

論文

형상기억합금 작동기를 이용한 복합재 보의 능동 형상 제어

양승만*, 노진호*, 한재홍**, 이 인***

Active Shape Control of Composite Beam Using Shape Memory Alloy Actuators

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

ABSTRACT

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

초 록

본 논문에서는 복합재 구조물에 대하여 형상기억합금 선을 이용한 능동 형상 제어에 관한 연구를 수행하였다. 형상기억합금 선의 열-기계적인 특성을 실험적으로 측정하였으며, 복합재 보 시편의 표면에 볼트를 이용하여 형상기억합금 작동기를 고정하는 방법으로 하이브리드 복합재 구조물을 제작하였다. 형상기억합금 작동기는 온도 상승에 의한 상변화에 의해 작동되며, 본 연구에서는 형상기억합금 작동기에 전력을 가하여 내부 저항을 통해 발생하는 열을 이용하여 구동하였다. 보다 빠르고 정확한 형상 및 변형 제어를 위하여 수치적 시뮬레이션을 통한 PID 피드백 제어를 설계하였으며, 형상기억합금 작동기에 적용하는 실험을 수행하였다.

Key Words: 복합재 구조물(composite structure), 그래파이트/에폭시(graphite/epoxy), 능동 형상 제어(active shape control), 형상기억합금(shape memory alloy), 비례-적분-미분 제어기(proportional-integral-derivative controller)

1. 서론

형상기억합금(shape memory alloy, SMA)은 일반적인 금속이나 합금에서는 찾아볼 수 없는 형상기억효과(shape memory effect)와 초탄성(superelasticity) 또는 위탄성(pseudoelasticity) 거동을 보인다. 이러한 특성은 1951년 Au-Cd 합금에서 처음

음으로 발견되었고, 1963년 미국 해군병기연구소(Naval Ordnance Laboratory)에서 Ni-Ti 합금에서 형상기억효과를 발견하였으며, 그 후로 SMA는 널리 이용되었다[1]. 니티놀(nitinol)이라고 불리어지는 Ni-Ti 계열의 SMA는 단위 부피당 큰 에너지를 낼 수 있고, 내부식성(corrosion resistance)과 생화학적 적합성(bio-compatibility)이 뛰어나다. 또한 100,000

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail: inlee@kaist.ac.kr)

사이클 이상의 긴 수명을 갖기 때문에 작동기로써 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 유한 요소 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 적용한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 SMA 작동기를 이용하여 복합재 구조물의 능동 형상 제어에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 SMA 선의 열-기계적 특성인 형상기억효과와 의사탄성 거동을 실험적으로 살펴보았다. SMA 작동기가 부착된 복합재 구조의 스텝 응답(step response)을 1차 모델로 가정하여 모델 파라미터를 실험적으로 구하였고, 보다 빠르고 정확한 형상 및 변형의 제어를 위해 수치적 모델을 이용한 모의실험(simulation)을 통하여 PID 제어를 설계하였다. 설계된 제어기는 실험을 통하여 정확하고 빠른 제어 성능을 확인하였다.

2. SMA 선의 열-기계적 특성

일반적으로 SMA 선은 제작 공정, 초기 변형률, 응력, 온도 등의 다양한 요인에 의하여 재료의 열-기계적 특성이 결정된다. 다양한 요인에 영향을 받기 때문에, 작동기로 적용하기에 앞서 사용할 SMA 선의 재료적인 특성에 대한 측정이 선행되어야 한다. 즉, 작동기로 사용하기에 앞서 SMA 선의 열-기계적 특성을 살펴보는 것이 매우 중요하다. 본 절에서는 본 연구에 사용할 SMA 선에 대한 열-기계적 특성을 실험을 통하여 살펴보았다. 준비한 SMA 선은 미국의 NDC (Nitinol Devices & Components) 사의 제품으로, 그 재료적 특성과 화학적 구성은 Table 1에 나타내었다.

첫번째 실험으로 SMA 선의 중요한 변수인 상변태 온도(transformation temperatures)를 측정하였다. 본 연구에서는 DSC(Differential Scanning Calorimeter, (주)신코 S-650 DSC)를 이용하였으며, SMA 선의 열흐름(heat flow)을 측정하는 방법으로 재료의 상변태 온도를 측정하였으며 Fig. 1에 측정한 결과를 나타내었다. 총 3회에 걸쳐 상온에서 100 °C 까지 가열/냉각 과정을 반복 수행하였다. 이때 첫번째 결과와 두, 세번째의 결과가 크게 다른 것을 알 수 있는데, 이는 SMA 선 자체에 초기 잔류 변형률(initial residual strain)이 존재하기 때문이다. DSC를 이용하는 경우에는 시편에 구속을 가하지 않기 때문에 첫번째 가열 과정동안 형상기억효과로

Table 1 Physical properties and chemical composition of SMA wire from NDC

Physical properties	
Diameter	0.185 mm
Cross-section area	0.027 mm ²
Density	6500 kg/m ³
Surface finish	Black Oxide (straight)
Chemical composition [weight %]	
Ni	49.7
Ti	Bal.
O	0.027
H	< 0.0003
C	0.0042

Table 2 Transformation temperatures of SMA wires

	M_f	M_s	A_s	A_f
First cycle	45.3	52.1	70.5	75.8
Second cycle	44.7	52.3	49.0	56.3

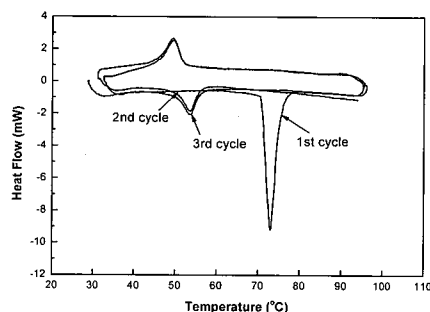


Fig. 1 Heat flow curves of SMA wire.

인해 초기 잔류 변형률이 제거되어 잔류 변형률이 없는 상태로 바뀌기 때문이다. 따라서 두번째와 세번째 과정은 유사한 결과를 보이고 있다. 첫번째, 두번째 과정의 결과를 이용하여 추정된 상변태 온도는 Table 2에 나타내었다.

다음으로 온도에 따른 SMA 선의 응력-변형률 관계를 살펴보았다. INSTRON® universal testing machine 5583과 INSTRON® SFL thermal chamber 를 이용하여 인장 실험을 수행하였다. 열 챔버를 이용하여 온도를 설정하고, 그 온도를 유지하면서 하중을 가한 후 제거하도록 하였다. 이때 사용한 시편의 길이는 200 mm 이고, 인장 속도는 0.8 mm/min 으로 고정하였으며, 30 °C 부터 120 °C 까지 5 °C 간격으로 인장 실험을 수행하였다. Fig. 2는 온도에 따른 응력과 변형률의 관계를 보여주고 있다. 약 70 °C 부근을 경계로 형상기억효과와 의사탄성 거동을 보이고 있다. 형상기억효과 영역에서는 온도가 올라갈수록 변형률에 대한 응력의 크기가 조금씩 낮아지고 있으며, 상변태가 일어나는 응력의 크기도 조금씩 낮아지고 있다. 초탄성 거동을

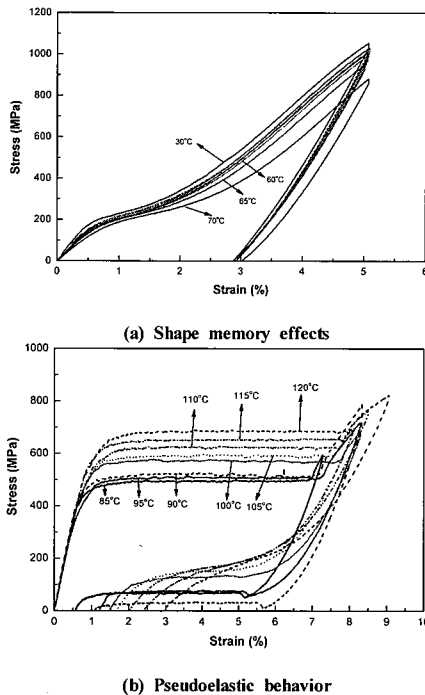


Fig. 2 Thermo-mechanical behaviors of SMA wires.

살펴보면 온도가 올라갈수록 상변태를 유발하는 응력의 크기가 커지고 있으며, 상변태가 완료되는 시점에서의 변형을 또한 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다.

3. 복합재 보의 대변형 가변 형상 실험

본 장에서는 SMA 작동기의 대변형 특성을 이용하여 유연한 구조물의 대변형 가변 형상 실험을 수행하였다. SMA 작동기를 bolt-joint connector를 이용하여 복합재 구조의 표면에 SMA 작동기를 부착하였으며, 전기를 가하여 자체 저항에 의해 발생하는 열을 이용하여 작동기를 구동하였다. 실험에 사용한 모구조물은 그래파이트/에폭시 CU-125, [0/90]_s 보 시편이다. 시편의 형상과 작동기의 위치는 Fig. 3에 나타내었다.

볼트 접합 연결장치를 이용하여 시편의 밑부분, 중간부분, 그리고 끝부분에 SMA 작동기를 고정하였으며, 작동기는 복합재 보의 한쪽 면에만 부착하였다. 사용한 SMA 작동기는 2가닥의 선을 사용하였으며, 밑부분과 끝부분에 전선을 연결하여 전기를 가하였다. 가변형상 실험에 사용된 장비들은 Fig. 4에 나타내었다. SMA 작동기의 양 끝단에 전류를 가하기 위해서 독일의 TOELLNER사의 TOE8852

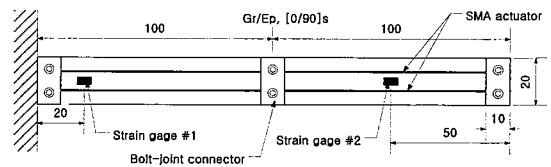


Fig. 3 Configuration of specimen.

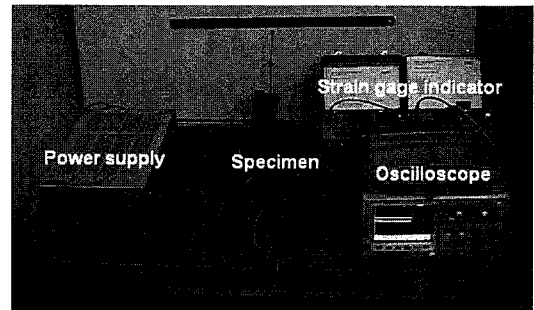


Fig. 4 Experimental setup.

모델을 사용하였으며, 2개의 채널과 채널당 160W(16 Volt, 10 Ampere)의 파워를 낼 수 있고, RS232 시리얼 통신으로 제어가 가능하다. Fig. 5는 인가된 전류의 크기에 따른 복합재 보의 변화된 형상을 나타내고 있다. 1.0A 이하의 전류에서는 거의 반응이 없으며, 3.0A 이상의 전류에 대해서는 시편의 끝부분에서 100 mm 이상의 변형이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 시편의 길이가 200 mm 인 점을 고려한다면 대단히 큰 변형이며, 이러한 대변형은 SMA 작동기의 큰 장점이라고 할 수 있다.

4. 복합재 보의 능동 형상 제어

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 작동기의 수학적 모델을 구하지 않고, SMA 작동기가 부착된 전체 구조 시스템에 대한 간단한 수학적 모델을 실험적 방법을

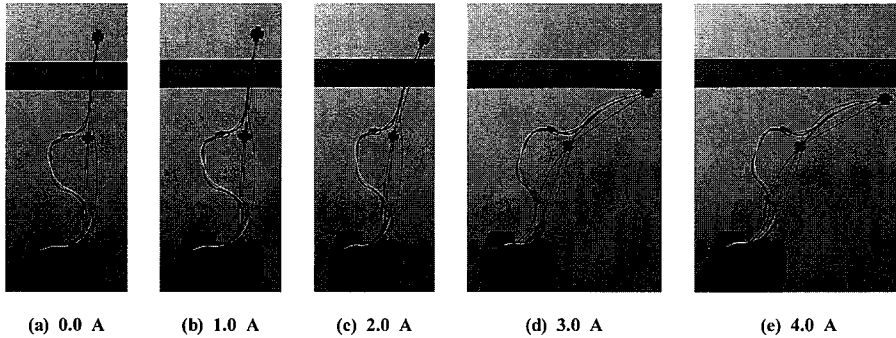


Fig. 5 Large deformations of the composite beam with SMA actuators according to applied electric currents.

통하여 수립하였다. 수립된 시스템의 수학적 모델을 기초로 PID 제어를 설계하여, 실험 모델에 적용하여 형상 제어를 수행하였다.

실험적 모델링과 형상/변형 제어를 수행할 시편은 Fig. 6에 나타내었다. 200 mm 길이의 외팔보 형태로 지지된 부근과 끝단에 볼트 접합 연결장치를 이용하여 SMA 작동기를 고정하였다. 사용된 복합재료는 그라파이트/에폭시 $[0_2/90_2]_s$ 시편으로, 앞선 대변형 가변 형상 실험에 사용하였던 시편보다 큰 강성을 나타내는 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.

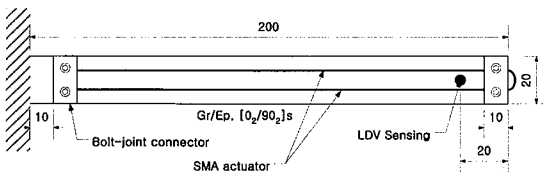


Fig. 6 Configuration of the specimen for active shape control using SMA actuators.

4.1 실험적 모델링

형상기억합금 선을 작동기로 이용하고, LDV(Laser Doppler Velocimetry, head: Polytec OFV303, controller: Polytec OFV3001)를 감지기로, 그리고 복합재 보 시편을 모 구조로 고려할 때, 전체 시스템의 입력은 형상기억합금에 인가되는 전력이 되고, 출력은 LDV를 통해 측정되는 변위

를 고려할 수 있다. 스텝 입력에 대한 전형적인 출력 신호를 살펴보면 시간 지연이 있는 시스템의 응답과 유사하며, 식 (1)과 같은 1차 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. 그리고 τ 는 시간 상수(time constant), K 는 교정 계수(correction factor), a 는 전력에 따른 변형 비례 상수(slope of the deflection versus power curve)를 의미한다.

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.

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

실험을 통한 복합재 보와 SMA 작동기 전체 시스템의 수학적 모델을 수립하기 위해서는 시간 상수(time constant), 교정 상수(correction factor), 그리고 변형-전력 관계의 기울기(slope of deflection versus power)를 구해야 한다. 먼저 실험을 통하여 시간 상수를 구해보았다. 식 (1)과 같은 1차 모델의 시간 상수는 시스템의 임펄스 응답(impulse response)을 이용하여 구할 수 있다. 하지만, 형상기억합금이 임펄스와 같이 짧은 시간의 입력에 대해서는 충분한 응답을 보이지 않기 때문에 본 연구에서는 10초간 전력을 가한 뒤 전력의 공급을 중지하고 복원되는 과정의 신호를 이용하여 시간 상수를 결정하였으며, 평균값은 1.7초이다. 다음으로 변형-전력 관계의 기울기를 구하기 위해서 전력의

크기를 변화시키면서 스텝 응답(step response)을 구하였다. 인가되는 전류는 30초 동안 일정하게 유지되며, 이 결과로부터 기울기를 구하면, $\alpha=6.89 \text{ mmWatt}^{-1}$ 이다. 마지막으로 교정 상수는 앞서 구한 계수들을 이용한 수학적 모델과 실험 결과를 비교하여 응답의 크기를 유사하게 조절하는 기능을 수행한다. 본 연구에서는 0.4A의 크기의 전류를 가한 경우(응답의 크기가 약 10 mm)를 기준으로 사용하였으며, 이때 $K=0.38$ 로 결정하였다.

4.2 능동 형상 제어

형상기억합금을 작동기로 이용하는 경우는 반응 속도가 매우 느리고, 정상 상태(steady-state)에서 오차가 크고, 수학적 모델 정립이 어렵다는 단점이 있다. 수학적 모델은 앞선 장에서 제안한 방법을 이용하여 실험적으로 모델링이 가능하고 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, 적용해 보았다. 본 연구에서는 앞먹임(feed-forward) 제어기와 선형 비례-적분-미분(proportional-integral-derivative, PID) 제어기를 이용하여 작동기의 성능을 개선하였다.

앞먹임 제어기는 -0.45A~0.45A의 전류를 0.05A 간격으로 스텝 입력으로 인가하고, 변형 크기를 측정하여 전류와 변형의 관계를 이용하여 구성하였다. 측정된 구간 사이의 간격은 선형으로 가정하였으며, 0.45A이상의 전류가 가해지지 않도록 설정하였다. Fig. 7에서는 앞먹임 제어기에서 목적값(reference)에 따른 제어력의 관계를 나타내었다. PID 제어기는 Fig. 8과 같이 구성하였으며 식(3)에 전달 함수(transfer function)를 나타내었다. 여기서, U_{con} 은 작동기에 전달되는 제어력을, r 은 목적값을, y 는 출력값을 의미한다. 또한 K_P , K_I , K_D 는 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 항에 대한 계수이다.

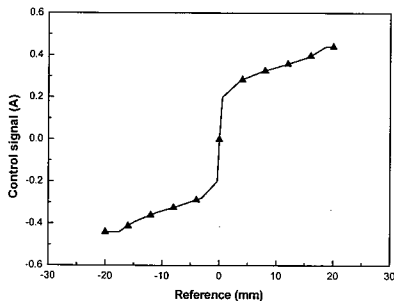


Fig. 7 Control law of feed-forward controller.

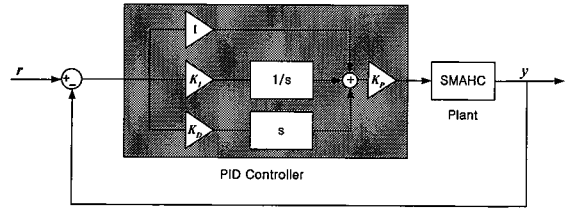


Fig. 8 PID feedback control system.

$$G_{PID}(s) = \frac{U_{con}}{r-y} = K_P \left(1 + K_I \frac{1}{s} + K_D s \right) \quad (3)$$

또한 제어기의 계인은 수치 모델을 이용한 모의 실험을 통하여 다음과 같이 결정하였다.

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

Fig. 9는 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. 목적값의 크기에 따른 응답과 제어 신호를 함께 나타내었다. 앞먹임 제어기를 적용한 경우는 대체로 정확한 위치에 도달하지 못하고, 반응 속도 또한 매우 느리며 평형 상태에 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 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. 9(a)) 수치 모델의 결과가 실험 결과에 비해 빠른 반응을 보이고 있으며, 목적값이 5 mm인 경우(Fig. 9(c))에는 오버슈트(overshoot)의 크기의 차이가 있기는 하지만, 응답의 속도는 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 그리고 목적값이 큰 경우(Fig. 9(e))에는 수치 모델의 반응 속도가 실험 결과보다 느린 것을 알 수 있다. 일반적으로 실험 결과는 수치 모델을 이용한 해석의 결과보다 큰 오버슈트를 보이고 있다.

제어 신호를 살펴보면, 수치 모델을 구한 기준과 유사한 영역인 Fig. 9 (e), (f)의 경우 모의 실험 결과와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었으나, 그보다 작은 전력이 가해지는 영역에서는 비교적 큰 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 작동기의 비선형성에 대한 정확한 모델링이

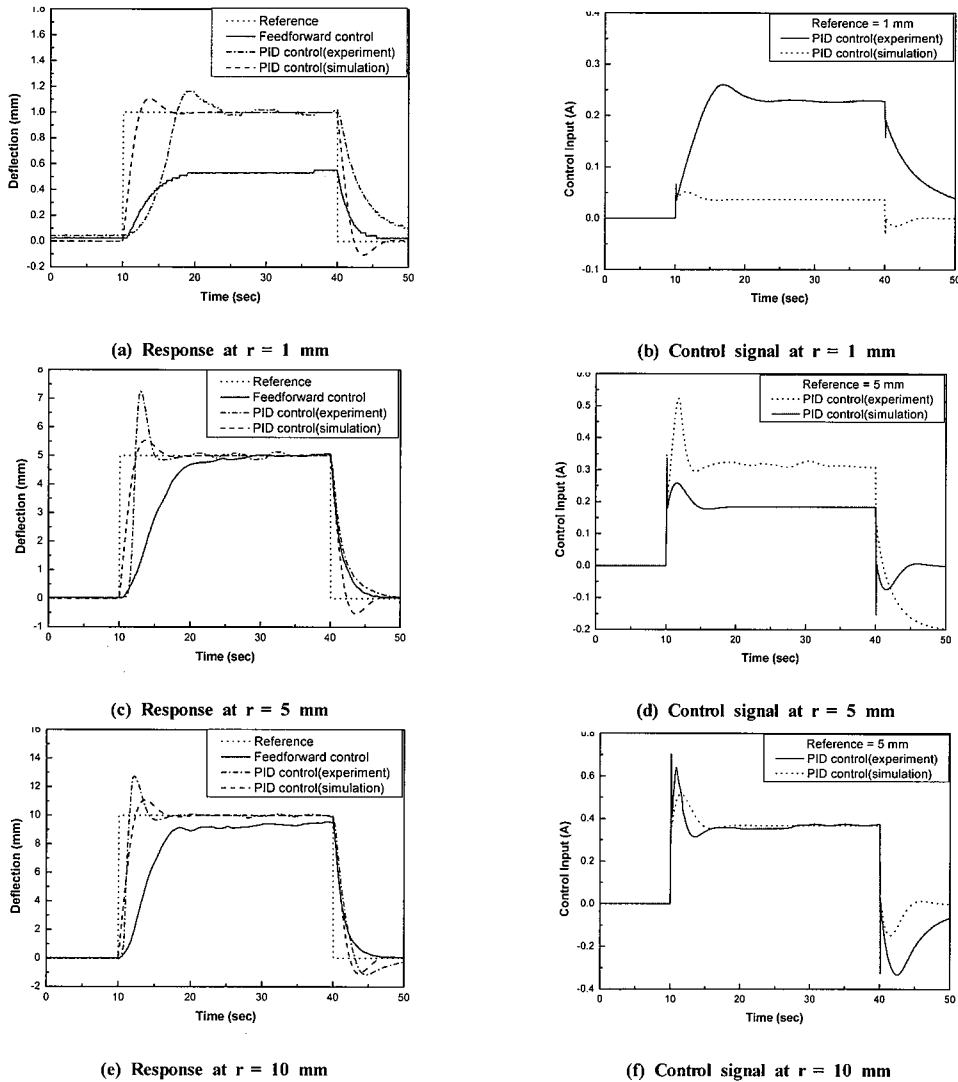


Fig. 9 Experimental and numerical results of active shape control of the composite beam.

수행되지 못한 결과이며, 추후 비선형성을 고려해야 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 실험을 통하여 형상기억합금 선의 열-기계적 특성을 살펴보고, 복합재료 외팔보 시편의 표면에 부착하여 대변형 가변 형상 실험을 수행하였다. 대변형이

가능한 SMA 작동기를 이용하여 시편의 끝부분의 변형이 시편 길이의 절반이 넘는 대변형을 줄 수 있었다. 그리고 외팔보 시편의 양쪽 표면에 SMA 작동기를 부착하여 양방향으로 변형이 가능한 모델을 제작하였으며, 전체 시스템에 대한 수치 모델을 실험적으로 구현하였다. 이 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 제어

를 수행할 수 있었다.

향후 SMA 작동기의 비선형성에 대한 모델링과 비선형 거동을 고려한 제어기 설계의 과정을 통하여 SMA 작동기를 이용한 연구가 보다 효과적으로 수행될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 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.