

## 저변형률하 불포화 이암풍화토의 동적거동 Dynamic Behavior of Unsaturated Decomposed Mudstone Soil Under Low Strain Amplitude

허 경 한\* / 정 충 선\*\* / 배 중 선\*\*\*  
Huh, kyung han/ Chung, choong sun/ Bae, joong seon

### Abstract

The interest in the dynamic properties of soils has increased strongly because of earthquake, heavy traffic, and foundations undergo high amplitude of vibrations. Most of soils in Korean peninsula are composed of granite soils, especially the decomposed mudstone soils are widely spread in Pohang areas, Kyong-buk province. Therefore, it is very important to investigate the dynamic properties of these types of soils. The most important soil parameters under dynamic loadings are shear modulus and material dampings. Furthermore, few definitive data exist that can evaluate the behavior of unsaturated decomposed mudstone soils under dynamic loading conditions. The investigations described in this paper is designed to identify the shear modulus and damping ratio due to a surface tension for the unsaturated decomposed mudstone soils under low and high strain amplitude. For this purpose, the resonant column test and the cyclic triaxial test were performed. Test results and data have shown that the optimum saturated degree of decomposed mudstone soils under low and strain amplitude is 32 ~ 37% which is higher than that of decomposed granite due to the amount of fine particles as well as the type and proportion of chief rock-forming minerals.

**Key words** : decomposed mudstone soils, dynamic loadings, shear modulus, damping ratio, low and high strain amplitude, resonant column test, cyclic triaxial test, optimum degree of saturation Parameter

### 요 지

본 연구는 정적은 물론 동적 거동에 관한 연구가 거의 없는 포항지역의 이암풍화토에 대하여 저변형률하에서의 동적 거동 파악을 위하여 수행되었다. 동적 거동에 영향을 미치는 요소들로는 간극비, 포화도 그리고 구속압 등 3가지의 변수를 설정하였다. 그 중 간극비와 포화도를 달리하여 공시체를 제작하고 구속압을 단계적으로 증가시켜가며 저변형률하에서의 전단탄성계수와 감쇠비의 거동을 고찰하였다. 이러한 저변형률하에서의 시험을 실시하기 위해 공진주 시험장치를 사용하였으며, 시험에서 얻어진 결과값들을 이용하여 이암풍화토의 동적 거동을 분석하였다. 연구결과에 의하면 저변형률하에서 이암풍화토의 최적포화도가 32 - 37% 나타났다. 이는 주광물의 비율과 형상뿐만 아니라 세립분의 함유량 차이로 인하여 화강풍화토보다 크게 나타났다.

**핵심용어** : 이암풍화토, 동적하중, 전단탄성계수, 감쇠비, 공진주시험

### 1. 서 론

지반거동에 관한 과거의 관점은 정적 지반거동에 대해서만 주로 이루어져왔으나 산업발전에 따라 고도화

되면서 점차 동적인 하중에 의한 지반거동 해석이 중요한 요소로 대두되고 있다. 흙의 동적 거동을 파악하는데 있어 전단탄성계수와 감쇠비는 가장 중요한 요소라 볼 수 있는데, Hardin과 Drnevich(1972) 및 Qian,

\* 정회원 · 초당대학교 건설정보학과 겸임교수(huh0392@hanmail.net)

\*\* 경원전문대학 토목환경과 교수

\*\*\* (주) 도건이엔씨 지반공학부 과장

Gray, Woods(1993)는 흙의 동적 전단탄성계수와 감쇠비에 영향을 미치는 요소들을 구속압, 간극비, 포화도, 입도분포 및 흙의 구조 등으로 보았다. 한편, Wu, Gray, Richart(1984)는 건조토나 완전포화토와는 달리 불포화토에서는 간극사이에서 발생하는 메니스커스 현상을 고려하여 흙의 전단탄성계수를 추정하여야 한다고 주장하였다.

우리 나라 전역에 걸쳐 널리 분포되어 있는 풍화토는 모암의 생성과정이나 풍화정도에 따라 그 특성이 다르며 따라서 동적 거동도 같지 않은 것으로 추정되나 이에 관한 연구는 매우 미미한 실정에 있다. 한편, 경남·북 지역중 포항지역에 분포하고 있는 풍화토는 이암풍화토로써 중부지방에 주종을 이루고 있는 화강풍화토와는 생성 기원이 다른 퇴적암이 풍화되어 이루어진 흙이다. 이암풍화토는 물에 접하게 되면 풍화의 속도가 현저히 빨라지고, 쉽게 연약화되는 특징이 있어 설계 및 시공에 상당한 문제를 발생시키고 있지만, 공학적 연구 및 동적 거동에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 또한, 이암풍화토 지층에서 자주 발생하는 자연사면의 활동이나 주택단지, 도로 및 공업단지건설을 위해 시공된 절취사면에서 발생하는 크고 작은 규모의 지반파괴활동은 이암이 풍화되어 그 전단강도가 급격히 저하되기 때문이고, 풍화되는 주된 원인은 강우 또는 계절적 건습 반복 작용에 의한 영향인 것으로 알려져 있다.

본 연구는 위와 같은 사실에 기초를 두고 포항지역 이암풍화토에 대한 동적 거동을 구명하기 위하여 시도되었다. 지반의 동적 거동 해석은 지진이나 폭파와 같은 고변형률( $\gamma > 10\text{-}1\%$ )의 범위부터 차량진동, 기계

진동 및 말뚝타설 등의 저변형률( $\gamma < 10\text{-}3\%$ )의 범위까지 연구의 대상이 되고 있다. 불포화 이암풍화토의 동적 거동은 흙 입자사이에 작용하는 표면장력의 영향을 고려하여 각각의 포화도에 대한 전단탄성계수와 감쇠비를 구하여 그 거동을 파악하였는데, 일련의 시험을 수행하여 동적 특성을 지배하는 요소 중 가장 중요한 정수인 전단탄성계수와 감쇠비가 포화도, 간극비, 구속압의 변화에 어떤 영향을 받는지를 분석하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용 시료

본 연구에 사용된 원시료는 경상북도 포항시 양덕동 토지구획정리사업 현장에서 채취한 이암풍화토이다. 물성 시험의 결과는 표 1에 있으며, 그림 1은 본 연구에 사용된 시료의 입도 분석 결과이다. 체가름시험 결과 이암풍화토의 #200번체 통과량은 각각 52.7%로써 세립분을 다량 함유하고 있으며, 공학적 분류상 통일 분류법에 의하면 이암풍화토는 MH에 해당된다. 입도분포, 흙입자의 형태, 흙의 비중, 흙 속에 포함되어 있는 성분의 종류 및 양 등 흙의 특성은 최대건조단위중량 및 최적함수비에 큰 영향을 미친다(그림 3). 본 연구에 사용된 시료의 구성성분을 고찰하기 위해 XRD 분석시험을 실시하여 그림 2와 같은 결과를 얻었으며, 이암풍화토를 구성하고 있는 조암광물의 성분을 파악하였다. 주 성분은 석영, 장석 그리고 점토성분인 kaolinite, illite 등으로 구성되어 있는 것으로 나타났으며, 이는 기존에 발표된 이암의 구성성분과 잘 일치하는 것으로 나타났다(이, 1996).

표 1. 시료에 대한 물성시험결과

비중	자연함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	최대건조단위중량(g/cm <sup>3</sup> )	최적함수비 (%)
2.635	21.3	53.5	30.6	22.9	1.37	30.0

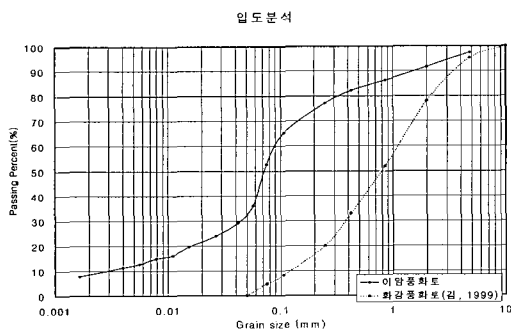


그림 1. 이암풍화토의 입도 분석 결과

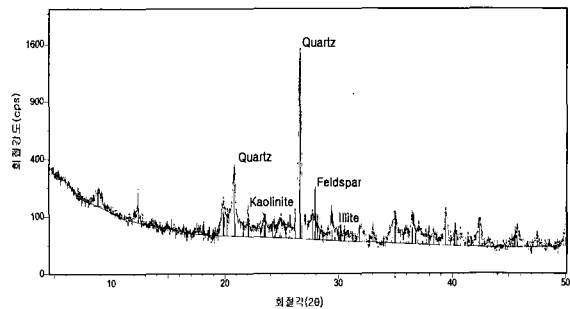


그림 2. X-Ray 회절분석 결과

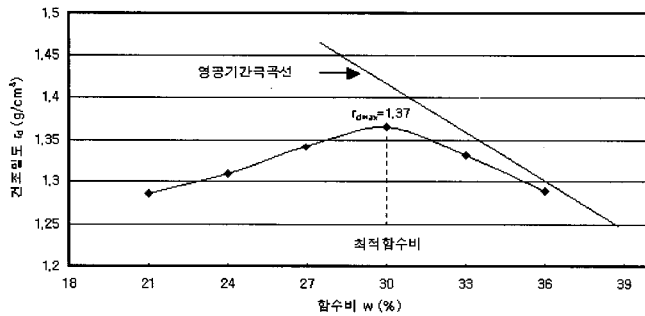


그림 3. 다짐곡선

구속압 (kgf/m <sup>2</sup> )	간극비	포화도(%)
0.5	1.0	0~70
1.0	1.1	0~60
2.0	1.2	0~60

표 2. 공진주 시험 조건

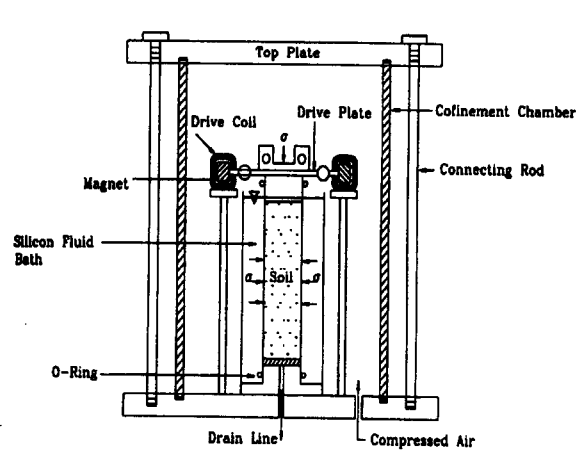


그림 4. 구속 시스템의 기본 형상

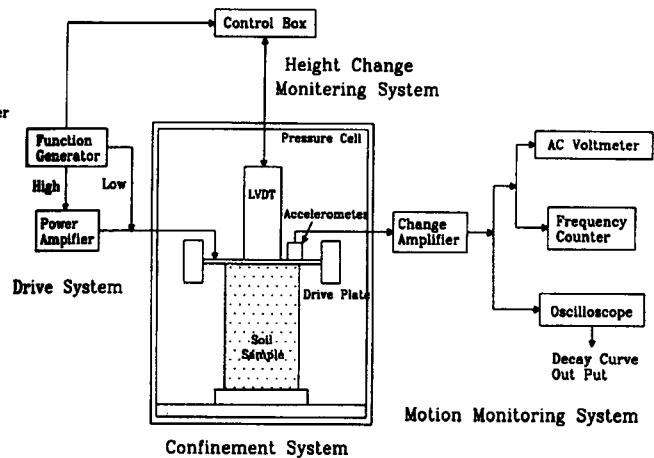


그림 5. 공진주 시험기의 상호 계통도

## 2.2 실험 장치

저변형률하에서 사용한 시험기는 Stokoe식 공진주 시험기로 일단고정 - 타단자유 형식의 기기이다. 기본 원리는 원통형의 공시체 상부에 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 1차 모드의 공진주파수(fr)와 진동의 크기(Ar)를 구한 후, 시험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파속도(Vs), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률( $\gamma$ )을 구하는 것이다. 표 2는 공진주시험 조건을 나타내고 있다. 본 연구에 사용한 기기는 10-5% ~10-1%의 낮은 변형률하에서 여러 형태의 응력 조건으로 시험할 수 있는 장점이 있다.

구속 시스템(confinement system)은 공시체 지지 시스템, 구속실(confinement chamber) 및 레귤레이터 등으로 구성되어 있다. 공시체지지 시스템은 스테인리스 재료로 된 저판(base pedestal)과 알루미늄재로 된 상부 캡(top cap)으로 되어 있다.

그림 4에서 보는 바와 같이 구속실은 내경 203.2mm (=8in), 외경 218.4mm(=8.6in), 높이 457.2mm(=18in)로 스테인리스재로 제작된 원형중공판으로 지지체의 하부

와 상부에 패인 홈에 끼워 넣고 연결 막대를 이용하여 결합한 것으로 200psi(=14kg/cm<sup>2</sup>)의 압력에 견딜 수 있도록 제작되어 있다. 레귤레이터는 공시체에 가해지는 구속 압력을 일정하게 유지시키며 작용 압력을 측정한다. 그림 5는 공진주 시험기의 상호 계통도에 관하여 나타내고 있다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 저변형률하에서의 동적 거동

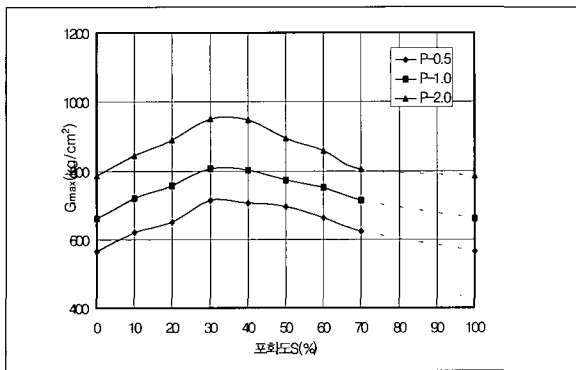
#### 3.1.1 포화도와 구속압에 따른 동적 거동

최대 전단탄성계수(Gmax)는 한계변형률 이하에서의 값을 말한다. 이 경우 최대 전단탄성계수에 대한 포화도를 최적포화도(optimum degree of saturation, Sr(opt))라 한다(Wu, 1984). 그림 6에서와 같이 결과를 분석하면 불포화도는 포화도의 변화에 따른 표면장력의 영향을 받기 때문에 완전건조나 완전포화된 흙의 전단탄성계수에 대한 거동과는 상당한 차이를 보인다. 흙 구조에 추가적인 유효구속압력을 발생시키는 모세관현상은 흙입자간 응력 발생에 영향을 미치며 이것은 흙의 전단탄성계수를 증가시킨다. 이러한 결과는 포화

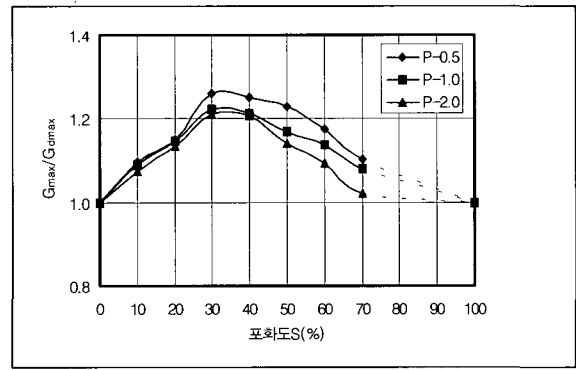
도가 저진폭 전단탄성계수에 영향을 미친다는 Wu et al.(1984)의 결과와 잘 일치하며 최적포화도에서 표면장력의 영향이 가장 크다고 볼 수 있다. 따라서 표면장력의 영향은 전단파속도를 상당히 증가시키기 때문에 불포화 상태에서 측정된 전단탄성계수 값을 완전포화 또는 완전건조 상태에서 얻은 전단탄성계수 값과 동일하게 취급한다면 토목구조물 설계시 문제점이 발생할 수 있는 것으로 판단된다.  $G_{max}/G_{dmax}$ 으로 정규화시킨 경우 그 증가비는 구속압이 증가할수록 오히려 감

소하는 거동을 보여 준다. 이 결과는 Wu(1984), Qian, Gray와 Woods(1993) 등이 주장한 심도가 얇은 지반에서 전단탄성계수에 대한 표면장력 효과가 심도가 깊은 지반에서의 전단탄성계수에 대한 표면장력 효과보다 더 크다는 사실과 잘 일치한다. 즉, 표면장력 효과로 인하여 증가하는 유효응력은 구속압이 큰 깊은 깊이에서보다는 낮은 구속압을 가지는 지표면에 가까운 지반 일수록 비례적으로 커지는 것으로 볼 수 있다.

< e = 1.0 >

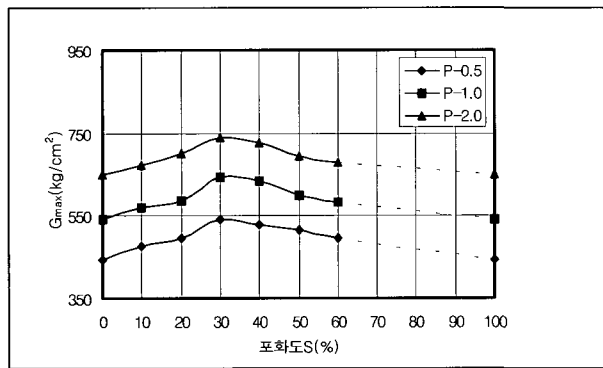


(a) 전단탄성계수

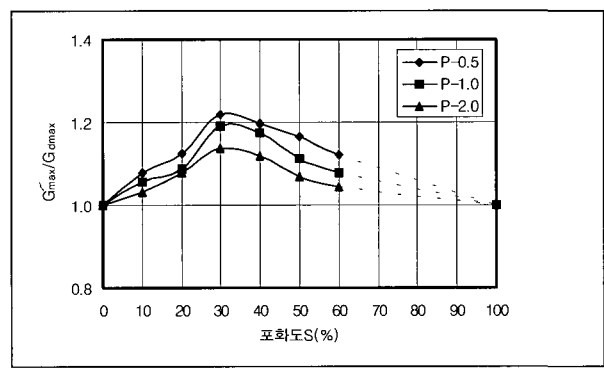


(b) 정규화전단탄성계수

< e = 1.1 >

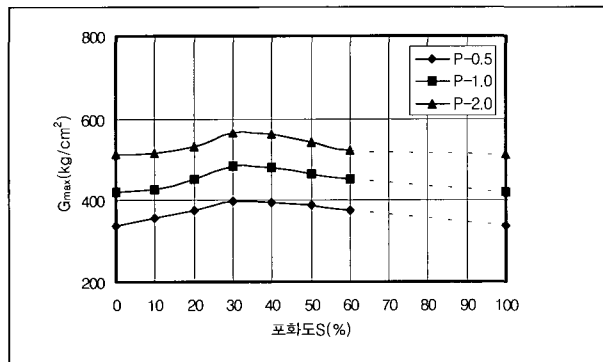


(a) 전단탄성계수

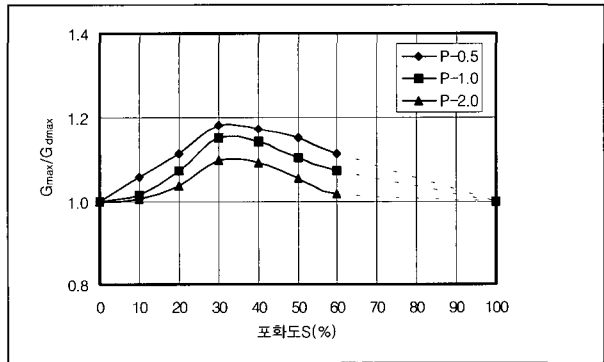


(b) 정규화전단탄성계수

< e = 1.2 >

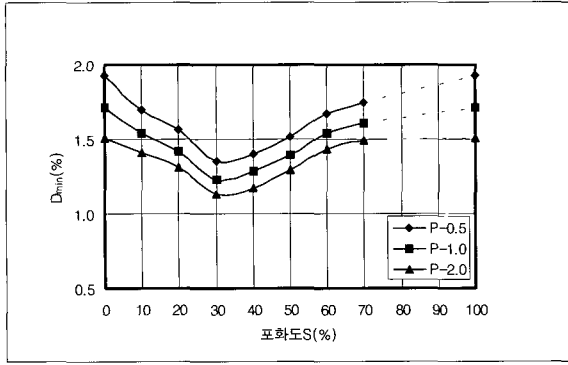


(a) 전단탄성계수

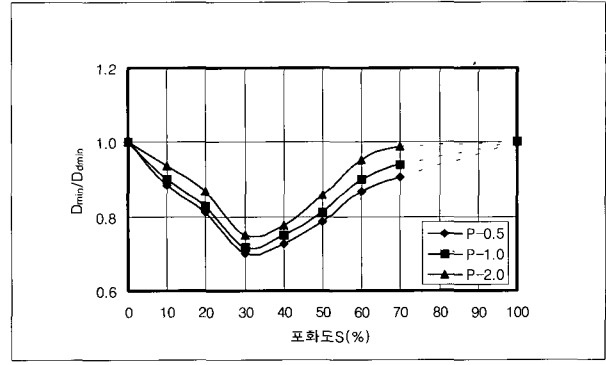


(b) 정규화전단탄성계수

그림 6. 포화도와 구속압에 따른 최대전단탄성계수의 거동



(a) 감쇠비



(b) 정규화감쇠비

그림 7. 포화도와 구속압에 따른 감쇠비의 거동 (간극비  $e = 1.0$ )

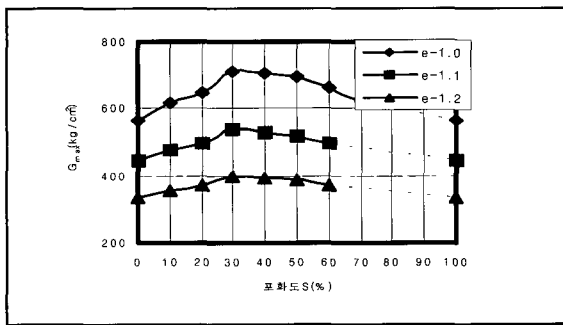
그림 7에서와 같이 감쇠비의 변화는 시료의 포화도에 관계없이 구속압이 증가할수록 최소감쇠비가 감소함을 알 수 있었다. 또한 각각의 구속압에서 포화도에 따른 시험을 수행했을 때 간극비에 따라 포화도가 약 32%~37%에서 최소감쇠비가 나타났다. 간극비가 커짐에 따라서 감쇠비의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 흙 사이에 존재하는 간극이 커짐에 따라서 감쇠비도 커진다는 기존의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 정규화 감쇠비는 구속압이 감소할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이는 정규화 전단탄성계수 증가비의 결과와 마찬가지로 모세

관 메니스커스 현상에 의한 표면장력의 영향인 것으로 판단된다.

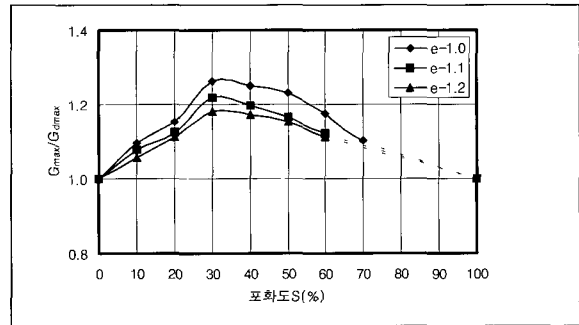
### 3.1.2 포화도와 간극비에 따른 동적 거동

포화도와 간극비에 따른 각 구속압에서의 최대전단탄성계수의 거동을 나타낸 그림 8과 그림 9는 같은 포화도를 가지는 흙에서의 간극비가 증가하면 전단탄성계수는 감소하고 또한, 동일한 간극비를 가지는 경우에 구속압이 증가하면 최대전단탄성계수도 증가하는 경향을 보였다.

< 구속압 = 0.5 kg/cm<sup>2</sup> >

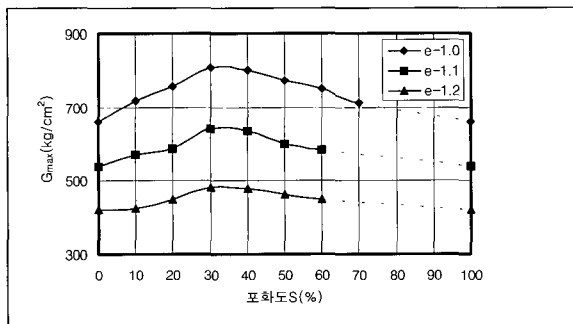


(a) 전단탄성계수

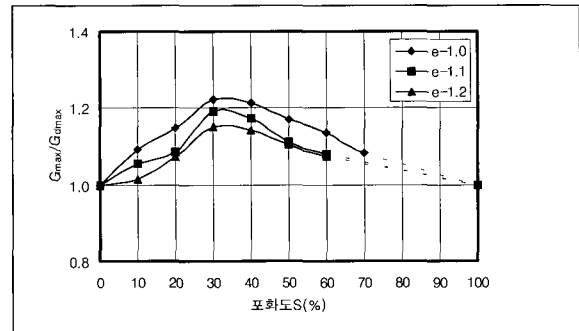


(b) 정규화전단탄성계수

< 구속압 = 1.0 kg/cm<sup>2</sup> >

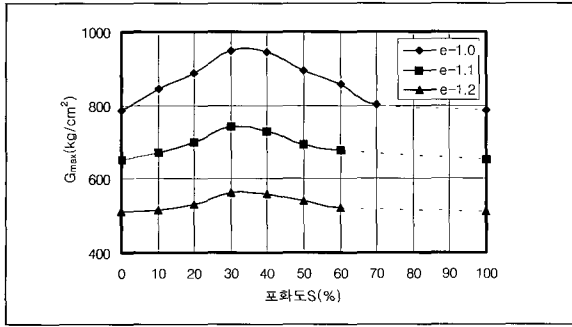


(a) 전단탄성계수

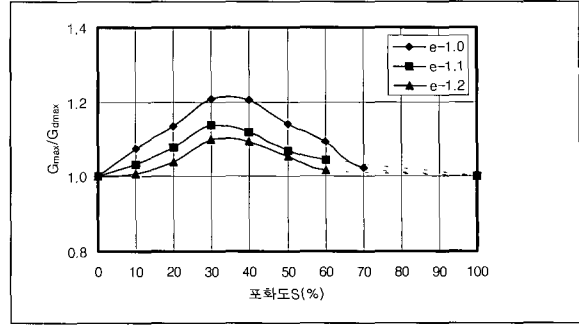


(b) 정규화전단탄성계수

< 구속압 = 2.0 kg/cm<sup>2</sup> >



(a) 전단탄성계수



(b) 정규화된전단탄성계수

그림 8. 포화도와 간극비에 따른 전단탄성계수의 거동

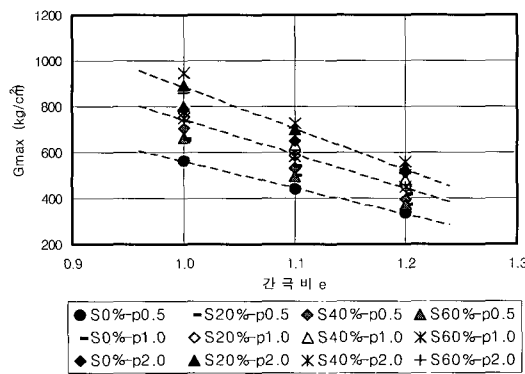


그림 9. 최대전단탄성계수에 대한 간극비와 구속압의 효과

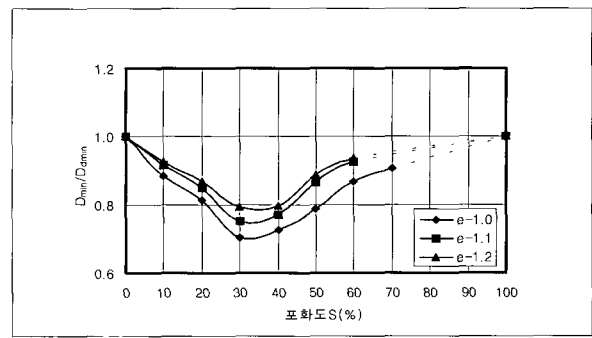
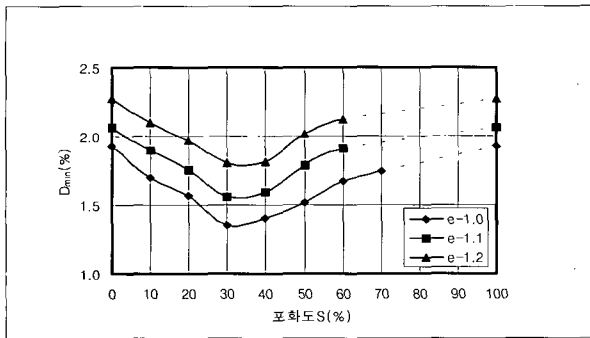


그림 10. 포화도와 간극비에 따른 감쇠비의 거동 (구속압 = 0.5 kg/cm<sup>2</sup>)

시료의 구속압을 0.5 kg/cm<sup>2</sup>으로 일정하게 하고, 간극비를 1.0, 1.1, 1.2로 달리하여 포화도를 변화시켰을 때 최소감쇠비 값의 분포를 나타낸 결과는 그림 10과 같다.

시료의 포화도에 관계없이 간극비가 증가할수록 최소감쇠비는 증가하는 것으로 나타났다. 각 구속압에서 포화도를 달리했을 때 최적포화도가 약 32% ~ 37% 인 시료에서 최소감쇠비가 나타나는데 이것 역시 표면장력의 영향으로 인한 것으로 사료된다. 또한 최대전단탄성계수와 마찬가지로 감쇠비의 거동에서도 최적합수

비는 간극비가 증가할수록 그 변화량은 적으나 증가하는 경향을 나타내고 있다.

### 3.2 이암풍화토와 화강풍화토의 동적 거동 비교·분석

재료의 특성 및 실험 조건의 차이로 인하여 정량적인 비교는 되지 못하지만, 포화도에 따른 화강풍화토(김, 1999)의 동적 거동과 비교하기 위하여 정성적인 방법으로 두 시료간의 특성을 그림 11(a)와 같이 나타내었다. 화강풍화토의 구속압은 0.5, 1.0, 2.0kg/cm<sup>2</sup> 이

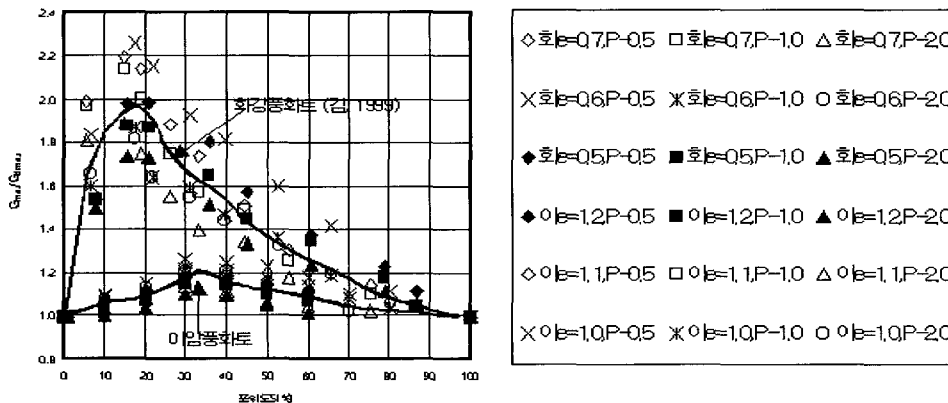
고, 간극비는 0.5, 0.6, 0.7 일 때의 정규화 전단탄성계수 증가비와 비교·검토하였다. 체가름시험 결과 이암풍화토와 화강풍화토의 #200번체 통과량은 각각 52.7%와 4.6%로써 이암풍화토가 상대적으로 세립분을 다량 함유하고 있으며, 공학적 분류상 통일 분류법에 의하면 이암풍화토는 MH에 속하고, 화강풍화토는 SW에 해당된다. 정규화 전단탄성계수 증가비 비교에서 화강풍화토가 이암풍화토보다 월등히 크게 나타나는 것은 간극비가 작을수록 그 효과가 크다는 기존의 연구결과(Wu, 1984; Woods at al., 1993)와도 잘 일치하는 부분이다. 화강풍화토는 최적포화도가 약 17% ~ 20%에 나타나며, 이암풍화토는 최적포화도가 약 32 ~ 37%에 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 여러 가지 조건과 구성 성분 차이의 영향도 고려해야겠지만, 화강풍화토가 #200체 통과량이 4.6%로써 세립분 함유량이 낮으며, 이암풍화토가 다량의 점토질 세립분(#200체 통과량 52.7%)을 함유하고 있는 것을 고려해 볼 때 세립분의 영향으로 인한 최적포화도의 차이라고 할 수 있다. 이것은 Qian & Woods(1993)의 세립분함유량이 증가할수록 최적포화도가 증가한다는 연구결과를 뒷받침할 수 있다. 포화도에 따른 이암풍화토와 화강풍화토에 대

한 정규화 감쇠비 거동을 그림 11(b)에 나타내었다. 화강풍화토의 간극비 형성이 이암풍화토에 비하면 상당히 조밀한 면에서 정규화 감쇠비의 효과가 크다는 것을 알 수 있었으며, 최적 포화도 역시 전단탄성계수를 정규화시켰을 때와 같이 각각 나타났다.

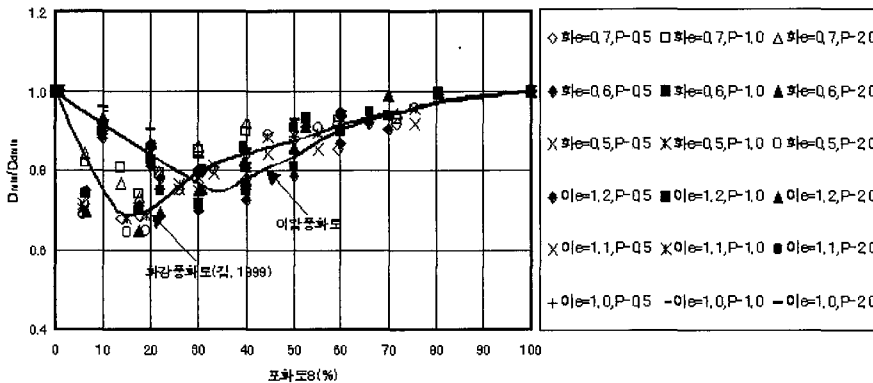
### 3.3 전단변형률과 구속압의 영향

동하중을 받는 흙의 응력 - 변형률 관계는 비선형 거동을 보이게 된다. 따라서 탄성 거동을 나타내는 최대변형률인 한계변형률(threshold strain)을 고찰하여 시험시료의 탄성적인 경향을 알아보는 것은 매우 중요하다. 정규화 전단탄성계수(normalized shear modulus,  $G/G_{dmax}$ )를 전단변형률과의 관계로 나타냄으로써 구속압에 따른 전단탄성계수의 절대값의 영향을 배제하고 한계변형률을 알 수가 있다.

그림 12 ~ 그림 13과 같이 본 연구의 시험시료들을 전체 도시화하면 전반적으로 한계변형률이 약  $8 \times 10^{-3}\%$  ~  $2 \times 10^{-3}\%$  정도이며, 구속압이 증가할수록 약간씩 한계변형률이 증가하며  $G/G_{dmax}$  곡선이 오른 쪽으로 천이되는 현상을 보이고 있다. 이러한 경향은 김 (1999)의 실험결과와도 일치하는데, 구속압이 증가



(a) 정규화전단탄성계수



(b) 정규화감쇠비

그림 11. 화강풍화토와의 동적 거동 비교

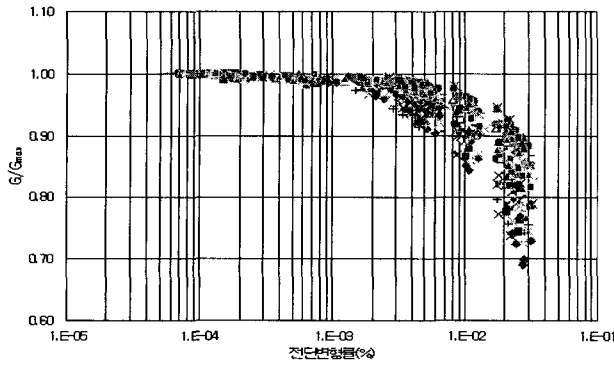


그림 12. 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수

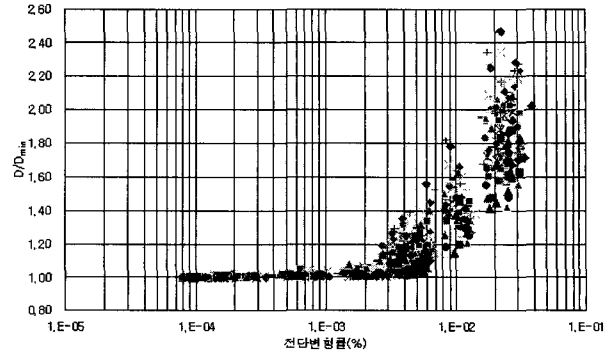


그림 13. 전단변형률에 따른 정규화 감쇠비

하면 재료의 탄성 영역이 그만큼 커진다는 것을 의미한다.

기존의 화강풍화토(김, 1999)의 한계변형률이 약  $5 \times 10^{-3}\% \sim 1 \times 10^{-3}\%$ 인 범위이지만 이암풍화토는 구성 성분과 세립분의 영향으로 인해 한계변형률의 범위가 보다 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

포항지역에 넓게 분포하고 있는 이암 풍화토의 동적 거동을 파악하기 위해서 간극비와 구속응력 그리고 포화도를 달리하여 저변형률하에서의 시험을 통한 결과들을 정리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전단탄성계수는 포화도가 높아짐에 따라 증가하다가 표면장력이 최대가 되는 최적포화도를 지나 감소한다. 구속압에 관계없이 간극비에 따라 최적포화도는 약 32 ~ 37%에 나타났으며, 이 결과는 화강풍화토의 최적포화도 17 ~ 19.5% 보다 상당히 큰 것으로 나타났다.
2. 구속압은 최적포화도에는 영향을 미치지 않았으며, 구속압이 증가할수록 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 실제 지반상에서 심도가 깊어질수록 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소한다는 기존의 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다.
3. 포화도의 영향을 배제하기 위해서 건조상태일 때의 값으로 정규화하여 분석하면, 오히려 정규화하기 전보다 낮은 구속압일수록 모관효과는 큰 것으로 나타났다. 이는 기존에 발표된 화강풍화토의 경우와 같은 결과였다.
4. 이암풍화토의 탄성 영역의 최대치인 한계변형률은 약  $8 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}\%$  범위로 나타났는데, 전단탄성계수가 크면 한계변형률도 커진다는 기존의 연구결과와 일치한다.

#### 참 고 문 헌

- 김덕용(1999) “화강풍화토의 동적거동”, 단국대학교 박사학위논문.
- 김동수, 권기철, 박재영, 정순용(1997) “화강풍화토의 변형특성” 지반공학회 봄학술 발표회 논문집.
- 배경태, 이종규(1997) “중간전단변형률에서의 불포화 화강풍화토의 동적거동” 단국대학교 석사학위 논문.
- 김영수, 정성관, 박강우, 김병탁(1994) “이암 풍화토의 공학적 특성에 관한 실험적 연구 -포항지역의 이암풍화토를 중심으로-”, 한국지반공학회 논문집, 제10권 제4호, pp.5~16.
- 이영희(1996) “포항이암층의 Slaking, 팽창 및 전단강도특성”, 한국지반공학회 논문집, 제12권 제2호, pp.33~42.
- 이종규(1999) “화강풍화토의 동적거동”, 한국지반공학회 논문집, 제15권 제1호, pp.175~183.
- 한중환, 광영훈, 손진담, 손병국(1986) “한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체 구조발달 및 퇴적환경연구”, 과학기술처 연구보고서, KR-86-2-(B)-4, pp.20~49.
- Bo Andreasson.(1979) “Deformation Characteristics of Soft, High-Plastic Clays Under Dynamic Loading Conditions”, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology.
- Hardin B. O. and Drnevich, V. P.(1972) “Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves”, JSMFED, ASCE Vol. 98, No. SM6
- S. Wu, Donald H. Gray and F. E. Richart, Jr.(1984) “Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts.” J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 110(9),



pp.1188~1203.

Xuede Qian, Donald H. Gray and Richard D. Woods.(1993) "Voids and Granulometry : Effects on Shear Modulus of Unsaturated Sands", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 2

Clarence. K. Chan., Marshall. L. Silver.(1976) "Cyclic Triaxial Strength of Standard Test Sand". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol. 102, No. GT5

Marshall L. Silver, Ted K. Park.(1975) "Testing Procedure Effects on Dynamic Soil Behavior" Journal of the Geotechnical Engineering Division,

ASCE, Vol. 101, No. GT10

Richard D. Woods et al.(1993) "Void and Granulometry : Effect on Shear Modulus of Unsaturated Sands", JGTED. ASCE. Vol. 119, No. 2

Richard D. Woods et al.(1993) "Resonant Column Tests on Partially Saturated Sands", GTJODJ. Vol. 16, No. 1

◎ 논문접수일 : 2004년 3월 26일

◎ 심사의뢰일 : 2004년 4월 02일

◎ 심사완료일 : 2004년 6월 11일