

# 공압형 인공근육으로 구동되는 상극구동의 다중 동시 사양 제어

## Multiple Simultaneous Specification Control of Antagonistic Actuation by Pneumatic Artificial Muscles

강 봉 수<sup>1</sup>

Bong-Soo Kang<sup>1</sup>

**Abstract** This paper presents a frequency-response test performed on an antagonistic actuation system consisting of two Mckibben pneumatic artificial muscles and a pneumatic circuit. A linear model, capable of estimating the dynamic characteristics of the antagonistic system in the operating range of pneumatic artificial muscles, was optimally calculated based on frequency-response results and applied to a multiple simultaneous specification control scheme. Trajectory tracking results showed that the presented multiple simultaneous specification controller, built experimentally by three PD typed sample controllers, satisfied successfully all required control specifications; rising time, maximum overshoot, steady-state error.

**Keywords:** Frequency-Response Test, Antagonistic Actuation, Pneumatic Artificial Muscle, Multiple Simultaneous Specification Control, Trajectory Tracking

### 1. 서론

인간과 같이 유연하고 다양한 움직임을 만들기 위해 지능로봇과 관련된 하드웨어 및 소프트웨어 기술이 발전하고 있다. 인간과 생활공간을 공유하며 인간의 활동을 도와주는 지능로봇이 갖추어야 할 중요한 요소의 하나는 과도한 움직임이나 예기치 못한 작동으로 인간과의 충돌 위험성을 최소화하는 안정한 인간-로봇 상호작용 기술을 들 수 있다. 대부분 지능로봇의 구동부로 사용되는 전기모터는 질량 대비 출력이 낮아 높은 기어비를 사용함으로써 외부 환경과의 접촉 및 힘제어에 어려움을 가지고 있다. 이에 대한 대안으로 인간근육과 작동원리와 기능이 유사한 공압형 인공근육(Pneumatic Artificial Muscle, 이하 PAM)에 대한 연구가 이루어지고 있다<sup>1)</sup>. PAM은 1960년대 처음으로 Mckibben에 의해 인공손을 구동하는 장치로 개발되었

으며<sup>2)</sup> 1980년대 화가로봇<sup>3)</sup>과 같이 로봇의 기능이 단순한 집기-놓기 작업에서 외부환경과의 상호작용이 요구되는 다양한 응용작업으로 발전하면서 유용한 구동장치로 연구되고 있으며 생물학적 근육과의 유사성으로 인하여 의공학분야에서도 관심이 높아지고 있다<sup>4)</sup>. 로봇분야 그리고 의공학분야로의 응용성을 고려할 때 PAM은 다음과 같은 장점을 가지고 있다. (1) 전기모터에 비해 질량 대비 출력이 매우 높다. (2) 작동원리가 인간근육과 유사하다. 즉 근육수축 시 당기는 힘을 발생하고 수축물이 커질수록 힘이 작아진다. (3) 공기의 압력을 조절하거나 수축범위를 조절함으로써 근육의 강성을 가변할 수 있다. (4) 외부의 급격한 충격을 흡수할 수 있다.

PAM의 동적특성을 파악하기 위한 모델링연구에 있어서 초기에는 단순한 형상변화만을 고려하여 인공근육에 가해지는 공압과 근육이 당기는 장력과의 관계를 유도하였으나<sup>2),5)</sup> 보다 정확한 운동을 예측하기 위해, 근육의 재료특성<sup>6)</sup>, 재질사이의 마찰<sup>7)</sup>, 공기의 유체특성<sup>8),9)</sup> 등을 포함하고 있다. 인공근육 동특성 예측이 어려움으로 인하여

Received : Aug.18.2010; Reviewed : Nov.02.2010; Accepted: Dec.02.2010

※ 본 연구는 2010년도 한남대학교 교비학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

<sup>1</sup> 한남대학교 기계공학과 교수

인공근육으로 이루어진 관절의 제어기법은 모델링오차로 인한 영향을 줄이는데 효과적인 가변구조제어기<sup>[7],[9]</sup>, 신경망제어기<sup>[10]</sup> 등이 사용되었으나 탄성재질 및 공기 압축성 등 모델 불확실성으로 인하여 좋은 제어성능을 내는데 어려움을 가지고 있다.

본 연구에서는 실험적 제어기 설계방법인 다중 동시 사양(Multiple Simultaneous Specification, 이하 MSS) 제어방법을 통해서 인공근육으로 이루어진 회전관절의 제어성능을 높이고자 한다. 특히 최적제어 기반의 기존 제어기법들은 최대과도응답, 정상상태오차 등 시스템에 요구되는 성능조건을 직접적으로 만족하도록 설계하기보다는 임의의 목적지수가 최적화되도록 설계된다. 반면 MSS 제어방법은 제어시스템에 요구하는 성능조건들을 직접적으로 만족하도록 실험적인 절차를 통하여 제어기가 설계된다<sup>[11],[12]</sup>. 그리고 순수하게 실험만으로 피드백 계인을 설계하는 Ziegler-Nichols PID 계인 설정 방법<sup>[13]</sup> 등과는 달리 플랜트의 모델이론식을 바탕으로 최소한의 실험적 절차를 거쳐 원하는 성능지수들이 모두 만족하는 제어기를 제시한다.

본 논문의 2장에서 먼저 공압형 인공근육으로 이루어진 상극 회전관절의 모델링과 주파수 응답실험에 대해서 서술한다. 3장에서는 MSS 제어법에 대해서 서술하고 4장에서 MSS 제어기를 상극 구동 회전관절에 적용하고 실험적 절차를 거쳐 제어기의 해를 구하는 과정을 서술한다. 그리고 제어성능에 대한 실험결과와 분석을 제시한다. 마지막으로 5장에서 결론을 제시한다.

## 2. 상극구동 회전관절의 모델링

### 2.1 공압형 인공근육의 특성

본 연구에서는 공압형 인공근육에서 가장 많이 사용되는 Mckibben 인공근육을 가지고 회전관절을 구성한다. Mckibben 인공근육은 그림 1과 같이 근육의 탄성막에 공기를 주입하면 탄성막의 부피가 증가하며 이때 탄성막을 감싸는 섬유는 늘어나지 않기 때문에 섬유망의 나선각을 증가하여 직경방향으로 늘어나 탄성막이 팽창하는 부피를 수용하고 길이방향으로 수축하여 인장력을 발생한다. 그림 2는 일정한 압력에서 매우 느린속도로 인공근육의 수축률을 변화시키면서 근육의 당기는 힘을 표시한 준정적(quasi-static) 실험결과이다. 압력은 1bar에서 6bar까지 바꾸어 가면서 실험한 결과로 동일한 수축률에서 압력이 높

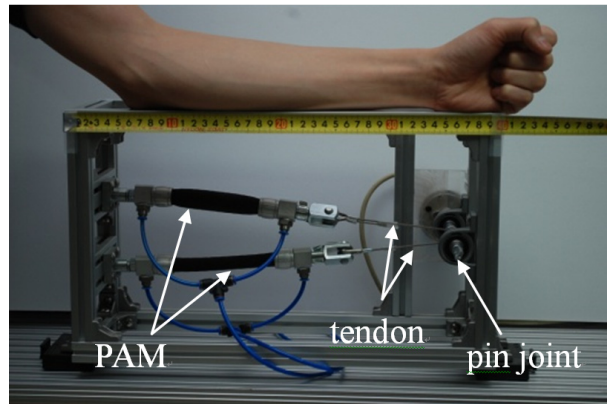


그림 1. 공압형 인공근육 사진 (DMSP10-100, FESTO) 상: 팽창 시, 하: 수축 시

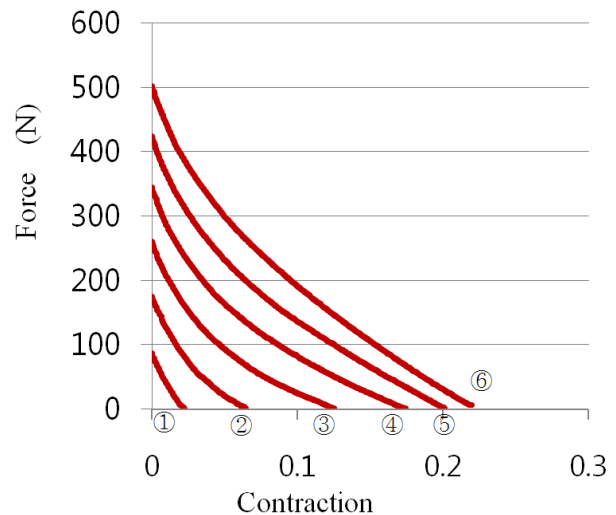


그림 2. 공압형 인공근육의 준정적 특성(자료, DMSP10-100, FESTO) (①:1bar, ②:2bar, ..., ⑥:6bar)

아질수록 당기는 힘이 커짐을 알 수 있다. 동일한 압력에서는 인간의 근육과 같이 수축률이 커질수록 당기는 힘이 점점 작아져서 최대수축률에 도달하면 당기는 힘은 0이 된다. 최대수축률은 압력이 작아질수록 작아지므로 낮은 압력에서는 인공근육을 사용할 수 있는 작동범위가 작아지게 된다.

### 2.2 상극구동 회전관절의 매개변수 추정

공압형 인공근육은 인간의 근육과 같이 수축할 경우에만 인장력을 발휘할 수 있으므로 양방향 회전운동을 만들기 위해서는 그림 3과 같이 두 개의 근육을 회전관절에 연결하고 한쪽이 수축하면 다른쪽은 이완이 되도록 하는 상

극 구동(antagonistic actuation)으로 회전관절을 제어해야 한다. 그림 3에서 반시계방향 구동을 만들기 위해서는 우측 근육이 더 수축해야 하므로 더 높은 공압을 가해주고 반대로 시계방향으로 구동하기 위해서는 좌측 공압을 높여야 한다. 회전조인트의 회전각과 회전반경을 각각  $\theta$ ,  $r$  이며, 관성모멘트와 점성마찰계수를 각각  $I$ ,  $b$  라고 한다면 상극 구동 모델에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$I\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = (F_1 - F_2)r \quad (1)$$

상극구동의 운동은 두 근육의 당기는 힘,  $F_i$  에 의해서 결정되므로 원하는 상극 회전운동을 만들기 위해서는 각 근육에 가해지는 압력 - 그림 3에서  $P_i$  - 을 제어해야 한다. 상극 구동의 초기상태에 두 근육에 동일한 평형압력,  $P_e$ 을 가했을 시 각 근육의 평형 수축률을  $\epsilon_e$ 라고 하자. 평형압력에서 편이된 압력,  $\Delta P$  만큼 압력을 변화시키면 ;

$$P_1 = (P_e - \Delta P), P_2 = (P_e + \Delta P) \quad (2)$$

회전 관절의 회전운동은 하나의 입력변수,  $\Delta P$  를 가지고 제어가 가능하다.

관련연구를 살펴보면 인공근육에 가해지는 공기의 압력을 제어하는 방식은 서보밸브 혹은 스펴밸브(pool)를 사용하는 방식<sup>[9],[10]</sup>, 그리고 압력제어밸브를 사용하는 방식<sup>[7]</sup> 두가지로 크게 나누어 진다. 스펴(pool)밸브를 사용하여 공기의 유량을 제어하는 방식은 응답시간은 짧지만 추가적인 압력조절루프가 필요한 단점이 있다. 압력제어밸브를 사용하는 방법은 응답특성이 다소 느리지만 가해진 전압에 비례하여 압력조절이 가능하다.

본 연구에서는 인간의 팔근육과 유사한 형태와 크기를 가지는 상극구동장치를 구현하기 위하여 그림 1과 같이 100mm의 길이를 가지는 PAM을 선정하고 힘줄에 해당하는 텐돈(tendon)의 길이를 포함한 구동부의 길이가 290mm가 되도록 설계하였으며 제어의 용이성을 위해 압력제어밸브를 사용하여 제어시스템을 구현하였다.

그리고 인공근육 재질의 특성, 인공근육 탄성막을 팽창시키는 공기의 운동특성, 회전관절의 운동 특성을 모두 포함한 시스템의 동적특성을 파악하기 위해서 먼저 시스템의 입력으로 압력변위(단위: bar), 혹은 압력제어밸브에 가

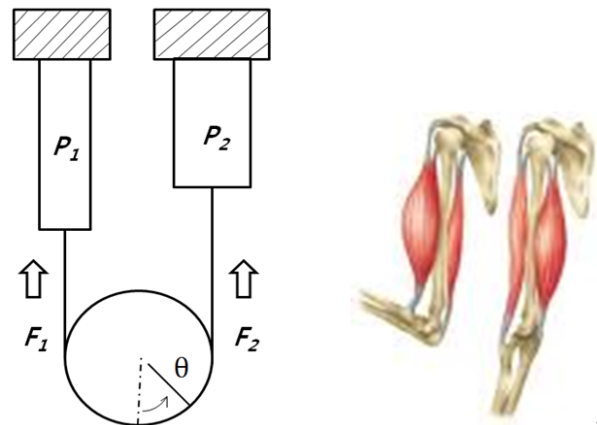


그림 3. 상극운동 (좌: 인공근육, 우: 인간의 상박근육)

해지는 전압변위(단위: voltage), 로 선정하고 출력으로 상극구동의 회전변위 (단위:radian) 를 선정한 후 인공근육의 작동범위에 해당하는 주파수인 0.1 Hz부터 5Hz까지 주파수 응답실험을 수행하였다. 표 1은 시스템의 설계치수이며 그림 4는 상극구동시스템의 입력과 출력의 크기와 위상차를 보여주는 실험결과이다. 입출력 특성은 작동 주파수범위에서 2차 선형시스템으로 근사할 수 있으며 최적의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

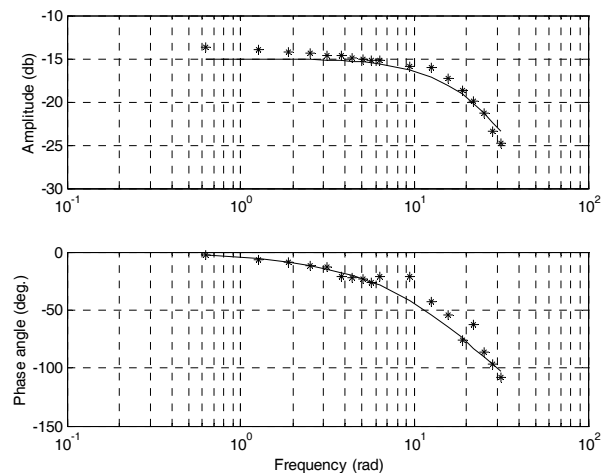


그림 4. 상극구동 주파수 응답특성 실선: 모델결과, “\*”: 실험결과

표 1. 상극구동시스템 설계치수

근육 길이	0.1 m	회전반경	0.007 m
평형수축률	0.04	밸브 이득	0.59 bar/V
평형압력	3bar	엔코더	2000 ct/rev

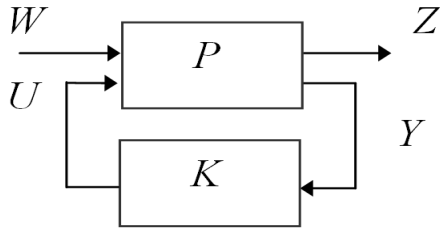


그림 5. 선형시스템 블록선도

$$\frac{\theta(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{0.009s^2 + 0.46s + 5.6} \quad (3)$$

### 3. 다중 동시 사양 제어

#### 3.1 제어시스템 정의

일반적인 선형 시불변(linear time-invariant) 시스템은 그림 4와 같이 표현된다. 플랜트,  $P$ 의 제어입력은  $U$ 이며 외부입력은  $W$ 이다.  $Y$ 는 측정되어 피드백되는 신호이며  $Z$ 는 제어 혹은 조정할 신호이다. 시스템의 전달함수는 복소 공간에서 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$\begin{bmatrix} Z(s) \\ Y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ZW}(s) & P_{ZU}(s) \\ P_{YW}(s) & P_{YU}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W(s) \\ U(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$U(s) = K(s)Y(s)$$

여기서  $K(s)$ 는 제어기의 전달함수이다. 외부입력,  $W$ 에서 제어 대상 신호,  $Z$ 까지의 전달함수  $H(s)$ 는 식 (4)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$H(s) = P_{ZW}(s) + P_{ZU}(s)R(s)P_{YW}(s), \quad (5)$$

$$\text{여기서: } R(s) = K(s)(1 - P_{YU}(s)K(s))^{-1} \quad (6)$$

시스템에  $n$ 개의 제어성능 요구조건이 주어졌을 때, 조건식을 전달함수에 대한 부등식의 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_1(H) &\leq \alpha_1 \\ \Phi_2(H) &\leq \alpha_2 \\ &\vdots \\ \Phi_n(H) &\leq \alpha_n, \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 은 시스템에 요구되는 성능조건의 상한값이다. 따라서 제어문제는 식(4)로 정의된 시스템에서 식(7)을 만족하도록 식(4)에서 정의된 제어기,  $K$ 를 설계하는 것이다. 식(7)로 정의된 성능 조건이 부록A에서 서술한 convex 성질을 만족하면 MSS 제어기를 구성할 수 있다. 최대 과도 응답, 상승 시간, 정상 상태 오차 등 대부분의 제어성능 조건은 convex 성질을 만족한다.

#### 3.2 샘플제어기

식(5)로 표현되는  $n$ 개의 조건 중에서 최소한 하나 이상의 조건을 만족하는 제어기를  $n$ 개 선택하고 이를  $K_1, K_2, \dots, K_n$ 로 명명한다. 제어기의 형태는 자유롭게 선택할 수 있으며 각 샘플 제어기를 시스템에 적용하여 실험을 수행하고 그 결과를 수집한다.  $i$ 번째 샘플 제어기,  $K_i$ 를 가지고  $j$ 번째 성능조건,  $\phi_j$ 에 대한 결과를  $\phi_{ij}$ 라 하자.

모든 샘플 제어기에 대해서 성능실험을 수행하면 다음과 같은 행렬부등식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \dots & \phi_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{n1} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)을 만족하는 정규화된(normalized) 가중치 상수,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 를 찾을 수 없는 경우 시스템의 주어진 요구조건,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 을 모두 만족하는 제어기,  $K(s)$ ,를 구할 수 없다. 따라서 제어 성능 조건을 완화시켜야만, 즉 식 (7)의 상한값을 더 크게 선정해야, 모든 성능 조건을 만족할 수 있는 제어기를 구성할 수 있다. 식 (8)을 만족하는 가중치 상수를 찾을 수 있다면 식 (7)의 조건을 만족하는 제어 시스템은 가중치 상수와 샘플제어 시스템의 조합으로 다음과 같이 구성된다<sup>[11]</sup>.

$$H^*(s) = \lambda_1 H_1(s) + \lambda_2 H_2(s) + \dots + \lambda_n H_n(s) \quad (9)$$

$$R^*(s) = \lambda_1 R_1(s) + \lambda_2 R_2(s) + \dots + \lambda_n R_n(s) \quad (10)$$

MSS 제어기를 포함한 전달함수  $H^*(s)$ 가 모든 성능 조건을 만족함을 부록B에 증명하였으며 식 (6)과 식 (10)으로부터 MSS 제어기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K^* = (I + R^*(s)P_{YU})^{-1}R^*(s) \quad (11)$$

#### 4. 제어실험

##### 4.1 제어기 구성

MSS 제어기법을 인공근육의 상극구동시스템에 적용하기 위해서 시스템의 신호를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} Z(s) &= [\theta] & Y(s) &= [\theta_d - \theta] \\ W(s) &= [\theta_d] & U(s) &= [V] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $\theta_d$ 는 회전관절의 기준 입력(reference input)이며  $V$ 는 압력제어밸브에 가해지는 입력 전압이다. 식(3)의 전달함수에서 압력제어밸브의 게인,  $\Delta P/V$  를 곱하면 압력제어밸브의 전압입력,  $V$ 에 대한 회전각으로의 전달함수,  $P$ 를 구할 수 있다.

$$P(s) = \frac{\theta(s)}{\Delta P(s)} \frac{\Delta P(s)}{V(s)} \quad (13)$$

시스템의 전달함수와 신호입력을 식(4) ~ 식(6)에 적용하면 다음과 같다.

$$H(s) = \left[ \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)} \right] \quad (14)$$

$$R(s) = \frac{K(s)}{1 + P(s)K(s)} \quad (15)$$

MSS를 구성하는데 필요한 샘플제어기로 일반적인 PD(Proportional-Derivative) 피드백 제어기를 선택하였다.

$$K(s) = K_p + K_d s \quad (16)$$

여기서  $K_p$  와  $K_d$ 는 각각 피드백 제어기의 비례 이득, 미분 이득으로 이득값을 바꾸어 가면서 다양한 샘플제어기를 구하였다. 제어시스템에 요구되는 기준함수로는 0°에서 10°사이를 2초의 주기로 변하는 사각함수를 선정하였으며 제어성능조건으로 상승시간, 최대과도응답, 정상상태오차에 대해서 다음과 같이 선정하였다.

상승시간:  $\Phi_1(H^*) \leq 10$  (ms)

정상상태오차:  $\Phi_2(H^*) \leq 1$  (degree) (17)

최대과도응답:  $\Phi_3(H^*) \leq 15$  (%)

각 샘플제어기의 이득값은 표 2에 실제 실험을 통해서 나온 성능지수는 표 3과 같다. 먼저 샘플제어기1의 경우 최대과도응답은 13.7%로 성능조건을 만족하였으나 상승시간, 정상상태오차가 각각 11ms, 1.13° 로서 요구조건을 만족하지 못하였다. 샘플제어기2는 샘플제어기1에 비해 큰 비례이득을 통해서 상승시간과 정상상태오차는 10ms, 0.95° 로서 조건을 만족하였으나 최대과도응답이 16.4%로 만족하지 못하였다. 샘플제어기3의 경우에는 비례이득을 더 크게 잡은 것으로 정상상태오차는 더욱 줄어 0.82° 값을 가졌지만 최대과도응답은 20.6%로 커졌다. 이렇게 하나 혹은 두 개의 조건만 만족하는 샘플제어기 3개가 구해지면 더 이상 시행착오를 거치지 않고 식(8)에 적용하여 해의 존재 유무와 해를 구할 수 있다. 표 2의 이득값과 표 3의 성능지수값을 대입하여 가중치 상수를 구하면 다음과 같다.

$$\lambda_1 = 0.33, \lambda_2 = 0.33, \lambda_3 = 0.33$$

그리고 구한 가중치 상수를 식(10)과 식(11)에 적용하여 계산한 MSS의 전달함수는 다음과 같다.

$$K^* = \frac{3.1 \times 10^{-3} s^4 + 3.4 \times 10^{-1} s^3 + 3.5 \times 10^1 s^2 + 1.4 \times 10^3 s + 5.4 \times 10^4}{8.1 \times 10^{-5} s^4 + 8.9 \times 10^{-3} s^3 + 9.7 \times 10^{-1} s^2 + 4.0 \times 10^1 s + 1.6 \times 10^3} \quad (18)$$

표 2. 샘플제어기 이득

	비례이득	미분이득
샘플제어기1	30	0.05
샘플제어기2	35	0.03
샘플제어기3	40	0.03

표 3. 제어기의 성능지수

	상승시간 (ms)	최대과도응답 (%)	정상상태오차 (degree)
조건	10	15	1°
샘플1	11	13.7	1.13 °
샘플2	10	16.4	0.95 °
샘플3	10	20.6	0.82 °
MSS	10	13.0	0.86 °

### 4.2 시스템 하드웨어

인공근육으로 구동되는 상극구동 시스템은 그림 6과 그림 7과 같이 제어기, 공압장치, 센서, PAM 등으로 구성된다. 회전각은 엔코더(encoder)로 측정되며 제어기의 전압출력이 압력제어밸브(VPPE-3, FESTO)로 가해진다. 압력제어밸브의 전압입력과 출구압력과의 이득,  $\Delta P/V$ 은 미리 보정(calibration)실험을 통해서 계산되었다. 식(18)로 표현되는 제어기는 10ms의 샘플링을 가진 zero-order hold 가정 하에 이산변환 후 CompactRIO(National Instruments)를 이용하여 구현하였다. CompactRIO시스템은 외부기기와 고속 인터페이스를 담당하는 FPGA(Field Programmable Gate Array)와 Real-time OS를 가진 제어기로 구성되며 각각은 독립적으로 LabVIEW™ 로 프로그램할 수 있다. FPGA는 엔코더 신호의 입력작업과 제어입력의 전압출력을 수행하며 RT제어기는 샘플링주기에 맞추어 주어진 제

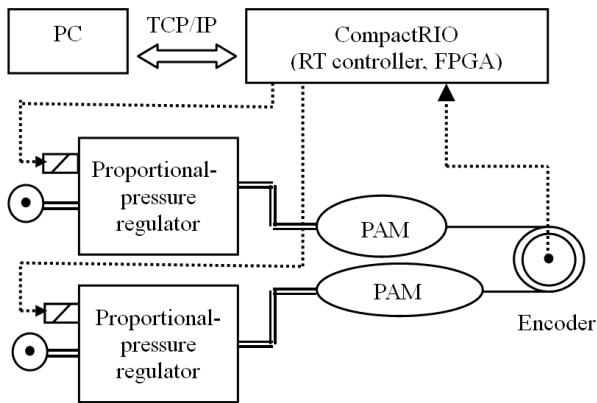


그림 6. 상극구동 실험장치의 블록다이어그램(solid: tendon, double solid: pneumatic, dashed: electrical)

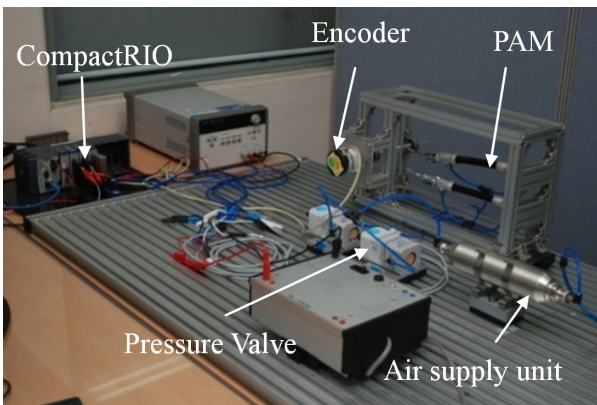


그림 7. 인공근육을 이용한 상극구동 시스템 실험장치

어입력 계산을 수행한다.

### 4.3 실험결과 및 고찰

그림 8은 사각파 기준입력에 대한 각 샘플제어기의 추종 성능을 나타낸다. 상대적으로 비레이득은 작고 미분이득은 큰 샘플제어기1이 최대과도응답은 작지만 상승이 느리고 정상상태오차가 가장 큼을 알 수 있다. 샘플제어기3은 비레이득이 크므로 최대과도응답이 가장 크고 정상상태오차는 가장 작다. 샘플제어기2은 중간의 성능을 보이고 있으며 어느 제어기도 표 2와 같이 모든 조건을 만족하지는 못한다.

그림 9는 MSS제어기를 포함해서 추종오차의 과도응답

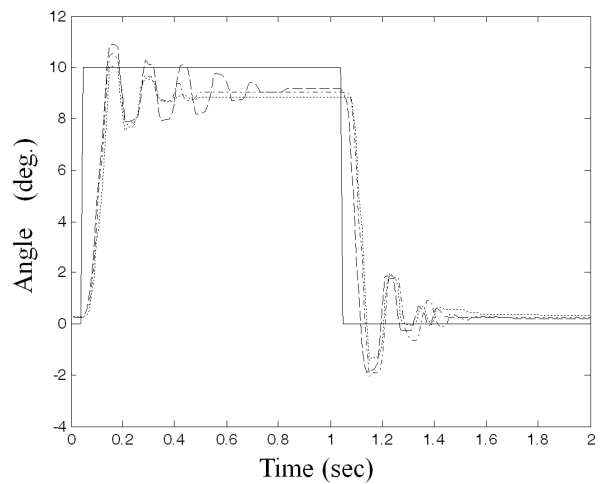


그림 8. 샘플제어기의 궤적추종 (샘플1: dotted, 샘플2: dashdot, 샘플3: dashed, 기준입력: solid)

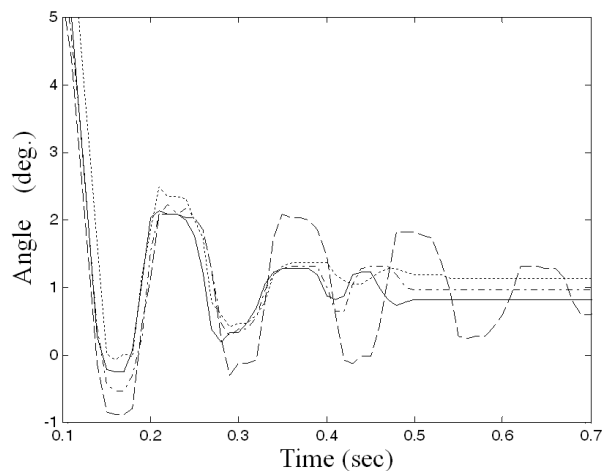


그림 9. 샘플제어기의 추종오차 (샘플1: dotted, 샘플2: dashdot, 샘플3: dashed, MSS: solid)

부분만을 보여주고 있다. MSS제어기가 최대과도응답에서는 샘플제어기1보다는 크지만 다른 두 샘플제어기보다 작으며 조건 15%를 만족한다. 정상상태오차-샘플제어기3은 0.7초에서도 아직 정상상태로 진입하지 않았음-에서도 샘플제어기1, 2 보다 빠르게 0.86° 로 수렴하여 오차조건을 만족하고 있다. 상승시간에서는 샘플제어기1만 가장 느려 10ms의 조건을 만족하지 못하고 MSS를 포함한 나머지 두 샘플제어기 모두 조건을 만족하고 있다. 따라서 MSS는 마치 각 샘플제어기의 필요한 장점만을 취한 듯 모든 성능요구조건을 만족하고 있다. 그림 10은 MSS 제어기의 추종 성능과 압력제어밸브에 가해지는 전압입력을 나타낸다. 압력 제어밸브 입력전압 5V는 평형압력 3bar에 해당되며 최대 10V까지 입력할 수 있다. 평형위치에서 정방향 및 역방향 회전을 위해서 압력제어밸브에 가해지는 전압이 사각파에 맞추어 상승 및 하강을 하게 되며 파형의 전이점에서 제어값은 입력최대값에 도달하고 있다.

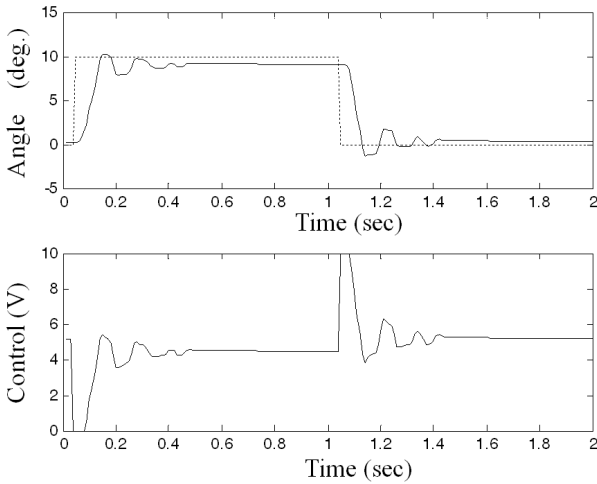


그림 10. MSS 제어기의 궤적추종 및 제어입력

### 5. 결론

공압형 인공근육으로 이루어진 상극구동 회전시스템은 인공근육의 재질특성 및 공압의 유체특성으로 인하여 모델링 및 정밀한 위치제어를 수행하기 어렵다. 본 연구에서는 먼저 두 개의 인공근육으로 이루어진 상극구동 시스템의 동적특성을 정확히 파악하기 위해 0.1Hz에서 5Hz사이의 작동범위에서 주파수 응답특성을 수행하였다. 그리고 동적특성을 최적으로 근사할 수 있는 2차 선형모델식을 구하고 이를 이용하여 상승시간, 최대과도응답, 정상상태오

차에 대한 3가지의 성능요구조건을 모두 만족할 수 있는 MSS 제어기를 설계하였다. 여러 번의 시행착오없이 PD 피드백 제어기 형태를 가진 3개의 샘플제어기 실험결과를 이용하여 MSS 제어기는 주어진 모든 제어성능조건을 만족함을 보였다.

### 부록 A

임의의 폐회로(closed loop) 전달함수  $H_1, H_2$ 와 임의의 상수  $\lambda \in [0,1]$ 에 대해서 다음의 식을 만족하면 해당 성능조건은 convex 성질을 만족한다.

$$\Phi(\lambda H_1 + (1-\lambda)H_2) \leq \lambda \Phi(H_1) + (1-\lambda)\Phi(H_2) \quad (A-1)$$

### 부록 B

식(7)을 만족하는 정규화된 가중치 상수를  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 라 하자. 식(8)과 같이 가중치 상수와 각 샘플 제어시스템의 조합으로 이루어진 새로운 제어시스템을  $H^*$ 라 한다면 각 성능조건에 대한 결과는 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$\Phi_i(H^*) = \Phi_i(\lambda_1 H_1 + \lambda_2 H_2 + \dots + \lambda_n H_n) \quad (B-1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

성능조건이 부록 A에서 정의된convex성질을 만족하면 식 (B-1)은 다음 부등식으로 바꿀 수 있다.

$$\Phi_i(H^*) \leq \lambda_1 \Phi_i(H_1) + \lambda_2 \Phi_i(H_2) + \dots + \lambda_n \Phi_i(H_n) \quad (B-2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

가중치 상수는 식 (8)의 헤이므로 식 (B-2)는 다음의 성질을 만족한다.

$$\Phi_i(H^*) \leq \alpha_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

따라서 가중치 상수와 샘플 제어시스템의 조합으로 이루어진 새로운 전달함수,  $H^*$ 는 식 (7)에서 주어진 모든 성능조건을 만족한다.

---

**참고문헌**


---

- [1] F. Daerden and D. Lefeber, "Pneumatic artificial muscles: Actuators for robotics and automation," European Journal of Mechanical and Environment Engineering, Vol.47, pp.11-21, 2002.
- [2] H. F. Schulte, "The characteristics of the Mckibben artificial muscle," The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics Appendix H, Publication 87, Washington DC: National Academy of Sciences, pp.94-115, 1961.
- [3] K. Inoue, "Rubbertuators and applications for robots," Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Robotics Research, Cambridge, USA, pp.57-63, 1988.
- [4] G. K. Klute, J. M. Czerniecki, and B. Hannaford, "Artificial muscles: actuators for biorobotic systems," Journal of Robotics Research, Vol.21, No.4, pp.295-309, 2002.
- [5] C.-P. Chou and B. Hannaford, "Static and dynamic characteristics of Mckibben pneumatic artificial muscles," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol.1, pp.281-286, 1994.
- [6] C. S. Kothera et al., "Experimental characterization and static modeling of Mckibben actuators," Proc. of IMECE 2006, Chicago, USA, pp.1-11, 2006.
- [7] B. Tondu and P. Lopez, "Modeling and control of Mckibben artificial muscle robot actuators," IEEE Control Systems Magazine, Vol.20, No.2, pp.15-38, 2000.
- [8] B.-S. Kang, C. S. Kothera, B. K. S. Woods, and N. M. Wereley, "Dynamic modeling of Mckibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, pp.182-187, 2009.
- [9] X. Shen, "Nonlinear model-based control of pneumatic artificial muscle servo systems," Control Engineering Practice, Vol.18, No.3, pp.311-317, 2010.
- [10] T. Hesselroth, K. Sarkar, P. P. van der Smaght and K. Schulten, "Neural network control of a pneumatic robot arm," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.24, No.1, pp.28-38, 1994.
- [11] Liu, H. T., and Mills, J. K., "Robot trajectory control system design for multiple simultaneous specifications: Theory and Experimentation," Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.120, pp.520-523, 1998.
- [12] 강봉수, 김수현, 곽윤근, "브러시리스 직류 모터로 구동되는 고속 작동기의 다중 동시 사양 제어," 대학기계학회논문집A권, 제28권, 제8호, pp.1093-1098, 2004.
- [13] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimal settings for automatic controllers," Trans. ASME, Vol.64, pp.759-768, 1942.
- [14] Glover, K. and Doyle, J. C., "State space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an  $H_\infty$  norm bound and relations to risk sensitivity," Systems and Control Letters, Vol.11, pp.167-172, 1988.

**강 봉 수**

1991 한국과학기술원 생산공  
학과(공학사)

1993 한국과학기술원 정밀공  
학과(공학석사)

1999 한국과학기술원 기계공  
학과(공학박사)

1999~2000 한국과학기술연구원 박사후 연구원

2000~2002 캐나다 토론토대학 박사후 연구원

2002~현재 한남대학교 기계공학과 교수

관심분야 : Robot mechanics and control, Smart actuator

E-mail : bskang@hnu.kr