

## 주사용 미세유량 조절기 설계와 제작

김병재\*·이상빈\*\*·신보성\*\*\*·성형진†  
(2003년 5월 30일 접수, 2004년 1월 5일 심사완료)

### Design and Fabrication of a Microflow Rate Controller for Medical Injection

Byoung Jae Kim, Sang Bin Lee, Bo Sung Shin and Hyung Jin Sung

**Key Words:** Flow Rate Controller(유량조절기), Medical Injection(주사)

#### Abstract

A new microflow rate controller for medical injection was developed and evaluated. The flow rate was controlled by changing the friction depth as well as the friction length of the micro-channel. A precise micro-fabrication of the micro-channel was requested for an accurate flow control. The friction depth was inversely proportional to the friction length, which gives a linear flow control to the channel length. The channel groove was fabricated with a plastic material. A rubber containing silicone oil was covered over the groove, which satisfies both lubrication and leakage prevention. The flow controller was validated by performing the numerical simulation and experiment. A good agreement was shown between computation and experiment.

#### 1. 서론

##### 기호설명

- $D$  : 원형관의 지름
- $\Delta p$  : 유로 양단의 압력차
- $\mu$  : 유체의 점성계수
- $L$  : 유로의 길이
- $Q$  : 유량
- $D_h$  : 수력직경(hydraulic diameter)
- $Re_{D_h}$  : 레이놀즈 수(특성길이 =  $D_h$ )

미세유량 조절은 병원에서 환자에게 정맥주사를 놓을 때 매우 중요하다. 이는 정확한 약물주입으로 치료의 효과를 높이기 위함 뿐 아니라 의료사고를 방지해야 하기 때문이다. 현재 미세유량을 조절하는 방법은 크게 두 가지 방법이 있다. 첫째는 인젝터를 이용하여 수액을 혈관에 주입하는 방법이며, 둘째는 수액의 수두차를 이용하여 자연 상태로 수액을 혈관에 주입하는 방법이다. 그러나 인젝터는 수액을 강제로 주입하기 때문에 간혹 환자에게 쇼크를 발생시켜 사망에 이르게 하기도 한다. 또 인젝터는 가격이 비싸서 많은 환자에 동시에 사용할 수 없는 문제점이 있다. 가장 좋은 방법은 자연 상태로 수액을 주입하는 방법이다.

자연 상태로 수액을 주입하는 방법도 세부적으로는 두 가지로 나뉘게 된다. 먼저 클램프를 이용하는 방법으로 탄성이 있는 튜브의 단면적을 롤러를 이용하여 변화시켜 유량을 대략적으로 조절하는 방법이다. 수액이 들어있는 팩을 높이면

---

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : hjsung@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 메인텍 (주)

\*\*\* 한국기계연구원 지능형정밀기계 연구부

---

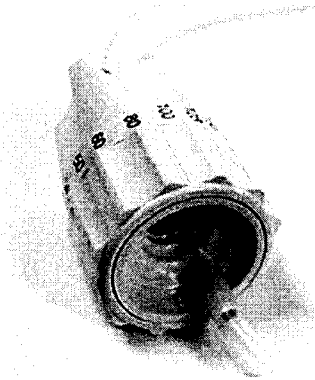


Fig. 1 Becton Inc. Product

되면 수두차에 의해 수액이 흐르게 되는데, 물러를 움직이면서 유량에 맞는 방울 수를 측정하여 유량을 조절하게 된다. 이 방법은 제작하기 간단하지만 작동시 수작업이 요구되므로 사용자의 숙련도에 따라 유량이 달라지고 미세유량을 조절하기 힘든 단점이 있다. 최근에 개발된 미세유량 조절기는 주로 이중 유로를 가지고 미세관의 길이를 변화시켜 유량을 조절하는 것으로 클램프보다 훨씬 정확한 것으로 알려져 있다. 몇 개의 외국제품들이 있으나 실제 사용시 성능이 일정하지 않은 문제가 있다. Fig. 1은 출시된 미세유량 조절기의 예를 보여준다. 현 시제품들은 이처럼 조절기 유량 설정 후 조절기가 환자가 깔고 있을 경우 움직이기 불편한 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존 제품 보다 성능이 좋고 환자가 움직이는데 무리가 없는 미세유량 조절기를 설계, 제작, 평가하고자 한다.

## 2. 제품 설계

먼저 유량을 조절하기 위한 인자를 아는 것이 중요하다. 이를 위해 층류인 경우 미세원형관 내를 흐르는 유량(Q)을 살펴보면 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

$$Q = - \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu L} \quad (1)$$

여기서 D는 관의 지름, Δp는 원형관 양단의 압력차, μ는 유체의 점성계수, L은 관의 길이이다. 식 (1)로부터 단일 유로를 사용할 경우 유량을 조절할 수 있는 인자는 4가지임을 알 수 있다. 그러나 유체의 점성계수와 압력차를 조절하는

방법은 쉽지 않기 때문에 실제 유량을 조절하는데 사용되는 인자는 유로의 지름과 길이라고 할 수 있다.

조절기의 성능에서 중요한 것 중 하나는 조절 인자와 유량사이의 관계가 선형적이어야 한다는 것이다. 비선형 영역이 존재하게 되면 유량이 조절인자에 매우 민감하거나 둔감한 영역이 존재하게 된다. 식 (1)을 보면 유량은 관의 지름의 4승에 비례한다. 따라서 관의 지름만으로 유량을 조절할 경우 유량이 작은 영역에서는 유량이 잘 변하지 않고 유량이 큰 부분에서는 유량이 급격하게 변하게 된다. 한편, 유량과 유로 길이의 관계는 식 (1)에서와 같이 반비례 관계이다. 관의 지름에 비교하여 유량과 조절인자 관계가 상당히 선형적이지만 좀 더 선형적인 관계를 만들 필요가 있다. 본 연구에서는 미세유량을 조절하기 위하여 유로 길이와 유로의 깊이를 동시에 변화시켰다. 그리고 단일 유로를 사용하여 기존제품보다 제작하기 쉽게 하였다. 유량과 유로 사이에는 반비례 관계가 있기 때문에 유량이 작을 때(유로의 길이가 김) 유량은 유로의 길이 변화에 둔감하다. 반대로 유량이 클 때(유로의 길이가 짧음) 유량은 유로 길이 변화에 매우 민감하다. 따라서 유량이 작을 때 유량이 유로 길이에 좀 더 민감하게 하고 유량이 클 때 더 둔감하게 해야 하는데 이를 위해 유로의 깊이를 유로의 길이가 짧아질수록 깊어지게 한다.

유량조절의 원리는 Fig. 2에 나타나 있다. 플레이트 B의 b에서 d까지 홈(groove)을 만들고 그 위에 플레이트 A를 덮어서 유로를 만든다. 홈과 플레이트 A 사이에는 고무가 있어 누수를 방지한다. 홈의 끝 d는 출구라인(f-g)에 이어지고 출구라인은 조절의 출구 g와 연결되어 있다. a를 통하여 흘러들어온 유체는 실제 c에서 d사이의 유로를 지나며, 플레이트 B가 회전하면 c의 위치가 이동하여 유체가 흘러가는 길이가 변하여 유체에 대한 저항이 변하게 된다. 또한 유로의 깊이는 Fig. 3에서 b 위치에서는 a<sub>1</sub>, d 위치에서는 a<sub>2</sub>로 깊어지게 하여 유량과 유로 길이 사이의 관계를 좀 더 선형화 시킨다. 유로의 너비는 w이다.

Fig. 4는 플레이트 A를 보여준데, a와 g는 Fig. 2의 a와 g와 같다. 플레이트 A 유로의 입구(a)를 통하여 흘러들어온 유체는 실제 유로(c-d)를

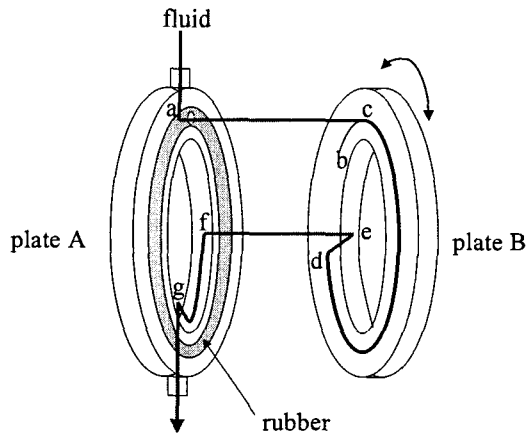


Fig. 2 Schematic diagram of controller

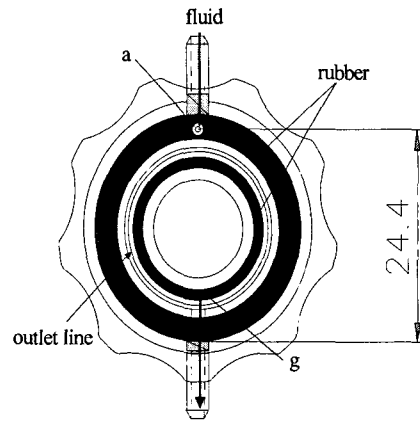


Fig. 4 Plate A ( $R=12.2\text{ mm}$ )

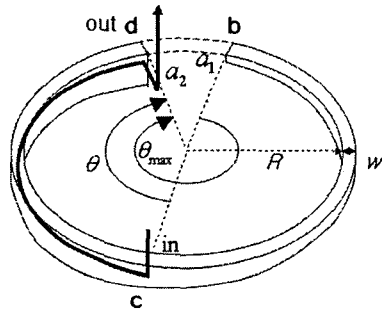


Fig. 3 Friction length ( $L=R\theta$ ) and depth ( $D=a_2\theta/\theta_{max}$ )

통과한 후 출구라인(outlet line)으로 흘러들어가게 된다. 출구라인의 유체는 조절기의 출구(g)를 통하여 밖으로 나가게 된다. 그리고 Fig. 4의 바깥쪽 고무는 홈에 밀착되어 누수를 방지하며, 안쪽 고무는 출구라인에서 조절기 외부로의 누수를 방지한다.

본 연구에서는 유량 조절범위를  $5 < Q < 200\text{ ml/hr}$ 로 정하고  $R=12.2\text{ mm}$ ,  $\theta=340=17\pi/9\text{ rad}$  ( $L=72.4\text{ mm}$ ),  $w=0.2\text{ mm}$ 로 고정하였으며 유로의 첫 깊이  $a_1=0\text{ mm}$ , 유로의 끝 깊이  $a_2=0.3\text{ mm}$ 로 하였다. 이 조건에서 유동은 층류이므로 인자들과 유량사이의 관계는 대략적으로 식 (1)의 경향을 만족한다고 할 수 있다( $Re_D < 2300$ ).

### 3. 제품 제작

Fig. 5는 두개의 캡을 서로 조임으로써 플레이트 A와 플레이트 B를 밀착시키는 방법을 보여주고 있다. 이 제품 제작에서 중요한 것은 미세유로의 정밀가공과 수액이 미세유로를 통해서만 흐르게 하기 위한 누수차단이다.

플레이트 A와 플레이트 B는 인체에 무독성인 ABS(acrylonitrile butadiene styrene)를 이용하여 사출하였고, 그 결과 유로의 오차는  $\pm 0.01\text{ mm}$ 이 내었다. 미세유로 뿐 아니라 플레이트 A와 B의 정밀가공이 미세 유로 가공 못지않게 중요한 이유는 미세유로를 플레이트 A로 동일한 압력으로 밀착해야 제품들의 성능이 일정해지기 때문이다. 미세유로는 초정밀가공 기술로 제작되었다. 금형 제작 절차는 CAD/CAM 프로그램을 사용하여 개발되었다.<sup>(2)</sup> 가공될 금형의 CAD 모델은 CAD 모델러에 의해 만들어지고 CAM 프로그램에 의해 황삭, 정삭 각각의 공구경로가 생성된다. 그 후 생성된 NC 데이터는 컴퓨터로부터 네트워크를 통해 직접 초정밀가공기로 전송된다. 몰드(mold)의 초정밀가공은 카바이드(carbide)로 코팅된 직경이 1.0 mm이고 두 날짜리 플랫 엔드밀(flat endmill)을 통해 이루어졌다(사출 후 홈이 생성되기 위해선 몰드에는 돌출부를 가공하게 된다. 따라서 1.0 mm 엔드밀로 0.2 mm 홈에 해당하는 돌출부를 가공할 수 있다). 이 때 최적의 가공조건은 스핀들(spindle) 속도가 50,000 rpm이고 이송속도

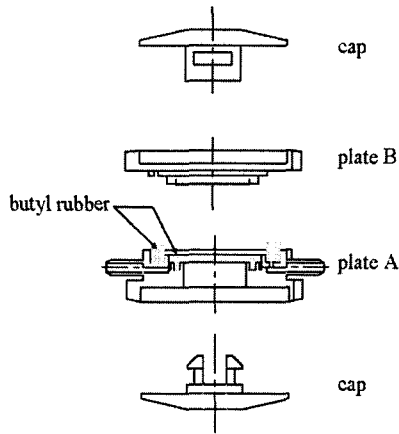


Fig. 5 Assembly of parts

는 50.0 mm/min였다.<sup>(3)</sup> 채널의 너비를 200  $\mu\text{m}$ 로 하였을 때 초정밀 가공 후 몰드 4곳의 치수는 Fig. 6에 나타나 있고 오차는 3% 이내(최대 5.92  $\mu\text{m}$  오차)임을 알 수 있다. 깊이 방향으로의 오차는 측정하지 못하였지만 너비방향으로의 오차와 비슷할 것으로 추정된다.

누수방지를 위한 고무는 의료 안전을 위해 무독성인 부틸(butyl)을 사용하였는데 부틸은 NBR(nitrile, acrylonitrile butadiene rubber)보다 부드럽고 복원력이 우수하여 플레이트 B와의 밀착도가 우수하다.<sup>(4)</sup> 고무는 누수를 방지할 수 있을 정도로 플레이트 B와 밀착되어야 하며 동시에 잘 미끄러져야 하는데 이를 위하여 고무에 실리콘 오일을 코팅 하였고,<sup>(5)</sup> 고무의 두께 오차를  $\pm 1 \mu\text{m}$  이내로 하였다. 그리고 고무의 두께는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 고무와 플레이트 결합하였을 때 고무의 윗면이 플레이트 A의 윗면보다 0.29 mm 높게 하여 고무가 플레이트 B에 있는 홈에 더 밀착되도록 하였다. 폴리카보네이트(polycarbonate)로 만들어진 캡의 오차도  $\pm 0.01 \text{ mm}$ 였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 유량조절 ( $Q=5\sim 200 \text{ ml/hr}$ )을 위하여  $a_1=0 \text{ mm}$ ,  $a_2=0.3 \text{ mm}$ ,  $L=72.4 \text{ mm}$ ,  $w=0.2 \text{ mm}$ 로 제작하였고, 유로 길이에 따른 평

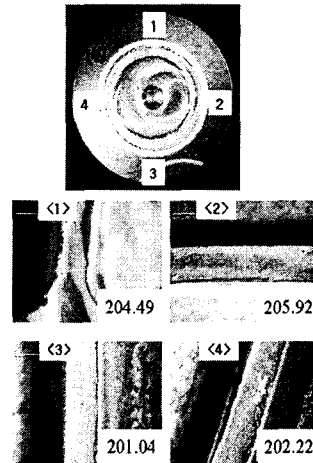


Fig. 6 Enlarged views of fabrication (unit:  $\mu\text{m}$ )

Table 1 Volume of a drop through needle

second/drop	ml/h	ml/drop
0.205	141.0	0.00974
0.350	100.5	0.00977
0.381	95.0	0.01005
0.742	46.0	0.00948
0.753	46.5	0.00973
1.200	28.0	0.00933
3.408	10.5	0.00994

균유량과 표준편차를 측정하였다.

유량은 실제 병원에서 사용하는 환경과 동일한 조건 하에서 측정되었다. 이를 위하여 Fig. 4의 상단부에 위치한 입구로부터 수두차를 80 cm로 하였고, 하단부의 출구에 튜브를 연결하고 튜브의 끝에는 바늘을 연결하였다. 바늘로부터 떨어지는 수액 한 방울의 부피를 측정하고, 초당 떨어지는 수액의 방울수를 측정한 후 유량을 계산하였다. 초당 떨어지는 수액의 방울 수는 오랜 시간 동안 측정 후 계산되므로 이로 인한 유량측정 오차는 무시할 수 있다. 수액 한 방울의 부피 오차를 알아보기 위하여 몇 가지 유량에서 수액 한 방울의 부피를 측정하였다. 수액 한 방울이 떨어지는 시간을 측정하고, 1시간동안 총 떨어진 부피를 측정하였다. Table 1에서 보는 바와 같이

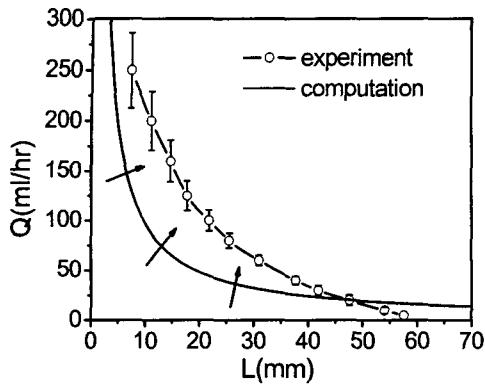


Fig. 7 Comparison between experiment(63 samples) and computation(depth=0.2 mm)

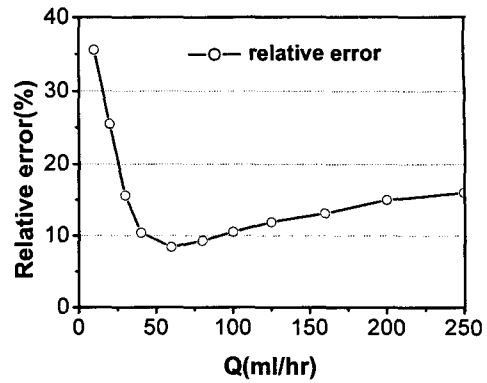


Fig. 9 Relative errors(standard deviation /mean)

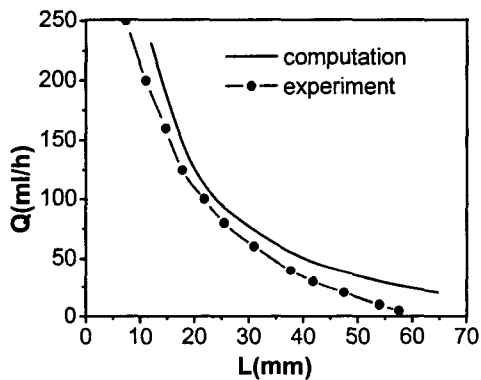


Fig. 8 Comparison between experiment and computation

수액 한 방울의 부피는 유량과는 상관없이 일정함을 알 수 있다. 한 방울의 부피는 평균적으로 0.00972 ml/drop이며 전 유량에 걸쳐 최대 ±3% 이내임을 볼 수 있다. 이는 유량측정오차가 대략적으로 ±3%임을 의미한다.

Fig. 7은 총 63 개의 샘플에 대하여 유로 길이에 따른 평균유량을 나타낸 결과이다. 실선은  $D_h=0.2\text{ mm}$  ( $w=a_1=a_2=0.2\text{ mm}$ )인 원형관 내 유량을 해석적으로 구한 결과이다. 수액에는 포도당, 엽화나트륨, 주사용수 등 여러 가지 물질이 포함되어 있으나 가장 많은 비중을 차지하는 것은 포도당이다. 많이 쓰이는 5% 수액의 물성치를 기준으로 상온에서 밀도  $\rho \approx 1050\text{ kg/m}^3$ , 점

성계수  $\mu=0.0012\text{ Pa}\cdot\text{s}$  으로 하였고, 지역에 따라 중력가속도(9.8 m/s<sup>2</sup>)가 다르지만 압력차는 수두차 80 cm에 해당하는  $\Delta p=-8230\text{ Pa}$  으로 하였다. 보는 바와 같이 유로 깊이가 일정한 것에 비하여 유로 길이와 유량사이의 관계가 좀 더 선형화되었음을 알 수 있다. 이 보다 더 선형화를 위해서는  $a_2$ 를 증가시켜야 하는데, 이 경우 전체적으로 실제 사용되는 유량보다 증가하게 된다. 혹은 깊이의 변화를 선형적으로 주지 않게 할 수도 있는데 이 경우 가공이 쉽지 않을 것이다. 이렇게 유로의 길이와 깊이를 동시에 변화를 주는 방법을 채택함으로써 단일 유로만 가지고도 넓은 유량범위에서 작동할 수 있는 조절기가 가능함을 보여 주고 있다.

Fig. 8에서 실선은 제품의 성능을 예측하기 위한 수치해석 결과이다. 보는 바와 같이 실험결과가 예측치와 비슷하게 나왔음을 확인할 수 있다. 유로의 치수는 제작된 제품과  $a_1$ 을 제외하고 모두 같다. 실험결과와 비교하였을 때 수치해석 결과보다 근소하게 작음을 알 수 있다. 그 이유는 실제 가공결과  $a_1 \neq 0\text{ mm}$  임을 감안하여  $a_1=0.1\text{ mm}$ 로 하였기 때문이다. 수치해석결과가 실험결과보다 작은 것으로 보아 실제 제작에서  $a_1 < 0.1\text{ mm}$ 으로 추정된다. 앞서 3장에서 유로의 너비의 최대 오차는 약 6  $\mu\text{m}$ 였다. 깊이에 대한 오차는 측정할 수가 없었는데 전반적으로 너비와 동일한 수준의 오차를 갖고 있을 것으로 예상된다. 다만 유로의 첫 부

분은 가공이 시작되는 시점이기 때문에 유로의 중간보다 공구와 금형사이의 충돌이 커서 오차 정도는 너비의 경우보다 클 것으로 생각된다.

Fig. 8를 보면 유량이 작을 때와 클 때 이론과의 차이가 커짐을 볼 수 있다. 그 이유는 먼저  $Q > 150 \text{ ml/hr}$  처럼 유량이 클 때, 유로가 짧아지면 실제로  $|A_p| < 8000 \text{ Pa}$ 으로 생각된다. 그리고 유량은 대략적으로 깊이에 4승에 비례하는데  $a_1 < a_2$ 이므로  $a_1$ 의 변화에 의한 유량의 영향이  $a_2$ 의 영향보다 더 크다. 그래서  $Q < 30 \text{ ml/hr}$ 와 같이 유량이 작은 경우에  $a_1$ 에 특히 민감하게 유량이 변한다. 따라서 유량이 작은 부분에서 실험결과가 이론치보다 많이 낮은 것은 앞에서 언급한 것처럼 실제  $a_1 < 0.1 \text{ mm}$ 되었을 것으로 추정되기 때문이다.

Fig. 9는 유량에 따른 유량의 상대오차 정도를 보여준다. 이 상대오차는 63개 제품의 표준편차를 평균 유량으로 나눈 값으로 상대오차가 작을수록 제품의 성능이 균일해 진다. 절대오차의 크기는 평균 유량이 작을수록 작아진다. 유량이  $25 < Q < 150 \text{ ml/hr}$  일 때에는 상대오차가 15% 미만이지만 유량이 극히 작을 때와 클 때 상대오차가 큼을 볼 수 있다. 특히 유량이 극히 작을 때 상대오차가 크다. 그 이유는 유량이 작다는 것은 유로 입구의 크기는 작다는 것인데 식 (1)에서 보는 것과 같이 유량은 유로의 단면적에 매우 민감한데다  $a_1$ 은 극히 작아서 가공오차의 유량에 대한 영향이 크기 때문이다. 그러나 유량이 작은 경우에 상대오차가 크다고 하더라도 절대오차는 매우 작기 때문에 이 영역에서 수액을 주입하더라도 문제가 없다. 유량이 클 경우에는 유로길이 가 짧아지면서 유량이 유로의 영향 뿐 아니라 복잡한 조절기 내부 구조의 영향도 받기 때문으로 생각된다. 유량이  $150 \text{ ml/hr}$  이상의 경우는 병원에서 실제 거의 사용하지 않으므로 제품상으로는 문제가 없다. Figs. 7~9부터 매우 만족스러운 결과를 얻었다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 유로 길이를 이용하여

유량을 조절한 방법을 개선하여 단일 유로를 사용하며 유로의 길이와 폭을 동시에 변화시키며 미세유량을 조절하는 제품을 개발하였다. 이론적 해석과 실험결과는 좋은 일치를 보여 주었고 유로의 깊이가 일정한 것에 비하여 유로 길이와 유량사이의 관계가 보다 선형화 되어 좋은 성능을 가질 수 있었다. 제품마다 약간씩 성능이 다를 수 있는 이유는 유로의 정밀가공에 대한 오차, 유로와 고무가 완전히 밀착되지 않음으로 인한 누수, 사출물과 고무의 오차로 인한 고무와 유로의 밀착의 변화 등 때문이다. 또한 환자가 누워서 움직이는데 무리가 없도록 설계되었다. 이렇게 만들어진 유량 조절기는 성능, 디자인 면에서 기존제품과 비교하여 경쟁력이 있어서 기존제품을 대체할 수 있을 것으로 생각한다. 앞으로 유로를 좀 더 정밀하게 가공하고 누수문제를 해결한다면 보다 더 정확한 유량 조절기가 될 것이다.

## 참고문헌

- (1) White, F.M., 1991, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- (2) Je, T.J., Lee, J., Choi, D.S., Lee, E.S., and Shin, B.S., 2002, "Development of a Micro Machining Technology for Fabrication of Micro Parts," *Key Engineering Materials*, Vol. 238~239, pp. 383~388.
- (3) Shin, B.S., Yang, D.Y., Choi, D.S., Lee, E.S., Je, T.J., and Whang, K.H., 2002, "Development of Rapid Manufacturing Process by High-Speed Machining with Automatic Fixturing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130,131, pp. 363~371.
- (4) Brandrup, J., and Immergut, E.H., 1989, *Polymer Handbook*, Wiley, New York.
- (5) Richard, B.E., 1984, *CRC Handbook of Lubrication: (Theory and Practice of Tribology)*, CRC Press, New York.