

내진실험 연구를 위한 다지점 가진 진동대의 활용

Applications of Seismic Test using Multi-platform Shaking Table System

최형석† · 김남식* · 정진환*

Choi, Hyung-Suk, Kim, Nam-Sik and Cheung, Jin-Hwan

Key Words : Shaking Table(진동대), Seismic Test(내진실험)

ABSTRACT

As the testing instrument for seismic research, the multi-platform shaking table system of SESTEC in the Pusan National University was introduced to suggest the multi-support shaking table testing methods and also to investigate its ability and applicability. 2 spans single-pylon cable-stayed bridge model, 3 spans girder bridge model and nuclear piping system model are presented and the acceleration and displacement table feedbacks of the each tests are compared to verify the simultaneous excitation ability in time domain and frequency domain.

1. 서 론

구조물의 내진성능을 평가하기 위해 실험모델을 제작하여 일정한 크기의 실험대 위에 설치하고 실제 지진과 유사한 진동으로 가진하는 진동대 실험법은 동적 성능을 검증하기 위한 방법 중 가장 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다. 국내에서도 최근 철근콘크리트 빌딩 및 교량 구조물의 내진성능, 각 중 구조 부재의 내진 및 지진격리성능 등을 연구하기 위하여 진동대를 이용한 다수의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 모든 실험이 그러하듯이 진동대 장비의 경우에도 시험이 가능한 규모, 성능 등의 특성에 한계가 있다.

이러한 물리적 한계에 의해서 진동대 실험은 상사법칙(similitude law)에 의해 축소된 시험체를 이용하거나, 실제 구조를 단순화 하여 실험을 수행하게 되는 것이 일반적이며, 이 과정에서 실제와 동일

한 상태에서 구조물 성능을 확인할 수 있는가하는 실험의 신뢰성을 확보하는 문제가 발생한다. 콘크리트구조와 같이 재료가 균질하지 않거나 복잡한 단면 형상을 갖고 있는 경우 특히 신뢰성을 확보하기 어려운 것으로 알려져 있다¹⁾.

본 논문에서는 단일 진동대의 규모를 작게 하면서도 비교적 대형 실험체에 대한 내진실험이 가능하도록 효율적인 진동대 시스템이 구축된 부산대학교 지진방재연구센터의 대용량 지진모사 실험장치의 실험사례를 통하여 다지점 진동대의 이용한 내진실험의 활용도 및 실험방법에 대하여 논하고자 한다.

2. 국내외 대형 진동대 실험시설 현황

유압장비 개발기술의 발전으로 실제 구조물과 같은 초대형 시험체를 설치하여 가진 할 수 있는 진동대 장비의 제작 및 운영 기술이 이미 상용화 개발되었으며, 현재 다양한 지진동 연구에 활용되고 있다. 일본 Tsukuba에 위치한 National research Institute for Earth Disaster prevention (NIED), E-Defense에 설치된 초대형 진동대와 미국의 University of California, San Diego에 설치된 야의 진동대가 대표적이다. 이들은 상세한 사양에는 차이가 있으나

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 지진방재연구센터
E-mail : engineer@pusan.ac.kr

Tel : 051-510-8186, Fax : 051-510-8181

* 부산대학교 사회환경시스템공학부

Table 1 국내 진동대 시설 현황¹⁾²⁾

시설명	장비크기	자유도	시험가능중량	설치년도	제작사
한국기계연구원	4m×4m	6	30	1991	MTS Systems Corp.
현대기술연구소	5m×3m	1	10	1996	SHIMADZU (MTS* Controller)
서울시립대학교	3m×3m	1	10	1997	MTS Systems Corp.
한양대학교	3m×3m	1	10	2003	MTS Systems Corp.
부산대학교	5m×5m	3	30	2009	MTS Systems Corp.
	5m×5m	3	60		
	4m×4m	6	30		

각각 최대 20m×15m, 7.6m×12.2m의 실험 가능 면적을 제공하며, 1,200톤, 2,000톤 시험체에 대한 내진실험이 가능하다²⁾.

국내에 기 구축된 진동대 실험시설을 살펴보면, 한국기계연구원³⁾, 현대건설(주) 기술개발원, 서울시립대학교, 한양대학교, 부산대학교 등에서 10톤 이상의 하중체가 설치 가능한 진동대를 보유하고 있으며(Table 1 참조), 이중 부산대학교 지진방재연구센터(이하 SESTEC)에서 국내 최대 규모의 진동대 장비를 보유하고 있다. 이 장비는 최대 5m×5m 공간에 60톤 실험체를 설치하여 최대 가속도 9.8m/s²의 내진실험이 가능하다. 이러한 진동대의 사양은 다양한 내진 및 진동 시험을 수행할 수 있으나 국외 구축 사례와 같은 실물 건설구조물 모형에 대한 시험을 수행할 수 있을 정도로 충분한 것은 아니다.

국내에서 수행된 최대 중량체의 진동대 실험은 고려대학교 이한선 교수팀에서 1/15 scale의 25층 콘크리트 공동주택 건물에 대한 진동대 실험을 수행

한 것이 대표적인 사례이다⁴⁾. 약 40 톤의 철근콘크리트 하중체를 왜곡된 축소상사법칙을 적용하여 제작한 것으로 시험체(Figure 1 참조)의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 2.2m, 2.2m, 5.6m이다. SESTEC의 최대 시험가능 면적(5m×5m)을 고려하면 시험 가능한 면적의 절반 수준이며, 시험 가능 최대 높이(15m)에 비하면 낮은 높이 이나 상사비를 고려한 축소모델의 제한사항과 진동대의 가속도기준 가진 성능 및 overturning moment 등을 고려하면 최대 중량의 시험체가 설치된 예이다.

국내에서도 미국과 일본에 구축된 것과 같은 초대형 진동대를 설치하여 실제 규모의 구조물에 대한 실험을 수행함으로써 앞서 논한 상사비 문제 등을 해결하면서 실험이 가능하겠으나, 이러한 시설은 설치 가격이 4억 달러(NIED, 2003년 설치 예산안 기준)에 달하고 지속적인 장비 운영 및 관리에도 많은 비용이 소요된다. 그러므로 장비를 지속적으로 활용하기 위해서는 대규모의 연구비 지원이 필요하며, 또한 장비의 관리를 위한 실험기관의 상시 지원도 필요하다. 지진에 의한 피해가 심각한 일본, 미국, 유럽 등지에서는 국가 정책적으로 또는 민간 연구측면에서 이러한 연구비용의 지원이 적극적일 수 있으나 국내 지진 및 진동관련 연구 분야에서는 관련 연구지원이 상대적으로 부족하고 실험적 연구 활성화도 낮은 실정으로 대형 진동대의 설치가 비효율적인 것으로 생각되고 있다.

3. 다지점 가진 진동대 시스템

SESTEC의 진동대 실험장비는 진동대의 크기에 대한 문제를 해결하기 위하여 설치된 3기의 진동대를 동시에 가진 할 수 있는 다지점 가진 개념이 설계에 반영되어있다. 이러한 점은 교량과 같이 길이가 긴 구조물을 대상으로 기존 진동대를 활용해 실



Figure 1 25층 공동주택 내진실험

Table 2 다지점 가진 진동대 사양⁵⁾

Items	Table A	Table B	Table C
Table Size (m)	5m×5m	5m×3m	5m×3m
Type	Moveable	Moveable	Fixed
DOF	3	3	6
Max. payload (ton)	30	60	30
Overturning moment (kN-m)	2,000	2,000	1,200
Max. acc. (g)	1.00	1.25	1.50
Max. stroke (mm)	±300	±300	±300
Operating frequency (Hz)	0.1 ~ 60	0.1 ~ 60	0.1 ~ 60

협할 수 없었던 실물 크기의 교량에 대한 실험이 가능하도록 한 것이다. 즉, 평소에는 3기의 진동대를 각각 활용하면서 대규모의 실험이 필요한 경우 3기의 진동대를 동시에 사용할 수 있도록 하여 국내 연구 환경 및 실정에 맞는 진동대 사용 환경을 제공하고자 한 것이다. 그러므로 장비의 활용도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 관리 비용을 최소화 할 수 있는 장점을 갖고 있다.

4. 진동대 실험 사례

SESTEC에서 보유한 3기의 진동대를 모두 활용한 대표적 진동대 실험 사례는 국내 6개 대학팀에서 공동 연구한 사장교 모형의 진동대 실험(Figure 2 참조)이다⁶⁾. 길이 28m, 높이 10.2m 인 강재 2경간 사장교 모형에 대한 실험으로, 주탑 및 교각이 3기의 진동대에 나누어 설치되어 동일 지반 가진 및 다지점 가진에 의한 사장교 거동을 평가한 실험사례이다. 사장교 형식의 특성상 대부분의 수직하중을 부담하는 주탑을 payload가 큰 Table B에 위치 시켜 초대형 진동대에서도 수행하기 어려운 28m의 교량 모형에 대한 내진시험을 수행한 것이다. SESTEC의 진동대 중 3자유도 2기는 각각 4m 간격으로 이동하여 설치하는 것이 가능하여 다양한 지간을 갖는 구조물의 실험에 적용될 수 있다.

이외에도 2기의 진동대를 활용한 사례는 부산대학교 정진환 교수팀에 의해서 Figure. 3에서와 같은 3경간 거더교를 2기의 3자유도 진동대 위에 설치하고 동시 가진하여 교량의 신축이음부에서 발생하는 충격을 모사한 실험이 수행된 바 있으며, Figure. 4

에서와 같이 비구조요소인 원자력발전소 배관계통에 대한 진동대 실험을 3자유도 및 6자유도 진동대에 분산 설치하여 가진 한 사례도 있다⁷⁾. 원전 배관계통의 진동대 실험은 배관이 설치된 지점을 고려하여 가진력을 각기 달리한 다지점 가진 실험이 수행되었다.

상기 제시한 사례들과 같이 비교적 대형의 실험체를 2기 또는 3기의 대형 진동대에 분산하여 설치한 후 가진하는 방법은 각 진동대가 1기의 대형 진동대에서 실험되는 것과 같이 동일한 운동을 재현할 수 있어야 그 활용도가 크다. 본 논문에서는 각 실험에서 계측된 진동대의 가속도 및 변위 피드백으로



Figure 2 2 spans cable-stayed bridge test



Figure 3 3 spans girder bridge test



Figure 4 Nuclear piping system test

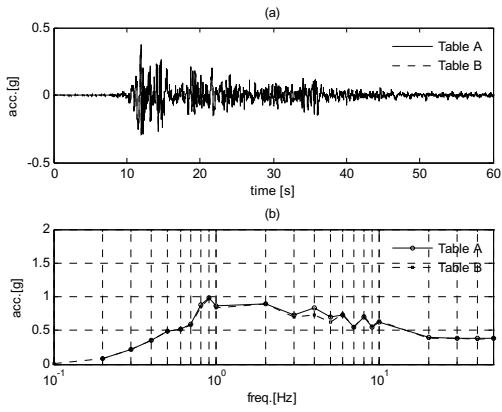


Figure 5 3 spans girder bridge accelerations and response spectrum(5% damping)

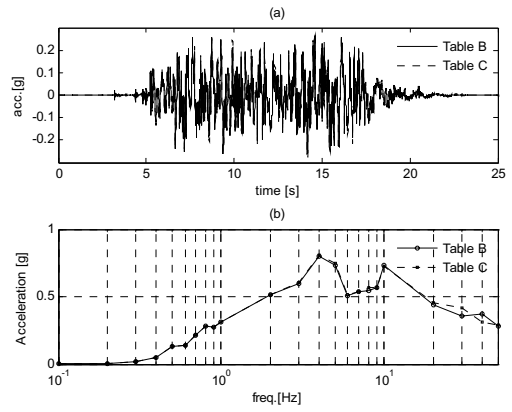


Figure 8 Nuclear piping system accelerations and response spectrum(5% damping)

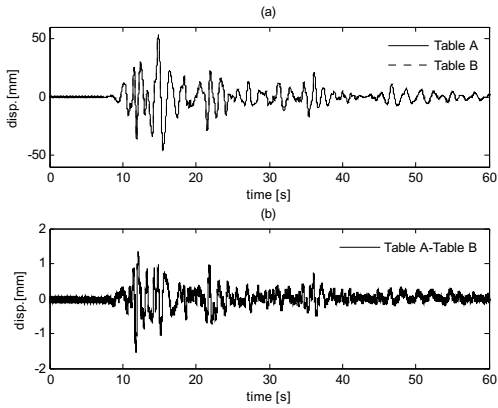


Figure 6 3 spans girder bridge displacement comparison

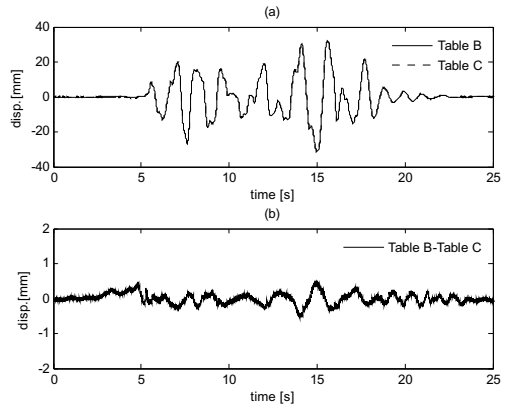


Figure 9 Nuclear piping system displacement comparison

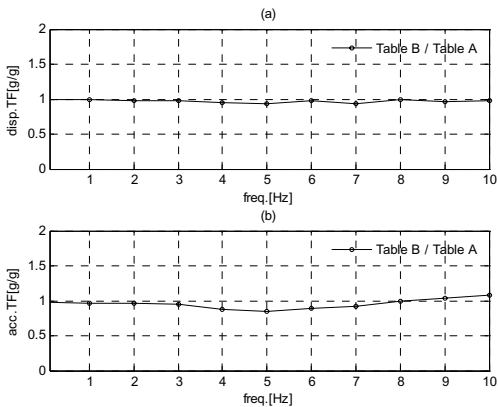


Figure 7 3 spans girder bridge acceleration feedbacks transfer function

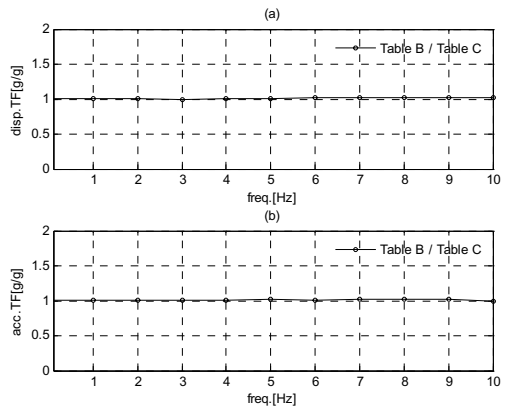


Figure 10 Nuclear piping system acceleration feedbacks transfer function

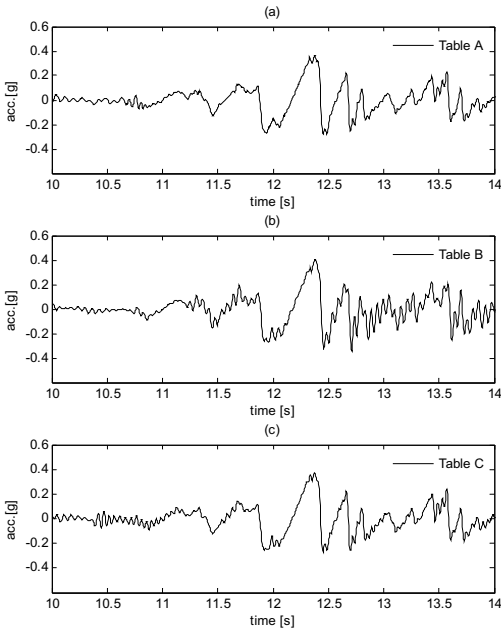


Figure 11 Cable-stayed bridge acceleration feedbacks

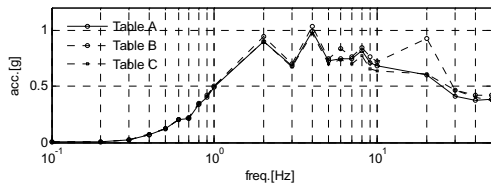


Figure 12 Cable-stayed bridge acceleration response spectrum

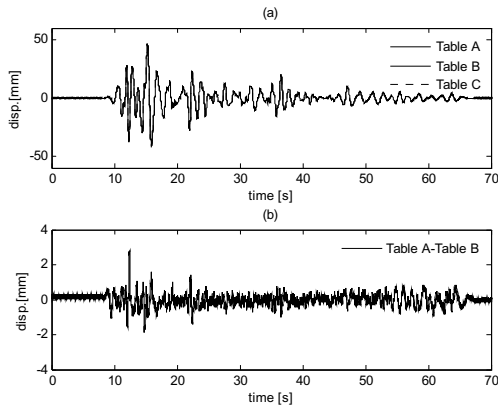


Figure 13 Cable-stayed bridge displacement feedbacks comparison

부터 2기 또는 3기 진동대 운동의 재현성 및 응답 특성을 분석하였다. Figure 5는 3경간 거더교 실

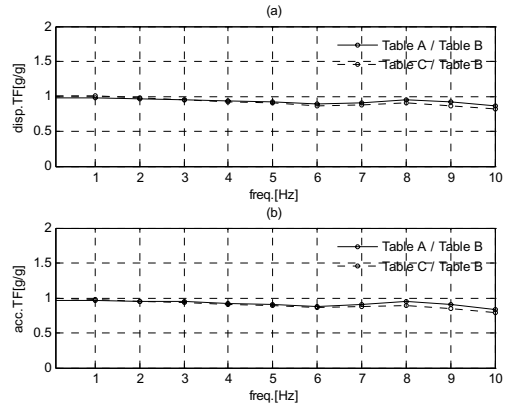


Figure 14 Cable-stayed bridge acceleration feedbacks transfer function

험의 3자유도 진동대 2기에서 측정된 가속도 피드백 및 가속도 응답스펙트럼을 도시한 것이다. 전체 주파수 영역에서 두 진동대의 운동이 유사함을 알 수 있으며 특히, 구조물에 영향을 줄 수 있는 변위 성분이 탁월한 3Hz 이하의 저주파수 영역에서는 발생하는 오차가 2% 이하로, 동일한 운동을 한 것으로 판단할 수 있다. 이는 Figure 2의 변위 피드백 결과와 두 테이블의 가속도 신호를 이용한 전달함수 산정결과에서도 확인할 수 있다. 전달함수는 다음의 식에 의해 산정하였다.

$$TF_{xy}(f) = P_{yx}(f) / P_{xx}(f) \quad (1)$$

여기서, f 는 가진 주파수이고, TF_{xy} 는 기준 진동대 신호(x) 및 그 비교 대상 진동대 신호(y)의 전달함수이다. P_{yx} 는 두 신호의 CSD(Cross Spectral Density function)함수, P_{xx} 는 기준 진동대 신호의 PSD(Power Spectral Density function)함수이다.

동일한 방법으로 원전배관의 진동대 실험의 결과에서도 2기의 진동대가 유사한 수준으로 제어, 가진 된 것을 확인할 수 있다. 수직축으로 가진한 6자유도 진동대를 이용하였으나 원전배관계통의 실험체 무게가 사용된 진동대 전체 용량의 1%(payload 기준) 정도의 수준으로 가볍기 때문에 3경간 거더교의 실험보다 오차가 작게 나타났다. Figure 9 (b)에 나타난 것과 같이 변위 피드백 기준으로 보면, 두 진동대에서 발생한 변위차가 1mm 이하로 제어된 것을 확인할 수 있다.

3경간 거더교 및 원전배관계통의 실험은 실험체의 질량이 5 ton 미만으로 구조물의 거동에 따른 진동대 제어 간섭 영향이 크지 않았으나 2경간 사장교 모형의 실험에서는 실험체의 질량이 상대적으로 크고 대부분의 하중이 중앙의 주탑에 집중되어 작용하게 되므로 진동대와 상부에 설치된 구조물의 상호작용으로 인하여 진동대의 제어가 원활하지 않을 수 있다⁸⁾. Figure 11의 (a), (b), (c)는 각각 사장교 모형이 설치된 Table A, B, C의 진동대 가속도 피드백 신호를 나타낸 것으로 Table A 및 C와 비교하여 주탑이 위치한 Table B(Figure 2 참조)의 응답이 상이하게 나타났으며, 동일한 신호의 응답스펙트럼(Figure 12 참조)으로부터 20 Hz 부근에서 제어가 어려웠던 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 구조물의 상호작용에도 불구하고 지진과의 주요한 성분인 10 Hz 미만의 구간에서 각 진동대 간의 제어된 운동의 차이는 크지 않았다(Figure 13, 14 참조).

진동대와 실험모형 간의 상호작용에 의한 영향으로 분산된 2기 또는 3기의 진동대에서 완전하게 동일한 운동을 재현하기는 어려우나 SESTEC의 다지점 진동대 시스템을 이용하여 국외의 초대형 진동대 크기 수준의 실험이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 지점 조건 구성방법에 따라 앞서 제시한 교량 및 배관구조물 뿐만 아니라 다양한 분야의 진동문제에 활용이 가능할 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 부산대학교 지진방재연구센터에서 보유한 진동대의 사양과 실험사례를 통하여 다지점 가진 진동대를 이용한 구조물 내진실험 적용방법을 제시하고 그 활용도를 분석하였다.

설치된 다지점 진동대는 미국과 일본의 초대형 진동대와 같이 중량의 단일 하중체에 대한 지진동 실험은 불가능하나 교량구조물과 같이 하중이 분산된 구조에 대해서는 보다 효과적으로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 국내의 내진 및 진동실험 및 연구환경의 특성상 이러한 점은 개별 장비 운영에 의한 전체 시스템의 활용도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 장비관리 비용을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 지점 조건의 구성방법에 따라서는 다양한 분야의 진동문제에도 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 국가과학기술연구망(KREONET)으로 연동되는 부산대학교 지진방재연구센터 공개 자료를 바탕으로 작성되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, H. S., Jung D. W., Lee, K. B., Kim, H. C., Lee, Y. H., Lee, K. H., Survey of Experimental Research Performed using Shaking Table Tests for Buildings in Korea, Proceedings of the Korea Concrete Institute Annual Autumn Conference, 2008.
- (2) Korea Institute of Construction and Transportation, Multi-platform Large Shaking Table System Facility, Final Report, 2009.
- (3) Lee, H. S., 6 Degrees of Freedom Shaking Table-Specifications and Usages, the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 1, No. 1, pp. 7~19.
- (4) Lee, H. S., Choi, S. H., Lee, K. B., Hwang K. R., Kim, Y. H., Earthquake Simulation Tests on a 1:15 Scale 25-Story RC Flat plate Building Model, Proceedings of the Earthquake Engineering Society Korea Annual Spring Conference, 2012.
- (5) Cheung, J. H., Kim, N. S., Kim I. T., Choi, H. S., Park C. Y., KOCED Seismic Simulation Test Center, Journal of Civil Engineering, Vol.57, No.8, pp.43.49, 2009.
- (6) Gong, Y. I., Park, Y. M., Choi, H. S., Cheung, J. H., Dynamic Test of Cable-stayed Bridge using Multi-support Excitation Shaking Table, 15th Asian Pacific Vibration Conference, 2013.
- (7) Cheung, J. H., Gui, M. S., Seo, Y. D., Choi, H. S., Kim, M. K., Seismic Capacity Test of Nuclear Piping System using Multi-platform Shake Table, Journal of Earthquake Engineering Society Korea, 2013.
- (8) Thoen B. K., Laplace P. N., Offline Tuning of Shaking Tables, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004