

자기력이 철 분말 및 탄소나노튜브 강화 자기유동 고무 복합재료의 유동 및 압축 특성에 미치는 영향

류 상 열* · 이 동 주**

* 영남대학교 기계공학부

Effect of Magnetic Force on Rheological and Compressive Properties of Magneto-Rheological Rubber Composites with Iron Particle and Carbon Nanotubes

Sang Ryeoul Ryu* and Dong Joo Lee**

* School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.

(Received May 7, 2012 ; Revised September 28, 2012 ; Accepted October 4, 2012)

Key Words: Magneto-Rheological Rubber Composite(자기유동 고무 복합재료), Magnetic Field(자기장), Iron Particle(철 입자), Carbon Nano-Tube(탄소나노튜브), Magneto-Rheological Effect(자기유동 효과)

초록: 고무 혼합물의 가류특성 및 전자석 장치를 이용하여 범용고무를 기지로 하는 이방성 자기유동 고무 복합재료(MRRC)의 제조가 가능하였다. 철 입자(IP) 함유량의 증가에 따라 MRRC의 자기 투과율은 증가하였으며, 불규칙 배향에 비해 2 tesla로 배향시킨 경우가 1.8~2배 높게 나타났다. 2 tesla로 배향한 CNT만 강화한 MRRC의 자기 투과율은 3.7%로 자기장의 영향이 뚜렷이 확인되었다. IP 90 + CNT 5 & 2 tesla 배향의 MRRC는 압축시험 시 0.49 tesla의 자기장 하에서 압축응력이 기지에 비해 2.1배 증가하였다. IP 함유량 증가에 따라 자기유동(MR) 효과는 증가하였으며, IP 90 & 2 tesla 배향의 경우 20.4%의 MR 효과를 보였다. 시험편 제조 시 및 압축시험 시 부여한 자기력 세기가 MRRC의 압축특성에 미치는 영향이 크다고 판단된다.

Abstract: An orthotropic magneto-rheological rubber composite (MRRC) based on a general-purpose rubber can be manufactured by using an electromagnetic device during the curing processes of rubber mixtures. The magnetic transmissivity of MRRCs increases with the iron particle (IP) content, and that of aligned MRRCs with a 2-T magnetic field is 1.8 to 2 times higher as compared to that of randomly dispersed MRRCs. The effect of a 2-T magnetic field on carbon nanotube (CNT) reinforced MRRC has been identified clearly, and the magnetic transmissivity is found to be 3.7%. The compressive stress of MRRC (IP 90 + CNT 5, 2 T alignment) under a magnetic field of 0.49 T is 2.1 times higher as compared to that of the matrix. The MR effect of MRRC increases with the IP content, and that of aligned MRRC with the IP 90 and 2 T magnetic field is 20.4%. It is confirmed that the magnetic field when making the specimen and when performing the compression test greatly impacts the compression characteristics.

1. 서론

자기유동 고무 복합재료(MRRC, magneto-rheological rubber composite)는 탄성률이나 감쇠력 등의 기계적 성질이 외부 자기장에 의해 빠르게 제어할 수 있는 지능성 재료(smart materials)의 한 분류이다. 이는 고무와 같은 탄성체에 나노 혹은

미크론 크기의 자기화 입자를 첨가함으로써 생성된다.^(1,2) 이러한 혼합물을 성형 전 혹은 성형 중에 자기장을 부여하면 자기화 입자들 사이의 자기장 유도 상호작용에 의해 사슬 혹은 더욱 복잡한 3차원 구조로 배향되어 이방성 재료가 형성된다.⁽³⁻⁵⁾ 또한 성형이 완료된 후에 임의 자기장을 가하게 되면 입자들 사이에 유도된 자기력이 기계적 성능을 제어할 수 있게 된다. 이러한 특성을 이용하여 가변적인 강성 및 감쇠 부품 등의 다양한 분야에서 잠재적인 응용이 가능하며, 이

† Corresponding Author, djlee@yu.ac.kr

같은 주제를 가지고 자동차 산업에 적용하기 위한 몇몇 연구가 이루어지고 있다.^(6,7) 많은 연구자들이 상온 경화형(RTV, room temperature vulcanization) 실리콘 고무에 자기화 입자를 첨가한 방법으로 이방성 복합재료에 관한 연구를 수행하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 하지만, RTV의 경우 범용고무에 비해 고가이고 탄성률 및 강도가 약하며, 형뜨기 용이나 도포용, 실패용 등에 제한적으로 사용된다. 또한 몇몇 연구자들은 NR(natural rubber)을 기반으로 하는 MRRC에 대한 연구를 하였다.^(11,12)

NR, SBR 등 범용고무의 경우 성형 시에 2000psi(13.79MPa) 이상의 압력이 필요하다. 성형압력이 낮을 경우 성형 후 고무분자들 사이에 기공등이 발생된다. 따라서 성형 중에 계속적인 압력이 부여되어야 한다. 그러므로 범용고무를 기반으로 하는 이방성 복합재료를 제조하기 위해서는 Chen 등⁽¹³⁾이 제안한 가압과 자기력 부여가 가능한 특수 구조의 프레스 설비가 필요하다. 하지만 본 연구에서는 성형 중에 가류물의 점도가 낮아지는 시간동안 산화철 입자(IP, iron particle)에 자기력을 부여하는 방법을 이용하여 이방성 복합재

료를 제작하였다. 또한 아직 미진한 연구 분야인 탄소나노튜브(CNT, carbon nano-tube)의 배향에 대한 시도를 하였다. 타 CNT 배향 관련 연구들⁽¹¹⁻¹³⁾의 자기력 세기는(MFD, magnetic flux density) 0.6~1.0 tesla(T)의 범위였지만, 그보다 높은 2 tesla까지 확대하였다.

본 논문의 목적은 자기장에 반응하고 센서나 액추에이터로 응용 가능한 MRRC를 개발하기 위한 것이다. 연구에 사용된 탄성체는 범용고무인 SBR(styrene butadiene rubber)이고 자기화 분말은 카르보닐기 철 분말(IP)과 다중벽 탄소나노튜브(CNT)를 사용한다. 주요 변수로는 ① IP 및 CNT 함유량, ② 성형 시 자기장 형성에 의한 배향효과, 그리고 ③ 성형 후 시험 시에 가하는 자기장 유무이며, 이들이 압축특성에 미치는 영향에 대해 연구하고자 한다. 향후 능동적 진동제어 시스템에 적용을 목표로 연구 중이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 고무는 Table 1과 같이 Styrene ($CH_2 = CH - C_6H_5$)과 Butadiene($CH_2 = CH - CH = CH_2$)을 공중합하여 만든 대표적인 범용고무인 SBR를 사용하였다. SBR은 천연고무에 비해 내마모성, 내노화성, 내열성이 뛰어나고, 가류특성이 안정적이며 가공성이 양호하여 사용범위가 넓은 합성고무이다. 보강재의 종류로는 CNT와 IP를 사용하였다. CNT는 Thermal CVD 공법으로 제조된 직경 10~15nm, 순도 95% 이상인 한화나노텍(주)의 CM-100이었고, 함유량은 0, 5(phr)이었다. 산화철 분말(IP)은 아모메탈(주)의 S-1640($\phi=3\sim 5\mu m$)을 사용하였고, 함유량은 0, 30, 60, 90(phr)이었다. CNT의 분산을 위하여 초음파 처리를 하였다. CNT 1g에 용제(toluene) 100ml의 비율로 1시간 초음파 분산하여 용액을 제조하였으며 초음파 분산용 기계는 Sonic & Material사의 *Vibra Cell*[®] (750Watts, 20kHz)를 사용하였다. 분산공정이 끝난 후에는 상온에서 36시간 정도 유지하여 용제를 휘발시켰다.

2.2 시편제작 및 시험방법

배합고무의 제조는 ASTM D3182와 D3190을 따랐으며, 혼합용 롤(roll)은 직경이 203.2mm(8") 길

Table 1 Formulation of matrix

	Ingredients	phr ¹
Rubber	SBR 1502	100.0
Activator	ZnO ²	5.0
	S-Acid	1.0
Iron Powder	S-1640	α (0, 30, 60, 90)
CNT	CM-100	β (0, 5)
Processing Oil	DOP ³	3.0
Accelerator	Oricell TT ⁴	1.2
	Vanax NS ⁵	2.0
Vulcanizing Agent	Sulfur	2.0
Retarder	PVI ⁶	0.05
SUM		113+ α + β

¹ parts per hundreds of rubber

² zinc oxide

³ di-2-ethylhexyl phthalate

⁴ trramethyl thiuram

⁵ benzothiazolyl-2-tert-butylsulfenamide

⁶ pre-vulcanization inhibitor

이가 406.4mm(16")의 개방형을 사용하였다. 원료고무(SBR 1502)와 IP의 중량 편차는 $\pm 1g$ 이며, 기타 CNT 등의 원료들은 $\pm 0.01g$ 이내로 하였다. 시험편 ($\varnothing 20 \times 10t$) 제작을 위해 혼합된 고무를 시험 금형에 넣고 압축프레스(80tons)를 사용하여 압축성형 하였다. 본 연구에서는 성형 중에 혼합물의 점도가 낮아질 때, 강화입자에 자기력 부여하는 방법을 적용하였으며 이를 위해 가류특성시험 결과를 이용하였다. 미가류(未加硫) 상태 고무의 가류특성 시험을 위해 ODR(oscillating disc rheometer, Monsanto사, D-100) 시험기(ASTM D2084, KS M 6687)를 사용하였다.

Fig. 1과 같이 시험온도 170°C에서 시간은 12분 있었고, 실험을 통틀어 가류개시시간(ts_2), 적정가류시간(optimum curing time, tc_{90}), 최대점도(M_H) 그리고 최소점도(M_L) 등의 정보를 알 수 있다. 하 금형 위에 원주방향 중심에서 $1 \pm 0.02^\circ$ 로 유동 가능한 디스크가 있으며, 디스크 위에 시료를 놓고 실험을 시작하면 상 금형이 압축을 한다. 상하 금형 사이에 있는 혼합물은 금형 및 디스크의 온도에 의해 점도가 떨어지며, 일정시간이 지나면 화학반응이 진행되면서 점도가 다시 상승하게 된다. 고무 혼합물에 열이 전달되면서 점도(torque 값)가 낮아지며, 가장 낮은 위치를 최소점도(M_L)라 부른다. 서론에서 언급한대로 점도가 낮은 구간에서 자기력을 부여하여 재료의 이방성이 형성된다. 일정 시간이 지나면 가류제의 영향으로 화학반응이 시작되는데, 이때를 가류개시시간(ts_2)이라 부르며, 이후는 고무 혼합물 내의 화학반응 확산으로 단위 시간당 점도가 빠르게 증가한다. 화학반응의 완료를 의미하는 위치가 최대점도(M_H)이며, 이는 성형 후의 경도나 탄성계수 등의 기계적 특성값과 밀접한 관계가 있다. 또한 적정가류시간(tc_{90})은 M_H 의 90% 수준일 때의 시간을 의미하는 것으로 성형시간 결정에 이용된다. 성형 중의 자기력 부여는 고무 혼합물이 상하 다이 및 디스크에 의해 점도가 떨어지는 위치부터 화학반응이 시작되기 전 구간(○부)에서 이루어져야 한다. 따라서 시험의 성형 순서는 다음과 같다. ① 열 프레스의 상하 금형 사이에 고무 혼합물 충전, ② 상하 금형 가압(온도: 170°C, 압력: 14MPa, 시간: 30"), ③ 금형을 Fig. 2와 같이 자기력 부여장치에서 자기력 부여(시간: ts_2 -30"), ④ 다시 열 프레스에서 가압(온도: 170°C, 압력: 14MPa, 시간: tc_{90} - ts_2), ⑤ 상하 금형을 열고

시험 이형. 이때 각 조건별 시험편에 대해 자기력 세기를 다르게 하였으며, 자기력 세기는 0.5, 1, 1.5 그리고 2 tesla(T)로 구분하였다.

성형 후 자기력에 의한 각 조건별 이방성을 판단하기 위하여 Fig. 3과 같이 Koshava4[®] 테슬라미터를 이용 투과된 자기력 세기(mT, militesla)를 측정하여 비교하였다. 압축시험은 Shimadzu사의 Autograph(Model AG-5000E)를 사용하였으며, 시험속도는 분당 2mm로 최대 30% 변형까지 변위를 가하였다. 압축시험의 경우도 성형 시 자기력 세기의 구분과 별도로 시험 상하에 영구자석을 이용하여 자기력의 영향을 검토하였다.

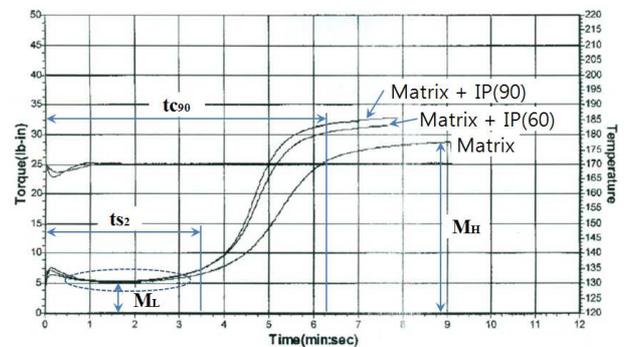


Fig. 1 Rheometer graphs for the matrix and IP reinforced MRRC

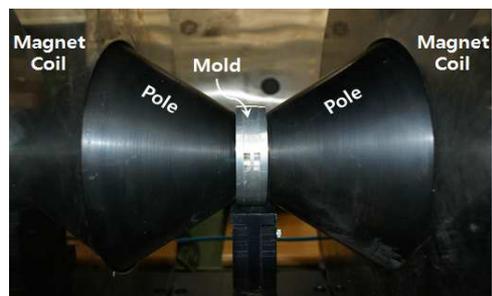


Fig. 2 A photograph of electromagnet device

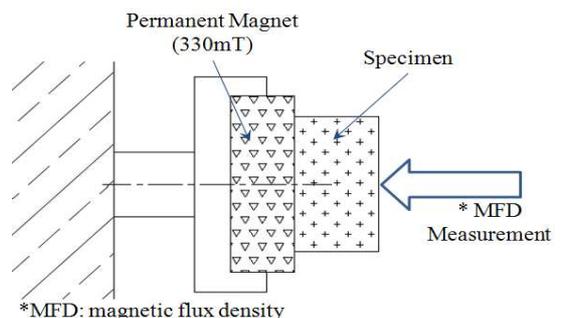


Fig. 3 A schematic of magnetic flux density (MFD) measurement

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동특성

Figs. 4-5는 열성형 전 고무 혼합물의 가류특성 시험 결과를 나타냈다. MRRC의 M_L 은 기지(5.05)에 비해 IP 함유량 증가에 따라 미소한 증가를 보였고, IP를 90phr 함유한 경우도 기지에 비해 6%의 증가를 나타냈다. 또한 기지와 IP(90phr)에 CNT를 첨가한 경우도 각각의 경우에서 미소한 증가를 보였다. 기지의 M_H 는 28.8였고, IP의 함유량 증가에 따라 증가하였으며, IP 90phr에서는 기지에 비해 14% 증가하였다. 기지와 IP(90phr)에 CNT를 첨가한 경우도 각각의 경우에서 3% 증가한 값을 보였다. MRRC의 ts_2 와 tc_{90} 은 기지(3.44, 6.11)에 비해 IP 함유량 증가에 따라 감소하였다. 기지와 IP(90phr)에 CNT를 첨가한 경우들도 감소하였고, 특히 기지에 CNT만 첨가한 경우가 크게

감소하였다. 이는 순수기지에 보강한 경우 CNT의 무게 비가 4.2%가 되지만 IP(90phr)에 CNT를 보강한 경우는 무게 비가 2.4%가 되기 때문으로 보인다. 일반적으로 첨가제 양의 증가에 따라 ts_2 나 tc_{90} 은 감소하며, M_L 이나 M_H 는 증가하는 경향을 보인다. 본 논문에서는 자기력 부여를 위해 M_L 값과 ts_2 전까지의 유지시간 관리가 중요하다. 따라서 Table 1의 배합표와 같이 가류 지연제(retarder)의 한 종류인 PVI를 소량 첨가하였다.

3.2 이방성 평가

본 실험에서는 기계적 특성 평가 전에 Fig. 3과 같이 330 militesla(mT)의 영구자석에서 투과된 자기력 세기(MFD)를 측정하여 MRRC의 이방성을 판단하였다. Fig. 6은 IP 함유량 증가에 따른 자기 투과율(MT, magnetic transmissivity) 변화를 나타냈다. 기지 및 MRRC의 자기 투과율은 다음의 식 (1)로 계산하였다.

$$MT = \frac{MFD_s - MFD_d}{MFD_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서, MFD_s 는 측정된 시편의 투과 자기력 세기를, MFD_d 는 시편의 높이 유지 시 투과 자기력 세기(135 militesla)를 의미한다. IP 함유량의 증가에 따라 자기 투과율은 증가하였으며, 불규칙 배향(RD, random dispersion)에 비해 2 tesla(T)로 배향(AL, alignment)시킨 경우가 1.8~2배 높게 나타났다. 따라서 성형시 부여했던 자기력에 의해 입자의 배향이 형성되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 성형 시 부여한 자기력 세기 증가에 따른 자기 투과율 결과를 나타냈다. CNT만 강화한 MRRCs는 1 tesla이하에서는 자기장의 영향이 없었으며, 2 tesla에서 자기장의 영향이 뚜렷이 확인되었다. 이때의 자기 투과율은 3.7%였다. 강자성의 IP만 90phr 강화한 MRRC는 RD 즉, 0 tesla에서 8.2%, AL(2 tesla)에서는 15.6%의 높은 자기 투과율을 보였다. 한편 IP + CNT의 경우는 IP만 강화한 경우에 비해 1.5% 정도 작은 값을 보였다. 2 tesla의 배향으로 CNT만 강화한 경우 뚜렷한 자기장의 영향을 확인하였지만, IP 90 + CNT 5의 MRRC를 2 tesla로 배향한 결과는 자기력 세기 증가에 따른 기울기와 큰 차이가 없었다. 이는 앞 절에서 고찰한 바와 같이 IP 90에 CNT 5

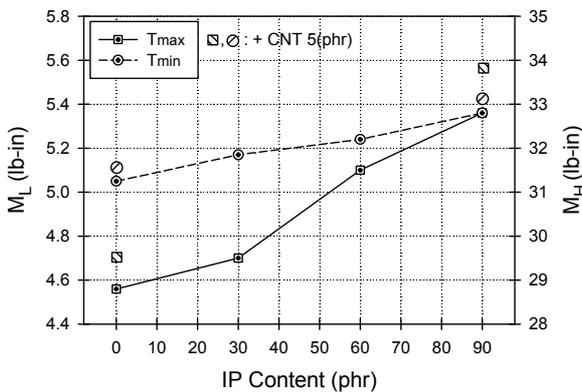


Fig. 4 Effects of IP and CNT content on the torque(M_L , M_H)

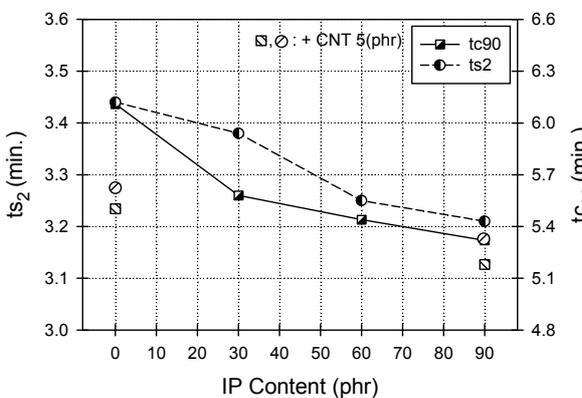


Fig. 5 Effects of IP and CNT content on the ts_2 and tc_{90}

를 첨가하면 상대적으로 IP의 함유량이 감소한다. 따라서 CNT의 배향이 어느 정도 형성될지라도 강자성의 IP 함유량 감소로 CNT 배향의 차이는 미미한 것으로 판단된다. Fig. 8은 IP 90phr 함유된 MRRC의 SEM 사진으로 RD의 경우에 비해 AL(2 tesla)의 경우가 화살표(↖) 방향으로 IP 입자들이 배향되어 있음을 확인할 수 있다.

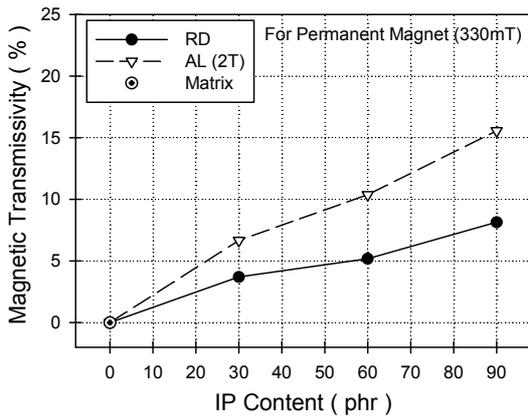


Fig. 6 Effects of IP content and particle alignment on the magnetic transmissivity

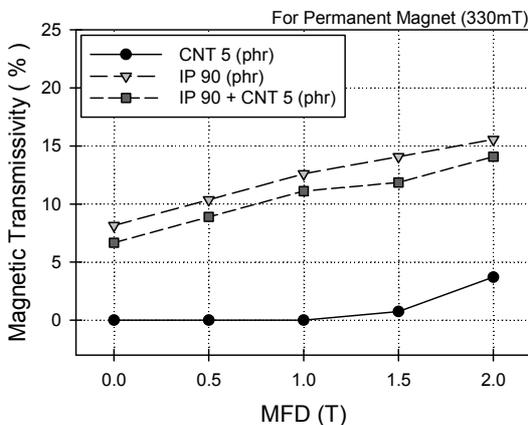


Fig. 7 Effects of MFD and particle content on the magnetic transmissivity

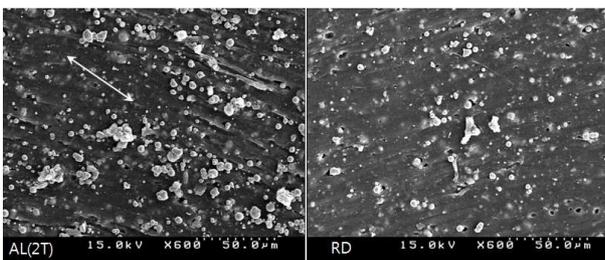


Fig. 8 SEM pictures for the IP(90phr) filled MRRC

3.3 압축 특성

Fig. 9는 지지 및 RD와 AL(2 tesla) 배향 MRRC의 압축응력-변형률 관계를 나타냈다. 기지에 비해 변형률 증가에 따라 MRRC의 응력은 크게 증가하였고, RD의 경우에 비해 AL의 경우가 크게 증가함을 알 수 있다. 특히 초기 변형률 영역에서 AL의 경우가 큰 응력 값을 보였는데, 이는 입자들이 배향되었을 때, 외부 하중에 대한 저항력이 크기 때문으로 판단된다. Fig. 10은 각 변형률에서 기지에 비해 MRRCs의 응력 증가율을 나타냈다. 전체적으로 AL의 경우가 RD에 비해 높은 값을 보였고, 특히 변형률이 0.1이하에서 큰 차이를 보였다. 변형률 증가에 따라 RD의 경우 응력의 감소기울기는 순서대로 -1.18, -0.47 그리고 -0.20였고, AL의 경우는 -3.81, -1.32 그리고 -1.27였다. 기울기가 크다는 의미는 초기 변형률에서 저항이 큰 것으로 보강재의 배향성을 판단할 수 있다. CNT만 강화한 MRRC의 기울기 비(AL/RD)는 2.8이었고 IP만 강화한 경우 기울기 비는 6.4로, 강자성의 IP가 CNT에 비해 배향이 양호함을 알 수 있다.

Fig. 11은 IP 및 CNT 함유량 증가에 따른 MRRCs의 압축응력 결과를 나타냈다. 압축응력은 변형률 0.3일 때의 응력 값을 의미한다. Fig. 11의 (a)는 압축시험 시 시편 상하에 영구자석(0.49 tesla)을 넣고 시험한 경우 이고, (b)는 영구자석 없이 시험한 경우로 시편의 성형 시 뿐만 아니라 압축시험 시 자기장의 영향을 비교하였다. 지지의 압축 응력은 1.21MPa이고 IP의 함유량 증가에 따라 MRRCs의 압축응력은 증가하였다. IP 함유량이 90phr인 MRRC의 압축응력은 자기배향(2

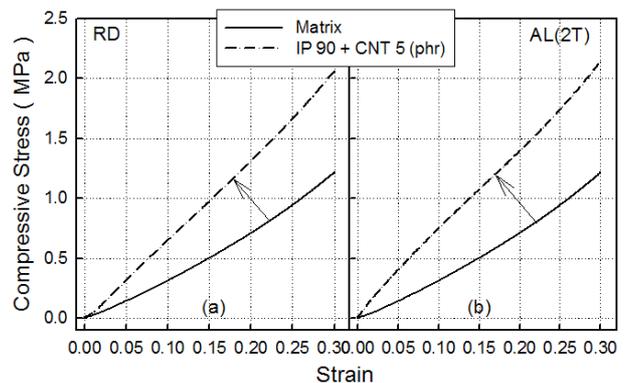


Fig. 9 Compressive stress-strain curves of the matrix and (a) randomly dispersed, (b) aligned MRRC(IP 90 + CNT 5)

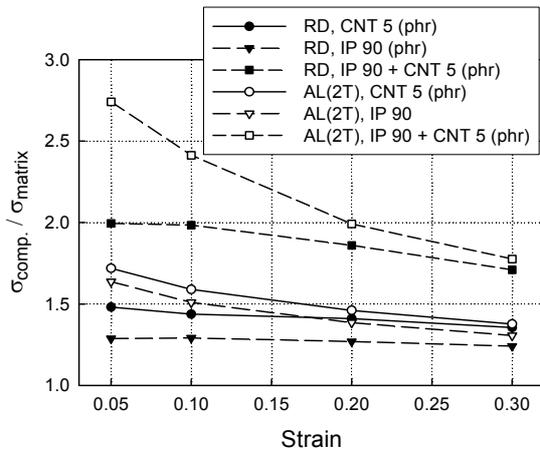


Fig. 10 Effects of particles and alignment on the $\sigma_{comp.}/\sigma_{matrix}$ at each strain

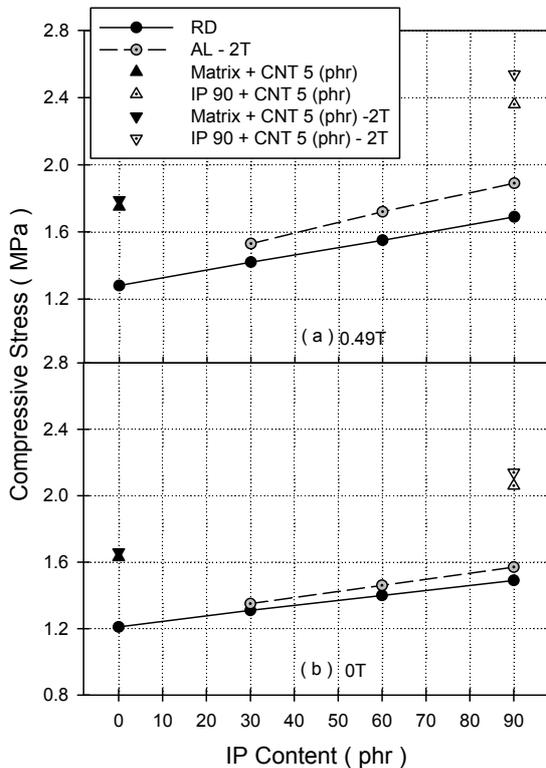


Fig. 11 Effects of IP & CNT content and particle alignment on the compressive stress

tesla)으로 5.4% 증가하였으며, 압축시험 시 0.49 tesla의 자기장 영향으로 13.4%까지 증가하였다. 또한 자기 배향(2 tesla)과 시험 시 0.49 tesla의 자기장 영향으로 기지에 비해 1.6배 증가하게 된다. CNT 5phr만 강화한 MRRC의 압축응력은 기지에 비해 40% 증가하여 IP에 비해 작은 양으로도 큰 영향이 있음을 알 수 있다. 이는 CNT의 직경(10 ~ 15nm)이 매우 작고, 튜브형태로 IP에 비해 작

은 양이지만 표면적과 종횡비가 크기 때문으로 보인다. CNT 5phr 강화 MRRC의 압축응력은 2T 배향으로 2.0% 증가하였고, 영구자석의 영향으로 2.9%까지 증가하였다. 한편, IP 90 + CNT 5의 경우 자기 배향(2 tesla)한 MRRC의 압축응력은 시험 시 0.49 tesla의 자기장 영향으로 기지에 비해 2.1배 증가하게 된다. 두 가지 입자가 동시에 강화된 MRRC의 압축응력은 피타고라스의 정리에 의해 각각 강화한 경우의 압축응력을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{comp.} = k \sqrt{\sigma_{CNT}^2 + \sigma_{IP}^2} \quad (2)$$

Fig. 11의 (a)에서 k 는 RD의 경우는 0.971, AL의 경우 0.93, (b)에서 각각 0.932와 0.939를 보였다. 실험적 오차를 감안하면 k 값은 1에 근접한다고 할 수 있다.

시험편 제조 시 부여했던 자기력에 의한 배향 분만 아니라 압축시험 시 부여한 자기력 세기가 MRRCs의 압축응력에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. 이를 MR 효과(magneto-rheological effect)^(1,8)라 부르며, 이러한 재질의 독특한 특성 때문에 MRRC에 대한 관심 증가되고 있다. MR 효과란 자기력 세기에 의한 응력의 증가를 의미하며, 다음과 같은 식 (3)으로 계산하였다.⁽¹⁾

$$MR \text{ Effect}(\%) = \frac{\sigma_{at 490mT} - \sigma_{at 0mT}}{\sigma_{at 0mT}} \times 100 \quad (3)$$

Fig. 12에는 IP 함유량 및 배향을 함수로 한 MR 효과에 대한 결과를 보여준다. 자기장의 영향이 없었던 경우에도 5.8% 정도의 MR 효과가 나타나는데, 이는 압축시험 시 시험편 상하에 설치한 영구자석의 영향을 의미한다. IP 함유량 증가에 따라 MR 효과는 비례적으로 증가하였으며, IP 90phr AL(2 tesla)의 경우 20.4%의 MR 효과를 보였다. 또한 RD의 경우에 비해 AL(2 tesla)의 경우가 1.6배 정도 높은 MR 효과를 나타냈다. Fig. 13에서 2 tesla의 자기력 세기에서 제조된 CNT 강화 MRRC는 7.8%, IP 90 + CNT 5의 경우는 18.7%의 MR 효과를 보였다. 이러한 MR 효과는 Figs. 6-7의 자기 투과율과 유사한 증가 기울기를 보였고, 시험편 제조시의 자기력 배향뿐만 아니라 압축시험 시의 자기력 부여도 중요한 인자임을 확인하였다.

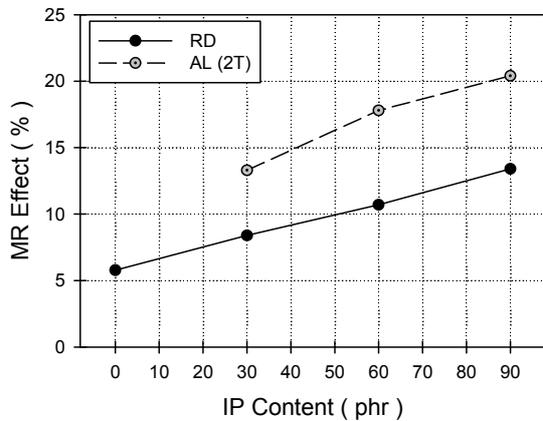


Fig. 12 Effects of IP content and particle alignment on the MR effect

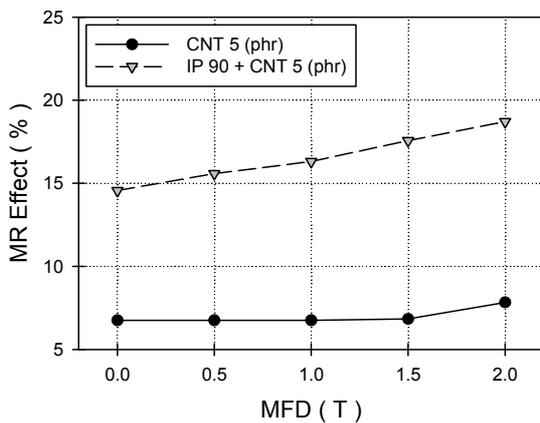


Fig. 13 Effects of MFD and particle content on the MR effect

4. 결 론

자기화 분말 강화 자기유동 고무 복합재료 (MRRC)의 유동 및 압축특성에 대한 연구에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고무 혼합물의 가류특성 및 전자석 장치를 이용하여 범용고무를 기지로 하는 이방성 MRRC의 제조가 가능하였다.

(2) 산화철 입자(IP) 함유량의 증가에 따라 MRRC의 자기 투과율은 증가하였으며, 불규칙 배향(RD)에 비해 2 tesla로 배향(AL)시킨 경우가 1.8~2배 높게 나타났다. CNT만 강화한 MRRC는 2 tesla에서 자기 투과율은 3.7%로 자기장의 영향이 뚜렷이 확인되었다.

(3) IP 90 + CNT 5 & 2 tesla 배향의 MRRC는 압축시험 시 0.49 tesla의 자기장 하에서 압축응력

이 기지에 비해 2.1배 증가하였다.

(4) IP 함유량 증가에 따라 MR 효과는 증가하였으며 IP 90phr AL(2 tesla)의 경우 20.4%의 MR 효과를 보였고, RD의 경우에 비해 AL(2 tesla)의 경우가 1.6배 정도 높은 MR 효과를 나타냈다.

(5) 시험편 제조 시 부여했던 자기력 배향과 압축시험 시 부여한 자기력 세기가 MRRC의 압축 특성에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다. 이러한 특성을 응용하면 액추에이터나 센서, 능동적 진동제어 시스템 등의 부품 소재에 자기유동 고무 복합재료의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2012년도 한국과학재단 일반연구비 (2012-00755)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Koo, J. H., Khan, F., Jang, D. D. and Jung, H. J., 2009, "Dynamic Characterization and Modeling of Magneto-rheological Elastomers under Compressive Loadings," *J. of Physics: Conference Series*, Vol. 149, 012093.
- (2) Bellan, C. and Bossis, G., 2002, "Field Dependence of Viscoelastic Properties of MR Elastomers," *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 16, pp. 2447~2453.
- (3) Zhang, W., Gong, X. L. and Chen, L., 2010, "A Gaussian Distribution Mode 1 of Anisotropic Magnetorheological Elastomers," *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 23, pp. 3797~3801.
- (4) Farshad, M. and Benine, A., 2004, "Magnetoactive Elastomer Composites," *Polymer Testing*, Vol. 23, pp. 347~353.
- (5) Stepanov, G. V., Abramchuk, S. S., Grishin, D. A., Nikitin, L. V., Kramarenko, E. Y. and Khokhlov, A. R., 2007, "Effect of a Homogeneous Magnetic Field on the Viscoelastic Behavior of Magnetic Elastomers," *Polymer*, Vol. 48, pp. 488~495.
- (6) Zhou, G. Y., 2004, "Complex Shear Modulus of a Magnetorheological Elastomer," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 13, pp. 1203~1210.
- (7) Ginder, J. M., Nichols, M. E., Elie, L. D. and

- Clark, S. M., 2000, "Controllable-stiffness Components Based on Magnetorheological Elastomers" *Smart Structures and Materials*, 2000: Smart Structures and Integrated Systems, Proc. SPIE 3985, p. 418~425.
- (8) Ryu, S. R., Lee, D. J. and Lee, J. H., 2010, "Effect of Magnetic Force on the Compressive and Dynamic Properties of Magnetorheological Elastomers," *J. of the Korean Society of Composite Materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 17~22.
- (9) Kwak, M. K., Jung, M. S., Bae, B. C., Heo, S. and Song, M. H., 2007, "Experimental Study on the Damping and Stiffness Characteristics of MR Elastomers," *Proceedings of The KSNVE Spring Annual Meeting*, No. KSNVE07S-33-06.
- (10) Yoon, J. H., Jeong, J. E., Yang, I. H., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2009, "Measurement of Shear Modulus Increment Ratio of Magneto-rheological Elastomer Based on Silicon Matrix due to Induced Current," *Proceedings of The KSME Fall Annual Meeting*, pp. 988~991.
- (11) Yoon, J. H., Jeong, J. E., Yang, I. H., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2009, "Experimental evaluation on Shear Modulus of Anisotropic Magneto-rheological Elastomer due to Induced Current," *Proceedings of The KSPE Fall Annual Meeting*, pp. 119~120.
- (12) Chung, K. H. and Yoon, K. S., 2010, "Basic Study for Development of Magneto-rheological Elastomer," *Elastomers and Composites*, Vol. 45, No. 2, pp. 106~111.
- (13) Chen, L., Gong, X. L. and Li, W. H., 2008, "Effect of Carbon Black on the Mechanical Performances of Magnetorheological Elastomers," *Polymer Testing*, Vol. 27, pp. 340~345.