

관절경 수술을 위한 관주(灌注)시스템 (Irrigation Pumping System) 제어기의 개발

김민수*(경희대 대학원 기계공학과), 이순걸(경희대 기계공학과)

Design of Irrigation Pumping System Controller for Operational Instrument of Articulation

M. S. Kim* (Mechanical Eng. Dept. KHU), S. G. Lee(College of Advanced Tech., KHU)

ABSTRACT

With the development of medical field, many kinds of operations have been performed on human articulation. Arthroscopic surgery, which has Irrigation Pumping System for security of operator vision and washing spaces of operation, has been used for more merits than others. In this paper, it is presented that the research on a reliable control algorithm of the pumping system instrument for arthroscopic surgery. Before clinical operation, the flexible artificial articulation model is used for realizing the model the most same as human's and the algorithm has been exploited for it. This system is considered of the following; limited sensing point, dynamic effect by compliance, time delay by fluid flow and so on. The system is composed with a pressure controller, a regulator for keeping air pressure, an airtight tank that can have distilled water packs, artificial articulation and a measuring system, and has controlled by the feedback of pressure sensor on the artificial articulation. Also the system has applied to Smith Predictor for time delay and the parameter estimation method for the most suitable system with both the experiment data and modeling. In this paper, the pressure error that is between an air pressure tank and an artificial articulation was measured so that the system could be presumed and then the controller had developed for performing State-Feedback. Finally, the controller with a real microprocessor has realized. The confidence of system can be proved by applying this control algorithm to an artificial articulation experiment material.

Key Words : Arthroscopic surgery (관절경 수술), Irrigation Pumping System(관주시스템), Time delay(시간지연), Smith predictor(Smith 예측기)

1. 서론

관절경 수술(Arthroscopic surgery)은 1918년 일본의 Takagi 에 의해 최초로 도입된 이래 슬관절(Knee joint) 질병의 진단과 치료에 획기적인 발전을 가져왔다.⁽¹⁾ 이 수술 방법은 환부 전체를 절개하지 않고 1cm 미만의 작은 절개 부위를 통하여 수술장비와 내시경 등을 넣어 관절 속의 손상된 부위를 모니터를 통해 진단과 치료를 동시에 시행하는 방법이다. 현재 기존의 완전 절개술보다 많은 이점을 가지고 있는 관절경 수술이 널리 시행되고 있다.⁽²⁾ 이 경우 시술자의 시야 확보와 일정한 수술 공간 및 부위 세척을 위한 관주시스템(IPS : Irrigation Pumping System)이 필수적으로 요구된다.

기존의 IPS 는 식염수 공급원의 높이 차에 따른

압력을 이용하는 방식이었다. 이 방법의 문제점으로는 시술하는 부위에 따른 압력 조절이 어렵고, 식염수 오염의 우려가 있으며 장비 운용에 따른 추가적 인력이 필요하며 사용자를 위한 편의장치의 부족 등을 들수 있다. 최근 도입되기 시작한 장비의 경우 연동펌프를 이용하여 실리콘 튜브를 압착해 짜내는 방식으로 유량을 공급하고 있다.

본 연구에서는 기존의 연동펌프와 차별되는 새로운 메커니즘을 갖는 시스템의 신뢰성 있는 압력 제어기를 구현하였다. 구동부에서 식염수팩으로 압력을 전달하는 과정에서 맥동현상(Fluctuation)이 과도하게 발생하였고, 이를 감소시키기 위해 압축성 유체인 공기를 이용하여 압력을 전달하는 모델을 제안하였다. 임상실험에 앞서 인체와 유사한 관절 모델을 구현하기 위해 유연성(Compliance)이 적용된

모의관절을 사용하였다. 모의관절에 설치된 압력센서로부터 신호를 피드백 받아 IPS의 구동부를 제어하는 과정에서 시간지연이 발생하였고 이를 보상하기 위해 Smith 예측기를 적용하였다.⁽³⁻⁴⁾

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

IPS 시스템은 공압공급부, 공압용기, 모의관절 체임버, 압력센싱부, 제어부로 구성되어 있다.

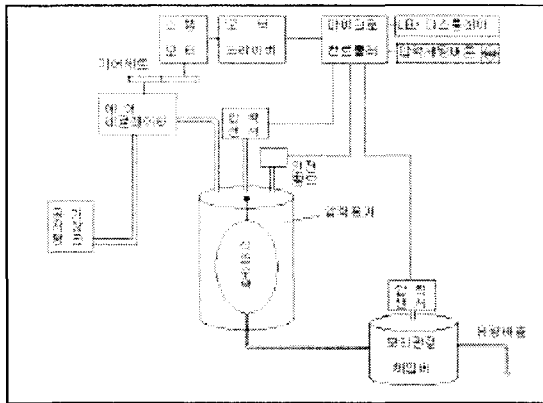
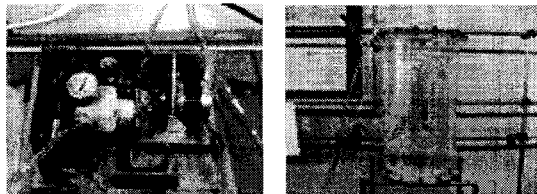
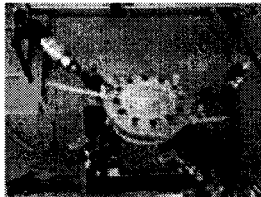


Fig. 1 Schematic of the system



(a) Actuator

(b) Air chamber



(c) Artificial articulation

Fig. 2 Picture of the IPS

공압공급부에서 압력용기로 공압을 가하여 식염수액 내의 식염수를 모의관절 체임버로 일정 유량을 흘려 보내게 된다. 모의관절 체임버 내의 압력을 일정하게 유지시키기 위해 압력값을 센서를 통해 받아들이고 이를 다시 제어부로 전달하여 구동부를 제어하는 구조로 이루어져 있다.

2.2 모델링

시스템의 개략도는 다음과 같다.

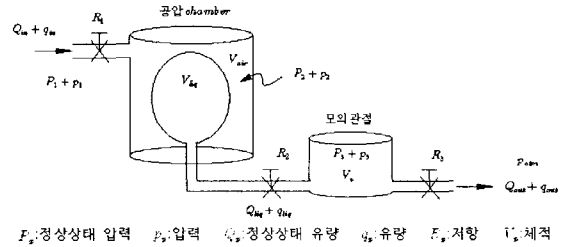


Fig. 3 Schematic of the system modeling

공압용기로 유입되는 공기유량은 압축되는 공기량과의 관계를 가지므로 다음과 같이 가정한다.

$$q_m \Delta t = (V_{air} + \Delta V_{air})(\rho_{air} + \Delta \rho_{air}) - V_{air} \rho_{air}$$

$$\cong V_{air} \Delta \rho_{air} + \Delta V_{air} \rho_{air}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} q_m \Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} V_{air} \Delta \rho_{air} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta V_{air} \rho_{air}$$

$$\therefore q_m = V_{air} \frac{d\rho_{air}}{dt} + \rho_{air} \frac{dV_{air}}{dt} \quad (1)$$

등온변화라 가정하면

$$p v = \text{constant}$$

$$\frac{p}{\rho} = \text{constant} \rightarrow \frac{p}{\rho} = K \rightarrow p = K \rho \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 다음과 같은 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\therefore q_m = V_{air} K \frac{dp_2}{dt} + \frac{K}{R_2} p_2^2$$

모의관절 내의 압력에 의해 다이어프램이 팽창하고 따라서 부피변화는 압력변화의 함수이다. 선형화 구간에서 체적의 변화는 압력변화에 비례한다고 가정하면,

$$\Delta V_c \propto \Delta p_3 \quad V_c \approx f(p_3)$$

$$C \frac{dp_3}{dt} = q_{in} - q_{out}$$

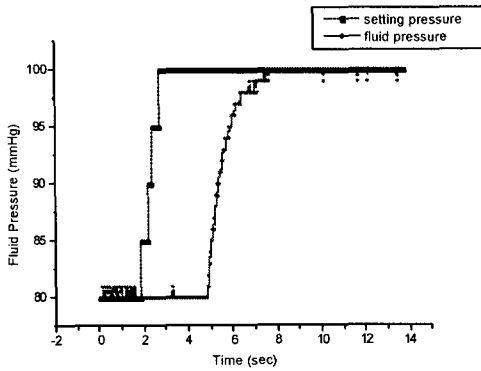
여기서, C 는 압력과 유량간의 상관계수이다.

3. 실험 및 고찰

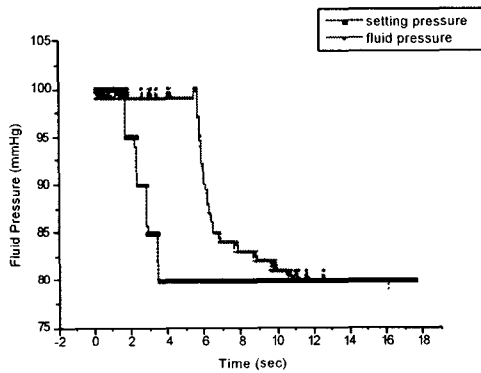
3.1 실험결과

설정압력을 기준으로 20mmHg 승압 및 감압

시켰을 때의 출력 양상은 다음과 같다.



(a) Pressure 20mmHg increase



(b) Pressure 20mmHg decrease

Fig. 4 Pressure increase and decrease

결과값으로부터 압축성 유체인 공기로 인해 감압 및 승압시 시간지연이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 의도한 바와같이 식염수액의 맥동현상(Fluctuation)은 거의 존재하지 않았으나 시간지연이 새로운 문제점으로 제시되었다. 실제 관절경 수술 시 안정된 압력과 돌발적인 상황에서의 빠른 반응성이 요구되므로 시간지연 문제를 해결할 수 있는 보상기가 요구된다.

3.2 Smith 예측기

시스템과 제어기 사이의 시간지연에 대한 오차를 줄이기 위한 방법으로 Smith 예측기를 적용하였다. 시간지연을 갖는 시스템의 전달함수는 시간지연을 제외한 전달함수 $G(s)$ 와 시간지연 전달함수 e^{-sL} 의 곱으로 나타낼 수 있다. 그림 5는 Smith 예측기의 블록선도이다.

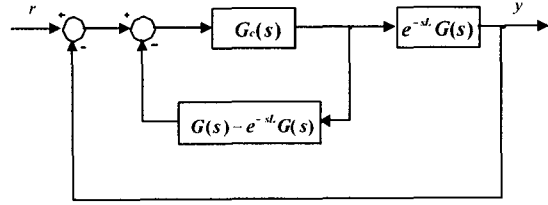


Fig. 5 Smith Predictor control system

시스템의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c G(s) e^{-sL}}{1 + G_c(s) G(s)}$$

3.3 Pade Approximation

시간지연 L 을 갖는 시스템을 해석하기 위해서는 펌프 시스템에서 e^{-sL} 을 포함하는 다항식의 수학적 해석이 용이해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Pade Approximation을 이용한 유리화에 의해 전체적인 시스템의 응답 특성을 해석한다.⁽⁵⁾

Pade approximation은 일반적으로 $P(p, q)$ 로 표기된다. 여기서 p 는 유리함수의 분자 다항식의 차수를 나타내고 q 는 분모 다항식의 차수를 나타낸다. $P(1, 1)$ 에 대한 e^{-s} 의 근사화는

$$e^{-s} - \frac{b_0 s + b_1}{a_0 + 1} = \epsilon$$

이 되고 식에 Mclaren Series를 적용하면,

$$e^{-s} = 1 - s + \frac{s^2}{2} - \frac{s^3}{3!} + \frac{s^4}{4!} + \dots$$

$$\frac{b_0 s + b_1}{a_0 + 1} = b_1 + (b_0 - a_0 b_1)s - a_0(b_0 - a_0 b_1)s^2 + a_0^2(b_0 - a_0 b_1)s^3 + \dots$$

과 같다. 따라서 $P(1, 1)$ 에 대한 e^{-s} 의 유리함수 근사화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e^{-sL} \cong \frac{1 - sL/2}{1 + sL/2}$$

3.4 시뮬레이션

모델링에 의해 구동부를 1차 시스템, 공압용기와 모의관절 체임버를 2차 시스템으로 구성하였다. 여기서 PID 제어기의 이득값들은 시간지연을 포함하고 있지 않은 경우에 대해 결정된 값들이다. 제어입력은 공압공급부의 공압레귤레이터에 장착된 스테핑모터의 스택각이다.

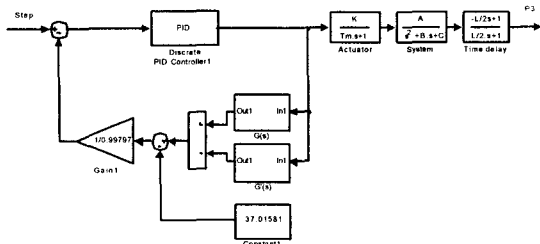


Fig. 6 Block diagram of system

시스템이 갖는 제어 변수들을 고려하여 제어입력 θ 에 대한 출력 p_3 를 블록선도로 나타내면 그림 6 과 같다. 실험결과로부터 시간지연 $L=3$ 에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

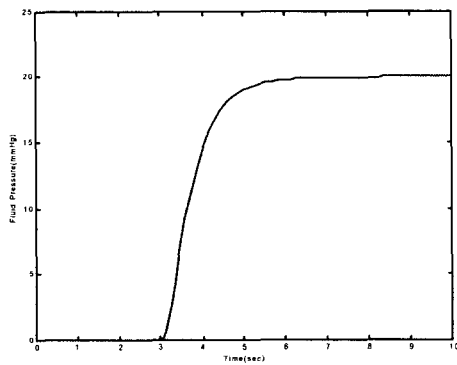
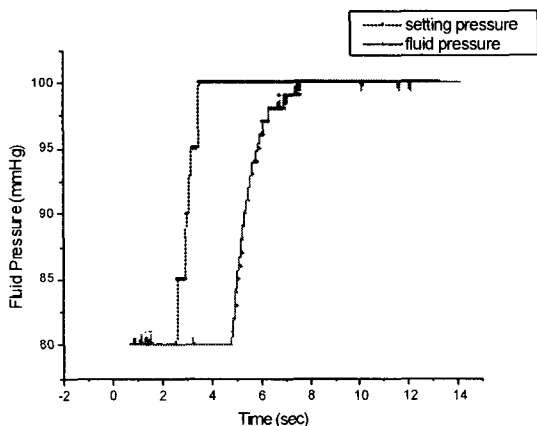


Fig. 7 Simulation result of time delay $L=3$

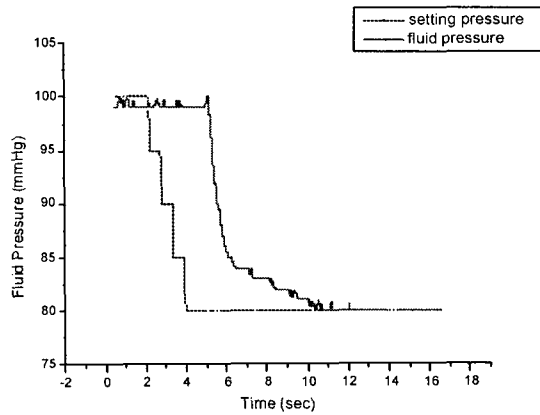
결과값으로부터 모델링이 실제 시스템과 유사하게 구현되었음을 확인할 수 있었다.

3.5 Smith 예측기 적용

제안된 Smith 예측기를 적용한 결과값을 그림 8 에 나타내었다. 보상기 적용으로 인해 시간지연이 감소 되었음을 알 수 있다.



(a) Pressure 20mmHg increase



(b) Pressure 20mmHg decrease

Fig. 8 Application of Smith predictor

4. 결론

본 연구는 새로운 메커니즘을 갖는 관주시스템 (IPS) 개발을 목표로 진행 되었다. 제안된 공압방식에 의해 식염수팩의 맥동현상(Fluctuation)은 현저하게 줄었으나 시간지연이 시스템의 큰 문제로 부각 되었다. 문제 해결을 위해 Smith 예측기를 적용한 결과 시간지연이 감소되는 효과를 볼 수 있었다. 그러나 만족할 만한 정도의 결과를 도출 할 수 없었다고 판단된다. 시간지연을 보상할 수 있는 보다 개선된 알고리즘이 향후 과제로 남아있다.

참고문헌

1. 황병연, 심용석, 노철규 “슬관절관절경을 이용한 반월상연골 절제술에 대한 임상적 연구(A Clinical Study on Arthroscopic Meniscectomy of the e Knee Joint). 진복의대논문집, 8 : 48
2. Sung-Jae Kim, Sang-Jin Shin. Technical evolution of arthroscopic knee surgery. Yonsei Medical Journal 40 1999
3. Mallek-Zavarei and M. Jamshidi “Time-delay system analysis optimization and applications”, North Holland Systems and Control Series, Vol.9, pp. 409-419, 1987
4. Z. Q. Wang and E. Shimemura, “Robust Control of Time Delay Systems using the Smith predictor”, International Journal of Control, Vol. 57, No.6, pp.1405-1420, 1993
5. S. Majhi and D.P Atherton, “Modified Smith predictor and controller for processes with time delay”, IEEE Cont. Theo. Appl., Vol.146, pp.359-365 1999