

SMA 작동기를 이용한 스마트 복합재 구조의 형상 제어에 관한 실험적 연구

양승만* · 노진호* · 한재흥** · 이 인***

Experimental Study on Shape Control of Smart Composite Structure with SMA actuators

Seung-Man Yang, Jin-Ho Roh, Jae-Hung Han and In Lee

Key Words : Shape Memory Alloy, Composite Structure, Graphite/Epoxy, Shape Control

ABSTRACT

In this paper, active shape control of composite structure actuated by shape memory alloy (SMA) wires is presented. Hybrid composite structure was established by attaching SMA actuators on the surfaces of graphite/epoxy composite beam using bolt-joint connectors. SMA actuators were activated by phase transformation, which induced by temperature rising over austenite finish temperatures. In this paper, electrical resistive heating was applied to the hybrid composite structures to activate the SMA actuators. For faster and more accurate shape or deflection control of the hybrid composite structure, PID feedback controller was designed from numerical simulations and experimentally applied to the SMA actuators.

1. 서 론

형상기억합금(shape memory alloy: SMA)은 일반적인 금속이나 합금에서는 찾아볼 수 없는 형상기억 효과(shape memory effect)와 초탄성(superelasticity) 거동을 보인다. 이러한 특성은 1951년 Au-Cd 합금에서 처음으로 발견되었고, 1963년 미국 해군병기연구소(Naval Ordnance Laboratory)에서 Ni-Ti 합금에서 형상기억효과를 발견하였으며, 그 후로 SMA는 널리 이용되게 되었다[1]. 니티놀(nitinol)이라고 불리는 Ni-Ti 계열의 SMA는 단위 부피당 큰 에너지를 낼 수 있고, 내부식성(corrosion resistance)과 생화학적 적합성(bio-compatibility)이

뛰어나다. 또한 100,000 사이클 이상의 긴 수명을 갖기 때문에 작동기로서 우수한 특징을 갖는다[2]. SMA의 이러한 특성을 이용하여 기계적 요소[3]와 의료 장비[4] 등에 널리 적용되고 있다.

SMA 작동기를 이용한 스마트 구조에 대한 연구들을 살펴보면, Rogers 등 [5]은 SMA가 삽입된 복합재 평판을 이용하여 스트레인 에너지, 구조의 고유 진동수 및 모드 형상과 같은 물성치를 능동적으로 조절할 수 있는 스마트 평판에 대한 연구를 수행하였다. Brinson 등[6]은 SMA에 대한 유한요소 모델을 수립하고, SMA가 삽입된 파이프 연결 장치(pipe coupling)와 SMA가 삽입된 복합재 평판의 거동을 살펴보았다. Rhee와 Koval[7]은 SMA 작동기에 대한 1차 모델(first-order model)을 구하여 구조물의 진동 제어에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 SMA 작동기를 이용하여 복합재

* KAIST, 항공우주공학과, 대학원

** KAIST, 항공우주공학과, 조교수

*** KAIST, 항공우주공학과, 교수

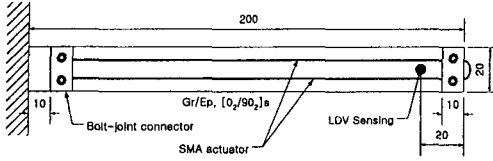


Fig. 1 Configuration of the specimen.

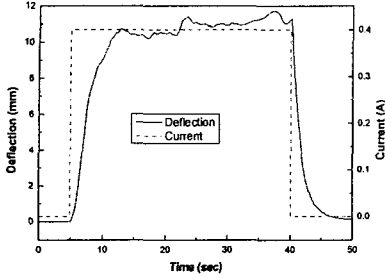


Fig. 2 Typical deflection history.

구조물의 능동 형상 제어에 관한 연구를 수행하였다. SMA 작동기가 부착된 복합재 구조의 스텝 응답(step response)을 1 차 모델로 가정하여 모델 파라미터를 실험적으로 구하였다. 그리고 보다 빠르고 정확한 형상 및 변형의 제어를 위해 수치적 모델을 이용한 모의실험(simulation)을 통하여 PID 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 실험을 통하여 정확하고 빠른 제어 성능을 확인하였다.

2. 실험적 모델링

SMA 작동기와 복합재 구조물의 결합된 구조물은 위치, 형상, 진동 제어 등의 용도로 활용될 수 있으며, 이러한 적용을 위해서는 임무에 적합한 제어기의 설계가 요구된다. 일반적으로 제어기 설계 과정을 효과적으로 수행하기 위해서는 시스템의 수학적 모델이 필요하고, 시스템의 수학적 모델은 작동기, 감지기, 구조의 수학적 모델을 이용하여 선형적인 방법으로 전체 시스템의 모델을 얻을 수 있다. 하지만 본 연구에서 사용하는 SMA 작동기는 매우 복잡한 비선형 거동을 보이며, 다양한 요인에 의해 그 거동이 달라지므로 정확한 수학적 모델을 구하는 것이 쉽지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 SMA 작동기가 부착된 복합재 보의 형상/변형 제어를 수행하기 위해서 SMA 작동기만의 수학적 모델을 구하지 않고, SMA 작동기가 부착된 전체 구조 시스템에 대한 간단한 수학적 모델을 실험적 방법을 통하여 수립하였다. 수립된 시스템의 수학적 모델을 기초로 PID 제어기를 설계하여, 실험 모델에 적용하여 형상 제어를 수행하였다.

실험적 모델링과 형상/변형 제어를 수행할 시편은 Fig. 1 에 나타내었다. 200mm 길이의 외팔보 형태로 지지된 부근과 끝단에 볼트 접합 연결장치를 이용하여 SMA 작동기를 고정하였다. 사용된 복합재료는 그래파이트/에폭시 $[0_2/90_2]_s$ 시편이고, 양 방향으로 변형이 가능하도록 SMA 작동기는 시편의 양쪽 면에 동일하게 부착하였다. 본 연구에서는 연결부의 표면에 사포를 부착하고 그 사이에 SMA 작동기를 고정함으로써 전기적 단락을 구현하였다. 본 실험에 사용한 SMA 작동기는 잔류 변형률을 추가로 주지 않고 제품 초기에 존재하는 잔류 변형률을 이용하였다. 이때의 잔류 변형률은 형상기억합금 선을 고온으로 가열하여 잔류 변형률을 제거한 후 길이의 변화를 측정하는 방법으로 구할 수 있으며 그 값은 약 3.5% 이다.

SMA 선을 작동기로 이용하고, LDV (Laser Doppler Velocimetry)를 감지기로, 그리고 복합재 보 시편을 모구조로 고려할 때, 전체 시스템의 입력은 형상기억합금에 인가되는 전력이 되고, 출력은 LDV 를 통해 측정되는 변위를 고려할 수 있다. 스텝 입력에 대한 전형적인 출력 신호를 살펴보면 Fig. 2 와 같고, 시간 지연이 있는 시스템의 응답과 유사하여, 식 (1)과 같은 1 차 모델(first-order model)로 가정할 수 있다[7].

$$\tau \dot{X} + X = KaP \quad (1)$$

여기서, X 는 측정 위치에서의 변형을 의미하며 $P= Ri^2$ 는 작동기에 인가되는 전력(electric power)을 의미한다. 이때 R 은 형상기억합금 선의 전기적 저항을, i 는 인가되는 전류를 의미한다. 모델에 사용된 계수들의 의미는 다음과 같다.

τ : time constant, K : correction factor
 a : slope of the deflection versus power curve

식 (1)은 입력 전류 i 에 대해서 비선형 관계를 나타내며, 선형 모델을 얻기 위해 비선형 방정식의 선형화를 수행하였다. 임의의 i_0 에 대해서 선형화를 수행하여 구한 시스템의 전달 함수는 식 (2)와 같다.

$$G(s) = \frac{2KaRi_0/\tau}{s + 1/\tau} \quad (2)$$

먼저 실험을 통하여 시간 상수를 구해보았다. 본 연구에서는 10 초간 전력을 가한 뒤 전력의 공급을 중지하고 복원되는 과정의 응답을 이용하여

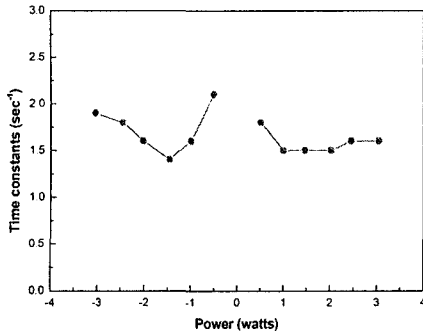


Fig. 3 Time constants of the composite beam.

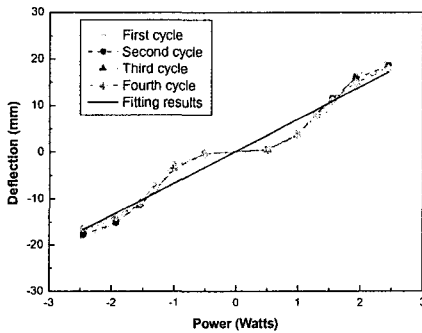


Fig. 4 Deflection magnitude of composite beam.

시간 상수를 결정하였으며, Fig. 3 에 전력에 따른 결과를 나타내었다. 이때 평균값은 약 1.7 초이다. 다음으로 변형-전력 관계의 기울기를 구하기 위해서 전력의 크기를 변화시키면서 스텝 응답(step response)을 구하였다. 인가되는 전류는 30 초 동안 일정하게 유지되며, Fig. 4 에 결과를 나타내었다. 이 결과는 선형적인 관계는 아니지만, 선형이라고 가정하여 그 기울기를 구하면, $a = 6.89 \text{ mmWatt}^{-1}$ 이다. 마지막으로 교정 상수는 앞서 구한 계수들을 이용한 수학적 모델과 실험 결과를 비교하여 응답의 크기를 유사하게 조절하는 기능을 수행한다. 본 연구에서는 0.4A 의 크기의 전류를 가한 경우의 응답을 기준으로 사용하였으며, 이때 $K = 0.38$ 로 결정하였다.

3. 능동 형상 제어

형상기억합금을 작동기로 이용하는 경우는 반응 속도가 매우 느리고, 정상 상태(steady-state)에서 오차가 크고, 수학적 모델 정립이 어렵다는 단점이 있다. 반응 속도와 정확한 힘/형상/변형의 유지를 위해서는 적절한 제어기의 설계가 요구된다. 본 논문에서는 반응 속도의 향상과 일정한 힘/형상/변형을 유지할 수 있도록 제어기를 설계, 적용

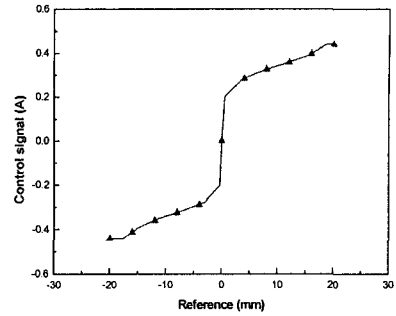


Fig. 5 Control law of feed-forward controller.

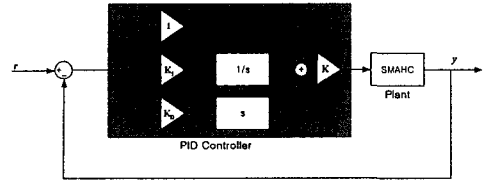


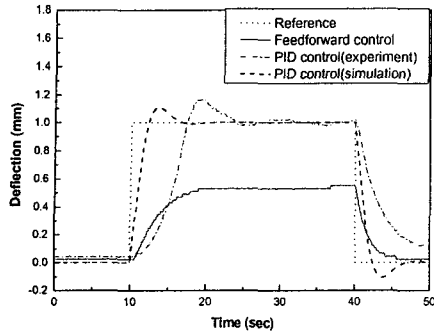
Fig. 6 PID feed-back control system.

해 보았다. 본 연구에서는 앞먹임(feed-forward) 제어기와 선형 PID(Proportional-integral-derivative) 제어기를 이용하여 작동기의 성능을 개선하였다.

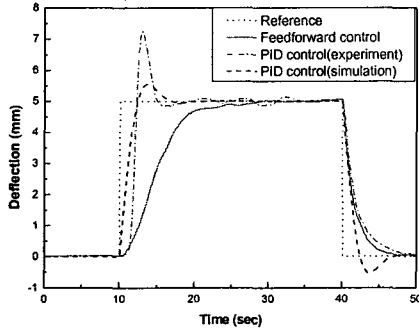
앞먹임 제어기는 - 0.45A ~ 0.45A 의 전류를 0.05A 간격으로 스텝 입력으로 인가하고, 변형 크기를 측정하여 전류와 변형의 관계를 이용하여 구성하였다. 측정된 구간 사이의 간격은 선형으로 가정하였으며, 0.45A 이상의 전류가 가해지지 않도록 설정하였다. Fig. 5 에서는 앞먹임 제어기에서 목적값(reference)에 따른 제어력의 관계를 나타내었다. PID 제어기는 Fig. 6 과 같이 구성하였으며 계인은 수치 모델을 이용한 모의 실험을 통하여 다음과 같이 결정하였다.

$$K = 0.035, K_I = 1.5, K_D = 0.1$$

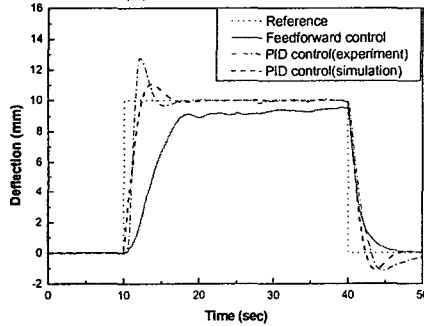
Fig. 7 는 수치 모델을 이용한 모의 실험 결과와 실험 결과를 함께 보여주고 있다. 앞먹임 제어는 PID 제어기의 성능 향상에 대한 비교를 위하여 수행되었으며, 작동기의 비선형성에 대한 거동을 확인하기 위하여 목적값의 크기에 따른 제어 효과를 살펴보았다. 앞먹임 제어기를 적용한 경우는 대체로 정확한 위치에 도달하지 못하고, 반응 속도 또한 매우 느리며 평형 상태(steady-state)에 도달하더라도 일정한 변형을 유지하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 특히 목적값이 작은 경우에 특히 큰 오차를 보이고 있다. 반면에 PID 제어기를 적용한 경우는 목적값의 크기에 크게 영향을 받지 않으면서도, 앞먹임 제어기에 비해서 보다 빠르게



(a) Reference: 1 mm



(b) Reference: 5 mm



(c) Reference: 10 mm

Fig. 7 Experimental and numerical results for shape control of the composite beam.

평형 상태에 도달하고, 평형 상태에서는 오차가 거의 없이 형상을 잘 유지하고 있음을 알 수 있다. SMA 작동기의 비선형 특성에 의하여 수치 모델의 결과가 실험 결과와 약간의 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 목적값이 작은 경우(Fig. 7a) 수치 모델의 결과가 실험 결과에 비해 빠른 반응을 보이고 있으며, 목적값이 5mm 인 경우(Fig. 7b)에는 오버슈트(overshoot)의 크기의 차이가 있지만, 응답의 속도는 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 그리고 목적값이 큰 경우(Fig. 7c)에는 수치 모델의 반응 속도가 실험 결과보다 느린 것을 알 수 있다. 일반적으로 실험 결과는 수치 모델을 이용한 해석의 결과보다 큰 오버슈트를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 복합재 외팔보 시편의 양쪽 표면에 SMA 작동기를 부착하여 양방향으로 변형이 가능한 모델을 제작하였으며, 전체 시스템에 대한 수치 모델의 파라미터들을 실험적으로 구현하였다. 이러한 모델을 이용한 모의 실험을 통하여 PID 제어기를 설계하고, 모의 실험을 통한 수치 모델의 응답이 실험의 결과를 유사하게 모사하고 있음을 확인하였다. PID 제어기는 SMA 작동기의 단점을 보완하여 보다 빠른 응답과 정확한 형상/변형 제어를 수행할 수 있었다.

후기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21 세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)과 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) K. Otsuka and C. M. Wayman, *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- (2) H. J. Lee, J. J. Lee, and J. S. Huh, "A Simulation Study on the Thermal Buckling Behavior of Laminated Composite Shells with Embedded Shape Memory Alloy (SMA) Wires," *Composite Structures*, Vol.47, 1999, pp. 463-469.
- (3) Jan Van Humbeeck, "Non-medical Applications of Shape Memory Alloys," *Materials Science and Engineering*, A273-275, 1999, pp. 134-148.
- (4) T. Duerig, A. Pelton, and D. Stöckel, "An Overview of Nitinol Medical Applications," *Materials Science and Engineering*, A273-275, 1999, pp. 149-160.
- (5) C. A. Rogers, C. Liang and J. Jia, "Structural Modification of Simply-Supported Laminated Plates using Embedded Shape Memory Alloy Fibers," *Computers and Structures*, Vol. 38, No. 5/6, 1991, pp. 569-580.
- (6) L. C. Brinson and R. Lammering, "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Applications," *International Journal of Solids and Structures*, Vol.30, No.23, 1993, pp. 3261-3280.
- (7) S. W. Rhee and L. R. Koval, "Comparison of Classical with robust control for SMA Smart Structures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 2, No. 3, 1993, pp. 162-171.