

〈技術論文〉

랜덤진동제어에서 치구성능향상을 위한 기준스펙트럼의 최적화에 대한 연구

김준엽* · 정의봉**

(1994년 3월 23일 접수)

A Study on Optimization of Reference Spectrum for Improvement of Fixture Performance in Random Vibration Control

Jun-Yeop Kim and Weui-Bong Jeong

Key Words : Environmental Test (환경시험), Random Vibration Control (랜덤 진동 제어), Reference Spectrum (기준스펙트럼), Fixture (치구)

Abstract

This paper proposes a method for determination of optimal reference spectrum in random vibration control. The least square method is used to minimize the spectrum deviation between the specified reference spectrum and spectra at the specimen-mounted points. This method needs only the measured FRF's at the control point and specimen-mounted points in pre-vibration test. Using the proposed method as reference spectrum, it is possible to easily predict spectra at the specimen-mounted points, and also to reduce overttest resulting from dynamic characteristics of shaker and fixture. This method is shown through theoretical and experimental results to be an effective method.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 환경시험 (environmental test)에 대한 관심이 증대되고 있으며 환경시험 중에서도 진동시험은 각종장비나 부품이 비행 또는 수송 등 실제상황에서 겪게되는 진동환경에 얼마만큼 견디는지 여부를 확인하고, 예상되는 동적하중에 의한 오동작이나 성능저하가 일어나지 않는지를 확인하기 위해 방위산업, 우주산업, 항공산업을 중심으로 발전하고 있다.⁽¹⁾ 진동시험 중에서도 정현파 진동시험 (sinusoidal vibration test)은 실제 진동현상과는 많이 다르기 때문에 실험실내에서만

행해지고 있으며, 요즘은 대부분의 진동시험규격들은 랜덤진동시험 (random vibration test)을 요구하고 있는 추세이다.

랜덤진동시험에서는 시험물부착점들에서의 응답 가속도스펙트럼이 시험규격에 정해진 기준스펙트럼 (specified reference spectrum)과 일치하도록 제어하는 것이 이상적이지만 가진기 자체의 동특성, 치구 (fixture) 및 시험물의 공진현상으로 인하여 시험물은 주파수에 따라 과대시험 (overttest) 또는 과소시험 (undertest)을 겪게 된다. 이와같은 가진기 및 시험물간의 공진현상으로 인한 문제점에 관해 많은 연구가 이루어졌으며,⁽²⁻⁵⁾ 이러한 문제점들이 진동시험 및 모드실험에 미치는 영향에 관한 연구가 이루어지고 있다.^(6,7) 특히, Sweitzer⁽⁸⁾은 시험주파수 범위 (10 Hz~1 kHz) 내에서 치구의 고유진동

*정회원, 국방과학연구소 환경시험실

**정회원, 부산대학교 정밀기계공학과 및 기계기술연구소

수가 존재하지 않는 강체치구(rigid fixture) 위에 강체시험물을 설치하여 진동시험을 수행할 경우, 시험물의 공진현상으로 인한 기계적 임피던스 영향을 수정하기 위해 기계적 임피던스수정법(mechanical impedance correction technique)을 이용하여 제어점에서의 구동스펙트럼(drive spectrum)을 구하는 방법을 제시하였다. 이와같이 치구가 시험주파수 범위내에서 강체운동을 나타낼 경우에는 시험물 부착점의 위치에 관계없이 동일한 기계적 임피던스가 얻어지므로 기계적 임피던스 수정법을 사용하여 시험물 부착점들에서의 응답 속도스펙트럼이 시험규격에 정해진 기준스펙트럼과 같아지도록 제어 가능하다. 그러나 일반적으로 환경진동시험의 경우에는 시험주파수 범위(5 Hz~2 kHz)내에 시험물의 고유진동수가 여러개 존재할 뿐만 아니라 치구 자체의 고유진동수도 여러개 존재하는 다자유도 시스템이므로 어떤 특정 제어점에 대한 시험물 부착점들에서의 응답 가속도스펙트럼이 위치마다 달라지게 된다.

따라서 본 논문에서는 치구 및 시험물의 고유진동수가 시험주파수 범위 내에 여러개 존재하는 경우 진동테이블 가속도스펙트럼에 대한 치구 위의 제어점 및 시험물 부착점들에서의 전달함수를 측정하여 시험물부착점들에서의 응답 가속도스펙트럼이 시험규격에 정해진 기준스펙트럼에 가장 가까운 운

동을 나타내기 위한 제어점에서의 최적 기준스펙트럼을 최소자승법(least square method)의 원리를 적용하여 구하는 방법을 제안하였다.

본 방법은 시험규격에서 정해진 기준스펙트럼으로 제어할 경우와 제안한 기준스펙트럼으로 제어할 경우, 시험물부착점들에서의 응답 가속도스펙트럼을 시뮬레이션을 통해 간단히 예측할 수 있으므로 제안 전·후 결과를 쉽게 비교, 확인할 수 있고 실험을 통해 이를 증명하여 제안한 방법의 유용성을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 랜덤진동시험

랜덤진동제어에서는 기준스펙트럼이라고 하는 파워스펙트럼 밀도함수(power spectral density function; PSD 또는 간단히 스펙트럼)를 사용한다. 이 경우 제어 계통도는 Fig. 1에 표시한 것과 같으며 진동테이블 또는 치구에 설치한 제어가속도계로부터의 출력스펙트럼을 기준스펙트럼과 비교하여 그 차이를 작게하는 형태로 feedback 한다.⁽⁹⁾

선형계의 랜덤진동해석의 모델로서 몇 개의 임의의 점 j 에 랜덤 가우시안 노이즈(random gaussian noise)로 가진하는 경우, 점 l 의 응답스펙트럼은

$$\{S_{x_l}(w_k)\} = \sum_{j=1}^{N_j} [|H_{lj}(w_k)|^2] \cdot \{S_{f_j}(w_k)\} \quad (1)$$

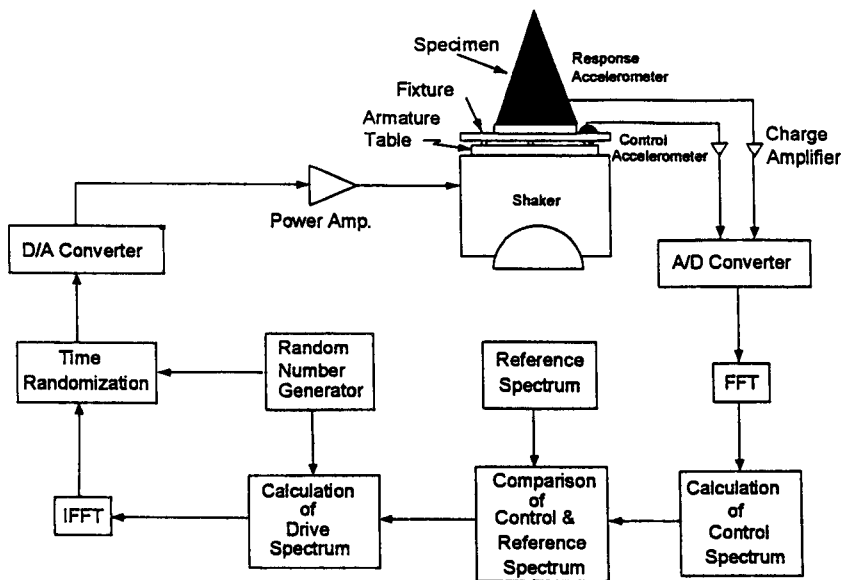


Fig. 1 Block diagram of random vibration control system

로 주어진다. 여기서,

- $\{S_{x_i}(w_k)\}$: 점 l 의 응답 변위스펙트럼 벡터
- $\{S_{f_j}(w_k)\}$: 점 j 의 가진력스펙트럼 벡터
- $[H_{ij}(w_k)]$: 시스템 전달함수행렬
- $l=1, 2, \dots, N_r$: 응답점의 수
- $j=1, 2, \dots, N_f$: 가진점의 수
- $k=1, 2, \dots, N_w$: 이산주파수의 수

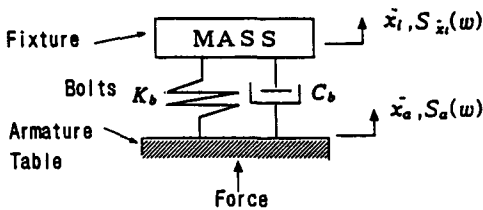
이다.

일반적으로 진동테이블이 시험주파수 범위내에서 diaphragming 모드⁽¹⁰⁾ (또는 oil canning 모드)가 일어나지 않는 가진기의 경우, 진동테이블은 강제 모드를 나타내기 때문에 진동테이블과 치구를 연결하는 여러개의 볼트에 동일한 가진력이 전달되는 단일입력 시스템으로 고려될 수 있다. 또한 랜덤진동시험에서는 Fig. 2에서처럼 시스템의 입력에 대한 정보로서 가진력스펙트럼 대신에 제어 가속도계로부터의 제어 가속도스펙트럼(또는 진동테이블 가속도스펙트럼) $S_a(w)$ 에 대한 임의점에서의 응답 가속도스펙트럼 $S_{\dot{x}_i}(w_k)$ 을 측정한다. 이 경우 식 (1)은 식(2)로 표현될 수 있다.

$$\{S_{\dot{x}_i}(w_k)\} = [|H_i(w_k)|^2] \cdot \{S_a(w_k)\} \quad (2)$$

식(2)에서 임의점 응답 가속도스펙트럼 $S_{\dot{x}_i}(w_k)$ 를 관심을 갖고 있는 1개의 제어점 응답 가속도스펙트럼 $S_c(w_k)$ 와 시험물 부착점 응답 가속도스펙트럼 $S_{s_i}(w_k)$ 로 분리하여 표현하면

$$\left\{ \begin{matrix} S_c(w_k) \\ \dots \\ S_{s_i}(w_k) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} |H_c(w_k)|^2 \\ \dots \\ |H_{s_i}(w_k)|^2 \end{matrix} \right\} S_a(w_k) \quad (3)$$



- $x_a(w)$: Acceleration at armature table
- $x_i(w)$: Acceleration at fixture
- $S_a(w)$: Control acceleration spectrum at armature table
- $S_{x_i}(w)$: Response acceleration spectrum at fixture
- K_b : Equivalent spring constant
- C_b : Equivalent damping coefficient

Fig. 2 Vibration test model

이다. 여기서,

- $H_c(w_k)$: 제어점 전달함수
- $H_{s_i}(w_k)$: 시험물 부착점 전달함수
- $i=1, 2, \dots, N_s$: 시험물 부착점 수

이다.

2.2 최적 기준스펙트럼의 유도

랜덤진동시험시 시험물 부착점에서 응답가속도스펙트럼은 치구 및 시험물의 공진현상으로 인하여 시험규격에 정해진 기준스펙트럼과 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 목적함수는 시험규격에 정해진 기준스펙트럼과 시험물 부착점에서의 응답가속도스펙트럼의 차이를 최소화하는 것으로 이것을 최소자승법으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } J &= \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{N_s} (S_{s_i}(w_k) - S_{ref}(w_k))^2 \\ &= \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{N_s} (|H_{s_i}(w_k)|^2 \cdot S_a(w_k) \\ &\quad - S_{ref}(w_k))^2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

- J : 목적함수
- $S_{s_i}(w_k)$: 시험물 부착점에서의 응답 가속도스펙트럼 [G^2/Hz]
- $S_{ref}(w_k)$: 시험규격에 정해진 기준스펙트럼 [G^2/Hz]

그런데 목적함수는 진동테이블 가속도스펙트럼 $S_a(w_k)$ 의 함수이므로 목적함수를 최소화하는 $S_a(w_k)$ 는

$$\frac{\partial J}{\partial S_a(w_k)} = 0 \quad (5)$$

로부터 구해지며, 이 때 얻어진 $S_a(w_k)$ 를 제안전의 $S_a(w_k)$ 와 구분하기 위해 $S_{ma}(w_k)$ 로 두면

$$S_{ma}(w_k) = \frac{S_{ref}(w_k) \cdot \sum_{i=1}^{N_s} |H_{s_i}(w_k)|^2}{\sum_{i=1}^{N_s} |H_{s_i}(w_k)|^4} \quad (6)$$

이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 제어점에서의 최적 기준스펙트럼 $S_{mc}(w_k)$ 는

$$\begin{aligned} S_{mc}(w_k) &= |H_c(w_k)|^2 \cdot S_{ma}(w_k) \\ &= \frac{S_{ref}(w_k) \cdot |H_c(w_k)|^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_s} |H_{s_i}(w_k)|^2}{\sum_{i=1}^{N_s} |H_{s_i}(w_k)|^4} \end{aligned} \quad (7)$$

로 된다.

2.3 응답 가속도스펙트럼의 계산

2.3.1 기존방법에 의한 스펙트럼

일반적으로 랜덤진동시험에서는 제어하고자 하는 한점의 가속도계를 제어 가속도계로 정하고서 제어점에서의 가속도스펙트럼 $S_c(w_k)$ 가 시험규격에 정해진 기준스펙트럼 $S_{ref}(w_k)$ 가 되도록 제어한다. 즉,

$$S_c(w_k) = S_{ref}(w_k)$$

이다. 이 경우 진동테이블 가속도스펙트럼 $S_a(w_k)$ 는

$$S_a(w_k) = \frac{S_c(w_k)}{|H_c(w_k)|^2} = \frac{S_{ref}(w_k)}{|H_c(w_k)|^2} \quad (8)$$

이다. 그러므로 시험물 부착점들에서의 응답가속도스펙트럼은 식(3)과 식(8)로부터

$$\begin{aligned} S_{s_i}(w_k) &= |H_{s_i}(w_k)|^2 \cdot S_a(w_k) \\ &= \frac{|H_c(w_k)|^2}{|H_c(w_k)|^2} \cdot S_{ref}(w_k) \end{aligned} \quad (9)$$

으로 표현할 수 있다.

2.3.2 제안방법에 의한 스펙트럼

제안한 방법으로 제어할 경우 시험물 부착점들에서의 응답 가속도스펙트럼은 식(3)과 식(6)으로부터

$$\begin{aligned} S_{ms_i}(w_k) &= |H_{s_i}(w_k)|^2 \cdot S_{ma}(w_k) \\ &= \frac{S_{ref}(w_k) \cdot |H_{s_i}(w_k)|^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_s} |H_{s_i}(w_k)|^2}{\sum_{i=1}^{N_s} |H_{s_i}(w_k)|^4} \end{aligned} \quad (10)$$

으로 표현된다.

3. 진동시험 결과

3.1 전달함수의 측정

랜덤진동제어시 제어점에서의 제안한 기준스펙트럼을 구하기 위해서는 치구 위의 제어점 및 시험물 부착점들에서의 전달함수를 먼저 측정해야 한다. 측정에 사용된 치구는 Fig. 3과 같은 제원을 갖는 치구로서 원추형(corn type)의 시험물(Fig. 1참조)

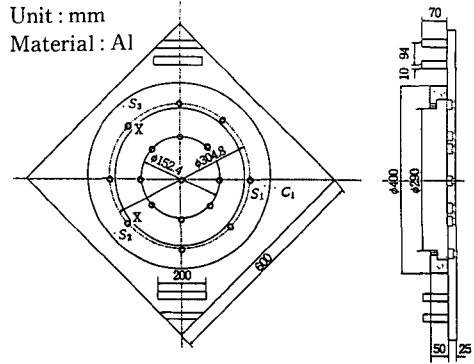


Fig. 3 Dimensions of fixture

을 고정시키기 위해 치구위에 8개의 볼트로써 체결된다. 전달함수를 측정하기 위해 진동테이블에 1개의 제어 가속도계를 설치한 후 치구를 15개의 볼트(3/8"-16 UNC, 길이 50 mm) (원래는 17개의 볼트로 체결되나 X 표시된 위치의 2개 볼트가 설치 위치 불량으로 15개로써 체결)로써 정격 토크 31.64 N·m로 체결하였다. 그리고 치구 위의 1곳을 제어점("C1"으로 표시)으로 설정하고 시험물이 설치될 위치 중에서 3곳을 시험물 부착점("S1", "S2", "S3"로 표시)으로 설정하였다.

랜덤진동제어를 위해 10 Hz~2 kHz 범위에서 0.001 G²/Hz의 일정한 크기의 낮은 진동레벨로써 진동테이블 가속도스펙트럼에 대한 제어점 및 시험물 부착점들에서의 전달함수를 측정하였다. 측정시스템은 Fig. 4와 같이 구성하였으며 전달함수를 구하기 위해 디지털 가진제어 시스템으로부터 제어된 신호를 직접 HP3565S 신호처리 시스템으로 받아들인 후 LMS CADA-X FMON 소프트웨어를 사용하였다. 실험의 오차를 줄이기 위해 30번 평균하였으며 이때 사용된 주파수 분해능은 5 Hz였다.

측정된 제어점 및 시험물 부착점들에서의 전달함수는 Fig. 5와 같다.

3.2 최적 기준스펙트럼 계산

최적 기준스펙트럼을 계산하기 위해서는 실험을 통하여 얻은 전달함수와 시험규격에 정해진 기준스펙트럼—여기에서는 10 Hz~2 kHz 범위에서 0.01 G²/Hz의 일정한 크기의 가속도스펙트럼을 사용—을 이용하여 진동테이블 가속도스펙트럼 $S_{ma}(w_k)$ 를 먼저 계산한다. 진동테이블 가속도스펙트럼은 가진기의 가진력(또는 구동전류)에 비례하는 양으로서 제안 전·후 Fig. 6처럼 나타났다.

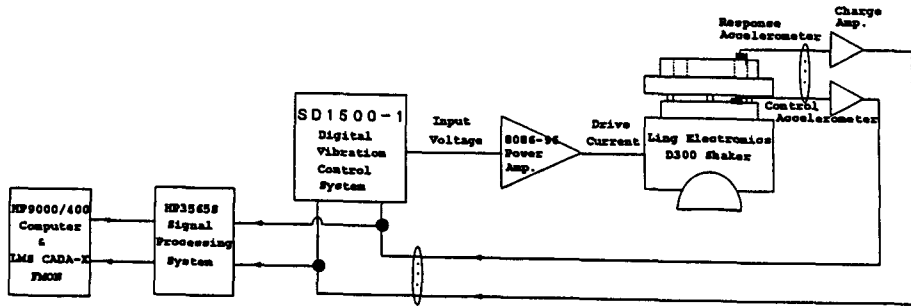


Fig. 4 Block diagram of vibration test

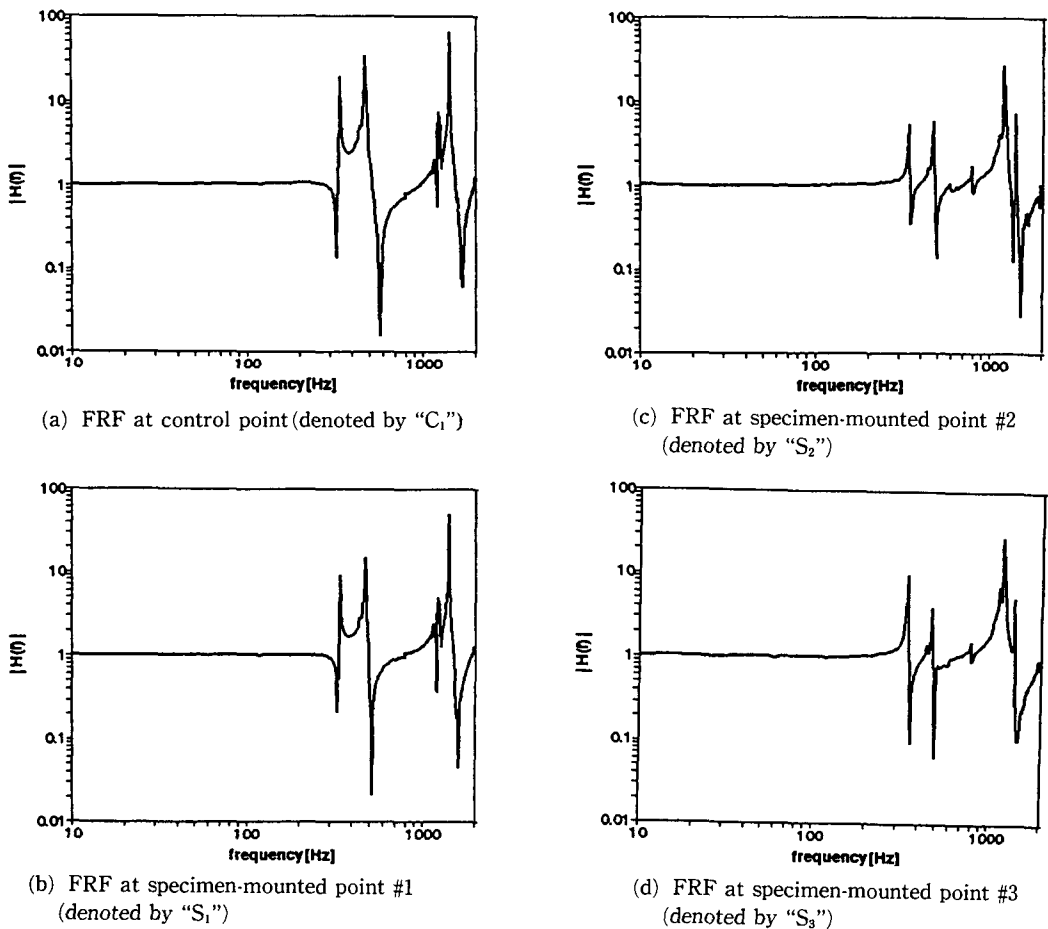


Fig. 5 Measured frequency response functions

제안한 기준스펙트럼은 계산된 $S_{ma}(w_k)$ 값과 제어점 전달함수를 이용하여 식(7)로부터 구해질 수 있으며, 이때 얻어진 기준스펙트럼을 제안전의 시험규격에 정해진 기준스펙트럼과 비교하여 나타내면 Fig. 7과 같다.

3.3 시뮬레이션 및 실험결과

제어점을 기존의 제어방식인 시험규격에 정해진 기준스펙트럼으로 제어할 경우와 제안한 기준스펙트럼으로 제어할 경우 시험물 부착점들에서의 응답 가속도스펙트럼을 시뮬레이션을 통해 예측 및 비교

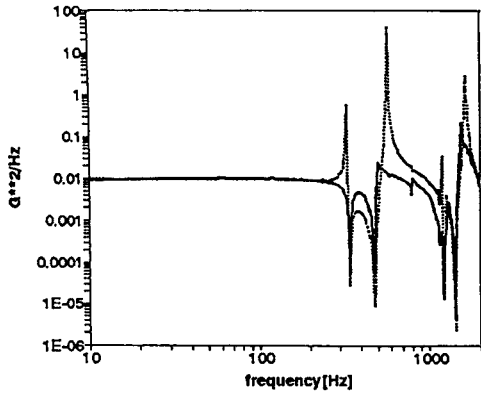


Fig. 6 PSD at armature table before and after modification(Dot : before modification, Solid : after modification)

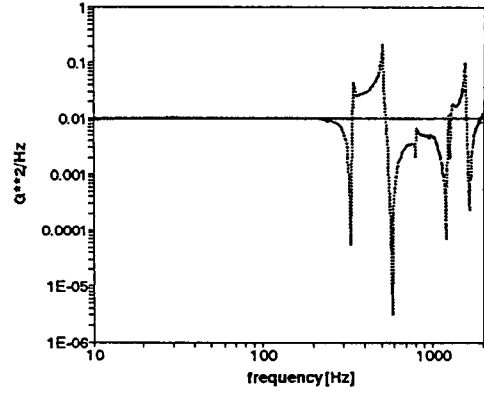
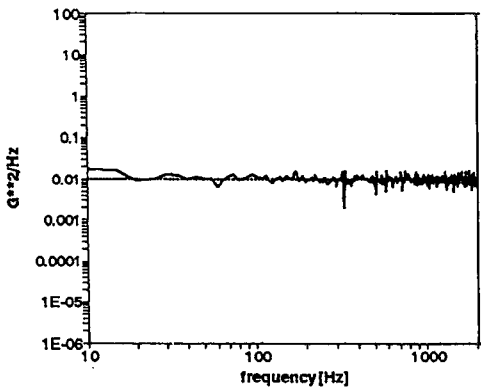
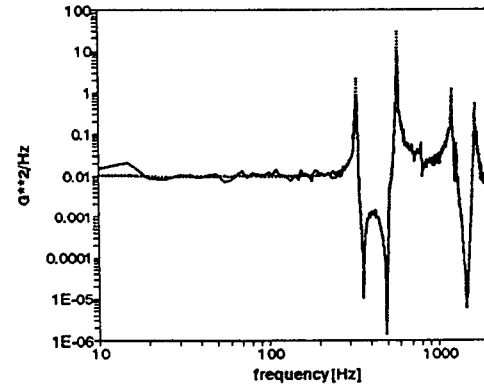


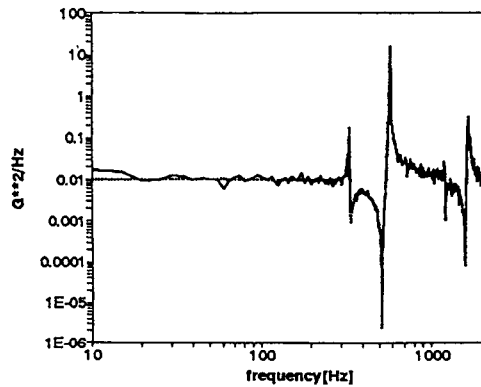
Fig. 7 Comparison of reference spectrum before and after modification (Dot : before modification, Solid : after modification)



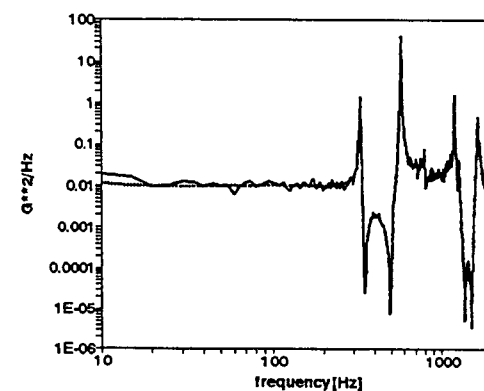
(a) PSD at control point, C_1



(c) PSD at specimen-mounted point #2, S_2

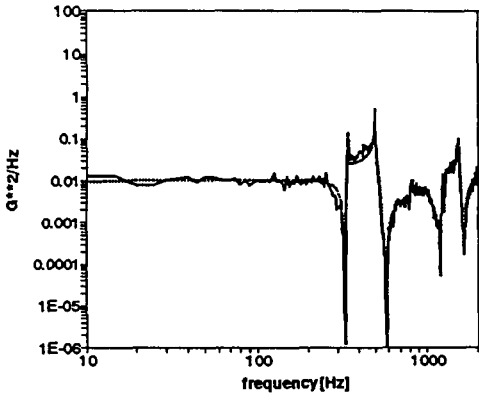


(b) PSD at specimen-mounted point #1, S_1

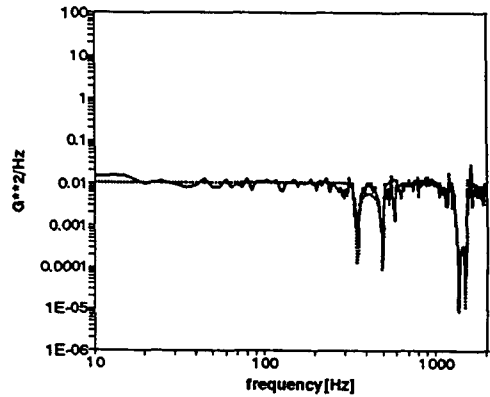


(d) PSD at specimen-mounted point #3, S_3

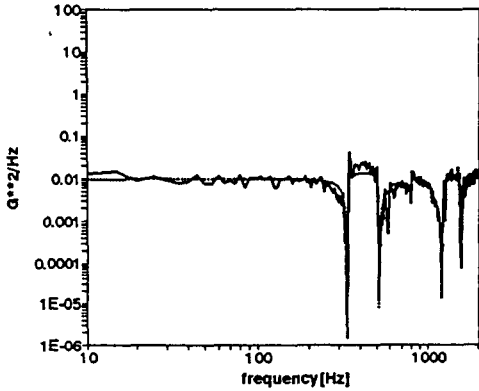
Fig. 8 Comparison of theoretical and experimental results before modification (Dot : Theoretical, Solid : experimental)



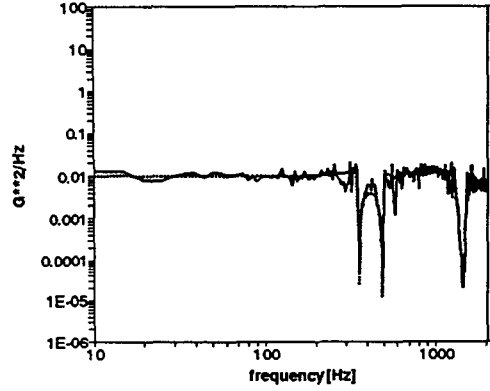
(a) PSD at control point, C_1



(c) PSD at specimen-mounted point #2, S_2



(b) PSD at specimen-mounted point #1, S_1



(d) PSD at specimen-mounted point #3, S_3

Fig. 9 Comparison of theoretical and experimental results after modification (Dot : Theoretical, Solid : experimental)

해 보았으며, 그 결과의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 기존의 방식으로 제어((a)참조)할 경우, 이론(점선) 및 실험(실선)에 의한 시험물 부착점에서의 응답 가속도스펙트럼으로서 치구의 공진현상으로 인해 시험물 부착점에서의 응답 가속도스펙트럼((b), (c), (d) 참조)은 시험규격에 정해진 기준스펙트럼과는 달리 상당히 과대 또는 과소 진동시험을 나타낼을 알 수 있다. 또한 그림에서 처럼 이론과 실험은 거의 일치하는 좋은 결과를 얻었으며 약간의 오차는 실험시 제어점에서의 스펙트럼이 시험주파수 범위에 걸쳐 정확히 시험규격에 정해진 기준스펙트럼으로 제어될 수 없는 특성 때문에 나타나는 오차이다.

Fig. 9는 동일 제어점에 대해 제안한 기준스펙트

럼((a)참조)으로 제어할 경우, 이론(점선) 및 실험(실선)에 의한 시험물 부착점에서의 응답 가속도스펙트럼 ((b), (c), (d)참조)으로서 반공진점(Antiresonance) 부근에서는 반공진 자체의 물리적특성(측정점마다 반공진주파수 및 그 크기가 측정점 마다 달라짐)으로 인하여 제안전에 비해 많은 효과를 얻을 수 없었으나, 시험물의 성능저하나 파손 등의 원인이 되는 공진점 부근에서는 대부분의 값들이 시험규격에 정해진 기준스펙트럼에 가까운 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

실험시에는 제안한 기준스펙트럼을 27개의 절점주파수(break point frequency)로 나눈 후, 각 절점주파수에 대한 스펙트럼 값을 입력하여 기준스펙트럼으로 사용하였다. 이 경우도 이론과 실험결과가 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

랜덤진동제어시 제어 가속도계 부착점만을 제어함으로써 실제 시험물 부착점에서의 응답 가속도스펙트럼이 시험규격에 정해진 기준스펙트럼과는 달리 왜곡되어 과대 또는 과소시험이 수행되는 기존의 방법을 개선하기 위한 제어점에서의 기준스펙트럼 결정방법을 제안하였다.

시스템이 선형시불변시스템(linear time invariant system)인 경우 실제 진동시험을 수행하기 전에 간단히 낮은 진동레벨시험을 수행하여 제어점 및 시험물 부착점들에서의 전달함수를 측정함으로써 제어점 기준스펙트럼을 결정할 수 있으며, 제안한 기준스펙트럼을 사용하여 실제 치구에 대해 랜덤진동시험을 수행하여 제안방법의 유용성을 검증하였다.

제안한 기준스펙트럼을 제어점 기준스펙트럼으로 사용함으로써 시험물 부착점들에서의 응답가속도스펙트럼이 시험규격에 정해진 기준스펙트럼에 가장 가까운 운동을 나타내었고, 종전의 진동제어시 나타나는 시험물 부착점들에서의 과대시험을 최대한 줄일 수 있었다. 이와같이 시험물의 성능저하나 파손 등의 원인이 되는 공진주파수에서 시험규격에 정해진 기준스펙트럼을 시험물 부착점에 인가할 수 있으므로 진동시험 중 또는 후에 나타나는 시험물의 성능저하나 파손 등 오동작에 대한 원인이 시험물 자체의 문제로 인한 것인지, 과대시험으로 인한 것인지에 대한 원인규명 및 해석이 정확하게 이루어질 수 있고 설계변경에 충분히 반영될 수 있다.

앞으로 랜덤진동제어시 반공진점에서의 시험물부착점 응답 가속도스펙트럼도 시험규격에 정해진 기준스펙트럼에 접근된 제어가 이루어지기 위한 치구의 구조적 측면에서의 연구가 동시에 이루어져야 한다.

참고문헌

- (1) 김준엽, 윤을재, 장성조, 이상설, 이주진, 1993, "우리별 2호 위성의 진동/충격시험법에 관한 연구," 대한기계학회 '93년 추계학술대회.
 - (2) Tomlinson, G. R., 1979, "Force Distortion in Resonance Testing of Structures with Electrodynamic Vibration Exciter," *Jr. of Sound and Vibration*, 63(3), pp. 337~350.
 - (3) Rao, D. K., 1987, "Electrodynamic Interaction between a Resonating Structure and an Exciter," *Proceedings of 5th IMAC*, pp. 1142~1150.
 - (4) Tomlinson, G. R., 1987, "A Simple Theoretical and Experimental Study of the Force Characteristics from Electrodynamic Exciters on Linear and Nonlinear System," *Proceedings of 5th IMAC*, pp. 1479~1486.
 - (5) Ewins, D. J., 1984, "Modal Testing: Theory and Practice," *Research Studies Press*, Great Britain, pp. 95~97.
 - (6) Olson, N. L., 1986, "Using and Understanding Electrodynamic Shakers in Modal Application," *Proceedings of 4th IMAC*, pp. 1160~1167.
 - (7) Brown, D. L. and Allemang, R. J., 1989, "Experimental Study of Active Vibration Control of Flexible Structures subject to Forced Vibration," *Proceedings of 7th IMAC*, pp. 926~933.
 - (8) Sweitzer, K. A., 1987, "A Mechanical Impedance Correction Technique for Vibration Tests," *Sound and Vibration*, April, pp. 30~34.
 - (9) Harris, C. M. and Crede, C. E., 1976, *Shock and Vibration Handbook*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, pp. 27-1~27-14
 - (10) Klee, B. J., Kimball D. V. and Tustin, Wayne 1971, *Vibration and Shock Test Fixture Design*, Tustin Institute of Technology, California, pp. 12-1~12-6.
- (1) 김준엽, 윤을재, 장성조, 이상설, 이주진,