

내충격 성능을 고려한 함정용 하이브리드 마운트의 설계 Design of Hybrid Mount to Naval Shipboard Considering Shock Resistance

조혜영† · 신윤호* · 문석준* · 정우진**

Hye-Young Jo, Yun-Ho Shin, Seok-Jun Moon and Woo-Jin Jung

Key Words : Hybrid Mount(하이브리드 마운트), Electro-Magnetic Actuator(전자기식 작동기), Moving coil(가동 코일)

ABSTRACT

In this study, the design procedure of hybrid active mount by an electro-magnetic actuator is proposed to reduce the transmitted force from naval shipboard equipment to ship hull structure. The hybrid type mount which is composed of a passive rubber element and an electro-magnetic actuator is introduced and, through the vibration measurement for the objective pump system, the required force of the actuator is computed and discussed in detail. The initial designs were supposed for three types, one is moving coil type actuator and the others are moving permanent magnet type actuators. Based on the initial design concept, the final designs considering shock resistance and interference with mover and stator are proposed and examined.

1. 서 론

장비의 하부에 설치되는 마운트는 장비 자체의 정하중을 지지하는 역할 뿐만 아니라 외부 진동으로부터 장비를 보호하여 장비 고유의 기능을 수행하도록 지원하는 역할을 담당한다.

산업의 발전과 더불어 더욱 우수한 방진 또는 내충격 성능을 보유하고 있는 마운트의 개발이 요구되고 있으며 수동형 마운트와 능동형 작동기가 결합된 하이브리드 마운트에 대한 연구가 널리 수행되고 있다.

국방 분야에서는 장비에서 발생하는 내부진동에 의한 교체음이 외부로 전달되는 것을 차단함으로써 적으로부터의 탐지율을 저감하기 위해 수동형 고무 마운트와 압접형 작동기를 결합한 연구가 진행되고 있다^(1,2).

본 연구에서는 구조기인 소음을 발생시키는 함정 탑재 장비의 진동 저감을 목표로 능동형 하이브리드 마운트용 전자기식 작동기의 최종 설계안을 제시한다. 내부 진동이 외부로 전달되는 성분의 차단에 대해 복합형 마운트의 효과적인 구성요소 배치형식을 제안하며 대상 시스템의 실측 결과 값을 가지고 요구 작동력을 산출한다. 산출한 목표 요구 작동력을 비롯해 다른 설계인자들을 고려하여 전자기식 작동기의 초기 설계안을 제시하고 마운트 설치 시 문제 원인이 될 수 있는 내충격 성능을 고려하여 최종 설계안을 제안한다. 또한 마운트의 정적 처짐에 의해 작동기의 정적 평형 상태는 변하기 때문에 그에 따른 작동기의 출력 힘이 요구 작동력을 만족하는지 확인한다. 또한 작동기의 힘의 크기와 관련된 공극 내 자속 밀도를 계산하여 상용 프로그램을 통한 값과 비교한다.

2. 목표 요구 작동력 산출

대상 시스템(펌프류)에 대한 기본 정보들과 실측 결과를 바탕으로 보다 상세화 된 요구 작동력을 산

† 교신저자; 한국기계연구원 시스템디자인믹스연구실

E-mail : gpduuds@kimm.re.kr

Tel : 042-868-7211, Fax : 042-868-7418

* 한국기계연구원 시스템디자인믹스연구실

** 국방과학연구소

출하였다. 그림 1은 대상 시스템의 개략도를 나타내며, 하이브리드 마운트의 수동부에 해당하는 점탄성 재질의 마운트만을 적용한 후 진동을 측정·분석하였다.

관심 회전 속도인 1600rpm에 대한 수직 방향 측정 결과는 그림 2과 같으며, 이를 1/3 옥타브 밴드로 나타내어 진동 허용 규격과 비교하면 그림 3과 같다. 관심 주파수 구간에서 하이브리드형 마운트 구성 취지에 부합되며 수동형 마운트를 거치면서 고주파수 대역에서의 진동 저감을 관찰할 수 있다.

대상 시스템에 대해 측정된 진동 신호를 이용하여 계의 기진력을 추정하는 것은 상대적으로 어려움이 따르지만, 관심 대상의 선체 및 다른 장비로 전달되는 전달력을 계산하는 것은 점탄성 마운트의 재질 정보를 알고 있다면 추정 가능하다. 장비로 전달되는 전달력은 마운트를 중심으로 상·하부에서의 절대 가속도(혹은 속도, 변위) 정보를 측정된 후 아래 식을 이용하여 산출한다.

$$F_c = c_r(\dot{x}_e - \dot{x}_b) + k_r(x_e - x_b)$$

여기서 k_r , c_r 는 점탄성 마운트의 강성 및 점성 감쇠를 의미하며, 아래첨자 e , b 는 각각 장비(Equipment)와 지반(Base) 즉 마운트 상부와 하부를 의미한다.

식과 측정 가속도 신호를 이용하여 계산된 전달력 추정 결과는 그림 4(a)와 같으며, 주파수 역으로 변환하면 그림 4(b)와 같다. 측정된 전달력 파워의 최대 값을 기준으로 20dB 이상 차이를 보이는 주파수 성분은 충분히 작다고 간주하고 제어 대상 주파수 성분에서 제외하면, 표 1과 같이 관심 주파수 성분 및 해당 성분에 대해 필요한 요구 작동력이 도출된다.

작동기에 대한 보수적인 설계를 위해 시간 역에서의 전달력을 기준으로 작동기의 최대 요구 작동력을 선정하면 120N이며, 최대 구동 변위는 $\pm 1\text{mm}$ 이다. 이는 공간에 대한 제약 조건과 함께 전자기식 작동기의 개념설계 시 목표 성능으로 정의한다.

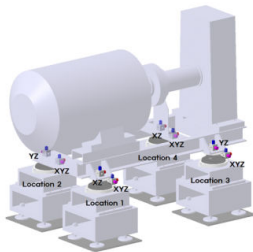


Figure 1 Schematic Diagram for Pump System

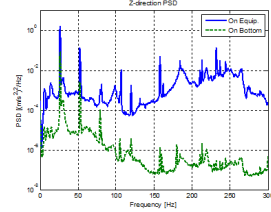


Figure 2 Measurement Results of Upper and Lower Part of Rubber Mount

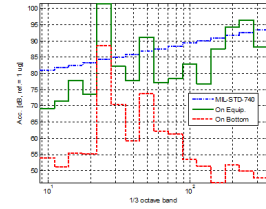


Figure 3 Vibration Measurement of Upper and Lower Part of Rubber Mount with Criteria for Pump System

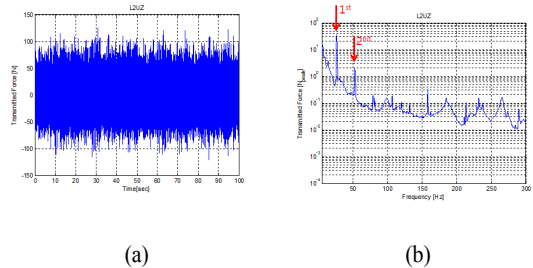


Figure 4 Computation of Transmitted Force in Time and Frequency Domain

Table 1 Computation Results of Required Force

	26.5Hz(1 st)	52.5Hz(2 nd)
Frequency Domain	41.5 N _{peak}	3.3 N _{peak}
Time Domain	Max. Force : 116 N _{peak} Max. Stroke : $\pm 1\text{mm}$ _{peak}	

3. 하이브리드 마운트의 개념 설계

3.1 하이브리드 마운트 배치형식 결정

본 연구에서 제시하는 능동형 하이브리드 마운트는 수동 요소인 고무 마운트와 상대적으로 저주파수 구간에 대해 능동 제어 이론 적용을 위한 전자기식 작동기의 결합 형태로 구성된다. 배치 형식에 따른

하이브리드 마운트의 동특성에 대한 비교 연구 결과를 바탕으로⁽³⁾, 수동요소와 작동기의 배치는 지반으로 전달되는 전달력 감소 측면에서 그림 5와 같이 비-접촉식 병렬형 마운트와 관성 질량형 마운트가 적합하다. 그러나 관성 질량형 마운트의 경우, 요구되는 작동력에 따라 큰 질량을 요구하기 때문에 최종적으로 비-접촉식 병렬형 마운트 배치형식을 선정하였다.

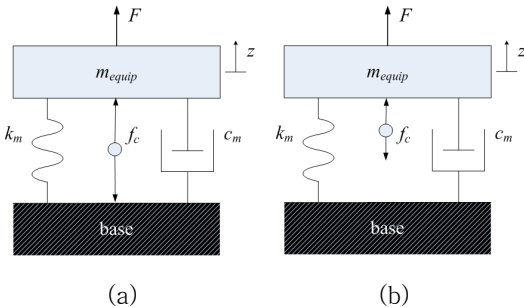


Figure 5 Configuration of Hybrid Mount:
(a) Non-contact Parallel Type
(b) Inertial Mass Type

3.2 하이브리드 마운트의 개념 설계안

전자기식 작동기의 초기 개념 설계는 코일부가 움직이는 가동 코일형과 영구자석부가 움직이는 가동 영구자석형을 고려하여 총 3가지 형태의 작동기를 설계하였다.

가동 코일형 작동기의 고정자는 영구자석과 자로 형성용 금속(Ferro-metal)로 구성되며, 이동자는 보빈에 일정 두께의 코일이 감긴 형태이다. 영구자석은 이동자가 움직이는 공극 내에 일정한 자기장을 발생시키고, 이로 인해 형성된 자기장 내에서 이동자에 감긴 코일을 통해 흐르는 전류의 수직 방향으로 작동기의 힘이 발생된다. 자속의 누설을 감소시키면서 힘의 세기를 크게 하기 위하여 영구자석을 2개로 나누어 공극 양단에 부착한다. 코일에 흐르는 전류의 방향과 세기에 비례하여 작동기의 힘의 방향과 세기가 결정된다.

가동 영구자석형 작동기는 이동자에 영구자석과 자로 형성용 금속을 부착하고 고정자에는 코일을 감는 형태로 구성된다. 가동 영구자석형 작동기는 영구자석의 자속과 코일이 감긴 고정자에 전류를 인가하였을 때 생성되는 자속으로 힘을 발생시킨다. 가동 코일형 작동기와 마찬가지로 코일에 흐르는 전류의 방향과 세기에 따라 작동기의 힘의 방향과 세기가 결정된다. 가동 영구자석형 작동기는 이동자를

구성하는 영구자석의 개수 및 배치 형식에 따라 2가지로 분류되어 설계하며, 가동 영구자석형 I과 II로 구분한다. 가동 영구자석형 I은 반경 방향으로 상반된 극을 가지는 2개의 영구자석이 상·하부에 직렬로 연결된 형식으로 구성하며, 가동 영구자석형 II는 영구자석이 반경 방향으로 형성하는 자계의 누설을 감소시키고 출력 힘을 크게 하기 위하여 영구자석에 자로 형성용 금속을 추가로 부착하여 설계한다. 작동기의 누설 자속을 최소화하고 소형화, 경량화를 목표로 하여 제안한 개념 설계안은 그림 6과 같다.

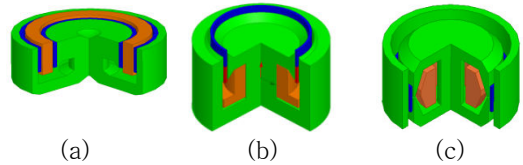


Figure 6 Initial Design of Electro-magnetic Actuators :
(a) Moving Coil Actuator
(b) Moving Permanent Magnet actuator I
(c) Moving Permanent Magnet actuator II

위 작동기의 자로 형성용 금속(Ferro-metal)은 SS430으로 페라이트 크롬강이고 영구자석은 N42H로 소결 네오디뮴 아연 붕소 자석이다. 코일은 Self-bounded 타입으로 가동 영구자석은 지름이 1mm, 가동 영구자석형 타입은 지름이 1.3mm인 것으로 선정하였다.

개념 설계안을 바탕으로 작동기를 최종 설계 시 마운트의 내충격 성능을 고려해야 한다. 수동요소인 고무 마운트의 경우 내충격 성능이 검증되어 실선에 장비와 함께 설치되는 제품이다. 그렇기 때문에 작동기의 내충격만을 고려한다. 위에서 제시한 작동기는 개념 설계안을 적용할 경우, 충격 하중 하에서 이동자와 고정자가 간섭하는 문제가 발생한다. 이는 하이브리드 마운트 상부에 장비를 설치하게 되면 하중에 의한 처짐이 발생하게 되어 설계 시 수동 고무 마운트의 하중이 인가 되어 정적 처짐이 발생하기 때문이다.

그렇기 때문에 가동 코일형 작동기는 내충격 성능을 만족하지 않아 설계대상에서 제외한다. 또한 가동 영구자석형 작동기 I은 가장 큰 정적 힘 특성을 나타내지만 디텐트 력이 크다는 단점을 가지고 있기 때문에 제외하고 최종적으로 가동 영구자석형 작동기 II를 상세 설계한다.

4. 하이브리드 마운트의 상세 설계

4.1 전자기장 해석

상세 설계 시 작동기는 두 가지 형태를 고려한다. 이동자가 코일이 감긴 자로 형성용 금속(Ferrometal)인 형태와 이동자가 영구자석인 형태이다. 두 가지 타입의 작동기의 명칭은 전자기식 작동기 I, 전자기식 작동기 II라 하자.

위에서 언급한 정적 처짐을 해결하기 위해 이동자를 고정자보다 처짐이 발생하는 길이 약 7mm를 띄워 조립한다. 또한 이동자와 고정자 간의 간섭을 없애기 위하여 수동 마운트와 결합되는 이동자의 지름을 수동 마운트 지름과 같게 하고 고정자를 이동자 바깥쪽으로 이동시킨다.

그림 7은 상용 프로그램을 이용하여 전자기식 작동기 I을 해석한 그림이다. 코일에 전류를 1A, 2A, 3A의 크기를 왼손방향으로 인가하고 이동자에 자로 형성을 확인하였다. 인가된 전류의 크기가 커질수록 자로 형성된 밀도가 증가하여 큰 힘을 생성한다.

그림 8은 전자기식 작동기 II를 해석한 그림이다. 가동 영구자석형 작동기 역시 인가된 전류의 크기가 커질수록 자로 형성 밀도가 증가하여 큰 힘이 생성된다.

두 작동기 모두 코일에 2A의 전류를 인가해주었을 때, 전자기식 작동기 I은 160N, 전자기식 작동기 II는 145N으로 목표 요구 작동력을 충족한다.

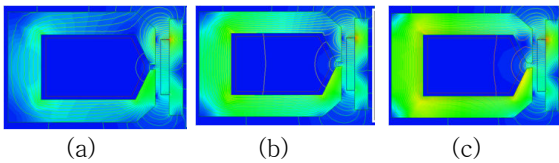


Figure 7 Analysis of Flux Using Commercial FE Code according to Supplied Current for Type I
(a) Supply 1A (b) Supply 2A (c) Supply 3A

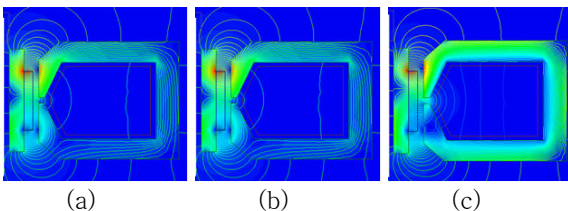


Figure 8 Analysis of Flux Using Commercial FE Code according to Supplied Current for Type II
(a) Supply 1A (b) Supply 2A (c) Supply 3A

전자기식 작동기 II의 시상수는 0.09로, 전자기식 작동기 I의 시상수 0.17보다 작은 값을 가진다. 전자기식 작동기 II의 코일 부피는 전자기식 작동기 I의 코일 부피보다 약 2배 크다. 그렇기 때문에 전자기식 작동기 I의 시상수가 더 작을 것이라 예측하였지만, 코일의 인덕턴스가 큰 만큼 저항도 커지기 때문에 전자기식 작동기 II의 시상수가 더 작은 값을 가진다. 전자기식 작동기 II의 시상수가 작기 때문에 전자기식 작동기 I보다 응답성이 더 빠를 것이다.

4.2 정적 평형 상태 변화에 따른 특성 검토

마운트의 정적 처짐으로 인하여 이동자와 고정자가 평행 상태 유지가 어렵다. 이러한 불 평행이 발생할 시에도 작동기의 출력 힘이 요구 작동력을 만족해야 한다.

그림 9는 전자기식 작동기 I의 이동자와 고정자의 변위 차에 따른 힘을 나타낸 그림이다.

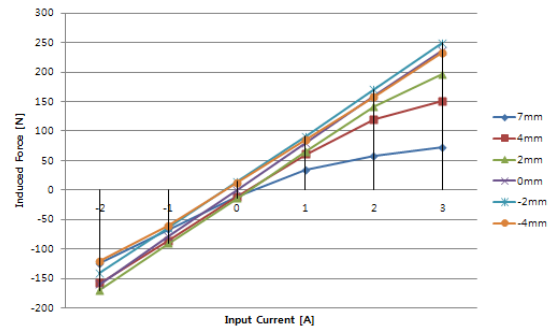


Figure 9 Computation of Static Force according to Variation of Equilibrium State for Type I

그림 10은 전자기식 작동기 II의 이동자와 고정자의 변위 차에 따른 힘을 나타낸 그림이다.

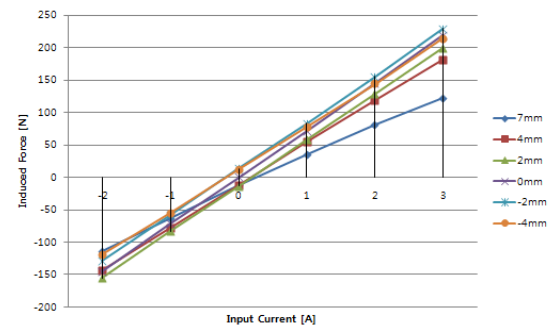


Figure 10 Computation of Static Force according to Variation of Equilibrium State for Type II

정적 평형 상태의 오차 범위 $\pm 1\text{mm}$ 정도임을 가 정할 때, 가동 구간 내에서 충분히 요구 작동력을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

4.3 공극 내 자속밀도

공극 내 자속밀도는 작동기의 출력 힘과 밀접한 연관이 있다. 공극 내 자속밀도가 커질수록 작동기의 출력 힘도 커지기 때문이다. 작동기의 힘을 예측 하기 위해 공극 내 자속밀도를 계산한다.

(가) 전자기식 작동기 I

영구자석의 자속은 자석의 N극에서부터 공극을 통과하여 Mover 금속을 거쳐 자석의 S극으로 흐른 다.

공극 내 자속은 자석의 전계 강도와 길이의 곱을 자석의 자기저항을 계산하여 합한 값으로 나눈다. 이 때, 자속 누설계수와 자기저항계수를 고려하여 계산한다. 자기 저항 계수는 일반적으로 1.2~1.5 사 이의 값, 자속 누설계수는 영구자석회로에서 2.5 ~ 10 사이의 값을 가지게 되는데 본 계산에서 자기저 항계수는 1.5, 자속 누설계수는 2.5를 택하였다. 계 산된 공극 내 자속은 공극의 면적으로 나누어 자속 밀도를 구한다.

코일은 Ferro-metal에 오른손 방향으로 감겨있다. 코일에 전류를 인가하여 발생한 자속은 Mover 금 속을 따라 흐르는 경로(경로 1)와 금속을 따라 흐르 다 공극을 통과하여 Stator를 거쳐 다시 공극에서 금속으로 흐르는 경로(경로 2)가 있다.

공극 내 자속은 감긴 코일의 턴 수와 인가한 전류 의 곱을 전체 자기저항의 값으로 나눈다. 전체 자기 저항 값은 자속의 경로 1의 공극 자기저항과 경로 2의 공극 자기저항과 자석의 자기저항을 합한 값이 병렬 연결되어있는 개념으로 구할 수 있다. 영구자 석의 특성은 표 2와 같다.

전자기식 작동기 I의 공극 내 자속은 다음 과 같다.

$$\text{공극 상부: } 0.3642 + 0.042 \times I \text{ (Wb)}$$

$$\text{공극 하부: } 0.3642 - 0.042 \times I \text{ (Wb)}$$

(나) 가동 영구자석형 작동기

전자기식 작동기 II은 공극 내 자속밀도 역시 위 의 전자기식 작동기 I와 같은 방법으로 계산한다. 전자기식 작동기 II의 공극 내 자속은 다음과 같다.

$$\text{공극 상부: } 0.3575 + 0.043 \times I \text{ (Wb)}$$

$$\text{공극 하부: } 0.3575 - 0.043 \times I \text{ (Wb)}$$

두 작동기의 공극 내 자속 밀도의 값은 크게 차이 가 나지 않는데, 그 이유는 영구자석의 부피가 크게 차이 나지 않으며 자로 형성의 패턴과 공극의 길이 가 같기 때문이다.

Table 2 Characteristic of Permanent Magnet

Parameters	Value
자석의 상대 투자율	1.05
자석의 보자력	148923.5

(다) 상용프로그램 결과와 비교

작동기의 공극 내 자속 밀도의 식을 유도해 보았 고 이를 상용 프로그램을 이용하여 확인한다. 전자 기장 해석 프로그램을 이용하여 공극 내 자속 밀도 의 값을 추출하고 Matlab을 이용하여 공극 내 자속 밀도의 평균 값을 계산한다.

공극 내 상부의 자속 밀도 값만 비교해보았다. 표 3은 전자기식 작동기 I에 대한 결과를, 표 4는 전 자기식 작동기 II에 대한 결과를 나타낸다.

Table 3 Comparison of Flux-density Values between Calculation and FE Code for Type I

	Calculated Value	Value using FE code
1A	0.4062	0.4187
2A	0.4482	0.4568
3A	0.4902	0.4928

Table 4 Comparison of Flux-density Values between Calculation and FE Code for Type II

	Calculated Value	Value using FE code
1A	0.4005	0.4061
2A	0.4435	0.4442
3A	0.4865	0.4832

5. 결 론

본 연구에서는 저주파수 대역의 진동 저감을 목표 로 전자기식 작동기를 포함하는 능동형 하이브리드 마운트의 설계 절차를 제안하였다. 하이브리드 마운 트 설계를 위한 수동 마운트와 작동기의 배치에 따 른 동특성 변화 등을 고려하여 지반에 전달되는 힘 을 효과적으로 감소시킬 수 있는 마운트 배치 형식

을 선정하였다. 하이브리드 마운트가 적용될 장비 시스템의 진동 계측 결과를 이용하여 작동기의 목표 요구 작동력을 산출하였으며, 누설 자속을 감소시키며 작동기를 소형화, 경량화 시키는 방향으로 세부적인 설계안을 제안하였다. 또한 실적용 및 설치 시 문제를 야기시킬 수 있는 내충격 성능과 간섭, 정적 평형 상태 변화에 따른 힘 특성 변화 등을 고려해 최종 설계안을 제시하였으며 이에 대해 세부적으로 검토 하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Moon, S. J., Kwak, J. S., Chung, J. H., Ji, Y. J., Yoon, J. S., Choi, S. M., Lee, H. Y., Jung, W. J. and Ki, D. J., 2010, "A Study on the Hybrid Mount against Vibration and Shock for Naval Ships", Shock and Vibration. Vol.17, pp. 269~283.

[2] Oh, J. S., Choi, S. B., Nguyen, V. Q., Moon, S. J. and Choi, S. M., 2011, "Evaluation of Vibration Control Performance for Active Hybrid Mount System: Experimental Investigation", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.21, No.5, pp. 455~460.

[3] H.Y. Cho, S.J. Moon, Y.H. Shin, W.J. Jung, M.C. Won, 2012, "A Comparative Study on the Dynamic Characteristics and Control Performance of Hybrid Mounts According to Element Configuration", Submitted to Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering

[4] Moon, S. J., Jung, H. J., Shin, Y. H., Jang, D. D., Jeong, J. A. and Moon, Y. J., 2011, "Development of a Hybrid Mount System Combined Air-spring with Piezostack Actuator for Micro-vibration", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.21, No.1, pp.56~65.

[5] Moon, S. J., Park, S. H., Jeong, J. A., Huh, Y. C., Kim, C. H. and Choi, S. M., 2011, "A Study on the Development of a Hybrid Electromagnetic Actuator Against Microvibration", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.21, No.5, pp.475~483.

[6] An, C. H., Yim, K. H., Jin, K. B. and Rim, K. H., 2007, "Active Control of Vibration Isolation Table Using Air-Spring", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.17, No.7, pp.565~571.

[7] Shin, Y. H. and Kim, K. J., 2009, "Performance Enhancement of Pneumatic Vibration Isolation Table in Low Frequency Range by Time Delay Control", Journal of Sound and Vibration. Vol.321, No. 10, pp.537~553.

[8] Lee, B. H. and Lee, J. W., 2007, "Optimal Design of Electromagnetic Type Active Control Engine Mount in Consideration of Actuator Efficiency", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1112~1118.

[9] Lee, D. H., Son, J. W. and Choi, S. B., 2009, "A New Type of Active Engine Mount System Featuring MR Fluid and Piezostack", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.19, No.6, pp. 583~590.