

# 의료용 마이크로머신에 있어서 유체 시스템에 관한 기초적 연구

○김 동욱, 김 남균

전북대학교 대학원 의용생체공학과

## The Basic Research of Fluid System in Medical Micromachine

KIM, Dong-Wook, KIM, Nam-Gyun

Dept. of Biomedical Engineering

Graduate School, Chonbuk National University

### Abstract

At present many kinds of micro actuators and micro mechanical components have been studied, but force transmission to arbitrary direction is difficult using the current method. To solve this problem, a micro hydraulic system is expected to be useful. Force transmission to arbitrary direction is necessary to development of medical use micromachine. In this paper, we studied about micro hydraulic system and magnetic fluid micro actuator and micro rapid prototyping system. The result of this studies indicated that possibility of the power transmission that using the micro cylinder system.

### 1. 서 론

최근, sub-micron단위의 공작 정도와 1mm이하의 크기를 갖는 기계, 즉 마이크로머신이 만들어지려고 하고 있다. 종래부터 미세가공기술에 의해 제작된 여러 종류의 기계들이 존재해 왔으나, 마이크로머신이 실현 가능한 것으로서 연구되기 시작한 것은 고도로 발달된 VLSI가공기술을 배경으로 sub-micron의 size의 미세한 기계부품이 설계·제작이 가능하게 되었고, 일체 가공법 개발의 성공이 계기로 되어 있다.<sup>1,2)</sup>

우리는 현재 활발히 연구되고 있는 마이크로머신의 응용으로써, 체내에서 자율적으로 이동하며 의료적인 처치를 행하는 로봇의 개발을 목표로 하고 있다. 환경으로써, 혈관내를 생각하며, 혈관의 직경은  $\mu\text{m}$ 부터  $\text{cm}$ 까지 폭넓은 범위로 분포되어 있어, 각 order에서 여러가지 응용이 기대되어진다. 예를 들면, 혈액중의 임파구를 로봇의 내부에 넣어서, 원하는 방법에 의한 자극으로 활성화시켜서 되돌려보내주는 응용을 생각하면, 세포의 크기(수십  $\mu\text{m}$ )로부터 그보다 약간 위의 세포 수개 정도의 조직을 취급하는 것으로 된다. 이

외에 DDS나 조직검사등 여러 가지가 생각되어지나, 체내에서의 가동 환경을 생각하는 이상, 대상을 유체를 포함해서 처리하는 것이 자연스러우며, 수십~수백  $\mu\text{m}$  order에서 유체와 그 중의 부유물을 대상으로 하여 상세하게 연구할 필요가 있다고 생각되어진다. 또한, 체내에서의 이동, 위치 결정, 고정 등의 동작을 생각해 볼 때, 2차원적인 시스템에서는 곤란이 예상되므로 3차원적인 기구의 구축은 필수적인 것이 되리라 생각된다.

본 연구에서는 유체를 이용하는 마이크로 시스템의 기초적인 연구로써, 마이크로 실린더를 이용한 시스템의 유체역학 적인 특성과 이의 구동 기구로써 사용 가능한 자성유체 마이크로 actuator, 그리고 이들 유체 시스템의 제작 방법으로써 이용할 수 있는 마이크로 광조형장치의 개발을 통하여, 마이크로 유체 시스템의 실용화에 대해서 검토함으로써, 장래, 의료용 마이크로 머신의 제작에 일조를 하려 한다.

### 2. 마이크로 실린더의 압력전달특성 및 과도응답특성의 검토

본 절에서는 유체 시스템의 기본 구조인, 각종 모세관과 플라자로 구성되는 마이크로 실린더를 이용하여 기초 데이터로써 압력손실과 과도응답특성을 실험적으로 검토한다. 또한, 과도응답 특성을 simulation하기 위한 수식 모델의 검토를 행함으로써, 마이크로 실린더의 설계에 도움이 되도록 하였다.

본 연구에서 사용한 마이크로 실린더는 13종류로, Table 1에 표시하는 것과 같은 모세관과 플라자의 조합으로 이루어져 있다.

실험 방법으로서는 모세관의 전체에 글리세린 수용액을 흡인 시킨 후, 모세관의 선단으로부터 플라자가 관벽에 닿지 않도록 삽입한다. 또다른 모세관의 선단으로부터 압력을 인가하여, 모세관 내부의 압력을 변화시킨다. 압력의 변화에 따라서, 실린더의 플라자가 이동하며, 이때, 플라자에 접하고 있는 힘 측정용 센

틸레버를 움직여 줌으로써, 켈틸레버의 변위를 측정함으로써, 마이크로 실린더가 발생시키는 힘을 측정할 수 있으며, 인가한 압력과 출력되는 힘을 비교함으로써, 마이크로 실린더의 압력손실의 정량적인 평가가 가능하다.

Table 1 Constitution of microcylinder

| Inner dia. of capillary | Diameter of plunger | Length of capillary mm         |
|-------------------------|---------------------|--------------------------------|
|                         | Length of plunger   |                                |
| 200 $\mu$ m             | 150 $\mu$ m         | Each<br>10.6, 16.0, 21.3, 32.0 |
|                         | 5.9mm               |                                |
| 400 $\mu$ m             | 330 $\mu$ m         |                                |
|                         | 5.7mm               |                                |
| 600 $\mu$ m             | 500 $\mu$ m         | 10.6, 16.0, 21.3, 32.0, 54.0   |
|                         | 6.0mm               |                                |

Table 2는 각각의 마이크로 실린더에 있어서의 압력전달 특성을 나타낸다.

Table.2 Ratio of force transmission

| Inner dia. of microcapillary tube | Cylinder output force / Converted force by tube % | Cylinder output force / Converted force by plunger % |
|-----------------------------------|---|--|
| 200 $\mu$ m                       | 74.3 $\pm$ 1.8                                    | 132.0 $\pm$ 3.5                                      |
| 400 $\mu$ m                       | 87.7 $\pm$ 2.4                                    | 130.2 $\pm$ 3.6                                      |
| 600 $\mu$ m                       | 86.9 $\pm$ 1.5                                    | 125.1 $\pm$ 2.4                                      |

조사한 범위에 있어서는 실린더의 출력은, 인가한 압력을 모세관의 단면적을 이용하여 힘으로 환산한 수치의 70%이상의 전달율을 보이고 있어 극단적인 동력의 손실은 보이지 않고 있다고 말할 수 있다. 이와 유사한 연구로써, 압축공기를 작동유체로하여 연구한 Ikei등의 결과와 비교할 때 대단히 동력의 손실이 없는 것으로 되어 있다.<sup>3)</sup>

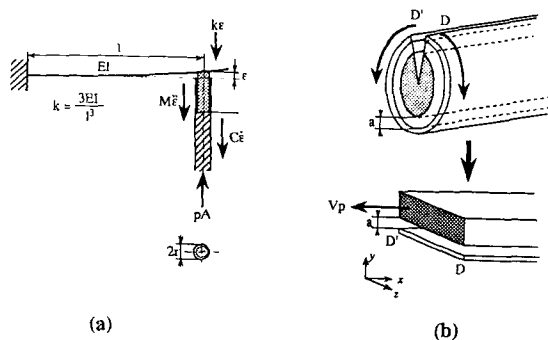


Fig. 1 Simulation model

이것은 점성이 높은 유체를 사용함으로써, 특별한

seal이 없이도 유체의 누설에 의한 손실을 줄일 수 있다고 생각됨으로써, 마이크로 사이즈의 경우, 유체를 이용한 동력전달은 어느 정도 점성이 있는 유체를 사용하는 것에 의해서, 동력전달 효율을 높일 수 있다는 것을 나타낸다.

마이크로 실린더의 과도응답특성을 검토하기 위하여, 마이크로 실린더에 Step狀의 압력을 인가하였을 경우의 특성을 실험적으로 검토하고, 이의 수식적 모델을 얻기 위한 시뮬레이션을 행하였다.

시뮬레이션에 있어서, 본 실험 시스템은 Fig.1(a)와 같이 스프링을 부하로 하는 실린더이므로, 근사적으로 식(1)과 같이 기술 가능하리라 생각된다. 식(1)의 점성항으로써는 Fig.1(b)와같이 실린더와 플란자를 한가운데를 잘라서 펼쳐 놓은 상태의 평행 2평판 모델로 가정하여, 식(2)로 나타나는 평행 2평판간의 층류유동에 있어서, 이동평판에 작용하는 전단응력을 이용하였다.<sup>4)</sup>

$$M \frac{d^2 \epsilon}{dt^2} + C \frac{d \epsilon}{dt} + k \epsilon - pA = 0 \quad (1)$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = u \frac{V_p}{a} + \frac{a}{2} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)로 부터 얻어지는 식(3)을 이용하여 시뮬레이션을 행하였다.

$$M \frac{d^2 \epsilon}{dt^2} + \frac{\mu}{a} \frac{d \epsilon}{dt} A_s + \frac{a}{2} \frac{dp}{dx} A_s + k \epsilon - pA_c = 0 \quad (3)$$

여기에서, M은 질량, C는 점성계수, k는 스프링상수, p는 압력, A<sub>s</sub>는 모세관의 표면적, A<sub>c</sub>은 모세관의 단면적, ε은 플란자의 이동거리, τ는 전단응력, μ는 점도, V<sub>p</sub>는 평판(플란자)의 속도, a는 평판간의 gap이다.

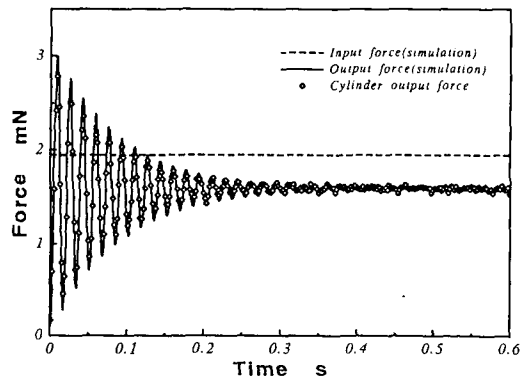


Fig. 2 Comparison of experimental data with simulated step response.

(Cylinder diaeter. : 200 $\mu$ m,  
Viscosity : 0.73 $\times$ 10<sup>-1</sup>Pa·s  
Cylinder length : 32.0mm)

Fig.2는 모세관의 내경이 200 $\mu$ m, 길이가 32mm, 플란자의 직경이 150 $\mu$ m, 길이가 5.9mm인 마이크로 실린더에 있어서, 작동유체의 점도가 73mPa·s인 경

우, 마이크로 실린더에 step상의 압력을 인가 하였을 때의 과도 응답특성을 실험결과와 시뮬레이션 결과를 보여주는 그래프로써, 양자는 서로 잘 일치하고 있는 것을 보여준다.

같은 방법으로 실험에서 준비한 모든 마이크로 실린더를 대상으로 조사한 결과를 Fig.3에 표시하였다.

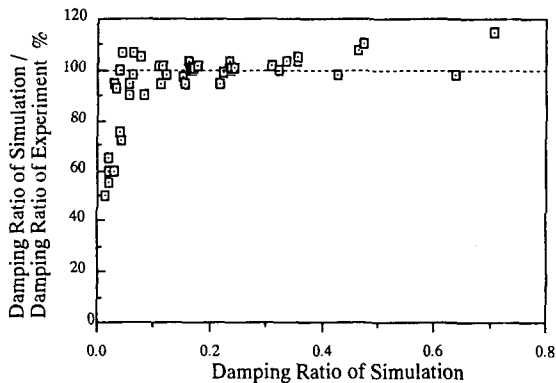


Fig.3 Estimation of simulation and experimental data by damping ratio.

이것은 과도응답특성의 실험결과와 시뮬레이션 결과를 종합하여, 대수감쇠비를 파라메타로하여 평가한 그래프이다. 감쇠비  $\zeta=0.05$  이상인 경우 양자는 거의 일치하고 있으나,  $\zeta=0.05$  이하인 경우의 데이터에서는 실험결과와 시뮬레이션 결과에 큰 차이가 있다. 그러나,  $\zeta=0.05$  이하의 저 감쇠비의 경우에 있어서는 사용하는 액체의 점도가 낮기 때문에 작동유체의 누설, 제어의 곤란등이 예상됨으로, 실용화의 관점상  $\zeta=0.05$  이하는 대상외로될 가능성이 높아, 본 연구에서 제한한 수식모델의 유용성이 확인되었다.

### 3. 자성유체를 작동유체로 하는 마이크로 actuator의 검토

전절에서는 유체를 작동유체로 하여, sub-micron order의 직경을 갖는 마이크로 실린더가 실용성을 갖는 것을 보여주었다. 유체에 의한 동력전달기구를 사용하기 위해서는 당연히 유체를 구동하는 동력원이 필요로 하게 되나, 본 연구에서는 유체를 구동하는 동력원으로써, 구조적으로 내구성, 신뢰성이 우수한 자성유체 마이크로 actuator을 고안하여 이의 실용 가능성을 검토한다.

실험 방법으로써는, 내경 70~400  $\mu\text{m}$ 의 모세관을 이용하여, 자성유체의 길이가 솔레노이드의 폭과 같이 되도록 모세관 현상을 이용하여 흡인시켰다. 솔레노이드를 모세관 단면에 대하여 평행하게 자장이 걸리도록 고정 시킨 후, duty ratio, 주파수 등이 변하는 변동자장을 인가하였다. 변동 자장이 인가된 상태에서 모세관의 한쪽 끝에서 압력을 인가하여, 인가된 압력이 누설되지 않을 때까지 압력을 높여 주어, 최대로 높일 수 있는 압력을 정자기압으로 정의하여, 정자기

압을 모세관의 직경의 변화와, 상기한 변동자장과와의 관계를 측정한다. 측정결과를 검토하면, 직류자장을 인가한 경우에는 자장의 세기와 정자기압의 관계는 선형관계를 나타내었으나, 정자기압의 크기는 모세관의 내경에 의존하였으며, 이의 차는 표면장력을 고려하는 것에 의하여 보정이 가능하였다. 교류(변동)자장의 주파수와 duty를 조절하는 것에 의하여, 보다 저전력으로 자기압의 발생이 가능한 것을 확인하였다.<sup>5)</sup>

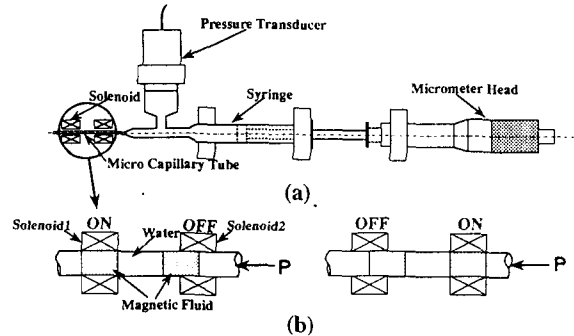


Fig. 4 Protocol of microactuator using magnetic fluid

(a) Experimental system  
(b) Principle of microactuator

자기압은 이상에서 검토한 정적인 상태의 정자기압과, Fig.4에 나타내는 것과 같이 2조의 솔레노이드와, 자성유체 plug를 이용하여, 자성유체를 왕복 운동시켰을 때의 동자기압이 있다. 동자기압은 자성유체가 이동할 때에 발생시키는 압력으로써, actuator의 성능을 평가할 수 있는 적절한 parameter라 할 수 있다.

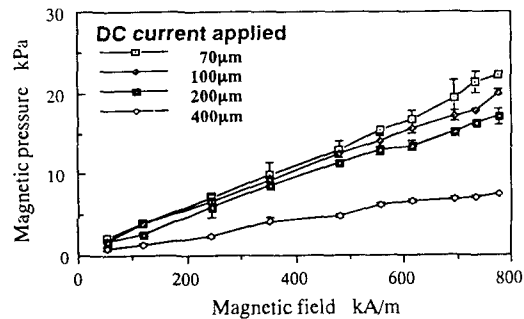


Fig.5 Generated magnetic pressure by the movement of magnetic fluid

Fig.5는 모세관에 직류 자장을 가하였을 경우에 얻어진 동자기압과 자장의 세기의 관계를 나타내는 그래프이다. 모세관의 내경이 400  $\mu\text{m}$ 의 경우 동자기압은 다른 3개(70,100,200  $\mu\text{m}$ )의 경향과 크게 달라지고 있으나, 모세관의 내경이 70,100,200  $\mu\text{m}$ 의 경우 동자기압은 정자기압의 85%정도의 수준에 있으므로, 극단적인 자기압의 변화는 없었다. 모세관의 내경이 70  $\mu\text{m}$ 의 경우, 자장의 세기가 440kA/m에서 13.3kPa (100mmHg)의 동자기압을 얻을 수 있어, 혈관내(세동맥, 동맥, 정맥등)에서의 가동하기 위한 충분한 동자

기압을 발생시키고 있어, 체내 가동 actuator로서의 가능성을 시사하였다.

자성유체를 이용한 마이크로 액츄에이터는, 외부자장에 의해 비접촉으로 유체의 구동이 가능하여, 다이아프램등의 가동부를 필요로 하지 않는다. 따라서, 가동부의 피로에 의한 파괴가 일어나기 어려워, 수명이 긴 기구가 얻어지리라 기대된다. 실용화에의 최대의 난점은 솔레노이드의 소형화에 있다고 생각되어져, 장래 이에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

#### 4. 마이크로 유체 시스템의 제작방법 검토

전절까지는 마이크로 실린더와 자성유체의 특성을 조사하였다. 마이크로머신은 이론적으로는 가능할지라도, 제작 가능성이 없으면 의미가 없어지게 된다. 이점에 대해서는 종래의 기계가공법에 있어서는 마이크로머신의 개념 그 자체가 존재하지 않았던 것을 보더라도 자명한 일이다.

본절에서는, 광조형법을 이용함으로써, 미리 설계된 것과 같은 제작이 가능하고, 조립의 과정이 필요치 않으며, 완성도가 높은 가공이 가능하도록 하는 연구를 수행하였다.

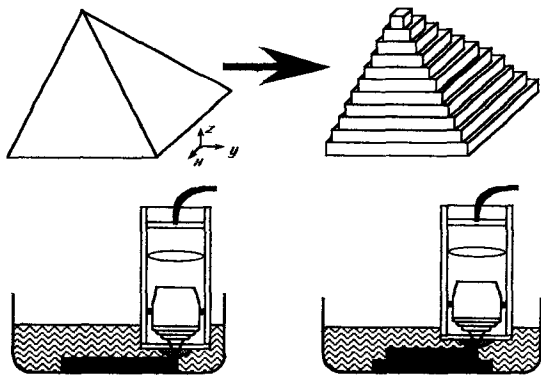


Fig.6 Fabricating process of micro rapid prototyping system

광경화성 수지에 자외선을 조사하면, 광 에너지가 주어진 부분의 광경화성 수지는 축중합 반응에 의해 경화된다. 경화되는 수지의 깊이 및 폭은 수지의 조성 및 조사된 광 에너지의 양에 따라서 변화하게 됨으로, 이들의 파라메타를 적절히 조절하는 것에 의해서 미세한 가공을 가능하게 할 수 있다.

광조형법의 원리는 광경화성 수지 용액의 얇은 층에 자외선의 미세한 빔을 XY방향에 따라서 경화시킴으로써, 2차원적인 가공이 가능하게 되며, 액면을 약간 상승시켜서 자외선을 조사시켜서 2차원적인 가공을 행하며, 이를 반복하는 것에 의해서 복잡한 입체의 구조물도 제작이 가능하다.(Fig.6 참조)

본 연구에서 사용한 마이크로 가공용 광조형장치는 Fig.7과 같이 크게 나누어서, 초고압 수은램프, XYZ Table, Shutter, 광학계, 제어용 컴퓨터에 의해서 구성

되며, 각 구성 요소의 사양은 Table 3과 같다.

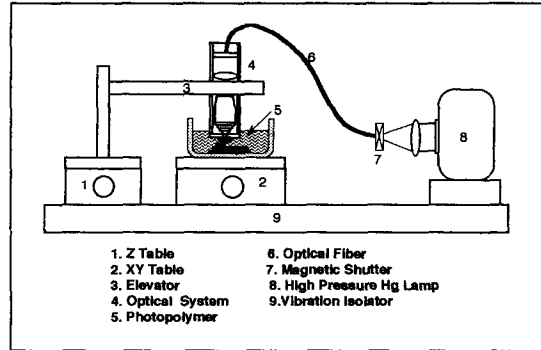


Fig.7 Rapid prototyping system for microfabrication

Table 3 Specification of micro rapid prototyping system

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Method                  | Scanning, Fixed surface                      |
| Work size               | 30mm*30mm*10mm at maximum                    |
| Table location accuracy | XY : 0.2 $\mu$ m, Z : 0.2 $\mu$ m at minimum |
| Light source            | High pressure Hg lamp (100W)                 |
| Beam shutter            | Electromagnetic (20Hz response frequency)    |
| Controller              | EPSON PC-286VE                               |

먼저, 이 System을 이용하여, 본 System의 가공정도를 평가하기 위하여, 자외선 빔을 자외선 경화성 수지에 조사 하였을 때의 최소 선폭을 조사한 그래프가 Fig.8이다.

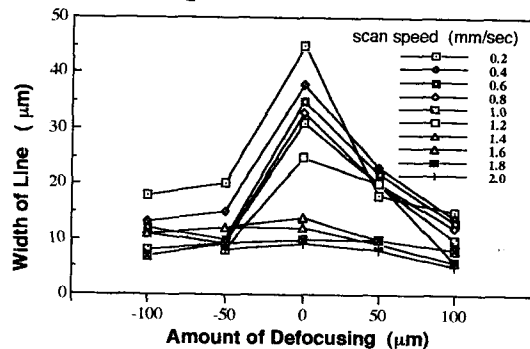


Fig.8 Evaluate of line width by defocusing

이 그래프에 의하면, scan speed 2mm/sec, 초점흐림량이 100 $\mu$ m의 경우에 5 $\mu$ m의 선폭이 얻어졌다. 가공정도를 마이크로머신의 주요한 제작 수단인 Surface micromachining의 경우의 약 1 $\mu$ m과 비교하여 볼 때 가공정도로써는 상당히 열악한 결과를 나타낸다. 그러나, 종래의 가공법으로는 완전한 3차원적인 가공이 불가능한 것에 대하여, 본 가공법은 완전한 입

체의 구현이 가능하게 됨으로써, 미세한 기구적인 구조물을 제작함에 있어서는 충분히 유용성이 있는 가공정도라 여겨진다.

Fig.9는 본 마이크로 광조형 장치를 이용하여 제작한 부품의 일례로써, 층압(slice간격)을  $50\mu\text{m}$ 으로 설정하여, 상부에 갈 수록 작아지는 정방형을 20층 적층하여서 제작한 피라미드 모형으로, 전체의 사이즈는  $1\times 1\times 1\text{mm}$ 이다.

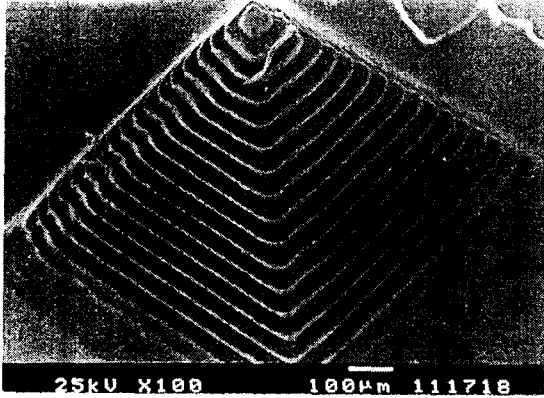


Fig.9 A SEM photograph of a pyramid model

상기의 예는 단순한 구조물이었으나, 미소 유체 집적회로의 모델로써, Fig.10과 같은 시작물도 가능하다. 관로는 폭  $100\mu\text{m}$ 로, 4개소에 관로가 있으며, 한가운데에  $1100\times 1100\mu\text{m}$ 의 방이 있어서, 이 부분에 뭔가 의한 세포 자극장치-를 일체화시켜 제작함으로써, 세포를 선택적으로 자극시킬 수 있는 장치가 가능하게 됨으로써, 면역 질환 환자의 치료 수단으로써의 활용도 가능하리라 생각된다.

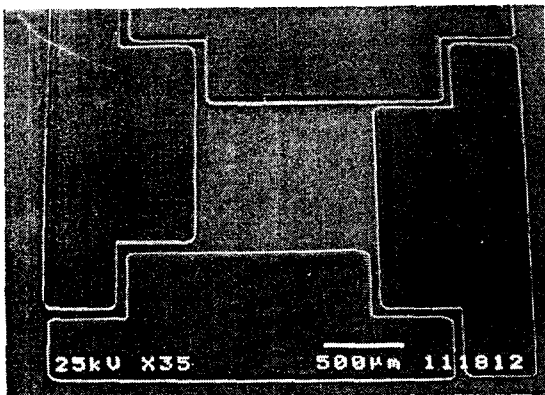


Fig.10 A SEM photograph of a fluid integrated circuit model fabricated by micro rapid prototyping system

본 연구에서는 유체를 이용한 마이크로머신의 의료분야에서의 응용을 위한 기초적인 연구로써, sub-millimeter order 영역의 기구를 대상으로 한 일련의 검토를 행하였다.

그 결과로써 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 마이크로 실린더에서 전달된 실린더 출력은 극단적인 압력전달의 손실은 보이지 않았다.
2. 마이크로 실린더에 있어서의 과도응답특성은  $\zeta=0.05$  이상의 경우 macro size의 유체역학 방정식을 이용하여 simulation가능하다.
3. 2조의 자성유체와 솔레노이드로 구성된 마이크로 액츄에이터를 이용하여 동적인 조건하에서 얻어진 동자기압을 검토한 결과 마이크로 액츄에이터의 내경이  $70\sim 200\mu\text{m}$ 의 경우 정적인 조건에서 얻어진 정자기압의 85%수준에 있어 왕복형 자성유체 마이크로 액츄에이터의 가능성이 시사되었다.
4. 試作한 마이크로 광조형장치는, 평면에서 약  $5\mu\text{m}$ 정도의 가공정도를 얻을 수 있어, 마이크로머신의 제작기공으로써의 가능성을 보여주었고, 미소 유체회로의 제작도 가능한 것을 시사하였다.

### 참고 문헌

- [1] L.S.Fan et al , " IC-Processed Electrostatic Micromotors", Sensors & Actuators, vol.20, pp.41, 1989
- [2] Y.C.Tai et al , " IC-Processed Electrostatic Synchronous Micromotors",Sensors & Actuators, vol.20, pp.49, 1989
- [3] Y.Ikei et al , " Fluid Driven Microactuators with Feedback Mechanism"m Proc. IEEE MEMS'93, pp.213, 1993
- [4] 손 병진, "유체역학", 탐출판사, pp.394, 1980
- [5] 金 東郁 等, "磁性流體を介したマイクロメカニカルシステムに關する基礎的研究",日本精密工學會誌, 第61卷, pp.112, 1995

## 5. 결 론