

## 2<sup>nd</sup> MEMS Competition - Designing a Magnetic Actuator Mimicking Cnidocyte Ejecting Mechanism for Large Displacement

2012-11986 윤지상

2010-11878 전호웅

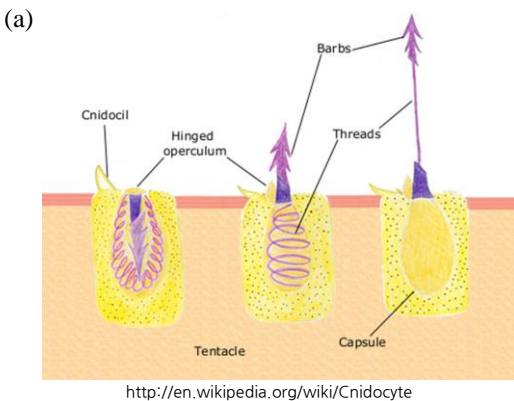
### 1. Introduction

자포동물문(cnidarian)이란 말미잘과 해파리 같은 자포류 동물을 일컫는 말이다. 이들은 자세포(cnidocyte)라는 분비 기관을 갖고 있는 독특한 세포를 가지고 있는데 이 발사체 형태를 갖고 있다. 자세포 종류중 독을 지니고 있는 가시세포(Nematocysts)라는 자세포가 존재하는데, 가시세포는 Figure 1a 에 나타난 것과 같이 발사하는 형태로 움직인다. 이 세포는 특정한 물리적 자극에 의해 발사된다.

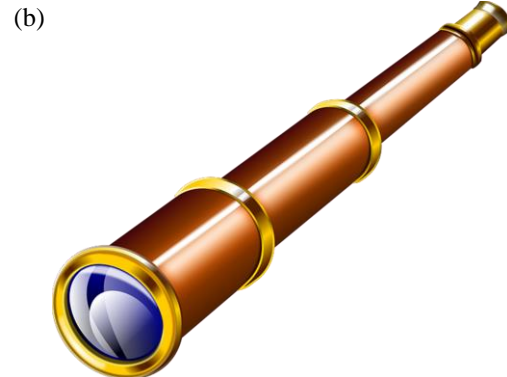
이번 실험에서는 이와 같은 가시세포를 모방한 Magnetic Actuator 를 제작해 보았다. 하지만 나선모양으로 따리를 틀고 있는 3 차원 구조물인

Threads (Figure 1a)를 2 차원 평면에 모방하는 것은 어렵기 때문에, Figure 1b 의 망원경의 구조에 착안하여 단순화한 Actuator 도안을 제작해 보았다.

Figure 1b 의 망원경은 접안 렌즈와 대물 렌즈를 기준으로 이 둘이 가까워지게 또는 멀어지게 길이를 조절할 수 있다. 이것을 도식화 한 것이 Figure 2 이다. Actuator 는 B field 가 만드는 자기장에 의해 Translational Force 를 받으면서 앞으로 전진하다가, 걸림쇠에 걸려서 정지한다. 이 과정이 반복된다보면 결국 Figure 1b 의 망원경과 같이 길게 펴진 모양을 갖게 된다.

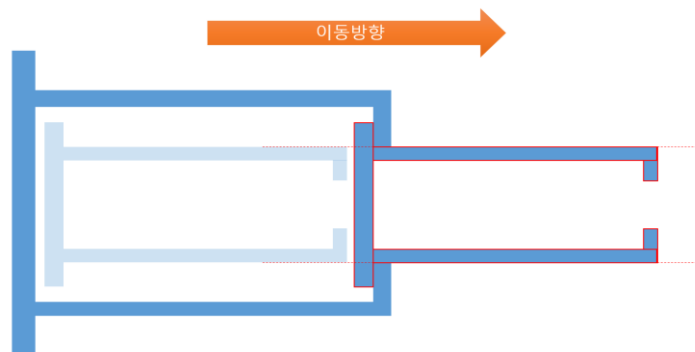


<http://en.wikipedia.org/wiki/Cnidocyte>



[http://pixabay.com/p-158156/?no\\_redirect](http://pixabay.com/p-158156/?no_redirect)

**Figure 1** (a) Nematocysts 에서 축수가 발사되는 원리이다. 물리적 자극이 주어지면 작살의 구조물이 세포에서 발사된다. (b) 단순화한 Actuator 의 모태가 된 망원경의 사진이다. 자석에 의한 translational force 를 받아서 정상상태에 도달하면 이것과 비슷한 모습을 취할 것으로 생각된다.



2.

**Figure 2** Magnetic Actuator 가 움직이는 모습을 나타낸 모식도이다.

## Design Specification

이번 실험에 사용할 Magnetic Actuator의 Mask는 Figure 3a 과 같고, 이 구조물의 규격은 Table 1 에 나타나있다. 모식도에서 가장 큰  $\pi$  모양의 구조물, 즉 Frame 0 은 고정되어있다. 이것을 기준으로 삼아 그 안에 Figure 3b 와 같은  $\pi$  모양의 단위 구조물들이 채워져 있고, 각 단위 구조물들은 서로  $15\ \mu\text{m}$  씩 떨어져있다.  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  영역 안에 최대한 많은 단위 구조물들을 채우기 위해서, 폭은 모두  $15\ \mu\text{m}$ 로 설계했다. 이렇게 하여 총 15 개의 구조체를 만들 수 있었다. 단위 구조물들이 이탈하지 않도록  $\pi$  모양의 단위체 끝에는 걸림쇠가 존재한다.

Figure 3a를 보면 가장 안쪽 구조물만 T 모양으로 만들었는데, 이는 Volume을 최대화하여 Translational Force를 최대한 많이 받도록 한 것이다.

## 3. Calculation

이번 실험에서는 Superparamagnetism(SPM)을 갖는 나노입자를 이용하여 Magnetic Actuator를 제작하였다. 이 입자는 자기장을 가해주면 자기장 축에 나란히 배열되게 되는데, 이를 UV를 통해 굳혀 Nanoparticle Chain을 만들었다. 자기장을 가해줄 경우 해당 구조물에는 Chain Rotation에 의한 Torque와 각 Nanoparticle이 Dipole을 띠면서 생기는 Translational Force가 생긴다. 이번에 만든 Magnetic Actuator는 Nanoparticle Chain이 자기장 축과 나란하게 형성되어있기 때문에 Chain Rotation에 의한 Torque는 존재하지 않고 오직 Translational Force만 받는다.

### 3.1 Major Driving Force

#### A. Translational Force

CNC 입자는 자기장 안에서 자화되기 때문에, 자기장에 의한 힘을 받는다. 이는 Translational Force 과 연결되고 이 힘이 본 Magnetic Actuator 를 움직이는 주 원동력이라 할 수 있다. Translational Force 는 식 (1)과 같이 구할 수 있고, 식에 사용된 각 Parameter 는 Table 2 와 같다. 최종적으로 각  $\pi$ 모양의 구조물들이 받는 힘을 각각 구하면 Table 1 의 Translational Force 와 같다.

$$F_m = \frac{V_p \chi_p (B \cdot \nabla) B}{\mu_0} = \frac{(LDW) \chi_p (B \cdot \nabla) B}{\mu_0}. \quad (1)$$

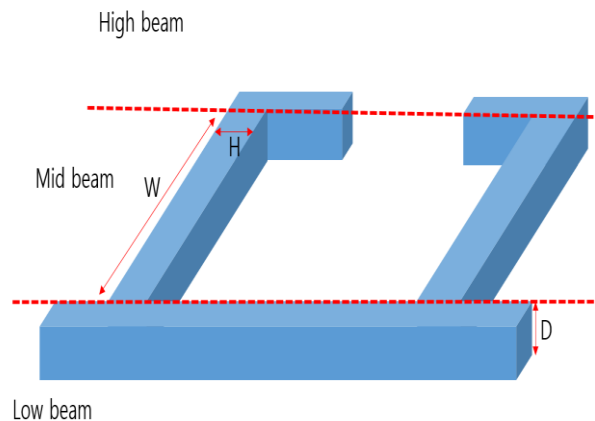
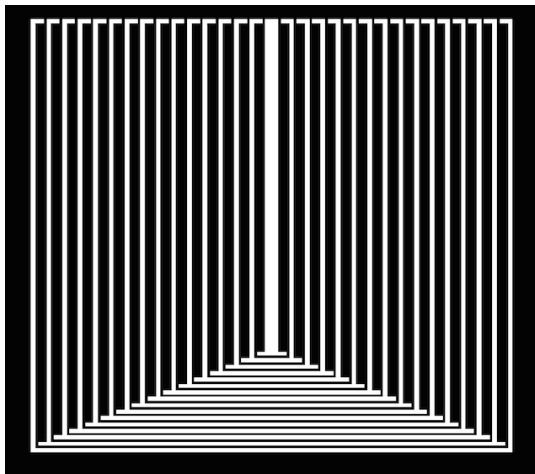
#### 3.2 Other Forces

Magnetic Actuator는 액체 속에서 움직이기 때문에 액체의 점도에 의해 Drag Force가 생긴다. 또한 이 구조물이 제대로 동작하려면 단위 구조에 작용하는 힘에 의해 걸림쇠가 휘거나 파손되어 단위 구조물이 빠져나가지 않는지 확인해야한다.

#### A. Drag Force

Magnetic Actuator 는 액체 속에서 움직이고 있다. 따라서 Actuator 가 움직이면서 주변 액체를 밀어내기 때문에 Shear Stress 가 발생한다. 액체의 정확한 Shear Rate 는 모르기 때문에 물( $H_2O$ )이라고 가정하고 계산하였다. 사용한 CNC 입자의 밀도 역시 알 수 없어서 물의 밀도와 같다고 생각하고 계산하였다. 구조물이 움직이면서 생기는 유체의 흐름을 단순화 하기위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- Isothermal, incompressible, Newtonian fluid 이고 laminar flow가 발생한다



**Figure 3** (a) 이번 실험을 위해 디자인한 Magnetic Actuator의 Mask이다. (b) Magnetic Actuator의  $\pi$  모양의 단위 구조물을 나타낸 그림이다. 부피 계산을 위해 구조물을 High Beam, Mid Beam, Low Beam 세 파트로

**Table 1. Specification**

Frame No.	D	Low Beam ( $\mu\text{m}$ )		Mid Beam ( $\mu\text{m}$ )		High Beam ( $\mu\text{m}$ )		Total Volume ( $\text{m}^3$ )	Translational Force (N)	Cumulative Force (N)
		W	H	W	H	W	H			
0	30	15	2000	1970	15	15	50	$2.718 \times 10^{-12}$	$1.335 \times 10^{-7}$	$1.699 \times 10^{-6}$
1	30	15	1940	1940	15	15	50	$2.664 \times 10^{-12}$	$1.309 \times 10^{-7}$	$1.566 \times 10^{-6}$
2	30	15	1810	1910	15	15	50	$2.579 \times 10^{-12}$	$1.267 \times 10^{-7}$	$1.435 \times 10^{-6}$
3	30	15	1680	1880	15	15	50	$2.493 \times 10^{-12}$	$1.225 \times 10^{-7}$	$1.308 \times 10^{-6}$
4	30	15	1550	1850	15	15	50	$2.408 \times 10^{-12}$	$1.183 \times 10^{-7}$	$1.186 \times 10^{-6}$
5	30	15	1420	1820	15	15	50	$2.322 \times 10^{-12}$	$1.141 \times 10^{-7}$	$1.067 \times 10^{-6}$
6	30	15	1290	1790	15	15	50	$2.237 \times 10^{-12}$	$1.099 \times 10^{-7}$	$9.534 \times 10^{-7}$
7	30	15	1160	1760	15	15	50	$2.151 \times 10^{-12}$	$1.057 \times 10^{-7}$	$8.435 \times 10^{-7}$
8	30	15	1030	1730	15	15	50	$2.066 \times 10^{-12}$	$1.015 \times 10^{-7}$	$7.378 \times 10^{-7}$
9	30	15	900	1700	15	15	50	$1.980 \times 10^{-12}$	$9.727 \times 10^{-8}$	$6.364 \times 10^{-7}$
10	30	15	770	1670	15	15	50	$1.895 \times 10^{-12}$	$9.307 \times 10^{-8}$	$5.391 \times 10^{-7}$
11	30	15	640	1640	15	15	50	$1.809 \times 10^{-12}$	$8.887 \times 10^{-8}$	$4.460 \times 10^{-7}$
12	30	15	510	1610	15	15	50	$1.724 \times 10^{-12}$	$8.467 \times 10^{-8}$	$3.572 \times 10^{-7}$
13	30	15	380	1580	15	15	50	$1.638 \times 10^{-12}$	$8.047 \times 10^{-8}$	$2.725 \times 10^{-7}$
14	30	15	250	1550	15	15	50	$1.553 \times 10^{-12}$	$7.627 \times 10^{-8}$	$1.920 \times 10^{-7}$
15	30	15	120	1535	50	0	0	$2.357 \times 10^{-12}$	$1.158 \times 10^{-7}$	$1.158 \times 10^{-7}$

**Table 2. Parameters.**

Parameter	Value	Scale
$\chi$ (Initial Mass Susceptibility)	0.0506	-
B (Magnetic Field)	0.1	T
$\nabla B$	12.2	T/m
$\mu_0$ (Permeability)	$1.26 \times 10^{-6}$	$\text{N/A}^2$
R (Particle Radius)	$0.8 \times 10^{-7}$	m
V (Volume)	$2.14 \times 10^{-21}$	$\text{m}^3$
$\rho$ (Density of Actuator)	1000	$\text{kg/m}^3$
$\mu$ (Viscosity of Liquid at 20°C)	1.002	$\text{mPa}\cdot\text{s}$

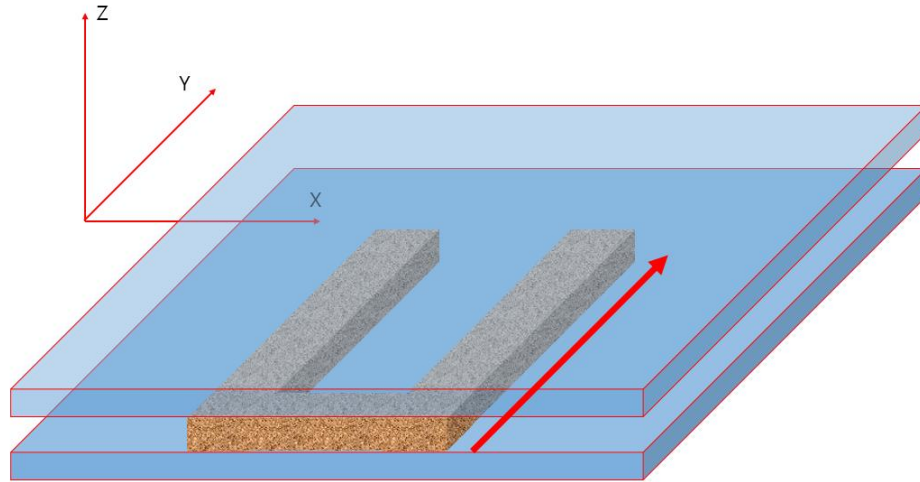
- Z축 방향에 따라 Y축 방향의 속도가 변하지 않는다. ( $\frac{\partial}{\partial z} = 0$ )
- Actuator의 위와 아랫면은 슬라이드 글라스에 밀착되어 있기 때문에 Sheer Stress는 오직 Actuator의 옆면에서만 발생한다.
- 모서리에서 발생하는 Turbulence는 무시한다.
- $\pi$  모양의 걸림쇠에 걸리는 부분과 걸림쇠는 구조물의 크기에 비해 작기 때문에 무시하였다.

- Reynolds Number  $R_e$  는 Drag Equation을 적용할 수 있을 정도로 충분히 크다.

위의 가정을 바탕으로 Drag Equation (2)을 적용하면 Appendix I 과 같은 결과가 나온다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (2)$$

여기서  $F_D$ 는 Drag Force,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $v$ 는 유체에 대한 물체의 상대 속도,  $A$  는 유체의 저항을 받는 면적 그리고  $C_D$  는 Drag Coefficient 이다. 물의 밀도는



**Figure 4** 유체와 Magnetic Actuator 의 흐름을 나타낸 모식도.

20°C에서  $998.207 \text{ kg/m}^3$  이고 [2] Drag Coefficient 는 단면적이 Cube 모양에 대한 값인 1.05 이다. [3]

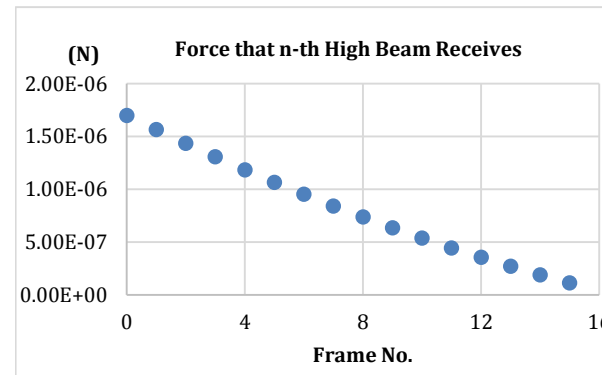
#### B. 걸림쇠가 휘는 정도

본 Magnetic Actuator는 매우 얇은 구조물이기 때문에 쉽게 휘어서 내부의 구조물이 흩어지는 현상이 일어날 수 있다. 따라서 구조물의 휘는 정도를 생각할 필요가 있다. 평형상태에서 걸림쇠에는 자기장에 의해  $\pi$  모양의 구조물이 미치는 힘과 탄성력이 평형을 이루고 있다. 걸림쇠의 모양이 Cantilever 와 비슷하기 때문에 걸림쇠가 휘어지는 정도는 Small Deflection Theory 를 이용하여 구했다. 계산을 하기위해 사용한 가정은 다음과 같다.

- $\pi$  모양의 구조물과 걸림쇠는 포개어져 있기 때문에 힘이 걸림쇠 끝에 집중되어 작용하진 않지만 계산의 편의상 힘이 걸림쇠 끝에 집중되어 작용한다고 가정하였다.
- 걸림쇠가 휘는 때 생기는 Displacement는 걸림쇠 자체의 길이( $35 \mu\text{m}$ )보다 매우 작다
- Pure Bending이 일어나기 때문에 걸림쇠가 휘어도 Mid Beam은 항상 걸림쇠와 직교해있다.
- Shear stress는 무시할 수 있다.

걸림쇠의 길이를 L 이라 하면 Tip Deflection 은 다음과 같다. (단, E: Elastic Modulus, F: Force, W: Depth of Actuator, H: Width of Actuator)

$$Y(L) = \frac{4FL^3}{EWH^3}. \quad (5)$$



**Figure 5** Frame Number 에 따른 누적 힘

Figure 5 그래프를 보면 처음으로 걸림쇠에 걸리는  $\pi$  모양의 구조물(Frame No. 1)이 가장 많은 힘을 받을 것이다. 따라서 이 경우에 대해서만 안정성이 증명되면 다른곳은 첫 번째 걸림쇠가 받는 힘보다 더 적은 양의 힘이 가해지므로 자동으로 안정성이 보장된다. 그렇기 때문에 우선 첫 번째 걸림쇠에 작용하는 힘과 그에 따른 Displacement 를 계산했다. 계산 결과는 약  $0.289 \mu\text{m}$  였고 이것이 걸림쇠가 힘에 따라 발생하는 Maximum Displacement 이다. 이는 Actuator Width 의 1/50배에 해당하는 작은 값이다. 따라서 구조물이 휘어서 단위 구조물이 흩어지는 현상은 고려할 필요 없다.

### 3.3 Maximum Displacement

본 구조물은 첫 번째  $\pi$  모양의 구조물부터 움직인다. 또한 이것이 걸림쇠에 걸리기 때문에 걸림쇠의 길이를 뺀 만큼  $\pi$  모양의 단위체가 전진한다. 이를 수식화하면 다음과 같다.

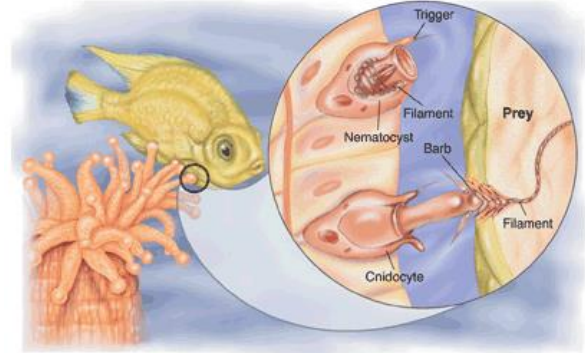
$$15 + \sum_{n=1}^{15}(1970 - 30n) = 25965\mu\text{m}. \quad (6)$$

따라서 본 Magnetic Actuator 는 총 25.965mm의 Maximum Displacement 를 얻을 수 있다.

### 4. Conclusion

본 연구에서는 Supermagnetic CNC Particle 을 이용한 Magnetic Actuator 을 설계하고 제작하였다.  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  안에서 만든 Magnetic Actuator 를 이용하여 변위를 크게 만들어야하기 때문에 지정된 영역 안에서 움직이는 구조물보다는 발사체같이 한 방향으로 전진할 수 있는 구조물이 적합하다고 생각했다. 따라서 본 실험에서는 자세포(Cnidocyte)를 2 차원으로 단순화시킨 모형을 만들어서 magnetic actuator 의 변위를 최대화 하려는 시도를 해보았다. 결과적으로 본 Magnetic Actuator 에 작용하는 Translational Force 의 크기는 구조물을 이동시키기에 충분했고, 이동시 유체와 구조물 사이에 발생하는 Drag Force 는 작았으며, 걸림쇠의 Tip Deflection 은 무시할 수 있을 정도로 작았기 때문에 Actuator 가 분리되는 문제는 없었다.

본 Magnetic Actuator 는 제한된 영역에서 Translational Force 만을 가지고도 충분히 큰 변위를 얻을 수 있음을 보여주었다. 또한 마지막 Frame 구조체의 부피를 극대화하여 Translational Force 를 최대한 크게 받을 수 있도록 설계하였다. 하지만 이 구조물은 어디까지나 모태가 된 자세포의 단순화된 모형이라는 한계를 가지고 있다. 또한 Chain Rotation 에 의한 Torque 를 사용하지 못했다는 점도 이번 연구의 한계점이다. 하지만 자세포의 가장 단순화된 모형이 성공적으로 움직일 수 있음을 알았기 때문에 여기서 조금 변형을 가해 실제 Figure 1a 의 Barbs 와 Threads 에 해당하는 부분을 추가한 Magnetic Actuator 를 생각해 볼 수 있다. 이런식으로 문제점을 개선한다면, Maximum Displacement 가 훨씬 더 증가할 수 있을 뿐만 아니라 응용 범위도 넓어질 것이다. 예를 들어 Figure 6 에서 나타난 자세포의 원리를 이용해 특정 국소부위에 약물을 퍼뜨릴 수 있는 의학용 장비에 사용할 수 있을 것으로 예상된다.



<http://www.jayreimer.com/TEXTBOOK/ebook/products/0-13-115516-4/sb4255f1.png>

**Figure 6** 자세포(Cnidocyte)가 발사한 촉수는 생물 표피 뿐만 아니라 진피 내부까지도 뚫고 들어갈 수 있다.

### References

- [1] Stanley Middleman, An Introduction to fluid dynamics : principles of analysis and design 2<sup>nd</sup> ed., 1998, Wiley, pp. 144, 157~164
- [2] Wikipedia contributors, "Density", Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Density> (Accessed March 30, 2015)
- [3] Wikipedia contributors, "Drag Coefficient", Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Drag\\_coefficient](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient) (Accessed July 8, 2015)

## Appendix I

