

## 자기유변 탄성체를 이용한 가변강성 기구에 대한 연구

안다훈 · 신유정\* · 최경후\*\*†

공주대학교, \*한국철도기술연구원, \*\*한국항공대학교  
(2021년 8월 25일 접수, 2021년 9월 10일 수정, 2021년 9월 10일 채택)

### Study on Variable Stiffness Mechanism Using Magnetorheological Elastomer

Dahoon Ahn, Yujeong Shin\*, and Kyungwho Choi\*\*†

Kongju National University, 1223-24, Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 31080, Korea

\*Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea

\*\*Korea Aerospace University, 76, Hanggongdaehak-ro, Deogyang-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10540, Korea

(Received August 25, 2021; Revised September 10, 2021; Accepted September 10, 2021)

**초록:** 본 연구에서는 정밀 모션기구 등의 제진 시스템에 적용하기 위한 가변강성 탄성기구를 제작하고 그 특성을 실험하였다. 진동 저감에 필요한 특성으로서 전단강성과 그 가변 정도를 파악하기 위해 천연고무 기지재 기반 자기유변탄성체를 제작하여 실험하였다. 혼입한 자기 응답성 입자는 입도 및 제조방식을 달리하는 4종의 카보닐 철을 사용하였으며, 자기장을 변경하며 전단강성 및 자기유변 효과를 측정하였다. 강성이 높고 자기유변 효과가 큰 입자를 선정하여 자기유변 탄성체를 제작하고, 이를 이용하여 전자석이 일체형으로 통합된 가변강성 탄성기구를 제작하였다. 전자석 전류 인가에 따른 공진주파수 변화를 실험하여 3.67-6.75% 가변강성 특성을 검증하였으며 전자석 구동에 따른 열적인 효과를 실험적으로 관찰하였다.

**Abstract:** In this study, variable stiffness elastic mechanism for the application to a vibration isolation system for precision motion mechanism was manufactured and its characteristics were evaluated. In order to understand the shear modulus and its variation as characteristics for vibration attenuation, magnetorheological elastomers based on a natural rubber matrix were fabricated and tested. Four types of carbonyl iron particles with different manufacturing methods were used, and the shear modulus and magnetorheological effects were measured by changing the volume fraction and applied magnetic field. A magnetorheological elastomer was manufactured by selecting carbonyl iron particles with high shear modulus and a large magnetorheological effect, and using this, a variable stiffness elastic mechanism with integrated electromagnets was manufactured. Variable stiffness characteristics of 3.67-6.75% were verified by testing the resonance frequency change according to the application of electromagnet current, and the thermal effect was experimentally observed.

**Keywords:** magneto-rheological elastomer, natural rubber, carbonyl iron particle, variable stiffness.

## 서 론

자기유변(magnetorheological, MR) 재료는 비자성체인 기지재 내부에 자기 응답성 입자를 내포하여 재료 외부에서 인가되는 자기장에 대하여 그 특성이 변화한다. MR 재료는 1948년 Jacob Rabinow에<sup>1</sup> 의하여 액상 형태인 자기유변유체(magnetorheological fluid, MRF)로 소개되었으며 그 이후 활발한 연구가 이루어졌고 댐퍼, 현가, 제동 장치 등에 실용화되었다<sup>2,3</sup>. 그러나 MRF는 액상으로 별도의 용기가 필요하고

입자 침강 등의 문제가 있어, 대안으로 자기유변 탄성체(magnetorheological elastomer, MRE)가 1983년 Rigbi and Jilken에<sup>4</sup> 의해 소개되었다. 이후 1996년 Jolly 등에<sup>5</sup> 의해 MRE의 거동 연구가 이루어지면서 MRE의 특성에 대한 다양하고 폭넓은 연구가 이루어져 왔다.

MRE는 일반적으로 비자성 고체 또는 겔 형태 매질에서 자기적으로 분극 가능한 입자로 구성되는 다양한 복합 재료를 포함한다. 기지재는 실리콘고무,<sup>6,7</sup> 천연고무(natural rubber, NR),<sup>8,9</sup> polydimethylsiloxane(PDMS),<sup>10</sup> 폴리우레탄<sup>11</sup> 등 다양한 비자성 고분자 물질이 사용되고 있다. 자기 응답성 입자로서는 대부분의 연구에서 자기포화도가 높은 카보닐 철 입자(carbonyl iron particle, CIP)를<sup>12,13</sup> 주로 사용하고 있으나 네오디뮴 자석,<sup>14</sup> 또는 비자성 입자인 carbon nano tube(CNT),<sup>15</sup>

†To whom correspondence should be addressed.  
kwchoi@kau.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-4011-0402  
©2021 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

그래핀<sup>16</sup> 등을 혼입하여 특성을 관찰하는 연구도 최근에 수행되었다.

MRE는 거시적 특성으로 봤을 때 외부자기장의 세기 조절을 통해 강성의 조절이 가능하다. 이러한 인장,<sup>17</sup> 압축<sup>18</sup> 또는 전단<sup>19</sup> 방향의 강성 특성 변화에 대한 연구는 다양한 종류의 기지재, 자성 입자 및 자기장 조건에서 결과가 보고되었다.<sup>20</sup> 이러한 특성 발현의 원리는 자성 입자 사이에 형성되는 자계 쌍극자간 자력의 존재로부터 설명할 수 있다. 입자가 강자성체이고 자기모멘트를 갖는 경우, 외부 자기장이 인가된 상태에서 MRE가 전단방향으로 변형하려면, 기존의 낮은 에너지 상태에서 입자가 변위되고 외부에서 일이 가해지는 형태가 된다. 이러한 일의 크기는 외부 자기장의 크기에 비례하므로, 자기장에 비례하는 전단 계수가 발생하게 된다.

외부 자기장에 의해 강성 조절이 가능한 특성을 활용하면 제진마운트 또는 서스펜션 장치에 MRE를 적용할 수 있다. Behrooz 등은<sup>21</sup> 실리콘고무 기반의 MRE를 이용한 제진 유닛을 제작하고 강성과 감쇠를 변화를 관찰하였으며, Xing 등은<sup>22</sup> 실리콘고무 기반의 MRE와 MRF를 복합으로 사용하여 제진 유닛을 제작하고 특성을 실험하였다. Gu 등은<sup>23</sup> MRE를 이용한 제진 유닛의 동적 응답 특성을 실험하여 실시간 제어에 활용이 가능함을 보였다. 외부에서 인가하는 자기장은 일반적으로 전자석을 주로 이용한다. Jeong 등은<sup>24</sup> 최적설계된 자기유변탄성체를 원형 구조물의 4방향에 전자석과 함께 배치하여 차량용 부품 구조를 제시하였으며 Jang 등은<sup>25</sup> 전자석에 의한 자기장제어가 갖는 지속적인 전력 소모 단점을 해결하기 위해 영구자석 기반의 차폐효과를 이용한 고효율 자기장 발생기를 설계하였다. 최근 들어서는 정밀모션 시스템의 플래서 가이드 기구로서<sup>26</sup> MRE를 이용하거나, 정밀모션을 구현하기 위한 제진시스템으로서 MRE를 이용하는 연구들이 이루어지고 있다.<sup>27,28</sup>

본 논문에서는 제진 시스템에 활용할 수 있는 가변강성 탄성기구를 제작하고 실험하였다. 하중 지지력이 좋은 천연고무를 기지재로서 이용하고, 혼입되는 자성입자로서 CIP의 크기를 달리하여 MRE의 전단강성 특성 변화를 측정하였다. 실험 결과에 기반하여 전자석 및 MRE가 결합한 일체형 가변강성 탄성기구를 제작하고 제진시스템에 활용하기 위한 가변강성 특성을 실험하여 전자석 인가 전류에 따른 공진주파수 변화를 관찰하였다.

## 실 험

**시험편 제작.** 가변강성 특성을 시험하기 위한 MRE 시험편은 고무재료 기지재에 외부 자기장에 반응하는 철입자를 40 vol%로 혼합하여 제작하였다. 고무재료는 천연고무(Syarikat Chuan Lee Rubber Sdn Bhd, 말레이시아)를 기반으로 제작하였으며, 각각의 성분 및 무게에 따른 조성비는 Table 1과

**Table 1. Composition of Rubber Specimen**

(unit : wt%)

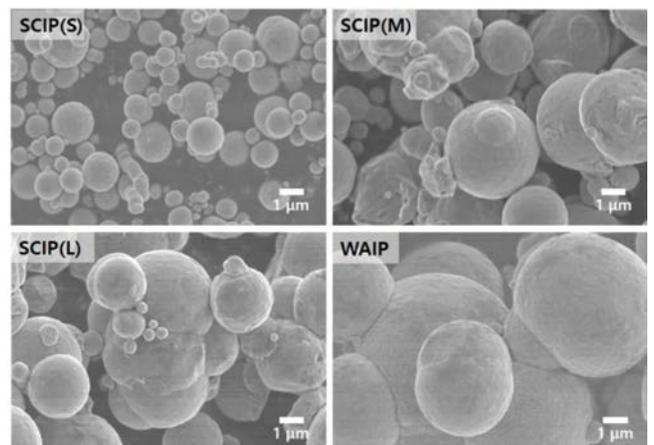
Matrix of natural rubber	Natural rubber	Organic matters	Carbon black	Oil	Metallic oxides
	68.7	7.0	17.8	4.1	2.4

**Table 2. Features of Iron Particles**

		SCIP (S)	SCIP (M)	SCIP (L)	WAIP
Contents	Fe (%)	98.2	99.8	99.8	99.7
	C (%)	0.7	0.007	0.006	0.03
	N (%)	0.7	0.01	0.004	0.02
	O (%)	0.4	0.19	0.19	0.25
Size	d50 (μm)	1.3	4.8	7.5	4.0
Tap density (g/mL)		3.8	4.1	3.9	4.25

같다. 기지재에 혼입하는 자성 반응 물질은 Table 2와 같이 제조방식에 따라 형태와 크기가 다른 CIP를 사용하였다. Shpere carbonyl iron particle(SCIP, BASF, 독일)은 구형의 입자로서 입도에 따라 (S), (M), (L)로 구분한다. Water atomized iron particle(WAIP, 메탈플레이어, 한국)은 노즐을 통해 나온 용융된 순철을 고압의 물 분사체로 충격을 주어 분산 및 응고시키는 고압수분사법으로 제조하였으며 구형으로 4.0 μm의 입도를 갖는다. Figure 1에 나타난 주사전자현미경 5000배 배율 이미지에서 각 입자의 형상과 크기를 확인할 수 있다.

시험편은 모두 14.5 mm×39.0 mm×7.0 mm 크기로 기지재에 철입자를 혼합하여 제작하였으며 그 과정을 Figure 2에 나타내었다. 구형 철입자의 부피분율이 40 vol%일 경우 MRE 내에서 입자간 간격과 입자크기의 비율이 이론적으로 약 16%에 불과하다.<sup>29</sup> 따라서 입자의 고른 분산을 위해 단힌 혼합로에서 NR과 카본블랙(OCI, 한국)을 약 40분간 혼합한 후, 두



**Figure 1.** Images of iron particles by a scanning electron microscope.



Figure 2. Fabrication process of MRE specimens.

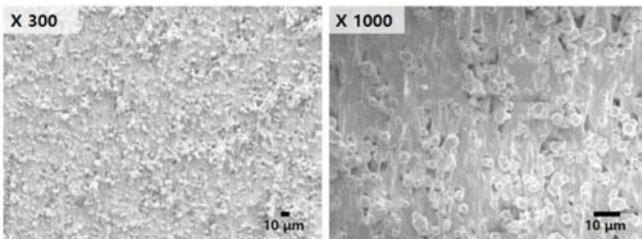


Figure 3. Images of the distributed iron particles inside MRE by a scanning electron microscope.

개의 반대방향으로 회전하는 평행한 롤 사이에 고무를 압연해 시트 형태로 연속적으로 감으며 철입자를 첨가하는 방법으로 약 1시간 가량 균일하게 혼합을 진행하였다. 혼합된 고무와 철입자 혼합 시트를 일정량 제단하여 제작된 금형에서, 고온 및 고압 프레스 성형 후 경화를 진행하여 시편을 제작하였다(양지고무산업, 한국). 주사전자현미경 이미지를 통해 시편의 제작 후 내부에서 철입자가 고른 분포를 이루고 있음을 Figure 3에서와 같이 확인하였다.

**가변강성 실험.** MRE의 외부 자기장에 따른 가변강성 특성은 Figure 4와 같이 특수 설계한 만능재료시험기(씨케이머티리얼즈, 한국)를 이용하여 측정하였다. 일반적인 만능재료 시험기와 동일하게 힘을 측정할 수 있는 로드셀, 변형량을 측정할 수 있는 변위 센서가 있으며, 이들 데이터를 실시간으로 획득하여 저장할 수 있는 데이터획득장치가 구성되어 있다. 이 외에 자기장을 생성하는 전자석 및 자기장 세기를 증가시키고 경로를 조정하는 철심이 배치되어 MRE가 위치하는 공간에 비교적 균일한 자기장을 인가할 수 있도록 하였다. 자기장의 세기는 전자석에 인가하는 직류 전압 및 전류에 의

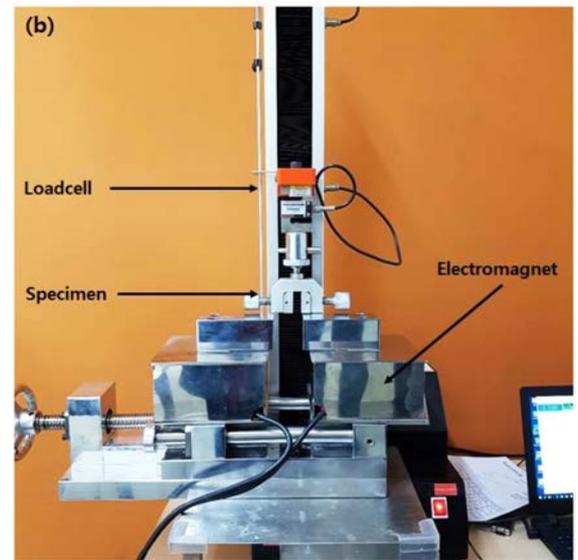
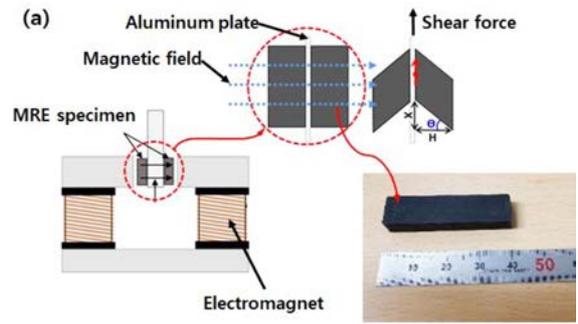
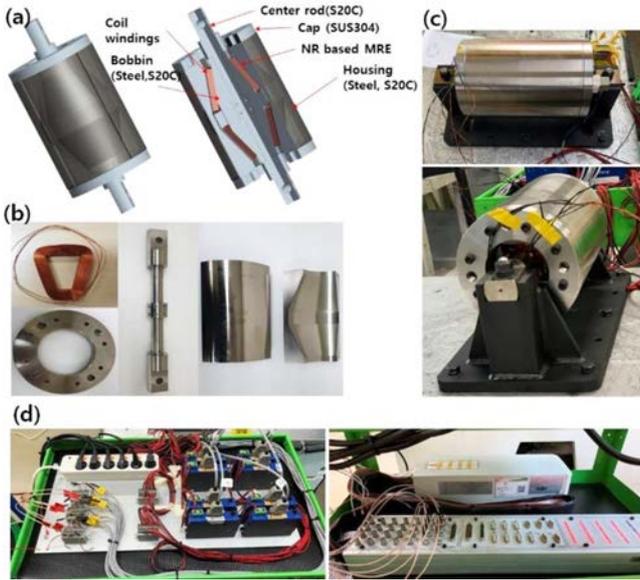


Figure 4. MRE test setup for measurement of shear stiffness: (a) schematic diagram of the test setup; (b) the implemented test equipment.

해서 조절 가능하며 별도의 측정기로 자기장 세기를 측정한다. 자기장 설정 후 동일한 종류의 두 시험편을 비자성체인 알루미늄 판에 대칭으로 접착시킨 후 전자석 철심 사이에 고정시키고 알루미늄 플레이트에 힘을 인가하여 종축으로 잡아당기면서 시험편의 전단 변형을 유발한다. 이 때, 알루미늄 플레이트가 고정된 변위계와 로드셀에서 각각 변위와 힘을 측정한다.

**가변강성 탄성기구 실험.** MRE를 이용한 가변강성 탄성기구는 Figure 5와 같이 제작되었다. 기구의 중앙에는 중심축 역할 및 자기전속 경로 역할을 하는 로드와 위치한다. 재질은 연자성체로서 S20C이다. 자기전속 경로이면서 동시에 8개의 코일보빈이 결합한다. 코일 보빈은 코일을 지지하면서 자기전속 경로 역할을 수행한다. 중앙 로드와 결합되도록 원주형 내면과, MRE에 결합되도록 마찬가지로 원주형 외면을 가지며, 재질은 S20C이다. 코일은 자가접합 권선으로 제작되며 보빈 내부에 위치한다. 원뿔대 형태의 MRE와 평행하도록 사다리꼴 형태를 가지며, 보빈과 함께 비스듬한 향을 가지도록 구성된다. MRE는 원뿔대의 각 형상을 가지며 보빈



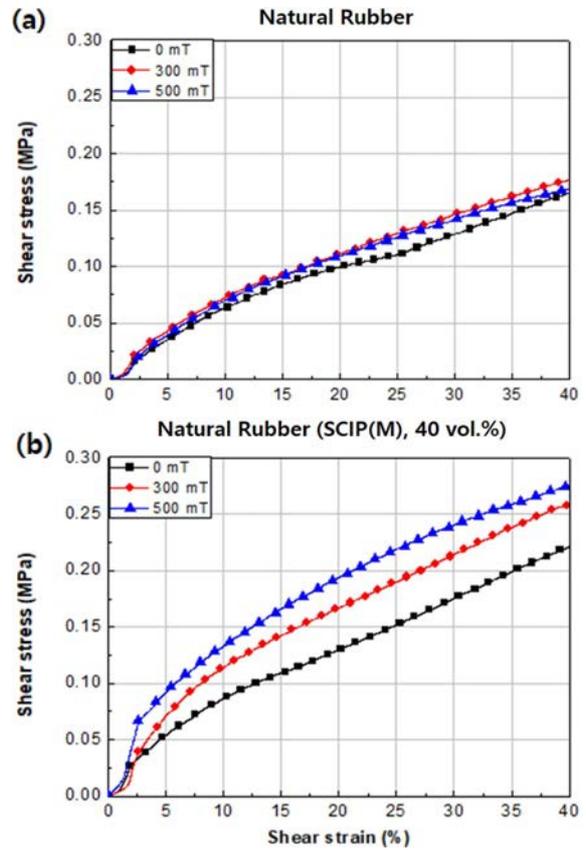
**Figure 5.** Variable stiffness elastomer unit: (a) schematic design; (b) fabricated components; (c) configuration of assembled elastomer unit; (d) configuration of electronics for experiments.

과 하우징 사이에 위치한다. MRE 외부에는 하우징 4개가 위치한다. 4분할로 제작하는 이유는 공차에 의한 MRE의 초기 변형을 방지하기 위함이며, 모든 부품은 볼트와 탭을 이용하여 조립하고 MRE만이 접착제를 이용하여 조립한다. 외부 하우징을 일체로 묶기 위하여 캡을 양쪽에 배치한다.

전장은 크게 코일에 전류를 인가하기 위한 전류증폭기, 전류제어기, 전원부의 세 부분으로 구성된다. 전류증폭기는 Copley controls사의 Junus JSP-090-10를 사용하였으며, 연속 전류 5 A 인가 가능하다. 제어기는 dSPACE사의 DS1003을 사용하였으며, 전류증폭기로 코일 전류 제어 신호를 내보낸다. 전원부는 ODA Technologies사의 OPE-505DI를 사용하였으며, 최대 전압 50 V, 최대 전류 5 A의 직류 전원이다. 전류 인가 시 가변강성 메커니즘의 강성 변화를 평가하기 위해 공진주파수를 측정한다. 중심 로드를 고정시키고 외부에서 임펄스 입력을 가한 뒤 자유 감쇠 진동을 관찰한다.

### 결과 및 토론

본 연구에서는 MRE에 인가되는 외부자기장의 세기, 전단 변형률 등의 인자에 따른 자기유변 효과를 실험적으로 확인하고 분석하였다. 특수 설계하여 제작한 시험 장치를 이용한 실험을 진행하면 전단응력-전단변형률 선도를 얻을 수 있다. Figure 6은 철입자가 없는 NR 시험편과 SCIP(M) 입자가 40 vol% 혼입된 시험편에 대한 전단응력-변형률 선도를 나타낸 것으로서 철입자를 혼입하면 자기장의 세기가 증가함에 따라 전단응력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 실험 장치로부터



**Figure 6.** Stress-strain curve obtained from measurement data of the MRE test equipment: (a) NR; (b) NR with SCIP(M).

측정한 값은 변위와 힘 값이며, 이들 측정값으로부터 전단응력, 전단변형률, 전단강성을 식 (1), (2), (3)과 같이 얻을 수 있고, 이들을 이용하여 자기유변효과(MR effect)를 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\tau = F/(2A) \tag{1}$$

$$\gamma = X/H \tag{2}$$

$$G = \tau/\gamma \tag{3}$$

$$\varepsilon = \Delta G/G_0 \tag{4}$$

수식에서  $\tau$ 는 전단강성 측정값,  $F$ 는 로드셀에서 측정된 힘,  $A$ 는 시험편의 단면적,  $\gamma$ 는 전단변형률,  $X$ 는 변위계에서 측정된 변위,  $H$ 는 시험편의 높이,  $G$ 는 시험편의 전단강성의 측정값,  $G_0$ 는 철입자가 함유되지 않은 순수 기지재의 전단강성 측정값,  $\Delta G$ 는  $G_0$  대비 측정된 전단강성의 변화량,  $\varepsilon$ 은 자기유변효과를 나타낸다. 이와 같은 실험결과의 재현성을 확인하기 위하여 동일 실험을 4회 반복한 결과를 Figure 7에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 4회의 실험 모두 매우 유사한 결과를 보여주며 실험 결과의 신뢰도를 입증하고 있다.

구형에 다른 입도를 갖는 3종의 SCIP 및 WAIP가 NR와

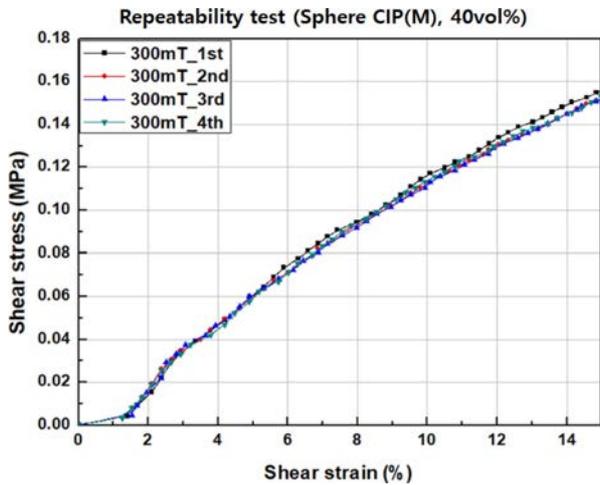


Figure 7. Repeatability data of stress-strain curve measurement.

혼합된 시편을 자기장 세기, 전단변형률에 따라 각각의 전단강성과 자기유변효과를 비교하였다. Figure 8에서 확인할 수 있듯이 순수한 NR에 비해 철입자가 분산된 MRE는 전단강성의 증가와 함께 높은 값의 자기유변효과를 보였다. 철입자로 인하여 시편의 강성이 높아지고, 내부 쌍극자모멘트가 증가하여 분산되어 있는 자성입자들 간에 강한 인력을 가지기 때문에 외부 하중에 대한 저항이 증가하며 응력이 증가한 것으로 보인다. 또한 입도가 감소할수록 자기유변효과가 증가하는 경향을 보인다. 이는 마이크로미터 크기의 입자를 함유한 복합재에서 입자 크기가 작을수록 기지재 내 네트워크 구조의 생성이 용이하여 성능이 더 높게 나타나는 일반적인 현상과도 일치한다.<sup>30,31</sup> MRE 또한 철입자의 입도가 낮을수록 쌍극자 모멘트에 의한 자력 형성 네트워크 형성이 더 용이하여 더 높은 자기유변효과를 나타내는 것으로 볼 수 있다. 입도가 비슷한 SCIP(M)과 WAIP가 혼합된 경우를 비교하면 SCIP(M)이 혼합된 경우가 더 큰 자기유변효과를 보인다. 이는 WAIP의 경우 용융된 철에 고압의 물을 분사하기 때문에 철 표면에 산화막이 존재하여 철입자간 거리를 증가시키는 효과가 있기 때문이다.

실제 가변강성 탄성기구를 구현하였을 때 전자석에 의해 예상되는 자기장 세기는 0.3 T이고, 진동절연 시스템 등에 응용하였을 때 전단변형률 또한 15% 이내일 것으로 예상된다. 따라서 이와 같은 조건에서 철입자에 따른 전단응력 및 자기유변효과를 Figure 9에서와 같이 비교해보면 SCIP(M) 시험편이 0.477 MPa, SCIP(L) 시험편이 0.343 MPa, WAIP 시험편이 0.413 MPa의 순서대로 전단강성을 가졌다. 자기유변효과는 SCIP(S), SCIP(M), WAIP의 순서대로 38.0, 31.6, 28.5%의 값을 가졌다. 자기유변효과는 SCIP(S)가 가장 크지만 가변강성 탄성기구는 진동절연 시스템 상부에 위치하는 진동절연 대상체의 하중을 지지하는 역할도 수행해야 하므로 전단강성이 가장 높으면서도 높은 자기유변효과를 갖는

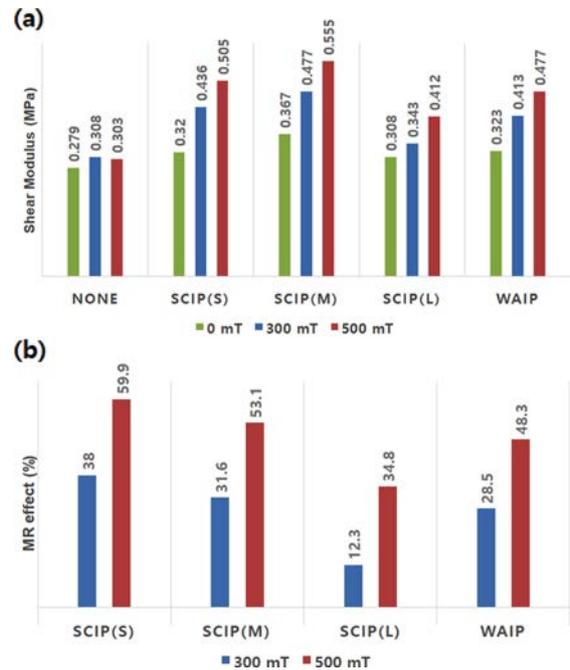


Figure 8. Change of shear modulus and magneto-rheological effect of natural rubber based MRE with different size of iron particles at strain of 15%: (a) shear modulus; (b) MR effect.

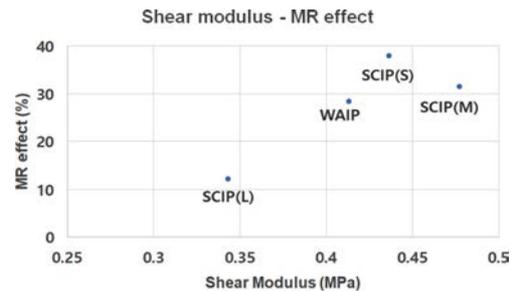


Figure 9. Shear modulus and magneto-rheological effect of NR based MRE with magnetic field strength of 0.3 T.

SCIP(M)을 이용하여 탄성기구를 제작하고 실험하였다.

Figure 10 및 Table 3은 제작한 탄성기구를 이용하여 공진 주파수를 시험한 결과이다. 전류가 인가되면 약 3.5-7%의 강성 증가를 관찰할 수 있다. 탄성기구 내부에서 생성된 자기장에 의해서 MRE의 강성이 증가한 영향이다. 그러나 실험이 거듭될수록 전체적으로 강성 값이 감소하는데, 이는 전류 인가로 인해 코일 주변의 온도가 상승하면서, MRE 또한 온도 증가로 인해 연화하기 때문이다. 이러한 온도 증가 현상은 Li 등에<sup>32</sup> 의해서도 보고된 바 있으며 40 °C까지 상승한 온도가 다시 상온으로 회복되는데 6시간 가까이 소요되었다. 본 연구에서도 Figure 11과 같이 0.1 T 정도의 최소 자속밀도를 형성하기 위한 전류를 지속적으로 인가하였을 경우 30 초 이상의 시간이 지나면 초기 온도보다 약 13 °C 상승한 온도로 수렴한다. 0.3 T 이상의 고자속밀도를 형성하기 위해 전

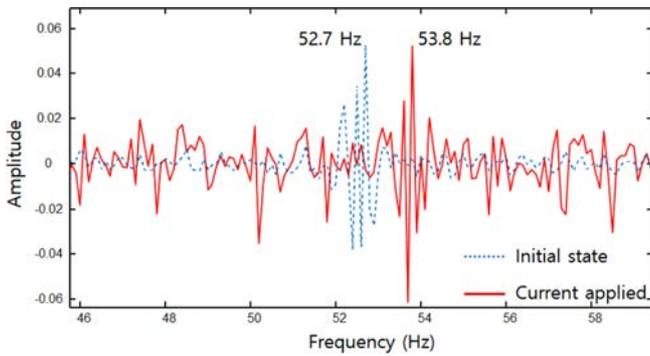


Figure 10. Change of natural frequency of variable stiffness elastomer unit.

Table 3. Calculation of Stiffness Increase

	Natural frequency (Hz)		Frequency increase (%)	Stiffness increase (%)
	OFF	ON		
1	52.7	53.8	2.09	4.22
2	42.1	43.5	3.33	6.76
3	33.0	33.6	1.82	3.67
4	27.6	28.3	2.54	5.14

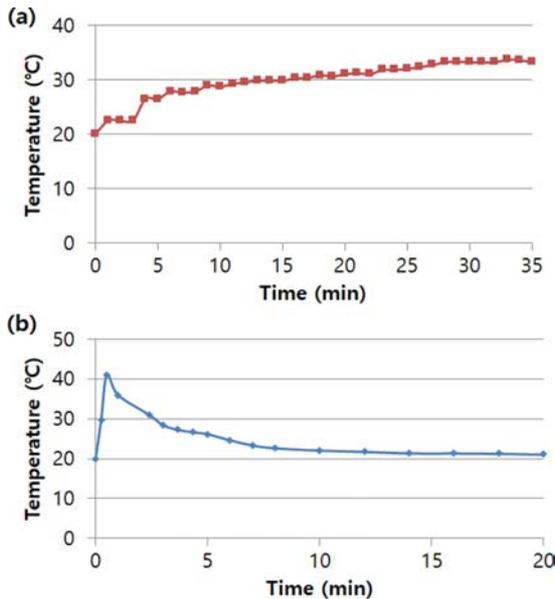


Figure 11. Temperature change of magnetorheological elastomer with (a) electric current input generating field strength of 0.1 T; (b) electric current input generating field strength 0.3 T.

류를 30초간 인가한 경우에는 온도가 급격히 상승하며 장시간 동작이 어려움을 볼 수 있다. 이러한 경우 코일에서 발생하는 열로 인해 MRE의 본래 목적인 강성을 증가하는 효과를 내지 못하고 오히려 고무의 강성이 감소하는 역효과를 초래하게 된다. 기지재인 NR의 온도가 증가함에 따라 강성이 감소함은 널리 알려져 있으며, MRE에 대해서도 온도 증가

에 따라 강성이 감소함이 실험적으로 입증된 바 있다.<sup>33</sup> 또한 MRE의 자기 특성은 온도 변화에 의한 영향이 거의 없는 것으로 보고된<sup>34</sup> 바 있어서, MRE의 온도에 따른 강성 감소는 기지재인 NR의 온도에 따른 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

## 결론

본 연구에서는 정밀 모션기구 등의 제진 시스템에 적용하기 위한 가변강성 탄성기구를 제작하고 그 특성을 실험하였다. 제진 시스템의 진동 저감 정도와 대역폭은 공진주파수에 의해서 결정되므로, 가변강성 탄성기구의 전단강성 특성이 실험적으로 검증되었다. 특히 일반적인 MRE의 특성 실험과 달리 자기유변 효과뿐만 아니라 전단강성의 증가 효과를 같이 관찰하여 가변강성 탄성기구 제작에 활용하였다. 이는 진동의 저감을 위해 가져야 하는 강성의 가변 특성과 제진 대상체의 하중을 지지하기 위한 강성 특성을 모두 고려할 수 있도록 한다. NR 기지재에 기반한 MRE를 제작하여 실험하였으며, 입도 및 제조방식을 달리하는 4종의 CIP 및 인가 자기장에 따라 전단강성 및 자기유변 효과를 측정하였다. 전단강성이 높고 자기유변 효과가 큰 자기 응답성 입자를 선정하여 MRE를 제작하고, 이를 이용하여 전자석이 일체형으로 통합된 가변강성 탄성기구를 제작하였다. 전자석 전류 인가에 따라 3.67-6.75%에 달하는 가변강성 특성을 검증하였다. 또한 전자석의 사용으로 인한 열발생 효과로 공진주파수의 감소를 실험적으로 관찰하였으며, MRE가 실제 제진 시스템에 적용되기 위해서는 가변강성 성능과 함께 온도변화에 따른 특성 변화 연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

**감사의 글:** 이 논문은 2020년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원, 2020년도 한국항공대학교 교비지원을 받아 수행되었음. 자기유변탄성체 시편의 제작 및 특성 실험에 도움을 주신 (주)씨케이머티리얼즈랩(대표: 김형준)에 감사드립니다.

**이해상충:** 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참고문헌

- Rabinow, J. The Magnetic Fluid Clutch. *Trans. AIEE* **1948**, 67, 1308-1315.
- Dezheng, H.; Xinhua, L.; Zengqiang, L.; Pawel, F.; Anna, H.-S.; Zhixiong, L. A Review on Structural Configurations of Magnetorheological Fluid Based Devices Reported in 2018-2020. *Front. Mater.* **2021**, 8, 24.
- Wang, J.; Meng, G. Magnetorheological Fluid Devices: Principles, Characteristics and Applications in Mechanical Engineering. *Proc. Inst. Mech. Eng. L.* **2001**, 215, 165-174.
- Rigbi, Z.; Jilken, L. The Response of an Elastomer Filled with Soft Ferrite to Mechanical and Magnetic Influences. *J. Magn.*

- Magn. Mater.* **1983**, 37, 267-276.
5. Jolly, M. R.; Carlson, J. D.; Muñoz, B. C.; Bullions, T. A. The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **1996**, 7, 613-622.
  6. Lian, C.; Lee, K.-H.; Choi, S.-B.; Lee, C.-H. A study of the Magnetic Fatigue Properties of a Magnetorheological Elastomer. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2019**, 30, 749-754.
  7. Samal, S.; Škodová, M.; Blanco, I. Effects of Filler Distribution on Magnetorheological Silicon-Based Composites. *Materials* **2019**, 12, 3017.
  8. Tao, Y.; Rui, X.; Yang, F.; Chen, G.; Bian, L.; Zhu, W.; Wei, M. Design and Experimental Research of a Magnetorheological Elastomer Isolator Working in Squeeze/elongation-shear Mode. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2018**, 29, 1418-1429.
  9. Shi, G.; Wang, W.; Lu, H.; Wang, G.; Yang, F.; Rui, X. Study of Crosslink Structure and Dynamic Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomer: Effect of Vulcanization System. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2019**, 30, 1189-1199.
  10. Zhong, H.; Pei, Y.; Hu, Z.; Zhang, P.; Guo, J.; Gong, X.; Zhao, Y. A Study of the Heat Transfer Properties of CIP Doped Magnetorheological Elastomers. *Smart Mater. Struct.* **2019**, 28, 025027.
  11. Yu, M.; Yang, P.; Fu, J.; Liu, S.; Qi, S. Study on the Characteristics of Magneto-Sensitive Electromagnetic Wave-Absorbing Properties of Magnetorheological Elastomers. *Smart Mater. Struct.* **2016**, 25, 085046.
  12. Jung, H. S.; Kwon, S. H.; Choi, H. J.; Jung, J. H.; Kim, Y. G. Magnetic Carbonyl Iron/Natural Rubber Composite Elastomer and Its Magnetorheology. *Compos. Struct.* **2016**, 136, 106-112.
  13. Fan, L.; Wang, G.; Wang, W.; Jeong, U.-C.; Yoon, J.-H.; Yang, I.-H.; Jeong, J.-E.; Kim, J.-S.; Chung, K.-H.; Oh, J.-E. Size Effect of Carbon Black on the Structure and Mechanical Properties of Magnetorheological Elastomers. *J. Mater. Sci.* **2019**, 54, 1326-1340.
  14. Schümann, M.; Borin, D. Y.; Huang, S.; Auernhammer, G. K.; Müller, R.; Odenbach, S. A Characterisation of the Magnetically Induced Movement of NdFeB-Particles in Magnetorheological Elastomers. *Smart Mater. Struct.* **2017**, 26, 095018.
  15. Li, R.; Zhou, M.; Wang, M.; Yanga, P. Study on a New Self-sensing Magnetorheological Elastomer Bearing. *AIP Advances* **2018**, 8, 065001.
  16. Bica, I.; Anitas, E. M.; Chirigiu, L. Magnetic Field Intensity Effect on Plane Capacitors Based on Hybrid Magnetorheological Elastomers with Graphene Nanoparticles. *J. Ind. Eng. Chem.* **2017**, 56, 407-412.
  17. Wang, Y.; Zhang, X.; Oh, J.; Chung, K. Fabrication and Properties of Magnetorheological Elastomers Based on CR/ENR Self-crosslinking Blends. *Smart Mater. Struct.* **2015**, 24, 9.
  18. Agirre-Olabide, I.; Elejabarrieta, M. J. A New Magneto-Dynamic Compression Technique for Magnetorheological Elastomers at High Frequencies. *Polym. Test.* **2018**, 66, 114-121.
  19. Xu, Z.-D.; Suo, S.; Zhu, J.-T.; Guo, Y.-Q. Performance Tests and Modeling on High Damping Magnetorheological Elastomers Based on Bromobutyl Rubber. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **2018**, 29, 1025-1037.
  20. Kang, S. S.; Choi, K.; Nam, J.-D.; Choi, H. J. Magnetorheological Elastomers: Fabrication, Characteristics, and Applications. *Materials* **2020**, 13, 4597.
  21. Behrooz, M.; Wang, X.; Gordaninejad, F. Modeling of a New Semi-Active/Passive Magnetorheological Elastomer Isolator. *Smart Mater. Struct.* **2014**, 23, 045013.
  22. Xing, Z.; Yu, M.; Sun, S.; Fu, J.; Li, W. A Hybrid Magnetorheological Elastomer-Fluid (MRE-F) Isolation Mount: Development and Experimental Validation. *Smart Mater. Struct.* **2015**, 25, 015026.
  23. Gu, X.; Li, Y.; Li, J. Investigations on Response Time of Magnetorheological Elastomer Isolator for Real-Time Control Implementation. *Smart Mater. Struct.* **2016**, 25, 11LT04.
  24. Jeong, U. C.; Yoon, J. H.; Yang, I. H.; Jeong, J. E.; Kim, J. S.; Fan, L.; Wang, G.; Wang, W.; Lu, H.; Yang, F.; Rui, X. Magnetorheological Elastomer with Stiffness-Variable Characteristics based on Induced Current Applied to Differential Mount of Vehicles. *Smart Mater. Struct.* **2013**, 22, 115007.
  25. Jang, D. I.; Yun, G. E.; Park, J. E.; Kim, Y. K. Designing an Attachable and Power-Efficient All-in-One Module of a Tunable Vibration Absorber based on Magnetorheological Elastomer. *Smart Mater. Struct.* **2018**, 27, 085009.
  26. Li, Z.; Liu, P.; Yan, P. Design and Analysis of a Novel Flexure-Based Dynamically Tunable Nanopositioner. *Micromachines* **2021**, 12, 212.
  27. Mikhailov, V. P.; Bazinenkov, A. M. Active Vibration Isolation Platform on Base of Magnetorheological Elastomers. *J. Magn. Mater.* **2017**, 431, 266-268.
  28. Guo, Y.-Q.; Zhang, J.; He, D.-Q.; Li, J.-B. Magnetorheological Elastomer Precision Platform Control Using OFFO-PID Algorithm. *Advances in Materials Science and Engineering* **2020**, 3025863.
  29. Park, J. E.; Jeon, J.; Cho, J. H.; Won, S.; Jin, H.-J.; Lee, K. H.; Wie, J. J. Magnetomotility of Untethered Helical Soft Robots. *RSC Advances* **2019**, 9, 11272-11280.
  30. Hassanabadi, H. M.; Rodrigue, D. Effect of Particle Size and Shape on the Reinforcing Efficiency of Nanoparticles in Polymer Nanocomposites. *Macromol. Mater. Eng.* **2014**, 299, 1220-1231.
  31. Zakaria, A. Z.; Shelesh-Nezhad, K. Quantifying the Particle Size and Interphase Percolation Effects on the Elastic Performance of Semi-Crystalline Nanocomposite. *Comput. Mater. Sci.* **2016**, 117, 502-510.
  32. Li, Y.; Li, J.; Samali, B. On the Magnetic Field and Temperature Monitoring of a Solenoid Coil for a Novel Magnetorheological Elastomer Base Isolator. *J. Phys. Conf. Ser.* **2013**, 412, 2033.
  33. Wan, Y.-X.; Xiong, Y.-P.; Zhang, S.-M. Temperature Effect on Dynamic Properties of Magnetorheological Elastomers. *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Advanced Material Engineering*, Shanghai, China, Apr 14-16, 2017; Adiguzel, O., Doumanidis, C. C., Wang, C., Wang, M.-C., Zaidi, B., Eds.; Atlantis Press: Dordrecht, 2017.
  34. Kiarie, W. M.; Gandha, K.; Jiles, D. C. Temperature-Dependent Magnetic Properties of Magnetorheological Elastomers. *IEEE Trans. Magn.* [Online early access]. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3082302. Published Online: May 21, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9437174> (accessed May 21, 2021).

**출판자 공지사항:** 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.