratio on the  $G/G_{max}$

전단탄성계수 감소곡선의 대표곡선을 Seed-Idriss (1970), Seed 등(1984) 연구 결과를 함께 도사했다. 섬유혼합토의 전단탄성계수 감소곡선이 비혼합토 보다 Seed-Idriss의 모래질 지반의 대표 곡선 쪽으로 위치하는 경향을 보이고 있으므로 보강 효과가 있는 것으로 판단된다.

Seed-Idriss의 연구결과와 비교해 보면 사질토 지반의 대표 곡선보다 비선형성이 상당히 크다. 섬유혼합비 0.1%, 0.3%의 경우  $10^{-5}\% \sim 10^{-3}\%$ 의 변형률인 선형영역에서는 Seed-Idriss의 모래질 지반 결과 주변에 분포하는 경향을 보이고 있으며 섬유혼합비 0.2%의 경우에는 Seed-Idriss의 모래질과 자갈질 결과의 사이에 분포한다. 전단변형률  $10^{-2}\%$  이후에는 모든 혼합비에서 자갈질 지반의 결과 쪽으로 치우치고 있다.

## V. 결 론

동적 하중이 작용하는 곳의 재료 개발의 일환으로 실트질 모래와 폴리프로필렌 망사형 섬유를 혼합한 섬유혼합토의 동적 보강 효과 및 변형특성 차이를 공진주 시험을 수행하여 알아보려고 하였다. 전단변형률에 따른 전단탄성계수, 재료감쇠비와 같은 지반의 동적물성치에 섬유가 미치는 영향과 섬유혼합토로서의 적절한 길이와 혼합조건을 제시하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 섬유혼합토의 최대전단탄성계수는 혼합비 0.2%에서 보강효과가 가장 크게 나타났으며, 0.3%일 때는 보강 효과가 감소하였다. 감쇠비는 0.1%에서 보강효과가 크게 나타났다. 섬유의 혼합비가 동일한 조건이라면 섬유의 길이가 PPF19와 PPF38에서 PPF60보다 최대전단탄성계수의 보강 효과가 나타났다.

2. 전단변형률이 증가할수록 PPF19, PPF38은 비선형 영역의 변형률( $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ )에서 섬유의 혼합에 의한 보강 효과가 더욱 크게 나타났다. 감쇠비의 선형한계변형률( $10^{-3}\%$ )을 기점으로

로 전단변형률이 증가하면 보강 효과가 감소하는 경향을 보였다.

3. 비선형 곡선의 대표적인 모델인 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 혼합비에 대한 섬유혼합토의 정규화탄성계수 감소곡선을 제안하였다. Seed-Idriss의 연구결과와 비교해 본 결과 사질토 지반의 대표 곡선보다 비선형성이 상당히 크며,  $10^{-2}\%$  이후의 변형률에서는 모든 혼합비에서 자갈질 지반의 결과 주변에 분포하고 있다.

## References

1. Kim, K. S., 1999, A Study on the Strength Characteristics of Fiber Mixed Soil, MS Thesis, Seoul National University, Korea
2. Kim, D. S., 1995, "Deformational Characteristic of Dry Sand Using Resonant Column/Torsional Shear Testing Equipment", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 11, No. 1, pp. 101-112.
3. Park, Y. K., 1999, Development of a Failure Model and Analysis of Undrained Strength Characteristics of Fiber Reinforced Soil, Ph. D. Dissertation, Seoul National University, Korea
4. Gray, D. H., and Al-Refeai, T., 1986, Behavior of Fabric versus Fiber Reinforced Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 804-820.
5. Gray, D. H., and Ohashi, H., 1983, "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 335-353.
6. Hwang, S. K., 1997, Dynamic Properties of Natural Soils, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin.
7. Seed, H. B., and Idriss, I. M., 1970, Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center,

- Univ. of California, Berkeley, Sept., pp. 37.
8. Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. H., and Tokimatsu, K., 1984, Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, UCB/EERC-84/14.
9. Maher, M. H., 1988, Static and Dynamic Response of Sands Reinforced with Discrete, Randomly Distributed Fibers, Ph.D. Dissertation, University of Michigan.