

## 공진주 실험의 이론적 모델링에 의한 자료분석 및 해석기법의 제안

### Data Reduction and Analysis Technique for the Resonant Column Testing by Its Theoretical Modeling

조 성 호<sup>1)</sup>Joh, S.-H., 황 선 근<sup>2)</sup>Hwang, S.K., 강 태 호<sup>3)</sup>Kang, T.-H., 권 병 성<sup>4)</sup>Kwon, B.-S.

<sup>1)</sup> 중앙대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

<sup>2)</sup> 한국철도기술연구원 궤도토목부 책임연구원, Principal Researcher, Civil Engineering Research, KRRI

<sup>3)</sup> 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

<sup>4)</sup> 한국철도기술연구원 궤도토목부 연구원, Researcher, Civil Engineering Research, KRRI

**SYNOPSIS:** The resonant column testing is a laboratory testing method to determine the shear modulus and the material damping factor of soils. The method has been widely used for many applications and its importance has been increased. Since the establishment of the testing method in 1963, the low-technology electronic devices for testing and data acquisition have limited the measurement to the amplitude of the linear spectrum. The limitations of the testing method were also attributed to the assumption of the linear-elastic material in the theory of the resonant column testing and to the use of the wave equation for the dynamic response of the specimen. For the better theoretical formulation of the resonant column testing, this study derived the equation of motion and provided its solution. This study also proposed the improved data reduction and analysis method for the resonant column testing, based on the advanced data acquisition system and the proposed theoretical solution for the resonant column testing system. For the verification of the proposed data reduction and analysis method, the numerical simulation of the resonant column testing was performed by the finite element analysis. Also, a series of resonant column testing were performed for Joomunjin sand, which verified the feasibility of the proposed method and showed the limitations of the conventional data reduction and analysis method.

**Keywords:** resonant column testing, equation of motion, shear modulus, damping factor

## 1. 서론

공진주 실험은 흙의 전단탄성계수, 재료감쇠비 등을 결정하는 실험으로, 최근 내진해석의 중요성과 더불어 그 사용빈도와 중요성이 증가하고 있다. 공진주 실험은 1960년 이후 널리 활용되어 왔으나, 현재까지의 공진주 실험은 측정장비의 제한성 때문에, 주로 선형스펙트럼의 진폭성분만을 측정하여 왔다. 이는 공진주 실험 시스템의 이론적 모델링에서 시료의 점성이 고려되지 않았던 것과 공진주 실험 시스템의 동적거동에 대한 이해가 부족했기 때문이었다고 할 수 있다.

공진주 실험에 의한 흙의 동적물성 측정은 공진주 실험 시스템의 동적 거동에 대한 이해를 전제로 한다. 공진주 실험의 시료 및 실험장치의 구성은 고정단-자유단 경계조건을 가지고 있는 연속보로 단순화할 수 있으며, 이렇게 단순화된 모델을 이용하여 공진주 시스템의 모델링을 구현한 경우로 Wood, Richart and Hall (1969)와 Hardin (1965)등을 들 수 있다. Wood, Richart and Hall(1969)은 공진주 실험 시스템에 대한 파동방정식을 유도하였으나, 시료를 단순히 탄성으로 가정하였고 시료의 점성을 고려하지는 않았다. 그리고, Hardin은 파동방정식의 유도에서 시료의 점탄성을 고려하였으나, 시료의 전단탄성계수를 결정하기 위하여 시료의 점탄성을 가정하여야 하는 문제점을 가지고 있었다. 한편, 기존의 연구자들이 이용한 파동방정식이외에 일반 구조물의 동적문제를 해결하는데 활용되는 운동방정식에 의한 방법을 생각할 수 있다. 그러나, 운동방정식을 이용하여 공진주 실험 시스템의 이론적 모델링을 연구한 경우는 없었다. 운동방정식에 의한 해법은 시스템의 동적 증폭계수와 동적 응답에 대한 위상각을 제시하기 때문에, 파동방정식에 대한 해법보다 더 많은 정보를 제공하는 장점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 보다 합리적이고 신뢰성 있는 공진주 실험시스템의 이론적 모델링을 위하여 공진주 실험시스템에 대한 운동방정식을 새로이 유도하였으며, 그 운동방정식의 일반해를 제시하였다. 이와 더불어, 공진주 실험시스템의 운동방정식 해로부터 새로운 공진주 실험의 자료분석 및 해석기법을 제안하였고, 유한요소해석에 의한 공진주 실험의 수치실험을 통하여 본 연구에서 제안한 해석기법의 신뢰성과 타당성을 확인하였다. 그리고, 주문진 표준사에 대한 공진주 실험을 통하여, 본 연구에서 제안한 자료분석 및 해석방법의 적용성을 확인하였으며, 기존 해석방법과의 비교를 통하여 기존 방법의 한계성과 문제점을 살펴보았다.

## 2. 공진주 실험 시스템에 대한 운동방정식

공진주 실험 시스템은 고정단-자유단 경계조건을 가지는 시료 위에 상부 캡 (top cap), 구동판 (drive plate), 영구자석 등의 부착요소가 연결되어 있는 구성을 가지고 있다. 여기서 공진주 실험의 시료는 연속체(continuous system)로 무한 개의 자유도를 가지고 있기 때문에 공진주 실험시스템의 모델링을 위해서 Lagrange 방정식을 이용하며(조성호 외, 2003), Lagrange 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

여기서,  $q_i$ 는 일반화된 좌표,  $T$ 는 시스템의 총 운동에너지,  $\Phi$ 는 시스템의 위치에너지이다. Lagrange 방정식의 적용에 있어서, 공진주 실험 시스템이 연속체이기 때문에 변위  $\theta$ 를 식 (2)로 정의한다.

$$\theta = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} U_i q_i \quad (2)$$

여기서,  $U_i$ 는 공간좌표  $x$ 의 함수로서 정규모드(normal-mode) 함수를 말한다. 공진주 실험의 흡시료 내에서 파의 전파를, 식(3)으로써 정규모드 함수는 파동방정식의 일반해를 제시하였다(조성호 외, 2003).

$$\theta(x, t) = \sum_{i=1,2,\dots}^{\infty} E_i \sin \frac{\omega_i x}{v_s} e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_i t + \delta_i) \quad (3)$$

이 파동방정식의 해를 기반으로 식(2)의 정규 모드 함수는 식(4)와 같이 가정할 수 있으며, 이를 식 (1)에 적용하여 구한 운동방정식은 식 (5)와 같다.

$$U_i(x) = \sin \frac{\omega_i x}{v_s} \quad (4)$$

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{T_0}{I^*} \sin \omega t \quad (5)$$

여기서,  $\omega_i$ 는 고유주파수,  $\xi_i$ 는 재료감쇠비,  $T_0$ 는 시료상단에 가해지는 외부 비틀력,  $\omega$ 는 외부비틀력의 가진 주파수,  $I^*$ 는 식 (6)에 의해서 정의된다.

$$I^* = I(1 + \sin \beta^* / \beta^*) \quad (6)$$

그리고, Lagrange 방정식의 일반해를 식 (7)이라고 하고 일반해를 식 (5)에 대입하면, 진폭  $A_i$ 는 식 (8), 위상각  $\phi_i$ 는 식 (9)에 의해서 정의된다.

$$q_i = A_i \sin(\omega t - \phi_i) \quad (7)$$

$$\text{여기서, } A_i = \frac{T_0 / (\omega_i^2 I^*)}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_i)^2]^2 + [2\xi_i (\omega / \omega_i)]^2}} \quad (8)$$

$$\tan \phi_i = \frac{2\xi_i (\omega / \omega_i)}{1 - (\omega / \omega_i)^2} \quad (9)$$

결과적으로, 공진주 실험에서 시료의 거동은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\theta(x, t) = \sum U_i(x) q_i(t) = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} A_i \sin \frac{\omega_i x}{v_s} \sin(\omega t - \phi_i) \quad (10)$$

특별히, 기본모드에 대한 동적증폭계수는 식 (11)와 같이 정리된다.

$$M = \frac{I}{\beta^2 I^*} \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_i)^2]^2 + [2\xi_i(\omega/\omega_i)]^2}} \quad (11)$$

### 3. 운동방정식의 해를 이용한 동적 물성의 결정

#### 3.1 전단탄성계수

흙의 전단탄성계수는 식 (12)와 같이 전단파 속도와 매질의 질량으로부터 결정될 수 있기 때문에, 공진주 실험으로부터는 흙의 전단파 속도를 구하게 된다. 선형-탄성 거동을 가정하는 공진주 실험시스템에 대하여 Richart, Wood and Hall (1969)가 유도한 관계식은 시료의 점성에 대한 고려와는 관계없이 동일한 관계식을 가지고 있다. 이는 흙의 전단파 속도가 시료의 점성과 관계없이 결정되는 고유의 특성을 가지기 때문이다. 공진주 실험시스템의 시료상단 부착요소(added mass)의 관성모멘트와 시료의 관성모멘트를 알고 있을 때, 이에 상응하는  $\beta$ 를 제시하게 된다. 관계식을 식 (12)의 형태로 표현하였을 때,  $\beta$ 에 따른  $f(\beta)$ 의 변화를 그래프로 표현해 보면 그림 1과 같이 된다. 그림 1은  $I/I_0$ 가 0.5810일 때의 경우이다. 식을 만족하는  $\beta$ , 즉, 식 (12)가 0이 되는 경우의  $\beta$ 를 찾기 위해서는 시행 오차법 또는 수치해석법을 이용하여야 하고,  $\beta$ 가 구해지면, 식 (13)에 의해서 흙의 전단파 속도를, 그리고 식 (12)에 의해서 흙의 전단탄성계수를 구할 수 있게 된다.

$$G = \rho v_s^2 \quad (12)$$

$$f(\beta) = \frac{I}{I_0} - \beta \tan \beta \quad (13)$$

여기서,  $\beta = \frac{\omega_n L}{v_s}$  (14)

한편, 식 (14)의  $\omega_n$ 은 공진주 실험시스템의 고유주파수를 의미한다. 공진주 실험으로부터 고유주파수를 결정하는 것은 기존의 공진주 실험장비 구성으로는 용이하지 않기 때문에, 일반적으로 고유주파수 대신 공진주파수를 사용하고 있다.

$$\beta = \frac{\omega_r L}{v_s} \quad (15)$$

여기서,  $\omega_r$ 은 공진 주파수로서,  $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ 로 정의된다. 전단변형률이 대변형률 영역에 속하게 되면 고유주파수와 공진주파수의 차이는 커지게 되므로, 식 (14)의 전단파 속도 계산에 있어서 가급적이면 고유주파수를 사용하도록 하여야 한다. 공진주 실험으로부터 공진주 실험에서 동적응답계수곡선을 측정하도록 하면, 고유주파수의 결정은 매우 용이하게 된다. 즉, 동적응답계수곡선의 위상각 스펙트럼을 계산한 후, 위상각이 90° 이 되는 주파수가 고유주파수가 되기 때문이다. 그림 2는 공진주 실험으로부터 측정될 수 있는 변위응답곡선의 예를 보여주고 있다.

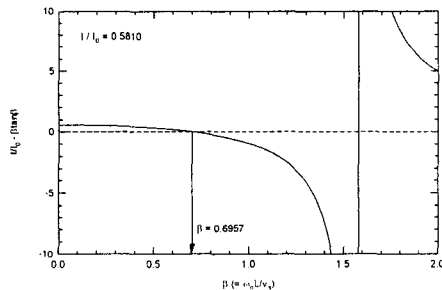


그림 1.  $I/I_0=0.5810$ 일 때,  $\beta$ 에 따른 함수  $f(\beta)$ 의 변화

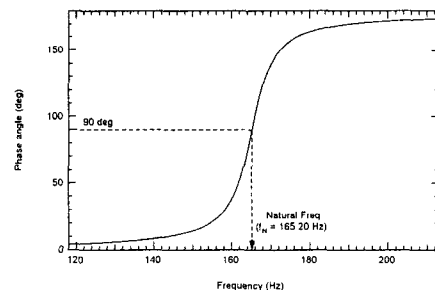


그림 2. 동적응답계수곡선의 위상각 스펙트럼으로부터 고유주파수의 결정

#### 3.2 재료감쇠비

공진주 실험에 있어서 재료감쇠비는 하프-파워 대역폭법, 자유진동감쇠법, 주파수-위상각법 등으로 측정할 수 있다. 이 중 하프-파워 대역폭법은 비교적 쉽게 적용할 수 있지만, 시료가 비선형 거동을 보일

는 경우 재료 감쇠비가 크게 측정되는 단점이 있고, 측정된 재료감쇠비에 대한 전단변형률을 명확히 규정하기 어려운 단점이 있다. 또한, 자유진동감쇠법의 경우도 전단변형률에 대한 정의문제와 진동수에 따른 재료감쇠비의 변화 등과 같은 문제점이 있다.

주파수-위상각법(조성호 외, 2000)은 공진주 실험 시스템의 고유주파수와 공진주파수에서의 위상각을 구하여 이로부터 재료감쇠비를 측정하는 방법으로(그림 3), 하프-파워 대역폭법 및 자유진동감쇠법의 단점을 극복할 수 있는 방법이다. 주파수 위상각법은 공진주실험에서 시료의 동적 응답에 따른 위상각 정보를 요구하는데, 주파수 영역에서의 시료의 각 변위는 측정된 가속도의 두 번 적분으로 구할 수 있다.

$$\theta(x, \omega) = \frac{\ddot{\theta}(x, \omega)}{\omega^2} \quad (16)$$

여기서,  $\theta$ 는 각변위,  $\ddot{\theta}$ 는 각가속도,  $\omega$ 는 주파수이다. 주파수 영역에서의 각변위가 구해지면, 시스템의 위상각은 변위로부터 구할 수 있다. 그리고, 시스템의 감쇠계수  $\xi$ 를 구하는데 적용될 수 있다.

$$\xi(\%) = \frac{1}{2} \left( \frac{\omega_n}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_n} \right) \tan \phi \times 100 \quad (17)$$

여기서,  $\omega_n$ 은 시스템의 고유주파수이다. 즉, 공진주 실험에서 위상각  $\phi$ 는 동적증폭계수 곡선의 위상각 스펙트럼에서 구할 수 있는 항이고, 가진 주파수도 정해져 있는 값이기 때문에, 고유주파수만 알 수 있으면 식 (17)에 의해서 시스템의 감쇠비를 계산할 수 있다.

### 3.3 전단변형률

공진주 실험에 대한 운동방정식의 기본모드 일반해는 식 (18)과 같다. 식 (18)에서  $U(x)$ 는 식 (19)로 표현된다.

$$\theta(x, t) = U(x)q(t) \quad (18)$$

$$U(x) = \frac{U(L)}{\sin(\omega_n L / v_s)} \sin \frac{\omega_n x}{v_s} \quad (19)$$

시간  $t$ 일 때, 위치  $x$ 에서의 전단변형률은 식 (20)로 표현할 수 있다.

$$\gamma(x, t) = r \frac{d\theta(x, t)}{dx} = r \frac{U(L)}{\sin(\omega_n L / v_s)} \cdot \frac{\omega_n}{v_s} \cdot \cos \frac{\omega_n x}{v_s} \cdot q(t) \quad (20)$$

식 (20)의  $q(t)$ 는 조화함수이기 때문에, 위치  $x$ 에서 최대 전단변형량은 식 (21)이 된다.

$$\gamma(x)_{\max} = \frac{rU(L)}{\sin(\omega_n L / v_s)} \cdot \frac{\omega_n}{v_s} \cdot \cos \omega_n x \quad (21)$$

시료 상단에서의 최대전단변형률은 식 (22)와 같이 표현되고, 등가 최대전단변형률은 식 (23)과 같이 결정된다.

$$\gamma(x)_{\max} = \frac{rU(L)}{L} \frac{\beta}{\tan \beta} \quad (22)$$

$$\gamma(x)_{\max, eq} = C \cdot \frac{rU(L)}{L} \frac{\beta}{\tan \beta} \quad (23)$$

여기서,  $C = r_{eq} / r_0$  (원통형 시료 = 0.79)이고,  $r_{eq}$ 은 시료의 등가반지름,  $r_0$ 은 시료의 반지름이다. 한편, 기존의 공진주 실험 자료해석에서는 시료의 각변형량이 시료의 높이 방향에 따라 일정하게 증가하는 것으로 가정하였다. 그러나, 이러한 가정은 크게 잘못된 것이다. 즉, 기존의 가정에 따른 전단변형률은 식 (24)와 같이 표현되어야 한다.

$$\gamma(x)_{\max, conventional} = \frac{rU(L)}{L} \quad (24)$$

즉, 식 (23)와 식 (24)를 비교하여 볼 때, 기존의 방법에 있어서는  $\beta / \tan \beta$ 의 항이 누락되어 있는 것을 알 수 있다.  $\beta / \tan \beta$ 는  $I/I_0$ 에 따라 달리 결정되는 것으로 그림 4과 같은 경향을 보이고 있다.  $I/I_0$ 이 큰 경우, 즉 시료상단 부착요소의 관성모멘트가 작은 경우는 기존의 방법으로 전단변형률을 구할 때 오차를 초래하게 된다. 따라서, 공진주 실험자료에 대해 전단변형률을 계산할 때는 사용하는 공진주 실험장비의 관성모멘트비  $I/I_0$ 를 정확하게 계산하여 이를 고려한 전단변형률 계산이 되도록 하여야 한다. 참고로, Stokoe 형식의 텍사스대학 공진주 실험장비는  $I/I_0$ 가 0.028로서  $\beta / \tan \beta$ 는 0.99이 되어 실

제보다 약 0.94% 과대평가하는 것으로 계산되어, 다행히도 기존의 전단변형률 계산방식으로도 큰 오차를 초래하지 않았던 것으로 평가된다. 그림 5에는 관성모멘트비  $I/I_0$  에 따른 전단변형률의 경향을 비교하였다. 관성모멘트비  $I/I_0$ 가 14.02인 경우와는 달리, Stokoe 형식의 텍사스대학 공진주 실험장비의 경우는 거의 직선경향으로 시료의 높이방향으로 전단변형률이 동일함을 확인할 수 있다.

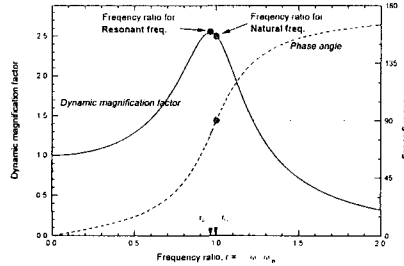


그림 3. 동적증폭계수 곡선의 진폭 스펙트럼과 위상각 스펙트럼 (조성호 외, 2000)

#### 4. 유한요소해석에 의한 검증

본 연구에서 제안한 공진주 실험의 자료분석 및 해석방법을 검증하기 위하여, 공진주 실험의 정상상태 진동 (steady-state vibration) 및 자유진동 (free vibration)을 유한요소해석으로 모사하였다. 정상상태 진동으로 동적증폭계수 및 위상각 스펙트럼을 구하였으며, 자유진동으로 자유진동 감쇠곡선을 구하였다. 본 연구에서 수행한 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 정상상태 진동은 "steady-state dynamics"과 자유진동은 "direct integration"을 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 모델은 직경 5cm, 높이 10cm의 원통형 시료 위에 두께 0.5cm의 디스크 형상의 구동판 (drive plate)을 올려 놓았다. 유한요소모델의 기본물성은 표 1에 요약한 바와 같다.

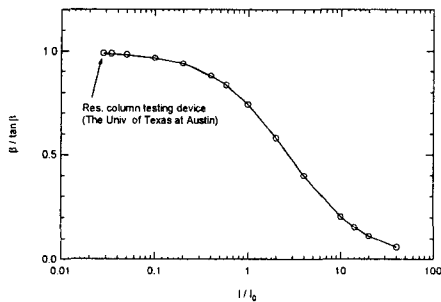


그림 4. 관성모멘트비  $I/I_0$ 에 따른  $\beta/\tan\beta$ 의 경향

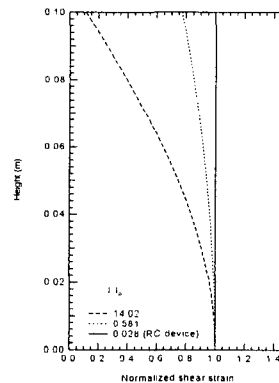


그림 5.  $I/I_0$ 에 따른 전단변형률의 분포

표 1. 공진주 실험시스템에 대한 유한요소모델의 기본물성

물성 요소	재료	단위중량 ( $\text{kg/m}^3$ )	전단파 속도 (m/sec)	전단탄성계수 (MPa)	영탄성계수 (MPa)	포아송비	관성모멘트비* ( $I/I_0$ )
시료	토사	1900	150	42.8	114	0.333	-
구동판	알루미늄	65410	1897	$2.35 \times 10^9$	$6.28 \times 10^9$	0.333	0.5810
		2710	1897	$9.75 \times 10^9$	$2.60 \times 10^9$	0.333	14.02

주 \*  $I$ : 시료의 관성모멘트,  $I_0$ : 구동판의 관성모멘트

본 연구에서는 동일한 토사시료에 대해 두 가지 종류의 알루미늄 구동판에 대해 공진주 실험을 모사하였다. 각각의 알루미늄 구동판은 각기 다른 관성모멘트비  $I/I_0$ 를 가지고 있는 것으로 하였고, 구동판의 관성모멘트는 단위중량의 크기를 달리함으로써 조정하였다. 각기 다른 구동판이 설치된 시료에 대하여 수행한 유한요소 해석결과를 전단탄성계수, 재료감쇠비의 형태로 정리하였다.

#### 4.1 전단탄성계수

일반적인 공진주 실험에서와 같이, 시료와 시료상단 부착요소로 구성된 전체 시스템의 동적증폭계수 곡선을 결정하기 위해서 유한요소해석에 의해 조화진동 실험을 모사하였다. 우선 비틀림진동 모드의 고유주파수를 알기위해 고유치 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 고유주파수를 확인하였고, 이를 근거로 대역을 설정하여 조화진동 공진주 실험을 모사하였다. 조화진동 공진주 실험에 의해서 동적증폭계수와 위상각 스펙트럼은 그림 7과 같이 결정되었는데,  $I/I_0=0.5810$ 의 경우 및  $I/I_0=14.02$  모두에 있어서 유한요소해석과 본 연구가 거의 동일하게 일치함을 확인할 수 있었다.

또한, 유한요소해석결과로부터 위상각이  $90^\circ$  가 되는 지점으로부터 고유주파수를 결정하였고, 또한 동적증폭계수가 최대로 되는 지점인 공진주파수를 결정하였다. 그리고, 고유주파수와 공진주파수를 이용하여 식 (12), (14)를 적용하여 구한 시료의 전단파 속도와 전단탄성계수를 표 2에 요약한 바와 같다. 유한요소해석을 위해 가정했던 전단탄성계수가 42.8 MPa, 전단파 속도가 150 m/sec 이었음을 참고하여 볼 때, 고유주파수를 이용하는 것이 더욱 정확한 결과를 제시함을 확인할 수 있었다. 그리고, 관성모멘트비는 시료의 전단파 속도와 전단탄성계수의 결정에 영향을 주지 않았다.

#### 4.2 재료감쇠비

공진주 실험에서 시료의 재료감쇠비는 주파수-위상각법, 하프-파워 대역법, 자유진동감쇠법 등에 의해서 결정할 수 있다. 주파수-위상각법과 하프-파워 대역법은 조화진동측정으로 결정되는 동적증폭계수 곡선이 필요하고, 자유진동감쇠법은 자유진동곡선이 필요하므로, 유한요소해석에 의해 조화진동과 자유 진동을 모두 모사하였다. 조화진동의 유한요소해석에 의한 동적증폭계수 곡선과 위상각 스펙트럼을 이용하여 주파수-위상각법, 하프-파워 대역법을 적용한 결과를 그림 6, 8에 설명하였고, 자유진동의 유한요소해석에 의한 자유진동감쇠법을 적용한 결과는 그림 7에 설명하였다. 각 방법에 의해 결정된 재료감쇠비는 표 3에 요약된 바와 같이, 동일한 관성모멘트비의 시료에 대해 세 가지 방법 모두 동일한 재료감쇠비를 제시함을 알 수 있다.

표 2 . 유한요소해석에 의해 결정된 시료의 전단파 속도와 전단탄성계수

관성모멘트비* ( $I/I_0$ )	$\beta$	고유주파수			공진주파수**		
		고유주파수 (Hz)	전단파 속도 (m/sec)	전단탄성계수 (MPa)	공진주파수 (Hz)	전단파 속도 (m/sec)	전단탄성계수 (MPa)
0.5810	0.6957	165.20	149.2	42.3	164.99	149.0	42.2
14.02	1.467	348.50	149.3	42.3	346.94	148.6	42.0

주 \* 본 연구에서 제안한 방법.

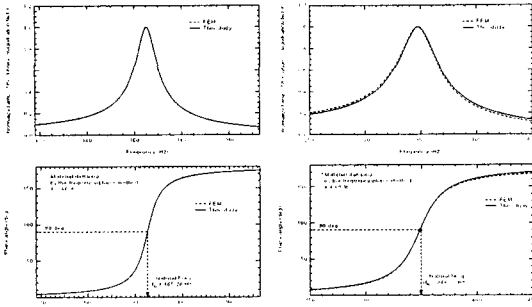
\*\* 기존의 공진주 실험자료 분석에서 사용하는 방법.

#### 4.3 전단변형률

공진주 실험에서의 전단변형률은 각변형량의 미분치를 이용하여 결정한다. 공진주 실험에서 측정하고자 하는 전단변형률은 시료의 높이방향인  $x$ 축에 대한 것으로 식 (22)의 각변형량을  $x$ 축에 대한 미분인 식 (21)에 대해서 결정된다. 관성모멘트비  $I/I_0$ 가 0.5810과 14.02에 대해서 수행한 유한요소해석 결과와 본 연구의 제안식인 식 (22), 그리고 기존의 방식대로 계산한 결과를 그림 10에 비교하여 도시하였다. 관성모멘트비  $I/I_0$ 가 14.02인 경우, 시료의 거동은 그림 10(b)에서와 같이 시료상단 부착요소가 없는 고정단-자유단 조건과 같이 sine 파 경향을 보이고 있는 반면, 관성모멘트비  $I/I_0$ 가 0.5810인 경우, 시료의 거동은 거의 직선으로 나타나고 있다. 따라서, 시료의 전단변형률도 시료의 각변형량 경향과 상응하게 나타나고 있으며, 관성모멘트비  $I/I_0$ 가 작을수록 기존방식으로 구한 전단변형률과 실제 전단변형률과의 차이가 작아짐을 확인할 수 있다.

표 3. 유한요소해석결과에 대해 결정된 시료의 재료감쇠비

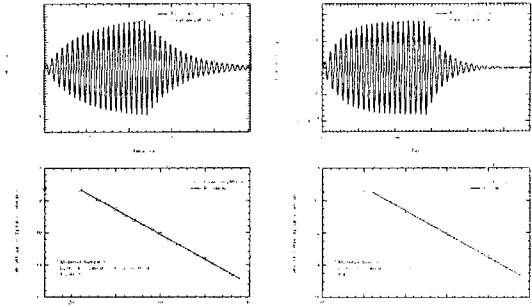
관성모멘트비* ( $I/I_0$ )	주파수-위상각법 (%)	하프-파워 대역법 (%)	자유진동감쇠법 (%)
0.5810	2.46	2.46	2.46
14.02	4.60	4.58	4.58



(a)  $I/I_0 = 0.5810$

(b)  $I/I_0 = 14.02$

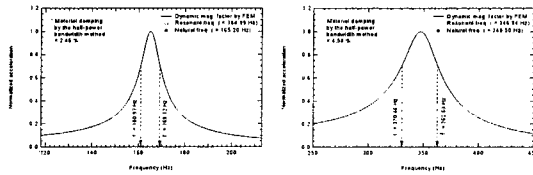
그림 6. 시료상단에서의 동적증폭계수와 위상각의 분포, 주파수-위상각법에 의한 재료감쇠비



(a)  $I/I_0 = 0.5810$

(b)  $I/I_0 = 14.02$

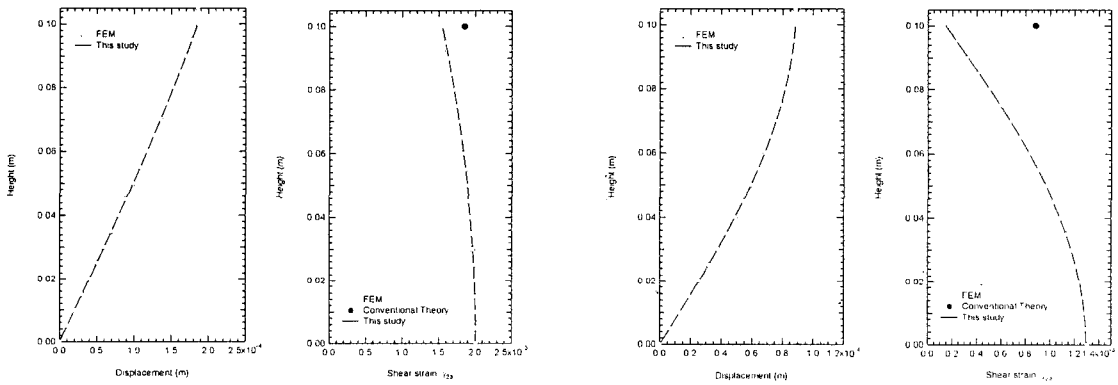
그림 7. 자유진동 감쇠법에 의한 재료감쇠비



(a)  $I/I_0 = 0.5810$

(b)  $I/I_0 = 14.02$

그림 8. 하프-파워 대역법에 의한 재료감쇠비



(a)  $I/I_0 = 0.5810$

(b)  $I/I_0 = 14.02$

그림 9. 위치에 따른 변위 및 전단변형률의 분포

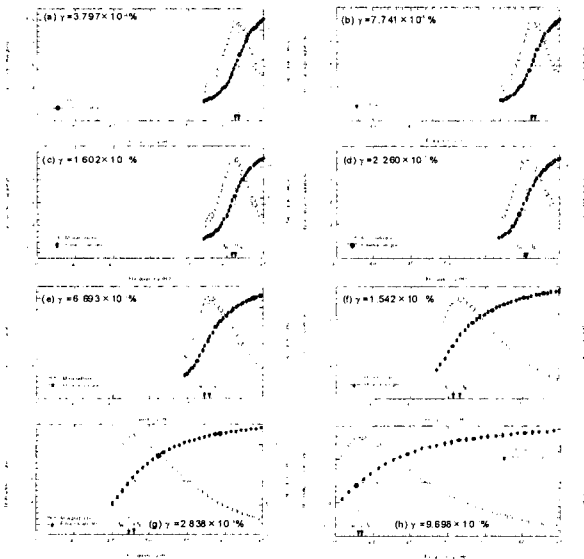


그림 10. 공진주 실험으로 결정한 동적증폭계수와 위상각 스펙트럼

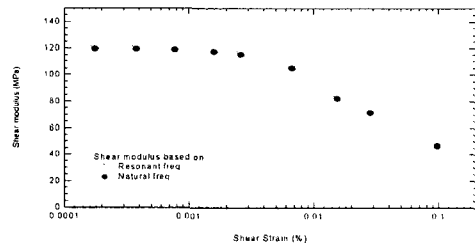


그림 11. 공진주파수에 의한 전단탄성계수와 고유주파수에 의한 전단탄성계수의 비교

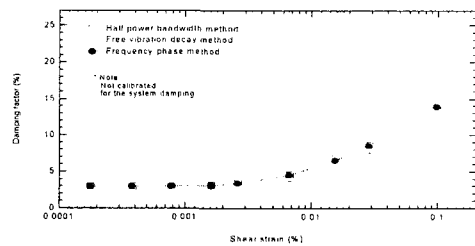


그림 12. 재료감쇠비 결정을 위한 하프-파워 대역법 자유진동감쇠법, 주파수-위상각법의 비교

## 5. 실제 토사 시료에 대한 적용

본 연구에서 제안한 공진주 실험자료 분석 및 해석기법을 실제 토사시료에 적용함으로써, 그 기법의 적용성을 극인하고자 하였다. 또한, 본 연구의 방법과 기존의 방법으로 해석한 결과를 비교함으로써, 새로이 제안된 기법의 타당성을 평가하고자 하였다. 본 장에서 사용한 시료는 노건조된 주문진 표준사를 사용하여 과소다짐(undercompaction)하여 시료를 조성하였다. 본 실험에서 사용한 공진주 실험장비는 중앙대학교에서 자체제작한 것으로서, 관성모멘트비  $I/I_0$  는 0.03421,  $\beta/\tan\beta$ 는 0.9887인 특징을 가지고 있다. 기존의 방법대로 구한 전단탄성계수와 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 전단탄성계수를 그림 11에 비교하였는데, 본 연구의 방법으로 구한 전단탄성계수가 다소 작게 평가되었으며, 그 차이는 고변형률 대역으로 가면서 더욱 크게 되었다. 재료감쇠비는 하프-파워 대역법, 자유진동감쇠법, 주파수-위상각법으로 결정하였으며, 각각의 방법으로 결정된 재료감쇠비를 그림 12에 비교하였다.

## 6. 요약 및 결론

공진주 실험은 흙의 동적 특성을 평가하기 위하여 1960년 이후 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 최근 발전된 전자기술에 상응하여 높은 신뢰도의 공진주 실험이 가능하도록 하는 새로운 공진주 실험의 자료분석 및 해석 기법을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 전단탄성계수의 결정에 있어서 기존의 방법은 선형스펙트럼의 공진주파수를 이용하였으나, 본 연구에서는 동적증폭계수 곡선의 고유주파수를 이용하는 방법을 제안하였다.
- 재료감쇠비의 계산에 있어서 본 연구에서는 동적증폭계수와 위상각 스펙트럼을 사용하는 주파수-위상각법을 제안하였다.
- 전단변형률의 계산에 있어서 기존의 방법은 시료의 선형 변형이라는 가정을 적용하고 있으나, 본 연구에서는 이를 배제하는 보다 합리적인 공식을 제안하였다.
- 본 연구에서 제안한 공진주 실험의 자료분석 및 해석기법을 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 두 가지 경우의 관성모멘트비에 대한 유한요소해석에 있어서 본 연구의 제안식들의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- 주문진 표준사에 대한 실제 실험자료에 대한 적용을 통하여, 본 연구의 적용성을 확인할 수 있었으며, 기존 방법과의 비교를 통하여 기존 방법으로 해석한 결과의 문제점을 지적하였다.

## 감사의 글

본 연구는 1998년 과학기술부의 특정개발연구사업(과제번호: 98-NE-05-04-A-02)에 의해 이루어진 것으로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 조성호, 강태호, 황선근(2003), "운동방정식에 의한 공진주 실험의 자료분석 및 해석" 지반공학회 논문집 (In-Review)
2. 조성호, 권병성, 황선근, 강태호(2003), "점성을 고려한 공진주 실험의 이론적 모델링" 지반공학회 논문집 (In-Review)
3. Hardin, B.O.,(1965) "The Nature of Damping in Sands," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 91, January, pp. 63-97.
4. Hardin, B.O.,(1970) "Suggested Method of Test for Shear Modulus and Damping of Soils by the Resonant Column" Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes, ASTM, pp.516-529.
5. Hwang, S. K. (1997), *Dynamic Properties of Natural soils*, Ph.D. Dissertation The University of Texas at Austin, Austin, Texas
6. Isenhower, W. M. (1979), *Torsional Simple Shear/Resonant Column Properties of San Francisco Bay Mud*, M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas
7. Ishihara, K. (1996), *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press Inc., New York
8. Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., Woods, R. D. (1970), *Vibration of Soils and Foundations*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.