



## 자기장 응답 입자의 배향이 자기유변 탄성체의 전달성에 미치는 영향

이주환·정경호<sup>†</sup>·윤지현\*·오재응\*·김민수\*\*·양경모\*\*·이성훈\*\*

수원대학교 신소재공학과, \*한양대학교 기계공학부, \*\*현대·기아 연구개발본부  
접수일(2011년 10월 18일), 수정일(2011년 10월 28일), 게재확정일(2011년 11월 10일)

### The Effect of Orientation of Magneto-responsive Particles on the Transmissibility of Magneto-rheological Elastomer

Joo-Hwan Lee, Kyung-Ho Chung<sup>†</sup>, Ji-Hyun Yoon\*, Jae-Eung Oh\*, Min-Soo Kim\*\*  
Kyung-Mo Yang\*\*, and Seong-Hoon Lee\*\*

Department of Polymer Engineering, The University of Suwon, Hwaseong-Si, Gyeonggi-Do 445-743, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Hyundai Kia Motors Research & Development Division, Gyeonggi-Do 772-1, Korea

(Received October 18, 2011, Revised October 28, 2011, Accepted November 10, 2011)

**요약** : 자기장 응답 입자를 효율적으로 배향시킬 수 있는 네오디뮴 자석이 삽입된 몰드가 제시되었다. 입자 배향 공정을 통해 이방성 자기유변 탄성체가 제조되었으며 입자의 최적 첨가량은 30 vol.% 였다. 입자 배향성이 증가할수록 자기유변 탄성체의 인장강도는 감소하고 경도는 증가하였다. FFT 분석기를 통해 측정된 최대 자기유변 특성은 30 vol.%의 자기장 응답 입자를 포함한 자기유변 탄성체에서 나타났으며 인가전류 3 A에서 최대 59%의 전단 모듈러스 변화율을 나타내었다. 또한 인가전류와 자기장 응답 입자의 첨가량이 증가할수록 자기유변 탄성체의 전달성은 감소하였고 흡수 주파수 영역은 증가하여 우수한 댐핑 특성을 나타내었다.

**ABSTRACT** : The neodymium magnet inserted mold was proposed to orient magneto-responsive particles efficiently. The anisotropic magneto-rheological elastomer(MRE) was prepared using the new mold and the optimum amounts of the particles was 30 vol.%. As the orientation of particles was increased, the tensile strength of MRE was decreased, while the hardness of MRE was increased. It was found that the MRE containing 30 vol.% of magneto-responsive particles showed the maximum magneto-rheological effect. The ratio of shear modulus shift was 59% at the input current of 3 A. The transmissibility of MRE was decreased with increasing the input current and loading amounts of magneto-responsive particles. Therefore, the damping property of MRE could be improved by preparing the anisotropic MRE.

**Keywords** : natural rubber, magneto-responsive particle, transmissibility, anisotropic MRE, damping property

## I. 서 론

현재의 자동차는 구조의 경량화와 더불어 고출력, 고성능화에 따라 승차감이나 진동, 소음의 개선에 대한 요구가 증대되고 있다. 진동과 소음을 낮추기 위해서는 가진원의 진동과 소음을 줄이는 방법 또는 가진원으로부터 진동전달을 방지하거나 가진원의 진동을 저감시키는 방안을 모색해야 한다. 가진원으로부터 진동전달을 방지하는 방법은 가장 많이 사용하고 있는 방진기술로써 구조물의 파손과 공해를 방지할 뿐만 아니라 신뢰성과 내구성을 향상 시키기도 한다.<sup>1</sup> 이러한 진동의 전달방지가 주요 목적인 고무 제품이 방진 고무이다. 방진 고무의 기술은 최근 자동차 산업이 급속하게 팽창하면서 양적, 질적으로 발전하고 있다. 자동차는 1대당 방진고무의 사용 개

수가 대단히 많고 그 특성상 방진고무의 기능을 최대한으로 이용하고 있는 제품 중의 하나이다. 자동차용 방진 고무는 진동과 소음을 감소시키는 것뿐만 아니라 조종안정성 등 자동차의 운전성능에도 영향을 주는 부품이다.

차량에서 발생하는 진동을 제어하기 위한 방진 고무는 구조물 사이에 설치되어 정적으로는 2개의 구조물을 고정하는 탄성역할과 동적으로는 진동제어의 역할을 한다. 그러나 고무는 가진 주파수와 함께 동적 강성도가 증가하는 단점이 있다. 구조물의 강건한 결합 상태를 유지하기 위해 고무의 강성을 높게 하면 진동 절연 효과가 저하되고, 또 그 절연효과를 높이기 위해 고무의 강성을 낮추면 구조물의 결합 상태는 나빠게 된다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 유체마운트가 개발되어, 마운트의 모델링 및 진동특성 해석, 진동절연 효과를 위한 능동적, 준능동적인 연구가 폭넓게 이루어지고 있다.<sup>2,3</sup> 유체마운트는 내부의 유체운동에 의해 발생하는 노치(notch) 주파

<sup>†</sup> 대표저자 E-mail: khchung@suwon.ac.kr

수보다 낮은 주파수에서는 진동절연 효과가 크게 되지만, 노치 주파수보다 높은 주파수에는 유체의 공진피크가 발생하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 차량의 고기능화와 상품성 향상을 목적으로 차량의 진동을 반능동적(외부의 전원이나 파워 연결을 통하여 제어가 가능, 그리고 부가적인 센서가 필요 없기 때문에 경제성면에 탁월)으로 제어하여 승차감과 조종성능을 동시에 향상시키는 기술로써 종래의 유체 마운트에서 진보된 기술인 외부로부터의 전기 신호에 의해 자기장의 세기를 변화함으로써 재료특성이 변하는 자기유변 탄성체 (Magneto-rheological Elastomer; MRE)를 개발하고자 한다. MRE의 기본특성은 MRE 외부에서 자기장이 가하여지면 분산된 입자가 자기장의 방향으로 사슬형상의 클러스터를 형성하고, 전단흐름이나 압력흐름에 대해 저항한다고 하는 것이 기본적인 메카니즘이다. MRE의 기본특성에 관한 연구는 현재 많은 연구가 이루어지고 있지만 결과는 미비한 실정이다.<sup>3-7</sup>

자기장 응답 입자가 충전된 매트릭스를 경화과정 중이나 경화과정 전에 일정한 자기장에 노출시킴으로써 입자의 선배향을 유도한 탄성체를 이방성 MRE (anisotropic MRE; a-MRE)라 하며 반면, 탄성체의 배합 후 별도의 선배향 과정 없이 경화과정을 거친 것을 등방성 MRE (isotropic MRE; i-MRE)라 한다. 대부분의 연구 결과들을 보면<sup>1,3,6,7</sup> i-MRE에 국한되어 있기 때문에 본 연구에서는 새로운 형태의 몰드를 디자인하여 a-MRE를 제조하고 이의 자기유변 특성을 i-MRE와 비교하고자 하였다. a-MRE는 선배향 과정을 통해 자기장 응답 입자들이 이미 일정한 방향으로 배열되어 있는 상태이기 때문에 최종적으로 성형된 후 자기장을 적용시 입자의 배향으로 인해 i-MRE에 비하여 모듈러스가 자기장 세기에 따라 더 크게 변할 수 있다. 따라서 a-MRE는 댐핑재료로 사용시 i-MRE보다 상대적으로 높은 자기유변(magneto-rheological; MR) 효과를 보일 수 있게 된다. 그러므로 보다 높은 MR 효과를 얻기 위해 a-MRE를 제조할 필요성이 있으며 그에 따른 제조공정의 설계도 수반되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 a-MRE를 제조하기 위한 효율적인 제조공정을 제시하였으며, 자기장 응답 입자의 배향성이 MRE의 전달성 특성에 미치는 영향을 분석하여 차량의 진동을 반능동적으로 제어가 가능한 스마트 재료 개발을 위한 데이터를 제공하고자 한다. 본 연구를 통해 신뢰성 있는 MRE가 개발이 된다면 자동차용 서스펜션 부시에 적용 가능하여 자동차의 성능 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 실험

### 1. 재료 및 배합공정

본 연구에서는 MRE의 매트릭스로 천연고무(NR, RSS#1)를

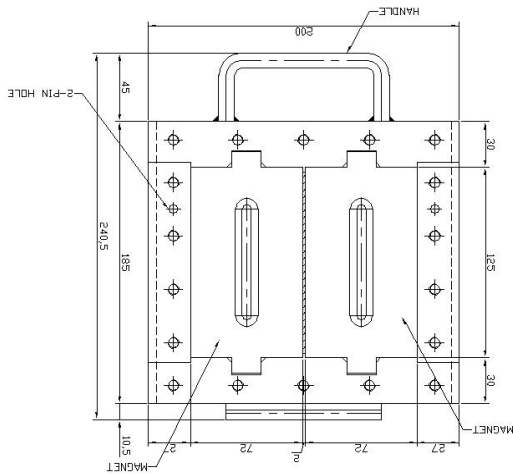
사용하였고, 자기장 응답 입자로는 표면처리한 미세 철입자 (International Specialty Products, s-1641)를 사용하였으며 사용량은 0~50 vol.%였다. 자기장 응답 입자의 평균 직경은 3~5  $\mu\text{m}$ 였고 구형 모양이었다. NR 매트릭스 경화를 위해 황 2.5 phr, ZnO 5 phr, stearic acid 2 phr 및 sulfenamides 0.8 phr을 사용하였다.

고무 배합은 냉각수가 순환되는 open mill을 사용하여 NR을 충분히 소련 시킨 후 ZnO, stearic acid 및 sulfenamides를 먼저 배합하였다. 가교제인 황은 자기장 응답 입자의 배합 동안 발생하는 열에 의한 매트릭스의 스코치를 방지하기 위해 자기장 응답 입자를 배합하고 충분히 분산시킨 후 마지막으로 첨가하여 최종 마스터배치를 얻었다. 마스터배치는 배합물의 안정화를 위해 상온에서 24시간 보관 후 사용하였다.

### 2. MRE 제조공정

자기장 응답 특성을 나타내는 MRE를 제조하기 위해 이전 연구에서 사용하였던 네오디뮴 자석을 이용하는 방법에는 몇 가지 문제점이 있었다.<sup>8</sup> 첫째, 네오디뮴 자석 사이에 고무 배합물을 위치시켜 자기장 응답 입자의 배향을 유도한 후 매트릭스 경화를 위해 유압 프레스로 옮겨 경화시킬 때 유압 프레스의 압력으로 인해 자기장 응답 입자가 재배향되는 즉, 입자의 배향성이 사라지는 문제점이 있었다. 둘째는 자기장 응답 입자의 재배향을 최소화하기 위해 고무 배합물에 포함된 기포를 제거하기 위한 범핑 공정을 매트릭스 경화시 생략함으로써 경화된 MRE 시험편 내부에 다수의 기공들이 발생하는 문제점이 있었다. 따라서 이를 개선하기 위해 네오디뮴 자석이 삽입된 몰드를 설계 제작하여 MRE 제조공정을 개선하고자 하였다. Figure 1에 네오디뮴 자석응용 몰드의 사진과 설계도를 나타내었다. 본 몰드는 네오디뮴 자석을 경화과정 중에 압력으로부터 손상되는 것을 방지하기 위한 알루미늄 몸체와 경화과정 중 자기장 응답 입자의 배향을 유도하기 위한 네오디뮴 자석(2쌍 1조)으로 이루어져 있다. 사용한 네오디뮴 자석은 크기가 600x120x350 mm이며 자력의 보존 및 강화와 자석의 보호를 위해 알루미늄이 3 mm 두께로 코팅되어 있다. 본 몰드에 사용되는 네오디뮴 자석의 표면 자속밀도를 가우스측정기로 측정한 결과 약 0.6 Tesla의 표면 자속밀도를 나타내었다.

자기장 응답 입자의 배향성이 없는 등방성 MRE (i-MRE)는 최종 마스터배치를 얻은 후 고무 레오메터 (대경엔지니어링, DRM-100)로부터 측정된 90% 경화시간에 의거하여 160 °C에서 i-MRE를 제조하였다. 자기장 응답 입자의 배향을 유도한 이방성 MRE(a-MRE)는 Figure 1에 나타난 몰드를 이용하여 오븐에서 80 °C의 온도로 약 30분 선처리한 후 몰드를 프레스로 옮겨 160 °C의 온도에서 경화시켜 a-MRE를 제조하였다.



(a)



(b)

**Figure 1.** Neodymium magnet inserted mold; (a) design drawing, (b) inside of real mold.

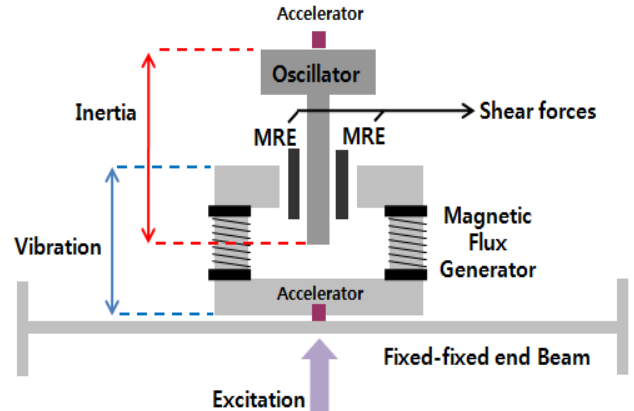
### 3. MRE의 기계적 물성 및 모폴로지 분석

제조된 MRE의 기계적 물성은 인장시험과 경도시험을 통해 평가하였다. 인장시험은 KSM 6782에 의거하여 표선거리 20 mm, 크로스헤드 이동속도 500 mm/min 및 상온에서 만능시험기(대경엔지니어링)를 이용하여 시행되었다. MRE의 자기장 응답 입자 첨가량에 따른 경도는 쇼와A 경도계를 이용하여 시험편 당 5회 측정하여 평균 경도값을 얻었다.

i-MRE와 a-MRE의 모폴로지는 주사전자현미경(JSM 5600, JEOL Co.)을 사용하여 조사하였고, 모폴로지 분석을 통해 MRE 제조공정 영향을 분석하였다.

### 4. MRE의 전달성 평가

MRE에 가해지는 진동의 전달성을 평가하기 위해 전자석이



**Scheme 1.** FFT analyzer.

적용된 Fast Fourier Transform (FFT) analyzer를 사용하였으며 설계된 FFT Analyzer를 Scheme 1에 나타내었다. Scheme 1에 나타난바와 같이 전체 시스템의 정확한 동작과 측정을 위하여 양끝이 고정된 철재 빔 위에 전체 시스템을 고정하였으며, 자기장을 부여할 수 있는 전자석 코일과 관성에 의해 MRE 시험편에 전단 하중이 가해질 수 있도록 2 개의 MRE 시험편을 Scheme 1에 나타난바와 같이 고정하였다. 하단에서 입력된 진동의 주파수를 하단의 가속도계가 측정하고 전체 시스템을 통해 감쇄된 진동을 상단의 가속도계가 측정함으로써 부가된 자기장의 자속밀도에 따른 MRE의 전달성을 측정할 수 있도록 구성되었다. FFT analyzer를 사용하여 자기장 응답 입자 첨가량 및 인가 전류 세기에 따른 MRE의 전달성이 측정되었다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 자기장 응답 입자 첨가량에 따른 MRE의 기계적 물성

자기장 응답 입자의 첨가량에 따른 MRE의 인장물성을 측정하여 그 결과를 Table 1에 나타내었고 Table 2에는 경도 측정 결과를 정리하였다.

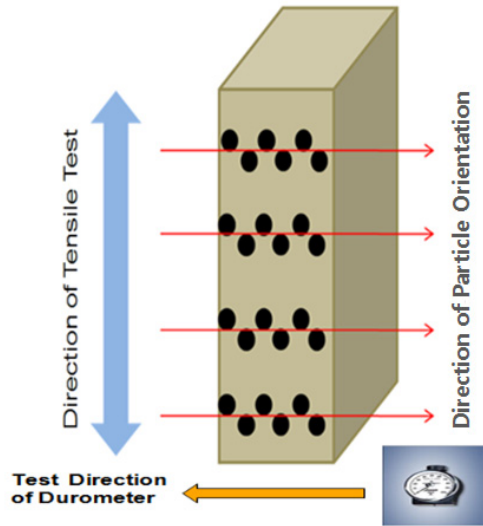
Table 1에 나타난바와 같이 i-MRE 경우 자기장 응답 입자의 첨가량이 증가함에 따라 인장강도 및 신장률이 30 vol.%의 첨가량까지는 다소 감소하다가 그 이상 첨가되면 크게 감소하였다. 그러나 a-MRE의 경우는 자기장 응답 입자의 첨가로 인장물성이 크게 감소하였으며 첨가량에 따른 차이는 크지 않았지만 i-MRE와 유사하게 40 vol.% 이상이 첨가되면 인장물성이 더욱 감소함을 알 수 있었다. 자기장 응답 입자와 매트릭스 사이의 계면결합을 기대하기 어렵기 때문에 자기장 응답 입자 첨가량이 증가할수록 인장물성이 감소하는 것은 당연한 결과라고 사료되며, a-MRE의 경우 i-MRE에 비해 인장물성이 더욱 크게 감소되는 이유는 자기장 응답 입자의 배향 특성으로 설

**Table 1. Tensile Properties of MRE with the Amounts of Magneto-responsible Particles**

Type of MRE	Vol. % of Particle	0	10	20	30	40	50
i-MRE	Tensile Strength (MPa)	25.9±0.8	25.4±2.3	23.4±0.7	23.8±0.3	16.0±1.2	10.8±0.8
	Elongation (%)	685±40	695±25	673±86	643±37	597±42	540±34
a-MRE	Tensile Strength (MPa)	25.9±0.8	8.7±1.5	5.2±1.8	5.9±0.9	5.4±1.1	3.8±1.2
	Elongation (%)	685±40	513±63	477±74	461±55	418±66	294±69

**Table 2. Hardness of MRE with the Amounts of Magneto-responsible Particles**

Vol. % of Particle	0	10	20	30	40	50
i-MRE	36	38	41	45	47	53
a-MRE	36	40	45	53	60	60



**Scheme 2.** Schematic diagram to represent the directions of particle orientation and test.

명되어질 수 있다.

제조된 MRE 시험편의 자기장 응답 입자 배향 방향과 시험이 수행된 시험방향을 Scheme 2에 도식화하여 나타내었다. i-MRE 경우는 자기장 응답 입자가 매트릭스에 균일하게 분산되어 배향성이 없지만 Scheme 2에 나타난바와 같이 Figure 1에 나타난 몰드를 사용하여 제조된 a-MRE 시험편의 경우 자기장 응답 입자는 두께 방향으로 배향이 되어 있으며 인장 시험은 입자 배향 방향과 수직 방향으로 진행이 된다. 이와는 반대로 경도는 자기장 응답 입자 배향 방향으로 측정된다. 따라서 자기장 응답 입자의 배향성이 우수할수록 인장강도는 감소하지만 경도는 증가할 것으로 예상이 되었다. 이와 같은 예상은 Table 1과 2에 나타난 결과와 잘 일치하였다. Table 2에 나타난 경도 값을 비교해보면 자기장 응답 입자 첨가량이

증가할수록 경도는 증가하였고 동일한 첨가량에서 a-MRE의 경도가 i-MRE의 경도보다 높았다. 인장강도 및 경도와 같은 기계적물성 평가를 통해 자기장 응답 입자의 배향성을 간접적으로 평가할 수 있다는 매우 흥미로운 결과를 얻었으며 모폴로지 비교를 통해 확인되었다.

자기장 응답 입자의 최적 첨가량을 평가하기 위해 자기장 응답 입자의 밀도 값을 사용하여 임계입자부피농도(critical particle volume concentration; CPVC)를 식 (1)을 사용하여 계산하였다. 식 (1)은 입자 형태가 구형일 경우에 해당하며 본 연구에서 사용된 자기장 응답 입자의 경우는 앞서 언급한 바와 같이 직경이 약 3~5 μm의 구형이기 때문에 식 (1)을 사용하여 CPVC가 계산될 수 있었다.

$$CPVC(\%) = \frac{100 \times \rho_{\text{apparent}}}{\rho_{\text{iron}}} = \frac{100 \times 2.7}{7.57} = 35.7 \quad (1)$$

여기서  $\rho_{\text{apparent}}$  및  $\rho_{\text{iron}}$ 는 각각 사용된 자기장 응답 입자의 겉보기 밀도 및 밀도를 나타낸다. 계산된 CPVC는 35.7 vol.%였으며 입자가 더 첨가될수록 입자 충전률이 높아 오히려 입자의 자기장에 의한 배향이 어려워질 것으로 판단되어지며 또한 MRE 자체의 인장강도와 신장률이 감소하였기 때문에 본 연구에서는 자기장 응답 입자의 최적 첨가량을 30 vol.%로 결정하였다.

MRE에 자기장이 인가되었을 때 자기장 응답 입자의 배향으로 인해 MRE의 모듈러스가 변하게 된다. 이러한 모듈러스의 변화율을 자기유변(magneto-rheological; MR) 효과라고 하며 MR 효과는 식 (2)에 의해 계산된다.

$$MR \text{ effect}(\%) = \frac{\Delta G}{G_i} \times 100 \quad (2)$$

여기서  $G_i$ 는 자기장이 인가되지 않았을 때의 MRE 초기 전단 모듈러스이며  $\Delta G$ 는 자기장이 인가되었을 때 MRE 초기 전단 모듈러스와의 차이를 의미한다. 따라서 MR 효과가 클수록 MRE의 성능은 우수하다고 할 수 있다. 이와 같은 MRE의 MR 효과는 Scheme 1에 나타난 FFT analyzer를 사용하여 측정되었으며 인가된 전류는 0~3 A 였다. 자기장 응답 입자가 0~50 vol.% 첨가된 i-MRE와 a-MRE의 인가전류에 따른 MRE 전단

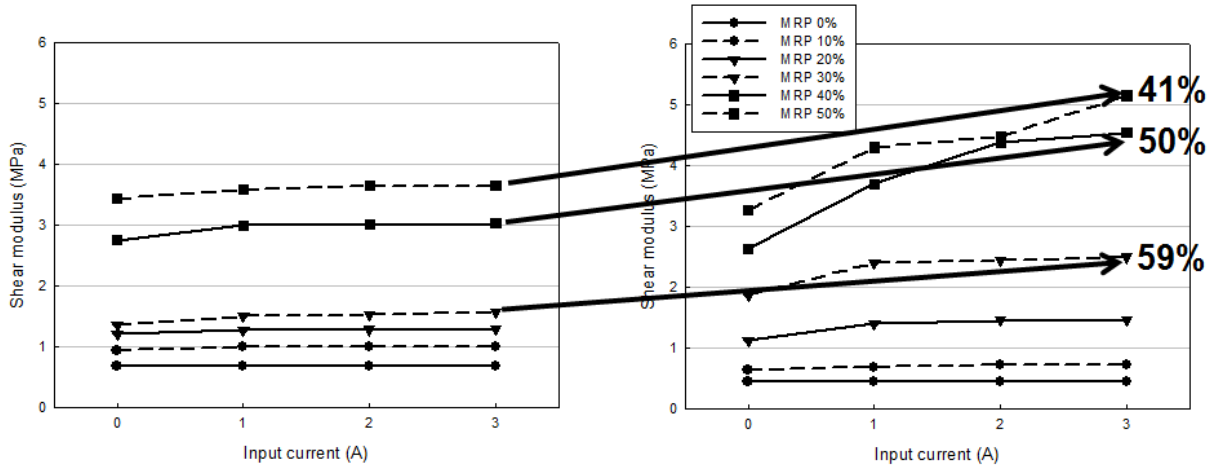


Figure 2. Change of shear modulus of MREs according to input current : (a) i-MRE, (b) a-MRE.

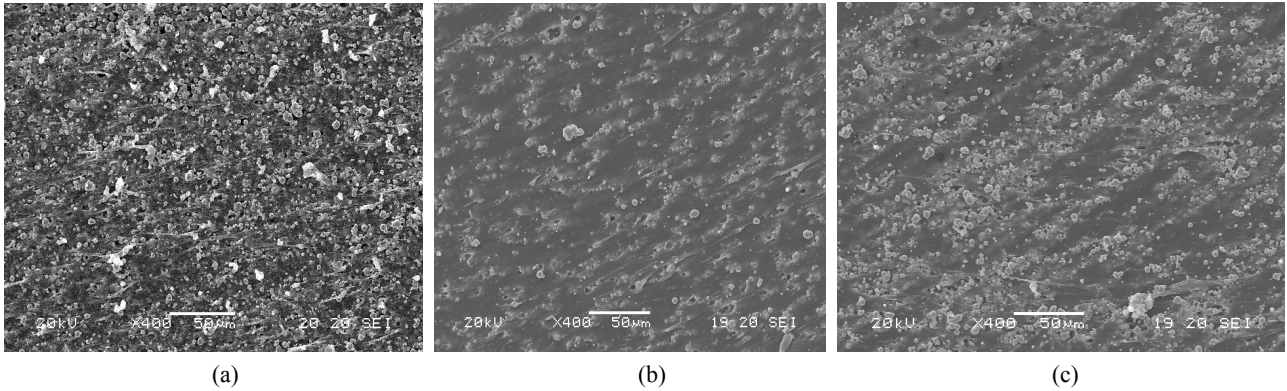


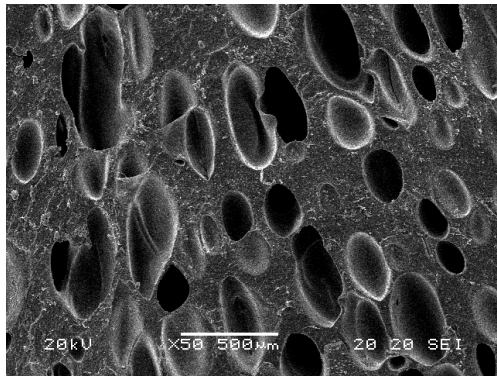
Figure 3. Morphology of MREs prepared by three different processes : (a) i-MRE, (b) a-MRE 1, (c) a-MRE 2.

모듈러스 변화를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)는 i-MRE의 결과이고 a-MRE의 인가전류에 따른 전단 모듈러스 변화는 Figure 2(b)에 나타내었다. Figure 2에 나타난 바와 같이 인가전류가 증가할수록 i-MRE와 a-MRE 모두 전단 모듈러스는 증가하였으며, 자기장 응답 입자 첨가량이 증가할수록 역시 전단 모듈러스는 증가하였다. 대부분의 경우 약 2 A의 인가전류에서 자기포화 현상을 나타내었으며, 3 A의 인가전류에서 i-MRE와 a-MRE의 전단 모듈러스 변화율은 자기장 응답 입자가 30 vol.% 첨가되었을 때 59%의 최대 값을 나타내었다. 자기장 응답 입자가 40 vol.%, 50 vol.%로 증가하면 전단 모듈러스 변화율은 각각 50% 및 41%로 감소하였다. 따라서 자기장 응답 입자가 30 vol.% 첨가되었을 때 최대 MR 효과를 나타내었으며 이 결과는 기계적 물성 및 CPVC의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

따라서 MRE 기계적 물성 결과와 비교해볼 때 현 시스템의 경우 약 30 vol.%의 자기장 응답 입자 첨가량이 최적인 것으로 사료되었다.

## 2. MRE의 모폴로지

MRE의 제조공정에 따른 모폴로지를 비교하여 Figure 3에 나타내었다. Figure 3(a)의 경우는 자기장 응답 입자를 균일하게 분산시켜 제조한 i-MRE의 모폴로지이며, Figure 3(b)의 경우는 앞서의 연구에서 네오디뮴 자석을 이용하여 자기장 응답 입자를 배향한 a-MRE의 모폴로지이다.<sup>8</sup> Figure 3(c)에는 본 연구에서 제시한 Figure 1에 나타난 몰드를 사용하여 제조된 a-MRE의 모폴로지를 나타내었다. Figure 3에 나타난 바와 같이 i-MRE의 경우는 자기장 응답 입자가 균일하게 매트릭스에 분산되어 있음을 알 수 있었고, a-MRE의 경우는 자기장 응답 입자의 뚜렷한 배향성을 확인할 수 있었다. 그러나 앞서의 연구에서 네오디뮴 자석만을 이용하여 자기장 응답 입자를 배향시킬 경우 공정 특성상 입자의 배향성이 다소 감소하였으며 또한 Figure 4에 나타난 단면에서 볼 수 있듯이 다수의 기공들이 발견되어 a-MRE의 기계적물성 감소에 큰 영향을 미쳤다. 그러나 Figure 1에 나타난 몰드를 이용하여 a-MRE를 제조할 경우 입자 배향성을 더욱 향상시킬 뿐만 아니라 범핑공정이



**Figure 4.** Cross-section of a-MRE manufactured by neodymium magnet.

가능하였기 때문에 매트릭스 내부에 기공도 발생하지 않았다. 따라서 이와 같은 공정을 통해 자기장 응답 입자가 30 vol.% 첨가되어 a-MRE가 제조되면 가장 우수한 전달성 즉 우수한 댐핑 특성을 가지는 자기유변 탄성체가 될 것으로 사료되었다.

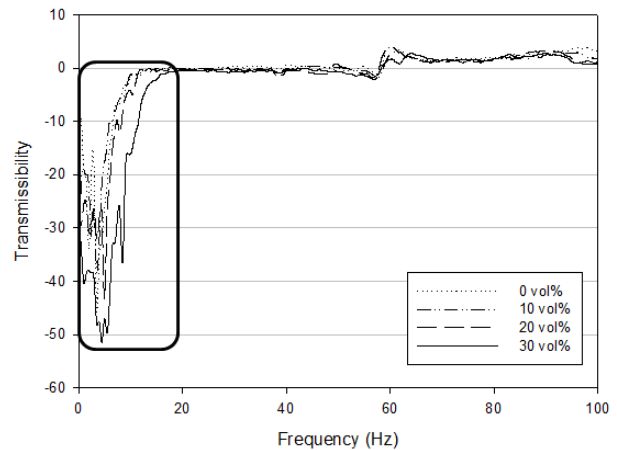
### 3. 자기응답 입자 첨가에 따른 MRE의 전달성 특성

자동차를 예로 들면 엔진으로부터 많은 진동이 발생하며 이 진동은 진동 마운트를 거쳐 차량의 나머지 부분으로 전달 되는데 이와 같은 진동의 전달을 전달성이라고 하며 전달된 힘을 가해진 힘으로 나눈 것으로 정의된다.

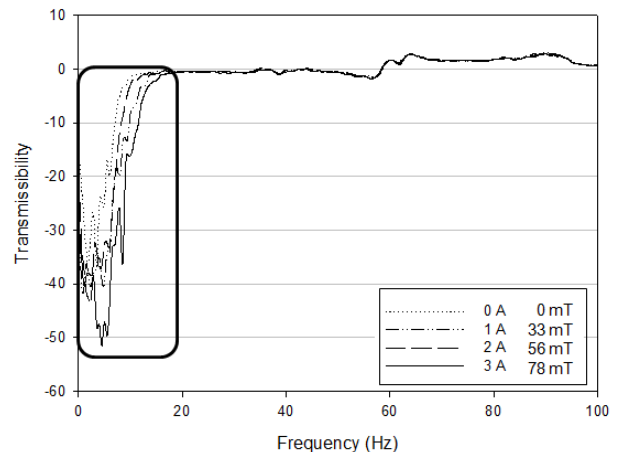
본 연구에서는 Scheme 1에 나타난 FFT analyzer를 사용하여 MRE의 전달성을 측정하였는데 아래의 가속도계를 통해 전류를 인가하여 진동을 발생 시키고 발생한 진동은 MRE 시험편을 통해 위쪽의 가속도계로 전달이 되어 감쇄된 진동이 측정된다.

Figure 5에는 0.078 Tesla의 자기 밀도에서 자기장 응답 입자 첨가량에 따른 전달성 결과를 나타내었는데 첨가량이 증가할수록 전달성이 감소하고, 흡수 주파수 영역이 넓어짐을 알 수 있었다. 자기장 응답 입자 첨가량을 30 vol.%로 고정하고 인가 전류 즉 자기 밀도 증가에 따른 전달성 결과는 Figure 6에 나타내었다. FFT analyzer에 인가전류가 0, 1, 2, 3 A로 증가함에 따라 자기 밀도는 0, 0.033, 0.056 및 0.078 Tesla로 변화하였다. Figure 6에 나타난바와 같이 자기 밀도가 증가할수록 전달성이 감소하고 주파수 영역이 넓어짐을 알 수 있다. 전달성이 감소한다는 것은 MRE의 우수한 댐핑 효과를 나타낸다는 의미이며 본 연구를 통해 30 vol.%의 자기장 응답 입자가 포함된 a-MRE는 우수한 댐핑 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

a-MRE 제조공정 및 기계적물성 향상을 위한 추가 연구가 현재 진행이 되고 있으며 신뢰성 있는 결과가 얻어진다면 본 연구의 최종 목표인 자동차용 서스펜션 부시에 응용될 수 있는 스마트 재료가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.



**Figure 5.** The variation of the transmissibility of a-MRE with the loading amounts of magneto-responsive particle.



**Figure 6.** The variation of the transmissibility of a-MRE with the input current.

## IV. 결 론

본 연구를 통해 네오디뮴 자석이 삽입된 a-MRE 제조용 몰드가 설계되었으며 이를 통해 네오디뮴 자석만을 사용하였을 경우 발생하는 매트릭스 내부의 기공을 제거할 수 있었다. 자기장 응답 입자 첨가량이 증가할수록 MRE의 인장강도는 감소하고 경도는 증가하였는데 입자와 매트릭스 사이의 계면결합을 기대할 수 없기 때문에 나타나는 당연한 결과였다. a-MRE의 경우 i-MRE에 비해 자기장 응답 입자의 동일한 첨가량에서 인장강도는 감소하고 경도는 증가하였는데, 이와 같은 결과는 입자의 배향성으로부터 초래되었으며 모폴로지 분석을 통해 확인되었다. MRE의 MR 효과 측면에서 최적의 자기장 응답 입자 첨가량은 30 vol.%였으며 a-MRE의 경우 최대 59%의 MR 효과를 얻었다. 또한 a-MRE의 전달성 특성은 자기

장 응답 입자 첨가량이 증가할수록 또한 자기 밀도가 증가할수록 전달성이 감소하고 진동 흡수 주파수 영역이 증가하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2008년도 일반연구자 지원사업(D00256) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임. 또한 현대·기아 연구개발본부의 지원에도 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. H. G. Busmann, B. Giinther, and U. Meyer, "Polymer matrix composites filled with nanoporous metal powders: preparation and electrical properties", *Nano Structured Mat.*, **12**, 531 (1999).
2. F. D. Goncalves, J. H. Koo, and M. Ahmadian, "A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies-Part 1: MR fluid and MR fluid models", *The Shock and Vibration Digest*, **38**, 203 (2006).
3. J. D. Carlson and M. R. Jolly, "MR fluid, foam and elastomer devices", *Mechatronics*, **10**, 555 (2000).
4. L. C. Davis, "Model of magnetorheological elastomers", *J. Appl. Phys.*, **85**, 3348 (1999).
5. C. Bellan and G. Bossis, "Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers", *Int. J. Modern Phys. B*, **16**, 2247 (2000).
6. M. Lokander and B. Stenberg, "Performance of isotropic magnetorheological rubber materials", *Polymer Testing*, **22**, 245 (2003).
7. Y. Shen, M. F. Golnaraghi, and G. R. Heppler, "Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers", *J. Intelligent Material Systems and Structures*, **15**, 27 (2004).
8. K. Chung and K. Yoon, "Basic Study for Development of Magnetorheological Elastomer", *Elastomers and Composites*, **45**, 106 (2010).