

# 공압식 대퇴의지의 유각기 동역학 시뮬레이션

조현석, 류제청, 문무성, 김규석, 김경훈, 김신기, 천미선  
재활공학연구센터

## Swing Phase Dynamic Simulation of Pneumatic Prosthesis

H. S. Cho, J. C. Ryu, M. S. Mun, G. S. Kim, K. H. Kim, S. K. Kim, M. S. Cheon  
Korea Orthopedic & Rehabilitation Engineering Center

### ABSTRACT

In this study, swing phase dynamic simulation of above-knee prosthesis is performed. The prosthesis consists of a single axis knee mechanism and pneumatic cylinder. The numerical modelling of the prosthesis is analyzed in two dimensions. The governing equation of thermodynamical pneumatic cylinder model is applied to construct the control of lower limb during swing phase. Knee flexion angle with respect to the orifice diameter of the pneumatic cylinder is produced. This analysis will be very useful to the design of pneumatic cylinder in prosthesis.

Zarrugh[5]는 Radcliffe의 다축 공압식의지를 모델로 하여 모의실험을 통한 수학적 해석을 하였으나 공압 실린더의 모델링에서 실험데이터를 이용하는 방법을 사용하여 완전한 수학적 모델링이 불가능하였다. 좀 더 정확한 모델링을 위하여 본 연구의 sub-project에서는 보다 정확한 공압실린더의 수학적 모델링을 제시하였다.[6]

본 논문은 정확한 기구학 모델링, 실린더내의 열역학적 수치모델링을 통하여 실험데이터가 필요없는 공압식의지의 유각기 운동을 시뮬레이션하고, 이 결과를 인간의 정상보행분석결과와 비교하여 대퇴의지용 공압실린더개발에 이용하고자 한다.

### 서론

대퇴 및 하퇴절단자를 위한 현대식 의지에 관한 연구는 이미 해외에서는 30년전부터 시작되어 지금까지 많은 성과를 거두고 있다. 이러한 연구는 인간의 보행특성을 기계적인 링크의 구성을 통하여 절단전의 상태로 되돌리는데 그 목적이 있다. 국내에서도 최근 몇 년사이에 이 분야에 관한 연구가 학계 및 당 연구소에서 활발히 이루어지고 있으며, 본 연구도 이러한 노력의 일환이다.

일반적으로 의지는 슬관절의 절단부위에 따라 크게 대퇴의지와 하퇴의지로 구분되며, 대퇴의지는 하퇴의지에 비하여 슬관절 메카니즘이 추가된다. 슬관절부는 축방식에 따라 단축식과 다축식으로 나뉘며, 유각기의 자연스런 보행을 위해 공압실린더나 유압실린더를 추가한다. Radcliffe[1]는 유각기동안의 운동을 원활히 하기위해 다축식 링크방식의 슬관절에 공압실린더의 도입을 통한 해결 방법을 제시하였다. 그후, Patil[2], Bar[3], Wang[4]등은 여러 가지 공압장치 모델을 제시하였으며 각기 장단점을 가진다.

### 공압식 대퇴의지의 모델링

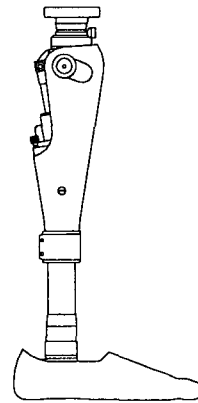


그림 1. Developed above-Knee Prosthesis

본 시뮬레이션은 당 연구소에서 개발중인 모델을 대상으로 하였으며 이를 그림 1에 나타내었다. 유각기동안의 운동에 고관절의 좌우 이동이 미치는 영향은 무시될 수 있다는 가정하에서 2차원 모델링을 하였다. 본 연구의 동역학 해석에 필요한 모델의 물성

치는 표. 1에 나타내었다.

표. 1 대퇴 의지의 부분별 물성치

Part	mass (kg)	moment of Inertia ( $I_{zz}$ )
Shank	1.327	4.989e-2 kg m <sup>2</sup>
Cylinder Rod	0.044	-
Cylinder	0.144	-

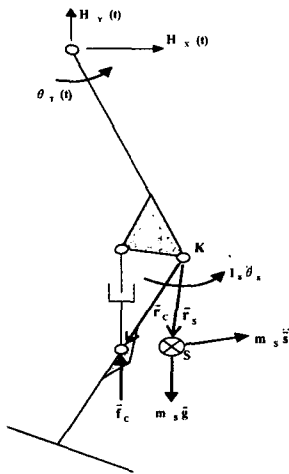


그림 2. Force Diagram

유각기 의지 동역학

유각기 대퇴의지의 동역학은 단순진자운동에 공압식 실린더가 추가된 형태로써 그림 2에 하퇴에 작용하는 힘들을 도시하였다. 하퇴의 회전중심 K에 대하여 이 힘들이 발생시키는 모멘트가 하퇴의 회전운동을 일으키게 되며 이를 운동방정식으로 표현하면 식 1과 같다.

$$\ddot{\theta}_s = \frac{\vec{r}_C \times \vec{f}_C + \vec{r}_S \times m_s(\vec{g} - \vec{s})}{I_s} \quad (식 1)$$

여기서,

$\ddot{\theta}_s$  = 하퇴의 각가속도

$\vec{r}_C$  = 회전중심에서 공압실린더 작용점까지의 거리

$\vec{r}_S$  = 회전중심에서 하퇴 무게중심까지의 거리

$\vec{f}_C$  = 하퇴에 작용하는 공압실린더의 축력

$\vec{g}$  = 중력가속도

$\vec{s}$  = 하퇴의 가속도

식 1에서  $\vec{f}_C$  를 제외한 각 값들은 기구학해석을

통하여 구할 수 있으며 하퇴에 작용하는 공압식 실린더의 축력  $\vec{f}_C$  는 공압실린더의 열역학 해석을 통하여 구하게 된다.

열역학적 해석

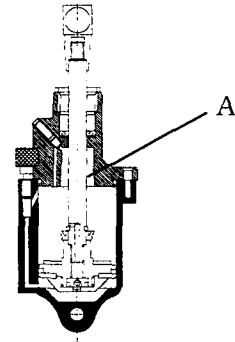


그림 3. Pneumatic Cylinder

그림 3은 모델링된 공압실린더의 모습을 보여주고 있다. 당면구소에서 개발중인 실린더 모델은 Rod쪽 챔버가 압축될 때 A영역에서 2차 압축이 일어나 3챔버 상태가 발생한다. 본 연구에서는 이점을 고려하지 않고 단순히 2챔버상태로 가정하고 시뮬레이션하였다. 공압실린더가 하퇴에 가하는 힘은 공압실린더 내부 챔버의 압력  $P_l, P_h$ , 피스톤과 실린더사이의 마찰력  $F_f$ , 그리고 피스톤의 운동에 의한 관성력  $m\ddot{x}_p$  등으로 표현될 수 있다. 그림 4에 이를 나타내었으며, 식 2에는 이들 힘의 평형방정식을 나타내었다.

$$F_c = P_l - P_h - F_f + m\ddot{x}_p \quad (식 2)$$

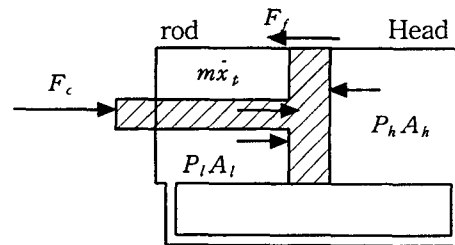


그림 4. Force Diagram of Cylinder

마찰력은 피스톤과 실린더사이의 운동마찰계수에 따라 일정한 값을 가지는데 실험을 통하여 구한 마찰력은 약 2N 정도이다. 피스톤의 운동은 의지의 운동으로부터 결정되는데 문제는 실린더 내부의 압력에 의한 힘을 결정하는 것이며, 이를 해결하기위하여

열역학 해석을 도입하였다.

실린더의 이동에 따른 공기의 압력변화의 지배방정식을 질량보존의 법칙에 의하여 유도된 식은 식 3 및 식 4와 같다. 이들 식을 보면 압력변화량은 피스톤 이동속도와 질량유량의 함수임을 알 수 있다.

$$\dot{P}_h = \frac{[(\frac{P_h}{P_0})^{\frac{1}{\gamma}} (\frac{\dot{y}}{H_{hiavg}}) - \frac{1}{\rho_0(A_h H_{hiavg})} \dot{m}]}{[\frac{1}{\gamma} (\frac{P_h}{P_0})^{\frac{1}{\gamma}-1} (1 - \frac{\dot{y}}{H_{hiavg}}) \frac{1}{P_0}]} \quad (\text{식 3})$$

$$\dot{P}_l = \frac{[(\frac{P_l}{P_0})^{\frac{1}{\gamma}} (\frac{\dot{y}}{H_{loavg}}) - \frac{1}{\rho_0(A_h H_{loavg})} \dot{m}]}{[\frac{1}{\gamma} (\frac{P_h}{P_0})^{\frac{1}{\gamma}-1} (1 - \frac{\dot{y}}{H_{loavg}}) \frac{1}{P_0}]} \quad (\text{식 4})$$

여기서,

$P_0$  = 대기압 (= 101000 Pa, 초기조건)

$\rho_0$  = 대기밀도 (= 1.2 kg/m<sup>3</sup>, 초기조건)

$y$  = 실린더 축방향 변위

$\gamma$  = 비열비 (= 1.4)

$\dot{m}$  = 질량유량

$H_{hiavg}$  = 헤드쪽 등가길이

$H_{loavg}$  = 로드쪽 등가길이

실린더 내의 압력변동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 오리피스를 통과하는 질량유량( $\dot{m}$ )이라고 할 수 있으며 압축성 유체의 베르누이 방정식을 오리피스의 입구에 적용함으로써 유량을 구할 수 있다. 압축성 유체의 경우, 양 챔버의 압력차에 따라 아음속역과 음속역으로 구분되어 다루어진다. 각각의 경우에 대한 질량유량은 식 5 및 식 6과 같다.

(1) 아음속역 ( $P_l < P_h < 1.893 P_l$ )

$$\dot{m} = aA \sqrt{\frac{2n}{n-1} P_h \rho_h \left( \left( \frac{P_l}{P_h} \right)^{\frac{2}{n}} - \left( \frac{P_l}{P_h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right)} \quad (\text{식 5})$$

(2) 음속역 ( $P_h > 1.893 P_l$ )

$$\dot{m} = aA \sqrt{P_h \rho_h n \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}} \quad (\text{식 6})$$

여기서,  $A$ 는 오리피스 단면적이고  $n$ 은 Reynolds수이다.

식 5 및 식 6에서 유량계수  $a$ 는 이론치와 실제와의 오차를 줄이기 위한 인자로서 오리피스의 모양에 따른 영향을 나타낸다. 정확한 유량계수를 구하는 것은 매우 중요한 문제로서 오리피스의 형상이 복잡해짐에 따라 정확한 유량계수를 구하기는 더욱 어렵다. 본 논문에서는 오리피스의 모양을 그림 5와 같은 형태로 단순화하여 유량계수를 구하였다.

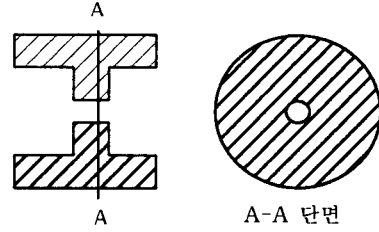


그림 5. 오리피스의 구조

구하여진 유량계수는 다음과 같다.

$$\alpha = 0.0047 \rho v \quad (P_h > P_l) \quad (\text{식 7})$$

$$\alpha = 0.0061 \rho v \quad (P_h < P_l) \quad (\text{식 8})$$

여기서  $\rho v$ 는 밀도와 속도의 곱이다.

이와같은 공압실린더의 모델링은 실험결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.[6]

### 모의 실험 방법

모의실험은 유각기동안의 대퇴의 운동과 하퇴의 초기 위치 및 속도를 주고 의지의 운동방정식(식 1)의 해를 구하는 것이다. 여기서 대퇴의 운동은 그림 6과 같은 정상인의 보행데이터를 사용하여 5-7차 다항식으로 구성하였다. 의지 동역학은 동역학 해석 S/W인 ADAMS(MDI Co. USA)를 이용하여 구현하였으며, 공압실린더 열역학은 MatLab(Mathwork Co. USA)으로 프로그래밍하였다. 전체 모의실험의 Block Diagram을 그림 7에 나타내었다.

오리피스 직경을 1.4mm, 0.17mm, 0.01mm인 경우에 대하여 모의실험을 수행하였다.

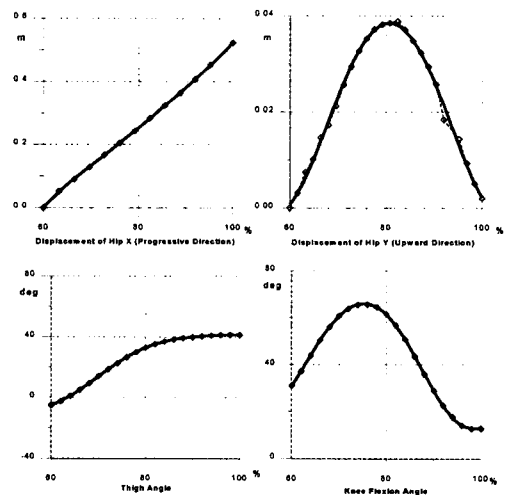


그림 6. Normal gait during swing phase

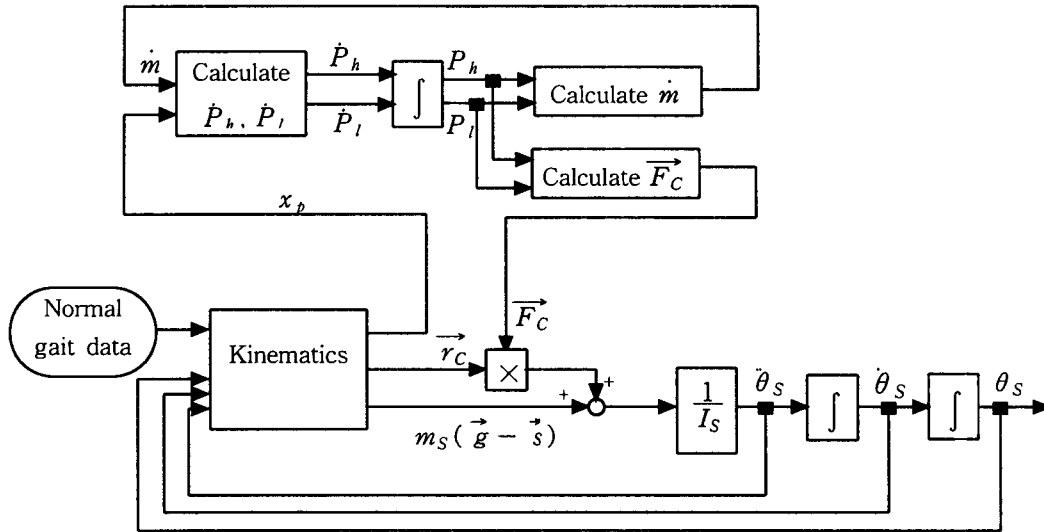


그림 7. Block Diagram of Simulation

실험 결과 및 고찰

오리피스 직경이 0.17mm일때의 실린더내의 두 챔버 압력, 질량유량 및 실린더 축력을 그림 8에 나타내었으며, 각각의 오리피스 직경에 대한 경우의 슬관절 각도와 와 정상인의 슬관절 각도를 그림 9에 나타내었다.

그림 8에서 피스톤이 Head쪽으로 이동함에 따라 Head쪽 압력이 증가하고, Rod쪽 압력은 감소함을 볼 수 있으며, 이때의 유량이동과 축력은 Head쪽 압력과 비슷한 경향을 보여준다. 그림 9에서 최대각도는 오리피스 직경이 0.17mm인 경우가 정상인의 경우와 비슷하며 유각기가 끝날때의 각도는 0도 정도로 완전히 다리가 퍼진 상태가 되어 정상인의 경우와 차이가 많이 나는데, 이는 정상인의 보행과 달리 의지보행의 특성으로서 바람직하다. 그림 9에서 오리피스의 직경이 0.01mm인 경우는 0.17mm인 경우와 큰 차이를 보이지 않는데 이는 직경이 0.2mm이상 작아질 경우는 양챔버사이의 유량이동이 극히 작아지게 되어 오리피스 조절에 의한 큰 변화를 기대하기 어려움을 알 수 있다.

일반적으로 보행속도가 빨라짐에 따라 오리피스의 직경은 작아져야 하는데 이 시뮬레이션의 실린더 모델은 정상보행에 알맞은 오리피스 직경이 직경이 0.1-0.2mm정도이며 그 이상 직경이 작아지는 것이 큰 차이를 보이지 않으므로 빠른보행에는 적합하지

않음을 알 수 있다. 오리피스의 직경이 1.4mm이상일 경우에는 공압실린더 해석결과, 질량유량 및 압력이 진동하는 양상을 보였으며 이는 매우 불안정한 상태가 되어 해석이 불가능하였다.

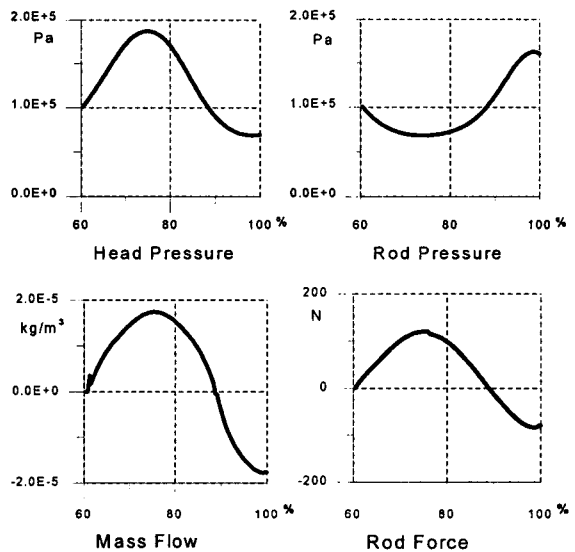


그림 8. Each status of pneumatic cylinder when Orifice diameter is 0.17mm

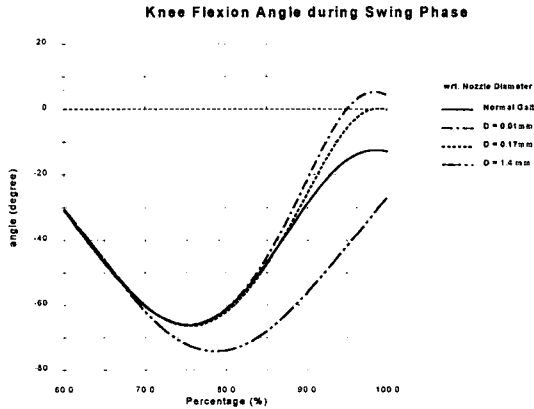


그림 9. Knee flexion angle during swing phase

### 결론

본 연구는 이론적으로 난해한 대퇴의지용 공압실린더를 모델링하여 이를 이용한 대퇴의지의 유각기 보행 시뮬레이션을 수행하였다.

본 수치 시뮬레이션을 통해 공압실린더 오리피스 크기에 따라 보행속도에 따라 적합한 하퇴운동을 가져오는 오리피스의 크기를 찾을 수 있게 되었다.

정상인의 정상보행속도를 구현하는 공압실린더의 오리피스 직경은 0.1-0.2mm사이이다.

오리피스 직경이 1.4mm이상인 경우는 질량유량이 너무커져서 실린더의 기능을 할 수 없음을 알 수 있다.

### 향후 연구 과제

시제품제작 및 임상테스트를 거치지 않고, 설계하는데 도움을 줄 수 있는 자료를 제시하였다. 성능향상을 위한 실린더 구조변경에 따른 시뮬레이션 모델링의 보안을 거쳐 시뮬레이션의 결과를 좀더 실질적으로 응용할 수 있을 것이다. 당 연구소의 공압식 의지의 개발 및 시제품 임상테스트가 진행중이며 실험결과와 본 시뮬레이션 결과비교를 통하여 시뮬레이션을 검증, 분석하게 될 것이다.

### 참고 문헌

- [1]. Radcliffe, C. W., UC-BL Pneumatic swing-control unit for above-knee prostheses, *Bulletin of Prosthetics Research*, 1968, Fall
- [2]. Patil, K. M., and Chakraborty, J. K., Analysis

of a new Polycentric Above-knee Prosthesis with a Pneumatic Swing Phase Control, *J. Biomechanics*, 1991, Vol.24, No.3/4, pp. 223-233

[3]. Bar, A., Ishai, G., Meretsky, P., and Koren, Y., Adaptive Microcomputer Control of an Artificial Knee in Level Walking, *J. Biomed. Eng.*, 1983, Vol.5, pp. 145-150

[4]. Wang, T. K., Ju, M. S., and Tsuei, Y. G., Adaptive Control of Above Knee Prosthesis: a Preliminary Report, *J. Biomechanical Engineering*, 1992, Vol.114, pp.421-424

[5]. Zarrugh, M. Y. and Radcliffe, C. W., Simulation of swing phase dynamics in above-knee prostheses, *J. Biomechanics*, 1978 Vol. 9 pp. 283-292

[6]. 이 재웅, 김 태국, 대퇴의족용 공압 감쇠기의 개발, *재활공학연구센터*, 1997