

T-형상 진동시험 치구의 동특성 개선을 위한 모우드실험의 응용

Application of Modal Test to Improving the Dynamic Characteristics of T-Type Fixture for Vibration Test

김준엽*, 윤을재*, 장성조* 김도영*

(Jun Yeop Kim, Eul Jae Yoon, Sung Jo Chang, Do Young Kim)

요 약

진동시험 동안 구조물은 진동시험기로 부터 높은 진동에너지를 받게 되는데 공급되는 에너지를 시험물에 전달하기 위해서는 시험물에 따라 다양한 종류의 진동시험치구가 필요하게 된다. 이 중에서 T-형상 진동시험치구는 진동시험축에 대해 3방향으로 시험물을 설치할 수 있고, 형상이 간단하며, 또한 값이 저렴하므로 많은 설계자들은 T-형상 치구를 설계하여 사용한다. 그러나 이 치구는 수직판이 어떤 주파수에서 평판처럼 공진현상을 일으키기 때문에 동역학적으로 설계하기가 어렵다.

본 논문에서는 진동시험치구의 기능을 향상시키기 위해 모우드 시험(Modal Testing) 기법을 사용하는 방법과 시험결과를 근거로 설계변경을 위해 수직보강판, 수평보강판, 그리고 천연 고무패드를 사용하여 이것들이 치구의 동특성에 미치는 영향을 기술하며 그 결과를 치구설계 때 응용 가능하도록 한다.

ABSTRACT

High vibration energy is transmitted to a test structure by a shaker during vibration test. And various kinds of vibration test fixtures according to test structures are required to mechanically couple energy from a shaker into test structures.

T-type fixture, one of these fixtures, permits the test item to be oriented in three direction with respect to the vibration axis and it appears simple and cheap. So many designers design and use it. But this type of fixture is difficult to design dynamically because the vertical panel resonates as a plate at certain frequency.

This paper shows how modal testing is going to be used to improve the function of vibration test fixture and how modification based on modal testing are applied. Also this paper describes the influence of vertical gussets, horizontal gussets and natural rubber pads on the T-type fixture. And the results are applicable to general fixture design.

I. 서 론

환경시험(Environmental Test) 계획의 일환으로 또는 공학적 설계의 측면에서 구조물 또는 그 구성요

소가 실제 상황에서 직면하게 되는 진동환경에 얼마만큼 견디는가를 조사하는 것은 대단히 중요하다.

진동시험 동안 구조물은 진동시험기로 부터 높은 진동에너지를 받게 되는데 공급되는 에너지를 시험물에 전달하기 위해 진동시험치구(Fixture for Vibration Test, 이하 '치구')가 필요하게 된다. 그러나 대부분의 시험자들은 치구의 동특성을 고려하지 않

*국방과학연구소

접수일자: 1992년 10월 12일

고서 치구를 단지 가진기(Exciter 또는 Shaker)와 시험물을 연결하는 보조기구(Adaptor)로만 생각하고자 쉽게 제작하지만 치구의 동특성을 먼저 고려하지 않으면 치구자체의 공진특성으로 인해 시험물은 어떤 주파수에서 과대진동시험(Overtest)이나 과소진동시험(Undertest)을 겪게된다. 그러므로 치구는 시험주파수 범위내에서 시험물의 정적 또는 동적특성에 영향을 최소화 하도록 설계되어야하는 공통점을 갖게된다. 이르기 위해서는 치구에 설치되는 시험물에 상관없이 응답특성이 시험주파수 범위내에서 강제진동을 나타내는 것이 가장 이상적이다. 물론 시험주파수 범위가 5~200Hz, 5~500Hz와 같은 주파수 영역에 대해서 치구는 강제진동을 나타낼 수 있지만 일반적으로 환경시험에서 적용되는 5~2,000Hz 범위내에서는 대부분의 치구가 한 개 이상의 고유진동수를 포함하며 댐핑이 작은 경우에는 대단히 증폭을 야기시키므로 최소한의 무게로 가급적 높은 고유진동수와 낮은 증폭율의 특성을 갖는 치구 설계가 관심의 초점이 된다.

이러한 치구설계의 목적으로 많은 사람들은 이론적 기초에 근거하여 치구를 설계하지만^(1,2) 치구가 진동시험기에 설치되는 조건, 치구를 구성하는 요소들간의 결합방법 - 용접, 볼트 체결 등 - 에 따라 많은 오차가 유발된다. 또한 치구의 형상이 복잡해지면 실험을 통해 얻은 결과와는 상당한 차이를 보여준다.

따라서 본 논문에서는 수직사각관의 양쪽면에 여러개의 시험물을 고정시켜 동시에 진동시험을 할 수 있으며, 시험물의 축을 변화시키기 위해서 숙련된 기술 및 많은 작업시간을 요구하는 가진기와 슬립 플레이트(Slip Plate)와의 조립작업을 수행하는 번거로움 없이도 동일한 치구에서 시험물만을 회전시키므로 수직된 3축의 시험방향에 대해 시험을 할 수 있는 장점때문에 많은 사용자들이 제작하여 사용하지만, 어떤 주파수에서 치구를 구성하고 있는 수직관 및 수평관이 심한 공진을 일으키기 때문에 동역학적으로 설계하기 어려운 T-형상치구의 동특성을 모우드 해석 기법을 이용하여 해석하고자 한다.

이러한 목적으로 T-형상치구를 요소별(수직사각관, 원형수평바닥판, 수직보강판)로 두 세트 제작하여 한 세트는 용접으로 각 요소를 결합하고 또 다른 세트는 각 요소를 볼트로 체결할 수 있도록 제작하여 여러가지 방법에 의한 T-형상치구의 동적특성을 비교, 검토한 후 T-형상치구 설계시 고려되어야 할 중요한 요소들을 제시하고자 한다.

II. 시험물 및 시험장치

그림 1은 각 요소가 용접된 T-형상 치구로 300(mm)×390(mm)×25.4t(mm)인 수직 사각관과 ϕ 415(mm)×25.4t(mm)인 원형수평바닥판이 서로 용접되어 있으며 수직사각관을 보강하기 위해 그림 2의 치수를 갖는 수직보강판이 수직사각관 앞면과 뒷면에 4군데 용접되어 있다. 그리고 모든 재료는 일반적으로 치구제작에 사용되는 알루미늄으로 만들어졌다.

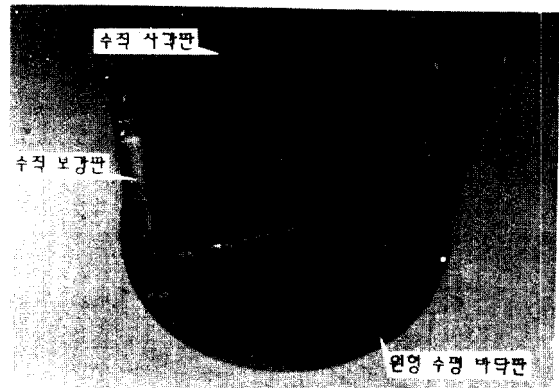


Fig 1. Welded T-Type Fixture under Test

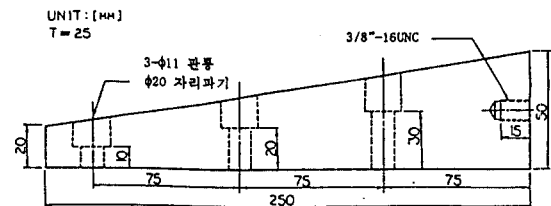


Fig 2. Dimension of Vertical Gusset

먼저 용접된 치구의 동적특성을 모우드실험을 이용하여 파악한 후 동일한 재료 및 치수를 갖는 수직사각관, 원형수평바닥판, 그리고 4개의 수직보강판을 각각 분리 제작하여 요소들을 여러가지 조건들에 대해 볼트를 이용하여 체결하면서 그 특성을 평가하였다.

원형수평바닥판은 진동시험기에 장착되면 체결볼트에 의해 제한을 받게 되므로 주로 수직 사각관을 아래의 경우 1, 경우 2, 경우 3에 대해 적용시켜 용접된 치구와 볼트체결된 치구의 동적특성을 모우드실험을 통해 상호 비교, 조사하였다.

경우 1: 수직보강판 설치에 의한 영향(용접체결 및

볼트체결의 경우)

경우 2: 복합재료(탄소섬유강화플라스틱:CFRP) 수평보강판 설치에 의한 영향

경우 3: 천연고무패드 삽입에 의한 영향

특히, 본 시험의 수행을 위해 PCB 회사의 GK291 B01 임팩터 햄머를 사용하여 5~2000 Hz 범위에 대해 전달함수를 측정하였다. 또한 시험데이터 획득³⁾ 및 분석⁴⁾은 HP3565S 시스템과 SDRC I-DEAS T-das 소프트웨어를 사용하여 그 결과를 얻었다. 시험을 수행하기 위해 설정된 측정점 및 좌표계가 그림 3에 나타나 있다.

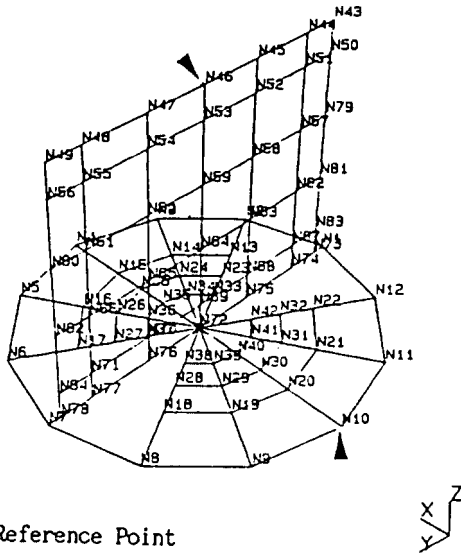


Fig 3. Modal Test Geometry

먼저 기준가진점(Reference Point)을 그림 3의 노우드점 10번과 46번의 두 곳에 정하고서 각 기준점에 대해 PCB 회사의 모델 309A 가속도계를 옮기면서 각 측정점에 대한 전달함수를 측정하였다.

모든 경우 자유경계조건에서 시험을 수행하기 위해 유연한 번지(Bungee) 코드에 치구를 매달고서 시험을 수행하였다.

시험물 및 시험장치가 설치된 모습이 그림 4에 나타나 있다.

Ⅲ. 시험수행방법 및 결과

본 시험은 일반적으로 환경시험에서 요구하는 5~2,000Hz 주파수 범위에 대해 수행하였다. 다중임



Fig 4. Experimental Apparatus for Modal Test

력(Polyreference) 기법을 사용하기 위해 두 곳 (-10Z, +46X)을 기준 가진점으로 정하고서 84곳의 측정점에 대해 전달함수를 측정하였다.

수직사각관에 대해서는 X축 방향으로 모든 전달함수(Accelerance: 가속도/힘)를 측정하였으며 원형수평바닥판에 대해서는 Z축방향을 모든 전달함수를 측정하였다. 또한 치구의 Y축 방향은 X축과 Z축 방향의 운동과 비교될 때 상대적으로 작은 운동이기 때문에 수행되지 않았다.

경우 1: 수직보강판 설치에 의한 영향(용접이음 및 볼트체결의 경우)

수직보강판에 의한 T-형상치구의 영향을 조사하기 위해, 수직사각판과 원형수평바닥판을 6개의 볼트(3/8"-16 UNC)로 체결한 후 수직사각판의 4곳에 수직보강판을 볼트로 체결하고서 모우드 시험을 수행한 후 치구의 동특성변화에 대해 조사하였다. 또한 정해진 가진기의 용량으로 시험할 수 있는 시험물의

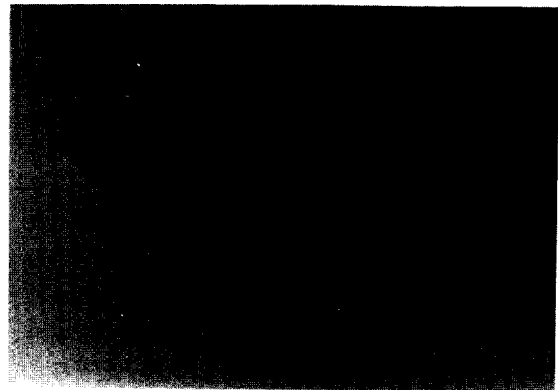


Fig 5. Vertical Gussets

무게를 증가시키기 위해 치구의 무게를 최소화 하는 것이 중요하므로 강도가 크면서 무게가 작은 성질을 갖는 복합재료(유리섬유강화플라스틱 : GFRP)로 수직보강판을 제작하고 동일한 치수를 갖는 알루미늄 수직보강판을 제작하여 각각에 대해 모우드시험을 수행하므로써 수직보강판이 T-형상치구에 미치는 영향과 복합재료 수직보강판의 사용 타당성에 대해 조사하였다.

사용된 수직보강판이 그림 5에 나타나 있다.

수직보강판에 의한 영향을 조사하기 위해 먼저 수직보강판이 설치되지 않은 T-형상 치구에 대해 모우드 시험을 수행한 후, 알루미늄 및 복합재료 수직보강판을 3/8"-16UNC 볼트로 280in-lb의 정격 토크로 체결한 후 각각에 대해 모우드 시험을 수행하였다.

시험결과, 수직보강판이 없는 T-형상치구는 시험 주파수 범위내에서 노우드점 10번과 46번의 가진점 전달함수(Driving Point Frequency Response Function)에서 각각 5개와 4개의 고유진동수가 측정되었다.

대표적인 전달함수가 그림 6에 나타나 있다.

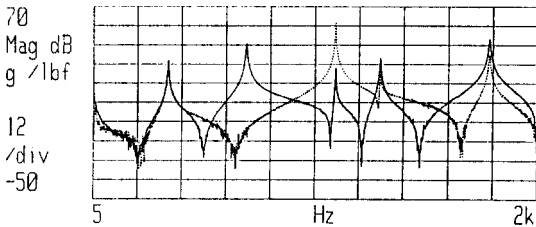
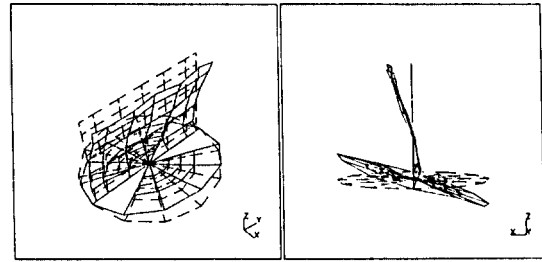


Fig 6. Driving Point Frequency Response Function (Solid Line : Node Point 10, Dot Line : Node Point 46)

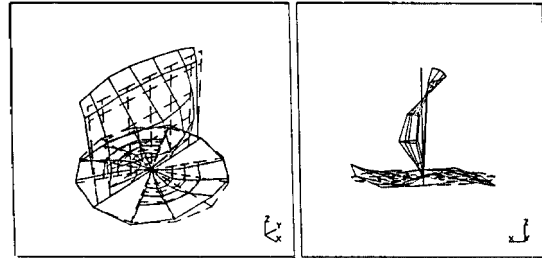
그림 7은 수직보강판이 없는 T-형상치구의 모우드 시험을 통해 얻은 고유진동수와 그때의 모우드 형상을 나타낸다.

그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 첫번째와 두번째 모우드 형상은 치구가 진동시험기에 설치되었을때 원형수평바닥판의 모우드로 인해 진동시험기에 연결시켜주는 볼트에 반복되는 인장과 압축응력을 야기시키며 특히, 첫번째 모우드는 수직사각판 및 원형수평바닥판의 연성 모우드(Coupled Mode)로서, 치구 설계 및 구조물 설계시 중요한 첫번째 모우드 제어에 많은 어려움을 준다.

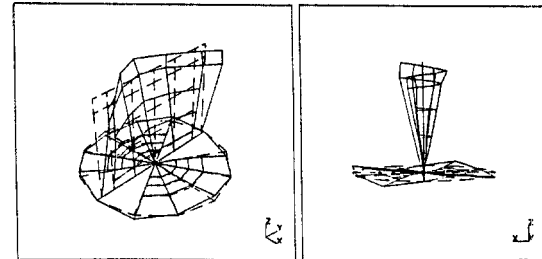
그리고 첫번째, 세번째, 네번째 모우드에서는 수직



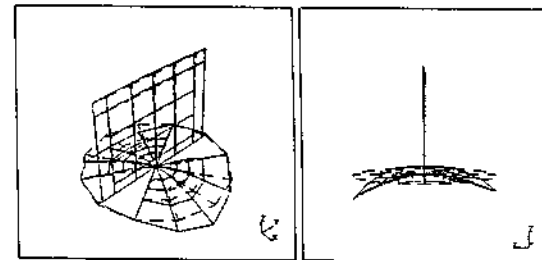
(a) 1st Mode Shape (343 Hz)



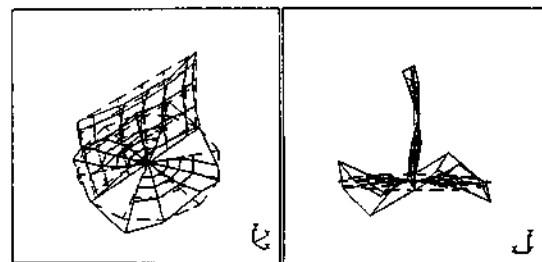
(b) 2nd Mode Shape (695 Hz)



(c) 3rd Mode Shape (1095 Hz)



(d) 4th Mode Shape (1297 Hz)



(e) 5th Mode Shape (1785 Hz)

Fig 7. Mode Shapes of T-Type Fixture (Without Vertical Gussets)

사각관의 모우드로 인해 과대진동시험을 야기시킬 수도 있다. 또한 두번째 모우드는 원형수평바닥판의 순수압힘 모우드로서 단순히 X축 방향으로만 가진시켜서는 이 모우드를 구별할 수 없으며 Z축 방향으로 가진하므로써 이 모우드를 구할 수 있다. 세번째와 네번째 모우드에서는 주로 수직 사각관의 유연모우드(Flexure Mode)만이 관찰되며 "U"자 형상의 모우드형상으로 수직사각관에 설치되는 시험물에 높은 압힘 응력을 받게 한다.

여기에서 알 수 있는 바와 같이 원형수평바닥판 모우드는 진동시험기에 고정되면 많은 제한을 받게 될 것이며 주로 수직사각관의 유연모우드가 지배적임을 알 수 있다. 이러한 유연모우드를 줄이기 위해 수직사각관에 4개의 수직보강관(알루미늄 및 복합재료)을 설치하여 모우드시험을 수행한 바, 예상했던 것처럼 모우드 형상에는 변화를 줄 수 없었다. 또한 전달율에도 거의 변화가 없었다. 단지 수직보강관의 설치로 인해 수직사각관의 모우드가 지배적인 첫번째와 네번째 고유진동수가 상당히 상승하는 효과를 얻을 수 있었다.(그림 8참조)

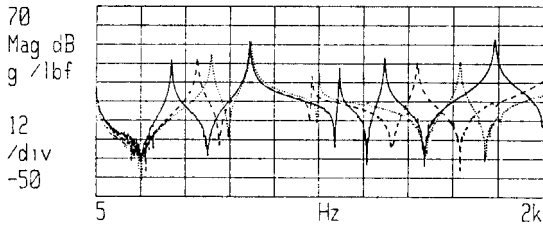


Fig 8. Comparison between With and Without Vertical Gusset (at node point 10)
(Solid Line : Without Gussets, Dashed Line : GFRP Gussets, Dot Line : Al Gussets)

그림 8은 수직보강관이 있는 경우(알루미늄 및 복합재료)와 그렇지 않은 경우 전달함수를 나타낸다.

알루미늄 수직보강관의 경우 첫번째 고유진동수는 343Hz에서 521Hz, 네번째 고유진동수는 1297Hz에서 1633Hz로 각각 51.8%, 26% 상승하였다. 복합재료 수직보강관의 경우도 첫번째와 네번째 고유진동수가 343Hz에서 457Hz, 1297Hz에서 1443Hz로 각각 33%, 11.3% 상승하는 효과를 얻을 수 있었다. 그리고 알루미늄 수직보강관이, 복합재료 수직보강관에 비해 모든 주파수 영역에서 고유진동수의 상승에 더 효과적임을 알 수 있다.

수직사각관, 원형수평바닥판, 알루미늄수직보강관을 볼트로 연결했을 경우와 용접된 치구를 모우드 실험을 통해 비교한 바, 용접된 경우가 볼트로 체결된 경우에 비해 고유진동수를 상승시키는데 더 큰 효과가 있다. 또한 주파수가 높을수록 그 상승율은 증가함을 알 수 있다. 그러나 모우드 형상은 수직보강관이 설치되지 않았을 경우와 거의 유사하였고 전달율(그림 9참조)도 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

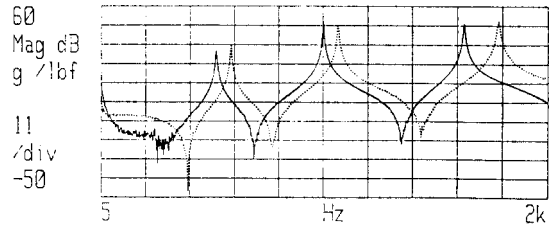


Fig 9. Comparison between Bolted and Welded Fixture (at node point 46)
(Solid Line : Bolted Fixture, Dot Line : Welded Fixture)

표 1은 용접된 치구, 수직보강관이 없는 볼트체결 T-형상치구와 수직보강관이 설치되었을 경우 각 모우드에서 고유진동수를 상호 비교하여 나타내었다.

Table 1. Natural Frequencies of T-Type Fixture by Various Gussets

Conditions	Mode No.	Natural Frequency [Hz]	Damping [%]
Welded Fixture (With Al Vertical Gussets)	1	589	3.223
	2	677	1.277
	3	1073	0.376
	4	1785	0.354
Bolted Fixture (Without Vertical Gussets)	1	343	3.646
	2	695	1.011
	3	1095	0.526
	4	1297	1.693
	5	1785	0.643
Bolted Fixture (With Al Vertical Gussets)	1	521	0.533
	2	701	0.319
	3	1007	0.485
	4	1633	1.690
Bolted Fixture (With GFRP Vertical Gussets)	1	457	0.693
	2	693	0.523
	3	973	0.451
	4	1443	2.424

경우 2: 복합재료(탄소섬유강화 플라스틱:CFRP) 수평보강판 설치에 의한 영향.

경우 1에서 얻은 모우드 형상 및 결과를 고려할 때 수직보강판은 고유진동수의 상승효과만을 얻을 수 있었으며 전달율의 감소에는 큰 효과가 없음을 알 수 있다. 또한 T-형상 치구는 주로 수직사각판의 유연모우드가 지배적이며 이것을 줄이기 위해서 T-형상치구의 수직사각판의 양쪽면에 그림 10에서 처럼 6개의 복합재료 수평보강판을 시험물을 체결하는 볼트구멍을 따라 설치하여 모우드 실험을 수행하였다.



Fig 10. Horizontal Gussets

경우 1에서의 목적과 마찬가지로 고유진동수에서 전달율을 감소시키며 치구의 무게를 줄이기 위해 CFRP 복합재료 수평보강판 23(mm)×300(mm)×18t(mm)을 사용하였다. 시험결과 수평보강판도 모우드 형상에는 거의 영향을 줄 수 없었다. 고유진동수에 있어서도 첫번째 및 두번째 고유진동수는 변화가 없었으며 수직사각판의 유연모우드가 지배적인 세번째 및 네번째 고유진동수에 많은 영향을 줄 수

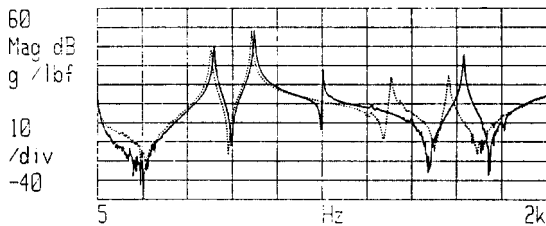


Fig 11. Comparison between With and Without Horizontal Gussets (at node point 10)
(Solid Line : Without Horizontal Gussets, Dot Line : With Horizontal Gussets)

있음을 알 수 있다. 특히 세번째 고유진동수는 1007 Hz에서 1309Hz로 30% 정도 상승되는 효과를 얻을 수 있었다.(그림 11참조)

그러나 경우 2에서도 경우 1의 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 첫번째 모우드는 수직사각판과 원형수평바닥판의 연성 모우드(Coupled Mode)로 인해 고유진동수 및 전달율의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

경우 3: 천연고무패드 삽입에 의한 영향

경우 1, 경우 2로 미루어보아 T-형상치구의 첫번째 모우드의 동특성을 개선시키기 위해서는 재료의 두께 변화나 재질의 변화가 대단히 중요한 인자임을 알 수 있다. 그러나 재료의 두께 변화는 시험치구의 무게를 증가시키므로서 설치 할 수 있는 시험물의 무게를 감소시킬 뿐 전달율의 감소에는 큰 효과가 없다. 따라서 경우 3에서는 첫번째 모우드의 전달율을 감소시키기 위해 수직사각판, 원형수평바닥판 그리고 수직보강판의 체결부위에 그림 12처럼 두께 5mm, 폭 23mm 고무패드를 각각 삽입하여 모우드시험을 수행하였다.

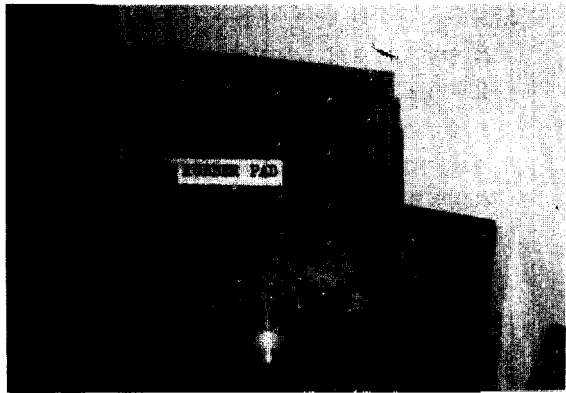


Fig 12. T-Type Fixture in which Rubber Pads are inserted

그림 12은 고무패드가 있을 때와 없을 때의 전달함수를 비교하여 나타낸다.

그림 13에서 알 수 있는바와 같이 치구구성 요소들 간의 고무패드 삽입으로 인해 댐핑의 증가로 첫번째 모우드에서 전달율이 25dB 정도 감소되었으며 관심 주파수 영역인 5~2000Hz 사이의 전 영역에 걸쳐 20dB 이상의 전달율의 감소효과를 얻을 수 있었다.

삼입고무패드는 진동으로 인해 야기되는 열과 온도변화로 인해 손상을 입기 쉬우며 주파수에 따라 불성치가 변하는 특성을 갖고 있기 때문에 최근 진동제어(Vibration Control)의 목적으로 설계, 생산되어 사용되는 여러가지 구속층댐핑재료(Constrained Layer Damping)^{5),6)}를 사용 주파수 및 온도범위에서 선택하여 적용하므로써 더욱 많은 전달율의 감소효과를 가져올 수 있다.

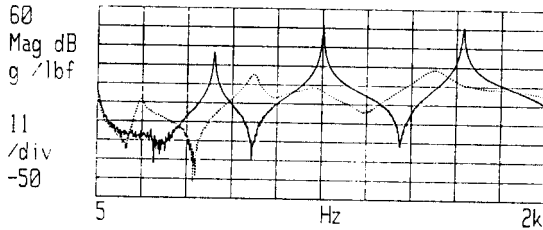


Fig 13. Comparison between With and Without Rubber Pads (at node point 46)
(Solid Line : Without Rubber Pads, Dot Line : With Rubber Pads)

IV. 결 론

1. 모우드 해석의 결과, 특히 가사화된 모우드 형상을 이용하므로써 진동시험치구의 동특성을 가장 효과적으로 도출, 개선시켜 진동시험 치구의 최적 설계가 가능하다.
2. 수직보강판의 설치는 T-형상치구의 첫번째 고유진동수를 상승시키는데 효과가 있으며 복합재료 보다는 알루미늄 수직보강판이 고유진동수 상승에 더 큰 효과가 있다. 또한 복합재료 수직보강판의 경우, 고유진동수에서 전달율의 감소에는 큰 효과를 기대할 수 없다.
3. 치구 구성요소가 용접된 경우가 볼트로 체결된 경우에 비해 관심주파수 영역에서 전체적으로 고유진동수의 상승효과를 가져오나 첫번째 고유진동수의 상승효과는 크지 않고 고차 모우드의 고유진동수를 상승시키는데 효과적이다.
4. T-형상치구에 수평보강판 설치는 저차모우드는 거의 영향을 줄 수 없으나 수직 사각판의 굽힘모우드인 세번째 고유진동수를 상승시키는데 효과적이다. 또한 Y축 및 Z축 방향의 굽힘모우드가 연성된 네번째 모우드는 Y축 뿐만 아니라 Z축 방향으로도 Gusset를 설치하므로써 동특성

을 개선할 수가 있다.

5. 치구설계시 구성요소간에 적절한 구속층댐핑재료의 사용은 관심주파수영역에서 전달율의 감소효과를 얻는데 대단히 효과적이다.

참 고 문 헌

1. Klee, Kimball and Tustin, Vibration and Shock Test Fixture Design, Tustin Institute of Technology, 1971, PP10-1~10-42
2. 김도영, 남궁석, "진동시험치구 최적설계에 관한 연구 (I)," 한국정밀 공학회, 제6권, 3호, 1989년.
3. Hewlett Packard, HP3565S System Reference, 1988.
4. SDRC, SDRC I-deas Tdas User's Manual, 1988.
5. G.R. Tomlinson, "The Use of Constrained Layer Damping in Vibration Control," Proceeding of the Conference held at the Univ. of Liverpool, 1988, PP99-107.
6. A.D. Nashif and T.M. Lewis, "Data Base of the Dynamic Properties of Material," Sound and Vibration, July 1991.

▲김 준 업



1963년 1월 27일생
1985년 2월 : 부산대학교 기계설
계학과 졸업(공학사)
1987년 2월 : 부산대학교 기계공
학과 졸업(공학석사)
1987년 2월 ~ 현재 : 국방과학연
구소 근무

▲윤 울 재



1955년 11월 6일생
1980년 8월 : 서강대학교 전자공
학과 졸업(공학사)
1982년 ~ 현재 : 국방과학연구소
근무

▲장 성 조



1953년 1월 17일생
1973년 2월 : 경북대학교 기계공
학과 졸업(공학사)
1989년 2월 : 충남대학교 기계공
학과 졸업(공학석사)
1974년 ~ 현재 : 국방과학연구소
근무

▲김 도 영



1940년 6월 20일생
1961년 ~ 1964년 : 해군사관학교
졸업(이학사)
1973년 ~ 1975년 : Defense Tech-
nical School, West
Germany 졸업
1978년 2월 : 연세대학교 기계공
학과 졸업(공학석사)
1991년 2월 : 충남대학교 기계공
학과 졸업(공학박사)

1973년 ~ 현재 : 국방과학연구소 근무