

# 6자유도 진동대 - 특성 및 활용방안

이 호 섭

〈해사기술연구소 구조연구부장〉

## 1. 서 언

한국기계연구소 부설해사기술연구소는 최대 30톤까지의 시험체에 대한 각종 진동시험이 가능한 6자유도 대형진동대를 보유하게 됨으로써, 기존의 대구조물 시험설비와 함께 국제적인 수준의 종합적인 구조 진동시험능력을 갖추게 되었다.

미국 MTS Systems Corporation으로부터 도입된 이 진동대 시스템은 표 1에 정리된 바와 같이 지금까지 미국, 일본을 비롯한 세계 각국에 약 30여기의 각종 진동대 시스템을 설치한 경험과 기술을 바탕으로 설계되었으며 고도의 유압시스템 및 아나로그, 디지털 제어기법을 종합하고 있다.

본 6자유도 진동대는 조화파형, 랜덤파형 및 각종 지진파와 실제 계측된 진동파형등 임의의 파형을 재생, 구현할 수 있으며 시험체의 진동응답을 동시에 계측하고 기록함으로써, 시험체가 놓여지는 환경과 동일한 상황에서의 특성을 예측, 분석할 수 있다.

6자유도 진동대는 그림1과 같이 기계, 건축, 토목, 선박, 해양구조물등에 대한 진동시험 및 전자, 전기기기, 특히 원자력 발전소에 이용되는 각종 기기의 내진검증등 각종 분야에 광범위하게 활용될 수 있다.

## 2. 진동대 시스템개요

### 2.1 제원 및 성능

진동시스템은 표 2에서 보는 바와 같이 최대 30톤의 시험체를 4m×4m크기의 진동대에 부착한 후, 최대 1.5g까지의 가속도를 받도록 가진할 수 있으며, 가진과 동시에 56개의 진동신호를 계측.기록할 수 있다. 이중 32개는 내장된 증폭기를 이용하는 스트레인게이지형 신호변환기용이며 24개는 기타 외부의 증폭기를 이용하게 되는 신호변환기용이다.

이 시스템은 6자유도 제어능력을 갖추므로써 공간상에서 움직이는 시험체의 모든 운동을 구현할 수

표 2 Principal performances of KRISO 6DOF seismic simulator

Specification	Performance
최대 적재하중	30Ton
진동대규모	4.0m × 4.0m
진동방향	3축병진, 3축회전
최대변위(mm)	H = ±100, V = ±67
최대속도(cm/s)	H = ±75, V = ±50
최대가속도(g)	H = ±1.5, V = ±1.0
최대허용편심(m)	H = ±0.5, V = ±2.5
최대진동주파수	50Hz
구동방식	Electrohydraulic Servo
제어방식	Analog / Digital Control
동시계측/분석능력	56Ch

있다. 보통 일반적인 가진기가 1축 방향의 병진운동을 구현함에 비해, 이 시스템은 동시 2축, 3축의 병진 운동뿐만 아니라 임의의 회전운동도 구현할 수 있다. 이 동시 가진 능력은 종래의 다른 가진 시스템과는 구별되는 독특한 것으로써, 모든 가진 현상을 재현할 수 있게 된다. 그림 2와 3은 1축 가진시 및 2축 동시 가진시의 수직 및 수평방향 가진능력을 각각 보여주고 있다.

### 2.2 시스템 구성

진동대 시스템은 크게 분류하면 진동대, 가진력 발생을 위한 유압 시스템, 아나로그 제어시스템 및 컴퓨터를 이용한 디지털 제어시스템의 4부분으로 구성된다. 그림 4에서 전체적인 설치도를 볼 수 있으며 그림 5에 각 요소별 기능을 정리하였다.

진동대의 제어는 아나로그 제어 시스템만을 이용할 수도 있다. 이 경우 입력파형으로써 신호발생기(function generator)로부터의 정현파, 삼각파등 각종 함수형 파형을 줄 수 있으며, 또한 테이프 레코더(tape recorder)등에 기록된 임의의 파형, 즉 실제 계측된 지진파, 진동파형등을 줄 수도 있다. 그러나 진동파형이 실제 기록되어 있지 않거나, 주파수 스펙트럼(fre-

표 1 Specifications for major shaking table systems in the world

Institution	Country	Date	Size(m)	Load(t)	Axis(DOF)	Max. Accl(g)	Freq(Hz)
Univ. of Illinois, Urbana	USA	1968	3.65×3.65	4.5	1/1	H=5	.1-50
Univ. of California, Berkeley	USA	1971	6.1×6.1	45	2/3	H=.67, V=.22	.5-50
Construction Eng. Research Lab.	USA	1973	3.65×3.65	6	2/3	H=15, V=30	.1-200
Kajima Inst. of Technology, Chofu	Japan	1975	4.0×4.0	20	2/3	H=2, V=1	.1-50
Univ. of Mexico, Mexico City	Mexico	1975	4.5×4.5	20	1/1	H=1.2	.1-50
Min. of Construction Tsukuba	Japan	1979	6.0×8.0	100	1/1,2/3	H=.7	.1-30
Univ. of Kiril & Metodij, Skopje	Yugo	1980	5.0×5.0	40	2/3	H=.67, V=.4	.1-30
Ansaldo Impianti Genoa	Italy	1980	3.5×3.5	7	2/3	H=1.3, V=.63	.1-60
Tishiba Electric Kawasaki	Japan	1980	5.0×5.0	20	2/3	J=1, V=.7	.1-30
Union Carbide Tennessee	USA	1980	1.83×1.83	7	2/3	H=.25, V=.25	.1-20
Min. of Construction Tsukuba	Japan	1981	2.0×3.0 (4 Tables)	25	1/1	H=.7	.1-50
Univ. of New York Buffalo	USA	1983	3.7×3.7	20	2/3	H=1 V=1	.1-60
Tong Ji Univ. Shanghai	P.R.China	1983	4.0×4.0	15	2/3	H=1.2, V=.8	.1-50
IHI, Yokohama	Japan	1983	4.5×4.5	35	3/6	H=1.5, V=1	.1-50
National Tech. Univ., Athens	Greece	1983	4.0×4.0	10	3/6	H=1.5, V=1.8	.1-60
ISMES Bergamo	Italy	1984	4.0×4.0	20	2/3	H=1, V=1.7	.1-60
East China Tech. Univ. of Water Resorces, Nanjing	P.R.China	1984	2.0×2.8	6	2/3	H=1.2, V=.62	.1-80
Dalian Inst. of Tech. Dalian	P.R.China	1984	3.0×3.0	10	1/1	H=1.0	.1-50
Yunnan Inst. of Tech., Kuming	P.R.China	1984	1.5×2.0	2.5	2/3	H=2.4, V=1.7	.1-80
ENEA, Rome	Italy	1985	4.0×4.0 2.0×2.0	10 1	3/6 3/6	H=3, V=3 H=5, V=5	.5-50 1-100
NTT, Tokyo	Japan	1985	3.0×3.0	10	3/6	H=3, V=3	1-100
Research Inst. for Electrical Industry Bucharest	Romania	1986	2.0×2.0 .75×.75	.5 .06	3/6 3/6	H=5, V=3.33 H=7.7, V=5	.5-33 .5-33
German Army Testing Inst. Meppen	Germany	1986	1.5×3.0	1.5	2/3	H=5, V=5	1=100
Kumagai-Gumi Tokyo	Japan	1987	5.0×5.0	70	3/6	H=3, V=1	.1-70
KRISO Taejon	Korea	1990	4.0×4.0	30	3/6	H=1.5, V=1	.1-50

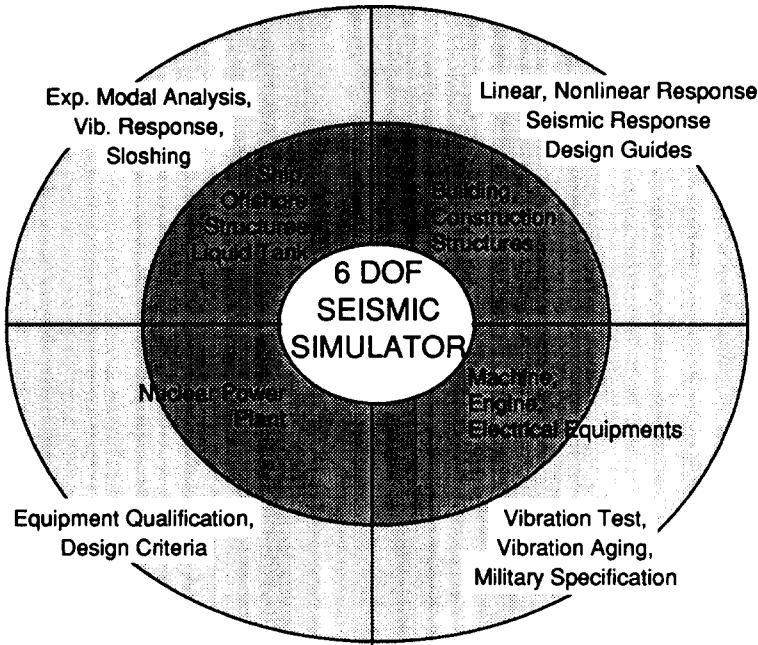


그림 1 Application fields with the 6DOF seismic simulator system

quency spectrum), 응답 스펙트럼(response spectrum)등 실제 파형대신 주파수 함수를 이용해야 하는 경우 및 파형이 수치(digital)로 기록되어 있는 경우는 컴퓨터에서의 파형합성 및 재생을 통한 디지털 제어시스템을 이용한다.

진동대가 구동될 때 시험체로부터 계측된 진동신호는 Anti-aliasing 필터를 거친 후 A/D변환기에 의해 Vax Station 3200 컴퓨터에 기록, 저장되며 STEX 소프트웨어를 이용하여 각종 기법의 분석이 가능하다.

또한, tape driver 및 Vax에 연결된 IBM PC와 Macintosh 컴퓨터등을 이용하여 자료의 보관 및 타 컴퓨터에서의 응용이 용이하게 이루어질 수 있다.

### 2.3 운용 소프트웨어 : STEX

진동대 시스템의 운용을 위한 소

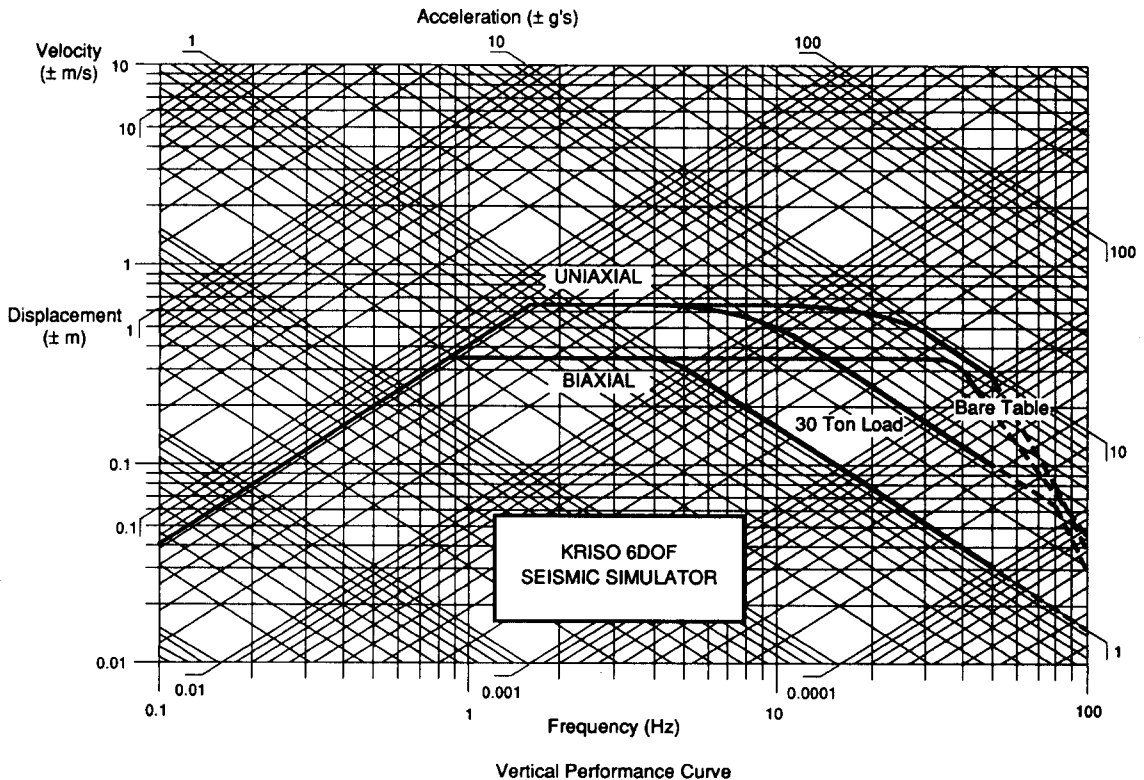


그림 2 System performance in the vertical direction

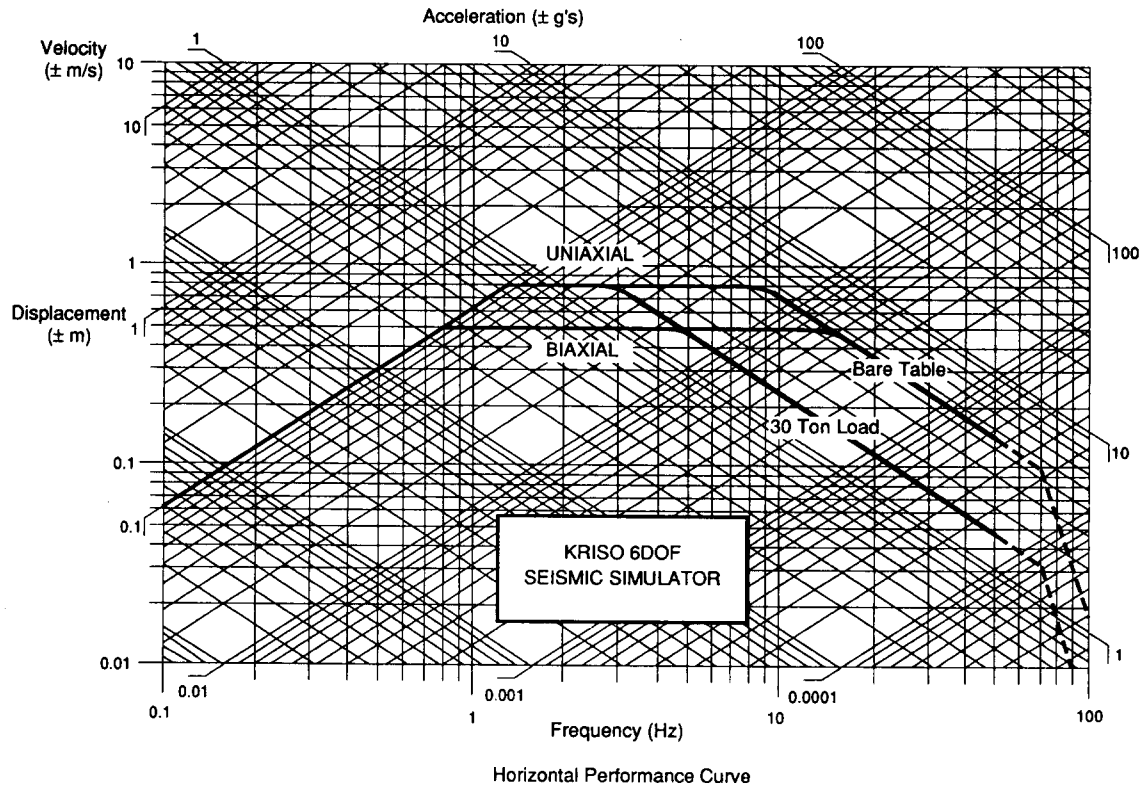


그림 3 System performance in the horizontal direction

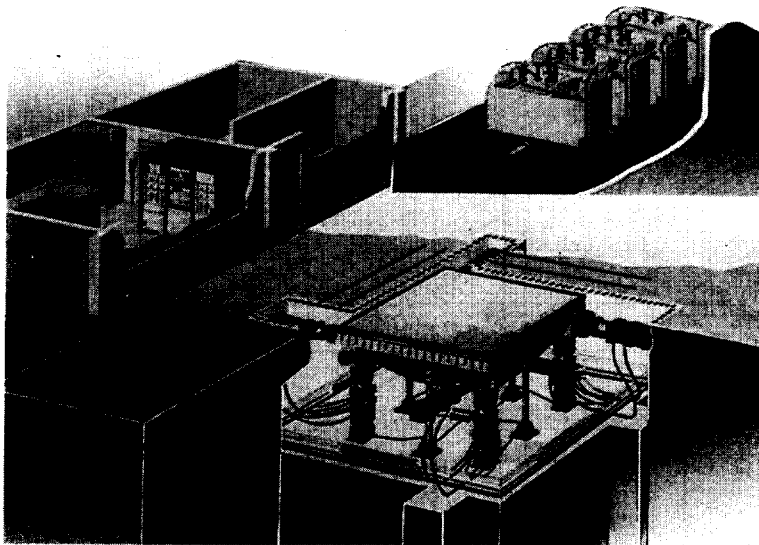


그림 4 Configuration of the KRISO 6 DOF seismic simulator system

소프트웨어는 STEX(Seismic Test Execution Software)로서 Vax Station 3200 컴퓨터에서 실행하도록 되어 있다.

STEX는 그림 6에서 보는 바와 같이 7부분의 기능으로 나뉘어져 있다.

각 부분의 주요 기능은 다음과 같다.

(1) System Definition

- (i) 진동대를 구동코자하는 자유도(degree of freedom)설정
- (ii) 시험체의 진동응답계측을 위한 신호변환기(transducer)의 종류 및 gain설정

(2) Data Analysis

- (i) 계측자료의 연산, 통계적 처리, 주파수분석
- (ii) 계측자료의 plotting 및 수정
- (iii) 정현파 및 Sweep, 주파수 스펙트럼 또는 응답스펙트럼 정의로부터 파형 합성

(3) Profile Library

- (i) Data analysis에서 정의

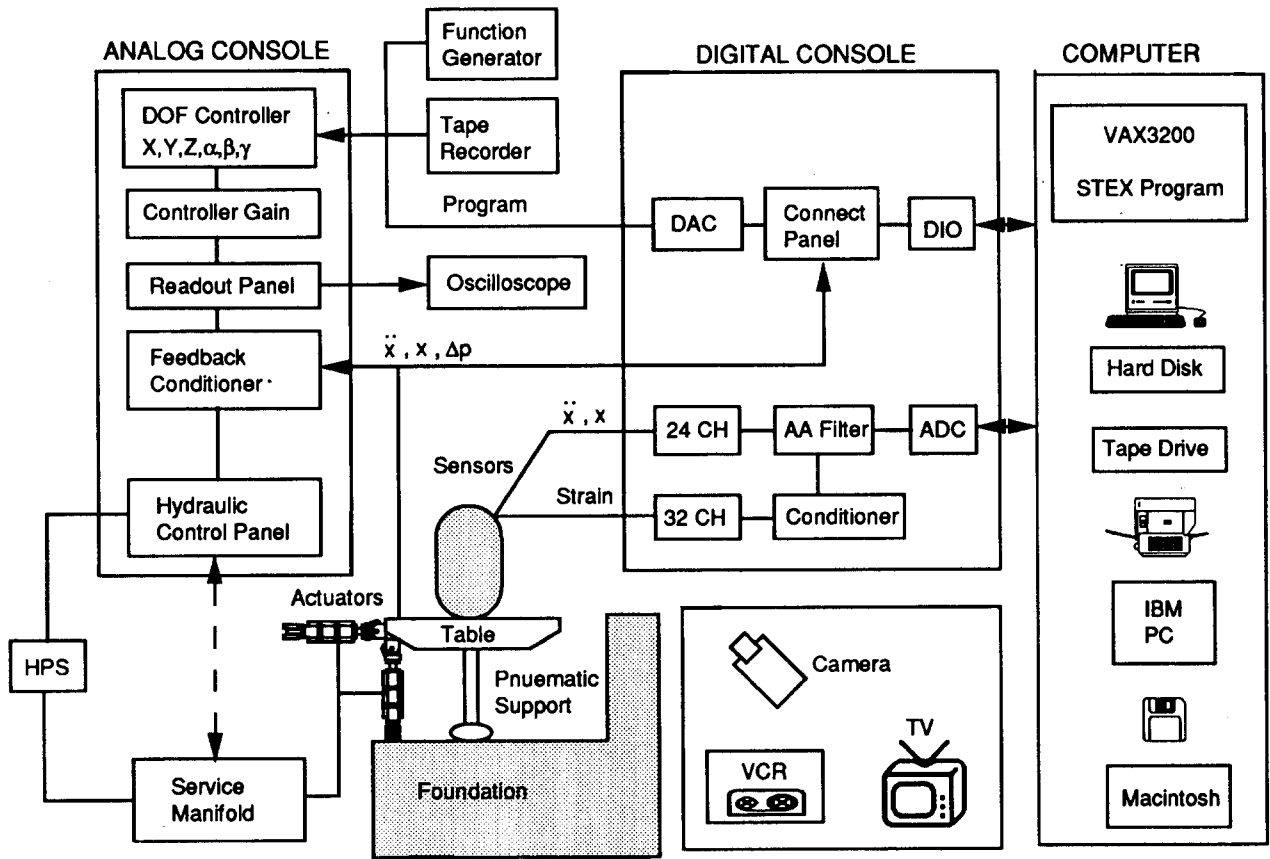


그림 5 Schematic diagram of KRISO 6 DOF seismic simulator system

Main control Options	
KEY Option Activated with 'KEY'	
C	System Definition
A	Data Analysis
P	Profile Library Utility
R	Random Library Utility
M	Model Library Utility
D	Data Access
E	Earthquake Testing
X	Exit to the Operating System

그림 6 Main options in program STEX

된 auto power spectral density 함수에 상응하는 random noise함성  
 (ii) 파형의 전체적인 진폭변환

(5) Model Library

- (i) Random library로부터 만들어진 random noise에 의한 시험 결과로부터 시험파형과 실제진동대의 거동을 비교하여 진동대 시스템의 전달함수 분석
- (ii) 추후 compensated Test를 위한 전달함수의 Expanded Inverse 합성

(6) Data Access

- (i) 여러 library에서 만들어진 파형 및 분석결과를 컴퓨터에 외부파일로 저장
- (ii) 이 파일들은 다른 시험을 위한 자료 또는 tape에 기록, 보존하는데 쓰임

(7) Earthquake Testing

- (i) Uncompensated test : profile 또는 random library에서 만들어진 시험파형을 진동대에 보냄으로써 시험완료
- (ii) Compensated test : model library에서 분석된 진동대 시스템의 주파수 특성을 고려하여 진동대로 보내지는 명령 시험파형을 변조함으로써 진동대가 처음 정의된 시험파형을 정확히 구현토록 반복시험

### 3. 진동대 시스템운용

#### 3.1 성능조정(Tuning)

진동대 구동방식은 크게 하나로

그제어와 디지털제어로 나누어진 다. 아나로그 제어는 일반적인 함수신호 발생기(function generator)에서 발생하는 파형을 입력하여 진동대를 구동하는 것을 의미한다. 이때는 디지털 제어는 이용되지 않으며, 주로 진동대에 주어지는 파형신호가 실제 잘 구현되는지를 확인하는데 주로 이용된다.

또한 어떤 진동신호가 현장에서 계측되어 이것이 테이프 레코더(tape recorder)에 기록되어 있을 경우, 이것을 직접 입력하여 진동대를 구동할 수 있다. 이와같은 기능을 그림 5의 구성도에서 볼 수 있다.

디지털제어를 통해 진동대를 구동하기 앞서 반드시 아나로그 제어 시스템만으로 white noise에 대한

응답 특성을 확인해야 한다. 즉 함수신호 발생기로 주는 white noise가 진동대에서 정확히 구현된다면 명령신호가 진동대에서 계측된 신호와의 전달함수의 크기는 1이 된다.

그러나 시험체의 중량 및 무게중심위치, 진동응답 크기등에 따라 이 전달함수의 크기가 작동 주파수 범위내에서 약간씩 변하게 되므로 아나로그 시스템의 제어 gain들을 조절하여 1에 가까이 되도록 한다. 이것을 튜닝(tuning)이라고 한다. 튜닝이 끝나면 진동대는 디지털제어 프로그램만에 의해 구동할 수 있다.

### 3.2 시험파형

#### (1) 조화파형

조화파형의 종류로써 정현파(sine)를 기본으로 진폭을 유지한 채 주파수를 일정한 시간비율로 변화시키며 변조할 때, 주파수 변화율이 일정한 비율인 linear sweep, 지수(exponential)형으로 되는 logarithmic sweep과 두개의 인접한 주파수를 갖는 정현파가 만들어내는 Sine Beat 등을 들 수 있다. 이와같은 시험파형의 예를 그림 7~9에 보였다.

IEEE std 344-1987[1]에서는 시험체가 설치되는 바닥(floor)의 진동이 하나의 독특한 주파수 성분만을 보일 때는 짧은 시간동안의 단일주파수시험(single frequency test)을 적용할 수 있음을 명시하고 있다. 이때 위에서 언급한 여러 조화파형을 이용할 수 있다. 이중

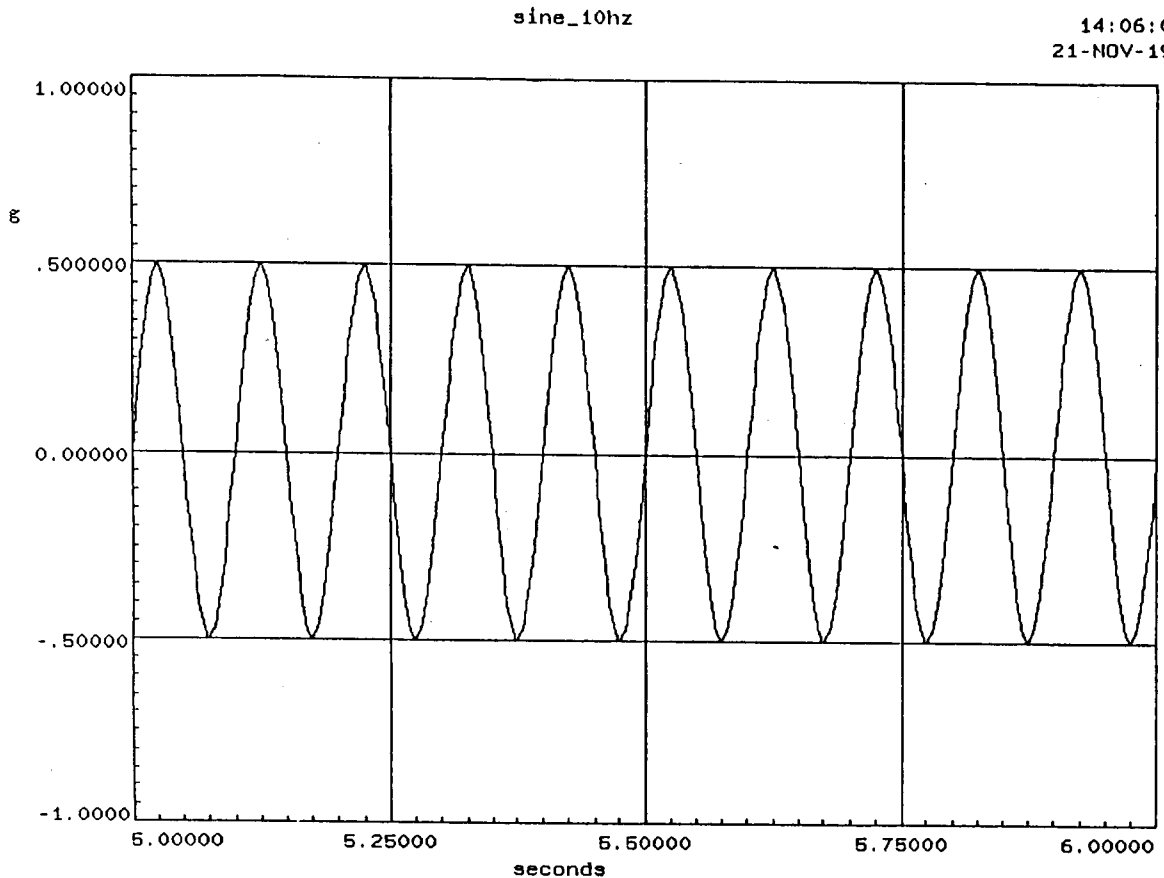


그림 7 Sine wave(10Hz)

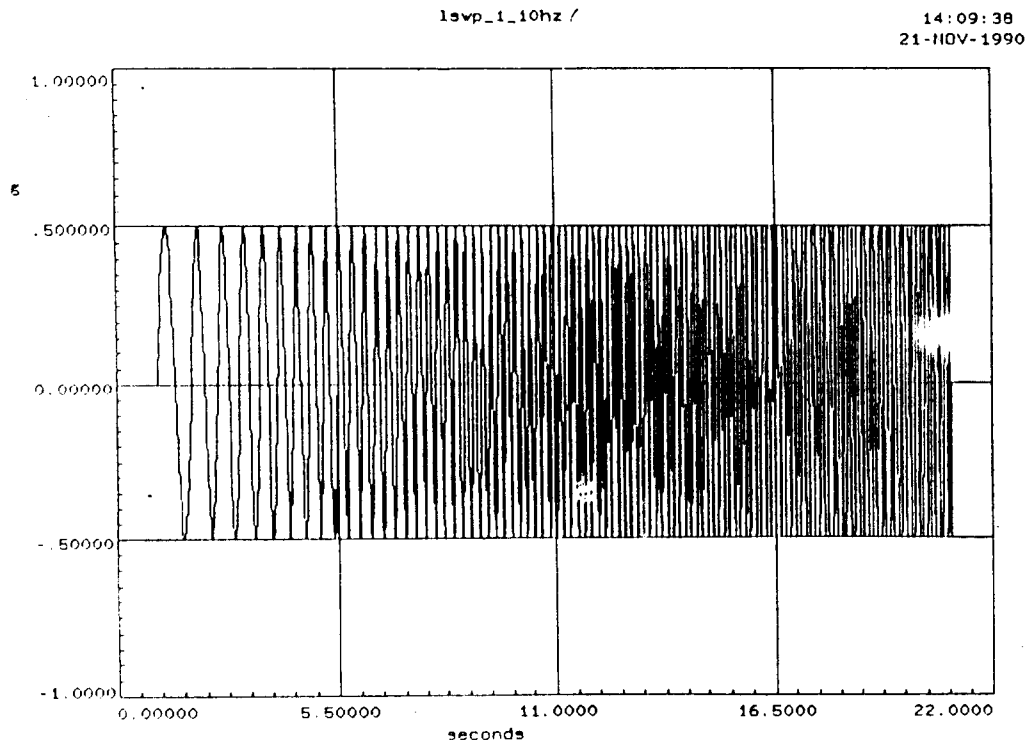


그림 8 Linear sine sweep(1Hz-10Hz, 0.5Hz/sec)

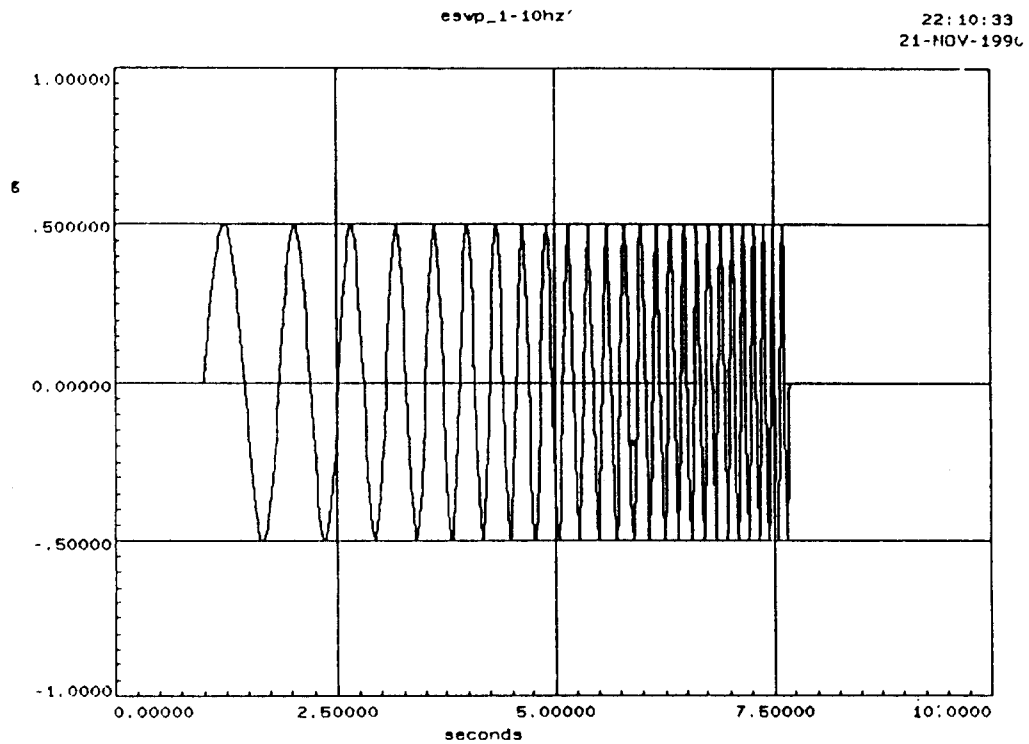


그림 9 Logarithmic sine sweep(1Hz-10Hz, 0.5oct./sec)

Sine Beat의 경우 보통의 수학적 개념과는 약간 달리 Beat 사이에 불연속적인 쉼(pause)을 두도록 하고 있다. Beat 하나는 중심주파수 파형이 5~10cycle 반복되도록 기술하고 있으며 최소 5개 이상의 Beat로 하나의 시험을 하도록 하고 있다.

그러나 Westinghouse의 시험절차서 WCAP 9714[2]를 보면 Sine Beat를 보다 엄밀히 정의하고 있다. 즉, Beat 당 중심주파수의 cycle은 10회, Beat 사이의 쉼은 2cycle 또는 15cycle로 하고 7개의 Beat로 시험하도록 정해놓고 있다. 이에 따라 그림 10에 보인 파형은 중심주파수가 9Hz일 때, Beating주파수는 이것의 1/20인 0.45Hz, Beat 간격 0.22 sec에 기준하여 합성된 결과이다. 한편, IEEE 344에서는 Sine sweep 시험시 주파수 변화율을 분당 2 octave 이하로 하도록 권고하고 있

다. 시험체의 감쇠에 의해 진동 응답의 크기가 주파수 변화율에 따라 변하므로 가능하면 천천히 변화시키도록 하는 것이다. 주파수를 최대 33Hz 까지 확장하여 파형을 합성하면 시험체의 공진주파수를 찾기 위한 시험(exploratory test)으로 이용할 수 있다.

(2) 랜덤파형

랜덤파형은 정의된 ASD(Auto-spectral Density), 또는 RSP(Response Spectrum)등을 기준으로 합성되며 위상신호로써 RPS(Random Phase Spectrum)를 정의하여 이용할 수 있다. 이것은 단일 주파수 파형과 대비하여, 어느 주파수 범위내에 수많은 주파수성분의 파형이 혼합된 것으로 볼 수 있다.

먼저 구현하고자 하는 진동대의 축방향별로 ASD를 정의한다. 이것은 각 주파수에 대응하는 ASD의 크기를 쌍으로 한(paired) 수표

(table)를 입력함으로써 정의된다. STEX 프로그램의 random library utility는 각 축방향별로 정의된 ASD를 기준으로 white noise끼리 서로 통계학적으로 독립적(statistically independent)이 되도록 합성하며, Coherence를 구해보면 거의 0에 가깝다. 이 Random 파형신호들은 내진검증시험(seismic qualification)에 보다는 시험체의 진동특성을 검증하기 위한 시험(exploratory test)에 유용하게 이용될 수 있다.

한편, RSP를 기준으로 한 랜덤 파형도 ASD의 경우와 마찬가지로 각 축방향 별로 정의할 수 있다. RSP는 일반적으로 유한한 시간내에서만 존재하는 과도진동(transient vibration)의 경우에 정의되므로, 이는 RSP와 동시에 시간축에서의 형상함수(Shape function)도 정의해야 한다.

그림 11은 예로써 하나의 RSP

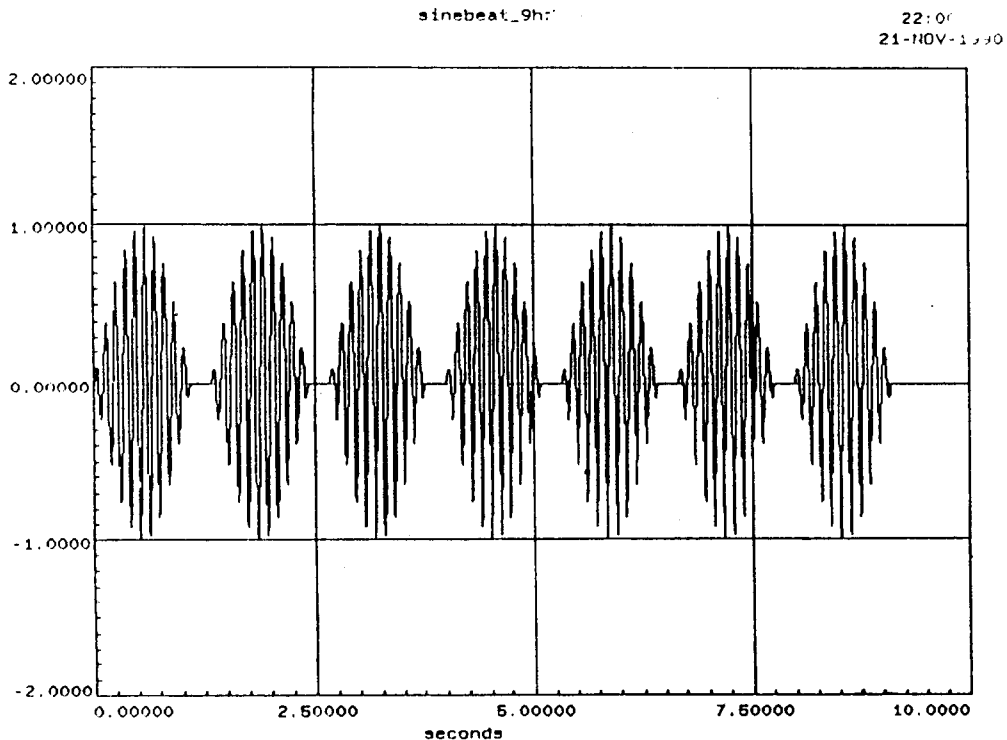
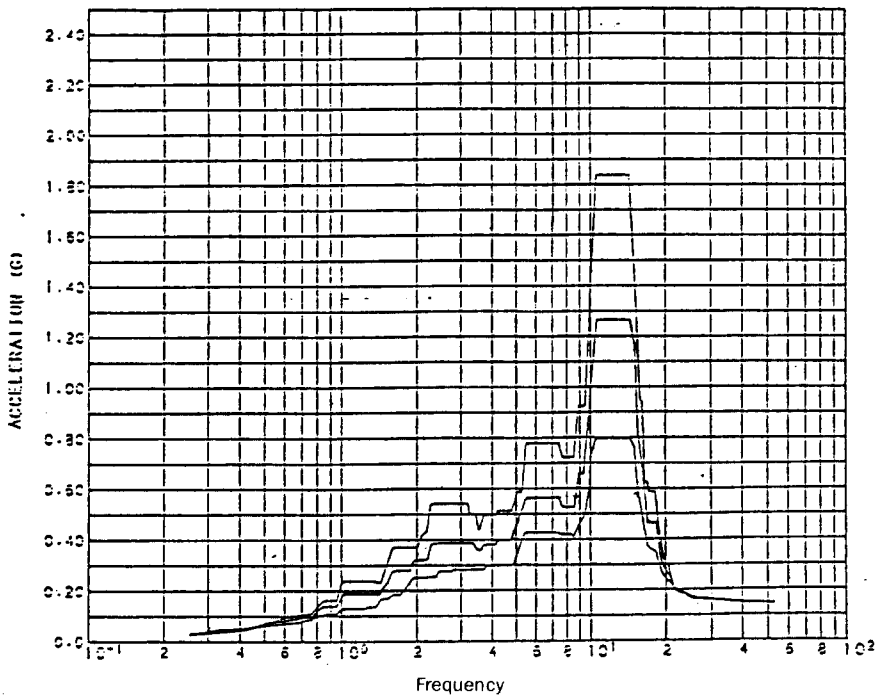


그림 10 Sine Beat(center freq.9Hz, beat freq.0.45Hz)





Damping 1, 2, 4%

그림 11 Response spectrum for a nuclear power plant

를 보여주고 있으며, 시간축에서의 형상함수는 사다리꼴로 정의하였다. 이 두함수를 기준으로 수차례의 과형합성과 응답스펙트럼 계산 후 초기치와의 비교를 통한 반복 계산을 통해 최종적으로 시험을 위한 응답 스펙트럼을 통해 최종적으로 시험을 위한 응답 스펙트럼 (TRS: Test Response Spectrum)이 구해진다.

그림 12는 그림 11을 기준으로 감쇠계수(damping factor) 2%인 경우에 대해 구해진 TRS이며 초기치 및 허용한계(tolerance limit)와 비교되어 있다.

그림 12의 TRS에 따른 시간파형은 그림 13과 같이 주어지게 되며, 이것을 내진검증 시험에 직접 이용할 수 있다.

(3) 지진파형

지진파형에 따른 시험을 위해 크게 2가지 방법을 이용할 수 있다.

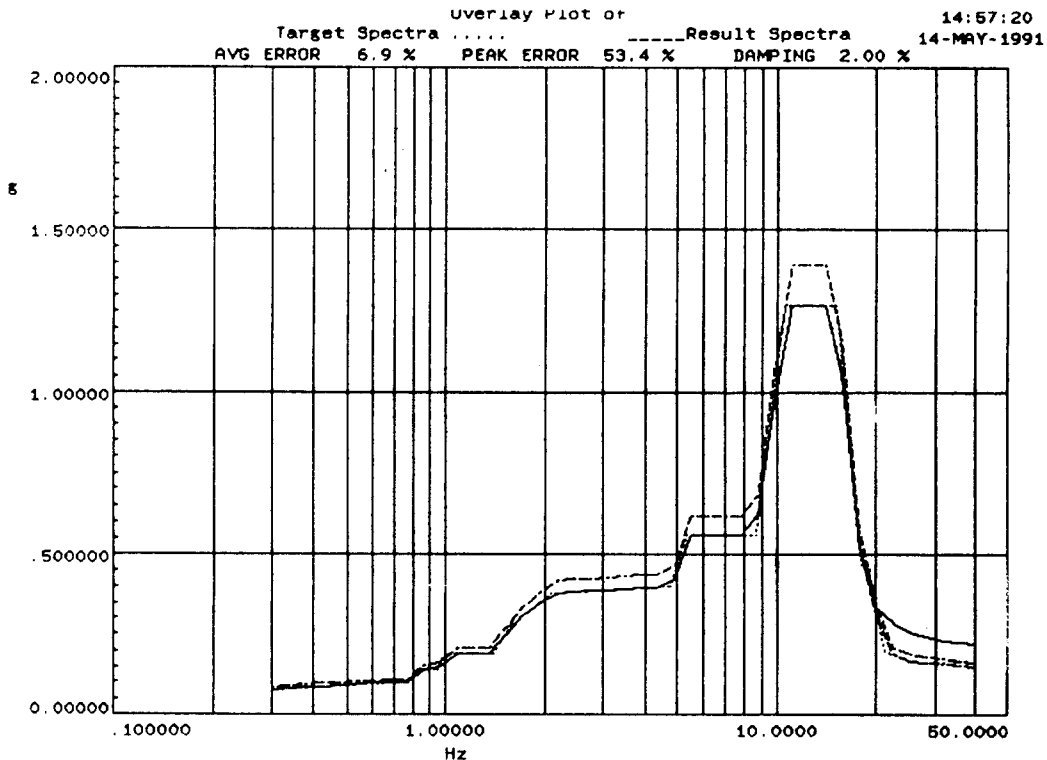


그림 12 Evaluated response spectrum(2%damping)

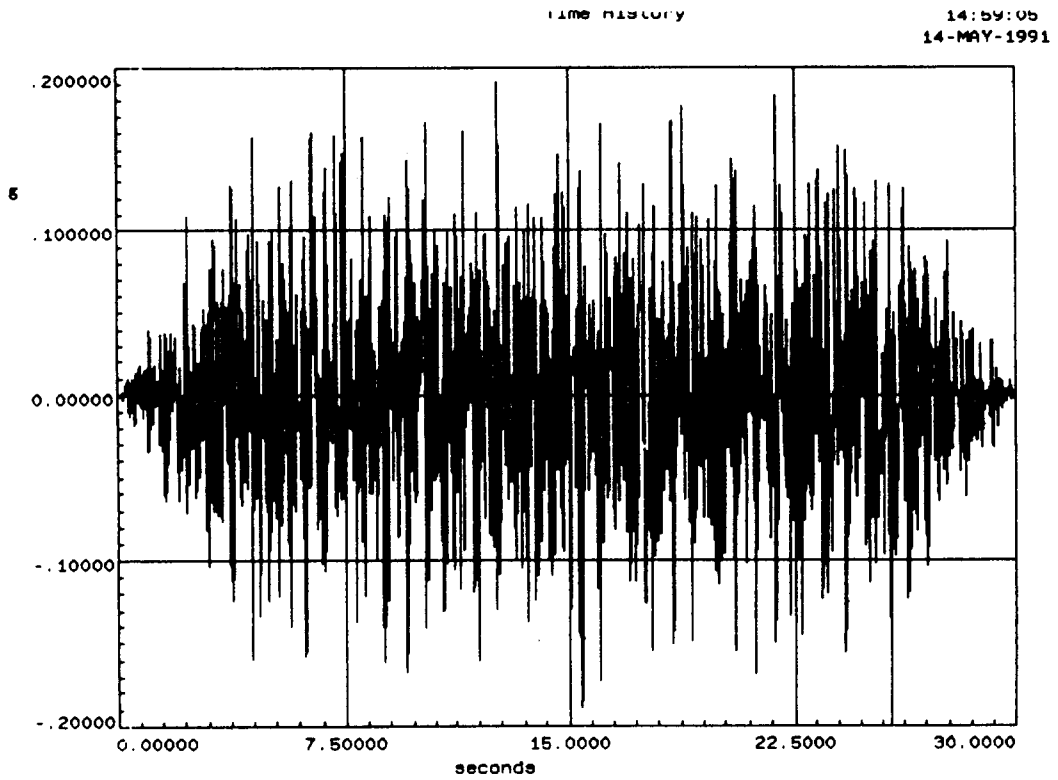


그림 13 Generated time history from RSP

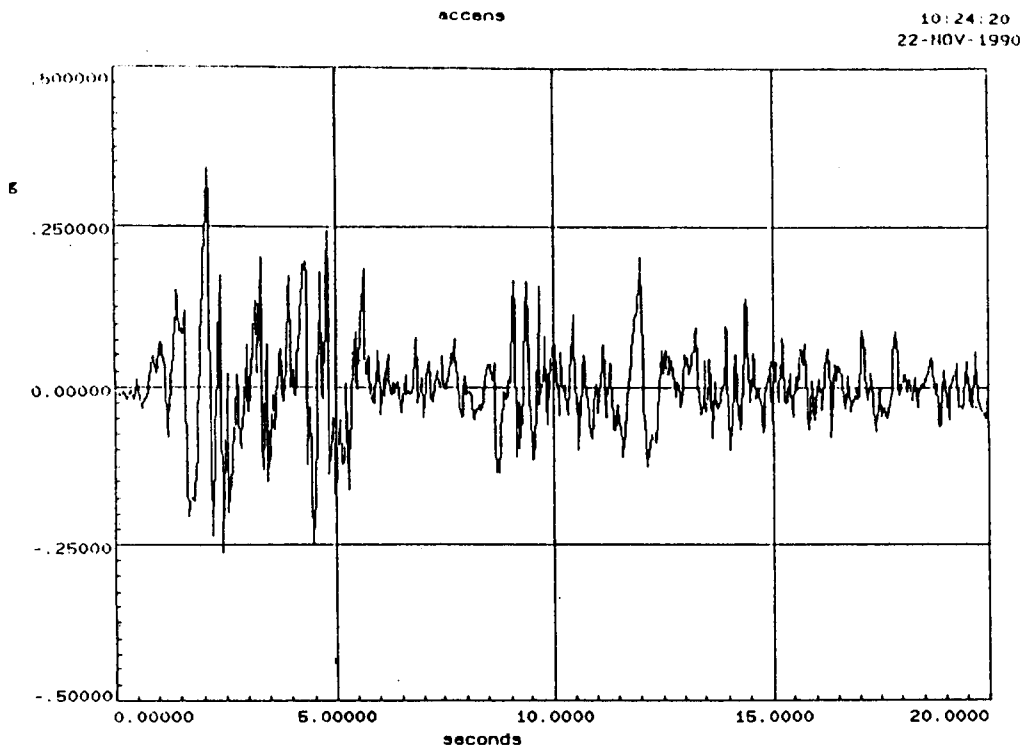


그림 14 El Centro earthquake, NS direction

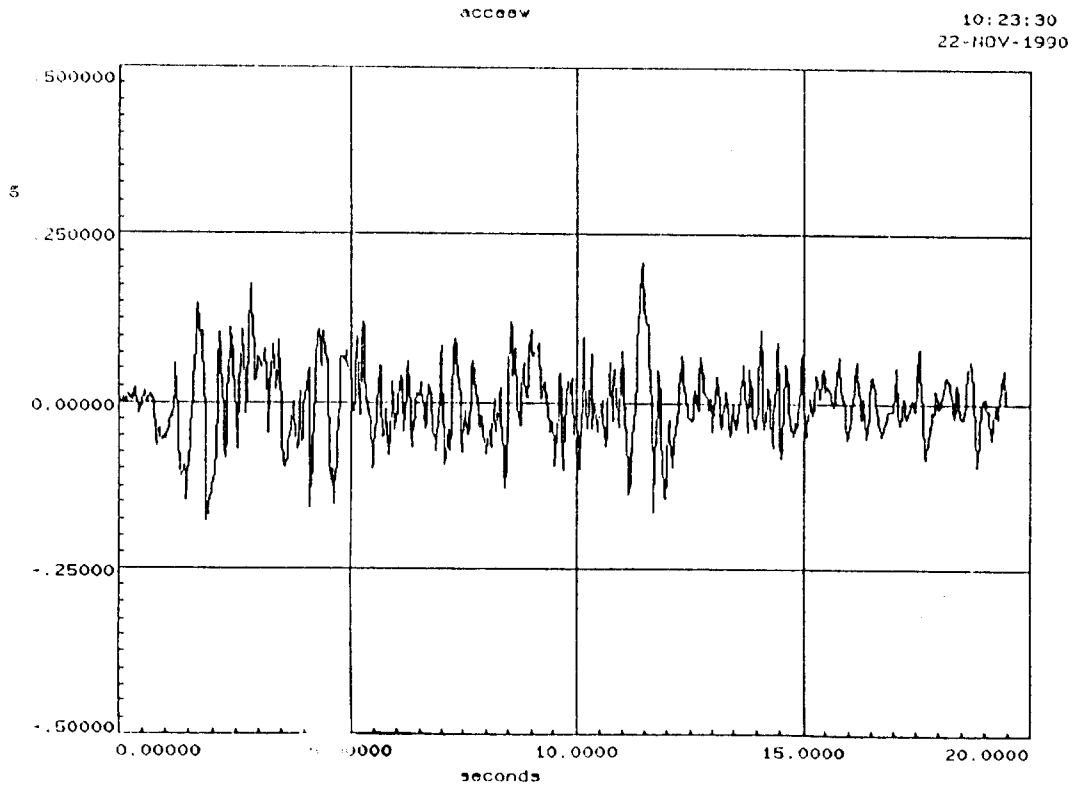


그림 15 El Centro earthquake, EW direction

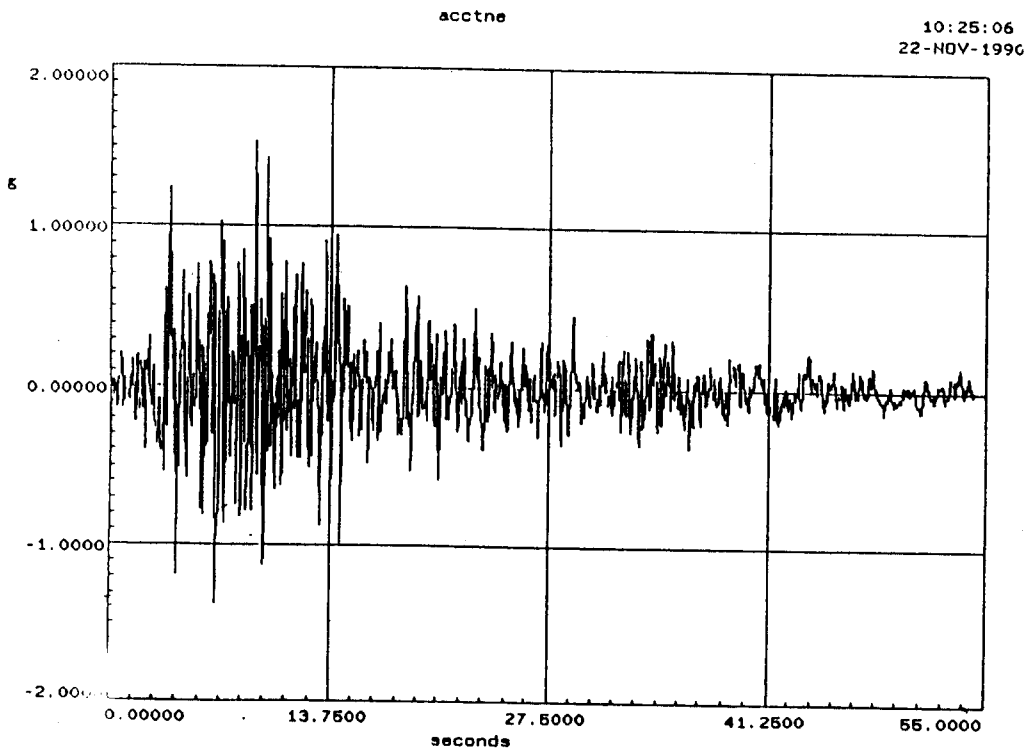


그림 16 Taft earthquake, NE direction

첫째는 일반적으로 많이 쓰이는 실제 지진파형을 구현함으로써 설계상의 문제점 확인 또는 외부자료 결과와의 비교가 가능하다.

둘째, 앞에서 언급한 바대로 ASD 또는 RSP가 주어질 경우 이를 토대로 모의 지진파형(simulated earthquake)을 합성하여 이용하는 방법이다.

STEX 프로그램내에는 몇가지의 실제 지진기록이 포함되어 있다. 이들 중 예로써 그림 14~17과 같은 파형을 이용할 수 있다.

### 3.3 시험기법

합성된 시험파형에 따라 진동대를 구동하는 기법에는 다음의 2가지가 있다.

- (1)비보상 시험  
(Uncompensated Test)
- (2)보상시험  
(Compensated Test)

비보상시험은 진동대 구동신호(drive signal)에 시험체의 동적특성을 고려하지 않고 앞절에서 언급한 합성신호를 직접 구현코자 하는 것이며, 시험체의 동적특성을 고려하여 구동신호를 변조시킴으로써 진동대의 운동이 프로그램에 의해 합성된 신호대로 정확히 구현되도록 반복하는 시험이 보상시험이다.

비보상시험은 그림 18에서 보는 바와같이 step 2에서 합성된 신호가 step 3에서 구동신호로 변환되어 진동대를 구동하는 5단계의 절차로 이루어진다. 그러나 보상시험

은 그림 19의 step 4에서 보듯이, 먼저 랜덤파형에 따른 비보상 시험을 통하여 시험체가 포함된 진동대의 응답 특성을 계측하여 진동대의 응답특성(model)을 결정한 후(model library), step 6에서 1차 시험을 실시하게 된다. 이 응답특성과 시험결과 계측된 진동대의 운동을 결합하여 step 7에서 튜닝을 통해 구동파형을 변조시킨 후 시험을 반복하게 되며, 진동대의 운동이 처음에 프로그램으로 합성된 파형과 거의 일치할 때 시험을 종료하게 된다.

### 4. 결 언

이상으로 해사기술연구소가 보

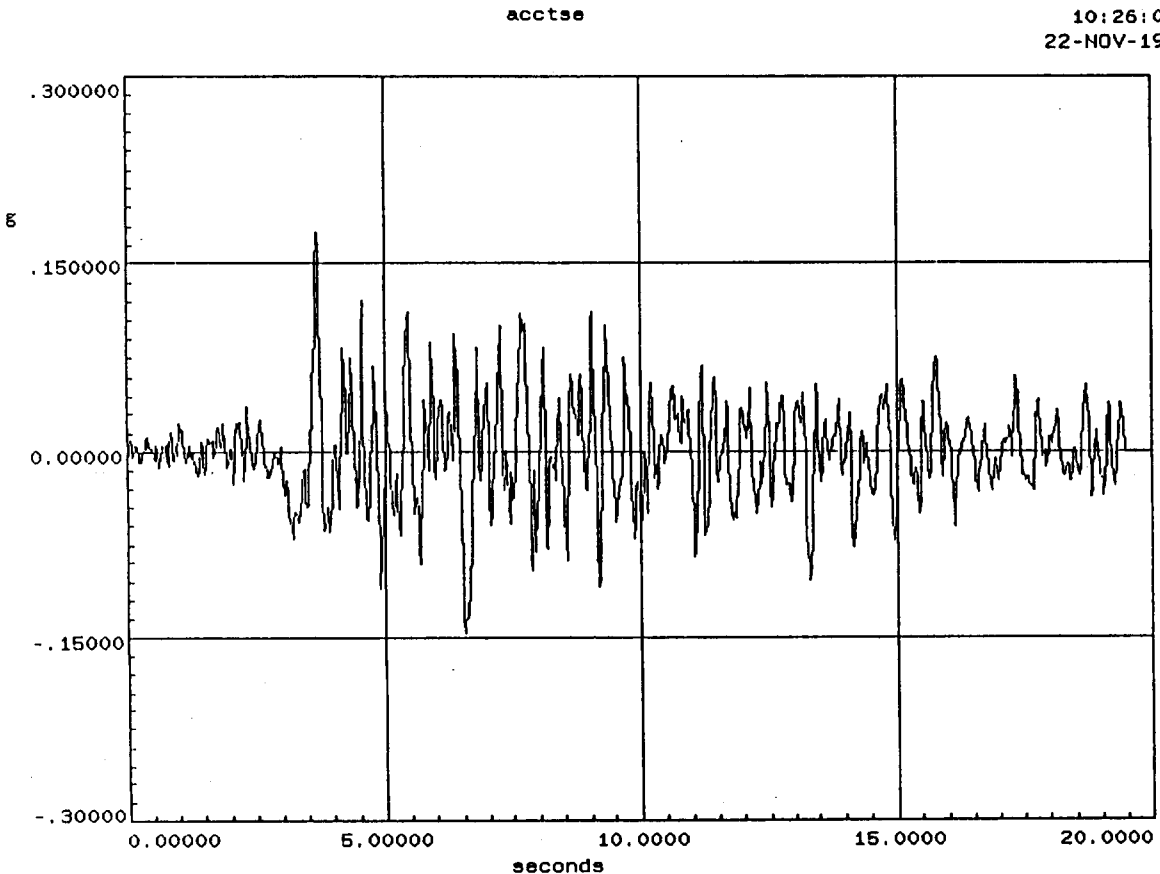


그림 17 Taft earthquake, SE direction

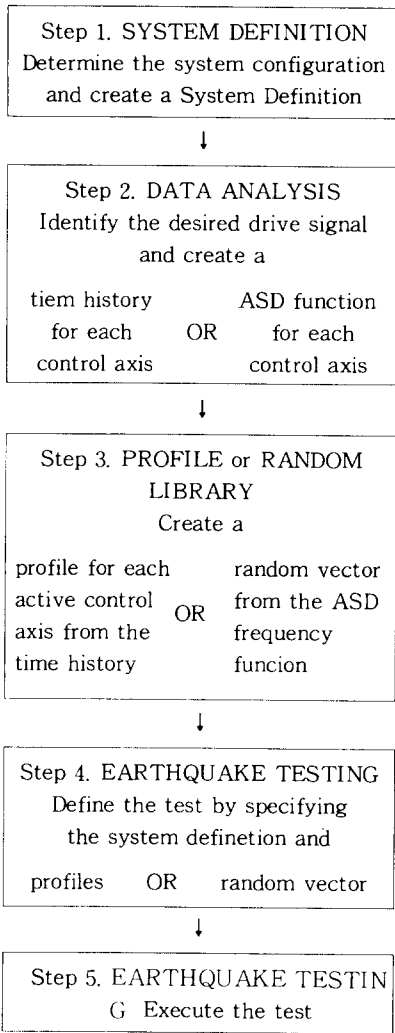


그림 18 Uncompensated test procedure

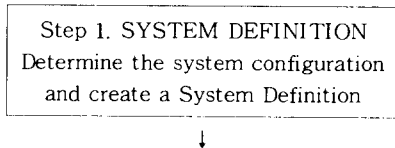


그림 19 Compensated test procedure

유하고 있는 6자유도 대형진동대의 시스템구성과 시험과형 합성기법 및 시험방법에 대하여 간략히 살펴 보았다. 통상적인 가진기가 1방향의 운동만을 구현할 수 있음에 비해, 6자유도 진동대는 3축병진, 3축 회전의 임의의 복잡운동을 구현할 수 있는 국내 유일의 설비이며 용량 또한 30톤의 시험체까지를 대상으로 한 대형 진동대로서 각종 분야에 필요한 진동시험 업무를 지원할 수 있다.

구조물의 방진 및 내진설계를 위해서는 가능한한 실물 또는 모형의 실증실험이 필수적이며, 이는 내진 해석기법의 개발 및 검증의 기초가 된다. 특히 이 시스템은 내진 검증 시험에 필요한 모든 기능을 갖추고 있으므로, 앞으로 건설될 국내원자력 발전소에 이용되는 각종기기의 내진검증시험을 통하여 이들 기기의 국산화에 크게 이바지할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] IEEE Std 344-1987, 1987 IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, ANSI/IEEE Standard 344
- [2] Kelly, R.E., Mcinerney, J.J., May, 1980. Methodology for the Seismic Qualification of Westinghouse WRD Supplied Equipment, Westinghouse WCAP 9714.