

미세 물체 조작을 위한 3젓가락형 집계의 설계 및 제작

박종규(포항공대 대학원 기계공학과), 문원규(포항공대 기계공학과)

Design and Fabrication of a 3 Chopstick Gripper for Microparts

J. K. Park(Mecha. Eng. Dept. Postech), W. K. Moon(Mechanical Eng. Dept., Postech)

ABSTRACT

A new type of gripper for micrometer-size objects is developed using piezoelectric multi-layer benders. It is composed of three chopsticks, two of which are designed to grip micro-objects. The third one is reserved for helping the two when objects are released from the chopsticks. It is well known that a micro object is much easier to grasp than to release it after holding it. The electrostatic force between the chopsticks and an object is believed to be the main cause of adhesion in a dry environment. The surface tension becomes very important when liquids are present or in a liquid. The third auxiliary chopsticks is introduced to solve these surface effects. All the three chopsticks are made of tungsten wires with sharpened ends by etching. When grasping microparts, the two chopsticks are utilized, and, when releasing them anywhere the parts are located, the third one reduces the electrostatic force between the objects and the chopstick may be to help the other two chopsticks to hold an object in a desired orientation. We constructed the three chopstick gripper for micro objects and test their function by holding and releasing an object of a diameter of 100 micrometers. We make use of open loop voltage control. The bender displacement resolution is sub-micrometer. The gripping forces, about tens of mN are obtained. The experiment shows that the third auxiliary chopstick functions effectively.

Key Words : Gripper(그립퍼), Piezoelectric multilayer bender(압전 다중막형 벤더), Third auxiliary chopstick(세번째 보조 젓가락), Electrostatic force (정전력), Gripping force(쥐는 힘)

1. 서론

마이크로 그립퍼는 미세 조립(Microassembly)에 중요한 구성요소로서 초소형 부품의 이송 및 조립에 이용될 뿐만 아니라 세포의 조작[1], 미세 외과 수술[2] 등의 다양한 미세 연구영역에서 유용한 도구이다. 그러나 미세 세계라는 환경으로 여러 가지 제약을 가지므로 이를 파악하고 개선하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 미세 영역에서의 그립퍼(Gripper)가 가져야 하는 특성을 연구하여 미세 부품 조립 시에 일어나는 문제점을 해결할 수 있는 정밀하고 효과적인 그립퍼를 개발하고자 노력하였다.

미세환경 하에서는 일상 생활에서 느끼는 것과는 상이한 현상에 부딪칠 수 있고 이는 여러 물리적 현상 중에서 크기의 변화에 따라 조건이 변화하여 주요인자가 달라져서 발생하는 것이다. 따라서 미세 구조물을 핸들링하는 그립퍼 제작 및 이용에는 이러한 물리적 특이성이 고려되어야 한다. 예를 들어 미세 환경에서는 표면장력 및 반 데르 발스 힘, 모세관 힘, 정전기력 등의 영향이 현저히 커져서

현상의 주요 인자가 되지만 일상적인 세계에서는 중요하지 않은 인자이다.[3] 그리고 작업조건은 작은 스케일 때문에 온도, 공기의 영향 등도 중요한 요건들로 작용한다. 미세 환경에서 작업을 하는 그립퍼는 이러한 앞서 언급한 주위 작용력을 이해하여, 이들이 하고자 하는 작업에 방해가 되지 않고 오히려 작업에 이용될 수 있도록 설계되어야 하며 또 대상 물체의 재료에 관계없이 취급할 수 있어야 한다. 더불어 미세 부품을 정밀하게 조립하기 위해서는 마이크로 또는 그 이하의 정밀도를 보장할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 조립이 되는 부품의 관점에서는 그립퍼의 쥐는 힘에 의해 대상물체가 손상되지 않아야 하면서도 그 잡는 힘이 충분하여 물체를 원하는 위치까지 원하는 상태로 이동시킬 수 있어야 한다.

1980년대 후반에 MEMS에 대한 연구가 활성화되면서 마이크로 그립퍼에 대한 연구도 활발하게 이루어졌다. 그립퍼의 종류도 매우 다양하여 압전 그립퍼[4], 흡착식 그립퍼, 형상기억합금을 이용한 그립퍼 등이 있다.[5] 최근에는 2젓가락형 그립퍼가 등장하여 실제 바이오 기술에 응용되고 있다.[6]

본 그립퍼의 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째로 총 세 개의 텅스텐 팁을 이용해서 물체를 잡기에 용이하도록 설계되었으며 구동기 하나는 스택 구동기를 사용하여 팁 끝 점을 정밀 제어할 수 있도록 고안되었다. 둘째로 그립퍼 지지대를 수치 해석을 통해 고주파수 대역의 고유진동수를 가지도록 설계하여 진동 문제를 해결하였다. 세 번째로 정전력을 활용하여 물체를 놓을 때 생기는 점착력 문제를 극복하도록 설계되었다. 네 번째로 각각의 팁에 약 3도 정도의 기울임을 주어 팁이 물체에 점 접촉 상태에서 집을 수 있도록 설계하여 원하는 방향으로 원활하게 물체를 집을 수 있도록 설계되었다.

2. 요구 사항과 설계 과정

그립퍼 팁의 종류는 기존의 연구에서 매우 다양하게 이용되었다. 그 예로 실리콘을 이용한 미세 그립퍼 팁이나 형상기억합금을 응용한 팁 그리고 흡착식 원형 팁 등 다양하다.[5] 그 중 대표적으로 이용되고 있는 미세 공정에 의한 실리콘 팁은 팁 끝점의 크기를 마이크로 단위로 설계 제작될 수 있다는 장점이 있으나 재료 특성상 파손의 위험이 많아 실제 조립 공정에 쓰이기에는 어려움이 많다. 따라서 본 그립퍼에서는 이러한 문제점을 해소하기 위해 원자 현미경에서 탐침용으로 쓰이는 텅스텐 와이어 팁을 이용하였다. 텅스텐 탐침은 팁 끝점을 10나노미터 이하로 최대한 작게 만들 수 있을 뿐만 아니라 충분한 강성을 지니고 있어서 파손의 위험이 없다는 장점을 가지고 있다.

기존의 그립퍼에서는 물체를 잡을 때 두 개의 팁을 이용하고 있으나 이 때에는 물체의 무게 중심선을 정확히 잡아야 하고 팁 간의 끝점이 정확히 일치해야 하며 충분히 쥐는 힘을 주어야만 물체를 이탈시키지 않고 이송시킬 수 있다는 어려운 점이 있다. 따라서 본 그립퍼에서는 3개의 팁 중 두 개의 팁은 물체를 잡을 수 있도록 하였고 나머지 하나의 팁은 물체가 튕겨나가지 않게 하는 역할을 맡게 하여 안정적으로 집고 이송시킬 수 있도록 설계되었다. 그리고 팁간의 끝점을 맞출 수 있도록 하나의 팁은 물체를 집는 방향으로 구동시키지 않고 끝점을 맞추는 방향으로 구동시킴으로써 지지하는 역할을 하도록 설계하였다.

각 팁이 수평을 이루게 되었을 때 물체와 닿는 면적이 늘어나게 되어 점착력 문제가 생길 뿐 아니라 물체의 집을 방향을 조절하는 데 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 각 팁에 3도의 기울임을 줌으로써 물체와 점 접촉 상태를 이룬 채 집을 수 있도록 설계하였다.

미세 환경에서 정확한 위치로 이동해서 물체를 잡을 때 가장 큰 문제로 작용하는 것 중에 하나는 진동문제이다. 일반적으로 그립퍼가 구동되는 변위는 약 50에서 100마이크로 미터이고 변위의 민감도는 약 0.1마이크로 미터이다. 따라서 저주파수 대역으로 설계되었을 때는 이러한 민감도 이상의 변위 오

차를 낼 뿐만 아니라 대상 물체에 접근할 때 공진 효과가 발생하여 조작에 큰 문제를 야기할 수 있다. 본 그립퍼는 이러한 문제점을 모델링과 수치 해석을 통해서 최소 100Hz 이상의 고유진동수를 가질 수 있도록 설계하였으며 각 부품간의 고유진동수의 간섭현상에 의한 진동 증폭 현상을 없애기 위해 각 부품간의 고유진동수 차이를 100Hz 이상으로 두었다. 또한 저주파수 대역의 변위의 요인으로 작용할 수 있는 유연한 연결부위를 최대한 피하기 위해 각 부품이 가능한 볼트 체결로 조립될 수 있도록 하였다.

미세 물체를 조작하는 데 기존 연구에서 많은 지적이 있었던 문제로 팁과 물체간의 점착력을 들 수 있다. 이러한 점착력의 원인으로는 정전력과 반데르발스 힘 그리고 표면장력 등을 들 수 있고 그 중에서도 정전력의 영향이 크다는 사실이 알려져 있다.[1] 이러한 점착력의 주원인인 정전력을 위란으로 여기지 않고 활용함으로써 물체를 조작할 수 있는 연구가 이미 발표된 바 있다.[5] 따라서 이러한 개념을 본 그립퍼에 응용하고자 하였다. 일단 물체를 집을 때는 젓가락형 구동원리를 그대로 이용하면서 그라운딩(Grounding)을 통해 물체에 존재하는 전하를 빼낸 후 이송시킬 때 1개의 팁은 물체에서 분리하면서 음전하를 가하고 나머지 2개의 팁에는 양전하를 가한다. 이후 물체를 원하는 위치에 분리시킬 때는 팁 하나를 물체와의 거리를 충분히 벌리면서 가했던 전하를 제거하면 물체가 분리될 것이다. 이러한 가상 시뮬레이션(Simulation) 알고리즘을 통해 물체의 조작문제를 해결하고자 하였다.

이러한 여러가지 문제점을 고려해서 설계된 그립퍼의 구조는 Fig 1에서 잘 나타나있다. 그립퍼는 그립퍼지지대, 지지대와 구동기 연결부, 2개의 압전 멀티레이어 벤더 구동기(Piezoelectric Multilayer Bender Actuator)와 1개의 압전 스택 구동기(Piezoelectric Stack Actuator) 그리고 마지막으로 3개의 텅스텐 탐침으로 구성되어 있다. 각각의 부품의 정밀 모델링(Modeling), 설계(Design) 및 조립(Assembly)은 MDT(Mechanical Desktop) 모델링 패키지에 의해 수행되었으며 대상물체의 크기를 100마이크로 이하로 정하였기 때문에 팁 끝부분의 간극을 약 100 마이크로미터 정도가 되도록 설계하였다. 구동기는 압전 멀티레이어 벤더 구동기와 압전 스택 구동기를 이용하였다. 압전 멀티레이어 벤더는 압전물질에 전압을 인가했을 때 길이방향의 변형이 일어나는 데 이러한 길이방향 변형을 굽힘방향 변위로 이용하는 구동기를 말한다.[14] 즉 전기적 에너지를 기계적 에너지로 전환시켜주는 압전현상을 이용하는 압전판을 여러 겹 겹침으로써 큰 변위를 낼 수 있는 구동기다. 본 그립퍼에서 2개의 팁이 이러한 멀티레이어 벤더에 의해 구동된다. 또한 압전 스택은 33방향의 변형을 이용하여 정밀 위치 제어기로 많이 쓰이는 구동기로서 최대 -10에서 +60V를 가해서 -1에서 +5마이크로미터의 변위로 작동한다.[13] 압전 스택은 팁의 끝점을 맞추는 구

동기 역할을 하도록 설계되었다. 그리고 각각의 팁에 전선을 부착하여 전하를 이동할 수 있게 하였고 그라운딩시킬 수 있도록 하였다.

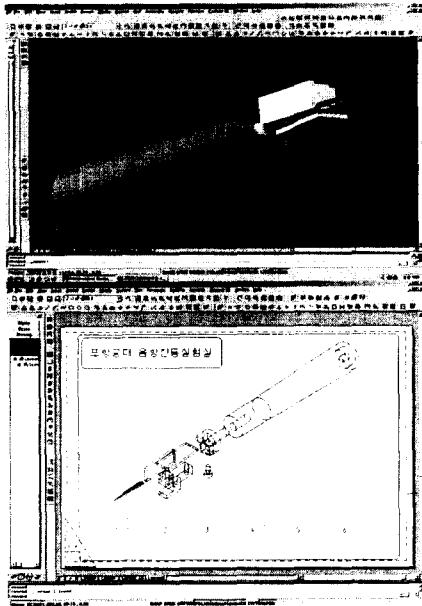


Fig 1 Design and layout of the gripper

3. 수치 해석

앞서 지정한 바와 같이 그립퍼의 지지대 부분에서 약한 진동이라도 발생하면 실제 미세 물체를 잡는 부분인 팁 끝 부분에서는 100마이크로미터 이상의 큰 진동을 야기할 수 있다. 이러한 진동은 사실상의 미세 물체를 잡거나 이동시키는 작업을 불가능하게 한다. 이러한 구조 진동에 의한 문제를 봉쇄하기 위해서는 그립퍼 지지대의 구조를 진동에 잘 견딜 수 있도록 충분한 강성과 높은 고유진동수를 갖도록 설계해야 한다.[8] 본 연구에서는 팁 및 그립퍼 지지대의 고유 진동수를 수학적 모델링을 통해 계산하여 그립퍼의 기계적 성질이 요구조건에 맞도록 설계하였고 설계가 완성된 후 이를 유한 요소법 패키지인 ABAQUS를 통해 확인하였다. 설계에 사용된 고유진동수 계산식은 외팔보(Cantilever) 모델을 이용하여 작성되었으며 팁과 지지대를 실린더 형으로 가정하였다. 실린더형 외팔보의 고유 진동수 계산 공식은

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0.23mL^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E}{0.23 \times 16m \times \rho} \frac{d}{L^2}}$$

$$(I = \frac{\pi d^4}{64}, m = \rho \pi^2 L)$$

로 나타내어지고[9] 이를 간단히 쓰면 $f_n = 607.56d / L^2$ 으로 된다. 이 공식을 이용하여 계산해보면 본 텅스텐 탐침의 경우 약 191Hz로 예

상할 수 있었으며 지지대의 경우 약 600Hz로 예상되었다. 지지대의 경우 수치해석 결과는 Fig 2에서 나타낸 바와 같이 555.18Hz로서 간단한 설계 공식을 이용한 결과와 큰 차이를 보이지 않았고 진동 문제를 야기시킬만한 주파수 대역을 훨씬 벗어나 있었다.

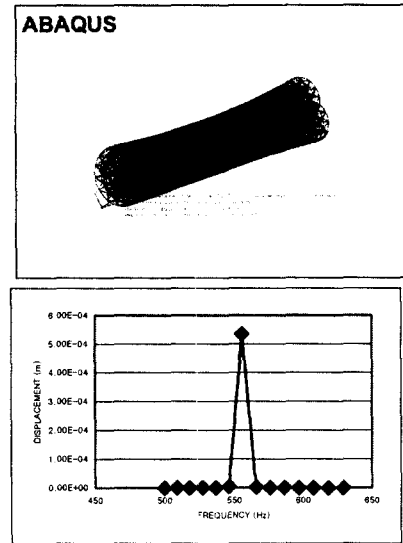


Fig 2. Simulation of gripper base

4. 제작 과정

각 구성요소 중 핵심 부품인 텅스텐 탐침은 원자현미경(STM)에 사용되는 텅스텐 탐침을 제작하는 방식과 같이 에칭을 통해 그 끝이 최소의 반경을 가지도록 제작되었으며 각 부품은 정밀가공, 연삭작업 그리고 방전가공을 통해 치수오차를 최소화하였다. 일단 텅스텐 와이어를 부착하기 전에 스틸 튜브(steel tube)를 먼저 부착하여 텅스텐 와이어가 끼워질 수 있도록 하여 조정 및 탈착이 원만하게 하고 전선을 부착하여 각 팁에 전압 및 전류를 가할 수 있도록 제작하였다. 그리고 구동기는[14] Ferroperm사에서 외주 주문 제작을 통해서 구매하였다.

정밀 조립 과정에서는 XYZ축 마이크로 스테이지 회전 마이크로 스테이지, 지지대 그리고 일반 그립퍼를 이용하였으며 정확한 위치에서 조립되기 위해서는 일단 각 부품의 정밀 가공을 통해 치수의 오차를 최소화해야 했다. 그리고 시아노 아크릴레이트 계통의 순간접착제를 이용하여 팁과 밴더를 부착하였으며 12배율의 CCD 카메라를 통해 팁간의 간극을 확인하면서 마이크로 스테이지 위치 제어를 통해 조립하였다. 조립과정은 Fig3에 잘 나타나있다.

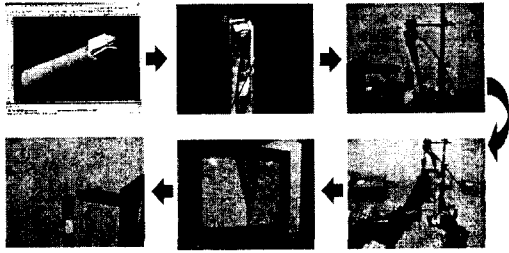


Fig 3. Assembly procedure of the gripper

5. 성능 시험

Fig 4는 시험 세팅을 보여주고 있다. 집는 과정과 놓는 과정을 입체적으로 분석하기 위해 총 2대의 CCD카메라와 소니 캠코더 1대를 이용하였으며 입력원을 위해 파워 앰프 서플라이(Power Amp Supply) 3대가 동원되었다. 대상 물체는 약 100마이크로미터의 금속 쇠구슬이었고 팁의 최대 변위는 ± 116 마이크로미터였다. 물체를 잡는 과정은 일단 3축 마이크로 스테이지 2개와 회전 스테이지를 통해 대상 물체까지 근접한 후 그립퍼 구동기의 구동을 통해 이루어졌다. 집는 과정에서 일부 정전력에 의한 점착력은 다시 확인할 수 있었으나 3개의 팁을 가지고 있는 그립퍼 특성상 그립핑 과정은 대체적으로 효과적인 작동을 이루었다. 그리고 설계과정에서 예상했던 진동문제는 일단 방진테이블을 통해 외부에서 전달되는 진동을 차단시킨 채 실험했을 때 구동에 거의 영향을 미치지 않을 정도로 해소되었음을 확인할 수 있었다. Fig 5와 6은 구동과정과 그립핑 실험 과정을 잘 보여주고 있다.



Fig 4 Setting of the gripping test

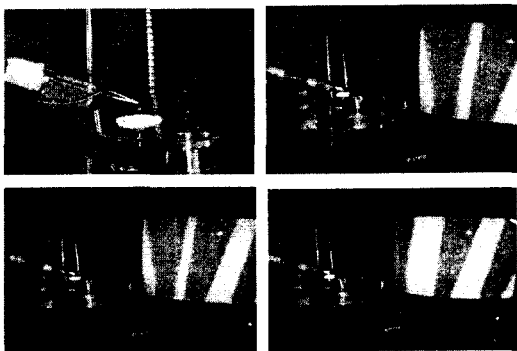


Fig 5. Actuation test of the gripper

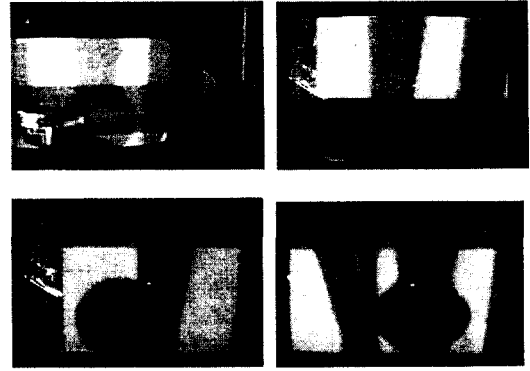


Fig 6. Gripping Test of the gripper

6. 결론

개발된 마이크로 그립퍼는 마이크로 어셈블리의 필수 요소이고 반도체, 의학, 생물, 화학 등 여러 분야에 응용이 가능하다. 특히 재료의 물성치 측정, 세포 및 염색체 조작이나 미세 외과 수술 등의 다양한 연구에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

본 그립퍼는 CAD 프로그램과 수치해석을 통해 체계적으로 설계되었고 정밀한 조립과정을 통해 설계된 치수대로 제작되었다. 그리고 3개의 텅스텐 와이어를 활용하여 물체를 잡는 데 편의를 기하였으며 젓가락형이기 때문에 물체의 형상에 상관없이 다양한 각도로 조작할 수 있었다. 텅스텐 탐침은 큰 강성을 지니고 있어서 충분한 그립핑 힘으로 물체를 집을 수 있었고 특히 스택을 이용하여 정확한 팁 끝점을 맞추어서 그립핑할 수 있었다. 그리고 대상물체에 물성에 큰 영향없이 집을 수 있는 장점을 가지고 있었다.

향후 과제

압전을 이용한 정밀한 마이크로 그립퍼는 제작된 후 미세 조립 공정 시스템에 적용되어 마이크로 핀의 조립 작업을 시도할 것이다. 동시에 압전의 히스테리시스(Hysteresis)를 실시간으로 보상하는 방법을 연구하고 PSD를 이용한 위치 보상법을 접목하여 마이크로 그립퍼의 작업 정밀도를 더욱 향상시킬 것이다. 그리고 정확한 그립핑 힘을 얻을 수 있는 전류 적분기를 이용하여 압전 밴더를 구동기 뿐만 아니라 센서로써도 동시에 활용할 계획이다. 그리고 정전력을 이용한 시험을 통해 점착력 문제를 완전히 해결할 계획이다.

후기

본 연구는 과기부의 정책연구개발사업에 의한 "마이크로 텔레 매니퓰레이터 제작을 위한 핵심 요소 및 시스템 기술 개발" 과제(관리 번호:전기전자 99-15)를 통해 수행되었다.

참고문헌

1. Xudong Li, Guangua Zong, Shusheng Bi, "Development of Global Vision System for Biological Automatic Micro-Manipulation System," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Korea, 2001, pp. 127-132
2. <http://robotics.jpl.nasa.gov/tasks/rams/homepage.html>
3. 오현석, "부각되는 마이크로 시스템과 그의 생산을 위한 해결 과제들(상)", LG생산기술, Vol.2 No.6, 1999, pp.12-15
4. Ando, Y., Sawada, H., Okazaki, Y., Ihikawa, Y., Kitahara, T., Tatsue, Y., Furuta, K. "Development of Microgrippers", Reichl, H., Microsystem Technologies, Springer, 1990, pp. 844-899
5. 오현석, "마이크로 그립퍼 기술의 현황과 문제점", LG생산기술, Vol.2 No.12 1999, pp.20-25
6. Tamio, T., Tatsuo, A., "Development of MicroManipulation System with Two-Finger Micro Hand" in Proc. IEEE Trans. on Robotics and Automation. 1999, Vol.15, No.1
7. Shigeo Fukada, "A Newly Developed Positioning System with Nanometric Resolution Driven by Leadscrew Mechanism," Proceedings of the 1st European Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, Copenhagen, Vol. 2, 2000, pp.274-281
8. 정완균 "마이크로 텔레 매니플레이터 제작을 위한 핵심 요소 및 시스템 기술 개발" 정책연구 개발사업 과제 중간 보고서, vol.1, 2000, pp55-57
9. Pilkey, W.D., "Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices" Wiley-Interscience, 1994, pp466-468
10. http://www.di.com/Brochures/B01_DI Corp.pdf
11. Jan G. Smits, Susan I. Dalke and Thomas K. Cooney, "The Constituent Equations of Piezoelectric Bimorphs," Sensors and Actuators A, vol.28, 1991, pp. 41-61
12. A. Sommerfeld, "Partial Differential Equations in Physics," Academic Press, 1949, pp. 111-115
13. 김덕호, 김경환, 김태송, 박종오, "마이크로 액츄에이터의 연구동향 : 마이크로 로봇의 연구개발 사례를 중심으로," 제어 자동화 시스템 공학회지 vol.7, No.1, pp.42-51
14. <http://www.ferroperm.com>