

# 공진주 시험을 이용한 섬유보강토의 동적변형특성

## Dynamic Deformation Characteristics of Fiber Reinforced Soils Using Resonant Column Tests

장 병 욱 · \* 허 준 · 박 영 곤 · 차 경 섭 · 우 철 웅 (서울대)

Chang, Pyoung Wuck · Heo, Joon · Park, Young kon · Cha, Kyung Seob · Woo, Chull Woong

### Abstract

In this paper, dynamic properties of fiber reinforced soils were investigated at shearing strains between  $10^{-4}\%$  and  $10^{-1}\%$  using resonant column test. Resonant column test has been widely used as a primary laboratory testing technique in investigating dynamic soil properties expressed in term of shear modulus and material damping. At strains above elastic threshold, the variations of shear modulus( $G$ ) and damping ratio( $D$ ) were investigated. Based on test results, the small strain shear modulus( $G_{max}$ ) and damping ratio( $D_{min}$ ) were determined and the effects of confinement on  $G_{max}$  and  $D_{min}$  were characterized.

### I. 서 론

동적하중을 받는 토목구조물의 설계를 위해 전단탄성계수 및 감쇠비의 측정은 토목구조물의 동적해석에 중요하다. 공진주 시험은 지반의 변형특성인 전단탄성계수 및 감쇠비를 가장 신뢰성 있게 평가할 수 있는 시험으로 동적하중을 받는 토목구조물의 지반-구조물의 상호작용과 관련된 연구를 수행하는데 많이 사용되어 왔다.

본 연구에서는 점성토와 사질토에 폴리프로필렌 단섬유를 혼합한 섬유혼합토에 대해 공진주 시험을 수행하여, 비혼합토와 섬유혼합토의 선형영역에서 최대전단탄성계수( $G_{max}$ )와 최소감쇠비( $D_{min}$ )에 대한 특성을 비교 연구하고, 또한 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 살펴보았다.

### II. 시험재료 및 방법

#### 1. 시험장치

본 연구는 Stokoe식의 공진주 시험기를 이용하여 수행하였다. 본 시험기는 흙을 원통형으로 성형하여 시험기 바닥에 고정시키고, 상단부를 자유조건을 유지하면서 비틀력을 재하 하는 방식을 취한다. 공진주 시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀 자극을 가하여 1차 모드의 공진주파수와 진동의 크기를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 탄성과전달이론을 바탕으로 전단파 속도, 시료의 전단탄성계수와 전단변형률을 구하는 동적인 시험방법이다. 공진주 시험에서 감쇠비는 하프-파우어 대역폭법(half-power bandwidth method)과 자유진동 감쇠법(free vibration decay method)을 이용하여 구하며, 본 시험에서는 저변형률에서는 하프-파우어 대역폭법을 이용하였으며, 고변형률에서는 자유진동 감쇠법을 적용하여 각 시료별 재료 감쇠비를 결정하였다.

## 2. 시험재료

### 2.1 흙 시료

본 논문에서는 사용한 흙은 국내에서 널리 분포하는 물리적 특성이 크게 차이 나는 모래질흙과 점토질 흙을 채취하여 섬유를 혼합 한 후 공진주 시험을 수행하여 단섬유 혼합토에 대한 변형특성을 평가하였다. 본 연구에서 적용한 모래질 흙과 점토질 흙의 채취장소는 각각 수원과 의왕이며 입도분포는 Fig.1과 기초물성치는 Table 1과 같다.

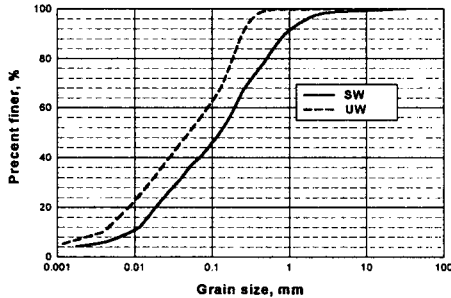


Fig. 1 Grain size distribution curve

Table 1. Physical properties of soils

Physical properties	SW	UW
Specific Gravity	2.75	2.73
Liquid Limit(%)	N.P	32.97
Plastic Index(%)	N.P	24.18
U.S.C.S	SM	ML
O.M.C(%)	23.0	20.2
Max. Dry Density( $t/m^3$ )	1.61	1.70

### 2.2 토목 섬유

시험에 사용된 토목 섬유는 폴리프로필렌(Polypropylene) 단섬유 60mm망사를 사용하였다. 섬유의 물리화학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Chemical and Physical properties of fiber

Specific Gravity	Tensile Strength(MPa)	Melting Point( $^{\circ}C$ )	Young's Modulus(MPa)	Diameter(mm)
0.91	350~770	164	3500	0.084

## 3. 시험절차

본 연구에서 SW시료와 UW시료는 공진주 시험을 위하여 채취된 교란시료를 재성형하여 시험을 수행하였다. 시험시료는 최대건조단위중량의 90% 내외 단위중량으로 A다짐으로 건조축에서 성형하였다. 섬유혼합비는 SW시료의 경우 0.2%, UW시료의 경우 0.3%의 섬유 혼합비로 하였으며, 시험시료는 직경 50mm, 높이 100mm로 성형하였다.

구속응력은 50kPa, 100kPa, 200kPa의 순차적 크기로 공기압을 이용하여 등방조건으로 재하한 후 4시간을 기다려 구속응력이 시료내에 균일하게 작용할 때 공진주 시험을 시작하였다. 시료의 공진주파수는 일정한 입력전압에서 하중주파수를 바꾸어 가면서 시료의 반응을 측정할 주파수 반응곡선으로부터 결정하였다. 하중주파수를 큰 폭으로 증가시키며(rough sweeping) 개략적인 공진주파수를 측정하고, 개략적으로 측정된 공진주파수 근방의 좁은 범위에서 작은 폭으로 하중주파수를 변화시키며(fine sweeping) 엄밀한 주파수 반응곡선을 획득하였다. 이때 하중주파수의 변화는 높은 하중주파수에서 낮은 하중주파수로, 하중주파수를 감소시키는 방향으로 변화시키는 방법(down sweeping)을 적용하였다. 실험의 수행은 공진주 시험에 의해 가해지는 손상은 무시할 수 있는 정도이므로 하나의 시료

로 모든 구속하중에서 시험을 실시하는 단계별시험법(staged testing)을 채택하였다.(김동수, 2001)

### III. 결과 및 고찰

동적변형특성인 전단탄성계수와 감쇠비는 변형률의 크기에 큰 영향을 받는다. 전단변형률의 크기가 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하여 비선형 곡선을 형성하고 있다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 대체적으로 변형률 크기에 따른 전단탄성계수 변화곡선은 위쪽으로 이동하고, 감쇠비 곡선은 아래편으로 이동한다. 이러한 경향은 본 연구에서의 SW시료와 UW시료의 비혼합토 뿐만 아니라 섬유혼합토에서도 같은 경향성을 보이고 있다.

#### 3.1 전단탄성계수( $G_{max}$ )

SW시료와 UW시료의 최대전단탄성계수 결과를 구속응력에 대하여 나타내면 Fig.2와 같다. 두 시료 모두 구속응력에 따라 최대전단탄성계수가 증가하는 것을 볼 수 있으며 또한, Fig.4에서 보는바와 같이 섬유 보강으로 인한 최대전단탄성계수 증가하는 것을 확인할 수 있다. SW시료와 UW시료에서 섬유를 보강한 경우에 SW시료의 경우 평균 6MPa, UW시료의 경우에는 평균 5.8MPa 정도의 최대전단탄성계수 증가가 나타났다. 이는 증가율로 SW시료와 UW시료 각각 7.0%와 5.7%의 최대전단탄성계수 증가율이 나타났다.

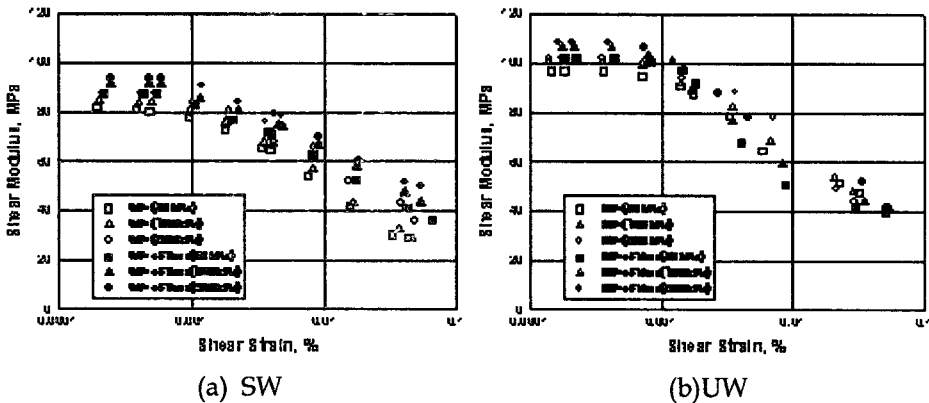


Fig 2. Comparison of Shear Modulus

#### 3.2 감쇠비(D)

SW시료와 UW시료의 재료감쇠비 결과는 Fig.3과 같다. 구속응력의 증가에 따라 작은 변화량이지만, 감쇠비가 감소함을 확인할 수 있으며, Fig.4에서 섬유를 보강한 경우에는 비혼합토보다 감쇠비가 증가함을 알 수 있다. 시료별 재료 감쇠비는 섬유를 보강하면 비보강토보다 SW시료의 경우 최소감쇠비가 3.4%내외에서 3.9%내외로 크게 나타났으며, UW시료의 경우에는 3.5%내외에서 3.8%내외로 재료감쇠비가 크게 나타났다.

SW시료와 UW시료에서  $10^{-3}$ 이하 저변형률에서의 섬유보강으로 인한 재료 감쇠비 증가 효과 보다는 중간변형률에서 섬유 보강으로 인한 재료감쇠비 증가 효과가 크게 나타났다.

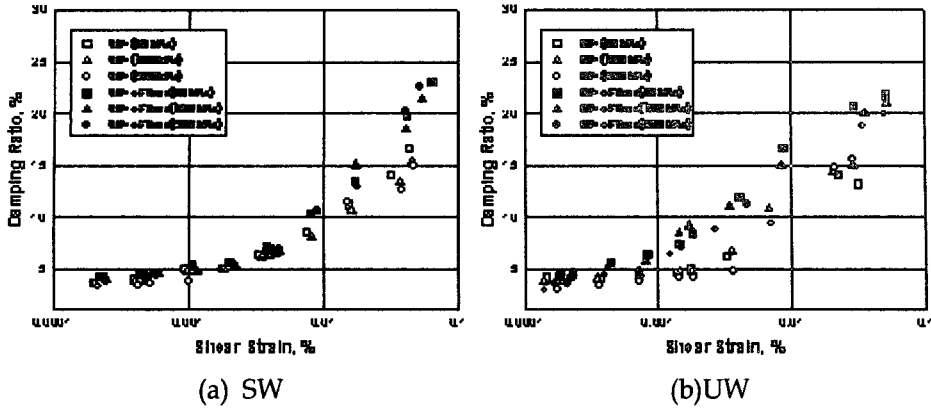


Fig 3. Comparison of Damping Ratio

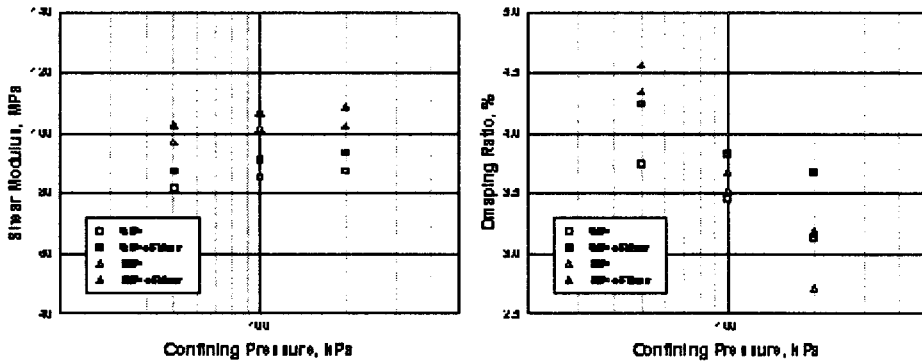


Fig 4. Shear Modulus and Damping Ratio of each sample in Cofining Pressure

#### IV. 결론

본 연구에서는 섬유 혼합토에 대하여 공진주시험을 수행하여, 최대전단탄성계수와 최소 감쇠비 및 변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 변화를 알아보았으며, 그 결과를 요약 하면 다음과 같다.

1. 최대전단탄성계수는 섬유를 보강한 경우 섬유를 보강하지 않은 비혼합토보다 SW시료의 경우에는 7%의 증가가 발생하였고, UW시료의 경우 최대전단탄성계수가 5.7% 증가했다.
2. 재료감쇠비의 경우 섬유보강토에서 SW시료의 경우 13%의 재료감쇠비 증가율이 나타났으며, UW시료의 경우에는 8%의 재료감쇠비 증가율이 나타났다.

#### 참고문헌

1. 박영근, 1999, 섬유혼합토의 전단파괴 예측 모델의 개발과 비배수 전단강도 특성 분석, 서울대학교 박사학위논문.
2. Hwang, S. K, 1997, Dynamic Properties of Natural Soil, Ph. D. Dissertation The University of Texas at Austin.
3. 김동수, 추연욱, 2001, 공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성, 한국지반공학회 논문집 제 17권 5호 pp. 115-128.
4. 김동수, 추연욱, 1999, 국내 준설패립토 지반의 동적변형특성, 1999년 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집 pp. 69-76.