

論文

형상기억합금 선 작동기를 삽입한 복합적층 보의 좌굴 및 좌굴후 제어

최 섭* · 이정주** · 서대철** · 최선우***

Buckling and Postbuckling Control of a Composite Beam with Embedded SMA Wire Actuators.

S. Choi*, J. J. Lee **, D. C. Seo** and S. W. Choi ***

ABSTRACT

In this paper, an experimental study on the buckling and postbuckling control of a laminated composite beam with eccentrically embedded SMA wire actuators is performed. For the purpose of enhancing the critical buckling load, buckling control is investigated through the use of reactive moment associated with the shape recovery force of SMA wire actuators. To improve the control authority for the buckling and postbuckling control of the SMA-composite beam, closed-loop control is used. The buckling and postbuckling control behaviours are presented and discussed qualitatively and quantitatively on load-deflection plots considering the stacking sequence of the laminate, slenderness ratio of the beam and activation conditions of the SMA wire actuators. By maintaining the desired deflection shape with the proper reactive moment, buckling control can be extended to the postbuckling of the SMA-composite beam subjected to an external load.

초 록

본 연구에서는 형상기억합금 선을 편심하게 삽입한 복합적층 보의 좌굴 및 좌굴후 제어에 관한 실험결과를 나타내었다. 임계좌굴하중을 향상하기 위하여 형상회복모멘트의 특성을 활용하였다. 좌굴제어의 범위를 향상시키기 위해 페루프 제어를 사용하여 좌굴후 제어의 거동을 검토하였다. 이러한 좌굴제어 실험을 통하여, 임계좌굴하중을 증가시키고 좌굴모드가 반대방향으로 변화하는 거동을 보의 세장비 및 기하학적 초기결함, 형상기억합금 선의 삽입 위치 등을 고려하여 하중-변위의 결과로부터 정량적, 정성적으로 분석하였다. 적당한 형상회복모멘트를 이용하여 원하는 변형형상을 유지함으로써 외부하중을 받는 보의 좌굴후 제어에서도 적용할 수 있다.

1. 개 요

복합재료는 비강성이나 비강도 면에서 우수하여 다

양한 구조물의 얇은 두께를 갖는 구조요소들에 널리 사용되고 있다. 이러한 두께가 얇은 복합적층 구조물은 비교적 낮은 하중에서도 탄성 범위 내에서 좌굴

* 국방과학연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

*** 항공우주연구소

(buckling)이 발생하게 된다. 따라서 좌굴은 얇은 두께의 구조물의 설계에서 중요한 설계기준이 된다 [1]. 복합적층 구조물의 좌굴에 대해 현재까지는 섬유방향과 적층순서 및 기하학적 조건 등을 고려하여 임계좌굴하중을 증가하도록 하는 것이 좌굴연구의 주요 목표가 되어 왔다. 그러나 예측하기 어려운 하중조건 및 온도 변화가 심한 환경조건 하에서 사용되는 유연한 복합적층 구조물의 좌굴은 여전히 구조물의 건전성에 큰 영향을 미친다. 따라서 좌굴이 발생하는 경우 원하는 시점에서 좌굴하중을 향상하거나 좌굴을 억제하는 등의 능동좌굴제어 분야가 최근 들어 많은 주목을 받고 있다. 이러한 좌굴제어를 통하여 항공/우주 구조물에서 활용하는 유연한 복합재료 구조물의 좌굴거동을 제어할 수 있으므로 보다 신뢰성 있는 구조물의 설계 및 제작이 가능하다. 좌굴에 취약한 복합적층 구조물의 안정성을 향상시키기 위해 구조물 자체적으로 힘 또는 모멘트를 발생하는 동작기능을 부여할 수 있는 지능형 재료를 사용한 지능형 구조물의 개념이 도입될 수 있다 [2]. 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 [3-4]. 좌굴과 같은 정적특성을 향상시키기 위해서는 상대적으로 큰 기계적 변형률과 제어력을 가진 지능형 재료가 요구되므로 작동소재로서 형상기억합금이 많이 사용되고 있다.

이러한 특성의 형상회복력을 활용하여 복합재료 구조물의 진동제어 [5], 음향제어 [6], 피로 [7] 및 형상제어[8] 등의 구조물 특성을 변화시키는 다양한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 형상기억합금을 삽입한 복합적층 구조물의 좌굴 및 좌굴후 제어에 관한 연구는 미비한 실정이다. Baz등 [9]은 형상기억합금 선을 복합재료 보의 중립면에 삽입한 슬리브(sleeve)안에 넣고 선을 양단에서 고정된 모델을 이용하여 능동좌굴제어 실험을 수행하였다. 제어하지 않은 보에 비하여 3배의 임계 좌굴하중 증가의 결과를 보였다. Thompson등 [10]은 복합적층 판의 중립면에 삽입한 슬리브안에 하중방향과는 수직인 상태로 형상기억합금을 삽입하고 선을 외부에 고정하여 좌굴후 거동을 연구하였다. 그들은 좌굴거동은 열영향으로 말미암아 적층순서에 의존한다는 실험결과를 발표하였다. 기존의 연구모델 [9-10]은 형상기억합금 선을 외부에서 고정하는 경계조건

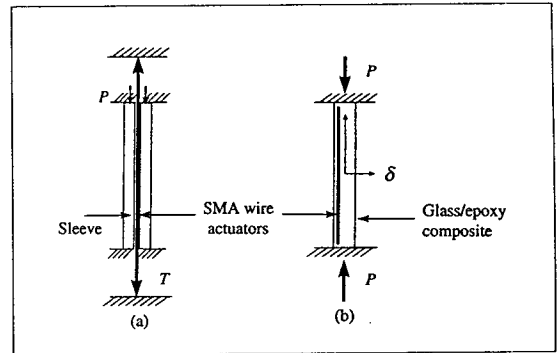


Fig. 1. Models for buckling control of a composite beam with embedded SMA wire actuators. a) model of previous studies [9], b) model of this study

으로 말미암아 실제 구조물의 적용에 한계를 가진다. 저자는 [11] 형상기억합금 선을 편심하게 삽입한 실험 시편과 개루프 제어(open-loop control)를 이용한 선의 작동방법으로 복합적층 보의 좌굴제어 거동에 관한 연구를 수행하여 임계좌굴하중을 증가시키고 변형형상의 변화의 결과를 얻었다. 또한 실험결과를 바탕으로 형상기억합금 선의 영향을 설명하는 이론적인 식도 제시하였다. 그러나 기존의 좌굴제어의 경우, 열영향으로 말미암아 형상회복모멘트의 영향이 미소 횡방향 변형에 국한하였으며 좌굴후 제어의 경우에는 그 영향이 거의 무시할 정도였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 복합적층 보의 좌굴후 제어에 적용할 수 있고 열영향을 최소화하면서 좌굴제어의 보다 좋은 성능을 가질 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 외력에 의하여 복합적층 보가 좌굴이 발생한 상태에서 형상회복모멘트(shape recovery moment)를 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 고찰한다. 그림 1은 기존의 연구모델 [9]과 본 연구에서 채택한 연구모델의 차이를 개략적으로 나타내었다.

2. 문제 정의

그림 1과 같이 형상기억합금 선이 한쪽으로 편심하게 삽입되고 양단고정인 복합적층 보가 외부 압축하중

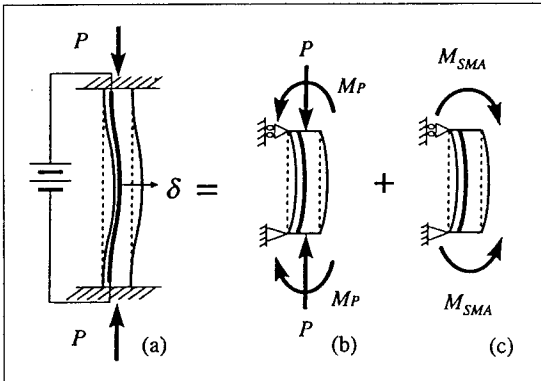


Fig. 2. Effect of the reactive moment, M_{SMA} , for the buckling control with equivalence between fixed-ends condition of length $2l$ and simply-supported condition of length l . a) the SMA-composite beam, b) bending moment, M_P , subjected to an external load, c) reactive moment, M_{SMA}

에 의해 좌굴이 발생한 이후 형상기억합금 선의 형상회복력을 활용하는 문제이다. 보에 삽입한 형상기억합금 선을 상변태 온도 이상으로 가열할 경우 상당한 형상회복력 및 형상회복모멘트가 발생한다 [11-13]. 형상회복력이 좌굴거동에 미치는 영향을 해석적으로 표현하기 위하여 보의 미소 횡방향 변위 범위내에서 좌굴거동을 나타내는 오일러 식 [14]과 형상기억합금 선의 형상회복력에 의한 내부응력 상태를 외부응력 상태로 증가하여 형상회복력의 영향을 평가할 수 있는 cut and paste 방법 [15]을 이용한다. 그림2(c)에 나타난 바와 같이 보의 길이방향으로 균일한 모멘트 분포가 발생하는 상태로 보의 중간지점에서의 모멘트는 아래 식(2)와 같이 단순하게 된다.

$$M_{SMA} = P_{SMA} \times e \tag{1}$$

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

여기서 P_{SMA} 는 형상회복력, e 는 삽입된 형상기억합금 선의 중립축에 대한 편심량, α 는 보의 임계하중에 대한 축하중 P 의 비이다. 양단지지 보 상태를 단순지지 보 상태로 등가 시킨 후 복합적층 보의 중간지점에서의 굽힘모멘트는 식(3)과 같이 표현된다. M_{SMA} 는 형상기억합금 선에 의한 형상회복모멘트이고 보의 길이방향으로의 모멘트 분포는 순수굽힘으로 표현된다. 형상회복력에 의한 형상회복모멘트의 방향은 양단고정경

우 반력을 고려하여 그림 2(c)에 표시한 바와 같이 시계방향 즉 좌굴을 방지하는 방향의 모멘트를 가지게 된다. 길이 $2l$ 인 양단고정의 좌굴문제를 길이 l 인 단순지지 보로 등가 시킨 후 [14] 보의 전체 굽힘모멘트와 횡방향 변위는 형상회복모멘트 M_{SMA} 에 의한 항과 외부압축하중에 의한 항의 합을 서로 중첩하여 아래 식 (3)와 같이 표현된다.

$$M = M_P - M_{SMA} \tag{3}$$

미소 횡방향 처짐 내에서, 형상회복모멘트 M_{SMA} 와 외부하중에 의한 모멘트 M_P 의 중첩으로 형상회복모멘트가 작용하는 보의 좌굴거동을 나타낼 수 있다. 보의 좌굴거동은, 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 스냅스루(snapthrough)와 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 스냅스루가 발생한다.

3. 실험

3.1. 실험시편

본 연구에서 사용된 시편은 유리섬유에폭시(주) 선경인더스트리의 프리프레그를 사용하였으며 제원은 길이 $2l=170\text{mm}$, 폭 23mm , 두께 1.0mm 의 복합적층 보에 삽입한 형상기억합금 선은 6개, 직경 0.38mm 로 외부 구조물에 고정하지 않았다. 편심하게 삽입한 형상기억합금 선을 형상회복모멘트로 활용하기 위하여 실험시편은 아래의 사항을 고려하여 설계하였다. 1) 레진 리치 영역 등 내부결함을 최소화하기 위하여 $[0]_4$ 사이 에 삽입, 2) 선을 시편의 두께방향으로의 삽입위치를 일정하게 유지하기 위하여 $[90]$ 층을 인접하여 적층. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 적층순서는 시편(A)의 경우 $[0_4/90]_s$, 시편(B)의 경우 $[90/0_4]_s$ 으로 4mm 간격과 중립축에서 각각 $0.3, 0.2\text{mm}$ 만큼 한쪽으로 편심하게 삽입하였다. 그림 3(b)는 실험시편(A)의 단면 광학현미경 사진으로 0° 층과 나란히 형상기억합금 선을

Table 1. Material properties of Glass/epoxy and wires

	Glass/epoxy	Wires	
		SMA	NiCr
E_1 (Gpa)	40.77	A 50.0 M 20.2	
E_2 (Gpa)	11.70		
ν_{12}	0.31	0.33	
G_{12} (Gpa)	4.89		
Resistance(Ω /m)		10.0	9.8
Diameter(mm)		0.38	0.4

(A : austenite, M : martensite)

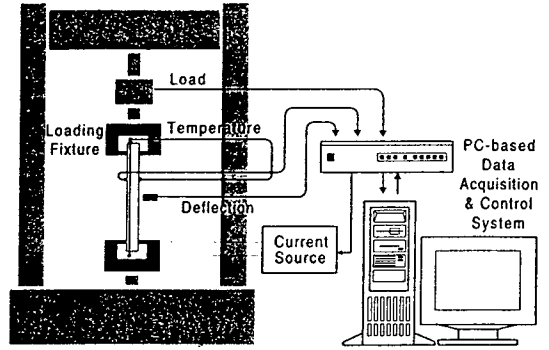


Fig. 4. Experimental setup for the buckling control test

및 형상기억합금 선 등의 물성치를 표 1에 나타내었다. 본 실험에서는 초기 작동횟수에 따라 형상회복력이 감소하는 반복효과(cyclic effect) [16]를 최소화하기 위해 냉장고에 보관하여 마르텐사이트 상으로 만들고, 형상회복력이 최대값이 아닌 증가하는 온도범위를 고려하여 활용하였다. 또한 형상기억합금의 초기변형률에 따른 형상회복력의 특성 실험결과를 바탕으로 초기변형률이 없는 상태로 삽입하였다 [17]. 본 실험에서 이용한 형상기억합금 선의 오스테나이트 시작온도 (A_s)는 45℃이며 외부 환경온도는 18℃이다.

3.2. 좌굴제어 실험

좌굴제어 실험은 기계식 구동의 INSTRON사의 시험기를 이용하여 변위제어로 수행하였다. 시편에 작용하는 압축하중 및 횡방향의 변형을 관찰하기 위하여 로드셀과 비접촉식 갭센서를 이용하였으며 양단고정의 경계조건으로 하였다. 센서에서의 신호가 실시간으로 제어기에 전달되어 미리 정해놓은 변위(δ_{act})와 비교하고 형상기억합금 선의 작동을 결정하게 된다. 보의 횡방향 변위가 미리 정해 놓은 변위에 도달하면, 제어기는 형상기억합금 선을 작동하는데 필요한 전류를 발생하는 전원공급기로 전달되도록 하였다. 그림 4는 좌굴제어를 위한 실험장비 구성도를 나타내며 형상기억합금 선의 작동은 전기저항 발열방법에 의해 이루어진다.

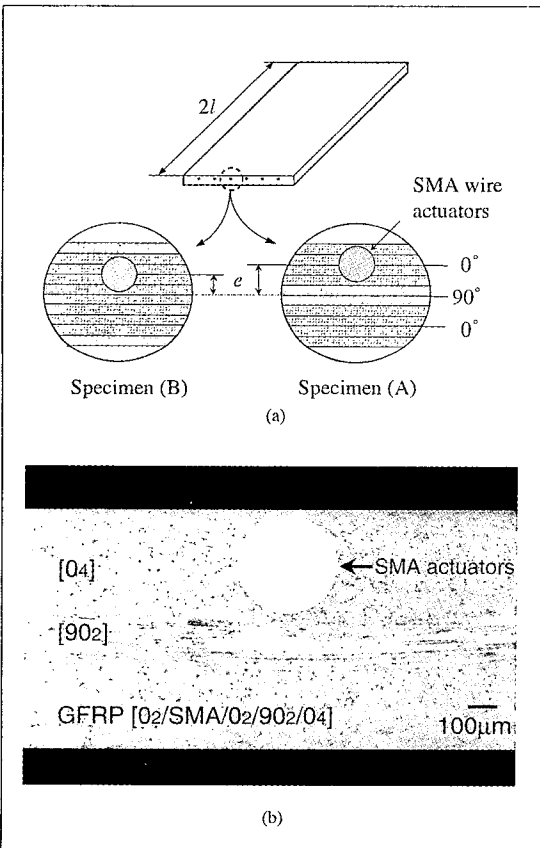


Fig. 3. Cross sections of SMA-composite beam of a) schematic diagram, b) optical micrography

삽입한 경우 레진리치 영역을 최소화할 수 있고, 90° 층을 인접하게 적층함으로써 선의 삽입위치를 조절할 수 있음을 나타내고 있다. 본 실험에서 이용한 복합재료

4. 결과 및 토의

형상회복모멘트, M_{SMA} 의 영향으로 보의 변형형상을 변형전의 형상으로 회복하여 같은 압축하중 하에서도 보에 작용하는 굽힘모멘트를 감소함으로써 좌굴거동에

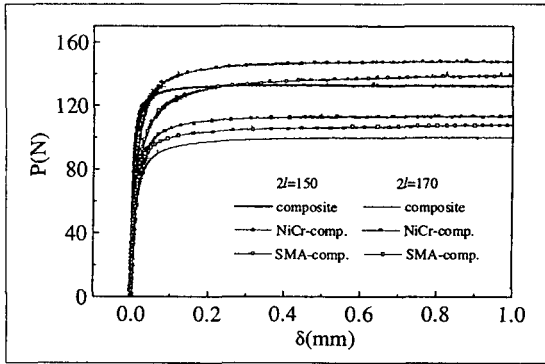


Fig. 5. Load-deflection curves of the SMA-composite beam and the NiCr-composite beam subjected to external compression load with different lengths (specimen A)

영향을 미치게 된다. 이러한 효과는 변위-하중곡선에서 임계좌굴하중을 증가 및 변형형상의 변화로 나타나며, 그림에서 표시된 no activation은 단지 외부 압축하중에 의한 좌굴거동을 나타낸다. 편심하게 삽입함으로써 발생할 수 있는 단면의 온도분포에 의한 모멘트의 영향을 배제하기 위하여 니크롬 선(NiCr)을 삽입한 시편과 비교하였다. 형상기억합금 선에 비해 유사한 직경과 저항 값을 가지나 형상회복력의 효과가 없는 니크롬 선을 삽입한 시편은 열하중 상태만 나타내고 형상기억합금 선을 삽입한 시편은 같은 열하중과 형상회복력을 나타내고 있다.

4.1. 기계적 특성

좌굴제어 실험에 앞서, 형상기억합금 선과 니크롬 선을 삽입하여 보강 함으로써 발생할 수 있는 기계적 특성을 비교하여 좌굴제어 실험시편의 타당성을 검토하였다. 그림 5은 영률이 서로 다른 형상기억합금 및 니크롬 선을 편심하게 삽입한 시편과 순수 복합적층 보의 외부하중에 의한 횡방향 변위를 나타내었다. 예상한 바와 같이 형상기억합금 및 니크롬 선을 삽입한 시편이 순수 복합재료 시편보다 임계좌굴하중이 각각 8%, 12% 증가함을 보였다. 이는 선을 복합재료에 삽입하여 강화한 효과로, 서로 다른 두 선을 삽입한 시편끼리는 임계좌굴하중의 차이가 무시할 만하며 본 연구에서는 굽힘강성 EI의 영향을 무시하였다. 굽힘강성 EI는 임계좌굴하중에 비례하며, 적층순서를 조절함으로써 증가함을 알 수 있다. 시편의 길이 2l=170mm이고 순수한 복합적층 보의 경우, 임계좌굴하중의 실험결과 값은 오일러 이론과 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 도표 2

Table 2. The critical buckling loads

unit : N

Stacking Sequence	$P_{cr}(FEM)$	$P_{cr}(Euler)$	$P_{cr}(Experiment)$
[90/0] _s	70.4	71.5	63.5
[0/90] _s	106.9	109.0	100.1

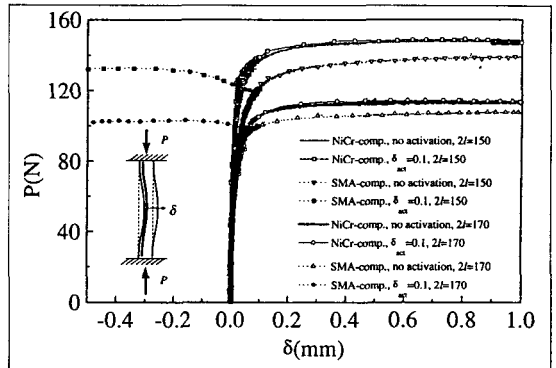


Fig. 6. Load-deflection curves of the SMA-composite beam and the NiCr-composite beam (specimen A)

에 나타내었다. 또한 본 실험에서는 좌굴거동에 중요한 변수인 세장비 l/r의 영향을 고려하였다. 시편의 길이 2l=170, 150mm에 대해 변화하여 편이상 세장비를 보의 길이 2l로 나타내었다.

4.2. 형상회복모멘트 M_SMA의 영향

그림 6는 외력이 작용하여 보의 횡방향 변형이 발생한 상태에서 ($\delta_{act}=0.1mm$)형상기억합금 및 니크롬 선에 전기저항 발열(2A, 2sec)로 작동하여 얻은 실험 결과를 나타내고 있다. 편심하게 삽입한 형상기억합금 선의 가열때문에 발생하는 복합재료 보 두께 방향으로의 온도분포에 의한 모멘트가 좌굴거동에 어떠한 영향을 미치는 지 검토하였다. 전기저항 발열로 작동하는 경우 니크롬 선을 삽입한 시편은 단지 단면 온도분포에 의한 모멘트를 받는 상태를 나타내고 형상기억합금 선을 삽입한 시편은 온도분포에 의한 모멘트와 형상회복모멘트를 받는 상태이다. 니크롬 선을 삽입한 시편은 외부하중에 의한 좌굴거동과 거의 동일하나 형상기억합금 선을 삽입한 시편은 형상회복모멘트 M_{SMA} 의 영향으로 스냅스루가 발생하였다. 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 스냅스루의 거동은 형상회복모멘트 M_{SMA} 가 M_p 보다 지배적으로 크기 때문이다. 그림 6의 결과로부터, 복합재료 보 두께 방향으로의 온도분포에 의한 영향은 무시할 수 있고 형상회복모멘트, M_{SMA} 의 영향

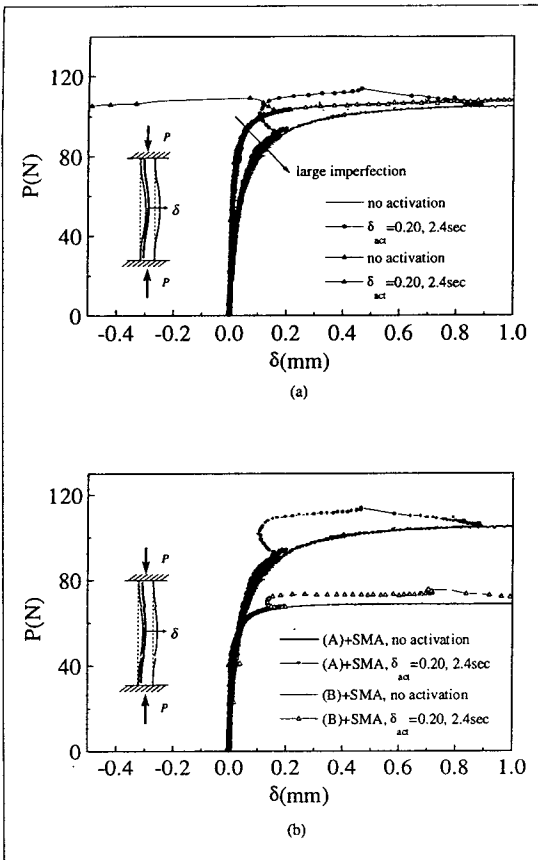


Fig. 7. Load-deflection curves of the SMA-composite beam with different a) the geometric initial imperfections (specimen A), b) the stacking sequence. (B)+SMA indicates specimen (B) with embedded SMA wire actuators

을 좌굴제어에 활용할 수 있다.

4.3. 기하학적 초기결함 및 적층순서의 영향

그림 7(a)는 기하학적 초기결함 정도에 따른 좌굴제어 거동의 실험결과로 복합적층 보의 기하학적 초기결함량 a부터 상대적인 변위를 측정한 실험결과들을 비교를 위해 영점으로 조정하였다. 비교적 초기결함량이 큰 경우 미소 횡방향 변위 범위에서($\delta_{act}=0.1mm$) 좌굴하중만을 증가시키는 거동을 보였다. 이러한 향상된 좌굴거동은, 식(2)와 같이 기하학적 초기결함량 a는 외부하중에 의한 굽힘모멘트 M_p 와 비례하여, 좌굴거동을 결정함에 있어 지배적이기 때문으로 설명된다. 반면, 초기결함량이 작은 경우는 좌굴거동을 결정함에 있어 형상회복모멘트 M_{SMA} 가 M_p 보다 크기 때문이다. 이러한

결과로부터, 형상회복모멘트가 기하학적 초기결함 정도에 따라 향상된 좌굴거동 및 스냅스루의 현상으로 나타난다.

그림 7(b)는 적층순서를 변화함으로써 형상기억합금 선을 삽입한 보의 서로 다른 굽힘강성을 가진 하중-변위의 실험결과를 나타내고 있다. 2암페어, 2.4초 동안의 작동, $\delta_{act}=0.2mm$ 에서의 작동하에서, 실험시편 (A)와 (B)의 좌굴거동은 각각 임계좌굴하중이 약간의 증가를 나타내고 있다. 형상기억합금 선의 서로 다른 삽입위치와, e, 서로 다른 적층순서로 인하여 실험시편 (A)의 형상회복모멘트 M_{SMA} 와 굽힘강성 EI는 (B)의 값보다 약 1.5배정도 크다. 좌굴제어 거동에 관련된 변수가 많기 때문에, 실험시편 (A)와 (B)의 하중-변위의 결과를 직접적으로 비교하기 어렵지만, 형상회복모멘트는 제어하지 않은 보의 거동과 비교하면 좌굴거동에 확실히 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 좌굴제어는 형상회복모멘트의 크기를 조절함으로써 보다 견고한 구조물까지도 적용할 수 있다.

4.4. 작동시간에 의한 영향과 보의 횡방향 변위값 δ_{act} 의 영향

그림 8(a)는 형상기억합금 선의 작동시간 변화에 따른 실험결과를 나타내었다. 전기저항발열방법에 의한 작동시간의 변화는 삽입한 형상기억합금의 온도변화를 의미하고, 형상회복력의 주요 변수인 온도의 상승은 곧 형상회복력의 증가를 의미한다. 외부압축하중에 의해 보의 횡방향 변형이 발생한 상태에서 ($\delta_{act}=0.1mm$) 작동시간이 2-3초일 경우의 좌굴거동은 임계좌굴하중을 증가시키는 반면 4초일 경우 형상회복모멘트 M_{SMA} 가 증가하여 급격한 형상의 변화 즉 스냅스루를 초래하게 된다. 보의 좌굴거동을 결정함에 있어 형상회복모멘트 M_{SMA} 가 M_p 보다 크기 때문이다. 형상회복모멘트를 이용한 능동좌굴제어 실험결과에서 형상회복력을 활용하지 않는 즉 제어를 하지않은 결과에 비하여 하중지지 능력을 증가시키고 또한 변형형상을 변화시킬 수 있음을 나타내고 있다.

형상회복력의 작동 기준인 보의 횡방향 변위를 변화시키면서 좌굴거동의 실험결과를 그림 8(b)에 나타내었다. 횡방향 변위가 비교적 적을 경우($\delta_{act}=0.1, 0.2mm$)는 좌굴모드가 반대방향으로 변화하는 스냅스루가 발생하는데 비해 클 경우($\delta_{act}=0.3, 0.5mm$)는 스냅스루의 현상이 없이 좌굴하중이 증가하는 현상을 보였다. 이러한 결과로부터 이러한 향상된 좌굴거동 및

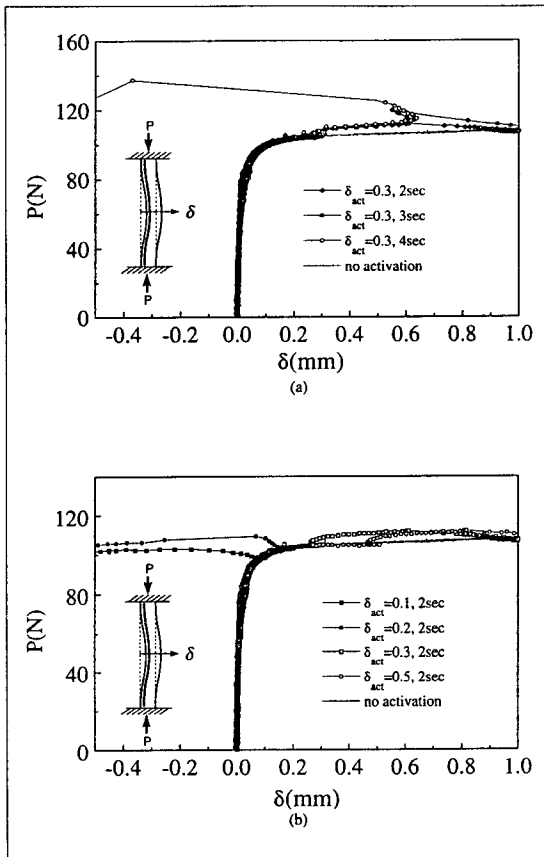


Fig. 8. Load-deflection curves of the SMA-composite beam (specimen A) with different a) activation time, b) activation starting position of deflection.

스냅스루 현상의 원인은 형상회복모멘트 M_{SMA} 영향임을 알 수 있다. 그림 8(b)에서 좌굴후 변형상태에서는 M_{SMA} 의 영향이 좌굴 이전의 미소변형의 경우에 비하여 지배적이지 못함을 알 수 있다. 이는 형상기억합금 선의 작동에 의하여 수반되는 복합적층 보의 열팽창에 의한 열하중은 급작스러운 좌굴을 유발하기 때문에 좌굴후 변형이 발생하기 전인 미소 변형에 국한하여 M_{SMA} 영향을 받게 된다. 이러한 연구결과를 바탕으로 보의 좌굴후 제어에 적용할 수 있고 열영향을 최소화 하면서 좌굴제어의 보다 좋은 성능을 가질 수 있는 제어방법이 필요하다.

4.5. 제어 방법의 영향

형상회복력의 특성을 이용하는 구조물의 좌굴제어는 좌굴을 억제하고 좌굴후 거동의 영향을 감소하기 위하

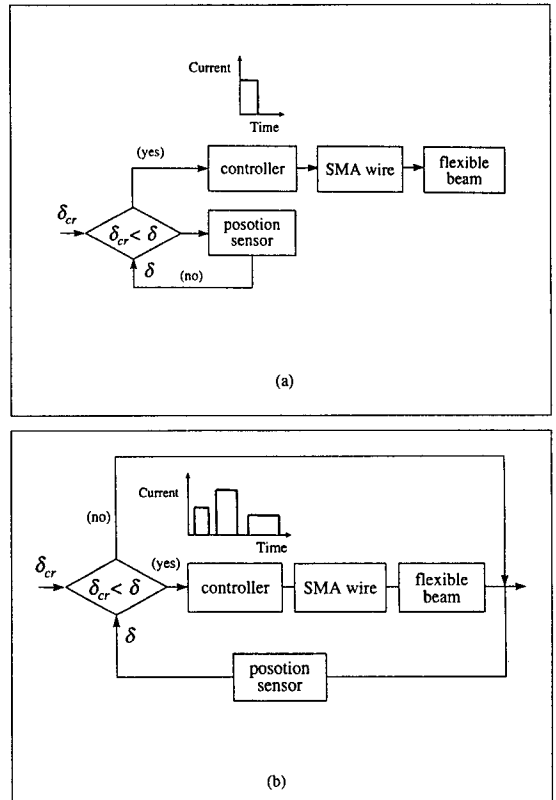


Fig. 9. Block diagram of a) open-loop, b) closed-loop control system

여 변형된 형상에서 원래의 형상으로 되돌아 갈 수 있도록 하는 개념이다. 원하고자 하는 형상을 유지하기 위한 적절한 형상회복모멘트를 계산하기 위해서는 천이온도에 따른 선의 온도, 응력, 변형률, 마르텐사이트의 분율로 표현되는 구성방정식이 필요하다 [18]. 따라서 정확한 형상회복력을 알기 위해서는 선의 작동중 천이온도를 측정하여야 한다. 전류가 통하는 형상기억합금 선의 전기적 절연, 외부 환경조건 및 열전대의 비드와 선의 접촉부분에서의 틈새등에 의한 영향으로 실제 실험에서 형상기억합금 선의 온도를 정확히 측정하는 것은 오차가 따른다 [19]. 더욱이 좌굴제어 거동은 그림 7, 8에 나타난 바와 같이 형상기억합금 선의 작동조건, 복합적층 보의 초기결합과 적층순서 등의 다양한 변수의 영향을 받는다. 이러한 형상회복력 및 좌굴제어 거동의 변수의 불확실성을 고려하면 원하고자 하는 형상을 유지하기 위한 적절한 형상회복모멘트를 활용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 좌굴 및 좌굴후 제어

에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 좌굴제어를 위하여 개루프 제어와 폐루프 제어를 적용하고 서로 비교하였다. 형상기억합금 선의 작동방법, 개루프 제어와 폐루프 제어의 제어시스템을, 그림 9(a),(b)에 나타내었다.

4.5.1. 개루프 제어 (open loop control)

앞서 언급한 바와 같이, 보의 휨방향 변위가 미리 정해 놓은 변위에 도달하면, 제어기는 형상기억합금 선을 작동하기 위하여 고정된 전류의 크기와 시간동안 전류를 공급하게 된다. 그 결과 형상회복모멘트 M_{SMA} 는 그림 7(b)에 나타낸 바와 같이 좌굴후 거동에서 좌굴제어에 필요한 형상회복력이 발생되기 전에 열하중이 작용하여 좌굴제어의 효과가 적어진다. 형상기억합금 선의 가열은 의도하지 않는 복합재료의 온도상승을 유발시켜 압축하중이 작용하게 되어 결국 보의 급작스러운 좌굴이 발생하게 된다. 그림 9(a)와 같이 개루프 제어를 이용한 임펄스(impulse) 형태의 전류작동은 1) 최적의 좌굴제어를 위한 공급전류의 크기와 작동시간의 결정이 어렵고 2) 좌굴후 거동 이전 상태인 미소 휨방향 변형 범위에서만 제한되는 단점이 있다.

4.5.2. 폐루프 제어(closed loop control)

개루프 제어의 단점을 극복하기 위하여 형상기억합금 선의 작동에 수반하는 의도하지 않는 열 압축하중을 최소화하면서 보의 좌굴후 제어까지의 확장을 위하여 폐루프 제어를 이용하였다. 형상기억합금 선의 작동 조건으로 폐루프 제어는 그림 9에 나타낸 바와 같이 개루프 제어를 수정함으로써 얻을 수 있다. 보 중앙의 휨방향 변위의 측정치와 미리 정해 놓은 값, 원하고자 하는 변형형상,과의 차이를 최소화함으로써 폐루프 제어를 이용한 제어목적은 보의 원하는 변형형상을 유지하기 위하여 최적의 작동시간과 전류의 크기를 자동적으로 결정하는 것이다. 본 실험에서 이용된 제어 알고리즘과 기존의 연구 [9]에서 적용된 제어 알고리즘과의 기본적인 차이는 다음과 같다. 기존의 연구는 형상기억합금 선을 인장력을 가지는 선의 장력을 이용하는 모델에서 비례제어를 적용하였으나 반면, 본 실험에서는 형상회복력을 형상회복모멘트로 활용하여 최적 좌굴 및 좌굴후 제어를 가능하게 하는 이산 시간 변수의 제어 알고리즘을 채택하였다. 이러한 두 폐루프 제어의 차이는 근본적으로 형상기억합금 선의 삽입조건과 경계조건의 차이에 있다.

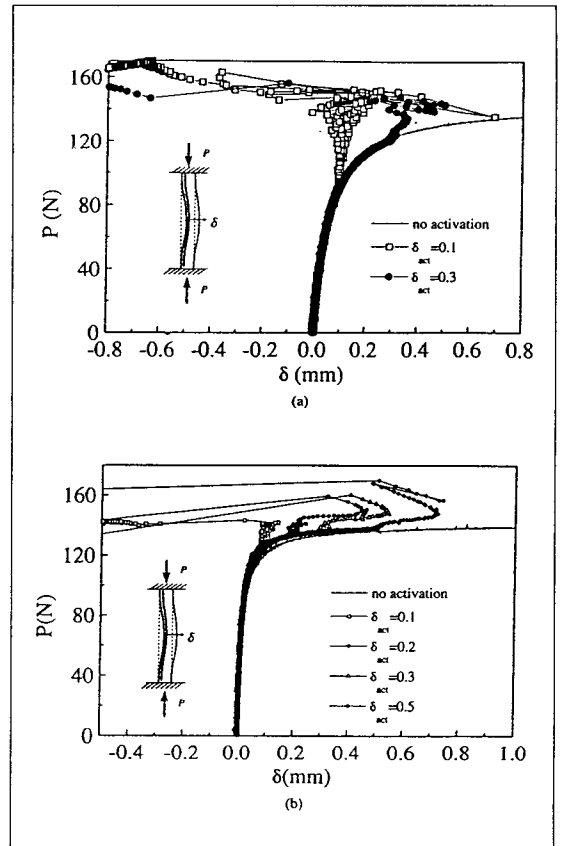


Fig. 10. Load-deflection curves of the SMA-composite beam (specimen A) for the closed-loop control at $2l=150\text{mm}$ with a) large geometrical initial imperfections, b) small geometrical initial imperfections

그림 10(a) 와 (b)는 형상기억합금 선의 작동을 위한 폐루프 제어가 좌굴제어 거동에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보기 위해 시편길이 $2l=150\text{mm}$ 에서 기하학적 초기결합량의 크기에 따라 나타내었다. 보의 휨방향 변위가 δ_{acr} 를 초과하면, 최적의 전류 크기와 작동시간을 가지며 작동하여 δ_{acr} 상태로 변형형상이 회복하고, 보의 휨방향 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. 결과적으로 보의 변형형상은 형상기억합금의 작동하는 동안 작동 휨방향 변위, δ_{acr} 와 굽힘강성에 관계없이 원

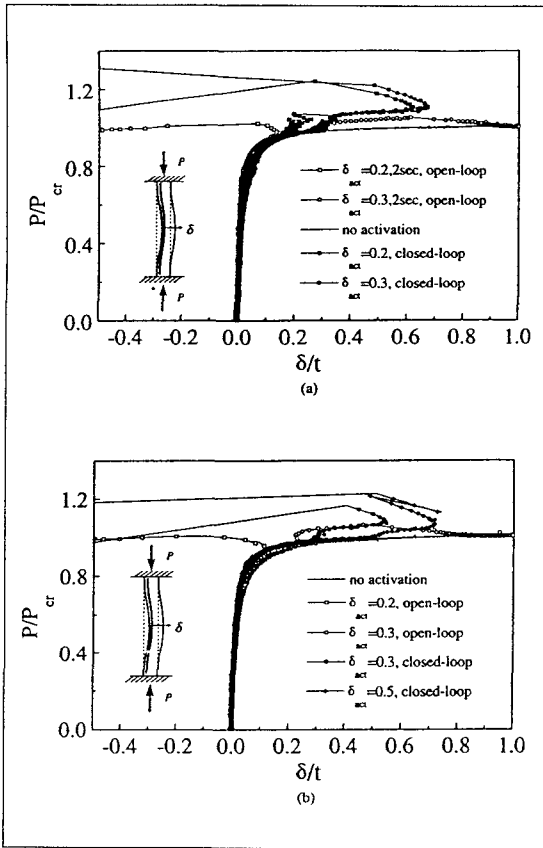


Fig. 11. Comparison load-deflection curves of the SMA-composite beam (specimen (A)) between open-loop and closed-loop control with different specimen lengths a) $2l=170\text{mm}$, b) $2l=150\text{mm}$.

하는 변형형상을 유지하기 위하여 적당한 M_{SMA} 가 작용함으로써 δ_{act} 값을 유지할 수 있게 된다. 그림 10에 나타난 바와 같이 좌굴제어의 최종적인 결과로서 스냅 쓰루의 발생은 자연대류에 의한 냉각상태에서 전기저항 발열작동에 의해 증가된 형상회복모멘트의 영향으로 설명할 수 있다.

그림 11에 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 나타난 선은 각각 개방형과 폐쇄형 제어회로를 이용한 좌굴제어 거동을 나타낸다. 개방형 제어회로에 의한 좌굴후 제어거동의 결과 형상회복모멘트는 임계좌굴하중의 증가 및 변형된 보의 변형

형상 회복에 영향을 크게 주지 않는다. 그러나 폐쇄형 제어회로에 의한 좌굴후 제어거동은 원하는 보의 변형형상을 유지함으로써 보의 하중지지 능력을 증가시킨다. 이러한 결과로부터, 좌굴후 거동에서도 좌굴제어가 가능하여 향후 상변태를 유발하는 온도변화에 환경조건과 예측하기 어려운 하중조건 하에서 활용되는 유연한 구조물의 좌굴제어 및 형상제어에 적용 가능성이 제시할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 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. 이는 형상기억합금 선은 유연한 복합재료 구조물의 좌굴 및 좌굴후 제어에 유용하게 활용될 수 있다.
2. 폐쇄형 제어회로를 이용하여 삽입한 형상기억합금 선의 형상회복모멘트로 원하는 변형형상을 유지함으로써 개방형 제어회로에 의한 것보다 좌굴후 제어를 포함하여 제어능력의 보다 좋은 성능을 가진다. 이러한 좌굴후 제어 거동의 결과를 바탕으로 항공기 및 우주 구조물 등의 유연한 구조물의 형상 및 좌굴제어에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 좌굴모드가 결정되어 있는 복합재료 쉘 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.

참 고 문 헌

1. Britvec, S.J., "Stability and optimization of flexible structures," Birkhauser, 1995.
2. Loughlan J., "The buckling of composite stiffened box sections subjected to compression and bending," *Compo. Struct*, Vol. 35, 1996, pp.

101-116.

3. Perkins, J., "Shape memory effects in alloys," Plenum Press, New York, 1975.

4. "Technical information of shape memory alloys," Inc. (<http://www.sma-inc.com>).

5. Baz, A., Poh, S. Ro, J. and Gilheany, J., "Control of the natural frequencies of Nitinol-reinforced composite beams," *J. of Sound and Vibration* Vol. 185, No.1, 1995, pp. 171-185.

6. Rogers, C.A., "Active vibration and structural acoustic control of shape memory alloy hybrid composites: Experimental results," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, No. 6, 1990, pp. 2803-2811.

7. Furuya, Y., "Design and material evaluation of shape memory composites," *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.*, Vol. 7, 1996, pp. 321-330.

8. Kudva, J., Jardine, P., Martin C. and Appa, K., "Overview of the ARPA/WL smart structures and materials Development-Smart wing Contract," *Proceeding of SPIE 2721*, 1996, pp. 10-16.

9. 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.

10. 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.

11. 최섭, 이정주, 전제춘, (1998) "형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 좌굴제어", 복합재료학회, 제 11권 제6호, pp. 29-38.

12. Choi, S, and Lee, J.J. and Suh, D.C., "A study on the buckling and postbuckling control of composite beam with embedded NiTi actuators," *J. of Compo. Mater.*, 1998, submitted.

13. Sun, G. and Sun, C.T., "Bending of shape-memory alloy-reinforced composite beam," *J. of Mater. Science*, Vol. 30, 1995, 5750-5754.

14. Timoshenko, S. and Gere. J., "Theory of elastic stability," McGRAW-HILL book company, Inc, 1963.

15. Suo, Z. and Hutchison, J.H., "Interface crack between two elastic layers," *Int. J. Fracture* Vol. 43, 1990, pp. 1-18.

16. Tobushi H., P.H. Lin, T. Hattori and M. Makita., "Cyclic deformation of TiNi shape memory alloy," *JSME Int. Journal*, Vol. A38, 1995, pp. 59-67.

17. 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.

18. Liang, C. and Rogers, C.A., "One-dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for shape memory materials," *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.*, Vol. 1, 1990, pp. 207-234.

19. Leo, P.H., Shield, T.W. and Bruno, O.P., "Transient heat transfer effects on the pseudoelastic behavior of shape memory alloy wires," *Acta metallurgy and materials* Vol. 41, No. 8, 1993, pp. 2477-2485.