

형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 좌굴 및 좌굴후 제어 (BUCKLING AND POSTBUCKLING CONTROL OF A COMPOSITE BEAM WITH EMBEDDED SHAPE MEMORY ALLOY WIRES)

최섭* (국방과학연구소), 이정주 (한국과학기술원), 최선우 (항공우주연구소),
S. Choi* (ADD), J.J. Lee (KAIST), S.W. Choi (KARI)

1. 서론

두께가 얇은 복합적층 구조물은 비교적 낮은 하중에서도 탄성 범위 내에서 좌굴(buckling)이 발생하게 된다. 따라서 좌굴은 얇은 두께의 구조물의 설계에서 중요한 설계기준이 된다. 예측하기 어려운 하중조건 및 온도변화가 심한 환경조건 하에서 사용되는 유연한 복합적층 구조물의 좌굴은 구조물의 건전성에 큰 영향을 미친다. 따라서 좌굴이 발생하는 경우 원하는 시점에서 좌굴하중을 향상하거나 좌굴을 억제하는 등의 능동좌굴제어 분야가 최근 들어 많은 주목을 받고있다 [1]. 좌굴과 같은 정적특성을 향상시키기 위해서는 상대적으로 큰 기계적 변형률과 제어력을 가진 지능형 재료가 요구되므로 작동소재로서 형상기억합금이 많이 사용되고 있다. 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)은 열에너지를 기계적 에너지로 변환하는 작동기로서 좋은 특성을 보유하고 있으며 이는 온도의 변화에 따라 상변태시 형상기억회복력(이하 형상회복력)을 발생하는 독특한 형상회복효과 및 초탄성의 성질을 가지고 있다. 형상기억합금을 삽입한 복합적층 구조물의 좌굴 및 좌굴후 제어에 관한 연구는 미비한 실정이다. 기존의 연구모델 [2-3]은 형상기억합금 선을 외부에서 고정하는 경계조건으로 말미암아 실제 구조물의 적용에 한계를 가진다. 저자는 [4] 형상기억합금 선을 편심하게 삽입한 실험시편과 개방형 회로(open-loop control)를 이용한 선의 작동방법으로 복합적층 보의 좌굴제어 거동에 관한 연구를 수행하여 임계좌굴하중을 증가시키고 변형형상의 변화의 결과를 얻었다. 그러나 기존의 좌굴제어는 좌굴후 거동이 발생하기 전인 미소 횡방향 변형에 국한하였으며 좌굴후 제어에서는 영향이 거의 무시할 만 하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 복합적층 보의 좌굴후 제어에 적용할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 외력에 의하여 복합적층 보가 좌굴이 발생한 상태에서 형상회복모멘트를 활용하여 변형 이전의 원래 상태로 회복함으로써 임계좌굴하중을 증가시키고 좌굴모드 형상(buckling mode shape)을 변화시키는 좌굴 및 좌굴후 제어 (buckling and postbuckling control) 거동을 실험적으로 고찰하였다.

2. 문제 정의

그림 1(a)과 같이 형상기억합금 선이 한쪽으로 편심하게 삽입되고 양단고정인 복합적층 보가 외부압축하중에 의해 좌굴이 발생한 이후 선의 형상회복력을 활용하는 문제이다. 형상회복력이 좌굴거동에 미치는 영향을 해석적으로 표현하기 위하여 보의 미소 횡방향 변위 범위 내에서 좌굴거동을 나타내는 오일러 식과 형상회복력에 의한 내부응력 상태를 외부응력 상태로 등가하여 형상회복력의 영향을 평가할 수 있는 cut and paste 방법을 이용한다. 그림 1(c)에 나타낸 바와 같이 보의 중간지점에서의 모멘트는 아래 식(1,2)과 같이 단순하게 표현된다.

$$M_P = \frac{aP}{2(1-\alpha)} \quad (1)$$

$$M_{SMA} = P_{SMA} \times e \quad (2)$$

여기서 P_{SMA} 는 형상회복력, M_{SMA} 는 형상회복모멘트, e 는 삽입된 형상기억합금 선의 중립축에 대한 편심량, α 는 보의 임계하중에 대한 축하중 P 의 비이다. 길이 $2l$ 인 양단고정의 좌굴문제를 길이 l 인 단순지지 보로 등가시킨 후 보의 전체 굽힘모멘트와 횡방향 변위는 형상회복모멘트 M_{SMA} 에 의한 항과 외부압축하중에 의한 항의 합을 서로 중첩하여 아래 식 (3)와 같이 표현된다.

$$M = M_p - M_{SMA} \quad (3)$$

보의 좌굴거동은, 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 스냅스루와 좌굴하중의 증가를 나타내는 거동, 형상회복모멘트 M_{SMA} 와 외부압축하중에 의해 좌굴을 유발하는 M_p 와의 관계로 설명할 수 있다. 즉 외부압축하중에 의한 모멘트 M_p 가 형상회복모멘트 M_{SMA} 의 항보다 클 경우 외부하중에 의한 모멘트를 형상회복모멘트가 감소시킴으로써 좌굴하중이 증가하는 거동을 보인다. 반면, M_{SMA} 의 항이 지배적일 경우 좌굴모드 형상(buckling mode shape)이 반대방향으로 변화하는 스냅스루(snapthrough)가 발생한다.

3. 실험

3.1 실험시편

본 연구에서 사용된 시편은 유리섬유에폭시 (FR) 선경인더스트리의 프리프레그를 사용하였으며 제원은 길이 170mm, 폭 23mm, 두께 1.0mm의 복합적층 보에 삽입한 형상기억합금 선은 직경 0.38mm로 외부구조물에 고정하지 않았다. 적층순서는 $[0_4/90]_s$ 으로 4mm 간격과 중립축에서 각각 0.3mm만큼 한쪽으로 편심하게 삽입하였다.

3.2 좌굴제어 실험

좌굴제어 실험은 INSTRON사 시험기를 이용하여 변위제어로 수행하였다. 시편에 작용하는 압축하중 및 횡방향의 변형을 관찰하기 위해 로드셀과 비접촉식 변위센서를 이용하였으며 양단고정의 경계조건으로 하였다. 센서에서의 신호가 실시간으로 제어기에 전달되어 미리 정해놓은 변위(δ_{act})와 비교하고 선의 작동을 결정하게 된다. 보의 횡방향 변위가 미리 정해 놓은 변위에 도달하면, 제어기는 형상기억합금 선을 작동하는데 필요한 전류를 발생하는 전원공급기로 전달되도록 하여 선의 작동은 전기저항 발열방법에 의해 이루어진다.

4. 결과 및 토의

형상회복모멘트, M_{SMA} 의 영향으로 보의 변형형상을 변형전의 형상으로 회복하여 좌굴을 억제하고, 같은 압축하중 하에서도 보에 작용하는 굽힘모멘트를 감소함으로써 좌굴거동에 영향을 미치게 된다. 이러한 효과

는 변위-하중곡선에서 임계좌굴하중을 증가 및 변형형상의 변화로 나타나며, 그림에서 표시된 no activation은 단지 외부 압축하중에 의한 좌굴거동을 나타낸다. 본 연구에서는 좌굴 및 좌굴후 제어에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 좌굴제어를 위하여 개방형 회로와 폐쇄형 회로를 적용하고 서로 비교하였다.

4.1 개방형 회로 (open loop control)

보의 횡방향 변위가 미리 정해 놓은 변위에 도달하면, 제어기는 형상기억합금 선을 작동하기 위하여 고정된 전류의 크기와 시간동안 전류를 공급하게 된다. 그 결과 형상회복모멘트 M_{SMA} 는 좌굴후 거동에서 좌굴제어에 필요한 형상회복력이 발생되기 전에 열하중이 작용하여 좌굴제어의 효과가 효과적으로 나타나지 않았다 [4,5]. 형상기억합금 선의 가열은 의도하지 않는 복합재료의 온도상승을 유발시켜 압축하중이 작용하게 되어 결국 보는 급작스러운 좌굴이 발생하게 된다. 개방형 회로를 이용한 임펄스(impulse) 형태의 전류작동은 1) 최적의 좌굴제어를 위한 공급전류의 크기와 작동시간의 결정이 어렵고 2) 좌굴후 거동 이전 상태인 미소 횡방향 변형 범위에서만 제한되는 단점이 있다.

4.2 폐쇄형 회로(closed loop control)

개방형 회로의 단점을 극복하기 위하여 형상기억합금 선의 작동에 수반하는 의도하지 않는 열 압축하중을 최소화하면서 보의 좌굴후 제어까지의 확장을 위하여 폐쇄형 회로를 이용하였다. 보 중앙의 횡방향 변위의 측정치와 미리 정해 놓은 값, 원하고자 하는 변형형상,과의 차이를 최소화함으로써 폐쇄형 회로를 이용한 제어목적은 보의 원하는 변형형상을 유지하기 위하여 최적의 작동시간과 전류의 크기를 자동적으로 결정하는 것이다. 본 실험에서 이용된 제어 알고리즘과 기존의 연구 [3]에서 적용된 제어 알고리즘과의 기본적인 차이는 다음과 같다. 기존의 연구는 형상기억합금 선을 인장력을 가지는 선의 장력을 이용하는 모델에서 비례제어기를 적용하였으나 반면, 본 실험에서는 형상회복력을 형상회복모멘트로 활용하여 최적 좌굴 및 좌굴후 제어를 가능하게 하는 이산 시간 변수의 제어 알고리즘을 채택하였다. 이러한 두 폐쇄형 회로의 차이는 근본적으로 형상기억합금 선의 삽입조건과

경계조건의 차이에 있다.

그림 2(a)와 (b)는 형상기억합금 선의 작동을 위한 폐쇄형 회로가 좌굴제어 거동에 어떻게 영향을 미치는 지 살펴보기 위해 시편길이 $2l=150\text{mm}$ 에서 기하학적 초기결함량의 크기에 따라 나타내었다. 보의 횡방향 변위가 δ_{acr} 를 초과하면, 좌굴의 전류 크기와 작동시간을 가지며 작동하여 δ_{acr} 상태로 변형형상이 회복하고, 보의 횡방향 변위가 δ_{acr} 미만으로 회복되는 경우 작동은 중지하게 된다. 선의 작동을 중지한 이후 외부하중에 의해 다시 보는 초기에 변형하는 방향으로 δ_{acr} 에 도달할 때까지 변형하게 된다. 이러한 제어 알고리즘을 통해 변형형상을 유지하기 위하여 작동함으로써 제어기는 열에 의한 영향을 효율적으로 최소화 할 수 있다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 좌굴제어의 최종적인 결과로서 스냅스프링의 발생은 자연대류에 의한 냉각상태에서 전기저항 발열작동에 의해 증가된 형상회복모멘트의 영향으로 설명할 수 있다.

그림 3에 시편길이 $2l=170, 150\text{mm}$ 에서 형상기억합금 선의 작동을 위한 개방형 또는 폐쇄형 제어회로를 이용한 좌굴제어 거동을 보 두께와 제어하지 않은 보의 임계좌굴하중으로 나누어 정규화하여 비교하였다. 점선과 실선으로 나타낸 선은 각각 개방형과 폐쇄형 제어회로를 이용한 좌굴제어 거동을 나타낸다. 개방형 제어회로에 의한 좌굴후 제어거동의 결과 형상회복모멘트는 임계좌굴하중의 증가 및 변형된 보의 변형형상 회복에 영향을 크게 주지 않는다. 그러나 폐쇄형 제어회로에 의한 좌굴후 제어거동은 원하는 보의 변형형상을 유지함으로써 보의 하중지지 능력을 증가시킨다. 결과적으로 보의 변형형상은 형상기억합금의 작동하는 동안 작동 횡방향 변위, δ_{acr} 와 굽힘강성에 관계없이 원하는 변형형상을 유지하기 위하여 적당한 M_{SMA} 가 작용함으로써 δ_{acr} 값을 유지할 수 있게 된다. 이러한 결과로부터, 좌굴후 거동에서도 좌굴제어가 가능하여 항후 상변태를 유발하는 온도변화에 환경조건과 예측하기 어려운 하중조건 하에서 활용되는 유연한 구조물의 좌굴제어 및 형상제어에 적용 가능성을 제시할 수 있다.

5. 결론

형상기억합금 선을 유연한 복합적층 보에 한쪽으로 편심하게 삽입한 모델을 이용하여 좌굴 및 좌굴후 제어에 관한 실험을 수행하였다. 이 결과로부터 아래의 결론을 얻었다.

1. 좌굴 및 좌굴후 제어거동에서 형상회복모멘트의 영향을 이용하여 임계좌굴하중의 증가 및 변형된 형상의 변화의 결과를 얻었다. 이러한 좌굴후 제어 거동의 결과를 바탕으로 항공기 및 우주 구조물 등의 유연한 구조물의 형상 및 좌굴제어에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 좌굴모드가 결정되어 있는 복합재료 셀 구조물의 하중지지 능력을 외부 기계적인 하중을 받고 상변태를 유발하는 온도의 변화를 갖는 환경조건에서 능동적으로 임계좌굴하중을 증가 뿐만 아니라 변형형상의 변화를 통해 보다 효율적인 설계가 가능하다.

참고문헌

1. Loughlan J., "The buckling of composite stiffened box sections subjected to compression and bending," *Compo. Struct*, Vol. 35, 1996, pp. 101-116.
2. Baz, A. Ro, J. Mutua, M. and Gilheany, J., "Active buckling control of reinforced composite beams," *Proceedings of the 33st structures, Structural, Dynamics and Materials conference*, 1991, pp. 167-175.
3. Thompson, S.P. and Loughlan, J., "Adaptive post-buckling response of carbon fibre composite plates employing SMA actuators," *Compo. Struct.*, Vol. 38, No.1-4, 1997, pp. 667-678.
4. 최섭, 이정주, 전제춘, (1998) "형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 좌굴 제어," *복합재료학회*, 제11권 제6호, pp. 29-38.
5. Choi, S and J.J. Lee., "The shape control of composite beam with embedded shape memory alloy wire actuators," *Smart Mater. and Struct.*, Vol. 7, No. 6, 1998, pp. 759-770.

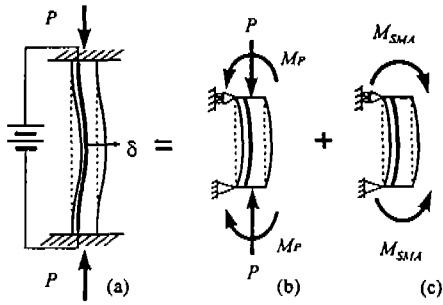
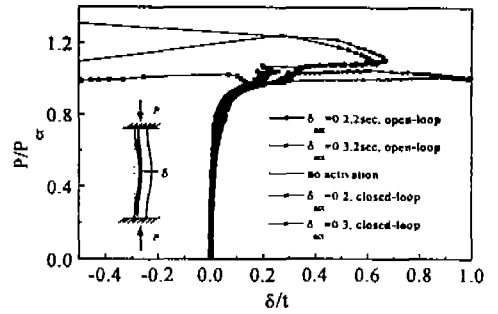
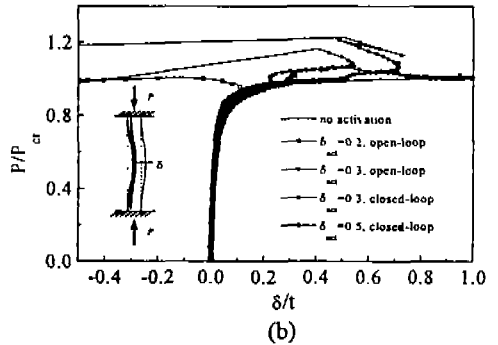


Fig. 1 Effects of the reactive moment, M_{SMA} , for the buckling control with equivalence between fixed-ends condition of length $2l$ and simply-supported condition of length l .

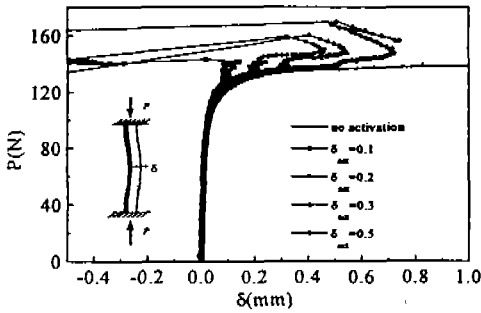
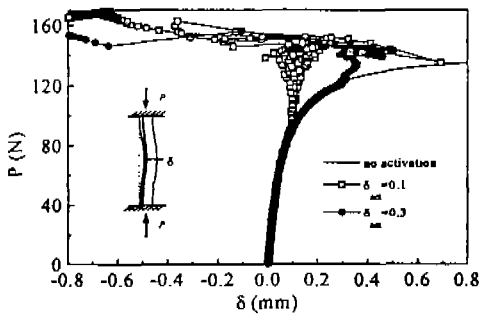


(a)



(b)

Fig. 3 Comparison load-deflection curves of the SMA-composite beam between open-loop and closed-loop control with different specimen length a) $2l=170\text{mm}$, b) $2l=150\text{mm}$.



(a)
(b)

Fig. 2 Load-deflection curves of the SMA-composite beam for the closed-loop control at $2l=150\text{mm}$ with a) large geometrical initial imperfections, b) small geometrical initial imperfections.