

대형장비의 진동시험치구 개발 및 실험적 평가

° 윤 용 집, ° 최 창 하, ° 기 무 현, ° 오 승 중 °

(Developing and Evaluating the Fixture of Vibration Test for a Large Equipment)

1. 머릿말

환경시험의 일부인 진동시험은 그 결과를 가지고 장비가 실제 운용하기 전에 진동에 대한 내구성이 있는가를 판단할 수 있는 단 하나의 방법이다. 이런 진동시험을 성공적으로 이끌어 정확한 결론에 도달하기 위해서는 아래 두가지 문제에 대한 해결이 필수적이라고 생각한다.

첫번째는 '실제 상황을 정확히 반영할 수 있는 진동시험수준의 결정이다.' 진동시험수준이 적절하지 못하면 전체적으로나 부분적으로 과대진동시험(Overtest)을 실시하거나, 과소진동시험(Undertest)을 실시할 수 밖에 없고, 이에 따른 결과도 신뢰도가 떨어진다. 예를 들어, 과대진동시험으로 시험장비가 고장나거나, 과소진동시험으로 시험장비에 이상이 없다고 해서 실제 상황에서 이 장비가 진동에 대하여 만족할 만한 내구성을 갖는다고 누구도 말할 수 없기 때문이다.

두번째는 '정해진 진동시험수준을 진동시험기로 부터 시험장비에 얼마나 정확히 전달할 수 있는가?' 라는 문제이다. 실제로 원하는 진동시험수준을 한치의 오차없이 정확히 시험장비에 가하는 것은 거의 불가능하다. 특히 시험장비가 대형화 되면 필수적 문제는 더 심각하다.

결론적으로 위에 지적한 두가지 문제의 해결이 성공적인 진동시험의 열쇠이며, 또한 시험결과에 대한 신뢰성을 보장받을 수 있는 길이기 때문이다. 이번 논문에서 다루고자 하는 것은 두번째 문제인 진동시험수준의 정확한 전달을 위하여 진동시험기와 시험장비 사이를 연결해 주는 진동시험치구(Test

Fixture) 개발에 관한 것이다. 실제 개발한 치구는 미군사규격(Military-Standard)과 보잉사 규격(Boeing specification) 그리고 샌디아사 규격(Sandia Corporation Standard)에 근거하여 분류하는 분류기준표에서 치구 중 가장 큰 부류(500 pounds 이상)에 속는 것으로, 현재 우리나라에서 보유하고 있는 것 중에 용량이 가장 큰 진동시험기에서 진동시험을 준비하고 있는, 체계에 전원을 공급하는 대형장비의 치구이다. 또한 실 진동시험을 실시하기 전의 모달시험과 예비시험 그리고 실 시험결과를 기술하므로써 제작된 치구의 실험적 평가를 하고자 한다.

2. 진동시험치구의 설계 및 해석

1) 개요

이번에 진동시험을 실시할 대상물은 무기체계 전체에 전원을 공급하는 장치로서 주전원공급장치(Primary Power Unit)라고 일컫는 것이다. 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 1290, 740, 1050(mm)이고, 무게는 446 Kg이다.

이 장비를 진동시험하기 위해서 진동시험기와 시험대상을 연결하는 시험치구(Test Fixture)를 설계, 제작하여 문제를 없이 진동시험을 마치는 것이 실질적인 목표이다. 그림 1.은 진동시험치구의 역할을 이해하는 기본이 되는 것으로써 가진기(Shaker)의 움직이는 부분을 테이블(또는 Armature)이라고 하고, 이 테이블과 시험장비(Test Item)를 연결하는 것을 시험치구(Test Fixture)라고 한다. 따라서 이 시험치구는 테이블의 진동을 가능한 그대로 시험장비에 전달해야 한다.

참고로 이번 진동시험의 사용한 초대형 진동시험기의 규격은 표 1. 과 같다.

* 정희원, 국방과학연구소

** 국방과학연구소

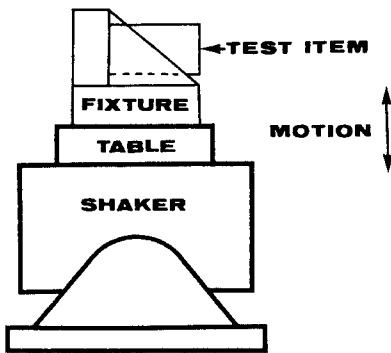


그림 1. 진동시험의 구성도

표 1. 초대형 진동시험기 규격

1. 제작회사	Ling Electronics Co. (U.S.A.)
2. Model No.	363 DR 96 Shaker System
3. System 구성	<ul style="list-style-type: none"> 가. A340 Shaker 나. 8096-96 Power Amplifier 다. S63000A Digital Vibration Control System 라. Hydrostatic Bearing(Kimball Model 810) 8 ea 마. Cooling Tower (세기냉동 Model FCT-120) 바. 기타 Data 기록장비
4. 장비용량	<ul style="list-style-type: none"> 가. Force Rating Sine : 36000 lb vector Random : 34000 lb rms 나. Frequency Range : 5 ~ 2000 Hz 다. Max. Displacement : 1.0 inch 라. Max. Velocity : 70 inches/sec 마. Max. Acceleration : 100g vector (Bare Table) 바. Amature Weight : 220 lb 사. Table Diameter : 23-1/4 inches 아. Overall Dimensions : 75(L) x 44(W) x 61.5(H)
5. 기타사항	<ul style="list-style-type: none"> 가. Shock Time History, Shock Response Spectrum Test 도 가능함. 나. Power Requirement : 480 KVA

2) 설계 목표

시험치구는 시험주파수 대역에서 시험기의 일부분으로 강제거동을 하는 것이 가장 이상적이나, 시험대상물이 커지고 치구와 설치되는 방법이 복잡해 짐에 따라 시험주파수 대역에서 치구 자체의 공진주파수(Resonance Frequency)가 나타나게 된다. 이런 이유에서 치구의 설계기준으로 공진주파수의 겹수나 전달율(Transmissibility)을 제한하게 된다. 앞에서

언급했듯이, 표 2.은 참고문헌 1.의 설계기준을 나타내고 있는 것으로 이 기준표에 따르면 이번시험 대상물은 500파운드까 넘고, 크기가 모두 24인치를 초과하기 때문에 다섯번째인 마지막 분류에 속한다. 그러므로, 치구설계의 목표를 '150Hz이내에 공진주파수가 없고, 150 ~ 300Hz 내에서는 1개의 공진주파수 있으며 전달율은 3을 넘지 않는 것'으로 하였다. 따라서 최초의 설계 개념을 간단히 표현하면, 시험치구는 가능한 가벼우면서도 강성이 높아 자체 고유 진동수가 높으며, 낮은 중폭특성을 나타내야 한다.

표 2. Design Criteria for Various Sizes of Fixtures

Component Description	Allowable Transmissibility Peak
Small components, mechanical, electrical, or electronic, up to cigar-box size and weight up to 5 pounds	None below 1000Hz. Above 1000Hz, a maximum of 3; resonances, limited to 5:1 over 3db bandwidth 100Hz.
Electrical, electronic, mechanical components in sizes up to a 10-inch cube and weights up to 15 pounds	None below 1000Hz. Max. of 4 peaks above 1000Hz, 5:1 None to exceed a 3db bandwidth 100Hz.
Odd-shaped mechanical components (i.e., large hydraulic valves). Electrical equipment (i.e., inverters, telemetering transmitters). Volumes up to 3 ft3, weights 10 to 50 pounds	None below 800Hz. Max. 4 peaks 6:1 over 3db bandwidth 100Hz, 800-1500Hz. Max. 3 peak 8:1 over 3db bandwidth 125Hz, 1500-2000Hz.
Larger equipment weighting 50 to 500 pounds, volumes up to 20 ft3	None below 500Hz. Max. 2 peaks 6:1 over 3db bandwidth 125Hz, 500-1000Hz. Max. 3 peak 8:1 over 3db bandwidth 150Hz, 1000-2000Hz.
Large equipment over 500 pounds and 24 inches minimum dimension. Note: These fixtures are exceedingly difficult to design. In general, use only with auxillary hydrostatic bearing	None below 150Hz. Max. 1 peak 3:1 150-300Hz also max. dimension. Note: These fixtures 3 peak 5:1 over 3db bandwidth 100Hz, 300-1000Hz. Max. 5 peak 10:1 over 3db bandwidth 200Hz, 1000-2000Hz.

3) 치구설계 및 해석

주진원공급장치(PPU)는 차량상판 좌측 후방에 매달리는 형태로 설치되어 있기 때문에 그림 2.과 같은 상자형을 치구의 기본모델로 정하여 해석을 시작하였고, 또한 치구의 재질은 강성과 무게를 고려하여 알루미늄을 사용하기로 결정하였다. 위의 모델을 이용하여 경계조건(Boundary Condition)이 자유로운 상태(Free Condition)에서 상용소프트웨어인 MSC/NASTRAN으로 해석하였고, 그 결과는 표 3.과 같다.

표 3. 기본모델의 고유진동수

Mode 1	79.2 Hz
Mode 2	128.7 Hz
Mode 3	178.0 Hz

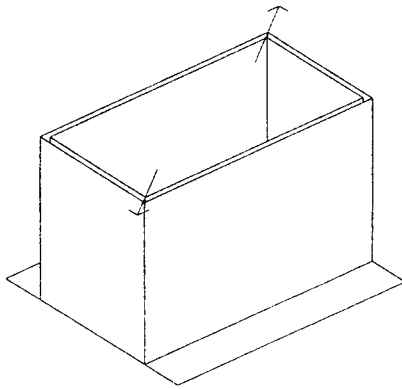


그림 2. 진동시험치구의 기본모델

첫번째, 두번째 고유진동수가 설계기준으로 정했던 150Hz 를 넘지 못했기 때문에 1차로 모델을 수정하였다. 즉, 옆면에 수직보강판(Vertical Gussets)을 각각 3개씩 설치하였고, 전체적으로 무게를 감소시키고 시험중 내부상태를 확인하기 위하여 옆면에 구멍을 추가하였다. 이 1차 수정모델을 이용하여 경계조건을 X,Y축 시험조건으로 했을 때 상용소프트웨어인 I-deas로 해석한 결과, 그림 3.와 같이 첫번째 모우드가 168Hz로 나타났기 때문에 기본적으로 이 모델은 X,Y축 진동 시험시의 설계기준은 만족하는 것으로 간주하였다.

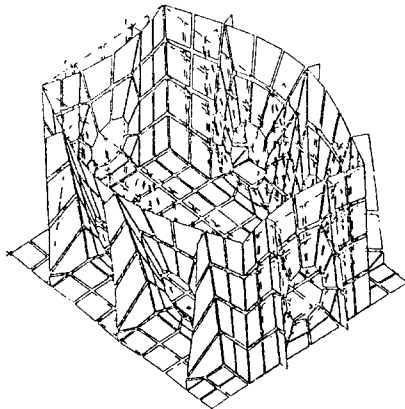


그림 3. 1차 수정모델 해석(X축 시험조건)

그러나 이 모델로 경계조건을 Z축 시험조건으로 하여 해석한 결과, 치구의 첫번째 모우드가 88Hz 밖에 안되었다. Z축 시험조건은 그림 4.에서도 볼 수 있듯이 진동시험기와 치

구밀면의 접촉면이 중앙 일부에 지나지 않기 때문에 치구밀면의 Plate 모우드가 저주파수 대역에서 뚜렷이 나타나고 있다. 따라서 설계기준과 차이가 너무 커, 또 한번의 모델 수정이 불가피하였으나 여러가지 수정모델로 수차례에 걸쳐 해석한 결과, 재작이 불가능할 정도로 보강을 하였음에도 불구하고, 이러한 상자형의 모델로는 첫번째 모우드가 100Hz 이상 넘지 못한다는 것을 알 수 있었다. 이런 이유로 Z축 진동시험이 가장 큰 문제라고 판단되었기 때문에 치구밀면의 Plate 모우드를 최대한 줄이기 위해 상자 안쪽으로 치구가 조립되는 볼트 체결 부위와 간섭되는 부분을 피해서 가능한 많은 보강을 하고 옆면도 수직보강판을 추가하기로 결정하고 해석을 마쳤다. 따라서 마지막으로 결정된 치구형태는 그림 5.와 같다.

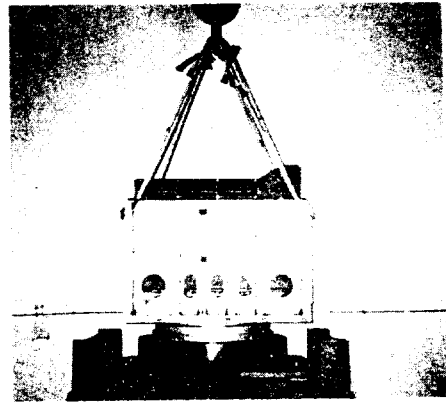


그림 4. Z축 진동시험

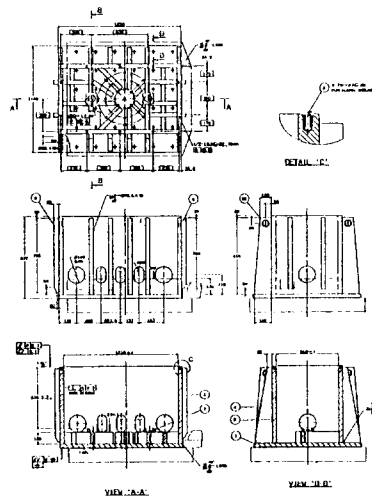


그림 5. 최종 결정된 치구 모델

한가지 중요한 사실은 Z축 진동시험시 위험요소가 있으면, 그림 4.과 같이 번지코드를 사용하여 치구와 시험물을 약간 들어주므로써 전체 무게를 감소시키는 효과를 가져오는 방법을 택하게 되어있다. 이 방법을 컴퓨터 시뮬레이션 상의 경계 조건으로 만들기에는 거의 불가능하기 때문에 치구의 첫번째 모우드가 어느 주파수에서 나타날 것인지 예측하기는 극히 어렵다.

참고로, 해석결과 외에 치구설계에 반영해야 할 중요한 사항은 아래와 같다.

- 가. 치구와 시험물을 합한 무게중심이 진동 가진기축 중심에 일치해야 한다.
- 나. 치구와 시험기 연결을 위한 볼트구멍 위치 결정시 3축을 모두 고려해야 한다.
- 다. 치구밀련의 평면도를 시험기에 맞게 설정해야 한다.

3. 치구의 시험결과 및 평가

1) 모달 시험(Modal Test)

제작된 치구를 앞의 해석결과와 비교하기 위하여, 또한 실 진동시험전에 치구의 특성을 먼저 파악하기 위해서 모달시험을 실시하였다. 이 시험에 쓰인 주장비는 PCB사의 Impulse Hammer Kit인 GK291B20 와 H.P. 3566 Spectrum Analyzer이고, 분석에 사용한 소프트웨어는 SMS사의 STAR 프로그램이다. 결과는 그림 6.에 나타나 있듯이 X축 시험조건에서 치구의 첫번째 모우드가 68Hz에서 나타났고, 두번째 모우드는 155Hz에서 나타났다.

The first mode : 67.83 [Hz.]
Damping : 5.62 [%]

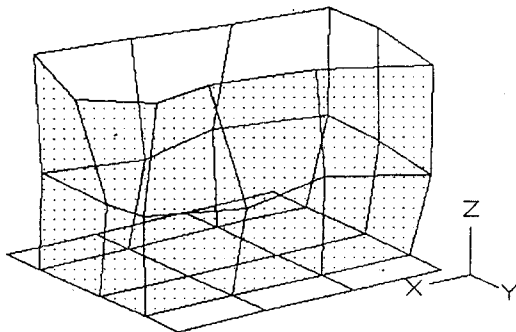


그림 6. 진동시험치구 모달시험 결과

2) Dummy Load에 의한 예비 진동시험

주진원공급장치를 실험물로 진동시험하기 전에 실험물의 무게와 MOI(Moment of Inertia)를 맞춘 Dummy Load를 사용하여 예비시험을 수행하므로써 실시시험의 가능성 검토 및 시험 제어센서(Control Sensor)의 위치나 제어방법을 점검하고, 또한 시험에 따른 진동시험기나 시험장비의 위험요소를 사전에 제거하기 위하여 예비시험을 실시하였다. 시험은 실 진동시험과 동일한 방법으로 시간만 줄인 상태에서 공진주파수 탐색 시험과 Random 진동시험을 한차례씩 실시하였고, 공진주파수 탐색시험결과는 그림 7.에 나타나 있다. Random 진동시험시는 실 시험에 적용할 진동시험수준을 제어하는 센서위치와 제어방법을 결정해야 하기 때문에 가속도계를 치구의 여러 위치에 붙여 보았다. 실제로 주진원공급장치의 진동시험수준을 결정할 때 차량상판에서의 진동시험 결과를 이용했기 때문에 치구와 시험장비의 접촉면에 가까운 치구 뒷부분에 가속도계를 부착하여 제어하는 것이 바람직하나, 시험 결과에도 나타나 있듯이 공진주파수 탐색시험 결과, 치구의 공진이 일어난 후에 발생하는 전달을 하락(Transmissibility Drop)이 너무 커 진동시험기에서 이 주파수부근의 진동수준을 무리하게 높여 주어도 실제 만족할 만한 수준으로 올라가지 못하기 때문에 치구 뒷면에서의 제어는 불가능하게 되었다. 이런 이유로 차선적인 평균제어(Average Control) 방법을 사용하기로 결정하였다. 이 방법을 간단히 설명하면, 치구 뒷면에서의 가속도와 진동시험기 테이블에서의 가속도를 산술적으로 평균하여 제어하는 방식이다.

3) 실제 진동시험

예비시험 때와 마찬가지로 공진주파수 탐색시험과 Random 진동시험을 한차례씩 실시하였고, 두가지 시험결과는 그림 8.과 그림 9.에 나타나있다. 특별히 예비시험과 차이가 있었던 것은 Z축시험 결과였다. 예비시험 때는 치구 공진주파수에서의 전달율과 그 후에 나타나는 전달을 하락이 커서 시험의 가능성까지 걱정하였으나, 실험을 이용한 공진주파수 탐색시험에서는 결과에서 볼 수 있듯이 완벽한 정도로 치구의 공진이 나타나지 않았다. Dummy Load를 사용했던 예비시험시와 차이를 살펴보면 다음 두가지 밖에 없다. 첫째로 Dummy Load를 실험물로 교체했다는 것이고, 둘째는 번지코드를 사용하여 들어 올리는 정도의 차이가 있었을 것이다. 따라서 Z축 시험시 Dummy Load와 실험물간의 동적인 특성 차이

가 크기 때문에 이런 결과가 발생되었다고 판단되며, 또 한가지 이유는 번지코드를 사용하여 치구와 실험물을 들어올리는 정도가 이상적으로 되어 치구에 공진이 발생하지 않은 것으로 판단할 수 있다.

4) 치구의 평가

치구를 평가할 수 있는 가장 중요한 자료는 실험물을 이용한 공진주파수 탐색시험결과이다. 따라서 이 결과에 의거하여 시험축별로 치구를 평가하면 아래와 같다.

X축의 경우, 치구의 공진이 일어나는 60Hz 부근과 400Hz 부근에서는 시험기에 가한 진동보다 더 큰 진동을 겪어 과대 시험이 되었을 것이고, 전달을 하락이 발생한 200Hz 부근에서는 과소시험이 되었을 것이다. 특히 이 전달을 하락 부위가 크기 때문에 전체적인 X축시험에 대한 치구는 만족할 만한 평가를 내릴 수 없다. Y축의 경우, 공진의 발생 횟수는 X축보다 많으나 Peak치가 크지 않고 전달을 하락 부위도 크지 않아 전체적인 Y축시험에 대한 치구는 만족할 만하다고 할 수 있다. Z축의 경우, 물론 번지코드의 효과이지만, 치구에 대한 평가는 새개의 시험속 중 가장 만족할 만하다고 할 수 있다.

또한 참고문헌 1의 “Judging a good fixture”를 인용하면, 경험적 기준으로 ‘시험 주파수내에 20dB(10배)의 Peak가 존재하면 안 되고, 전달을 하락도 3dB(0.7)를 넘어서는 안 된다.’라고 명시되어 있다. 따라서 이런 여러 평가 사항을 전체적으로 요약하면, 이번에 개발된 시험치구는 Z축의 진동시험에는 적합하고, Y축 진동시험도 어느정도 적합하나, X축 진동시험에는 적합하지 않은 것으로 결론을 내릴 수 있다. 그러나 이것은 치구자체에 대한 평가이고, 전체적인 진동시험은 평균제어 방법으로 미흡하나마 X축시험도 성공적으로 마쳤다고 말할 수 있다.

4. 맺음말

대형장비의 진동시험치구 개발과 관련하여 이번 시험을 통하여 배울 수 있었던 사항을 언급하면 다음과 같다.

첫번째는 ‘Z축시험에 크게 비중을 두지 말라는 것이다.’ 설계 당시에는 진동시험수준도 세가지 축 중 Z축이 가장 높고, 치구와 진동시험기 간의 연결부위가 가장 적어 실제로 진동시험이 가능할지도 의문이었다. 이런 인식 때문에 치구밀면의

Plate 모드를 가능한 줄여 고유진동수를 높이기 위해 다른 축, 즉 X, Y축 시험에 악영향을 미치는 보강을 하였던 것이다. 그림 5.와 같이 치구내부에 보강재들을 용접하여 붙였기 때문에 X, Y방향의 강성증가에는 도움이 못되고, 무거운 증가시키는 요인이 되어 처음에 예상했던 고유진동수에 많이 미치지 못하였다. 하지만 Z축시험의 경우는 번지코드를 사용하여 가장 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

둘째는 ‘대형장비의 진동시험치구의 경우 고유주파수 대역보다는 댐핑에 더 세심한 주의를 기울여야 한다는 것이다.’ 처음 설계시는 강성쪽에 훨씬 관심을 많이 가지고 접근했기 때문에 댐핑은 2차적인 문제였다. 그러나 사실은 정반대였다. 설계기준인 ‘첫번째 모드가 150Hz 이상이어야 한다’는 것은 단지 설계기준일 뿐 150Hz 이내에 공진주파수가 있거나 없거나 진동시험에 미치는 영향은 크게 다른것이 없다. 반대로 전달을 좌우하는 댐핑은 진동시험에 크게 영향을 미친다. 만약 이번 진동시험에서 치구자체의 댐핑이 커서 공진주파수 뒤에 나타나는 전달을 하락(Transmissibility Drop)이 적었다면, 치구 윗부분에서 제어가 가능했기 때문에 실시시험에서 치구의 공진주파수 영역은 무시될 수 있었기 때문이다.

셋째는 ‘컴퓨터 해석상의 유한요소 모델링에 신중을 기해야 한다는 것이다.’ 물론 Z축시험과 같이 번지코드를 사용해서 들어 올리는 것은 컴퓨터 해석상에 적용하기 불가능하기 때문에 이런 경우를 제외하고, 치구와 시험기가 연결되는 부위가 워낙 복잡하기 때문에 유한요소 모델링 과정에서 특별히 조심을 해야한다. 실제로 모델링 과정에서 이 부분의 삼각형 Mesh를 많이 줄인 결과 모델의 첫번째 고유주파수가 10Hz이상 떨어진 적도 있었다. 삼각형 Mesh가 Stiff하다는 것은 알고 있었으나 이 정도까지 큰 영향을 미칠 줄은 몰랐기 때문에 복잡한 재결부위의 모델링에 좀더 세심한 주의를 기울여야 하겠다.

마지막으로 넷째는 ‘진동시험기, 시험치구, 시험장비간의 체결에 주의를 기울여야 한다는 것이다.’ 그 이유는 먼저 볼트 체결에 따라 공진주파수가 달라지는 경우가 발생했기 때문이고, 또 하나는 진동시험도중 볼트가 풀려 진동시험기가 고장날 뻔했기 때문이다.

위에 언급한 것들에 주의를 기울여 대형장비의 진동시험치구를 개발하고, 진동시험을 수행한다면, 많은 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- 1) B. J. Klee, David V. Kimbell and Wayne Tustin, 1971, "Vibration and Shock Test Fixture Design", Tustin Institute of Technology, pp. 1-1, 10-6, 12-4
- 2) 김준업, 윤윤재, 장성조, 김도영, 1993, "T-형상 진동시

험 치구의 동특성 개선을 위한 모우드실험의 응용", 한국음향학회지 Vol. 12 No. 1

- 3) 김도영, 남궁석, 1989, "진동시험 치구의 최적설계 및 제작에 관한 연구(I)", 한국정밀공학회지 제6권 제3호

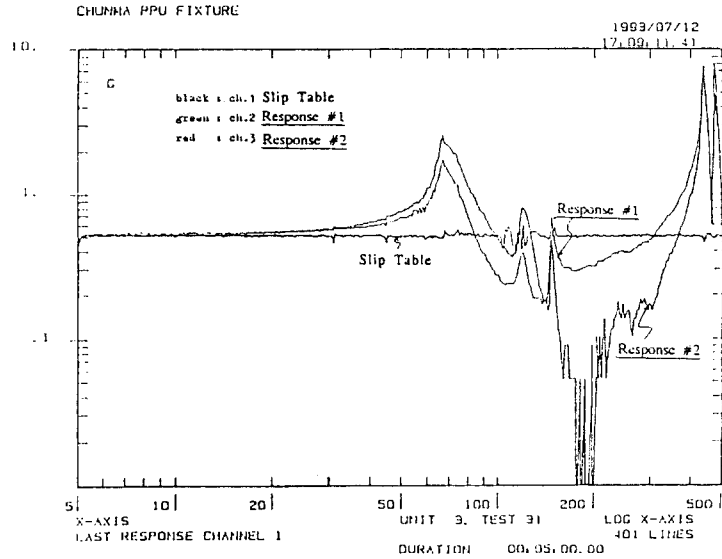


그림 7-1. 예비 공진주파수 탐색시험 결과(X축)

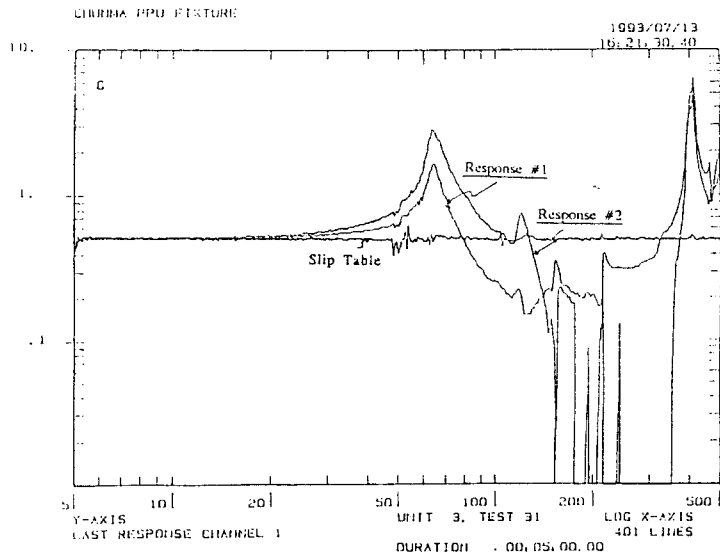


그림 7-2. 예비 공진주파수 탐색시험 결과(Y축)

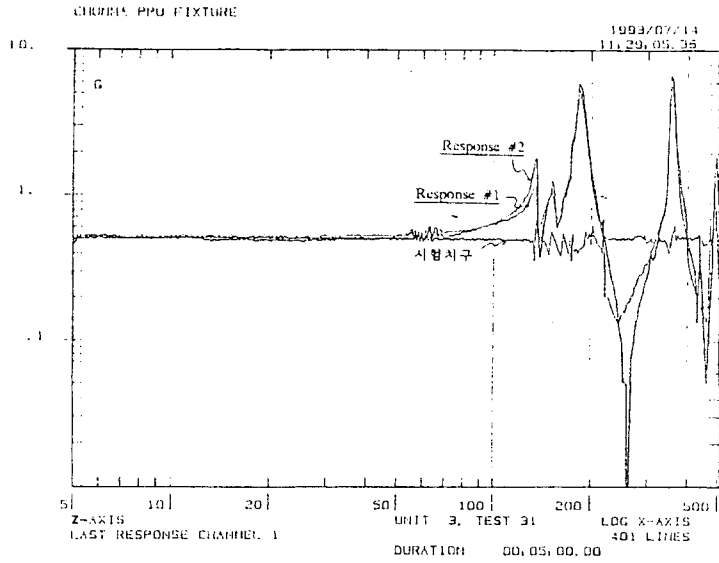


그림 7-3. 예비 공진주파수 탐색시험 결과(Z축)

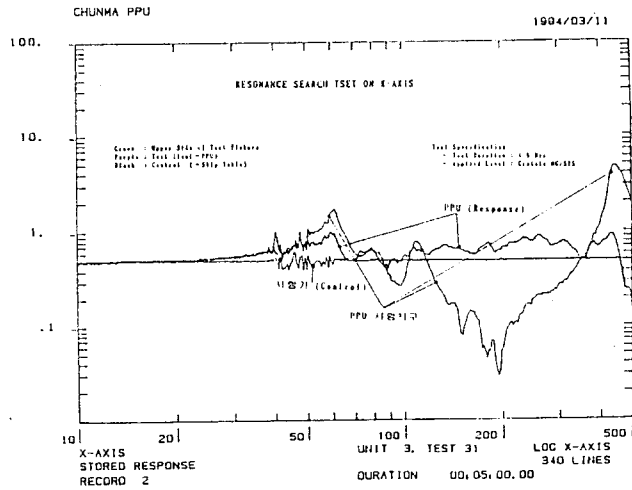


그림 8-1. 공진주파수 탐색시험 결과(X축)

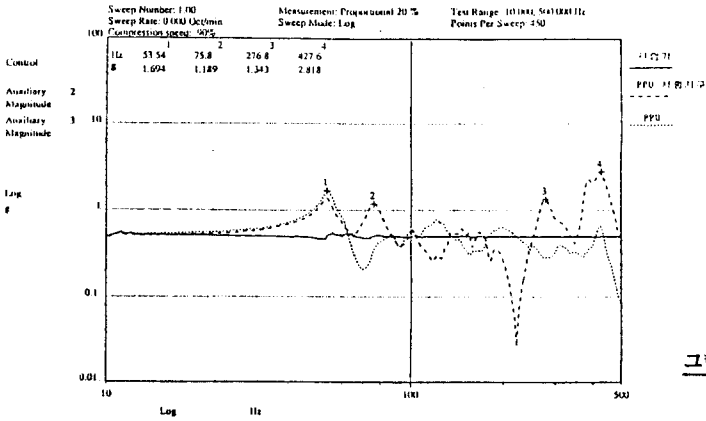


그림 8-2. 공진주파수 탐색시험 결과(Y축)

10 45:33
 Wed Apr 06 1994

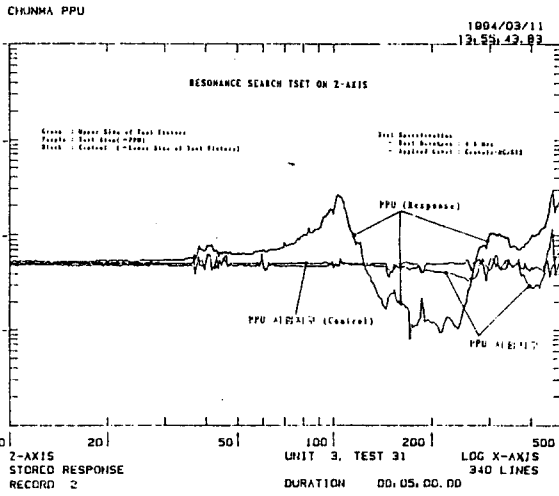


그림 8-3. 공진주파수 탐색시험 결과(Z축)

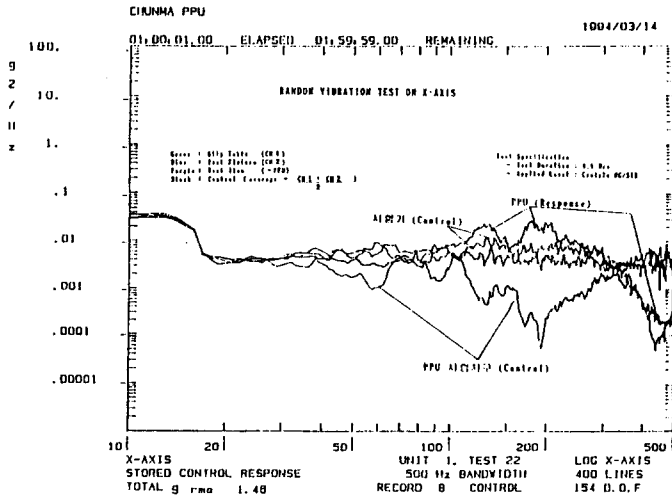


그림 9-1. 랜덤 진동시험 결과(X축)

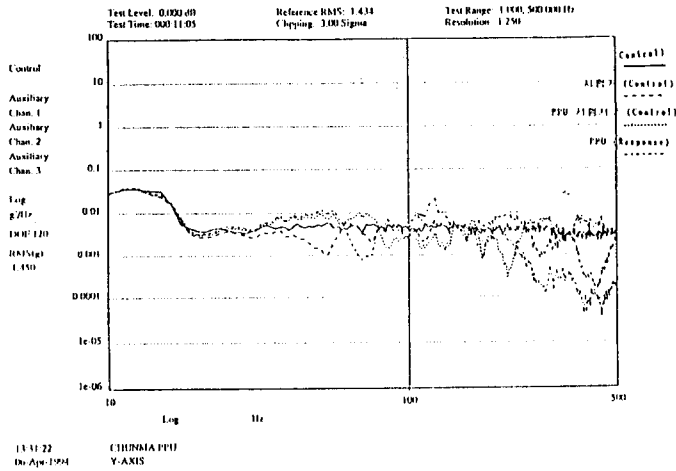


그림 9-2. 랜덤 진동시험 결과(Y축)

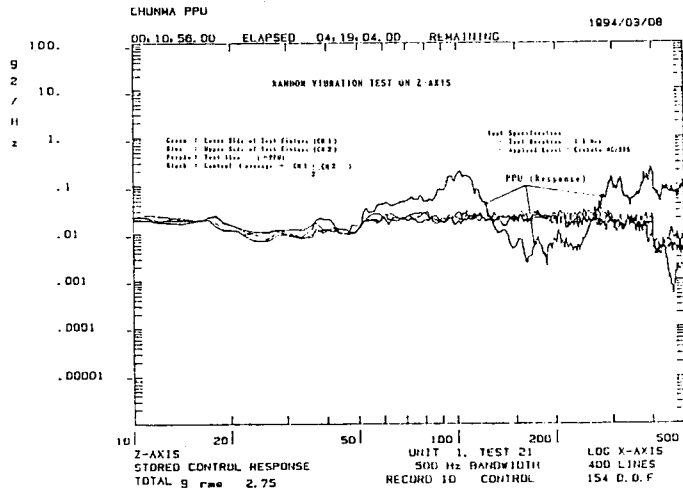


그림 9-3. 랜덤 진동시험 결과(Z축)