

함정용 능동 하이브리드 마운트 개발에 대한 연구

문석준^{†*}, 지용진^{**}, 윤정식^{***}, 최승복^{****}, 이현엽^{*****}, 김재호^{*****}, 정우진^{*****}

한국기계연구원^{*}, (주)수퍼센츄리^{**}, (주)퓨처테크^{***}, 인하대학교^{****},
충남대학교^{*****}, 국방과학연구소^{*****}

A Study on Development of an Active Hybrid Mount for Naval Ships

Seok-Jun Moon^{†*}, Yong-Jin Ji^{**}, Jeong-Sik Yoon^{***}, Seung-Bok Choi^{****},
Hyun-Yup Lee^{*****}, Jae-Ho Kim^{*****} and Woo-Jin Jung^{*****}

KIMM^{*}, Super Century Co., Ltd.^{**}, Future Tech^{***}, Inha Univ.^{****},
Chungnam National Univ.^{*****} and ADD^{*****}

Abstract

Passive-type control devices such as resilient mounts and wire rope isolators are generally used for protecting the shipboard equipment from shock loading and for suppressing the mechanical vibration of the equipment in naval ships. To improve the performance of the control device, a new hybrid mount is under development in this study. This mount consists of a passive-type rubber element and an active-type piezo-stack element. It can be expected that the mount has enhanced performance of about 20 dB or more with respect to transmissibility through a series of performance tests of prototype mount.

※Keywords: Hybrid mount(하이브리드 마운트), Resilient mount(탄성마운트), Piezo stack(압전 작동기), Naval ship(함정), Vibration control(진동제어), Shock(충격)

1. 서론

함정에 탑재되고 있는 각종 기계/전자 장비들을 살펴보면, 장비 하부에 다양한 형태의 마운트가 설치되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 마운트는

장비에서 발생하는 진동 및 소음이 하부 구조물로 전달되는 것을 차단하고, 외부 충격으로부터 장비를 보호하기 위한 목적으로 사용되고 있다. 함정용 마운트로서는 고무요소로 구성된 마운트와 wire rope형 마운트가 널리 채택되고 있으며, 이들 탄성 마운트는 우수한 진동 및 충격 차단능을 제공하고 있다. 최근 몇 년 전까지도 한국 해군 함정에 탑재되는 장비에 사용되고 있는 마운트

접수일: 2008년 1월 22일, 승인일: 2008년 4월 10일

†교신저자: sjmoon@kimm.re.kr, 042-868-7428

는 대부분 미국 또는 유럽으로부터 수입된 제품인 것으로 알려져 있다. 따라서 함정용 마운트의 국산화 개발에 대한 연구개발이 절실한 실정이다.

함정용 마운트의 개발을 위한 국내 연구 사례는 매우 드물게 찾아볼 수 있다. 한국기계연구원에서는 국가지정연구실사업을 통해 미 해군 표준마운트인 고무탄성마운트(resilient mount)에 관한 기술을 개발하였으며, 기술이전을 통해 (주)수퍼센츄리에서 양산개발에 성공하여 현재 해군 함정에 납품되고 있다(Chung et al. 2004).

최근 함정의 생존성과 관련된 연구(Chung et al. 2006)의 증가와 함께 고정도 stealth화를 추구하는 잠수함 등에서는 보다 향상된 성능을 요구하고 있다. 즉, 외부 충격으로부터 장비를 보호하는 내충격 성능은 기본적으로 확보하고 추가적으로 탑재장비의 특정한 기진주파수에서의 진동 및 소음을 능동적으로 차단할 수 있는 능력을 확보해야 한다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위한 노력으로 본 연구에서 능동 하이브리드 마운트를 개발하고자 하였다. 능동 하이브리드 마운트는 내충격성을 확보하기 위해 수동형 고무요소를 기본으로 하고, 넓은 주파수영역에서의 진동차단 성능을 향상시키기 위한 능동형 압전 작동기로 구성되어 있다. 현재 상용화된 고무탄성마운트 제품과 비교하여 최대 20 dB이상의 향상된 진동차단 성능을 제공하는 하이브리드 마운트의 개발을 목표로 하였다. 또한 제한조건으로서 마운트의 높이가 고유진동수를 고려하였다. 마운트의 높이가 과도하게 높은 경우 탑재장비의 무게중심이 상승하는 효과가 발생하므로, 능동 하이브리드 마운트는 기존의 탄성마운트 높이의 1.4배를 초과하지 않는 것으로 제한하였다. 수동형 마운트가 설치된 함정 탑재장비의 최저차 고유진동수는 일반적으로 마운트의 강성에 의해 지배를 받으며, 고유진동수가 10 Hz 이하에 존재하도록 마운트를 선정한다. 따라서 능동 하이브리드 마운트도 정격하중(100 kg)에서의 고유진동수가 약 6 Hz가 되도록 설계제한을 설정하였다.

2. 기본 설계

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. 1과 같은 개념설계를 도출하였다.

Fig. 1은 기존의 미 해군 표준마운트인 고무탄성마운트에 능동요소인 압전 작동기를 삽입한 형태이며, 이러한 개념설계를 통해 고려한 제한조건을 만족할 수 있게 되었다. 개념 설계된 마운트의

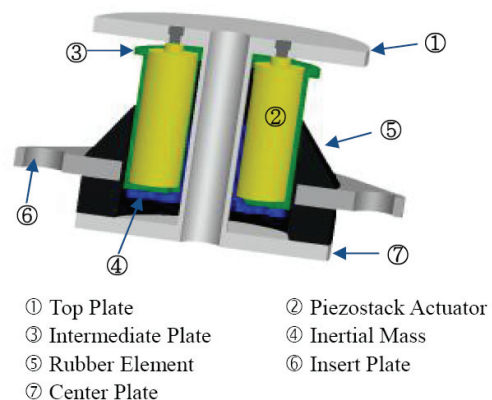


Fig. 1 Conceptual design of the hybrid mount

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

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

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

여기서,

- m_m : interim mass of mount (0.51 kg)
- c_m : damping coefficient of rubber (537 Ns/m)
- k_m : stiffness of rubber (160447 N/m)
- z : relative displacement of mount top
- m_{equip} : mass of equipment (100 kg)
- k_p : stiffness of piezo stack (90 MN/m)
- 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 기반가속도

는 MIL-STD-167- 1A의 Type 2를 고려하여 선정하였다(DoD 2005). 설계단계에서의 고무 탄성 마운트의 특성파라미터는 기존의 마운트에 대한 실험 자료로부터 산출된 자료를 가정하여 사용하였다. 모델링에 사용된 압전 작동기는 Piezomechanik사의 piezo stack actuator (모델명: PSt350bp/25/90)이며, 압전 작동기의 특성치는 제작사에서 제공하는 자료(Piezomechanik 2002)와 독립적인 동특성 시험을 통해 파악하였다 (Nguyen et al. 2007). 식 (1)과 (2)를 이용하여 여러 가지 수치실험을 수행하였다. Fig. 3은 압전 작동기가 작동하지 않을 경우 기반가속도에 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.

참고로 압전작동기의 특성치를 Table 1에 정리하였다.

한편, Fig. 4는 압전 작동기의 작동에 의해 마운트 상부에 전달되는 가속도를 나타내고 있다. 즉, 압전 작동기의 제어력이 얼마나 진동제어에

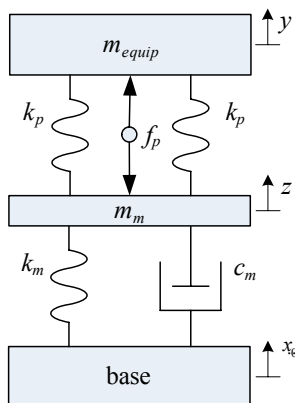


Fig. 2 Modeling for the hybrid mount

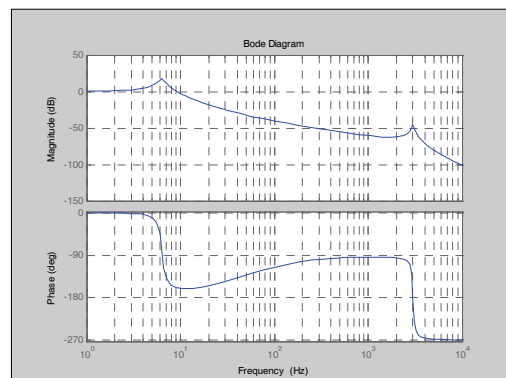


Fig. 3 Acceleration transmissibility

Table 1 Characteristics of the piezo stack

| Stroke | Length | Capacitance | Stiffness | Resonance freq. |
|--------|-----------|-------------|-----------|-----------------|
| 90um | 107m m | 750nF | 90MN/m | 14 kHz |

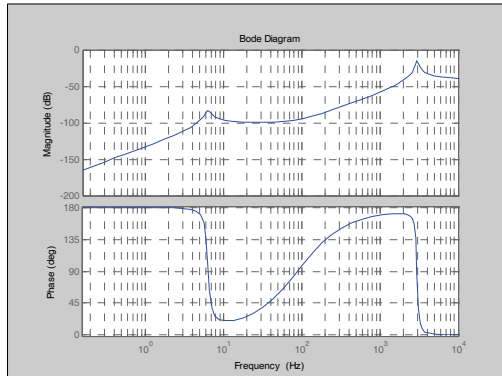


Fig. 4 Transmitted acceleration by piezo stacks

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. 이러한 일련의 설계 및 수치실험을 통해 본 연구에서 원하는 하이브리드 마운트의 고무요소와 압전 작동기의 사양을 결정함으로써 기본 설계를 수행하였다.

3. 제작 및 성능시험

하이브리드 마운트의 제작상의 오류를 최소화하기 위해 Fig. 5에 보이는 바와 같은 mock-up을 제작하였다. Fig. 1에서 보는 것과 매우 유사하며, 오른쪽 그림이 분해했을 때의 모습이며, 왼쪽 그림이 모두 결합했을 때의 모습이다. 하이브리드 마운트의 요소 중 압전 작동기는 국내 기술로 제작하기 어려워 고려한 Piezomechanik사의 제품을 수입하여 사용하기로 하였다.

먼저, 하이브리드 마운트의 고무요소 성형을 위해서 금형을 제작하였다. Fig. 6은 고무요소 시제품 제작에 사용된 금형을 보여주고 있으며, 금형

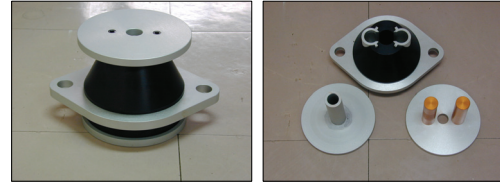


Fig. 5 Mock-up of the hybrid mount



Fig. 6 Mold for rubber shape

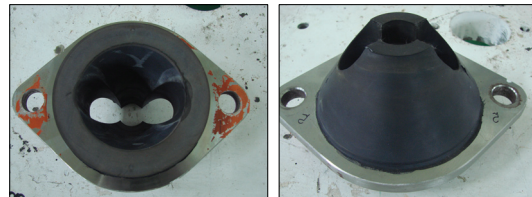


Fig. 7 Rubber shape from the mold

을 통해 성형된 고무요소를 Fig. 7에 보여주고 있다. 고무요소의 특성은 고무배합에 크게 의존하므로, 서론에서 언급한 한국기계연구원의 탄성마운트 개발품과 동일한 배합을 사용하였다[6]. 또한 고무요소의 형상은 다양한 형상의 제작 및 시험 등을 통해 최적의 형상을 결정하였다. 최종적으로 성능평가시험을 위해 10개의 시제품을 제작하였다. 성능평가시험은 능동요소가 삽입되지 않은 상태의 하이브리드 마운트(dummy 삽입)를 대상으로 탄성마운트와 관련된 시험을 수행하였다. 또한 압전 작동기가 결합된 후의 하이브리드 마운트에 대해서도 별도의 평가시험을 수행하였다.

미 해군 규정을 보면, 일반적인 마운트에 대한 성능평가 방법을 MIL-M-17185A 규격(DoD 1956)으로 제공하고 있다. 특히 고무로 대표되는 탄성마운트에 대해서는 별도의 규격(MIL-M-17508F) (DoD 1990)에 명시되어 있

다. 하이브리드 마운트인 경우 어느 규격을 적용해야 하는지가 명확히 규정되어 있지 않다. 다만, 하이브리드 마운트는 표준마운트를 기본으로 개발하기 때문에 MIL-M-17508F를 기준으로 성능시험을 수행하였다. 수행된 성능시험 항목을 Table 2에 정리하였다.

10개의 시제품들은 Table 2에 기술된 항목의 시험을 모두 통과하였다. 이외에 추가로 충격시험을 수행하였다. 충격시험은 Fig. 8과 같이 4개의 하이브리드 마운트를 부착한 시험용 dummy 질량(약 400 kg)체에 대해 수행하였다. 충격시험은 MIL-S-901D(DoD 1989)에 규정된 중간중량 충격 시험을 이용하여 수행되었다. 총 12번의 충격 가력이 수행되었다. 충격시험 후 최대 정격하중에서 축 방향으로 공진주파수 시험 수행하여 주파수의 변화가 허용치 안에 있는 것을 확인하였다. 이로써 하이브리드 마운트의 수동요소에 대한 성능시험은 모두 수행되었으며, 요구 성능을 모두 만족하고 있음을 확인하였다.

Table 2 Performance test items

| MIL-M-17508F |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <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 |

압전 작동기가 결합된 후의 하이브리드 마운트에 대한 실험은 Fig. 9와 같이 전자기식 진동대를 이용하여 수행하였다. 지반 가속도는 앞에서 기술한 바와 같이 MIL-STD-167-1A의 Type 2를 고려하였다. 상용화된 함정용 고무마운트인 (주)수퍼센추리의 (SC)7E450와의 성능 비교 시험을 수행하였다. 하기 위해 현재 관련된 시험이 진행되고 있으며, 현 단계에서 정리된 시험결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 전자기식 진동대 상부에 마운트를 설치하고, 마운트 상부에는 정격하중 질량체(100 kg)를 탑재하여 하중을 작용하도록 하였다. 진동 전달률을 측정하기 위해 마운트 하부 및 상부에 각각 가속도계를 설치하였다. 시험은 약 20 Hz부터 1,000 Hz까지의 범위에서 수행되었으며, 정현파 가진을 통해 가속도 설치 위치에서의 가속도를 계측한 후 전달률을 계산하였다.

압전 작동기의 제어는 feedforward 제어를 사용하였다. Fig. 10은 성능시험에 사용된 제어를 간략하게 도시하고 있다. 마운트 하부에 설치된 가속도계로부터 계측된 신호를 되먹임(feedback)하고 제어를 하고 있다. 마운트 입장에서 보면, 마운트 하부에서 계측된 신호는 앞먹임(feedforward) 신호이다. 시험결과를 Fig. 11에 도시하였다. 압전 작동기의 제어는 feedforward 제어를 사용하였다. Fig. 10은 성능시험에 사용된 제어를 간략하게 도시하고 있다. 마운트 하부에 설치된 가속도계로부터 계측된 신호를 되먹임(feedback)하고 제어를 하고 있다. 마운트 입장에서 보면, 마운트 하부에서 계측된 신호는 앞먹임(feedforward) 신호이다. 시험결과를 Fig. 11에 도시하였다.

Fig. 11을 보면 상용화된 함정용 고무마운트(SC7E450)는 100 Hz이상에서 진동 전달률이 약 -30 dB로 일정한 것을 볼 수 있으며, 저주파수에서는 고유진동수 영향이 있는 것을 확인할 수 있다. 반면, 능동 하이브리드 마운트인 경우 SC7E450과 비교하여 100 Hz ~ 200 Hz 범위에서 약 10 dB 이상의 향상된 효과를 볼 수 있으며, 200 Hz이상에서는 약 20 dB 이상의 진동저감 효과를 확인할 수 있다. 그러나 약 50 Hz 이하의



Fig. 8 Shock test

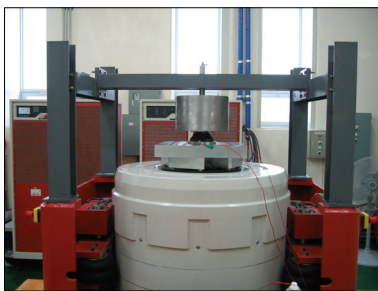
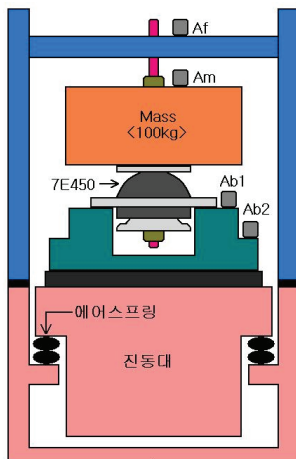


Fig. 9 Experimental set-up

영역에서는 큰 진동저감효과를 볼 수가 없었다. 이는 압전 작동기의 고유 특성상 저주파수에서 제공하고 있는 제어력이 작고, Fig. 4에서 보는 바와 같이 전달되는 제어력이 작기 때문이다. 이점은 앞으로의 연구를 통해 극복해야 할 부분이다. 본

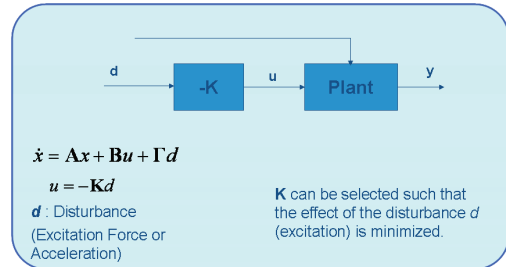


Fig. 10 Control logic for piezostack actuators

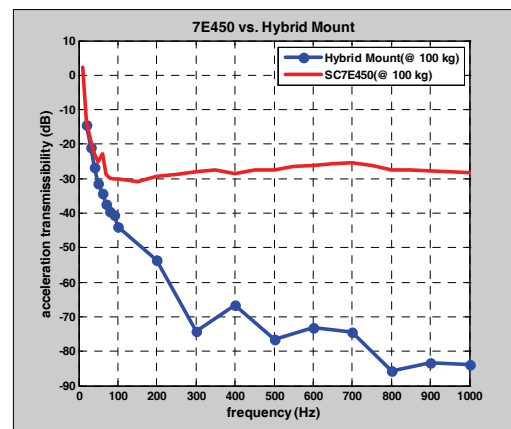


Fig. 11 Test result

문에 기술된 성능시험 과정 및 결과에 관한 자세한 사항은 참고문헌(Moon et al. 2007)을 참조하기 바란다.

4. 고찰 및 결론

본 연구에서는 외부 충격으로부터 장비를 보호하는 내충격 성능은 기본적으로 확보하고 추가적으로 탑재장비의 특정한 기진주파수에서의 진동 및 소음을 능동적으로 차단할 수 있는 능력을 확보하는 함정용 능동 하이브리드 마운트를 개발하였다. 능동 하이브리드 마운트는 내충격성을 확보하기 위해 수동형 고무요소를 기본으로 하고, 넓은 주파수영역에서의 진동차단 성능을 향상시키기 위한 능동형 압전 작동기로 구성되어 있다. 개발한 하이브리드 마운트는 미 해군 규격에 따라 충격시험을 포함한 약 10가지의 성능시험을 수행하

여 수동적인 마운트로서의 성능 평가를 만족스럽게 통과하였다. 능동적인 마운트로서의 성능은 현재 상용화된 고무탄성마운트 제품과 비교하여 약 20 dB이상의 향상된 진동차단 성능을 제공하는 것을 시험을 통해 확인하였다.

본 연구에서는 하이브리드 마운트 단품에 대한 결과만을 수록하고 있으며, 추후 지속적인 연구를 통해 다수의 마운트로 구성되는 마운트 시스템에 대한 결과를 발표할 예정이다. 개발하고 있는 하이브리드 마운트는 잠수함 등해군 함정의 stealth 화에 필요한 장비라고 사려 되며, 또한 상선의 엔진마운트, 해양구조물의 상부구조 등 다양한 용도로 활용될 수 있다. 본 연구에서 개발된 능동 하이브리드 마운트를 실제 함정에 적용하기 위해서는 몇 가지 극복할 문제들이 있으나, 추가적인 연구를 통해 실선 적용이 가능한 마운트를 개발하고자 한다. 본 논문과 연계하여 하이브리드 마운트의 설계에 관한 내용은 참고문헌(Moon et al. 2008)을 참고하기 바란다.

후 기

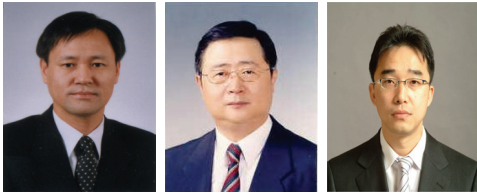
본 논문의 내용은 민군겸용기술사업인 “방진/내충격 능동 하이브리드 마운트 시스템 개발” (과제번호: 05-DU-MC-01)의 연구결과 중 일부분입니다. 국방부 및 민군겸용기술센터의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Chung, J.H., Lee, H.Y., Yu, J.M., Cho, D.S., Park, S.I., Lim, G.H. and Park, J.K., 2006, “An Overview on Survivability Design for Naval Ships in Korea,” Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 4, pp. 41-49.
- Chung, J.H., Kim, B.H., Kwak, J.H., Jeong, J.A. and Lee, H.Y., 2004, “An Experimental Study on the Characteristics of Rubber Mounts for Naval Shipboard Application,” Proceedings of the Annual Spring Meeting SNAK, pp. 402-409.
- Department of Defense, 1956, MIL-M-17185A(SHIPS): Mounts, Resilient: General Specifications and Tests for(Shipboard Application), USA.
- Department of Defense, 1990, MIL-M-17508F(SH): Mounts, Resilient: Type 6E100, 6E150, 7E450, 6E900, 6E2000, 5E3500, 6E100BB, 6E150BB, 7E450BB, and 6E900BB, USA.
- Department of Defense, 2005, MIL-STD-167-1A: Mechanical Vibrations for Shipboard Equipment(Type I - Environmental, Type II - Internally Excited), USA.
- Department of Defense, 1989, MIL-S-901D(NAVY): Shock Tests. High Impact Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirements for, USA.
- Nguyen, V.Q, Choi, S.M., Paeng, Y.S., Han, Y.M., Choi, S.B, and Moon, S.J., 2007, "Active Vibration Control Using Piezostack Based Mount," KSNVE07A-05-01.
- Moon, S.J., et al., 2007, Development of Hybrid Mount System for Shock and Vibration Control, Report No. 05-DU-MC-01, Ministry of National Defence.
- Moon, S.J., Chung, J.H., Kwon, J.I., Choi, S.B. and Lee, H.Y. 2008, "Development of Hybrid Mount Design against Shock and Vibration," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 18-25.
- Piezomechanik, 2002, Long Life Bipolar Piezo Stack Actuators.



< 문 석 준 > < 지 용 진 > < 윤 정 식 >



< 최 승 복 > < 이 현 엽 > < 김 재 호 >



< 정 우 진 >