creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

자성입자-고분자 복합재료로 구성된 나선형 자기스프링의 자기장 인가 스프링 상수 변화 연구

2022년 2월

서울대학교 대학원

공과대학 재료공학부

윤 지 열

자성입자-고분자 복합재료로 구성된 나선형 자기스프링의 자기장 인가 스프링 상수 변화 연구

지도 교수 김 상 국

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2021년 12월

서울대학교 대학원
공과대학 재료공학부
윤 지 열

윤지열의 공학석사 학위논문을 인준함
2021년 12월

위 원 장 _____ 홍 성 현 _____ (인)

부위원장 _____ 김 상 국 _____ (인)

위 원 _____ 이 명 규 _____ (인)

초 록

탄성 재료로 만들어진 일반적인 기계 진동 시스템은 주어진 시스템의 복원력과 감쇠력 사이의 균형에 의에 제어되는 독특한 진동 성향을 나타낸다. 따라서 기계 진동 시스템의 동적 특성은 질량, 스프링 상수 및 감쇄 상수와 같은 재료 및 환경 변수에 의해 결정된다. 본 연구에서는 자성 물질과 탄성 재료를 복합한 새로운 개념의 기계진동시스템 요소를 제안한다.

이 시스템에서 자기력은 기계 진동 시스템의 거동을 결정하는 또 다른 핵심 변수로 작용한다. 이전의 퍼멀로이(Py)로 스프링 pitch 사이의 자기력을 simulation 했던 연구에서는 기계적 힘에 비하여 자기력이 매우 약하여 외부자기장으로 스핀을 정렬시키는 것만으로는 충분한 힘을 만들기 힘들었다.

그러나 본연구에서는 자기 이방성을 이용하여 자기력을 증가시켰고 이를 통해 스프링의 기계적 특성을 제어하여 보았다. 일반적인 자기 이방성을 가진 자석은 자성 물질 분말을 압축한 세라믹 물질이므로 탄성 거동을 하지 않아 탄성 물질에 자성 물질을 이식하는 방법으로 연구를 수행하였다. 수십 나노 크기의 산화철(Fe_3O_4, magnetite) 입자와 Elastomer를 혼합한 magnetic composite를 3D 프린터로 제작

한 스프링 몰드에 주입하고 스프링을 제작하였다. 공정 중에 외부 자기장을 스프링 축에 수직한 방향으로 인가하여 자성 입자의 사슬이 형성되도록 하여 스프링의 자화 용이축이 스프링의 축에 수직한 방향으로 생성되도록 하였다.

이렇게 만들어진 스프링이 자기장이 인가된 상태에서 압축 또는 인장 한다면 자성 입자 사슬은 Zeeman energy에 의해서 외부 자기장과 정렬하려는 돌림힘을 받게 되고 이는 외부적으로 스프링의 거동을 조절할 수 있는 힘으로 작용한다. 이는 스프링의 강성에 영향을 주게 되어 결과적으로 외부자기장으로 스프링의 강성을 제어할 수 있게 된다.

주요어 : 감쇠력, 산화철 나노 입자, 자성 나노 입자 사슬, 자성 스프링, 자기 이방성, 자성 액추에이터, 스프링 상수

학 번 : 2019-27183

목 차

초 록 1

목 차 3

제 1 장 서 론 7

제 2 장 연구 배경 9

2.1. 자기 유변 탄성체 9

2.2. 사슬 배열 나노 입자의 자성 에너지 11

2.2.1. 산화철 나노 입자 11

2.2.2. 쌍극자 상호작용 에너지 13

2.2.3. 제만 에너지 15

2.3. 훅의 법칙 17

제 3 장 모 델 링 18

3.1. 스프링 설계 18

3.2. 자기 이방성 설계 22

3.2.1. 자성 스프링의 자기 이방성 22

3.2.1. 산화철 나노 입자의 자기 모멘트 평형 24

3.3. 유효 스프링 상수 29

3.3.1. 2D rod 모델 29

3.3.2. 스프링 구조의 돌림힘 34

제 4 장 실 험 45

4.1. 실험 시편 제작 45

4.1.1. 스프링 몰드 제작 45

4.1.2. 자성 나노 입자 탄성 복합체 제조.....48

4.1.3. 자성 스프링 제조 49

4.2. 유효 스프링 상수 측정 56

제 5 장 실험 결과 및 분석 59

5.1. 자성 스프링의 초기 거동 59

5.2 자기장 인가에 따른 유효 스프링 상수 62

5.3. 모델과 실험의 비교 65

5.4. 결과 분석 67

제 6 장 결　　론.....69

참고문헌 71

Abstract 77

그림 목차

[그림 1] 무한개의 입자 사이의 자기 쌍극자 상호작용 14

[그림 2] 자성 입자 사슬의 제만 에너지 16

[그림 3] 스프링 설계 20

[그림 4] 스프링 몰드 설계 21

[그림 5] 사슬 배열된 입자의 자기 모멘트가 받는 토크 26

[그림 6] 자기장 세기에 따른 자기 메몬트 각도의 변화 28

[그림 7] 1회전 자기 스프링의 2D rod model 30

[그림 8] 자성 스프링의 2D rod model 31

[그림 9] 자성 스프링의 2D 인장 model 32

[그림 10] 자성 스프링이 받는 힘 35

[그림 11] 자성 스프링이 받는 돌림 힘 36

[그림 12] 자기장-유효 스프링 상수 그래프 40

[그림 13] 피치각-쌍극자 에너지에 의한 스프링 상수 그래프.... 42

[그림 14] 유효 스프링 상수 관계식에서 삼각함수가 가지는 값.. 43

[그림 15] 스프링 설계 46

[그림 16] 스프링 몰드 설계 46

[그림 17] 완성된 몰드 47

[그림 18] 자기장 속 몰드 정면도 50

[그림 19] 자기장속 몰드 상평면도 50

[그림 20] 자기장속 몰드 개념도 51

[그림 21] 실제 전자석 사이의 스프링 몰드 51

[그림 22] 완성된 자성 스프링 52

[그림 23] 등방성 스프링의 xy단면 현미경 사진 54

[그림 24] 이방성 스프링의 xy단면 현미경 사진 54

[그림 25] VSM 측정 결과 55

[그림 26] 실험 장치의 개념도 (정면도) 57

[그림 27] 위에서 내려다 본 실험 장치 58

[그림 28] 등방성 스프링의 초기 거동 59

[그림 29] 이방성 스프링의 초기 거동 60

[그림 30] 전자석에 흐르는 전류에 따른 자기장의 세기 62

[그림 31] 이방성 스프링의 자기장-유효 스프링 상수 그래프 63

[그림 32] 등방성 스프링의 자기장-유효 스프링 상수 그래프 64

[그림 33] 이방성 스프링의 모델과 실제 실험 값의 비교 66

제 1 장

서론

전형 적인 기계 진동 시스템의 특성은 질량, 감쇠상수, 강성으로 결정이 된다. 이러한 변수들도 인하여 system의 natural frequency 와 damping ratio 와 같은 특성들이 결정되게 된다. 이러한 변수들을 조절할 수 있다면 우리는 system의 진동 특성을 제어할 수 있을 것이다. 그러나 강성, 감쇠 상수, 질량은 시스템의 특성 값이므로 한번 정해지게 되면 바뀌지 않는 상수로 취급하는 변하지 않는 값 이였다.

여기서 우리가 만약 이러한 변하지 않는 값들을 변하게 하여 제어할 수 있다면 기계 진동 시스템의 진동 특성을 제어할 수 있을 것이다. 공학자들은 이러한 아이디어를 실현시키기 위해서 다양한 시도를 하였다. 그 중에서 대표적인 것이 자기 유변 유체(MRF)를 이용한 MR damper이다. [1]

자기 유변 유체는 유체에 magnetic particle이 혼합되어 있는 유체로 자기 장에 따라 유체 내에 있는 magnetic particle 이 정렬되어 chain을 형성하면서 자기 유변 유체의 거동이 달라진다. 특히 유체의 점성이 영향을 받게 되는데 배열된 입자의 힘으로 전단 응력이 증가하여 점성이 증가하게 된다. 만약 기계 진동 시스템의 댐퍼에 자기 유변

유체를 사용한다면 자기장에 따라 점성이 증가하여 감쇠 상수를 변화시켜 수 있었다. [1]

강성을 조절하려는 아이디어도 지속적으로 발전되어 왔다. 강성을 조절하는 방법으로는 상변화 또는 유리 전이를 이용한 방법이 주로 연구되어 왔으며 유의미한 성과가 있었다. 그러나 상변화 또는 유리 전이 방식을 이용하여 강성을 제어하는 방식들은 강성이 모두 온도의 함수로 나타나게 되어 빠르게 능동적으로 시스템의 특성을 변화시킬 수 없다는 단점이 있었다. [2]

자기 유변 유체를 이용한 방식에서 보듯이 자기장을 이용한 방식은 system이 외부 자기장에 즉각적으로 응답하여 능동적으로 system의 특성을 제어할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특성을 이용해서 자기장을 통해서 구조체의 강성을 제어해보려고 한다.

기존의 연구에서는 원통형 모양의 실리콘 스프링을 자기 유변 탄성체로 만들어서 탄성체의 강성을 제어하는 시도가 있었다. [42] 그러나 본 연구에서는 흔히 사용하는 나선형 코일 스프링의 강성을 제어해보려는 시도를 하였다. 나선형 코일 스프링의 강성을 조절할 수 있다면 코일 스프링이 쓰이는 모든 시스템에서 응용할 수 있을 것이므로 응용처가 무궁무진하다 할 수 있다.

제 2 장

연구배경

2.1. 자기 유변 탄성체

자기 유변 탄성체(magnetorheological elastomer, MRE)는 마이크로 또는 나노 크기의 강자성 입자와 고분자 탄성체 메트릭스로 구성된 물질이다. 이러한 복합 재료의 기계적 특성은 외부 자기장으로 제어할 수있다. [3]

MRE는 일반적으로 폴리머의 경화를 통해서 제작된다. 액체 상태의 고분자 재료와 산화철 또는 카보닐 철과 같은 자성재료를 혼합하여 폴리머를 경화 시켜 제작할 수있다. 이 때 자기장을 가해준다면 자성 입자가 사슬과 같은 구조로 배열되어 이방성을 심어 줄 수있다. 자기장을 가해주지 않으면 자성 입자가 무작위로 배열되어서 등방성 MRE가 된다. [4]

이렇게 해서 만들어진 MRE는 다양한 응용처가 있으며 관련 연구 또한 활발하게 진행되고 있다. MRE의 가장 큰 특성은 자기장을 가해주면 강성이 변화한다는 특징이 있다. 특히 이방성을 가진 MRE의 경우 MRE에 변형이 있을 때 자기장이 가해지면 자성 입자 사슬이 자기장과 정렬하려는 힘을 받기 때문에 이를 통해서 강성을 제어 할 수있

으며 이러한 원리를 이용하면 자성 액추에이터로서도 활용이 가능하다. [5,6]

MRE 관련 연구들을 살펴 보면 자기장 내에서 강성이 변화하는 성질을 이용하여 제진(Vibration isolation) 시스템에 응용하려는 연구가 진행되고 있으며, 소프트 로봇의 액추에어터로서 활용하려는 연구 또한 활발하게 진행되고 있다. [6,7]

2.2. 사슬 배열 나노 입자의 자성 에너지

2.2.1 산화철 나노 입자

산화철(Fe_3O_4, magnetite)은 강자성체인 철의 대표적인 산화물로 스피넬(spinel)구조를 가지며 페리 자성의 특성을 가진다.[8] 이는 자석에 끌리며 영구자석으로 제조할 수도 있다. 지구상에서 자연 상태로 존재하는 가장 대표적인 자성 물질이며 고대의 사람들이 나침반으로 이용했던 물질도 바로 산화철(Fe_3O_4, magnetite)이다. [9]

이러한 형태의 산화철은 우리 몸에서도 쉽게 발견될 정도로 생체적합도가 높은 물질이다. 따라서 이러한 생체적합성과 자성을 이용하여 다양한 용도로 이용하려는 시도가 되고 있다. 특히 산화철의 나노 입자는 인체에서 표적 약물 전달를 비롯하여 소프트 생체 로봇 등 다양한 분야에서 응용 및 연구가 되고 있다.[10]

이러한 산화철 나노 입자는 크기에 따라서 자성의 특징이 달라지게 되는데 나노 입자의 크기가 대략 25nm 이하에서는 초상자성, 80nm 이상에서는 페리자성을 띄게 된다. 이러한 특징으로 인해서 산화철 나노 입자의 크기별로 다양한 용도와 쓰임새가 연구되었다.

산화철의 크기에 따라 자성 특징이 달라지는 것은 산화철 입자에 있는 자구(magnetic domain)와 관계가 있다. 나노 입자가 80~100nm 이하면 입자가 단자구(single domain)를 이루게 되어 자화가 한방향으로 일어나게 된다. 만약 80~100nm 보다 입자의 크기

가 커진다면 입자는 다자구(multi domain)을 이루게된다. 따라서 입자안에 여러 개의 자구가 형성된다. 산화철 나노 입자가 일정 크기 이상에서 다자구를 이루는 이유는 정자기 에너지(magnetostatic energy)의 영향이 가장 크다. 입자의 크기가 커질 때 입자의 자구가 단자구로 남아 있게 되면 자기 모멘트에 의해 정자기 에너지 역시 계속 커지게 되는데 각 자구를 분할함으로서 각 자구별 자기 모멘트의 크기를 줄이고 총 정자기 에너지 역시 낮출 수있어 자구를 분할하여 다자구 형태를 가지는 것이 더 안정된 상태가 된다. 단자구에서 다자구로의 변화가 일어나는 입자 크기는 정자기 에너지와 함께 자벽 에너지(domain wall energy), 이방성 에너지(anisotropy energy), 교환 에너지(exchange energy) 등이 고려되어 단자구보다 다자구가 더 낮은 에너지 상태가 되는 지점으로 정해지게 된다. [11, 12]

2.2.2 쌍극자 상호작용 에너지

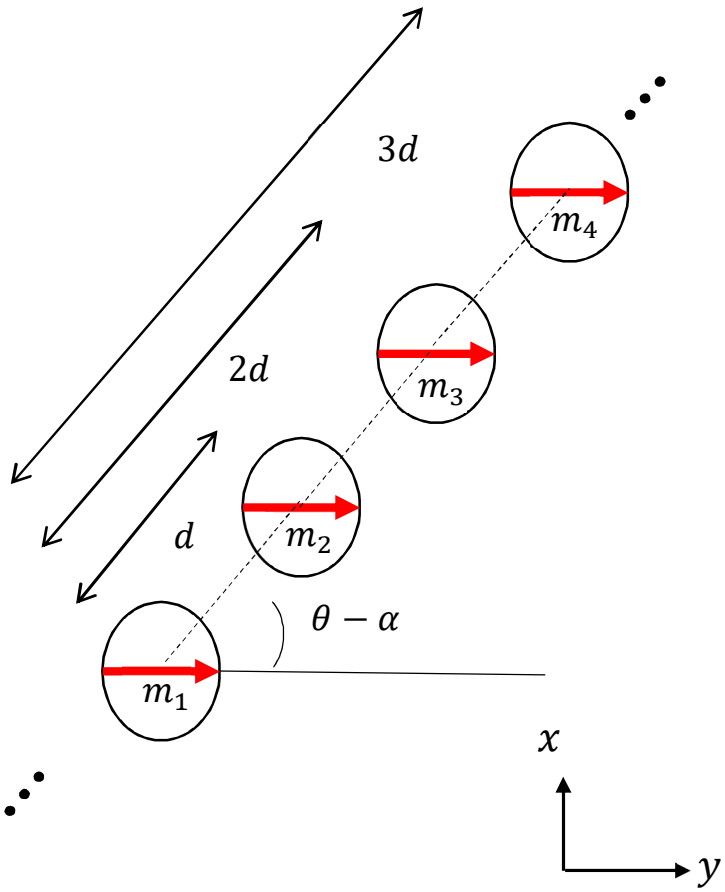
자기 쌍극자 상호 작용에너지는 자극과 자극 사이에서 쌍극자 상호작용을 최소화 하는 에너지이다. 따라서 두개의 극이 꼬리에 꼬리를 무는 방향으로 있을 때 최소가 되고 안정화가 된다.

아래 그림과 같이 자기모멘트의 크기가 각각 m_1 과 m_2 이고 두 입자사이의 거리가 d인 두 입자 사이의 자기 쌍극자 상호작용 에너지는 다음과 같이 정의할 수있다.[12]

$$E_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left(\frac{m_1 m_2}{d^3}\right)(\overrightarrow{m_1}\cdot\overrightarrow{m_1} - 3(\overrightarrow{m_1}\cdot\vec{d})(\overrightarrow{m_2}\cdot\vec{d})) \tag{2.1}$$

$$E_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)(1 - 3cos^2(\theta - \alpha)) \tag{2.2}$$

아래 그림과 같이 여기서 무한개의 같은 크기와 성질을 가지는 입자가 일렬로 놓여져 사슬을 이루고 있다고 가정하고 각 입자들 사이의 에너지를 모두 더해 준다면 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.



<그림 1> 무한개의 입자 사이의 자기 쌍극자 상호작용

$$E_{1\infty} = 2E_{12}\sum_{1}^{\infty}\frac{1}{n^3} \tag{2.3}$$

$$E_{dipole} = \frac{0.6\mu_0 N}{\pi}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)(1 - 3cos^2(\theta - \alpha)) \tag{2.4}$$

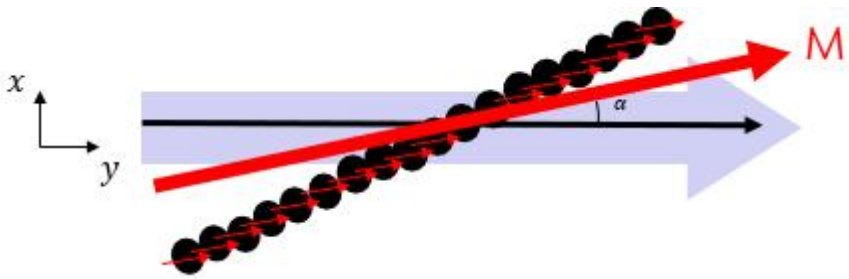
2.2.3 제만 에너지

제만 에너지는 자기 모멘트가 외부 자기장 하에 놓여져 있을 때 생기는 일종의 퍼텐셜 에너지이다. 이 에너지는 자기 모멘트와 외부자기장의 방향이 평행할 때 최소가 되고 안정화 된다. 따라서 자기 모멘트가 외부 자기장 방향에 대해서 기울어져 있으면 자기장과 평행 할 때 보다 더 높은 에너지 상태를 가지게 되고 더 낮고 안정된 에너지 상태가 되기 위해서 자기 모멘트는 토크를 받게 된다.

1개의 입자가 외부 자기장 내에서 가지는 제만 에너지는 입자의 자기 모멘트 m과 자기장의 세기 B의 내적으로 표현 할 수 있다. [12]

$$E_z = -\vec{m} \cdot \vec{B} \tag{2.5}$$

아래 그림과 같이 N개의 나노 입자가 외부자기장과 α 만큼의 각도 이루고 있을때, 제만 에너지는 각 입자 에너지의 총량으로 구할 수 있으며 다음과 같이 표현 할 수 있다.



<그림 2> 자성 입자 사슬의 제만 에너지

$$E_z = -N\vec{m} \cdot \mu_0 \vec{H}$$
$$= -Nm\mu_0 H cos\alpha \qquad (2.6)$$

2.3 훅의 법칙

훅의 법칙(Hooke’s law)은 탄성 거동을 하는 물체가 외력에 의해서 변형 되었을 때 원래 상태로 돌아오려는 힘과 변형된 정도 사이를 관계에 대한 법칙으로 1차원 운동에서는 다음과 같은 간단한 식으로 나타낼 수있다. [13]

$$F = -kx \tag{2.7}$$

외력 F가 주어졌을 때, 반대반향으로 −kx 만큼의 복원력이 생긴다는 의미이다. 여기서 k는 스프링 상수 또는 강성이라고 부르는 상수값이며, x는 변형된 정도를 의미한다.

식의 형태에서도 볼 수있듯 k가 상수이기 때문에 x가 증가 함에 따라서 복원력 또한 선형적으로 증가한다.

제 3 장

모 델 링

3.1. 스프링 설계

나선형 스프링의 설계 parameter는 스프링의 지름(D), 스프링 코일의 지름(d), 스프링의 회전수(n) 그리고 스프링을 구성하는 물질의 전단 탄성 계수(G)이다. 위의 설계 인자들이 결정되면 스프링 상수를 구할 수있다. [14]

$$k = \frac{G d_{coil}^4}{8nD^3} \tag{3.1}$$

본 연구에서는 자기장이 인가되는 제한된 공간에서 실험할 스프링을 제작 해야 한다. 전자석 사이의 공간은 가로 10cm, 세로 12cm, 높이 7cm이고 이 공간 내에서 스프링의 거동을 관찰 해야한다. 전자석의 극과 극 사이에서 자기장의 구배가 생기는데 자기장의 구배가 생기면 자기 모멘트는 힘을 받게된다. [12] 실험에서는 일정한 자기장을 가정하므로 극과 극 사이에 자기장의 구배가 최대한 없는 지점에서 실험해야 한다. 따라서 스프링의 지름은 작으면 작을수록 일정한 자기장 내에서 실험 할수 있으나 스프링이 너무 작으면 스프링의 길이

변화를 측정함에 있어서 오차가 커질 수 밖에 없다.

그리하여 극과 극 사이의 자기장을 측정해본 결과 극과 극 중앙 지점을 중심으로 약 1.5cm 내외에서는 자기장의 구배가 거의 없다는 것을 확인하고 스프링의 지름을 2cm 로 설계하기로 하였다.

이 실험에서는 Xinus lab의 Shore A 경도 15의 몰드용 실리콘을 사용할 것인데 경도 값을 영률로 변환하는 관계식을 사용하여 [15,16]

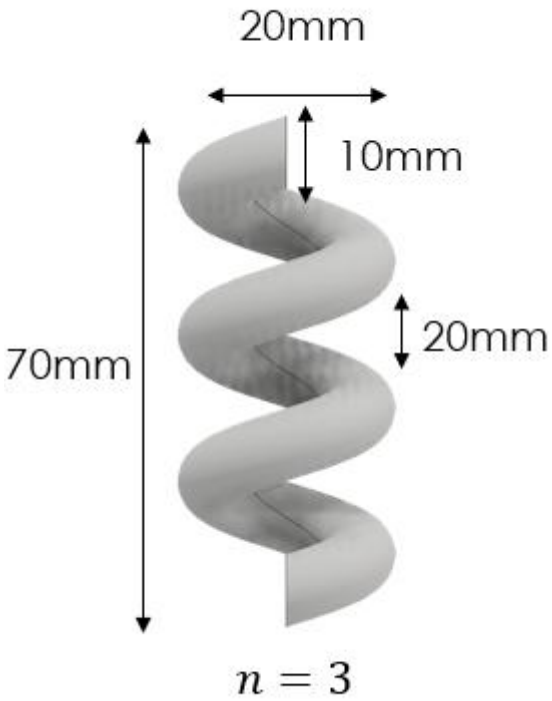
$$\log_{10} E = 0.0234S - 0.6403 = 0.51MPa \qquad (3.2)$$

영률을 구하였다. 이 수치와 실리콘의 프와송비 0.49를 대입하여 해당 제품의 전단 탄성 계수를 구할 수 있있다. [17]

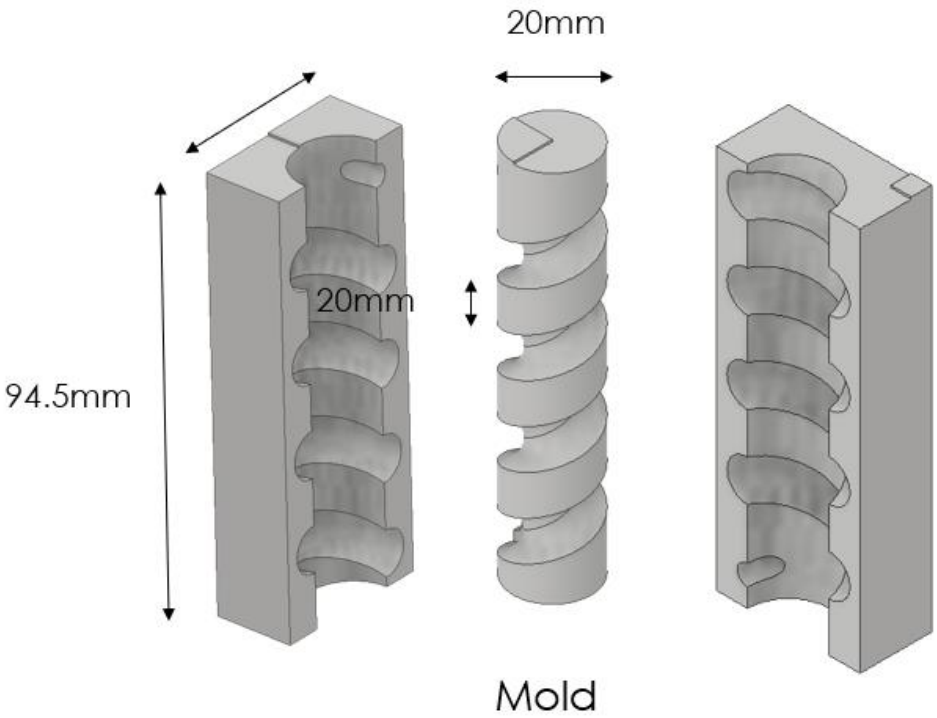
$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} = 0.17MPa \qquad (3.3)$$

이 수치를 이용하여 스프링 상수가 7~9N/m 정도 되는 스프링을 설계하는데 앞의 스프링 상수 공식에 따라서 코일의 지름과 감은수는 각각 1cm와 3으로 결정하였다. 공식에 따르면 8.85Nm 의 값이 나오게 된다.

이를 바탕으로 다음과 같이 스프링을 설계하였다.



<그림 3> 스프링 설계



<그림 4> 스프링 몰드 설계

3.2. 자기 이방성 설계

3.2.1. 자성 스프링의 자기 이방성

본 연구의 목적은 자성 스프링의 자기 이방성을 이용하여 외부 자기장으로 스프링 상수를 제어해 보는 것이다. 스프링에 자기 이방성을 심는 방식은 스프링의 축방향으로 심는 방법과 축의 수직한 방향으로 자기 이방성을 심어 주는 두가지의 방식을 생각 할 수 있다.

스프링의 축방향으로 나성 나노 입자 사슬을 만들어 자기 이방성을 심어 준다면 외부 자기장이 스프링의 축방향으로 가해질 때 자기장에 의한 퍼텐셜 에너지가 가장 낮은 상태가 된다. 이 상태에서 인장 또는 수축할 시에 자성 나노 입차 사슬이 외부 자기장에 대해서 기울여져 편차가 생기고 스프링의 기계적인 퍼텐셜 에너지에 자성 에너지에 의한 퍼텐셜 에너지가 추가적으로 생긴다. 이는 사슬이 자기장에 정렬하려는 힘을 추가적으로 받게 됨을 의미한다. 이를 이용하여 자성 스프링에 외부 자기장을 이용하여 추가적인 힘을 줄 수 있다.

두번째 방법으로는 스프링 축에 수직한 방향으로 자성 나노 입자 사슬을 만들어 주는 것이다. 이 방법에서는 외부 자기장을 스프링 축의 수직 방향으로 걸어 주면 자기장에 의한 위치 에너지가 가장 낮은 상태가 된다. 이 상태에서 스프링이 인장 또는 수축하게 되면 앞과 마찬가지로 자성 나노 입자 사슬이 자기장에 대해 기울어 지면서 자기장 방향으로 정렬하는 힘을 받게된다. 이 방법 역시도 외부 자기장으

로 스프링에 추가적인 힘을 가해줄 수있다.

본 연구에서는 실험 환경의 제약으로 인하여 두 번째 방법인 스프링의 축방향으로 자성 나노 입자 사슬을 배열 시켜 주어 이방성을 만들었다.

3.2.2 산화철 나노 입자의 자기 모멘트 평형

앞 장에서 설명한대로 스프링 축의 수직 방향으로 이방성을 만들어 줄것이다. 제조의 편의성을 위해서 Molding 방식을 이용하여 MRE로 스프링을 만들어 줄 것이다. MRE를 경화 시키면서 스프링 축의 수직한 방향으로 자기장을 가해 준다면 자기장 방향으로 MRE 내의 자성 입자들이 사슬 형태로 배열되게 된다. 따라서 이를 통해서 자기 이방성을 나선형 코일 스프링에 심어 줄 수 있다.

구형의 산화철 나노 입자 사슬을 이용하여 이방성을 심어 주었으므로 무수히 많은 입자가 사슬 형태로 배열 되었을 때의 경우를 모델링 하려한다. MRE 내의 산화철 입자의 크기는 대략 80nm 정도의 제품을 사용하였으므로 MRE 내의 산화철 나노 입자 하나하나가 단자구(single domain)라고 가정하였다. 따라서 이 시스템에서 고려해야 하는 자기 에너지는 쌍극자 에너지와 제만에너지만 고려해 주면 된다. [12]

그리고 스프링의 거동에 따른 기계적 에너지를 함께 고려하여 기계적 에너지에 의한 구조의 토크와 자성 에너지에 의한 토크의 평형을 구해 준다면 자기 스프링의 유효 스프링 상수를 구할 수 있다.

여기서 토크의 평형은 크게 두가지를 생각할 수있다. 첫번째는 자기 쌍극자 에너지에 의한 자기 모멘트가 받는 토크와 제만 에너지에 의해 자기 모멘트가 받는 토크 사이의 평형이다. 두번째는 자기 에너

지에 의한 토크와 기계적 토크의 평형 관계이다.

이 장에서는 지기 에너지에 의한 자기 모멘트의 평형 관계에 대해서 설명하겠다. 아래 그림과 같이 자기장 내에서 산화철 자성 나노 입자 사슬이 받는 토크는 2가지가 있다. 앞서 설명하였듯이 이 시스템에서는 자성 에너지는 쌍극자 상호작용에 의한 에너지와 제만 에너지가 있다. 이들 에너지를 각도로 미분하게 되면 각 에너지에 의한 토크를 구할 수 있고 이 두가지 에너지에 의한 토크가 평형을 이루는 점까지 자기 모멘트가 회전하게 된다.

먼저 쌍극자 에너지에 의한 토크는 사슬의 길이 방향으로 향하게 되며 이 시스템에서는 반시계 방향으로 작용한다. μ_0가 진공투자율, N은 자성 나노 입자의 개수, π는 원주율, m은 자기 모멘트, d는 입자사이의 거리, θ는 스프링 피치각, α는 자기모멘트와 외부자기장 사이의 각 일 때 에너지와 에너지에 의한 토크는 다음과 같이 정의된다. [12]

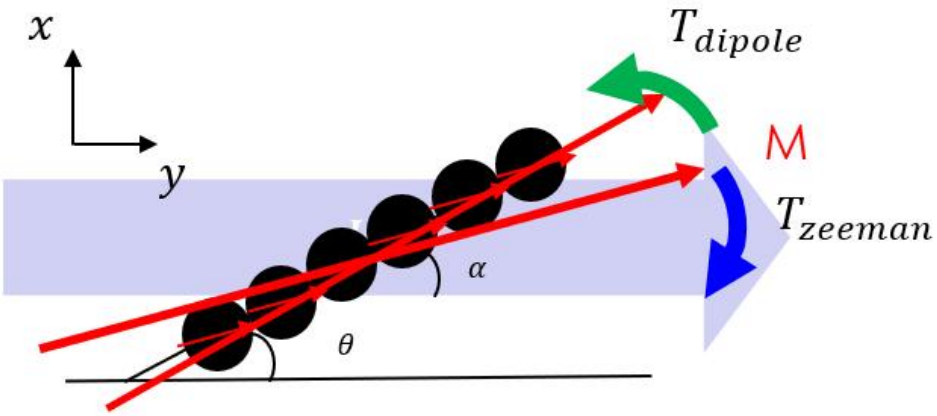
$$E_{dip} = \frac{0.6\mu_0 N}{\pi}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)(1 - 3cos^2(\theta - \alpha)) \tag{3.4}$$

$$T_{dip} = \frac{1.8\mu_0 N}{\pi}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)sin2(\theta - \alpha) \tag{3.5}$$

제만 에너지에 의한 토크는 자기장과 평행해 지도록 하는 방향으로 작용하게 되는데 이 시스템에서는 시계 방향으로 작용한다. [12]

$$E_z = -Nm\mu_0 H cos\alpha \tag{3.6}$$

$$T_z = N\vec{m}\mu_0 H \cdot sin\alpha \tag{3.7}$$



<그림 5> 사슬 배열된 입자의 자기 모멘트가 받는 토크

이 두 토크가 평형을 이룰 때 까지 자기 모멘트가 회전 할 것이다.

토크의 평형을 고려하면 다음과 같은 방정식이 만들어 진다.

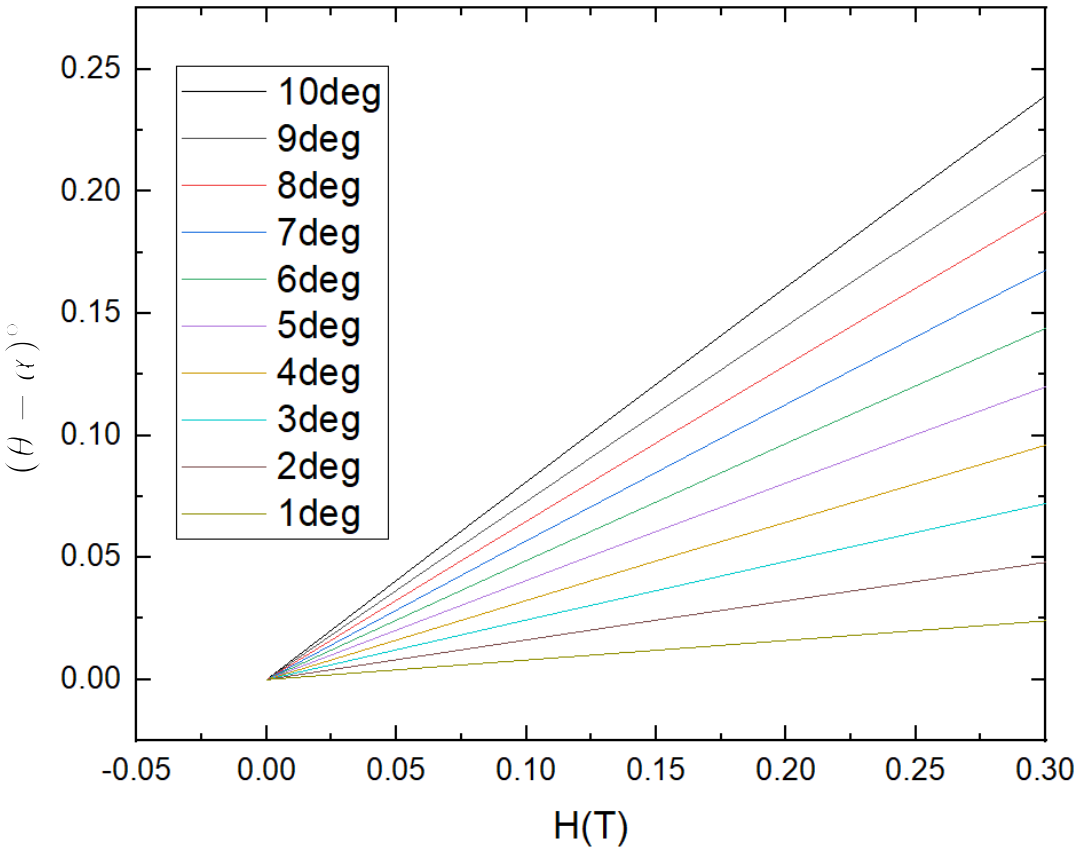
$$N\vec{m}\mu_0 H \cdot \sin\alpha - \frac{1.8\mu_0 N}{\pi}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)\sin 2(\theta - \alpha) = 0 \qquad (3.8)$$

위 식을 정리하면 다음과 같이 간단하게 표현할 수있다.

$$H = \frac{1.8m}{\pi d^3}\left(\frac{\sin 2(\theta - \alpha)}{\sin\alpha}\right) \qquad (3.9)$$

이 토크 평형 식을 이용하면 자기장 세기에 따라서 자기 모멘트 각이 얼마나 회전하는지를 예상 할 수 있다.

이 실험에서는 스프링의 피치각이 0~10° 사이에서 움직이므로 스프링 피치각 θ가 0~10° 일 때 각각 자기장이0~0.3T 까지 변화할 때 사슬 방향으로부터 자기 모멘트각의 변화를 그래프를 plot해 보았다. 여기서는 지름이 75nm 인 구형의 산화철(magnetite) 나노 입자의 물성치를 이용하였다. Plot의 결과를 보면 스프링 사슬 각도와 자기 모멘트가 이루는 각도 θ − α가 피치각 θ의 약 2.5% 정도 움직이는 것으로 예상할 수있다. 이는 다이폴 에너지에 의한 토크가 더 강하기 때문이다.



<그림 6> 자기장 세기에 따른 자기 모멘트 각도의 변화

3.3. 자기 스프링 상수

3.3.1. 2D rod Model

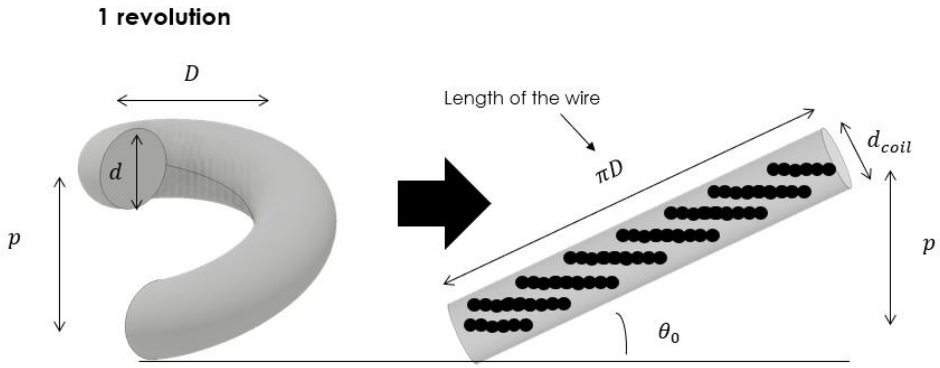
앞서 정리한 돌림힘들의 자기 모멘트들 사이의 토크이다. 자기력에 의한 스프링 상수를 구하기 위해서는 자기력와 기계력 힘들에 의한 평형을 구해야 한다.

여기서는 2가지 접근 방법이 있다. 힘은 현재 시스템에서 에너지의 x 방향으로의 미분으로 나타낼 수있다. 따라서 이 시스템에서 정의하고 있는 에너지인 지만 에너지와 자기 쌍극자에 의한 퍼텐셜 에너지를 x방향으로 미분한다면 자기력을 구할 수있게 되고 이를 통하여 자기장에 의해 변화하는 스프링 상수를 구할 수있다. 스프링의 퍼텐셜 에너지는 $E_{spring} = \frac{1}{2}kx^2$ 의 간단한 식으로 나타낼 수있고 x 방향으로 미분하면 우리가 알고 있는 스프링에 의한 힘의 방정식인 F = kx 가 표현된다.

그러나 자기력 시스템에서는 에너지가 x의 함수가 아니라 자기 모멘트 각도의 함수로 주어지게된다. 따라서 x와 자기 모멘트 각도 α 사이의 관계식을 먼저 구해야 한다.

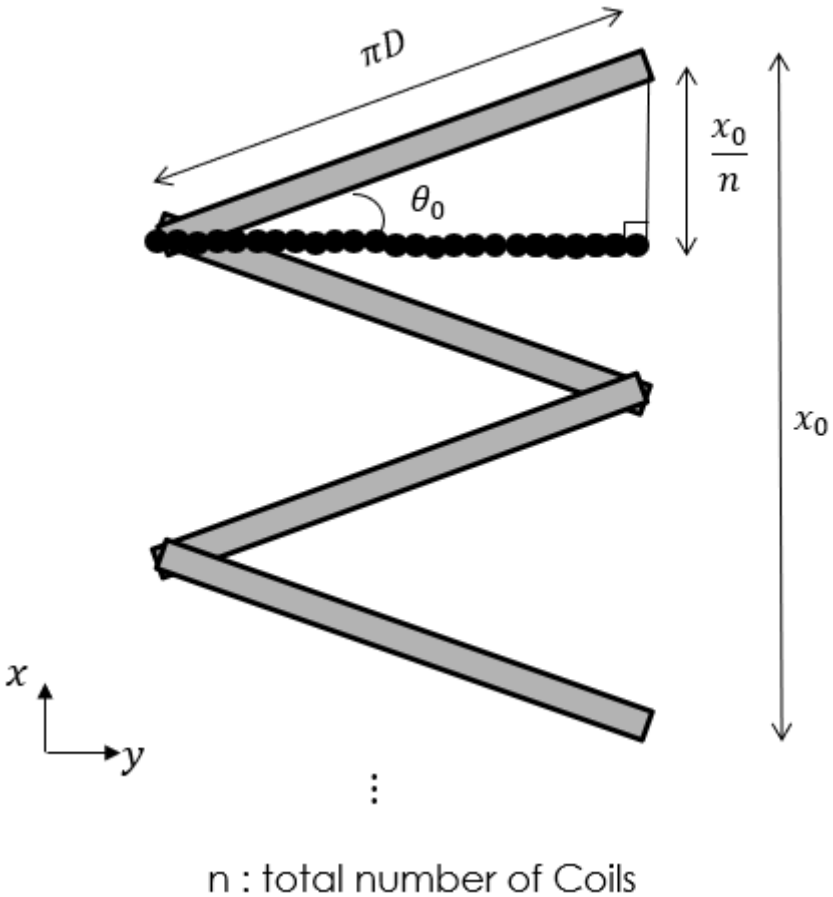
스프링 축에 수직한 방향으로 자성 나노 입자 사슬을 만들었으므로 스프링이 늘어날 때 자성 나노 입자 사슬이 얼마 만큼의 각도로 움직이는 지 모델링하기 위해서 스프링을 2D rod 로 가정하여 모델링을 하였다. 스프링의 pitch 각도의 변화가 rod의 각도 변화가 될것이고

pith의 길이가 rod의 높이로 모델링을 한다면 rod의 회전 운동을 스프링의 인장과 수축 운동으로 표현 할 수있다. 다음 그림은 1바퀴 회전한 스프링의 그림이다. 여기서 스프링을 펴 주게 되면 스프링을 갱로 표현할 수있고 스프링 parameter에 대응하는 rod의 parameter는 그림에 표기 하였다.



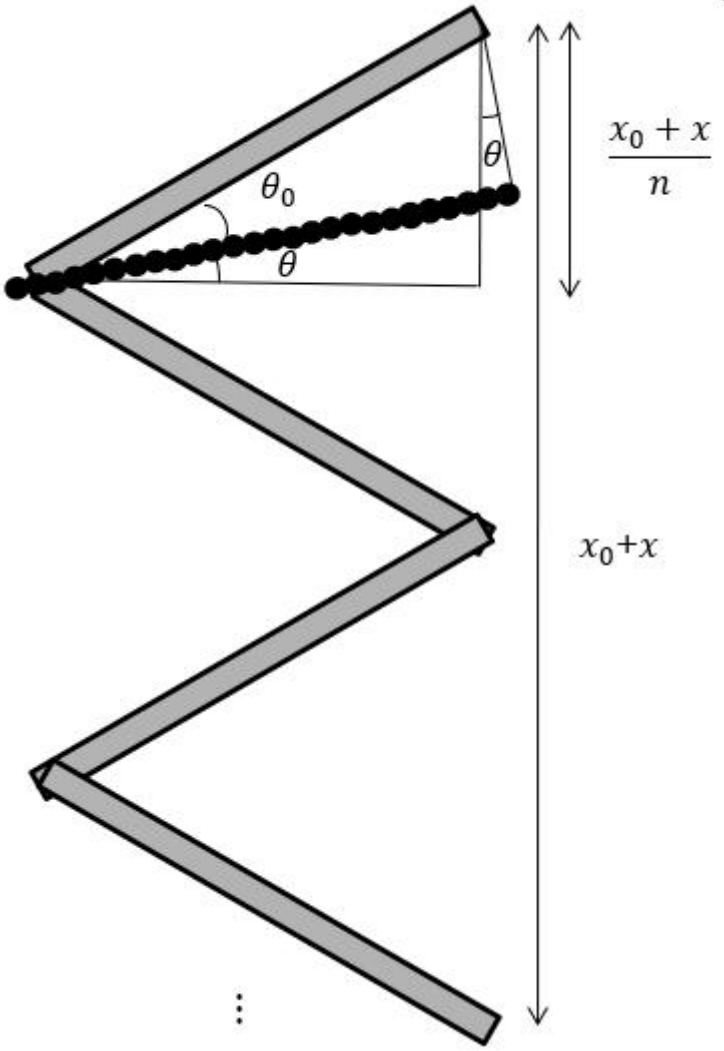
<그림 7> 1회전 자기 스프링의 2D rod Model

여기서 스프링을 n 번 회전 시킨다면 다음과 같이 모델링 할수 있다.



<그림 8> 자기 스프링의 2D rod Model

이 스프링이 늘어 나게 된다면 <그림 8>는 다음과 같이 변화한다.



<그림 9> 자기 스프링의 2D 인장 Model

여기서 D는 스프링의 지름, θ_0는 초기 피치 각도, θ는 피치각 변화량, x_0는 초기 스프링길이, x는 스프링 길이변화량, n은 스프링의 회전수를 의미한다. 여기서 얻을 수 있는 기하학적 관계로 θ를 x의 함수로 표현할 수있고 반대도 가능하다.

$$sin\theta_0 = \frac{x_0}{n\pi D} \tag{3.10}$$

의 관계를 <그림 8>에서 얻을 수있으며

$$sin(\theta_0 + \theta\ ) = \frac{x_0 + x}{n\pi D} \tag{3.11}$$

의 관계를 <그림 9>으로부터 유도할 수있다.

식 1과 2의 관계를 이용하면 x를 θ의 함수로 표현할 수있다.

$$x = n\pi D\{sin(\theta_0 + \theta) - sin\theta_0\} \tag{3.12}$$

이 식을 통하면 스프링의 x방향으로의 변위와 스프링 피치 각도의 변화량 사이의 관계를 추론 할 수있다.

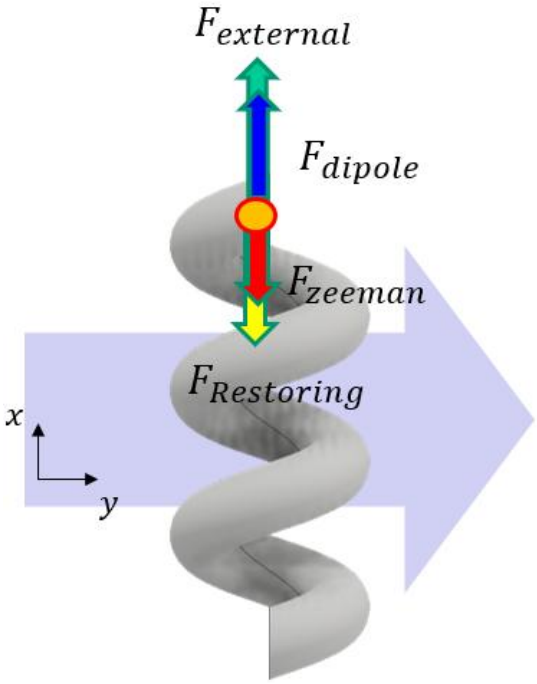
3.3.2. 스프링 구조의 돌림힘

앞서 정리한 자기 에너지들에 의한 토크의 평형에 기계적인 돌림힘이 더해져서 자기 스프링에서 평형을 이루게 된다. 이 시스템에서 기술할 수 있는 힘은 외부력, 스프링의 복원력, 지만 에너지에 의한 힘, 자기 쌍극자 모멘트 에너지에 의한 힘 총 4가지이고 힘의 평형 상태에서 돌림힘도 평형을 이루게 된다.

먼저 스프링을 외력으로 잡아 당겨주면 스프링 구조가 변화하게 되고 원래 상태로 돌아가려는 복원력이 생기게 된다. 자기력에 의 한 힘이 없으면 이 두힘은 평형을 이루고 있다. 그러나 이방성을 가진 스프링에 자기장을 인가하게 된다면 스프링은 제만 에너지에 의한 힘과 자기 쌍극자 모멘트에 의한 힘 두가지의 힘을 추가로 받게 되어 4가지 힘은 평형을 이룬다.

힘의 평형 방정식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

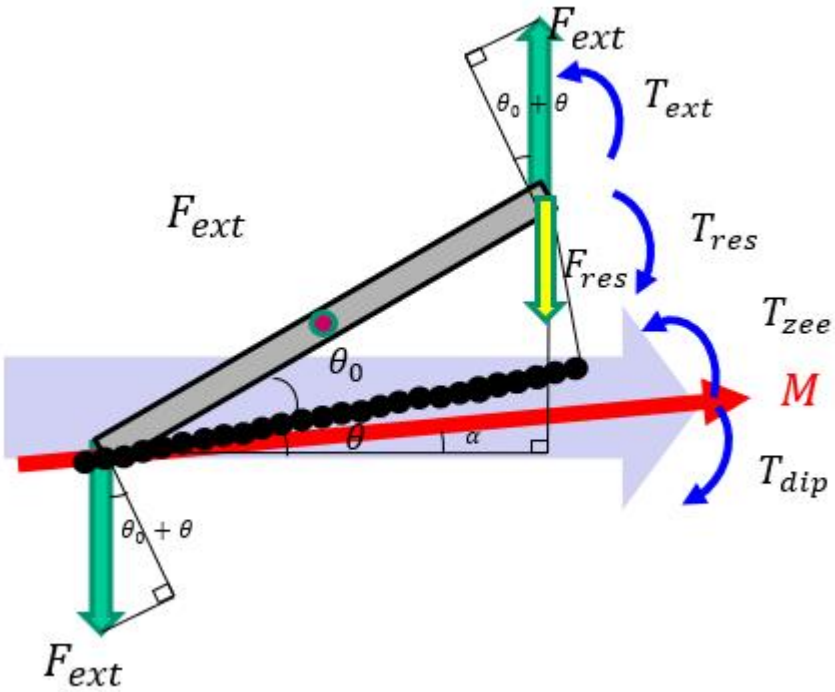
$$F_{ext} + F_{dip} = F_{res} + F_{zee} \tag{3.13}$$



<그림 10> 자성 스프링이 받는 힘

따라서 돌림힘의 평형은 다음과 같이 표현할 수있다.

$$T_{external} + T_{dipole} = T_{Restoring} + T_{zeeman} \tag{3.14}$$



<그림 11> 자성 스프링이 받는 돌림힘(2D rod model)

여기서 4가지의 각 토크들은 다음과 같이 표현 할수 있다.

$$T_{dip} = \frac{1.8\mu_0 N}{\pi}\left(\frac{m^2}{d^3}\right) sin2(\theta - \alpha) \tag{3.15}$$

$$T_{ext} = \pi D n k_{eff} x \cdot \cos(\theta_0 + \theta) \tag{3.16}$$

$$T_{res} = \pi D n k_0 x \cdot \cos(\theta_0 + \theta) \tag{3.17}$$

$$T_{zee} = N\vec{m}\mu_0 H \cdot sin\alpha \tag{3.18}$$

이 토크들의 평형으로부터 다음 식이 유도된다..

$$k_{eff}(H,\theta) = k_0 + N\vec{m}\mu_0 H\left(\frac{1}{n^2\pi^2D^2}\right)\left(\frac{sin\alpha}{cos(\theta_0+\theta)\,(sin(\theta_0+\theta)-sin\theta_0)}\right) - \frac{1.8\mu_0 N}{\pi^3 n^2 D^2}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)\frac{sin2(\theta-\alpha)}{cos(\theta_0+\theta)\,(\sin(\theta_0+\theta)-sin\theta_0)} \tag{3.19}$$

이 식과 앞에서 유도한 자기 모멘트 끼리의 평형식

$$H = \frac{1.8m}{\pi d^3}\left(\frac{sin\,2(\theta-\alpha)}{sin\,\alpha}\right) \tag{3.20}$$

을 연립하면 유효 스프링 상수 상수 k_{eff}를 구할 수있다.

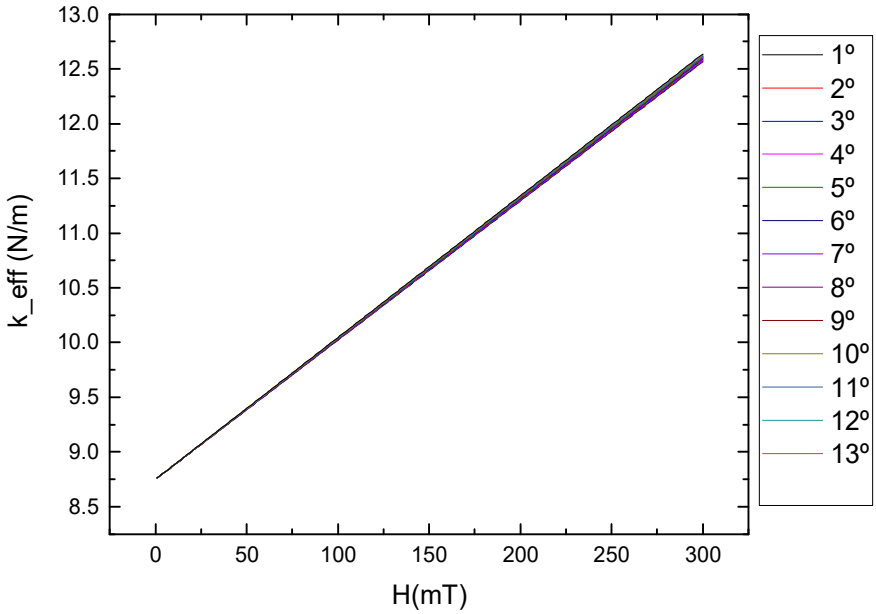
유효 스프링 상수 k_{eff}는 유도한 바에 따르면 자기장과 pitch angle에 따라 변화하는 2변수의 상관 관계를 가진다.

여기서 pitch angle은 스프링의 가동 범위를 통해서 구할 수있는데 앞에서 설계한 스프링의 초기 피치 각은 약 21.8° 이고, 완전히 압축 되었을 때 대략 9.17°의 값을 가진다. 따라서 이 스프링이 이상 적인 진동을 하게 된다면 피치각의 변화는 두 값의 차이인 대략 13도 정도로 변화해야 한다.

따라서 유효 스프링 상수 k_{eff} 를 이 실험에서 쓰이는 스프링에 해당하는 값들로 plot 해보면 다음과 같다.

입자의 개수는 $\mathrm{N} = \frac{fw}{\rho}$ 의 관계식을 이용하여 구하였다. 여기서 N은 산화철 나노 입자의 개수, f는 산화철 나노입자의 질량율, w는 스프링의 질량, ρ는 산화철의 밀도 이다.

자기 모멘트는 $\mathrm{m} = M_s\mathrm{V}$ 의 관계식을 이용하였다. [12]



$k_0 = 8.75$
$(initial\ stiffness)$
$V = 1.48 \times 10^{-5} m^3$
$(volume)$
$n = 3$
$(revolutions - design\ parameter)$
$\theta_0 \approx 21.8°$
$(initial\ pitch\ angle\ - design\ parameter)$
$D = 0.02m$
$(spring\ Diameter)$

$d = 75nm$
$(particle\ diameter)$
$N = 1.82 \times 10^{15}\ particles$
$(particle\ amount)$

$M_s = 90emu/g$
$(saturation\ manetization\ - Fe_3O_4)$
By measurement

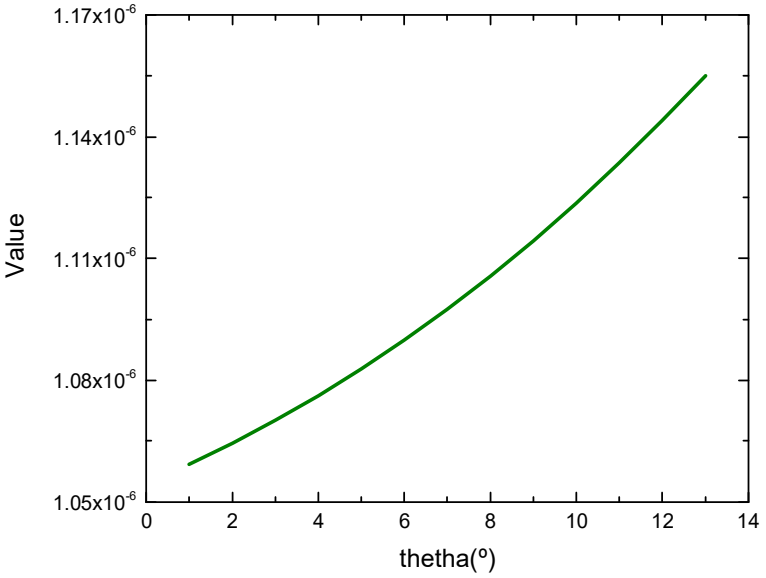
<그림 12> 자기장-유효 스프링 상수 그래프

자기장이 0~ 300mT 일때 유효 스프링 상수는 8.75 ~12.6 정도까지 선형적으로 커지는 것을 볼 수있다. 이 결과는 유효 스프링 상수 k_{eff}는 오직 자기장에만 관계가 있는 것처럼 보인다. 이 결과를 분석하기 위해 각 항을 각각을 plot해보았다.

앞에서 구한 k_{eff} 관계식에서 k_0을 제외하면 자기 쌍극자 에너지에 관련된 항과 제만 에너지와 관련된 항이 있다.

먼저 자기 쌍극자 에너지에 관련된 항만 plot 해보면 다음과 같다.

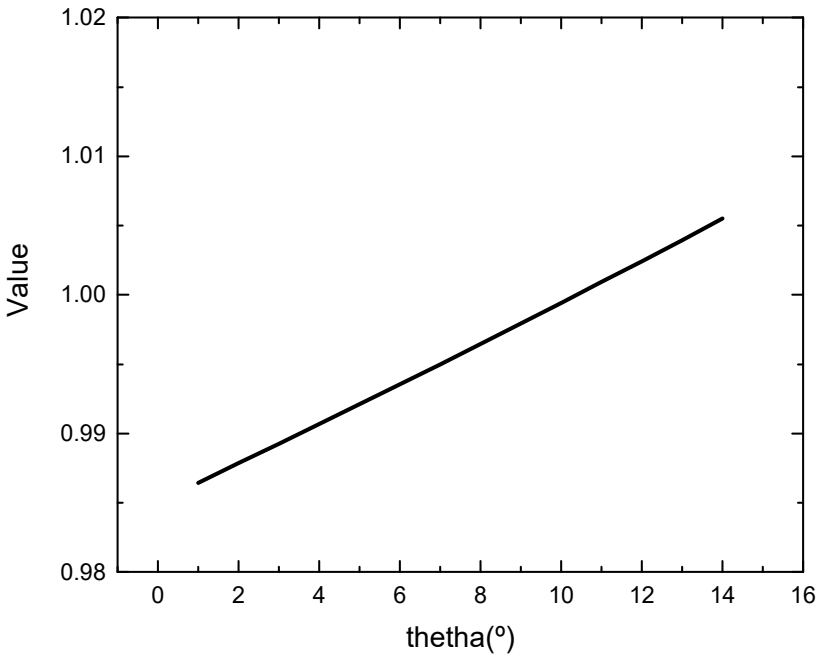
$$k_{dip} = \frac{1.8\mu_0 N}{\pi^3 n^2 D^2}\left(\frac{m^2}{d^3}\right)\frac{sin2(\theta-\alpha)}{cos(\theta_0+\theta)(\sin(\theta_0+\theta)-sin\theta_0)} \quad (3.21)$$



<그림 13> 피치각-쌍극자 에너지에 의한 스프링 상수 관계

자기 쌍극자 에너지와 관련된 스프링 상수 항은 10^{-6} 정도의 크기 이기 때문에 무시할 수 있는 항이 되겠다. 따라서 k_{eff}는 제만 에너지와 관련이 있다는 것을 알 수있다.

제만 에너지와 관련된 스프링 상수 항에 있는 삼각함수들 $\left(\frac{sin\alpha}{cos(\theta_0+\theta)(sin(\theta_0+\theta)-sin\theta_0)}\right)$만 따로 plot 해보면 다음과 같다.



<그림 14> 유효 스프링 상수 관계식에서
삼각함수 항이 가지는 값

제만 에너지에 의한 스프링 상수 항에있는 삼각 함수 들은 스프링이 운동하는 범위 내에서 대략 1의 값을 가지는 것을 알수 있다. 따라서 삼각함수와 관련된 항들을 1로 취급하면 유효 스프링 상수 k_{eff}는 오직 외부 자기장 H에 대한 함수로 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$k_{eff}(H) = k_0 + \left(\frac{Nm}{n^2\pi^2D^2}\right)H \tag{3.22}$$

유효 스프링 상수 k_{eff}는 스프링 설계 인자인 스프링의 감은 횟수 n, 스프링의 지름 D, 자성 나노입자의 개수 N, 자성 물질의 자화 값 m과 관련되어 있다는 결론을 내릴 수 있다.

제 4 장

실 험

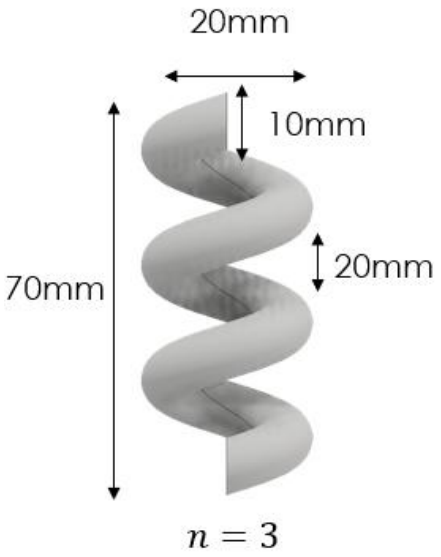
4.1. 실험 시편 제작

4.1.1. 스프링 몰드 제작

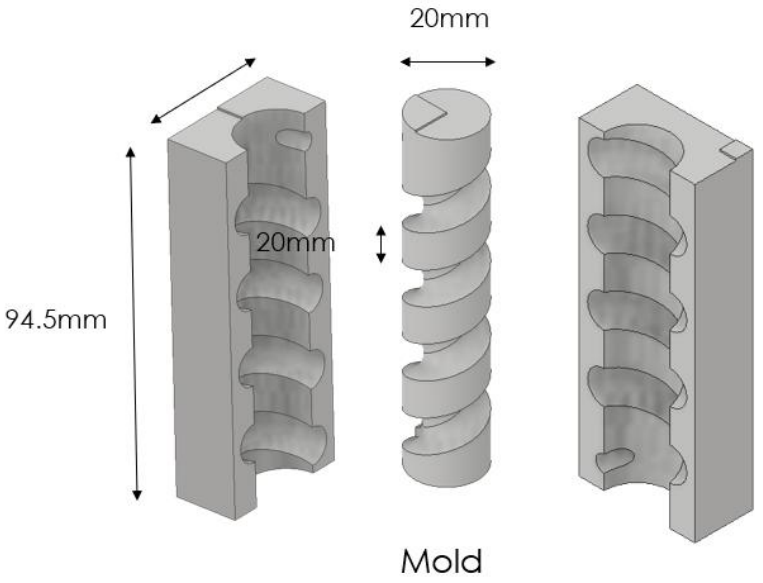
보통의 스프링은 탄성이 있는 금속 재질의 와이어를 꼬아서 제작한다. 그러나 앞서 언급하엿듯이 자성 물질은 세라믹 물질이기 때문에 보통의 스프링과 같은 방법으로 제조할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 몰드를 이용하여 스프링을 제작하였다.

몰드의 설계는 3장에서 설계한 스프링을 바탕으로 이를 본뜬 몰드를 3D CAD를 사용하여 도면을 그리고 3D printer를 이용하여 몰드를 인쇄하였다.

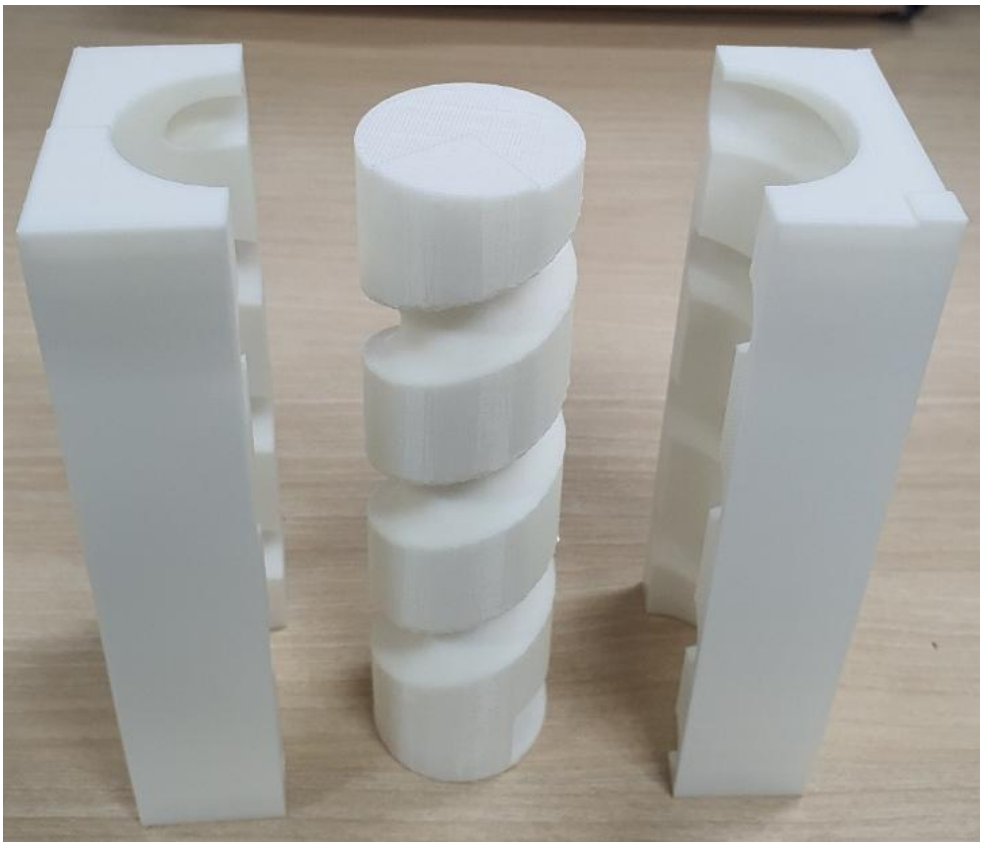
여기서 사용한 Tool은 CAD는 Autodesk의 Inventor를 3D printer로는 신도리코의 3D wox 2X 를 사용하였다. 신도리코사의 3D wox 2x 는 FFF(Fused Filament Fabrication)을 이용한 방식으로 필라멘트를 노즐에서 녹여서 적층을 하는 방식이다. 이 방식으로 인쇄를하면 해상도가 좋지는 않으나 시편으로 사용할 스프링의 제작에는 큰 무리가 없다고 판단하여 이 제품을 사용하여 인쇄하였다. [18]



<그림 15> 스프링 설계



<그림 16> 스프링 몰드 설계



<그림 17> 완성된 몰드

4.1.2. 나성 나노 탄성 복합체 제조

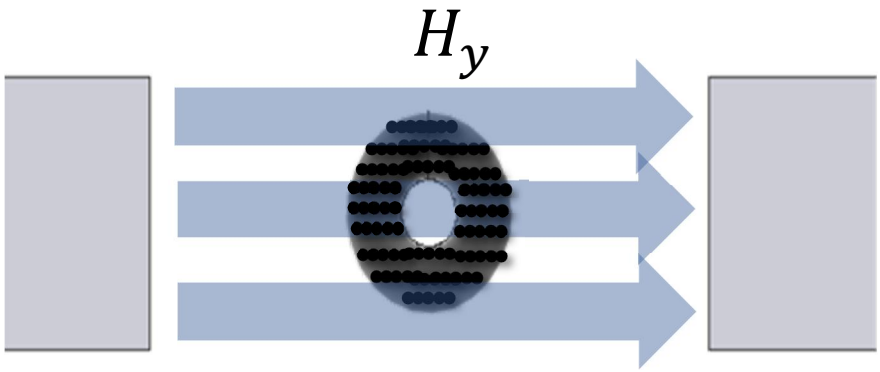
Xinuslab의 SH2115(shore A 경도 15)의 몰드용 실리콘 A와 B를 1:1로 혼합하고, 산화철 나노 입자 (Sigma Aldrich, 637106)를 20wt% 만큼 첨가하여 균일하게 섞이도록 하였다. 산화철 나노입자와 실리콘을 기계적으로 저어서 섞어 주었는데 이과정에서 복합체에 기포가 다량으로 유입될 수가 있으므로 섞음이 완료된 시료를 저압 챔버에 넣고 약 5분간 기포를 제거 해주었다. 기포를 제거하지 않고 실리콘을 만들면 구조 사이사이에 pore가 생겨 구조에 악영향을 미치고 추후 자성 입자 사슬을 형성 시킬 때도 방해 요소로 작용할 것이기 때문에 최대한 제거해 주어야 한다. [6, 19]

4.1.3. 자성 스프링 제조

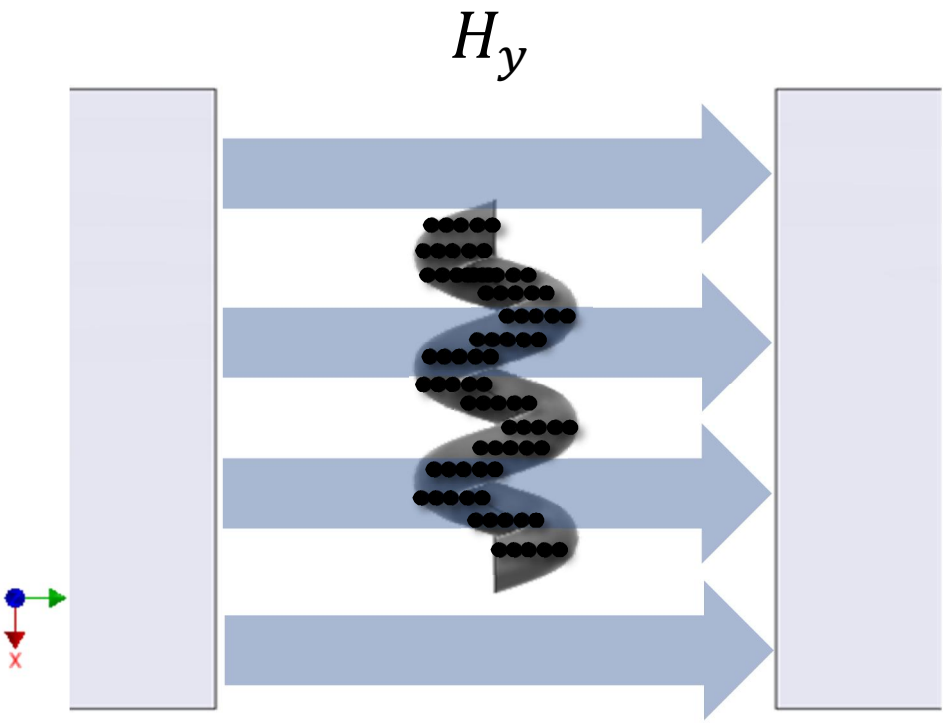
기포제거가 끝난 복합체를 주사기를 이용하여 몰드에 주입시켜 준다. 몰드에 미리 주입부 반대편에 공기 및 복합체가 빠져나갈수 있는 공간을 만들어 주어 몰드 내에 복합체가 꽉 찰 수 있도록 해주었다. 주입하는 과정에서도 복합체에 기포가 생길 수 있기 때문에 최대한 천천히 주입해준다.

몰드에 복합체의 주입이 완료되면 주입했던 구멍과 반대편의 구멍을 밀몽하여 복합체가 세어나가지 않도록 한다.

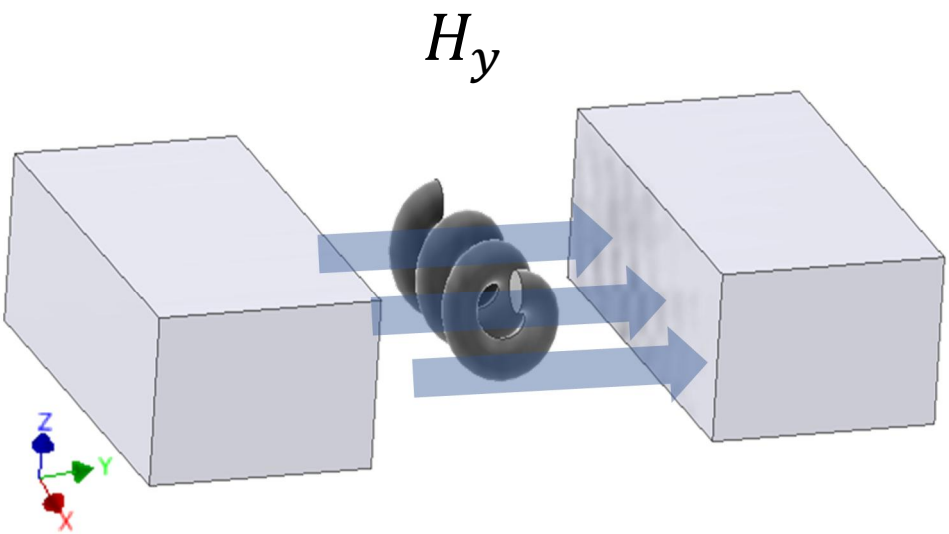
이 후 몰드에 스프링의 축방향으로 자기장을 인가하여 스프링에 자기 이방성이 심어지도록한다. SH2119 실리콘의 A타입과 B 타입을 혼합하면 촉매 반응으로 인해서 경화가 진행되게 되는데 48 시간 동안 50mT의 자기장을 인가하여 자성 입자 사슬이 형성 될 수 있도록 한다. [6, 19]



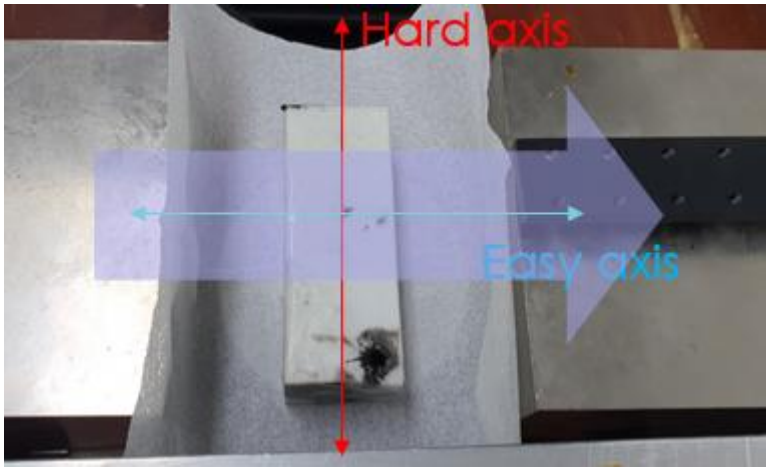
<그림 18> 자기장 속 몰드 정면도



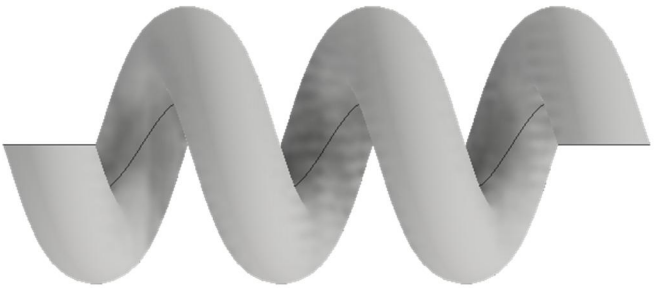
<그림 19> 자기장 속 몰드 상평면도



<그림 20> 자기장속 몰드 개념도



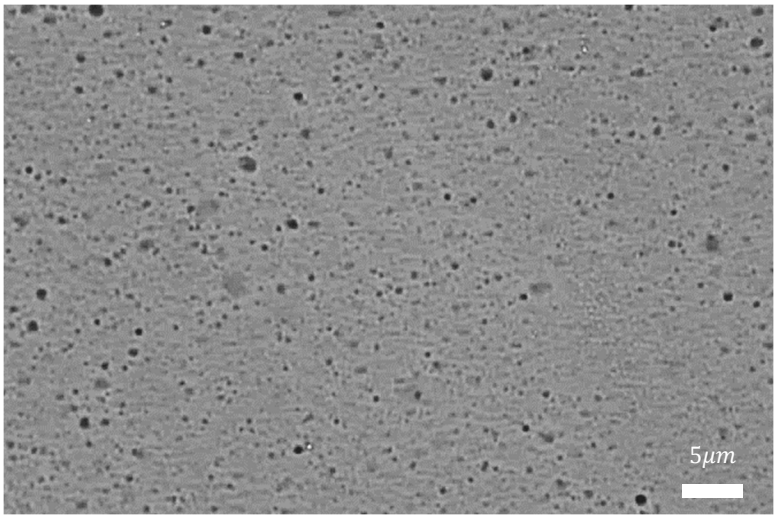
<그림 21> 실제 전자석 사이의 스프링 몰드



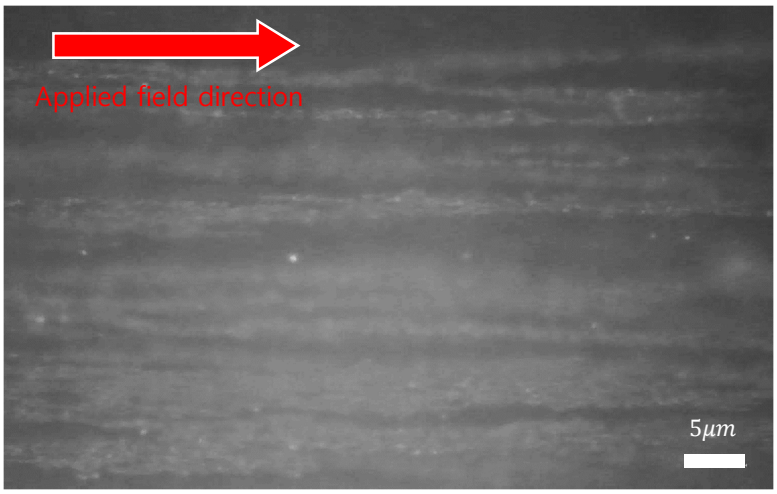
<그림 22> 완성된 자성 스프링

만약 제대로 사슬이 형성이 되었다면 탄성체 경화시 자기장을 가해준 스프링에서는 자성 나노 입자들이 사슬을 이루고 있을 것이다. 탄성체 경화시에 자기장을 가하지 않은 스프링도 대조군으로 제작하여 자기장이라는 변수에 의해서 사슬이 형성되었는지 광학 현미경으로 관찰 하였다.

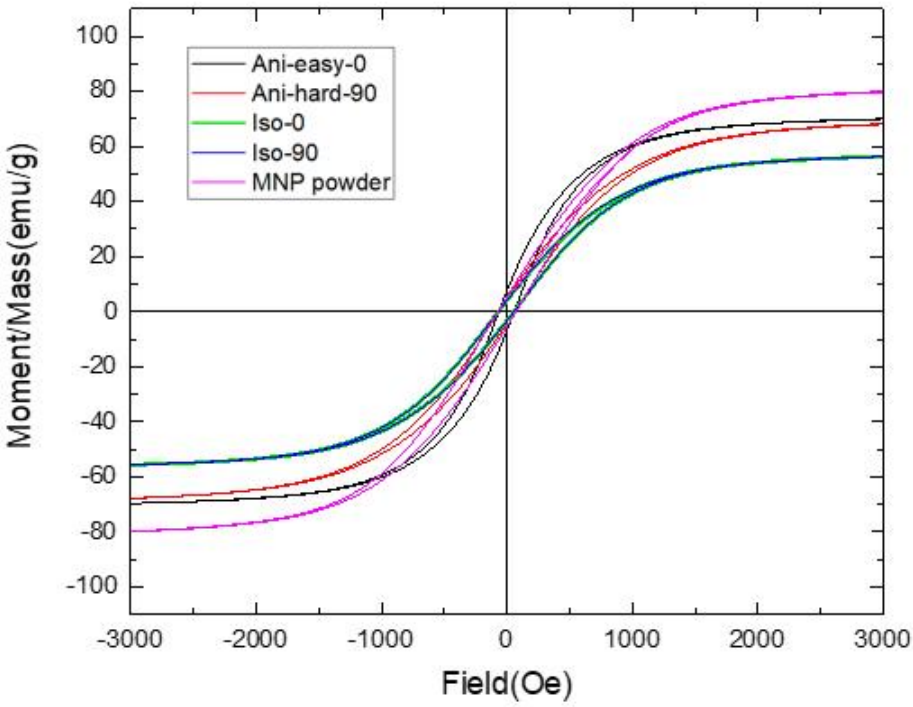
경화시 이방성을 만들어 주기위해 자기장을 가해주어 자성 나노 입자 사슬을 만들어 준 시료의 xy 단면을 현미경을으로 관찰한 사진은 <그림 24>와 같다. 자기장을 가해준 방향으로 사슬이 잘 형성되어 있는 것을 볼 수있다. 경화시에 자기장을 가해주지 않은 시료에서는 이러한 사슬을 관찰할 수가 없었다.

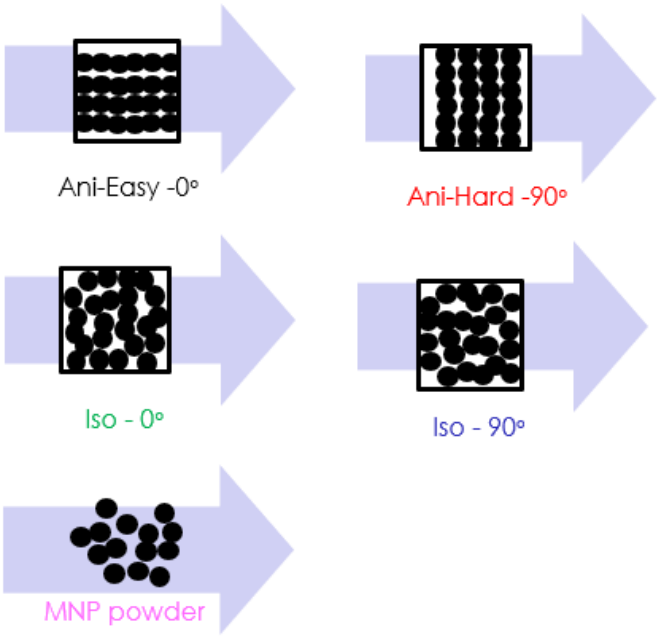


<그림 23> 경화시 자기장을 가해주지 않은
시료의 현미경 사진(등방성 스프링, xy 평면)



<그림 24> 경화시 자기장을 인가한
시료의 현미경 사진(이방성 스프링, xy 평면)





<그림 25> VSM 측정 결과

4.2. 유효 스프링 상수 측정

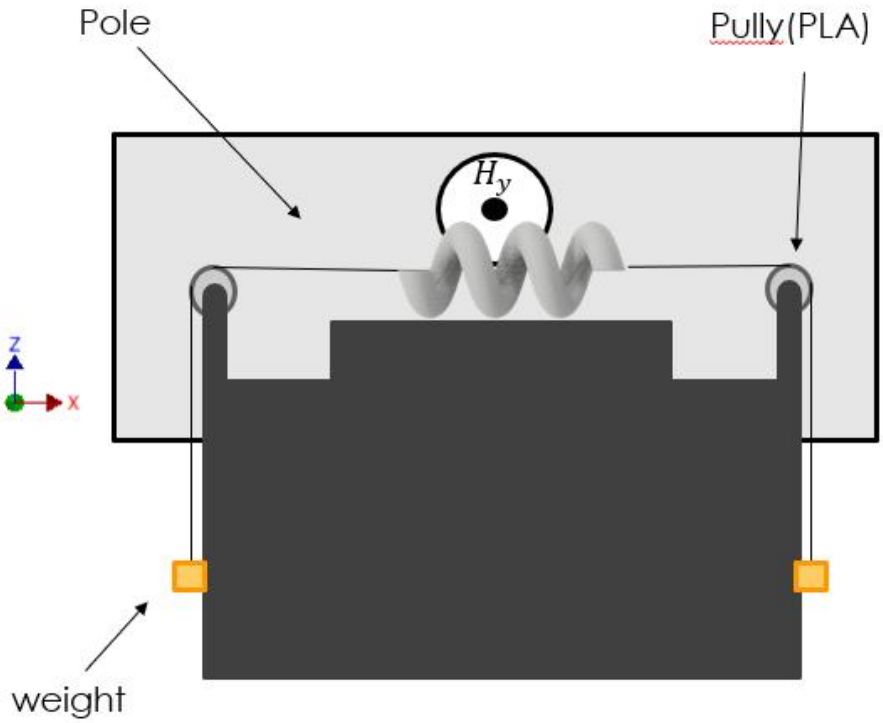
스프링이 훅의 법칙을 따른다고 가정하고 스프링의 축방향으로 힘을 가해 주고 늘어난 길이를 측정하면 스프링 상수를 측정 할 수있다. 이 실험에서는 스프링에 일정한 힘을 가해주기 위해서 추를 이용하여 스프링에 일정한 힘을 가해주었다.

<그림26>과 같이 일정한 자기장을 가해줄 수 있는 전자석의 극과 극 사이에 실험 장치를 설치하였다. 추의 무게를 이용하기 위해서 3D 프린터로 인쇄한 도르레를 설치하였다.

실험 절차는 다음과 같다.

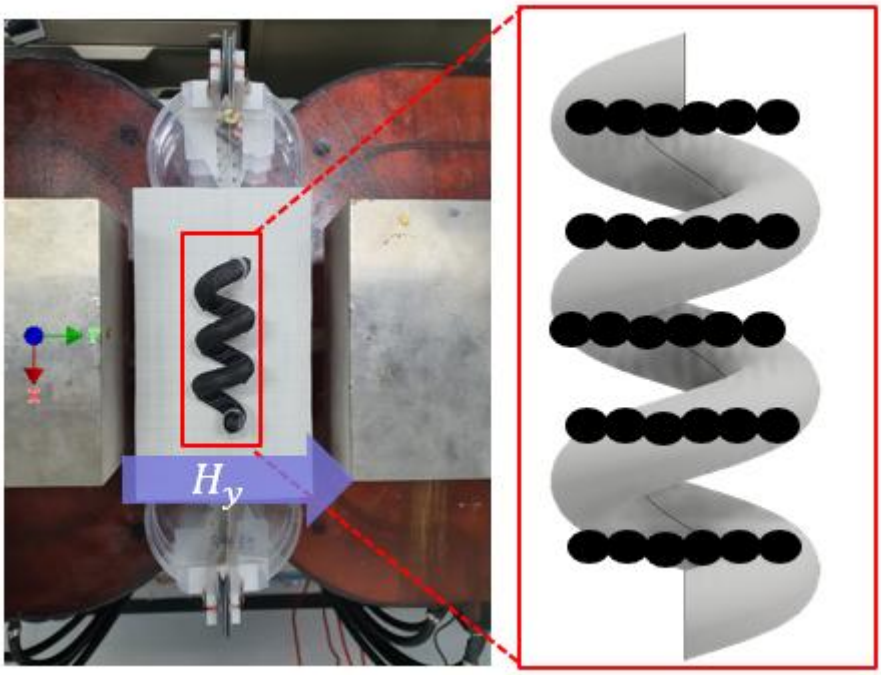
1. 일정한 자기장을 인가해준 후 추를 10g씩 추가하면서 늘어난 길이를 측정한다.
2. 측정이 끝나면 자성 스프링을 탈자 시켜준다.
3. 탈자가 완료되면 다른 세기의 자기장을 인가해주고 위의 과정을 반복한다.
4. 이렇게 해서 얻어진 데이터(F-x 관계)를 Linear fitting 을 통하여 기울기를 구하고 스프링 상수를 구한다.

여기서 자기장의 세기는 0mT에서 시작하여 25mT 단위로 올려가며 300mT 까지의 스프링 상수 값을 측정하였다.



- Weight : 10g, 20g, 30g, 40g
- H : 0 – 300mT, step size ~ 25mT

<그림 26> 실험 장치 개념도 (정면도)



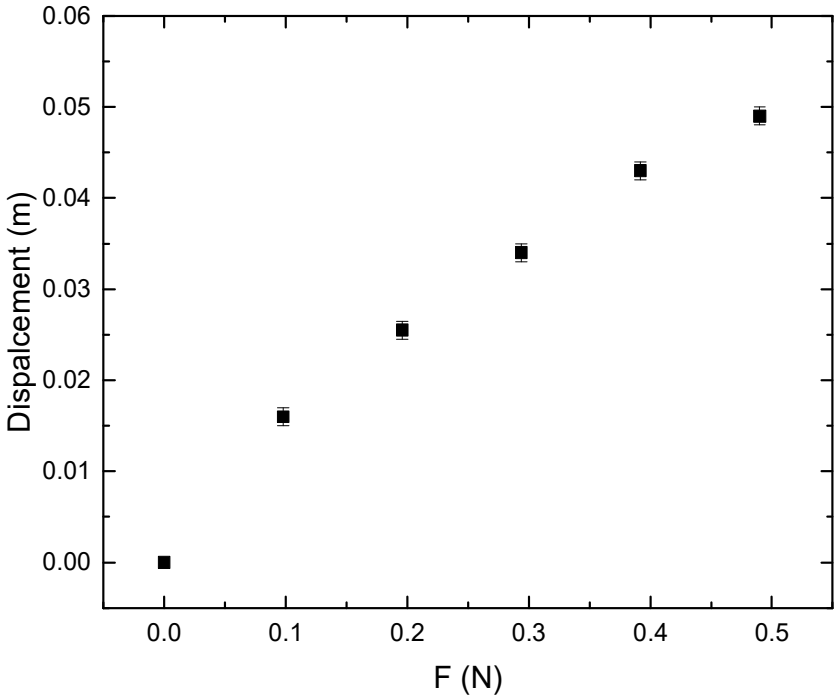
<그림 27> 위에서 내려다본 실험 장치

제 5 장

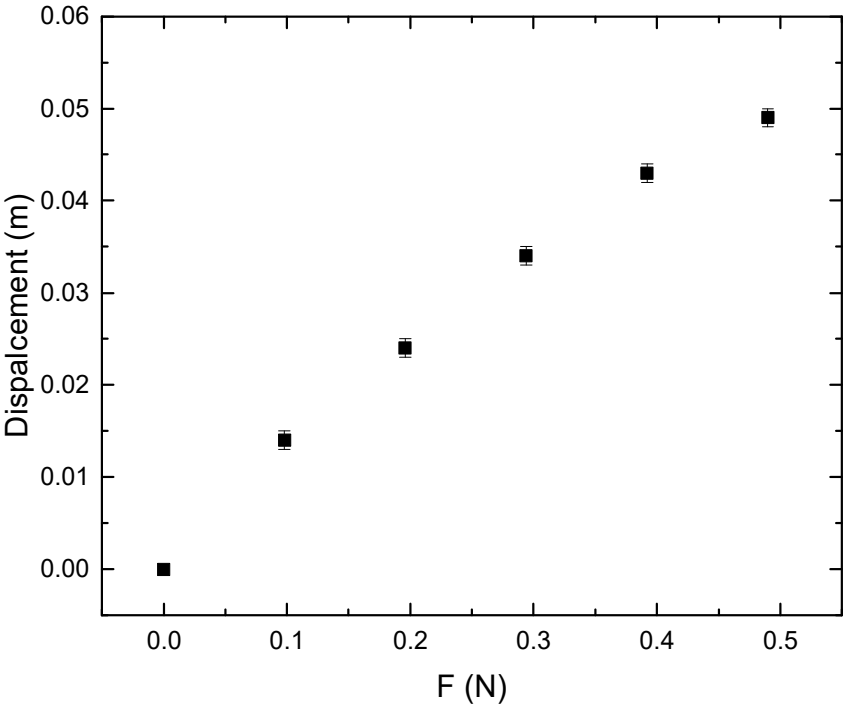
실험 결과 및 분석

5.1. 자성 스프링의 초기 거동

이방성 자기 스프링과 등방성의 자성 스프링의 자기장이 없을 때의 초기 거동을 알아 보았다.



<그림 28> 등방성 스프링의 초기거동(H=0)



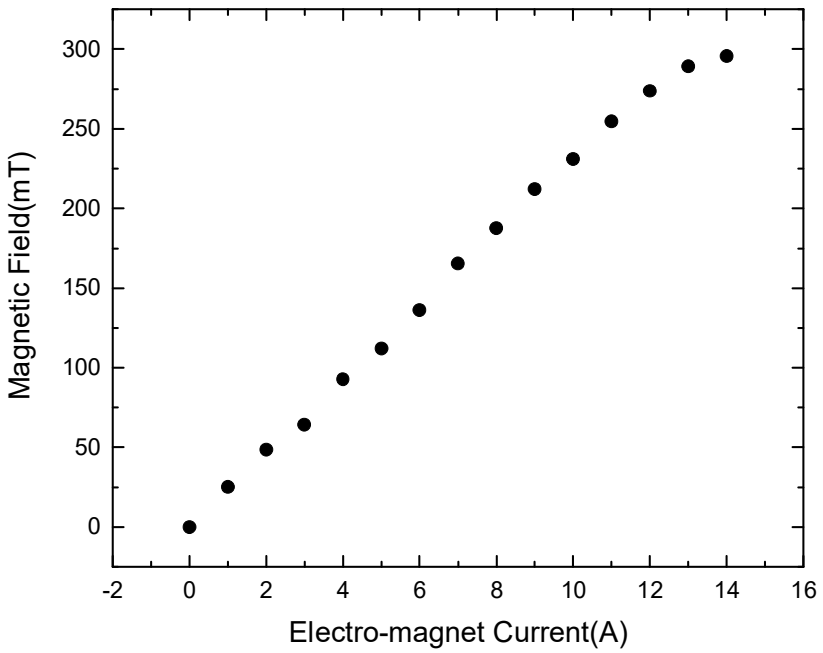
<그림 29> 이방성 스프링의 초기거동(H=0)

시편의 초기 거동을 관찰하면 F = kx 훅의 법칙에 따라서 linear 하게 거동하는 것 처럼 보인다. 그러나 힘이 증가할수록 displacement 가 감소하는 경향이 관찰 되는데 이는 실리콘 폴리머의 특성에서 기인하는 것으로 보인다. 그러나 0.4N까지 힘을 가해주었을 때 까지는 선형 거동을 한다고 가정하고 실험 데이터를 분석하였다.

0.4N까지의 피어슨 상관 계수를 구해보면 이방성 스프링과 등방성 스프링 각각 0.998, 0.992 의 상관 관계를 가지므로 이는 이 구간에서는 충분히 선형 거동한다고 가정할 수 있다. [20]

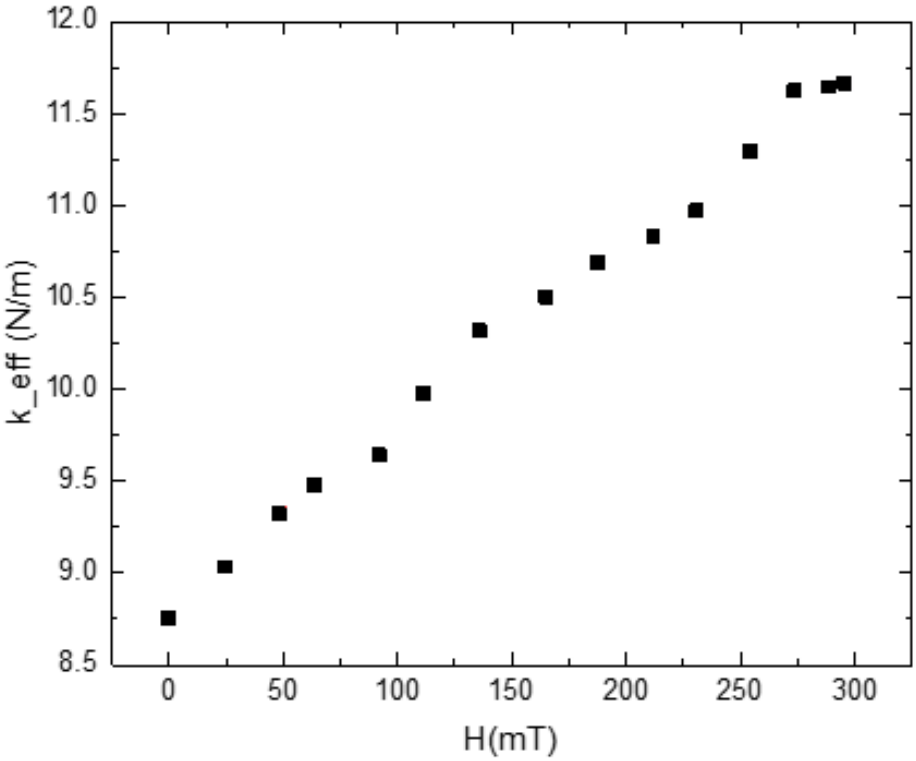
5.2. 자기장 인가에 따른 유효 스프링 상수 측정

전자석의 전류의 세기를 변화 시키면서 자기장의 변화를 주었다. 사용한 전자석은 전류 범위 0~15A에서 안정적인 자기장을 만들어 줄 수 있다. 실험에서는 전류의 세기를 1A 씩 증가 시키면서 자기장을 변화 시켜주었다. 다음 그림은 전류의 세기에 따른 자기장을 측정한 것이다. 1A의 전류 변화가 있을 때 25mT 의 자기장의 세기가 변한다.



<그림 30> 전자석에 흐르는 전류의 세기와
자기장의 세기

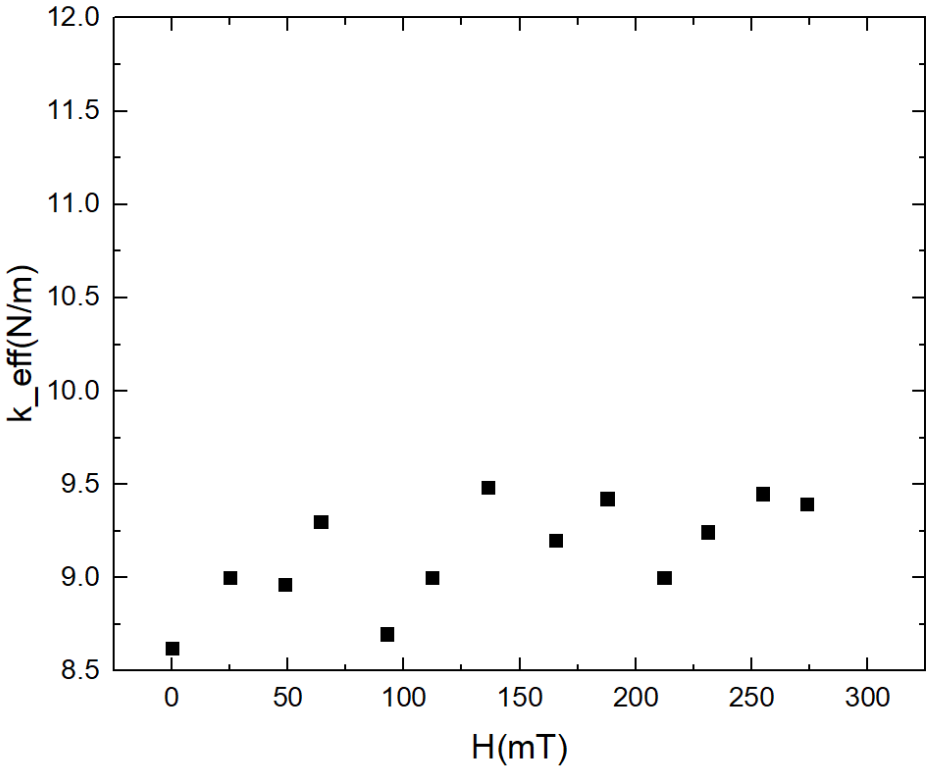
자기장에 따른 이방성 스프링의 k_{eff}의 측정 데이터는 다음과 같다.



<그림 31> 이방성 스프링의 자가징에 따른
유효 스프링 상수 변화

이방성 스프링은 자기장이 증가함에 따라서 선형 적으로 유효 스프링 상수가 증가하는 경향을 보인다.

다음은 등방성 스프링의 자기장의 세기에 따른 유효 스프링 상수의 변화이다.

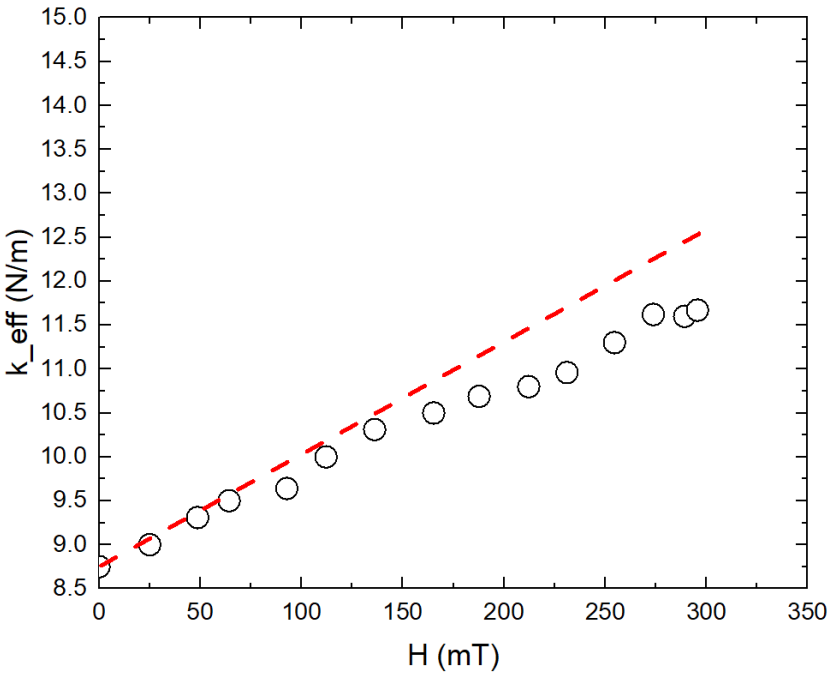


<그림 32> 등방성 스프링의 자가징에 따른
유효 스프링 상수 변화

등방성 스프링은 자기장의 변화와 유효 스프링 상수가 강한 상관 관계를 보이지 않았다.

5.3. 모델과 실험 결과의 비교

모델에 의하면 이번 실험에서 제조된 이방성 자성 스프링은 100mT 당 유효스프링 상수가 대략 1.4Nm 정도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 실험에서는 100mT 당 1Nm 정도 증가하는 경향의 보였다.



<그림 33> 이방성 스프링의 모델과 실제 시험 값의 비교

5.4. 결과 분석

이방성을 가진 자기 스프링의 자기장에 따른 유효 스프링 상수 변화는 모델을 통해 이론적으로 예측했던대로 외부 자기장의 세기와 선형적인 관계가 있었고 경향 또한 잘 맞아 떨어졌다.

그러나, 실제로 예측했던 모델에서는 100mT의 자가장 변화가 있으면 강성은 1.4정도로 변화해야 하는데 실제 실험결과는 모델과 완벽하게 일치 하지 않았다. 그 이유에 대해서 생각해 보면 크게 두 가지 이유를 생각할 수가 있다.

첫번째 이유로는 모델에서는 1줄의 산화철 나노 입자 사슬을 가정하여 산화철 나노 입자들이 일렬로 꼬리에 꼬리를 물고 있다고 가정하였다. 그러나 실제에서는 산화철 나노 입자 사슬이 1줄이 아니라 여러 개의 다발을 이루고 있으므로 모델보다 자기 이방성이 약화되어 이러한 결과가 나왔다고 생각할 수 있다. 그리고 실제로 시료 단면의 현미경 사진을 관찰해보면 입자가 모델처럼 꼬리에 꼬리를 물지 않고 덩어리 째 사슬을 이루고 있는 것을 관찰 할 수가 있는데 이 또한 자기 이방성을 약화 시키는 요인으로 작용할 수있다.

두번째로는 스프링 모션에서 오는 오차를 생각해 볼 수 있다. 모델은 스프링을 2D Rod라 가정 하였으나 실제로 스프링 모션에서는 구조의 비틀림이 발생한다. 구조의 비틀림이 발생하게 되면 자성 입자 사슬 또한 비틀림이 발생하게 되고 이는 입자 사이의 거리를 멀어지게

하여 입자 사이의 자기 쌍극자 상호작용을 감소 시킬 것이며 이방성을 감소 시키는 결과를 가져온다. 또한 입자 사슬들 사이에서도 꼬임이 발생하게 된다. 여기에서 실제 실험값과 모델과의 차이가 발생하였다고 할 수 있다.

제 6 장

결 론

본 연구에서는 코일 스프링 구조에 산화철 나노 입자 사슬을 이용하여 자기 이방성을 만들어 주었을 때, 자기장의 세기에 따라서 스프링의 강성이 어떻게 변화할지를 수식으로 예측하고, 실제 샘플을 제작하여 실험을 통해 모델을 검증하였다.

이론상의 예측을 위하여 자기 쌍극자 상호작용 에너지, 제만 에너지 , 스프링의 탄성 에너지로 의해 발생되는 토크의 평형 관계에 대해서 정리 하였고, 그 결과 이방성을 가진 자기 스프링의 유효 스프링 상수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$k_{eff}(H) = k_0 + \left(\frac{Nm}{n^2\pi^2D^2}\right)H$$

이방성을 가진 자기 스프링의 유효 스프링 상수는 외부 자기장의 세기와 선형적인 관계를 가지고 있었으며 자성 물질의 포화 자화 값, 코일 스프링의 지름, 코일을 감은 횟수, 자성 나노 입자의 총량을 조절하면 비례상수를 조절 할 수가 있다.

실제 실험결과에서도 자기장의 세기가 증가함에 따라 스프링의 강성이 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있었고 모델의 식과 실제

결과도 잘 맞아 떨어지는 것을 볼 수 있었다.

결과적으로 본 연구는 자기 이방성을 가진 나선형 자성 스프링을 외부자기장에 따라 강성을 변화시킬 수 있다는 것을 최초로 확인하였다. 이방성을 가진 자성 스프링의 가성을 외부 자기장으로 능동적으로 조절 해 줄 수있다면 다양한 기계 진동 시스템에서 응용할 수있으리라 생각한다. 특히 강성은 진동 시스템의 고유 진동수, 감쇠 상수와도 연관 되어 있기 때문에 이를 외부에서 능동적으로 조절 할 수 있다면 다양한 분야에서 응용 할 수 있으리라 기대할 수있다.

참고 문헌

[1] J. David Carlson, Wilfried Matthis, James R. Toscano, "Smart prosthetics based on magnetorheological fluids," Proc. SPIE 4332, Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2001.

[2] Blanc, L.; Delchambre, A.; Lambert, P. Flexible Medical Devices: Review of Controllable Stiffness Solutions. Actuators, 6, 23, 2017.

[3] Magnetorheology, Editor: Norman M Wereley, Royal Society of Chemistry, Cambridge 2014

[4] Mark R Jolly, J David Carlson and Beth C Muñoz, Smart Mater. Struct. 5 607, 1996.

[5] Liu, Taixiang & Xu, Yangguang, Magnetorheological Elastomers: Materials and Applications, 2019.

[6] Trivoramai Jiralerspong, Geonhee Bae, Jae-Hyeok Lee, and Sang-Koog Kim, ACS Nano 2020 14 (12), 17589-17596, 2020.

[7] Barkan Kavlicoglu, Bryce Wallis, Huseyin Sahin, Yanming

Liu, "Magnetorheological elastomer mount for shock and vibration isolation," Proc. SPIE 7977, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 79770Y, 2011.

[8] Cornell; Schwertmann, The Iron Oxides. New York: VCH. pp. 28–30. ISBN 978-3-527-28576-1, 1996.

[9] Nesse, William D, Introduction to mineralogy. New York: Oxford University Press., p. 361, 2000.

[10] Blaney, Lee, "Magnetite (Fe3O4): Properties, Synthesis, and Applications". The Lehigh Review. 15 (5), 2007.

[11] Li, Q., Kartikowati, C.W., Horie, S. et al. Correlation between particle size/domain structure and magnetic properties of highly crystalline Fe3O4 nanoparticles. Sci Rep 7, 9894, 2017.

[12] Cullity, B. D., & Graham, C. D, Introduction to magnetic materials. John Wiley & Sons, 2011

[13] Thompson, J. O. Hooke's law. Science, 64(1656), 298-299, 1926.

[14] Steven R. Schmid, Bernard J, Hamrock, Bo O.Jacobson, Fundamentals of Machine Elements 3/E, Chap. 17 spring, CRC Press, 2014.

[15] A. N. Gent, On the relation between indentation hardness and Young's modulus, Institution of Rubber Industry -- Transactions, 34, pp. 46–57, 1958.

[16] Bill Reuss, "Convert Durometer to Young's Modulus", https://www.cati.com/blog/2011/07/convert-durometer-to-youngs-modulus/, 2011.

[17] Goodno, B. J., & Gere, J., Statics and Mechanics of Materials. Cengage Learning, 2018.

[18] Hamzah, Hairul Hisham; Saiful, Arifin Shafiee; Aya, Abdalla; Patel, Bhavik Anil. "3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors: A mini review". Electrochemistry Communications. 96: 27–371, 2016.

[19] 배건희, "산화철 나노 입자 사슬을 이용한 프랙탈 구조 자기 액추에이터의 거동 제어 Motion Control of Fractal Structure Magnetic Actuator Embedded with Chained Iron Oxide Nanoparticles," Seoul National University, 2019.

[20] Weisstein, Eric W. "Statistical Correlation". mathworld.wolfram.com. Retrieved 22 August 2020.

[21] J. Kim, S. E. Chung, S. E. Choi, H. Lee, J. Kim, and S. Kwon, "Programming magnetic anisotropy in polymeric

microactuators," Nat. Mater, vol. 10, no. 10, pp. 747–752, 2011

[22] S. R. Mishra, M. D. Dickey, O. D. Velev, and J. B. Tracy, Selective and directional actuation of elastomer films using chained magnetic nanoparticles," Nanoscale, vol. 8, no. 3, pp. 1309–1313, 2016.

[23] 이제준, "현가장치 응용을 위한 자기 스프링에서의 자기적 힘과 기계적 힘에 대한 연구 Magnetic and mechanical forces in helical compression magnet spring for suspension application" Seoul National University, 2018.

[24] R. M. Erb, J. J. Martin, R. Soheilian, C. Pan, and J. R. Barber, "Actuating Soft Matter with Magnetic Torque," Adv. Funct. Mater., vol. 26, no. 22, pp. 3859–3880, 2016.

[25] M. Motornov et al., "Field-directed self-assembly with locking nanoparticles," Nano Lett., vol. 12, no. 7, pp. 3814–3820, 2012.

[26] Mørup, S.; Hansen, M. F.; Frandsen, C. Beilstein J. Nanotechnol., 1, 182–190, 2010.

[27] R. Zhao, Y. Kim, S. A. Chester, P. Sharma, and X. Zhao, "Mechanics of hard-magnetic soft materials," J. Mech. Phys. Solids, vol. 124, pp. 244–263, 2019

[28] A. Boczkowska and S. F. Awietjan, “Microstructure and Properties of Magnetorheological Elastomers,” Adv. Elastomers−technology, Prop. Appl., pp. 147–180, 2012.

[29] J. B. Tracy and T. M. Crawford, “Magnetic field−directed selfassembly of magnetic nanoparticles,” MRS Bull., vol. 38, no. 11, pp. 915–920, 2013.

[30] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, Phil. Trans. Roy. Soc., A240, 599, 1948.

[31] F. Barozzi, F. Gasparini, Fondamenti di Elettrotecnica: Elettromagnetismo, UTET Torino, 1989

[32] Hubert, A. and Schäfer, R. Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures, Springer−Verlag, 1998

[33] Abragam, A., The Principles of Nuclear Magnetism. Oxford University Press, Oxford, 1961.

[34] Malcolm H. Levitt, Spin Dynamics: Basics of Nuclear Magnetic Resonance. ISBN 0−471−48922−0, 2008.

[35] Magnetorheology: Advances and Applications, N.M. Wereley, Ed., Royal Society of Chemistry, RSC Smart Materials, Cambridge, UK, 2014.

[36] Sikulskyi, Stanislav, "Analytical and Numerical

Approaches on the Stiffness of Magnetorheological Fluid Filled Spring" Dissertations and Theses. 375, 2017.

[37] G Y Zhou and Z Y Jiang, Smart Mater. Struct. 13 309, 2004.

[38] Syam Thaer M. I., Muthalif Asan G. A., Salem Ayman M. H., Hejazi Ahmed A. A. 3D numerical modelling and analysis of a magnetorheological elastomer (MRE). Journal of Vibroengineering, Vol. 22, Issue 5, p. 1251−1265, 2020.

[39] Hanou Xu and Lin Ye, “Characterization and Simulation of Magnetorheological Elastomer Filled with Carbonyl Iron and NdFeB Particles under Uniaxial Tension, Compression, and Pure Shear Modes”, The University of Sydney, 2019.

[40] M. F. Hansen and S. Mørup, J. Magn. Magn. Mater., 184, L262–274. 1998.

[41] D. Kim, N. Lee, M. Park, B. H. Kim, K. An and T. Hyeon, J. Am. Chem. Soc., 131, 454–455, 2009.

[42] Xiao−min DONG, Miao YU, Chang−rong LIAO, Wei−min CHEN, “A new variable stiffness absorber based on magneto−rheological elastomer”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 19, Supplement 3, Pages s611−s615, 2009.

Abstract

Study on magnetic-field controllable spring constant in magnetic helical springs composed of magnetic-particle-polymer composites

Ji-Yeol Yoon

Department of Materials Science & Engineering

The Graduate School

Seoul National University

A typical mechanical vibration system made of an elastic material exhibits a unique vibrational tendency that is controlled by the balance between the restoring force and the damping force of a given system. Therefore, the dynamic properties of mechanical vibration systems are determined by material and environmental variables such as mass, spring constant and damping constant. In this study, we propose a new conceptual mechanical vibration system-element that combines magnetic and elastic materials.

In this system, the magnetic force acts as another key variable that determines the behavior of the mechanical vibration system. The magnetic anisotropy was used to control the mechanical properties of the spring. Since a magnet is a ceramic material compressed with magnetic material powder, it does not behave elastically, so the study was conducted by implanting a magnetic material into an elastic material. A magnetic composite mixed with iron oxide nanoparticles

and elastomers was injected into a spring mold made with a 3D printer to produce a spring. During the process, an external magnetic field(50mT) was applied in a direction perpendicular to the axis of the spring to form a chain of magnetic particles, thereby making the easy axis of magnetization.

If the spring is compressed or stretched while a magnetic field is applied, a torque is generated to align the magnetic particle chain with the axis by the Zeeman energy, which acts as a force that can externally control the behavior of the spring. This affects the stiffness of the spring, and as a result, it is possible to control the stiffness of the spring with an external magnetic field.

Keywords : Spring constant, Damping, Magnetic Anisotropy, Magnetic nano particle
Student Number : 2019-27183