

센서화된 초탄성 마이크로그리퍼의 설계, 제작 및 성능평가

김덕호* · 김병규† · 강현재* · 김상민*

(2003년 4월 29일 접수, 2003년 8월 20일 심사완료)

Design, Fabrication, and Performance Evaluation of a Sensorized Superelastic Alloy Microrobot Gripper

Deok-Ho Kim, Byungkyu Kim, Hyunjae Kang and Sang-Min Kim

Key Words : Microgripper(마이크로그리퍼), Microassembly(마이크로조립), Piezoelectric Polymer(압전폴리머), Superelastic Alloy(초탄성합금), Micro Force Sensing(마이크로 힘센싱)

Abstract

This paper presents the design, fabrication, and calibration of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper. Electro discharge machining technology is employed to fabricate super-elastic alloy based micro gripper. It is tested to present improvement of mechanical performance. For integration of force sensor on the micro gripper, the sensor design based on the piezoelectric polymer PVDF film and fabrication process are presented. The calibration and performance test of force sensor integrated micro gripper are experimentally carried out. The force sensor integrated micro gripper is applied to perform fine alignment tasks of micro opto-electrical components. It successfully supplies force feedback to the operator through the haptic device and plays a main role in preventing damage of assembly parts by adjusting the teaching command.

1. 서론

최근 마이크로 부품 (MEMS) 조립 및 생체 세포 조작 작업과 같은 응용분야에서 1mm 이하의 미소세계에서의 센싱 및 조작의 중요성이 부각되고 있다. 특히, 미소세계의 역학에 관한 불확실성으로 인해 정밀하고 신뢰성이 높은 조작을 위해서는 피드백 감지 센싱 기능을 하는 정밀한 마이크로그리퍼의 필요성이 제기된다.⁽¹⁾

마이크로 가공 기술의 발달과 함께 여러가지 마이크로 그리퍼에 관한 선행 연구사례들이 발표되었는데, 제작방법, 액츄에이터 방식, 센서 채용 방식에 따라 유형이 분류된다. 예를 들면, 마이크로그리퍼는 실리콘 표면가공,⁽²⁾ 레이저 마이크로가공,⁽³⁾ 전기방전가공⁽⁹⁾ 방법에 의해 제작될 수 있다. 구동방식에 따라서는 정전기 액츄에이터,^(2,10) 압전 액츄에이터,^(3,4) 진공

(Lorentz) 전자기력 방식^(6,11)의 마이크로그리퍼 등이 있다. 또한, 마이크로그리퍼의 센서화를 위해서 압 저항식 힘 센서⁽⁵⁾ 또는 반도체형 스트레인 게이지 센서^(3,6,9) 등이 사용되었다. 대표적인 마이크로그리퍼의 개발 사례를 소개하면 다음과 같다.

Kim 과 Pisano⁽²⁾는 자체적인 센싱 기능은 없지만 실리콘 표면 공정을 이용하고, 정전기 힘을 이용하는 폴리실리콘(polysilicon) 마이크로 그리퍼를 처음으로 개발했다. Arai et al.⁽⁵⁾는 마이크로 그리퍼의 표면에 흡착력을 감소시키기 위하여 마이크로피라미드 형태의 구조를 제시하고 압저항식 센서를 제작하여 통합하였다. Goldfarb 과 Celanovic⁽⁹⁾에 의하여 제시된 마이크로그리퍼는 압전세라믹 액츄에이터에 의하여 구동되며 그리퍼의 위치 및 힘을 모두 측정하기 위하여 반도체형 스트레인 게이지를 이용하였다.

마이크로조립 및 미세조작에 성공적으로 사용되기 위한 마이크로 그리퍼의 필요조건을 정리해 보면 중량대 비 높은 힘 출력, 높은 정밀도, 피드백 센싱 기능이 있다. 그러나, 기존에 개발된 대부분의 집게방식(tweezer) 마이크로 그리퍼에서는 그리퍼력을 직접 센싱하기에 제한이 있고, 실제적으로 마이크로조립 시스템에서

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원

E-mail : bkim@kist.rekr

TEL : (02)958-6730 FAX : (02)958-6910

* 한국과학기술연구원 마이크로시스템센터

액츄에이터, 보이스 코일 모터를 채용한 로렌즈

센서정보에 기반한 조작이 제대로 이뤄지지 못했다.

본 논문에서는 압전폴리머 힘센서가 통합된 마이크로 그리퍼의 설계, 제작 및 캘리브레이션에 관한 연구수행 결과를 소개하였다. 개발한 마이크로 그리퍼의 특징은 첫째, 소형 압전 폴리머 PVDF 힘센서를 제작하여 마이크로그리퍼의 힘센싱이 직접 가능하게 한 점과, 둘째, 기계적인 동작특성을 개선한 초탄성 합금재질의 마이크로그리퍼를 전기방전가공을 통해 제작한 점이다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서 초탄성 합금 마이크로그리퍼의 설계 및 전기방전가공을 이용한 제작에 대해 설명하였다. 3 장에서 압전폴리머를 이용한 힘센서의 제작공정에 대해 설명하였다. 4 장에서는 마이크로그리퍼의 성능평가 실험과 센서의 캘리브레이션 결과, 마이크로조립 시스템에 통합하여 힘 피드백에 기반한 조립 실험 결과를 다루었다.

2. 마이크로그리퍼 설계 및 제작

2.1 설계 및 해석

Fig. 1은 본 연구에서 개발된 마이크로그리퍼를 보여준다. 전체적으로 보이즈 코일 모터 액츄에이터, 초탄성 NiTi 합금 그리퍼 핸드, 압전폴리머 힘센서로 구성되어 있다.

마이크로그리퍼를 구동시키는 선형추력은 보이즈 코일 모터에 가해지는 전류입력에 비례하여 선형적으로 발생하는 로렌쯔력의 원리에 의한다. 발생된 선형 추력은 기계적으로 탄성힌지 매커니즘을 통해 마이크로그리퍼 끝단의 변위를 발생시키며, 지렛대의 원리(lever mechanism)를 통해 변위는 증폭된다. 본 연구그룹에서 이전에 개발한 마이크로그리퍼의 시제작품은 스테인리스 스틸 (Stainless Steel: SUS-304)을 재질로 Nd YAG 레이저가공법을 이용하였다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 유한요소해석 (FEM)에 근거하여, 마이크로그리퍼의 재질을 NiTi 초탄성합금으로 선정하였다. 마이크로그리퍼의 기계적인 구조재질을 초탄성 합금으로 채택함으로써 탄성이 좋아지고, 큰 변형률(strain) 변화에도 회복이 잘 이뤄지며, 반복적인 큰 응력(stress)에도 영구적인 변형이 적다. 이러한 특성을 이용하면 마이크로그리퍼의 끝단 그리핑 변위를 증폭하고, 반복정밀도, 내구성을 개선할 수 있다.

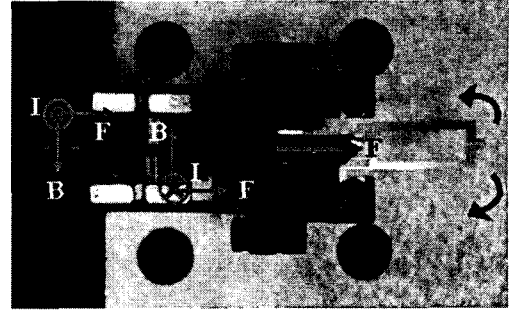


Fig. 1 Microgripper and its operational principle actuated by voice coil motors

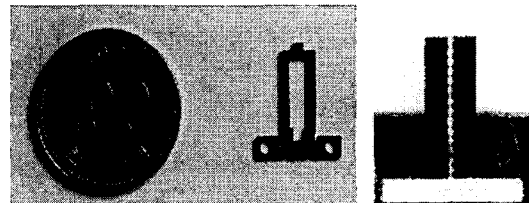


Fig. 2 Elastic hinge mechanism and saw-shaped surfaces of microgripper fabricated by EDM

2.2 EDM 가공법을 이용한 제작

극히 미세한 형상물의 가공을 위해 반도체공정법, 레이저가공방법, 마이크로 방전가공과 같은 방법의 적용이 가능하다. 본 연구에서는 초탄성 합금 재질의 마이크로그리퍼를 제작하기 위해 마이크로 방전가공 (micro-EDM: Micro Electro Discharge Machining) 방법을 사용하였다. 마이크로 방전가공방법을 이용한 미세가공의 특징으로는 큰 중횡비(high aspect ratio)의 정밀한 가공에 적합하여 삼차원 형상구조의 가공이 가능하고, 경도가 큰 금속재료에도 가공성이 좋은 점을 들 수 있다.

이러한 마이크로 방전가공의 특징을 이용하여 Fig. 2 에서 보듯이 NiTi 재질 마이크로그리퍼의 탄성힌지구조 부위를 가공하였다. 또한 마이크로 그리퍼 끝단에 톱(saw) 모양의 미세구조를 두께 500 μm 로 가공하여, 파지물체와 접촉하는 면에 파지(gripping) 및 해지(releasing)시 불필요한 흡착력(adhesion force)의 최소화를 꾀하였다. 마이크로 그리퍼의 크기는 15.5 \times 5.22 \times 0.5 mm 이다. 그리퍼 양 표면 사이의 간격은 조작하고자 하는 대상체의 크기에 따라 조정 가능하며, 여기서는 초기간격을 100 μm 로 설계 제작하였다. 그리퍼가 조작할 수 있는 목표대상체의 크기는 그리퍼의 최대 변위를 감안했을 때 최대 300 μm 이다.

3. 압전 폴리머 센서 제작

3.1 압전폴리머 센서

Poly(VINYLIENE FLUORIDE) (PVDF)는 $(-CH_2-CF_2-)_n$ 단위체 사슬로 이루어진, 약 50-65%의 결정(crystallinity)을 가지는 압전폴리머 재료이다.⁽⁷⁾ PVDF 재료가 압전성(piezoelectricity)을 지닌 것은 단위체내에서 탄소원자에 비해 불소원자가 상대적으로 큰 전자음극성(electronegativity)을 가져 큰 쌍극성 모멘트가 발생되는데 기인한다. 다른 압전재료와 마찬가지로 PVDF 필름도 기계적인 접촉에 의한 압력, 음향 및 열에 의한 응력에 의해 전기적인 신호를 발생하게 된다. 센서로서 선형성이 좋고, 넓은 대역폭을 지니며, 신호대 노이즈 비가 높아 신호의 신뢰성이 높다. PVDF 압전폴리머 재료는 저가이며, PZT 와 같은 압전세라믹 재질에 비해 가볍고 매우 유연한 구조를 가져 복잡한 형상의 표면에도 사용 가능하다. 또한 화학적 물질에 대한 우수한 안정성과 생체적합성(biocompatibility)을 갖는다. 이러한 특성을 잘 활용하여 힘센서로써 제작하여 마이크로그리퍼의 표면에 부착하면 마이크로부품 또는 생체시료를 조작⁽⁸⁾ 하는 응용분야에 적용하기 적합하다고 판단된다. 본 연구에서는 마이크로로봇 그리퍼의 센서화를 실현하기 위하여 압전폴리머재료인 PVDF 를 사용하여 힘센서를 설계 제작하였다.

3.2 제작공정

센서의 제작을 위해 28 μm 두께를 갖는 압전폴리머 PVDF 필름(MSI Inc.)을 사용하였다. 고속의 절단 톱(dicing saw)을 이용하여 원하는 크기의 직사각형 모양으로 압전폴리머 층을 잘라내었다. PVDF 필름의 양면에는 니켈 전극이 도포되어 전기적인 출력을 얻을 수 있으며, 압전폴리머층에 전극을 도포하는 금속화(metallization) 과정은 생략할 수 있었다. PVDF 필름 층의 니켈 전극 위에 50 μm 직경의 금도선(gold wire)을 실버에폭시(Dotite 전기도전성 에폭시: D-500)를 사용하여 부착하였고, 실내 온도에서 4 시간동안 경화시켰다.

얇은 패릴렌(parylene) 코팅 공정을 통해 압전폴리머 센서의 기계적인 강성(stiffness)을 좋게 했고, 니켈 전극을 외부의 전기적인 노이즈와 기계적인 진동으로부터 절연시켰다. 패릴렌은 금속, 유리, 합성수지, 세라믹, 실리콘과 같은 다양한 재료 표면에 구성요소를 보호하기 위하여 코팅물질로 사용되는 폴리머 재료이다. 또한 패릴렌은 생체적합성이 있어 마이크로그리퍼의

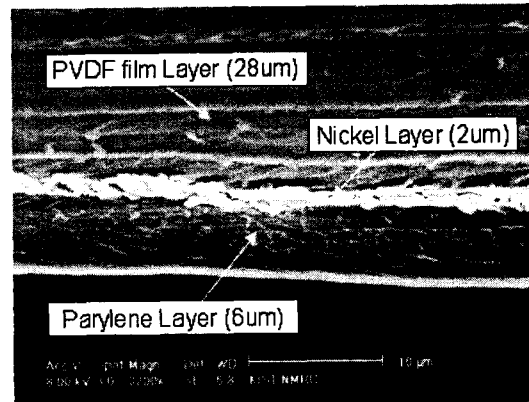


Fig. 3 Side view SEM image of the fabricated piezoelectric tactile sensor with parylene coating for showing the details of the piezo, nickel, and coated parylene

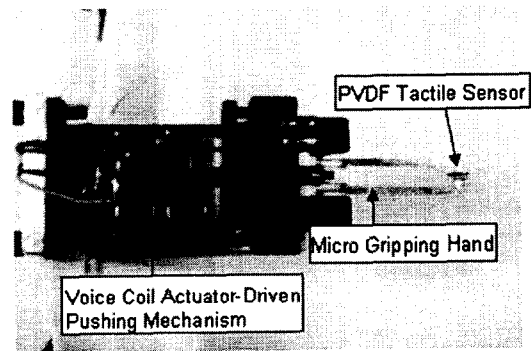
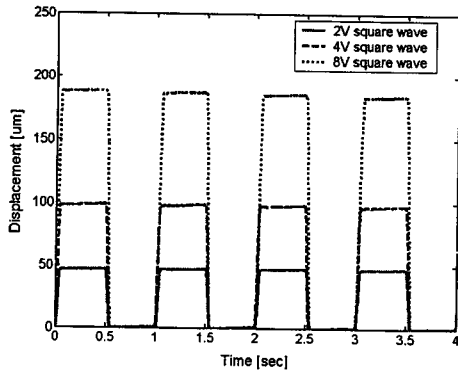


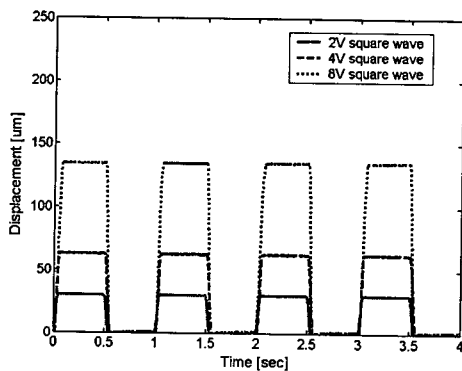
Fig. 4. A tactile sensor integrated microgripper

마이크로 힘센서에 응용되면 생체시료의 조작에도 이용할 수 있는 이점이 있다. PVDF 압전폴리머 층의 양면에 패릴렌 코팅층을 입히면 외부 열에 대한 절연층으로도 기능할 수 있으므로 압전체의 초전기성(pyroelectricity)을 보상하는 효과도 기대할 수 있다.

Fig. 3 은 소형 힘센서 시제품의 단면도를 보여주는 전자현미경 사진이다. 압전폴리머 필름 층, 니켈 전극 층 및 패릴렌 코팅 층으로 이루어져 있으며, 압전형 힘센서의 전자현미경을 통한 단면의 세부구조를 보여준다. 압전폴리머 필름층과 패릴렌 코팅층의 두께는 각각 28 μm 와 6 μm 이며, 니켈 전극의 두께는 약 2 μm 이다. Fig. 4 에서 보듯이 제작한 압전폴리머 소형 힘센서는 비도전성 에폭시를 이용하여 초탄성합금 재질의 마이크로그리퍼의 양 표면에 부착하여 통합하였다.



(a) superelastic alloy



(b) stainless steel (SUS 304)

Fig. 5 Open-loop step response of position control loop for a 1 Hz square wave, showing the actual position at 2V (solid), 4V (dashed), and 8V (dotted)

4. 실험결과

4.1 그리퍼 성능 평가 실험

본 연구에서 방전가공에 의해 제작한 초탄성합금 재료의 그리퍼와 스테인리스 스틸 재료로 제작된 그리퍼와의 비교 평가실험을 수행하였다. 우선 보이스코일 모터에 의한 추력에 의해 발생하는 그리퍼의 변위를 측정범위가 1mm 이고 정밀도가 0.5 μm 의 사양을 갖는 레이저 변위측정 센서 (모델: LK 3100, Keyence 사) 를 이용하여 측정하였다.

Fig. 5 는 개루프 1 Hz 사각파(square wave) 입력을 각각 다른 전압으로 마이크로그리퍼의 액추에이터에 인가 하였을 때 그리퍼의 변위 측정 실험결과이다. 실험결과에서 보듯이 마이크로 그리퍼의 최대변위(stroke) 측면에서는 초탄성합금 그리퍼가 스테인리스 스틸 재료의 그리퍼보다

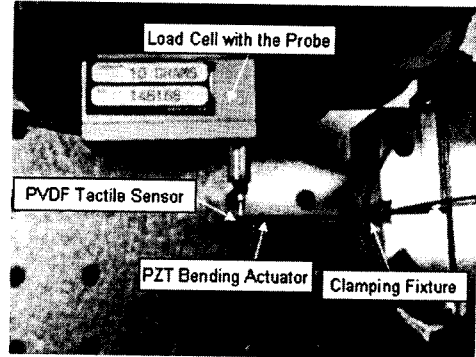


Fig. 6 Experimental setup for analyzing the performance of the PVDF sensor with parylene coating (size: 2 × 6 mm, thickness: 28 μm PVDF film)

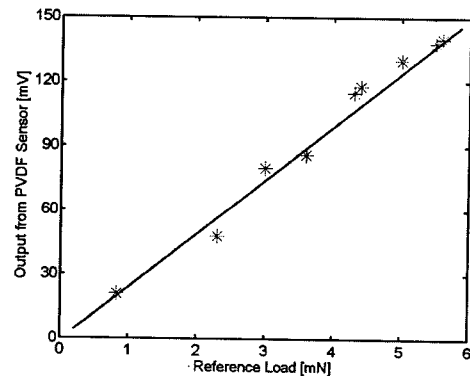


Fig. 7 Calibration result of the miniaturized PVDF sensor (2 × 6 mm) for load input

좋은 성능을 보여주고 있다. 이러한 특성은 비슷한 수준의 선형추력이 인가되었다 하더라도 마이크로그리퍼의 신중한 재질선택에 따라서 더 우수한 변위특성을 나타냄을 보여주는 결과이다.

4.2 센서 캘리브레이션 실험

2 × 6mm 의 크기로 제작한 소형 압전폴리머 힘센서를 대상으로 캘리브레이션 실험을 수행하였다. 캘리브레이션 장치구성은 Fig. 6 에서 보는 바와 같다. 1mm 직경을 갖는 소형 프로브가 결합된 초정밀 로드셀 (모델: GSO-10, Transducer techniques 사, 최대측정범위: 100mN, 해상도: 10 μN)을 제어된 외력을 인가할 수 있는 진동 소자가 결합된 센서의 표면에 접촉하여 출력되는 압전폴리머센서의 신호를 측정하였다. 센서의 출력신호는 전하증폭기 (모델: 5011B10, Kistler 사) 회로와 저주파역 필터를 통해 DAQ 보드를 통해 획득되었다.

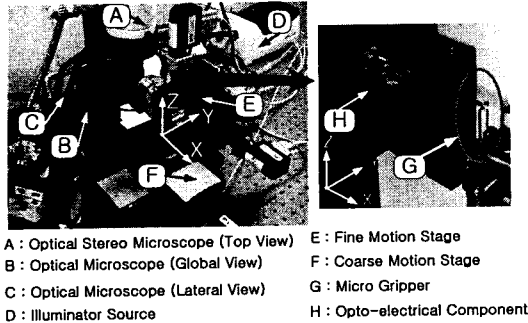


Fig. 8 Application of the sensorized microgripper in a force-sensing microassembly system

실험결과 Fig. 7 에서 보듯이 PVDF 센서에서의 출력전압이 인가되는 외력에 비례해서 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있으며, 측정된 범위에서의 분해능은 39.5 mN/V 이며, 선형도(linearity)는 $\pm 6.5\%$ 이다.

4.3 마이크로 조립시스템 통합실험

본 연구에서 설계 제작한 센서화된 마이크로 그리퍼를 광통신부품 조립시스템에 통합하여 힘 반향(force feedback) 실험을 수행하였다.

Fig. 8 은 광통신부품 조립을 수행하는 마이크로 조립시스템을 나타내고 있다. 마이크로 조립 시스템은 7 자유도의 분산형 마이크로 매니플레이션이 가능하며, 3 자유도 미동 마이크로 매니플레이터, 2 자유도 거동 x-y 스테이지, 1 자유도 회전형 스테이지 및 1 자유도 마이크로그리퍼로 구성되어 있다. 또한, 스테레오 현미경, 작업자에게 힘 반향 정보를 제공하는 햅틱 장치 (모델: 6 자유도 PHANTOM 1.5 Premium, SensAble Technologies, Inc.)로 구성 되었다. 본 연구에서는 마이크로그리퍼가 통합된 마이크로 조립 시스템을 이용하여 현재 산업 현장에서 수작업으로 조립되는 광통신부품을 비전과 햅틱인터페이스를 이용한 힘반향 정보기반의 조립실험을 수행하였다.

Fig. 9 는 실제 광통신 부품의 조립의 삽입공정에서 광파이버와 LD 펌프모듈 부품간의 접촉시에 초탄성 마이크로그리퍼에 탑재된 센서에서 측정된 실험결과를 나타내고 있다.

광파이버 부품은 깨지기 쉬워 작업자가 느끼지 못하는 mN 범위의 힘에서도 파손 될 수 있으며, 광통신 부품 중 LD 펌프 모듈의 조립 공정은 광파이버를 LD 펌프 모듈에 수 μm 의 정밀도로 삽입을 하는 공정으로 부품간의 접촉이 빈번하게 일어나고 이에 따라서 광파이버 부품이 파손이 빈번하게 일어난다. 더욱이 개발한 마이크로 조립 시스템의 비전 정보의 정밀도는 $18\mu\text{m}/\text{pixel}$ 로, 비전 정보로 각 부품간의 접촉을 판별하기에는 한계가 있다. 그러므로 힘센서가 통합된 마이크로

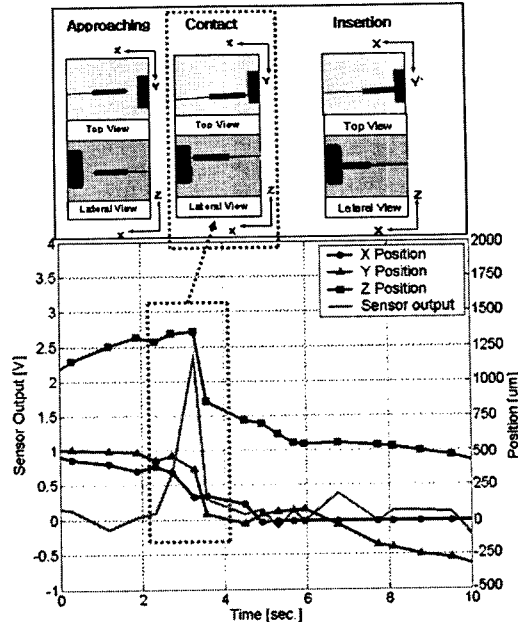


Fig. 9 Experimental result of the force feedback-based microassembly

그리퍼를 이용하여 광파이버 부품 조립시에 발생하는 각 부품간의 충돌을 실시간으로 감지하는 것은 조립작업에서 매우 중요하다. 본 연구에서 개발한 센서화된 초탄성 마이크로그리퍼를 이용한 마이크로 조립 시스템은 광통신 부품 조립 시 광통신 부품간의 접촉을 실시간으로 검사하고, Fig. 9 와 같이 각 부품간의 접촉이 일어나면 마이크로그리퍼의 표면에 탑재된 센서에서 전단응력이 발생하여 순간적으로 큰 전압신호가 발생된다. 발생한 전압신호는 전하 증폭기를 통해 증폭되어 햅틱장치를 통해 작업자에게 힘 반향 정보가 전달되어 각 부품간의 충돌 정보를 감지할 수 있게 된다. 광파이버는 휘어지기 쉬워 LD 펌프모듈과 충돌후에 약 1 초간 접촉상태를 유지하다가 작업자가 힘 방향 정보에 기반하여 3 자유도 교시정보를 마이크로 매니플레이터에 전달함으로써 충돌에 의한 광파이버의 손상을 막고, 삽입공정을 성공적으로 수행한다.

또한 마이크로 조립 시스템은 각 부품간의 충돌이 일어나면 조립 공정을 일시 중단 시킨 후, 마이크로 매니플레이터의 위치를 충돌이 일어나기 전의 위치로 이동시킴으로써 부품의 파손을 막는다. 이와 같은 실시간 힘 반향 정보는 광통신 부품 조립에 있어 부품의 파손을 줄임으로써 작업의 효율과 신뢰성을 높인다. 본 연구에서는 이상과 같이 힘 반향이 가능한 마이크로 그리퍼를 광부품조립 작업에 효과적으로 통합하여 마이크로 그리퍼의 유용성을 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 소형 압전폴리머 힘센서가 통합된 마이크로 그리퍼의 설계, 제작 및 캘리브레이션에 대해 설명하였다. 본 연구에서는 마이크로 그리퍼의 힘센싱이 가능하도록 압전폴리머 센서를 설계, 제작하였으며, 마이크로 방전가공법을 이용한 초탄성 합금 재질의 그리퍼를 제작하여 그리퍼의 기계적인 성능을 개선하였다. 제작된 압전폴리머 힘센서는 캘리브레이션 실험을 통해 광통신 조립용 마이크로조립 시스템에 통합되었고, 햅틱 인터페이스를 통해 조작자에게 높은 민감도 및 우수한 신호 대 노이즈 비 (S/N 비) 의 힘 센싱 신호를 피드백 해주었다. 이와 같은 역각 정보의 피드백을 통해 광파이버 조립 작업에서 부품의 손상을 막는 것이 가능하고, 마이크로 부품 조립의 효율성을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 과학 기술부 21 세기 프론티어 연구 개발 사업인 지능형 마이크로 시스템 개발 사업 (<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비 지원을 받아 수행되었음 ; 과제협약번호 MS-02-324-01.

참고문헌

- (1) Zhou, Y., and Nelson, B. J., 2000, "The Effect of Material Properties and Gripping Force on Micrograsping," *Proceedings of 2000 IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 1115~1120.
- (2) Kim, C. J., and Pisano, A. P., 1992, "Polysilicon Microgripper," *Sensors and Actuators, A*, Vol. 33, pp. 221~227.
- (3) Menciassi, A., Scali, G., Eisinger, A., Anticoli, C., Francabandiera, P., Carrozza, M.C., and Dario, P., 2001, "An Instrumented Probe for Mechanical Characterization of Soft Tissues," *Biomedical Microdevices*, pp. 149~156.
- (4) Tanikawa, T., and Arai, T., 1999, "Development of Micro-manipulation System having a Two-fingered Micro-hand," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 1, pp. 152~162.
- (5) Arai, F., Lee, G. U., and Colton, R. J., 1998, "Integrated Microendeffector for Micromanipulation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 17~23.
- (6) Kim, S.-M., Kim, K., Shim, J.-H., Kim, B. K., Kim, D.-H., and Chung, C.-C., 2002, "Position and Force Control of a Sensorized Microgripper," *Proceedings of the 2002 International Conference on Control, Automation and System*, pp. 319~322.
- (7) Fung, C., Elhajj, I., Li, W. J., and Xi, N., 2002, "A 2-D PVDF Force Sensing System for Micromanipulation and Microassembly," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1489~1494.
- (8) Dargahi, J., Parameswaran, M., and Payandeh, S., 2000, "A Micromachined Piezoelectric Tactile Sensor for an Endoscopic Grasper-Theory, Fabrication and Experiments," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 329~335.
- (9) M. Goldfarb and N. Celanovic, 1999, "A Flexure-based Gripper for Small-scale Manipulation," *Robotica*, Vol. 17, No. 2, pp. 181~188.
- (10) K. B. Lee and Y.-H. Cho, 2001, "Laterally-driven Electrostatic Repulsive-force Microactuator," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 25, No. 3, pp. 424~433.
- (11) Min, H.-J., Lim, H.-J., Kim, B., and Kim, S. H., 2002, "Design and Performance Evaluation of Impact Type Actuator using Magnetic Force," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1438~1445.