

다목적 이축 진동시험 설비의 기술적 검토

Technical Review on the Multipurpose Biaxial Shaking Table System

안희재¹⁾ 나성원²⁾ 이충동³⁾ 김석곤⁴⁾
Ahn, Hee Jae Na, Seong Won Lee, Choong Dong Kim, Seok Kon

ABSTRACT

The design fundamentals of the shaking tables are briefly discussed. In order to understand the recent trends in development of the shaking tables, the characteristics and performances of the major seismic testing facilities are investigated. The international standards related to the vibration tests using shaking table are also overviewed. The newly designed multipurpose biaxial shaking table of Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd. is introduced. It has the capabilities to perform the vibration, shock and seismic qualification tests in two simultaneous and independent directions (vertical and horizontal directions). Since the shaking table adapts four extremely stiff torque tubes instead of much more expensive hydraulic actuators, these tubes can restrain two undesired rotational motions. Regarding the manufacturing and maintenance costs, the system is more economical since it has only two hydraulic actuators unlike others.

1. 서 론

현재, 산업 기술의 발전에 의하여 매우 복잡하고 정교한 신제품이 많이 개발되고 있으며, 이들 제품은 기술력의 발전에도 불구하고 혹독한 외부 환경에서 다기능 및 고정도를 요구하기 때문에 기존의 제품에 비하여 안전성이 크게 증가하였다고 볼 수 없다. 또한, 초대형 구조물이나 원자력 발전소 및 관련 설비 등과 같이 사고가 발생할 경우에 막대한 인명 및 재산 피해를 유발할 수 있는 구조물이나 기기 등은 지진이나 진동, 충격 등에 대한 매우 높은 신뢰도를 필요로 한다. 따라서, 제품의 신뢰도를 증가하기 위하여 컴퓨터를 이용한 공학해석이 많이 사용되고 있으나, 제품의 특성 또는 사용 조건 등에 따라서 정확한 공학 해석이 불가능하거나 비경제적인 경우가 빈번하다. 이와 같이 공학 해석이 곤란할 경우나 불충분한 경우에는, 축소 모형이나 실물을 진동대(Shaking Table, Seismic Simulator)에 올려놓고 인공 지진 또는 가상의 진동을 발생시켜서 구조 안전성 및 내구성을 검증하는 시험이 많이 사용되고 있다. 이와 같은 시험을 수행하는 진동대는 매

1. 현대중공업 마북리연구소 선임연구원
2. 현대중공업 마북리연구소 연구원
3. 현대중공업 마북리연구소 부소장
4. 현대중공업 중전기사업본부 과장

우 고가일 뿐만 아니라 복잡하여 사양 선정에서부터 설계, 제작 및 설치에까지 고도의 기술을 필요로 한다.

현대중공업에서는 신규 진동시험대의 활용도를 극대화하기 위하여, 원자력 발전소에 관련된 주요 기기, 대형 구조물 및 통신 설비 등의 내진성능검증뿐만 아니라 철도차량의 주요 부품 및 선박용 전장품 등의 진동시험과 충격 시험을 병행할 수 있는 다목적 진동시험설비를 설치 중에 있다. 본 연구에서는 다목적 수직·수평 이축 진동시험설비의 도입에 관련하여 고려해야할 주요 검토 사항 및 필요한 제반의 기술을 정리하였다.

2. 진동대의 개요

2.1 진동대의 분류

일반적으로 진동대는 유압식, 전동식 및 기계식 등과 같이 가진원의 종류 및 기구학적으로 병진운동이 가능한 축의 수에 의하여 분류를 할 수 있다. 진동시험기를 도입하는데 있어서 제일 먼저 선정해야 할 주요 사항은 시험의 대상 몇 종류에 의하여 가진 방식과 운동 가능 축을 결정하는 것이다. 가진원으로는 큰 하중 및 큰 진폭이 필요할 경우에는 서보 유압식 가진기(Servo Hydraulic Actuator)를 사용하고, 적은 진폭과 높은 주파수가 요구될 때는 전동식 가진기(Electro Magnetic Actuator)를 선택하는 것이 일반적이며, 편심 하중이나 캠 등과 같은 방식을 이용하는 기계식 진동시험 장치는 주파수 또는 진폭을 변화시키기가 곤란하므로 특정한 용도에만 국한되어 사용된다. 따라서, 비교적 낮은 주파수 범위에서 사용되고 큰 진폭과 적재 하중이 요구되는 내진시험용 진동대는 유압식 가진기를 사용하는 것이 일반적이다.

그림 1은 일반적인 1축, 2축 및 3축 진동대의 기구형상을 나타내고 있으며, 회전 운동이 가능하도록 진동대의 가진기 및 구속장치의 연결부를 설계하면 2축 시험기는 3~5 자유도 까지, 3축 시험기는 6 자유도까지 가진이 가능하다. 3축의 진동시험기가 사용 범위가 넓고 편리하지만, 가진 축 수가 많아질수록 비용이 급격히 증가하게 된다.

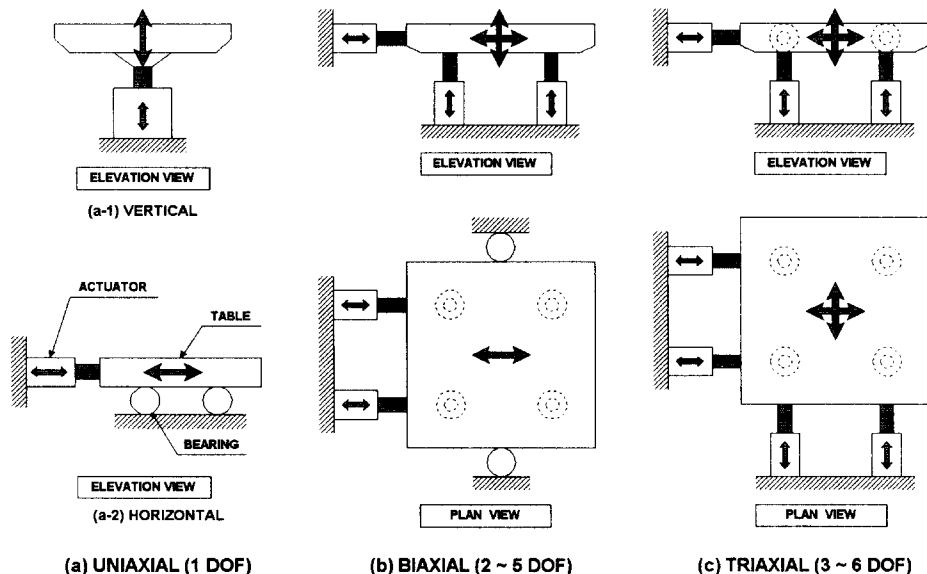
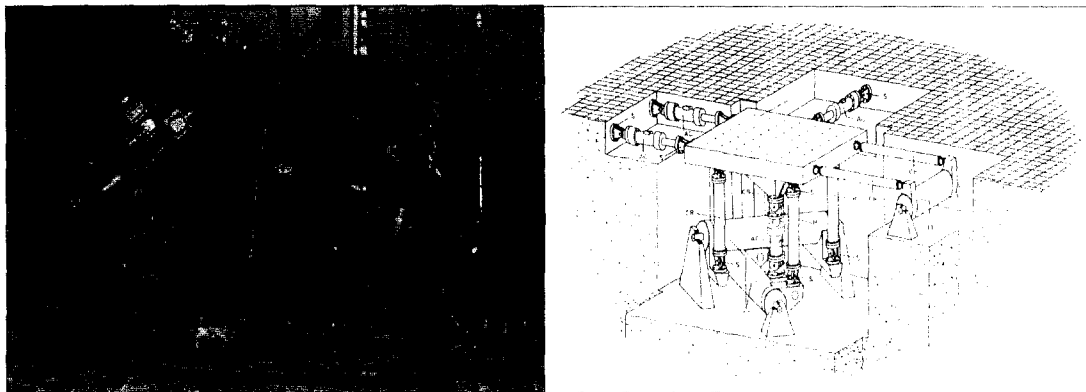


그림 1. General Kinematic Mechanism for Shaking Table

일반적으로 1축 진동대는 1개의 가진기, 2축일 경우에는 수평용 2개와 수직용 4개의 가진기, 3축일 경우에는 수평용 4개와 수직용 4개의 가진기를 사용하는데, 기존 설비의 성능을 향상시킬 때는 보다 많은 가진기를 사용할 수도 있다. 예를 들어 EERC (University of California at Berkeley)의 진동대는 수평 및 수직용으로 각각 8대의 가진기를 사용하고 있으며, USACERL (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories)의 3축 지진 및 충격 시험장치는 수평용으로 6개 및 2개의 가진기와 9개의 수직용 가진기를 사용하고 있다.

한편, 설비의 제작과 유지보수비를 절감하기 위하여 그림 2와 같이 Torque Tube와 Linkage를 사용하여 원하지 않는 방향의 회전을 구속하므로써 가진기의 수를 상당히 줄일 수 있는 새로운 구조의 진동대에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이들의 결과로 Wyle Lab. (Huntsville), ANCO Engineers, Commonwealth Edison Company와 LNEC (National Lab. for Civil Engineering, Portugal) 등에서 경제적인 진동대를 성공적으로 사용하고 있다.



(a) Shaking Table of ANCO

(b) Shaking Table of LNEC

그림 2. Triaxial Shaking Table using Torque Tubes

2.2 특성 및 성능

진동대의 특성 및 성능을 결정하는 것은 매우 중요하고 어려운 일이다. 왜냐하면, 특성과 성능을 결정하기 위해서는 현재의 필요한 시험의 범위와 향후에 발생 가능한 시험들을 고려해야 하는데, 장비의 수명을 고려한 미래의 불확실한 수요를 예측하는 것은 힘들뿐만 아니라 수요의 과다 및 과소 평가에 따라 투자비의 변화가 매우 크기 때문이다. 또한, 다른 일반적인 설비에 비하여 투자 대비 활용도가 다소 낮다고 볼 수 있으므로 활용도를 극대화할 필요가 있다. 그러나, 대부분의 진동 및 내진에 관련된 시험규격은 현존하는 시험장비의 성능을 고려하여 작성 또는 변경되므로, 현존하는 시험장비의 사양이나 변경되는 동향을 참고하는 것이 특성 및 성능 결정에 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 따라서, 각국의 진동대에 대한 성능에 대하여 조사한 결과에 의하면, 1980년대 이전은 1축 진동대가 주를 이루고, 1980년대 초에는 2축 진동대가, 1980년대 중반이후로는 대부분 3축 진동대가 많이 신설되거나 기존의 1축 또는 2축 진동대를 3축 진동대로 개선한 사례가 많았으며, 1990년대 이후에 신설되는 진동대는 보다 대형화되는 경향을 나타내고 있다. 주요한 내진 시험용 진동대의 특성 및 성능을 도표 1에 정리하였다.

도표 1. Characteristics & Performances of the Major Seismic Shaking Tables

Facility	Table Characteristics				Performance			
	Table Size (m)	Freq. Range (Hz)	Max. Payload (Ton)	Controlled Degrees of Freedom	Axis	Max. Displ. (mm)	Max. Vel. (cm/s)	Max. Accel. (g's)
KIMM (Korea)	4×4	DC~ 50	30	6 Triaxial	X,Y	±100	80	1.5
					Z	± 67	65	3.2
HDEC (Korea)	5×3	DC~ 30	30	1 Uniaxial	X	±100	50	1.0
MEC (Japan)	4×4 (11×4)	DC~ 30	40	2 Biaxial	X	±100	70	2.5
					Z	± 50	70	1.5
IHI (Japan)	4.5×4.5	DC~ 50	35	6 Triaxial	X,Y	±100	75	1.5
					V	± 67	50	1.0
Hitachi (Japan)	4×4	DC~ 30	20	6 Triaxial	X	±150	100	2.0
					Y	± 75	80	2.0
					Z	± 75	50	2.0
Ministry of Construction (Japan)	8×8	DC~ 50	300	6 Triaxial	X,Y	±600	200	2.0
					Z	±300	100	1.0
IABG (Germany)	4.1×3.2	DC~100	10	6 Triaxial	X	±125	43	1.6
					Y	±125	53	1.3
					Z	± 50	26	2.6
EPSRC (UK)	3×3	DC~100	15	6 Triaxial	X,Y,Z	± 75	60	1.0
EERC (USA)	6×6	DC~ 50	63.5	3 Triaxial	X,Y	±125	66	0.7
					Z	± 75	38	0.7
SUNY (USA)	3.6×3.6	DC~ 60	50	5 Biaxial	X	± 75	76	0.5
					Z	± 38	76	1.0
USACERL (USA)	3.6×3.6	DC~100	55	6 Triaxial	X	± 70	76	1.0
					Y	±150	76	2.0
					Z	± 35	76	2.0

3. 관련 시험 규격

지진에 대한 시험 규격은 설치 장소의 지진 특성과 위치에 따른 층반응 스펙트럼에 의하여 지진의 강도가 다르기 때문에 시험 방법과 순서에 대해서만 정의되어 있으며, 원자력 발전소의 주요 장치에 대한 내진성능검증을 규정한 「IEEE 344」와 지진 관련 시험규격을 도표 2에 정리하였다. 진동 및 충격에 대한 시험 규격은 제품의 특성 및 용도에 따라 많은 국제 규격이 있으며, 내진 시험 규격에 비하여 시험 방법 및 조건을 명확하게 정의하고 있다. 또한, 내진 시험과 비슷한 시험 조건을 요구하는 철도차량 부품, 전기 견인장치 및 전기 제품 등의 진동과 충격 시험에 대한 국제 규격을 도표 2에서 정리하였다. 진동시험에 관련한 규격은 가진 주파수를 변화시켜 제품의 공진 유무를 조사하고 공진 주파수를 파악하는 공진시험, 진동을 받는 상태에서 제품의 사용성을 검증하는 진동기능시험, 공진 주파수로 일정한 시간을 가진하는 내구성을 검증하는 진동내구성시험 등을 수행하도록 규정하고 있으며, 충격시험 규격은 Half Sine Wave와 같은 특정한 충격하중을 정해진 횟수만큼 제품에 가하여 제품의 충격에 대한 내구성을 검증하도록 규정하고 있다. 그림 3은 진동 및 충격 시험에 관련된 각 규격에서 요구하는 시험 조건을 나타낸 것이다.

도표 2. International Standards for Earthquake, Vibration & Shock Verification Test

Category	Code	Subject
Seismic Test	IEEE 344	Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations
	IEC 68-3	Seismic test methods for equipments
	BELLCORE STD GR-63-CORE	Network Equipment-Building System (NEBS) Requirements: Physical Protection
Vibration Test	JIS E 4031	Railway rolling stock parts - Test methods for vibration
	KS B 8144	Test Methods for Vibration of Parts of Railway Rolling Stock
	MIL-STD-167-1	Mechanical Vibration of Shipboard Equipment
	IEC 77 Ch. IV	Rules for electric traction equipment- Test
	IEC 68-2	Basic environmental testing procedures
Shock Test	JIS E 4032	Railway rolling stock parts - Test methods for shock
	KS B 8146	Test Methods for Shock of Parts of Railway Rolling Stock
	IEC 77 Ch. IV	Rules for electric traction equipment- Test

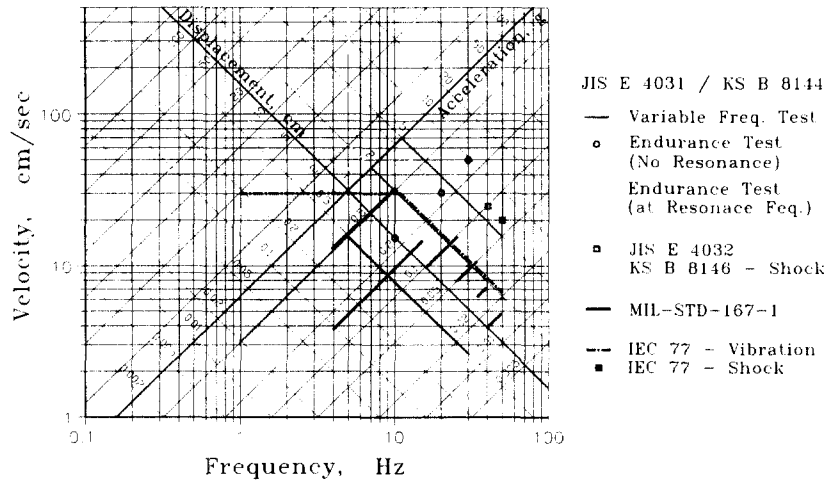


그림 3. Test Conditions for Vibration & Shock

4. HHI 2축 진동대

4.1 사양 및 특징

현대중공업(HHI)에서는 신설하는 진동대의 활용도를 최대한 높이기 위하여, HHI에서 생산하는 제품에 대한 내진 시험뿐만 아니라 그림 3에 나타난 진동 및 충격 시험을 충분히 수행할 수 있도록 사양을 결정하였으며, 도표 3에 주요한 사양을 정리하였다. 수직 방향과 2개의 수평 방향으로 각각 독립적인 시험을 요구하는 대부분의 진동시험 규격을 만족시키고, 지진의 특성을 충분히 고려할 수 있도록 동시에 수직 및 수평 방향을 시험할 수 있는 2축 진동대로 결정하였다. 그리고, HHI에서 제작하고 내진성능검증을 필요로 하는 제품은 대부분 3Hz 이상의 진동특성을 갖기 때문에, 경제성을 고려하여 최대 변위를 일반적인 내진 시험용 진동대에 비해 다소 작게 선정하였다.

신설 진동대는 그림 4에 나타낸 것과 같이 4개의 Torque Tube와 8개의 수직용 Link를 사용하여 2방향의 회전 운동(Pitching & Rolling)을 구속하고 2개의 수평 Link를 사용하여 원하지 않는 수평 및 회전 운동 (Sway & Yawing)을 구속하는 Torque Tube 방식이다. 그리고 중력 영향에 의한 수직 가진기의 불균형 하중이 최소가 되도록, 테이블 하부에 테이블 및 시험체의 중량을 시탱하는 4개의 Airbag을 설치하였다. 이와 같은 방식은 높은 비틀림 강성을 갖는 Torque Tube를 이용하여 각각 1개의 수직 및 수평용 가진기로 충분히 동시에 수직 및 수평 2축 진동시험이 가능하므로, 투자비가 매우 낮을 뿐만 아니라 시스템이 단순화되어 가진기의 고장 확률이 낮고 유지 보수가 용이한 장점이 있다. 또한, 두개의 수평용 Link 대신에 가진기를 추가하면, 3축 4자유도의 진동대가 되므로, 필요할 경우에는 3축 진동대로 쉽게 확장할 수 있도록 설계하였다. 그러나 다수의 가진기를 사용하여 능동적으로 제어하는 것에 비하여, 하나의 대용량 가진기로 운동을 제어하기 때문에 시험 정도가 다소 낮아질 수 있는 단점이 있다.

도표 3. Specification

Table Size	4m × 4m	
Freq. Range	DC~ 100Hz @ <1 Ton DC~ 50Hz @ 8 Ton DC~ 33Hz @ 16 Ton	
Max. Payload	16 Ton	
DOF	Biaxial 2 DOF	
Max. Displace.	X	± 75 mm
	Y	± 50 mm
Peak Accel.	X	7.5 g @ 1 Ton
		4.0 g @ 8 Ton
		2.0 g @ 16 Ton
	Y	6.0 g @ 1 Ton
		3.5 g @ 8 Ton
		2.4 g @ 16 Ton
Peak Velocity	X	75 cm/sec
	Y	

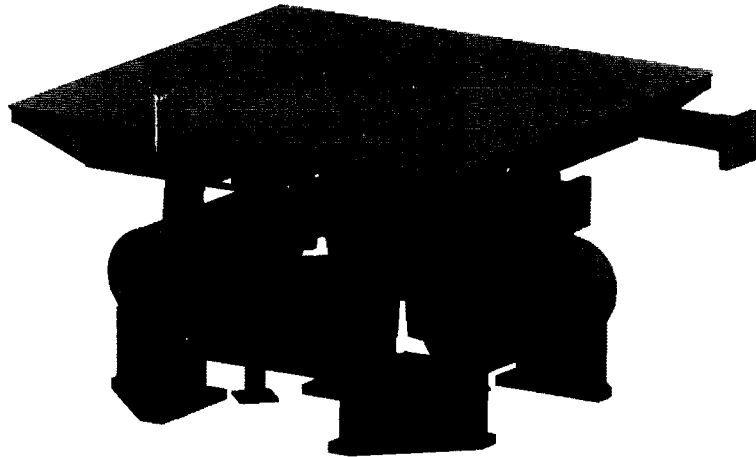


그림 4. Configuration of HHI Shaking Table

4.2 주요 구성요소

4.2.1 테이블 (Table)

가진기로부터 제어기에 의하여 설정된 운동을 시험 대상물에 전달하는 기능을 하는 테이블은 대형 진동대에서 매우 복잡하고 중요한 것 중의 하나이다. 진동대에서 테이블과 시험편이 동시에 진동하므로 최대 적재 하중뿐만 아니라 테이블의 질량이 가진기의 용량과 진동대의 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에 테이블의 질량이 최소가 되는 것이 바람직하다. 그러나 테이블의 강성이 적어서 테이블의 고유 진동수가 진동대의 사용 주파수 범위 내에 있거나 근접해 있을 경우에는 공진의 영향에 의하여 시험의 정도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 경제적인 진동대를 위해서는 고 비용 또는 고 중량의 테이블이 되지 않도록 강성, 강도 및 고유진동수 등을 고려한 최적설계가 반드시 필요하다. 기존 진동대의 테이블은 대부분 경량 설계를 위하여 철판을 용접한 구조 외에도 알루미늄 벌집 구조, 또는 프리스트레스드 철근 콘크리트 등을 사용하고 있으며, 마그네슘 합금강을 사용하는 경우도 가끔 있다.

본 설비에 사용된 테이블은 상하의 철판사이에 구형강의 트러스를 용접하고 강성과 감쇄를 증가시키기 위하여 알루미늄 상판을 상부 철판에 볼트로 조립하였으며, 유한요소 해석을 통하여 테이블의 고유진동수가 150 Hz 이상이 되도록 상하의 철판과 트러스의 단면을 최적화 하였다.

4.2.2 기초 (Foundation)

진동대의 운동에 의한 반력을 주변의 지반으로 전달하는 기초는 그림 5에 나타난 것과 같이 부유식 기초 (Floating or Isolated Foundation) 또는 고정식 기초 (Fixed or Solid Foundation)가 사용된다. 부유식 기초를 사용할 경우에는 기초의 고유진동수 근처인 0.5 ~ 1.5 Hz에서 지반으로 전달되는 진동이 증폭되어 기초가 심하게 진동할 수 있다. 부유식 기초는 대략적으로 5 Hz 이상의 진동에서는 탁월하게 우수한 반면에 설치 및 유지관리 비용이 상당히 높은 단점이 있기 때문에, 일반적으로 초대형 진동대에 사용된다.

고정식 기초의 경우는 기초의 중량과 지반 계수에 의하여 결정되는 기초의 고유진동수를 상당히 높게 하고, 지반과의 접촉면을 넓게 하여 감쇄를 증가시키므로, 대부분의 주파수 범위에서 지반으로 전달되는 진동의 반력이 부유식에 비하여 다소 높을 수는 있으나 크게 증폭되지는 않는다. 일반적으로 고정식 기초는 부유식 기초에 비하여 설치 비용이 저렴하므로 많이 사용되고 있으며, 기초의 중량은 진동하는 시험편 및 테이블 중량의 50 ~ 100배 정도가 되도록 설계한다. 본 설비에서는 이동 중량의 60배 정도인 1000톤 (10m×10m×5m)의 고정식 철근콘크리트 기초를 사용하였다.

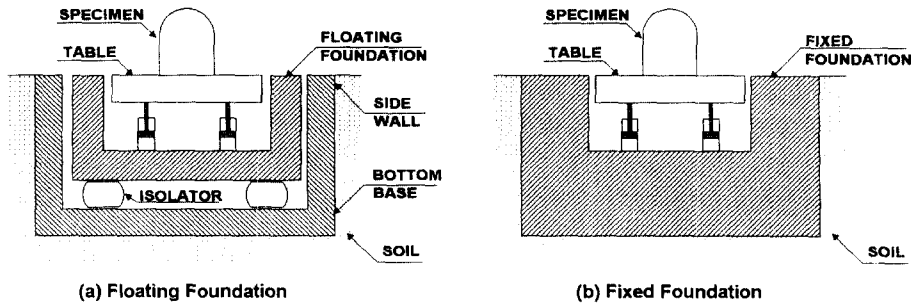


그림 5. Foundations of Shaking Table

4.3 유압장치

4.3.1 유압식 가진기 (Servo-Hydraulic Actuator)

진동대에 사용되는 유압식 가진기는 양 방향으로 작동하므로 Double Rod Cylinder가 사용되며, 가진기의 용량을 선정하는데 가장 기본이 되는 것은 공급되는 유압과 피스톤의 유효 단면적으로 결정되는 가진력이다. 이에 못지 않게 중요한 인자는 식 1로 계산되는 Oil Column Resonance에 의한 가진기의 고유 진동수이며, 실제의 유압식 가진기에서는 실린더 양단의 압력차를 측정하여 제어기에서 능동적으로 심한 압력변동을 보상하므로 Oil Column Resonance 주파수 보다 다소 높은 범위까지 사용이 가능하다. 식 1에서 알 수 있듯이 가진기의 고유진동수는 Stroke가 커질수록 낮아지므로, Long Stroke 및 고주파수용 가진기의 경우에는 소요 가진력 보다는 공진 주파수에 의하여 가진기의 용량이 결정된다. 또한, 가진기의 용량과 속도가 서보 밸브 및 유압공급 장치의 용량을 결정하여, 전체 설비의 투자비에 직접적인 영향을 주므로 가진기의 용량 선정에 상당한 주의

가 필요하다. 진동대에는 대용량의 동적 유압식 가진기를 사용하므로, 서보 밸브는 대용량 및 고주파용인 3-Stage Servo Valve가 대체적으로 사용되고 있다. 서보 밸브의 고유 진동수는 진동대의 최대 진동수의 3배 정도가 되는 것이 바람직하며, 본 설비와 같이 대형 유압식 가진기에 적합한 서보 밸브가 없을 경우에는 2개의 밸브를 사용할 수 있다.

$$\omega_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \times \beta \times A_e^2}{V \times M}} \quad [Hz] \quad \text{----- (1)}$$

- where, β = Bulk Modulus of the Oil
 A_e = Effective Area of the Cylinder
 M = Moving Mass
 V = Trapped Total Oil Volume
 = $A_e \times S/2 + V'$
 S = Stroke of the Cylinder
 V' = Trapped Oil Volume in Pipeline per Cylinder Side

4.3.2 유압공급 장치

전 유압계에 압력을 공급하는 동력원인 유압공급 장치는 유압 펌프, 전동기, 유압 탱크 및 냉각기 등으로 구성되어 있다. 가진기의 유압은 3000 psi (210 kgf/cm²)가 가장 많이 사용되고, 경우에 따라 4000 psi 또는 5000 psi의 초고압이 사용되므로, 유압 펌프는 주로 기어 펌프, 배인 펌프, 나사 펌프 및 플린저 펌프 등의 용적형 펌프가 사용된다. 서보 밸브와 유압 공급장치의 용량은 가진기가 최대 속도를 발휘하는데 필요한 유량에 의하여 결정되는데, 내진 시험과 같이 최대 속도가 지속적으로 유지되지 않고 순간적으로 작용할 경우에는 축압기 (Accumulator)를 사용하는 것이 경제적이다. 축압기는 이와 같은 압력 에너지의 축적 이외에도 펌프에서 발생하는 맥동과 밸브의 개폐에 의한 수격 등의 충격압을 완화하는 기능을 한다. 본 설비는 30 in/sec의 속도를 얻기 위하여 280 GPM의 펌프와 270 Gallon의 축압기를 사용하였으며, 유압 시스템의 구성도를 그림 6에 나타내었다.

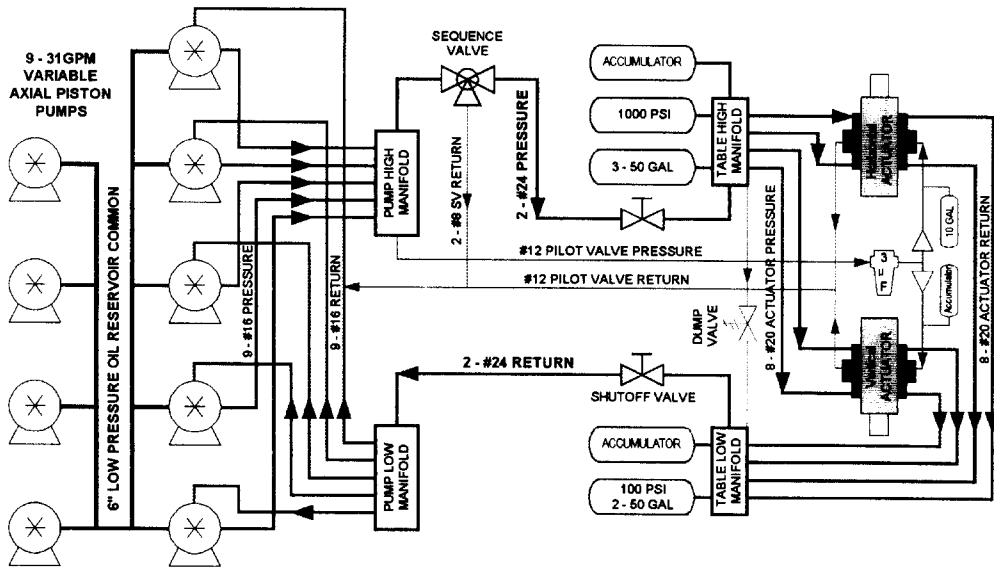


그림 6. Schematic of Hydraulic Power System for HHI Shaking Table

4.4 제어 및 계측

일반적인 진동대의 제어는 시험의 종류에 따라 필요한 가진 파형으로 테이블이 운동하도록 Servo Controller를 제어하는 Outer Servo Loop와 제어기에서 발생된 구동 신호에 따라 가진기가 운동하도록 서보 밸브를 제어하는 Inner Servo Loop로 구성된다. Outer Servo Loop는 Random, Sine, Classical Shock, Transient, Shock Response Spectrum, Sine-on-Random, Random-on-Random 등과 같은 필요한 가진 파형을 발생하여 가진기의 구동 신호를 Servo Controller에 전달하고, Table의 운동을 측정하여 의도한 파형과 Table의 실제 운동 파형과의 차이를 보상함으로써 원하는 시험이 될 수 있도록 제어하는 장치이다. Inner Servo Loop는 가진기에 설치된 변위 (LVDT) 및 압력차 (ΔP) 측정 장치를 통하여 가진기의 운동 및 상태를 파악하여 Outer Servo Loop에서 발생된 구동 신호와 일치하도록 Analog 방식으로 서보 밸브와 가진기를 제어하는 Close Loop System이다. 본 설비의 제어 장치는 그림 7에 나타낸 것과 같이 Data Physics 사의 Controller를 사용하였으며, 가진기 제작사인 Gardner System 사의 Servo Controller를 사용하였다. 또한, 20 채널의 Data Physics 사의 계측 장치를 사용하고 있어서 다소 부족할 수 있다고 판단되지만, 향후에 쉽게 증설할 수 있으므로 본 설비를 어느 정도 운영한 이후에 증설 규모를 결정할 계획이다.

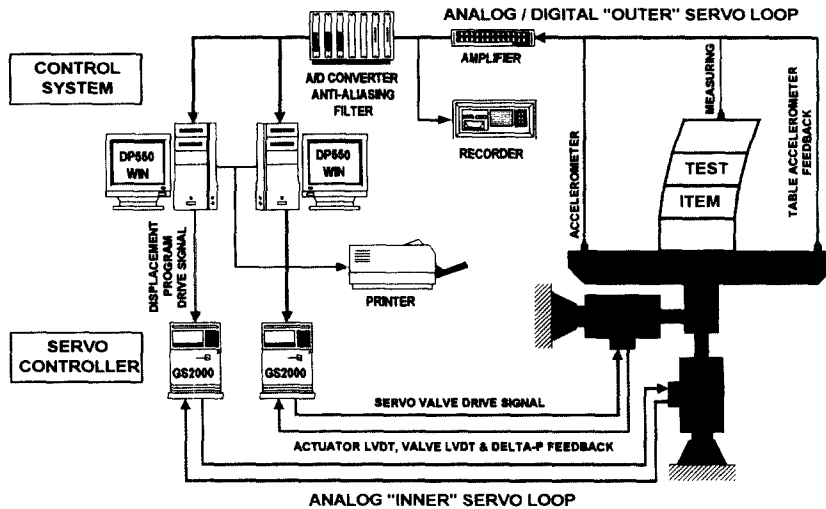


그림 7. Schematic of Control & Measuring System for HHI Shaking Table

5. 결 론

진동대 설비에 대한 최근의 추세 및 진동, 충격 및 내진 관련 시험 규격을 조사하고, 진동대 설계에 필요한 기본적인 기술을 정리한 결과를 토대로 HHI에 신설하는 다목적 2축 진동설비의 구성과 사양을 검토하였다. 그 결과, 고가인 유압식 가진기의 수를 대폭 줄이고, 축압기의 용량을 크게 함으로써 초기 투자비를 매우 절감하였으며, 유지관리 비용이 저렴하고 내진 시험뿐만 아니라 진동 및 충격 시험 등 활용 범위가 다양한 다목적 수직·수평 2축 진동 시험설비를 구축할 수 있었다. 본 설비의 설치가 완료되면 일부 우려하고 있는 시험 정도에 대한 심도 있는 조사뿐만 아니라 시험 정도를 보다 향상시키는 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. ANCO Engineers, Inc. (1998), "Operation of the Anco R-020 Independent Biaxial Shake Table," User's Guide.
2. F. T. Emilio, R. T. Duarte, F. J. Carvalhal (1986), "A NEW TYPE OF THREE-DEGREES-OF-FREEDOM SHAKING TABLE," Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering, pp. 7.1/9~7.1/16.
3. M. Kunieda, Y. Ochi, K. Ando, S. Shimosaka (1985), "IHI Earthquake-Proof Engineering Laboratory," IHI Engineering Review, Vol. 18 No. 2, pp. 69~75.
4. M.T.S. Systems Corporation (1980), "Simulating Earthquakes With An MTS Seismic System," pp. 1~11.
5. A.M. Reinhorn, S. P. Prawel (1983), "Design of a Composite Shaking Table for Earthquake Simulation," Proceedings of the 8th Conference on Electronic Computation, pp. 725~736.
6. A. Schmidt (1983), "CONTROL OF MULTI-AXIS VIBRATION SYSTEMS," Proceeding of workshop on spacecraft vibration testing, pp. 75~89.
7. C. M. Harris (1988), "SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK," McGRAW-HILL.
8. 손병진, 염명순, 박영조 (1983), "유압공학," 탑출판사.
9. IEEE Std 344-1987, "IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
10. MIL-STD-167-1 (1969), "MECHANICAL VIBRATION OF SHIPBOARD EQUIPMENT (TYPE I - ENVIRONMENTAL AND TYPE II - INTERNALLY EXCITED)," MILITARY STANDARD, U. S. A. Department of Defense.
11. JIS E 4031 (1994), "鐵道車輛部品 - 振動試驗方法," 日本規格協會.
12. JIS E 4032 (1994), "鐵道車輛部品 - 衝擊試驗方法," 日本規格協會.
13. IEC 68-3-3 (1991), "Environmental testing Part 3: Guidance Seismic test methods for equipments," International Electrotechnical Commission.
14. IEC 68-2 (1982), "Basic environmental testing procedures," International Electrotechnical Commission.