

◆특집◆ 진동 제어 및 응용 기술

방진/내충격 하이브리드 마운트의 개발에 대한 연구

문석준*, 정정훈*, 권정일*, 최승복**, 이현엽***

Development of Hybrid Mount Design Against Shock and Vibration

Seok Jun Moon*, Jung Hoon Chung*, Jeong Il Kwon*, Seong Bok Choi** and Hyun Yup Lee***

Key Words : Hybrid Mount (하이브리드 마운트), Resilient Mount (탄성 마운트), Piezo Stack Actuator (압전 작동기), Shock (충격), Vibration (진동)

1. 서론

기술의 발달로 인하여 항공기, 선박, 자동차 등 수송기계시스템에 탑재되는 장비의 요구되는 출력은 높아지고 있으며, 이로 인하여 종전보다 현격히 높은 소음 및 진동문제를 발생시키고 있다. 이러한 문제들은 시스템의 성능, 수명 및 주변 환경에 큰 악영향을 미치고 있다. 따라서 장비에서 발생하는 진동으로부터 지지부에 전달되는 진동을 감소시키고 또한 외부의 진동이나 충격으로부터 장비에 전달되는 진동 혹은 충격을 감소시키기 위한 효과적인 방법 중 하나로써 마운트를 널리 채용하고 있다. 마운트를 제진장치측면에서 분류를 하면 수동형, 능동형 및 하이브리드(또는 혼합형) 마운트 등으로 대별할 수 있다. 진동절연에 널리 사용되고 있는 수동형 마운트로서는 고무 또는 와이어(wire)의 탄성 특성을 이용한 탄성마운트가 대부분이며, 전자기식 또는 압전 작동기 등을 이용하는 능동형 마운트에 대한 연구개발도 활발히 진행되고 있다.

수동형 마운트는 작은 감쇠특성으로 인해 고주파수의 비공진주파수 대역에서는 우수한 진동절연 성능을 보이지만 공진주파수 대역에서는 비공진주파수 대역에서와 달리 진동절연의 성능저감을 보인다.¹ 이와 같이 수동형 마운트로는 진동 절연효과가 부족할 경우 능동형을 사용하게 되는데, 함정에서와 같이 입력되는 진동이 큰 경우에는 큰 제어력이 필요하게 되므로 능동형 마운트만으로는 현실적으로 곤란하게 된다. 또한 내충격 측면에서 보면 능동형에 비해 수동형 마운트가 우수한 특성을 가지고 있다. 따라서 수동형과 능동형의 장점이 결합된 하이브리드 마운트가 방진/내충격용 마운트로서 효과적일 수 있다. 관련연구로서는 Ahn 등²이 공기스프링과 전자기식 작동기를 병렬로 결합하여 절연시스템 구성하고, 신경망회로를 적용하여 능동방진장치를 개발하였다. Kim 등^{3,4}은 고무마운트 상부에 압전작동기를 직렬로 연결한 하이브리드 마운트를 제작하여 유연구조물의 진동제어에 적용한 연구를 수행하였다. Nakamura 등⁵은 능동형 공기스프링과 자기변형 작동기를 직렬로 연결하여 하이브리드 작동기를 개발하여 반도체 장비의 진동절연시스템으로 적용하였다. 이러한 연구들은 일반 환경에서 적용 가능한 진동제어장치로서 충격하중과 같은 극한 환경은 고려되지 않았다.

본 논문에서는 극한 하중환경에서도 성능유지가 요구되는 군수용 장비와 정밀운용이 요구되는

* 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

Tel. 042-868-7428, Fax. 042-868-7418

Email : sjmoon@kimm.re.kr

** 인하대학교 기계공학부

*** 충남대학교 선박해양공학과

기계 시스템의 진동/충격제어 방법 및 장치개발에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

반도체, LCD, 인공위성, 정보통신, IT 관련 장비 등과 같은 고부가가치 장비의 성능 보호를 위해 사용되는 특수목적용 방진/내충격 하이브리드 마운트에 대한 연구를 다루고자 한다. 이러한 마운트는 신뢰성과 내구성 등의 엄격한 기준을 만족하면서 고성능의 절연효과를 가져야 한다. 마운트의 개발을 위해서는 우선 적용될 규격(specification)을 결정해야 한다. 본 연구에서는 미국 해군에서 제시하고 있는 함정 탑재용 장비를 위한 방진/내충격 마운트에 적용되고 있는 사양을 기준으로 하이브리드 마운트를 개발하고자 하였다. 고려된 규격은 다른 어떤 규격보다 엄격하기 때문에 고려된 규격을 만족하는 마운트를 개발한다면, 특수목적으로 널리 적용할 수 있을 것으로 판단하고 있다.

하이브리드 마운트는 내충격성을 확보하기 위해 수동형 고무요소를 기본으로 하고, 넓은 고주파수 영역에서의 진동절연 성능을 향상시키기 위한 능동형 압전 작동기로 구성되어 있다. 현재 상용화된 수동형 고무탄성마운트 제품과 비교하여 최대 20 dB이상의 향상된 진동차단 성능을 제공하는 하이브리드 마운트의 개발을 목표로 하고 있다. 개발시 제한조건으로서는 마운트의 높이와 고유진동수를 고려하였다. 마운트의 높이가 과도하게 높은 경우 탑재장비의 무게중심이 상승하는 효과가 발생하므로 하이브리드 마운트는 기존의 탄성마운트 높이의 1.4배를 초과하지 않는 것으로 제한하였다. 수동형 마운트가 설치된 함정 탑재장비의 최저차 고유진동수는 일반적으로 마운트의 강성에 의해 지배를 받으려, 고유진동수가 10 Hz이하에 존재하도록 마운트를 선정한다. 따라서 하이브리드 마운트로 정격하중에서의 고유진동수가 약 6 Hz가 되도록 설계제한을 설정하였다.

2. 규격 분석

2.1 설계 기진력

수동형 마운트와 달리 하이브리드 마운트 설계에서 설계 기진력을 고려하는 이유는 능동형 요소가 설치되므로, 능동형 요소의 설계 제어력 결정이 반드시 필요하기 때문이다. 미 해군은 함정에 탑재되는 주요 장비에 대해 일정수준(실제로 함정에 탑재된 장비가 겪게 될 진동보다 가혹한 수준)의 소음/진동시험을 통과해야 한다고 규정하고 있는데, 이 규정이 MIL-STD-740-2⁶와 MIL-STD-167-1A⁷이

다. 따라서 이 규격에서 있는 내용을 근거로 하여 하이브리드 마운트의 설계 기진력을 결정하였다. 각 규격에서 정의된 사양을 종합하여 정리하면 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 최종 설계 기진력은 정리된 두 규격의 값을 비교하여 큰 값으로 결정하였다.

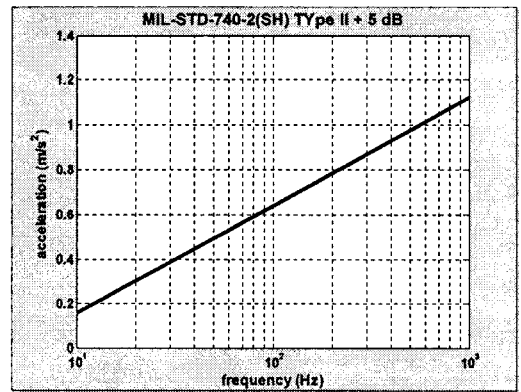


Fig. 1 MIL-STD-740-2 Type II(+ 5 dB)

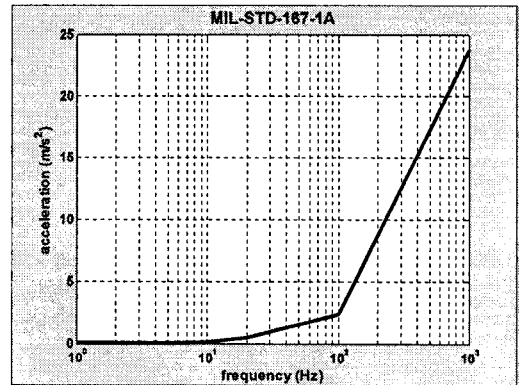


Fig. 2 MIL-STD-167-1A

2.2 성능평가 방법

미 해군 규정을 보면, 일반적인 마운트에 대한 성능평가 방법을 MIL-M-17185A⁸로 제공하고 있다. 특히 고무로 대표되는 표준탄성마운트에 대해서는 별도의 규격(MIL-M-17508F)⁹에 명시되어 있다. 하지만 미국 내에서도 하이브리드 마운트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음에도 불구하고, 미 해군에서는 하이브리드 마운트인 경우 어느 규격을 적용해야 하는지가 명확히 규정되어 있지 않다. 다만, 본 연구에서는 하이브리드 마운트는 표준탄성마운트를 기본으로 개발하고자 하기 때문에 MIL-M-

17508F에 명시된 기준을 포함한 성능평가를 수행할 필요가 있다. 분석된 성능시험 항목을 Table 1에 정리하였다. Table 1을 살펴보면, 약 10가지 이상의 시험평가항목이 정리되어 있으며, 정하중, 동하중 시험을 비롯하여 오일시험, 염분시험 등 다양한 시험을 통해 극한 환경에서도 성능저하가 없음을 증명해야 한다. 따라서 하이브리드 마운트의 고무요소에 대해서는 Table 1에 정리된 평가항목에 대해 시험을 수행하고자 한다. 이외에 충격시험은 별도로 MIL-S-901D¹⁰에 규정하고 있다. 즉, 총 12번의 충격가속시험을 수행해서 변형, 파손 등이 없음을 확인해야 하며, 충격시험 후 최대 정격하중에서 축방향으로 공진주파수 시험을 수행하여 주파수의 변화가 허용치 안에 있는 것을 확인해야 한다. 이로

서 하이브리드 마운트의 수동요소에 대한 성능시험은 완료되며, 요구 성능을 모두 만족하고 있음을 확인해야 한다. 따라서 이러한 요구 성능을 모두 만족하기 위해서는 하이브리드 마운트의 설계 및 제작단계에서 치밀한 준비와 검토가 필요하다. 압전 작동기가 결합된 후의 하이브리드 마운트에 대한 성능시험은 전자기식 진동대를 이용하여 마운트 상부 및 하부에서의 진동 전달률을 계측함으로써 진동절연성능을 평가하고자 하였다. 자세한 내용은 참고문헌¹¹에 기술되어 있다.

3. 마운트 설계

3.1 개념설계

Table 1 Performance test items for passive resilient mounts

MIL-M-17508F	MIL-M-17185A
<ul style="list-style-type: none"> • For two mounts <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Dynamic stiffness and resonant frequency - Deflection at upper rated load - Quality of rubber-to-metal bond - Strength, axial - Strength, radial • For remaining two mounts <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Dynamic stiffness and resonant frequency - Deflection at upper rated load - Quality of rubber-to-metal bond - Drift(시험 후 Dynamic stiffness and resonant frequency test 실시) - Fatigue - Porosity and delamination 	<ul style="list-style-type: none"> • For four mounts <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Vibration - Shock isolation(시험 후 vibration test 실시) • For two mounts <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Static load-deflection - Salt spay(시험 후 static load- deflection test 실시, 시험 전후 static load-deflection의 현저한 차이가 있으면 vibration test를 실시하여 평균 공진주파수에 대해 변화량이 ±15% 이내인지 확인) • For two mounts <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Static load-deflection - Oil test(시험 후 static load-deflection test 실시, 시험 전후 Static load-deflection의 현저한 차이가 있으면 vibration test를 실시하여 평균 공진주파수에 대해 변화량이 ±15% 이내인지 확인) • For three mounts <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Drift(시험 후 vibration test 실시) • For one mount <ul style="list-style-type: none"> - Examination - Cold storage(시험 후 vibration test 실시)

본 연구에서 고려하고 있는 능동 하이브리드 마운트는 수동요소인 고무와 능동요소인 압전 작동기가 결합되어 있다. 두 요소의 결합방법으로서 크게 병렬연결과 직렬연결을 고려하였다. 병렬연결의 경우 상대적으로 강성이 큰 압전 작동기와 강성이 상대적으로 작은 고무요소가 연결되므로, 전체 하이브리드 마운트의 고유 강성은 압전 작동기의 강성에 의해 지배를 받는다. 따라서 고유진동수가 상대적으로 매우 높아져서 고유진동수 제한조건을 만족할 수 없다. 또한 탑재장비 하중에 의한 정적 처짐이 발생하지 않으므로 고무요소의 장점인 내충격성을 살릴 수 없다. 따라서 외부 충격하중이 직접적으로 압전 작동기에 먼저 작용하게 되며, 탑재되는 장비의 내충격성을 확보할 수 없다. 반면 직렬연결인 경우, 병렬연결의 단점을 제거할 수 있으나 두 요소의 결합방식으로 인하여 높이가 증가하는 단점이 발생한다. 따라서 높이를 최대한 줄이는 노력을 통해 높이 제한조건을 만족해야 한다. 이러한 각 연결방법별 장단점을 고려하여 능동 하이브리드 마운트의 개념설계를 수행하였으며, 이를 토대로 Fig. 3과 같은 개념설계를 도출하였다. Fig. 3은 기존의 미 해군 표준마운트인 고무탄성마운트에 능동요소인 압전 작동기를 삽입한 형태이며, 이러한 개념설계를 통해 고려한 제한조건을 만족할 수 있게 되었다. 도출된 개념설계는 서론에서 언급한 기존 연구의 결과와는 상이한 설계임을 다시 한 번 밝혀두며, 2008년 1사분기 중에 특허등록이 완료될 예정이다.

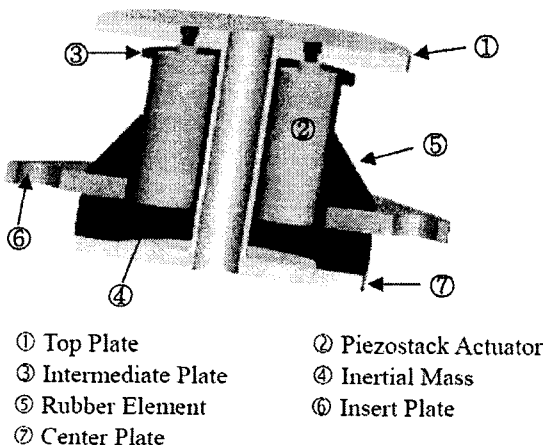


Fig. 3 Conceptual design of the hybrid mount

3.2 압전 작동기 (능동요소) 설계

개념 설계된 마운트의 방진성능을 고찰하기 위해 진동 전달률과 관련된 간단한 수치실험을 수행하였다. 진동 전달률은 마운트 상부 탑재장비의 기진력에 의한 마운트 하부 전달력의 비와 마운트 하부 지반가속도에 의한 마운트 상부 전달 가속도의 비가 같으므로, Fig. 4와 같이 하이브리드 마운트를 2자유도계로 모델링할 수 있다. Fig. 4를 수학적식으로 표현하면 식 (1)과 (2)와 같다.

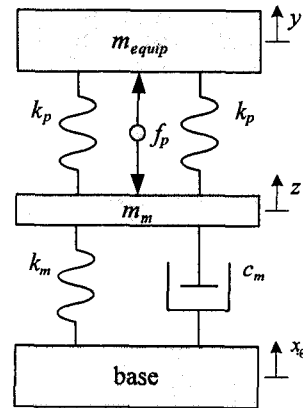


Fig. 4 Modeling for the hybrid mount

$$m_m \ddot{z} + c_m \dot{z} + k_m z + 2k_p(z-y) = -m_m \ddot{x}_0 - f_p \quad (1)$$

$$m_{equip} \ddot{y} + 2k_p(y-z) = -m_{equip} \ddot{x}_0 + f_p \quad (2)$$

여기서,

- m_m : interim mass of mount
- c_m : damping coefficient of rubber
- k_m : stiffness of rubber
- z : relative displacement of mount top
- m_{equip} : mass of equipment
- k_p : stiffness of piezo stack
- y : relative displacement of equipment
- f_p : exciting force by piezo stacks
- \ddot{x}_0 : base acceleration

본 연구에서 하이브리드 마운트의 정격하중은 100 kg을 고려하였으며, 이때 고유진동수는 6 Hz 근방에 존재하도록 설계하였다. 설계 기진력에 대해서는 상기 2.1절에 기술한 바 있다. 압전 작동기

에 대한 설계단계에서의 모델링은 상용화된 제품 중을 선정하여 그 특성치를 사용하였으며, 수치해석 과정을 통해 최종적인 압전 작동기의 제어력을 결정해야 한다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 여러 가지 수치실험을 수행하였다. Fig. 5는 압전 작동기가 작동하지 않을 경우 지반가속도에 대한 마운트 상부에서의 가속도 전달률을 보여주고 있다. 마운트의 고유진동수인 6 Hz 부근에서 첫 번째 피크가 있고, 이후 10,000 Hz까지 진동이 차단되는 것을 알 수 있다. 3,000 Hz 부근에서의 두 번째 피크는 압전 작동기의 강성에 의해 발생하는 것이다. 따라서 압전 작동기가 작동하지 않는 수동형으로 사용될 경우 고무요소의 특성에 의해 하이브리드 마운트의 특성이 지배되고 있는 것을 알 수 있으며, 고유진동수 제한조건을 만족하고 있는 것을 확인하였다. 이를 통해 내충격성도 확보될 것으로 판단할 수 있다.

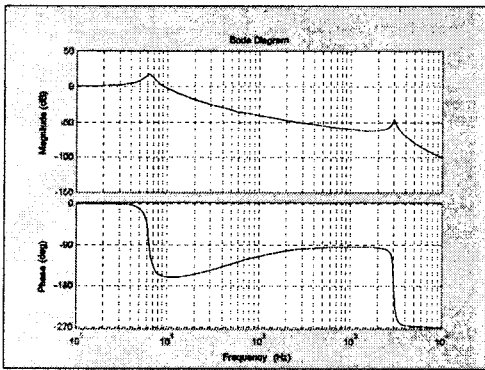


Fig. 5 Acceleration transmissibility

한편, Fig. 6은 압전 작동기의 작동에 의해 마운트 상부에 전달되는 가속도를 나타내고 있다. 즉, 압전 작동기의 제어력이 얼마나 진동제어에 사용될 수 있는지를 판단할 수 있다. 고무요소와 직렬로 연결되어 있기 때문에 압전 작동기의 제어력이 모두 마운트 상부로 전달되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 주파수에 따라 전달되는 특성이 상이하므로, 이러한 특성을 고려해야 함을 알 수 있다. 즉, 2.1절에 기술된 설계 기진력에 대해 20 dB 이상의 진동절연을 위해 필요한 압전 작동기의 설계 제어력을 산정하여 정리하면 Table 2와 같다. 저주파수 영역에서는 제어력의 전달률이 매우 작으므로 큰 설계 제어력이 필요한 반면 고주파수영

역에서는 제어력의 전달률이 작지 않으므로 적은 설계 제어력이 산정되었다. 이를 근거로 하여 압전 작동기의 설계 제어력을 결정하였으며, 압전 작동기의 공진주파수는 관심주파수 영역 밖에 있어야 한다. 이러한 일련의 설계 및 수치실험을 통해 본 연구에서 원하는 하이브리드 마운트의 고무요소와 압전 작동기의 사양을 결정함으로써 기본 설계를 수행하였다.

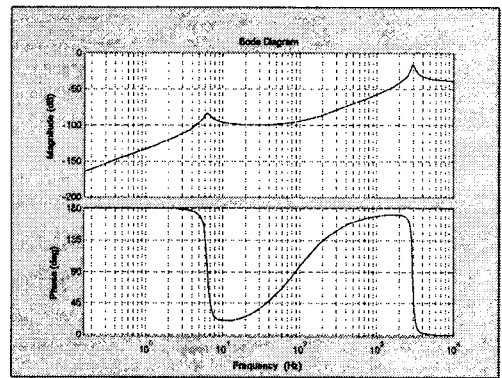


Fig. 6 Transmitted acceleration by piezo stack actuator

Table 2 Required design control force

Freq. (Hz)	Exciting Condition ($10^{-3}ms^{-2}$)	Required Force (N)
18.0	62.47	5967
24.0	48.46	4846
32.2	37.85	3740
43.1	31.24	2914
57.6	26.65	2217
77.1	24.11	1649
103.0	22.54	1156
138.0	21.63	759
185.0	21.27	471
247.0	20.81	274
331.0	20.89	160
443.0	20.95	91
592.0	21.31	52
793.0	22.27	29
1060.0	23.15	16

3.3 고무요소 (수동요소) 설계

일반적으로 고무요소는 비선형성이 매우 강하

기 때문에 해석을 통해 설계를 하는 것은 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 자체 개발된 고무마운트¹²와 동일한 고무재질을 갖는 하이브리드 마운트를 개발하고자 하였다. 기존 고무마운트의 특성시험결과와 하이브리드 마운트의 수동요소에 대하여 수행한 특성시험결과를 바탕으로 유한요소해석법을 이용하여 고무요소의 설계방법을 정립하였다.

먼저 고무의 초탄성 시험인 단축 인장 시험과 이축 인장 시험을 통하여 시간에 독립적인 변형 에너지 함수를 정의하고, 점탄성 시험을 통해 시간의 영향을 받는 고무의 특성을 파악하였다. 즉, 이 시험들을 통하여 고무의 비선형 물성치를 계산하고자 하였다. 단, 이 물성치는 설계자(또는 분석자)가 어떤 해석 모델과 이론을 적용하는가에 따라 달라진다. 각 변형률에 대한 단축 인장과 이축 인장 시험의 결과로 stress-strain data를 얻을 수 있다. 이를 비선형 상용 해석 프로그램인 MARC[®]를 이용하여 data-fitting을 수행하는 과정에서 각 변형률 별 고무의 비선형 물성치를 계산할 수 있다. MARC[®]을 이용하여 실제 단축 인장 시험과 동일하게 모델링을 한 후 앞선 data-fitting을 통해 추정된 비선형 물성치를 적용하였다. 실제 시험과 유한 요소 해석 결과를 비교함으로써 적절한 비선형 물성치를 결정하였다. 점탄성 시험도 단축 인장 시험과 동일하게 수행하였으며, 검증과정에 있어 고무와 시험장비의 접촉 부분에 발생하는 마찰계수에 대한 정보가 없어 MARC[®]를 통해 다양한 마찰계수를 적용하여 적당한 계수를 예상할 수 있었다. 그리고 이렇게 얻어진 마찰계수의 마운트 거동에 어느 정도의 영향을 미치는지 검토해 보았다. 마찰계수 0.1~0.5를 적용했을 경우의 시험 값과 해석 값의 비교이며, 이를 바탕으로 마찰계수 0.22를 적용하여 시험 data를 fitting 한 결과에 가까운 결과를 얻을 수 있었다. 하이브리드 마운트는 전체 형상의 1/4만을 3차원으로 Fig. 7과 같이 모델링하였다. 1/4 3차원 모델에서 YZ면에서의 경계조건은 X방향에 대한 변위만을 구속하였고, ZX면에서의 경계조건은 Y방향에 대한 변위만을 구속하였다. 마운트 상부 장비가 올라가는 부분은 contact body로 정의하여 변위를 주었다. Insert plate와 고무가 접촉되는 부분은 고정되어 있으므로, 접촉 면은 X, Y, Z 축 변위를 고정하였다. 전체 절점은 25,697개, 요소는 17,160개이며, 이때

사용된 요소는 비압축성 거동을 위한 3차원 10절점 4면체 solid 요소를 사용하였다. 정적해석을 통해 하이브리드 마운트의 변형형상과 load-deflection data 결과를 검토하였다. 점탄성 해석의 검증단계에서 결정된 마찰계수 0.22를 하이브리드 마운트 해석시에도 동일하게 적용하였다. Fig. 8은 load-deflection curve를 보여 주고 있으며, 참고적으로 시험결과와 비교를 통해 잘 일치하는 것을 확인하였다. 해석 결과 하이브리드 마운트의 변형형상은 고무요소의 깨짐이나 균열, 찢어짐이 발생할 가능성이 있는 변형 양상은 보이지 않았으며, 이는 실제 하이브리드 마운트 특성 시험 결과와 동일하다. 또한 하이브리드 마운트가 100kg의 하중을 받을 시 약 10 mm의 처짐이 발생하며, 이때 실제 실험결과와 해석결과에서의 강성은 약 8%의 오차를 보여주고 있다. 얻어진 강성을 통해 하이브리드 마운트의 정격하중에서의 고유진동수를 구할 수 있다.

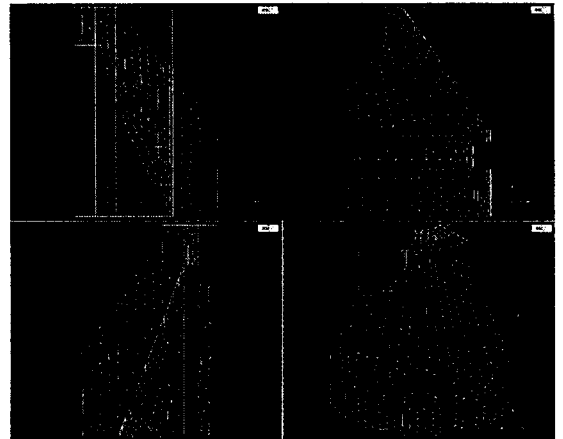


Fig. 7 Model of the hybrid mount using MARC[®]

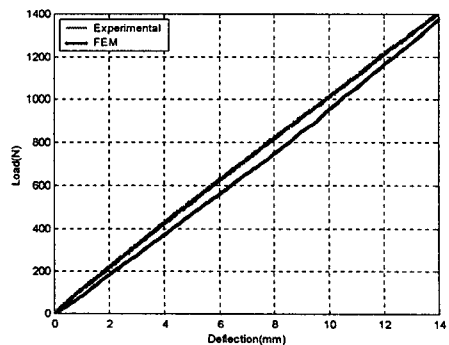


Fig. 8 Load-deflection curve of the hybrid mount

3.4 제어기의 설계

능동요소인 압전 작동기를 위한 제어기를 설계하였다. 3.2절에서 기술한 식 (1)과 (2)를 이용하여 제어대상 시스템의 상태공간모델을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \Gamma d(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $x(t)$ 는 상태변수벡터, $u(t)$ 는 입력벡터, $d(t)$ 는 외란을 나타낸다.

본 연구에서는 앞먹임(feedforward) 제어기 기법을 적용하였다. 앞먹임 제어이론을 사용하여 상태공간 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \Gamma d(t) \\ u(t) &= -Kd(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, K 는 제어 이득(gain)을 나타낸다. 따라서 제어기가 포함된 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + (\Gamma - BK)d(t) \quad (5)$$

제어 계인은 외란의 영향이 상태변수에 최소로 작용할 수 있도록 결정하였다.

4. 고찰 및 결론

본 논문에서는 방진/내충격 하이브리드 마운트 개발에 있어서 필요한 설계사항만을 간략하게 제시하였다. 상기에서 기술한 설계방법에 근거하여 하이브리드 마운트를 제작하여 규격에서 정의된 다양한 시험을 수행하였다. 예를 들면, Fig. 9는 4개의 하이브리드 마운트 상부에 질량체를 탑재하고 충격시험을 하는 모습을 보여주고 있으며, Fig. 10은 전자식 작동기 상부에 하이브리드 마운트를 설치하고 진동차단 성능을 평가하는 시험모습을 보여주고 있다.

일련의 설계, mock-up의 제작, 시제품의 제작 등의 과정을 통해서 하이브리드 마운트를 개발하였다. 개발된 마운트는 제시된 모든 성능평가시험을 성공적으로 통과하였으며, 방진성능도 기존 단성마운트에 비해 약 20 dB 정도 향상된 성능을 보이고

있다(Fig. 11 참조). 그러나 실제 장비에 탑재되기 위해서는 극복해야 할 많은 문제가 있는 것은 사실이다. 따라서 지속적인 설계방법의 개발을 통해 우수한 성능을 갖는 하이브리드 마운트를 개발하고자 한다.



Fig. 9 Setup for shock test

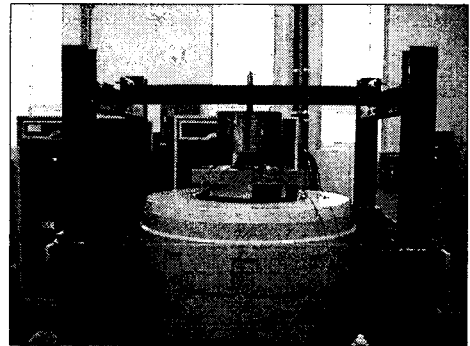


Fig. 10 Setup for vibration performance test

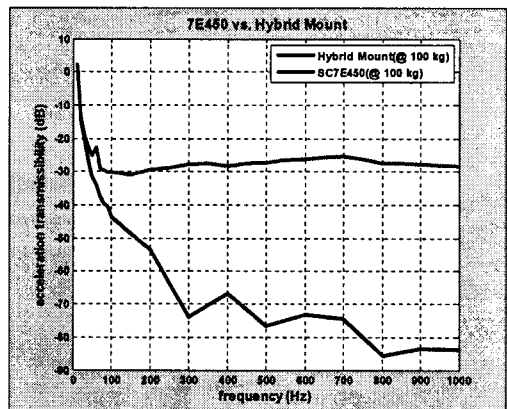


Fig. 11 Results of vibration performance test

후기

본 논문의 내용은 민군겸용기술사업인 “방진/내충격 능동 하이브리드 마운트 시스템 개발” (과제 번호: 05-DU-MC-01)의 연구결과 중 일부분입니다. 국방부 및 민군겸용기술센터의 후원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yook, J. Y., Choi, S. B., Sung, K. G. and Moon, S. J., “Design of Hybrid Mount Using Rubber Element and Piezoelectric Actuator with Application to Vibration Control,” Transactions of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 391-397, 2007.
2. Ahn, K. G., Pahk, H. J., Jung, M. Y. and Cho, D. W., “A Hybrid-Type Active Vibration Isolation System Using Neural Networks,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 192, No. 4, pp. 793-805, 1996.
3. Kim, S. H., Choi, S. B., Hong, S. R. and Han, M. S., “Vibration Control of a Flexible Structure Using a Hybrid Mount,” International Journal of Mechanical Science, Vol. 46, Issue 1, pp. 143-157, 2004.
4. Choi, S. B., Hong, S. R. and Kim, S. H., “Beam Vibration Control via Rubber and Piezostack mounts: experimental work,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 273, No. 4-5, pp. 1079-1086, 2004.
5. Nakamura, Y., Nakayama, M., Masuda, K., Yasuda, M., Tsuchiya, M. and Fujita, T., “Development of Uni-Axial Hybrid Actuator Using the Combination of an Air Actuator and a Giant-Magnetostrictive Actuator,” Smart Materials and Structures, Vol. 11, No.3, pp. 361-369, 2002.
6. Department of Defense, USA, MIL-STD-167-1A, “Mechanical Vibrations for Shipboard Equipment (Type I - Environmental, Type II - Internally Excited),” 2005.
7. Department of Defense, USA, MIL-STD-740-2 (SH), “Structureborne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment,” 1986.
8. Department of Defense, USA, MIL-M-17185A (SHIPS), “Mounts, Resilient; General Specifications and Tests for (Shipboard Application),” 1956.
9. Department of Defense, USA, MIL-M-17508F(SH), “Mounts, Resilient: Type 6E100, 6E150, 7E450, 6E900, 6E2000, 5E3500, 6E100BB, 6E150BB, 7E450BB, and 6E900BB,” 1990.
10. Department of Defense, USA, MIL-S-901D (NAVY), “Shock Tests. High Impact Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirements for,” 1989.
11. Moon, S. J., Ji, Y. J., Yoon, J. S., Choi, S. B., Lee, H. Y., Kim, J. H. and Jung, W. J., “Development of Hybrid Mount System for Shock and Vibration Control,” Report No. BSU056-1371.M, KIMM, pp. 160-198, 2007.
12. Chung, J. H., Kim, B. H., Kwak, J. S., Jeong, J. A. and Lee, H. Y., “An Experimental Study on the Characteristics of Rubber Mounts for Naval Shipboard Application,” Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp.402-409, 2004.