

다구찌법을 이용한 저탄성 MRE 제조공정 연구

신대용*, 자크리아 타리크*, 라문우*^{#,} 박성제*^{#,}

^{*}한국기술교육대학교 기계공학과

A Low-elastic MRE Fabrication Process based on the Taguchi Method

Dae-Yong Shin^{*}, Zakria Tariq^{*}, Moon-Woo La^{*^{#,}}, Sung-Jea Park^{*^{#,}}

^{*}School of Mechanical Engineering, KOREATECH.

(Received 25 October 2019; received in revised form 2 December 2019; accepted 16 December 2019)

ABSTRACT

In this study, a PDMS-based low-elasticity magnetorheological elastomer (MRE) was fabricated and the Taguchi method was used to identify the factors affecting the elastic modulus. The mixing entropy was calculated using optical microscopy to confirm particle dispersion, which was referenced in the process establishment. In the MRE process, four parameters, namely the curing agent, particle type, particle fraction, and applied magnetic field, were divided into three levels. The elastic modulus of the specimen was compared at the off-state and at 0.2 T using compression tests, and the obtained signal to noise ratio indicated that the softness and change in the elastic modulus of the MRE was mainly affected by the curing agent and the particle fraction.

Key Words : Magnetorheological Elastomer(자기유변탄성체), Taguchi Method(다구찌법), Particle Dispersion (입자 분산)

1. 서 론

자기유변탄성체 (Magneto-rheological Elastomer, 이하 MRE)는 탄성을 갖는 고분자 매트릭스와 자성 미세입자의 혼합물로써, 외부에서 인가되는 자기장에 따라 매트릭스 내 미세입자의 배열이 변화되어 기계적, 유동학적 특성이 제어되는 성질을 갖고 있다^{1,2)}. 자기장이 없는 상태에서는 고분자 매트릭스

의 탄성에 따른 유연성을 보이지만, 외부 자기장이 인가된 상태에서는 자성 미세입자의 반응을 통해 대체로 강성이 증가하는 특성을 보인다. 이러한 유연성 및 강성은 고분자 매트릭스 및 자성 미세입자의 종류, 미세입자의 농도 및 분포, 인가된 자기장의 세기 및 방향에 따라서 다양하게 조절될 수 있다.

MRE는 위와 같은 특성을 기초하여, 댐퍼, 자동화 장치, 자기 저항 센서, 햅틱 장비 등과 같은 분야에 널리 적용되고 있다³⁻⁷⁾. 다만 기존에 일반적으로 사용된 MRE는 대체로 자기장이 작용하지 않았을 시의 (Off-state) 탄성률이 높은 고분자

These authors contributed equally to this work

Corresponding Author : psj7517@koreatech.ac.kr

Tel: +82-41-560-1121, Fax: +82-41-560-1253

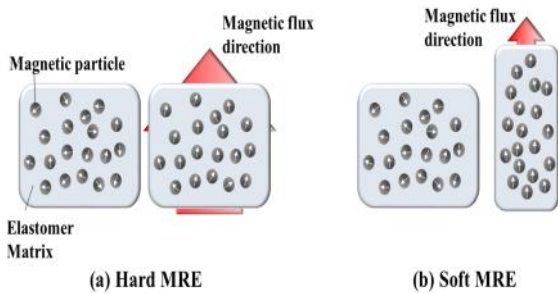


Fig. 1 MRE changes applied by magnetic fields

(>400 kPa)를 매트릭스로 이용하여 제조되었기 때문에, Fig. 1과 도시한 바와 같이 MRE의 유연성 및 강성이 제한적이다^[8,9]. 자기장에 따른 MRE의 특성 변화 범위를 확장하기 위해서는 비교적 Off-state 탄성률이 낮은 고분자를 매트릭스로 이용해야 한다. 다만, 지나치게 탄성률이 낮은 고분자 혹은 점성유체를 이용하게 되면 매트릭스 혹은 미세입자의 유출이나 혼합 불균형 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 주의가 필요하다^[9].

본 연구에서는 MRE 제작을 위해 열경화성 실리콘의 일종인 PDMS (Polydimethylsiloxane)를 이용하였다. PDMS는 경화에 요구되는 시간 및 온도가 낮아 제작이 용이하고, 경화제 (curing agent)의 농도에 따라 탄성률을 제어할 수 있는 장점이 있다^[10]. 베이스에 대한 경화제의 질량 분율을 10%에서 4%까지 변화를 주어 정상적인 경화가능 여부와 경화된 PDMS의 탄성률 변화를 확인하였다. 그리고 높은 투자율을 지녀 MR 물질에 많이 사용되는 카르보닐 철 (Carbonyl iron powder, 이하 CIP)을 자성 미세입자로 사용하였다. PDMS와 CIP의 고른 혼합을 위해서 초음파 공정을 도입하였고, 분산성과 분배성을 확인하기 위해 공정 조건에 따라 정규화된 혼합 엔트로피 (Normalized mixing entropy)를 확인하였다. 제작된 저탄성 MRE의 탄성률을 확인하기 위해 압축시험을 수행 후 자기장이 가해지지 않은 상태 (이하 Off-state)의 탄성률의 정의를 위하여 응력-변형률 선도의 선형 범위 탄성률인 영의 계수 (Young's modulus)를 이용하였다. MRE의 특성은 압축, 인장, 전단 조건에서의 자기장이 가해지지 않은 Off-state 모듈러스와 자기장이 가해진 후의 모듈러스의 비로

나타낼 수 있으며, 변화한 모듈러스의 비가 클수록 기계적 특성의 변화 가능범위가 넓어져 우수한 MRE로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 MRE에 0.2 T의 자기장 작용 후 압축시험을 수행하여 Off-state 탄성률과 자기장 작용 후 탄성률의 변화량을 비교하였다. 또한, 사전실험을 통해 실험인자로 선정된 PDMS 경화제 분율, CIP 종류, CIP 분율, 경화중 인가된 자속밀도가 MRE 탄성률에 미치는 영향을 확인하기 위해 다구찌 기법 (Taguchi method)으로 실험을 계획 하고 분석을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 MRE 제조공정

MRE 제조를 위해 Sylgard 184 (Dow Corning)의 프리폴리머 베이스 (Pre-polymer base)와 가교경화제 (crosslinking curing agent)를 이용하여 고분자 매트릭스를 구성하였다. 자성 미세입자로써 성분 및 입자 크기가 각기 다른 세 가지 종류의 CIP (BASF CIP CC/CM/OM)를 준비하여 입자의 종류에 따른 MRE 탄성률을 확인하고자 하였다. CIP의 성분과 입자크기는 Table 1과 같다. PDMS 베이스와 경화제, CIP를 스티러를 이용하여 10분 동안 혼합 후 초음파 유화기 (KSS-650DT, 한국코프로텍)에서 초음파 공정을 진행하였다. 혼합 이후 1시간의 진공처리를 통해 탈기 (degassing)하였다. 직경 29 mm, 두께 13 mm의 원기둥 형상으로 제작하기 위해 사전에 제작된 몰드에 주입 혼합물을 주입하고 오븐에서 65°C의 온도로 3시간 동안 경화함으로써 샘플을 완성하였다. 경화 과정에서 자기장이 가해지지 않은 상태인 등방성 (Isotropic) MRE를 제작하였고,

Table 1 CIP product range

CIP	type	Fe min (%)	C max (%)	N max (%)	O max (%)	d50 value (μm)
CC	soft	99.5	0.03	0.01	0.1-0.3	3.8-5.3
OM	hard	97.8	0.7-0.9	0.6-0.9	0.1-0.04	3.9-5.2
CM	soft	99.5	0.03	0.01	0.1-0.3	7.0-9.5

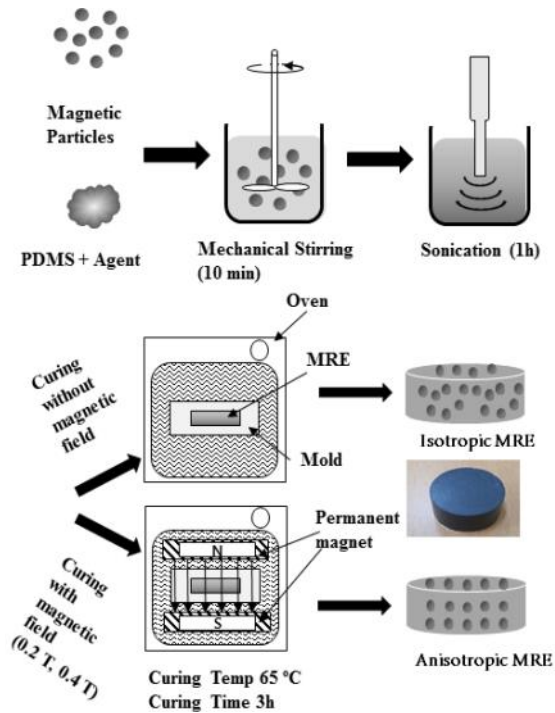


Fig. 2 Schematic of MRE experimental process

몰드 상하부에 0.2 T와 0.4 T의 자속밀도를 갖는 영구자석을 부착하여 자성 입자가 사전구조를 갖도록 하는 이방성 (Anisotropic) MRE를 제작하였다. 본 제작 과정의 모식도 및 샘플의 형상은 Fig. 2와 같다.

2.2 분산성 확보

실험결과와 일관성 및 신뢰성을 위하여, 고분자 매트릭스와 자성 미세입자를 혼합하는 과정에서 매트릭스 내 미세입자의 분포 정도를 정량적으로 판단할 필요가 있다. 본 연구에서는 고분자 매트릭스 내의 자성 미세입자 혼합 및 분산을 평가하기 위하여, 초음파 공정 시간에 따라 광학현미경으로 획득한 이미지를 분석하여 혼합의 정량적 판단을 수행하였다.

일반적으로 베이스와 입자의 혼합은 입자 응집과 관련 있는 분산혼합 (Dispersive mixing)과 전체적인 분포와 관련 있는 분배혼합 (Distributive mixing)으로 분류될 수 있다^[11]. 이 중 분배혼합의

정량적인 평가를 위하여, 정규화된 혼합 엔트로피를 혼합특성의 지표로 이용할 수 있다^[12]. 혼합 엔트로피와 정규 혼합 엔트로피는 다음 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$S = - \sum_{c=1}^C P_C \sum_{m=1}^M P_{m,c} \ln P_{m,c} \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{S - S_0}{S_{max} - S_0} \quad (2)$$

식 (1)에서 c 는 분할된 이미지의 셀을 의미하며, C 는 분할된 셀의 총 개수, P_c 는 가중계수, m 은 혼합물에 포함된 재료 종류, M 은 포함된 재료의 총 개수, $P_{m,c}$ 는 c 번째 셀에 m 의 재료가 존재할 확률을 의미한다. 식(2)에서 S_0 는 이론적으로 혼합이 전혀 이루어지지 않았을 경우의 혼합 엔트로피, S_{max} 는 이론상 완전한 혼합이 이루어진 경우의 혼합 엔트로피를 의미한다.

분산혼합에 적합한 공정시간을 수립하기 위해 초음파 공정시간(10분, 20분, 60분, 120분, 180분, 300분)에 따른 관찰 시편을 제작하였다. Fig. 3은 분산 평가를 위한 시편의 모식도로 초음파 공정이 완료된 후 경화되지 않은 상태의 MRE를 슬라이드 글라스 위에 100 μm 두께로 도포하여 제작하였다. 광학 현미경은 초점거리 별로 이미지의 차이가 발생하기 때문에, 시편두께 방향으로 여러 이미지를 획득한 후 오버레이하여 최종적인 이미지를 획득하였다. 획득한 이미지는 ImageJ (Wayne Rasband, US) 프로그램을 이용하여 Gray scale 및 Binary image로 변환하여 100개의 cell로 나누어 각 cell 내에 PDMS와 CIP가 존재할 확률을 계산하였고, 식 (1)과 (2)를 이용하여 Mixing entropy와 Normalized mixing entropy를 계산하여 분산의 정

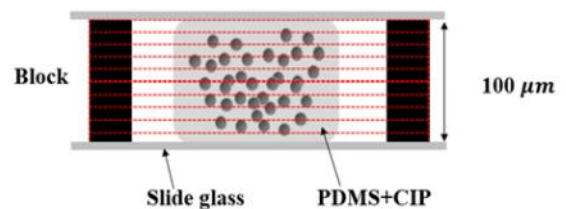


Fig. 3 Pre-polymer specimen for microscopy

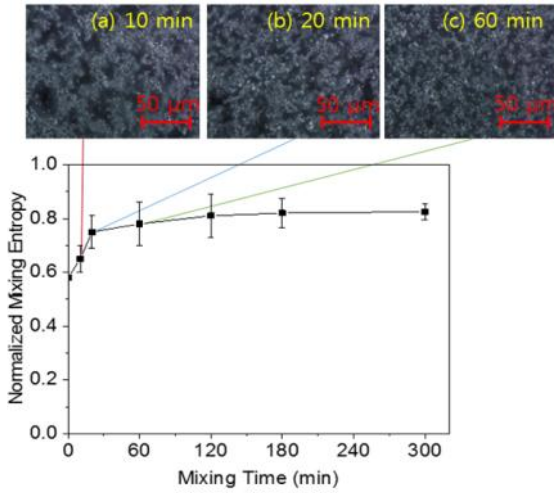


Fig. 4 Normalized mixing entropy and micrography with sonication time

량화를 수행하였다.

초음파 공정의 시간별(10분, 20분, 60분, 120분, 180분, 300분)에 따른 정규 혼합 엔트로피는 Fig. 4와 같으며, 60분에서 혼합의 최적화가 이루어졌다고 판단하여 초음파 공정 조건으로 설정하였다.

2.3 실험계획법

저탄성 MRE의 제작 및 평가는 다구찌 기법을 이용하여 진행하였다. 다구찌 기법은 실험결과에 변동을 초래하는 여러 요인들 중 변동에 둔감한 공정조건을 찾음으로써 실험결과와 변동을 감소시키는 방법이다. 다구찌 기법의 요인은 제어요인(Control parameter)과 잡음요인(Noise parameter)으로 나눌 수 있으며, 이 중 실험자가 제어할 수 없는 잡음요인의 영향을 최소화시키는 것을 목적으로 한다. 다구찌 기법에서 각 실험의 특성치는 신호입력과 잡음이 실험결과에 어느 정도의 영향을 주는가를 나타내는 비인 S/N비(Signal to noise ratio)로 나타낸다.

다구찌 기법에서, ‘신호(siganl)’의 의미는 시스템 출력에 바람직한 값을 나타내며, ‘소음(noise)’의 의미는 출력에 바람직하지 않은 값을 나타낸다 [13]. S/N비는 특성치가 높을수록 좋은 망대특성(Larger-the-better,LTB), 특성치가 낮을수록 좋은 망

소특성(Smaller-the-better,STB), 특성치가 정해진 목표치에 가까울수록 바람직하다고 평가하는 망목특성(Nominal-the-best,NTB)으로 나누어 계산될 수 있는데, 본 연구의 목적은 낮은 Off-state 탄성률을 지닌 MRE를 제작하고, 자기장의 작용 시 높은 탄성률의 변화를 위한 공정 조건을 찾는 것이므로 망소특성(Off-state 탄성률) 및 망대특성(탄성률의 높은 변화)의 S/N비를 사용하였다. 각 S/N비의 계산은 다음 식을 통해 수행하였다.

$$S/N(STB) = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n Y_i^2\right] \text{ [dB]} \quad (3)$$

$$S/N(LTB) = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right] \text{ [dB]} \quad (4)$$

Table 2 Levels of the parameters and L9(3⁴) orthogonal array

Parameters	Level			Unit
	1	2	3	
Curing agent mass fraction	4	5	6	wt%
CIP type	BASF CIP CC	BASF CIP CM	BASF CIP OM	
CIP mass fraction	60	70	80	wt%
Magnetic flux density	0	0.2	0.4	T

Table 3 L9(3⁴) orthogonal array

Exp. #	Curing agent mass fraction	CIP type	CIP mass fraction	Magnetic flux density
1	1(4%)	1(CC)	1(60%)	1(0 T)
2	1(4%)	2(CM)	2(70%)	2(0.2 T)
3	1(4%)	3(OM)	3(80%)	3(0.4 T)
4	2(5%)	1(CC)	2(70%)	3(0.4 T)
5	2(5%)	2(CM)	3(80%)	1(0 T)
6	2(5%)	3(OM)	1(60%)	2(0.2 T)
7	3(6%)	1(CC)	3(80%)	2(0.2 T)
8	3(6%)	2(CM)	1(60%)	3(0.4 T)
9	3(6%)	3(OM)	2(70%)	1(0 T)

MRE 탄성률에 영향을 끼치는 인자로 엘라스토머 경화제 분율, CIP 종류, CIP 분율, 경화과정에서 MRE에 작용한 자속밀도 총 4가지로 판단하여 각 인자별 3단계 수준을 설정하였고 각 인자수준 및 직교배열표(Orthogonal array)는 Table 2,3과 같다.

2.4 압축시험 방법

실험계획법에 따라 9개의 실험조건으로 제작한 MRE 샘플의 탄성률을 측정하였다. 압축장비로 Fig. 5와 같이 압축 시험기에 MRE에 자기장을 가하기 위한 전자석을 장착 후 가우스미터를 이용하여 전자석에서 발생하는 자속 밀도를 측정 후 시험을 진행하였다. 자기장이 작용하지 않은 Off-state와 0.2 T의 자기장을 작용한 후의 응력-변형률 선도를 측정 및 비교하였다. 압축시험에 사용된 장비는 한국 에이엔디(AND) MCT-1150이며, 압축속도는 30 mm/min로 설정하였다.

압축시험 결과로 획득한 응력-변형률 선도에서 자기장이 가해지지 않은 상태에서 탄성률의 측정을 위하여 영의 계수를 이용하였다. Off-state 탄성률과 자기장이 작용 후 탄성률의 측정을 위하여 후크의 법칙을 따라 응력-변형률 선도 선형 범위 내 응력 변화와 변형률 변화의 비인 탄성률의 일반적인 정의를 이용하였다. 또한, 자기장 작용 후의 탄성률(E_f)과 Off-state 탄성률(E_0)의 차이(ΔE)를 Off-state 탄성률로 나누어 자기장 작용 후의 탄성률 변화율을 계산하였다.

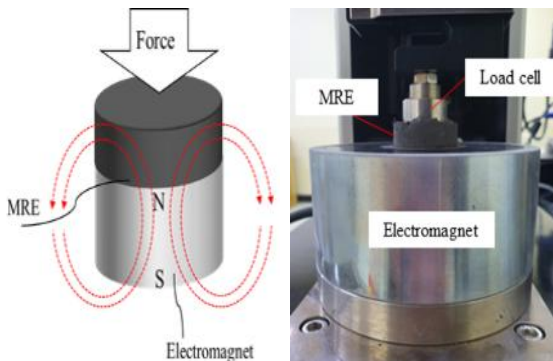


Fig. 5 Apparatus for compression test

3. 실험결과 및 결론

3.1 압축시험 결과

다구찌법 직교배열표의 다양한 실험조건에 따라 제작한 9개의 MRE의 압축시험 결과는 Fig. 6와 같으며 응력-변형률 선도로 나타내었다. 압축시험을 통해 외부 자기장이 작용 시 자성입자의 반응으로 MRE의 강성이 높아지는 것을 확인하였다. Off-state 에서의 탄성률과 0.2 T의 자기장 작용 시의 탄성률을 영의 계수를 이용하여 계산하였고 Table 4에 나타내었다.

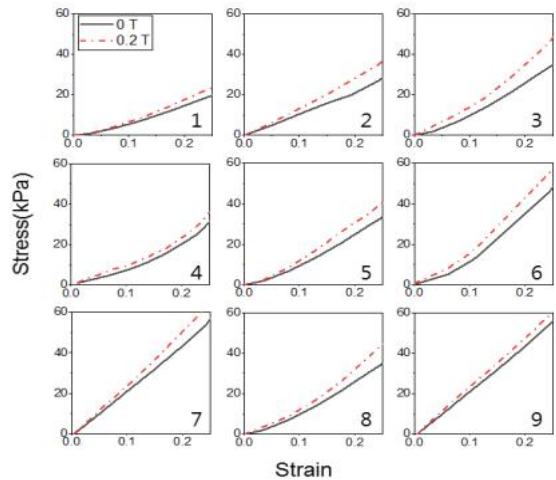


Fig. 6 Stress-strain curves of Taguchi MRE samples

Table 4 Elastic modulus and changes in modulus with Taguchi MRE samples

Sample. #	0T (Off-state)	0.2 T	ΔE (kPa)
	E_0 (kPa)	E_f (kPa)	
1	106	120	15
2	132	179	47
3	164	221	57
4	163	187	24
5	169	203	34
6	202	232	30
7	246	310	64
8	191	293	48
9	258	281	23

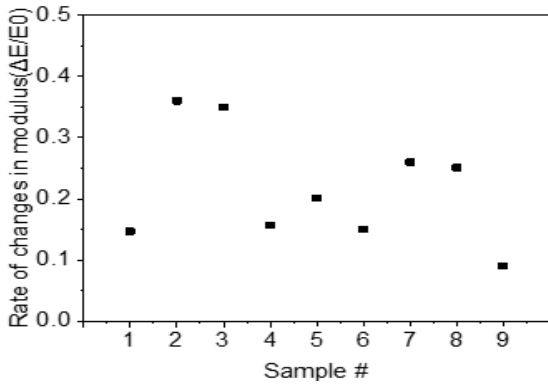


Fig. 7 Rate of changes in modulus of Taguchi MRE samples

자기장이 가해지지 않은 상태인 off-state 탄성률 (E_0)의 경우 9개의 샘플이 모두 100 ~ 250 kPa내의 범위 내로 제작되었다. 0.2 T의 자기장 작용 후, 탄성률을 측정하여 E_r 로 나타내었다. 또한 샘플별 off-state 탄성률 대비 자기장 작용 시 탄성률 변화율을 확인하기 위하여 탄성률 변화량을 off-state 탄성률로 나누어 Fig. 7에 나타내었다. 압축실험을 통해 9개의 실험조건 내에서 탄성률의 변화율이 최대 36% 일어남을 확인하였으며, 낮은 Off-state를 지닌 동시에 높은 탄성률 변화를 구현할 수 있는 MRE 제작을 위한 실험조건의 최적화를 위해 S/N비를 이용하였다. 압축시험의 데이터인 off-state 탄성률을 S/N비 망소특성에, 탄성률 변화율을 S/N비 망대특성에 적용하여 최적조건을 확인하였다.

3.2 다구찌법을 통한 결과분석

실험계획법을 바탕으로 각 실험인자가 본 연구의 특성치로 설정한 탄성률에 끼치는 영향을 확인하기 위해 Minitab software (Minitab, Inc., US)를 이용하여 S/N비를 계산하였다. 낮을수록 좋은 Off-state 탄성률을 망소특성의 S/N비를 계산하기 위한 실험결과로, 높을수록 좋은 탄성률 변화율을 망대특성으로 결정하여 S/N비를 계산하기 위해 식(4)와 (5)의 Y_i 에 각각 대입하였다. S/N비에서 그래프의 기울기는 실험인자의 수준이 특성치에 영향을 주는 정도를 나타내는 것으로 해석할 수 있다. S/N비의 절대값이 높을수록, 그 수준의 인자는 연구의 목표로

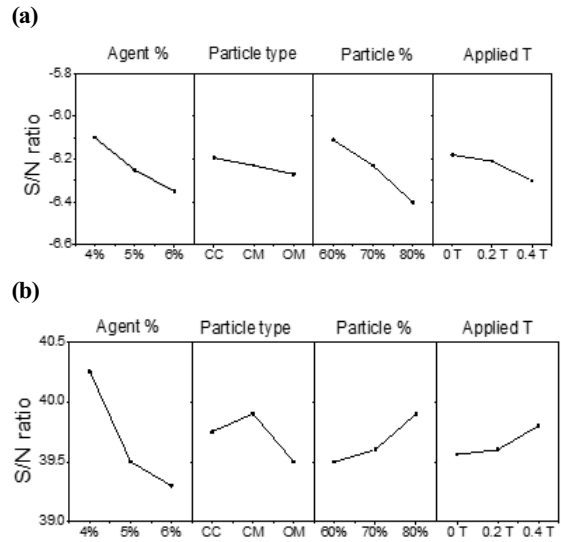


Fig. 8 Response diagram in the Taguchi experiments
(a) Smaller-the-better(off-state modulus)
(b) Larger-the-better(changes in Elastic modulus)

하는 특성치에 많은 영향을 끼친다. 계산된 S/N비의 그래프는 Fig. 8와 같다.

Fig. 8 (a)는 낮은 off-state 탄성률을 지닌 MRE 제작을 위한 실험인자들의 S/N비를 나타낸다. S/N비 분석 결과, 본 연구 공정에서 선정한 4개의 실험인자 중 off-state 탄성률에 지배적인 인자는 PDMS 경화제 비율과 MRE 내 자성입자의 비율로 확인되었으며 영향도 순서는 자성입자 비율 > 경화제 비율 > 경화 시 작용한 자속밀도 > 자성입자 종류의 순서이다. PDMS 경화제 비율은 PDMS 탄성체 내 가교밀도 (cross-linking density)를 결정하는데, 경화제 비율이 감소할수록 탄성체 내 가교밀도 감소로 고분자 사슬의 결합이 느슨해져 강성이 감소하는 것으로 판단된다. 자성입자 비율의 경우, 금속 성분인 카르보닐 철 자성 입자의 밀도는 탄성체의 밀도보다 높으므로 자성입자의 비율과 MRE의 off-state 탄성률은 비례하는 경향이 있다. 또한 경화 시 외부 자기장이 작용한 이방성 MRE의 경우 자속 밀도가 높아질수록 매트릭스 내에 사전 배열된 입자 구조로 off-state 탄성률이 높아질 것으로 예상할 수 있다. S/N비 분석을 통해 확인한 본 연구 공정의 가장 낮은 탄성률 구현을 위한 최적조건은 4%

의 경화제 비율, CC의 자성입자, 60%의 자성입자 비율로 등방성 MRE를 제작하는 것이며, 직교배열 표 1번 샘플과 동일하다. 1번 샘플의 탄성률 측정값을 참고하여 본 연구공정에서 제작 가능한 MRE의 off-state 탄성률의 최소값은 106 kPa이다.

Fig. 8 (b)는 자기장 작용 시 off-state 탄성률 대비 높은 탄성률의 변화를 구현할 수 있는 MRE 제작을 위한 실험인자의 S/N비를 나타낸다. 4개의 실험인자 중 높은 탄성률 변화율에 지배적인 인자는 PDMS 경화제 비율이다. 영향도 순서는 경화제 비율 > 자성입자 비율 > 자성입자 종류 > 경화 시 작용한 자속밀도 순이다. 경화제 비율이 낮을수록 제작된 MRE가 낮은 off-state 탄성률을 지니며 높은 탄성률 변화범위를 구현할 수 있는 것으로 확인되었다. 가교밀도의 감소는 자기장 작용 시 탄성체 내부구조의 유연성을 높여 자성입자의 정렬을 증가시킬 수 있는 것으로 판단된다. Fig.8 (a)에서 확인한 바와 같이 자성입자 비율과 자속밀도의 증가는 off-state 탄성률을 증가시키는데, 탄성률의 변화율 또한 높일 수 있다. 자성입자의 비율이 높을수록 자기장에 반응하는 자성입자의 수가 증가하게 되고 결과적으로 자기장 작용 후 높은 강성의 변화를 구현할 수 있을 것으로 확인되었다. 경화 과정에서 자기장 작용(0.2 T, 0.4 T)으로 사전 구조화된 이방성 MRE는 자기장 방향으로 미리 정렬된 구조를 갖고 있기 때문에, 경화 후에 자기장이 작용 시에도 자기장 방향으로 비교적 강한 구조를 이루어 강성이 증가하는 결과를 보인다. 본 연구 공정에서 가장 높은 탄성률 변화구현을 위한 실험조건은 4%의 경화제 비율, CM의 자성입자, 80%의 자성입자 비율, 경화 중 0.4 T의 자속밀도를 가한 이방성 MRE를 제작하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서 다구찌 기법을 이용한 실험계획법을 이용하여 4개의 각 실험 인자의 수준별로 PDMS 매트릭스 기반의 저탄성 MRE 제작 및 자기장 작용 후 탄성률의 큰 변화를 기대할 수 있는 조건을 확인하였다. MRE 제작 전 사전실험을 통하여 4개의 실험인자 결정 후 분산의 정량화를 위하여 혼합 엔

트로피를 이용하였다. 실험결과, 분산도는 초음파 공정 시간에 비례하여 증가하는 경향이 있으며, 1시간의 초음파 공정 후 본 연구 내 실험조건 하에서 가장 큰 분산도를 확보할 수 있는 것으로 확인되었다. 제작한 MRE의 압축시험 결과, off-state 탄성률은 실험인자 중 미세입자 분율과 경화제 분율에 크게 비례하였고, 자기장 작용 후 탄성률의 변화 또한 위 두 가지 실험인자의 영향이 큰 것으로 판단하였다. 이는 고분자 매트릭스 내 체인의 생성과 관련이 있는 것으로 사료되며, 경화제 분율 상승 시 분자 내 구조의 고착으로 미세입자의 내부 정렬이 원활하지 않아 자기장 작용 시 탄성계수의 변화가 비교적 낮은 것으로 판단하였다. 또한 본 실험을 통해 PDMS 기반 MRE의 off-state 탄성률을 100 kPa에서 300 kPa 까지 조정이 가능함을 확인하였고, 탄성률의 변화 범위를 36%까지 구현하였다.

후 기

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (No. 2018R1A6A1A03025526). 또한 본 결과물은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과임. 더불어, 2019년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원(라문우)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Sutrisno, J., Purwanto, A., & Mazlan, S. A., "Recent progress on magnetorheological solids: materials, fabrication, testing, and applications," *Advanced engineering materials*, Vol. 17, No. 5, pp. 563-597, 2015.
2. Lokander, M. and Stenberg, B., "Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials," *Polymer testing*, Vol. 22, No. 6, pp. 677-680, 2003.
3. Xuan, S., Xu, Y. and Gong, X., "Recent progress

- on the magnetorheological plastomers," International Journal of Smart and Nano Materials, Vol. 6, No. 2, pp. 135-148, 2015.
4. Behrooz, M., Wang, X. and Gordaninejad, F., "Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system," Smart Materials and Structures, Vol. 23, No. 4, 2014.
 5. Ahmad, S. H., and Sahrim Hj., "Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite-thermoplastic natural rubber nanocomposites," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 322, No. 21, pp. 3401-3409, 2010.
 6. Kawasetsu, T., Horii, T., Ishihara, H. and Asada, M., "Mexican-hat-like response in a flexible tactile sensor using a magnetorheological elastomer," Sensors, Vol. 18, No. 2, 587, 2018.
 7. Li, W. H., Liu, B., Kosasih, P.B. and Zhang, X. Z., "A 2-DOF MR actuator joystick for virtual reality applications," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 137, No. 2, pp. 308-320, 2007.
 8. Vatandoost, H., Norouzi, M., Alehashem, S. M S. and Smoukov, S. K., "A novel phenomenological model for dynamic behavior of magnetorheological elastomers in tension-compression mode," Smart Materials and Structures, Vol. 26, No. 6, 065011, 2017
 9. Yao, J., Sun, Y. and Liu, Y., "Magnet-induced aligning magnetorheological elastomer based on ultra-soft matrix," Composites Science and Technology, Vol. 162, pp. 170-179, 2018.
 10. Wang, Z., Volinsky, A. A. and Gallant, N. D., "Crosslinking effect on polydimethylsiloxane elastic modulus measured by custom-built compression instrument," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 131, No. 22, 41050, 2014.
 11. Seo, K. D., Park, J. M., Jeong, H. and Kim, D. S. "An experimental investigation of mixing of carbon nanotube/polymer composite in a batch-type screw mixer," Microsystem technologies, Vol. 20, No. 2, pp. 243-250, 2014.
 12. Park, J. M., "A chaotic micromixer using obstruction-pairs," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 20, No. 1, 2009.
 13. Yang, W. P. and Tarn, Y. S., "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," Journal of materials processing technology, Vol. 84, No. 1-3, pp. 122-129, 1998.