

# 박용 발전기세트 진동 제어용 MR 마운트 개발 Development of MR Mount for Vibration Control of Marine Diesel-Generator Set

강옥현† · 김원현\* · 주원호\* · 박준희\*\*

Ok-Hyun Kang, Won-Hyun Kim, Won Ho Joo and Jun-Hee Park

**Key Words :** MR mount(MR 마운트), Diesel-generator set(발전기세트), Flow mode(유동 모드), Damping force(감쇠력)

## ABSTRACT

This paper investigates the magneto-rheological(MR) mount for the marine diesel-generator(D/G) sets. Sometimes, significant vibrations over the allowable limit are observed on the D/G sets due to their huge excitation forces. Because the severe vibration can lead to structural damages to the D/G sets, it should be reduced below the limit. Although passive mounts with rubber isolators are usually used, the vibration reduction performance is not always sufficient. In addition, expecting that the vibration levels required by customers will get more severe, vibration reduction devices need to be developed. To the aim, the flow mode type of MR mount has been designed. Especially, the annular-radial configuration was adopted to enhance the damping force within the restricted space. The geometry of the mount has been optimized to obtain the required damping force and the magnetic field analysis has been carried out using ANSYS APDL. To verify the performance of the developed MR mount, an excitation test was conducted. In addition, they were applied to a medium-speed diesel generator and it was verified that about 40% of vibration reduction was yielded.

## 기 호 설 명

- $\Delta P$  : 총 압력 강하
- $\Delta P_{\eta}$  : 점성에 의한 압력 강하
- $\Delta P_y$  : 항복응력에 의한 압력 강하
- $\eta$  : 점성 계수
- $L_p$  : 피스톤 상/하부 판 두께 혹은 극(pole) 길이
- $L_c$  : 피스톤 중간판 두께
- $t_{d1}$  : 환형 유로 간극
- $t_{d2}$  : 반경 유로 간극
- $t_h$  : 내부 하우징 두께
- $R_o$  : 내부 하우징 반경
- $R_i$  : 피스톤 중간판 내경
- $Q$  : 유체 유동량
- $\tau_{ya}$  : 환형(annular) 유로 간극 영역에서의 항복 응력
- $\tau_{yr}$  : 반경(radial) 유로 간극 영역에서의 항복 응력
- $\dot{z}$  : 유동 속도

## 1. 서 론

최근 강화되고 있는 환경 규제에 의한 엔진 폭발 압력의 증가 추세와 더불어 원가 절감을 위한 구조 경량화는 박용 발전기세트의 진동 성능에 불리한 영향을 주고 있다. 또한 발전기세트에 대한 엄격한 진동 수준을 요구하는 고객들이 증가하고 있다. 하지만 기존의 탄성 마운트 교체 및 구조물 보강과 같은 수동적인 공진 회피 설계로는 진동 저감 성능에 한계가 있기에 발전기세트 저진동화를 위해서는 추가적인 진동 저감 장치의 개발이 필요하였다<sup>(1)</sup>.

본 논문에서는 발전기세트의 진동 저감을 위하

† 교신저자; 정회원, 현대중공업 동역학연구실  
E-mail : okhyun.kang@hhi.co.kr  
Tel : 052-202-7404 , Fax : 052-250-9570  
\* 현대중공업 동역학연구실  
\*\* 인하대학교 지능 구조물 및 시스템 연구실

여 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 마운트를 개발하였다. 개발된 MR 마운트는 실제 현장에서 적용되고 있는 상용 탄성 마운트와 직결된 구조를 가지며 유체의 유동 모드를 이용한 감쇠력을 발생시킨다. 특히 기진력이 큰 발전기세트의 진동을 효과적으로 저감시키기 위해 제한된 부피 내에서 높은 감쇠력을 발생시킬 수 있는 annular-radial 타입의 3 단 피스톤 형상을 적용하였다<sup>(2)</sup>. MR 마운트의 상세 형상 치수는 ANSYS 기반의 최적 설계를 통하여 도출하였으며, 피로시험기를 이용한 동특성 실험을 통하여 개발된 MR 마운트의 감쇠력을 검증하였다. 이를 바탕으로 중속 박용 발전기세트에 개발된 MR 마운트를 실적용하여 진동 저감 성능을 검증하였다.

## 2. 발전기세트용 MR 마운트 설계

### 2.1 MR 마운트 구성

박용 발전기세트 적용을 위해 제안된 MR 마운트 전체 형상을 Figure 1에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 개발된 MR 마운트는 정하중 지지를 위한 상부 탄성 요소와 감쇠력을 발생시키는 하부의 MR 댐퍼가 직결된 구조를 가진다. 상부의 탄성 요소는 기존의 상용 탄성 마운트를 이용하였으며 이는 여러 업체에서 제공되는 다양한 사양의 탄성 마운트에 동일한 MR 댐퍼를 단순 연결함으로써 손쉽게 MR 마운트를 구성할 수 있도록 하기 위함이다. MR 댐퍼는 피스톤을 중심으로 상/하부 챔버가 있으며 MR 유체로 채워져 있다. MR 마운트의 감쇠력 발생 부위와 자기 회로는 Figure 2에 자세히 나타내었다. 탄성 마운트와 직결되어 수직 방향으로 부하가 작용할 때 3단으로 구성된 피스톤 역시 수직 방향으로 동일하게 움직인다. 이 때 그림의 붉은색 화살표로 표기한 유로를 따라 유체가 상부 혹은 하부 챔버로 이동한다. 그리고 피스톤 중앙부에 감겨진 코일에 전류가 인가되면 파란색 점선과 같이 자기장이 형성되어 유체 유동에 저항하는 감쇠력을 추가로 발생시킨다. 자기회로 형상은 그림에서 볼 수 있듯이 annular-radial 덕트 형상을 적용하여 제한된 부피 내에서 높은 감쇠력을 갖도록 하였다.

### 2.2 수학적 모델링

MR 마운트의 감쇠력 모델링을 위하여 MR 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 유체 저항에 의한 동일 공간 상의 내부 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하며 유로 형상에 의한 압력 손실은 없다고

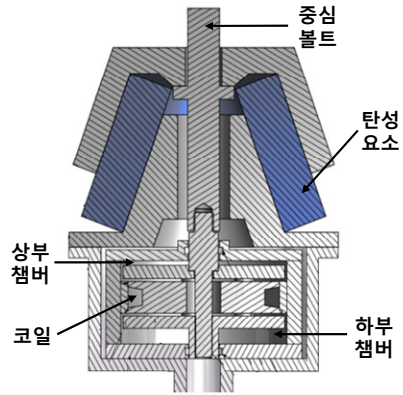


Figure 1 Overall configuration of MR mount

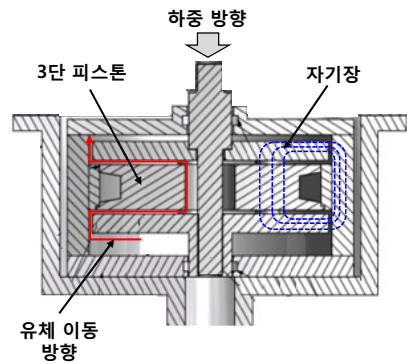


Figure 2 Magnetic circuit parts

가정하였다. 이를 바탕으로 계산된 총 압력 강하는 MR 유체의 기본 점성에 의한 압력 강하와 자기장 세기에 의해 결정되는 항복 응력에 의한 압력 강하의 합으로 표현할 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_{\eta} + \Delta P_{y} \quad (1)$$

$$= \left\{ 2 \left[ \frac{6\eta L_p}{\pi t_{d2}^3 R_o} + \frac{6\eta}{\pi t_{d1}^3} \ln \left( \frac{R_o}{R_i} \right) \right] + \frac{8\eta L_c}{\pi R_i^4} \right\} Q$$

$$+ 2 \left( c \frac{L_p}{t_{d2}} \tau_{ya} + c \frac{R_o - R_i}{t_{d1}} \tau_{yr} \right) \text{sgn}(\dot{z})$$

위의 식 (1)에서 알 수 있듯이 압력 강하는 유로 간극의 크기에 반비례한다. 하지만 감쇠력 증가를 위하여 간극을 너무 작게 하면 유체 잠김 현상이 발생할 수 있으므로 적절한 간극 선정이 중요하다<sup>(1)</sup>.

### 2.3 자기장 해석

MR 마운트의 자기회로 설계 및 해석을 위하여 ANSYS APDL을 이용하였다. 해석을 위한 자기회로

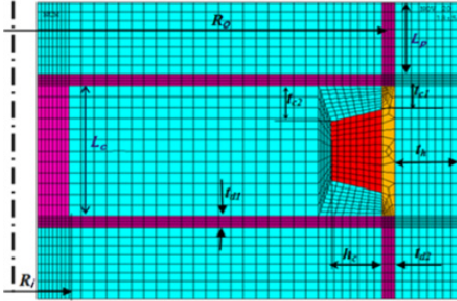


Figure 3 FE model

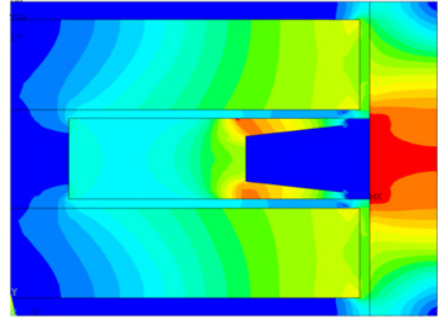


Figure 4 Magnetic flux density

Table 1 Design variables and optimal values

Design variables	Values (mm)
Annular Magnetic Pole Length ( $L_p$ )	15.4
Inner Radius of Inner Housing ( $R_o$ )	69.2
Height of Core Set ( $L_c$ )	52
Gap of Radial Region ( $t_{gr}$ )	2
Gap of Annular Region ( $t_{ga}$ )	2
Thickness of Inner Housing ( $t_h$ )	14
Inner Radius of Center Core ( $R_i$ )	12

부의 유한 요소 모델은 Figure 3에 나타내었다. 코일과 보빈을 제외한 부분은 강자성체인 steel 1018 물성치를 이용하였고, MR 유체는 Liquid Research사의 MRHCCS4-B 80% 제품을 이용하였다. 자기 회로의 상세 형상 치수는 ANSYS APDL의 최적화 기법을 이용하여 설계하였으며<sup>(3)</sup> 주요 최적 변수 값은 위의 Table 1에 정리하였다. 도출된 최적 형상 치수가 적용된 자기회로의 해석 결과인 자속 밀도 분포는 Figure 4와 같다. 환형(annular) 및 반경(radial) 영역에서의 평균 자속 밀도와 이 때 생성되는 MR 유체의 감쇠력은 Table 2에 정리하였으며 최종적으로 38.2kN의 감쇠력이 발생됨을 해석적으로 검증하였다. 특히 반경 영역에서 발생하는 감쇠력이 환형 영역의 3배 이상임을 알 수 있었으며 이로부터 추가적인 감쇠력이 필요할 경우 피스톤의 길이 증가보다는 반경 증가가 효과적임을 알 수 있다.

Table 2 Simulation results: damping force

Simulation	Annular	Radial
Average Magnetic Density	1.06T	0.55T
Damping Force	8.8kN	29.4kN
Total Damping Force	38.2kN	

### 3. 동특성 시험

제작된 MR 마운트의 감쇠력 검증을 위해 동특성 시험을 수행하였다. 시험 장치 구성은 Figure 5와 같으며 MTS 장비를 가진기로 이용하였다. 시험 조건은 1mm 크기 변위를 수직 방향으로 다양한 주파수(1, 2, 4, 6, 8, 10Hz)에서 가진하였다. 이 때 0 ~ 3A의 전류를 0.5A 간격으로 인가하여 감쇠력 변화를 확인하였다. MR 마운트에 작용하는 하중은 MTS에 내장된 로드셀(load cell)을 이용하여 측정하였고, 변위 측정을 위한 갭 센서(gap sensor)와 가속도 센서를 그림과 같이 설치하였다. 가진 주파수 1 Hz에서 측정된 MR 마운트의 힘-변위 선도는 Figure 6과 같다. 전류 인가 전에는 탄성 마운트의 동강성에 해당되는 기울기를 가지며 전류를 증가함에 따라 발생하는 감쇠력 역시 커진다는 것을 알 수 있다. 각 가진 주파수에서 측정된 최대 감쇠력은 Table 3에 정리하였으며 최대 25.6kN의 감쇠력이 발생되었다. 여기서 탄성 마운트에 의한 복원력을 제거하면 최대 약 19kN의 감쇠력이 발생되었다.

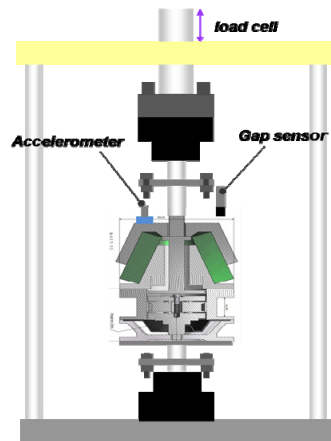


Figure 5 Test set-up

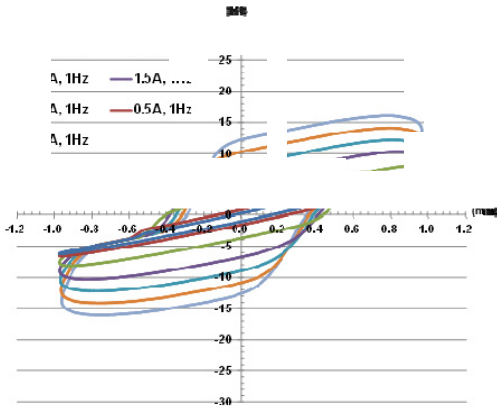


Figure 6 Force-displacement diagram (@ 1Hz)

Table 3 Maximum damping force

	1 Hz	2Hz	4Hz	6Hz	8Hz	10Hz
0.0 A	6.2	6.4	6.5	6.7	6.7	6.5
0.5 A	6.6	6.8	6.8	6.9	6.8	6.8
1.0 A	8.2	8.6	9.0	9.1	9.3	9.2
1.5 A	10.4	-	12.2	12.6	12.9	13.1
2.0 A	12.2	14.6	16.2	17.0	17.5	17.3
2.5 A	14.2	17.4	20.2	21.4	21.8	21.5
3.0 A	16.1	18.5	23.3	24.8	25.1	25.6

#### 4. 실적용 시험

MR 마운트의 진동 저감 성능을 검증하기 위하여 당사 중속 박용 발전기세트에 실적용 시험을 수행하였다. 해당 발전기세트는 총 4개의 탄성 마운트로 지지되며 이를 모두 개발된 MR 마운트로 교체하였다. 그리고 Figure 7과 같이 발전기 측 하단에 설치된 MR 마운트 옆에 유압 가진기를 설치한 후 4 kN의 동하중을 수직방향으로 가진하였고, 그 때 발생하는 마운트 상부 베이스프레임 진동 응답을 계측하였다. MR 마운트에 의한 진동 저감 성능을 비교하기 위하여 기존 탄성 마운트가 설치된 조건에서도 동일한 유압 가진기 실험을 수행하였다.

유압 가진기 실험을 통해 계측된 마운트 상부 베이스프레임 진동은 Figure 8과 같다. 해당 그림은 기존 탄성 마운트에 의한 진동 응답과 MR 마운트 적용 후 응답 크기의 비를 나타낸다. MR 마운트는 기본적으로 점성 감쇠를 가지고 있기 때문에 전류를 인가하지 않더라도 탄성 마운트 설치 시보다 진동 수준이 크게 감소됨을 알 수 있다. 그리고 전류를 인가하였을 때 진동 크기가 최대 40% 추가 감소되었다. 10 ~ 12 Hz 구역은 anti-resonance 구간

으로 진동 응답이 오히려 크게 증가한 것처럼 보이지만 그 절대적인 크기는 매우 작다.

유압 가진기에 의한 MR 마운트의 진동 변위 크기를 Figure 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 진동 변위 크기의 실효값이 0.35mm 이상 일 경우 전류 인가에 따른 추가적인 감쇠가 발생됨을 알 수 있고 12Hz 이상의 미소 변위에서는 점성 감쇠만이 존재함을 알 수 있다. 그리고 10 ~ 11.5Hz 구간에서는 전류 인가 시에 변위 크기가 오히려 증가함을 볼 수 있는데 이는 MR 유체의 강성 효과가 발생하는 천이 구간으로 판단된다. 따라서 본 실험으로부터 개발된 MR 마운트는 큰 진동 변위를 가지는 박용 발전기세트 진동 저감 장치로 활용 가능성을 검증하였다.

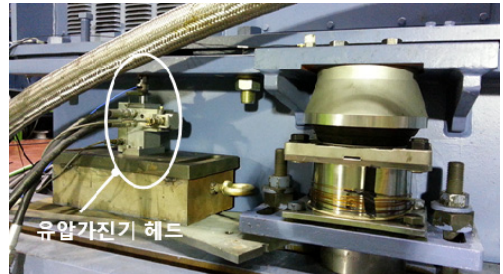


Figure 7 Installation of hydraulic exciter

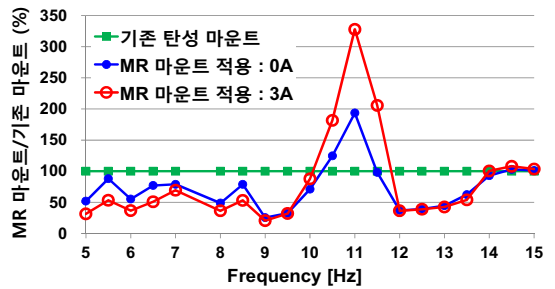


Figure 8 Hydraulic exciter test results

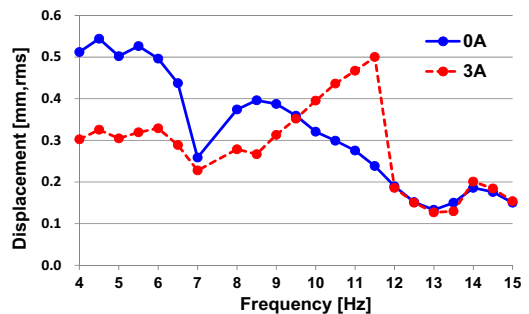


Figure 9 Displacement comparison

### 3. 결 론

본 논문에서는 박용 발전기세트의 진동 저감을 위한 MR 마운트를 개발하였다. 개발된 MR 마운트는 상용 탄성 마운트를 직접 결합할 수 있도록 하여 발전기세트에 기 적용되고 있는 기존 탄성 마운트를 그대로 활용 가능하도록 하였다. 그리고 제한된 부피 내에서 높은 감쇠력을 발생시킬 수 있도록 annular-radial 형상의 자기회로를 설계하였다. 개발된 MR 마운트는 동특성 시험을 통하여 20 kN에 가까운 감쇠력이 발생됨을 검증하였고, 당사 중속 박용 발전기세트에 설치하여 유압 가진기를 이용한 가진 실험을 수행하였다. 그 결과 개발된 MR 마운트는 큰 진동 변위를 가지는 박용 발전기세트 진동을 저감하는데 효과적임을 검증하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) Kang, O. -H., Kim, W. -H., Joo, W. H. and Park, J. -H., 2013, Design of the Magnetorheological Mount with High-damping Force for the Marine Diesel-generator Set, Proceedings of SPIE 8688-49.
- (2) Nguyen, Q. -H., Han, Y. -M., Choi, S. -B. and Wereley, N. M., 2009, Geometry Optimization of MR valves Constrained in a Specific Volume Using the Finite Element Method, Smart Mater. Struct. 16, pp. 2242~2252.
- (3) Ha, S. H., Seong, M. -S., Heung, Q. -N. and Choi, S. -B., 2009, Optimal Design of MR Damper : Analytical Method and Finite Element Method, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1110~1118.