

## Ni-Ti 형상기억합금 선재의 인발 공정 후 형상회복 예측에 관한 연구

김상현<sup>1</sup> · 이경훈<sup>2</sup> · 이선봉<sup>3</sup> · 염종택<sup>4</sup> · 박찬희<sup>4</sup> · 김병민<sup>#</sup>

### Prediction of Shape Recovery for Ni-Ti SMA Wire after Drawing

S. H. Kim, K. H. Lee, S. B. Lee, J. T. Yeom, C. H. Park, B. M. Kim

(Received July 30, 2013 / Revised October 23, 2013 / Accepted November 4, 2013)

#### Abstract

The aim of the current study was to predict shape recovery behavior of Ni-Ti shape memory alloy (SMA) wire after loading-unloading and after wire drawing. The superelasticity of SMA was analyzed by a hyper-elastic model for the Mullins effect using ABAQUS. Firstly, tensile tests and loading-unloading tests of the Ni-Ti SMA wire with a diameter 1.0 mm were performed using an MTS servo-hydraulic tester. The parameters for the Mullins effect were computed by ABAQUS based on curve-fitting of the loading-unloading test data. The proposed FE-model predicted the shape recovery of Ni-Ti SMA after wire drawing. Finally, the effectiveness of the model was verified by drawing experiments. The wire drawing experiments using the Ni-Ti SMA were conducted on a drawing machine(1ton, 50mm/s). In order to evaluate the shape recovery of Ni-Ti SMA, the drawn wires are annealed for 30min at 450°C.

**Key Words** : Shape Memory Alloy, Ni-Ti Alloy, Hyper-Elasticity, Mullins Effect, Wire Drawing

### 1. 서 론

형상기억합금은 상당량의 변형(약 6~8%의 변형률)이 발생한 후 열-기계적 하중에 의하여 원래의 형상을 회복하게 된다[1]. 그 중 Ni-Ti 합금은 다른 형상기억합금에 비해 온도와 응력에 따라 큰 상변태 변형과 높은 회복력을 가진다. 또한, 하중과 온도가 변화되는 동안 발생하는 전위 또는 복원되지 않는 마르텐사이트상에 의한 영구변형 때문에 재료의 기계적 특성이 변화된다[2,3]. 선형적인 탄성거동을 보이는 일반 금속재료와는 달리 형상기억합금은 탄성구간과 상변태 구간이 합쳐져 비선형적인 초탄성 거동을 나타내어 소재에 가해지는 하중을 제거하면 비선형적인

탄성이력을 보이며 형상을 회복하게 된다[4]. 형상회복거동에 의해 초탄성 범위 안에서 변형된 형상기억합금은 하중 제거 시 거의 원형으로 회복하지만, 초탄성 한도를 넘어서 소성변형을 받게 되면 완전 회복되지 않고 잔류 변형률이 발생된다. 이러한 형상기억합금의 영구변형 발생 및 변형거동의 변화는 제품의 설계 시 반드시 고려되어야 하다.

형상기억합금의 복잡한 변형이력을 예측하기 위한 해석모델과 형상기억합금을 이용한 인발공정에 관한 연구는 이미 많은 연구자들에 의해 제시되었다. A. R. Pelton은 Hyper-elastic 모델을 이용하여 형상기억합금 튜브의 굽힘 해석을 수행하였다[5]. Y. J. Kim 등은 Modified Brinson model을 ABAQUS UMAT

1. 부산대학교 첨단정밀공학 협동과정.

2. PNU-IFAM Joint Research Center

3. 계명대학교, 기계자동차공학부

4. 재료연구소 타이타늄 연구실

# Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

서브루틴에 적용하여 형상기억합금의 초탄성 변형 거동 및 형상기억효과를 모사할 수 있는 알고리즘을 개발하였다[6]. 하지만, Hyper-elastic 해석모델의 경우, 형상기억합금의 비선형적인 인장거동은 잘 모사할 수 있으나 하중을 제거하였을 경우의 탄성회복 거동의 예측에는 적합하지 않다. S. K. Wu 등은 Ni-Ti 형상기억합금의 인발공정 시 고려해야 할 패스 설계와 열처리공정을 제시하였으나, 인발공정 후 형상기억합금의 초탄성 특성에 의한 형상 회복 거동에 관한 결과는 제시하지 못 하였다[7]. 그리고 K. Yoshida 등은 형상기억합금 튜브 인발공정의 유한요소해석을 수행하였으나 형상회복에 관한 연구는 부족하였다[2,3].

따라서 본 연구에서는 Hyper-elastic 모델에 응력-변형률 완화 현상을 모사할 수 있는 물린스 효과(Mullins effect)를 결합한 유한요소해석 모델을 이용하여 Ni-Ti 형상기억합금 선재의 변형 및 형상회복 거동을 예측하였다. Hyper-elastic 모델을 통해 Ni-Ti 선재의 인장변형거동을 모사하고, 선재의 형상회복 거동은 물린스 효과 모델을 사용해 나타내었다. 제안된 유한요소해석 모델의 검증을 위해 450°C에서 30분간 풀림처리 후 노냉하여 형상기억 특성을 부여한 Ni-Ti 선재( $\phi 1\text{mm}$ )의 인장 실험, 부하-제하(Loading-unloading) 실험 및 인발 실험을 실시하였다.

## 2. Ni-Ti 형상기억합금의 기계적 특성

### 2.1 실험방법

실험에 사용된 Ni-Ti 형상기억합금 선재의 화학적 조성은 Nickel-50.0at%, Titanium-50.0at%이다. 초기 오스테나이트 상태의 형상기억합금은 외부 하중에 의해 마르텐사이트로 변화되면서 상변태 변형률을 가진다[8]. 선재에 가해지는 하중을 제거하면 역방향의 변태가 발생하고 형상기억 효과에 의하여 본래의 상으로 되돌아오는데, 이를 형상회복(Shape recovery)이라고 한다. Ni-Ti 선재의 상변태 변형률과 초탄성 거동에 의해 발생하는 형상회복거동을 확인하고 유한요소해석 모델에 대입할 물성을 획득하기 위해 만능재료시험기(MTS)를 이용하여 인장실험과 부하-제하 실험을 실시하였다.

### 2.2 실험결과

Ni-Ti 형상기억합금 선재가 상온에서 파단될 때까지

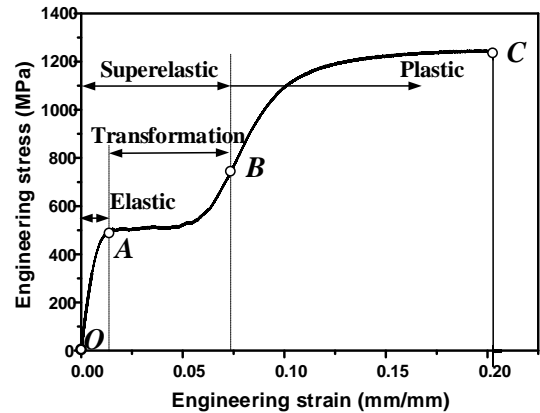


Fig. 1 Stress-strain curve of Ni-Ti SMA wire

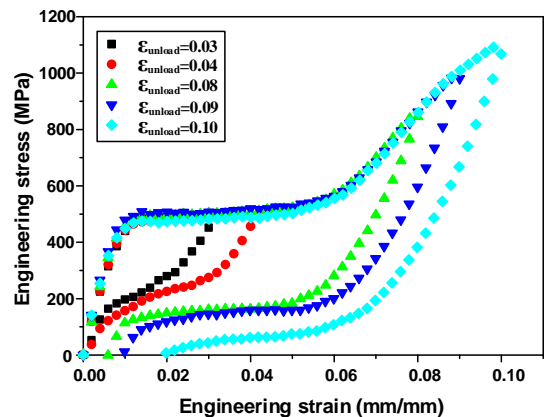
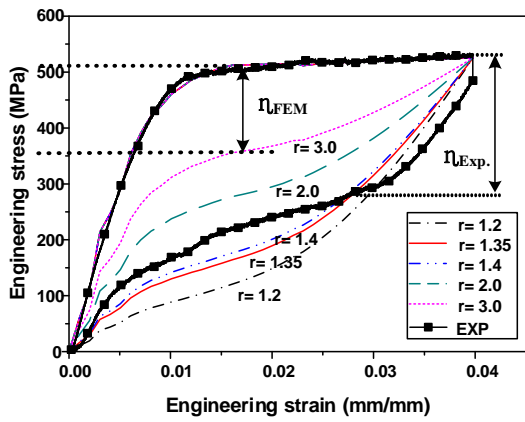


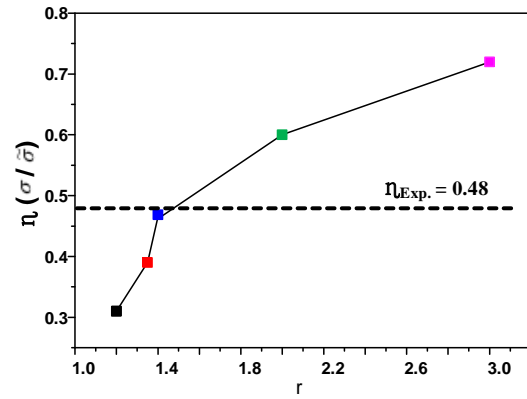
Fig. 2 Stress-strain curves of Ni-Ti SMA for loading-unloading test

인장실험을 수행한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 최대 연신율은 약 20%, 인장강도는 약 1248 MPa이며 초기 탄성구간(O-A)의 변형률은 약 0.01, 상변태 구간(A-B)의 변형률은 약 0.06으로 나타났다.

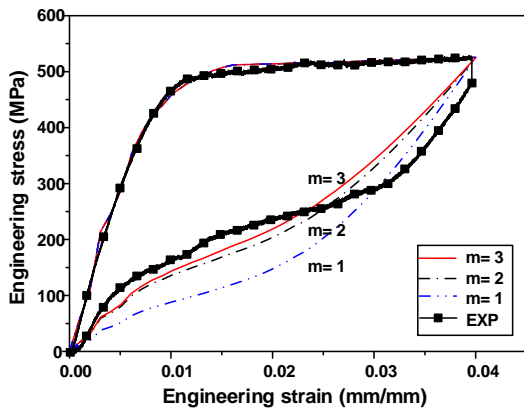
Fig. 2는 Ni-Ti 선재를 변형률이 각각 0.03, 0.04, 0.08, 0.09, 0.1이 될 때까지 인장 후 하중을 제거하는 부하-제하 실험의 결과를 나타낸다. 제하 실험을 변형률이 0.03에서 0.08까지의 지점에서 수행한 결과, 선재는 원형에 가까운 형상회복을 보였다. 반면에 변형률이 0.09 및 0.1의 지점에서 제하 실험을 했을 때, 탄성이력에 따라 형상회복이 되지만 잔류 소성변형률이 발생되었다. 0.1의 변형률 지점에서 시편에 가해지던 하중을 제거한 경우, 0.018의 소성변형률이 나타났다. 이러한 결과는 Ni-Ti 형상기억합금이 상온에서 변형률이 0.08을 초과하게 되면 합금 내부의 마르텐사이트상에 의한 소성변형이 발생하여 형상회복 특성을 잃어버리는 것을 의미한다[9].



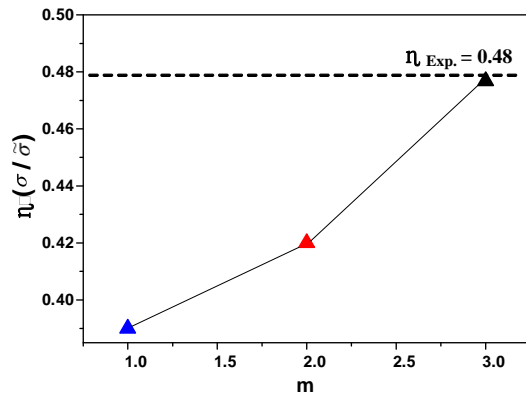
(a)  $\beta=0.5, m=1$



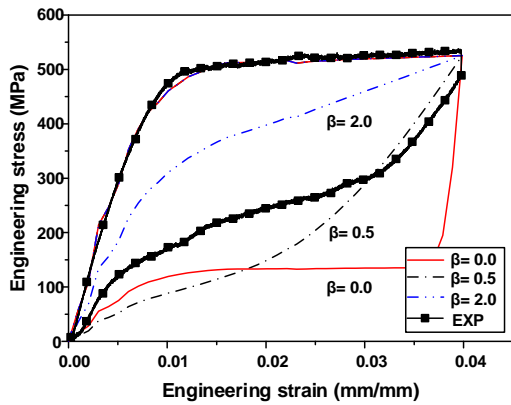
(b) softening ratio,  $\eta$  ( $\beta=0.5, m=1$ )



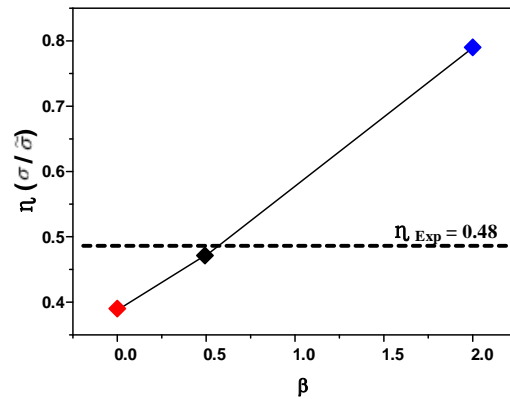
(c)  $r=1.4, \beta=0.5$



(d) softening ratio,  $\eta$  ( $r=1.4, \beta=0.5$ )



(e)  $r=1.4, m=3$



(f) softening ratio,  $\eta$  ( $r=1.4, m=3$ )

Fig. 3 Comparison of mullins effect model to stress-strain curve obtained under loading-unloading test

### 3. Ni-Ti 형상기억합금의 변형거동 모사를 위한 유한요소해석

#### 3.1 유한요소해석 조건

Hyper-elastic 및 Mullins 효과 모델을 결합한 유한요소해석 모델을 이용하여 Ni-Ti 형상기억합금 선재의 인장 및 형상회복 거동을 예측하였다. 앞서 수행한 인장실험 결과인 응력-변형을 선도를 Hyper-

elastic 모델의 물성치로 대입하였다. 여기서 물린스 효과란 초탄성재료가 반복적인 변형 또는 하중이 가해질 때 발생하는 현상으로 재료의 탄성이력 손실로 인해 발생하는 일종의 연화 현상을 의미한다. Fig. 4 는 이러한 연화 현상을 인장 그래프와 제하 그래프를 통해 나타내었다. 하중 부하 시, 특정 변형률 지점의 공칭응력  $\tilde{\sigma}$ 와 제하 시의 공칭응력  $\sigma$ 의 값의 비를  $\eta$ 로 정의 한다.  $\eta$  값을 수식으로 정의하면 아래의 식 (1)로 정의 된다. 물린스 효과를 구현하기 위한 재료 상수  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 는 하중이 제거된 변형체의 탄성회복 선도에 영향을 미친다. Fig. 5 는 재료상수  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 의 값이  $\eta$ 에 미치는 영향을 그래프로 나타내었다[10]. 재료상수  $r$ 은 재료의 연화 정도에 영향을 미치고  $m$ 은 변형에너지 밀도를 경계 짓는다. 그리고  $\beta$ 는 재연화곡선의 기울기를 결정짓는 역할을 한다[11]. 즉, 재료상수  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 의 변화를 통해 재료에 가해지는 하중이 제거 되었을 때의 공칭응력, 변형률 커브의 기울기가 달라지게 된다. 이러한  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 의 재료상수 값은 성형해석 프로그램인 ABAQUS 6-10의 재료 물성치에 대입한다.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf} \left[ \frac{\bar{W}_{\max} - \bar{W}}{m + \beta \cdot \bar{W}_{\max}} \right] \quad (1)$$

유한요소해석에 적용할 물린스 효과 모델의 재료상수 값을 결정하기 위해 부하-제하 해석을 실시하여 실험과 동일한 형상회복거동을 나타내는  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 를 도출하였다. 변형률이 0.04인 지점에서 제하하여 형상을 회복한 Ni-Ti 형상기억합금 선재의 응력-변형률 선도와 유한요소해석에  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 를 변화시켜 도출된 각각의 선도를 비교한 후 가장 오차가 작은 경우의 재료상수 값을 정하는 방법으로 진행하였다. Fig. 3은 각 재료상수 값의 변화에 따른 응력-변형률 선도 및 연화비(Softening ratio,  $\eta$ )를 나타낸다. Ni-Ti 형상기억합금에 대해 도출된 물린스 효과의 재료상수  $r$ ,  $m$ ,  $\beta$ 는 각각 1.4, 3, 0.5 이다.

### 3.2 유한요소해석 결과

Fig. 6는 유한요소해석에서의 응력-변형률 선도 결과와 Ni-Ti 형상기억합금의 인장실험을 통해 얻은 응력-변형률 선도를 비교하여 나타낸 것이다. Hyper-elastic 모델에 물린스 효과를 적용한 유한요소해석의 결과, 변형률이 0.07인 지점까지 상변태 변형률이

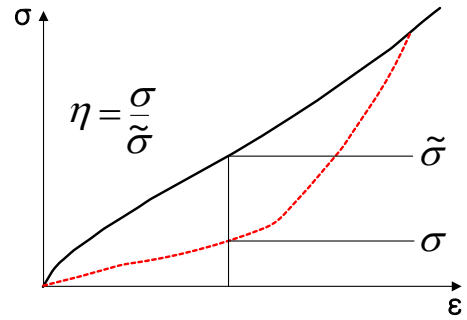


Fig. 4 Definition of function  $\eta$  for stress-strain curve

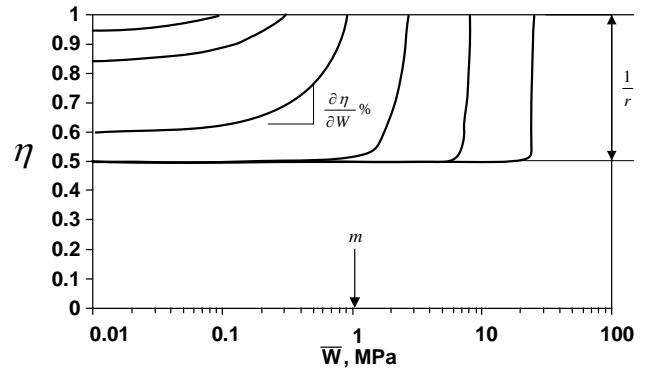


Fig. 5 Dependence of the ratio  $\eta$  on instantaneous and strain energy density

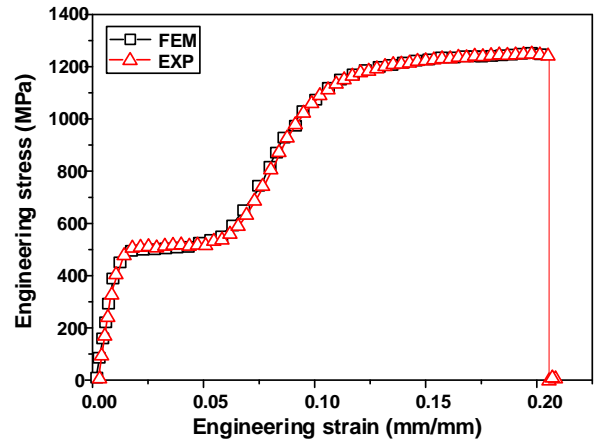


Fig. 6 Comparison of simulation and experimental result for tensile test

나타나는 것과 이후 소성영역에서의 변형거동이 Ni-Ti 형상기억합금의 인장실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7는 부하-제하 실험 결과와 유한요소해석의 결과를 비교한 것이다. 변형하중을 제거했을 때 탄성이력 선도의 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하

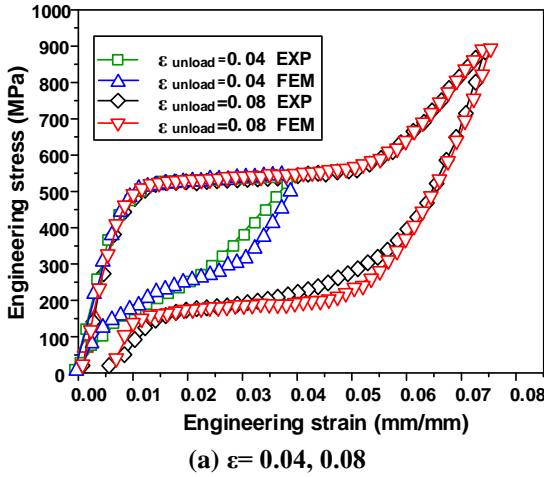


Fig. 7 Comparison of simulation and experimental result for tensile test

었다. Ni-Ti 선재가 상변태 변형률을 지나 소성변형을 받은 상태에서는 하중을 제거하면 원형으로 회복하지 못하고 잔류 소성변형률을 나타내었다. 연신율이 0.08인 지점에서 제하한 경우, 해석 및 실험에서 소성변형률은 각각 0.0049와 0.0051의 소성변형률을 나타내었다. 또한, 연신율이 0.1인 지점에서 제하한 경우에서도 해석과 실험이 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 이를 통해 Hyper-elastic 및 물린스 효과 모델을 결합한 유한요소해석 모델이 Ni-Ti 형상기억합금의 소성변형률을 예측하는데 유용함을 확인하였다.

#### 4. Ni-Ti 형상기억합금 선재의 인발 해석 및 실험

##### 4.1 유한요소해석

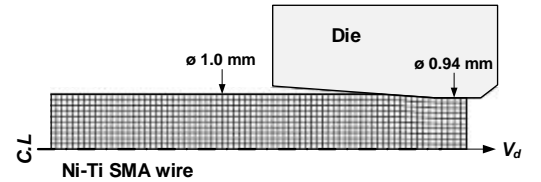


Fig. 8 FE-model of wire drawing process

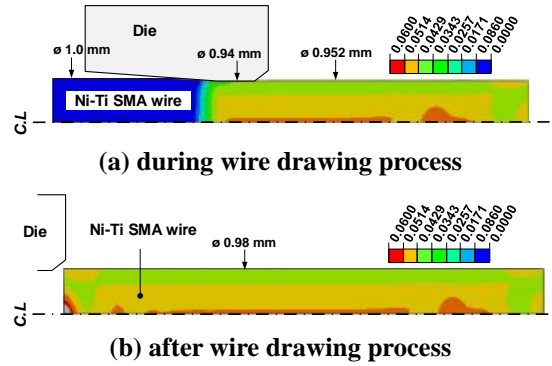


Fig. 9 Distribution of effective strain and diameter of Ni-Ti SMA wire

본 연구에서 제시한 Ni-Ti 형상기억합금의 변형거동을 모사할 수 있는 해석 모델의 타당성을 검증하기 위해 인발공정에 대하여 성형해석을 실시하였다. Fig. 8은 Ni-Ti 형상기억합금 선재 인발 공정의 해석 모델을 나타낸 것이다. 성형해석은 상용 S/W인 ABAQUS를 이용하였으며, 대칭면을 고려하여 1/2 단면에 대하여 수행되었다. 유한요소의 개수는 약 650개이고 최소사이즈는 약 0.005mm이며, 선재와 금형 간의 마찰계수( $\mu$ )는 0.11로 설정하였다. Ni-Ti 선재의 인장실험을 통해 도출된 응력-변형률 선도 및 물린스 효과의 재료상수 값인  $r=1.4$ ,  $m=3$ ,  $\beta=0.5$ 를 대입하였다.

Fig. 9는 성형해석 결과를 인발 공정이 진행됨에 따른 변형률 분포를 나타낸 것이다. Ni-Ti 형상기억합금 선재의 단면 평균변형률은 금형 랜드부를 빠져나오면서 약 0.01 감소되었다. 이로 인하여 Ni-Ti 선재는 0.04mm 만큼 형상회복이 발생하였다. 최종 선재의 직경은 0.98mm로 나타났다.

##### 4.2 실험

본 연구에서 제안한 해석 모델 및 성형해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 해석과 동일한 조건 하에서 인발 실험을 수행하였다. Fig. 10은 실험에 사용된 인발기(1ton, 50mm/s)를 나타내었다. 인발 다이의 소재는 다이아몬드이고, 선재와 금형의 마찰



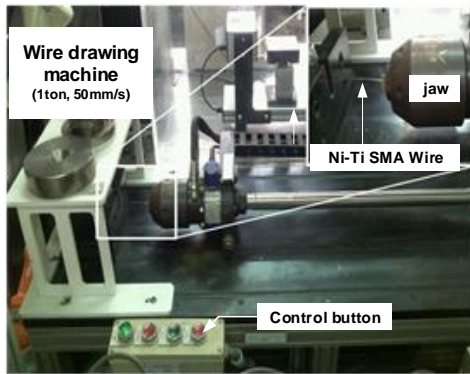


Fig.10 Wire drawing experiment

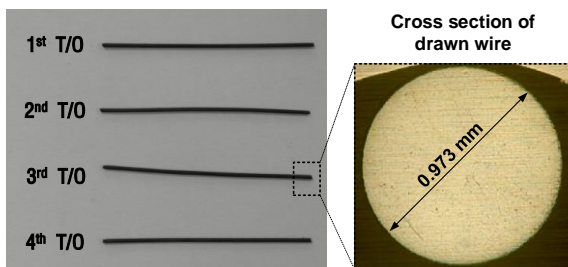


Fig.11 Cross section of final product

감소를 위해 고체윤활제인 스테아르산 나트륨을 사용하였다.

Fig. 11 는 인발 실험을 통해 생산된 제품을 나타내었다. 실험 결과, Ni-Ti 선재 단면의 직경은 설계치수인 0.94mm 보다 큰 0.973mm 로 나타났다. 설계 단면감소율은 11.6%이지만 실제 제품의 단면감소율은 5.3%라는 실험결과를 얻었다. 이러한 결과는 소재가 다이스를 빠져 나옴과 인발기의 하중이 없어졌을 때 형상기억합금 소재의 초탄성 특성에 의해 원주 방향으로 형상회복이 이루어진 것으로 판단된다. 그리고 해석의 결과와 실험결과를 비교 하였을 때, 0.007mm의 차이를 보였지만, 형상기억합금 선재를 인발한 후의 형상회복 현상을 모사하고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 해석 모델을 적용할 경우, 인발 후의 변형거동 및 형상회복을 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Ni-Ti 형상기억합금의 형상회복을 예측할 수 있는 유한요소해석 모델을 제안하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) Ni-Ti 형상기억합금의 인장 실험 및 부하-제하

실험 결과, 선재의 초탄성 변형률, 항복응력, 최대연신율 및 인장강도는 각각 0.074, 750MPa, 20%, 1248MPa 로 나타났다.

(2) 응력변형률 선도 및 연화비의 비교를 이용하여 플린스 효과의 재료 상수인  $r, m, \beta$ 를 각각 1.4, 3, 0.5 로 정의하였다.

(3) 본 연구에서 제안한 Hyper-elastic 및 플린스 효과 모델을 결합한 유한요소해석 모델을 직경 1 mm 선재의 인발 공정에 적용하였다. 성형해석과 인발 실험을 수행한 결과, 성형된 선재의 직경은 설계치수인 0.94mm 보다 큰 0.98mm 와 0.973mm 로 나타났다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 해석모델을 적용할 경우, Ni-Ti 형상기억합금의 형상회복을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

- [1] K. S. Ho, 2010, A Phenomenological Constitutive Model for Pseudoelastic Shape Memory Alloy, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No.8 pp. 468~473.
- [2] K. Yoshida, H. Furuya, 2004, Mandrel Drawing and Plug Drawing of Shape-memory-alloy Fine Tubes used in Catheters and Stents, *J. Material. Process. Tech.*, Vol. 19, pp. 145~150.
- [3] K. Yoshida, M. Watanabe, H. Ishikawa, 2001, Drawing of Ni-Ti Shape-memory-alloy Fine Tubes used in Medical Tests, *J. Material. Process. Tech.*, Vol. 19, No. 1, pp. 251~255.
- [4] S. H. Kim, M. H. Cho, 2007, Experimental Test and Numerical Simulation on the SMA Characteristics and Behaviors for Repeated Actuations, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 3, pp. 373~379.
- [5] A. R. Pelton, N. Rebelo, T. W. Duerig, A. Wick, 1994, *The First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*(editor: A. Pelton et al), Pacific Grove: MIAS, California, USA, pp. 353~358

- [6] Y. J. Kim, J. H. Chung, J. J. Lee, 2008, Analysis on the Behavior of the Shape Memory Alloy using Abaqus UMAT, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 32, No.12, pp. 1153~1160.
- [7] S. K. Wu, H. C. Lin, W. C. Yen, 1996, A Study on the Wire Drawing of TiNi Shape Memory Alloys, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 215, No. 1-2, pp.113~119.
- [8] K. S. Ho, 2011, An Improved Constitutive Model of Shape Memory Alloy, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 5, pp. 350~356.
- [9] X. Wang, B. Xu, Z. Yue, 2007, Phase Transformation Behavior of Pseudoelastic NiTi Shape Memory Alloys under Large Strain, J. Alloy. Compd., Vol. 463, No. 1-2, pp. 417~422.
- [10] R. E. Paige, W. V. Mars, 2004, ABAQUS Users' Conference, Cooper Tire & Rubber Company, Boston, Massachusetts, USA, pp. 1~15.
- [11] J. Diani, B. Fayolle, P. Gilormini, 2009, A Review on the Mullins Effect, Eur. Polym. J., Vol. 45, No. 3, pp. 601~612.