

論文

자기력이 자기유동 탄성체의 압축 및 동적 특성에 미치는 영향

류상렬*, 이동주**, 이중항***

Effect of Magnetic Force on the Compressive and Dynamic Properties of Magnetorheological Elastomers

Sang Ryeoul Ryu*, Dong Joo Lee**, Jong Hang Lee***

ABSTRACT

The compressive and dynamic properties of magnetorheological elastomers were investigated as functions of magnetizable particle volume fraction, alignment of the embedded particle and magnetic force. The specimens consisted of pure and filled silicone with randomly dispersed, longitudinal and transverse aligned magnetizable particle chains. To align the embedded particles in the elastomer, the cross-linking of the elastomer composites took place in a magnetic field. The compression and dynamic tests in the absence and the presence of different magnetic forces were carried out. The modulus and loss factor of the elastomer composites increase with increasing volume fraction at the same magnetic force. The case of longitudinal alignment shows a high modulus and loss factor when compared to the case of transverse alignment or random dispersion.

초 록

자기화 분말 함유량과 분말의 배향, 그리고 자기력 세기를 함수로 한 자기유동 탄성체의 압축 및 동적특성에 대해 연구하였다. 시험편은 순수 실리콘과 분말이 불규칙 배향된 실리콘, 축 방향으로 배향된 실리콘 그리고 축 직각 방향으로 배향된 실리콘으로 구분하였다. 탄성체 내에 포함된 분말의 배향을 위해 복합 탄성체의 성형을 자기장 내에서 실시하였다. 압축 및 동적시험은 자기력이 없는 경우와 자기력의 크기를 다르게 제어하는 경우로 구분하여 수행되었다. 복합 탄성체의 탄성율 및 손실계수는 동일한 자기력 세기에서 분말 함유량의 증가에 따라 증가하였다. 축 방향으로 배향된 복합탄성체의 탄성율과 손실계수는 축 직각 방향 배향 혹은 불규칙 배향에 비해 높게 나타났다.

Key Words : 자기유동 탄성체(magnetorheological elastomer), 자기력(magnetic force), 압축탄성율(compressive modulus), 손실계수(loss factor)

1. 서 론

자기유동 탄성체(MRE, magnetorheological elastomer)는 탄성율이나 감쇠 등의 기계적 성질이 외부 자기장에 의해 빠르게 제어할 수 있는 지능성 재료(smart materials)의 한 분류이다. 이는 탄성체 또는 고무 같은 재료에 나노 크기의 자기

화(magnetizable) 입자를 첨가함으로 생성된다[1-2]. 이러한 배합물을 성형 전에 자기장에 놓게 되면 자기화 입자들 사이의 자기장 유도 상호작용에 의해 사슬 혹은 더욱 복잡한 3차원 구조로 배향되어 이방성 재료가 형성된다. 또한 배합물이 성형된 후에는 자기장에 의해 형성된 구조들이 탄성체의 내부에서 그 형태를 유지하며 고정된다[3]. 성형이 완료된 후

* 영남대학교 기계공학부

**+ 영남대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail: djlee@yu.ac.kr)

*** 영남대학교 기계공학부 연구생

에 임의 자기장을 가하게 되면 입자들 사이에 유도된 자기력이 기계적 성능을 제어할 수 있게 된다. 이러한 특성을 이용하여 가변적인 강성 부품이나 감쇠 요소 등을 포함하는 다양한 분야에서 잠재적인 응용이 가능하다. 이 같은 주제를 가지고 자동차 산업에 적용하기 위한 몇몇 연구가 이루어지고 있으며, 자기화에 의해 배향된 금속분말을 포함하는 복합 탄성체는 높은 변형율의 센서나 액추에이터로 이용이 가능하다고 할 수 있다[4].

본 논문에서는 자기장에 반응하고 센서나 액추에이터로 응용할 수 있는 자기유동 탄성체를 개발하기 위한 것이다. 연구에 사용된 탄성체는 실리콘 고무이고 자기화 분말은 카르보닐 철을 사용한다. 주요 변수로는 ① 카르보닐 철 함유량, ② 성형시 자기장 형성에 의한 배향, 그리고 ③ 성형 후 시험시에 가하는 자기장 크기이며, 이들이 압축 및 동적 특성에 미치는 영향에 대해 연구하고자 한다. 또한 센서나 액추에이터 등과 같은 제품들에 자기유동 탄성체가 응용될 수 있는 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 제조

자기적으로 능동적 거동을 보이는 복합 탄성체는 2개의 주요 부분 즉, 탄성체와 자기화 금속 성분으로 이루어져 있다. 금속 분말의 주 기능은 자기적으로 비활성인 탄성체에 잠재적인 자기적 특성을 주기 위한 것이고, 다른 한편으로는 복합 탄성체의 강성을 높이고 강도를 강화 기능이 있다. 탄성체는 신에츠사의 KE-12를 사용하였으며, 인장강도가 2.5MPa, 신장율이 180%, 경도가 41(Durometer A) 그리고 비중이 1.30이었다. 카르보닐 철 금속 분말은 AOMETAL사의 S-1640를 사용하였으며, 입자 평균 크기는 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 겉보기 비중이 $2 \sim 3 \text{g/cm}^3$, 탭(tap) 비중이 $3.5 \sim 4.5 \text{g/cm}^3$, 철(Fe)함유량이 최소 98% 이상이었다.

시험편은 순수한 실리콘과 카르보닐 철의 함유량이 20%, 40% 그리고 60%인 3가지로 분류하였다. 시험편의 제조는 ① 탄성체와 금속 분말의 혼합, ② 1차 진공 처리 ③ 경화제 첨가, ④ 하급형에 붓고 2차 진공처리, ⑤ 상급형을 닫고 배향을 위한 자기력 가하기, ⑥ 이형하기 등의 공정을 거쳐 완성되었다. 시험편의 크기는 $\phi 15 \text{mm} \times 15 \text{mm} (t)$ 였고, 금속 분말이 배향되도록 성형시 자기장을 가하였다. 이때 자기력 세기는 극(pole) 중심부에서 200mT였고, Fig. 1과 같이 자기력의 세기 조절이 가능한 Electromagnet 장비를 제작하여 사용하였다. 배향의 종류는 ① 불규칙 배향(R.D.: random dispersion), ② 축 방향 배향(L.A.: longitudinal alignment), ③ 축에 직각방향 배향(T.A.: transverse alignment) 등으로 구분하여 배향에 따른 특성의 변화에 대해 검토하였다.

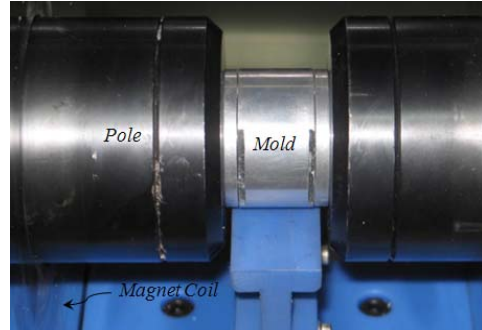


Fig. 1 A photograph of electromagnet device.

2.2 실험방법

압축시험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 Autograph (Model AG-5000E)이며, 최대 4mm까지 변위를 가하였고 시험 속도는 2mm/min.였다. 각 조건별 시험편에 대해 자기력 세기 (mT)를 다르게 하였으며, 그 자기력 크기는 490, 410, 50 그리고 0으로 구분하였다. 여기서 0은 자기력이 없는 경우를 의미한다.

고무의 동적성질[5]은 Hysteresis 현상에 대한 값으로부터 손실계수(loss factor, $\tan \delta$)와 스프링 상수 등을 구할 수 있다. 동적특성시험(KS M 6604)의 시험기는 SAGInoMIYA 시험기를 사용하였으며, 압축시험과 동일한 형상의 시험편을 사용하였고, 각 조건별 시험편에 자기력 세기를 다르게 적용하였다. 단, 시험 조건은 각 시험편의 25% 변형에 해당하는 예비하중(pre-load)을 가한 후, 진동수(10, 15, 20Hz)와 진폭(0.15, 0.30, 0.45mm)을 변화시키면서 값을 얻는다. 또한 금속 분말 함유량 20%에 대해 예비하중 값을 변화시키면서 각 자기력 세기별 동적특성 값을 얻는다. 모든 실험의 시료는 시험편 4개 이상을 사용하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 압축 특성

Fig. 2는 자기력 세기가 490mT일 때, 축 방향 배향(L.A.)과 불규칙 배향(R.D.)에 대한 압축응력-변형율 선도이다. 동일한 금속분말 함유량과 변형율에서 L.A.의 경우가 가장 높은 응력을 보였고, T.A. 경우 그래프에 표현 하지 않았지만, R.D.보다 다소 높은 값을 보였다. 또한 시험시 부여한 자기력 세기에 따른 압축응력 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 여기서 압축응력은 변형율이 0.25일 때의 응력 값을 의미한다. 모든 시험 조건에서 시험편 제작시 부여했던 자기력의 영향이 있음을 알 수 있고, L.A.와 R.D.에 대한 결과를 나타냈는데, T.A.의 경우는 L.A.와 R.D.의 중간정도 값을 보였다. 순수

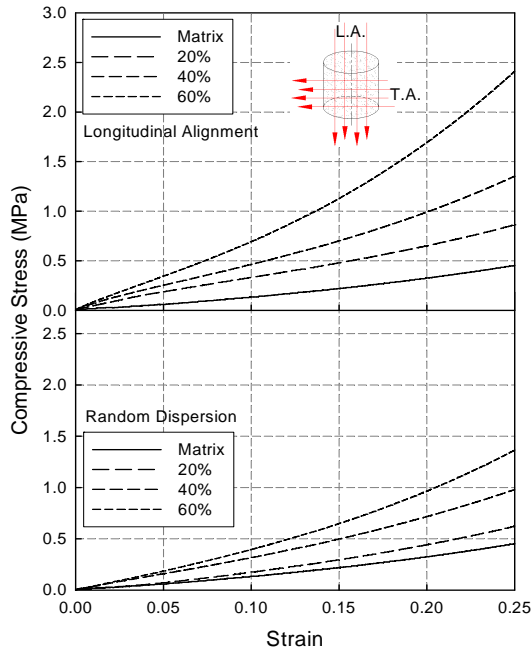


Fig. 2 Compressive stress-strain curves of matrix and MREs when the magnetic force is 490mT.

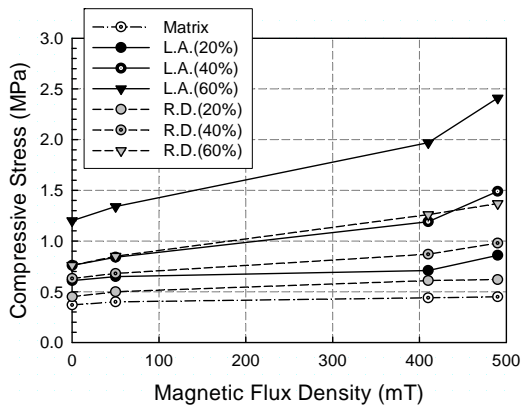


Fig. 3 Effects of particle alignment, magnetic flux density and volume fraction on compressive stress.

실리콘(기지)은 압축시험시 부여한 자기력의 세기가 증가할수록 0.37MPa에서 최대 0.45MPa 까지 미소한 변화를 보였다. 기지는 자기력이 통하지 않는 재질이지만, 시험편의 높이가 0로 시험시 상하에서 부여하는 자기력의 영향으로 미소한 변화를 보이게 된다. 자기유동 탄성체(MRE)의 경우는 자기력의 세기가 증가할수록 금속분말 함유량이 증가할수록 높은 응력 값을 보였으며, 동일한 자기력 세기에서도 배향 기력에 따라 큰 차이를 보였다. 그 중에서 금속분말 함유량 60%의

L.A. 경우가 0.2MPa에서 최대 2.41MPa를 보였고, R.D. 경우는 0.76MPa에서 최대 1.37MPa를 보였다. 이와 서 부시험편 제조시 부여했던 자기력에 의한 배향과 압축 시험시 부여한 자기력 세기가 MRE의 압축 응력에 적지 않은 영향을 미친다와 볼 수 있다. 이를 MR 효과 이계 된다.or 다ological effect)[1, 6]라 부르며, 이러한 재질의 독특한 특성 때문에 MREs에 대한 관심 증가되고 있고 다양한 분야에서 응용이 될 것으로 전망된다. MR 효과란 자기력 세기에 의한 응력의 증가를 의미하며 다음과 같은 식으로 계산하였다[1].

$$MR\ Effect(\%) = \frac{\sigma_{at\ 490m\ T} - \sigma_{at\ 0m\ T}}{\sigma_{at\ 0m\ T}} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 4에는 금속분말의 배향과 함유량을 함수로 한 MR 효과에 대한 결과를 나타냈다. 분말 함유량이 비교적 적은 20%에서는 MR 효과가 약 40%로 배향에 따라 큰 차이를 보이지 않았지만, 분말 함유량이 40% 이상에서는 배향에 따른 큰 차이를 보였다. 분말 함유량 40%에서 L.A.의 경우는 R.D.에 비해 37% 높은 MR 효과를 보였고, 분말 함유량 60%에서는 21% 높은 MR 효과를 보였다. 이와 같이 분말함유량에 따라 MR 효과 다르게 나타나는 것은 시험편 제작시 부여했던 자기력의 세기와 관계가 있다고 판단된다. 시험편 제작시 부여했던 자기력 세기는 극의 중앙부에서 200mT 정도로 동일한 세기를 모든 시험편에 적용하였다. 그런데 금속분말의 함유량이 증가할수록 배합물의 점도가 증가하기 때문에 동일한 자기력 세기로는 배향의 될 되었던 것으로 사료된다. 향후 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

Figs. 5-6은 자기력 세기와 배향, 금속분말 함유량이 MREs의 압축탄성율에 미치는 결과를 보여준다. 기지 및 MRE의 압축탄성율은 변형율이 0.05~0.1의 범위에서 구하였다. 압축응력의 결과와 유사하게 시험편 제작시와 압축 시험시 부여했던 자기력의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다. 기지는 시험시 상하에서 부여하는 자기력의 영향으로 1.21MPa에서 최대 1.49MPa 까지 미소한 변화를 보였다. MRE의 경우는 자기력의 세기가 증가할수록 금속분말 함유량이 증가할수록 높은 탄성율을 값을 보였으며, 동일한 자기력세기에서도 배향 종류에 따라 큰 차이를 보였다. 여러 조건 중 금속분말 함유량 60%의 L.A. 경우가 3.17MPa에서 최대 7.08MPa를 보였고, R.D. 경우는 2.36MPa에서 최대 4.28MPa를 보였다. 이를 기지의 값과 비교해 보면 L.A의 경우 기지에 비해 4.8배, R.D.의 경우는 2.9배 증가했음을 알 수 있다. 또한 기지에 비해 자기력 세기가 없고 금속분말 함유량 60%의 L.A. 경우 압축탄성율은 2.6배 증가하였고, 자기력 세기가 490mT 금속분말 함유량 60%의 L.A. 경우 압축탄성율은 4.8배 증가하였다. 한편 자기력 세기가 0인 경우의 압축 탄성율을 인장 탄성율을 값과 유사한 경향을 보였다.

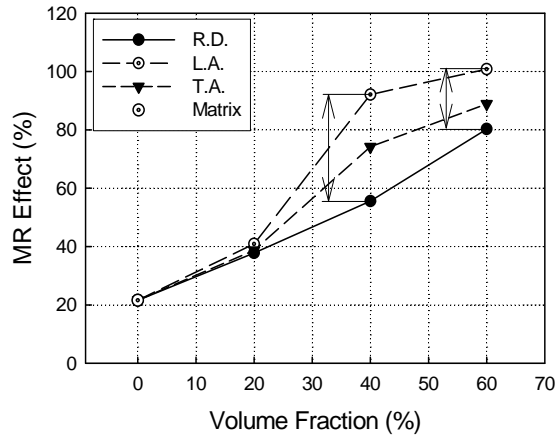


Fig. 4 Effects of particle alignment and volume fraction on MR effect.

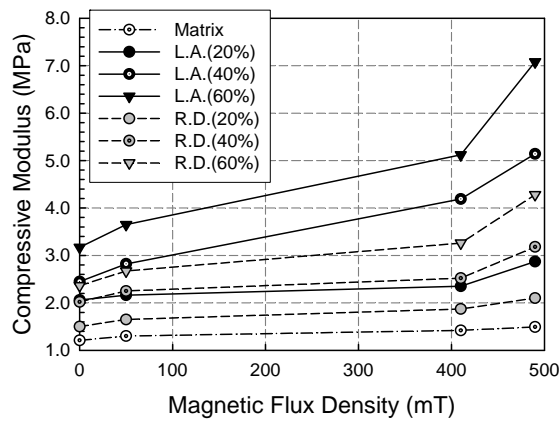


Fig. 5 Effects of particle alignment, magnetic flux density and volume fraction on compressive modulus.

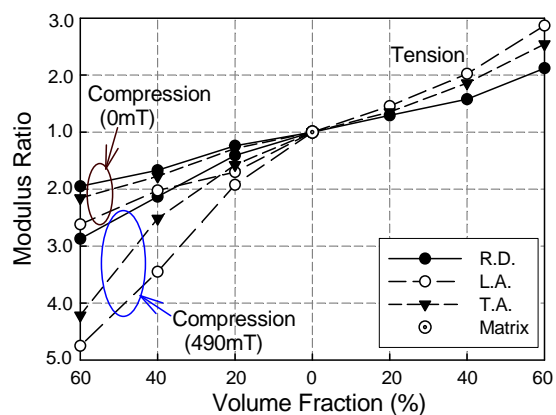


Fig. 6 Effects of particle alignment, magnetic flux density and volume fraction on modulus ratio.

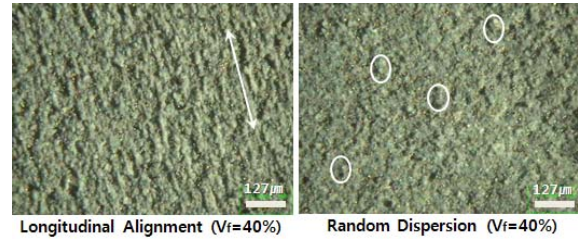


Fig. 7 Microscopic pictures of filled silicone with L.A. and R.D. at volume fraction 40%

현미경 검사를 위해 빛 유형의 Nikon Eclipse LV 150이 이용되었다. Fig. 7은 압축 시험편에서 추출된 현미경 사진이다. 불규칙 배향 시험편은 ○표시 부와 같이 부분적으로 뭉쳐있는 것을 볼 수 있고, 그에 비해 L.A. 배향 시험편에는 자기력에 의해 화살표(↓) 방향으로 분말이 배향되고 고무가 결합되어 형성된 결을 볼 수 있다.

3.2 동적 특성

고무란 물질은 금속과 달리 고무 자체가 내부 마찰에 의한 에너지를 소산시킬 수 있기 때문에 여러 분야에서 충격흡수, 제진, 방진, 내진 그리고 완충 재료로서 널리 사용되고 있다. 이러한 성질을 나타내는 것이 손실계수로 점탄성(viscoelastic) 재료의 동적 특성을 나타내는 중요한 자라 할 수 있다. 손실계수를 높이기 위한 방법으로는 충전제나 수지, 금속분말 등의 첨가나 고무 블렌드를 이용한 방법이 사용되고 있다[7]. 또한 손실계수는 사용 온도, 진동수, 변형 진폭에 따라 변화하고, 폴리머의 종류, 가류 조건 등에 따라 상이하다[8]. 본 논문에서도 기지에 금속분말을 강화하여 MRE를 제작하였으므로 동적특성의 평가가 필요하다고 판단되었다. 기지 및 MREs의 동적 특성시험은 10.2mm/min의 속도로 예비하중(25% 변형)까지 2회 가진 후 동적 특성을 측정하였다.

Fig. 8은 L.A. 배향의 MREs에 시험시 490mT의 자기력을 가한 경우로 진동수(10, 15, 20Hz)와 진폭(0.15, 0.30, 0.45mm) 변화에 따른 값을 나타냈다. 금속분말 함유량의 증가에 따라 손실계수 값이 크게 증가함을 알 수 있다. 시험 조건에 대해서는 주파수의 증가할수록, 진폭이 증가할수록 내부 마찰량의 증가로 손실계수가 증가하였다. 시험시 부여한 자기력의 세기에 대한 결과는 Fig. 9에 나타냈다. 예비하중은 자기력 세기별 기지의 25% 변형에 해당되는 하중을 의미한다. 따라서 자기력의 세기에 따른 예비하중은 변할지라도 동적시험의 결과는 유사하게 나타났다. 하지만 동일한 금속분말 함유량에서도 금속분말의 배향에 따라 손실계수 값이 다르게 나타났다. 주파수 15Hz, 진폭 0.3mm, 시험시 자기력 세기 410mT인 경우에 대해 금속분말의 배향에 따른 결과를 Fig. 10에 나타냈다. L.A. 배향의 경우 특히 금속분말 20%에서 T.A. 배향이나 R.D. 배향보다 높은 손실계수를 보이고 있으며, 함유량의 증가에 따라

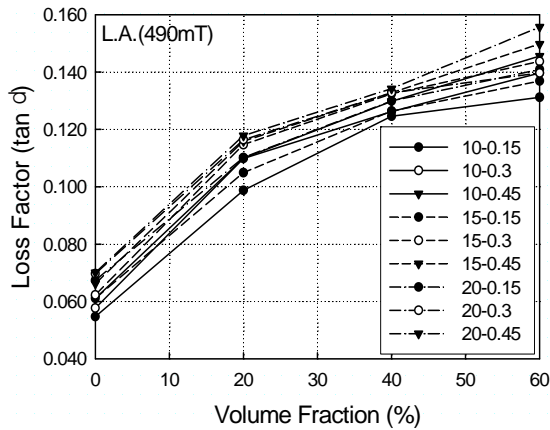


Fig. 8 Effects of volume fraction on loss factor of the MREs with longitudinal alignment.

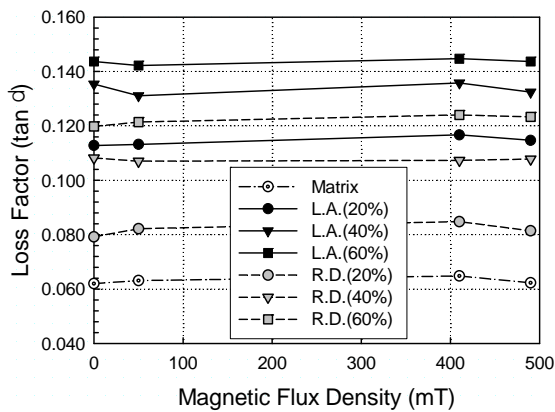


Fig. 9 Effects of magnetic flux density on loss factor of the MREs with random dispersion and longitudinal alignment.

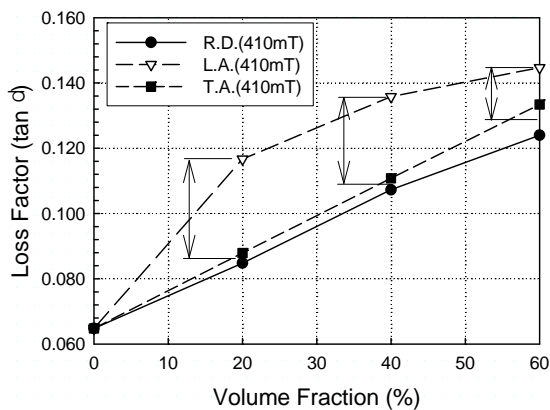


Fig. 10 Effects of particle alignment and volume fraction on loss factor of the MREs.

그 차이(↓)가 감소함을 알 수 있다. 이는 시험편 제작시 부여했던 자기력 세기에 의한 것으로 MR 효과 차이와 유사한 경우라 판단된다. 다만, MR 효과의 경우는 정적상태의 시험으로 금속분말 40%에서 배향별 큰 차이를 보였지만, 손실계수는 동적상태의 시험으로 금속분말 20%에서 큰 차이를 보였다. 향후 MR 효과와 더불어 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

또한 금속분말 함유량 20%에 대해 예비하중 값을 변화시키면서 자기력 세기별 손실계수 값을 비교하였다. 금속분말 함유량 20%, 주파수 15Hz 그리고 진폭 0.3mm일 때의 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 앞에서 고찰한 바와 같이 시험시 부여한 자기력 세기에 관계없이 유사한 값을 보였으며, 예비하중(6.2→8.2→10.2)의 증가에 따라 손실계수가 감소하였다. 하지만 감소하는 경향은 기지에 비해 금속분말을 강화한 경우 크게 나타났으며, L.A. 배향의 경우가 특히 크게 나타났다. 이는 금속분말을 강화한 경우가, 특히 L.A. 배향의 경우가 탄성율이 높은 강한 재료이기 때문인 것으로 보인다. 동일한 주파수와 진폭변위(0.3 mm)일지라도 예비하중이 증가할수록 그에 저항하는 재료의 반력이 커지기 때문에 내부마찰에 의한 재료의 손실 스프링정수가 감소하는 것으로 보인다. 따라서 강한 재료일수록 예비하중의 증가에 따른 손실계수가 크게 감소하게 된다.

고무의 동적특성은 사용 온도나 진동수, 진폭에 따라 변화하고, 폴리머의 종류, 성형 조건 등에 따라 상이하다. 따라서 부품 설계 및 해석을 위해 다양한 변수에 따른 데이터의 확보가 선행되어야 한다. 일반적으로 손실계수 값이 0.05보다 큰 경우를 방진재료라 한다[7]. 본 연구의 경우 기지가 0.063 정도이고, 금속분말 60%의 R.D. MRE는 0.122, L.A. 배향된 MRE는 0.144 정도까지 증가하였다. 따라서 기지 경우도 방진재료로 적용이 가능하다고 판단되며, 금속분말 강화 MREs들은 재료의 강성을 증가시키면서 또한 손실계수의 증가로 좀 더 가혹한 조건에 대한 부품 소재의 적용이 가능하다고 사료된다.

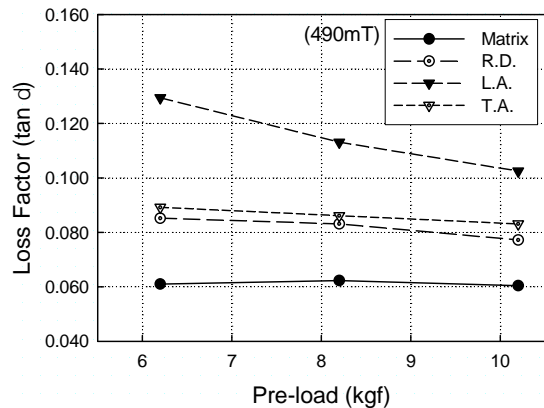


Fig. 11 Effects of pre-load and particle alignment on loss factor of the MREs.

4. 결 론

자기화 분말 강화 자기유동 탄성체의 압축 및 동적특성에 대한 연구결과에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 금속분말의 함유량 증가에 따라 MR 효과가 크게 증가하였으며, 금속분말 함유량 40%에서 축 방향으로 배향된 경우가 불규칙 배향의 경우에 비해 37% 높은 MR 효과를 보였다.
- ② 압축 탄성율은 자기력의 세기와 금속분말 함유량이 증가할수록 크게 증가하였으며, 자기력 세기가 490mT 금속분말 함유량 60%의 축 방향 배향된 복합 탄성체의 압축 탄성율은 기지에 비해 4.8배 증가하였다.
- ③ 손실계수는 금속분말 함유량의 증가에 따라 크게 증가하였고, 동일한 금속분말 함유량에서 축 방향으로 배향된 경우가 축 직각으로 배향 혹은 불규칙 배향된 경우에 비해 손실계수 값이 크게 나타났다. 또한 예비하중 증가에 따라 손실계수는 감소하였고, 감소하는 경향은 기지에 비해 금속분말을 강화한 경우 크게 나타났으며, 축 방향 배향된 경우가 특히 크게 나타났다.
- ④ 금속분말 강화 자기유동 탄성체는 배향 및 자기력에 의해 기지 재료의 강성을 증가시키면서 또한 손실계수의 제어가 가능하다. 이러한 특성을 응용하면 좀 더 가혹한 조건의 액추에이터나 센서 등의 부품 소재에 자기유동 탄성체의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2009년도 한국과학재단 일반연구비(2009-0076679)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Koo J.H., Khan F., Jang D.D. and Jung H.J., "Dynamic Characterization and Modeling of Magnetorheological Elastomers under Compressive Loadings," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 149, 2009, 012093.
- 2) Bellan C. and Bossis G., "Field Dependence of Viscoelastic Properties of MR Elastomers," *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 16, 2002, pp. 2447-2453.
- 3) Farshad M. and Benine A., "Magnetoactive Elastomer Composites," *Polymer Testing*, Vol. 23, 2004, pp. 347-353.
- 4) Bedmarek S., "The Giant Magnetostriction in Ferromagnetic Composites within an Elastomer Matrix," *Applied Physics A*, Vol. 68, 1999, p. 63-67.
- 5) 류상렬, 이동주, "단섬유 강화 Chloroprene 고무의 동적 특성 연구," 한국복합재료학회지, Vol. 17, No. 3, 2004, pp. 45-50.
- 6) Chen L., Gong X.L. and Li W.H., "Effect of Carbon Black on the Mechanical Performances of Magnetorheological Elastomers," *Polymer Testing*, Vol. 27, 2008, pp. 340-345.
- 7) 윤정식, "고무의 방진, 제진 및 완충 특성," 고무학회지, Vol.31, No.4, 1996, pp. 281-290.
- 8) Sharma M.G., *Vibration and Acoustic Measurement Hand Book*, Spartan Books, 1974, pp. 207-214.