

정전력을 이용한 마이크로 그리퍼의 설계 및 제작

안 동 섭*, 김 용 권
서울대학교 전기공학파

Design and Fabrication of Micro Gripper Using Electrostatic Force

Dongsup Ahn*, Yongkweon Kim

Department of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

A comb drive electrostatic micro gripper was designed and fabricated. We designed it analytically using electrostatic force and cantilever deflection equation. In fabrication, we used LIGA-like technology consisted of Ni electroplating through polyimide patterned by O₂ Plasma RIE and Al sacrificial layer. This micro gripper was designed to handle an optical fiber which is 125μm in diameter.

1. 서론

유전 공학이나 전자현미경 응용 등의 극히 미세한 양을 다루어야 할 필요가 있는 분야에서는 미세한 물체를 직접 잡고 이동시킬 수 있는 조작 시스템이 필요하다. 이러한 용도에 사용되는 집게는 조작하고자 하는 대상 물체와 거의 비슷한 크기의 것이어야 한다. 기존의 설계, 제작된 마이크로 그리퍼를 분류해 보면 표 1과 같은 특징을 가지고 있다[1-4].

표 1. 기존의 마이크로 그리퍼

	구동방식	공정	구조물 재료	조작 대상
University of California, Berkeley	Comb Drive	Bulk+ Surface Micro-machining	Poly Silicon	Red-Blood Cell(2.7μm), Protozoa
Cornell Univ.	Parallel Plate		Tungsten (W)	*Initial gap(3μm)
Case Western Reserve Univ.	Bimetal		p+ silicon	Small Crystal of Salt(100μm), Optical Fiber

마이크로 그리퍼의 형상이나 치수를 설계하기 전에 고려해야 될 점은 1)구동 방식, 2)공정, 3)구조물의 재료, 4)조작 대상 물체의 크기 등으로 나누어 볼 수 있다.

구동 방식은 크게 정전력 방식과 Bimetal 방식으로 나누어 진다. 정전력 방식에서는, Comb Drive 구조가 평행판 전극 구조보다 제작은 다소 어려우나 동일한 치수의 구동부 크기라면, 평행판 전극 구동부와 비슷한 크기의 정전력이 변위에 거의 무관하게 발생하고 제어가 용이하다. 반면에, Bimetal 구동은 접합된 재료간의 열팽창 계수 차이를 이용하므로 고온(약 220°C)을 발생시켜야 하며 따라서, 응용 분야가 제한되

는 단점이 있다[4]. 그러므로, 본 논문에서는 Comb Drive를 선택하였다.

공정 선택시 고려한 점은 수십 μm 이상의 박막 형성이 가능하고 표준 CMOS 공정과 호환 가능한 공정이어야 한다는 것이다. 본 논문에서는 폴리이미드를 모울드로 이용한 선택적 금속 도금을 사용하여 수십 μm 정도의 박막을 형성하는 공정을 사용하였다[5-8]. 전기 도금은 상온 부근의 저온에서 선택적으로 두꺼운 박막을 형성할 수 있으며 두께 조절이 용이하다는 장점이 있다.

구조물의 재료는 적절한 강도를 가진 물질로서 동작 중에 파괴되지 않아야 하고 제작 공정과 적합해야 한다. 본 논문에서는 모든 단위 공정으로서 표현 미세 가공 기술을 사용하고 두꺼운 구조물 형성 방법으로 폴리이미드를 모울드로 이용한 전기 도금을 사용하므로 구조물의 재료로서 니켈(Ni)을 선정하였다[6-8].

본 논문에서는 직경 125μm 광섬유를 하나씩 조작 가능한 비교적 큰 변위를 발생시킬 수 있는 Comb Drive 정전 마이크로 그리퍼를 설계하고 LIGA-like 기술을 사용하여 제작하였고 이를 보고한다.

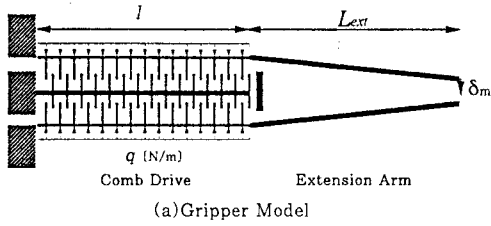
2. 마이크로 그리퍼의 설계

Comb Drive는 Comb Element가 여러번 반복해서 연결된 것이므로 한 개의 Comb Element의 변형을 구한 다음, 이를 중첩하여 최대 변위를 구할 수 있다. 수직 전계에서 사용한 가지는 Comb Element 중 빗살 부분은 폭이 좁고 길이가 길어서 발생 변위에 기여하지 못하고, 정전력은 Comb Element의 끝부분에 집중된다는 것이다.

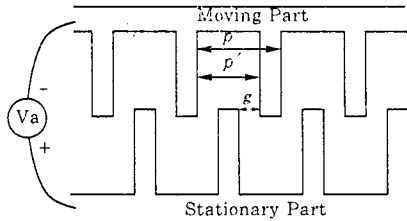
그림 1.(b)에서 Comb Drive의 등가 굽곡 강도(Flexural Rigidity)는 $EI(p/p)$ 로 구해진다. 여기서, E 는 영률이고 I 는 회전 관성이다. Extension Arm은 Comb Drive의 끝에 연결되어 있고, 폭이 Comb Drive 가동부의 폭에 비해 크기 때문에 강체로 볼 수 있다. 등가 굽곡 강도를 이용하여 Extension Arm 끝부분에서 최대 변위를 구하면 식 (1)을 얻는다.

$$\delta_m = \frac{ql^4}{8EI(p/p)} + \frac{ql^3}{6EI(p/p)} L_{ex} \quad \text{---(1)}$$

q 는 단위 길이당 정전력, l 은 Comb Drive의 길이, L_{ex} 은 Extention Arm의 길이이다.



(a) Gripper Model



(b) Comb Drive (Magnified)

그림 1. 마이크로 그리퍼 모델 (Depth : h)

Comb Drive에 전압을 인가했을 때, 발생 정전력의 정확한 식은 평행판 전극에 의한 힘을 포함하지만 전체 발생력에 비해 매우 작으므로 이를 무시하면 식(2)를 얻는다.

$$f_e = \epsilon_0 \frac{h}{2g} V_a^2 \left(\frac{l}{p} \right) \quad \text{---(2)}$$

h는 구조물의 높이, g는 Comb간의 간격, V_a는 인가 전압, p는 Comb Element의 길이이다. 식(2)를 식(1)에 대입한 식을 설계 수식으로 사용한다.

이때, 설계 변수는 l, L_{ext}, p, g가 있다. 변수를 개별적으로 변화시켰을 때 이것이 인가 전압 대 최대 변위 관계에 미치는 영향을 분석하여 표 2와 같이 마이크로 그리퍼의 치수를 결정하였다.

표 2. 설계된 마이크로 그리퍼의 치수

변수	길이	치수
Comb Drive	길이	2000μm
	폭	20μm
Extension Arm	길이	2000μm
	폭	40μm
Comb Element의 길이		80μm
Comb의 폭		20μm
Comb간의 간격		20μm

마이크로 그리퍼의 설계 치수를 결정할 때, 낮은 인가 전압에서 최대 변위를 얻을 수 있는 치수를 택했고, 최소 선폭은 20μm로 고정하였다. Extension Arm 끝부분의 간격은 조작 대상 물체의 최대 크기인 140μm이다. 설계된 치수를 사용하여 인가 전압과 최대 변위와의 관계를 그래프로 나타낸 것이 그림 2이다.

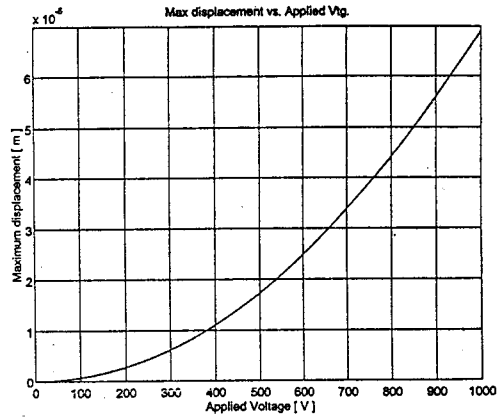


그림 2. 인가 전압 대 최대 변위(이론)

그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 최대 변위는 인가 전압의 제곱에 비례한다. 직경 125μm의 광섬유를 잡기 위해서는, 변위가 7.5μm(140μm-125μm=15μm의 1/2)필요하고 이때의 인가 전압은 300-350 [V]이다.

마이크로 그리퍼로 강체 구를 잡았을 때 잡는 힘을 계산하기 위해 그림 3의 모델을 사용하였다. 이 모델을 사용하여 그리퍼가 강체 구를 잡는 힘을 계산하면 식(3)을 얻을 수 있다.

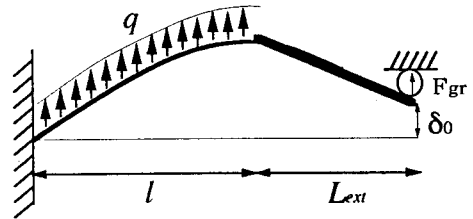


그림 3. 잡는 힘을 구하기 위한 모델

$$F_{gr} = \frac{l^3 \left\{ \frac{1}{8} l + \frac{1}{6} L_{ext} \right\} q - EI \left(\frac{p}{g} \right) \delta_0}{l \left\{ \frac{1}{3} l^2 + l L_{ext} + L_{ext}^2 \right\}} \quad \text{---(3)}$$

δ₀는 Extension Arm의 끝이 강체 구를 잡기 직전까지의 변위이다. 설계한 마이크로 그리퍼로 직경이 125μm인 광섬유를 잡는다면 δ₀는 7.5μm이고 이때, 잡는 힘은 수 μN이다.

3. 마이크로 그리퍼의 제작

마이크로 그리퍼의 제작 공정은 실리콘을 기판으로 한 LIGA-like 공정을 사용하며, 가동부 구조물을 기판 위에 띄우기 위한 희생층으로는 Al을 사용한다. 전체적인 공정을 정리하면 다음과 같다.

실리콘 웨이퍼에 Comb Drive 고정부와 가동부의 전기적인 절연을 위해 열 산화막을 5000Å 형성한다. 그 위에, 도금된 가동부 구조물을 띄우기 위한 희생층으로 Al을 3μm 증착한다. 도금된 구조물이 기판에 고정될 부분의 Al을 습식 식각으로 패터닝한다. 이 기판 위에, 도금을 위한 접착층, 기반층, 기반 보호층(Adhesion, Seed, Seed Protection Layer)으로서 Cr/Ni/Cr(200/2000/500Å)을 전체적으로 증착한다. 그 위에 폴리이미드를 스핀 코우팅해서 약 30μm의 박막을 입힌다. 그 다음, 120°C에서 30분간 Semicure한다. 그 위에 Photo Resist 패턴을 형성하고 Ni를 2000Å 증착한 후 Lift Off해서 RIE(Reactive Ion Etching)를 위한 Mask를 형성한다. 이 기판을 O₂ Plasma에서 RIE로 패터닝해서 도금 모울드를 형성한다. 그 다음, 기반 보호층 Cr을 제거하고 기반층 Ni와 도금된 Ni간의 접착을 강화시켜 주기 위해 Cu를 5분간 도금한다. 여기에 Ni를 30μm 도금한 다음, 모울드로 사용된 폴리이미드를 고압 O₂ Plasma에서 제거한다. 마지막으로, 희생층 Al을 습식 식각으로 제거한다. 이상의 공정 및 공정 결과가 그림 4. 및 그림 5.에 각각 나타나 있다.

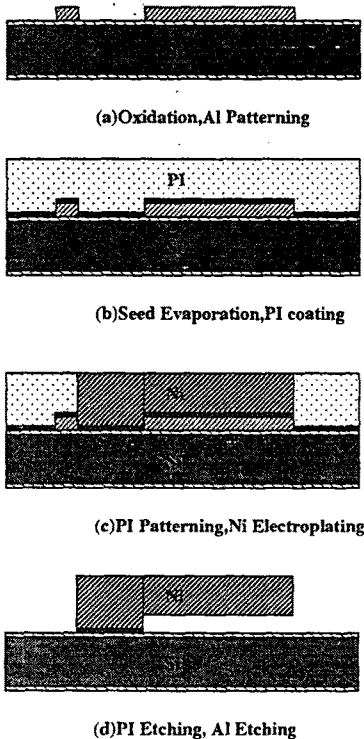


그림 4. 공정 순서도

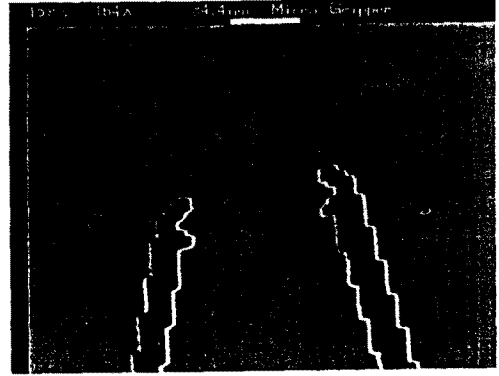


그림 5. 제작된 도금 모울드(SEM)

4. 결론

직경 125μm의 광섬유를 잡을 수 있는, 가동부 전체 길이가 4000μm인 Comb Drive 마이크로 그리퍼를 설계하였다. 인가 전압과 변위, 잡는 힘의 관계를 해석한 결과, 약 350 [V]에서 7.5μm 변위를 얻었고 잡는 힘은 수 μN이었다.

Al을 희생층으로 하고, 기반층 Ni와 도금된 Ni의 접착 강화를 위해 Cu를 얇게 도금한 후 Ni를 도금하는 LIGA-like 공정으로 마이크로 그리퍼를 제작하였다.

참고문헌

- [1] Chang-Jin Kim, Albert P. Pisano, "Silicon-Processed Overhanging Microgripper," *Journal of Micro Electro Mech. Syst.*, Vol. 1, No. 1, March 1992, pp. 31-36.
- [2] Chang-Jin Kim and Albert P. Pisano, Richard S. Muller, Martin G. Lim, "Polysilicon microgripper," *Sensors and Actuators A* 33 (1992), pp. 221-227.
- [3] L. Y. Chen, Z. L. Zhang, J. J. Yao, D. C. Thomas, and N. C. MacDonald, "Selective Chemical Vapor Deposition of Tungsten for Microdynamic Structures," in *Proc. IEEE Micro Electro Mech. Syst. Workshop*, Salt Lake City, UT, Feb. 1989, pp. 82-87.
- [4] Wen-Hwa Chiu and Mehran Mehregany, "Microfabricated Tweezers with a Large Gripping Force and a Large Range of Motion," *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, South Carolina, June 13-16, 1994, pp. 107-110.
- [5] 안 동섭, 이 상욱, 김 호성, 김 용권, "감광성 폴리이미드를 모울드로 이용한 기반층이 없는 선택적 금속 도금에 관한 기초 연구," *대한전기학회 추계종합학술대회 논문집* 1993, pp. 204-206.
- [6] A. Bruno Frazier and Mark G. Allen, "Metallic Microstructures Fabricated Using Photosensitive Polyimide Electroplating Molds," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 2, No. 2, June 1993, pp. 87-94.
- [7] Chong H. Ahn, Yong J. Kim, and Mark G. Allen, "A Fully Integrated Micromachined Inductor With A Nickel-Iron Magnetic Core (The Switched DC/DC Boost Converter Application)," *The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 70-73.
- [8] Mark G. Allen, "Polyimide-Based Processes for the Fabrication of Thick Electroplated Microstructures," *The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 60-65.