

# 대변위-고정밀 위치제어를 위한 자기변형

## self-moving cell 선형모터

°두 재 균\*, 김 재 환\*\*, 최 승 복\*\*, 박 홍 근\*\*\*

### Magnostrictive self-moving cell linear motor for displacement control with large force and high resolution

°Jae-Kyun Doo\*, Jae-Hwan Kim\*\*, Seung-Bok Choi\*\* and Hong-Geun Park\*\*\*

#### ABSTRACT

The design and test of an magnetostrictive linear motor(MLM) that operates based on self-moving cell concept is presented. The moving cell is composed of Terfenol-D linear actuator and a ring structure, and a cell train is constructed by connecting two cells in series. Since this motor uses the stroke of Terfenol-D actuators and friction force of the cells, it can essentially produce long stroke and large force. The overall performance of the MLM was measured in terms of speed and force. The pushing force is directly related with the friction force. This work is a proof-of-concept stage and investigation is necessary for realistic application.

#### 1. 서론

인치웜 형식(inchworm-type)의 자기변형 선형모터는 인치웜 동작을 형상화한 모터이다. 인치웜 형식의 선형모터는 높은 정밀도와 긴 거리를 운전할 수 있기 때문에 목표물의 이동 또는 자세 제어에 폭 넓게 적용되며 지속적으로 발전해왔다. 그러나 이들 대부분은 가진기 자체의 원천적인 단점인 작은 변형량, 낮은 속도 그리고 clamping device와 push device가 서로 분리되어 있어서 구조적으로 복잡한 단점이 있다. 그리고 충분하지 못한 clamping force는 성능이 저하된 push force와 속도를 가지고 거동하기 때문에 한정된 부분에서 이용되고 있는 것이 현실이다. 지능재료(smart material)를 이용한 인치웜 모터는 앞으로 광학, 반도체 산업 그리고 항공우주산업에서 필연적으로 요구되어지는 초정밀 위치제어부분에 광범위하게 적용되어 지리라 생각한다. 이 논문에서는 지능재료 중 큰 힘과 큰 변형량을 가진 자왜재료(Terfenol-D)를 이용한 self-moving cell 선형모터를 제안하였다.

#### 2. 자기변형 self-moving cell 선형모터

큰 힘을 가지고 긴 거리를 고정밀도를 이동하는 선형모터를 설계하기 위하여 self-moving cell 개념을 제안하였다. 이 개념은 clamping device와 push device가 서로 일체화된 것을 특징으로 한다. 제안되어진 선형모터는 2개의 cell이 일렬로 연결되어 있으며 안내대(guideway)에 삽입되어진 상태로 움직인 각각의 cell은 Terfenol-D 선형 가진기와 ring 모양의 셸(shell)로 구성되어 있다.

##### 2.1 작동원리

Fig.1은 자기변형 선형모터의 작동원리를 a)~d) 총 4 단계에 걸쳐 설명한 그림이다. a)단계에서는 선형모터 cell들을 구성하는 2개의 셸이 안내대의 벽면(wall)과 간섭 치수(interference dimension)를 형성함으로써 clamping force가 생성된다. clamping force는 셸과 벽면(wall)사이의 간섭 치수와 clamping cell의 수에 크게 의존한다. a)그림에서 볼 수 있듯이 clamping force가 front/rear cell 모두에서 형성되어 기존의 다른 선형모터에 비하여 봤을 때 정지 상태를 유지하기 위한 추가적인 전력

\* : 인하 대학교 대학원

\*\* : 인하 대학교 기계공학과

\*\*\* : 부천 공업 고등학교

이 필요 없게 된다. 이것이 바로 본 논문에서 제안한 self-moving cell 선형모터의 장점 중 하나이다.

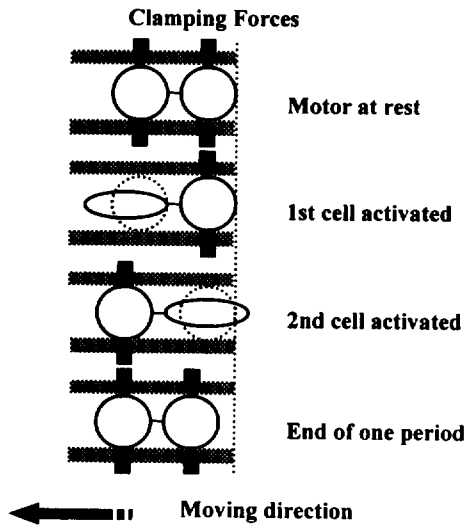


Fig.1 Working principle of magnetostrictive self-moving cell linear motor.

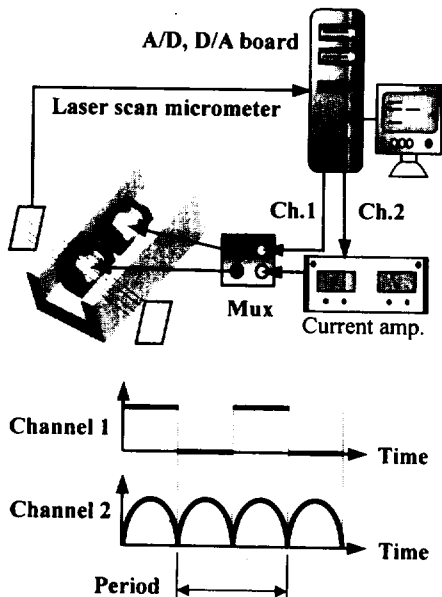
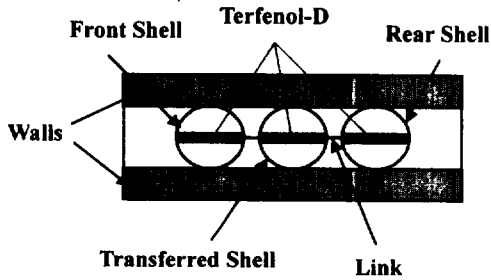


Fig.2 Schematic diagram of experimental setup for the magnetostrictive self-moving cell linear motor using demultiplexer.

b)단계는 front cell 안의 전류가 입력이 되고 자기변형 가진기(Terfenol-D)가 동기 되었을 때 셀은 고리모양에서 타원 모양으로 변형되면서 간섭 치수가 없어지고 동시에 clamping force 를 잃게 되고 축방향(이동방향)으로 이동하게 된다. 이것은 rear cell 의 clamping force 가 front cell 의 전진을 받쳐준 결과이다. c)단계에서는 front cell 에 흐르던 전류를 단락 시킴과 동시에 rear cell 에 전류를 인가한다. front cell 의 셀은 이때 벽면과의 간섭 치수가 복원되어 clamping force 를 발생시킨다. rear cell 에서는 인가된 전류로 인하여 rear actuator 의 Terfenol-D 가 변형되어 clamping force 가 소멸됨으로써 front actuator 이 수축될 때 rear cell 이 뒤따라갈 수 있게 해준다. 셀의 변형량과 front actuator 역할을 하는 cell 의 개수는 선형모터의 진행속도에 큰 영향을 준다. d)단계 그림은 한 주기가 지난 후 선형모터를 나타낸 것으로서 front/rear cell 모두에 clamping force 가 작용하고 있음을 볼 수 있다. 결론적으로 front cell 에서 한 주기 동안에 일어난 자기변형재료의 변형량이 모두 선형모터를 이동시키는 역할을 수행한다면 rear cell 의 clamping force 는 front cell 의 push force 를 유지강화 시키는 역할을 한다. 또한 선형모터를 구성하고 있는 cell 중 진행방향에 위치한 front actuator 의 strain 이 모터의 속도를 결정하며 front cell 의 개수에 비례하여 증가한다. Fig.2 는 제안된 모터의 개략적 구성을 나타내고 있다. 두 개의 자기변형 moving cell 이 안내대에 장착되어있고 Mux(demultiplexer)를 사용하여 컴퓨터의 입력신호를 바꾸어 자기변형 작동기에 인가된다. channel 1 의 pulse wave 는 Mux 에 직접 입력되어 front/rear cell 에 인가되어지는 가진 전류의 순서를 결정하는 역할을 한다. channel 2 에서 나가는 sine wave 의 절대값은 전류 증폭기를 경유하여 front/rear cell 에 가진 전류를 내보낸다. 고정밀 위치제어에서는 변위센서를 이용하여 이동거리를 feedback 받아 제어를 할 수 있다. Mux 를 사용하면 전류 증폭기 한대 만으로 다수의 actuator 들을

운전할 수 있으므로 시스템을 단순화 할 수 있다.



■ Speed Operation Mode

→ Having the twice moving distance



■ Force Operation Mode

→ Reinforce the clamping force

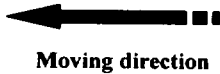
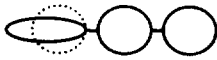


Fig.3 Two operating modes of the motor with three cells.

2.2 장점

자기변형 self-moving cell 선형모터의 장점으로 는 위에서 언급되었듯이 첫째 clamping force 는 간섭치수와 cell 의 수량에 의지하기 때문에 강한 clamping force 는 간섭치수와 cell 의 수량을 증가 시킴으로써 강화 시킬 수 있다. 둘째 자기변형 가진기인 Terfenol-D 는 큰 힘을 낼 수 있기 때문에 강한 push force 를 만들 수 있다. 셋째 clamping force 는 전기적인 힘이 작용하지 않을 때 항상 작용하므로 fail-safe lock 을 보증할 수 있다. 넷째 진행거리는 가진 되어지는 자기변형 재료의 변형량 이므로 입력되어지는 전류량을 제어함으로써 초 정밀 위치제어에 사용할 수 있다. 다섯째 제안되 어진 선형모터는 force mode 와 speed mode 로 운전

할 수 있다. Fig.3 는 두 가지 운전방식을 설명한 그림이다. force operation mode 는 macro motion control 에 사용 가능한 mode 로 clamping force 를 증가 시켜 push force 를 강화 시키는 방식으로 clamping cell 의 숫자를 증가 시킴으로써 이룰 수 있다. Speed operation mode 는 micro motion control 에 사용가능하며 모터의 속도를 증가 시키는 운전방 식으로 이웃한 여러 개의 cell 을 동시에 가진 함으 로써 이룰 수 있다.

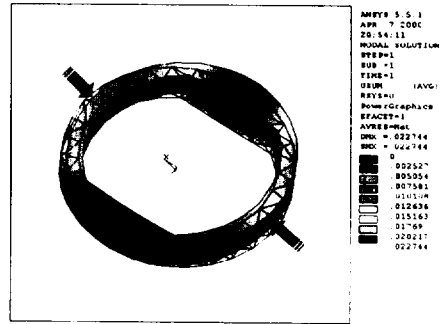
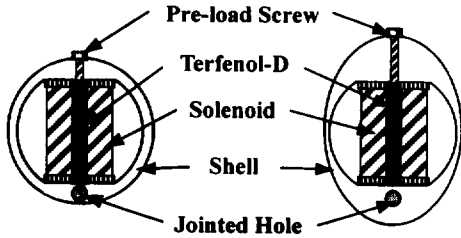


Fig.4 Finite element analysis result for Stiffness coefficient

3. Moving cell 설계

자기변형 self-moving cell 선형모터 디자인에서 핵심이 되는 부분이 바로 cell 디자인이다. 최대의 clamping force 와 이동 속도를 이끌어내기 위해서는 cell 의 최적 설계가 뒷받침되어야 한다. cell 을 구성하는 셸은 기본적으로 링 형태이며 Terfenol-D 와 솔레노이드(solenoid)가 안전하게 삽입되기 위하여 평행한 면을 가지도록 가공되어 있다. 셸은 자기장 손실이 적은 brass 로 만들었다.

Ring 형상에 따라 clamping force 와 이동 속도가 크게 좌우 되므로 횡단면에서 cell 의 stiffness 를 알아 보기 위하여 FEM 해석을 수행하였다. Fig.4 는 cell 의 mesh 를 보여주고 있으며 ANSYS 를 이용하여 해석을 수행한 결과 평균값 572N/mm 을 얻었으며 이것은 0.1mm 의 간섭치수에 57.2N 의 clamping force 를 얻을 수 있음을 의미한다.



The 1st prototype

The 2nd prototype

Fig.5 Schematic diagram of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> prototype actuators

Fig.5 는 1<sup>st</sup> 와 2<sup>nd</sup> prototype 을 보여 주고있으며 Fig.6 에서는 2<sup>nd</sup> prototype 를 clamping force 를 증가 시키기 위하여 최적설계방법 중 다구찌법으로 셸의 횡 방향 변형률을 최적화 시켰다. 최적화 후 약 15%의 횡방향 변형률이 증가했음을 알 수 있었으며 clamping force 와 실속력(stall force)의 증가, 모터의 무게 감소로 인한 정적 마찰력(static friction force)의 감소 그리고 최소 활성화 전류(minimum activation current)의 감소를 이끌어 낼 수 있다.

#### 4. 안내대 설계

외부로부터 오는 모든 하중을 최종적으로 벽면과 cell 사이의 수직 마찰력(normal frictional force)가 받쳐주고 밀어주는 역할을 담당한다. 따라서 대변위-고정밀 성능을 지닌 자기변형 self-moving cell 선형모터 개발에 있어서 안내대는 중요한 요소이다.

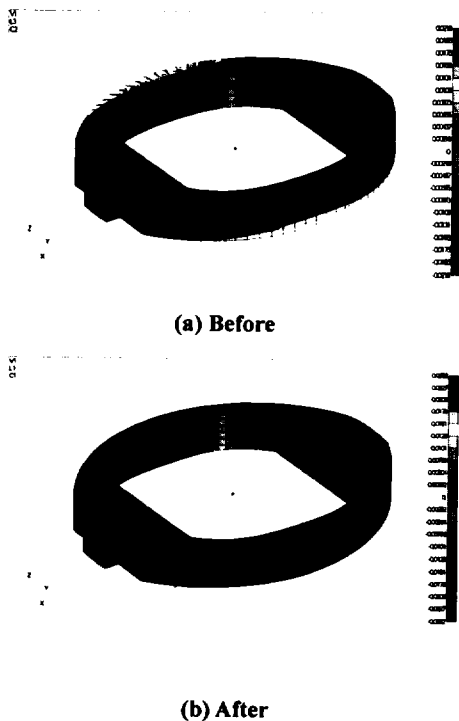


Fig.6 Finite element analysis result for optimizing transverse displacement of 2<sup>nd</sup> prototype shell.

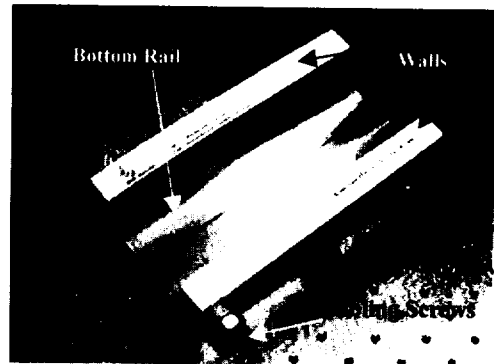


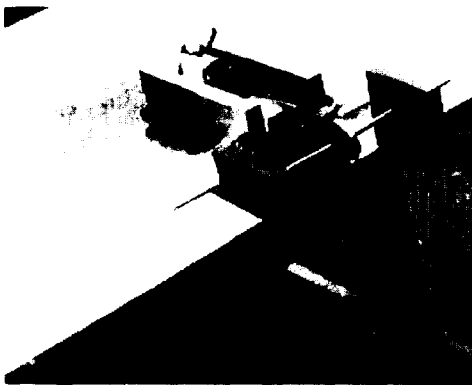
Fig.7 Detail of guideway which consists of six assembling screws, a pair of walls and a bottom rail

안내대의 주임부는 cell train의 안내이며 Fig.7 에서와 같이 한 쌍의 벽면, 1 개의 바닥 레일(bottom rail) 그리고 체결 나사(assembling screw)들로 구성되어 있다. 벽면과 셸의 접촉면은 마모율이 낮고, 높은 마찰 계수를 유지할 수 있도록 설계 및 가공을 하여야 하므로 2 개의 벽면, 1 개의 바닥 레일 그리고 셸 모두가 서로 접촉하는 부위에 대해서

평면도와 평행도를 얻기 위하여 연삭 및 래핑가공을 하였다. 특히 벽면과 cell 사이의 평행도는 일정한 수직력(normal force)를 유지시킨다는 의미에서 중요하다. Cell train 과 안내대는 접촉과 분리를 수없이 반복하기 때문에 안정적인 접촉 또한 설계시 고려되어야 한다. 안정적인 접촉은 수직력, 접촉면의 강성 그리고 마찰계수에 의해 영향을 받으며 대부분의 변형을 셀에서 일어나게 하게 위하여 벽면은 상대적으로 단단한 재료를 사용하였다.

**Table 1. The front actuator's property: time delay and stroke at 3[A]**

Property Frequency	Time delay (msec)	Displacement ( $\mu\text{m}$ )
5Hz	9.3	22.62
10 Hz	15.2	23.08
15 Hz	15.6	22.34
20 Hz	16.1	22.2
25 Hz	16.6	21.6



**Fig.8 Photograph of the experimental set up for the front/rear actuators' static-friction force**

### 5. Moving cell 테스트

자기변형 재료(Terfenol-D)가 cell 안쪽에 삽입된 상태로 운전되어지는 자기변형 self-moving cell 선형모터의 전체적인 성능을 평가하기 전에 먼저 각각의 cell 에 대한 운전 특성을 측정해 보았다.

### 5.1 시간지연 및 행정

Table 1 에서 볼 수 있듯이 가진 주파수가 증가함에 따라 actuator 의 변위는 거의 일정하나 시간 지연은 조금씩 증가함을 알 수 있다. 이것은 코일 및 자기 변형 재료의 자기력에 기인한 것으로 사료된다.

**Table 2. Static-friction force and minimum agitated current of the front/rear actuators.**

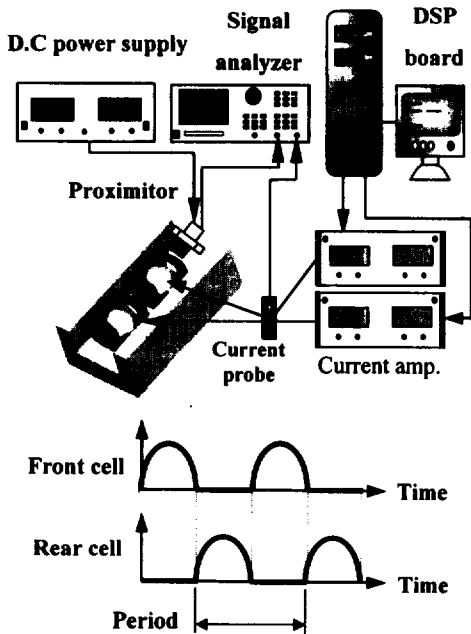
Property Actuator	Static-friction Force[N]	Minimum activation current[A]
Front	2.43	0.7
Rear	2.26	0.8

### 5.2 마찰력 측정

Fig.8 는 마찰력을 측정하기위한 장치로 cell 이 안내대 안에 삽입된 상태에서 줄과 롤러를 사용하여 추와 연결한 모습을 보여준다. Table 2 에서 볼 수 있듯이 마찰력은 약 2.2N 에서 2.4N 사이 이며 front cell 과 rear cell 측정치가 동일 하지 않은 이유는 가공 및 조립 시 생긴 오차 때문이다. 최소 활성화 전류(minimum activation current)가 나타내는 의미는 안내대로부터 cell 이 분리되어 출발할 수 있는 최소 가진 전류 값을 의미한다.

## 6. 모터의 성능 테스트

Fig.9 은 자기변형 self-moving cell 선형모터의 1" prototype 의 이동 속도를 측정하기위한 실험장치를 나타내고 있다. DSP board 가 내장되어 있는 컴퓨터에서 반 주기 만큼 시간 지연된 half sine wave 들이 생성이 되고 이 신호들은 전류증폭기로 인가되어진다. 인가된 신호 파형에 따라 전류 증폭기(HP6268B)에서 전류 신호가 발생되어 지고 Terfenol-D 를 감싸고 있는 solenoid 에 인가되어 자기장을 형성, Terfenol-D 를 변형시킨다. Current probe 는 입력 전류의 파형 및 크기를 변위 센서인 proximeter(BENTLY NEVADA)는 이동 거리를 측정한다.

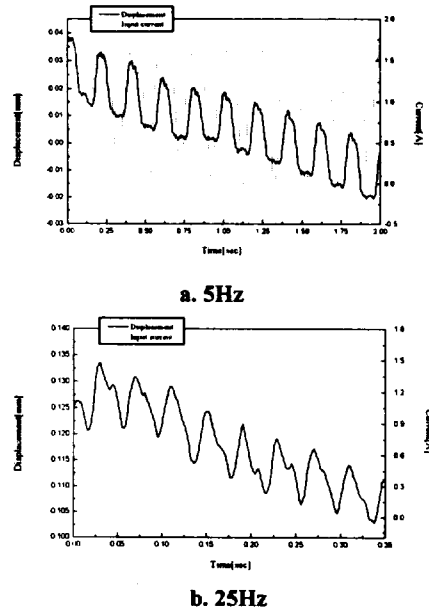


**Fig.9 Schematic diagram of experimental setup for the magnetostrictive self-moving cell linear motor.**

Fig.10 은 가진 주파수가 5Hz, 25Hz 일 때 각각의 시간에 따른 변위를 나타낸다. Proximeter 가 이동중인 cell 뒤쪽에 위치한 관계로 변위는 시간에 따라 감소되어짐을 알 수 있다. 전진 되어지는 cell의 움직임은 입력 전류에 따라 변화되며 그림 상의 기울기는 움직이는 cell train의 속도를 나타낸다. Cell train에 외력을 가하지 않았음에도 기울기가 일정하지 않은 이유는 cell과 guideway가 서로 안정된 상태에서 접촉과 분리를 되풀이 하지 않기 때문이다. 또한 앞에서 언급한 작동원리 4 단계를 지그재그형태의 이동궤적으로 증명할 수 있다.

Fig.11 는 가진 주파수와 입력 전류에 따른 자기변형 self-moving cell 선형모터의 이동 속도를 나타낸 그림으로 주파수와 전류가 증가함에 따라 속도가 빨라 짐을 알 수 있다.

앞에서 설명한 실험 결과는 모두 외력(external load)이 없는 상태에서 측정 되었다. Fig.12 은 자기변형 self-moving cell 선형모터의 외력 특성을 나타



**Fig.10 Displacement vs. input**

낸 그림으로 전류변화에 따른 외력과 이동속도와 관계 측정한 결과이다. 외력이 증가함에 따라 이동속도는 감소하였고 1.2A 전류가 인가되었을 때 최고 속도는 0.017mm/sec, 실속(stall) 외력은 약 1N으로 나타났다. 실속 외력은 clamping cell 수와 간섭 치수를 증가 시킴으로써 키울 수 있다. 전류가 증가할수록 속도와 실속 외력이 모두 상승하며 실속외력은 정적 마찰력과 밀접한 관계를 맺고 있다.

이상의 결과적으로 자기변형 self-moving cell 선형모터의 개념을 실제적으로 적용하기 위하여 1<sup>st</sup> prototype을 통하여 증명하였다. 2<sup>nd</sup> prototyped의 성능 평가에서는 최적화된 셀, 코일 두께 변화 그리고 Mux를 추가한 결과를 토대로 높은 가진 주파수대역에서의 모터 성능 및 2개 이상의 cell로 이루어진 모터 제작 등에 적용하는 것이 또한 앞으로 해야 할 과제이다.

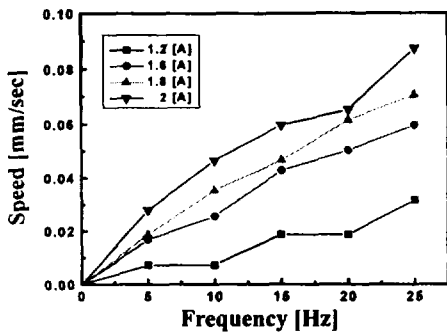


Fig.11 Speed vs. frequency at various input current.

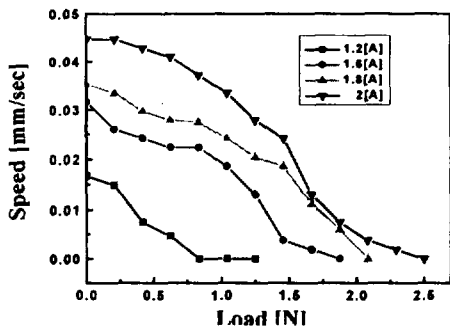


Fig.12 Load characteristic of the LMM, 25Hz

## 7. 결론

Self-moving cell 개념에 기초하여 작동되는 자기 변형 선형모터를 설계하고 실험하였다. push force 는 직접적으로 cell 의 마찰력과 관계가 있으며 이것이 본 논문에서 제안한 자기 변형 self-moving cell 선형모터의 주요한 개념으로써 cell 수를 증가 시킴으로써 큰 힘과 대변위를 발생시킬 수 있다. 이 연구는 자기 변형 self-moving cell 선형모터의 개념을 증명하는 단계이고 접촉 매커니즘, cell 의 수, 높은 가진 주파수 대역에서의 운전특성 및 마모와 열영향에 대한 연구가 뒷받침되어야 하겠다.

## 참고문헌

1. Jaehwan Kim, J.-K. Doo and S.-B. Choi, Magnetostrictive linear motor based on self moving

cell concept, Actuator 2000, 116-119, Bremen, Germany, June, 2000.

2. J. Vranish et al., Magnetostrictive Direct Drive Rotary Motor Development, I.E.E.E. Trans. On Margnetics, 27, 5355-5357, 1991.
3. Bi Zhang, Zhen Qi Zhu, Design of an inchworm-type linear piezomotor, Proceedings SPIE, 2190, 528-539, 1994.
4. T. Higuchi, Y. Yamagata, K. Furutani, K. Kudoh, Precise Positioning Mechanism Utilizing Rapid Deformations of Piezoelectric Elements, Proceedings IEEE MEMS, 222-226, 1990.
5. K. Ikuta, S. Aritomi, and T.Kobashima, Tiny Silent Linear Cybernetic Actuator Driven by Piezoelectric Device with Electromagnetic Clamp, Proceedings MEMS, 232-237, 1992.