

형상기억합금 튜브의 buckling 거동

최점용

Buckling behavior of shape-memory alloy tube

Jeom Yong Choi

Abstract

The buckling behavior of cylindrical shape-memory alloy and aluminum tube is investigated at room temperature using a split Hopkinson pressure bar and an Instron hydraulic machine with a specially designed recording system. The shape-memory alloy at superelastic property regime buckles gradually in quasi-static loading, and fully recovers upon unloading. However, the buckling of aluminum tube is sudden and catastrophic, and shows permanent deformation. This gradual buckling of shape-memory alloy is associated with the forward and reverse transformation of stress-induced martensite and seems to have a profound effect on the unstable deformation of tube structures made from shape-memory alloy.

Key Words : Ni-Ti alloy, shape-memory, Split Hopkinson pressure bar, tube, buckling, superelastic property

1. 서론

형상기억합금의 초탄성(superelastic) 특성은 형상기억합금을 약 6~8% 변형 후 응력을 제거하면 잔류 소성 변형 없이 원래의 형상을 회복하는 특성으로, 응력-변형 곡선은 히스테리시스 루프를 나타낸다. 루프의 면적은 형상기억합금에 의하여 흡수된 에너지를 나타낸다[1,2]. 최근에 형상기억합금의 초탄성특성을 이용한 에너지 흡수재료[3], 및 flexible 구조의 능동적인 buckling제어[4]등 다양한 분야 응용을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 강(steel) 및 알루미늄 튜브 구조물의 정적(static) 및 동적(dynamic) buckling 현상에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 형상기억합금 튜브의 buckling 거동에 대한 연구는 거의 없는 실정이다[5]. 형상기억합금의 경우, buckling 거동은 오스테나이트→마르텐사이트로의 정반응 또는 역변태 거동에 상당한 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 초탄성 효과를 나타내는 영역에서 형상기억합금 튜브의 buckling 거동을 split Hopkinson bar (SHPB) 및 Instron을 이용하여 동적, 정적 조건하에서 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 튜브는 55.85at%Ni-Ti 합금으로 오스테나이트 역변태 온도는 $A_f=281K$ 이고 상온에서 오스테나이트 조직이다. 4.5mm(외경)-0.125(두께) 튜브의 소재를 사용하여 길이/직경(L/D) 비를 0.8~2.6가 되도록 적당한 길이로 가공하여 정적 및 동적 변형 실험에 사용하였다. 그림 1은 Instron 시험기기의 buckling 시험을 위한 장치로, clip gauge, 거울, 및 그림으로 구성되어 있다. 압축실험은 변위제어에 의한 방식으로 상온에서 약 $10^{-3}mm/s$ 의 cross-head speed로 실험을 하였다. 특히 압축 변형동안 발생하는 튜브의 buckling 거동 관찰을 위하여 시편에 가해지는 응력과 동기화한 접사 렌즈를 부착한 디지털 카메라를 이용하여 촬영-기록하였다.

그림 2는 동적 압축 시험을 위한 SHPB로 충격봉, 시편, platen, 입사 및 전달봉, 그리고 데이터 기록 시스템으로 구성된다[6.7]. SHPB에서 동적 buckling 거동을 직접 관찰하기 위하여 고속 카메라인 Imacon 200 프레임 카메라를 설치하였다. 또 buckling 거동 비교를 위하여 7075-Al 튜브 시편을 가공하여 시험하였다.

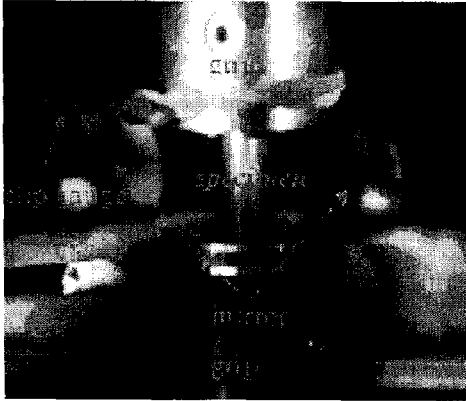


Figure 1 Photograph of the fixed-end buckling-test set up, showing the sample and its reflections in the back mirrors

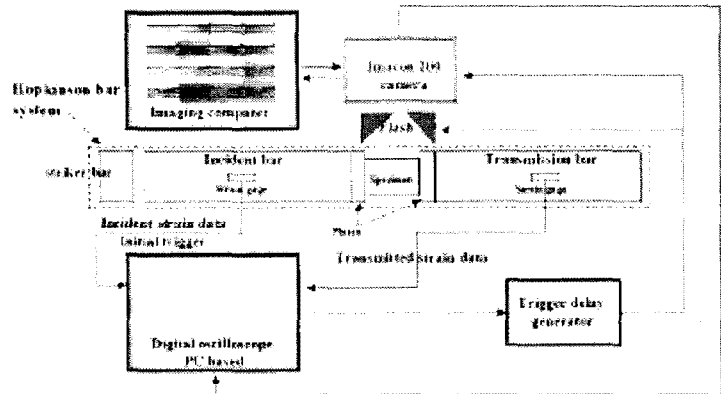


Figure 2 Schematic diagram of the dynamic-test set-up, showing the Hopkinson bar, a P.C.-based digital oscilloscope, a trigger delay generator, an Imacon 200 framing camera, and an image processing computer displaying a set of actual images

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 변위제어에 의한 정적 변형 조건에서 형상기억합금 튜브의 변위에 따른 하중 변화를 나타낸 것이다. 튜브의 양쪽 끝은 그림1에 표시한 그림을 이용하여 고정하였다. 하중-변위곡선은 히스테리시스 루프로 형상기억합금의 전형적인 초탄성 특성을 나타낸다[1,2]. 그림 4는 연속적인 buckling 거동을 나타낸 사진으로, 그림 3에 표시한 각각의 하중에서 촬영한 것이다. 형상기억합금 튜브는 최대 하중(2)에서 buckling이 시작되며 buckling 발생과 동시에 하중은 (2)에서 (3)으로 급격히 감소한 후, 변형에 의하여 buckling이 진행됨에 따라 하중은 (4)로 연속적으로 감소한다.

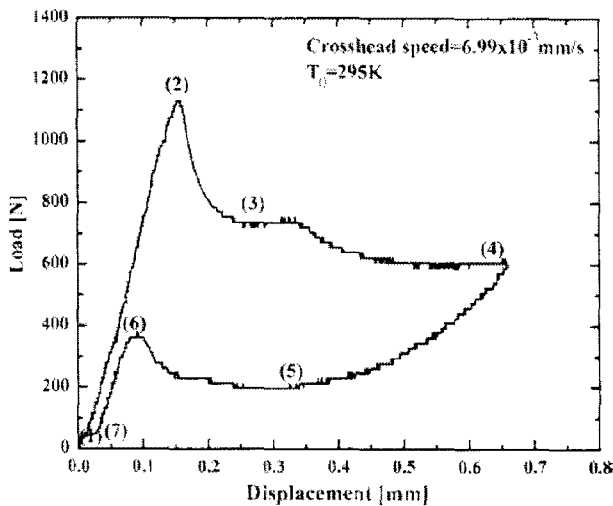


Figure 3 The load-displacement relation for the Ni-Ti tube (R/t=18) shown in Fig. 4; L/D is 1.5

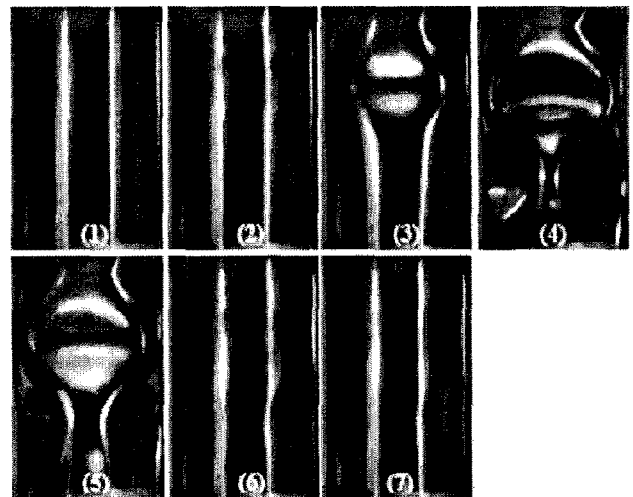


Figure 4 Photographs of Ni-Ti tube (R/t=18) buckling in uniaxial compression under a displacement-controlled loading with a cross-head speed of $6.99 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$; numbers correspond to the load-displacement states of Fig. 3; L/D is 1.5

그러나 변위가 (4)에서 (6)으로 감소하면 그림 4에 나타난 것처럼 buckling 현상이 서서히 사라져 (6) 단계에서 원래의 형상을 회복한다. 또 buckling은 체스보드(chessboard) 형태로 발생한다. 이상의 가역적인 buckling 현상은 초탄성 구간에서 하중을 가하는 경우, 모상인 오스테나이트의 마르텐사이트 변태 및 하중을 제거하는 경우 역변태 즉 마르텐사이트가 모상 오스테나이트로 변태함에 의해 발생한다. 비교를 위하여 Ni-Ti 합금과 동일한 크기인 4.5mm 외경-0.127mm 두께 (R/t=18)의 7075-Al 튜브를 이용하여 양끝이 구속되지 않는 조건에서 압축시험을 하였다. 그림 5는 압축시험시 하중-변위를 나타낸 그림으로 buckling이 갑자기 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 그림 5의 하중 변화에 대응되는 연속적인 buckling 거동을 나타낸 것이다. 하중을 제거하여도 buckling된 부분의 회복이 일어나지 않는 영구 변형을 나타낸다[7].

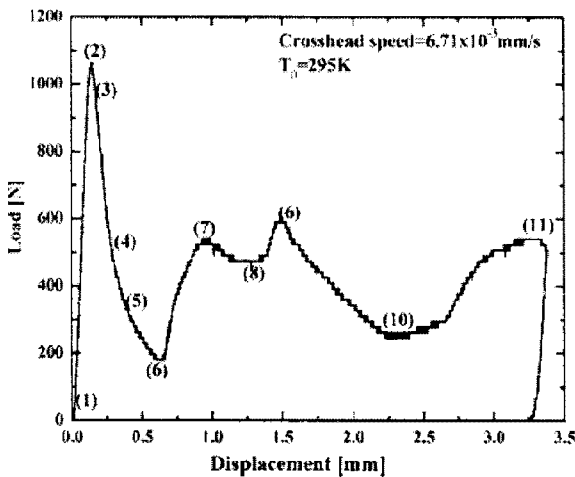


Figure 5 Variation of load with displacement for an Al-tube(R/t=18) with unconstrained ends, obtained under a cross-head speed of 6.71×10^{-3} mm/s

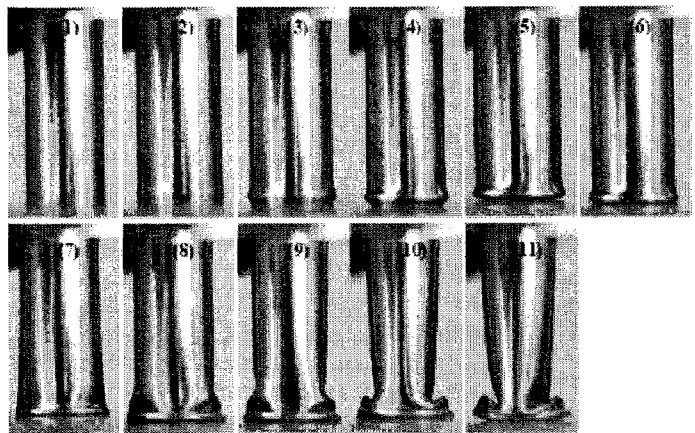


Figure 6 Photographs of Al-tube with unconstrained ends, buckling in uniaxial compression with a cross-head speed of 6.71×10^{-3} mm/s; numbers correspond to the load stages in Fig. 5

그림 2에 나타난 장치를 이용하여 동적 변형동안의 Ni-Ti 형상기억합금 튜브의 buckling 거동을 조사하였다. 그림 7은 동적 변형시의 공칭응력-공칭변형을 나타낸 것으로, 평균 공칭 변형속도는 1300/s였다. 또 그림에 주기적인 카메라-타이밍도 나타내었다(약 $5\mu\text{s}$ 간격). 그림 7에서 공칭변형이 약 3.6%에 도달할 때까지 공칭응력은 거의 일정한 값을 나타낸다. 그러나 변형이 3.6% 이상으로 진행됨에 따라 급격한 응력의 감소가 발생한다. 그림 8은 각각의 카메라-타이밍에 촬영한 사진이다. 약 1.9% 변형에서 buckling은 링(ring) 형성에 의하여 시작되며 약 3.6% 변형까지 더 분명하게 링이 형성, 전파됨을 알 수 있다. 링이 형성되는 동안 그림 7에 나타난 것처럼 응력은 거의 일정하다. 변형이 3.6%를 초과함에 따라 링 형태의 buckling이 비대칭적인 체스보드(chessboard) 패턴으로 변화하며 하중의 급격한 감소가 발생한다[7]. 이는 그림 4의 정적 buckling 거동과 동일하다.

4. 결론

튜브의 동적 및 정적 변형조건에서 buckling 현상을 고속카메라가 부착된 split Hopkinson pressure bar 및 Instron으로 직접 관찰 기록하였다. Ni-Ti 형상기억합금 튜브에 변형을 가하는 경우 buckling이 점진적으로 발생하고, 하중을 제거하는 경우 buckling된 부분이 회복되는 초탄성(superelastic) 현상이 관찰되었으나, 알루미늄 튜브는 영구변형이 발생하였다. L/D가 1.5인 정적 변형의 경우 buckling이 체스보드 형태로 발생하나, L/D가 2.5인 동적 변형의 경우 buckling은 초기 링(ring) 형태 진행 후 체스보드(chessboard) 형태로 천이한다. 이상의 buckling 거동은 형상기억합금의 상변태 현상인 응력 유기 마르텐사이트의 형성 및 소멸과 밀접한 관계가 있다.

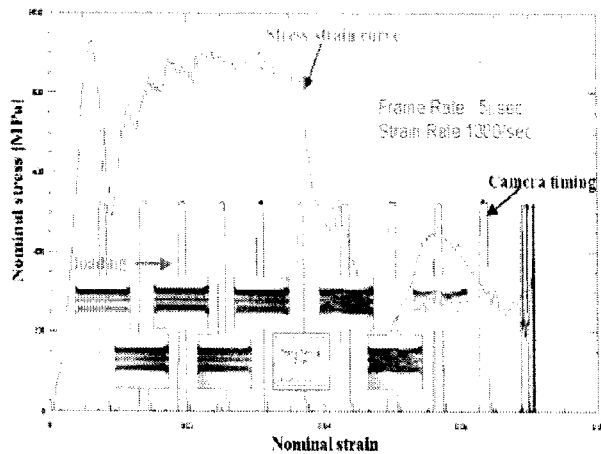


Figure 7 Variation of stress with nominal strain, obtained using SHPB; L/D is 2.5

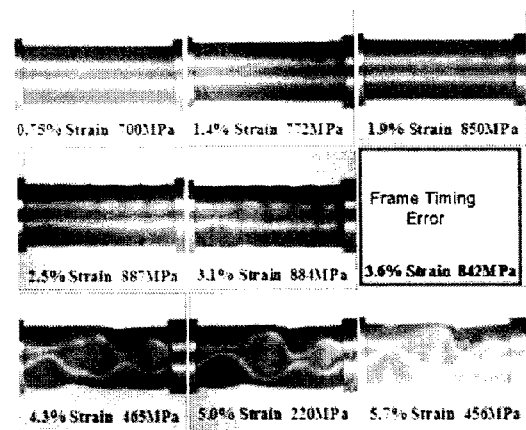


Figure 8 Photographs of the dynamic buckling of a thin Ni-Ti tube($R/t=18$), obtained using SHPB; L/D is 2.5, and the term 'strain' refers to the axial shortening divided by L

참 고 문 헌

- [1] J. Van Humbeeck, 2001, Shape memory alloys: a material and a technology, *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 3, pp143-156
- [2] K. Miyazaki, K. Otsuka, 1989, Development of shape memory alloys, *ISIJ Int.*, Vol. 29, pp353-377
- [3] S. Saadat, J. Salichs, M. Noori, H. Davood, I. Bar-on, Y. Suzuki, A. Masuda, 2002, An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 11, pp218-229
- [4] T. J. Lu, J. W. Hutchinson, A. G. Evans, 2001, Optimal design of a flexural actuator, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 49, pp2071-2093
- [5] A. A. A. Alghamdi, 2001, Collapsible impact energy absorbers: an overview, *Thin-Walled Struct.*, Vol. 39, pp189-213
- [6] S. Nemat-Nasser, J. Y. Choi, 2005, Strain rate dependence of deformation mechanisms in a Ni-Ti-Cr shape-memory alloy, *Acta Mater.*, Vol. 53, pp449-454
- [7] S. Nemat-Nasser, J. Y. Choi, J. B. Isaacs, D. W. Lischer, 2006, Quasi-static and dynamic buckling of thin cylindrical shape-memory shells, *J. Appl. Mech.* Vol. 73, pp825-833