Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.33, No.6, pp.373-381, December, 2021

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2021.33.6.373

초탄성 NiTi 형상기억합금의 이력모델 개발

이창석[1] · 전종수[2*]

[1]연구조교수, 한양대학교, 건설환경공학과, [2]조교수, 한양대학교, 건설환경공학과

Hysteretic Model for Superelastic NiTi Shape Memory Alloys

Lee, Chang Seok[1], Jeon, Jong-Su[2*]

[1]Research Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea
[2]Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

Abstract - This study presents a simple hysteretic model to reproduce the stress-strain response of superelastic NiTi shape memory alloys (SMAs). The developed model is capable of simulating the functional degradation of SMAs, which causes the reduction of the transformation stress and the accumulation of permanent strain. Computational efficiency is achieved by idealizing the stress-strain response in a multi-linear phenomenological manner. The model capability is validated against existing experimental results. The developed model reproduced the experimental transformation stress reduction and permanent strain accumulation with fair accuracy.

Keywords - NiTi shape memory alloys, Superelasticity, Functional degradation, Hysteretic model, Stress-strain response

1. 서 론

니켈-티타늄(NiTi) 형상기억합금(shape memory alloy, 이하 SMA)의 초탄성(superelastic) 거동 특성을 이용한 진동제어 장치는 자기복구(self-centering)능력이 뛰어나기 때문에 지반운동으로 인한 건설 구조물의 진동을 저감시키는데 탁월한 효과가 있는 것으로 알려져 있다[1]-[3]. 최근에는 NiTi SMA의 현상학적(phenomenological), 열기계적(thermomechanical), 미시기계적(micromechanical) 재료모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 기반 연구가 증가하는 추세이다[4]. 현상학적 모델은 실험에서 관측된 SMA의 열기계적 특성을 경험적으로 풀어낸 모델로, 계산이 간단하다는 장점이 있다. 열기계적 모델과 미시기계적 모델은 실험으로 관측된 SMA의 오스테나이트(austenite)에서 마르텐사이트(martensite)에 이르는 상변이(phase transformation)을 모사하는데 효과적이다. 그러나 이 두 모델은 현상학적 모델에 비해 복잡하고 강도 높은 계산량과 전문적인 지식을 필요로 하기 때문에 건설 분야에서는 현상학적 모델을 선호하는 추세이다. 최근에는 SMA를 이용한 구조물 보수 및 보강에 대한 연구[5]-[10]가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 지반운동은 기본적으로 반복하중 특성을 가지고 있으며, 이로 인해 SMA의 기능저하(functional degradation)[11]가 발생할 수 있다는 실험적 연구결과와는 달리, 과거 건설 분야에서 사용된 현상학적 모델은 SMA의 기능저하에 대해 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 최소한의 모델매개변수로 반복하중을 받는 초탄성 NiTi SMA의 응력-변형률 응답을 정확히 모사할 수 있는 현상학적 이력모델을 개발하였다. NiTi SMA의 응력-변형률 응답은 과거에 수행된 시험결과를 참고하여 다선형 거동으로 이상화하였다. 또한 과거 NiTi SMA의 해석적 연구에서 간과되었던 기능저하로 인한 영구변형률(permanent strain) 누적과 상변이 응력 저감을 도입함으로써 과거 연구와의 차별성을 강조하였다. 개발된 모델의 수치안정성(numerical stability)과 모델매개변수 민감도분석을 수행하고, 실험결과와의 비교를 통한 모델의 정확성을 평가하였다.

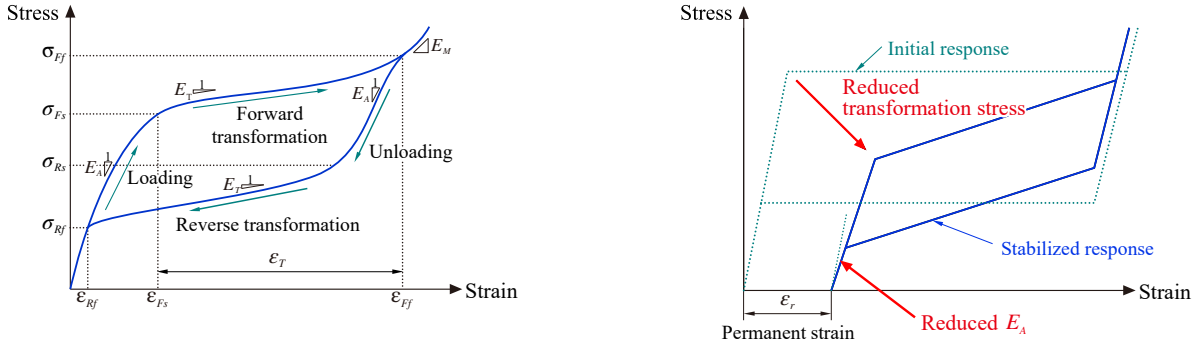
Note.-Discussion open until June 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 15, 2021; revised on November 22, 2021; approved on November 22, 2021.
Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-2-2220-0324 Fax. +82-2-2220-0399
E-mail. jongsujeon@hanyang.ac.kr

2. 기능저하를 고려한 NiTi SMA 모델 개발

NiTi SMA는 초탄성 거동[12]으로 인해 재료에 큰 변형이 발생하더라도 하중제하(unloading) 이후에 영구변형이 생기지 않으면서 상당량의 에너지를 소산할 수 있다[13]. 이러한 초탄성 거동은 온도나 응력변화로 인해 유도되는 오스테나이트에서 마르텐사이트에 이르는 상변이에 기인한다[14]. 초탄성 NiTi SMA의 응력-변형률 응답 개형도는 Fig. 1에 제시되어 있다. SMA에 가해지는 응력이 증가하여 순방향 상변이 시작 응력(forward transformation start stress, σ_{Fs})에 도달하면 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변이가 발생한다. 하중제하시에는 SMA의 응력이 역방향 상변이 시작 응력(reverse transformation start stress, σ_{Rs})으로부터 역방향 상변이 종료 응력(reverse transformation finish stress, σ_{Rf})에 걸쳐 마르텐사이트에서 오스테나이트로 돌아오게 된다.

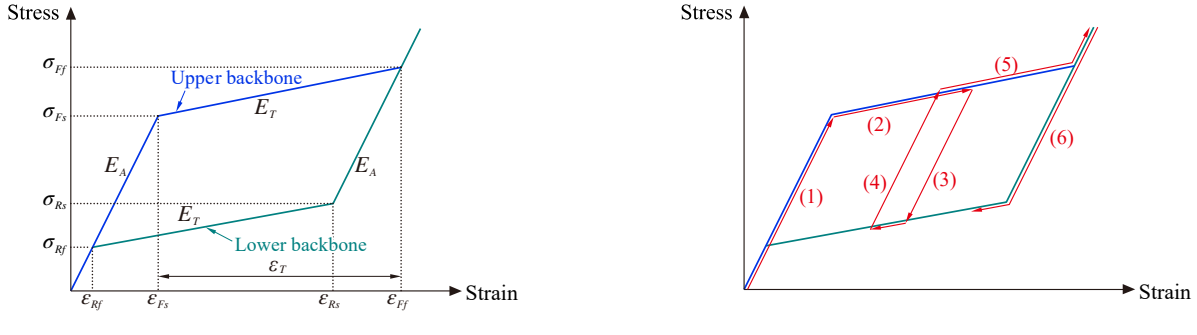
이상적인 상황에서는 순방향 상변이 때 마르텐사이트로 변화한 초탄성 NiTi SMA 원자격자(atomic lattice)는 역방향 상변이를 거쳐 오스테나이트로 돌아오게 된다. 그러나 현실에서는 하중이 제하되어도 마르텐사이트로 상변이한 원자격자의 일부는 오스테나이트로 돌아오지 못하고 오스테나이트와 마르텐사이트가 혼재하는 현상이 발생한다[15]. 이 때문에 상변이 응력은 초기의 순수한 오스테나이트일 때와 동일하지 않고 영구변형이 발생하는데, 이와 같은 현상을 NiTi SMA의 기능저하라고 한다. 기능저하는 반복가력 횟수가 증가함에 따라 점진적으로 누적되며, 일정 횟수에 도달하면 안정화되어 더 이상 발생하지 않는 특성이 있다[16]. 반복하중으로 인한 기능저하는 SMA의 응력-변형률 응답에 다음과 같은 영향을 미친다. (1) 상변이 응력의 점진적 감소[17], (2) 영구변형의 점진적 증가[18], (3) 오스테나이트 계수(austenite modulus)의 점진적 감소[18] 등이 이에 해당한다. 초기와 안정화된 NiTi SMA 응력-변형률 응답 개형도는 Fig. 1(b)에 나타나 있다.

현재 건설 분야에서 주로 사용되고 있는 NiTi SMA 모델[19]-[21]의 개형은 Fig. 2에 제시되어 있다(이하, 기존모델). Fig. 2(a)에서 보듯이 기존모델을 구성하기 위해 필요한 모델매개변수는 E_A, E_T, σ_{Fs}, σ_{Rf}, ε_T이다. 하지만 기존모델에서는 SMA의 응력-변형률 응답을 비교적 간단하게 이상화하였고 반복하중으로 인한 기능저하가 고려되지 않고 있다



(a) Idealized phase transformation process (b) Functional degradation

Fig. 1. Schematic stress–strain response of superelastic SMA



(a) Backbone (b) Cyclic response

Fig. 2. Conventional hysteretic model

(Fig. 2(b)). 참고로 트리거라인 모델(trigger-line model[22]) 도 존재하지만, 해당 모델은 Fig. 2에 제시된 모델에 비해 사용 빈도가 낮고, Fig. 2의 모델과 유사한 동적 응답을 보이는 것으로 확인[4]되었기 때문에 본 연구에서 고려되지 않았다. 본 연구에서 개발된 모델(이하, 개발모델)의 개선된 점은 이어지는 절에 자세히 설명되어 있다.

2.1 개발모델의 골격곡선

이력모델에서 골격곡선은 주어진 변형률에 대해 해석 모델이 발현할 수 있는 응력의 최대경계를 뜻한다[23]. NiTi SMA의 고유한 응력-변형률 응답을 정의하기 위해 Fig. 3(a)에 제시된 바와 같이 총 6개의 모델매개변수(E_A, E_M, E_T, σ_{Fs}, σ_{Rf}, ε_T)가 필요한데 이를 이용하여 하한과 상한 골격곡선을 정의할 수 있다. 이외의 매개변수들은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_{Fs} = \frac{\sigma_{Fs}}{E_A} \tag{1}$$

$$\sigma_{Ff} = \sigma_{Fs} + E_T \varepsilon_T \tag{2}$$

$$\varepsilon_{Ff} = \varepsilon_{Fs} + \frac{\left(\sigma_{Ff} - \sigma_{Fs}\right)}{E_T} \tag{3}$$

$$\varepsilon_{Rf} = \frac{\sigma_{Rf}}{E_A} \tag{4}$$

골격곡선 매개변수와 식 (1) - (4)를 통해 계산된 매개변수를 이용하여 상한 및 하한 골격곡선은 각각 식 (5), 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_A \varepsilon & \text{for } \varepsilon < \varepsilon_{Fs} \\ \sigma_{Fs} + E_T(\varepsilon - \varepsilon_{Fs}) & \text{for } \varepsilon_{Fs} \le \varepsilon < \varepsilon_{Ff} \\ \sigma_{Ff} + E_M\left(\varepsilon - \varepsilon_{Ff}\right) & \text{for } \varepsilon_{Ff} \le \varepsilon \end{cases} \tag{5}$$

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_A \varepsilon & \text{for } \varepsilon < \varepsilon_{Rf} \\ \sigma_{Rf} + E_T\left(\varepsilon - \varepsilon_{Rf}\right) & \text{for } \varepsilon_{Rf} \le \varepsilon \end{cases} \tag{6}$$

반복하중으로 인한 개발모델의 이력규칙(hysteretic rule)은 Fig. 3(b)와 같다. 그림에서 (1)부터 (6)까지 나열된 숫자는 주어진 응력에 대해 개발모델이 움직이는 경로를 나타낸 것이다. 하중재하(loading)시 응력-변형률 응답은 골격곡선 상에 머무른다. 만약 Fig. 3(b)의 (2), (4), 또는 (6)과 같이 하중제하(unloading)가 발생하면, 응력은 기울기 E_A를 따라서 움직인다.

2.2 NiTi SMA의 기능저하

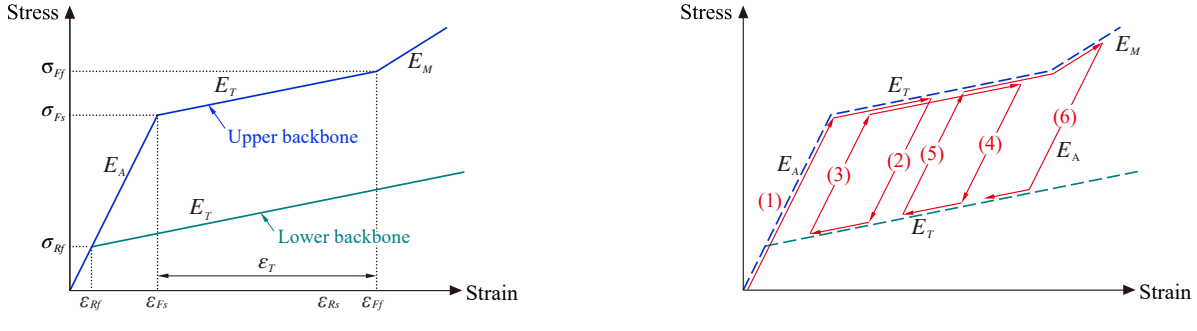
이 절에서는 개발모델에 도입된 NiTi SMA의 기능저하에 대해 설명한다. 개발모델은 Fig. 4에 제시된 바와 같이 NiTi SMA에서 대표적으로 발생할 수 있는 2가지 기능저하(상변이 응력 저감과 영구변형 누적)를 고려할 수 있다.

초탄성 NiTi SMA 실험체에 반복하중이 작용하면 초기 사이클에서는 응력경계(stress boundary)가 급격하게 감소하고, 사이클이 누적될수록 응력 감소폭이 줄어드는 지수감쇠(exponential decay)가 관찰되었다[18]. 영구변형률은 반복가력 횟수에 따라 지수성장(exponential growth)을 보였다. 이와 같은 현상을 식 (7) - (11)을 통해 개발모델에 구현하였으며, 이는 과거 해석적 연구에서 관측된 바와 유사한 경향을 보인다[23].

$$\sigma_{Fs} = \sigma_{Fs}^{1}\left[1 - c_{s1}(1 - e^{-c_{s2}x})\right] \tag{7}$$

$$\sigma_{Ff} = \sigma_{Ff}^{1}\left[1 - c_{s1}(1 - e^{-c_{s2}x})\right] \tag{8}$$

$$\sigma_{Rs} = \sigma_{Ff} - \left(\sigma_{Ff}^{1} - \sigma_{Rs}^{1}\right) \tag{9}$$



(a) Backbone (b) Cyclic response

Fig. 3. Developed phenomenological hysteretic model

$$\sigma_{Rf} = \sigma_{Fs} - \left(\sigma_{Fs}^{1} - \sigma_{Rf}^{1}\right) \tag{10}$$

$$\varepsilon_r = c_{r1}(1 - e^{-c_{r2}x}) \tag{11}$$

여기서, σ_{Fs}와 σ_{Ff}는 각각 순방향 상변이 시작 및 종료 응력, σ_{Rs}와 σ_{Rf}는 각각 역방향 상변이 시작 및 종료 응력, 그리고 ε_r은 영구변형률(Fig. 4(b))을 의미한다. 나열된 상변이 응력 관련 매개변수에 붙은 아래첨자 1은 기능저하가 발생하지 않은 상변이 응력이며 식 (5), 식 (6)에 사용된 골격곡선상의 값과 동일하다.

미시기계적 모델의 경우, 불완전한 상변이로 인해 누적된 잔류 마르텐사이트 부피분율(residual martensite volume fraction)에 의해 기능저하 정도가 계산된다[16]. 이와 같은 복잡한 계산법은 미시기계 분야 비전문가들의 SMA 모델 활용에 어려움을 줄 수 있으므로, 본 연구에서는 과거 실험결과를 바탕으로[25], 식 (12)와 같이 SMA모델에 가해진 누적변형률을 제시하였다.

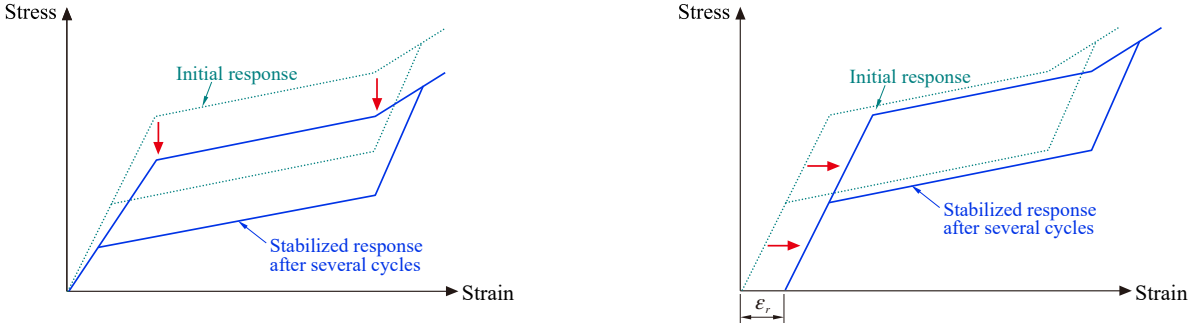
$$x = \int \sqrt{1 + \left(\frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right)^2}\, dt \tag{12}$$

여기서, t는 해석단계(analysis step), 그리고 $\varepsilon(t)$는 t에 따라 변화하는 모델의 변형률이다. 식 (12)를 통해 계산된 누적변형률을 식 (7), 식 (8), 식 (11)에 대입하여 개발모델을 이용한 응력-변형률 응답의 기능저하를 계산할 수 있다. 참고로 식 (12)는 과거 실험결과[14]를 참고하여, 모델에 가해진 변형률이 양수일 때와 음수일 때에 대하여 독립적으로 계산된다.

3. 기존모델과 개발모델의 비교

이 장에서는 현재 건설 분야에서 사용되고 있는 NiTi SMA 모델(기존모델)과 개발된 모델(개발모델)의 응력-변형률 응답을 비교하였다. 이를 위해 이전 장에서 개발된 초탄성 NiTi SMA 모델을 오픈소스 구조해석 소프트웨어인 OpenSees[26]에 'SuperelasticSMA'라는 새로운 'UniaxialMaterial' 클래스(class)로 도입하였다. 'SuperelasticSMA'의 응력-변형률 응답은 Table 1에 제시된 임의의 모델 매개변수를 이용하여 계산되었다. 괄호 밖의 숫자는 인장력, 괄호 안의 숫자는 압축력에 대한 값을 의미한다. Table 1에 제시된 E_A, E_M, E_T, σ_{Fs}, σ_{Rf}, ε_T는 기능저하가 발생하기 전, NiTi SMA 모델(기존모델 및 개발모델)의 골격곡선을 구성하는 데 사용된다.

Fig. 5에서는 600 MPa의 인장응력을 10회 반복하는 인장-제하(tension-unloading) 사이클에 대한 기존모델과 개발모델의 응력-변형률 응답을 비교하였다. 개발모델의 경우, 첫 번째 사이클과 마지막 사이클을 각각 빨간색과 파란색으로 강조하여 기능저하로 인한 응력-변형률 응답 차이를 확인하기 쉽게 하였다. 기존모델은 기능저하가 고려되지 않았기 때문에 10번의 사이클이 반복되는 동안 계산된 응력-변형률 응답이 모두 동일하였다(Fig. 5(a)). 개발모델의 해석결과는 Fig. 5(b)에 나타내었다. 이 그림에서 첫 번째 사이클(파란색 실선)과 마지막 사이클(빨간색 실선)을 비교하면, 사이클이 반복되면서 응력-변형률 곡선의 면적이 점차 감소하고 영구변형률이 증가하였다.

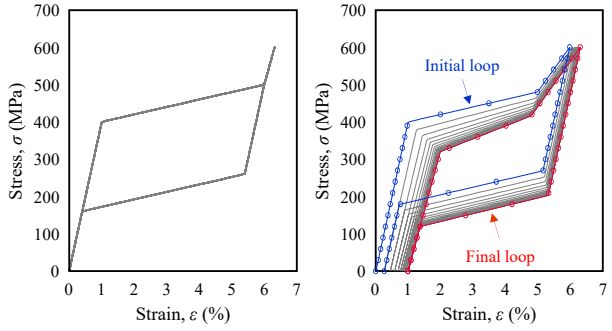


(a) Transformation stress boundary (b) Permanent strain

Fig. 4. Schematic representation of stabilized functional degradation after experiencing several cycling

Table 1. Model parameters used for sensitivity analysis

E_A (MPa)	E_M (MPa)	E_T (MPa)	σ_{Fs} (MPa)	σ_{Rf} (MPa)	ε_T	c_{r1}	c_{r2}	c_{s1}	c_{s2}
40,000	2,000 (2,400)	12,000 (15,600)	400 (600)	200 (150)	0.04 (0.02)	0.01	5	0.2	5



(a) Stress–strain response of conventional model (b) Stress–strain response of proposed model

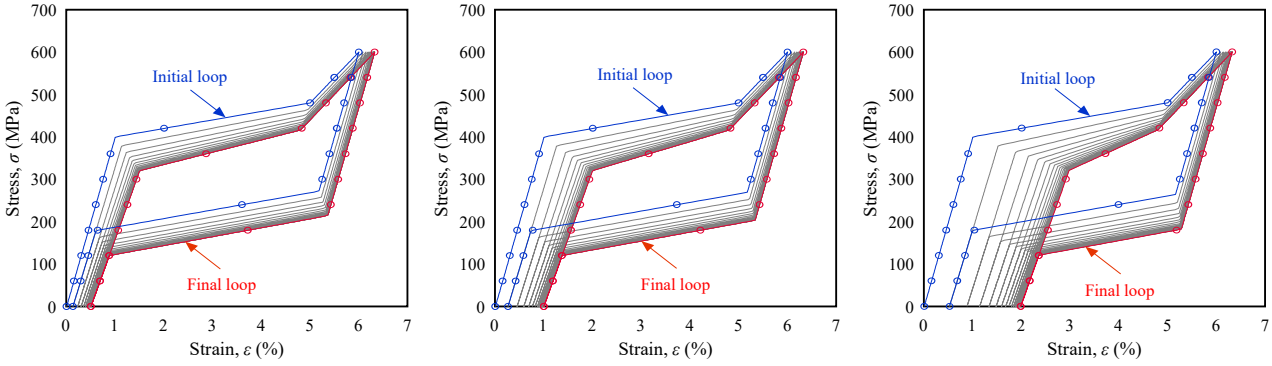
Fig. 5. Simulation results under tension–unloading cycling

4. 모델 매개변수 민감도 분석

이 절에서는 개발모델의 기능저하 관련 모델매개변수(c_{r1}, c_{r2}, c_{s1}, c_{s2})가 응력-변형률 응답에 미치는 영향을 Fig. 6부터 Fig. 9에 각각 나타내었다. Table 1에 제시된 모델매개변수를 기본값으로 하여 매 그림마다 하나의 매개변수만 변화시키고 나머지 매개변수의 값은 고정시켰다. 반복하중의 경우 가력진폭이 600 MPa인 인장-제하 하중을 총 20회 반복하였다. 기존모델은 기능저하를 고려할 수 없어 매 사이클마다 동일한 응력-변형률 응답을 보이는 것을 Fig. 5에서 확인하였으므로 민감도 분석에서 제외되었다.

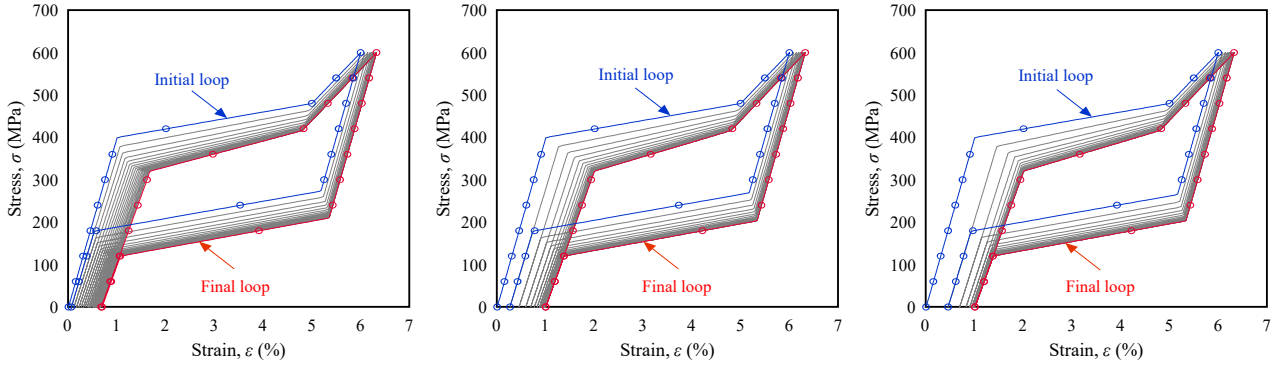
c_{r1}은 0.005에서 0.02까지 변화시켰으며, 이때 개발모델의 응력-변형률 응답에 미치는 영향은 Fig. 6에 나타내었다. 식 (11)에서 확인할 수 있듯이, c_{r1}은 반복하중으로 인한 개발모델에 누적될 수 있는 최대 영구변형률과 사이클마다 누적되는 영구변형률의 크기를 결정한다. 만약 c_{r1}이 0이라면 영구변형률은 발생하지 않는다. Fig. 7과 식 (11)에서 확인할 수 있듯이 c_{r2}는 사이클마다 누적되는 영구변형률의 크기에만 영향을 준다. Fig. 7(a)의 경우 마지막 사이클에서 누적된 영구변형률이 0.006 정도인데, 이는 c_{r2}가 작아서 발생한 현상이다. 만약 더 많은 사이클이 누적된다면 최댓값인 c_{r1} = 0.01에 도달할 것이다.

식 (7), 식 (8), 식 (11)에서 확인할 수 있듯이, 상변이 응력저감과 관련된 c_{s1}, c_{s2}의 역할은 c_{r1}, c_{r2}와 유사하다. c_{s1}은 초



(a) c_{r1} = 0.005 (b) c_{r1} = 0.01 (c) c_{r1} = 0.02

Fig. 6. Sensitivity of parameter c_{r1} on stress–strain response

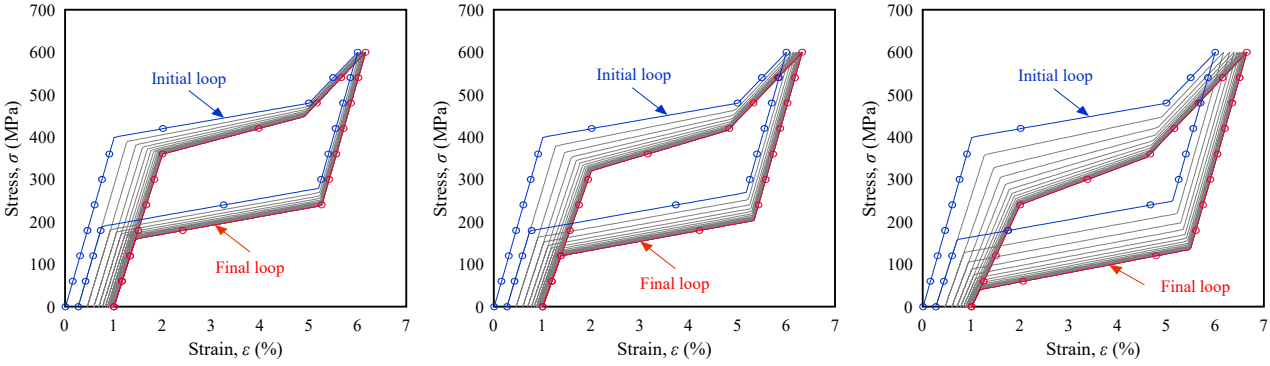


(a) c_{r2} = 1 (b) c_{r2} = 5 (c) c_{r2} = 10

Fig. 7. Sensitivity of parameter c_{r2} on stress–strain response

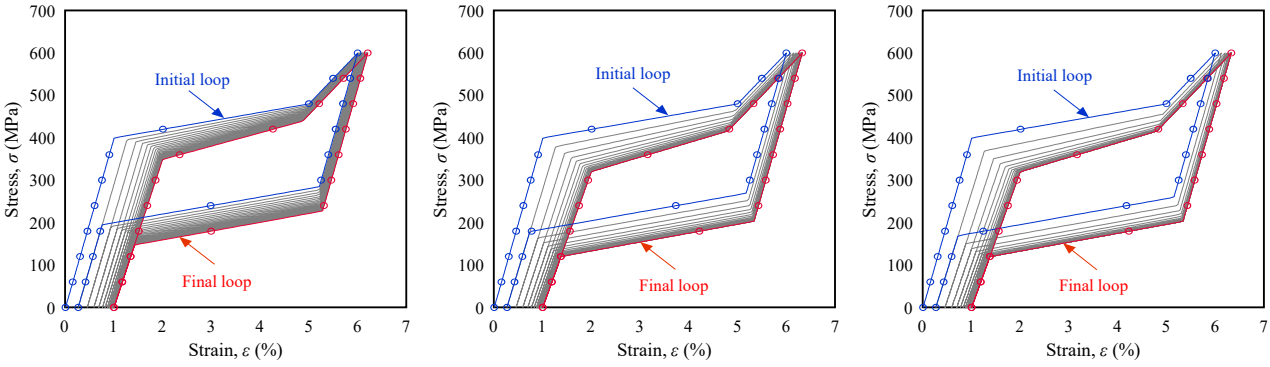
기 사이클의 상변이 응력에 대해 발생할 수 있는 최대 상변이 응력 저감량과 사이클마다 발생하는 상변이 응력의 크기를 결정하며, 이는 Fig. 8에서 확인할 수 있다. c_{s1}은 0부터 1 사이의 값을 갖는다. c_{s2}는 사이클마다 발생하는 상변이 응력 저감 정도를 결정한다. c_{s2}에 큰 값이 할당되면 사이클마다 발생하는 상변이 응력 저감 정도가 증가하게 된다(Fig. 9).

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)를 비교해 보면, 마치 c_{r2}가 최대 영구변형률을 지배하는 것처럼 보일 수 있다. 이는 이전 문단에서 설명하였듯이, Fig. 7(a)의 c_{r2}가 작기 때문에 20사이클만으로 최대 누적 영구변형률(c_{r1} = 0.01)에 도달하지 못했기 때문이다. Fig. 10에서는 c_{r1}, c_{r2}, c_{s1}, c_{s2}로 인해 발생한 기능저하를 40 사이클까지 확장하여 나타내었다. Fig. 10(a)를 보면, 영구변형률이 Fig. 7(a)에 비해 임계값(c_{r1} = 0.01)에 더 가까워진 것을 확인할 수 있다. c_{s2}에도 동일한 설명을 적용할 수 있다. Fig. 10(d)에서 40번째 사이클의 σ_{Fs}가 20번째 사이클에 비해 임계값(c_{s1} = 0.2)에 가까워진 것을 확인할 수 있다.



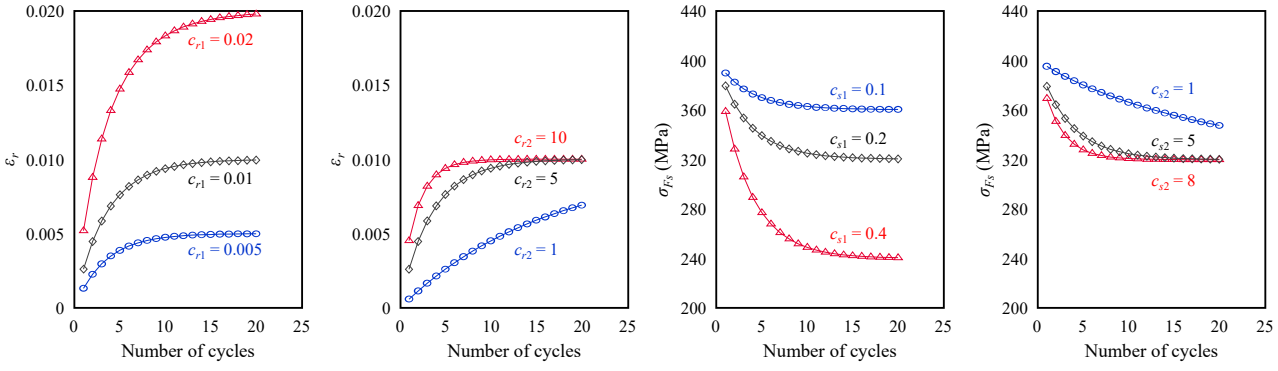
(a) c_{s1} = 0.1 (b) c_{s1} = 0.2 (c) c_{s1} = 0.4

Fig. 8. Sensitivity of parameter c_{s1} on stress–strain response



(a) c_{s2} = 1 (b) c_{s2} = 5 (c) c_{s2} = 8

Fig. 9. Sensitivity of c_{s2} on stress–strain response

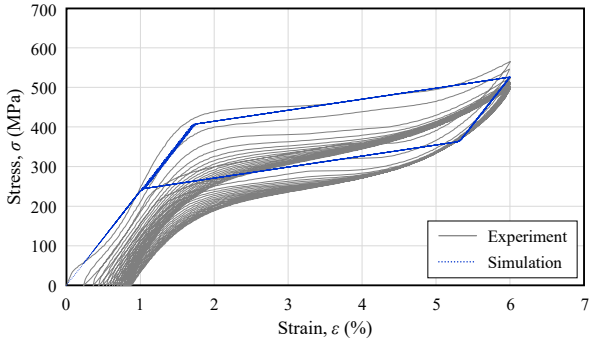


(a) c_{r1} (b) c_{r2} (c) c_{s1} (d) c_{s2}

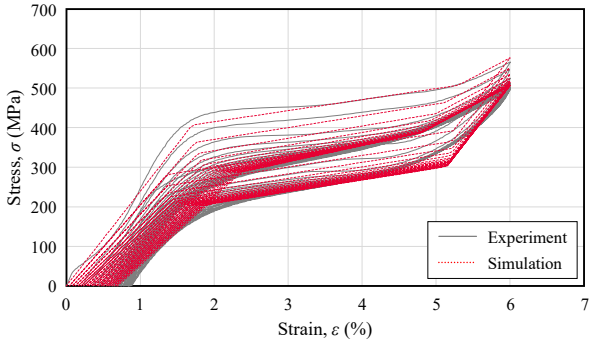
Fig. 10. Sensitivity of model parameters on functional degradation of stress–strain response

5. 실험결과와 해석결과의 비교

이 장에서는 개발모델이 실제 실험결과를 잘 모사할 수 있는지 확인하였다. 검증에 사용된 실험체는 McCormick *et al.*[27]에 의해 수행되었으며, 12.7 mm의 지름을 가진 봉형태이다. 실험체는 6 % 변형률에 도달한 후 하중을 제하하는 인장-제하 사이클을 20번 반복하였다. Fig. 11(a)에서 보는 것과 같이 기존모델은 기능저하를 고려할 수 없으므로 모든 사이클이 동일한 결과를 보였다. 반면 개발모델의 경우, 실제 초탄성 SMA 시험편에서 발생한 상변이 응력 저하 및 영구변형률 누적을 모사할 수 있었기 때문에 훨씬 실험과 유사한 결과를 보였다(Fig. 11(b)). 해석결과와 실험결과의 평균제곱오차(*MSE*)를 비교해 보면, 개발모델은 2.65로, 기존모델(*MSE* = 15.33)의 약 17 %에 해당한다. Fig. 11(b)에 사용된 σ_{Fs}는 395 MPa로, 실제 실험에서 계측된 421 MPa과는 약 7 %의 오차를 보였다.



(a) Existing model



(b) Developed model

Fig. 11. Comparison of experimental data and simulated results

6. 결 론

본 연구에서는 NiTi SMA에 반복하중이 작용하면 발생할 수 있는 기능저하(상변이 응력 감소와 영구변형률 누적)을 고려할 수 있는 현상학적 이력모델을 개발하였다.

(1) 개발된 모델은 현상학적 이해를 기반으로 개발되었기 때문에 NiTi SMA의 상변이와 관련된 미시기계적 전문지식이 없는 경우에도 해석모델을 사용할 수 있다.

(2) 개발된 모델은 반복하중으로 인한 기능저하를 고려할 수 있다. 실험결과에서 관측된 SMA의 기능저하(상변이 응력 감소와 영구변형 누적)의 특성을 반영하였다. 개발된 모델의 실험 결과 모사 오차는 기존 SMA 모델에 비해 약 82.7 % 낮은 것으로 확인되었다. 상변이 시작응력의 예측 오차는 약 7 % 이내로 확인되었다.

(3) 기능저하로 인한 상변이 응력 감소와 영구변형률 누적은 SMA 모델에 가해진 변형률의 크기와 반복 횟수를 기반으로 계산된다.

(4) 개발된 NiTi SMA 모델은 상온에서의 초탄성 응력-변형률만을 고려할 수 있다. 따라서 미래 연구에서는 마르텐사이트 상태에서의 거동, 그리고 하중 및 온도 변화로 인한 기능저하가 고려되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R1I1A1A01040348).

참고문헌(References)

[1] DesRoches, R., and Smith, B. (2004) Shape Memory Alloys in Seismic Resistant Design and Retrofit: A Critical Review of Their Potential and Limitations, *Journal of Earthquake Engineering*, Taylor & Francis, Vol.8, No.3, pp.415-429.

[2] Saadat, S., Salichs, J., Noori, M., Hou, Z., Davoodi, H., Bar-On, I., Suzuki, Y., and Masuda, A. (2002) An Overview of Vibration and Seismic Applications of NiTi Shape Memory Alloy, *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, Vol.11, No.2, pp.218-229.

[3] Wilson, J.C., and Wesolowsky, M.J. (2005) Shape

Memory Alloys for Seismic Response Modification: A State-of-the-Art Review, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.21, No.2, pp.569-601.

[4] McCormick, J.P. (2006) *Cyclic Behavior of Shape Memory Alloys: Materials Characterization and Optimization*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, USA.

[5] Fang, C., Yam, M.C.H., Lam, A.C.C., and Xie, L. (2014) Cyclic Performance of Extended End-Plate Connections Equipped with Shape Memory Alloy Bolts, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.94, pp.122-136.

[6] Saiidi, M.S., O'Brien, M., and Sadrossadat-Zadeh, M. (2009) Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Using Superelastic Nitinol and Bendable Concrete, *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol.106, No.1, pp.69-77.

[7] Yang, J.G., Back, M.C., Lee, J.Y., and Lee, H.D. (2014) Energy Dissipation Capacity of the T-stub Fastened by SMA Bars, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.231-240 (in Korean).

[8] Hu, J.W. (2015) Numerical Simulation for the Quasi-static Behavior of Superelastic Nitinol Shape Memory Alloys (SMAs), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.6, pp.493-501 (in Korean).

[9] Kim, J.H., Kim, J.-W., and Lee, S.J. (2018) Hysteresis Behavior of Recentering Diagonal Bracing Steel Frames, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.4, pp.185-192 (in Korean).

[10] Kim, J.-W., and Kim, C.J. (2019) Hysteresis Characteristics of Self-Centering Semirigid CFT Column-to-Beam Double Web-Angle Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.5, pp.311-320 (in Korean).

[11] Hua, P., Chu, K., Ren, F., and Sun, Q. (2020) Cyclic Phase Transformation Behavior of Nanocrystalline NiTi at Microscale, *Acta Materialia*, Elsevier, Vol.185, pp.507-517.

[12] Fang, C., and Wang, W. (2020) *Shape Memory Alloys for Seismic Resilience*, Springer, Singapore.

[13] Dolce, M., and Cardone, D. (2001) Mechanical Behaviour of Shape Memory Alloys for Seismic Applications 2. Austenite NiTi Wires Subjected to Tension, *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, Vol.43, No.11, pp.2657-2677.

[14] Lim, J.T., and McDowell, D.L. (1995) Path Dependence of Shape Memory Alloys During Cyclic Loading, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Sage, Vol.6, No.6, pp.817-830.

[15] Jiang, X., Du, J., Fan, Y., Huang, J., and Pan, F. (2019) One-Dimensional Macroscopic Constitutive Model for Ratcheting of Superelastic Shape Memory Alloys, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.145, No.3, 04019007.

[16] Auricchio, F., Marfia, S., and Sacco, E. (2003) Modelling of SMA Materials: Training and Two Way Memory Effects, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol.81, No.24-25, pp.2301-2317.

[17] Eggeler, G., Hornbogen, E., Yawny, A., Heckmann, A., and Wagner, M. (2004) Structural and Functional Fatigue of NiTi Shape Memory Alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, Vol.378, No.1-2, pp.24-33.

[18] Fang, C., Zheng, Y., Chen, J., Yam, M.C.H., and Wang, W. (2019) Superelastic NiTi SMA Cables: Thermal-Mechanical Behavior, Hysteretic Modelling and Seismic Application, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.183, pp.533-549.

[19] Andrawes, B., and DesRoches, R. (2007) Comparison Between Shape Memory Alloy Seismic Restrainers and Other Bridge Retrofit Devices, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.12, No.6, pp.700-709.

[20] Nakashoji, B.A. (2014) *Seismic Performance of Square Nickel-Titanium Reinforced ECC Columns with Headed Couplers*, Master's Thesis, University of Nevada, Reno, USA.

[21] McCormick, J., DesRoches, R., Fugazza, D., and Auricchio, F. (2007) Seismic Assessment of Concentrically Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy Braces, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.133, No.6, pp.862-870.

[22] Thomson, P., Balas, G.J., and Leo, P.H. (1997) Analysis of Trigger Line Models for Shape Memory Hysteresis Based on Dynamic Testing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Sage, Vol.8, No.3, pp.193-201.

[23] Morin, C., Moumni, Z., and Zaki, W. (2011) Thermomechanical Coupling in Shape Memory Alloys Under Cyclic Loadings: Experimental Analysis and Constitutive Modeling, *International Journal of Plasticity*,

Elsevier, Vol.27, No.12, pp.1959-1980.

[24] Applied Technology Council (2009) *Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response*, FEMA-P440A, Federal Emergency Management Agency, USA.

[25] DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004) Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 130, No.1, pp.38-46.

[26] McKenna, F. (2011) OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation, *Computing in Science & Engineering*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol.13, No.4, pp.58-66.

[27] McCormick, J., Tyber, J., DesRoches, R., Gall, K., and Maier, H.J. (2007) Structural Engineering with NiTi. II: Mechanical Behavior and Scaling, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.133, No.9, pp.1019-1029.

요 약 : 본 연구에서는 초탄성 NiTi 형상기억합금의 응력-변형률 관계를 모사할 수 있는 이력모델을 개발하였다. 개발된 모델은 형상기억합금의 전반적인 응력-변형률 관계와 더불어 반복하중으로 인한 기능저하를 구현할 수 있다. 개발된 이력모델의 응력-변형률 모사 정확도는 NiTi SMA 실험체의 시험결과에 대해 검증되었다. 기능저하로 인해 반복가력 사이클마다 발생하는 상변이 응력 저감량과 영구변형률 누적량은 시험에서 측정된 값과 유사하였다. 또한 기존 SMA 모델에 비해 높은 정확도로 실험결과를 모사하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 형상기억합금, 초탄성, 기능저하, 이력모델, 응력-변형률 응답