

정전형 inchworm 마이크로 액츄에이터의 설계 및 제작

Design and Fabrication of the Electrostatic Inchworm Microactuator

이 승 기, *江 刺 正 喜
단국대학교 전기공학과, *東北대학교 기계전자공학과

Seung-Ki Lee and *Masayoshi Esashi
Dept. of Electrical Eng., Dankook Univ.
*Dept. of Mechatronics and Precision Eng., Tohoku Univ.

Abstract

A novel structure of a linear microactuator has been designed and analyzed. The proposed structure can overcome serious problems from which conventional linear microactuators suffer, primarily due to the moving principle that is the repetition of attachment and detachment of the moving part to the fixed part. According to the calculated results, the proposed microactuator can generate force of a few mN and the moving speed of 13 cm/min under the condition of 100 volts and the frequency of 1.4 kHz.

1. 서론

마이크로 가공기술 (micromachining)을 이용한 미세 구조물의 제작에 있어서, 수평방향에 대한 움직임만을 갖는 좁고 두꺼운 구조 (high aspect ratio)는 외부에 실제적인 구동력을 전달할 수 있다는 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다 [1]. 그러나 지금까지 기관 마이크로 가공 (bulk micromachining)에 의해 제작되어진 좁고 두꺼운 구조를 갖는 마이크로 액츄에이터 (특히 선형 마이크로 액츄에이터)에서는 거의 움직임을 관찰할 수 없었다.

본 논문에서는 기관 마이크로 가공에 의해 제작되어진 기존의 선형 마이크로 액츄에이터들의 문제점을 분석하고 그 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 동작원리에 의한 선형 마이크로 액츄에이터를 설계·제작하고자 한다.

2. 정전형 선형 마이크로 액츄에이터의 문제점 분석

기관 마이크로 가공에 의해 지금까지 제작된 정전형 선형 마이크로 액츄에이터중에서 [2-4] Matsubara 등에 의해 제작된 경우는 정전력에 의해 9 μm 정도의 움직임이 확인되었으나 전극의 pitch가 40 μm 임을 감안하면 매우 미미한 움직임이다. 그러나 지금까지 제작된 예중 가장 대표적인 형태라고 볼 수 있다. 정전력을 이용하는 기존의 선형 마이크로 액츄에이터들이 실제로 쉽게 움직이지 않는 이유는 대략 다음과 같은 공통적인 문제점 때문인 것으로 정리할 수 있다.

우선 첫째로, 고정부 전극과 이동부 전극 사이의 aligning force를 구동력으로 삼는 일반적인 구조에서 이동부의 위치가 불안정하여 고정부에 붙어버리는 문제점이 있다. 즉 이동부 전극이 상·하 고정부 전극 사이의 중앙에 위치하면 수직 방향의 정전력은 상·하로 상쇄되고 수평 방향의 정전력 (aligning force)이 이동부 전극을 움직이게 하는데, 이때 이동부 전극의 위치가 중앙에서 조금이라도 벗어나면 이동부가 고정부에 붙어버리고 만다.

둘째로, 이동부와 고정부 사이의 마찰을 피하고, 정전력을 발생시키기 위해 이동부 전극을 접지 상태로 유지시켜 주는데 필요한, 이동부 전극을 기반으로 부터 지지하고 있는 스프링 빔이 그다지 유연하지 못하여 이동부 전극의

움직임에 방해가 되는 점이다.

셋째로, 이동부와 고정부의 상대적 위치에 따라 aligning force에 의한 구동력이 약해지는 순간이 발생할 수 있다. 고정부 전극에 3상의 전압을 인가하여 aligning force를 발생시키는 경우 각 상이 바뀌는 부분에서는 발생력이 0에 가까워진다.

이러한 문제점들은 단순히 마이크로 액츄에이터의 구조나 재료의 변경등의 방법으로는 해결될 수 없으며, 본 논문에서는 움직임을 방해가 되는 요인들을 제거하기 보다는 그 요인 자체가 구동력이 될 수 있는 적극적인 해결 방안에 주안점을 두었다. 즉 이동부가 고정부에 붙어버리는 현상 그 자체가 움직임을 될 수 있고 기관과 이동부 사이에 스프링 빔이 없는, 이동부가 완전히 분리되어 있는 구조를 고려한다. 단 이때, 완전히 분리된 이동부를 접지 전위 상태로 유지할 수 있는 방법이 필요하다. 또한 이동부 전극과 고정부 전극이 어떠한 상대적 위치에 존재하더라도 aligning force가 급격히 감소하지 않는 전극 배치가 필요하다.

3. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 설계

3.1 구조

본 논문에서 제안한 inchworm 마이크로 액츄에이터의 구조를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 (a)는 이동부의 전체적인 모습을 나타내고 (b)는 이동부와 고정부가 합쳐져 있는 상태의 단면도, (c)는 이동부의 평면도와 단면을 나타낸다. 이동부는 실리콘으로 구성되며 상·하로 glass 상에 전극이 형성되어 있는 고정부가 존재한다.

이동부는 폭 50 μm , 길이 3 mm의 stripe 형태의 전극 101개와, 전극 양쪽으로 폭 10 μm , 길이 2 mm의 스프링 빔에 의해 지지되고 있는 폭 500 μm , 길이 10.45 mm의 또다른 전극 2개로 구성되어 있다. 각 영역의 두께는, 101개의 stripe 형태 전극 및 스프링이 195.5 μm , 양쪽의 2개의 전극이 198 μm 이며, 두께의 차 2.5 μm 는 모두 윗부분에 형성되어 있다.

고정부에는 이동부의 각 전극과 동일한 형태로 glass를 1 μm 정도 etching하여 그 내부에 전극을 형성한다. Etching 되어 있는 홈의 내부에 형성된 전극에는 전압을 인가하고, 나머지 glass의 대부분을 덮고 있는 전극은 이동부의 전위를 접지 상태로 유지하는데 쓰이게 된다. 홈을 형성할 때 이동부의 2개의 큰 양쪽 전극에 대응하는 부분은 상부의 glass에만 형성되어 있다. 고정부에 형성되어 있는 stripe 형태의 전극은 25개가 하나의 상을 이루고 각 상끼리의 간격은 3/4 pitch, 즉 75 μm 만큼 떨어져 있다. 전체적으로는 3/4 pitch 만큼씩 떨어져 있는 25개의 전극군이 5개가 있으며 양쪽 끝의 2개 군은 서로 연결되어 있어 결국 4상으로 동작하는 형태가 된다. 이 전극은 상·하 glass에 모두 형성되어 있다. Glass의 대부분이 전극에 의해 덮여 있게 되므로 이동부가 움직이는 것을 관찰할 수 있도록 하기 위해 glass 상의 전극 물질로는 ITO (Indium

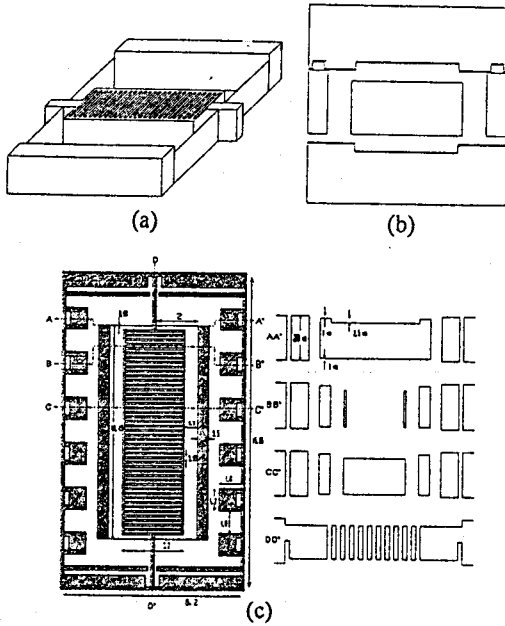


그림 1. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 구조 ; (a) 이동부의 전체적인 모습, (b) 이동부와 고정부가 조합된 상태의 단면도, (c) 이동부의 평면도 및 단면도

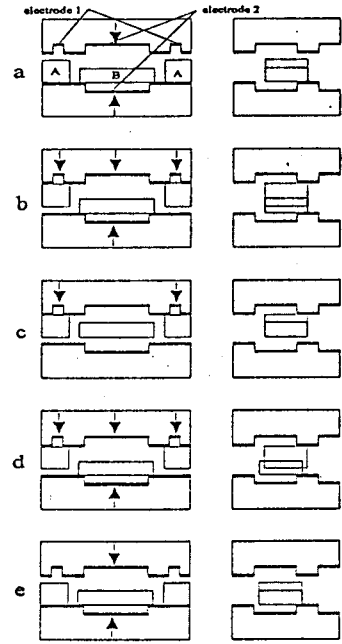


그림 2. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 동작원리

Tin Oxide)를 사용하였다.

3.2 동작원리

그림 2에는 inchworm 마이크로 액츄에이터의 동작원리가 나타나 있다. 먼저 고정부의 stripe 형태의 전극 군(그림 상의 전극 2)에 전압을 인가하면 이동부는 하부 glass에 고정된다 (a). 이 상태에서 이동부의 2개의 큰 전극에 해당하는 고정부의 전극(그림 상의 전극 1)에 전압을 인가하면 이동부의 stripe 전극은 하부 glass에 고정되어 있으므로, 스프링 빔으로 지지되고 있는 양쪽의 큰 전극이 고정부 쪽으로 당겨지게 된다 (b). 이후 전극 2의 전압을 끊으면 스프링 빔의 탄성 복원력에 의해 이동부의 stripe 전극은 상·하 glass 사이에 떠있는 형태가 된다 (c). 이때 이동부 전극과 상부 glass와의 거리는 2.5 μm , 하부 glass와의 거리는 2 μm 이다. 이제 다시 전극 2에 전압을 인가하면 양쪽의 큰 전극들은 고정부에 고정되어 있는 상태에서 이동부의 stripe 전극이 아래쪽으로 당겨지게 된다 (하부 glass와의 거리가 더 가까우므로 아래로 당겨짐). 이때 이동부 전극과 고정부 전극이 정확하게 일치된 상태가 아니므로 aligning force가 작용하게 되며 결국 스프링 빔이 탄성 변형되면서 조금 앞으로 진행된 거리에서 이동부 전극이 고정부에 붙게 된다 (d). 전극 1의 전압을 끊으면 탄성 변형된 스프링 빔의 복원력에 의해 이동부의 큰 전극 역시 앞으로 나아간 상태가 된다 (e). 이 상태에 이르면 (a)의 상태와 동일한 상태가 되며 이후 같은 과정을 반복함으로써 inchworm 마이크로 액츄에이터의 운동이 계속 된다.

4. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 제작

4.1 이동부의 제작

이동부는 200 μm 두께의 (110) 방향 실리콘 웨이퍼를 기판 마이크로 가공하여 제작한다. 먼저 웨이퍼의 양면을 동일한 마스크를 사용하여 1 μm 씩 etching 한다. 두번째 마스크를 사용하여 윗부분만 2.5 μm etching 한다. 이와 같은 두번의 etching을 통해, 그림 2의 (c)에서 전극과 상

부 glass 사이의 2.5 μm , 전극과 하부 glass 사이의 2 μm 가 가능해진다. 마지막으로 윗면과 아랫면이 약간 다른 두장의 마스크를 사용하여 stripe 형태의 전극이 나타날 수 있도록 실리콘을 관통 etching 한다. 이때 윗면과 아랫면의 마스크의 차이는, 이동부와 contact용 pad 부분을 지탱하는 좁은 영역만은 관통 etching 하지 않고 100 μm 정도 남겨둠으로써 이동부와 고정부의 조합이 끝난뒤 소자 단위 별로 분리할 수 있도록 하기 위함이다.

4.2 고정부의 제작

고정부는 300 μm 두께의 pyrex glass를 사용한다. 먼저 glass에는 전해방전 가공 (electrodischarge drilling)에 의해 contact용 lead 선을 연결할 부분에 구멍을 뚫어 놓는다. Chrome을 마스크 재료로 하여 glass를 etching한 후, lift-off에 의해 전극을 형성한다. 전극의 형태는 전압을 인가하는 전극은 etching된 내부에 존재하고 나머지 전극은 접지 전위 전극으로 사용된다. 전극이 형성된 glass는 횡방향 (그림 1 (c)의 단면 AA' 방향)으로는 이동부의 크기대로 dicing하고 종방향 (그림 1 (c)의 단면 DD' 방향)으로는 200 μm 정도만을 scribing 해준다.

4.3 이동부와 고정부의 조합

상부 glass와 이동부를 양극접합 (anodic bonding)에 의해 결합한다. 하부 glass를 다시 양극접합하고 contact용 구멍이 있는 부분에 stencil 마스크를 사용하여 chrome-copper-gold를 순차적으로 증착한다. 이동부를 기판으로 부터 지지하고 있는 부분을 laser assisted etching에 의해 분리하고 contact이 형성되어 있는 실리콘 island 부분은 기계적으로 분리한 후 도전성 epoxy를 사용하여 lead 선을 부착함으로써 모든 공정이 끝나게 된다.

그림 3에는 이동부의 etching이 끝난 상태의 구조가 나타나 있다.

5. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 해석

본 논문에서 제안한 inchworm 마이크로 액츄에이터의 구조 및 동작원리는 기존의 정전형 선형 마이크로 액츄에

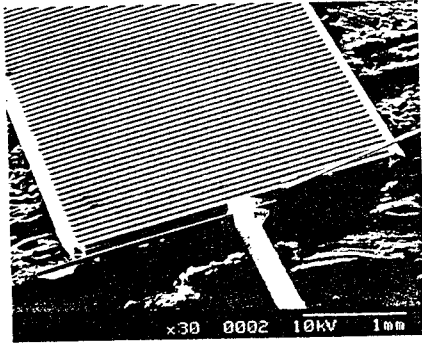


그림 3. 제작된 이동부 전극의 모습

이터들이 갖는 문제점을 해결할 수 있다.

이동부가 고정부 사이에 위치하여 수직 방향의 정전력을 상쇄시키는 방식이 아니고 오히려 어느 한쪽 고정부로 당겨지는 힘 자체가 구동력이 되므로 이동부가 고정부에 붙어버려 움직이지 않는 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 발생력 자체도 증가하게 된다. 또한 이동거리도 인가하는 전압의 주파수에 의해 결정되므로 상당한 속도를 갖는 것이 가능하다. 본 논문에서 제작한 구조의 경우 100 volt의 전압을 1.4 kHz의 주파수로 인가하면, inchworm 마이크로 액츄에이터의 동작 한주기동안 이동거리는 약 1.6 μ m, 속도는 13 cm/min 정도가 되고 그때의 발생력이 수 mN 정도일 것으로 계산되었다.

기판과 이동부 사이에 스프링 빔이 없으므로 스프링 빔이 유연하지 못하여 운동에 방해가 되는 문제도 해결될 수 있다. 이동부를 접지 상태로 유지하는 것은, inchworm 마이크로 액츄에이터는 항상 이동부가 고정부에 접촉하고 있기 때문에 전압을 인가하는 전극을 홈의 내부에 제작하고 나머지 대부분의 영역을 접지용 전극으로 만들어 줌으로써 가능해진다.

고정부 전극과 이동부 전극의 상대적 위치에 따라 발생력이 약해지는 문제도 이와 같은 동작 방식과 구조에서는 해결될 수 있다. 고정부의 전극이 각 상별로 3/4 pitch 만큼씩 떨어져 있으므로 이동부 전극과 고정부 전극의 전체적인 배치는 그림 4와 같이 된다. 이러한 고정부 전극의 배열은 전극들의 위치가 어떤 형태가 되더라도 수평 방향의 aligning force는 일반적인 구조의 경우의 최대값보다

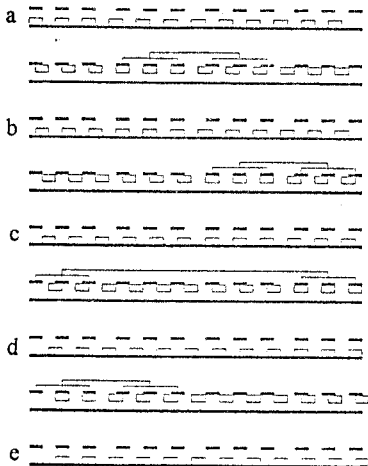


그림 4. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 전극 위치에 따른 구동 방법

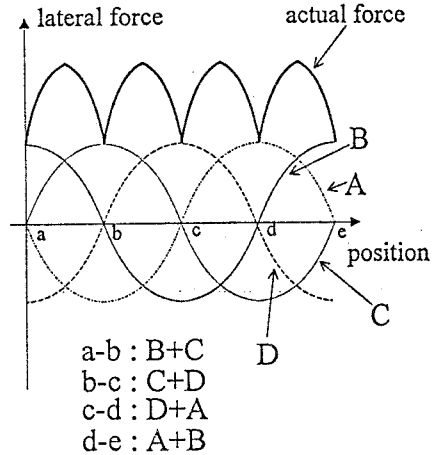


그림 5. Inchworm 마이크로 액츄에이터의 수평 방향의 발생력

커지게 된다. 이러한 수평 방향의 힘의 관계가 그림 5에 나타나 있다.

6. 결론

기존의 정전형 선형 마이크로 액츄에이터들이 갖는 문제점을 해결할 수 있는 방법으로서 inchworm 마이크로 액츄에이터의 구조를 설계하고 그 특성을 분석하였다. 제안된 구조는 이동부가 기판으로 부터 완전히 분리되어 있고, 이동부의 고정부에 대한 부착과 분리를 반복하며 앞으로 나아가는 동작원리에 의해 움직인다. 또한 4상으로 구동되는 고정부 전극들이 각 상별로 3/4 pitch씩 떨어져 있어 발생력이 급격히 감소하는 경우가 생겨나지 않는다. 제안된 구조에 대해 1.4 kHz의 주파수로 100 volt의 전압을 인가하면 13 cm/min의 속도와 수 mN 정도의 발생력을 얻을 수 있는 것으로 계산되었다.

본 논문에서 제안한 inchworm 마이크로 액츄에이터는 기존의 선형 stepping 마이크로 모우터의 기본 구조를 그대로 유지하면서 새로운 동작원리에 의해 동작한다는 데에 의미가 있다. 즉 현재의 기본 구조와 정전형 방식을 그대로 유지할 수 있으면서 그 문제점들을 해결할 수 있다는 것이다.

따라서 본 논문에서 제안한 inchworm 마이크로 액츄에이터의 구조 및 동작원리는, 기판 마이크로 가공을 이용한 정전형 마이크로 액츄에이터가 실제적인 기계부품으로서 실용화되는 데에 응용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] Y.Gianchandani and K.Najafi, "Micron-sized High Aspect Ratio Bulk Silicon Micromechanical Devices," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems*, pp.208-213, 1992.
- [2] K.Suzuki, "Silicon Capacitive Micro-Sensors and Electrostatic Microactuators : Towards a Micro Electro Mechanical System (MEMS)," Ph.D dissertation, Tohoku Univ., 1993.
- [3] R.Mahadevan, M.Mehregany and K.J.Gabriel, "Application of Electric Microactuators to Silicon Micromechanics," *Sensors and Actuators*, vol.A21-A23, pp.219-225, 1990.
- [4] T.Matsubara, M.Yamaguchi, K.Minami and M.Esashi, "Stepping Electrostatic Microactuator," *Proc. 7th Int. Conf on Solid-State Sensors and Actuators*, pp.50-53, 1993.