

# 자기유변 탄성중합체의 동적 파라미터 연구

## A study on the Dynamic parameters of MR Elastomers

\*김필기<sup>1</sup>, 김상민<sup>2</sup>, #석종원<sup>3</sup>

\*P. Kim<sup>1</sup>, S. Kim<sup>2</sup>, #J. Seok(seokj@cau.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> 중앙대학교 기계공학부 대학원, <sup>3</sup> 중앙대학교 기계공학부

Key words : Magnetorheological elastomer, Silicone, Carbonyl Iron particle, Shear modulus

### 1. 서론

지능 물질 (Smart material)은 외부 조건을 적절히 제어함으로써 다양한 응용 분야에 적합한 특성을 나타낼 수 있기 때문에 이들 외부조건에 의해 유변학적 성질이 변화하는 지능물질들에 대한 연구가 최근까지 활발히 수행되어 왔다. 특히 자기장에 의해 유변학적 특성이 변화하는 물질을 자기유변 물질 (Magnetorheological material)이라고 하며, 이 물질은 주로 비자화 물질에 자화성이 강한 입자를 혼합한 형태를 가지고 있다.<sup>1-5</sup> 자기유변 물질은 모재로 사용되는 비자성 물질의 종류에 따라 구분될 수 있는데, 대표적으로 자기유변 유체 (Magnetorheological fluid, MRF)와 자기유변 탄성중합체 (Magnetorheological elastomer, MRE) 등을 예로 들 수 있다. 자기유변 유체는 오일 및 물과 같은 유체에 MR (Magnetorheological) 입자를 혼합한 것으로 자기장의 세기에 따라 다양한 항복 응력을 나타낸다.<sup>5</sup> 반면, 자기유변 탄성중합체는 고무 및 겔 (Gel) 등 고상의 물질 내에 MR 입자를 분포시킨 것이며, 자기장의 세기에 따라 각각 다른 영률 및 전단계수를 갖는다.<sup>6,7</sup>

자기유변 물질의 특성은 자기장의 세기에 따른 MR 입자의 상호 작용에 의해 결정되기 때문에, 이들의 유변적 특성은 MR 입자 및 모재의 특성에 크게 영향을 받는다. 모재의 투자율이 높으면 MR 입자의 자화도가 상대적으로 약해지기 때문에<sup>4</sup>, 모재의 투자율은 가능한 한 낮은 것이 효율적이며 또한 MR 입자는 높은 투자율을 갖는 것이 바람직하다고 알려져 있다.<sup>8</sup> 이외에도 자기유변적 특성은 MR 입자의 크기 및 분포 형태, 모재의 경도 및 점탄성 특성 등의 다양한 인자에 의존적이다.<sup>6,9,10</sup> 본 연구에서는 자기유변 중합체의 자기유변 특성을 고찰하기 위한 일환으로, 실리콘 (Silicone)을 모재로 한 자기유변 중합체의 제작 및 전단계수 측정실험이 수행되었다. 각기 다른 MR 입자의 비율을 갖는 시편이 제작되었으며, 이들에 대한 전단계수 측정결과가 서로 비교되었다.

### 2. 시편 제작

자기유변 중합체의 전단계수 측정을 위한 시편은 모두 20x20x1.5 (mm)의 크기로 제작되었다. 자기유변 중합체의 모재로 실리콘 (KE-1300, ShinEtsu)이 사용되었으며, 이 실리콘에는 2~10 μm 크기의 CI (Carbonyl Iron) 입자가 혼합되었다. 이 때, CI 입자의 혼합율에 따른 전단계수의 변화를 실험하기 위해 실리콘 대비 CI 입자의 체적비율은 5, 10, 15, 20, 25 %로 정하였다. 실리콘 내 기공 형성을 방지하기 위하여 CI 입자를 포함한 실리콘은 진공 챔버 내에 약 90 분간 놓여졌다. 기포를 제거한 실리콘은 부가 타입의 경화제 (CAT-1300, ShinEtsu)를 혼합한 후 오븐 내 (60 °C)에서 120 분간 경화되었다. 이와 같이 제작된 자기유변 중합체의 MR 입자는 실리콘 내에 고르게 분포되기 때문에 등방성 물질이라고 가정할 수 있다.

전단계수 측정을 위하여 준비된 자기유변 중합체와 알루미늄 판을 이용하여 Fig. 1 과 같은 형태의 시편이 제작되었다.<sup>10</sup> 알루미늄 판과 자기유변 중합체의 접촉에는 실리콘 용 접착제(2700, Axia) 및 에폭시 접착제 (DP-460, 3M)가 사용되었다.

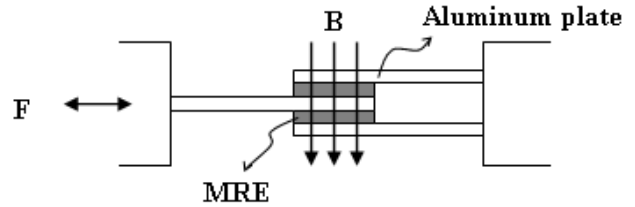


Fig. 1 Schematic for double lap shear test specimen

### 3. 자기유변 중합체의 전단계수

전단계수  $G$  는 전단 응력 ( $\tau$ ) 과 전단 변형률 ( $\gamma$ )의 비이며 Eq. (1)으로 정의된다.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{FL}{Ay} \quad (1)$$

여기에서  $A$  와  $F$  는 전단면의 넓이와 전단면에 작용하는 힘이며,  $L$  와  $y$  는 각각 MRE 의 초기 두께 및 전단 방향의 변위를 나타낸다. 일반적으로 주기적인 진동 조건 하에서는  $F$  와  $y$  는 주파수의 함수이며, 전단계수는 복소수 형태로 다음 Eq. (2)와 같이 표현된다.<sup>11,12</sup>

$$G^* = G' + iG'' \quad (2)$$

복소 전단계수  $G^*$  의 실수부  $G'$  은 Storage (or in-phase) modulus 로 점탄성 물질이 변형에너지를 저장하는 정도를 나타내는 척도이다. 그리고 복소 전단계수  $G^*$  의 허수부  $G''$  은 Loss (or out-of-phase) modulus 이며, 이는 변형에너지가 손실되는 정도를 나타낸다.<sup>11</sup> 또한, Loss modulus 와 Storage modulus 의 비로 표현되는 Loss angle 또는 Loss factor 는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 Loss modulus 와 더불어 점탄성 물질의 감쇠 특성을 기술하는데 종종 사용된다.<sup>1,11</sup>

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (3)$$

Fig. 1 과 같이 구성된 자기유변 중합체의 시편에서 주어진 진동 주파수에 대한  $F$ ,  $y$  가 측정될 수 있으며, 이는 주파수 분석을 통하여 Eq. (2)로 표현되는 복소 전단계수로 표현될 수 있다.  $F$ ,  $y$  의 측정에는 재료 물성 시험기(MTS 810)가 사용되었다. 이와 같은 전단계수 측정 실험은 자기장의 세기를 변화시키며 동일하게 반복 수행되었다.

### 4. 실험 및 결과

전단계수 측정을 위한 자기유변 중합체의 시편이 앞서 기술한 방법으로 제작되었다. 각기 다른 CI 입자의 체적비를 갖는 총 5 종류의 시편이 준비되었으며, 자기장이 인가되지 않은 경우와 0.4 및 0.6 T 의 자기장이 가해진 경우에 대한 각 시편의 복소 전단계수가 측정되었다. 자기장을 발생시키기 위한 방법에는 마주보는 두 개의 네오듐 영구자석이 사용되었고 이들 두 자석 사이의 거리를 조절함으로써 원하는 자기장의 세기가 시편에 인가되도록 하였다. 이 과정에서 자기장의 세기는 가우스 미터(MG-4D, Walker)에 의해 확인되었다.

천연 고무를 모재로 사용한 Storage modulus 측정 실험에서 CI 입자의 체적비가 클수록 Storage modulus는 증가하는 것으로 이미 잘 알려져 있다.<sup>10)</sup> 실리콘을 모재로 한 결과 역시 이와 유사한 경향을 나타내게 된다. Figure 2는 CI 입자의 체적비에 따른 Storage modulus를 나타낸 것이다. 자기장을 가한 경우, 약 15%의 CI 입자 체적비 이하에서는 체적비가 증가할수록 Storage modulus가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 연구 보고<sup>10)</sup>와 유사한 경향이다. 하지만 약 20% 이상의 CI 입자 체적비에서는 Storage modulus가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시편에서 자기유변 중합체와 알루미늄 판 사이의 접착이 불안정하기 때문에 발생하는 현상으로 추정되며, 정상적인 Storage modulus의 측정값이라고 단정하기 어렵다. 또한, 비록 Fig. 2의 결과는 15%의 체적비 이하에서만 유효하지만, 유효 범위 내에서는 자기장이 있는 경우 그렇지 않은 경우에 비해 MR 입자의 양에 대한 자기유변 중합체의 Storage modulus 증가율이 큰 것을 확인할 수 있다.

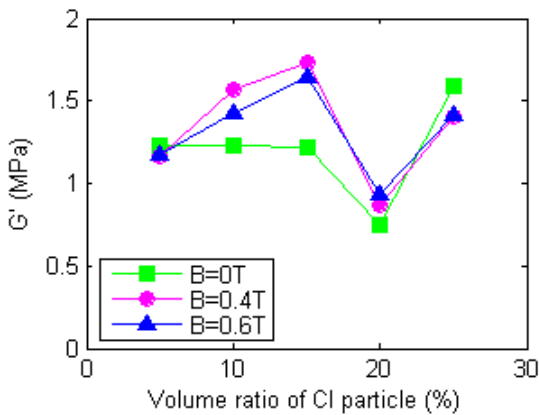


Fig. 2 Shear storage moduli for CI particle volume ratio (CI particle/silicone)

Figure 3은 CI 입자의 체적비에 따른 Loss modulus를 나타낸 것이다. 여기에서 Loss modulus는 Storage modulus에 비해 변동폭이 적으며, 약 0.7MPa~1.5MPa의 값을 갖는다. 자기장을 가한 경우의 Loss modulus는 대체로 CI 입자의 양에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 일반적으로 Loss modulus는 Storage modulus에 비하여 작은 값을 갖는다고 알려져 있으며<sup>13)</sup>, 본 실험에서 얻은 결과도 Loss modulus는 Storage modulus에 비해 조금 낮은 영역에 분포하고 있다.

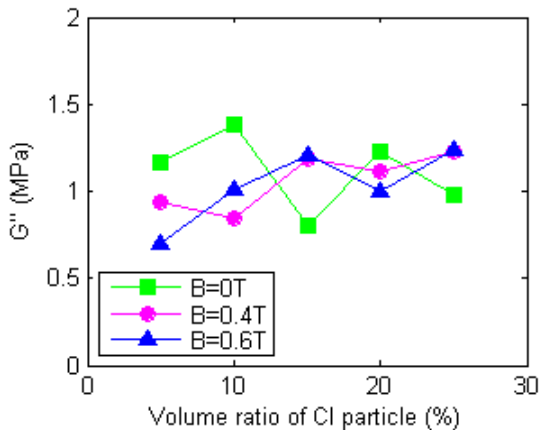


Fig. 3 Shear loss moduli for CI particle volume ratio (CI particle/silicone)

5. 결론

본 연구에서는 실리콘을 모재로 CI 입자를 혼합한 자기유변 중합체에 대한 동적 특성을 고찰하기 위한 일환으로 복소 전단계수를 측정하였다. 총 다섯 경우의 서로 다른

CI 입자 체적비에 대한 자기유변 중합체의 시편이 제작되었으며, 자기장의 세기 따른 Storage modulus 및 loss modulus가 구하여졌다. 비록 준비된 자기유변 중합체의 일부 시편에 대한 실험결과에 대한 충분한 신뢰성을 확보하지는 못하였지만, 대체적으로 알려진 복소 전단계수에 대한 연구결과와 유사한 거동을 확인할 수 있었다. 자기유변 중합체의 Storage modulus는 MR 입자의 양이 많을수록 크고 자기장이 인가된 경우에 큰 증가율을 보일 것으로 예상된다. 향후 자기유변 중합체에 대한 동적 거동을 고찰하기 위하여, 보다 충분한 양의 시편의 사용 및 이들에 대한 보다 효과적이고 정밀한 측정이 요구된다.

후기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 청정기술기반 산업원천 기술개발사업의 지원으로 수행되었음 (과제번호: 10024121-2008-21).

참고문헌

1. W.H. Li, H. Du, G. Chen and S.H. Yeo, "Viscoelastic properties of MR fluids under oscillatory shear," *Smart Structures and Materials 2001: Damping and Isolation*. Inman, D.J. (Ed.). Proceedings of SPIE, **4331**, 333-342, 2001.
2. S.A. Demchuk and V.A. Kuzmin, "Viscoelastic properties of magnetorheological elastomers in the regime of dynamic deformation," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **75**, 396-400, 2002.
3. J.M. Ginder and L.C. Davis, "Shear stresses in magnetorheological fluids: Role of magnetic saturation," *Applied Physics Letters*, **65**, 3410-3412, 1994.
4. B.C. Munoz, M.R. Jolly, "Composites with Field Responsive Rheology Tusty, in: W. Brostoe (Ed.), *Performance of Plastics*, Carl Hanser Verlag, 553-574, 2001.
5. J. Rabinow, "The magnetic fluid clutch," *AIEE Transactions*, **67**, 1308-1315, 1948.
6. C. Bellan, G. Bossis, "Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers," *International Journal of Modern Physics B*, **16**, 2447-2453, 2002.
7. G.Y. Zhou, "Complex shear modulus of a magnetorheological elastomer," *Smart Materials and Structures*, **13**, 1203-1210, 2004.
8. J.D. Carlson, M.R. Jolly, "MR fluid, foam and elastomer devices," *Mechatronics*, **10**, 555-569, 2000.
9. W.I. Kordonski, S.R. Gorodkin, Z.A. Novikova, "The influence of ferroparticle concentration and size on MR fluid properties," In *6<sup>th</sup> International Conference on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and their Applications*, World Scientific, Yonezawa, Japan, 1997.
10. M. Lokander, B. Stenberg, "Performance of isotropic magnetorheological rubber materials," *Polymer Testing*, **22**, 245-251, 2003.
11. J.D. Ferry, "Viscoelastic properties of polymers," John Wiley & Sons Inc., 1980.
12. E.L. Madsen, G.R. Frank, M.A. Hobson, S. Lin-Gibson, T.J. Hall, J. Jiang and T.A. Stiles, "Instrument for determining the complex shear modulus of soft-tissue-like materials from 10 to 300 Hz," *Physics in Medicine and Biology*, **53**, 5313-5342, 2008.
13. M. Lokander and B. Stenberg, "Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials," *Polymer Testing*, **22**, 677-680, 2003.