

## 이식형 약물 주입 장치용 마이크로 튜브 펌프

백두진\* · 박준우\*\* · 이덕희\*\* · 이철한\*\* · 홍소영\*\* · 조영호\*\*\*

### Micro Tube Pump for an Implantable Drug Infusion Device

Du-Jin Bach\*, Jun Woo Park\*\*, Duck Hee Lee\*\*, Chul Han Lee\*\*, Soyoung Hong\*\*  
and Yung Ho Jo\*\*\*

Key Words : Tube pump(튜브 펌프), Implant(이식), Drug infusion device(약물 주입 장치)

#### ABSTRACT

This paper proposes a tube pump composed of small-sized cams and followers for an implantable intrathecal drug infusion device. Each followers is driven by a cam and liquid is discharged by a sequential reciprocal motion of the followers. The advantage of this structure is that it allows the pump to be clean and valveless. To design a small-sized, low power pump some analysis were performed to determine the design parameters of the cam, follower and the tube. To verify the feasibility of the experiment, a prototype was manufactured and its operating characteristics were investigated. Experimental results were in accordance with the expected results obtained from analysis.

#### 1. 서론

말기 암 환자의 통증 조절을 위한 이식형 약물 주입 장치는 척수에 직접 약물을 투여하므로, 적은 양의 약물로도 경구 투여나 정맥 투여보다 더 좋은 효과를 볼 수 있다. 척수 주입식 통증 치료법을 위한 이식형 약물 주입 장치의 개념은 1969년 Buchwald 그룹에 의해 처음 도입되었다. 1975년 single-rate infusaid pump를 사용하여 임상적응에 성공한 것을 계기로 1970년대 후반 여러 회사들이 연구 개발에 뛰어들었다. 초기에는 당뇨병 환자들을 위한 인슐린 펌프 개발로 시작되었지만, 1970년대 후반 Medtronic사가 통증

조절과 경직에도 사용할 수 있는 약물 주입의 용도로 펌프를 개발하기 시작하였다.<sup>(1)</sup>

이식형 약물 주입 장치는 기본적으로 약물을 보관하는 약물 저장고와 저장고에서 약물을 뽑아내는 펌프, 그리고 약물 투입 부위를 연결시켜 주는 카테터(catheter)로 구성된다. 약물 주입 장치가 복부 내 피하 부위에 이식된 후, 펌프가 구동되면 저장고의 약물이 카테터를 통해 환자의 척수에 약물이 투여되어 통증을 조절하게 된다.

펌프가 약물 저장고에서 카테터로 약물을 이송시키는 방식에 따라 크게 증기압 펌프와 연동 펌프로 구분된다. 증기압 펌프의 경우 약물 저장고의 내부가 벨로우즈 형태의 얇은 금속막에 의해 두 개의 챔버로 나뉘며, 벨로우즈 외부에는 내부의 압력보다 높은 압력을 만들어 주는 가스(fluorocarbon)로 채워져 있다. 즉 두 챔버 사이의 압력차에 의해 약물이 카테터로 이송된다. 이러한 구조는 펌프를 구동할 추가적인 에너지원이 필

\* 국립암센터 연구소 의공학연구과

E-mail : djbach@ncc.re.kr

\*\* 국립암센터 연구소 의공학연구과

\*\*\* 국립암센터 연구소 의공학연구과

E-mail : joyh@ncc.re.kr

요 없는 장점이 있으나 약물 주입의 패턴을 조절할 수 없는 단점이 있다.

현재 이식형 약물 주입 장치의 추세는 체외 무선 조정기를 통해 약물 주입 패턴을 환자의 상태에 맞게 설정할 수 있는 방식으로, 이러한 방식의 약물 주입 장치는 체내에 이식된 후 2~3년 간 배터리에 의해 구동되기 때문에, 저전력 및 소형화에 적합한 전용 펌프의 개발이 필요하다. 대표적인 제품으로 Medtronic사의 Synchromed 펌프가 있으며, 튜브와 롤러를 사용한 연동 방식의 튜브 펌프를 사용하였다.

튜브 펌프는 튜브 내에 액체를 포집하여 짜내듯 밀어내어 배출시키는 원리를 이용한 것으로, 임펠러 등이 필요하지 않은 장점이 있다. 따라서 액체와 펌프 상호간에 오염이 없으므로 약물 주입 장치용으로 사용하기에 적합하며, 정지시 체크밸브가 필요 없으므로 간단한 구조로써 소형화 및 경량화에 유리하여 이식형으로 적합하다.

이러한 튜브 펌프는 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 크게 롤러 방식과 캠-팔로워 방식으로 구분된다. Medtronic사의 Synchromed 펌프는 롤러 방식을 사용하였는데, 이러한 구조는 튜브가 롤러의 구동 방향으로 밀리는 현상이 발생하게 되는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 캠-팔로워 방식을 사용한 튜브 펌프를 제안하였다. 이러한 캠기구는 구동체인 캠과 피동체인 팔로워로 구성되며 운동의 형태를 변환시키는데 편리한 장치로서, 고기능화 기계에서 매우 유용하게 응용되고 있는 기계요소이다.<sup>(2)</sup> 특히 기구의 구조가 간단하고 구성 부품의 수가 적으며, 튜브를 수직 방향으로 압축하기 때문에 튜브의 밀림 현상이 없는 장점이 있다. 아울러 소형화, 경량화 및 저전력화에 적합한 캠, 팔로워 및 튜브에 관한 설계 변수들을 도출하여, 캠-팔로워 마이크로 튜브 펌프를 설계하였다. 선정된 설계 변수들을 이용하여 제안된 펌프의 시제품을 제작하였으며, 실험을 통해 구동 특성을 확인하였다.

## 2. 구조 및 구동 원리

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 마이크로 튜브 펌프의 기본 구조로서, 4개의 캠이 각각 90°의 각을 이루며 회전축에 고정되고, 이 캠들에 의해 수직 왕복 운동을 하는 팔로워 4개, 약물이 이송되는 실리콘 튜브 및 펌프 하우징, 그리고 상용 스텝 모터로 구성된다.

Fig. 2는 제안된 마이크로 튜브 펌프의 구동 원리를

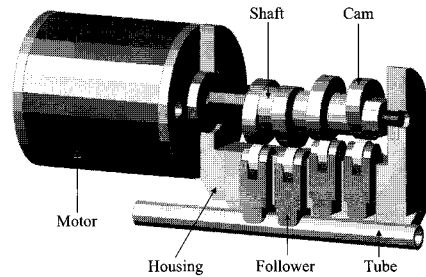


Fig. 1 Schematic view of the proposed pump

보여준다. 모터에 의해 축이 회전하면 회전축에 고정된 4개의 캠이 90°의 위상차를 가지며 회전하게 되고, 각각의 팔로워가 순차적으로 왕복운동을 함으로써 튜브를 압축하여 튜브내의 액체를 이송하게 된다. 캠 형상과 위상차에 의해, 1개의 팔로워가 튜브를 압축한 상태로 유지되는 구간이 90°이며, 그에 인접한 팔로워가 튜브를 압축하는 시점까지 압축된 상태가 유지된다. 따라서 모터가 1회전 하는 동안, 동시에 튜브를 누르게 되는 경우가 4번 발생한다. 이러한 효과에 의해 팔로워가 튜브를 누를 때 액체가 역방향으로 흐르는 것을 방지할 수 있다. 한편, 캠의 위상차는 캠의 개수에 의해 정해지고 캠의 개수와 위상차의 곱이 360° 보다 작으면 안 되며 그 이상으로 설계해야 하나, 정확히 360°를 맞추는 것이 박출량 및 모터 회전수면에서 효율적이다.

또한 팔로워에 의해 튜브가 압축된 상태에서는 압축된 부분의 양쪽으로 튜브의 변형이 생기게 된다. 이 부분은 튜브가 완전히 복원을 하지 못하는 범위이므로 인접한 팔로워의 위치를 이 범위내로 설계해서는 안 된다. 복원을 하지 못하는 튜브의 길이는 대략 1.7mm로 측정되었다. 즉, 팔로워 사이의 간격이 1.7mm보다 좁게 설계되면 박출량이 감소하게 되며, 넓게 설계되면 박출량은 동일하나 펌프 전체의 길이가 길어지게 되어 소형화에 불리한 현상이 된다는 것을 알 수 있다.

## 3. 설계 변수 해석

### 3.1 캠-팔로워 설계

Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 캠의 형상이다. 팔로워를 완전히 누른 상태로 90°가 유지되는 구간을 갖는 타원형으로 설계하였으며, 가공 및 조립 오차를 고

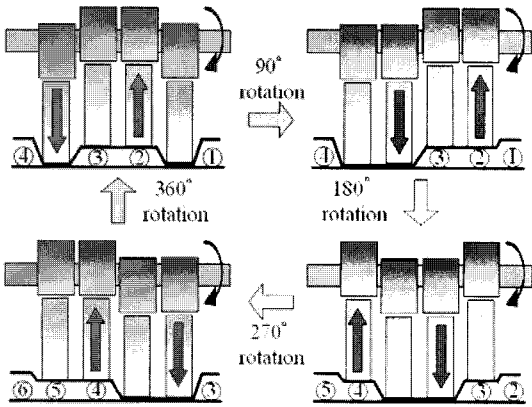


Fig. 2 Operation mechanism

려하여 양쪽으로 1°씩의 여유각을 주었다. 캠의 기초원 반경은 2mm, 최대 팔로워 이동 길이는 1.65mm이다.

직선 병진 운동용 캠의 원활한 운동과 구속조건(접촉유지)을 만족하는 형상 정의를 위해 압력각과 곡률반경 해석이 필요하다. 압력각은 팔로워 운동의 방향과 작용선의 방향이 이루는 각도로, 이 각이 커지면 측력이 증가하고 미끄럼 마찰이 증가하여 팔로워의 매끄러운 운동을 방해하게 된다. 그래서 일반적으로 직선 병진 운동용 캠의 압력각은 30°를 넘지 않도록 해야 한다.<sup>(3)</sup>

캠 표면의 모든 점에서는 각각의 곡률반경을 갖는다. 캠의 형상에서 오목한 부분의 곡률반경을 음의 값으로, 볼록한 부분의 곡률반경을 양의 값으로 정의할 수 있다. 음의 값을 갖는 곡률반경의 경우 그 절대값이 팔로워 롤러의 반경보다 작으면 그 점에서는 롤러와 캠이 접촉할 수 없게 되고 오동작을 하게 된다. 그리고 양의 값을 갖는 경우도 곡률반경이 작으면 문제가 발생하게 되며, 이 경우 Fig. 3의 피치곡선, 즉 팔로워 롤러의 중심 궤적을 통해 캠의 윤곽을 찾게 된다. 캠 피치곡선의 곡률반경이 팔로워 롤러의 반경보다 작게 되면 캠 표면에 뾰족한 부분을 만들게 되고 고속회전 시 올바른 동작을 할 수 없게 된다.<sup>(4,5)</sup>

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{v}{h} \right) \quad (1)$$

$$\rho_{pitch} = \frac{(h^2 + v^2)^{3/2}}{2v^2 - ah + h^2} \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 사용하여, 설계한 캠의 압력각  $\Phi$ 와 캠 피치곡선의 곡률반경  $\rho_{pitch}$ 를 해석하였으며,<sup>(4,5)</sup> 결과를 각각 Figs. 4와 5에 도시하였다. 여기서  $h$ 는 캠의 회전 중심에 대한 팔로워 롤러의 높이로, 캠의 기초원 반경과 팔로워 롤러의 변위량의 합이다. 그리고  $v$ 는 팔로워의 선속도,  $a$ 는 팔로워의 가속도이다. 설계한 캠 기구의 변위, 속도, 가속도를 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 4에서 압력각의 최대값은 23°이며, Fig. 5에서 피치곡선의 곡률반경 최소값은 2.4mm로 해석되었다. 이와 같이 해석된 압력각은, 앞 절에서 언급한 일반적인 캠기구 설계 제한 조건인 30°보다 작고,<sup>(3)</sup> 피치곡선의 곡률반경 또한 팔로워 롤러의 반경(1.5mm)보다 1.6 배 이상 크므로,<sup>(4,5)</sup> 캠과 팔로워 롤러의 접촉이 원활하고 불필요한 측력이나 충격력이 최소화된 캠의 형상 설계가 되었다는 것을 알 수 있다.

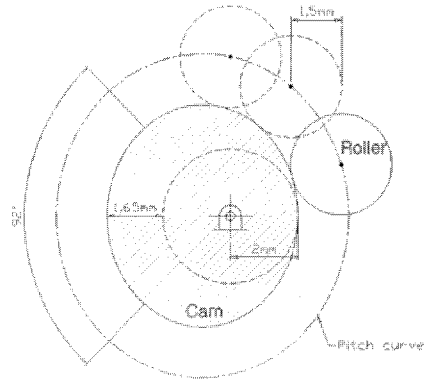


Fig. 3 Shape of the designed cam

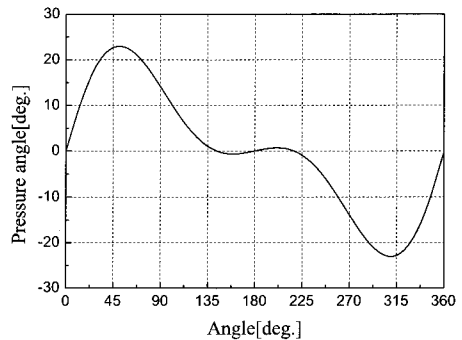


Fig. 4 Pressure angles of the cam mechanism

### 3.2 토크 해석 및 모터 선정

Fig. 7은 팔로워의 움직임에 따른 튜브의 상태를 보여준다. (a)는 튜브가 눌리지 않은 상태이고, (b)는 완전히 눌린 상태, 그리고 (c)는 완전히 눌린 상태에서 0.14mm가 압축된 상태이다.

실리콘 재질의 튜브(SILASTIC Rx-50 Medical Grade Tubing, DOW CORNING corp.) 사이즈는 외경 2.41 mm, 내경 1.57 mm이다. 펌프의 역류를 방지하기 위해, Fig. 7(c)와 같이 0.14 mm가 더 압축되도록 설계하였다. 이때의 튜브 변형률은 약 0.17이며, 0.2를 넘지 않도록 설계하였다. 이는 모터에 걸리는 부하를 최소화하기 위함이다.

펌프를 구동할 모터를 선정하기 위해 식 (3), (4), (5)를 사용하여 펌프의 구동토크를 해석하였다.

$$F_{normal} = A \cdot E \cdot e \quad (3)$$

$$F_{friction} = \mu \cdot F_{normal} \quad (4)$$

$$T = r \cdot F_{friction} \quad (5)$$

여기서  $F_{normal}$ 은 수직항력,  $A$ 는 접촉면적,  $E$ 는 탄성계수,  $e$ 는 변형률,  $F_{friction}$ 은 마찰력,  $\mu$ 는 마찰계수,  $T$ 는 구동토크,  $r$ 은 반경이다.

Fig. 7(c)의 상태에서 팔로워와 튜브가 접촉하는 부분의 면적은  $4.16 \text{ mm}^2$ 이며, 캠 형상에 의해 2개의 팔로워가 동시에 튜브를 압축하는 구간이 생기므로, 이때의 최대 접촉면적  $A$ 는  $8.32 \text{ mm}^2$ 이다. 실리콘 튜브의 탄성계수  $E$ 는  $2.1 \text{ Mpa}$ 이며<sup>(6,7)</sup>, 튜브의 변형률  $e$ 는 0.17, 캠과 팔로워 롤러 사이의 마찰계수  $\mu$ 는 0.044, 그리고 캠 최대반경  $r$ 은  $3.65 \text{ mm}$ 이다. 참고로 팔로워 롤러로 사용되는 금속(SUS)재질의 베어링과 플라스틱(TEFLON) 재질인 캠 사이의 마찰계수는, ASTM D1894 시험방법에 따라 0.044로 측정되었다.<sup>(8)</sup>

구동토크  $T$ 는  $0.48 \text{ mNm}$ 로 해석되었으며, 이 결과를 통해 설계된 펌프를 구동할 상용 스텝 모터(AM1524, ARSAPE)를 선정하였다. 이 모터는 24 rps에서 대략  $0.5 \text{ mNm}$ 의 토크(pull-in torque) 특성을 가지므로, 그 이하의 속도에서 펌프를 구동해야 함을 알 수 있다.

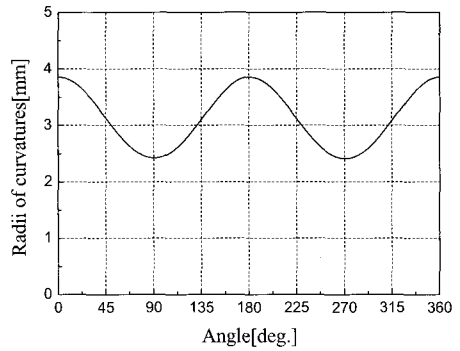


Fig. 5 Radii of curvatures of the pitch curve of the cam

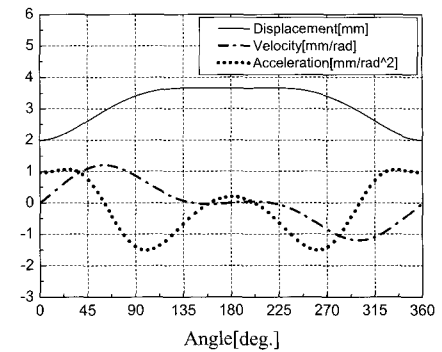


Fig. 6 Displacement, velocity and acceleration curves of the designed cam mechanism

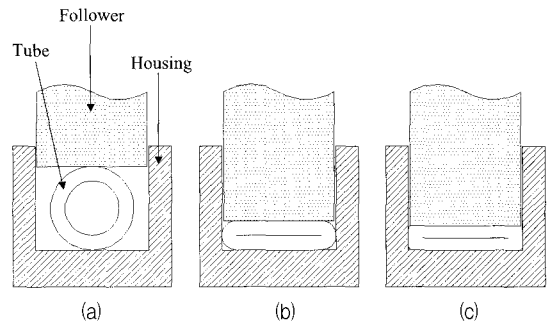


Fig. 7 Shape of the follower and the tube

### 4. 실험 결과

Fig. 8은 시제작된 마이크로 튜브 펌프이며, Table 1은 시제품의 주요 설계 변수의 값이다.

캠과 접촉하는 팔로워 롤러는 별도의 롤러 및 구성



Fig. 8 Photo of the prototype

Table 1 Design parameters of the prototype

Parameter	Value
Motor diameter [mm]	15
Motor length [mm]	16.5
Pump housing length [mm]	22
Total length [mm]	38.5
Weight(motor, pump) [g]	12, 6.2
Tube size(OD, ID) [mm]	2.41, 1.57
No. of cams	4
No. of followers	4
Follower width [mm]	2
Gap between followers [mm]	1.7
Max. follower moving length [mm]	1.65
Follower roller radius [mm]	1.5
Capacity [ml/min]	9.87

부품을 사용하지 않고 구름 윤활 요소인 상용 볼베어링(MR681, NSK Ltd.) 자체를 사용하여 마찰영향을 최소화 하였으며 소형화 및 경량화에 유리한 구조로 제작하였다.

제작된 마이크로 튜브 펌프를 1 rps(24 pps) 간격으로 24 rps까지 속도를 증가시키면서 소모 전류와 박출량을 측정하였다. 소모 전류 측정은 디지털 멀티미터(34401 A, Agilent)를 사용하였으며, 박출량은 미세 전자 저울(92SM-202A, Precisa Instruments Ltd.)을 사용하여 측정하였다. 실험은 비이커 속에 담겨져 있는 약물 대용제(밀도 1.0 g/ml)를 사용하여 대기압 하에서 수행 하였으며, 총 5 번의 반복 실험을 하여 그 평균값을 결과로 사용하였다.

Fig. 9는 속도에 따른 소모 전류를 보여준다. 속도가 증가함에 따라 소모 전류가 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 속도에 따른 박출량을 보여준다. 회전당 박출량은 모든 속도에 대해 거의 일정

한 값을 보이며, 9.68  $\mu\text{l}/\text{rev}$ 의 평균값을 갖는다. 또한 초당 박출량은 속도에 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

약물 주입 장치에서 약물은 약물 저장고, 마이크로 펌프, 박테리아 필터, 카테터 순으로 이동된다. 이 때 음압(0.67 atm)이 형성되어 있는 약물 저장고와 미세 격자(0.22  $\mu\text{m}$  pore)의 박테리아 필터, 그리고 직경(0.35 mm)이 좁은 카테터를 통과하면서 실제 카테터 끝단의 출구에서는 그 유량이 대략 50% 정도로 감소하는 것을 실험을 통해 도출하였다. 리튬 이온 배터리(LSH 26180, SAFT) 1 개를 사용하여 2년 동안 약물 주입 장치를 사용할 수 있는 수명 해석을 통해, 실제 카테터 끝단에서 4.5~5.0  $\mu\text{l}/\text{rev}$ 의 유량 조건이 만족되어야 함을 계산하였다. 따라서 설계된 마이크로 펌프는 9.0~10.0  $\mu\text{l}/\text{rev}$ 의 유량 조건을 만족해야 함을 알 수 있다.

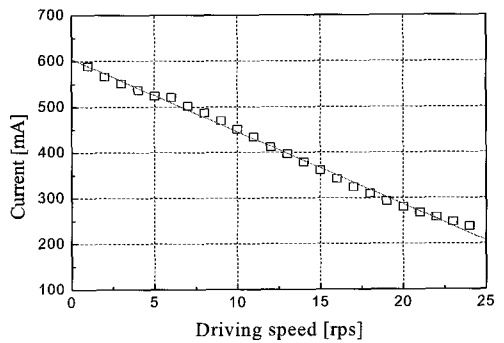


Fig. 9 Measured currents according to various driving speeds

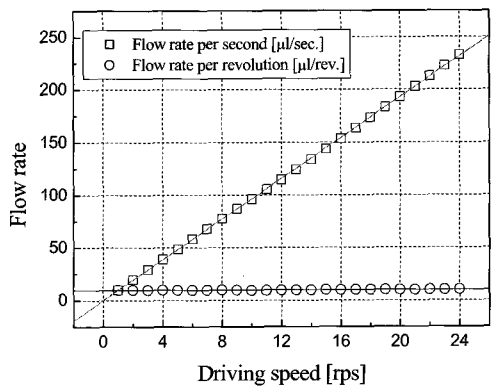


Fig. 10 Measured flow rates according to various driving speeds

모터의 속도가 증가함에 따라 모터의 토크는 감소하기 때문에 Fig. 10에서와 같이 24 rps 이상의 속도에서는 펌프를 구동할 수 없었다. 이는 이미 앞 절에서 해석한 속도인 24 rps 이하로 구동되어야 한다는 조건과 일치한다.

펌프를 고속으로 구동하면 전력손실이 줄지만, 상대적으로 토크가 감소하여 펌프 구동이 불안정해지게 된다. 실험 결과를 통해, 시제작된 마이크로 튜브 펌프의 정격 구동속도를 18 rps로 선정하였다. 이는 마찰 및 부하 영향에 의한 임계값인 한계 구동 속도(24 rps)의 25% 여유를 갖는 값이므로 충분한 안정성이 보장될 수 있으리라 사료된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 캠-팔로워 방식의 마이크로 튜브 펌프를 설계하였다. 이러한 구조는 액체와 펌프 상호간에 오염이 없으므로 약물 주입 장치에 적용하기에 적합하며, 정지시 체크밸브가 필요 없으므로 간단한 구조로써 소형화 및 경량화에 유리하여 이식형으로 적합하다.

캠 형상의 최적 설계를 통해 팔로워, 튜브 및 모터 토크에 관한 설계 변수를 도출하였으며, 선정된 설계 변수를 사용하여 마이크로 튜브 펌프의 시제품을 제작하였다.

속도에 따른 소모 전류와 박출량을 측정하여 해석 결과와 비교하였으며, 안정성과 효율성이 고려된 펌프의 정격 구동 속도를 선정하였다.

제작된 마이크로 튜브 펌프는 현재 이식형 약물 주입 장치에 장착되어, 체외 실험과 동물 실험에 사용되고 있다. 향후 성능 향상을 위해 마찰 영향의 최소화 및 박출량 증가, 소형화 등 구조 설계에 관한 연구가 계속될 것이다.

## 후 기

본 연구는 2007년도 국립암센터 기관고유연구사업(0510241-3) 지원으로 이루어진 것임.

## 참고문헌

- (1) 홍소영, 최계순, 박준우, 이철한, 신정옥, 이정찬, 조영호, 2005, "Review: 만성 통증 조절을 위한 이식형 약물 펌프," 제32회 대한의용생체공학회 춘계학술대회.
- (2) 구병국, 신중호, 윤허업, 장옥화, 2000, "요동운동 롤러 종동절과 디스크 캠 기구의 운동해석을 위한 원호 접근법에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 523~526.
- (3) 신중호, 강동우, 김종수, 김대원, 2000, "종동절의 상대가속도를 이용한 원반 캠의 곡률반경 결정법에 관한 연구," 한국정밀공학회지 제17권 제8호, pp. 113~119.
- (4) R. L. Norton, 1992, "Design of Machinery," McGraw-Hill, pp. 353~369.
- (5) J. E. Shigley and J. J. Uicker, 1980, "Theory of Machines and Mechanisms," McGraw-Hill, pp. 226~241.
- (6) American Society for Testing and Materials Standard: Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers- Tension, ASTM D412.
- (7) Product Information - SILASTIC(R) Rx Medical Grade Tubing, DOW CORNING.
- (8) American Society for Testing and Materials Standard: Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting, ASTM D1894.