

적층형 압전재료를 이용한 초정밀 선형 모터에 관한 연구

Research for ultra precision linear motor by using piezo stack actuators

임장환* · 김재환**

Janghwan Lim, Jaehwan Kim

Key Words : Self-moving-cell, Piezo stack actuator(적층형 압전 작동기), Taguchi method(다구찌법), Macro-micro motion(매크로-마이크로 운동)

ABSTRACT

This paper is focused on the research of the ultra precision linear motor by using piezo stack actuators. The development of linear motor which can be controlled nano or micro scale is necessary for the precision manufacturing. Self-moving-cell principle is used for the design of linear motor. Self-moving-cell linear motor is consisted of three cell structures, and each cell has two shells and one piezo-stack actuator. Each cell can do clamping and moving by two shell structures. The shell structure deformation by piezo stack actuator can move the linear motor by losing the clamping between the shall and guideway. This paper presents the design, manufacturing and test of the motor.

1. 서 론

나노 기술의 개발과 초정밀 제어는 현대에 있어서 주목 받는 이슈로 떠오르고 있다. 이 논문에서는 지능 재료를 이용하여 이러한 나노 제어가 가능한 선형 모터의 개발 및 성능 개선을 목적으로 한다.⁽¹⁾ 지능 재료의 일종인 압전 재료는 선형성이 우수하고 큰 힘을 낼 수 있는 장점을 보유하고 있지만 작동 범위가 작기 때문에 적층형 압전작동기로 제작되어 큰 변위를 낼 수 있도록 만들어 진다. 본 연구실에서 개발된 기존의 Self-moving-cell 개념의 선형 모터는 macro, micro control, 안내대와와의 접촉 안정성 등 여러 가지 장점에도 불구하고 모터의 작동 시 발생하는 쉘의 변형량이 재료의 소성영역까지 도달하게 되어 모터의 안내대 삽입 후 탄성 변형이 아닌 소성 변형이 되어 stall force가 설계값보다 적게 나오는 단점이 발생하였다. 또한 쉘과 선형모터의 몸체와 만나는 부분의 형상이 쉘이 안내대에서 이탈할 경우 그 변형량이 일정하지 않아 작동 중 안내대 내에서 회전하는 단점이 발견되었다.⁽²⁾⁽³⁾ 따라서 이 논문에서는 선형 모터의 쉘 설계 시 적층형 압전 작동기에서 발생하는 blocking force와 그에 따른 변형량을 고려

하여 모터의 설계 및 해석하였고 실제 적층형 압전 작동기에서 발생하는 힘과 유사한 조건을 제시하여 실제 변형량과 유사한 FEM 해석상의 설계 데이터를 사용하였고 다구찌법을 이용해 모터 설계 치수의 최적화를 실시하였다.⁽⁴⁾ 또한 모터의 작동 중 발생하는 변형이 재료의 탄성 변형 구역에서 발생하도록 최대 응력을 고려하여 설계를 하였다. 또한 모터의 실제 제작을 통해 모터의 쉘과 안내대와의 간섭량에 따른 모터의 추력 및 stall force에 대한 실험결과를 도출하였고, 모터의 macro 작동 및 micro 작동 실험을 통해 마이크로 및 나노 제어를 위한 위치 제어 실험을 실시하였다.⁽⁵⁾

2. 선형 모터의 설계

2.1 선형 모터의 작동 원리

이 논문에서 제시하는 압전 선형 모터는 기존에 본 실험실에서 제안된 Self-moving-cell 개념을 기본으로 작동한다. 제안된 모터는 각각의 쉘이 Self-moving cell 형상을 가지고 인치웜 운동을 한다. 모터는 각각의 쉘이 순차적으로 작동됨에 따라서 안내대를 따라 움직인다. 작동 쉘들은 안내대와 적절한 양의 간섭을 가지고 압입되어 클램핑 되어있기 때문에, 기존의 인치웜 타입의 모터가 가지는 큰 단점인 정지 시 항상 에너지가 공급되어야 하는 단점을 극복하는 원리를 가지게 된다. Fig.1은 제안된 모터의 구조이다. 세 개의 Self-moving-cell 들은 하나

* 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : kelvin273@hanmail.net
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 838-1716

** 인하대학교 기계공학과

의 구조로 가공되어 강성을 유지하게 되어 있다. 각각의 셀들은 하나의 적층형 압전 작동기를 가지고 있어 순차적으로 보내지는 입력 신호에 의해 각각의 셀들의 제어가 가능하도록 되어 있다. 또한 2개의 셀을 가지게 되며 이 셀의 크기 및 형상, 치수는 안내대와의 간섭량 및 변형량 강성 등을 고려하여 설계된다. Fig.2는 모터의 작동원리를 나타내고 있다. 초기 상태에 모든 셀은 안내대와의 간섭으로 인해 고정되어 있으며, 첫 번째 단계로 첫 번째 셀이 적층형 압전 작동기의 팽창에 의해 반경 방향으로 수축하게 되어 안내대와 잠금이 풀리게 되어 움직임이 자유로운 상태로 되고 고정되어 있지 않은 오른쪽 길이 방향으로 팽창하게 되어 전진하게 된다. 뒤를 이어 두 번째 셀이 작동되며, 이때 첫 번째 셀은 작동 전압을 제거하여 반경 방향으로 복귀되어 다시 안내대에 잠기게 된다. 이와 같이 두 번째와 세 번째 셀이 순차적으로 작동되어 하나의 주기를 완성하고 초기 상태로 돌아온다. 따라서 이런 한 주기를 반복하면서 선형 모터의 스텝 변위가 발생하고 연속적인 주기 운동으로 원하는 이송 거리까지 무한히 이동할 수 있다. 압전 선형 모터의 속도는 가진 주파수와 단위 이동거리에 비례하며, 단위 이동거리는 적층형 압전 작동기의 행정과 가해 주는 전압에 의해서 결정된다. 또한 모터의 추력 및 stall force는 모터의 셀과 안내대와의 간섭량에 의해 결정되어 진다. 또한 각각의 셀을 제어함으로써 압전 선형 모터는 macro 이송 모드와 micro 위치제어 모드에서 작동될 수 있다. macro 이송 모드는 먼 거리를 이동하여야 하는 경우의 작동 모드로서 Self-moving-cell 개념을 이용하여 신속히 이동하며, 정밀한 위치제어를 필요로 하는 경우 뒤쪽의 두 셀을 고정된 상태로 첫 번째 셀에 인가하는 전압을 제어함으로써 정밀한 위치제어를 수행한다.

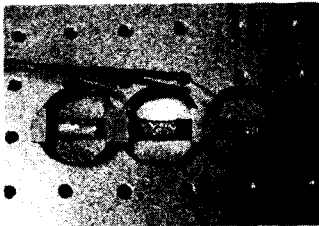


Fig 1. Linear motor

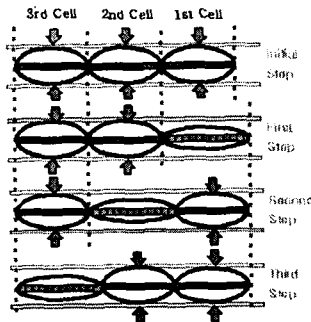
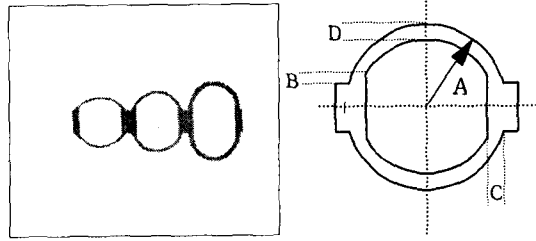


Fig 2. Operation Principle

2.2 셀 설계

본 선형 모터의 개발 시 가장 중요한 부분은 모터의 셀 부분의 설계이다. 이는 모터의 작동 시 길이 방향의 변위 즉 모터의 행정간 이송 거리를 나타내는 중요한 척도로서 작용을 하게 된다. 셀의 길이 방향 변형량 및 강성은 모터의 작동 시 이송 거리를 나타내는 중요한 인자로 작용하게 되고, 반경 방향의 변위 및 강성은 모터를 안내대와의 간섭을 통해 모터의 stall force를 나타내는 중요한 척도도 작용을 하게 된다. 모터의 셀의 형상은 기존 제안된 모델을 기반으로 한다. 모터의 치수는 다구찌법을 이용하여 치수의 최적화를 실시하였다.



(a) Basic Model (b) Design Parameter

Fig 3. Motor Design Concept

모터 셀의 주 형상 인자를 찾기 위해서 Fig 3.(a)에서 제안된 기본적인 형상에 기반을 둔 모델을 3개 선택하였다. 이 3개의 모델의 기본 치수를 기초로 FEA 해석을 통해 길이 방향 변형량, 반경방향 변형량, 최대 응력이 우월하게 나오는 치수를 선택하였다. Fig 3.(b)에서 이 모델을 기반으로 5개의 설계 인자를 선택하였고, 각 인자 당 3수준 값을 적용하여 다구찌법을 이용하여 최적화된 셀의 치수를 선정하였다. 선택한 인자는 A(셀의 외경), B(셀과 지지부 Rib부 높이), C(셀의 접촉부 길이), D(center부에서의 외경과 내경의 간격)로 선택하였다. 각각의 모델에 대해서 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 반경 방향 변형량 및 강성 계수, 길이 방향 변형량 및 강성계수, 그리고 변형시 셀 구조물의 최대 응력에 대한 결과를 도출하였다. 여기서 변형 시의 최대 응력을 고려하는 이유는 구조물이 힘을 받아 변형되는 원리를 이용하기 때문에 변형 시 발생할 수 있는 소성 변형의 영향을 없애기 위함이다. 모터의 셀의 소성 변형 발생시 이는 직접적으로 안내대와의 간섭량에 영향을 주고 모터의 추력에 영향을 주게 되므로 모터의 셀 설계 시 중요한 요소로 간주된다. 다구찌법에 의한 결과는 Table 1. 과 같다.

Table 1. 다구찌법을 이용한 설계 치수 최적화

(a) 인자 및 수준

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
A(외경)	R19.21mm	R17.78mm	R16.16mm
B(shell과 지지부 Rib부 높이)	0.0mm	1.0mm	1.5mm
C(셀 접촉부 길이)	3.0mm	4.0mm	5.0mm
D(center부에서의 외경과 내경의 간격)	1.0mm	1.5mm	2.0mm

(b) 반경방향 변형률에 대한 간이 분석 결과

Factor	A	B	C	D	SUM
유의 수준	2	3	1	2	-
기여율(%)	16.66	26.75	28.49	28.11	100

(c) 길이방향에 변형률에 대한 간이 분석 결과

Factor	A	B	C	D	SUM
유의 수준	3	2	1	1	-
기여율(%)	22.47	5.20	41.62	6.67	100

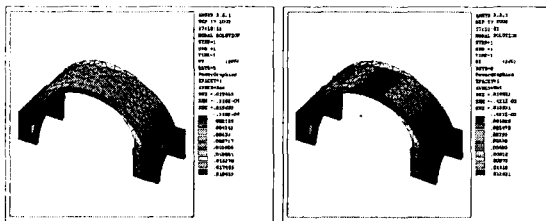
(d) 최대 응력에 대한 간이 분석 결과

Factor	A	B	C	D	SUM
유의 수준	3	3	3	1	-
기여율(%)	24.72	12.55	52.60	10.13	100

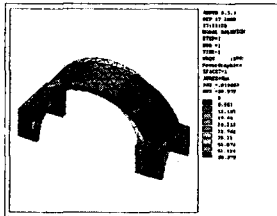
(e) 각각의 유의 인자들에 대한 간이 분석결과

Factor	A	B	C	D	SUM
유의 수준	3	3	1	1	-
기여율(%)	20.10	22.06	25.90	31.96	100

위의 표를 분석해 보면 반경 방향 및 길이 방향 변형률, 최대 응력 인 3개의 결과에 대해서 다구찌법을 적용한 결과 최적의 인자 조합은 $A_3B_3C_1D_1$ 이고 이것은 A(외경): R16.16mm, B(셸과 지지부의 Rib 높이):1.5mm, C(셸 접촉부 길이):3mm D(center 부에서의 외경과 내경의 간격):1.0mm 인 선형 모터의 치수결과를 얻을 수 있다. 이 결과를 가지고 FEA 해석을 하면 Fig 4.와 같은 해석 결과를 얻을 수 있고 한 셸 당 반경 방향 변형률은 $12.63\mu\text{m}$, 길이 방향으로 $19.653\mu\text{m}$, 최대응력은 58.98Mpa 가 발생한다. 또한 해석으로 구한 셸의 강성은 길이 방향으로 $9.57\text{N}/\mu\text{m}$, 반경방향으로 $9.00\text{N}/\mu\text{m}$ 를 나타낸다.



(a)Longitudinal direction deformation (b)Radial direction deformation



(c) Stress

Fig 4. FEA Results

2.3 프리로드의 영향

적층형 압전 작동기는 압축응력에는 큰 내구성을 가지고 있으나 인장 응력 및 전단 응력에는 큰 취약성을 가지고 있다. 적층형 압전 작동기를 이용 시 이러한 단점을 보완하기 위해서 프리로드를 적용하는 하는 것이 일반적인 방법이다. 제한된 선형 모터의 경우 작동 시 선형 모터의 변형시의 변형량이 스프링 역할을 하여 적층형 압전 작동기에 프리로드를 가해 주는 방식을 취하게 된다. 또한 이 경우 주어지는 프리로드는 적층형 압전 작동기의 변형량을 감소시키며 힘을 발생시키는 역할을 하게 되므로 이에 대한 영향을 고려하여 설계 해야 한다.

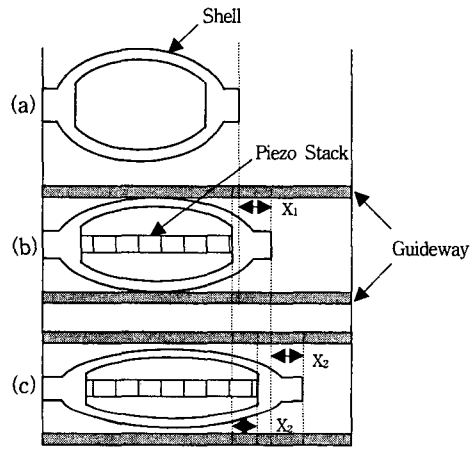


Fig 5. Deformation Figure

모터 작동시의 적층형 압전 작동기의 변형과 셸의 변형량과의 관계는 Fig 5.와 같다. Fig 5. (a)경우 셸의 삽입 전 모든 부분에 힘이 작용하지 않는다. Fig 5.(b)의 경우 모터와 셸의 설계 간섭 치수를 $10\mu\text{m}$ 로 할 경우 셸을 안내대에 삽입하면 압입에 의한 셸의 반경 변형량이 $10\mu\text{m}$ 가 되고 동일한 변형을 발생 시킬 수 있는 등가의 힘은 길이 방향으로 150N의 힘이 작용하는 것과 동일하다. 이 경우 아직 적층형 압전 작동기에는 어떤 프리로드도 작용하지 않는다. Fig 5.(c)의 경우 적층형 압전 작동기에 전압을 가하면 적층형 압전 작동기는 먼저 셸이 안내대를 지지하고 있던 힘(150N)을 이길 수 있는 힘이 발생되고 다음 셸의 변형을 일으키는 힘이 작용하여 셸의 변형을 일으킨다. 이러한 프리로드에 의한 영향을 이용하여 셸의 변형량을 계산하면 반경 방향으로 $8.59\mu\text{m}$, 길이 방향으로 $13.23\mu\text{m}$, 최대 응력은 88.84Mpa 가 나온다.

2.4 외부 하중에 대한 모터의 영향

셸 당 반경 방향 강성은 $9.00\text{N}/\mu\text{m}$ 로 설계되어 있고 안내대와 의 간섭량은 $10\mu\text{m}$ 로 했을 경우 한 셸에서 발생하는 수직력은 90N이다. 각각의 수직력에 대한 추력은 안내대와 셸의 마찰 계수를 0.3으로 했을 경우 27N이다. 또한 선형 모터에 간섭되어 있는 셸의 수는 6개이므로 전체 stall force는 약 16kg의 힘을 지지할 수 있다. 그러나 각각의 마찰면을 모두 연삭하였을 경우 실제 마찰계수는 실제적으로 작아지고 위에서 제시된 힘보다

적은 stall force를 가질 것으로 추정된다.

또한 추력을 측정하기 위해 모터의 끝단에 하중을 가할 경우 이는 모터 셀의 변형을 가져온다. 이는 각각 셀의 길이 방향 변위의 증가와 반경 방향 변위의 증가를 발생시켜 셀과 안내대의 간섭량을 감소시키는데 5N, 10N의 힘을 길이 방향으로 가했을 경우 반경 방향 변형량은 0.7 μ m, 1.3 μ m 가 발생하여 원래 의도했던 간섭량 보다 적게 되어 stall force를 감소시킨다.

3. 선형 모터의 성능 평가

실제 제작을 통해 모터의 성능을 평가하였다. 첫 번째로는 macro한 모터의 성능을 평가한다. 속도 및 추력에 대한 모터의 실험 결과를 알아보고 한 step 당 모터의 변형량을 알아본다. 두 번째로 micro한 모터의 운동에 대해 알아본다. 2,3 번 셀을 고정된 상태에서 1번 셀의 최소 변형량과 분해능을 측정하고 그에 따른 작동 전압을 측정한다. 또한 이력 보상을 통해 조정 밀 위치제어를 할 수 있는 가를 알아본다. 선형모터의 조립형상과 측정 장치 구성은 Fig 6.과 같다. D/A 보드가 내장되어 있는 PC로 선형 모터의 제어 신호를 3채널 Piezo-Amp로 증폭시켜 모터의 각각의 셀에 있는 적층형 압전 작동기로 인가한다. 모터의 끝단에 레이저 센서를 장착하여 변위를 측정하고 디지털 오실로 스코프를 통해서 데이터를 수집한다.

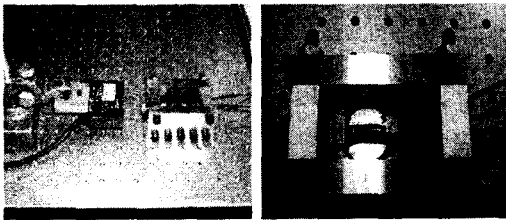


Fig 6. Experimental Set Up

3.1 Macro 이송

모터의 macro 이송에 관한 실험 조건은 120V의 작동 전압을 각 셀당 10%의 신호 증첩을 주어 실험을 실시한다. 이 경우 Fig 7. Fig 8. 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 경우 모터의 최대 속도는 무 하중일 경우 80Hz에서 591.8 μ m/s 의 최대 속도를 가지게 된다. 무 하중일 경우 80Hz 까지 속도가 증가하다가 이후에는 감소하는 경향을 보인다. 하중에 관계없이 약 50Hz까지는 대부분의 속도가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이 실험 조건 하에서 모터가 발생할 수 있는 추력은 4.25N 정도 이다.

3.2 신호 증첩량에 따른 속도

모터의 각 셀에 작용하는 입력 신호의 증첩량은 모터의 백래쉬나 속도에 영향을 미친다. 따라서 여기서는 무하중 조건하에서 10Hz 조건 및 3.1절의 실험에서 최대속도가 측정된 80Hz 하에서 신호 증첩량에 따른 속도의 변화를 실험하였다. 10Hz의 작동 주파수 하에서 0% 증첩인 경우 모터의 속도는 66.03 μ m/s

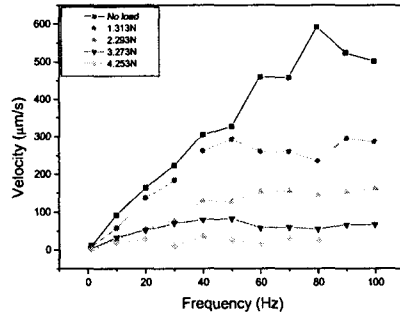


Fig 7. Velocity Characteristics

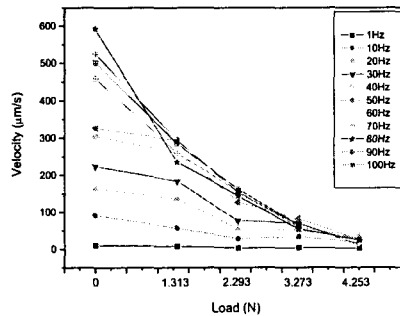
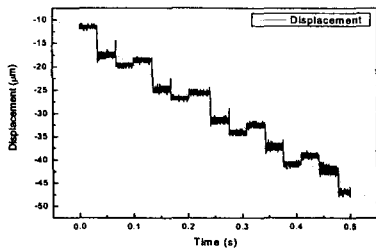
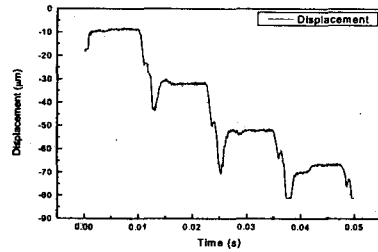


Fig 8. Load Characteristics

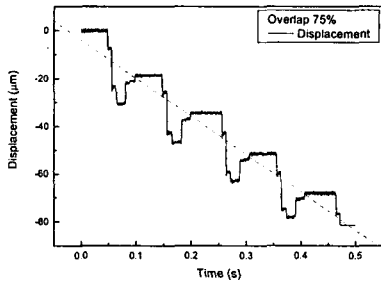
이다(Fig 9.(a)). 이 경우의 실험 그래프를 분석한 결과 상당한 잡음이 측정되는데 이는 셀의 작동 시 각각의 셀들이 안내대와 충분히 이탈되지 않은 상태에서 움직여 이러한 결과가 나오는 것으로 추정되고 이에 따라 모터의 변위 및 속도가 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 각각의 셀에 들어가는 모터의 신호에 증첩량을 증가시켜 준 경우 5-50%까지 증첩을 할 경우 모터의 속력은 약 100 μ m/s까지 증가한다(Fig 9.(c)). 증첩량을 계속 증가시켜 75%까지 증가시키면 최대 속도인 158.8 μ m/s까지 증가한다(Fig 9.(b)). 3.1 절에서 실험 한 결과 모터의 최대 속도가 나오는 80Hz 대역에서의 간섭량에 따른 모터의 속력은 Fig 10.(c)와 같이 나온다. 80Hz 대역에서도 10Hz에서와 유사한 경향의 그래프가 나옴을 알 수 있다. Fig 10.(a)에서와 보듯이 0%의 증첩에서는 최저 속도인 337.9 μ m/s가 나오고 5-40% 까지 약 600 μ m/s 의 비슷한 속도가 측정되는 것을 알 수 있다(Fig 10.(c)). 계속 증첩량을 증가시킬 경우 모터의 속도는 대략 1000 μ m/s 정도 까지 증가하면서 65% 인 경우 최대 속도인 1489 μ m/s를 얻을 수 있다(Fig 10.(b)). 이는 3.1 절에서 구한 속도의 약 3배에 해당하는 결과이고 입력 신호의 간섭량이 본 연구 모터에 상당한 요인으로 작용함을 알 수 있다. 이러한 간섭량 증가에 따라 모터의 속도가 변하는 주된 요인은 적층형 압전 작동기와 셀 구조물의 응답성에 기인한 것으로 추정된다.



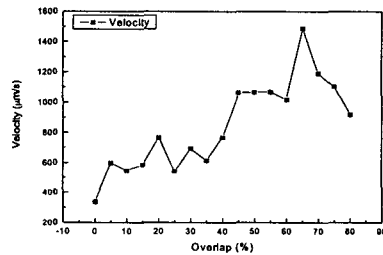
(a) 0% Overlap



(b) 65% Overlap

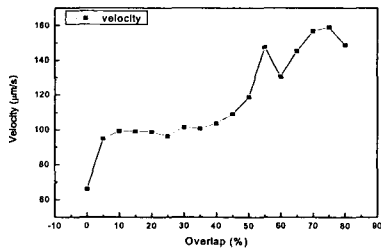


(b) 75% Overlap



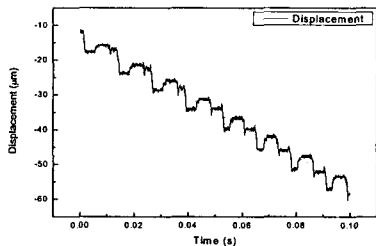
(c) Velocity Characteristics at 80Hz

Fig 10. Overlap Characteristics at 80Hz



(c) Velocity Characteristics at 10Hz

Fig 9. Overlap Characteristics at 10Hz



(a) 0% Overlap

3.3 Micro 이송

2, 3 번 셀은 고정하여 즉 전압을 가하지 않은 상태에서 1번 셀만 작동 전압을 가하여 셀의 끝단의 변형 유무를 측정하였다. 5V-120V까지의 전압을 1번 셀에만 적용하여 각 전압 당 변형량을 측정 한 결과는 Fig 11.과 같다. 이 경우 전압에 따라 1번 셀의 변위가 포물선 형태로 증가함을 알 수 있다. 1번 셀의 최대 변위는 120V일 때 $7.76\mu\text{m}$ 정도 이고 10V의 작동 전압의 경우 $0.15\mu\text{m}$ 정도 나타냄을 알 수 있다. 고전압의 경우 10V 단위 당 큰 변형 차이를 나타내는 반면 저전압에서는 10V 당 전압 변화당의 변화량은 적음을 알 수 있다. 이러한 작동 전압에 대한 변형량의 차이는 micro 제어를 할 경우 고려해야 하는 사항이 된다. 1V 당 셀의 변화량의 정도를 알아보기 위해서 100V에서 110V까지 1V씩 증가 시켜 1번 셀의 변형량을 측정하였고 결과는 Fig 12.와 같이 도출되었다. 이 경우 1V 작동 전압 증가 시 약 100nm의 변형량을 가짐을 알 수 있다. 적층형 압전 작동기를 사용할 경우 발생하는 이력은 micro 제어를 위해서는 반드시 고려해야 하는 사항이다. 변위차를 알기 위해서 1번 셀에 20V 단위로 80 V까지 1Hz로 계단파형으로 전압을 올리고 내려서 변위를 측정 한 결과는 Fig 13.와 같다. 이 경우 동일한 전압에서 상향 시와 하향 시 변위의 차이는 약 $0.352\mu\text{m}$ 정도가 발생함을 알 수 있다. 이러한 변위차를 보상하기 위하여 하향 시 전압을 상향 전압보다 4.314V씩 적게 가하면 동일한 위치의 변위를 구할 수 있다.

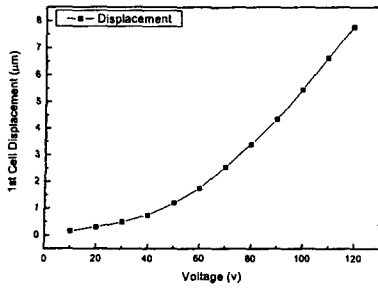


Fig 11. 1st cell displacement per 10V

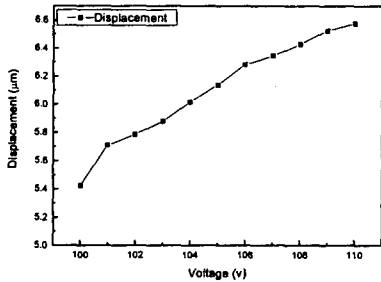
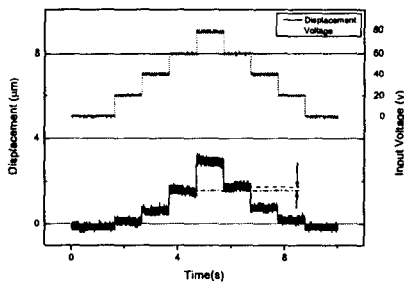
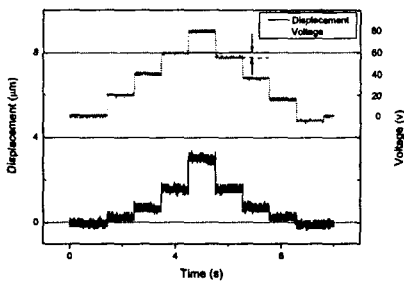


Fig 12. 1st cell displacement per 1V



(a) Before compensation



(b) After compensation

Fig 13. Displacement compensation

4. 결론

Self-moving cell 개념을 이용하여 적층형 압전 작동기를 사용하는 선형 모터의 개발 및 성능 개선을 위하여 개선된 설계 개념을 적용하였고 실제 제작을 통해 실험을 실시하였다. 최대 속도는 기존의 모델 보다 많은 성능 개선을 하였고 각 셀로 입력되는 신호의 증첩은 모터의 속력에 상당한 요인으로 작용한다는 것을 발견하였다. 하중은 기존의 모델 보다 많은 개선이 이루어 졌다. 추후 모터의 셀과 안내대와의 간섭량을 변화시켜 이에 따른 모터 속도 및 하중에 관한 상관성도 연구할 예정이다.

참고 문헌

- (1) Bi Zhang, Zhenqi Zhu, March 1997, IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol.2. No.1.
- (2) B.W. Kang, J. Kim, K. Choi and H. Kim, October 2002, The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology
- (3) Jaehwan Kim, Jae-Kyun Doo and Jae-Do Kim, July 2001, Feasibility Assessment of New Hybrid Motor Using Magnetostrictive Material, International Journal of the KSPE, Vol.2-2, pp. 26-30.
- (4) 이상복, 2001, MINITAB을 이용한 다구찌 기법 활용, 이레테크
- (5) 이진호, 김재환, 최관영, 2001, "적층 압전작동기를 이용한 Self-moving-cell 선형모터 연구", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 371~375.