

MR 엘라스토머의 감쇠 및 강성 특성에 대한 실험조사

Experimental Study on the Damping and Stiffness Characteristics of MR Elastomers

곽문규† · 정문산* · 배병찬* · 허석** · 송명호***

Moon K. Kwak, Moonsan Jung, Byungchan Bae, Seok Heo, Myong H. Song

Key Words : MR 엘라스토머(MR Elastomer), MR 재료(MR Materiel), 감쇠(Damping)

ABSTRACT

This paper is concerned with the experimental research of magnetorheological elastomers (MREs). The modulus of the MR elastomers can be controlled by an applied magnet field, so that it can be effectively used for vibration suppression applications. The MR elastomer in this experiment is a mixture of KE-1300 silicone, carbonyl iron powder (300mesh) and a silicone hardener (CAT-1300). Three specimens were manufactured and tested by using the vibration testing instruments. The magnetic field was generated by the permanent magnets. The experimental results show that the natural frequencies of the test article with MR elastomer changes by the applied magnetic field. The performance of the MR elastomer can be increased by stronger magnetic fields. This is under investigation.

1. 서 론

전자유동학적(Magnetorheological, MR) 재료는 자장의 영향에 의해 유동학적 성질이 변화는 재료이다. MR 재료들은 두 개의 부류로 나뉘는데, MR 유체와 MR 엘라스토머이다. MR 유체와 장비의 개발은 Rabinow[1,2]에 의해 처음 이루어졌다고 본다. MR 유체는 자장에 의해 극성을 가질 수 있는 입자들이 점성유체에 섞여있는 재료이다. 자장이 유체에 가해지지 않으면 입자들은 불규칙적으로 액체안에 분포되어 있게 된다. 그러나 자장이 걸리는 경우에는 입자들이 외부 자장의 방향에 따라 체인 형태로 정렬되어 MR 유체의 유동학적 성질이 변하게 된다. 일반적으로 자성화할 수 있는 입자들은 10^{-7} 에서 10^{-5} m의 크기를 가진다. MR 유체들은 다양한 분야에 응용되고 있는데, 예를 들어 브레이크와 클러치[3,4], 댐퍼[5], 엔진마운트[6]에 응용되고 있다. 그러나 MR 유체는 결정적인 단점이 있는데 예를 들어 액체 누출은 환경 오염을 가져올 수 있고, 입자 잔류물은 MR 장비의 성능을 저하시킬 수 있다. 최근에 MR 유체와 유사한 성

질을 가지는 고체인 MR 엘라스토머가 MR 유체의 단점을 보완할 수 있는 해결책으로 떠오르고 있다.

MR 엘라스토머는 실리콘 고무나 천연 고무와 같은 폴리머 재료안에 체인 형태로 극성화할 수 있는 입자들을 가지고 있는 재료이다. MR 엘라스토머에 보이는 실제 현상은 MR 유체와 매우 유사하다. MR 엘라스토머의 경우 엘라스토머 복합재안에 포함된 입자들이 항복 전 상태에서 작동한다. 반면에 MR 유체는 항복 후 연속 전단이나 유동 형태로 작동한다[7].

MR 엘라스토머를 제작하기 위해서는 강한 자장이 필요하다. 전형적인 양생 자기력은 약 8×10^6 A/m[8]이다. 체인 형성은 입자들간의 비등방성 자력에 의해 만들어진다. 각각의 입자들이 가해진 자장에 노출되면 자력 쌍극자(dipole) 모멘트가 자장을 따라 입자들에 가해진다. 입자들의 쌍극자들이 머리-꼬리 체인 형태를 형성한다. 엘라스토머가 양생되면 입자들은 위치에 고정되고 전단력이 가해지면 엘라스토머 내의 쌍극자 상호작용을 극복하기 위해 추가적인 일이 필요하다. 자장이 증가됨에 따라 추가로 해야할 일로 비례하여 늘어나며 자장에 좌우되는 전단 모듈러스가 만들어진다[9].

최근에 일부 연구자들이 MR 엘라스토머의 장점에 주목하기 시작했다. 1992년에는 토요타의 R&D 연구실에서 엔진 마운트를 위해 철입자를

† 책임저자: 동국대학교 기계공학과 교수
E-mail : kwack@dongguk.edu
Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9379

* 동국대학교 기계공학과 석사과정

** 건국대학교 인공근육연구센터 연구교수

*** 동국대학교 기계공학과 교수

가지고 있는 실리콘 젤을 개발하였다[10]. Jolley 등[11]은 특정 부피를 가지는 탄소 철입자를 가지고 실리콘 오일을 사용하여 MR 엘라스토머를 제작하였다. Ford 연구소에서는 Ginder 등[12]이 천연 고무와 합성고무를 이용해 MR 엘라스토머를 제작하였다. Watson[13]은 MR 엘라스토머를 사용해 조정이 가능한 자동차 부싱을 개발하였다. 그런 부싱은 정상상태에서는 엘라스토머 스프링과 같이 행동하지만 전자기장이 가해지면 모듈러스가 30% 까지 변할 수 있다. 부싱의 응답시간은 10ms 이하이다. 더 나아가서 엘라스토머는 아주 큰 변형율에도 손상되지 않는다[12].

MR 엘라스토머의 응용분야가 많지 않지만 이 재료의 응용에 대한 전망은 밝다. 예를 들어 자율 조절 진동 흡수 장치, 강성 조절이 가능한 마운트, 자동차 현가장치 등이다.

현재까지 MR 엘라스토머에 대한 소수의 모델이 개발되어 사용 중이다. 대부분의 MR 재료에 대한 모델은 체인내의 두 개의 근접한 입자간 자기 쌍극자 상호 작용에 근거를 두고 있다. 이에 대해서는 참고문헌[13]에 자세히 설명되어 있다.

본 연구에서는 국내에서는 아직 연구가 시작되지 않은 MR 엘라스토머에 대한 초기 실험을 수행하고 그 응용성을 검토하였다. MR 엘라스토머를 제작하고 자기장이 걸렸을 경우의 변화를 관찰하였다. MR 엘라스토머의 응용은 위에서 설명한 바와 같이 전단 모드에서의 강성 변화를 이용하는 것인데 본 연구에서는 간단하게 축방향 모드에 대한 실험 장치를 구성하고 가능성을 탐구하였다. 실험 결과는 MR 엘라스토머가 감쇠 및 강성 조절에 대해 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

2. MR Elastomer 의 제작

MR Elastomer 의 제작을 위해 아래 그림 1 의 재료들이 사용되었다. 그림 1 의 왼쪽부터 차례로 실리콘 (KE-1300T)과 이형제 (KF96), 경화제 (CAT-1300), 철가루(300mesh, $\rho = 7.75 \text{ g/cm}^3$)가 보여지고 있다. 더 입자가 작은 철가루의 사용이 필요했으나 구입할 수 있었던 300 mesh 의 철가루였다. 일반적으로 500 mesh 이상의 철가루 사용을 권장하고 있다.

KE-1300T 실리콘은 일본 Shin-Etsu Chemical 사의 형뜨기용 고무이다. 주재료인 KE-1300T 와 경화제(CAT-1300)를 혼합하여 실온 또는 고온에

에서 경화시킨다. 이 제품을 사용하면 단시간에 실리콘 고무모형을 제작할 수 있다. 특히 이형성과 내열성, 내약품성, 치수안정성이 뛰어나고 경화시 발열하지 않아 모형유지가 필요한 미술과 시제품 제작 등 다양한 산업분야에 폭 넓게 이용되는 제품이다.

그림 2 는 주형을 보여주고 있으며 그림 3 은 주형을 이용해 실제 제작된 MR 엘라스토머들을 보여주고 있다.



Fig. 1 Materials used for MR elastomer fabrication

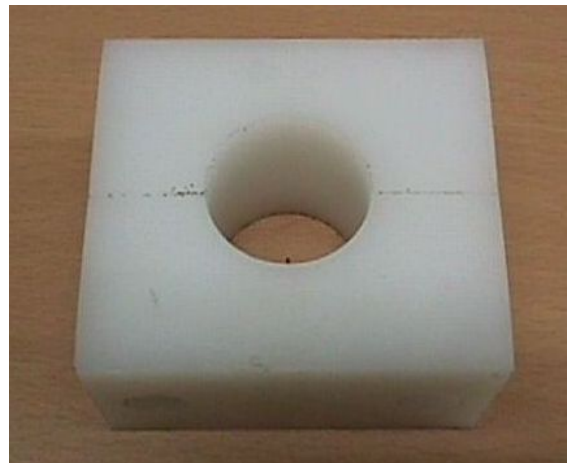


Fig. 2 Mold for MR elastomer fabrication



Fig. 3 MR elastomers

그림 2 에 보이는 주형의 제작에는 내마모성과 기계가공성이 뛰어나서 롤러, 부싱, 기어 등의 제작에 사용되는 MC 나일론을 사용하였다.

그림 3 의 MR 엘라스토머는 전체높이 35mm, 직경 25mm 가 되도록 제작되었다. 아래 표 1 은 제작된 MR 엘라스토머의 전체 부피에서 실리콘과 철가루가 차지하는 부피비를 보여준다.

표 1 MR 엘라스토머의 구성비

| 시편 | Silicone | Iron powder |
|----|----------|-------------|
| 1 | 90% | 10% |
| 2 | 80% | 20% |
| 3 | 70% | 30% |

표 2 는 부피비에 따른 혼합 후, 실리콘과 철가루의 비중을 곱하여 부피비에 따른 중량을 계산하고 이를 실리콘에 대한 철가루의 중량비를 산출한 결과를 나타낸다.

표 2 MR 엘라스토머의 중량비

| 시편 | 중량(g) | | 중량비(%) |
|----|-------|----------|---------------|
| | Iron | Silicone | Iron/silicone |
| 1 | 31.0 | 40.0 | 79 |
| 2 | 46.5 | 34.9 | 177 |
| 3 | 62.0 | 30.5 | 304 |

표 2 의 혼합 비율에 따라 혼합된 용액을 그림 3 의 주형에 채운 후에 알루미늄 판을 이용하여 주형의 위아래를 막고 고정시켰다. 일반적으로 MR 엘라스토머를 성형할 때 자기장을 걸어주면 입자들이 자기장의 자력선을 따라 체인 링크를 형성한다. 이 구조는 성형이 완료된 후에도 그 모양을 유지하게 된다[14]. 성형 과정에서 그림 4 와 같이 네오디뮴 자석을 주형의 위아래에 부착하여 자력선을 따라 입자들이 배열되도록 유도하였다.

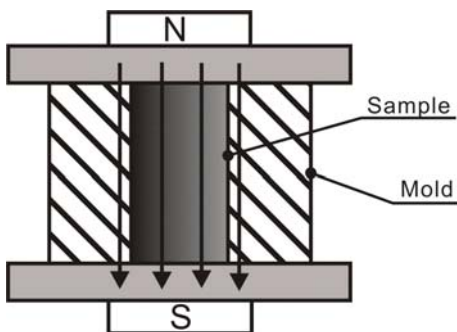


Fig. 4 Magnet Arrangement in Molding Process

그림 4 와 같이 주형을 만든 후 상온에서 24 시간을 방치하면 그림 2 와 같은 MR 엘라스토머를 완성할 수 있다.

3. MR 엘라스토머 진동 실험 장치

본 실험에는 FFT 신호 분석 장비(HP35670A), 가속도계(ENDEVCO 7751-500), Mini Shaker(B&K Type 4810), Power Amplifier (B&K Type 2706), 네오디뮴자석(폭 25mm, 높이 10mm, 두께 5mm, 0.45T)을 사용하였다. 그림 5 는 본 실험에 사용된 장비들을 보여준다.

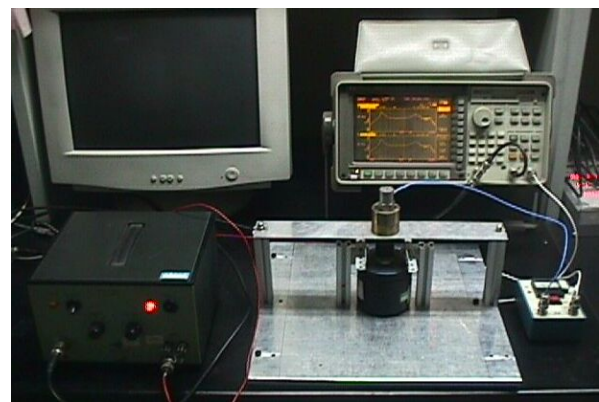


Fig. 5 Vibration Testing Equipments

그림 6 은 mini shaker 와 MR 엘라스토머, 알루미늄 판, 가속도계가 배열된 것을 보여주고 있다. FFT 신호분석기를 이용해 10Hz ~ 810Hz 사이의 주파수대역으로 미니셰이커를 가진시키고 가속도계의 신호를 입력 받아 주파수 응답 곡선을 구했다. 먼저 자장이 없을 경우에 대해 실험하고 자석을 부착하여 주파수 응답 곡선상의 변화를 관찰하였다.

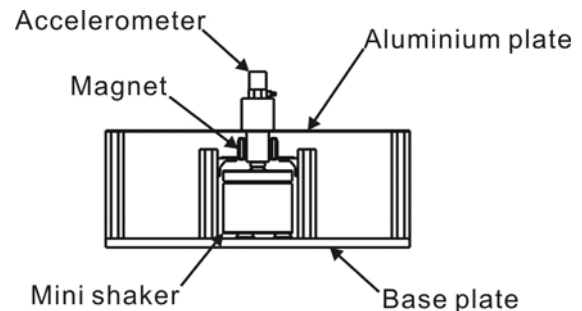


Fig. 6 Schematic Diagram of Vibration Testing Apparatus

실험을 위해 두께 10mm 의 알루미늄 재질의 사각판의 중심에 미니셰이커를 고정시키고 그 위에

MR 엘라스토머를 부착하였다. MR 엘라스토머의 윗부분에 두께 1mm 폭 45mm 길이 340mm의 알루미늄 판을 부착하였다. 알루미늄 판은 볼트를 이용해 양단을 고정시켰다. 고정된 알루미늄 판 위에 황동으로 된 무게 278g의 추가 질량을 부착하고 그 위에 가속도계를 부착하였다. 자기장을 생성하기 위해 네오디움자석을 MR 엘라스토머의 양 옆에 2mm의 간격을 두고 근접시켰다. 이렇게 만들어진 실험 장치는 그림 7과 같이 신호분석기와 증폭 앰프에 연결되었다.

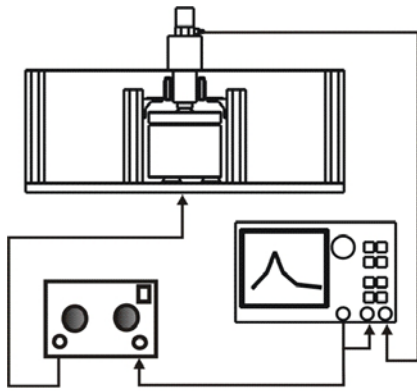


Fig. 7 Vibration Experiment Setup

4. MR 엘라스토머 진동실험

그림 8은 제작된 세 개의 MR 엘라스토머에 자장이 걸리지 않았을 경우에 대한 주파수 응답곡선을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 철가루 성분이 많아질수록 최저차 고유진동수가 증가한다. 즉, 강성이 증가함을 알 수 있다.

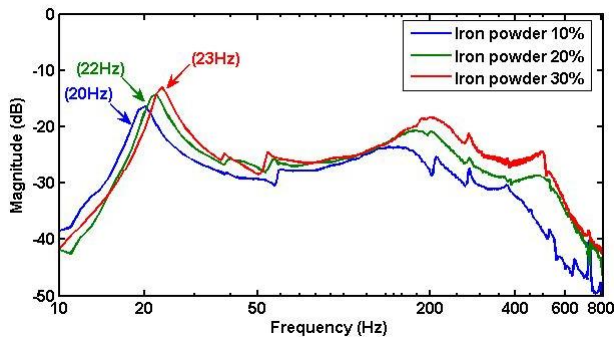


Fig. 8 Frequency Response Curves without Magnetic Field

각각의 MR 엘라스토머에 자력이 걸렸을 때에 대한 주파수 응답 곡선이 그림 9부터 10까지 보여

지고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 자력이 걸릴 경우 강성이 증가되어 고유진동수가 약간 상승하고 감쇠가 증가함으로 인해 이득이 약간 감소함을 알 수 있다.

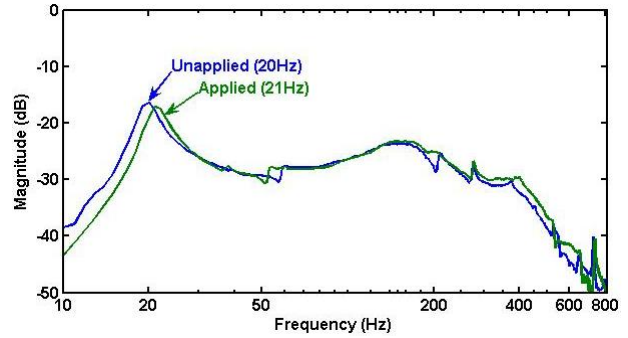


Fig. 9 Frequency Response Curve for Specimen #1

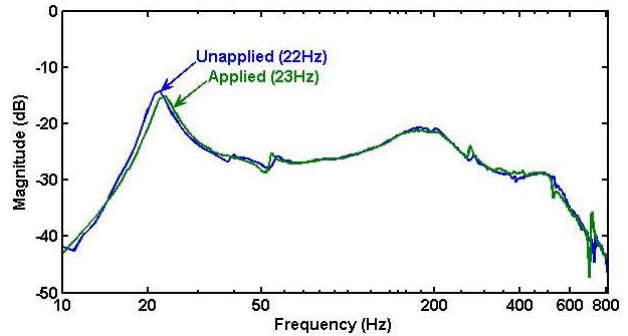


Fig. 10 Frequency Response Curve for Specimen #2

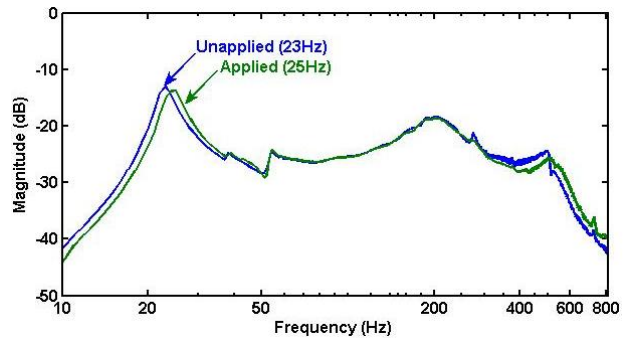


Fig. 11 Frequency Response Curve for Specimen #3

5. 토의 및 결론

본 실험에서는 국내에서 아직 연구가 활발하게 진행되지 않고 있는 MR 엘라스토머의 제작 과정을 살펴보고 제작된 엘라스토머를 진동 실험 장치를 통해 재료의 특성을 조사하였다. MR 엘라스토머는 철가루와 실리콘 혼합물로 이루어지며 철가루 입자가 체인 형태의 구조로 배열될 수 있

도록 양생 과정에서 자력을 가한다. 본 연구에서는 철가루 구성비 10%, 20%, 30%를 가지는 MR 엘라스토머를 제작하고 진동 실험 장치를 통해 각각의 재료 특성을 조사하였다. 네오디뮴 자석을 이용해 자장을 형성하고 그 영향을 조사하였다.

실험 결과는 자력이 없는 경우에 철가루 혼합비율이 증가함에 따라 강성이 증가함을 알 수 있었고 자력을 가할 경우 강성과 감쇠 모두에 영향을 줌을 확인할 수 있었다. 다만, 자력이 약해 큰 변화를 주기는 어려웠는데 이에 대해서는 현재 연구가 진행 중이다.

참고문헌

- (1) Rabinow, J., 1948, The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transaction, 67:1308- 1315.
- (2) Rabinow, J., 1951, Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device, US Patent 22575360.
- (3) Carlson, J.D., 1991, US Patent 5, 054,593.
- (4) Gentry, S.B., Mazur, J.F. and Blackburn, B.K. 1995. US Patent 5,460,485.
- (5) Dyke, S.J., Spencer, B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D., 1998, An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection, Smart. Mater. Struct., 7:693- 703.
- (6) Carlson, J.D. and Weiss, K.D., 1995, US Patent, 5,328,373.
- (7) Carlson, J.D. and Jolly, M.R., 2000, MR Fluid, Foam and Elastomer Devices, Mechatronics, 10:555- 569.
- (8) Jolly, M.R., Carlson, J.D., Munzo, B.C. and Bullions, T.A. 1996a, The Magnetoviscoelastic Response of Elastomer Composites Consisting of Ferrous Particles Embedded in a Polymer Matrix, J. Int. Mat. Sys. & Struct., 7(6):613- 622.
- (9) Borcea, L. and Bruno, O., 2001, On the Magneto-elastic Properties of Elastomer-ferromagnet Composites, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 49(12):2877- 2991.
- (10) Shiga, A., Fujimoto, Y. and Hirose, M., 1993, Tokai Hei Japanese Patent 5-25315, Feb. 2.
- (11) Jolly, M.R., Carlson, J.D., and Munoz, B.C., 1996b, A Model of the Behaviour of Magnetorheological Materials, Smart Mater. Struct., 5:607- 614.
- (12) Ginder, J.M., Nichols, M.E., Elie, L.D. and Clark, S.M., 2000, Controllable-stiffness Components Based on Magnetorheological Elastomers, In: Wereley, N.M. (ed.), Smart and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems, Proceedings of SPIE 3985, pp. 418- 425.
- (13) Watson, J.R. 1996. US Patent 05609353.
- (14) Y. Shen, M.F. Golnaraghi and G.R. Heppler, 2004, Experimental Research and Modeling of Magnetorheological Elastomers, Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 15-January.