

## 論文

## 형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 좌굴제어 거동

최 섭\* · 이정주\*\* · 전제춘\*

**The Buckling Control Behaviours of Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wire Actuators**

S. Choi\*, J.J. Lee\*\* and J. C. Jeon\*

**ABSTRACT**

In this paper the results of experiment and analysis on the buckling behaviour of a laminated composite beam with eccentrically embedded shape memory alloy (SMA) wires are presented. The effects of the reactive moment of the embedded SMA wires on the critical buckling load and deflection shape of laminated composite beam are observed in detail from the buckling test. The increased critical buckling load and altered deflection shape due to the effects of activation of SMA wires are represented qualitatively and quantitatively on the load-deflection behaviour record. The results obtained from the buckling test confirm that the buckling resistance of a composite beam with embedded SMA wires can be increased by the use of reactive moment of the SMA wires. Based on the experimental analysis, the new formula for the buckling behaviour of a laminated composite beam with embedded SMA wires is also suggested.

**초 록**

본 연구에서는 형상기억합금 선을 복합적층 보에 한쪽으로 편심하게 삽입한 모델을 이용하여 좌굴제어 거동에 관한 실험 및 해석결과를 정리하였다. 외력에 의하여 좌굴이 발생한 상태에서 형상회복모멘트를 이용하여 변형전의 상태로 회복하게 하는 좌굴제어 실험을 통하여, 임계좌굴하중을 증가하고 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 거동을 하중-변위의 결과로부터 정량적, 정성적으로 분석하였다. 좌굴실험 결과에서 좌굴 저항성을 증가하는 거동은 형상회복모멘트의 영향임을 나타내었다. 형상기억합금 선을 편심하게 삽입한 복합재료 보의 좌굴거동을 나타내기 위하여 실험결과를 바탕으로 오일러 식과 cut and paste 방법을 적용한 해석모델을 제시하였다.

**1. 서 론**

복합재료는 비강성이나 비강도 면에서 우수하여 구조물의 경량화를 필요로 하는 항공/우주 구조물에 널리 사용되고 있다. 이러한 복합재 구조요소들은 재료자

체의 압축강도에 비해 상대적으로 매우 낮은 좌굴응력을 갖고 있으며 두께가 얇고 길이가 긴 복합적층 구조물의 특징상 기하학적 초기결함, 하중의 불일치 등으로 인한 좌굴은 구조물의 설계에서 중요한 설계기준이 된다. 무게 경량화의 설계요구조건을 만족하기 위하여 널

\* 국방과학연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

리 활용되는 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 온도변화가 심한 환경조건 하에서 사용되는 유연한 복합적층 구조물의 좌굴은 여전히 구조물의 건전성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 좌굴발생시 원하는 시점에서 좌굴하중을 향상하거나 좌굴을 억제하는 등의 능동좌굴제어 분야가 최근 들어 많은 주목을 받고 있다. 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 [1]. 이에 사용되는 지능형 재료는 주로 압전재료와 형상기억합금이 있다 [2-4]. 압전재료는 센서와 작동기로서의 특성이 우수하나 재료 특성상 대변형과 큰 하중이 요구되는 좌굴제어 분야에 적용하기 힘든 단점이 있다. 반면, 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)은 열에너지를 기계적 에너지로 변환하는 작동기로서 좋은 특성을 보유하고 있으며 이는 온도의 변화에 따라 상변태시 형상회복력(이하 형상회복력)을 발생하는 독특한 형상회복효과 및 초탄성의 성질을 가지고 있다. 이러한 형상기억합금은 냉각등의 문제로 말미암아 높은 작동 주파수 영역에서의 작동이 어려우나, 낮은 주파수 영역에서 단위체적당 큰 하중을 발생하는 대변형, 고성능 작동기로 적합하다 [2-4]. 좌굴과같은 정적특성을 향상시키기 위해서는 상대적으로 큰 기계적 변형률과 제어력을 가진 지능형 재료 [3,4]가 요구되므로 작동소재로서 형상기억합금이 많이 사용되고 있다. 이렇게 형상회복력을 구조물의 정적/동적특성을 제어할 수 있으므로 형상기억합금을 삽입한 복합재료 구조물은 작동환경의 변화에 능동적으로 대응할 수 있게 된다. 형상회복력의 특성을 이용하는 구조물의 좌굴제어는 좌굴을 억제하고 좌굴후 거동의 영향을 감소하기 위하여 변형된 형상에서 원래의 형상으로 되돌아갈 수 있도록 하는 개념이다. 이러한 좌굴제어를 통하여 항공/우주 구조물에서 활용하는 유연한 복합재료 구조물의 좌굴거동을 제어할 수 있으므로 보다 신뢰성 있는 구조물의 설계/제작이 가능하다.

형상기억합금을 이용한 좌굴거동에 관한 연구는 1990년 초부터 시작되었다 [5-13]. Rogers등 [5]은 복합재료에 삽입한 형상기억합금 선은 본질적으로 추가적인 압축하중을 유발시킨다는 연구를 수행하였다.

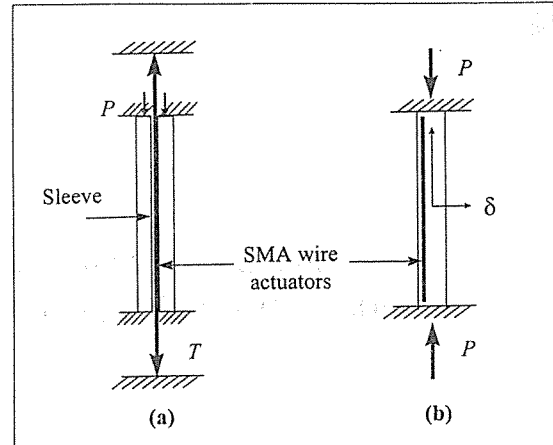


Fig. 1. Models for buckling control of a composite beam with embedded SMA wires. a) model of previous studies[8], b) model of this study

형상기억합금 선의 작동만으로 구조물의 좌굴이 발생할 수 있음을 수치적으로 계산하였다. 그는 형상회복력을 이용하여 제어에 적용할 경우 좌굴에 미치는 나쁜 영향을 고려하여야 한다는 설계고려사항을 제시하였다. Chaudhry와 Rogers [6,7]는 형상기억합금 선을 복합재료에 삽입한 모델에서 외팔보 실험을 통하여 형상회복력에 의한 압축하중은 외부하중과는 달리 좌굴에 영향이 없음을 주장하였다. 형상회복력과 같은 내부작동기는 구조물의 거동에 직접 영향을 주지않고 편심하게 삽입한 경우 단지 모멘트로만 구조물에 영향을 미친다고 주장하였다. Baz등 [8]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 [9]은 복합적층 판의 중립면에 삽입한 슬리브안에 하중방향과는 수직한 상태로 형상기억합금을 삽입하고 선을 외부에 고정하여 좌굴후 거동을 연구한 결과 형상회복력의 영향으로 인하여 임계좌굴하중이 증가하고 횡방향 변형이 감소한다는 실험결과를 발표하였다. 송호천 [10]등은 국내에서는 처음으로 형상기억합금 선을 복합적층 판에 중립면에 삽입한 모델에서 형상회복력을 이용하여 임계좌굴하중이 증가하는 좌굴거동을 조사하였다. 기존의 연구모델 [8-10]은 형상기억합금 선을 외부에서 고정하는 경계조건으로 말미암아 실제 구조물의 적용에 한계를 가진다. 아울러 복합재료의 중립면에 삽입하여 좌굴시 굽힘모멘트를 제어하는 것이

아니라 단지 외부에 고정된 형상기억합금 선(string)의 장력을 적용한 모델이다. 그림 1은 기존의 연구모델 [8]과 본 연구에서 채택한 연구모델의 차이를 개략적으로 나타내었다.

본 연구에서는 Fig.1과 같이 형상기억합금 선을 복합재료 보에 편심하게 삽입하고 선은 외부 구조물에 고정하지 않는 자유로운 상태의 경계조건을 연구 모델로 좌굴제어에 관한 실험과 해석을 수행하였다. 외력에 의하여 좌굴이 발생한 상태에서 형상회복력에 의한 형상회복모멘트를 이용하여 변형전의 상태로 회복하게 하는 좌굴제어 분야에서 최초의 실험적 연구로 판단된다. 형상기억합금 선을 편심하게 삽입한 복합재료 보의 좌굴거동을 나타내기 위하여 실험결과를 바탕으로 오일러 식과 cut and paste 방법을 적용한 해석모델을 제시하였다 [11-13].

## 2. 보의 좌굴거동 해석

그림 1과 같이 복합적층 보에 한쪽으로 편심하게 삽입한 형상기억합금 선의 형상회복력이 좌굴거동에 미치는 영향을 해석적으로 표현하기 위하여 보의 미소 횡방향 변위 범위 내에서 좌굴거동을 나타내는 오일러 식과 형상기억합금 선의 형상회복력에 의한 내부응력 상태를 외부응력 상태로 등가하여 형상회복력의 영향을 평가할 수 있는 cut and paste 방법 [14]을 이용한다. 복합적층 보에 삽입된 선의 형상회복력은 주위 복합재료와의 계면을 통하여 힘이 전달된다. 형상회복력에 의하여 선과 복합재료 경계면에 작용하는 전단응력

이 그 계면분리 강도보다 클 경우 선은 복합재료와 분리하게 된다. 이러한 계면분리는 형상기억합금을 활용한 지능형 구조물의 개발에 있어 고려하여야 할 연구 분야로 파괴역학적인 접근도 수행되고 있다. 그러나 본 연구에서는 비교적 유연한 보의 좌굴제어 거동에 적용함으로써 계면분리에 의한 영향은 무시할 수 있을 뿐만 아니라 실험이후 육안으로 확인해 본 결과 계면분리 현상은 없는 바 본 연구에서 제외하였고 선과 복합재료는 완전 접착(perfect bonding)으로 가정하였다.

축방향 압축하중이 작용하에서 양단고정된 보의 끝단에서 회전이 구속되어 편심된 하중조건에서 굽힘의 영향이 없게 된다. 따라서 양단고정된 보의 좌굴거동은 하중편심이 아닌 시편의 기하학적 초기결함만으로 고려하여야 한다. 이러한 효과에 의한 굽힘응력은 기하학적 초기형상에 의존하게 되며, 양단고정된 보의 좌굴거동은 보다 안전한 설계지침으로 유효길이계수를 도입하는 것이 바람직하다고 주장하고 있다. 이 해석방법은 Timosenko에 의해 제안된 방법이다 [15]. 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 길이가  $2l$ , 기하학적 초기결함량이  $a$  이고 양단고정 보의 모델에서 기하학적 초기결함을 포함한 곡률을 식(1)로 가정할 수 있고

$$y_0 = \frac{a}{2} (1 - \cos \frac{\pi x}{l}) \quad (1)$$

응력상태는 그림 2(b)와 같이 길이가  $l$ 이고 보의 중간지점에서  $a/2$ 크기의 기하학적 초기결함량을 가지는 단순지지 보와 같이 등가할 수 있다. 그림 2(b)와 같은 상태에서 외부압축하중에 의해서 발생하는 기하학적 초기결함량을 고려한 보의 처짐식은 식 (2)로 표현된다.

$$y = \frac{1}{1-\alpha} \frac{a}{2} (\sin \frac{\pi x}{l}) \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는 보의 임계하중에 대한 축하중  $P$ 의 비이다. 양단지지 보 상태를 단순지지 보 상태로 등가시킨 후 복합적층 보의 중간지점에서의 굽힘모멘트와 횡방향의 변위는 식(3)과 같이 표현된다.

$$M_p = \frac{aP}{2(1-\alpha)}, \quad \delta_p = \left[ \frac{a}{2(1-\alpha)} - \frac{a}{2} \right] \quad (3)$$

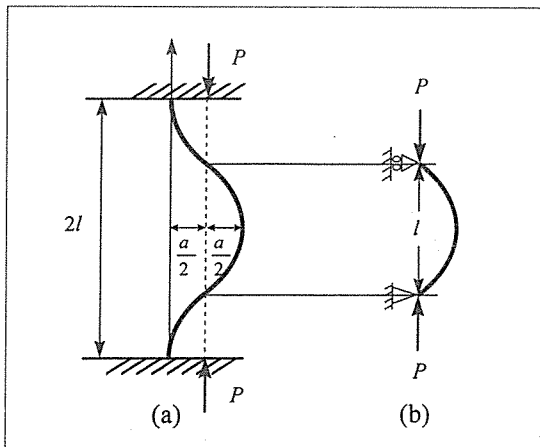


Fig. 2. Analytical model for buckling behaviour with initial geometric imperfection under fixed-ends condition

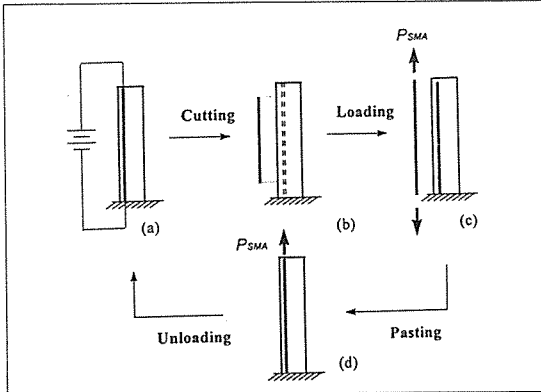


Fig. 3. Analytical model for stress analysis using the cut and paste method

cut and paste 방법을 설명하기 위해 그림 3(a)와 같이 이종재료가 완전히 접착되어 있고 균일한 온도상승의 조건에 있는 평형상태를 가정한다. 이 개념은 먼저 형상기억합금 선을 떼어내고 이후 선을 복합적층 보에 붙이는 것이다. 떼어낸 선과 보에 다시 붙인 모델의 하중상태는 그림 3(c)와 3(d)와 같다. 떼어낸 형상기억합금 선은 그림 3(b)와 같이 온도증가 상태에서 형상기억효과에 의해 수축한다. 형상기억합금 선의 모서리에서의 기하학적 경계조건을 만족하기 위해서는 그림 3(c)와 같이 형상기억합금 선에 인장력의 형상회복력  $P_{SMA}$ 이 작용한다. 형상기억합금 선을 보에 붙인 상태에서는 하중의 경계조건을 만족하기 위해서 제하(unloading)과정으로 보에 압축력의 형상회복력  $P_{SMA}$ 이 작용한다. 형상기억합금 선을 포함한 보는 생브낭의 원리 (Saint-venant's principle)에 의해 끝단에서의 영향을 무시하고 형상기억합금 선의 부피비가 매우 적어 보의 길이방향으로 균일한 압축응력이 작용한다고 가정하면 보의 길이방향으로 균일한 굽힘응력이 작용한다. 이와 같은 원리에 의해 형상기억합금 선을 편심하게 삽입한 복합적층 보는 형상회복력에 의한 모멘트에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 선의 형상회복력에 편심 삽입량을 곱하여 그림 3(c)에 나타난 바와 같이 보의 길이방향으로 균일한 모멘트 분포가 발생하는 상태로 보의 중간지점에서의 모멘트와 휨방향의 변위는 아래 식(4)와 같이 단순하게 된다.

$$M_{SMA} = P_{SMA} \times e, \delta_{MSM} = \frac{M_{SMA} l^2}{8EI} \quad (4)$$

여기서  $P_{SMA}$ 는 형상회복력이고  $e$ 는 삽입된 형상기억합금 선의 중립축에 대한 편심량이다.  $M_{SMA}$ 는 형상기억합금 선에 의한 형상회복모멘트이고 보의 길이방향으로의 모멘트 분포는 순수굽힘으로 표현된다. 양단 고정 보의 상태에서 단순지지 보의 상태로 증가하는 과정에서 회복력에 의한 모멘트의 방향을 고려함에 있어 많은 주의가 필요하다. 그림 2에 나타난 바와 같이 양단고정의 경계조건에서, 식(1)로부터 보의 양단고정 지점과 중간에서의 모멘트의 크기가 동일하고 부호만 다를 수 있다. 형상회복력에 의한 형상회복모멘트의 방향은 양단고정경우 반력을 고려하여 그림 4(c)에 표시한 바와 같이 시계방향 즉 좌굴을 방지하는 방향의 모멘트를 가지게 된다. 길이  $2l$ 인 양단고정의 좌굴 문제를 길이  $l$ 인 단순지지 보로 등가시킨 후 보의 전체 굽힘모멘트와 휨방향 변위는 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 에 의한 항과 외부압축하중에 의한 항의 합을 서로 중첩하여 아래 식 (5,6)와 같이 표현된다.

$$M = M_p - M_{SMA} \quad (5)$$

$$\delta = \left[ \frac{a}{2(1-\alpha)} - \frac{a}{2} \right] - \frac{M_{SMA} l^2}{8EI} \quad (6)$$

편이상 식(6)에서 첫째항, 외부압축하중이 작용하여 초기결함에 의한 처짐 항을 6(a)라하고 둘째항, 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 에 의한 항을 6(b)로 명기하였다. 미소 휨방향 처짐범위 내에서, 형상회복모멘트 및 휨방향 변위( $M_{SMA}$ ,  $\delta_{SMA}$ )와 외부하중에 의한 모멘트 및 휨방향

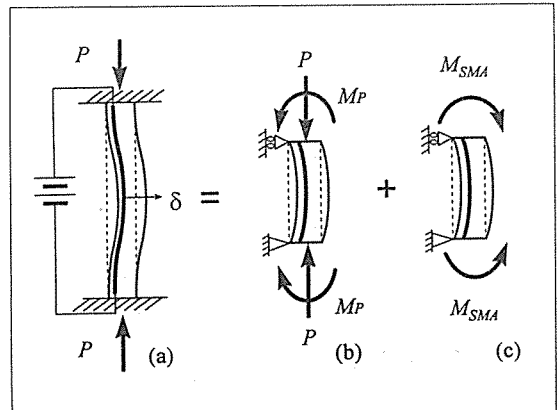


Fig. 4. Effect of the reactive moment,  $M_{SMA}$ , for the buckling control with equivalence between fixed-ends condition with length  $2l$  and simply-supported condition with length  $l$

변위 ( $M_p$ ,  $\delta_p$ )의 증첩으로 형상회복모멘트가 작용하는 보의 좌굴거동을 나타낼 수 있다. 보의 좌굴거동은, 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 스프링과 좌굴하중의 증가를 나타내는 거동, 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 와 외부압축하중에 의해 좌굴을 유발하는  $M_p$ 와의 관계로 설명할 수 있다. 즉 외부압축하중에 의한 모멘트 및 횡방향 변위( $M_p$ ,  $\delta_p$ )가 형상회복모멘트 및 횡방향 변위( $M_{SMA}$ ,  $\delta_{SMA}$ )의 항보다 클 경우 외부하중에 의한 모멘트를 형상회복모멘트가 감소시킴으로써 좌굴하중이 증가하는 거동을 보인다. 반면,  $M_{SMA}$ ,  $\delta_{SMA}$ 의 항이 지배적일 경우 스프링이 발생한다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험시편

본 연구에서 사용된 시편은 유리섬유에폭시 (주) 선경인더스트리의 프리프레그를 사용하였으며 제원은 길이 170mm, 폭 23mm, 두께 1.0mm의 복합적층 보에 삽입한 형상기억합금 선은 직경 0.38mm로 외부 구조물에 고정하지 않았다. 그림 5(a)에 나타난 바와 같이 적층순서는 시편(A)의 경우  $[0_2/SMA/0_2/90_2/0_4]_T$  이고 시편(B)의 경우  $[90_0_2/SMA/0_2/90]_T$  으로 4mm 간격과 중립축에서 각각 0.2, 0.3mm 편심하게 삽입하였다. 복합재료 적층시 형상기억합금 선을 직선형태로 삽입하고, 경화과정에서 상변태 온도 이상이므로 형상기억합금 선의 작동을 구속하기 위해 삽입위치 고정 및 성형치구를 제작하여 활용하였다. 편심하게 삽입한 형상기억합금 선을 형상회복모멘트로 활용하기 위하여 실험시편은 아래의 사항을 고려하여 설계하였다. 1) 레진리치 영역 등 내부결함을 최소화하기 위하여  $[0]_4$ 사이에 삽입, 2) 선을 시편의 두께방향으로의 삽입위치를 일정하게 유지하기 위하여  $[90]$ 층을 인접하여 적층. 그림 5(b)는 실험시편(A)의 단면 광학현미경 사진으로  $0^\circ$ 층과 나란히 형상기억합금 선을 삽입한 경우 레진리치 영역을 최소화할 수 있고,  $90^\circ$ 층을 인접하게 적층함으로써 선의 삽입위치를 조절할 수 있음을 나타내고 있다. 본 실험에서 이용한 복합재료 및 형상기억합금 선 등의 물성치를 표 1에 나타내었다.

#### 3.2 실험장치 및 실험방법

좌굴제어 실험은 기계식 구동의 INSTRON사의 시험기를 이용하여 0.01mm/분의 속도로 변위제어로 하였다. 시편에 작용하는 압축하중 및 횡방향의 변형을

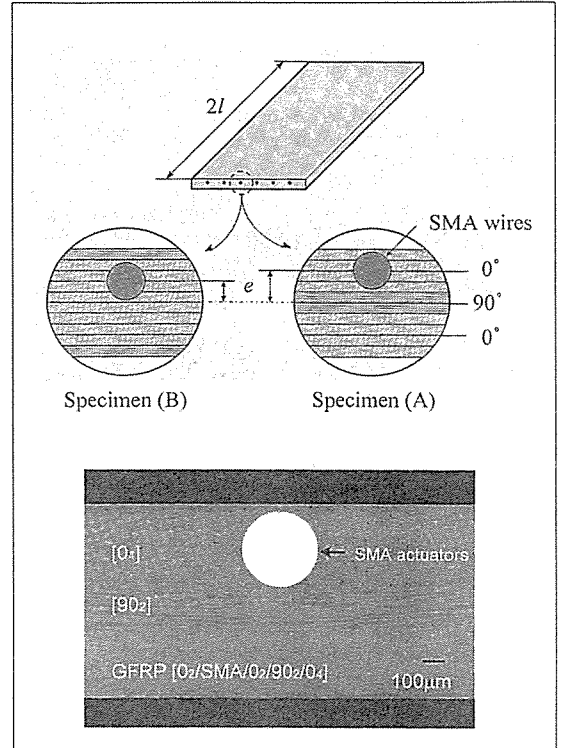


Fig. 5. Cross sections of NiTi-composite beam of a) schematic diagram, b) optical micrography

관찰하기 위하여 로드셀과 비접촉식 캡센서를 이용하였으며 양단고정의 경계조건으로 하였다. 센서에서의 신호가 실시간으로 제어기에 전달되어 미리 정해놓은 변위( $\delta_{act}$ )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. 그러므로 좌굴을 유발하는 외부 압축하중에 의한 모멘트를 상쇄하는 방향의  $M_{SMA}$ 가 발생하게 되어 외부압축하중에 의해 변형된 보의 변형전의 형상으로 회복하게 되는 좌굴제어 거동을 얻을 수 있다.

그림 6(a)는 좌굴제어를 위한 실험준비를 완료한 상태이고 6(b)는 개략적인 실험장비 구성도를 나타내며 형상기억합금 선의 작동은 전기저항 발열방법에 의해 이루어진다. 선의 작동에 의해 유발되는 복합재료의 온도영향을 최소화 하기 위하여 1,2초 동안의 임펄스 형태의 전류 작동방법을 택하였다. 형상회복력은 온도, 응력, 변형률, 마르텐사이트의 분율로 나타난다 [16]. 형상회복력을 알기 위해서는 선의 작동 중 천이온도를

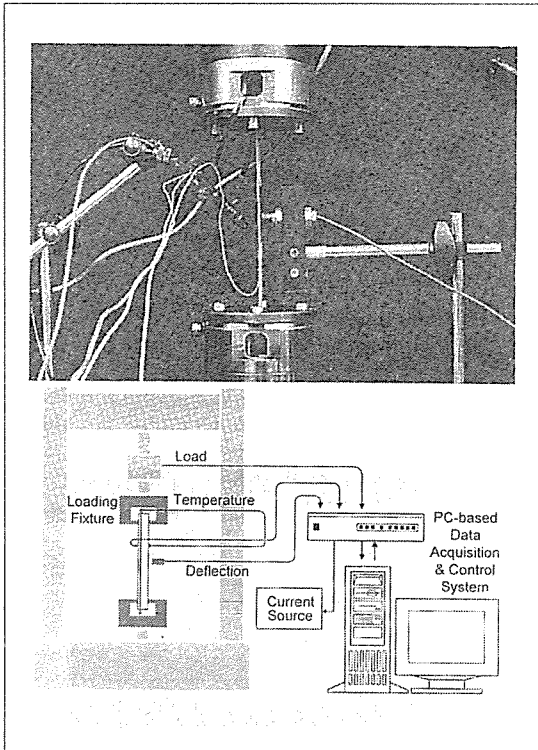


Fig. 6. Experimental setup for the buckling test

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. 형상회복력의 특성을 나타내는 형상기억합금 선의 표면 천이온도 측정은 정성적으로 파악하여야 함을 추천하고 있다 [17]. 따라서 대안으로 형상기억합금 선의 형상회복력의 크기와 형상회복모멘트의 방향을 알기 위해 니크롬 선을 삽입한 시편을 사용하여 비교하였다. 초기 작동횟수에 따라 형상회복력이 감소하는 반복효과(cyclic effect) [18]를 최소화하기 위해 냉장고에 보관하여 마르텐사이트 상으로 만들고, 형상회복력이 최대값이 아닌 증가하는 온도범위를 고려하여 활용한 실험결과 반복효과에 의한 영향은 없었다.

#### 4. 결과 및 토의

형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 의 영향으로 보의 변형형상을 변형전의 형상으로 회복하여 같은 압축하중 하에서도

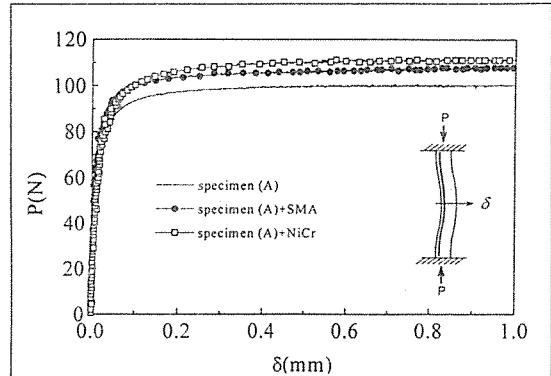


Fig. 7. Load-deflection curves for the composite beam (specimen A) with embedded SMA and NiCr wires

보에 작용하는 굽힘모멘트를 감소함으로써 좌굴거동에 영향을 미치게 된다. 이러한 효과는 변위-하중곡선에서 임계좌굴하중을 증가 및 변형형상의 변화로 나타나며, 그림에서 표시된 no activation은 단지 외력에 의한 좌굴거동이고 전기저항발열을 통한 작동(activation)은 2암페어, 2초의 작동조건을 나타낸다. 본 연구에서는 임계좌굴하중을 비교하기 위해 시편 두께의 1/10에 해당하는 횡방향 변위에만 한정하여  $\delta_c$ 으로 표현하고 그에 해당하는 하중을 임계좌굴하중이라 한다. 이 방법은 좌굴거동이 기하학적 초기결함 정도에 따라 변하지만 일반적으로 많이 적용되고 있다.

앞에서 설명한 형상회복력의 효과가 없는 니크롬 선(NiCr)을 삽입한 시편 도입의 목적은 형상회복력의 크기를 계산하고 편심하게 삽입함으로써 발생할 수 있는 단면의 온도분포에 의한 모멘트의 영향을 배제하기 위함이다. 좌굴실험에 앞서, 니크롬 선 또는 형상기억합금 선을 삽입한 시편과 순수 복합재료 시편의 기계적 특성을 비교하여 좌굴제어 실험시편의 타당성을 검토하였다. 그림 7은 영률이 서로 다른 선을 편심하게 삽입한 시편의 외부하중에 의한 횡방향 변위를 나타내었다. 예상한 바와 같이 형상기억합금 및 니크롬 선을 삽입한 시편이 순수 복합재료 시편보다 임계좌굴하중이 각각 6%, 10% 증가함을 보였다. 이는 선을 복합재료에 삽입하여 강화한 효과로, 두 선을 서로 삽입한 시편끼리는 임계좌굴하중의 차이가 무시할 만하며 이는 좌굴제어 거동에 영향을 미치는 굽힘강성  $EI$ 의 영향을 무시할 수 있다.

#### 1) 형상회복력의 영향과 형상회복모멘트 $M_{SMA}$ 의 방향성

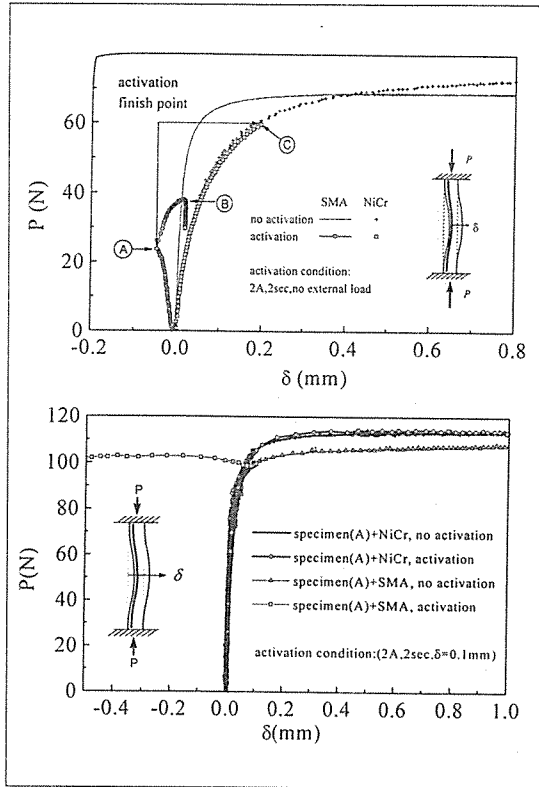


Fig. 8. Load-deflection curves for the composite beam (specimen A) with embedded SMA and NiCr wires. a) without external load (specimen B), b) after subjected to external load (specimen A)

형상회복력의 크기와 형상회복모멘트의 방향을 살펴 보기 위해 양단고정 조건과 외부 압축하중이 작용하지 않은 상태에서 형상기억합금 선을 전기저항 발열로 작동하는 실험을 수행하였다. 형상기억합금 선에 비해 유사한 직경과 저항 값을 가지나 형상회복력의 효과가 없는 니크롬 선을 삽입한 시편은 열하중 상태만 나타나고 형상기억합금 선을 삽입한 시편은 같은 열하중과 형상회복력을 나타내고 있다. 따라서 같은 조건으로 발열할 경우 형상회복력은 이들의 하중차이로부터 계산할 수 있다. 그림 8(a)에서 A점과 C점은 전류를 통한 가열을 중단하는 상태이고 이후에는 자연대류에 의해 냉각되는 상태이다. A-B의 과정을 물리적으로 설명하면 아래와 같다. 전기저항 발열을 중단하면 자연대류에 의해 냉각되는 과정에서 하중방향이 서로 반대방향으로 작용하는 열하중과 형상회복력의 관계에서 형상회복력이 감소함에 따라 B점으로 이동하게 된다. 냉각중 상

태인 B점은 회복력이 크게 감소하여 형상회복력이 작동하지 않고 외부압축하중에 의한 좌굴거동으로 되돌아감을 알 수 있다. 따라서 형상회복력은 C점과 A점의 하중차이로 36-40N 범위임을 도출할 수 있고 이 값을 이용하여 식(6)으로 나타난 좌굴제어의 해석에 반영하였다. 또한 그림 8(a)에서 형상기억합금 선과 니크롬 선을 삽입한 시편의 변형의 부호로부터  $M_{SMA}$ 의 영향을 설명할 수 있다. 형상기억합금 선을 삽입한 시편의 횡방향 변위는 전기저항 발열 작동중 상태에서 형상회복모멘트의 영향으로 말미암아 음의 부호를 가지는데 이는 그림 4(c)에 나타난  $M_{SMA}$ 의 방향으로 설명된다. 반면, 니크롬 선을 삽입한 보의 형상회복모멘트가 작용하지 않고 복합재료 보 단면의 온도상승으로 열하중이 발생하여 양의 부호를 가진다. 이는 그림 4(b)에 나타난  $M_P$ 의 영향으로 설명된다. 결국 형상기억합금 선과 니크롬 선을 삽입한 보의 형상회복모멘트의 영향으로 인하여 서로 다른 변형형상이 됨을 알 수 있다.

그림 8(b)는 외력이 작용하여 보의 횡방향 변형이 발생한 상태에서 ( $\delta_{act}=0.05mm$ ) 형상기억합금 및 니크롬 선에 전기저항 발열방법으로 작동하여 얻은 실험결과를 나타내고 있다. 편심하게 삽입한 형상기억합금 선의 가열때문에 발생하는 복합재료 보 두께 방향으로의 온도분포에 의한 모멘트가 좌굴거동에 어떠한 영향을 미치는 지 검토하였다. 이를 통하여 그림 8(a)에서 설명한 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 가 좌굴거동에 미치는 영향을 더욱 명확하게 설명할 수 있다. 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  $M_{SMA}$ 의 영향으로 스냅스루가 발생하였다. 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 스냅스루의 거동은  $M_{SMA}$ 가  $M_P$ 보다 지배적으로 크기 때문이다. 그림 8(b)의 결과로부터, 복합재료 보 두께 방향으로의 온도분포에 의한 영향은 무시할 수 있고  $M_{SMA}$ 의 영향을 좌굴제어에 활용할 수 있다.

## 2) 기하학적 초기결합의 영향

그림 9는 기하학적 초기결합 정도에 따른 좌굴제어 거동의 실험결과로 복합적층 보의 기하학적 초기결합량  $a$ 와 굽힘 강성  $EI$ 는 실험결과를 바탕으로 식(3)과

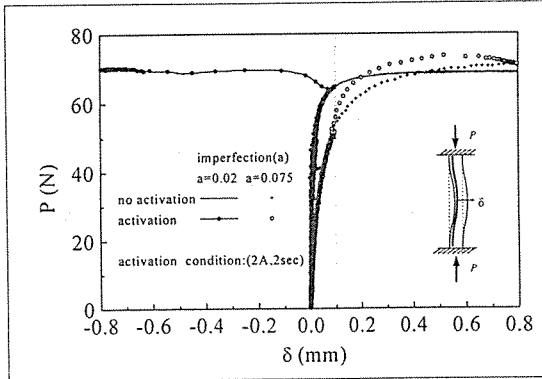


Fig. 9. Load-deflection curves for the composite beam (specimen B) with embedded SMA wires with different initial imperfections.

오일러 좌굴하중식을 이용하여 결정하였다. 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 의 영향을 검토하기 위해서 보의 초기변형을 영으로 조정하여 나타내었는데, 이는 횡방향 변위를 보의 초기변형에서 상대적으로 변형한 양을 측정한 실험결과들과 비교하기 위해서 이다. 실선으로 표시한 비교적 초기결함량이 큰 경우 미소 횡방향 변위 범위에서 ( $\delta_{uc}=0.1mm$ ) 좌굴하중 만을 증가시키는 거동을 보였다. 이러한 향상된 좌굴거동은, 식(3)과 같이 기하학적 초기결함량  $a$ 는 외부하중에 의한 굽힘모멘트  $M_P$ 와 비례하여, 식 6(a)항이 좌굴거동을 결정함에 있어 지배적이기 때문에 설명된다. 반면, 초기결함량이 작은 경우는 좌굴거동을 결정함에 있어 식 6(a)항보다 형상회복모멘트에 의한 항인 식 6(b)항이 크기 때문이다. 이러한 결과로부터, 형상회복모멘트가 기하학적 초기결함 정도에 따라 향상된 좌굴거동 및 스냅스루의 현상으로 나타난다.

### 3) 형상기억합금 선의 삽입위치에 의한 영향

그림 10는 선이 음(A경우), 양(B경우)의 방향으로 각각 편심하게 삽입한 모델에서, 형상회복모멘트를 고려한 좌굴거동을 나타내었다. A경우, 외부압축하중에 의해 보의 횡방향 변형이 양의 방향으로 발생한 상태에서 ( $\delta_{uc}=0.05mm$ ) 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 는 그림 4(c)와 같이 좌굴을 방지하는 방향의 형상기억모멘트가 되어 좌굴거동에 좋은 영향을 미친다. 반면 B경우, 같은 횡방향 변형에서 전기저항 발열에 의한 작동을 하면 외부압축하중에 의해 좌굴이 일어나는 방향으로 형상기억모멘트가 작용하여 복합재료 보의 좌굴거동에 나쁜 영향을 미친다. 그림 10에서는 좌굴 거동을 임계

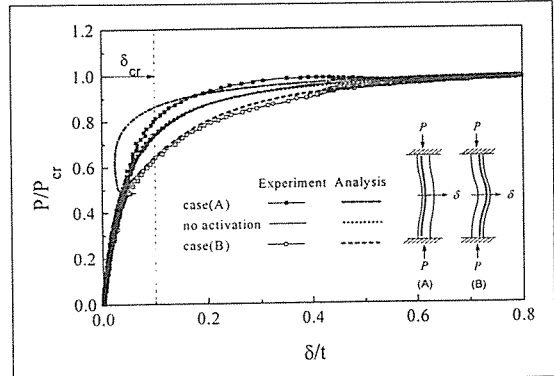


Fig. 10. Comparison of normalized load-deflection curve between experimental and analytical results(specimen B)

좌굴하중과 시편의 두께로 정규화 하여 해석결과와 함께 나타내었다. 여기서 실험결과를 해석적으로 비교하기 위해서는 기하학적 초기결함량  $a$ 의 크기를 결정하고  $M_{SMA}$ 에 의한 좌굴거동의 영향을 나타내기 위하여 형상회복력이 작동하지 않고 단지 외부하중에 의한 좌굴거동을 no activation으로 표시하여 나타내었다. 전기저항 발열에 의한 형상기억합금 선의 작동은 복합재료 보의 온도증가에 영향을 미쳐 결국 열하중이 발생된다. 따라서 횡방향 변위가 발산하는 임계 좌굴하중까지 형상회복력  $P_{SMA}$ 는 열하중에 비해서 선형으로 변한다고 가정하였고 형상회복력  $P_{SMA}$ 의 크기는 그림 8(a)에 나타난 실험결과를 바탕으로 36N으로 하였다. 점선은 식(6)을 이용하여 얻은 해석결과로 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 형상회복모멘트에 의한 영향으로  $\delta_{cr}$ 에서 10.8%의 임계좌굴하중이 증가하였다.

### 4) 작동시간에 의한 영향

그림 11에는 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 ( $\delta_{uc}=0.05mm$ ) 작동시간이 1초일 경우의 좌굴거동은  $\delta_{cr}$  범위에서 임계좌굴하중을 21% 증가시키는 반면 2초일 경우 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 가 증가하여 급격한 형상의 변화 즉 스냅스루를 초래하게 된다. 보의 좌굴거동을 결정함에 있어 식 6(b)항이 6(a)보다 크기 때문이다. 형상회복모멘트를 이용한 능동좌굴제어 실험결과에서 형상회복력을 활용하지 않는 즉 제어를 하지않은 결과에 비하여 하



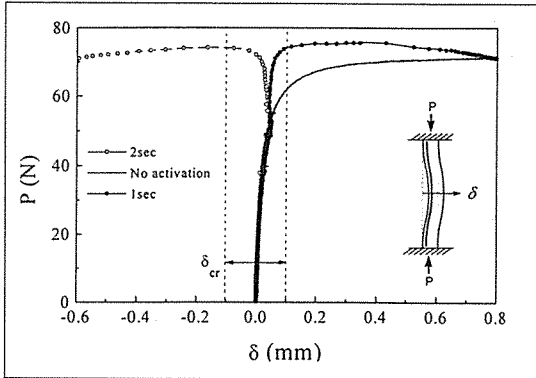


Fig. 11. Load-deflection curves for the composite beam (specimen B) with embedded SMA wires with different activation time of SMA wires

중지지 능력을 증가시키고 또한 변형형상을 변화시킬 수 있음을 나타내고 있다.

#### 5) 보의 횡방향 변위값 $\delta_{act}$ 의 영향

형상회복력의 작동 기준인 보의 횡방향 변위를 변화시키면서 좌굴거동의 실험결과를 그림 12에 나타내었다. 같은 초기결함에서 보의 횡방향 변위값을 크게 하는 것은 보의 임계좌굴하중에 대한 축하중의 비로 표현되는  $\alpha$ 값이 커져 식6(a)가 지배적임을 의미한다. 횡방향 변위가 비교적 적을 경우( $\delta_{act}=0.025, 0.05\text{mm}$ )는 좌굴모드가 반대방향으로 변화하는 스냅쓰루가 발생하는데 비해 클 경우( $\delta_{act}=0.1\text{mm}$ )는 스냅쓰루의 현상이 없이 좌굴하중이 증가하는 현상을 보였다. 이러한 결과로부터 이러한 향상된 좌굴거동 및 스냅쓰루 현상의 원인은 형상회복모멘트  $M_{SMA}$ 로 또한 명백히 설명

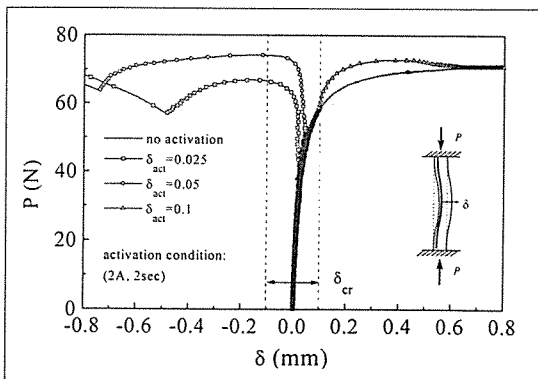


Fig. 12. Load-deflection curves for the composite beam (specimen B) with embedded SMA wires with different activation starting position of deflection,  $\delta_{act}$

된다. 형상기억합금 선의 가열은 의도하지 않는 복합재료의 온도상승을 유발시켜 압축하중이 작용하게 되어 결국 보는 급작스러운 좌굴이 발생하게 된다. 특히 좌굴후 거동 즉 횡방향 변위가 비교적 큰 상태에서 전기저항 발열로 작동할 경우, 좌굴제어에 필요한 형상회복력이 발생되기 전에 열하중이 작용하여 좌굴제어의 효과가 적어진다. 좌굴후 거동에서의 좌굴제어로 확장하기 위하여 closed-loop 형태의 형상기억합금 선의 작동방법을 활용하여 연구중이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 형상기억합금 선을 유연한 복합적층 보에 한쪽으로 편심하게 삽입한 모델을 이용하여 좌굴제어 거동에 관한 실험 및 해석을 수행하였다. 이 결과로부터 아래의 결론을 얻었다.

1. 형상기억합금 선의 형상회복모멘트를 이용하여 좌굴제한 결과, 제어를 하지않은 결과에 비하여 임계좌굴하중이 10.8-21%만큼 증가하였다. 이는 상변태를 유발하는 온도의 변화를 갖는 환경조건에서 능동적으로 임계좌굴하중을 증가 시킴으로써 보다 효율적인 설계가 가능하다.

2. 압축하중이 작용하는 복합적층 보는 형상회복모멘트에 의해 미소 횡방향 처짐범위에서 좌굴모드를 반대방향으로 변화하는 스냅쓰루를 관찰하여 항공기 및 우주 구조물 등의 유연한 구조물의 형상제어에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 거동을 미소 횡방향 변형범위 내에서 오일러 방정식과 cut and paste방법을 이용하여 해석적으로 나타내었고 실험결과와 잘 일치하였다.

## 참 고 문 헌

1. Thompson, S.P. and Loughlan, J., "Adaptive post-buckling response of carbon fibre composite plates employing SMA actuators," *Comp. Struct.*, Vol.38, 1997, pp.667-678.
2. Gandhi, M.V., Thompson, B.S., "Smart Materials and Structures," Chapman and Hall, 1992
3. Perkins, J., "Shape memory effects in alloys",

1975, Plenum Press.

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

5. Rogers, C.A. and Jia, J., "Structural modification of simply-supported laminated plates using embedded shape memory alloy fibers," *Comput. and Struct.*, Vol. 38 No. 5/6, 1991 pp. 569-580.

6. Chaudhry, Z.A., and Rogers, C.A., "Response of composite beams to an internal actuator force," *J. of Mechanical design*, Vol. 114, 1992, pp. 343-348.

7. Chaudhry, Z.A. and Rogers, C.A., "Enhancing induced strain actuator authority through discrete attachment to structural elements," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 7, 1993, pp. 1287-1292.

8. Baz, A., Ro, J., Mutua, M. and Gilheany, J., "Active buckling control of reinforced composite beams," *Proceedings of the 33rd Structures, Structural, Dynamics and Materials conference*, 1991, pp. 167-176.

9. Thompson, S.P. and Loughlan, J., "The active buckling control of some composite column strips using piezoceramic actuators", *Compo. Struct.*, Vol. 32, 1995, pp. 59-67.

10. 송호천, 황운봉, 박현철, 한경섭, "형상기억합금 강화 복합재료판의 좌굴특성," *복합재료학회 추계 학술발표대회 논문집*, 1996, pp. 216-221.

11. 최섭, 이정주, "형상기억합금 선을 삽입한 복합적층 보의 형상제어에 관한 연구," *한국복합재료학회 춘계학술발표대회 논문집*, 1998, pp. 23-25.

12. Choi, S and Lee, J.J., "The shape control of composite beam with embedded shape memory alloy wire actuators," *Smart Material and Structures* 1998, accepted for publication submitted.

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

14. Suo, Z. and Hutchison, J.H., "Interface crack between two elastic layers," *Int. J. Fracture*,

Vol. 43, 1990, pp. 1-18.

15. Timoshenko, S. and Gere, J., "Theory of elastic stability," McGRAW-HILL, 1963.

16. Shaw, J.H. and Kyriakides, S., "Thermomechanical aspects of NiTi," *J. of Mechanics for Physics and Solids*, Vol. 43, 1995, pp. 1243-1281.

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

18. Tobushi, H., Lin, P.H., Hattori, T. and Makita, M., "Cyclic deformation of TiNi shape memory alloy," *JSME Int. Jour.*, A-38, 1995, pp. 59-67.