

## 석분 및 벤토나이트 함유량에 따른 화강풍화토의 동적거동 특성

### Dynamic Behavior Properties of Decomposed Granite Soil varying Content of Stone Sludge and Bentonite

이 강 일<sup>1\*</sup>      Lee, Kang-Il                      김 민 준<sup>2</sup>      Kim, Min-Jun  
김 태 훈<sup>3</sup>      Kim, Tae-Hoon                      우 종 태<sup>4</sup>      Woo, Jong-Tae

#### ABSTRACT

Dynamic characteristics of decomposed granite soil mixed with stone sludge and bentonite were investigated to figure out adequate applications of stone sludge. A total of 16 specimens with different stone sludge contents of 0%, 5%, 10%, 15% and bentonite with 0%, 5%, 10%, 15% were prepared. Resonant column tests were carried out on each specimen at different confining pressure. The results showed that the optimum mixing ratio which can satisfy the maximum shear modulus and the minimum damping ratio of the decomposed granite soils ranges from 5% to 10% respectively.

#### 요 지

본 연구는 석산개발 및 석재가공으로 인해 발생하는 석분의 적절한 활용방안을 모색하기 위해 화강풍화토에 석분과 벤토나이트를 혼합한 시료에 대한 동적거동 특성을 연구하였다. 공시체 성형은 화강풍화토에 석분을 0%, 5%, 10%, 15%로 혼합하고 그 혼합토에 벤토나이트를 0%, 5%, 10%, 15%로 다시 혼합하여 만든 16개의 시료를 중량백분율로 배합한 뒤 표준다짐을 실시하고 공시체를 제작하여 각 구속압별로 공진주실험을 실시하였다. 본 연구결과 화강풍화토가 가지고 있는 최대전단탄성계수 및 최소감쇠비 조건을 만족하는 혼합비율은 화강풍화토에 석분과 벤토나이트의 함유량이 각각 5%에서 10%범위 정도인 것으로 확인되었다. 따라서 이 범위 내에서 화강풍화토에 석분과 벤토나이트를 혼합한다면 이 혼합된 시료도 동적거동을 받는 지반재료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Decomposed granite soil, Stone sludge, Bentonite, Damping ratio

#### 1. 서 론

화강풍화토는 우리나라에서 널리 분포하는 흙으로써 공기에 노출되거나 물과 접촉하면 강도특성이 쉽게 변화하는 흙이며, 도로건설, 지하철, 사면조성, 댐건설 등 얇은 기초 부터 대도시 근접시공에 이르기까지 건설기술자가 가장 많이 당면하고 있는 지반재료이다. 또한 최근 들어 석산개발 및 석재가공으로 인해 발생하는 다량의 석분이 산업폐기물로 지정되어 처리되고 있어 이에 대한 적절한

활용방안의 연구가 절실하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 석분의 적절한 활용방안을 검토하기 위해 화강풍화토에 석분과 벤토나이트와 같은 세립분을 혼합했을 경우 이 시료의 동적특성에 대한 연구를 진행하였다.

석분슬러지의 특성 및 재활용에 관한 연구는 1990년 초 이상권과 김운복(1992)에 의해 석재산업의 재해 및 공해방지를 위한 기초연구를 시작으로 손정수 등(1995)은 폐석 및 석분슬러지를 활용한 인조 석판재의 제조에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 진호일 등(1999)은 석산 및 석가

1\* 정회원, 대전대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, E-mail: kilee@daejin.ac.kr)

2 비회원, 대전대학교 토목공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate School Master Course, Dept. of Civil Engineering, Daejin University)

3 정회원, (주)대우건설 기술연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology)

4 정회원, 경북대학교건설환경공학과교수 (Member, Professor, Dept. of Construction and Environmental Engineering, Kyungbuk University)

공업체로부터 발생되는 석폐기물의 물리, 화학적 특성에 관한 연구를 하였고, 백신원(2001)은 석분의 효과적인 이용에 관한 연구를 하였다. 그리고 한국자원연구소(2000)에서는 석분 슬러지 활용기술 개발에 관한 연구를 하였으며 김치권 등(1996)은 석분슬러지의 재활용방안에 대한 연구, 남정만 등(2005)은 현무암 석분슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구를 발표 바 있다. 더불어, Boosinsuk et al.(1991)과 Kenney et al.(1991)은 모래-벤토나이트 혼합물의 지반공학적 특성에 관한 연구를 수행하였다. 김찬기 등(2008)은 폐석분 혼합토의 지반공학적 특성 및 활용에 관해 연구하였으며, Fernuk(1989)은 4종의 흙-벤토나이트 혼합물에 대하여 삼축압축 투수실험과 현장시료의 투수실험을 통하여 실내와 현장시료의 투수성에 대한 상호관계를 규정하였다. 또한 흙의 동적특성 연구로는 이종규 등(1999)은 세립분 함유량에 따른 화강풍화토의 동적거동 특성을 연구하였고, 이형근(2002)은 공진주실험을 이용한 화강암 풍화토의 동적물성치 측정에 대하여 연구하였다. 더불어 김동수 등(2004)은 공진주/비틀전단실험을 이용한 화강풍화지반의 동적변형특성을 연구하였다.

본 연구는 김찬기 등(2008)에 의해서 기 연구된 화강토와 석분 그리고 벤토나이트를 다양하게 혼합했을 경우 인공호수 및 쓰레기 매립장등의 차수공사 등에 이러한 재료의 활용방안에 대한 연구의 일환이며 시험재료 및 시료의 배합조건 그리고 다짐조건이 동일한 상태에서 석분과 벤토나이트와 같은 세립분이 증가할 경우 흙의 동적거동 특성을 연구한 것이다. 이를 위해 포천지역에서 채취한 화강풍화토에 대해 중량백분율로 0%, 5%, 10%, 15%의 석분을 각각 혼합하고, 여기에 벤토나이트를 0%, 5%, 10%, 15%를 각각 다시 혼합하는 배합조건으로 다짐특성 및 토사공진주실험 등을 통해 본 혼합시료의 동적특성 및 건설재료의 활용가능성을 연구하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 공진주 실험장비

연구에 사용된 공진주실험기는 그림 1과 같이 Stokoe식 실험기로서 경계조건으로는 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 가진시스템(drive system)을 시험시편의 상부와 연결하여 지반재료에 비틀력을 재하하고 비틀력에 의한 공시체의 거동은 가진판에 부착된 가속

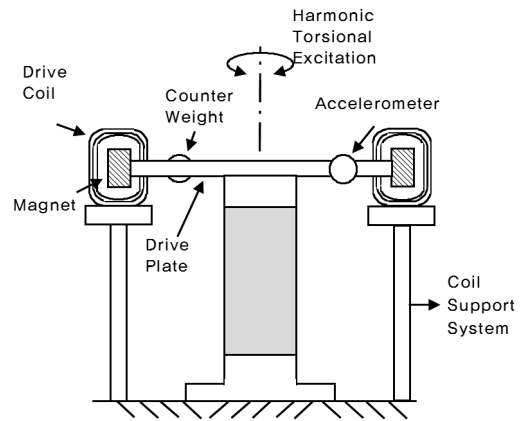


그림 1. 공진주시험기의 개요도(김동수 등, 2004)

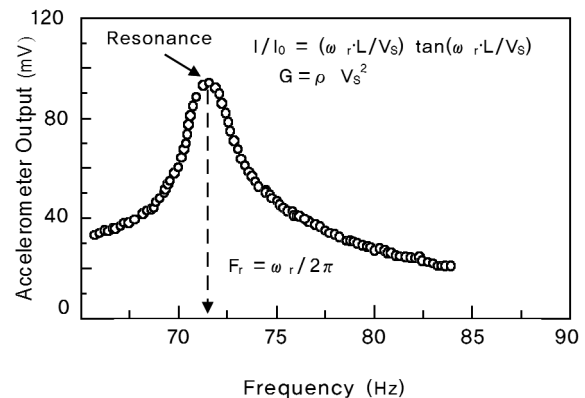


그림 2. 공진주시험에서 얻은 주파수 응답곡선의 예(김동수 등, 2004)

도계(accelerometer)를 이용하여 측정한다.

공진주시험의 기본원리는 원통형의 시편에 진동수를 바꿔가면서 비틀을 가하여 그림 2에서와 같이 1차 모드의 공진주파수( $f_r$ )와 진동의 크기( $A_r$ )를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기, 공시체의 무게를 이용하여 전단파 속도( $V_s$ ), 전단탄성계수( $G$ ) 및 전단변형율( $\gamma$ )을 구하는 동적인 시험방법으로 다음과 같은 방법으로 그 결과를 얻는다.

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

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

여기서,  $I$  = 시편의 질량관성 모멘트  
 $I_0$  = 가진시스템의 질량관성 모멘트  
 $\omega$  = 시편-가진시스템의 고유 진동수  
 $l$  = 시편의 길이  
 $V_s$  = 전단파 속도

식 (1)에 의해 전단파속도( $V_s$ )가 구해지면 전단탄성계

수(G)를 식 (2)로 구한다.

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

여기서,  $\rho$  = 시료밀도

공진주시험에서 감쇠비(D)는 자유진동 감쇠곡선(free vibration decay curve)을 이용하는 방법을 적용하여 결정하였으며 감쇠비를 산정하는 이론식은 식 (3)과 같다.

$$\delta = \ln \frac{\theta_n}{\theta_{n+1}} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (3)$$

여기서,  $\theta_n, \theta_{n+1}$  : 두 개의 잇따른 진폭  
 $D$  : 감쇠비

## 2.2 시료의 물리적 특성

본 연구에서 사용된 화강풍화토는 경기도 포천지역에서 채취하였으며 벤토나이트는 DY-100S를 사용하였다.

표 1. 석분슬러지의 성분함량(김중철, 2011)

분석항목	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
성분함량(%)	55.68	19.63	2.64	0.59	1.08	0.9	0.58	불검출	0.033	2.38	0.23

표 2. 각 시험시료의 물리적 특성

시료	PI(%)	#200체 통과율(%)	Gs	USCS
화강풍화토	NP	13.5	2.67	SW
석분	NP	97.8	2.70	ML
벤토나이트	227.4	100.0	1.70	CH

표 3. 시료성형 및 시험조건

시료	석분 함유량(%)	벤토나이트함유량(%)	화강풍화토 함유량(%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	최적 함수비(%)	구속응력 (kPa)	
A-1	0	0	100	20,604	9.62	50	
A-2		5	95	20,231	9.81		
A-3		10	90	19,731	10.12		
A-4		15	85	19,623	10.20		
B-1	5	0	95	19,721	9.49		
B-2		5	90	19,594	9.62		
B-3		10	85	19,221	9.98		
B-4		15	80	19,113	10.24		
C-1	10	0	90	19,582	9.60		100
C-2		5	85	19,525	9.98		
C-3		10	80	19,250	10.56		
C-4		15	75	19,0054	10.81		
D-1	15	0	85	19,623	9.90	200	
D-2		5	80	19,574	10.13		
D-3		10	75	19,231	10.29		
D-4		15	70	19,064	10.45		

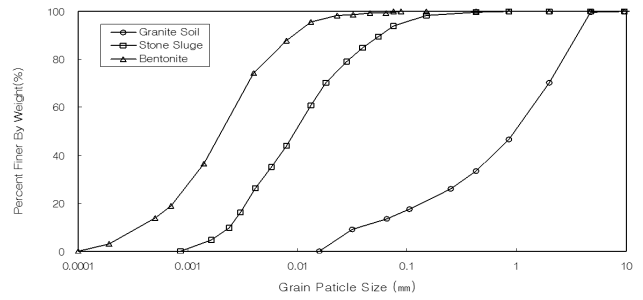
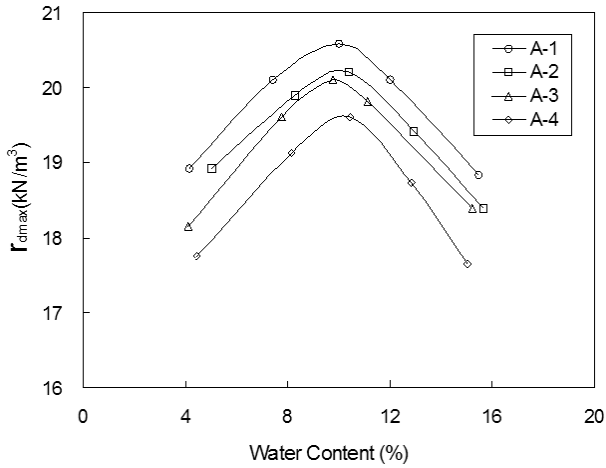


그림 3. 각 시험시료의 입도분석

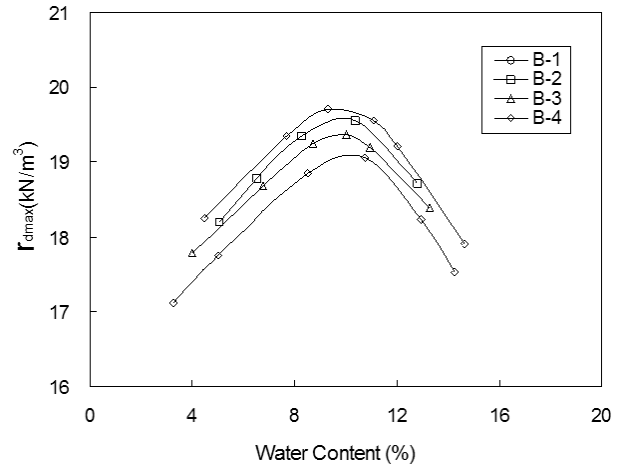
석분은 석재 가공 중 나오는 부산물로서 유해성은 없지만, 적절한 활용방안이 없어서 산업폐기물로써 버려지고 있는 포천지역 석재공장에서 발생된 석분 슬러지를 사용하였다. 포천지역 석분의 화학적 조성성분은 XRD 분석기를 통해 석분슬러지의 성분조사를 실시하였으며 그 결과는 표 1과 같고 규소와 알루미늄이 주성분으로 나타났다. 또한 표 2는 본 연구에 사용된 각 시료의 물리적 특성을 나타낸 것이며, 그림 3은 각 시료에 대한 입도분석 결과이다.

## 2.3 시험조건

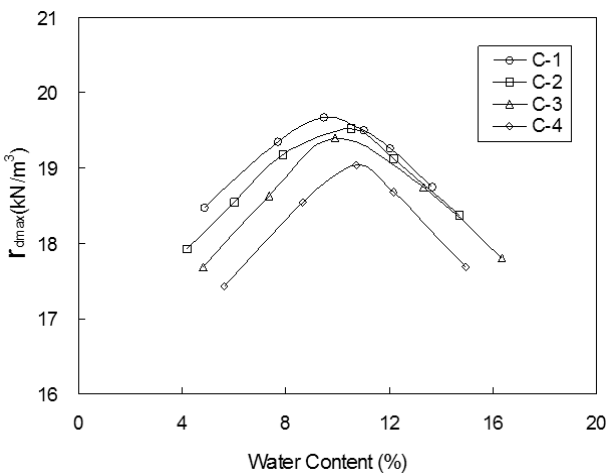
본 연구에서 수행한 공진주 시험조건은 표 3과 같이 화



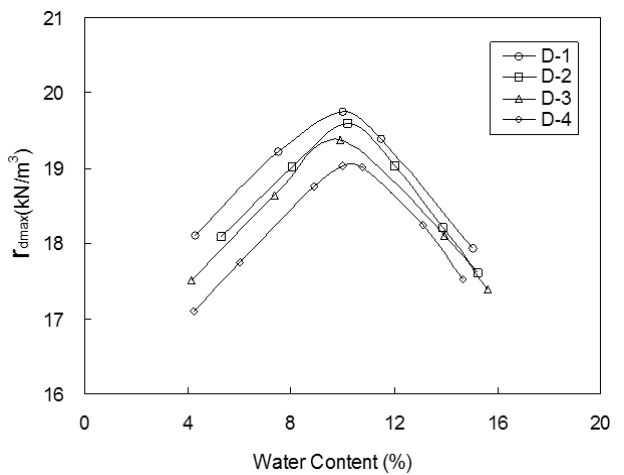
(a) 석분이 0%인 시료(A 그룹)



(b) 석분이 5%인 시료(B 그룹)



(c) 석분이 10%인 시료(C 그룹)



(d) 석분이 15%인 시료(D 그룹)

그림 4. 각 시험조건별 다짐곡선

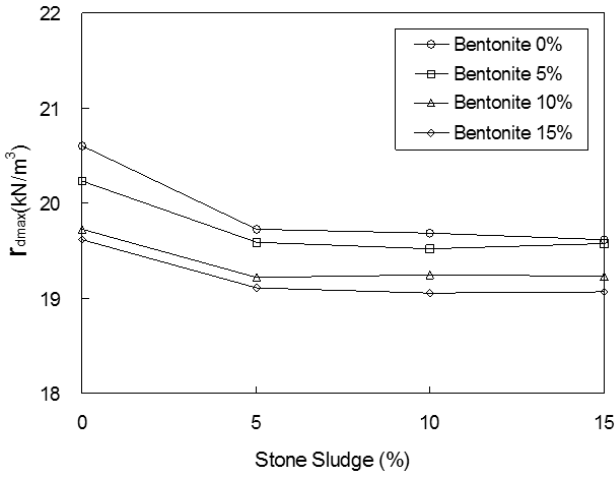
강풍화토에 대해 중량백분율로 0%, 5%, 10%, 15%의 석분을 각각 혼합하고, 여기에 벤토나이트를 0%, 5%, 10%, 15%를 각각 다시 혼합하는 배합조건으로 하였다. 화강풍화토 시료는 입자의 크기가 시험에 미치는 영향을 줄이기 위해 4.75mm의 체로 시료를 걸러낸 후 노건조시킨 다음 최적함수비 상태의 흙을 만들고 각 시험조건별로 시료를 고르게 혼합하였다. 공시체 제작은 먼저 표준다짐시험법(D 다짐)으로 최적함수비와 최대건조단위중량을 구하고 이 값을 기준으로 함수비는 최적함수비를 사용하고 단위중량은 최대건조단위중량의 95%의 값을 사용하여 과소다짐법으로 공시체를 제작하였다. 공시체의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm의 원통형이며 공진주시험에 사용된 구속응력은 각각 50, 100, 200kPa의 단계로 나누어 각각의 시료에 대해 압밀과정을 거친 후 전단시험을 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

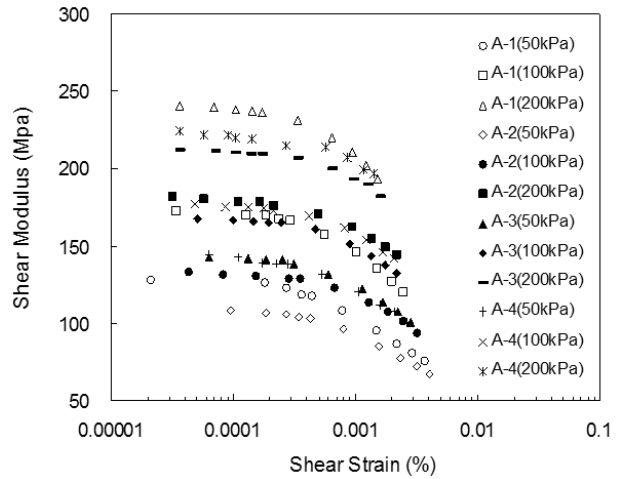
#### 3.1 다짐시험

화강풍화토에 석분과 벤토나이트를 일정 중량비로 혼합한 뒤 표준다짐시험(D다짐)을 실시하였으며 그 시험 결과는 그림 4와 같다. 그림 4는 표 2에서와 같이 화강풍화토에 석분함유량이 0%인 A그룹과 석분함유량이 5%인 B그룹 그리고 석분함유량이 각각 10%, 15%인 C, D그룹에 대한 다짐시험 결과를 나타낸 것이다.

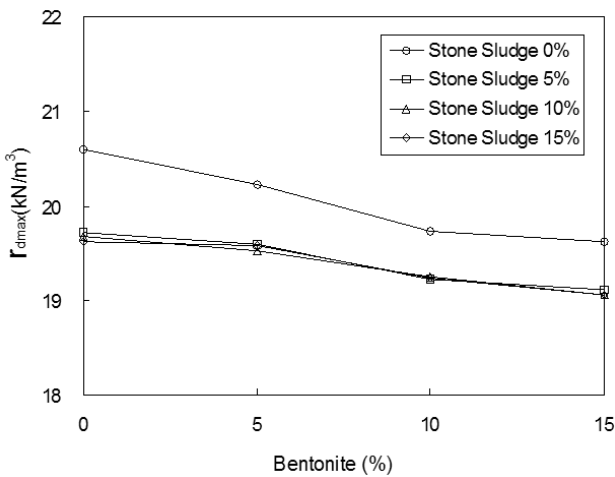
표 3과 그림 4의 다짐시험결과에 의하면 최적함수비는 9.49~10.49% 범위에 위치하고 있으며 석분함유량 및 벤토나이트 함유량이 많아질수록 최적함수비는 약간씩 증가하는 양상을 보이고 있다. 또한 그림 5는 그림 4의 실험결



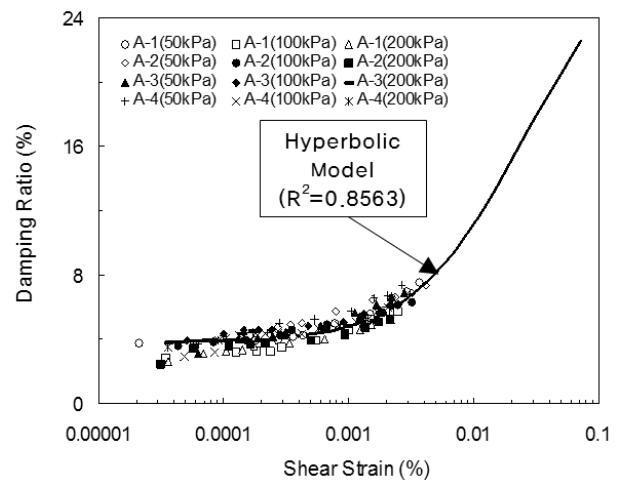
(a) 석분함유량



(a) 전단변형률과 구속압에 따른 전단탄성계수



(b) 벤토나이트함유량



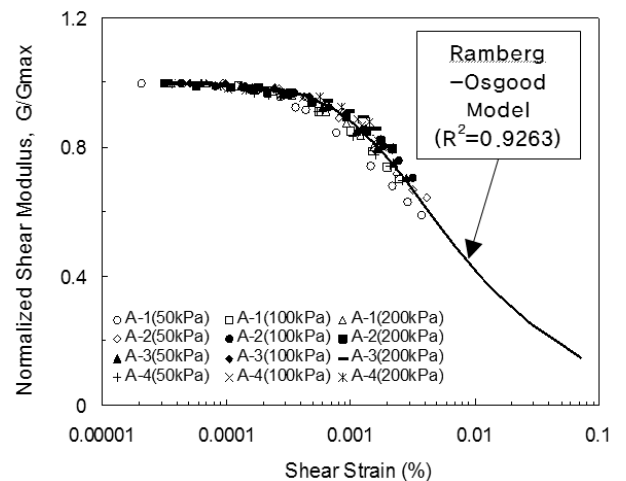
(b) 전단변형률과 구속압에 따른 감쇠비

그림 5. 석분 및 벤토나이트 함유량에 따른 최대전단위중량의 변화

과를 석분과 벤토나이트 함유량에 따른 최대전단위중량 변화를 분석하여 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면 석분의 함량이 증가할수록 최대전단위중량은 현저히 감소하다가 석분의 함유량이 5% 이후부터는 석분의 함유량에 관계없이 최대전단위중량은 일정한 양상을 보이고 있다. 또한 벤토나이트 함유량이 많아질수록 최대전단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보이고 있다.

### 3.2 공진주시험

그림 6은 석분함유량이 0%인 경우(A그룹)에 대하여 대표적으로의 구속압에 따른 전단탄성계수, 감쇠비 그리고 정규화 전단탄성계수에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 실험결과에 의하면 전단탄성계수는 벤토나이트



(c) 전단변형률과 구속압에 따른 정규화 전단탄성계수

그림 6. 석분함유량이 0%인 경우(A그룹)의 실험결과

트 함유량이 작을수록 감소하는 경향을 보이고 있으며, 전단변형률은  $2 \times 10^{-4}\%$  ~  $4 \times 10^{-4}\%$  이하에서 대략 전단탄성

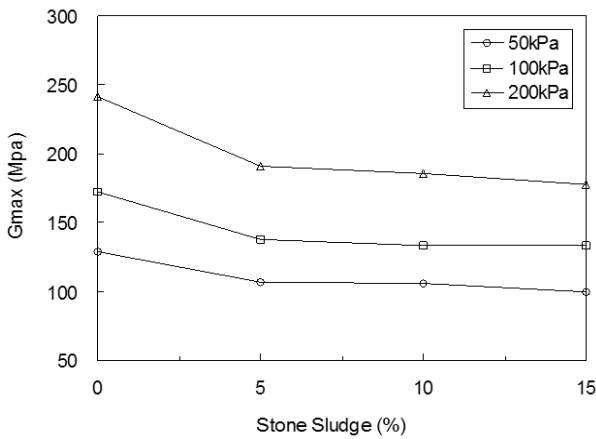
계수가 거의 일정한 값을 유지하는데 이 범위의 전단변형율에서 흙이 탄성거동을 하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)의 실험결과에 의하면 낮은 전단변형율 상태에서는 감쇠비 변화가 크지 않지만  $4 \times 10^{-4}$ % 이상의 전단변형율에서는 감쇠비가 점차로 증가하고 있으며 쌍곡선모델(hyperbolic model)과 비교적 잘 일치하고 있음을 보였다.

그림 6(c)의 경우는 석분함유량 및 벤토나이트 함유량에 따라서 약간씩 차이는 있지만 정규화된 전단탄성계수( $G/G_{max}$ )의 범위는 대략 1.0~0.6에 위치하며 전단변형율은  $2 \times 10^{-4}$ %~ $7 \times 10^{-3}$ % 범위에 분포하고 있다. 또한 Ramberg-Osgood Model은 저변형율 영역에서 실험결과들의 비선형성을 나타내는데 매우 적합하다고 알려져 있는데(Anderson, 1974) 본 실험결과는 그림상의 회귀분석값( $R^2=0.9263$ )에서와 같이 이 모델과 잘 일치하고 있음을 보여준다.

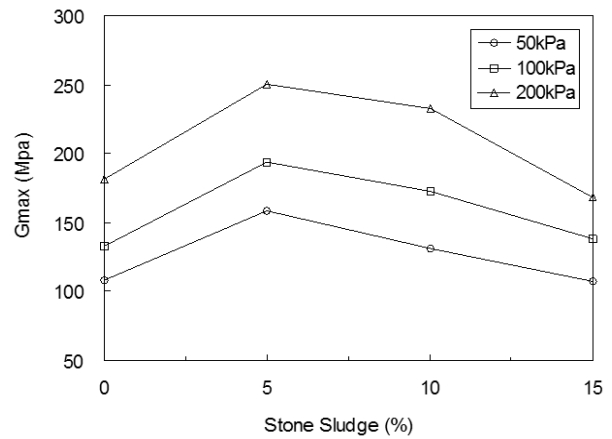
### 3.3 석분 함유량에 따른 전단탄성계수

그림 7은 석분함유량에 따른 구속압별 최대전단탄성계수 값을 비교 분석한 것이다. 그림 7(a)은 화강풍화토에 석분함유량만을 점진적으로 증가시킬 경우의 실험결과로서 석분함유량이 증가할수록 그리고 구속압이 감소할수록 최대전단탄성계수 값은 감소하고 있다. 이의 실험결과는 다짐시험결과(그림 5(a))에서 얻은 최대건조단위중량과 석분함유량과의 그래프 양상과 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

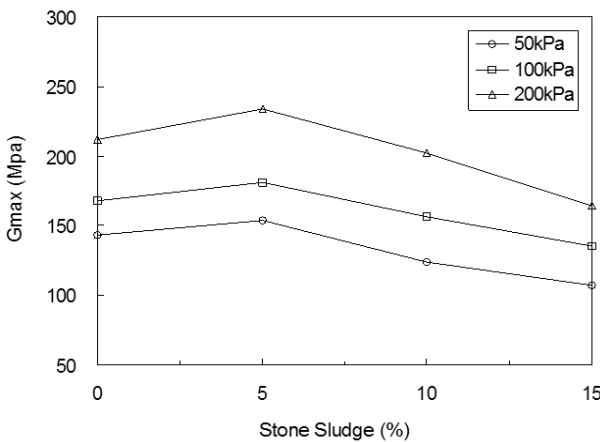
그러나 벤토나이트 함유량을 점진적으로 증가시킨 그림 7(b) 및 7(c)의 실험결과에서는 석분함유량이 5%일 때 전단탄성계수가 최대를 나타내다가 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있지만 벤토나이트 함유량이 15%인 경우(그림 7(d))는 석분함유량이 증가하면서 최대전단탄성계수가 감소와 증가를 약간씩 반복하고 있지만 전반적으로



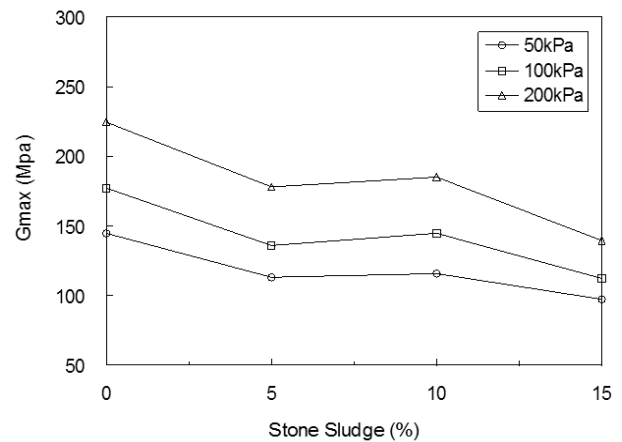
(a) 벤토나이트 함유량이 0%인 경우



(b) 벤토나이트 함유량이 5%인 경우



(c) 벤토나이트 함유량이 10%인 경우



(d) 벤토나이트 함유량이 15%인 경우

그림 7. 석분 함유량에 따른 최대전단탄성계수

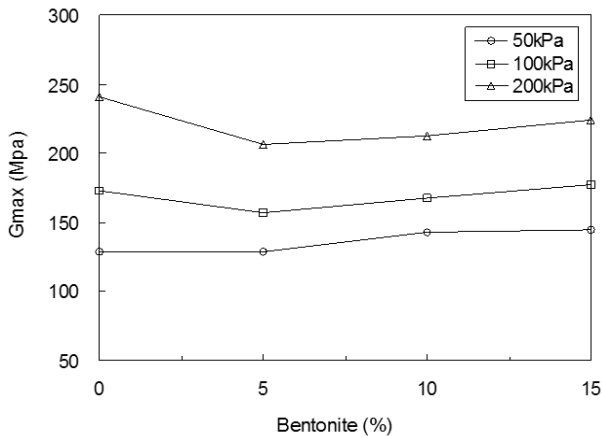
는 감소해가는 경향을 보였다. 이와 같은 시험결과의 원인은 화강풍화토가 가지고 있는 입자에 비소성질인 석분과 점성성분을 가지고 있는 벤토나이트 성분을 약 5%범위에서 혼합할 경우 다짐시 재료가 가장 큰 강도를 나타내었기 때문에 판단된다. 따라서 상기와 같은 실험결과로 보아 약간의 차이는 있지만 석분함유량에 따른 최대전단탄성계수는 화강풍화토에 석분과 벤토나이트 함유량이 각각 5% 범위 내에 있을 경우이며 이 값은 순수한 화강풍화토의 실험결과 값(A-1)과 거의 일치하고 있다.

### 3.4 벤토나이트 함유량에 따른 전단탄성계수

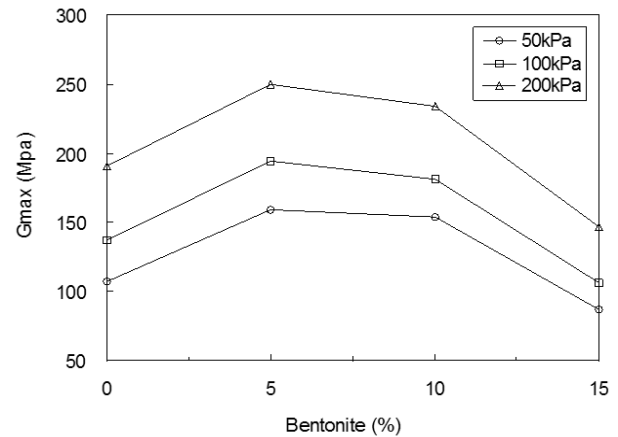
그림 8은 벤토나이트 함유량에 따른 최대전단탄성계수 값을 구속압 별로 비교 분석한 것으로 그림 8(a)의 경우는 순수 화강풍화토에 석분을 첨가하지 않고 단지 벤토나이트 함유량만을 증가시킨 시험 결과로서 벤토나이트 함유량이 0%인 경우가 가장 큰 전단탄성계수 값을 보이다가

벤토나이트 함유량이 5%인 경우 약간 감소하다 다시 벤토나이트 함유량이 증가할수록 약간 증가하는 경향을 나타내었지만 그 차이는 매우 작았다. 이러한 원인은 벤토나이트라는 점토광물만을 약 15%범위 내에서 화강풍화토에 혼합하여 다질 경우 점성성분의 증가로 인해 일정부분 강도증가 현상이 나타났기 때문에 판단된다.

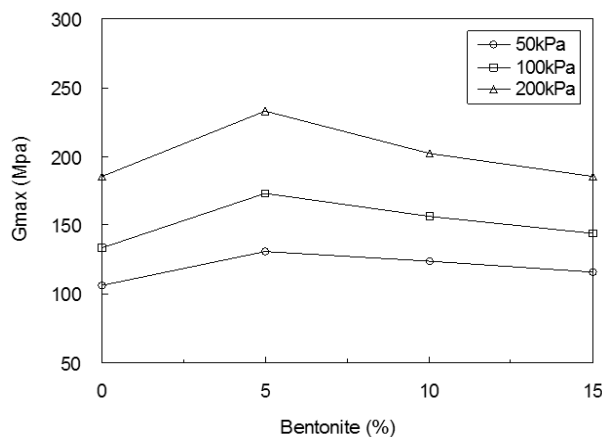
그러나 석분함유량이 5%~10%인 그림 8(b), (c)의 경우는 벤토나이트 함유량이 5%에서 10%내의 범위에서 가장 큰 최대전단탄성계수를 보이고 그 이후에 감소하는 양상을 보였는데 이는 그림 7에서 설명한 바와 같이 다짐조건에 적합한 세립분의 함유량에 기인한 것으로 판단된다. 또한 석분 함유량이 15%인 그림 8(d)의 경우에는 벤토나이트 함유량과 관계없이 최대전단탄성계수가 거의 일정한 상태를 보이다가 감소해가는 현상을 보였다. 이는 석분 및 벤토나이트인 세립분이 10%이상 함유할 경우 강도 저하 현상이 크게 나타나고 있음을 보여준다. 이상의 시험 결과는 그림 7의 석분함유량별 전단탄성계수의 특성과 거의



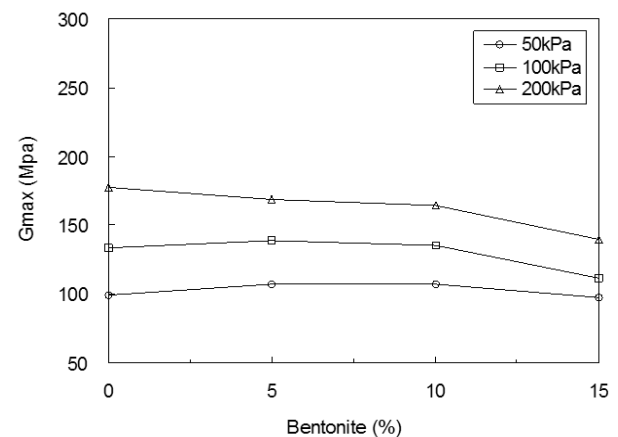
(a) 석분 함유량이 0%인 경우



(b) 석분 함유량이 5%인 경우

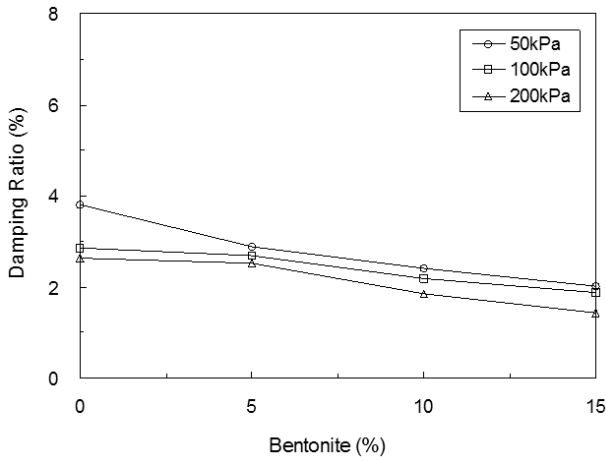


(c) 석분 함유량이 10%인 경우

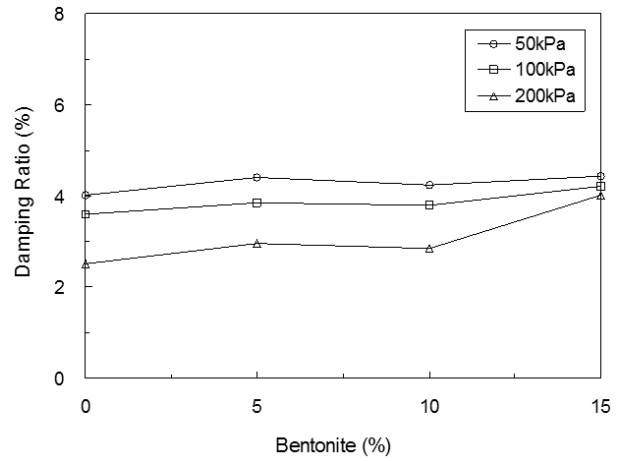


(d) 석분 함유량이 15%인 경우

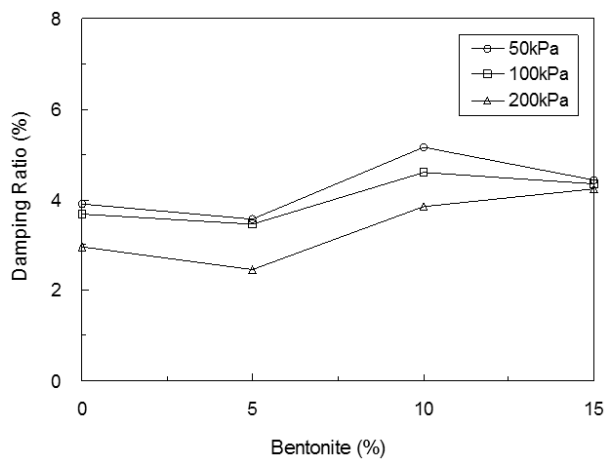
그림 8. 벤토나이트 함유량에 따른 최대전단탄성계수



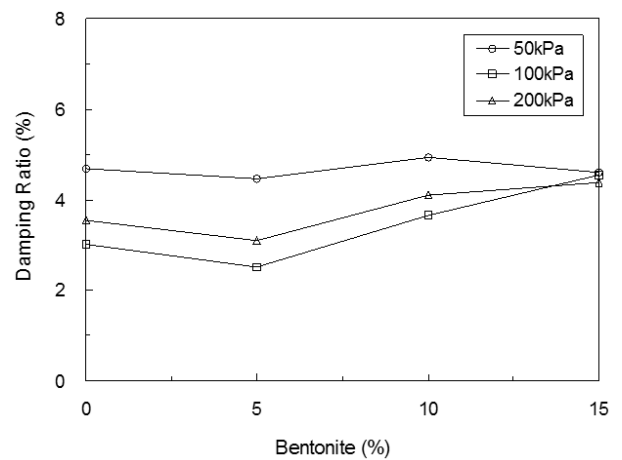
(a) 벤토나이트 함유량이 0%인 경우



(b) 벤토나이트 함유량이 5%인 경우



(c) 벤토나이트 함유량이 10%인 경우



(d) 벤토나이트 함유량이 15%인 경우

그림 9. 석분함유량에 따른 최소감쇠비

유사한 거동양상을 보였다.

### 3.5 석분 함유량에 따른 감쇠비

그림 9는 석분함유량에 따른 각 구속압별 감쇠비 특성을 나타낸 것으로 화강풍화토에 석분만을 점점 증가시킨 경우(그림 9(a))는 석분함유량의 증가와 함께 감쇠비가 점점 감소해가는 특성을 보였고 화강풍화토에 석분과 벤토나이트를 함께 증가시킨 경우(그림 9(b), (c), (d))는 전반적으로 석분함유량이 증가함에 따라서 감쇠비는 데이터산은 보이지만 전반적인 경향은 약간 감소해가다 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 다짐시험에서 석분 함유량에 따른 최대전단단위 중량의 변화 때문으로 판단된다. 또한 구속압이 증가함에 따라서 전반적으로 감쇠비가 감소해가는 경향을 보이고 있다. 이러한 특성은 구속압이 증가하면 시료의 강성이 그 만큼 커지기 때문으로 판단된다.

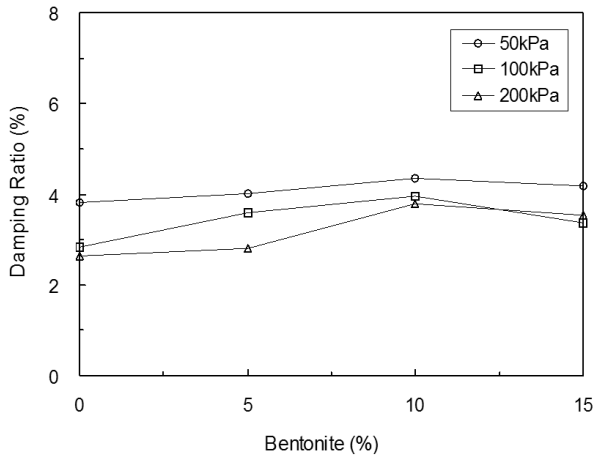
### 3.6 벤토나이트 함유량에 따른 감쇠비

그림 10은 벤토나이트 함유량에 따른 감쇠비 변화곡선을 나타낸 것으로서 그림에서와 같이 석분함유량이 없는 경우(그림 10(a))는 벤토나이트 함유량 증가와 관계없이 감쇠비 변화는 거의 나타나지 않았지만 석분함유량이 점점 증가하고 벤토나이트 함유량이 증가하면 감쇠비는 점진적으로 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 가장 큰 최소 감쇠비는 석분함유량이 15%이고 벤토나이트 함유량이 15%인 경우로 나타났다. 이는 화강풍화토에 세립분 함유량이 제일 큰 경우에 해당하며 재료가 점토질에 가까울수록 감쇠비가 가장 커지는 경향과 일치한다.

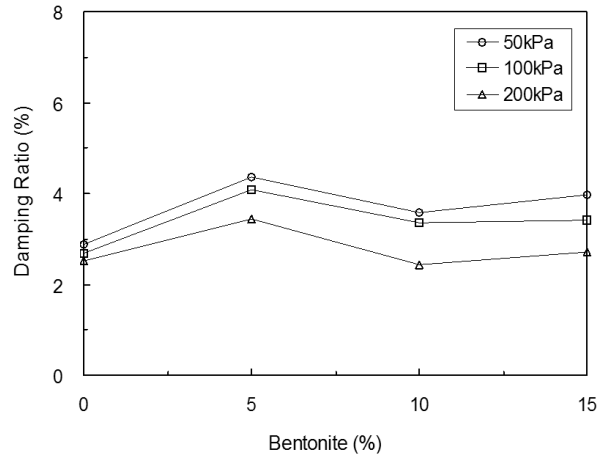
### 3.7 구속압에 따른 최대전단탄성계수 및 감쇠비

그림 11은 표 2의 A그룹의 배합조건에 대하여 대표적

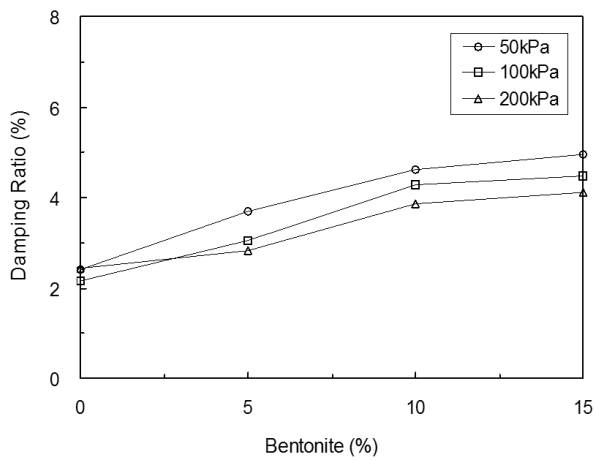




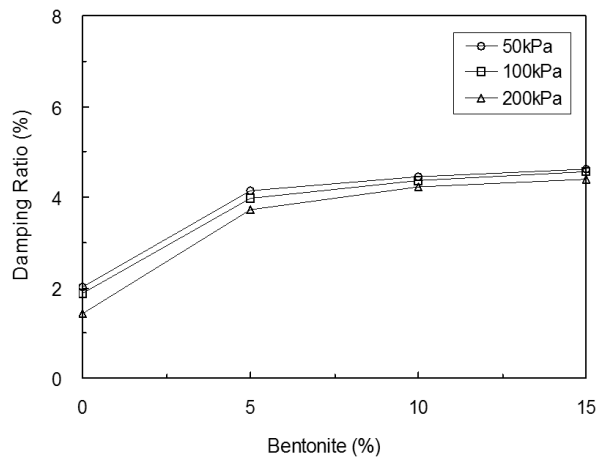
(a) 석분 함유량이 0%인 경우



(b) 석분 함유량이 5%인 경우

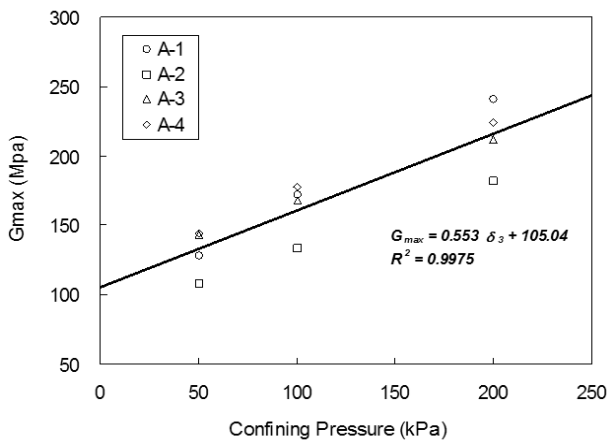


(c) 석분 함유량이 10%인 경우

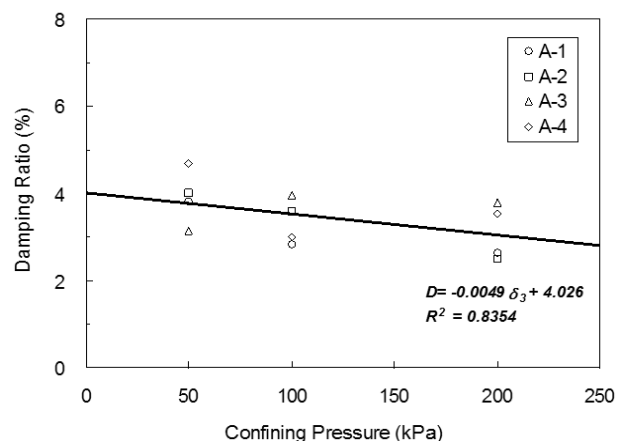


(d) 석분 함유량이 15%인 경우

그림 10. 벤토나이트함유량에 따른 최소감쇠비



(a) 최대전단탄성계수



(b) 최소감쇠비

그림 11. 구속압에 따른 최대전단탄성계수 및 최소감쇠비의 변화(A그룹)

으로 구속압에 따른 전단탄성계수 및 감쇠비의 변화관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 공시체 시료에 관계없이 구속압이 증가하면 전단탄성계수는 비례관계로 증가하

는 경향을 나타내었으며 감쇠비는 구속압이 증가하면 전단탄성계수와 반대로 감소해가는 양상을 보였으며 그 상관관계의 추세식을 함께 그림상에 표기하였다. Hardin et

al.(1972) 등에 의하면 전단변형율이 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하며, 구속압이 증가하면 전단탄성계수는 증가하고 감쇠비는 감소한다는 연구 결과를 발표하였는데 본 연구 결과에서도 기존의 연구동향과 유사한 실험결과를 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

화강풍화토에 석분 및 벤토나이트가 혼합된 시료의 동적 거동특성을 고찰하기 위하여 토사공진주시험을 통해 각 시료별 전단탄성계수 및 감쇠비 특성에 대하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 혼합시료의 다짐실험결과는 석분의 함유량이 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하다가 5% 이후부터는 석분의 함유량에 관계없이 최대건조단위중량은 거의 일정한 양상을 보였다. 또한 벤토나이트 함유량이 많아질수록 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 나타내었다.
- (2) 전단변형율은  $2 \times 10^{-4} \% \sim 4 \times 10^{-4} \%$  이하에서 대략 전단탄성계수가 거의 일정한 값을 보이고 있으며 감쇠비는 쌍곡선모델과 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 저변형율 영역에서 실험결과들의 비선형성을 나타내는데 매우 적합한 Ramberg-Osgood 모델과 본 실험결과들은 잘 일치하고 있다.
- (3) 감쇠비는 화강풍화토에 석분만을 점점 증가시킨 경우 점진적으로 감소해 가고 벤토나이트만을 점진적으로 증가시킨 경우는 감쇠비 변화에 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 구속압이 증가하면 전단탄성계수는 비례관계로 증가하지만 감쇠비는 구속압이 증가하면 전단탄성계수와 반대로 감소해가는 양상을 보였다.
- (4) 최대전단탄성계수 및 최소감쇠비는 화강풍화토에 석분과 벤토나이트 함유량이 각각 5%에서 10% 내에 존재할 때 이며, 이 값은 화강풍화토 만으로 실험한 값과 거의 일치한다. 따라서 이 범위 내에서 화강풍화토에 벤토나이트와 석분을 혼합한다면 이 혼합토 시료도 동적거동을 받는 지반재료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 논문은 석분과 벤토나이트를 화강풍화토에 혼합하여 시험을 수행하였기 때문에 석분 혹은 벤토나이트가 전

단탄성계수 및 감쇠비 관계에 어떠한 영향을 나타내었는지에 대하여 정량적이고 구체적인 분석에는 어려운 한계가 있고 더불어 최적의 석분 및 벤토나이트 함량을 찾기 위해서 본 실험에서 적용된 배합조건은 매우 부족한 것으로 판단됩니다. 따라서 향후 다양한 조건에서의 추가적인 연구 및 분석이 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

#### 참고문헌

1. 김동수, 고동희, 윤준웅 (2004), “공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화지반의 동적변형특성”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제5권, 제1호, pp.35-46.
2. 김종철 (2011), *석분슬러지 혼합토의 지반공학특성 및 활용*, 박사학위논문, 대진대학교, pp.12-73.
3. 김치권, 김병규, 손정수 (1996), *석분슬러지 재활용 방안 연구(II, III)*, 한국자원연구소 연구보고서.
4. 김찬기, 정수훈, 조원범 (2008), “폐석분 혼합토의 지반공학특성 및 활용에 관한 연구”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제7권, 제3호, pp.17-24.
5. 남정만, 윤중만, 김기영, 김광일 (2005), “현무암 석분슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구”, *한국폐기물학회지*, 제22권, 제5호, pp.464-471.
6. 백신원 (2001), “석분의 효과적인 이용에 관한 연구”, *한국산업안전학회지*, 제16권, 제1호, pp.65-72.
7. 손정수, 김병규, 김치원 (1995), “폐석 및 석분슬러지를 활용한 인조 석판재의 제조”, *자원리싸이클링학회지*, 제8권, 제1호, pp.4-11.
8. 이상권, 김윤복 (1992), “석재산업의 재해 및 공해방지를 위한 기초 연구”, *한국자원공학학회지*, 제29권, 제2호, pp.57-64.
9. 이종규, 김덕용 (1999), “세립분 함유량에 따른 화강풍화토의 동적 거동”, *대한토목학회 논문집*, 제19호, 제3-4호, pp.785-793.
10. 이형근 (2002), *공진주시험을 이용한 화강암 풍화토의 동적물성치 추정*, 석사학위논문, 경희대학교, pp.11-30.
11. 진호일, 민경원, 한상목, 신대용 (1999), “석산 및 석가공업체로부터 발생하는 석폐기물의 물리적 화학적 특성”, *한국자원공학학회지*, 제36권, 제4호, pp.290-298.
12. 한국자원연구소 (2000), *석분 슬러지 활용기술 개발에 관한 연구*, 한국산업자원부 연구보고서, pp.3-32.
13. Anderson, D. G. (1974), *Dynamic Modulus of Cohesive Soils*, Ph.D Thesis, University of Michigan.
14. Boonsinsuk, P., Pulles, B. C., Kjartanson, B. H. and Dixon, D. A. (1991), “Prediction of Compactive Effort for a Bentonite-

- Sand Mixture”, *Canadian Geotechnical Society 44th Canadian Geotechnical Conference*, Vol.2, No.64, pp.1-12.
15. Ferniuk, N. and Haung, M. D. (1989), “Comparison of Laboratory and Field Soil in Permeabilities”, *Canadian Geotechnical Conference*, Winnipeg, Manitoba, October.
16. Kenny, T. C., Veen, W. A., Swallow, M. A. and Sungaila, M. A. (1991), “Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand”, *Canadian Geotechnical Society 44th Canadian Geotechnical Conference*, Vol.2, No.63, pp.1-10.
17. Hardin, B. O. and Drenevich, V. P. (1972), “Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effects”, *JSMFED*, ASCE Vol.98, No.SM6, pp.603-623.
- (논문접수일 2012. 1. 31, 심사완료일 2012. 3. 18)