인공지능 의지용 공압실린더의 특성 해석

조현석*, 김종권, 류제청, 김신기, 문무성
재활공학연구센터

An analysis of characteristic of a pneumatic cylinder in intelligent prosthesis

H. S. Cho, J. K. Kim, J. C. Ryu, S. K. Kim, M. S. Mun
Korea Orthopedic & Rehabilitation Engineering Center(**KOREC**)

ABSTRACT

In this study, an experiments and numerical simulation of a three chamber pneumatic cylinder for an intelligent AK-knee prosthesis is performed. The cylinder has a variable orifice which can be controlled automatically through a microprocessor controller as needed while amputee gaits. In the experiment, the cylinder was driven by a cam whose trajectory simulates the normal gait, and axial forces of cylinder with different of orifice opening was measured. The numerical simulations was based on thermodynamic and fluid mechanical consideration. The experimental results and the numerical results were in good agreement.

서 론

대퇴절단자가 사용하는 인공지능의지의 슬관절 장치는 보행속도 적응력이 매우 중요하다. 이 슬관절 장치중에서 유체작용식(유공압) 슬관절은 최근 들어 유각기의 원할한 보행속도를 조절하기 위하여 개발되고 있다. 보행 중 유각기 동안의 슬관절운동을 Radcliff[1]가 공압실린더의 도입을 통하여 해결방법을 제시한 이후, Patil[2], Bar[3]등은 여러 가지 공압장치 모델을 제시하였으며 상용화는 Hosmer Co.(미국), Endolite(영국)등이 하였다. Zarrugh[4]는 4절링크의지의 수학적 해석을 시도하였으나 공압실린더의 모델링에서 실험데이타를 이용하는 방법을 사용하였다. 보다 정확한 공압실린더의 수학적 모델링은 J.Y.Lee등이 제시하였고[5], H.S. Cho등은 그동안 수학적 해석의 검증을 통하여 본 모델의 타당성을 입증했다[6]

본 연구의 목적은 인공지능 의지용 공압 실린더를 제작하여 실험을 통하여 의지 축에 걸리는 힘을 구하고, 실험과 같은 조건에서 공압 실린더의 시뮬레이션을 실행하여 이때의 결과를 비교하여 보행속도에 적응하는 최적의 공압 실린더를 개발하는데 있다.

실험장치 및 방법

실험장치는 캠 기구를 통하여 정상인 보행 시 유각기 슬관절의 운동에 따른 의지착용 공압 실린더의 피스톤운동을 유도하여 그 축력을 측정할 수 있게 하였다. 실험장치는 구동부, 실린더, 측정부로 되어있고, 축력은 로드 셀에 의해 측정되며 데이터는 Data Acquisition System(DT2831)로 처리하였다. 실험방법은 장치를 초기 셋팅하고 로드 셀을 캘리브레이션한 다음 모터제어부를 조절하여 캠의 회전속도를 정상인의 보통 걸음속도로 한다. 이후 공압 실린더의 노즐위치를 조절하면서 데이터를 처리하고 결과그래프를 나타낸다.

시뮬레이션

대퇴의지의 하퇴에 작용하는 공압식 실린더의 축력 $\vec{f_C}$는 공압 실린더의 열역학 해석을 통하여 구하게 된다. 실린더내의 힘은 공압 실린더 내부 챔버의 압력, 피스톤과 실린더사이의 마찰력, 그리고 피스톤의 운동에 의한 관성력등의 힘의 평형방정식으로 표현될 수 있다.. 실린더내의 압력변화량은 피스톤 이동속도와 질량유량의 함수임을 알 수 있다. 실린더 내의 압력변동에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 오리피스를 통과하는 질량유량이며 압축성 유체의 베르누이 방정식을 오리피스의 입구에 적용함으로써 유량을 구할 수 있다. 압축성 유체의 경우, 양 챔버의 압력차에 따라 아음속 역과 음속 역으로 구분되어 다루어진다. 각각의 경우에 대한 질량유량 식은 다음과 같다.

(1) 아음속역 ($P_l < P_h < 1.893 P_l$)

$$\dot{m} = \alpha A \sqrt{\frac{2n}{n-1} P_h \rho_h \left(\left(\frac{P_l}{P_h}\right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_l}{P_h}\right)^{\frac{n+1}{n}} \right)} \quad (1)$$

(2) 음속역 ($P_h > 1.893 P_l$)

$$\dot{m} = \alpha A \sqrt{P_h \rho_h n \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n+1}{n-1}}} \quad (2)$$

유량계수 α는 이론치와 실제와의 오차를 줄이기 위한 인자로서 오리피스의 모양에 따른다. 정확한 유량계수를 구하는 것은 매우 중요한 문제로서 각 노즐에 있어서 유량계수는 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.0016 \rho v \text{ (1차 노즐)} \\ \alpha &= 0.0040 \rho v \text{ (2차 노즐)} \\ \alpha &= 0.0051 \rho v \text{ (3차 노즐)} \end{aligned} \quad (3)$$

결과 및 고찰

3챔버식 공압 실린더는 보행 유각기의 마지막 단계에서 실린더내의 압력의 급격한 반전에 따라 슬관절 신전이 빠르게 일어나는 현상을 방지하고 의지착용자의 보행을 원할히 하기 위하여 고안되었다. Fig.1은 보행에 따른 실린더의 작동과정을 나타낸 것이다. A는 Pre-Swing의 시작상태이며 Toe-off하면서 보행은 슬관절 굴곡이 일어나 최대 굴곡상태인 B

상태까지 공압 실린더내의 피스톤이 하향진행하며 실린더하부의 니들밸브를 통해 유체가 하부챔버에서

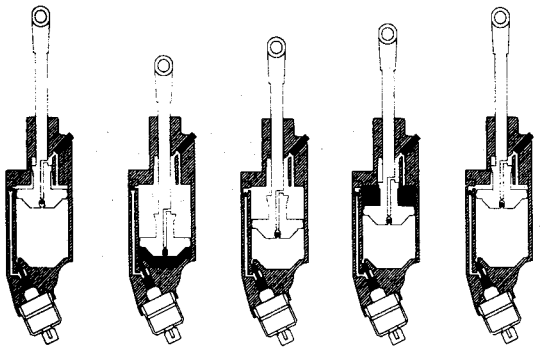

Fig. 1 A schematic diagram showed operation process of the pneumatic cylinder

상부챔버로 이동한다. 이때 Fig.2와 3에 보는바와 같이 축력이 최대에 이르는 시점을 지나 1차노즐의 질량유량도 크게 증가한다. 슬관절이 신전됨에 따라 피스톤은 상향진행하며 상하챔버사이에 압력이 평형을 이루는 **C**상태를 지나 상부챔버의 압력이 커지게 되어 실린더의 체크밸브는 서서히 닫히고 피스톤의 체크밸브가 열리면서 유체는 2차노즐을 통해 상부챔버에서 하부챔버로 이동하게된다. 이 상태에서 보행속도에 따라 급격히 신전이 일어나며 유각기 보행이 거의 종료될 때 발뒤축 접지시 매우 부자연스런 보행을 이루게된다. 이를 방지하기위해 **D**상태에 이르면 속도저감 챔버(실린더 상부에 제3의 챔버)가 형성되어 상부챔버의 공기는 3차노즐을 통하여 제3의 챔버로 이동하면서 Fig. 2의 **D-E** 구간의 저항압력이 생성된다. 이 힘은 급격한 신전(**C**와**D**사이 구간)에 대한 완충작용으로 작용하여 **E**의 발뒤축 접지 전 의지의 움직임을 부드럽게 유도할 수 있다. Fig.2는 보행시간에 대한 축력의 변화로서 시뮬레이션과 실험결과 사이의 오차가 거의 없이 같은 경향을 나타내고 있다. Fig.3은 3챔버의 모델에서 보행에 따른 각 노즐을 통과하는 유체의 질량유량을 나타낸 것이다. 여기서 챔버들의 압력변화와 함께 실린더내의 유체의 흐름을 알수 있으며 각 노즐의 설계 및 간극조정을 수치적으로 미리 판단할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

결론

인공지능의지용 공압실린더의 개발은 정상인의 유각기 보행궤적을 모사한 캠기구를 통한 성능실험과 수치 모델링을 이용한 시뮬레이션결과를 비교하였다.

1. 인공지능의지용 공압실린더의 속도저감장치(3챔버와 3차노즐)는 보행속도에 따라 발뒤축 접지시 의지의 급격한 신전을 방지함을 알 수 있다.
2. 실험과 수치해석결과 보행시간에 따라 유사한 축력을 나타내었다.
3. 보행에 따른 실린더내의 압력변화, 질량변화등을 구하여 실린더 제작 전 노즐형태 및 직경을 설계할 수 있게 되었다.

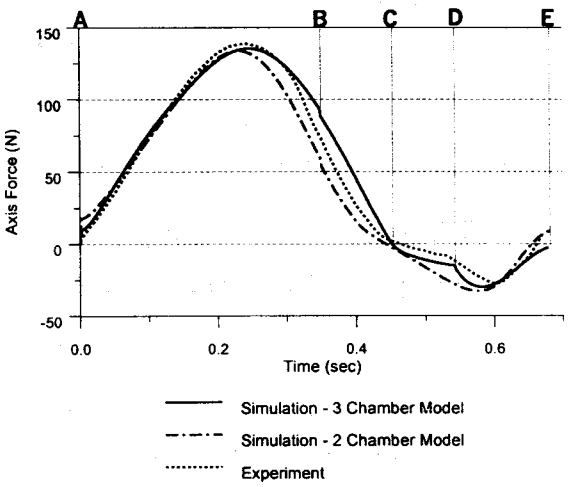

Fig. 2 Comparison of axial forces cylinder.

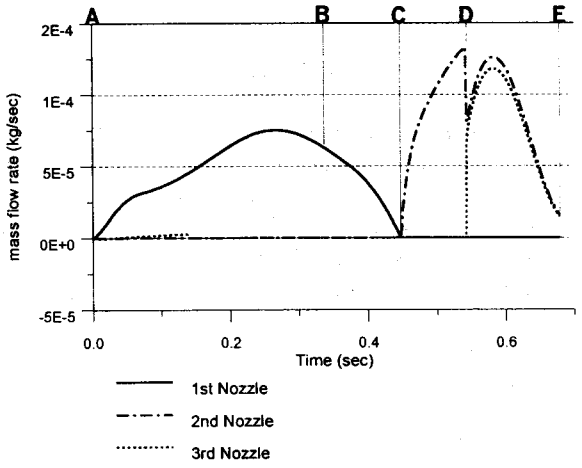

Fig. 3 Mass flow rate through each nozzle of 3 chamber model.

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 Artificail Knee in Level Walking, *J. Biomed. Eng.*, 1983, Vol.5, pp. 145-150

[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

[7] 조현석,류제청등, 공압식 대퇴의지의 유각기 동역학 시뮬레이션, 의용생체공학회 춘계논문집 19, 2,1997