한국토목섬유학회논문집 제10권 2호 2011년 6월 pp. 21 ~ 28
J. Korean Geosynthetics Society Vol.10 No.2 June. 2011 pp. 21 ~ 28

# 흙의 비선형 모델을 이용한 감쇠비 산정 및 비교

# Calculation of Damping Ratio Using Non-Linear Soil Models and Comparison between Measured and Predicted Data

이 형 규[1] Lee, Hyoung-Kyu
배 윤 신[2]* Bae, Yoon-Shin

**ABSTRACT**

Several theoretical soil nonlinear models to predict damping ratio, which is one of the typical dynamic properties of soils, it is impractical to predict damping ratio. The resonant column and torsional shear test(RC-TS) is used to represent the dynamic behavior of soils from intermediate to medium shear strains. A limitation of RC-TS is measure precise shear strain in large strains and the modified equivalent radius($R_{eq}$) was obtained using both modified hyperbolic model and Ramberg-Osgood model. Bonneville clays were tested using RC-TS test to obtain rotation and torque. The measured rotation and torque were then compared with calculated rotation and torque using curve-fitting method. Then, the nonlinear soil model parameters were obtained and the equivalent radius was calculated using the model parameters.

**요 지**

지반의 대표적 동적 물성치중 하나인 감쇠비를 구하기 위한 여러 이론적 비선형모델이 개발되어 왔으나 실제 측정된 감쇠비를 정확히 예측하기는 불가능하다. 공진주/비틂전단 시험기는 미소변형율에서 중간변형율까지 흙의 동적 거동을 표현하는데 자주 이용되어 왔다. 공진주/비틂전단 시험기의 단점중의 하나는 측정된 감쇠비에 상응하는 변형율 산정법이 복잡하다는 것이다. 이를 해결하기 위하여 수정쌍곡선 모델과 Ramberg-Osgood모델을 사용하여 수정등가반경법을 도입하여 보다 정확한 변형율을 계산하였다. 유타지역에서 채취된 시료를 이용하여 공진주/비틂전단 시험기로 측정된 비틂력-비틂각을 이론적 비틂력-비틂각과 비교하고, 맞춤곡선법을 사용하여 각 비선형모델의 매개변수를 구하였으며 적합모델별 매개변수에서의 등가반경을 산정하였다.

***Keywords*** **:** Deep excavation, Retaining system, Settlement

## 1. 서 론

우리나라의 경우 큰 규모의 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역으로 알려져 있었으나 2010년 2월 9일 18시 08분 14초에 서울 부근에서 규모 3.0의 지진이 발생했다. 이 지진은 국내에서 2010년 들어 7번째로 발생한 지진이며, 사람이 느낄 수 있는 유감지진이 발생한 것은 올해 들어 처음이다. 아울러, 2009년에는 국내에서 총 60회의 지진이 발생하였으며, 이 중 규모 3.0 이상의 지진은 8회, 유감지진은 총 10회 발생하여 한국도 더 이상 지진으로부터 안전지대가 아니라는 주장이 설득력을 얻고 있다. 그 동안 지진으로 인한 피해는 일본과 중국에서만 한정된 것으로 알려졌으나 더 이상 한반도도 이 같은 자연재해로부터 안전하지 않다는 사실이 입증되고 있는 것이다. 최근 국토해양부는 지진발생시 2층 이하 소규모 건축물의 피해를 최소화하고, 건축주의 자발적인 내진보강을 유도하기 위해

1 정회원, 서일대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoil University)
2* 정회원, 서울시정개발연구원 환경안전연구실 부연구위원 (Member, Associate Research Fellow, Environmental and Safety Research Division, Seoul Development Institute, E-mail: ysbae@sdi.re.kr)

내진보강 체크포인트를 배포하는 등 지진 방재를 위한 여러 지침을 제시하고 있다. 본 연구에서는 공진주/비틂전단 시험기를 사용하여 내진설계를 위한 감쇠비를 보다 정밀하게 측정할 수 있는 방안을 시도해 보았다.

공진주/비틂전단 시험에서의 응력-변형율 산정은 비틂력을 받고 있는 시료 반경방향의 응력-변형율에 대한 불균형 때문에 다소 복잡하다(Kim, 1991). 이것은 비틂력을 받고 있는 흙시료의 반경방향으로 균일하지 않은 응력-변형율에 기인한다. Chen and Stokoe(1979)는 비틂시험시 등가반경법을 제안하였으나 대변형율에서의 감쇠비 산정에는 부적합하다(Sasanakul and Bay, 2008a). 수정 등가반경법은 이러한 문제를 해결하기 위하여 지반의 비선형 거동 모델중 쌍곡선 모델을 사용하여 개발되었다. Sasanakul 등(2008a)은 감쇠비 산정시 수정 등가반경법에 수정쌍곡선 모델과 Ramberg-Osgood 모델을 사용하여 보다 다양한 지반거동 모델을 적용하였다. 본 연구에서는 미국 유타 지역에서 채취한 시료를 사용하여 공진주/비틂전단 시험을 실시하였다. 지반 비선형 모델(쌍곡선 모델, 수정쌍곡선 모델, Ramberg-Osgood 모델)을 이용하여 비틂력(T)과 비틂각(θ)을 산정하였으며 공진주/비틂전단 시험기로 측정된 비틂력(T) 및 비틂각(θ)과 비교하였다. 이 때 이론치와 측정치가 가장 근접한 경우의 이론적 계산(T,θ)값을 선택하며 그 경우 각 지반 비선형 모델별 매개 변수값을 얻을 수 있다. 마지막으로 지반 비선형 모델별 여러 매개 변수값에 상응하는 등가반경을 획득할 수 있다. 수정 쌍곡선 모델과 Ramberg-Osgood 모델의 경우 대변형율에서의 등가반경은 다소 차이를 보이므로 보다 정확한 감쇠비 산정을 위해서는 각 모델별 매개변수에 따른 등가반경을 고려하여야 한다.

## 2. 공진주 비틂전단 시험기를 활용한 지반의 감쇠비 측정

### 2.1 지반의 비선형 모델

지반의 감쇠거동은 선형구간의 변형율에서는 일정한 감쇠를 나타내지만 비선형구간의 변형율에서는 변형율이 증가함에 따라 감쇠도 증가한다. 또한 지반의 감쇠는 재하주파수와는 무관하다(Kokusho, 1987). 지반의 비선형 거동을 역학적으로 나타내기 위하여 많은 모델들이 개발되어 왔다(Kokusho, 1987, Ishihara, 1996, Hardin and Drnevich, 1972). 그러나 개발된 많은 모델이 지반의 감쇠거동을 정확히 예측하지는 못하고 있다.

감쇠모델 중 점성모델의 두 가지 문제점은 이력 감쇠거동을 정확히 표현하지 못하고(감쇠가 변형율과 무관하게 일정) 감쇠가 재하주파수에 비례하여 증가하는 문제가 있다. Ishihara(1996)는 이런 점성모델의 문제점을 보완하여 비점성모델을 개발하였지만 여전히 감쇠가 변형율에 대하여 일정한 문제점이 있었다. 이력모델은 변형율이 증가함에 따라 감쇠가 증가되는 실제 지반의 감쇠거동의 표현이 가능하지만 미소변형율에서의 감쇠비가 제로(zero)로 표현되어 실제 감쇠거동과는 거리가 있다. 또한 이력모델은 Masing 법칙(Masing, 1926)에 근거한 지반의 거동을 관측하였으며 대변형율에서 너무 큰 감쇠가 발생되는 문제가 있지만 Chen and Stokoe(1979)는 문제점으로 제시된 대변형율은 통상적으로 시험되는 동적시험의 변형율을 넘어선 경우로 일반적인 대변형율(1에서5%의 변형율)에서의 이력모델로 계산된 감쇠비는 실제의 지반의 감쇠비와 거의 일치한다고 지적하였다.

### 2.2 비틂전단 시험에서 감쇠비 산정을 위한 변형율 산정

공진주-비틂전단 시험기의 단점은 비틂중에 응력-변형율 분포가 시료 수평면의 반경방향으로 일정하지 않으며 중간병형율과 대변형율에서는 시료의 비선형 거동으로 인하여 그 영향으로 더욱 커지게 된다(Hardin and Drenevich, 1972). 그림 1은 비틂시험에서 시료가 비틂 전단상태에서의 가로방향의 단면을 보여주고 있다.

비틂시험에서 응력-변형율 관계를 산정하기 위하여 Hardin and Drnevich(1972) 는 식 (1)과 식 (2)와 같이 시료의 평

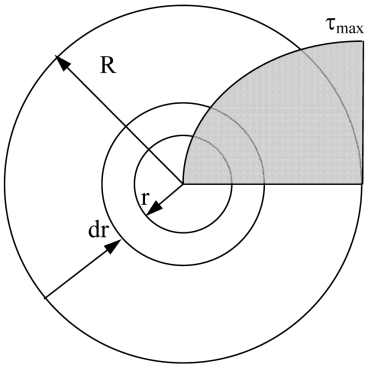


그림 1. 비틂시험기에서 반경방향으로 시료가 받는 전단력의 분포

균 변형율 사용하였다.

$$\gamma \approx g \approx 2/3*R*(\theta/L) \quad (3)$$

$$\tau \approx 2/3*R*(T/I_P) \quad (4)$$

여기서, T = 비틂력
R = 시료의 반경
L = 시료의 높이
θ = rotation
$I_p$ = 시료의 면적 극관성모멘트

그러나 식 (3)과 식 (4)는 지반의 비선형 거동을 고려하지 않았다. Chen and Stokoe(1979)는 지반의 비선형 거동을 고려한 전단변형율을 나타내기 위하여 식 (5)와 같이 등가반경 및 등가전단변형율을 정의하였다.

$$\gamma_{eq} = R_{eq} \times \theta / L \quad (5)$$

여기서, $\gamma_{eq}$ = 등가전단변형율
$R_{eq}$ = 등가반경

그림 2에서 보는 바와 같이 전단변형율(γ)이 0.001%이하에서는 등가반경($R_{eq}$)은 0.82이 사용되었으며 0.001% 이상에서는 등가반경($R_{eq}$) 0.79가 사용되었다.

Sasanakul(2005)은 비선형 응력-변형율 관계를 보다 정확하게 분석하여 수정등가반경법을 제시하였으며 그림 3은 비틂각에 다른 수정등가반경의 수치를 보여주고 있다.

그림 3에서 제시한 등가반경($R_{eq}$)은 응력-변형율 관계가 쌍곡선모델에 근거하여 얻어진 수치이며 수정쌍곡선모델 및 Ramberg-Osgood 모델에 근거한 등가반경은 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 6은 쌍곡선 모델, 수정쌍곡선 모델 및 Ramberg-Osgood 모델에 근거한 등가반경을 나타내었다. 그림 6에서 보는 같이 저변형율에서는 Ramberg-Osgood 모델에 근거한 등가반경이 다소 크게 나타났으며 수정쌍곡선 모델 및 쌍곡선 모델에 근거한 등가반경은 0.8 정도를 나타내었다. 중간변형율($\theta/\theta_r$=1.27)에서는 Ramberg-Osgood 모델(alpha=3인 경우)을 제외한 모든 모델의 등가반경이 0.768로 수렴하였다. 대변형율에서는 등가반경이 모델마다 다소 큰 차이를 나타내었으며 수정쌍곡선 모델(a=1.2)의 등가반경이 가장 작고 Ramberg-Osgood 모델

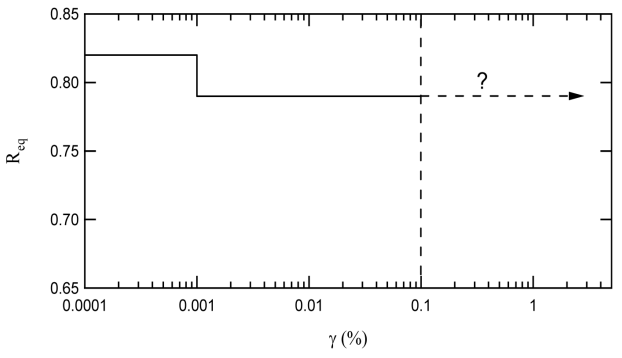


그림 2. Chen and Stokoe(1979)이 제시한 등가반경($R_{eq}$)

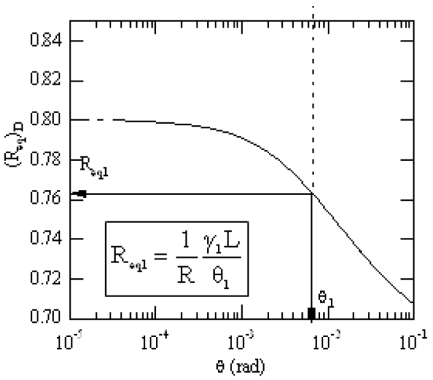


그림 3. Sasanakul(2005)이 제시한 등가반경($R_{eq}$)

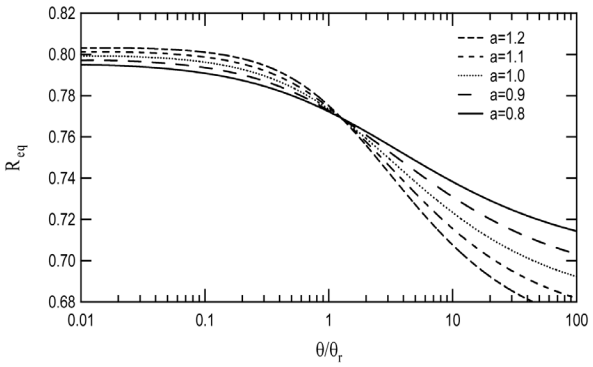


그림 4. 수정쌍곡선 모델에 근거한 등가반경($R_{eq}$)(Bae, 2008)

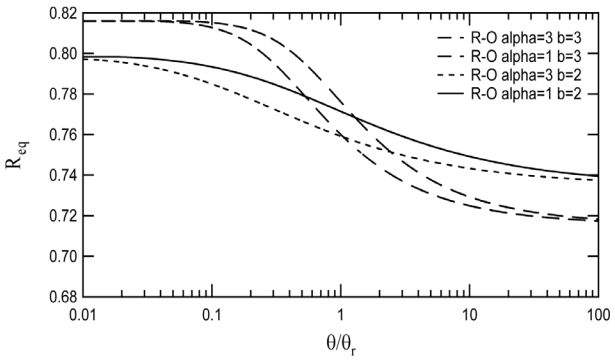


그림 5. Ramberg-Osgood 모델에 근거한 등가반경($R_{eq}$)(Bae, 2008)

(alpha=1, b=2 인 경우)의 등가반경이 가장 큰 값을 나타내었다.

그림 4와 그림 5에서는 비틂각을 참조각($\theta_r$)으로 나누어 정규화하였다. 참조각($\theta_r$)은 식 (6)에 표기하였다.

$$\theta_r = \frac{\gamma_r L}{R} \tag{6}$$

여기서, $\gamma_r$ = 참조전단변형율
L = 시료의 높이
R = 시료의 반지름

## 3. 모델 검증

### 3.1 시료의 물리적 특성 및 시료준비

7개의 Bonneville clay가 본 시험에 사용되었다. 시료채취 위치는 미국 Wasatch front 부근의 4곳으로 정하였다. 3개의 샘플은 Utah County의 Provo 강 근처에서 채취되었으며 또 다른 샘플 한 개는 Cache County의 Nibley 지역에서, 마지막 2개의 샘플은 Salt Lake County지역 Salt Lake시 공항근처에서 각각 채취되었다. 각각의 채취지역을 아래 표 1에 정리하였다.

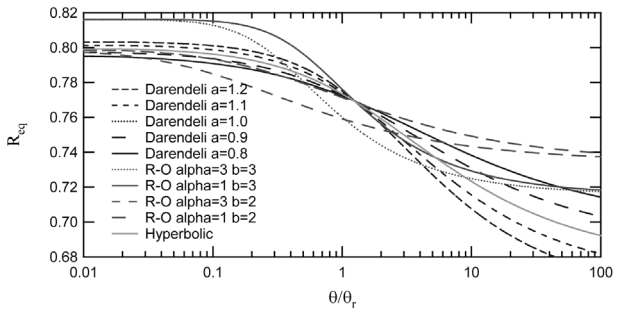


그림 6. 수정쌍곡선 모델 및 Ramberg-Osgood 모델에 근거한 등가반경($R_{eq}$)

교란되지 않은 시료를 얇은 쉘비 관(Shelbytube)을 사용하여 채취하였다. 시료의 상태를 평가하고 선택부분을 판단하기 위하여 시료 관을 열기 전에 X-ray 이미지 촬영을 실시하였다(USU, 2009). 흙의 분류 및 물성치를 결정하기 위하여 아터버그 시험과 비중기 시험을 각 시료를 사용하여 실시되었다. 그 외의 물리적 특성도 공진주/비틂전단시험 실시 전에 파악되었다. 시료의 물리적 특성 및 흙의 종류를 표 2에 나타내었다.

본 연구에 사용된 모든 시료는 200번 체 통과량이 85% 이상인 세립토로 구성되어 있다. 그림 7은 소성지수와 액성한계와의 관계를 나타내는 소성도이다.

Provo강 부근에서 채취한 시료(PRV37과 PRV37)은 액

표 1. 시료채취위치

| Site No. | County | Address |
|---|---|---|
| 1 | Utah | Geneva Rd. Bridge over Provo River, Provo, UT |
| 2 | Cache | 2835 S 1000 W Nibley, UT |
| 3 | Cache | USU Drainage Farm Site Logan, UT |
| 4 | Salt Lake | BYU Research Site North West of Salt Lake City International Airport, Salt Lake City, UT |

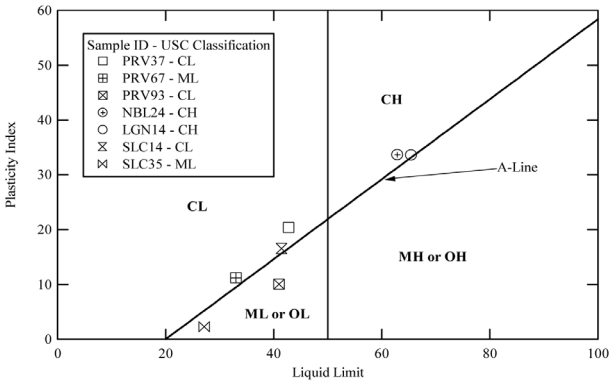


그림 7. 액성한계와 소성지수와의 관계를 나타내는 소성도

표 2. 시료의 물리적 특성

| Sample ID | Site No. | 깊이 (m) | USC 분류 | 액성 한계 | 소성 지수 | % No.200체 통과율 | % 세립토 함유량 < .002 mm | 함수비 (%) | 단위중량 ($t/m^3$) | 간극비 | 포화도 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PRV37 | 1 | 11.3 | CL | 43 | 20 | 99.46 | 16.81 | 30.61 | 113.86 | 0.981 | 85.77 |
| PRV67 | 1 | 20.4 | CL | 33 | 11 | 85.84 | 8.42 | 22.40 | 123.13 | 0.661 | 89.83 |
| PRV93 | 1 | 28.3 | ML | 41 | 10 | 97.60 | 16.10 | 41.64 | 115.09 | 1.052 | 99.85 |
| NBL24 | 2 | 7.3 | CH | 63 | 34 | 99.32 | 24.03 | 53.83 | 106.53 | 1.483 | 99.78 |
| LGN14 | 3 | 4.3 | CH | 65 | 34 | 98.82 | 19.92 | 60.90 | 101.80 | 1.744 | 91.54 |
| SLC14 | 4 | 4.3 | CL | 42 | 17 | 98.98 | 9.06 | 41.07 | 114.57 | 1.043 | 99.91 |
| SLC35 | 4 | 10.7 | ML | 27 | 2 | 89.94 | 7.00 | 22.26 | 117.15 | 0.735 | 76.48 |

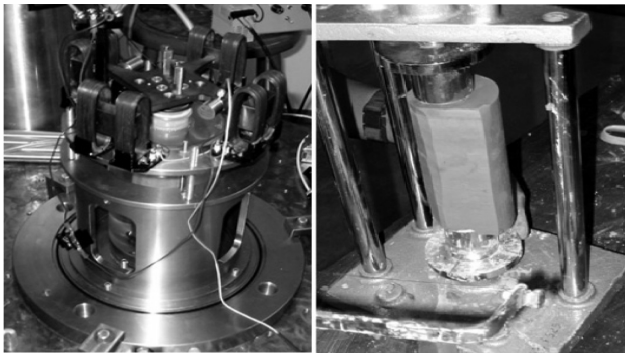

그림 8. 공진주/비틂전단 시험기 및 시료의 사진

성한계가 낮은 점토질(CL)로 구성되어있다. 단, 28.3m에서 채취한 시료(PRV93)은 액성한계가 낮은 실트질의 혼합토(ML)이다. Salt Lake시 공항 근처에서 채취한 시료(SLC14)는 액성한계가 낮은 점토질(CL)로 구성되었으며 샘플(SLC35)는 액성한계가 낮은 실트질의 혼합토(ML)이다. Nibley와 Logan시에서 채취한 시료(NBL24와 LGN14)은 액성한계가 높은 점토질(CH)이다.

X-ray 이미지 촬영은 채취된 시료의 좋은 상태 부근을 가려내기 위하여 사용되었다. 시료용 톱과 트리밍 기기를 사용하여 지름 3.5cm와 높이 7cm의 공시체로 제작되었다. 제작된 공시체는 공진주-비틂전단 시험기의 저부 받침대에 놓기 전에 제원(지름과 높이)과 무게를 측정하였다. 그림 8은 본 연구에 사용된 공진주/비틂전단 시험기와 시료의 사진이다.

### 3.2 감쇠모델을 사용하여 계산된 감쇠비와 실측치와의 비교

본 연구에서는 세가지 흙의 비선형 모델(쌍곡선 모델, 수정 쌍곡선 모델, Ramgerg-Osgood 모델)이 사용되었다. 각 모델의 매개변수를 결정하기 전에 우선 공진주-비틂전단 시험기로 비틂각(θ)와 비틂력(T)을 측정한다.

쌍곡선 모델의 경우 Sasanakul 등(2008b)이 제안한 closed-form 식 (7)을 사용하여 비틂력(T)을 얻을 수 있다. 여기서 최대전단탄성계수(Gmax)는 공진주시험기를 사용하여 측정한다. 측정된 비틂력(T)과 closed-form 식을 사용하여 계산된 비틂력(T)을 비교하여 가장 유사한 경우의 모델 매개변수($\gamma_r$)을 선택한다. 이 경우는 측정치와 계산치와의 차이가 최소가 되며 식 (8)로 표현되는 chi-square 값이 최소가 된다. 측정된 비틂력과 계산된 비틂력의 비교는 Igor Pro 4.01이 제공하는 맞춤곡선 방법을 사용하였다. 자세한 방법은 Sasanakul 등(2008b)에 소개되었다.

$$T = \frac{1}{3}\pi G_{max}\gamma_r R\left[2R^2 - 3R(\frac{\gamma_r L}{\theta}) + 6(\frac{\gamma_r L}{\theta})^2\right] + 2\pi G_{max}\gamma_r^4(\frac{L}{\theta})^3\left[\ln(\gamma_r) - \ln(\gamma_r + \frac{\theta R}{L})\right] \quad (7)$$

$$\text{chi-square} = \sum\left(\frac{y - y_i}{\sigma_i}\right)^2 \quad (8)$$

여기서, y = 주어진 점에서의 맞춤값
$y_i$ = 주어진 점에서의 측정값
$\sigma_i$ = 각 점에서의 표준편차

수정 쌍곡선 모델의 경우는 비틂력(T)을 closed-form의 형태로 계산이 불가능하기 때문에 식 (9)을 사용하여 수치적으로 적분하여 구할 수 있다(Ishihara, 1996). 마찬가지로 모델 매개변수($\gamma_r$, a)를 구하기 위해 맞춤곡선 방법을 사용하였다.

$$T = 2\pi\left(\frac{L}{\theta}\right)^3\int_o^{\gamma_{max}}\left(\frac{G_{max}\gamma}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a}\right)\gamma^2 d\gamma \quad (9)$$

Ramberg-Osgood 모델의 경우도 식 (10)을 사용하여 수치적으로 적분하여 구할 수 있다(Ishihara, 1996). 맞춤곡선 방법을 사용하여 모델 매개변수($\gamma_r$, $\alpha$, b)를 산정하였다.

$$r = \frac{L}{\theta}\frac{\tau}{G_{max}}\left[1 + \alpha\left|\frac{\tau}{G_{max}\gamma_r}\right|^{b-1}\right] \quad (10)$$

표 3은 본 연구에서 사용된 7가지 시료를 사용하여 세가지 흙의 비선형 모델에 필요한 모델 매개변수를 보여준다. 표 3에서 보는 바와 같이 구속압을 바꿔가며 실험한 결과 36가지의 시험 중에서 쌍곡선 모델이 적합한 경우는 6가지가 있고 수정쌍곡선 모델이 적합한 경우는 26가지 경우이었고, Ramberg-Osgood 모델은 4가지 경우에 적합

**표 3. 공진주 비틂전단 시험기를 이용한 맞춤곡선 결과**

| 샘플명 | Test | 구속압 (kPa) | $G_{max}$ (kpa) | 쌍곡선 모델 | | 수정 쌍곡선 모델 | | | Ramberg-Osgood Model | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $\gamma_r$(%) | Chi-square | $\gamma_r$(%) | a | Chi-square | $\gamma_r$(%) | α | b | Chi-square |
| PRV37 | RC* | 85.49 | 4.72E+04 | 0.0682 | 3.755e-5 | 0.0686 | 1.1247 | 1.125e-5 | 0.0817 | 2.5892 | 3.1565 | 2.294e-5 |
| | | 170.99 | 6.78E+04 | 0.1003 | 1.391e-5 | 0.0711 | 1.2718 | 1.746e-7 | 0.0845 | 1.8386 | 2.9475 | 1.594e-7 |
| | | 341.98 | 1.07E+05 | 0.12024 | 4.311e-5 | 0.0975 | 1.2199 | 3.707e-8 | 0.0751 | 1.5531 | 2.6576 | 9.285e-7 |
| PRV67 | RC | 142.72 | 6.51E+04 | 0.0826 | 2.358e-5 | 0.0646 | 0.8156 | 1.140e-4 | 0.0911 | 2.990 | 2.998 | 1.115e-4 |
| | | 285.44 | 1.13E+05 | 0.09883 | 2.827e-3 | 0.0884 | 0.8848 | 1.703e-4 | 0.0943 | 1.5387 | 2.9293 | 4.389e-4 |
| | | 570.88 | 1.97E+05 | 0.1002 | 2.218e-4 | 0.0991 | 0.9804 | 1.359e-4 | 0.0881 | 3.5389 | 3.0348 | 7.820e-4 |
| | TS* | 142.72 | 7.55E+04 | 0.0787 | 1.507e-5 | 0.0813 | 0.9247 | 4.777e-6 | 0.0672 | 1.8889 | 2.3368 | 1.213e-5 |
| | | 285.44 | 1.29E+05 | 0.0890 | 3.909e-4 | 0.0837 | 0.9332 | 1.048e-5 | 0.0810 | 1.2712 | 2.7652 | 3.230e-4 |
| | | 570.88 | 2.16E+05 | 0.901 | 1.390e-3 | 0.0903 | 0.9822 | 1.463e-4 | 0.1260 | 4.3452 | 2.4520 | 3.903e-4 |
| PRV93 | RC | 193.05 | 5.47E+04 | 0.1468 | 4.158e-4 | 0.1405 | 0.9461 | 1.977e-4 | 0.1206 | 3.3366 | 3.0810 | 1.245e-4 |
| | | 386.10 | 8.28E+04 | 0.1626 | 1.117e-3 | 0.1589 | 0.9612 | 9.534e-4 | 0.1164 | 1.0101 | 3.0471 | 3.234e-5 |
| | | 772.21 | 1.63E+05 | 0.1496 | 6.555e-3 | 0.1575 | 1.0676 | 3.758e-3 | 0.0725 | 0.8989 | 3.9020 | 1.383e-3 |
| | TS | 193.05 | 5.70E+04 | 0.1447 | 1.274e-4 | 0.1397 | 0.9245 | 3.171e-6 | 0.0917 | 1.7197 | 2.7414 | 5.821e-5 |
| | | 386.10 | 8.38E+04 | 0.1621 | 1.251e-4 | 0.1618 | 0.9957 | 1.455e-4 | 0.1130 | 1.2465 | 2.6823 | 1.884e-4 |
| | | 772.21 | 1.62E+05 | 0.1750 | 1.910e-4 | 0.1665 | 1.0905 | 6.015e-5 | 0.0520 | 0.4246 | 2.6025 | 7.282e-5 |
| NBL24 | RC | 51.02 | 2.39E+04 | 0.1233 | 2.251e-5 | 0.1105 | 0.8179 | 1.334e-6 | 0.0860 | 1.9180 | 2.2430 | 1.188e-7 |
| | | 102.04 | 2.88E+04 | 0.2041 | 1.432e-4 | 0.2338 | 0.6307 | 2.804e-5 | 0.1652 | 1.1277 | 1.8279 | 2.231e-5 |
| | | 204.08 | 3.86E+04 | 0.1907 | 4.766e-4 | 0.1784 | 0.9231 | 2.215e-4 | 0.0983 | 1.3168 | 2.9929 | 4.862e-5 |
| | TS | 51.02 | 2.29E+04 | 0.1454 | 4.439e-7 | 0.1903 | 0.8268 | 1.334e-7 | 0.1387 | 1.1602 | 1.9624 | 1.534e-7 |
| | | 102.04 | 2.83E+04 | 0.1607 | 1.627e-7 | 0.3564 | 0.7183 | 6.790e-8 | 0.1667 | 0.5338 | 1.6435 | 4.149e-8 |
| | | 204.08 | 3.59E+05 | 0.1736 | 1.1207e-5 | 0.1708 | 0.9196 | 7.085e-5 | 0.0089 | 1.1244 | 2.4910 | 2.154e-6 |
| LGN14 | RC | 42.75 | 9.10E+03 | 0.1499 | 8.807e-6 | 0.1190 | 0.7200 | 4.263e-6 | 0.1660 | 1.4012 | 2.0539 | 8.051e-7 |
| | | 85.49 | 1.98E+04 | 0.1309 | 9.038e-5 | 0.1160 | 0.9101 | 1.354e-5 | 0.2011 | 3.0293 | 3.2337 | 1.498e-5 |
| | | 170.99 | 4.22E+04 | 0.0845 | 2055e-4 | 0.0924 | 1.1340 | 5.800e-5 | 0.0583 | 2.4987 | 4.1770 | 5.050e-5 |
| | TS | 42.75 | 9.82E+03 | 0.1148 | 1.403e-6 | 0.1206 | 0.8130 | 1.491e-7 | 0.1895 | 3.6054 | 2.1361 | 2.504e-7 |
| | | 85.49 | 2.17E+04 | 0.1251 | 1.127e-5 | 0.1176 | 0.9104 | 3.888e-6 | 0.2278 | 2.8652 | 2.6826 | 1.305e-6 |
| SLC14 | RC | 53.78 | 2.83E+04 | 0.0876 | 3.832e-4 | 0.0719 | 0.8014 | 1.328e-4 | 0.0644 | 2.5520 | 2.0108 | 6.295e-5 |
| | | 107.56 | 3.93E+04 | 0.1045 | 1.335e-3 | 0.0169 | 0.7898 | 1.992e-4 | 0.0765 | 3.0820 | 2.5711 | 1.919e-4 |
| | | 215.11 | 5.63E+04 | 0.1000 | 3.349e-4 | 0.0741 | 0.8210 | 7.909e-4 | 0.356 | 0.9476 | 2.8067 | 1.986e-4 |
| | TS | 53.78 | 2.97E+04 | 0.0680 | 2.291e-5 | 0.0767 | 1.1452 | 1.852e-6 | 0.0278 | 3.0341 | 4.0786 | 1.094e-6 |
| | | 107.56 | 4.13E+04 | 0.1094 | 8.992e-5 | 0.1037 | 0.9067 | 2.957e-5 | 0.0723 | 1.9080 | 2.7680 | 5.563e-6 |
| | | 215.11 | 5.90E+04 | 0.0649 | 2.192e-4 | 0.0720 | 1.3202 | 2.105e-6 | 0.0437 | 2.4400 | 4.3630 | 2.997e-5 |
| SLC35 | RC | 91.01 | 3.30E+04 | 0.0769 | 3.027e-4 | 0.0640 | 0.7958 | 1.695e-5 | 0.0670 | 2.4297 | 2.4638 | 6.825e-8 |
| | | 182.02 | 6.56E+04 | 0.0696 | 2.830e-4 | 0.0669 | 0.9522 | 2.185e-4 | 0.0438 | 2.0074 | 3.0837 | 1.312e-5 |
| | TS | 91.01 | 3.62E+04 | 0.0737 | 1.233e-4 | 0.0640 | 0.8463 | 1.189e-5 | 0.0528 | 2.4193 | 2.6647 | 2.577e-6 |
| | | 182.02 | 7.09E+04 | 0.0787 | 9.096e-6 | 0.0783 | 0.9819 | 1.086e-5 | 0.0486 | 1.6063 | 2.8360 | 1.232e-5 |

*RC: 공진주 시험, TS: 비틂전단 시험

하게 나타났다. 최대전단탄성계수($G_{max}$)를 구하는 방법은 Kim(1991)과 Ishihara(1996)에 소개되어 있다. 그림 9는 7가지 시료 중 PRV37시료의 공진주/비틂전단 시험결과를 보여준다.

### 3.3 비선형 모델별 등가반경 산정결과

공진주/비틂전단 시험에서 주어진 비틂각에서의 감쇠비 산정을 위한 등가반경계수($R_{eq}$)를 구하기 위하여 그림 4와 그림 5를 참조하여 수정쌍곡선 모델과 Ramberg-Osgood 모델에서의 등가반경계수($R_{eq}$)를 구할 수 있다.

36가지 시료 중 26가지 경우에 해당하는 수정쌍곡선 모델의 매개변수(a)와 그에 상응하는 등가반경($R_{eq}$)을 정규화된 비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1과 10인 경우에 대하여 그림 4를 참조하여 보간법으로 계산하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

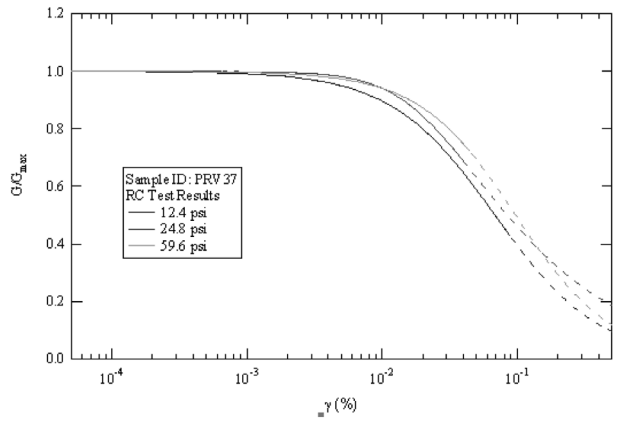


그림 9. 공진주/비틂전단 시험결과(PRV 37)

표 4. 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1과 10인경우의 수정쌍곡선 모델의 매개변수(a)

| 샘플명 | 시험법 | 구속압 (kPa) | 매개변수 (a) | $\theta/\theta_r$=0.1 일 때 $R_{eq}$값 | $\theta/\theta_r$=10 일 때 $R_{eq}$값 |
|---|---|---|---|---|---|
| PRV37 | RC | 85.49 | 1.1247 | 0.7993 | 0.713451 |
| | | 341.98 | 1.2199 | 0.8015 | 0.706012 |
| PRV67 | RC | 285.44 | 0.8848 | 0.7932 | 0.732007 |
| | | 570.88 | 0.9804 | 0.7957 | 0.72478 |
| | TS | 142.72 | 0.9247 | 0.7942 | 0.729013 |
| | | 285.44 | 0.9332 | 0.7945 | 0.728367 |
| | | 570.88 | 0.9822 | 0.7958 | 0.724643 |
| PRV93 | RC | 193.05 | 0.9461 | 0.7948 | 0.727386 |
| | | 386.10 | 0.9612 | 0.7952 | 0.726239 |
| | | 772.21 | 1.0676 | 0.7979 | 0.717956 |
| | TS | 193.05 | 0.9245 | 0.7942 | 0.729027 |
| | | 386.10 | 0.9957 | 0.7961 | 0.723617 |
| | | 772.21 | 1.0905 | 0.7985 | 0.71615 |
| NBL24 | RC | 51.02 | 0.8179 | 0.7913 | 0.736924 |
| | | 102.04 | 0.6307 | 0.7862 | 0.751496 |
| | | 204.08 | 0.9231 | 0.7942 | 0.729134 |
| | TS | 51.02 | 0.8268 | 0.7916 | 0.73627 |
| | | 102.04 | 0.7183 | 0.7886 | 0.744637 |
| | | 204.08 | 0.9196 | 0.7941 | 0.7294 |
| LGN14 | RC | 85.49 | 0.9101 | 0.7939 | 0.730122 |
| | | 170.99 | 1.1340 | 0.7995 | 0.712717 |
| | TS | 42.75 | 0.8130 | 0.7912 | 0.737285 |
| | | 85.49 | 0.9104 | 0.7939 | 0.7301 |
| SLC35 | TS | 53.78 | 1.1452 | 0.7998 | 0.711834 |
| | | 107.56 | 0.9067 | 0.7938 | 0.730381 |
| | | 215.11 | 1.3202 | 0.8039 | 0.698158 |

나머지 4가지 경우의 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수(α, b)와 그에 상응하는 등가반경($R_{eq}$)를 정규화된 비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1과 10인 경우에 대하여 그림 5를 참조하여 보간법으로 계산하여 표 5에 나타내었다.

표 5. 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1과 10인경우의 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수(α, b)

| 샘플명 | 시험법 | 구속압 | 매개변수 (a) | 매개변수 (b) | $\theta/\theta_r$=0.1 일 때 $R_{eq}$값 | $\theta/\theta_r$=10 일 때 $R_{eq}$값 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PRV37 | RC | 170.99 | 1.8386 | 2.9475 | 0.814151 | 0.727376 |
| PRV67 | RC | 142.72 | 2.990 | 2.998 | 0.812752 | 0.724872 |
| LGN14 | RC | 42.75 | 1.4012 | 2.0539 | 0.791645 | 0.747994 |
| SLC14 | RC | 53.78 | 2.5520 | 2.0108 | 0.786783 | 0.744623 |

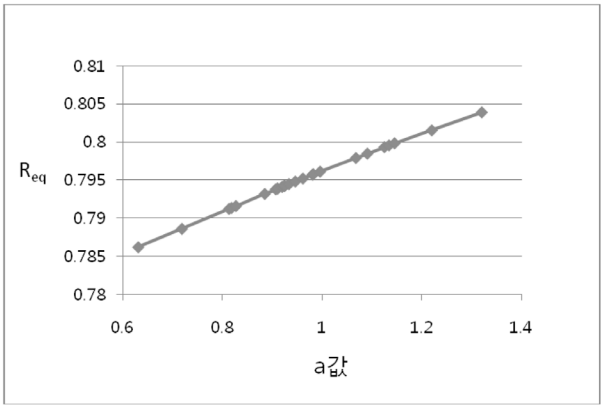


그림 10. 수정쌍곡선 모델에서 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1인 경우 매개변수(a) 값에 따른 등가반경($R_{eq}$)

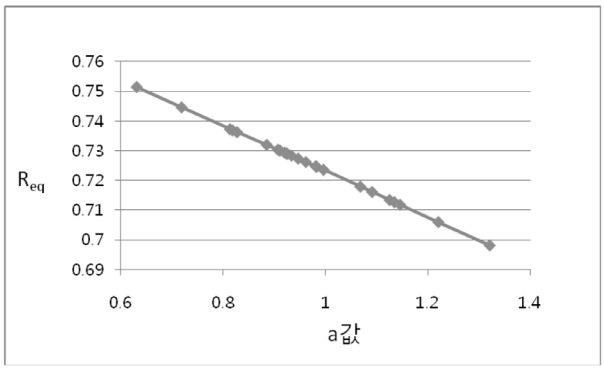


그림 11. 수정쌍곡선 모델에서 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 10인 경우 매개변수(a) 값에 따른 등가반경($R_{eq}$)

그림 10에서 보는 바와 같이 수정쌍곡선 모델의 경우 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1인 경우 매개변수(a) 값이 0.63에서 1.32까지 증가하는 동안 등가반경($R_{eq}$)는 0.786에서 0.804로 0.0177 증가하였다. 반면 그림 11에서는 수정쌍곡선 모델의 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 10인 경우 매개변수(a) 값이 0.63에서 1.32까지 증가하는 동안 등가반경($R_{eq}$)는 0.698에서 0.751로 0.0533가량 증가하였다. 결국 대변형율에서는 등가반경($R_{eq}$)값이 매개변수(a) 값에 따라서 더욱 민감하게 변함을 알 수 있다.

Ramberg-Osgood 모델의 경우는 표 5에서 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 0.1인 경우 매개변수(α) 값이 1.84에서 2.55까지

증가하는 동안 등가반경($R_{eq}$)는 0.792에서 0.813으로 0.02 증가하였다. 반면 Ramberg-Osgood 모델의 정규비틂각($\theta/\theta_r$)이 10인 경우 매개변수($\alpha$) 값이 1.84에서 2.55까지 증가하는 동안 등가반경($R_{eq}$)는 0.725에서 0.748로 0.023가량 증가하였다. Ramberg-Osgood 모델의 경우에는 매개변수($\alpha$)값에 대한 등가반경($R_{eq}$)값이 전단변형율에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 공진주/비틂전단 시험기를 사용하여 감쇠비를 정밀하게 측정할 수 있는 방안을 시도하였다. 여러 지반 비선형 모델(쌍곡선 모델, 수정쌍곡선 모델, Ramberg-Osgood 모델)을 이용하여 이론적 비틂력과 비틂각을 계산하여 측정치와 맞춤곡선법을 사용하여 비교하여 각 모델별 매개변수를 산정하였다. 공진주/비틂전단 시험기의 단점중의 하나인 측정된 감쇠비에서의 변형율 산정을 위하여 수정등가반경법을 이용하여 모델 매개변수에 해당하는 등가반경을 구할 수 있었다. 수정쌍곡선 모델의 경우 대변형율에서는 매개변수($\alpha$)에 따른 등가반경 변동값이 크므로(0.0177~0.0533) 변형율에 따른 감쇠비 계산시 유의해야 한다. Ramgerg-Osgood 모델은 변형율에 관계없이 매개변수($\alpha$)에 대하여 등가반경이 비슷(0.02~0.023)하게 증가함을 알 수 있다. 향후 추가연구로 다양한 흙의 종류(CL, CH, ML or OL)별 시험결과를 분석하여 흙의 종류에 따른 각 모델별 매개변수 산정 및 상관성 규명이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년도 서일대학 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Bae, Y.S. (2008), *Modeling soil behavior in large strain resonant column and torsional shear tests*, PhD Thesis, Utah State University.
2. Chen, A.T.F., and Stokoe, K.H. (1979) *Interpretation of strain dependent modulus and damping from torsional soil tests*, Rep. No. USGS-GD-79-002, NTIS No. PB-298479, U.S. Geological Survey, 46.
3. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972), "Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects." *J. Soil Mech. and Found. Div*., ASCE, 98 (6), 603-624.
4. Ishihara, K. (1996). *Soil behavior in earthquake geotechnics*. Oxford University Press, Oxford.
5. Kim, D.S. (1991), *Deformational characteristics of soils at small strains from cyclic tests*, PhD Thesis, Univ. of Texas Austin, Texas.
6. Kokusho, T. (1987), "In situ Dynamic Soil Properties and Their Evaluations," *Proc. of the Eighth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Kyoto, Vol.2, pp.215-240.
7. Masing, G. (1926), "Eigenspannungen und Verfestgung Beim Messing", *Proc. of Second Int. Conc. of Applied Mech*., pp.332-335.
8. Sasanakul, Inthuorn (2005), *Development of an electromagnetic and mechanical model for a resonant column and torsional shear testing device for soils*, Ph.D Thesis, Utah State University.
9. Sasanakul, I. and Bay, J. (2008a), "Stress integration approach in resonant column and torsional shear testing for soils", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.134, No.12, pp.1757-1762.
10. Sasanakul, I., Bay, J., and Bae, Y. (2008b), "Stress integration approach for soil damping measurements in torsional testing", *Proc. of the 4th decennial geotechnical earthquake engineering* and soil dynamics conference, Sacramento, CA, May 18-22.
11. Utah State University (2009), *Dynamic properties of Bonneville clay*, presented at Eng. Geology and Geotechcnial Eng. Symposium.

(논문접수일 2011. 3. 7, 심사완료일 2011. 6. 16)