

# 조립재료 동적물성 산정을 위한 대형 공진주시험기



신 동 훈  
한국수자원공사 K-water연구원  
기반시설연구소 소장



하 익 수  
한국수자원공사 K-water연구원  
기반시설연구소 책임연구원  
(geodoc@kwater.or.kr)

## 1. 서론

공진주시험(resonant column test)은 Ishimoto와 Iida(1936, 1937)에 의해 최초로 시작되었으나 1950에 이르러서야 연구가 활발해지기 시작했다. Wilson, Casagrande와 Corse(1950) 등은 Iida의 공진주시험기를 개조하여 흙 공시체에 대하여 균일한 구속응력을 가하여 실제지반의 상태를 구현하였으며, Stevens(1962)는 최초로 electromagnetic vibration 방식 및 piezoelectric accelerometer 방식을 공진주 시험기에 사용하였으며, Stevens(1965)는 최대주응력비가 1보다 큰 상태의 시험을 할 수 있도록 공진주 시험기를 개선하였다.

1960년대 이후에는 F.E. Richart, Jr.(1970)에 의해 많은 발전이 이루어졌으며, 주로 직경 36mm 내지 76mm, 높이 72mm 내지 152mm인 소형의 원주형 공시체를 사용하였다.

초기의 공진주시험은 저진폭 전단변형시험에만 실시할 수 있었으며, 고진폭 전단변형시험이 가능하게 되어서

야 전단변형의 크기가 흙시료의 동적성질에 미치는 영향에 대하여 연구하기 시작하였다. 이와 관련하여 Drnevich(1967)은 전단변형이 시험체의 직경에 따라 달리 나타나는 측정상의 문제점에 대하여 연구를 수행하였다. 또한 이를 발전시켜 공동 시험체로 시험을 할 수 있는 시험기기를 개발하여 시험체의 두께가 얇을수록 전단변형이 대체적으로 일정한 값을 나타내고 있음을 밝힌바 있다.

그러나, 이들 공진주시험기는 대부분 공시체의 직경이 36 내지 76mm 정도로 작아 시료의 최대입경은 대략 8mm 정도로 제한되어 있어 필댐이나 도로 노반재료 등과 같은 조립재료의 동적물성을 파악하기 위해서는 대형 공진주 시험기의 개발이 필요하였다.

실제로 독일, 미국 등의 여러 대학에서는 철도 발라스트나 댐축조 재료의 동적물성을 산정하기 위하여 대형공진주시험기를 개발하여 사용하고 있으며, 최근에는 우리나라에서도 개발되어 사용되고 있다.

본 논문에서는 미국, 독일 및 우리나라에서의 대형공진

주시험기 구축 현황을 분석하고 향후 연구방향을 조망해 보고자 한다.

## 2. 공진주시험 및 시험기 관련 기준 현황

공진주시험법 및 시험기에 대한 기준은 우리나라에는 기준이 없으며, 미국의 ASTM D 4015 (공진주시험법에 의한 흙의 전단탄성계수와 감쇠정수 산정 시험법; Standard Test Methods for Modulus and Damping of

Soils by Resonant-Column Method)가 국제적으로 유일하다. ASTM 4015에 따르면, 공진주시험법은 “공진주의 진동을 이용하여 불교란 또는 교란된 원주형의 흙시료의 전단탄성계수, 전단감쇠, 로드의 계수(일반적으로 Young계수) 및 로드의 감쇠를 결정하는 방법으로서 비파괴식 방법이며, 비파괴식 방법이란 진동의 변형을 진폭이 10-4 이하일 때를 말한다.”

ASTM기준에 따르면 대형공진주 시험기와 소형공진주 시험기를 명확히 구분하고 있지는 않으나 적용가능한 입경의 크기를 공시체 직경을 70mm를 기준으로 제시하고 있고, 현재 상용화되어 있는 공진주시험기에서 사용하고 있는 공시체의 최대직경이 100mm인 점을 감안할 때 소형공진주시험기와 대형공진주시험기의 구분은 100mm를 기준으로 하여도 좋을 것이다. 그림 1은 ASTM 4015의 공진주시험 모델을 나타낸 것이다.

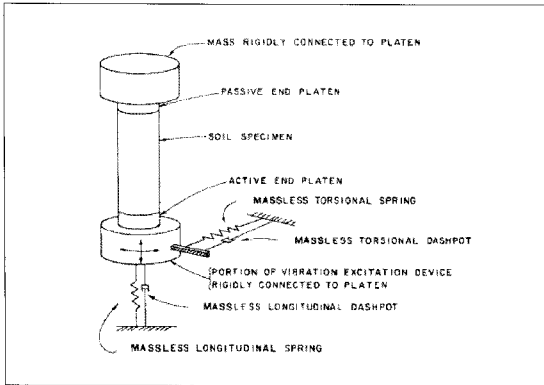


그림 1. 공진주시험 모델

## 3. 국내외 구축 및 활용 현황

소형 공진주시험기는 전세계적으로 일반화되어 있으나 공시체 직경이 150mm이상인 대형공진주시험기를 구

표 1. 국내외의 공진주 시험기 구축 및 활용 예

보유기관	국가	활용	시료의 크기 (mm)	
			직경	높이
미공병단 수리실험연구소(WES) Texas대학교	미국	다수의 댐 및 기타	100	370
			150	300
칼수루헤 공과대학교	독일	바쿰댐 (말레이시아)	800	800
			100	100
		마셰드 솔레이만 (이란)	100	100
			고속전철	500
Ruhr-Bochum대학교		철도	100	200
Kassel대학교		철도	500	1000
쾨리히 공대	스위스	다수의 댐	80	250
			150	450
경희대학교	한국	철도노반 등	150	300
한국수자원공사	(2011년 구축예정)	한국	댐, 제방 및 대형건설 프로젝트	200

축하여 활용하고 있는 곳은 그리 많지 않다. 표 1은 댐이나 다른 지반구조물을 설계할 때 사용된 공진주시험기의 예를 나타낸 것이다.

### 3.1 경희대학교

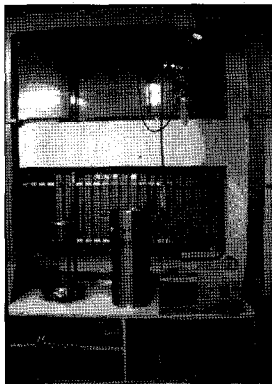
경희대학교에서는 도로 노반이나 노체 재료 또는 철도의 발라스트 재료 등의 회복탄성계수(resilient moduls)를 산정하는데 활용하고자 미국 텍사스 대학의 Menq의 대형 공진주 시험 장비(Multi Mode Device)(Menq, 2003)를 모델로 하여 직경 15cm, 높이 30cm의 원주형공시체를 사용할 수 있는 대형공진주 시험장비를 개발하였다(박인범, 2010).

#### (1) 시험장치의 구성

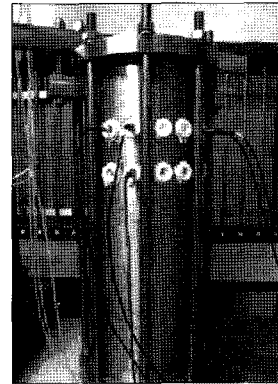
- 가진 시스템(Driving System) : 공시체에 비틀력을 재하
- 시료지지 시스템(Specimen Support System) : 공시체를 지지할 수 있는 시스템
- 구속압 재하 시스템(Confinement System) : 공시체 에의 구속압 재하 시스템
- 제어 및 계측장비 : 비틀가진력 제어 장치와 신호를 측정하고 기록할 수 있는 장치
- 기타장치 : 호이스트, 에어 콤프레서, 공시체 몰드

#### (2) 특징

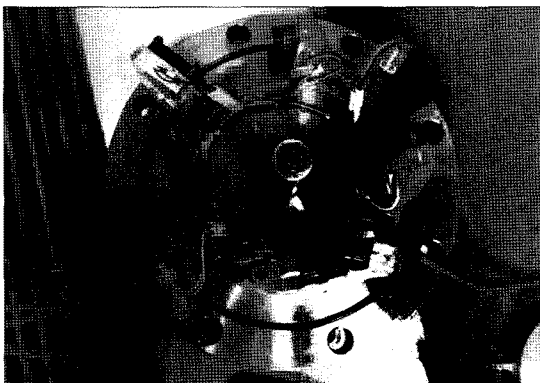
- 가진방식 : 하부가진형, 코일-자석식 가진기를 사용



(a) 시험기 전경



(b) 압력셀



(c) Coil-Magnet 가진장치



(d) 가진장치 지지대

그림 2. 경희대학교 대형 공진주 시험기

## 조립재료 동적물성 산정을 위한 대형 공진주시험기

- 하며 시료의 하부에 위치
- 단부조건 : 자유-자유(하부 페데스탈을 베어링으로 지지) 지점조건 구현
- 대형 공시체 시험 : 직경 15cm × 높이 30cm
- 가능한 시험 : 공진주 시험

- 공시체 크기 : 직경 15cm × 높이 30cm
- 공치체 타입 : 원주형 실린더형
- 사용가능한 최대입경 : 25mm (공시체 직경의 1/6)  
→ ASTM기준 만족
- 구속압 : 압력셀 3452kPa까지 가능

### (3) 주요제원

- 공시체 크기 : 직경 15cm × 높이 30cm
- 공치체 타입 : 원주형 실린더형
- 사용가능한 최대입경 : 25mm (공시체 직경의 1/6)  
→ ASTM기준 만족
- 구속압 : 800kPa까지 가능

### (4) 결과의 활용 예

- 암버력 재료의 전단탄성계수 산정
- 암버력 재료의 회복탄성계수 예측 모델 구축

## 3.2 Texas대학교

Menq 박사(2003)는 비소성 사질토 및 자갈질 재료 (nonplastic sandy and gravelly soils)의 동적성질 평가 하는데 활용하고자 직경 15cm, 높이 30cm의 원주형공 시체에 대하여 시험할 수 있는 대형공진주시험기를 개발 하였다.

### (1) 주요제원

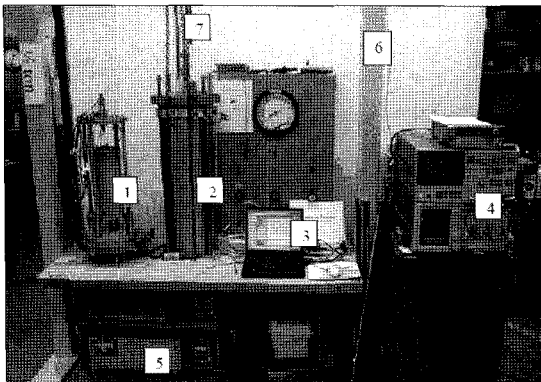


그림 3. Texas대학교의 대형공진주 시스템 전경

### (2) 특징

- 가진방식 : 하부가진형, 코일-자석식 가진기 사용
- 단부조건 : 자유-자유(free-free) 지점조건 구현
- 대형 공시체 시험 : 직경 15cm × 높이 30cm
- 소프트 스프링을 이용하여 공시체를 지지함으로써 배경 노이즈를 최소화함
- 가능한 시험 종류 : 비틀 공진시험(RC test), 종방향 공진 시험(LC test) 및 구속압축파 측정 시험

### (3) 결과의 활용 예

- 총 59종류의 모래질 및 자갈질 재료, 씻은 모르타르 용 모래, 뒷채움재료, 매립재료 등의 재생형 시료에 대하여 간극비(e), 유효구속압, 평균입경, 균등계수 등이 동적물성에 미치는 영향을 조사

## 3.3 Karlsruhe대학교

Karlsruhe 대학교에서는 철도 발라스트 재료 دم 축 조재료 등의 동적물성을 산정하고자 대형 공진주시험기를 개발하였다.

### (1) 주요제원

- 공시체 크기 : 직경 50cm × 높이 100cm, 직경 80cm × 높이 100cm
- 공치체 타입 : 원주형 실린더형
- 사용 가능한 최대입경 : 63mm (직경 50 cm일때), 125mm (직경 80cm 일때)
- 구속압 : 압력셀이 없으며, 진공압으로 98kPa까지 가능

### (2) 특징

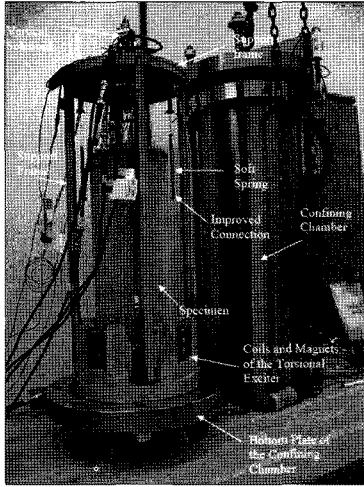


그림 4. Texas대학교의 대형공진주 시스템

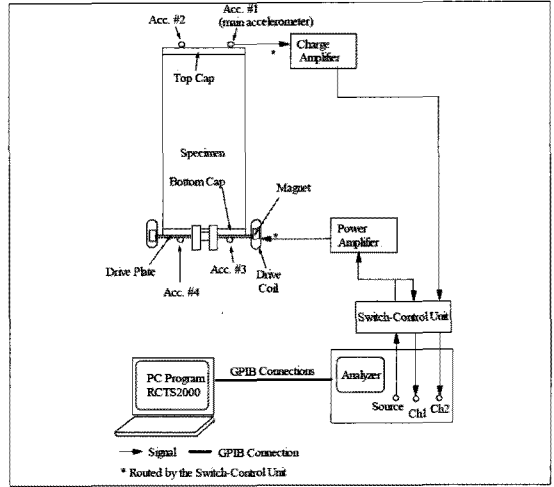


그림 5. 비틀상태의 공진 측정 계통 개요도

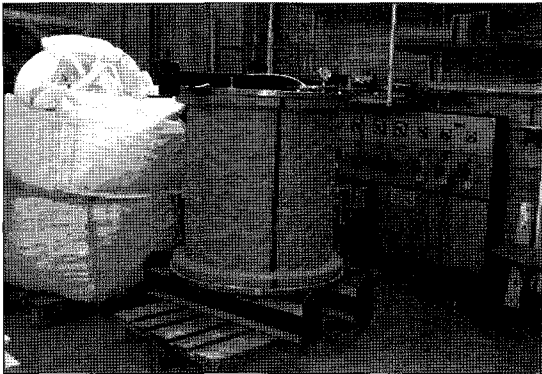
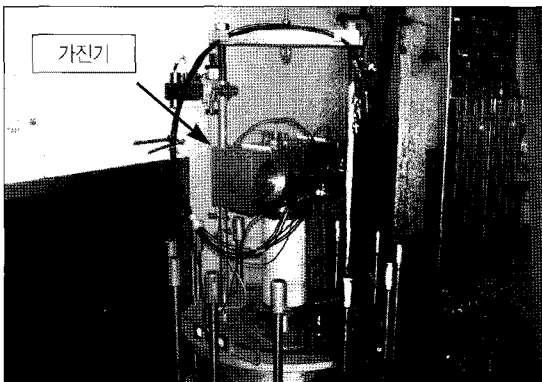


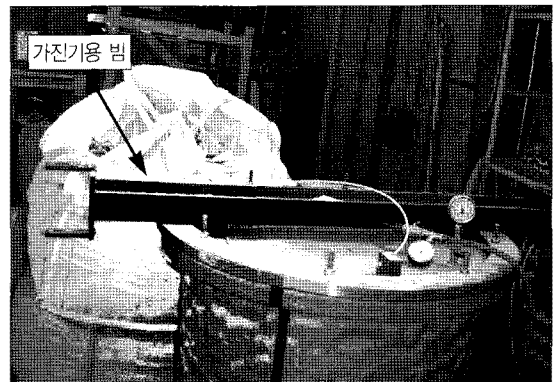
그림 6. 칼스루헤 대학교의 대형공진주시험기 전경: 구속압을 가하기 위한 챔버 대신에 진공압(suction, 최대 -98kPa)으로 구속

- 가진방식 : 상부가진형, Electro-dynamic 가진기 사용
- 단부조건 : 자유-자유(free-free) 지점조건 구현
- 대형 공시체 시험 : 직경 50cm × 높이 100cm, 직경 80cm × 높이 100cm
- 공시체 지지방식 : 하부 페데스탈의 아래에 볼베어링으로 지지
- 가능한 시험 종류 : 비틀 공진시험(RC test), 시간경과에 따른 동적물성 변화 평가시험 가능

(3) 결과의 활용 예



(a) 소형 공진주 시험기의 가진부



(b) 대형공진주 시험기 상부

그림 7. Driving System



그림 8. 대형공진주 시험기에서 Free-Free조건 구현을 위한 페데스탈 하부의 베어링 시스템

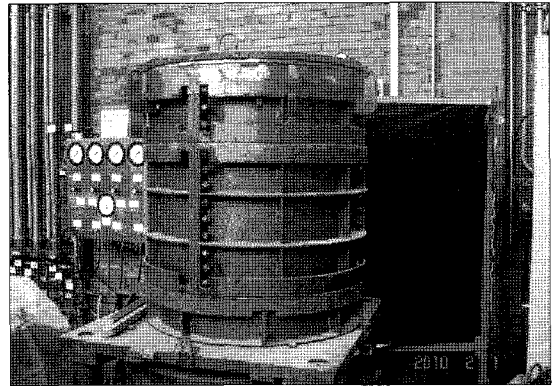


그림 9. 공시체 제작용 몰드

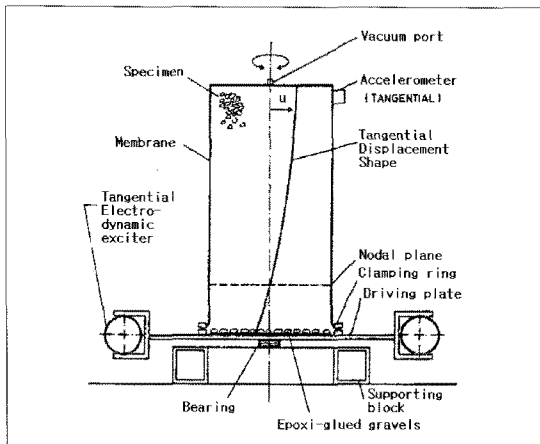


그림 10. 공시체 직경이 50cm, 높이 100cm인 하부가진형 대형공진주 시험기 (Prange, 1983)

- 말레이시아 바쿰댐 축조재료에 대한 공진주 시험
- 독일 고속전철 발라스트 재료에 대한 공진주 시험

### 3.4 Kassel대학교

Kempfert, H.G., Gotschol, A. 및 Stcker(2006) 등에 따르면 조립재료의 장기변형거동 조사 및 철도교통하중과 같이 반복하중을 받는 발라스트 재료의 동적물성 산정하고, 이들 지반재료의 반복-점소성 구성모형을 개발하는데 활용하고자 본 시험기를 개발하였다.

#### (1) 주요제원

- 공시체 크기 : 직경 50cm × 높이 100cm, 공시체 무게 ≈ 390kg
- 공시체 타입 : 원주형 실린더형
- 사용 가능한 최대입경 : 63mm
- 구속압 : 압력셀이 없으며, 진공압으로 98kPa까지 가능

#### (2) 특징

- 반복삼축시험 및 공진주시험 겸용
- 가진방식 : 상부가진형, Electro-dynamic 가진기 사용 (토크=200N)
- 단부조건 : 압축공기를 이용한 자유-자유(free-

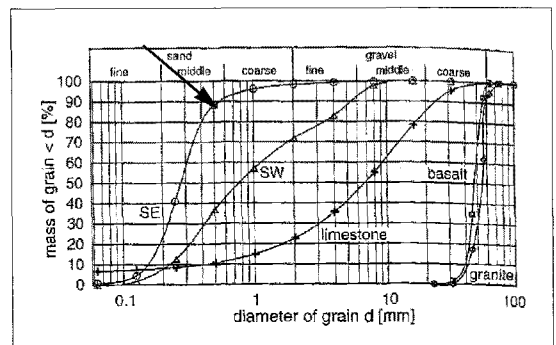


그림 11. 대형 공진주 시험에 사용된 시료의 입도분포 (Kassel대학교)

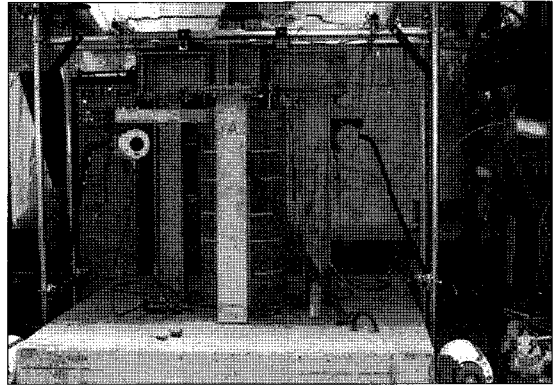
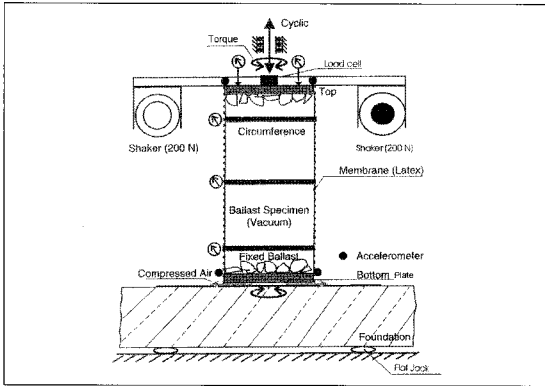


그림 12. Kassel대학교의 대형공진주 시험기

free) 지점조건 구현

- 대형 공시체 시험 : 직경 50cm × 높이 100cm
- 공시체 지지방식 : 하부 페데스탈과 기초 사이에 압축공기를 가하여 공시체를 들어올린 채로 유지 ⇒ 축방향재하시에도 압축공기에 의해 공시체가 부상(floating)되어 있는지 확인이 필요함
- 가능한 시험 종류 : 비틀 공진시험(RC test), 시간경과에 따른 동적물성 변화 평가시험 가능

### (3) 결과의 활용 예

- 반복 점소성 구성모델 개발
- 독일 고속전철 발라스트 재료에 대한 공진주 시험
- 교대 뒷채움부 조립토의 동적거동 모델링

## 3.5 한국수자원공사 K-water연구원

한국수자원공사 K-water연구원(기반시설연구소)에서는 2011년 현재 직경 200mm, 높이 400mm의 대형 공시체를 사용할 수 있는 대형공진주 시험기를 개발하고 있다. 본 시험기는 모래 및 자갈질 재료, 쇠석재료, 철도 발라스트 재료 등의 조립재료의 강성(stiffness)과 감쇠 특성을 조사하는데 활용될 예정이다.

### (1) 주요제원

- 공시체 크기 : 직경 20cm × 높이 40cm
- 공시체 타입 : 원주형 실린더형

- 사용 가능한 최대입경 : 25mm

- 구속압 : 최대 1MPa

### (2) 특징

- 가진방식 : 상부가진형, Coil-Magnet 가진기 사용
- 단부조건 : 자유-고정(free-fixed) 하부고정형
- 대형 공시체 시험 : 직경 20cm × 높이 40cm
- 가능한 시험 종류 : 비틀 공진시험(RC test), 비틀진단시험, 종방향 공진시험

## 4. 고찰 및 결론

공진주시험기는 지난 40여년간 극소변형을 내지 저변

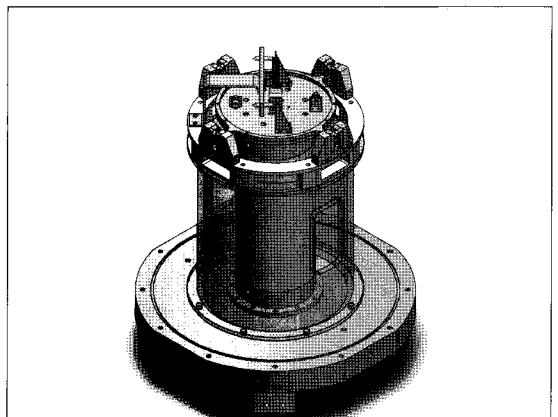


그림 13. 한국수자원공사 개발중인 대형공진주시스템 입체도

형률 영역에서의 토질재료의 강성(stiffness)과 감쇠(damping)을 구하는데 있어 매우 효과적으로 사용되어 왔으며 많은 연구와 개발이 이루어져 왔다.

최근까지 개발되어 사용되고 있는 공진주 시험기 중 자갈이나 록필재료 등과 같은 대입경의 조립재료의 동적물성을 구할 수 있는 대형공진주 시험기는 표 1과 같다.

전술한 바와 같이 대형공진주 시험기는 대부분 댐이나 철도 등에 사용되고 있으며, 사용목적에 따라서 시험기의 구성방식에 있어 차이가 있다. 즉, 철도 발라스트 재료를 대상으로 하는 경우에는 작은 구속압만을 사용하여도 되므로 100kPa 정도의 진공압을 구속압으로 이용하고 있으나 댐과 같이 높은 구속압을 필요로 하거나 구속압의 영향을 검토하려고 하는 경우에는 특수한 챔버를 사용하여 1.0~3.5MPa 까지 구속압을 가할 수 있는 시스템이 사용되기도 한다.

대형공진주 시험의 경우에도 공시체의 경계조건은 자유-자유 조건과 고정-자유 조건이 모두 사용되고 있으나 자유-자유 조건의 시험기가 선호되고 있는 것으로 보인다.

공시체의 직경이 150mm 이상인 대형공진주 시험기에서 사용할 수 있는 입자의 최대입경은 최대 125mm (칼스루헤 대학교)이며, 일반적으로 25mm로 나타났다.

공진주시험에 대한 시험기준은 세계적으로 ASTM기준이 유일하나, 향후 우리나라에서도 활발한 연구활동을 통해 자체 시험기준을 마련할 필요가 있다.

## 감사의글

본 기사는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F05) '대형지반구조물 대입경조립재료 동적물성 산정기법 연구'과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

## 참고문헌

1. 박인범(2010), 암버력-토사의 회복탄성계수 예측 모델 결정 방법에 관한 연구, 경희대학교 대학원 석사학위논문.
2. 김동수(1995), "공진주/비틀전단시험을 이용한 건조사질토의 변형특성," 한국지반공학회논문집, 제 11권 제1호, pp.101-112.
3. ASTM(2003), "Standard test methods for modulus and damping of soils by resonant-column method," ASTM D4015, 2003, Philadelphia.
4. Avramidis, Anestis S. and Saxena, Surendra K.(1990), "The modified "Stiffened" Drnevich resonant column apparatus," Soils and Foundations, Vol.30, No.3, pp.53-68.
5. Clayton, C.R.I., Priest, M.B., Zervos, A. and Kim, S.G.(2009), "The Stokoe resonant column apparatus: effects of stiffness, mass and specimen fixity" Geotechnique 59, No.5, pp.429-437.
6. d'Onofrio, A. Silvestri, F. and Vinale, F.(1999), "A new torsional shear device", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.22, No.2, pp.101-111.
7. Hardin, B.O. and Kalinski, M.E., "Estimating the shear modulus of gravelly soils," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.131, No.7, 2005. pp.867-875.
8. Ishimoto, M. and Iida, K.(1936), "Determination of elastic constant by means of vibration methods, Part 1, Young's modulus," Bulletin of Earthquake research Institute, Tokyo Imperial University, Vol. 14, pp.632-657.
9. Ishimoto, M. and Iida, K.(1937), "Determination of elastic constant by means of vibration methods, Part 2, Modulus of rigidity and Poisson's ration," Bulletin of Earthquake research Institute, Tokyo Imperial University, Vol. 15, pp.67-88.
10. Iida, K.(1938), "Relation between the normal-tangential viscosity ratio and Poisson's elasticity ratio in certain soils," Bulletin of Earthquake research Institute, Tokyo Imperial University, Vol. 16, pp.391-406.
11. Menq, F.Y.(2003), Dynamic properties of sandy and



- gravely soils, The university of Texas at Austin, Ph.D. dissertation.
12. Wichtmann, T. and Triantafyllidis, T.(2009), "Influence of the grain-size distribution curve of quartz sand on the small strain shear modulus", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.135, No.10, 2009. pp.1406-1416.
13. Tatsuoka, F. and Shibuya, D.S.,(1991), "Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests," Key Note Lecture for Session No.1, The 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, December.

