

## 마이크로 광 조형 기술을 이용한 마이크로 벨로우즈 액추에이터의 개발

강현욱\*(포항공대 대학원 기계공학과), 이인환(충북대학교 기계공학부),  
조동우(포항공대 기계공학과)

### Development of Micro-bellows Actuator Using Micro-stereolithography Technology

H.-W. Kang(Dept. of Mech. Eng., POSTECH), I. H. Lee(Sch. of Mech. Eng., CBNU),  
D.-W. Cho(Dept. of Mech. Eng., POSTECH)

#### ABSTRACT

All over the world, many kinds of micro-actuators were already developed for various applications. The actuators are using various principles such as electromagnetic, piezoelectric and thermopneumatic etc. The most of the micro-actuators have been made using 2D based MEMS technology. In these actuators, it is difficult to drive 3-dimensional motion. This characteristic gives the limit of actuator application. However, micro-stereolithography technology has made it possible to fabricate freeform three-dimensional microstructures. In this technology, 2-dimensional micro-shape layer is cumulated on the other layers. This layer-by-layer process is the main principle to fabricate 3-dimension micro-structures.

In this research, a micro-bellows actuator that is vertically moving was developed using the micro-stereolithography technology. When pressure was applied into the bellows, a non-contact actuating motion is generated. For actuation experiment, syringe pump and laser interferometer were used for applying pressure and measuring the displacement. Several hundreds micro-scale actuation was observed. And, to demonstrate the feasibility of proposed actuation principle, in this research, a micro-gripper was developed using half-bellows structure.

**Key Words :** Micro-actuator(마이크로 구동기), Bellows(벨로우즈), Micro-stereolithography(마이크로 광 조형 기술)

#### 1. 서론

전 세계적으로 마이크로 가공 기술을 이용하여 특정 기능을 수행하도록 많은 종류의 마이크로 액추에이터들이 개발되었다. 그 구동 원리 또한 압전, 정전력, 형상기억합금 등 매우 다양하다[1,2]. 이러한 마이크로 액추에이터들은 대부분 2 차원 기반의 가공 기술인 MEMS 기술을 이용하여 개발되어졌다. 그러나 이러한 가공 기술은 3 차원 구동 등의 특정 기능을 수행하기 위한 액추에이터의 개발에 많은 한계를 지니고 있다. 그리고 MEMS 기술에서 이용되는 실리콘 재료는 액추에이터로서 많이 이점을 가지는 반면에 많은 단점도 지니고 있다.

마이크로 스케일에서 액추에이터에 의하여 발생 하는 표면 마찰은 액추에이터의 내구성 및 성능에

많은 문제점을 야기시킨다[3]. 이러한 문제를 피하기 위하여 많은 연구자들이 재료의 변형에 의하여 구동이 이루어지는 비접촉 구동 방식의 액추에이터를 소개하였다[4-6]. 그러나 MEMS 기술에서 주로 이용되는 실리콘은 액추에이터의 재료로서 구동 효율등의 단점을 가지고 있다. 이에 대하여 많은 연구자들이 실리콘이 아닌 폴리머 기반의 액추에이터를 개발하기 위한 연구를 수행하였다[6,7]. 폴리머 계열의 재료는 실리콘에 비하여 낮은 탄성계수를 가지고 있어, 액추에이터로서 높은 효율을 제공할 수 있는 기반을 제공하여 준다. 또한 그 종류도 다양하여 바이오 공학, 화학 공학 등 필요로 하는 목적에 부합한 재료의 선택과 저렴한 재료의 이용이 가능하다는 특징이 있다[6].

그 외에, 2 차원 기반의 MEMS 기술은 마이크로

스케일에서 넓은 범위의 구동을 유도하기가 힘들다. MEMS 기술을 이용한 액추에이터 개발에서 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구 결과들이 보고되었다[4,8]. 그러나 이러한 방법들은 액추에이터 시스템의 복잡성을 증가시키게 되어, 제작 측면에 있어 많은 단점을 유발시키게 된다. 또한 마이크로 스케일에서 3 차원 모션의 유도는 더욱 어렵다. 이는 제작 기술이 2 차원 기반 기술이기 때문이다.

이에 본 연구에서는 3 차원 가공 기술인 마이크로 광 조형 기술[9,10]을 이용하여 수직 방향으로 넓은 구동범위를 가지는 벨로우즈 액추에이터를 개발하였다. 이러한 벨로우즈 액추에이터는 기존의 마이크로 액추에이터에 비하여 넓은 범위의 구동이 가능하며, 3 차원 가공 기술을 이용한 단일 공정을 통하여 제작이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한 폴리머 재질로 이루어져 있어, 바이오 공학, 화학 공학 등 그 목적에 따른 다양한 재료의 선택성을 가지고 있다. 그 뿐만 아니라 본 연구를 통하여 개발된 마이크로 벨로우즈 액추에이터의 구동 원리를 이용하면, 다양한 3 차원 모션을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 가능성을 보여주기 위하여 벨로우즈 구동원리를 이용한 마이크로 그림퍼를 제작하였다.

## 2. 마이크로 벨로우즈 액추에이터의 개발

### 2.1 구동 원리 및 구조적 특징

마이크로 벨로우즈 액추에이터는 여러 개의 주름을 가지고 있는 벨로우즈 형상을 이용한 것이다. Fig. 1 과 같이 여러 개의 주름으로 이루어진 3 차원 벨로우즈 형상 내부에 압력이 인가되면, 특정 방향으로 구조가 변하게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 일정 이상의 압력에 의하여 주름을 이루는 각도가 변하게 된다. 이러한 각도의 변화는 벨로우즈를 수직방향으로 늘이는 효과로 나타난다. 이러한 변형 원리를 가지는 벨로우즈 형상을 마이크로 가공 기술로 제작하여, 인가되는 압력을 조절하면 필요로 하는 마이크로 구동을 얻을 수 있다.

이러한 벨로우즈 액추에이터의 총 구동 범위는 압력이 가해졌을 때 변하는 주름의 각도와 주름의 수에 따라 변하게 된다. 제작과정에서 주름 수의 조절은 액추에이터의 총 구동 범위와 분해능에 큰 영향을 미치게 된다. 서로 다른 주름 수를 가진 벨로우즈 액추에이터들의 인가 압력이 서로 같다고 가정할 때, 압력에 대하여 주름의 수가 많을수록 큰 변위를 가지는 반면에 낮은 분해능을 가지게 된다. 즉, 벨로우즈 액추에이터의 구조적 특징에 의하여, 구동 범위 및 분해능이 주름의 수와 연관되어 나타난다는 특징이 있다. 그 외에도 재료의 성질도 매우 중요하다. 낮은 입력 파워에 대하여 넓은

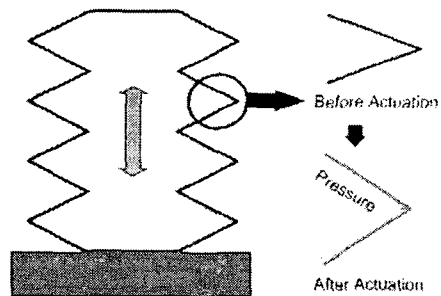


Fig. 1 Actuation principle of bellows actuator

구동 범위를 가지기 위해서는 높은 유연성을 가진 재료가 필요한 반면에, 높은 분해능을 가지기 위해서는 낮은 유연성의 재료가 필요하다. 그 외에 벨로우즈를 구성하는 벽의 두께 및 주름의 기울임 각도 등도 큰 영향을 주게 된다. 이러한 여러 가지 변수들은 벨로우즈 액추에이터의 디자인에 유연성을 부여하여 다양한 분야로의 적용을 가능하게 한다.

### 2.2 액추에이터의 제작

2.1 절에서 살펴본 것처럼, 벨로우즈 액추에이터는 내부로 압력을 가하기 위하여 속이 빈 벨로우즈 형상을 가지고 있다. 또한 마이크로 시스템으로의 적용을 위한 초소형 크기의 3 차원 형상으로서의 제작이 요구되며, 구동을 위하여 유연한 재질로 이루어져야 한다.

이러한 벨로우즈 액추에이터의 제작을 위하여 본 연구에서는 마이크로 광 조형 기술[9,10]을 이용하였다. 마이크로 광 조형 기술(micro-stereolithography technology)은 현재 산업 분야에서 널리 쓰이고 있는 광 조형(stereolithography) 기술을 응용하여 마이크로 크기의 제품을 제작하는 기술이다. 즉, Fig 2 와 같이 수  $\mu\text{m}$  직경의 초점 된 레이저 빔을 광 경화성 수지 표면 위에 주사하여 단면 형상을 성형하고, 이를 층층이 쌓아올려 원하는 3 차원 형상을 얻어내는 것이다. 이러한 마이크로 광 조형 기술을 이용하면 벨로우즈와 같은 복잡한 3 차원 형상의

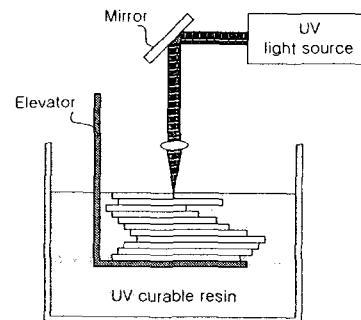


Fig. 2 The Principle of micro-stereolithography

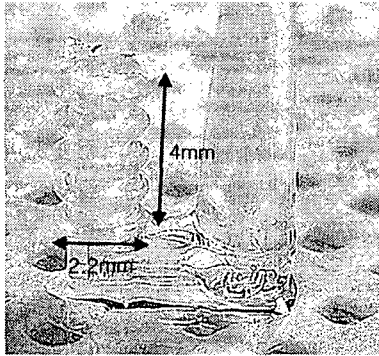


Fig. 3 Micro-bellows actuator

구조물을 단일 공정을 통하여 제작할 수 있다. 더구나 성형 시 이용되는 광 경화성 수지는 폴리머 계열로써 액추에이터가 필요로 하는 높은 유연성을 지니고 있다. 뿐만 아니라 본 연구에서는 일반 캐속조형에서 이용되는 상용화된 광경화성 수지인 SL5180 (Huntsman LLC)을 이용하였다. 이는 이미 상용화되어 있는 많은 종류 중의 하나로써, 액추에이터의 적용 목적에 따라 다양한 재료의 선택성이 가능하다. Fig. 3은 이러한 기술을 이용하여 제작된 마이크로 벨로우즈 액추에이터를 보여주고 있다. 벨로우즈를 이루는 각 주름은 지름 2.2mm에 높이 0.8mm이며, 전체 높이는 4mm에 해당한다.

## 2.3 구동 실험

### 2.3.1 실험 장치

Fig. 4는 실험에 이용된 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 액추에이터의 구동을 위하여 주사기를 이용한 공압이 이용되었다. 그림에서 보는 것처럼 액추에이터 내부로 공압을 가하기 위하여 공압 파이프가 벨로우즈에 연결되었다. 그리고 공압의 생성은 주사기 펌프를 이용하였다. 주사기 펌프가 연결된 파이프를 통하여 벨로우즈에 압력을 공급해 주고, 전달된 압력은 벨로우즈를 구동시키게 된다. 그리고 벨로우즈의 구동 변위는 레이저 간섭계(Polytec, Interferometer : OFV-511)를 이용하여 측정하였다.

### 2.3.2 실험 결과 및 고찰

2.3.1 절에서 소개된 실험 장치를 바탕으로, 마이크로 벨로우즈 액추에이터의 구동 실험을 수행하였다. Fig. 5는 서로 다른 주름의 수(3,5,7)에 따른 벨로우즈 액추에이터의 구동결과를 압력에 대한 변위의 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보듯이 압력이 증가할수록 구동 변위가 선형적으로 증가하는

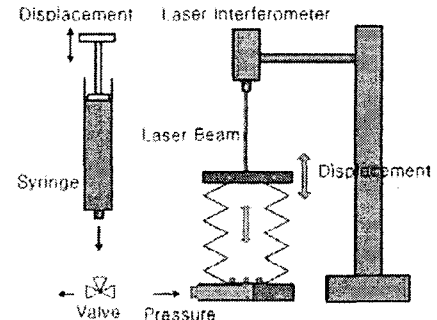


Fig. 4 Bellows displacement measuring system

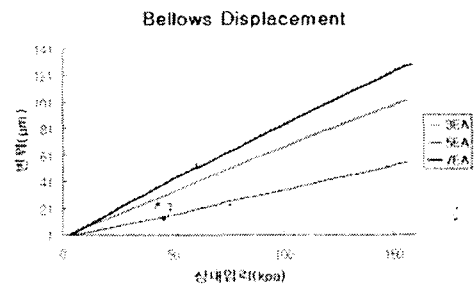


Fig. 5 Measuring results of bellows actuation

것을 볼 수 있었다. 그리고 벨로우즈를 구성하는 주름의 수와 비례하여 구동 변위가 발생하는 것을 볼 수 있다. 즉, Fig. 5의 그래프에서 단위 주름수당 압력에 대한 변위의 기울기는 약  $0.1246(\mu\text{m}/\text{kPa} \cdot n)$ , 단,  $n$ 은 주름의 수이다. 이는 압력에 대한 변위가 주름의 수에 비례한다는 것을 의미한다.

그리고 최대 변위는 주름의 수가 5개인 벨로우즈 액추에이터의 경우 약  $400 \mu\text{m}$ 에 이르는 것으로 측정되었다. 이는 광학 현미경을 이용한 측정 결과이다.

### 2.4 벨로우즈 액추에이터 구동원리의 응용

마이크로 광 조형 기술의 3 차원 가공이라는 특징과 벨로우즈 액추에이터의 구동 원리는 다양한 응용성을 가진다 Fig. 6과 Fig. 7은 구동 원리의 다양한 응용성을 보여주기 위하여 제작된 마이크로 그림퍼이다.

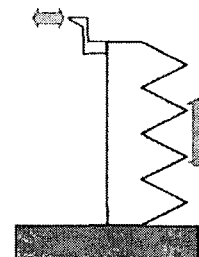


Fig. 6 Bending motion using bellows actuation principle

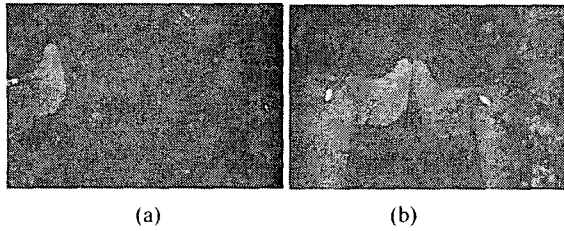


Fig. 7 Micro-gripper using bellows actuation principle: (a) before and (b) after actuation

마이크로 그립퍼의 굽힘운동을 유도하기 위하여, Fig. 6의 개략도와 같이 기존의 벨로우즈의 형상을 반으로 나눈 형상으로 설계하였다. 이러한 형상은 주름이 있는 한쪽 면에서만 변위가 발생하여, 전체적으로는 굽힘 운동이 유도되기 때문이다. Fig. 7은 제작 및 구동 결과를 보여주고 있다. (a)는 구동 전, (b)는 구동 후의 모습으로 성공적인 작동을 확인할 수 있다. 그 외에도 벨로우즈를 이용한 다관절 구동 등 특정 목적에 따라 마이크로 스케일에서 다양한 구동을 유도할 수 있다.

### 3. 결론

마이크로 광 조형 기술은 마이크로 스케일에서 자유 3 차원 구조물 제작을 가능하게 한다. 그리고 광 경화성 수지라는 폴리머 재료를 이용한다. 이 재료를 이용한 액추에이터는 실리콘에 비하여 높은 효율과 종류의 다양성 및 경제적 측면에서 많은 장점을 제공하여 준다.

본 연구에서는 이러한 마이크로 광 조형 기술을 이용하여 수백 마이크로 이상의 변위를 가진 마이크로 벨로우즈 액추에이터를 개발하였다. 개발된 액추에이터는 벨로우즈 형상으로 내부에 압력이 가해지면 특정 방향으로 변형하게 된다. 이러한 벨로우즈 액추에이터의 변형 특성을 통하여, 0~150kpa까지는 선형적으로 구동 변위가 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 구동 변위가 벨로우즈를 구성하는 주름의 수에 비례한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 벨로우즈의 작동 원리와 마이크로 광 조형 기술은 마이크로 스케일에서 자유로운 구동을 가능하게 할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 벨로우즈를 이용한 마이크로 그립퍼를 개발하여 그 응용성을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 산업기반기술개발사업인 차세대신기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. Thielicke, E., Obermeier, E., *Microactuators and their technologies*, Mechatronics, volume 10, pp. 431-455, 2000.
2. Gilbertson, R.G., Busch, J.D., *Survey of micro-actuator technologies for future spacecraft missions*, The Journal of The British Interplanetary Society, Vol. 49, pp. 129-138, 1996.
3. Wang, W., Wang Y., Bao, S., Xiong B. and Bao, M., *Friction and wear properties in MEMS*, Sensors and Actuators A, Vol. 97-98, pp. 486-491, 2002.
4. Butefisch, S., Seidemann, V. and Buttgenbach, S., *Novel micro-pneumatic actuator for MEMS*, Sensors and Actuators A, Vol. 97-98, pp. 638-645.
5. Wego, A., Glock, H.W., Pagel L. and Richter, S., *Investigations on thermo-pneumatic volume actuators based on PCB technology*, Sensors and Actuators A, Vol. 93, pp.95-102, 2001.
6. Nguyen, N.T., Truong, T.Q., *Fully polymeric micropump with piezoelectric actuator*, Sensors and Actuators B, Vol. 97, pp.137-143, 2004.
7. Suzumori, K., *Elastic materials producing compliant robots*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 18, pp.135-140, 1996.
8. Millet, O., Bernardoni, P., Regnier, S., Bidaud, P., Tsitsiris, E., Collard, D., Buchaillot, L., *Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism*, Sensor and Actuators A, Vol. 114, issues 2-3, pp.371-378, 2004.
9. 이인환, 조동우, 극소 광 조형기술을 이용한 3 차원 구조물의 제작? 한국정밀공학회 2001년도 추계 학술대회논문집, 수원, 경희대학교, 2001.10.26-27, pp.1080-1083, 2001.
10. 이인환, 김동성, 조동우, 권태현, 마이크로 광 조형기술을 이용한 3 차원 형태의 응용제품제작 및 이의 평가? 한국정밀공학회 2003년도 춘계 학술대회논문집, 제주, 오리엔탈호텔, 2003.6.12-13, pp.233-236, 2003.