

H_∞ 제어기법을 적용한 소형 SMA 그립퍼의 힘 추적 제어 Force Tracking Control of a Small-Sized SMA Gripper via H_∞ Synthesis

한 영 민(인하대 대학원)*, 최 승 복(인하대 기계과), 정 재 천(인하대 기계과)
Y. M. Han(Inha Univ. Graduate School)*, S. B. Choi(Inha Univ.), C. C. Cheong(Inha Univ.)

ABSTRACT

This paper presents a robust force tracking control of a small-sized SMA gripper with two fingers using shape memory alloy(SMA) actuators. The mathematical governing equation of the proposed system is derived by Hamilton's principle and Lagrangian equation and then, the control system model is integrated with the first-order actuator dynamics. Uncertain system parameters such as time constant of the actuators are also included in the control model. A robust two degree of freedom(TDF) controller using H_∞ control theory, which has inherent robustness to model uncertainties and external disturbances, is adopted to achieve end-point force tracking control of the two-finger gripper. Force tracking control performances for desired trajectories represented by sinusoidal and step functions are evaluated by undertaking both simulation and experimental works.

Key Words : SMA Actuator(형상기억합금 작동기), Two Degree of Freedom(TDF) Controller(2 자유도 제어기), H_∞ Control Theory(H_∞ 제어이론), Force Tracking control(힘 추적 제어), SMA Gripper(SMA 그립퍼)

1. 서 론

최근 로보틱스 분야에서는 차세대의 소형 이동 로봇을 가능하게 할 각종 장치와 로봇의 하부 시스템 개발이 연구의 초점이 되고 있다. 특히, 우주공간이나 원자로 내부와 같이 인간이 도달할 수 없는 위험하거나 좁은 공간에서의 원활한 작업수행을 위해 로봇 자체는 물론 그립퍼, 머니풀레이터 등 그 하부 시스템들의 소형화가 요구되고 있으며, 나아가 반도체 생산 공정, 생체공학, 의학분야에서 작은 시핀이나 생체조직과 같은 유연하고 부서지기 쉬운 작은 물체를 다루는 섬세한 작업에서는 다양한 외란과 불확실성에서도 대상물에 손상을 주지 않는 작업 수행을 위해 강건한 제어 개념이 요구된다.⁽¹⁾

먼저, 이러한 로봇 시스템의 소형화에 따른 가장 큰 장애물은 적절한 작동 매카니즘이 부재이다. 생물의 근육이 소형화가 쉽고 충분한 작동 범위를 가지면서도 큰 단위 중량 당 힘을 발휘할 수 있는데 보하여 기존의 일렉트로마그네틱, DC 서보모터 등의 전동기들은 구조가 복잡하고 소형화에 따른 현저한 고위의 감소가 심각한 문제로 대두되고 있어 실제 시스템에 적용하는데 많은 어려움이 있다.

하지만, 최근들어 감지와 작동 분야 등 여러 응용 분야에서 다양하게 응용되고 있는 지능 재료(smart materials)들의 출현으로 로보틱스 분야에서도

새로운 작동 매카니즘이 제시되고 있다. 현재 이러한 지능 재료로서 전기유동유체(electro-rheological fluids), 압전재료(piezoelectric materials), 형상기억합금(shape memory alloy), 광섬유(optical fiber) 등이 있다. 특히, 형상기억합금^{(2),(3)}과 압전재료는 구조물의 진동제어와 각종 머니풀레이터, 인공지 등에 적용되어 다양한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 단위 중량 당 큰 파워를 가지고 있을 뿐만 아니라, 소형화에 따른 반응속도의 향상 등 여러 가지 잇점을 가지고 있는 형상기억합금(SMA) 작동기를 제안하였으며, 충분한 작동범위를 가지도록 스프링 형태를 이용하였다. 그리고 이를 두개의 유연 팽거를 가지고 있는 실제 소형 그립퍼에 적용하였다.⁽⁴⁾

또한, 소형화로 인해 외란이나 불확실성에 더욱 민감한 시스템의 성능과 안정성을 보장하기 위해 대표적인 현대 강건제어 이론의 하나인 H_∞ 제어 기법^{(5),(6)}을 도입하였으며, 나아가 주파수영역 뿐만 아니라 시간영역 성능사양을 직접적으로 설계에 반영할 수 있는 TDF H_∞ 제어기법을 제안하고, 힘 추적 제어를 수행함으로서 소형 로봇과 그 하부 시스템의 작동기로서 형상기억합금 작동기의 이용 가능성과 TDF H_∞ 제어기법의 강건성과 성능을 입증하였다.

2. 동적 모델링

본 연구에서 고려된 SMA 스프링 작동기가 장착된 그립퍼 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 그림에서 보듯이 선단 질량을 가지는 2개의 유연 평거를 가지고 있고, 그 각각에 두개의 SMA 작동기를 평거의 고정단으로 부터 길이 L_1 의 위치에 대칭으로 설치하였으며, 스트레인 게이지를 평거에 부착하여 끝단의 접촉력을 측정하였다.

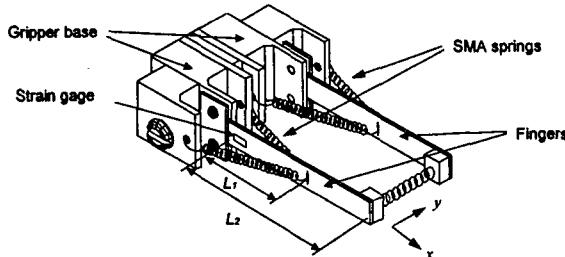


Fig. 1 The Small-sized SMA gripper with two finger

주어진 시스템에서 두개의 평거는 서로 대칭이므로 하나의 평거만을 고려하여 이를 외팔보로 가정하였다. SMA 작동기에 의한 제어력이 L_1 의 위치에 작용하고, 끝단에서 발생하는 대상물과의 접촉력을 k_2 의 스프링 상수를 가지는 스프링으로 모델링하여 시스템의 위치에너지와 운동에너지는 구한 후, 이를 Hamilton's principle에 적용하면 다음과 같은 지배 방정식과 4개의 경계 조건을 얻을 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \tilde{k}_1 y \delta(x - L_1) = 0 \quad (1)$$

$$y(x,t)|_{x=0} = 0$$

$$\left. \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$EI \left. \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=L_2} = -F_a(t) \delta(x - L_1) \quad (2)$$

$$EI \left. \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial x^3} \right|_{x=L_2} = -M \left. \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=L_2} + k_2 y|_{x=L_2}$$

여기서 ρ, A 는 평거의 밀도와 단면적을, E 와 I 는 탄성계수와 관성모멘트를, M 은 선단 질량을 나타낸다. 또한, $F_a(t)$ 는 형상기억합금 작동기의 유효제어력을 나타내고, $\tilde{k}_1 y$ 와 $k_2 y$ 는 반대쪽 SMA 스프링의 유효반력과 평거의 끝단에 작용하는 접촉력을 의미하다.

위에서 얻은 지배 방정식은 편미분 형태이므로 제어기의 설계를 위해 모드 해석을 통하여 이를 유한개의 모드로 구성하고 감쇠항을 첨가하여 다음과 같은 모달 좌표계로 변환하였다. 본 연구에서는 제2차 모드까지 고려하였다.

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i + (\tilde{k}_1 \phi_i^2(L_1) q_i + k_2 \phi_i^2(L_2) q_i) / I_i = F_a \phi_i(L_1) / I_i \quad (3)$$

여기서, I_i 는 $\int_0^{L_2} \rho A \phi_i^2(x) dx + M \phi_i^2(L_2)$ 로 정의되는 일반화된 질량이며, ζ_i 와 ω_i 는 각각 i 번째 굽힘진동 모드의 감쇠비와 고유진동수를 나타내며, q_i 와 ϕ_i 는 i 번째 일반화된 모달좌표와 모드 형상함수를 나타낸다.

한편, 형상기억합금 작동기의 발생력은 공급되는 전류에 따라 지수적으로 증가, 감소한다고 가정하여 입력 전류와 발생력 사이의 관계를 다음과 같은 1차 선형 모델로 표현할 수 있다.

$$\tau_h \frac{dF_a(t)}{dt} + F_a(t) = k_a i(t), \quad \tau_c \frac{dF_a(t)}{dt} + F_a(t) = k_a i(t) \quad (4)$$

여기서, $F_a(s)$ 는 작동기가 발생시킬 수 있는 힘을 나타내며, τ_h 와 τ_c 는 각각 가열시와 냉각시의 시상수를 나타낸다. 그리고 k_a 는 영향계수, $i(t)$ 는 입력전류이다. 형상기억합금 작동기는 실제 두개의 형상기억합금 스프링으로 구성되어 한쪽의 가열과 동시에 반대쪽이 냉각된다. 따라서, 가열과 냉각의 동특성이 서로 결합되어 작동기의 동특성을 결정한다. 그러므로, 입력 전류와 발생힘 사이의 관계를 다음과 같은 전달 함수 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{F_a(s)}{i(s)} = \frac{k_a}{s \tau + 1} \quad (5)$$

여기서, τ 는 가열과 냉각의 시상수를 모두 고려하여 적절한 값을 선택하였으며, 그 오차는 작동기가 가지고 있는 불확실성으로 가정하였다.

식 (3), (5)로 부터 전체 시스템의 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{F_c(s)}{i(s)} = \frac{k_a}{s \tau + 1} \cdot \frac{k_2 \phi_i(L_2) \cdot \phi_i(L_1) / I_i}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2 + \frac{\tilde{k}_1 \phi_i^2(L_1)}{I_i} + \frac{k_2 \phi_i^2(L_2)}{I_i}} \quad (6)$$

여기서, F_c 는 끝단의 접촉력이다.

3. 제어기 설계

H_∞ 제어기 설계기법은 다음 식과 같다. 페루우프 전달함수 $T(s)$ 의 H_∞ -norm을 최소화 시킬 수 있는 안정화 제어기 $K(s)$ 를 찾는 것이다.

$$\min_{K(S) \text{ stabilizing}} \|T(s)\|_\infty \leq \gamma \quad (7)$$

이러한 설계기법에는 혼합감도함수 문제, 루우프 형상기법 등이 있지만, 이들은 주파수 형상에 근거하여, 감도함수(sensitivity transfer function)나 개루우프 형상(loop gain)을 적절히 조정함으로써 필요한 성능 사양을 맞추는 간접적인 접근방법이다. 따라서 본 연구에서는 주파수영역에서 강건성을 고려하면서도 시간영역 성능사양을 직접적으로 설계에 반영할 수 있는 H_∞ 2 자유도 제어기법 즉, TDF H_∞ 모델 추종 기법을 적용하였으며, 다음 Fig. 2는 이러한 TDF H_∞ 제어기법의 구성도를 나타낸다.

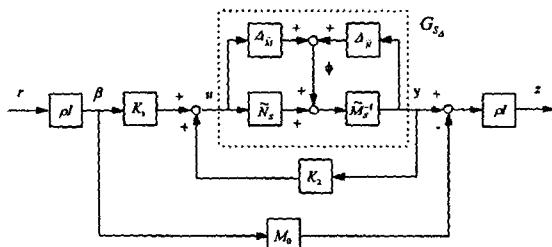


Fig. 2 The TDF H_∞ configuration

제어입력은 prefilter K_1 과 귀환제어기 K_2 의 결합으로 다음과 같이 결정된다.

$$u = K_1 \beta + K_2 y \quad (8)$$

Fig. 2에 나타난 것과 같이 TDF H_∞ 문제는 H_∞ 루우프 형상기법을 이용하여 강건성을 보장한다. H_∞ 루우프 형상기법은 시스템의 불확실성을 다음과 같은 coprime factor로 모델링한다.

$$G_d = (\tilde{M} - \Delta_M)^{-1} (\tilde{N} + \Delta_N) \quad (9)$$

이때, $\Delta_M, \Delta_N \in H_\infty^*$, $\|\Delta_M, \Delta_N\| \leq \gamma^{-1}$ 을 만족한다. 그리고, 이러한 섭동을 고려한 플랜트에 대하여 개루우프의 특이치가 설계목적 특히, 시스템의 안정화에 부합하도록 가중함수 W 를 선정하고, 이를 플랜트와 결합한 shaped plant G_S 에 대하여 견실 안정화 제어기 K 를 찾는다.

$$\gamma_{\min} = \inf_{K \text{ stabilizing}} \left\| \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I - G_S K)^{-1} \tilde{M}_S^{-1} \right\|_\infty \quad (10)$$

즉, K 는 식 (9)를 만족하는 모든 G_d 을 안정화 시키는 제어기이며, 이는 small gain theorem으로 증명될 수 있다. 그리고, 최종 귀환 제어기는 가중함수와 결합되어 WK 로 나타난다. TDF H_∞ 제어 문제에서는 귀환 제어기 K_2 가 견실 안정화 제어기 역할을 한다.

이와 같이 안정화 된 페루우프 시스템에 요구되는 시간영역 성능사양을 부여하기 위해서 다음과 같은 TDF H_∞ 모델 추종기능을 추가하여 합성한다.

$$\|(I - G_S K_2)^{-1} G_S K_1 - M_0\|_\infty \leq \rho \gamma^2 \quad (11)$$

여기서, M_0 는 추종모델이며, ρ 는 견실 안정성과 모델 매칭 사이의 상대적 가중치이다. 즉, ρ 가 클수록 모델 매칭의 비중이 커지고 상대적으로 견실 안정성이 떨어진다. 반대로, ρ 가 0이면 이 문제는 H_∞ 루우프 형상 문제와 완전히 동일하게 된다.

따라서, 제안된 그림과 시스템의 불확실성을 coprime factor로 모델링하여, TDF H_∞ 문제를 구성하면 다음과 같다.

$$\left\| \begin{array}{c|c} \rho^2 (I - G_S K_2)^{-1} G_S K_1 - M_0 & \rho (I - G_S K_2)^{-1} \tilde{M}_S^{-1} \\ \hline \rho G_S (I - K_2 G_S)^{-1} K_1 & (I - G_S K_2)^{-1} \tilde{M}_S^{-1} \\ \rho (I - K_2 G_S)^{-1} K_1 & K_2 (I - G_S K_2)^{-1} \tilde{M}_S^{-1} \end{array} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (12)$$

Fig. 2의 페루우프 시스템은 식 (12)의 요소 (2,2)와 (2,3)에 의해 G_d 에 포함되는 모든 섭동 시스템을 안정화 시키며, 요소 (1,1)에 의해 강건한 모델 매칭 특성을 가진다. 따라서, K_2 는 식 (10)의 K 와 같이 전체 시스템을 안정화 시키는 귀환 제어기임을 알 수 있으며, 최종귀환 제어기는 WK_2 이다.

그리고, 페루우프 전달함수 $R_{y\beta}$ 의 정상상태 오차를 최소로 하기위해 다음과 같은 scaling matrix를 정의하였다.

$$S = R_{y\beta}(0)^{-1} M_0(0) \quad (13)$$

따라서, 최종 prefilter는 $WK_2 S$ 이다.

4. 실험장치 및 방법

일정한 온도 환경을 조성하기 위해 단열 챔버를 제작하였고, 그 내부에 그립퍼를 장착하였다. 본 실험에 사용된 형상기억합금 작동기는 큰 스트레인을 얻기 위해 스프링 형태를 이용하였으며, 500% 초기 소성 스트레인을 부가하였다. 작동기는 그립퍼의 베이스로 부터 50mm 위치에 고정시켰다. 끝단에 5.5g의 선단질량을 부가한 것은 물건 파지시 접촉부에 해당하는 부분이므로 보다 확실한 파지를 위한 부가적인 부착물을 고려한 것이다. 그립퍼는 22mm × 32mm × 10mm의 베이스에 2개의 80mm 평거가 장착되어 있다.

그리고, 본 연구에 사용된 유연 평거와 형상기억 합금 작동기의 물리적, 기하학적 특성치들은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Dimensional and mechanical properties of fingers and SMA actuators

Finger		SMA spring	
Material	Glass epoxy	Material	Nitinol
Young's modulus	6.3 GPa	Coil spacing	0.66 mm
Length	80 mm	Coil turns	15
Thickness	0.6 mm	Wire diameter	0.33 mm
Width	6 mm	coil diameter	3.81 mm
Density	1865 kg/m ³	Transition temperature	43 °C

선단 접촉력은 스트레인 게이지를 통하여 측정하였으며, 이 신호가 저주파수 필터(low-pass filter)를 통하여 신호 분석기(FFT)에 저장된다. 또한 이 신호는 A/D 컨버터를 거쳐 제어기로 보내지며, 제어기에서는 그 신호에 따라 제어력을 입력할 작동기의 선정 및 전류의 크기를 결정하여 이 신호를 D/A 컨버터로부터 전압/전류 변환기로 제어전류의 크기에 해당하는 전압이 공급되어 제어가 이루어진다.

5. 실험결과 및 고찰

TDF H_∞ 제어기를 적용한 소형 SMA 그립퍼의 힘 추적제어 성능과 강건성을 보이고자 계단 입력과 사인파 추적에 대한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. Fig. 3은 0.2Hz 계단입력에 대한 추적 성능을 나타낸다. 0.01N의 요구 입력에 대해 시뮬레이션

과 실험 모두 우수한 결과를 보여주고 있다. 작동기의 느린 반응속도로 인해 큰 overshoot가 발생할 우려가 있으므로 이를 피하고 가능한 빠른 반응속도를 가지도록 1차 추종모델을 선정하였고, 이때 gain margin은 27.7dB 이었다. 따라서, 제어 결과에서 보는 바와 같이 작은 overshoot로 안정적으로 제어가 수행되고 있음을 알 수 있다.

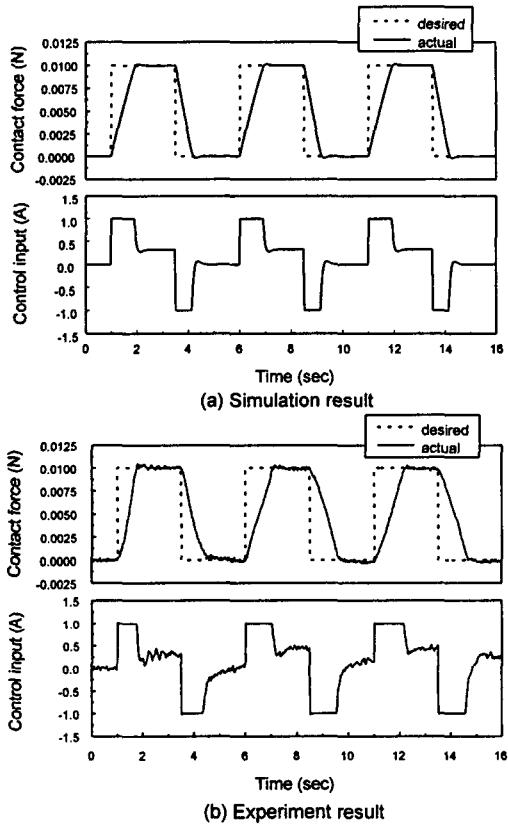


Fig. 4 Force tracking performance for the step trajectory

Fig. 4에서는 0.08N의 요구 입력으로 대상물을 파지한 후 0.25Hz 사인파 추적에 대한 결과를 보여주고 있다. 제어가 수행된 후 약 0.9초 후에 우수하게 요구궤적을 추적하는 것을 볼 수 있다. 다만, 실험에서는 시뮬레이션 결과에 비해 큰 제어입력이 들어가고 있는데, 이는 가열에 비해 상대적으로 느린 냉각속도로 인한 결과로 판단된다. 즉, 제어력을 발생하고 있는 반대쪽 스프링이 냉가지연으로 인해 반력을 가지고 있기 때문이다. 이러한 반력은 진동제어에서는 과도제어을 억제하는 등의 유리한 역할을 할 수도 있지만 추적제어에서는 바람직하지 못하다. 하지만 본 실험에서는 강건 제어기가 이를 보상하여 큰 제어력을 발생시키므로 우수한 제어결

과를 보여주고 있다. 따라서, 작동기 시상수의 설정에서도 이러한 동적인 요구궤적을 훌륭히 추적함을 미루어 제어기의 강건함을 알 수 있다.

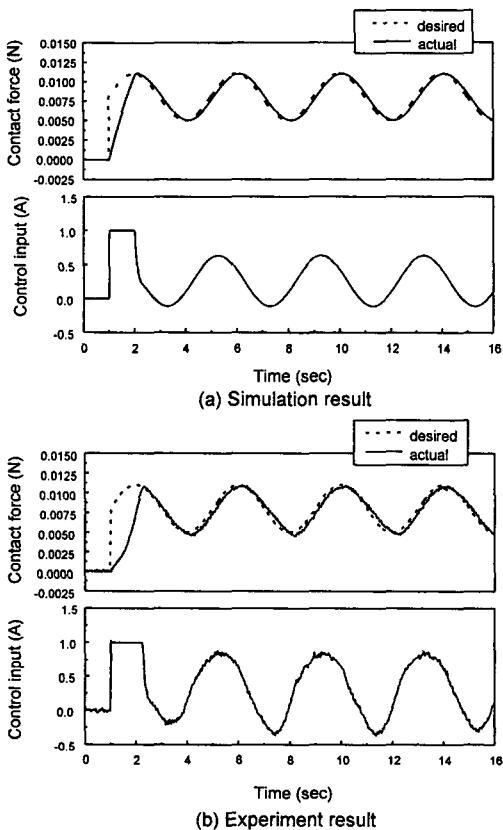


Fig. 5 Tracking performance for the sinusoidal trajectory

참고문헌

- K. Ikuta, M. Tsukamoto and S. Hirose, "Shape Memory Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application to Active Endoscope", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia, pp.427-439, 1988.
- A. Baz, K. Imam and J. McCoy, "Active Vibration Control of Flexible Beams Using Shape Memory Actuators", Journal of Sound and Vibration, Vol. 140, No. 3, pp.437-456, 1990.
- S. B. Choi and C. C. Cheng, "Vibration Control of a Flexible Beam Using SMA Actuators", J. of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 19, No. 5, pp.1175-1180, 1996.
- C. Liang and C. A. Rogers, "Design of Shape Memory Alloy Springs With Applications in Vibration Control", Journal of Vibrations and Acoustics, Vol. 115, pp.129-135, 1993.
- D. C. McFarlane and K. Glover, "A Loop Shaping Design Procedure Using H_∞ Synthesis", IEEE Transactions Automatic control, Vol. 37, No. 6, pp.759-769, 1992.
- D. J. N. Limbeer, E. M. Kasenally and J. D. Perkins, "On the Design of Robust Two Degree of Freedom Controllers", Automatica, Vol. 29, No. 1, pp.157-168, 1993.

6. 결론

본 연구에서는 형상기억합금을 작동기로 사용하여 소형 그립퍼의 힘 추적 제어를 수행하였다. SMA 작동기의 특성과 연계하여 동적 지배방정식을 유도하였고, 그립퍼의 가열과 냉각에 따른 SMA 작동기의 불확실성을 고려하여 강건한 제어개념을 도입하였으며, 나아가 주파수 영역 뿐만 아니라 시간영역에서의 성능사양도 고려할 수 있는 TDF H_∞ 제어기를 설계하였다. 또한 이를 실험적으로 구현하여 제어기의 강건성과 소형 로봇과 그 하부 시스템의 작동기로서 SMA 작동기의 적용 가능성을 입증하였다. 소형화에 많은 잇점을 가지고 있는 형상기억합금은 로보틱스 등 다양한 분야에 응용가능성을 가지고 있으며, 앞으로 SMA 작동기의 실제 적용에 있어서 냉각문제의 해결과 양방향 SMA에 대한 연구가 필요하다.