

정밀 가공 장비를 위한 방진 시스템 설계 사례

A Vibration Isolation System Design for a Vibration-sensitive Equipment

장 한 기* · 홍 석 인* · 김 호 상** · 이 대 희** · 이 경 돈**

Han-Kee Jang, Seok-In Hong, Ho-Sang Kim, Dae-Hee Lee and Kyung-Don Lee

(2006년 1월 12일 접수 ; 2006년 2월 16일 심사완료)

Key Words : Vibration-sensitive Equipment(정밀 장비), Cradle-type Support Design(요람형 지지대 설계), Vibration Isolation(진동 절연), Vertical and Horizontal Vibration Isolation(수직 및 수평 진동 절연)

ABSTRACT

In this study a vibration isolation system with the cradle-type support was designed so as to reduce the transient vibration due to positioning motion of the moving mass on worktable as well as to achieve the desired isolation efficiency on the floor vibration. The design procedure was performed in the two steps. The first step is to select appropriate isolators to meet the isolation efficiency, and the second step is to reduce the transient vibration of the worktable by adopting the cradle-type support. After the application of the selected isolators with the cradle-type support to the system it was shown that the required vibration criterion(VC-D) was easily satisfied and that the undesirable transient vibration was reduced remarkably.

1. 서 론

정밀 장비의 기본 성능은 광학계의 정밀도, 베어링이나 구동 시스템의 성능, 혹은 제어 시스템에 의해서 결정되지만, 최종적으로 발휘되는 정밀도는 장비가 설치되어 사용되는 환경에 의해서 제한되는 경우가 많다. 장비의 정밀도를 저해하는 환경 요인 중에서도 진동은 장비의 구동 속도(혹은 주파수)가 증가할 때 특히 부정적인 영향을 미치는 요인이다. 이와 같은 이유로 장비의 유형에 따라, 혹은 장비가 달성하려는 정밀도 수준에 따라 충족해야 하는 진동 환경의 수준이 제시되어 있다. 이 기준들은 모든 유형의 장비에 대해 제공되어 있는 것이 아니라 장비 개발과 관련된 회사별로 다르게 적용되고

있다^(1,2).

이 연구의 목적은 레이저 가공기용 워크테이블(worktable)에 대한 방진 설계를 수행하는 것으로서, 달성하고자 하는 정량적인 목표는 BBN 사의 진동 임계치(vibration criterion: VC-D) 조건을 충족하는 것이다⁽¹⁾. 이를 위해 먼저 장비를 설치할 환경에 대한 진동을 측정하였으며, 해당 환경에서 필요한 진동 절연율을 산정하였다. 이를 토대로 방진 시스템의 공진 주파수를 결정하고 이를 구현하기 위한 절연기를 선정하고 전체 시스템을 구성하여 진동 절연 성능을 확인하였다. 해당 시스템은 정적인 상황에서 요구 조건을 만족하였으나, 워크 테이블에 장착된 유정압 가이드 위의 가공물 이송 과정에서 예상치 않은 문제가 발생하였다. 이 문제점은 설치 환경과 무관하게 시스템 내부 요인에 의해 발생한 것으로서, 유정압 가이드 위의 이송 질량이 수평면 상에서 저주파수 거동을 하면서 워크스테이션의 수평방향 거동과 회전 방향 거동이 야기되는 것이었다. 이를 해결하기 위하여 이 연구에서는 크레이들(cradle) 지지대 시스템을 도입하여 진동 절연 시스

* 책임저자 : 정희원, 고등기술연구원 제품기술연구센터

E-mail : hkjang@iae.re.kr

Tel : (031)330-7435, Fax : (031) 330-7116

* 정희원, 고등기술연구원 로봇/생산기술센터

** 정희원, 고등기술연구원 로봇/생산기술센터

템을 재설계하고, 적용 효과를 확인하였다.

2. 진동 절연 설계 기준 및 요구사항

2.1 대상 시스템 개요

이 연구의 대상 장비는 레이저 가공기로서 요구 사양은 다음과 같다. 수평면 상에서 가로 세로 각각 150 mm의 이송 범위 내에서 운동 정밀도 0.5 μm 를 충족시켜야 한다. Fig. 1과 같이 그라나이트(granite) 재질의 정반 위에는 1축 이송용 유정압 가이드(Precitech사의 Nanoform 200) 2세트가 90도 각도로 설치되어 2축 거동을 구현한다. 워크테이블의 사이즈는 가로, 세로가 각각 1200 mm와 900 mm이다. 진동 절연 설계를 수행함에 있어서 다른 시스템의 방진설계와 달리 고려해야 하는 특성은, 유정압 가이드 위에서 이송되는 질량(moving mass)이 절연기에 의해 지지되는 전체 질량과 비교할 때 무시할 수 있는 수준이 아니라는 것이다. 유정압 가이드 하나의 자체 이동 질량이 75 kg 정도로 추정되고, 가이드 위에 추가로 설치되는 질량이 50 kg정도이므로, 절연기로 지지되는 전체 시스템의 질량이 약 1100 kg임을 가정할 때 유정압 가이드 위의 약 120 kg의 이동 질량은 무시할 만한 값이 아닐 뿐 아니라 동적 안정성 측면에서 설계에 불리한 요인으로 작용할 것이 예상된다.

2.2 절연 설계상의 요구 사항

이 연구에서 대상으로 삼고 있는 시스템에 대한 진동 임계치가 별도로 존재하는 것은 아니지만 유사한 장비를 고려할 때, BBN 진동 임계치 중 하나인 VC-D를 진동 환경 기준으로 정하였다. VC-D는 8 Hz 이상에서 진동의 수준이 6 $\mu\text{m/s}$ 이하의 값을 갖

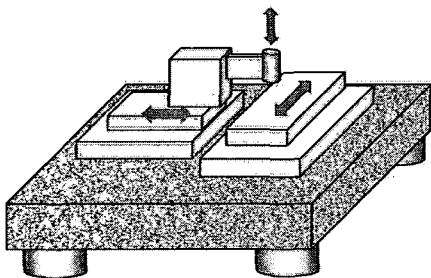


Fig. 1 Granite bed and the two hydraulic linear motion guides for the micro-machining center

도록 요구한다. 따라서 가공기 워크 테이블 위에서의 진동 수준이 VC-D를 만족하면 절연 설계가 바람직하게 된 것으로 판단한다. 이 연구에서는 진동 분석 및 설계 대상 주파수 범위를 1~80 Hz로 잡았는데, 이는 이 주파수 대역이 정밀 장비의 성능에 주로 영향을 미치기 때문이다⁽¹⁾. BBN의 진동 임계치는 4 Hz 부터이지만 이 연구에서는 저주파수 거동에도 관심이 있어서 하한 주파수를 1 Hz로 하였다.

설계 요구 사항을 결정하는 과정에서는 수직 방향의 진동 절연만을 고려하였다. 그러나 충격성 진동이 지반을 통해 전달되는 경우, 예를 들어, 인근에 프레스 장비가 있는 경우, 지면과 평행한 방향으로의 진동 전달이 정밀 가공에 주는 부정적인 영향을 무시하기 어려운 경우도 있다. 따라서 이 연구에서는 수직 방향이외에 최소한의 수평 방향의 진동 절연까지 고려하고자 한다.

2.3 가공기 설치 장소의 지반 진동 현황

진동 절연 설계를 위해서는 가공기 설치 장소에서의 진동 발생 현황, 즉 문제가 되는 진동의 크기와 주파수를 알아야 한다. Fig. 2는 시스템 설치 장소 바닥에서 측정한 진동 스펙트럼을 보여 주고 있다. 두 가지 진동 신호를 관찰해 보면 10 Hz 이상부터 진동이 VC-D 기준을 초과하고 있음을 알 수 있고, 30 Hz 부근에서는 기준치의 3배를 초과하는 진동 수준을 보이고 있었다. 30 Hz 인근의 진동 성분은 건물의 공조 설비에서 기인하는 것으로 판단되었다. 이 결과로부터, 해당 장소에서는 적어도 10 Hz부근부터 진동 저감이 요구됨을 알 수 있다.

3. 진동절연 설계

일반적인 방진 설계의 절차는 Fig. 3에 도시한 바와

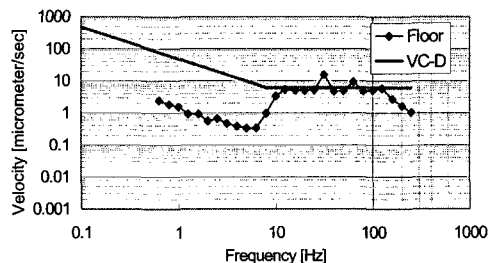


Fig. 2 Environmental vibrations on the floor

같으며, 이 연구에서도 1차적으로 이 절차에 따라 방진 효율을 결정하고 진동 절연기를 선정하였다.

3.1 기본 설계(1차 설계안)

(1) 기본 개념 및 진동 절연 설계

이 연구에서는 10 Hz에서의 진동 절연율이 90% 이상이 되는 절연 시스템을 설계하고자 하였다. 이를 만족하기 위해서는, 절연기(isolator)에 의해 지지되는 전체 시스템의 공진 주파수는 3 Hz로 하였으며, 이 경우 10 Hz에서의 절연율은 90.9%가 된다. 따라서 목표 값을 3 Hz로 선정하였다. 공진 주파수가 지나치게 낮을 경우 외력이나 내부 관성 이동에 의해 시스템 전체의 저주파수 거동이 크게 발생할 우려가 있고, 반대로 높을 경우 목표가 되는 주파수 영역에서의 진동 절연 효과를 기대할 수 없기 때문이다. 대상 시스템은 4개의 절연기로 지지되도록 하였으며, 테이블 위에서의 질량 이동을 고려하여 자동으로 수평이 조정되도록 절연기를 구성하였다.

(2) 절연기의 선정과 시스템 구성

위에서 언급한 바와 같이 수직 방향뿐만 아니라 및 수평 방향으로의 진동 절연 기능이 있는 절연기를 선정하였는데, 수평 방향에 대한 시스템 공진 주파수는 별도로 요구 사항을 설정하지 않았다. 본 연구에서 사용한 절연기는 공압 진동 절연기 형태의 절연기로서 Newport사의 I-800-B 모델로서 Fig. 4와 외부 형상에는 차이가 있으나 내부 구조는 동일하다⁽⁴⁾. 해당 시스템은 수직 방향의 기본 공진

주파수가 3 Hz이고, 수평방향으로의 공진 주파수는 1.5 Hz 이다. 수평방향으로의 진동 절연은 Fig.4에 도시한 바와 같이 진자(pendulum) 형태의 구조를 이용하여 구현하고 있다.

이 연구에서는 대상 장비를 Fig.5와 같은 방식으로 전체 시스템을 구성하였다. 위크테이블의 네 귀퉁이에 진동 절연기를 설치하였으며, 각 절연기로 공급되는 공기는 별도의 컴프레서에서 발생된다.

(3) 결과 및 문제점

이 연구에서는, 전술한 공압 진동 절연기 4개로 시스템을 구성하였는데, 제조사에서 제공하는 설계치를 보면 수직 방향 공진 주파수가 3 Hz, 수평 방향의 공진 주파수가 1.5 Hz로서, 당초 설정한 조건을 충족함을 알 수 있다. 실측 결과상으로도 10 Hz이상에서의 수직 방향의 진동 절연 성능이 쉽게 충족됨을 알

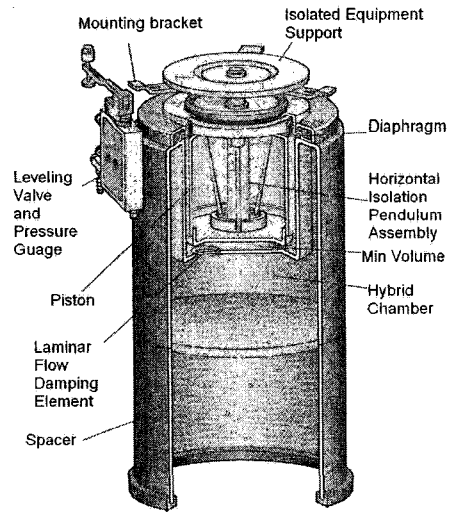


Fig. 4 Inner structure of a pneumatic isolator for vertical and horizontal vibration isolation

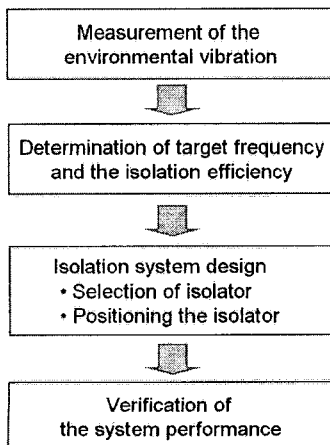


Fig. 3 Design procedure of vibration isolation

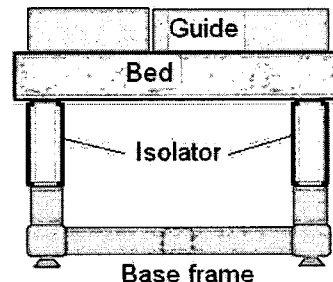


Fig. 5 Initial design of the isolation system

수 있었다(Fig. 6의 곡선 -◆- 및 -■- 참조).

그러나, 시스템 구성 후 시험 기동 과정에서 상부 구조물 전체의 롤(roll) 및 피치(pitch) 거동이 발생하여, 작업 수행에 지장이 발생하였다. 이와 같은 거동의 원인은 상단에 설치된 유압압 리니어 가이드의 질량이동에 기인한 것인데, 이동 질량은 리니어 가이드 1개당 약 120 kg 정도로 추정된다. Fig. 7에 개념적으로 도시한 바와 같이, 대상 시스템의 상단부에 힘(관성력)이 작용하면 x축 방향으로의 병진운동과 y축을 기준으로 한 회전 운동이 동시에 일어나게 된다^(3~5). 이와 같은 거동은 진동 절연 성능에는 직접적인 영향이 없을지라도 대상물의 수평 유지를 위한 공압 회로의 반복적인 작동과 이에 따른 컴프레서의 빈번한 작동을 유발한다. 이 과정에서 공압 회로는 대상 장비의 수평을 잡기 위해서 복원력을 발생시키게 되고, 결과적으로 대상 장비의 과도 진동을 야기한다. 이와 같은 문제점은 병진운동과 회전운동의 연성(coupling)을 제거 또는 최소화함으로써 해결할 수 있다^(2,4).

3.2 2차 설계

(1) 기본 개념

1차 진동 절연 설계에서 구조물 전체의 회전 거동 문제가 발생하여, 이를 해결하기 위한 방안으로 Fig. 7(b)와 같은 지지 방식을 도입하였다. 그라나이트(granite) 재질의 정반 측면을 지지하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 크레이들 구조물 사용하여 지지하고자 하였다. 크레이들 위에 정반을 설치하기 위해서는 불완전한 접촉을 피하기 위해 3점 지지 방식을 택하였다.

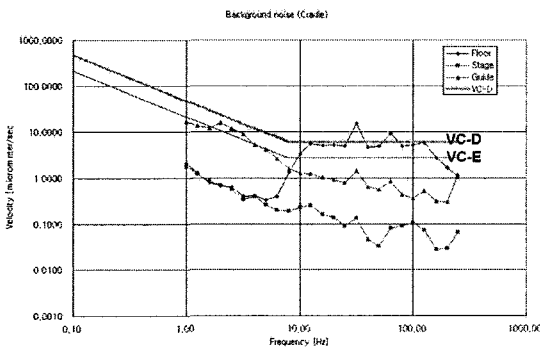
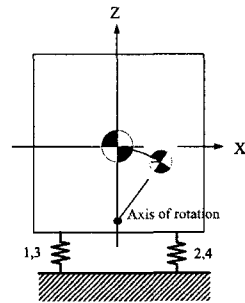


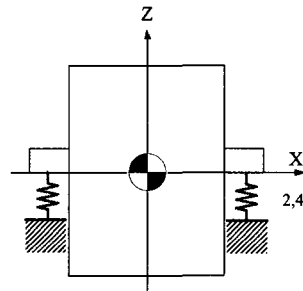
Fig. 6 Vibration on the worktable before and after isolation with vibration criteria

(2) 크레이들 지지대 구조물 설계 과정

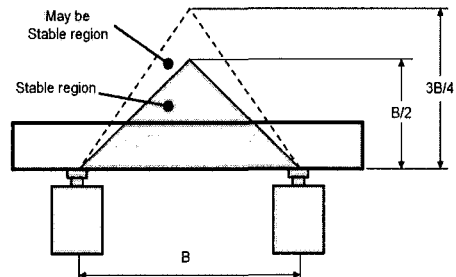
크레이들 구조물의 설계를 위해서는 첫째, Fig. 7(b)와 같이 수직 축 상에서 무게 중심을 포함하는 수평면이 절연기 지지부가 위치하여야 한다. 두 번째는, 1000 kg 정도의 구조물을 지지하기 위하여 충분한 강성을 확보해야 한다. 세 번째는 크레이들 구조물이 방진 장치의 일부이기 때문에 자체적으로 공진이 발생하는 것은 바람직하지 않다. 이 연구에서는 환경 진동의 주요 피크가 30 Hz 부근에 있기 때문에 크레이들 구조물의 1차 공진이 적어도 이 주파수 보다 높아야 한다. 공진 주파수는 높을수록



(a) Bottom supporting



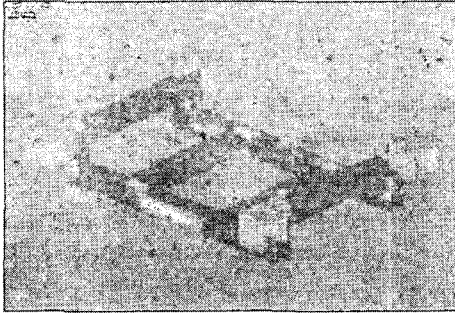
(b) Supporting in the plane with the mass center



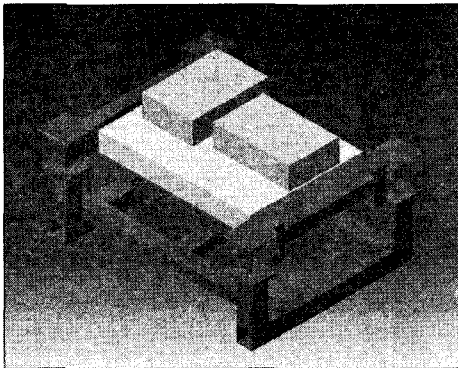
(c) Stable and unstable region with applied force
Fig. 7 Dynamic stability with the supporting mechanism

좋지만 강성을 키울수록 자체 중량도 증가하기 때문에 바람직하지 않다. 이 연구에서는 50 Hz 이상 되면, 진동 절연기 위로 전달되는 진동이 충분히 저감(attenuation)되어 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

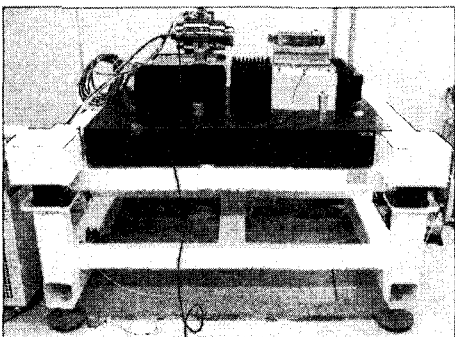
이 연구에서는 Fig. 8과 같은 형상의 크레이들을 설계하여 방진 시스템을 구성하였다. 유한요소



(a) Finite element analysis of the cradle structure



(b) Construction of the isolation system



(c) Photo of the isolated system

Fig. 8 Modified isolation design with a cradle structure

해석을 이용하여 크레이들 구조물의 1차 공진 주파수를 예측해 본 결과 81.5 Hz이었으므로, 동적인 강성뿐만 아니라 정적인 강성도 충분한 것으로 판단된다. 그리고 무게 중심은 정반과 정반 위 의 유정압 가이드의 질량이 유사하여 정반 상부 표면 높이를 기준으로 진동 절연기 지지 위치를 결정하였다.

(3) 2차 설계안의 적용 결과

크레이들을 도입하여 대상 구조물의 무게 중심이 진동 절연기의 지지 높이를 맞춤으로써 수평 방향의 운동과 회전 운동(롤 또는 피치) 사이의 연성을 제거하였으며, 1차 설계안 적용 시와 비교한 수평방향의 거동을 Fig. 9에 도시하였다. 가이드 위의 이동 질량이 최대 행정 위치에서 방향이 바뀔 때 발생하는 수평 방향 거동의 최대값이 회전 운동의 저감으로 인해 1차 설계안 적용 시보다 65%가 감소하였을 뿐만 아니라 잔류 진동의 지속 시간도 절반이하로 줄어들었다. 잔류 진동의 크기와 시간이 줄어든 이유는, 회전 운동 자체가 거의 발생하지 않아서 공압 절연기(pneumatic isolator)에서의 변위가 매우 작아서 자동 수평 조절 기능이 작동할 필요가 없었기 때문이다.

앞서 도시한 Fig. 6의 진동 스펙트럼을 보면 절연기 적용 이후 정반 위에서의 진동 특성(-■-)이 당초 목표였던 VC-D 뿐만 아니라 VC-E 조건까지도 만족함을 알 수 있었다. 따라서 이 연구 개발의 목표는 충분히 달성된 것으로 판단된다. 그러나 유정압 가이드 상면에서 측정한 진동 특성(-▲-)은 VC-D는 만족하지만 VC-E는 만족하지 못함을 알 수 있다. 가이드 위에서의 진동이 증가한 이유는, 가이드를 지지하기 위한 작동유의 유동에 기인한

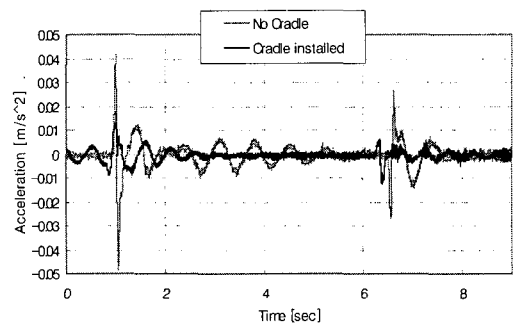


Fig. 9 Vibration in the direction of the guide owing before and after the application of the cradle

것으로 추정된다. 현재로서는 가이드 위에서의 진동 수준이 VC-D 조건을 충족하지만, 향후 가이드 위에 장착되는 시스템의 정밀도 개선이 필요할 경우 가이드 자체의 진동까지 저감시킬 필요성이 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 정밀 가공 장비의 설치 환경 요구 조건인 BBN사의 VC-D 진동 수준을 충족시키기 위한 진동 절연 시스템을 설계하고 구현하였다. 해당 시스템을 적용한 결과 정반과 유정압 가이드 위에서 측정된 진동 특성이 1~100 Hz범위에서 VC-D를 만족하는 결과를 얻었다. 그러나 실제 장비 가동시, 즉 정반 위에서의 무시할 수 없는 질량의 왕복운동으로 인해 질량 이동 방향과 회전(pitch 또는 roll) 거동이 동시에 발생하여 시스템 전체의 불안정한 거동이 발생하였다. 더구나 이와 같은 회전 거동이 발생하는 경우에 작동하는 절연 시스템의 자동 수평 조절 기능이 추가적으로 대상 시스템에 의해 잔류 진동을 유발시키는 문제가 발생하였다. 이 연구에서는 대상 시스템의 회전 거동과 가이드 진행 방향 거동 사이의 연성(coupling)을 제거하기 위해 크레이들 형태의 구조물을 도입하였으며, 이를 시스템에 적용한 결과, 도입 이전에 비해 최대 진동량이 65% 감소하였으며, 진동의 잔류 시간도 절반 정도로 줄어들었음을 확인하였다.

이 연구 수행 결과 정반 위에서의 진동은 당초 목표로 하였던 것보다 훨씬 낮은 수준(VC-E)을 달성하였으나, 실제로 정밀 장비가 장착되는 유정압 가이드 위에서의 진동은 목표치를 겨우 만족하는 것을 알 수 있었다. 따라서 현재의 시스템보다 제품의 정밀도

를 향상시키고자 하는 경우에는 내부적인 요인에 의한 진동을 저감시키기 위한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 산업자원부의 차세대연구개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Gordon, C. G., 1991, "Generic Criteria for Vibration-sensitive Equipment," Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE), Vol. 1619, San Jose, CA, pp.71 ~ 85.
- (2) Park, S. K., 1994, "Sources of Vibration in a Semi-conductor Factory and the Program for Vibration Isolation," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 12 ~ 22.
- (3) Harris, C. M., 1988, Shock and Vibration Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill.
- (4) Newport Corporation, 2004, The Newport Resource 2004 (The figure was inserted under the agreement of Newport corporation).
- (5) Lee, H. K. and Lee, S. E., 1992, "Experimental Behavior Analysis of Double Isolated Anti-vibration System," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 281 ~ 292.