

# 반복삼축압축시험을 이용한 주문진 표준사의 동적변형특성 분석

## Dynamic Deformation Characteristics of Joomunjin Standard Sand Using Cyclic Triaxial Test

김 유 성<sup>1</sup> Kim, You-Seong

고 형 우<sup>2</sup> Ko, Hyoung-Woo

김 재 홍<sup>3</sup> Kim, Jae-Hong

이 진 광<sup>4</sup> Lee, Jin-Gwang

### Abstract

In this study, the modified cyclic triaxial tests with Joomunjin standard sand are performed for dynamic deformation characteristics, such as Young's moduli and damping ratio. The cyclic triaxial test is equipped with Local Displacement Transducer (LDT) on the outside of a cell which has a range from  $10^{-4}$  to  $10^{-1}$  of shear strains,  $\gamma$  (%), instead of conventional cyclic triaxial test which has linear variable displacement transducer (LVDT) with low precision. With the small strain control, tests were carried out at various loading rates, void ratios, and effective confining pressures. Based on the test results, such as dynamic deformation characteristics, shear modulus, and damping ratio, it is found that the test can measure more range of medium strains (0.02-0.2%) than results obtained from conventional test (resonant column test). For the medium strain range, dynamic deformation characteristics investigated by the cyclic triaxial test are also different from those predicted by nonlinear model in conventional test.

### 요 지

본 논문에서는 주문진 표준사를 대상으로 개량된 반복삼축압축 시험장치를 이용하여 탄성계수와 감쇠비에 대한 변형특성을 분석하였다. 기존의 낮은 정밀도를 갖는 LVDT를 사용한 반복삼축시험기를 개량하여 정밀하고 넓은 영역의 동적변형특성을 얻기 위해서 전단변형률( $\gamma$ )  $10^{-4}$ - $10^{-1}$ % 범위의 측정을 제어하는 셀 외부 LDT와 내부의 시료에 LDT를 설치하여 사용하였다. 이러한 미소변형제어를 통하여 5가지의 재하속도 변화와 간극비를 구분하고 4가지의 구속응력 조건을 달리하여 반복삼축시험을 수행하였다. 시험결과를 바탕으로 전단탄성계수와 감쇠비를 여러 조건에 대하여 반복하중 및 변형률 크기의 영향을 비교하고 분석한 결과, 주문진 표준사의 기존(공진주 시험)의 동적변형특성 보다 넓은 구간에서 시험값들을 얻을 수 있었다. 또한, 공진주 시험에서 0.02% 이하의 미소변형률 구간에서 얻은 결과를 토대로 중간변형률 구간을 비선형 모델로 예측한 값들은 반복삼축시험으로 얻은 실험값들과 다른 변형특성을 나타내고 있음을 관찰할 수 있었다.

**Keywords :** Cyclic Triaxial Test, Shear Modulus, Damping Ratio, Local Deformation Transducer, Joomunjin Sand

1 정희원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University)

2 정희원, 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University)

3 정희원, 전북대학교 토목공학과 박사후과정 (Post Doctor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, Tel: +82-70-4060-8182, Fax: +82-63-270-2421, woghdjfk@gmail.com, 교신저자)

4 정희원, 전북대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 규모가 큰 지진과 쓰나미로 막대한 피해발생이 계속되면서 지진에 의한 지반 구조물들의 액상화 피해가 꾸준히 발생하고 있다. 지진 하중뿐만 아니라 도심재개발로 인한 근접공사에 따른 지반의 변위, 지반구조물의 변형, 구조물 기초의 침하예측에 관련된 지반진동은 지반공학 분야의 문제로 대두되고 있다. 이러한 지반진동과 연관된 지진하중, 건설하중, 폭발하중, 파랑하중 등과 같은 동적하중을 받는 구조물이 경험하는 변형량은 매우 작아서 실제 계측결과 변형률 0.1~1% 이하임을 보인다(Burland, 1989). 따라서 지반구조물의 설계에서는 미소변형 상태에서 획득된 전단탄성계수(shear modulus,  $G$ ) 및 감쇠비(damping ratio,  $h$ )로 표현되는 지반의 동적물성치가 중요한 요인으로 작용한다. 지반재료의 동적변형특성 중 최대전단변형계수에 대한 많은 실험연구들이 수행되어 간극비, 과압밀비, 구속응력, 지질학적 연도, 소성지수( $PI$ ) 등 다양한 요소들의 영향을 받는다는 연구결과들이 발표되었으며(Hardin and Richart, 1963; Hardin and Black, 1968; Dobry and Vucetic, 1987), 비선형 전단변형계수와 감쇠비에 대한 연구 또한 많은 실험연구들이 수행되어 제안되었다.(Seed and Idriss, 1970; Seed et al., 1984; Kim, 1991; Vucetic and Dobry, 1991; Rollins et al., 1998). 특히, Hardin(1978)은 미소변형률 영역에서 최대전단변형계수( $G_{max}$ )에 대해 구속응력의 증가에 따라  $G_{max}$ 가 비례하여 증가한다고 제안하였다. 또한, 모래시료에 대한 연구를 통하여 구속응력이 증가함에 따라 정규화 전단변형계수 감소곡선( $G/G_{max}$ )이 전단변형률( $\gamma$ , %)의 증가하는 방향으로 이동한다는 사실을 주장하였다(Shibata and Soelarno, 1975; Iwasaki et al., 1978). Vucetic and Dobry(1991)는 전단변형계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 형태가  $PI$ 에 따라 변화한다고 발표하였고, 비소성 흙에 대하여 한 개의 대표곡선을 제안하였다. Seed와 그 동료 연구자들(1970, 1984)은 모래시료와 자갈시료 각각에 대하여 전단변형계수 감소곡선과 감쇠비곡선의 가능영역을 제안하였고, 제안된 결과에서는 모래시료의 전단변형계수 감소곡선이 자갈시료의 곡선보다 오른쪽으로 치우치는 경향을 보였다. Rollins et al.(1998)의 연구결과에서는 자갈시료의 변형특성이 Seed등의 연구결과 중 모래시료의 결과와 거의 일치함을 보였다. Vucetic과 Dobry(1991), Seed and Idriss(1970)의 연구결과에서는 비소성-비점성 지반에 대하여

구속압과 무관한 대표곡선이나 대표되는 대역이 제안되었지만, 많은 다른 연구자들에 의해 비선형의 전단변형계수와 감쇠비 특성에 대한 구속응력의 중요성이 밝혀졌다(PHRI, 1997). 동일한 전단파 속도에서 지진하중 작용시, 지반부지의 응답특성의 증폭 및 감폭 현상은 지반의 전단변형계수 감소곡선과 감쇠비 곡선에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 연약지반에서 지반의 동적물성의 영향으로 지반변위를 증폭시킨 사례가 Loma Prieta and Mexico City 지진에서 나타났다(Stone et al., 1987; Idriss, 1993).

국내에서도 Kim(1995)는 건조사질토에 대한 공진주/비틀전단시험을 통하여 구속응력이 증가함에 따라 선형한계변형률( $\gamma_t^c$ )이 증가하고 동일한 변형률 크기에서 전단변형계수가 증가한다는 연구결과를 발표하였다. Park(2002)은 비소성 토질의 전단변형계수 감소곡선의 평균유효구속압에 따른 전단변형계수 감소곡선을 산정할 수 있는 방정식을 제안하였다. Kim and Choo(2004, 2005)은 포화 및 배수조건에 따른 사질토 지반의 변형특성을 비틀전단시험기를 이용하여 연구하였으며 간극수압증가와 동적변형특성 변화에 근거한 사질토 지반의 반복한계전단변형률에 대하여 제안하였다. 또한 간극비, 배수조건, 평균유효응력의 영향을 평가하고 대표적인 경험식을 도출하였다. 주문진 표준사의 대형 공진주시험기의 적용(Park et al., 2009), 낙동강모래의 동적변형특성을 위한 공진주/비틀전단시험(Kim et al., 2009) 그리고 성토재료를 사용하여 대입경 조립재료를 가지고 대형 삼축압축시험장비로 동적변형특성(Lee et al., 2010)을 검증하였다. 이러한 연구 결과들은 대부분 공진주 시험기나 공진주/비틀전단 시험기를 통하여 실시되었으나, 국내 표준시험으로 많이 사용하는 지반재료인 주문진 표준사의 시험결과의 신뢰성 확보를 위한 교차검증을 할 수 있는 연구결과는 미흡한 실정이다.

위에서 언급한 것처럼, 기존 연구와 같이 실험실에서 지반의 동적 물성치를 구하는 대표적 방법으로 공진주 실험이 널리 사용되어 왔다. 지반의 동적거동은 변형률의 크기에 따라 다르게 나타나는데 공진주 실험에서는 유압식이나 기계식으로 작동하는 대부분의 반복시험기(cyclic testing equipment)와는 달리 전기적 코일-자석(coil-magnet) 상호작용으로 비틀력(torque)을 시료에 가함으로써 순응도 문제(compliance problem)없이 미소변형률(전단변형률,  $\gamma < 10^{-3}\%$ )하에서의 선형거동과 중간변형률( $10^{-3} < \text{전단변형률}, \gamma < 10^{-1}\%$ )하에서의 비

선형 거동 등 지반의 동적특성을 표현할 수 있다. 이러한 공진주시험 결과로부터 비선형 해석 모델들이 개발되었으며 그 중 Ramberg와 Osgood 모델(1943)과 Modified Hyperbolic Model(Hardin and Drnevich, 1972)이 대표적으로 사용되어 왔다. 그러나, 이러한 모델들에서 얻을 수 없는 요소인 전단변형률  $10^{-1}\%$  이상에서 전단변형계수 감소곡선과 감쇠비 곡선의 2차 변곡점에 대해서 공진주 시험에서 얻은 시험결과는 전단변형률  $10^{-1}\%$  이하까지만 나타나므로 그 이상의 실질적인 값들을 위해서 비선형 해석모델에 의한 추정을 하고 있는 실정이다. 또한, 이러한 모델들의 변수 중 하나인 최대전단강도 ( $\tau_{max}$ )는 실측 공진주시험에서 얻은 값이 아니라, 별도의 단조재하시험에서 측정한 내부마찰각으로부터 추정

한다. 즉, 두 가지 시험에 의한 지반의 동적변형특성을 판단하므로 실험의 효율성과 정확성에 문제를 제기할 수 있다.

본 연구에서는 상기의 문제점을 해결하고자 미소변형률 측정장치(Local Deformation Transducer)를 이용하여 반복삼축시험기를 개량하고, 개량된 반복삼축시험기의 검증과 향후 연구에서의 시험결과의 비교 및 평가를 위해서 주문진 표준사의 동적변형특성을 규명하고 전단변형계수 감소곡선과 감쇠비 곡선의 2차 변곡점까지의 데이터를 이용하여 기존의 비선형 해석모델에 비해 보다 실제에 근접한 신뢰성 있는 동적변형곡선들을 제시하고자 한다.

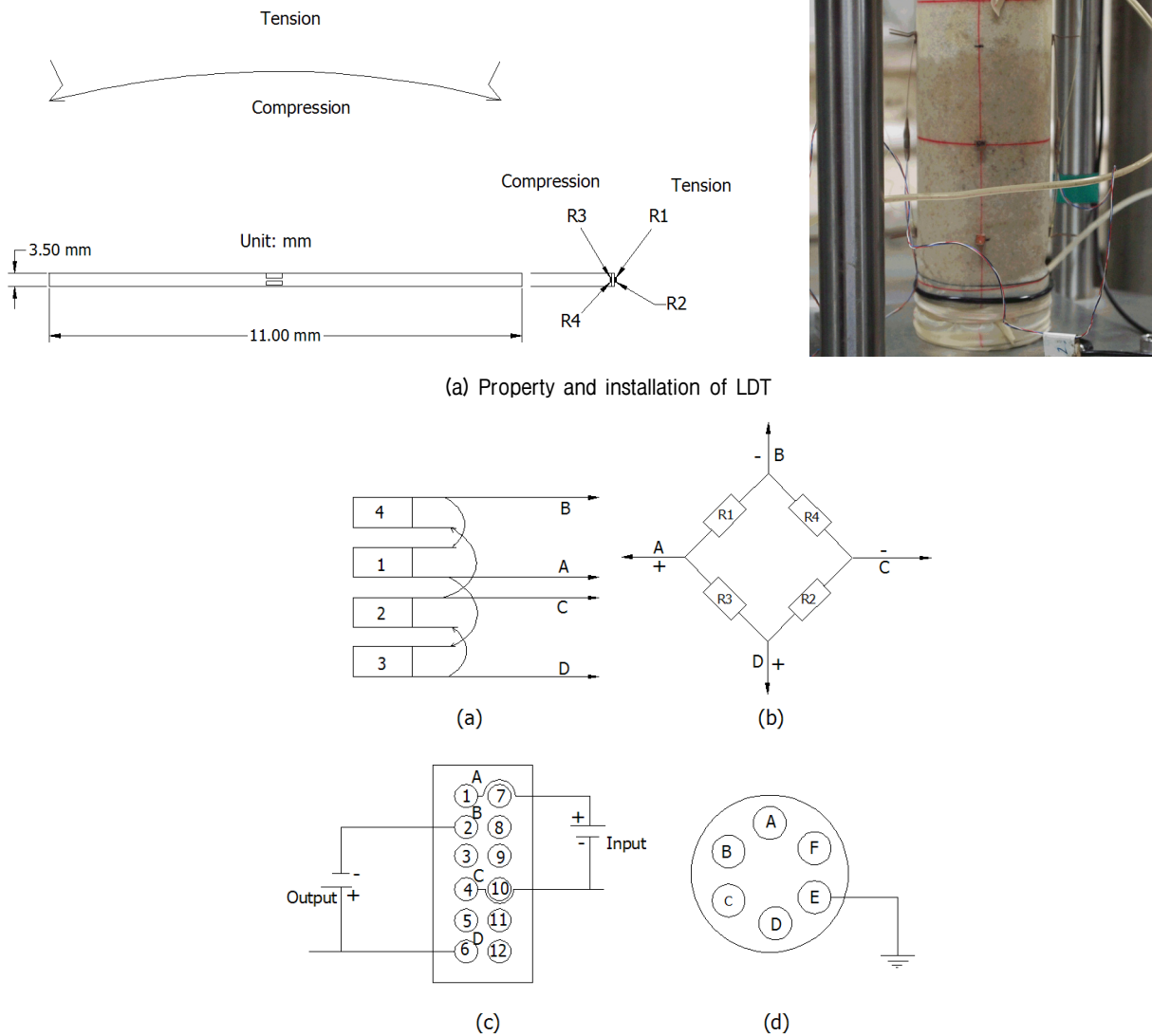


Fig. 1. Property and wiring diagram of LDT

## 2. 반복삼축시험 장치와 시료

### 2.1 LDT(Local Deformation Transducer)

개발된 반복삼축시험 장치는 일본(동경대)에서 사용했던 장비가 갖고 있는 단점을 보완한 장비이다. 보완된 점은 시험장치 내부에 설치된 미소변위 측정장치(LDT)로써, 전단탄성계수-감쇠비 곡선을 얻기 위해 필요한 미소변형률 측정과 축변형률 제어를 할 수 있도록 제작된 것이다(Fig. 7). 일본 지반공학회(지반재료의 변형 특성을 구하기 위한 반복삼축 시험방법, JGS 0542-2000) 기준에서는 외부 축변위계를 LVDT로 사용하는 것으로 규정되어 있으나, 본 연구의 시험장치 외부에 LDT를 추가 설치하여 미소변형률을 위해 축변형률 제어를 정밀하게 측정할 수 있도록 보완하였다.

Goto et al.(1991)은 삼축압축시험에서 축방향 미소변위 측정장치(LDT)를 이용할 경우 시료와 상·하부 캡 사이에서 발생하는 bedding error를 배제하고 시료의 평균적인 축변형률을 측정할 수 있다고 보고하였다. LDT는 휨강성이 작은 0.3mm의 띠형 인청동(phosphor bronze) 박판에 변형률 게이지(strain gage) 4개를 Fig. 1과 같이

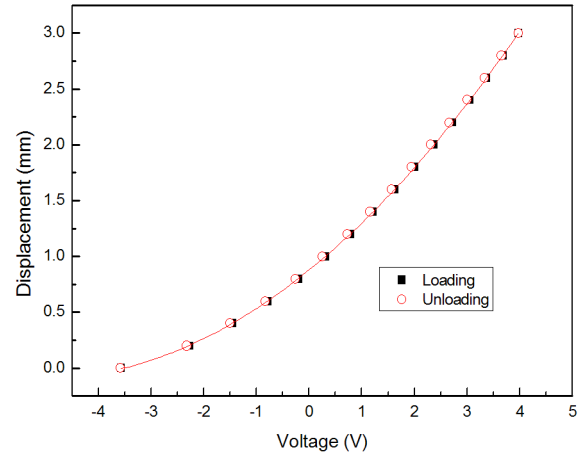


Fig. 3. Result for 1st LDT verification

압축과 인장 측면에 각 2개씩 병렬로 부착한다. 축변형률 측정을 위한 외부 LDT와 시료의 양 측면에서 인장과 압축 변형률을 측정하기 위한 내부 LDT를 Fig. 2와 같은 힌지를 셀 상단과 멤브레인에 각각 부착하고 LDT를 약간 휨 상태로 거치하게 된다. 내부 LDT는 시료의 전단면 발생위치에 따라 값이 변화할 수 있으므로 시료 반대편에 2개를 설치하는 것이 일반적이다.

LDT의 검증은 1/100mm까지 측정 가능한 마이크로

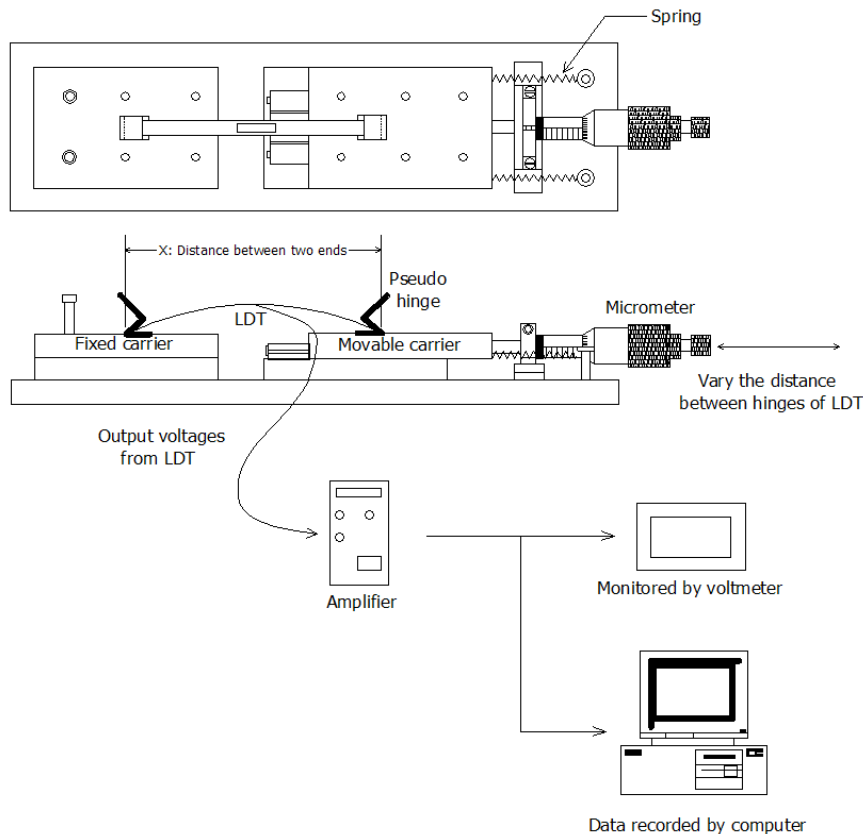


Fig. 2. Diagram for verification of LDT

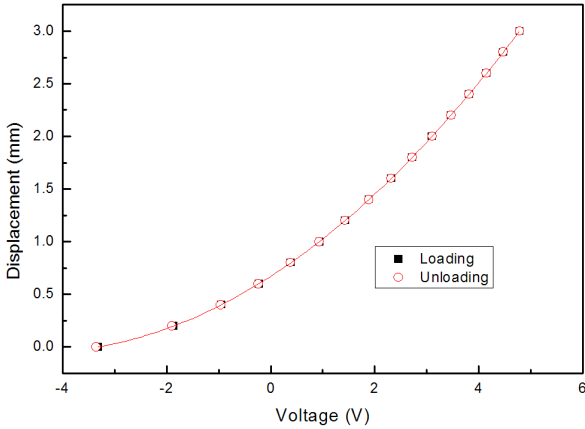


Fig. 4. Result for 2nd LDT verification

미터(micrometer)를 이용하였으며, Fig. 2와 같이 검증기구에 LDT를 설치하고 마이크로미터의 변위를 증가·감소 시켜가면서 앰프를 통해 증폭된 전압 값을 컴퓨터에서 확인할 수 있다. LDT 2개의 검정결과를 Fig. 3-4에 나타내었다. 검증곡선은 2차방정식으로 표현하였으며 변위의 증·감에 따른 편차는 거의 없는 것으로 나타났다.

## 2.2 시료와 시험장비

지반재료의 동적변형특성을 구하기 위해서는 0.001% 이하의 변형률에서 측정을 할 수 있는 LDT의 사용이 필수적이다. 반면에 미소변형률에서의 정밀제어는 서보모터의 감속기어 조절뿐만 아니라 재하/제하(load/unloading)의 반전가능한 최소 rpm의 설정 및 정밀한 축변형률 제어가 요구된다. 이러한 범위에서 축변형률을 제어할 수 있는 기어형태의 정밀제어 반복삼축시험장치가 사용되었다. 본 시험기를 이용하여 주문진 표준사의 동적변형특성에 대하여 연구를 수행하였고, 대상 시료에 대한 물리적 특성인 비중, 입도, 최대·최소 상대밀도 등을 알기 위한 기본물성에 대한 시험을 실시한

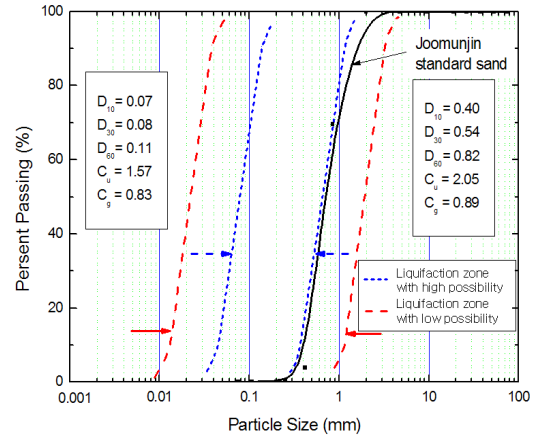


Fig. 5. Particle-size distribution and liquefaction potential curve of joomunjin sand

결과를 Table 1과 2에 나타내었으며 Fig. 5는 주문진 표준사의 입도분포곡선과 액상화 발생 가능성 범위를 나타내었다. 주문진 표준사의 입경에 따른 균등계수는 2.05, 곡률계수는 0.89로 나타났으며 통일분류법(USCS)으로 SP로 분류되었다. Ishihara(1996)의 방법으로 대상토의 입도분포에 따른 액상화 발생 가능성을 Fig. 5와 같이 적용시켜 보았다. 외부에 긴 파선은 액상화 발생 가능성의 범위이고, 내부의 짧은 파선의 범위는 액상화의 가능성이 높은 범위이다. 주문진 표준사의 입도분포곡선은 액상화 가능성이 높은 범위에 매우 근접해서 나타나고 있어 액상화에 취약하다는 것을 확인할 수 있다.

대상 시료의 최대·최소 상대밀도는 농촌공사 새만금 사업단 시험실의 상대밀도 시험기를 이용하여 비점성토의 상대밀도 시험방법(KSF2345, 2010)으로 시험을 실시하였다. 반복삼축시험에 사용할 상대밀도에 따른 밀도와 간극비를 Table 2와 같이 정리하였다.

시험 장비에 대해서는 0.001%이하의 범위에서 축변형률을 제어할 수 있는 기어형태의 정밀제어 삼축압축 시험장치가 사용되었다. Fig. 6에 시험에 사용된 삼축압

Table 1. Property of joomunjin sand

Specific gravity $G_s$	Grain-size (mm)			Uniformity coefficient $C_u$	Gradation coefficient $C_c$	USCS
	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$			
2.650	0.40	0.54	0.82	2.05	0.89	SP

Table 2. Various relative density ( $D_r$ ) used for cyclic triaxial test

Relative Density ( $D_r$ )	Max.	80%	70%	60%	50%	40%	30%	Min.
Density ( $g/cm^3$ )	1.648	1.580	1.548	1.517	1.488	1.459	1.432	1.355
Void ratio	0.608	0.677	0.712	0.747	0.782	0.816	0.851	0.955





Fig. 6. Cyclic triaxial test for small strain

발생장치(CONVUM)로 구성된 국부적인 공기압시스템, (2) 시료를 포함하는 삼축압축셀, (3) 시료의 반응을 측정할 장치, (4) 아날로그 신호를 디지털신호로 바꿀 수 있는 A/D converter, (5) 재하장치와 공기압시스템을 제어할 수 있고 데이터를 저장할 수 있는 컴퓨터, (6) 디지털 신호를 아날로그신호로 바꾸어 E/P transducer 나 모터 컨트롤러로 보내는 D/A converter, 마지막으로 (7) 하중과 변위들의 측정을 보다 정확히 분석할 수 있는 앰프(amplifier)로 나눌 수 있다. 기존 시험장비들이 제어를 하지 못했던 축변형률의 미소변형률(0.0002%)부터 중간변형률(0.3%)까지 제어할 수 있는 LDT와 LVDT의 장비를 설치한 모습이 Fig. 7에 나타나 있다.

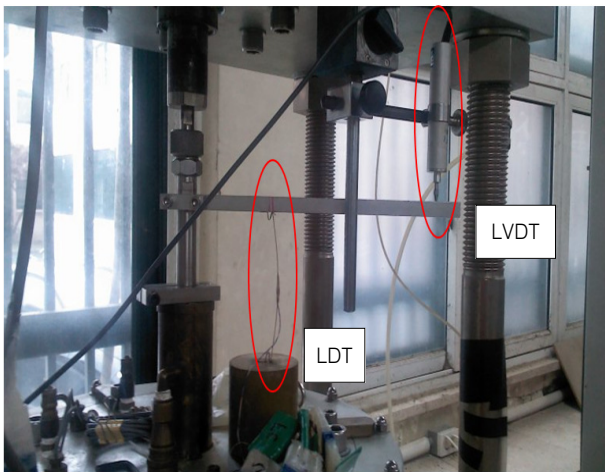


Fig. 7. Installation of LDT (left) for strain control and LVDT (right)

### 3. 주문진 표준사의 동적변형특성

#### 3.1 응력-변형률 관계

앞장에서 언급한 외부 LDT에 의한 축변형률 제어, 내부 LDT에 의한 축변형률을 측정할 수 있는 반복삼축 시험장비를 이용하여 주문진 표준사에 대한 반복삼축 시험 및 단조재하 삼축압축시험을 실시하여 문헌의 시험 결과와의 비교를 통해 동적변형특성을 분석하였다. 주문진 표준사에 대한 반복삼축시험의 전단변형계수 감소곡선에서 요구되는 최소 전단변형률 0.001%을 기준으로 그 이하(0.0002%, 0.0005%)에서부터 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 마지막으로 0.2%의 중변형률 레벨까지 시험을 실시하였다. Fig. 8-9에서는 간극비 ( $e = 0.677$ ), 시료높이( $H = 15\text{cm}$ ), 유효구속압( $\sigma'_c = 200\text{ kPa}$ ) 그리고 시료직경( $D = 7.5\text{cm}$ )을 이용한 반복삼축시

축시험장치의 전경을 보여주고 있다. 이 시험장치의 주요한 구성요소는 다음과 같다. (1) 아날로그 모터와 기어로 구성된 축재하 시스템과 E/P transducer와 진공압

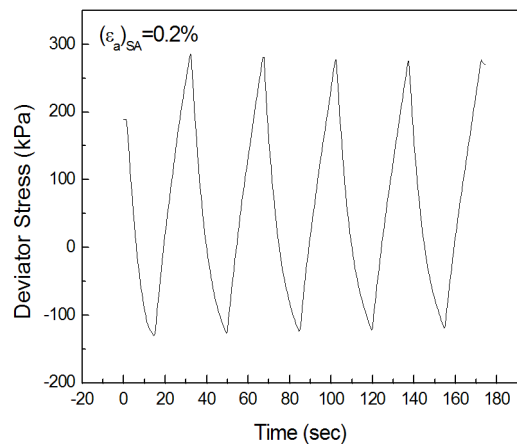
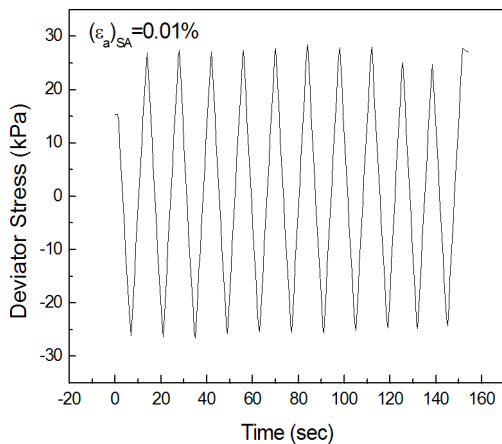


Fig. 8. Deviator stress obtained from cyclic triaxial test ( $\epsilon_{a(SA)} = 0.0002, 0.001, 0.01, 0.2\%$ )

험을 실시하여 대표적인 응력-시간, 응력-변형률의 4가지 관계를 보여주고 있다. Fig. 9는 전 변형률 구간에서 정밀한 데이터를 취득하였으며 편진폭 변형률이 증가할수록 루프의 면적이 증가하고 있으며, 10번째 루프(일본 지반공학회 기준 「지반 재료의 변형 특성을 구하기 위한 반복 3축 시험 방법」(JGS 0542-2000))만을 취득하여 응력-변형률 관계를 나타내었다. 기준이 되는 편진폭 축변형률 0.001%에서는 선형관계를 나타내고 있으며, 편진폭 축변형률이 증가할수록 응력연화 현상에 의해 루프의 면적이 넓어지고, 0.001%이하에서는 약간의 루프가 형성되고 있다. 이는 LDT와 로드셀의 측정 정밀도 한계에 다다른 것으로 판단된다. Fig. 9의 Figure 상의 루프 양 끝단을 연결하는 선의 기울기를 계산하여 등가 변형계수( $E_{eq}$ )를 산정하였고, 외부 축변형률을 제어한 LDT와 내부 LDT의 측정값( $(\epsilon_a)_{SA}$ )의 결과가 거의 일치하고 있음을 보여주고 있으며, 감쇠비 산정을 위한 루프의 면적은 AutoCAD의 면적 산출 기능을 이용하여 산정하였다. 각 편진폭 축변형률 레벨(0.0002%에서 0.2%까지의 10가지의 전단변형률)에서 산정된 등가 변형계수( $E_{eq}$ )와 감쇠비( $h$ )를 Fig. 10과 같이 도시하였다.

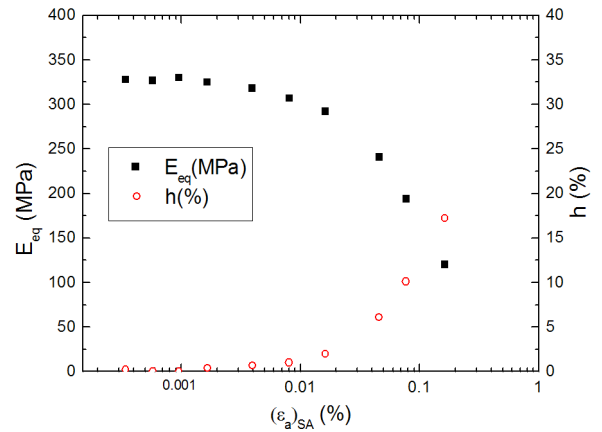


Fig. 10. Plot of equivalent elastic modulus( $E_{eq}$ ) and damping ratio ( $h$ ) vs. axial strain( $(\epsilon_a)_{SA}$ ) at 10th cyclic loading

### 3.2 재하속도, 간극비, 구속압 변화에 따른 동적변형특성

반복삼축시험 진동주기(Frequency)는 일본지반공학회 기준(JGS 0524-2000)에서는 0.05~1.0Hz로 규정하고 있다. 그러나, 반복삼축시험기의 서보모터의 유효 RPM은 10~3,000 범위이다. 따라서, 편진폭 축변형률  $(\epsilon_a)_{SA}$ 이 0.0002%에서부터 0.2%까지 넓은 범위에서 일정한 진동주기로 시험을 실시하려면 시험도중에 서보모터

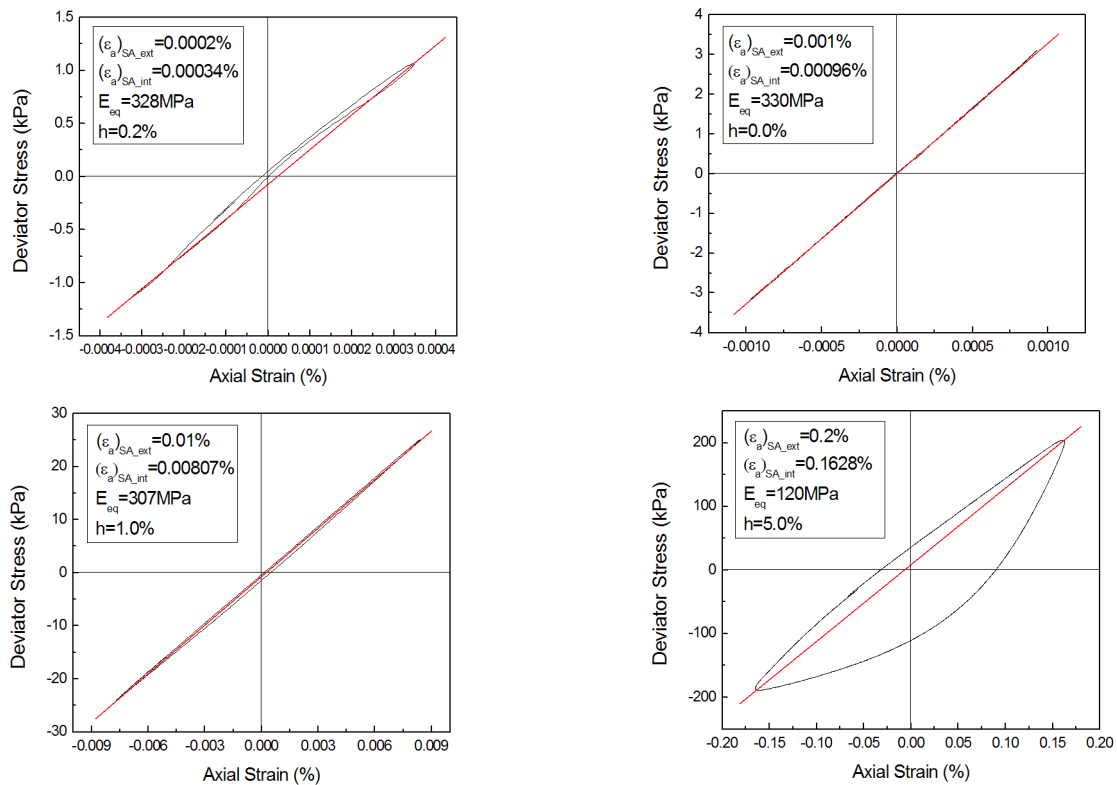
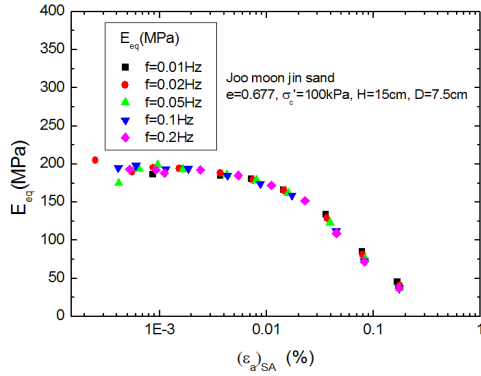


Fig. 9. Plot of deviator stress vs. axial strain at 10th cyclic loading ( $(\epsilon_a)_{SA}$  = 0.0002, 0.001, 0.01, 0.2%)

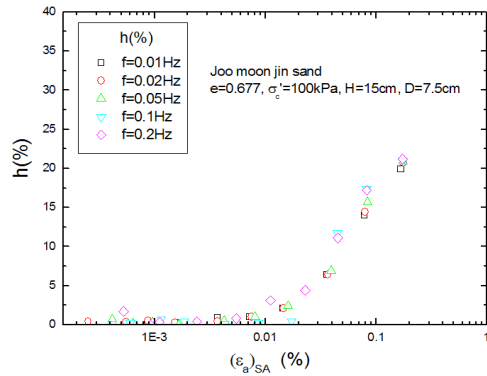
의 기어비 변경을 해서 변형률속도를 제어해야 한다. 서보모터의 기어비 변경없이 반복삼축시험을 실시하기 위하여 재하속도(또는 진동주기)를 변경하면서 반복삼축시험을 실시하고, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 진동주기가 0.01Hz~0.2Hz 범위에서 시험한 결과 변형계수( $E_{eq}$ )와 감쇠비( $h$ ) 모두 진동주기에 상관없이 일정한

값을 나타내고 있다. 이러한 결과를 토대로 간극비와 구속압 변화에 따른 시험들은 편진폭 축변형률 0.0002%~0.05%까지 0.1Hz으로 시험을 실시하고, 0.1%에서는 0.05Hz, 0.2%에서는 0.02Hz로 서보모터의 기어비변경없이 반복삼축시험을 수행하였다.

주문진 표준사의 간극비에 따른 동적변형특성은 상

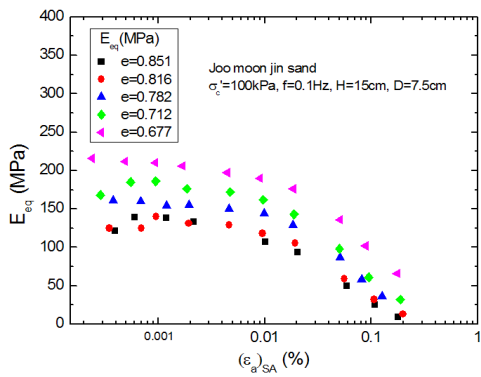


(a) Equivalent elastic modulus ( $E_{eq}$ ) vs. axial strain

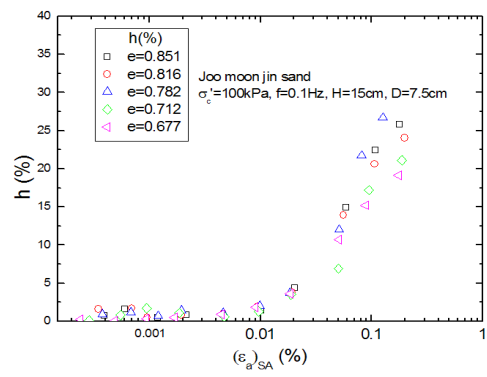


(b) Damping ratio vs. axial strain

Fig. 11. Plot of  $E_{eq}$  and  $h-(\epsilon_a)_{SA}$  regarding loading ratio

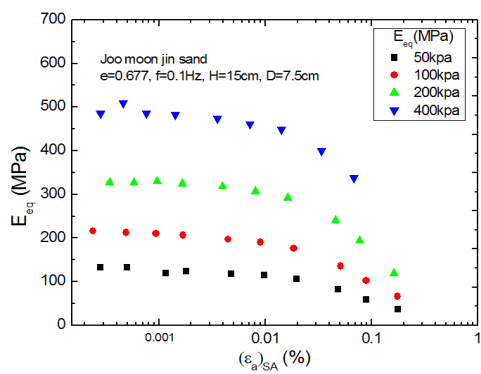


(a) Equivalent elastic modulus ( $E_{eq}$ ) vs. axial strain

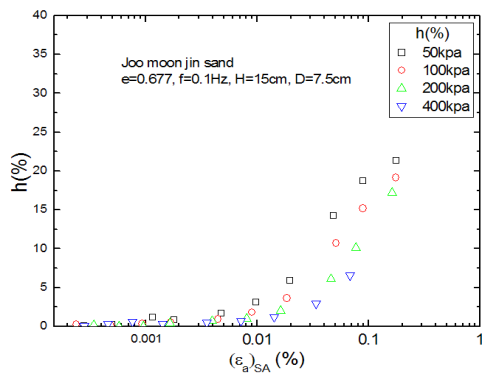


(b) Damping ratio vs. axial strain

Fig. 12. Plot of  $E_{eq}$  and  $h-(\epsilon_a)_{SA}$  regarding void ratio



(a) Equivalent elastic modulus ( $E_{eq}$ ) vs. axial strain



(b) Damping ratio vs. axial strain

Fig. 13. Plot of  $E_{eq}$  and  $h-(\epsilon_a)_{SA}$  regarding confining pressure



Table 3. Maximum elastic modulus ( $E_{max}$ ) corresponding to confining pressure

$\sigma'_c$ (kPa)	50	100	200	400
$E_{max}$ (MPa)	130	214	329	485

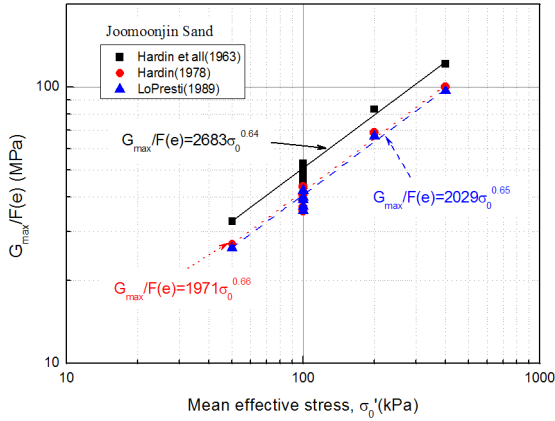


Fig. 14. Plot of  $G_{max}/F(e)$  vs. mean effective stress regarding confining pressure

대밀도에 따른 간극비(Table 2)를 기준으로 반복삼축시험을 실시하였다. 시험에서 구속압은 모두 100 kPa 고 정하고 상대밀도 30%~80%에 해당하는 간극비 0.85 1~0.677의 시험결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 간극비가 감소할수록 등가변형계수 ( $E_{eq}$ )는 증가하였으며, 편진폭 축변형률 0.05%에서 간극비가 커질수록 대체적으로 감쇠비가 증가하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 13은 구속압에 따른 주문진 표준사의 반복삼축 시험결과를 나타낸다. 구속압이 증가할수록 등가변형계수가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, Table 3은 구속압에 따른 최대변형계수( $E_{max}$ )를 보여주고 있다. Fig. 14는 Hardin et al.(1963)의 연구결과와 일치하는 경향을 보이고 있다. Hardin et al.(1963)은 최대전단변형계수에 대하여 간극비와 구속응력의 함수를 다음과 같이 식 (1)로 나타내었다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (1)$$

여기에서  $A$ ,  $n$  은 상수,  $\sigma'_0$ 는 유효구속압,  $F(e)$ 는 간극비의 함수이다. 간극비의 함수  $F(e)$ 는 식 (2)로 제안하였고, Iwasaki et al.(1978)과 Kokusho(1980)가 모래지반의  $G_{max}$  측정을 통하여 검증한바 있다.

Table 4. Parameters ( $A$ ,  $n$ ) of three models for  $G_{max}/F(e)$  plot

$F(e)$ Eqs' parameters from literatures	$A$	$n$
Hardin et al. (1963)	2683	0.64
Hardin (1978)	1971	0.66
Lo Presti (1989)	2029	0.65

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (2)$$

이후 Hardin(1973)과 Lo Presti(1989)에 의해 새로운 간극비 함수가 식 (3)과 (4)와 같이 제안하였다.

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \quad (3)$$

$$F(e) = e^{-1.3} \quad (4)$$

식 (2)-(4)의 모델을 이용하여 본 연구에서 구한  $G_{max}$ 를  $F(e)$ 에 의해 정규화하여 유효구속압의 관계를 최소자승법으로 상수  $A$ 와  $n$ 을 산정하였다. 식 (2)-(4)의 간극비 함수  $F(e)$ 을 이용하여 최대전단변형계수( $G_{max}$ )를 분석하여 Fig. 14에서 검증되어졌고, 각 함수에 의해 구해진  $A$ 와  $n$ 을 Table 4에 정리하였다. Fig. 14에서 세 가지 간극비 함수  $F(e)$ 에 의해 정규화된 최대전단변형계수( $G_{max}$ )가 각각의 제안된 방정식의 경향과 잘 일치하고 있다.

### 3.3 주문진 표준사의 동적변형특성 비교 분석

본 연구에서 주문진 표준사를 대상으로 수행하였던 재하속도, 간극비, 그리고 구속압 변화에 따른 모든 동적변형특성들에서 편진폭변형률,  $(\epsilon_a)_{SA}$   $10^{-3}\%$ 이하에서  $G_{max}$ 를 결정하여  $G_{eq}/G_{max}$ 로 정규화한 결과들을 Fig. 15와 16에서 보여준다. 다른 시험방법으로 수행한 결과들이지만, 전단변형계수( $G_{eq}/G_{max}$ )의 경향은 유사한 값을 보이고 있다. Fig. 15에서는 지반의 액상화 해석에서 주로 사용되는 전단변형계수 감소곡선의 문헌들과 본 연구에서 실시한 시험결과들을 비교하였다. 모래시료에 대한 공진주시험, 반복삼축시험 그리고 단순전단시험에서 얻은 데이터들을 정규화 곡선으로 제안한 Vucetic and Dobry(1991)의 결과와 일본의 표준사인 토

요타 모래를 구속압 별로 시험을 수행하여 정규화 곡선으로 제시한 Kokusho(1980)의 곡선들을 나타내었다. 그리고, 지반재료의 동적변형특성의 기준으로 많이 인용되고 있는 Seed and Idriss(1970)의 연구결과와 본 연구결과를 비교하였다.

Fig. 15에서 알 수 있듯이, 주문진 표준사는 Seed and Idriss(1970)의 결과보다 우측에 위치하고 있고, 곡선의 기울기가 급경사를 이루고 있다는 걸 알 수 있다. Toyoura 모래와 곡선의 기울기가 급경사를 이루는 비슷한 경향이 있으나, 미소변형률 범위에서 선형구간이 긴 주문진 표준사의 특성 때문에 약간 우측으로 비선형구간을 이루고 있음을 알 수 있었다. Fig. 16은 동적변형특성으로 많이 수행하고 있는 공진주시험을 이용해 주문진 표준사의 전단변형률 감소곡선을 구하고(Park et al., 2009), Ramberg-Osgood(1943)의 비선형 모델을 이용해 회귀 분석한 결과와 본 연구의 시험결과를 비교한 것이다. 전단변형률 0.0002%~0.02%의 구간에서는 공진주시험과

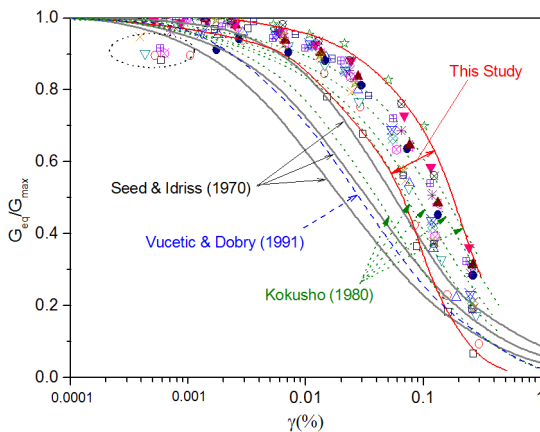


Fig. 15. Comparison of plot of  $G_{eq}/G_{max}$  vs.  $\gamma$  in joomunjin sand

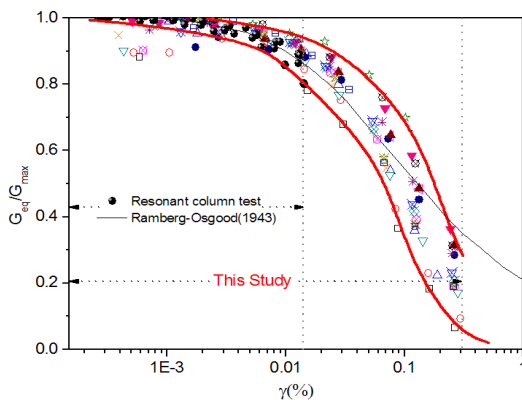


Fig. 16. Comparison of resonant column test with cyclic triaxial test in joomunjin sand

반복삼축시험의 결과는 매우 잘 일치하고 있으므로 두 가지의 시험내용에 대한 검증이 되었으나, 비선형 모델(Ramberg-Osgood, 1943)을 이용하여 공진주시험 결과를 전단변형률 0.02% 이후 예측한 결과와 반복삼축시험으로 직접 시험으로 수행하여 얻은 동적변형특성들(중간 평균곡선을 점선으로 표시)은 많은 오차를 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 연구에서 얻어진 결과는 지반 재료의 동적변형특성을 정확히 제시하기 위해서 기존 실험방법으로 수행된 결과들을 통하여 Ramberg-Osgood(1943) 모델로 예측하는 중간변형률 부분을 LDT 장비로 직접 실험하여 얻을 수 있다는 장점을 보여주고 있다. 본 실험의 여러 가지 결과를 통하여 중간변형률 구간에서 2차 변곡점이 발견할 수 있었으며, 그에 대한 차이점은 지반 재료의 안정성 평가에 영향을 끼칠 수 있을 것이라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 미소변형률에서의 제어 및 측정을 위한 LDT를 셀 내부와 외부에 장착한 반복삼축압축시험기를 이용하여 기존 비선형모델로 예측해왔던 부분을 실험값으로 직접 얻어서 저변형률에서 중간변형률( $10^{-4}$ ~ $10^0\%$ )까지의 동적변형특성을 검증하고 비교하였다. 본 연구의 실험결과로부터 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- (1) 주문진 표준사의 동적거동 평가시 요구되는 전단변형률  $10^{-3}\%$ 이하에서의 반복재하를 실시하기 위하여 외부에 설치한 LDT로 축변형률을 제어하고 시료에 부착한 내부 LDT의 시험결과 값들과 비교하여 동적변형특성을 위한 반복삼축시험의 정밀도 검증을 확인하였으며,  $10^{-4}\%$ 까지의 축차응력~축변형률 관계의 이력곡선을 적절하게 구할 수 있었다.
- (2) 동적변형특성에서 진동주기가 0.01~0.2Hz 범위에서는 변형률( $E_{eq}$ )과 감쇠비( $h$ ) 모두 일정한 값들이 측정되었으나, 간극비가 감소할수록, 구속압이 증가할수록 변형률은 증가하고 감쇠비는 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 본 연구에서는 구속압 50~400kPa, 간극비 0.677~0.851, 재하주파수 0.01~0.2Hz로 시험한 모든 결과들과 문헌들에서 제시된 결과들을 비교하였으며, 주문진 표준사는 Seed and Idriss(1970), Vucetic and

Dobry(1991)가 제안한 곡선보다 우측에 위치하여 미소변형률 구간에서 선형구간이 길게 나타나고 있으며, 곡선의 기울기가 급경사를 이루고 있어 Toyoura 모래(Kokusho, 1980)와 유사한 경향을 보였다.

- (4) 동적변형특성을 확인하기 위해 일반적으로 사용되는 공진주 시험은 0.0002~0.02%의 구간에서는 반복삼축시험의 결과와 유사한 경향을 보이나, 중간 변형률 구간을 예측하기 위하여 사용하는 비선형모델(Ramberg-Osgood, 1943)은 주문진 표준사 동적변형특성을 정확하게 표현하지 못하고 많은 오차가 발생하고 있음을 본 연구의 개량된 반복삼축시험장비 결과에서 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2012R1A1A2044128).

## 참고 문헌

1. Burland, J. B. (1989), "Small is Beautiful-the Stiffness of Soils at Small Strains," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.26, pp.499-516.
2. Choo, Y. W. and Kim, D. S. (2005), "Dynamic Deformation Characteristics of Sands Under Various Drainage Conditions", *Journal of the Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.21, No.3, pp.27-42.
3. Dobry, R. and Vucetic, M. (1987), "State-of-the-art report: dynamic properties and response of soft clay deposits" *Proceeding of International Symposium on Geotechnical Engineering Soft Soils*, Vol.2, pp.51-87.
4. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S., and Sato, T. (1991), "A simple Gauge for Local Small Strain measurements in the Laboratory", *Soil and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.136-151.
5. Hardin, B. O. (1978), "The Nature of Stress-Strain Behavior of Soil", *Proceedings, Geotech. Eng. Div. Specialty Conference on Earthquake Eng. and Soil Dynamics*, Pasadena, CA, ASCE, Vol.1, pp.3-90.
6. Hardin, B. O. and Black, W. L. (1968), "Vibration modulus of normally consolidated clay" *Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, Vol.94, No.SM2, pp.353-369.
7. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves" *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.98, No.SM7, pp.667-692.
8. Hardin, B. O. and Richart, F. E. (1963), "Elastic Wave Velocities in Granular Soils" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations, ASCE*, Vol.9, No.SM1, pp.33-65.
9. Idriss, I. M. (1993), "Assessment of Site Response Analysis

- Procedure", *Report No. NIST GCR 95-667*, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD, Center for Geotechnical Modelling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, David.
10. Ishihara, K. (1996), "Pore pressure generation characteristics of gravel under undrained cyclic loading", *Ph.D. Dissertation*, University of California, Berkeley.
11. Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, T. (1978), "Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.39-56.
12. JGS 0542-2000, "Method for Cyclic Triaxial Test to Determine Deformation Properties of Geomaterials", *The Japanese Geotechnical Society*.
13. Kim, D. (1991), "Deformational characteristics of soils at small to intermediate strain from cyclic tests" *Ph.D Dissertation*, The University of Texas at Austin, US.
14. Kim, D. S. (1995), "Deformational Characteristics of Dry Sand Using Resonant Column/Torsional Shear Testing", *Journal of the Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.11, No.1, pp.101-112.
15. Kim, D. S. and Choo, Y. W. (2004), "Cyclic Threshold Shear Strains of Sands Based on the Buildup of Pore Water Pressure and Variations of Deformation Characteristics", *Journal of the Korean Society of Civil Engineering(KSCE)*, Vol.24, No.3, pp.193-203.
16. Kim, J. M., Park, Y. H., and Lim, S. D. (2009), "Dynamic Shear Properties of Nak-Dong River Sand Determined by Resonant Column/Torsional Shear Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.25, No.11, pp.5-15.
17. Kokusho, T. (1980), "Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range" *Soils and Foundations*, Vol.20, No.2, pp.45-60.
18. KSF 2345 (2010), Testing Method for Relative Density of Cohesionless Soils, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Testing Standard*.
19. Lee, S. J., Kim, Y. K., Choo, Y. W., Lee, S. H., and Kang, T. H. (2010), "Development and Verification of Large Triaxial Testing System for Dynamic Properties of Granular Materials", *Journal of the Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.26, No.12, pp.5-17.
20. Lo Presti (1989), "Proprieta dinamiche dei terreni", *Proc. 14<sup>th</sup> Conf. Geotech. Turin*.
21. Park, D. K. (2002), "A Suggestion of an Empirical Equation for Shear Modulus Reduction Curve Estimation of Sandy Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.18, No.3, pp.127-138.
22. Park, I. B., Park, C. S., and Mok, Y. J. (2009), "Verification of the Large Scale, Free-free Resonant Testing Equipment using Jumunjin Sand", *International Symposium on Urban Geotechnics*, pp.1415-1424.
23. Port and Harbour Research Institute(PHRI) (1997), *Handbook in Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, pp.57-67.
24. Ramberg, W. and Osgood, W. R. (1943), "Description of Stress-Strain Curves by the Three Parameters" Technical Note 902, *National Advisory committee for Aeronautics*, Washington, D.C.
25. Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B. and Daily, W. D. (1998), "Shear modulus and damping relationships for gravels" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.124, No.5, pp.396-405.

26. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis" Report No. EERC 70-10, *Earthquake Engineering Research Center*, Univ. of California, Berkeley, Sept., pp.37.
27. Seed, H. B., Wang, R. T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K. (1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils" Report No. UCB/EERC-84/14, University of California, Berkeley
28. Shibata, T. and Soelarno, D. S. (1975), "Stress-Strain Characteristics of Sands Under Cyclic Loading" *Proc. JSCE*, Vol.239, pp.57-65 (in Japanese).
29. Stone, W. C., Yokel, F. Y., Celebi, M., Hanks, T., and Leyendecker, E. V. (1987), "Engineering aspects of the September 19, 1985 Mexico earthquake" *NBS Building Science Series 165*, National Bureau of Standard, Washington, D.C. pp.207.
30. Vucetic, M and Dobry R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.1, pp.89-107.

(접수일자 2012. 5. 21, 심사완료일 2012. 11. 23)