

# Silane Coupling Agent 첨가에 따른 MRE 의 전단계수 변화율에 대한 실험적 규명

## Experimental Identification on Variation Rate of Shear Modulus of MRE due to Adding Silane Coupling Agent

윤지현\* · 정운창\* · 양인형\* · 이유엽\*\* · 오재응†

Ji-Hyun Yoon, Un-Chang Jeong, In-Hyung Yang, You-Yub Lee and Jae-Eung Oh

### 1. 서 론

MR 재료는 기본 매트릭스에 MRP (Magnetic Reactive Powder) 등을 첨가하여 강성이 인가 자기장 세기에 의해 증가할 수 있는 자기유동학적 재료이자 스마트 재료이다. 기본 매트릭스에 따라 크게 MR 유체 (Magnetorheological Fluid, MRF) 와 MR 엘라스토머 (Magnetorheological Elastomer, MRE) 로 분류할 수 있다. MRF의 경우, 인가전류에 따른 자기력에 의해 극성을 가질 수 있는 입자들이 점성유체 내부에 불규칙적으로 분포하게 되어 있으나, 외부 자기장의 방향에 따라 입자들이 체인 형태로 정렬하여 기계적 물성이 변하게 된다. 이런 성질을 이용하여 브레이크와 클러치, 엔진마운트, 댐퍼 등에 적용되고 있다. 그러나, MRF는 유체의 봉입을 위해 시스템을 소형화시키기 어렵고, 유체 누출 등의 환경오염 문제가 발생할 수 있으며, MRP 입자의 잔류물은 시스템의 성능을 저하시킬 수 있다. 또한, 고가의 유체를 사용하기 때문에 기계 시스템 적용시, 경제성 문제가 대두될 수 있다. 이와 같은 MRF의 단점을 보완하기 위해, MR 재료이며 고체 상의 엘라스토머인 MRE에 대한 연구가 주목을 받고 있다.

MRE는 MRF와 마찬가지로 천연고무 (Natural Rubber, NR), 실리콘과 같은 폴리머 매트릭스에 자기력에 따라 극성을 나타내는 입자인 MRP를 첨가하여, 자기장 인가 시 매트릭스 내부에 분포하는 MRP 간의 인력에 의해 물성이 변화하는 가변형 엘

라스토머이다. 즉, MRE의 가변 성능 발현 메커니즘은 MRF와 유사하며, 차이점은 MRE는 매트릭스 안에 분포된 입자들이 항복 전 상태에서 작동하는 반면에 MRF는 항복 후 연속전단이나 유동 형태로 작동하는 것이다.

최근, 이와 같은 가변 특성을 갖는 MRE에 대해 다양한 연구가 이루어지고 있다. 도요타 R&D 연구실에서는 철 입자가 포함된 실리콘 젤을 엔진마운트에 적용하기 위해 개발하였고 (1992), Ford 연구소에서는 Ginder 등이 NR과 합성고무를 이용하여 MRE를 제작하였다. 또한, Watson은 MRE를 이용한 자동차 부싱을 개발하였다.

본 연구에서는 MRE의 기계 시스템 응용을 위한 기초연구로서 MRP와 천연고무 매트릭스 간의 계면결합력을 변화시킬 수 있는 MRP 코팅에 따른 MRE의 전단계수 변화율을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. MRP 코팅으로 인하여 금속 성분인 MRP와 천연고무 매트릭스 간의 계면결합력이 변화하여 MRE 시편의 MR 효과가 증가할 것으로 예상되었다. 이를 실험적으로 규명하기 위해 천연고무를 기본 매트릭스로 한 MRE에 MRP와 첨가제를 배합하여 시편을 제작한 후 자기장을 인가와 진동 응답을 이용하여 MRE의 전단계수 평가가 가능한 시스템을 구성하여 Silane 커플링제 코팅에 따른 MRE의 전단계수 변화율을 실험적으로 규명하였다.

### 2. MRE 시편 제작

NR을 기본 매트릭스로 하여 Activator는 ZnO는 Stearic Acid, Accelerometer는 CZ, Curing Agent는 S로 준비하였다. 이와 같은 각종 첨가제와 MRP를 NR과 함께 고무배합장치인 Roll-mill을 사용하여 재료를 배합하였다. 이 작업을 거친 뒤, 고분자

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

Tel : (02)2294-8294, Fax : (02)2299-3153

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 호원대학교 자동차기계공학과

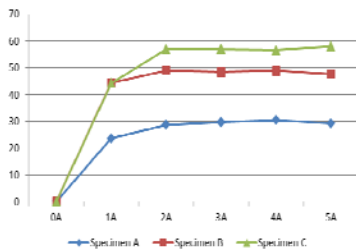
재료 내의 사슬 완화를 위하여 상온에서 24시간 두었다. 다음으로 Press를 이용하여 160도 2000psi의 조건으로 경화과정을 약 10분 간 거쳐서 MRE 시편을 제작하였다. 경화 시 강한 자기장을 인가하여 MRP의 체인 형태의 배열을 유도한 것을 anisotropic MRE라 하고, 이와 같은 배향 과정을 거치지 않은 MRE를 isotropic MRE라 한다.

본 연구에서는 경화 시 Anisotropic Mold로 배향한 anisotropic MRE에 대하여 기존 문헌에서 알려진 MRP의 최적 부피성분비 30vol%로 충전하여 20mm x 20mm x 2mm인 sheet 형태의 세가지 MRE 시편을 제작하였다 (Table 1).

**Table 1** Fabricated Specimens of MRE

Specimen	Orientation	Silane Coupling	MRP vol%
A	Anisotropic	X	30
B	Isotropic	O	30
C	Anisotropic	O	30

### 3. 실험결과 및 고찰



**Fig.1** Variation rate of shear modulus of MREs (%).

Fig.1과 같이 인가전류에 따른 전단계수 변화율을 자기장이 가해지지 않았을 때의 전단계수에 대한 변화율 (%)로 나타내었다.

세 시편의 전단계수 변화율을 비교해보면 anisotropic MRE의 경우, Silane 커플링제로 MRP를 코팅함으로써 전단계수 변화율이 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. Anisotropic MRE의 Silane 커플링제 코팅 유무에 따른 A와 C 시편에서 각각의 전단계수 최대변화율이 약 27% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Silane 커플링제 코팅으로 인해 MRP와 NR 매트릭스 간의 계면결합력이 증가하여, Anisotropic Mold 배향 시 MRE 내부에 형성된 MRP 클러스터가 자속 방향으로 배향이 보다 잘 이루어진 것으로 판단할 수 있다. 이와 함께, 자기포화점은 재료의 고유특성이며, MRP 성분비를

30vol%로 고정시켰으므로 시편에 무관하게 2A에서 자기포화가 발생하는 것을 확인하였다

일반적용 MRE 배향으로 인해 anisotropic MRE가 isotropic MRE보다 전단계수 변화율이 높은 것으로 나타나지만, 시편 A, B에서처럼 isotropic MRE를 Silane 커플링제로 코팅할 경우 코팅하지 않은 anisotropic MRE보다 전단계수 최대변화율 기준으로 약 20% 높은 결과가 나타났다. 그러므로, MRP의 Silane 커플링제 코팅이 MRP와 NR 매트릭스 간의 계면결합력을 증가시켜 Anisotropic Mold만을 이용한 배향보다 높은 MR 효과를 얻을 수 있었다.

### 3. 결 론

가변형 엘라스토머인 MRE 내부에 분포하는 MRP에 금속 성분인 MRP와 NR의 폴리머 매트릭스 간의 계면결합력을 증가시킬 수 있는 Silane 커플링제 코팅이 MRE의 전단계수 변화율에 미치는 영향을 실험적으로 규명하기 위해 배향 (anisotropic, isotropic) 및 Silane 커플링제 유무에 따른 세 개의 시편을 제작하였다.

측정 결과, anisotropic MRE의 Silane 커플링제 코팅 유무에 따른 A와 C 시편에서 각각의 전단계수 최대변화율이 약 27% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Silane 커플링제 코팅으로 인해 MRP와 NR 매트릭스 간의 계면결합력이 증가하여, Anisotropic Mold 배향 시 MRE 내부에 형성된 MRP 클러스터가 자속 방향으로 정렬이 보다 잘 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

일반적으로 MRE 배향으로 인해 anisotropic MRE가 isotropic MRE보다 전단계수 변화율이 높은 것으로 나타나지만, 시편 A, B에서처럼 isotropic MRE를 Silane 커플링제로 코팅할 경우 코팅하지 않은 anisotropic MRE보다 전단계수 최대변화율 기준으로 약 20% 높은 결과가 나타났다. 그러므로, MRP의 Silane 커플링제 코팅이 MRP와 NR 매트릭스 간의 계면결합력을 증가시켜, Anisotropic Mold만을 이용한 배향보다 높은 MR 효과를 얻을 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임(No. 2011-0002879)