

초탄성 거동을 고려한 NiTi 합금 튜브의 변형해석

강 우 종*

자동차부품연구원 구조특성연구팀

Finite Element Analysis of NiTi Alloy Tubes with the Superelastic Behavior

Woojong Kang*

Structural Characteristics Engineering Lab., Korea Automotive Technology Institute, Cheonan-si,
Chungnam 330-912, Korea

(Received 1 February 2006 / Accepted 13 March 2006)

Abstract : NiTi alloy known as its shape memory effect also has superelastic characteristic, which makes it possible to be elastic under large deformation. Since the tensile strength of the alloy is very high and density is low compared to carbon steel, it can be applied to lightweight structural design. In order to design structures with shape memory alloy, finite element analysis is used and a constitutive algorithm based on Aurrichio's model is added to LS-DYNA as a user subroutine. Explicit time integration and shell element formulation are used to simulate thin-walled structures. The algorithm uses Drucker-Prager type loading condition to calculate martensite volume fraction during the transformation. The implemented algorithm is verified in uni-axial loading condition and martensite phase transformation can be detected well with the algorithm. In this study, as a energy absorbing structure, thin-walled tube is modeled with finite elements and the deformation behavior is studied. Simulation results has shown that the martensite transformation was generated in loading condition. After plastic deformation reached, the load decreases linearly without reverse martensite transformation.

Key words : Shape memory alloy(형상기억 합금), Superelastic(초탄성), Finite element method(유한요소법)

1. 서 론

형상기억 합금에 대한 연구는 1960년대에 Buehler와 Wiley에 의하여 NiTi 합금의 형상기억(shape memory)성질이 발견된 이래로 진행되었으며, 또한 일정 온도에서 발생한 대변형에 대해서 초탄성(superelastic)거동을 보임이 발견되면서 다양한 분야에서 응용되고 있다. 여기서 형상기억 성질이란 변형이 어느 정도 이상으로 커져 소성변형이 발생하였을 때 가열을 하게 되면 변형전의 형상으로 복

원되는 성질을 말하며, 초탄성 특성은 일반 금속재료에서는 소성 변형이 될 정도로 큰 변형이 발생하여도 하중을 제거하면 고무와 같이 원상으로 회복되는 특성을 말한다.

형상기억 합금은 이와 같은 형상기억 특성과 초탄성 특성으로 인하여 스마트 구조물에 많이 적용되었으며, 알루미늄 기지 재료에 보강재로 사용되면서 금속기지 복합소재의 개발과 관련하여 연구가 진행된 바가 있다.^{1,2)} 현재 자동차 조향계의 진동특성을 저감시키기 위하여 연구가 진행되고 있으며, 에너지 흡수 구조용 소재로써 적용하기 위한 연구

*Corresponding author, E-mail: wjkang@katech.re.kr

는 많이 진행되고 있지 못하다. 그러나 steel 소재에 비하여 밀도가 작은 반면 인장강도는 2GPa 정도로 우수하기 때문에 경량 소재로써 많은 활용 가능성을 가지고 있으며 범퍼스테이 또는 사이드 멤버의 크래쉬 박스(crash box)에 적용 가능하다.

형상기억 합금의 구성방정식에 대하여 많은 연구가 진행되고 있으며, Hyperelasticity 모델은 하중을 가할 때의 거동을 모사할 수는 있으나 제거하였을 경우의 거동에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다.³⁾ 따라서 초탄성 거동을 나타내기 위하여 마르텐사이트 변태를 나타낼 수 있는 새로운 모델이 요구되었으며 이에 관하여 많은 연구가 이루어져왔다.

형상기억 합금은 세선(thin wire)이나 튜브(tube) 형태로의 응용 분야가 많았기 때문에 1차원 구성방정식이 먼저 연구되기 시작하였다. Tanaka⁴⁾에 의하여 1차원 구성방정식이 제안된 이후로, Liang,⁵⁾ Brinson⁶⁾ 등의 연구자들에 의하여 1-D 구성방정식이 제안되었으며 또한 유한요소 해석에도 적용되었다.^{4,6)} 1990년대에 들어 3차원 구성방정식이 제안되기 시작하였으며,^{7,8)} 소성학에 기반을 둔 구성방정식^{9,10)}과 열역학 제2법칙에 근거한 구성방정식으로 구분될 수 있다.¹¹⁾ 이처럼 다양한 구성방정식에 관한 연구가 진행되었으나 형상기억 합금의 거동을 완벽히 모사할 수 있는 수학적 모델은 없는 것으로 알려져 있다. 특히, 형상기억 합금은 변형률 속도에 매우 민감하며 마르텐사이트 변태 특성 또한 변형률 속도에 따라 달라지는 것으로 알려져 있기 때문에^{12,13)} 이에 대한 연구가 좀더 진행되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서는 소성학에 기반한 Auricchio의 구성방정식^{9,10)}을 외연적 시간적분법을 사용하고 있는 LS-DYNA의 쉘 요소 수식화에 적용하였으며, 이를 이용한 유한요소해석을 통하여 얇은 원형관 형상의 형상기억 합금의 작용 하중에 따른 초탄성 특성 및 소성변형 특성을 분석하였다. 이를 통해 경량 소재로써 높은 항복강도를 갖는 형상기억 합금 소재가 에너지 흡수 구조로써 사용될 경우 그 특성을 평가할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다.

2. 형상기억 합금의 초탄성 거동

형상기억 합금은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 오스테나이트(austenite)와 마르텐사이트(martensite)의 비확산 변태에 의하여 초탄성 거동을 보이는 것으로 알려져 있다. 온도가 높아지게 되면 오스테나이트 조직으로 변태하게 되고 낮아지게 되면 마르텐사이트 조직으로 변태하게 된다. 그러나 작용 온도가 M_d 보다 크게 되면 마르텐사이트 변태는 발생하지 않으며 항상 오스테나이트 조직으로 존재하게 된다. NiTi 합금의 일반적인 응력-변형률 선도는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 작용 온도가 M_d 보다 크게 되면 o-f 경로를 따르게 되어 일반적인 steel 소재의 탄소성 거동을 보이게 되지만 M_d 보다 낮고 A_f 보다 높은 온도에서 하중을 가하게 되면 o-a-b-e를 따라서 조직은 오스테나이트에서 마르텐사이트로 변하게 되며 하중을 계속 가할 경우 소성영역에 들어가게 된다. 마르텐사이트 변태가 일어나는 도중에는 응력의 큰 증가 없이 변형률만 증가하는 특성을 보이다가 변태가 끝나면 마르텐사이트의 탄성계수를 따라서 응력이 크게 증가하기 시작한다. 소성역에 들어가기 전에 하중을 제거하게 되면 조직은 오스테나이트로 다시 바뀌게 되며 b-c-d-o의 경로를 따라 응력이 감소하게 된다. 이때에도 마찬가지로 응력의 감소가 매우 완만한 구간이 있으며 이때에는 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 역변태가 진행중인 구간이다. 역변태가 끝나면 오스테나이트 조직의 탄성계수를 따라서 응력이 급격히 감소하기 시작한다. 이러한 거동 특성을 초탄성이라 하며, 탄성계수는 온도와 변형률의 함수가 된다. 이러한 초

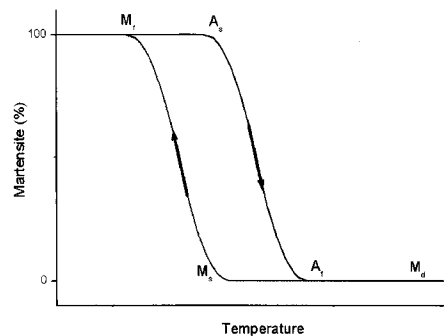


Fig. 1 Diagram of martensite transformation

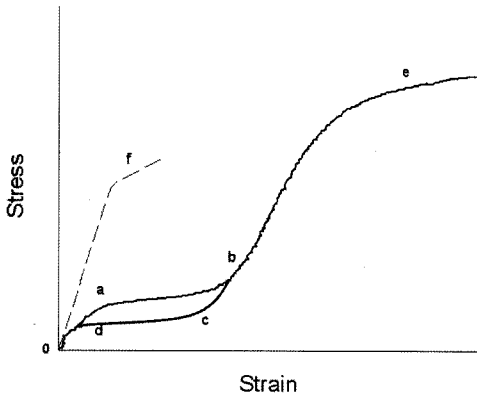


Fig. 2 Stress-strain curve of NiTi alloy

탄성 거동은 일반적으로 약 2~5%의 탄성 변형률을 갖기 때문에 많은 분야에서 응용되고 있다.

3. 초탄성 거동의 수식화

본 연구에서는 초탄성 거동을 보이는 형상기억 합금 쉘 구조물의 거동을 유한요소해석을 통하여 분석하고자 하며 이를 위하여 거시적 관점에서의 초탄성 거동 구성방정식을 쉘 요소에 적용하였다. 거시적 관점에서의 초탄성 거동 모델링은 등방성을 가정하였으며 변형률 속도에 대한 영향은 고려하지 않았다. 그러나 Nemat-Nasser 등에 의하면 NiTi 합금은 변형률 속도에 크게 의존하게 되므로 동적 특성이 중요한 경우 이에 대한 고려가 반드시 필요하게 된다.^{12,13)}

마르텐사이트 변태과정 중에는 마르텐사이트와 오스테나이트의 체적 비율(volume fraction)의 합은 1이 되며, 마르텐사이트의 체적비율을 ξ 라 하면 변태 변형률(transformation strain)은 마르텐사이트 체적비와 다음의 관계를 갖는다.

$$\epsilon^{tr} = \epsilon_L \xi \cdot N_{ij} \quad (1)$$

여기서 ϵ_L 은 최대 변태변형률을 나타내며, N_{ij} 는 방향텐서를 나타낸다.

마르텐사이트 변태가 진행되는 동안 전체 변형률은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^{tr} + \epsilon_{ij}^{th} \quad (2)$$

여기서 우변의 각 항은 탄성 변형률과 변태 변형

률 및 열변형률을 의미한다. 변태 변형률을 이용하면 형상기억 합금의 구성방정식은 아래의 식과 같이 표현된다. 본 연구에서는 일정 온도에서의 초탄성 거동에 관심이 있으므로 식 (2)의 열변형률은 무시하였다.

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^{tr}) \quad (3)$$

여기서 D_{ijkl} 은 4차의 탄성계수 텐서이다.

본 연구에서는 마르텐사이트 변태의 시작과 끝을 판별하기 위하여 식 (4)와 같이 Drucker-Prager 형태의 함수를 이용하였다. 오스테나이트에서 마르텐사이트로의 변태가 발생하는 것을 기준으로 수식을 나타내고자 한다. 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 역변태의 경우에도 동일한 과정으로 전개될 수 있다.

$$F = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} + 3\alpha P - CT \quad (4)$$

여기서 s_{ij} 는 편차응력텐서를 나타내며, F 는 압력, T 는 온도 그리고, α 와 C 는 재료특성을 나타낸다.

이와 같이 하중 함수를 이용할 경우 식 (1)의 변태 변형률의 방향은 식 (5)와 같이 나타나게 된다.

$$N_{ij} = \xi \frac{\partial F}{\partial s_{ij}} \quad (5)$$

Fig. 3과 같이 빗금 부분에서 마르텐사이트 변태가 발생할 때의 온도와 판별함수를 정의하면 다음의 조건일 경우 마르텐사이트 변태가 발생하게 된다.

$$F_s > 0, F_f < 0, \dot{F} > 0 \quad (6-1)$$

여기서,

$$F_s = F + CM_s \quad (6-2)$$

$$F_f = F + CM_f \quad (6-3)$$

이다.

마르텐사이트 체적비를 응력과 온도의 함수로 가정할 경우 식 (7)과 같이 선형특성, 지수특성 등의 다양한 전개함수(evolution equation)가 제안되었다.^{4,6)}

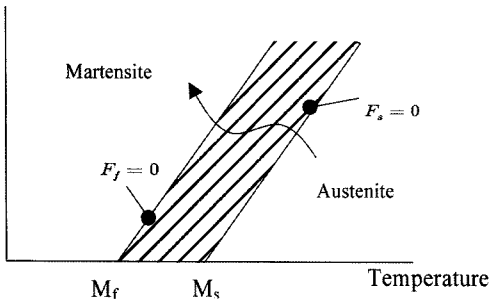


Fig. 3 Martensite transformation diagram

$$\dot{\xi} = (\xi - 1) \frac{\dot{F}}{F_f} \quad (7-1)$$

$$\dot{\xi} = (\xi - 1) \frac{\dot{F}}{(F_f)^2} \quad (7-2)$$

유한요소 수식화를 위하여 변형률을 체적변형률과 편차변형률로 구분하면, 편차응력의 증분은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\dot{s}_{ij} = 2G(\dot{\epsilon}'_{ij} - \epsilon_L \dot{\epsilon}^{tr}) \quad (8)$$

마르텐사이트 체적비는 응력과 온도의 함수이며 식 (7)과 같은 전개함수 형태로 가정할 수 있으며, 여기에 식 (1)의 변태 변형률의 정의를 고려하면 식 (9)와 같은 편차응력의 증분과 마르텐사이트 체적비의 관계가 얻어진다.

$$\dot{s}_{ij} = \frac{2G\dot{\epsilon}'_{ij}}{(1 + \epsilon_L \frac{\partial \xi}{\partial s_{ij}} \frac{\partial F}{\partial s_{ij}})} \quad (9)$$

셸 요소에 적용하기 위해서 평면응력 조건을 만족시켜야 하므로, 본 연구에서는 LS-DYNA의 유저 서브루틴을 작성하여 셸 요소에 대한 평면응력 조건을 만족하는 초탄성 구성방정식을 적용하였다.¹⁴⁾

4. 튜브 압괴 해석

4.1 구성방정식의 검증

작성된 유저 서브루틴의 검증을 위하여 단축 하중 상태의 거동에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 먼저 초탄성 거동을 보여주기 위하여 가상의 재료를 가정하여 구성방정식의 작동을 검증하였으며, 다음으로 시험 결과로 얻어진 NiTi 합금의 응력-변

형률 선도를 이용하여 구성방정식을 검토하였다. 실제 NiTi합금의 경우 2~5%의 최대 탄성변형률 특성을 보이게 되지만, 마르텐사이트 변태의 시작과 종료 시점에 대한 정확한 판별을 분석하기 위하여 최대 10%의 탄성 변형률을 갖는 인위적인 Test 재료에 대한 물성치를 이용하여 해석을 수행하였다.

Test Material Property

$$E = 1000\text{MPa}, C = 1\text{MPa}/^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_L = 10\%, \beta = 10\text{MPa}$$

$$M_f = 10^\circ\text{C}, M_s = 70^\circ\text{C}$$

$$A_s = 90^\circ\text{C}, A_f = 130^\circ\text{C}$$

Fig. 4는 위의 물성치를 이용한 해석결과를 나타낸다. 일정 온도에서 가상의 재료 특성을 갖는 초탄성 소재거동을 나타내고 있으며, 식 (7)에 나타낸 마르텐사이트 변태의 전개 특성에 따라 응력의 증가가 달라지지만 변태의 시작과 끝은 동일하게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 마르텐사이트의 탄성계수가 오스테나이트에 비하여 약간 더 크지만 이 경우에는 동일하게 유지하였다.

Fig. 5는 Fig. 4의 지수 전개함수를 이용한 초탄성 거동에서 마르텐사이트 변태가 완벽히 진행되기 전에 응력을 감소시킬 경우 다시 오스테나이트로 변태가 진행되는 것을 보여주고 있다.

Fig. 6은 NiTi 합금의 1축 응력 상태에서의 응력-변형률 선도를 나타내고 있으며, 해석결과와 시험

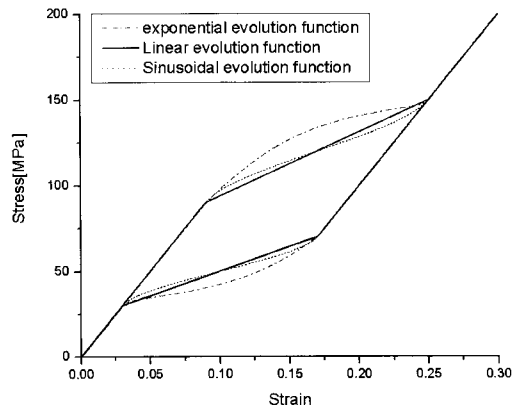


Fig. 4 Characteristics of evolution equations.

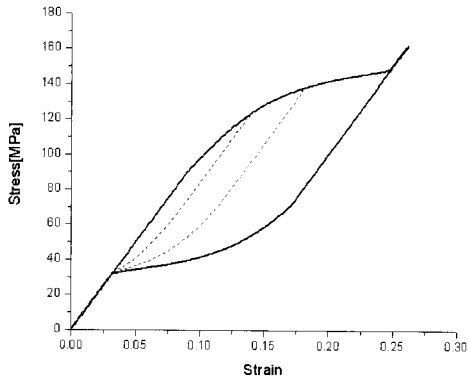


Fig. 5 Multiple stress cycles

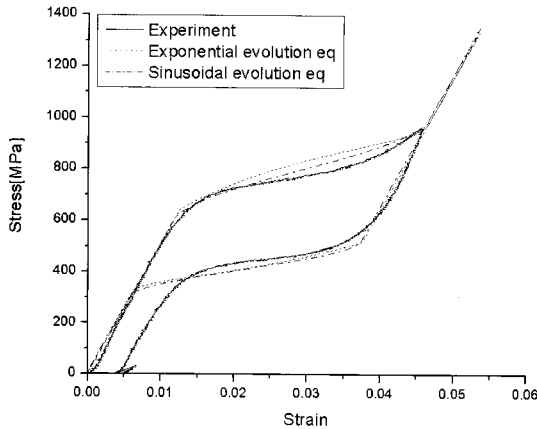


Fig. 6 Comparison between experiment and simulation subjected to uni-axial loading

결과를 비교하고 있다. 시험의 경우 이상적인 초탄성 거동을 통하여 완전한 복원이 이루어지지 않은 것으로 나타났으나 해석 모델의 경우 이러한 특성이 고려되지는 않았다. 전개함수의 특성에 따라서 응력의 증가 및 감소 특성이 다르게 나타나고 있으며, 이 경우에는 주기함수를 이용한 전개특성이 시험 결과와 보다 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 작성된 유한요소 구성방정식을 적용한 해석 결과가 NiTi합금의 초탄성 거동을 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 유한요소 튜브의 압괴 거동

여기에서는 형상기억 합금 튜브의 압축붕괴 해석을 수행하여 튜브의 변형에 따른 하중 특성을 분석하고자 한다. 튜브의 형상은 Fig. 7에 나타난 바와 같

으며, 높이 12.7mm, 직경 15.9mm, 두께 1.1mm이다. 해석 조건은 아래쪽 변위를 고정하였으며 무게 200Kg의 질량이 1m/sec의 속도로 반대쪽에 충격을 주도록 하였다. 해석에 사용된 응력-변형률 선도 (Fig. 8)는 Fig. 6과 동일한 것으로 약 1500MPa 이상의 응력에서 소성 특성을 보이고 있다. 비교를 위하여 단축 인장조건에 대한 해석 결과를 같이 도시하였다. Fig. 9에는 튜브의 변형 형상을 나타내고 있다. 비교를 위하여 튜브의 재질을 7075 알루미늄으로 하였을 경우를 같이 도시하였다. 두 경우 모두 튜브의 중앙에 일정량의 소성 변형이 발생한 것을 볼 수 있다. NiTi 합금 튜브의 경우에는 질량체가 튜브를 변형시킨 후 다시 바운딩되었다.

하중의 시간이력은 Fig. 10에 나타난 바와 같다. NiTi 합금이 7075 알루미늄에 비하여 작용 반력이 월등히 높은 것을 알 수 있으며, 변형 초기(1000μsec 이전)에 하중 증가가 완화된 구간이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이때 마르텐사이트 변태가 발생하

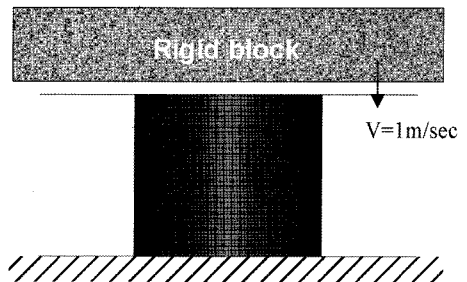


Fig. 7 Finite element model for NiTi alloy tube

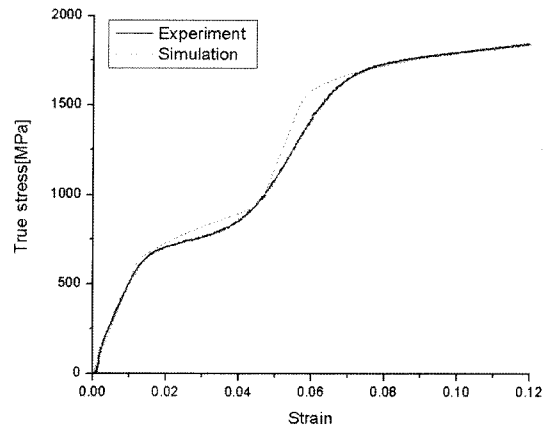


Fig. 8 Stress-strain curve of the NiTi alloy tube

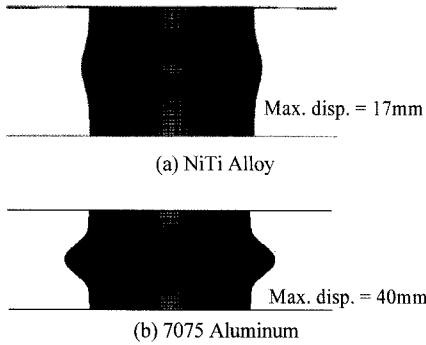


Fig. 9 Comparison of deformed shapes: (a) NiTi alloy tube; (b) 7075 aluminum

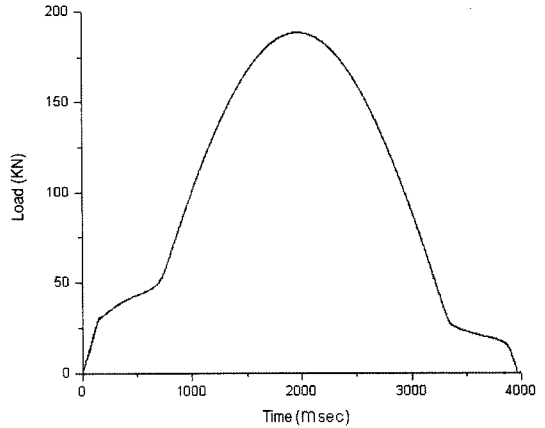


Fig. 11 Load history of the NiTi tube without plastic behavior

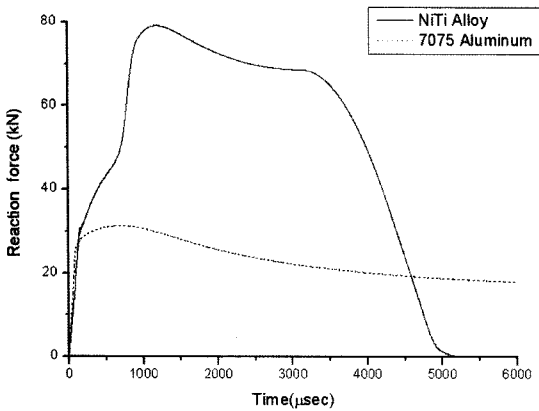


Fig. 10 Load history curves of NiTi and 7075 aluminum tubes

므로 하중 증가율이 둔화되었다가 다시 증가하는 경향을 보이게 된다. 따라서 소재의 조직은 오스테나이트에서 마르텐사이트로 변화함을 알 수 있다. 그러나 질량체가 반동되어 하중이 제거되면 오스테나이트로의 변화 없이 하중이 선형적으로 감소하는 특성을 보이게 되는데, 이것은 발생 응력이 소재의 항복응력을 넘었기 때문에 일반적인 초탄성 거동과는 달리 오스테나이트로의 변태 없이 선형적인 응력감소 경로를 따르기 때문이다. 따라서 튜브의 최종적인 결정조직은 마르텐사이트 조직으로 변태된 채로 남아있게 되며, 소성변형이 남아있게 된다.

그러나 만일 소재의 소성변형이 발생하지 않는다고 가정하면, 하중 변화는 Fig. 11에 나타난 바와 같으며 튜브가 복원되면서 다시 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 역변태가 발생하고 이에 따라 하중의 감소율이 완만하게 변하는 구간이 생기게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 Auricchio의 구성방식에 기반하여 NiTi 합금의 초탄성 거동을 고려한 튜브의 변형해석을 수행하였다. 외연적 시간적분법을 사용하고 있는 LS-DYNA의 쉘 요소에 대한 유저 서브루틴을 개발하였으며, 가상의 모델에 대하여 검증을 수행하고 실제 실험 결과와 비교하였다. NiTi 합금의 상변태 후 소성변형 특성을 고려하여 얇은 NiTi 튜브의 변형을 분석하였으며, 7075 알루미늄 튜브에 비하여 작은 변형으로 상대적으로 큰 충격량을 흡수함을 볼 수 있었다. 따라서 자동차의 범퍼나 사이드 멤버 등의 충격에너지 흡수를 위한 구조용 소재로써 활용 가능함을 알 수 있다. 또한 NiTi 튜브는 하중이 가해질 때 마르텐사이트 변태가 발생하여 하중 증가가 완만한 구간이 발생하게 되며 소성역에 들어갈 경우에는 오스테나이트로의 역변태가 발생하지 않고 하중이 감소하는 것으로 나타났다.

References

- 1) T. H. Jeong, D. J. Lee and H. G. Kim, "Development of Al Matrix Composite using Shape Memory Alloy," Transactions of KSAE, Vol.6, No.6, pp.53-62, 1998.
- 2) J. H. Roh, I. K. Oh, S. M. Yang, J. H. Han and I. Lee, "Thermal Post-Buckling Analysis of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Shell

- Panels," *Smart Materials and Structures*, Vol.13, No.6, pp.1345-1350, 2004.
- 3) A. R. Pelton, N. Rebelo, T. W. Duerig and A. Wick, "Experimental and FEM Analysis of the Bending Behavior of Superelastic Tubing," *The First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, Pacific Grove: MIAS, pp.353-358, 1994.
 - 4) K. Tanaka, "A Thermomechanical Sketch of Shape Memory Effect: One-Dimensional Tensile Behavior," *Res Mechanical*, Vol.18, pp.251-263, 1986.
 - 5) C. Liang and C. A. Logers, "One-Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials," *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.*, Vol.1, pp.207-234, 1990.
 - 6) L. C. Brinson and R. Lammering, "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and Their Applications," *Int. J. Solids Struct.*, Vol.30, No.23, pp.3261-3280, 1993.
 - 7) C. Liang and C. A. Rogers, "A Multi-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys," *Journal of Engineering Mathematics*, Vol.26, pp.429-443, 1992.
 - 8) F. Trochu and Y. Y. Qian, "Nonlinear Finite Element Simulation of Superelastic Shape Memory Alloy Parts," *Computers & Structures*, pp.799-810, 1997.
 - 9) J. Lubliner and F. Auricchio, "Generalized Plasticity and Shape Memory Alloys," *Int. J. Solids. Struct.*, Vol.33, pp.991-1003, 1996.
 - 10) F. Auricchio, R. L. Taylor and J. Lubliner, "Shape-memory Alloys: Macromodelling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.146, pp.281-312, 1997.
 - 11) M. A. Qidwai and D. C. Lagoudas, "Numerical Implementation of a Shape Memory Alloy Thermomechanical Constitutive Model Using Return Mapping Algorithms," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.47, pp.1123-1168, 2000.
 - 12) S. Nemat-Nasser, J. Y. Choi, W.G. Guo and J. B. Isaacs, "Very High Strain-rate Response of a NiTi Shape-Memory Alloy," *Mechanics of Materials*, Vol.37(2-3), pp.287-298, 2005.
 - 13) S. Nemat-Nasser and J. Y. Choi, "Strain rate Dependence of Deformation Mechanisms in a Ni-Ti-Cr Shape-Memory Alloy," *Acta Materialia*, Vol.53, No.2, pp.449-454, 2005.
 - 14) LS-DYNA, Ver. 970 Theory Manual, 2005.