

316L 스테인리스강의 상온 반복 거동에 대한 수정 다층 모델의 적용성 검토

임재용* · 이순복†

(2004년 5월 15일 접수, 2004년 8월 19일 심사완료)

Applicability Evaluation of Modified Overlay Model on the Cyclic Behavior of 316L Stainless Steel at Room Temperature

Jae-Yong Lim and Soon-Bok Lee

Key Words : Modified Overlay Model(수정 다층모델), Cyclic Hardening(반복경화), Elastic Limit(탄성 한계), Plastic Strain Range Dependence(소성변형률 진폭 의존성), Master Curve(기준곡선),

Abstract

The validity of 'modified overlay model' to describe the cyclic behavior of annealed 316L stainless steel at room temperature was investigated. Material parameters ($\tilde{f}_i, m_i, b, \eta, E$) for the model were obtained through constant strain amplitude test. The strain amplitude dependency of elastic limit and cyclic hardening, which were the characteristics of this model, were considered. Eight subelements were used to describe the nonlinearity of the hysteresis loops. The calculated hysteresis curve in each condition (0.5%, 0.7%, 0.9% strain amplitude test) was very close to the experimental one. Two tests, incremental step test and 5-step test, were performed to check the validity of 'modified overlay model'. The elastic limit was saturated to the one of the highest strain amplitudes of the block in the incremental step test, so it seemed to be Masing material at the stabilized block. Cyclic hardening was successfully described in the increasing sequence of the strain amplitude in 5-step test. But, the slight cyclic softening followed by higher strain amplitude would not be able to simulate by 'modified overlay model'. However, the discrepancy induced was very small between the calculated hystereses and the experimental ones. In conclusion, 'Modified overlay model' was proved to be appropriate in strain range of 0.35%~1.0%.

기호설명

\tilde{f}_i, m_i : i 번째 부요소의 분율, 항복응력
 $\tilde{\sigma}_i$: i 번째 부요소의 응력
 $\tilde{\epsilon}_{p,i}, \tilde{\epsilon}_{e,i}$: i 번째 부요소의 소성, 탄성변형률
 f_i : i 번째 부요소의 항복 조건
 $\Delta \sigma, \Delta \epsilon$: 역응력-역변형률좌표계에서의 좌표
 $\Delta \sigma^*, \Delta \epsilon^*$: 기준 곡선좌표계에서의 좌표

$\sigma, \epsilon_p, \epsilon_e$: 거시응력, 거시소성/탄성변형률
 p : 누적 소성변형률
 b : 반복 경화 속도
 R : 등방성 경화 변수
 R_0 : 초기 탄성 한계
 F : 소성기억률표면 조건
 ξ, q : 소성기억률표면의 중심, 크기
 η : 소성기억률표면의 이동 속도

1. 서론

구조물의 신뢰성을 확보하기 위해 1차적으로 요구되는 조건은 재료의 거동을 정확히 이해하고 예측하는 것이다. 금속 재료의 반복 거동은

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : sblee@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3029 FAX : (042)869-3095
 * 회원, 한국과학기술원 기계공학과

바우싱거 영향, 재료의 이방화, 반복 경화/연화, 평균 응력 이완, 라체팅(Rachetting) 등 많은 특이 현상을 포함한다. 이러한 반복 변형 거동을 표현하기 위해서 많은 구성 모델이 제안되어 왔으며 현재까지 많은 노력을 기울이고 있다. 탄성영역에서 소성영역으로 넘어가는 천이 구간의 모사를 위해 다수의 항복면을 사용한 Mróz model,⁽¹⁾ Dafalias and Popov의 Bounding Surface를 사용한 Two Sur-face model,⁽²⁾ Chaboche의 비선형 이동성 경화모델,⁽³⁾ Valanis의 Endochronic model⁽⁴⁾ 등 많은 모델들이 금속 재료의 반복 거동을 위해 제안되어 왔다.

본 연구에서 사용한 상온에서의 풀림처리된 316L 스테인리스강의 반복 거동 및 이력 곡선은 Masing 가정⁽⁵⁾에 근거한 반복 응력-변형률 곡선으로 간단히 표현될 수 없으며, 재료 거동의 정확한 모사를 위해 이에 대한 고려가 필요하다. 이에 대해, 여러 개의 탄성-완전소성체 부요소를 사용하여 재료의 소성 거동을 표현할 수 있는 '다층 모델'^(6,7)에 Non-masing 거동을 고려한 '수정 다층 모델'이 윤삼순 등^(8,9)에 의해 제안된 바 있으며, 고온 하에서 일정 변형률 진폭 인가시에 316L 스테인리스강의 안정화 된 이력 곡선을 성공적으로 모사한 바 있다.

본 연구에서는 '수정 다층 모델'을 사용하여 상온에서 Non-masing 거동을 보이는 풀림처리된 316L 스테인리스강의 반복 변형 거동을 모사하였으며, 검증 실험을 통해 '수정 다층 모델'의 반복 변형 거동 예측 능력에 대해 연구하였다.

2. 저주기 피로 시험

2.1 피로 시험 절차

시험에 사용된 재료는 풀림처리 된 316L 스테인리스강으로 발전설비, 가스터빈, 압력용기 등의 고온 구조물 재료 및 내식성 재료로 사용되는 대표적인 오스테나이트계 강이다. 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같으며, 가공 전의 재료는 1100°C에서 40분간 용체화 처리 후 수냉되었다.

시험에 사용된 시험편은 원재료로부터 선반 가공하였으며, 입자 크기 80 μ m에서 13 μ m까지의 에머리 페이퍼와 다이아몬드 입자 3 μ m로 연마한 후

전해 연마를 하였다. 시험편의 형상 및 치수는 ASTM 표준 E606-92에서 규정하는 표준 규격에 맞추어 일정 단면부를 가지는 시편(dog-bone type)으로 제작하였으며 표점 부분(gage section)의 직경 및 길이는 8mm, 20mm로서 Fig. 1에 나타내었다.

피로 시험은 MTS사에서 제작된 10톤 용량의 closed-loop servo-hydraulic test system으로 총변형률 제어 실험을 수행하였으며, 변형률 제어 및 측정은 MTS사에서 제작된 단축용 변위신장계(model no.: 632-13F-20, 10mm gage length)를 사용하였다.

시험 조건은 상온에서 총변형률 제어를 하였으며, 고려된 변형률 진폭은 0.35%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, 0.9%, 1.0%이다. 시험 시 변형률 속도를 일정하게 하기 위해 삼각파가 사용되었으며, 모든 조건에서 변형률 속도는 1×10^{-3} /sec로 고정하였다

2.2 시험 결과

저주기 피로 실험의 사이클에 따른 응력 진폭의 변화를 Fig. 2에 도시하였다. 풀림 처리된 재료의 특징인 급격한 1차 반복 경화가 초기의 수십 사이클 동안 모든 변형률 진폭 조건에서 일어났으며, 저진폭의 실험에서는 약간의 연화가 관찰되었다. 또한, 과단 전 수명의 대부분 동안 상당량의 2차 반복 경화가 관찰되었다. 이는 M_d 온도 이하에서 스테인리스강의 소성 변형률 유지 마르텐사이트 상변태로 인한 것으로 설명될 수 있는데, 재료 미시 관점에서 준안정한 오스테나이트계강(metastable austenitic steel)은 소성 변형이 유발되면 마르텐사이트로 상변태되면서 강도가 증가하는 특성이 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 여기서 M_d 온도란 상변태가 일어날 수 있는 최대 온도를 말한다. 스테인리스강의 상변태로 인한 지속적인 반복 경화는 G. Baudry와 A. Pineau,⁽¹⁰⁾ Th. Nebel과 D. Eifler⁽¹¹⁾ 및 R. Alain⁽¹²⁾의 실험 결과와도 유사하다.

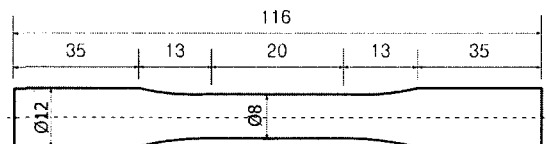


Fig. 1 Test specimen for low cycle fatigue [mm]

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
0.025	0.41	1.41	0.025	0.025	10.22	16.16	2.09	0.043

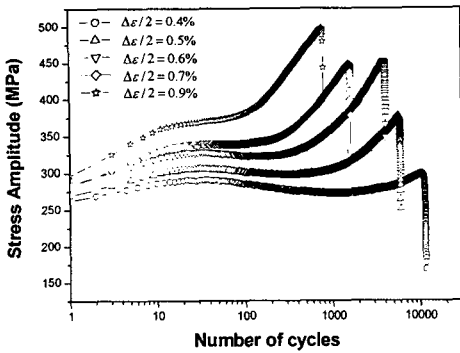


Fig. 2 Peak stress response of annealed 316L STS under constant strain amplitude cycling at RT

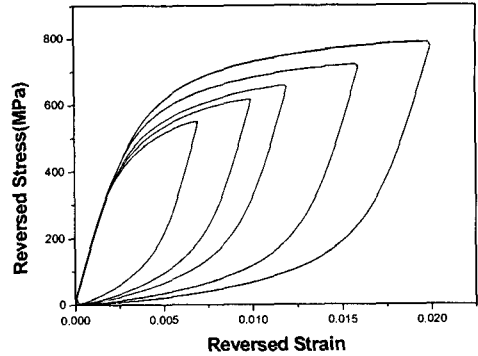


Fig. 4 Reversed stress-reversed strain curve

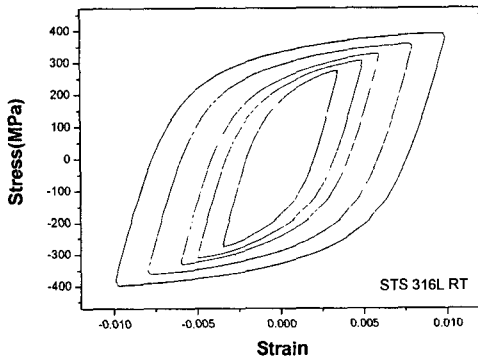


Fig. 3 Stabilized hysteresis loops of annealed 316L STS at room temperature

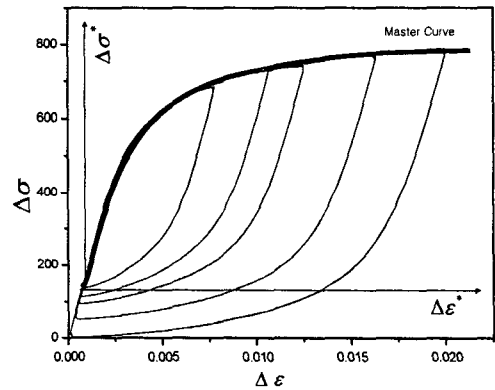


Fig. 5 Master curve of 316L stainless steel

일반적인 공학적인 문제에 있어서 금속 재료는 초기의 반복 경화/연화 후 상당 수명동안 안정화 상태를 유지하므로, 반복 응력-변형률 곡선은 중간 수명, 즉 안정화 상태에서의 데이터를 이용하는 것이 관례이다.⁽⁵⁾ 그러나, 본 연구에서 고려한 상온에서 316L 스테인리스강은 상변태로 인하여 지속적인 경화가 일어나기 때문에 안정화 상태를 정의하기가 곤란하다. G. Baudry와 A. Pineau,⁽¹⁰⁾ A. Mateo 등⁽¹³⁾의 연구에서는 각 싸이클당 피크 응력의 평균값을 대표값으로 써서 반복 응력-변형률 선도를 구성하였으며, A. Mateo 등⁽¹⁴⁾은 1차 경화 후 15%의 하중 감소가 생겼을 때를 안정화 상태로 취하였다. 한편, S. Degallaix 등⁽¹⁵⁾의 연구에서는 중간 수명에서의 값으로 취하였으며, 연구자마다 안정화 상태를 임의로 정의하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 마르텐사이트 상변태로 인한 2차 경화 영역의 모델링은 고려하지 않았으므로, 1차

경화가 끝난 후에 보이는 의평탄구간(quasi-pateau)에서의 이력 곡선을 안정화 상태로 정의하였다.

1차 반복 경화가 이뤄진 뒤 수백 싸이클 동안의 의평탄구간에서는 각 변형률 진폭당 일정한 이력 곡선을 가지며, 이에 대한 이력 곡선을 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 4는 각 이력 곡선의 최저점을 원점에 일치시킨 그림이며, 변환된 좌표의 x축과 y축을 역변형률(Reversed strain)과 역응력(Reversed stress)이라 지칭하기로 한다. 각 이력 곡선의 인장 구간(ascending branch)이 반복 응력-변형률 곡선의 두 배 확대된 곡선으로 표현될 경우 이를 Masing 거동이라 지칭하지만, 본 연구에서의 재료 316L 스테인리스강은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 Non-masing 거동을 보인다.

그러나, 작은 진폭의 이력 곡선을 탄성 기울기를 따라 이동시키게 되면 여러 변형률 진폭에서 얻어진 이력 곡선의 비선형 부분은 가장 큰 진폭

실험의 비선형 구간과 일치함을 확인할 수 있다. 일치한 비선형 구간을 기준곡선(Master curve)이라 하며,⁽¹⁶⁾ 이를 Fig. 5의 굵은 선으로 나타내었다. $\Delta\sigma, \Delta\varepsilon$ 는 역응력, 역변형률의 좌표축을 표시한 것이며, $\Delta\sigma', \Delta\varepsilon'$ 이라 표시된 좌표축은 탄성 기울기를 따라 변환된 기준 곡선의 좌표축을 지칭한다. 즉, 여러 진폭의 비선형 구간은 한 개의 기준곡선으로 표현할 수 있으며, 변형률 진폭 의존성은 변형률 진폭에 따른 탄성한계의 변화로 표현할 수 있음을 알 수 있다. 재료 상수의 획득 과정은 3.2 절에서 기술하였다.

3. 반복 거동의 모델링

3.1 수정 다층 모델

‘다층 모델’^(6,7)은 여러 개의 부요소(Subelement)가 병렬로 연결되어 이 부요소의 평균적인 값으로 거시적인 응력 및 변형률 등의 거동을 산출하는 모델이다. 이 모델에서의 각 부요소는 동일한 탄성 계수를 갖지만, 서로 다른 항복 강도를 갖는 탄성-완전소성체이며, 이해를 돕기 위해 Fig. 6에 간단한 모형을 도시하였다. ‘다층 모델’에서의 거시 응력은 각 요소가 지지하는 응력의 합으로 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \tilde{f}_i \tilde{\sigma}_i \quad (1)$$

N 은 부요소의 개수를, \tilde{f}_i 와 $\tilde{\sigma}_i$ 는 각 요소의 분율과 각 부요소에 작용하는 응력을 의미한다. 거시적인 거동을 표현하기 위한 모든 요소의 분율합은 1이 된다.

$$\sum_{i=1}^N \tilde{f}_i = 1 \quad (2)$$

윤삼손 등^(8,9)에 의해 제안된 ‘수정 다층 모델’에서는 변형률 진폭 의존성과 반복 경화/연화 영향을 고려하기 위해 탄성-완전소성체인 부요소 대신 탄성-비선형경화체의 부요소를 사용하였다. 각 부요소에서의 항복 조건은 식 (3)과 같으며, ‘수정 다층 모델’에서는 기존의 ‘다층 모델’에 반복 경화와 변형률 진폭 의존성을 고려하기 위한 항 $R(\Delta\varepsilon, p)$ 가 첨가되었다. 이 성분은 모든 부요소에 대해 동일한 값을 갖는다고 가정한다.

$$f_i = |\tilde{\sigma}_i| - m_i - R(\Delta\varepsilon, p) \quad (3)$$

$$dR = b(R_{stable} - R)dp \quad (4)$$

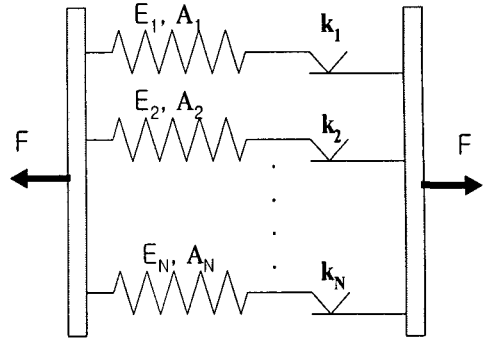


Fig. 6 Simplification of overlay model

m_i 는 각 부요소의 고유 항복 응력이며, 기준 곡선에서 비선형 구간을 모사하기 위한 성분으로 바우싱거 효과와 같은 이력 현상을 내부 변수를 도입하지 않고 표현할 수 있도록 하는 성분이다. 식 (4)는 싸이클에 따른 응력 진폭의 변화, 즉 반복 경화 현상을 표현하기 위해 등방성 경화 변수 R 을 미분꼴로 나타낸 것이다

‘수정 다층 모델’에서는 탄성 한계의 변형률 진폭 의존성을 고려하기 위해 Chaboche⁽¹⁷⁾가 제안한 소성 변형률 기억 표면을 도입하였다. 식 (5)-(8)에 소성 변형률 기억 표면 조건과 내부 변수 발전식을 표시하였다.

$$F = \frac{2}{3} J(\varepsilon_p - \xi) - q \leq 0 \quad (5)$$

$$d\xi = (1 - \eta) H(F) \langle n : n^* \rangle d\varepsilon_p \quad (6)$$

$$dq = \eta H(F) \langle n : n^* \rangle dp \quad (7)$$

$$n = \frac{d\varepsilon_p}{|d\varepsilon_p|}, \quad n^* = \frac{\varepsilon_p - \xi}{|\varepsilon_p - \xi|} \quad (8)$$

여기서 ξ, q 는 각각 소성 기억률 표면의 중심과 크기를 나타내는 내부 변수이며, η 는 소성 기억률 표면의 이동 속도를 나타낸다. 위 식에서 쓰인 J 는 second invariant 이며, ε_p 와 ξ 의 거리를 나타낸다 $H(F)$ 는 Heaviside 함수로서 $F < 0$ 일 때는 0, $F \geq 0$ 일 때는 1의 값을 갖는다.

재료의 거시적인 거동은 각 부요소 거동의 평균적인 값으로 정리될 수 있으며, 식 (1), (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_p = \sum_{i=1}^N \tilde{f}_i \tilde{\varepsilon}_{p,i} \quad (9)$$

$$\varepsilon_e = \sum_{i=1}^N \tilde{f}_i \tilde{\varepsilon}_{e,i} \quad (10)$$

3.2 재료 상수의 획득

‘수정 다층 모델’의 재료 상수를 획득하는 과정을 아래의 절에서 기술하였으며, 이에 대한 결과를 Table 2에 정리하였다.

3.2.1 변형을 진폭에 따른 탄성 한계의 변화

일정 변형을 진폭 실험을 수행하게 되면, 소성 변형을 진폭은 일정한 값에 수렴하게 되며, 316L 스테인리스강의 경우 Fig. 7에서 도시한 바와 같이 수렴된 소성 변형을 진폭과 탄성 한계와의 관계는 선형성을 갖는다. 이를 고려하기 위해 ‘수정 다층 모델’에서는 소성 변형을 기억 표면을 도입하여, 안정화 상태에서의 탄성 한계를 소성 변형을 기억 표면의 반지름에 관한 선형 함수로 표현하였다. 이들의 관계는 식 (11)과 같이 정리될 수 있다. 또한, 단축 하중 조건에서 일정 변형을 피로 실험을 수행할 경우, 소성 변형을 기억표면의 중심과 반지름은 식 (12), (13)과 같은 값에 수렴하게 된다.

$$R_{stable} = 127 + 10874q \tag{11}$$

$$\xi|_{stable} = \frac{(\epsilon_p)_{max} + (\epsilon_p)_{min}}{2} \tag{12}$$

$$q|_{stable} = \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \tag{13}$$

본 연구에서 탄성 한계를 결정하기 위한 기준으로 안정화 상태의 이력 곡선에서 변형을 오프셋이 50μ인 지점을 탄성 한계로 결정하였다.

3.2.2 이력곡선의 비선형 구간의 모사

2절의 실험 결과에서 알 수 있듯이 이력 곡선의 비선형 구간은 변형을 진폭에 관계없이 동일한 형태를 가지므로, 각 부요소의 분율 f_i와 각 부요소의 항복 응력 값 m_i를 통해 비선형 구간의 동일한 형태를 결정할 수 있다. 비선형 구간의 형태는 Fig. 5의 기준 곡선에서 취하였으며, 기울기가 변

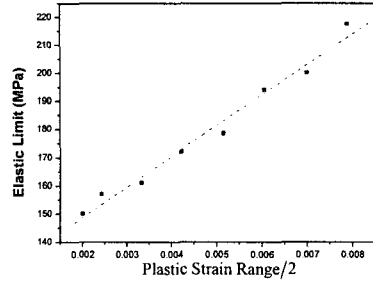


Fig. 7 Plastic strain range dependence of elastic limit

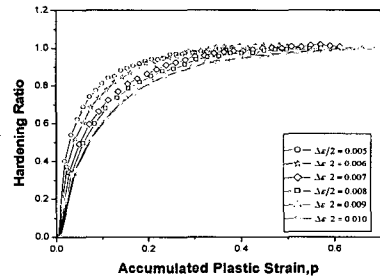


Fig. 8 Evolution of isotropic hardening

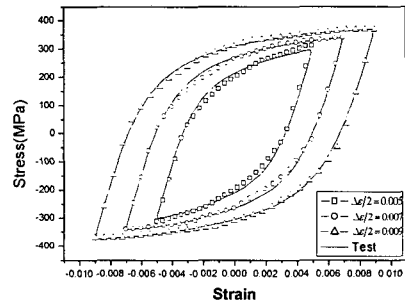


Fig. 9 Description of stabilized hysteresis loops with modified overlay model

Table 2 Material parameters of 316L stainless steel at RT for Modified overlay model

Elastic modulus (GPa)	185.3		
Stabilized elastic limit (MPa)	$R_{stable}=127+10874q$		$0.002 < q < 0.0079$
Yield stress and fraction of subelements	Subelement No.	Fraction	Yield stress (MPa)
	0	0.5593	0.0
	1	0.0740	46.3
	2	0.0804	139.0
	3	0.0982	231.7
	4	0.0922	463.3
	5	0.0622	741.3
	6	0.0260	1297.3
7	0.0077	1853.3	
Softening rate, b	12.2		
Initial yield, R ₀ (MPa)	90		
Memory surface speed, η	0.1		

하는 응력-변형을 좌표 $(\epsilon_i^*, \sigma_i^*)$ 를 얻어서 기준 곡선을 총 7개의 구간으로 나누었다. 즉, 총 8개의 부요소의 분율과 항복 응력은 다음의 식 (14)와 (15)를 통해 얻을 수 있으며, Table 2에 값을 정리하였다.

$$\begin{cases} f_0 = 1 - \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_1^* - \sigma_0^*}{\epsilon_1^* - \epsilon_0^*} \right), & i=0\text{th subelement} \\ f_i = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_i^* - \sigma_{i-1}^*}{\epsilon_i^* - \epsilon_{i-1}^*} \cdot \frac{\sigma_{i+1}^* - \sigma_i^*}{\epsilon_{i+1}^* - \epsilon_i^*} \right), & i=1 \sim 6\text{th} \\ f_7 = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_7^* - \sigma_6^*}{\epsilon_7^* - \epsilon_6^*} \right), & i=7\text{th} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} m_0 = 0 \\ m_i = \frac{E\epsilon_i^*}{2} \end{cases} \quad (15)$$

3.2.3 반복 경화 (Cyclic Hardening)

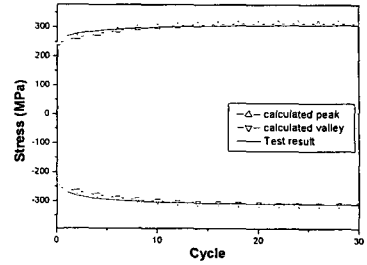
반복 경화 현상, 즉 사이클에 따른 응력 진폭의 변화가 초기 수십 사이클 동안 관찰되며, 이를 표현하기 위해서 ‘수정 다층 모델’에서는 등방성 경화 변수 R을 누적 소성 변형률 p에 관한 함수로 표현하였다. Fig. 8은 경화비(H.R.)와 누적 소성 변형률 p에 관한 그래프이며, 경화비는 사이클에 따른 등방성 경화 변수의 진전을 정규화한 것이다. 경화비는 식 (16)과 같이 정의될 수 있으며, 미분꼴로 나타내면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$H.R. = \frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_0}{\Delta\sigma_{stable} - \Delta\sigma_0} \approx \frac{R - R_0}{R_{stable} - R_0} = 1 - \exp(-bp) \quad (16)$$

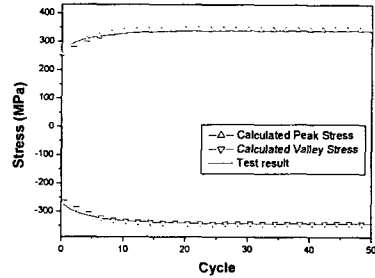
위 식에서 $\Delta\sigma_0$ 와 R_0 는 초기 응력 범위와 초기 탄성 한계를 의미하며, p는 누적 소성 변형률, b는 경화 속도를 나타낸다. 비선형 피팅에 의하여 경화 속도를 나타내는 b 값을 구하였다.

3.3 모델의 정확도 확인

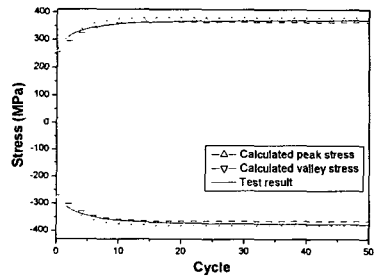
‘수정 다층 모델’을 이용하여 안정화 된 이력 곡선을 모사함으로써 재료 상수 획득의 정확도 및 모델의 정확도를 확인하였다. Fig. 9에는 0.5%, 0.7%, 0.9% 일정 변형률 진폭 실험에서 실험값과 모델계산값의 이력 곡선을 비교하였다. 실험에서의 소성 변형률 에너지 밀도 W_p 가 3.01, 5.52, 8.34 (MJ/m³)인데 반하여, 예측치에서는 2.91, 5.40, 8.39 (MJ/m³)로 정확한 모사를 수행함을 확인할 수 있다. 즉, 비선형 구간을 여러 개의 선형 구간으로 나눠 계산을 수행한다고 해도 이력 곡선의 형상은 정확히 모사함을 알 수 있다. Fig. 10에 사이클에 따른 0.5, 0.7, 0.9%에서의 응력 진폭을 나타내었다.



(a) 0.5% constant strain amplitude test



(b) 0.7% constant strain amplitude test



(c) 0.9% constant strain amplitude test (d)

Fig. 10 Stress amplitude response of constant amplitude test

3.4 반복 거동 예측을 통한 검증

316L 스테인리스강이 일정한 변형률 진폭이 아닌 여러 진폭의 시험을 했을 때 반복 거동 예측 결과와 비교해 봄으로써 ‘수정 다층 모델’의 구성식 적용 가능성 여부에 대한 검증을 수행하였다. 두 가지의 실험으로 증분 단계 시험(Incremental step test)와 5단계의 블록 시험(5 step test)를 수행하였다.

Fig. 11(a), (b)는 증분 단계 시험에서 시간에 따라 인가한 변형률 파형과 안정화 된 이력 곡선을 나타내었으며, 변형률 인가는 0.4%~1.0%를 단계적으로 증가시켰다가 감소시켰다. Fig. 11(c), (d)는 안정화 된 블록에서의 이력 곡선을 각 진폭 별로 구분하여 역변형률과 역응력의 형태로 취한 것이다.

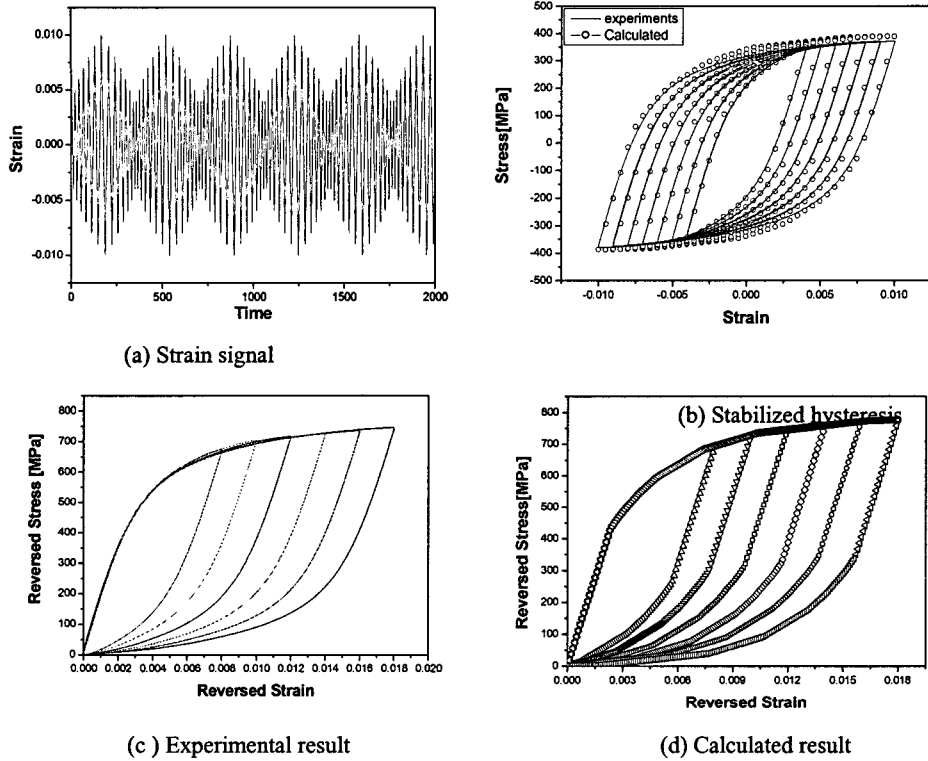


Fig. 11 Incremental step test result

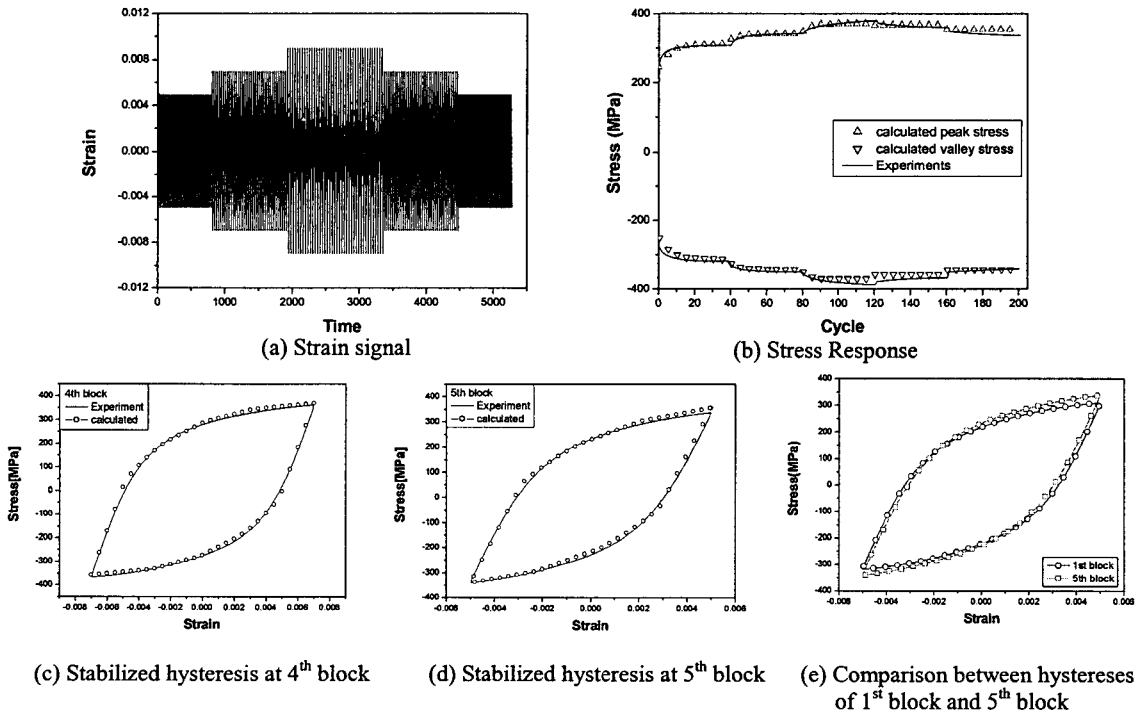


Fig. 12 5-Step test result

안정화 블록에서의 탄성 한계는 인가한 가장 큰 변형률 진폭, 즉 1.0%의 탄성 한계에 수렴하게 되어 그보다 작은 변형률 진폭의 이력 곡선은 가장 큰 진폭의 인장 구간(ascending branch)을 따라가게 된다. 즉, Masing 거동을 보이는 재료의 거동과 유사해짐을 알 수 있다.

Fig. 12는 5단계의 블록 시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 각 블록은 각 변형률 진폭에서 안정화 되도록 40사이클씩 인가하였다. 첫째 블록과 다섯째 블록은 0.5%, 둘째 블록과 넷째 블록은 0.7%, 셋째 블록은 0.9%의 변형률 진폭을 인가하였다. Fig. 12(b)에서는 응력 진폭 결과를 나타내었는데, 하중이 증가하는 방향인 셋째 블록까지는 반복 경화 현상을 효과적으로 모사하였다. 그러나, 넷째와 다섯째 블록에서 알 수 있듯이 큰 진폭의 변형률 인가 후 작은 진폭의 변형률을 인가하였을 때 나타나는 약간의 반복 연화 현상은 효과적으로 모사하지 못하였다. 이는 소성 변형률 기억표면의 크기가 늘어가는 방향으로만 제안되었기 때문이다. 그러나, Fig. 12(c), (d)에서 보인 넷째와 다섯째 블록에서 구한 이력 곡선에는 큰 차이는 보이지 않았으며, 본 연구에서의 관심 영역인 0.35%~1.0%의 변형률 영역에서는 심각한 반복 연화는 일어나지 않기 때문에 '수정 다층 모델'은 비교적 정확하게 모사할 수 있는 것으로 보인다.

Fig. 12(e)에서는 첫째 블록과 다섯째 블록에서의 이력 곡선을 비교하였는데, 이들의 모양이 다른 것은 큰 진폭의 하중을 받고 난 뒤 탄성 한계가 바뀌었기 때문이다.

4. 결 론

Non-masing 거동의 모사를 위해 제안된 '수정 다층 모델'을 상온하에서의 풀림처리된 316L 스테인리스강에 적용함으로써 재료의 반복 거동 예측에 적절한 구성 모델인지에 대한 검증을 수행하였다. '수정 다층 모델'은 Non-masing 거동을 보이는 재료의 이력 곡선을 효과적으로 모사했으며, 변형률 진폭 의존성과 반복 경화 현상을 효과적으로 모사할 수 있는 모델로 제안된 바 있다. 이에 대해 본 연구에서는 반복 거동에 대한 검증 실험으로서 상온에서의 증분단계시험(Incremental step test)과 5단계의 블록 시험(5-step test)을 수행하였다. 증분단계시험 시 안정화 된 블록에서 Non-masing 재료의 탄성 한계는 가장 큰 진폭의 탄성 한계에 수렴하였으며, '수정 다층 모델'은 이를 효과적으로 모사하였다. 또한, 5단계의 블록 시험에서 하중이 증가하는 방향으로의 거동 예측은 정확히 모사할 수 있었으나, 큰 하중을 받고 난 뒤에 생기는 약

간의 반복 연화는 고려할 수 없었다. 그러나, 관심 영역인 0.35%~1.0%의 변형률 진폭 영역에서 이력 곡선은 이에 대한 큰 오차는 수반하지 않았으며, 비교적 정확한 모사를 하고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 한국과학기술원 기계공학과 CARE Lab.의 지원하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mróz, 1967, "On the Description of Anisotropic Work Hardening," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 15, pp. 163~175.
- (2) Dafalias, Y. and Popov, E.P., 1975, "A Model for Nonlinear Hardening Materials for Complex Loading," *Acta Mechanica*, Vol. 21, pp. 173~192.
- (3) Chaboche, J.L., 1986, "Time Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity," *International Journal of Plasticity*, Vol. 2, No. 2, pp. 149~188.
- (4) Valanis, K.C., 1971, "A Theory of Viscoplasticity Without a Yield Surface," *Arch. Mech.*, Vol. 23, pp. 517~534.
- (5) Ralph I. Stephens, 2001, *Metal Fatigue in Engineering, Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- (6) Chiang, D.Y. and Beck, J.L., 1994, "A New Class of Distributed Element Models for Cyclic Plasticity- I. Theory and Application," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 31, No. 4, pp. 469~484.
- (7) Chiang, D.Y. and Beck, J.L., 1994, "A New Class of Distributed Element Models for Cyclic Plasticity- II. On Important Properties of Material Behavior," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 31, No. 4, pp. 485~496.
- (8) Samson Yoon, Seong-Gu Hong and Soon-Bok Lee, 2003, "Description of Hysteresis Loops using Modified Overlay Model," *KSME Transaction A*, Vol. 27, No. 11, pp. 1856~1863.
- (9) Samson Yoon, Seong-Gu Hong, Soon-Bok Lee, 2004, "Phenomenological Description of Cyclic Deformation Using the Overlay Model," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 364, pp. 17~26.
- (10) Baudry, G. and Pineau, A., 1977, "Influence of Strain- Induced Martensitic Transformation on the Low-cycle Fatigue Behavior of a Stainless Steel," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 28, pp. 229~242.
- (11) Th Nebel and Difler, D., 2003, "Cyclic Deformation Behavior of Austenitic Steels at Ambient and Elevated Temperatures," *Sādhanā*, Vol. 28, Parts 1&2, pp. 187~208.
- (12) Alain, R., Violan, P., Mendez, J., 1997, "Low Cycle

- Fatigue Behavior on Vacuum of a 316L Type Austenitic Stainless Steel Between 20 and 600°C Part I: Fatigue Resistance and Cyclic Behavior," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 229, pp. 87~94.
- (13) Mateo, A., Llanes, L., Iturgoyen, L. and Anglada, M., 1996, "Cyclic Stress-Strain Response and Dislocation Substructure Evolution of a Ferrite-Austenite Stainless Steel," *Acta, Materialia*, Vol. 44, No. 3, pp. 1143~1153.
- (14) Mateo, A. et. al. , 2001, "Cyclic Deformation Behavior of Superduplex Stainless Steels," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 314, pp. 176~185.
- (15) Degallaix, S., Seddoouki, A., Degallaix, G, Kruml, T. and Polák, J., 1995, "Fatigue Damage in Austenitic-Ferritic Duplex Stainless Steels," *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures*, Vol. 18, No. 1, pp. 65~77.
- (16) Ellyin, F., 1997, *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*, Chapman & Hall, 1st Ed.
- (17) Chaboche, J.L., Dang-Van, K. and Gordier, G, 1979, "Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Gardening of 316 Stainless Steel," *Proc. 5th SMiRT*, Paper L11/3.