

변온 하중하에 있는 재료의 이력거동 예측을 위한 다층 모델에 관한 연구

김 상 호¹⁾ · 서 동 훈²⁾ · 여 태 인^{*2)}

세종공업(주)¹⁾ · 울산대학교 기계자동차공학부²⁾

A Study on the Overlay Model for Description of Hysteresis Behavior of a Material under Non-isothermal Loading

Sangho Kim¹⁾ · Donghun Seo²⁾ · Taein Yeo^{*2)}

¹⁾Research & Development Center, Sejong Industrial Co., 800-01 Hyomoon-dong, Buk-gu, Ulsan 683-360, Korea

²⁾School of Mechanical & Automotive Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received 2 September 2009 / Accepted 4 November 2009)

Abstract : The present work focuses on the characterization of material parameters of the Overlay²⁾(multilinear hardening) model for analyzing the non-isothermal cyclic deformation. In the previous study²⁰⁾, all the parameters were especially based on the Overlay theories, and a simple method was suggested to find out the best material parameters for the isothermal cyclic deformation analysis. Based on the previous research this paper further improves the isothermal parameters and suggests how to apply the isothermal parameters to the non-isothermal conditions especially for the description of TMF(Thermo-Mechanical Fatigue) hysteresis behavior. The parameters are determined and calibrated using 400 series stainless steel test data in the reference papers.^{3,18)} For the implementation into ABAQUS,¹⁷⁾ a user subroutine is developed by means of ABAQUS/UMAT. The finite element results show good agreement with test for the case of uniaxial non-isothermal cyclic loading, signifying the proposed method can be used in the TMF analysis of the converter-inserted heavy duty muffler system and the stainless steel exhaust-manifold system which are to be done in our future research.

Key words : Non-isothermal(변온), Low cycle fatigue(저주기수명), Overlay model(다층 모델), Material parameter(재료 상수), Hysteresis behavior(이력 거동), Thermo-mechanical fatigue(열적 기계적 피로)

Nomenclature

E : elastic modulus
 σ_y : yield stress
 R : elastic limit

Subscripts

o : initial value, st : stabilized value
p : plastic value, r : reversed value

1. 서론

산업용 기계 및 항공기, 자동차등의 주요 부품인 발전소의 터빈 로터(Rotor), 가스 터빈(Turbine) 및 자동차용 배기 매니폴드(Exhaust Manifold), DPF (Diesel Particulate Filter, 매연포집장치)등은 고온, 고압의 취약한 운전 조건에서 운행되며, 이로 인하여 구조물의 열적·기계적 비탄성 변형이 발생한다. 예를 들어, 자동차용 배기 매니폴드의 가스 온도는 6000 rpm에서 약 950°C까지 상승하며, 현재 디젤 엔진용 배기정화장치로 널리 적용되고 있는 DPF 시스템

*Corresponding author, E-mail: ytn@mail.ulsan.ac.kr

템의 경우 매연 재생과정에서 1000°C 이상의 열충격에 의하여 과도한 소성변형을 발생시키기도 한다. 따라서, 이러한 부품들은 급격한 가열과 냉각에 따른 온도 이력을 겪게 되고, 이러한 피로 손상 현상을 열·피로라고 하며 크리프와 함께 고온에서 사용되는 재료의 주요 파손 메커니즘 중의 하나이다. 많은 연구자에 의해 고온 및 소성영역의 재료거동을 정확히 모사하기 위하여 많은 연구가 수행되어졌으며, 내부 상태변수를 사용한 여러 가지 재료모델들이 개발되었다.⁷⁻¹³⁾

한편, 다층 모델 개념을 이용하여 복잡한 비탄성 구성방정식을 사용하지 않고, 여러 개의 완전 탄소성 요소를 이용하여 재료의 이력현상을 모사할 수 있는 방법도 개발된 바 있다.^{5,6)} 그러나, 개발된 비탄성 구성방정식의 경우 등온(Isothermal) 조건에 국한하며 검증하는 것이 일반적인 사례이고,^{2,5,14,15)} 열적 기계적(Thermo-Mechanical) 조건에서 재료모델의 유용성을 시험 결과와 비교 검증한 사례는 약간 있으나, 이때 구성방정식을 변온(Non-Isothermal) 조건으로 확장하기 위하여, 온도 의존성을 특정 함수의 형태로 가정하고 추가적인 내부 변수의 도입 등의 복잡한 과정이 수반되는 것이 일반적이다.^{18,23-25)}

본 연구에서는 변온 상태의 이력거동을 모사하기 위한 복잡한 내부변수의 도입을 배제하기 위해 다층 모델을 적용하였으며, 변온 과정에서 일관성 있는 재료 상수 추출을 위한 효율적인 방안을 제안하였다. 또한 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS와의 연동을 위하여 ABAQUS/UMAT(User Material Subroutine)을 이용한 다층 재료 모델을 구현하였으며, 등/변온시의 열적 기계적 하중 하에서의 시험결과^{18,22)}와 비교하여 이에 대한 유용성을 검증하였다.

2. 다층 모델의 기본 개념

본 연구에서 사용된 다층 모델의 구성 방정식에 대한 상세한 유도 과정은 참고문헌²⁾에 기술되어져 있다.

2.1 탄소성 구성 방정식

다층 모델은 여러 개의 탄소성 요소를 사용하여 재료의 이력 거동을 모사할 수 있으며, 내부 변수를

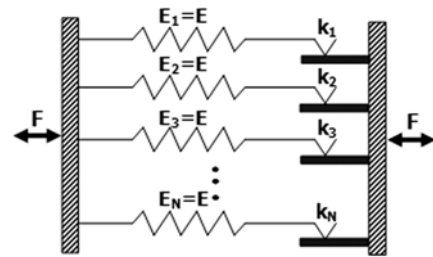


Fig. 1 Overlay model concept²⁰⁾

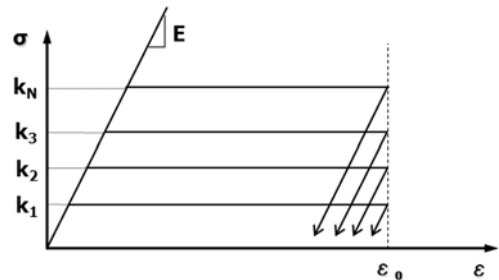


Fig. 2 Elasto-Perfectly plastic element for overlay model²⁰⁾

도입하지 않고도 바우싱거 효과(Bauschinger Effect)와 같은 이동 경화 현상을 표현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. Fig. 1 및 2에서 보듯이 다층 모델은 항복 특성이 다른 N개의 부요소(Subelement)가 병렬로 연결되어 있으며, 각 부요소는 고유의 항복 응력 k_i 와 동일 강성 $E(=E_1 \dots = E_N)$ 를 지니고 있는 탄성-완전 소성체(Elastic-Perfectly Plastic) 모델로 가정한다. 따라서, 다층 모델에서 거시 응력 σ 은 식 (1)과 같이 각 요소가 지지하는 응력의 합으로 나타내어지며, 각 요소의 항복 조건은 식 (2)와 같이 규정할 수 있다.

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

$$f_i = J_2(\tilde{\sigma}_i) - k_i = 0 \quad (2)$$

여기서, $\tilde{\sigma}_i$ 와 ϕ_i 는 i번째 부 요소의 응력과 분율을 의미하고 J_2 는 제 2의 응력 불변식을 의미한다.

기본적으로 다층 모델은 각 부요소의 분율과 항복 응력의 차이를 이용하여 재료의 이력현상을 모사할 수 있으며, 각 부요소의 분율은 식 (3)에서 계산할 수 있다. 이에 대한 자세한 유도과정은 참고문헌에 수록되어 있다.²⁾

$$\frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i} = \left(1 - \sum_{j=1}^i \phi_j\right) E \quad (3)$$

2.2 다층모델을 이용한 이력곡선 모사

이력곡선을 Fig. 3 과 같이 선형(Elastic Limit)과 비선형 구간(Master Curve)으로 구분할 경우, 각 부요소의 항복응력 k_i 를 식 (4)와 같이 두 성분으로 분리하여 나타낼 수 있다.

$$k_i = m_i + R(\Delta e^p, p) \quad (4)$$

여기서 m_i 는 비선형 구간에 관련된 성분으로 소성 변형률 진폭 및 누적 소성 변형률에 무관하며 각 부요소마다 다른 값을 지닌다. 탄성한계(Elastic Limit) R 은 소성 변형률 진폭 및 누적 소성 변형률에 의존하는 성분으로 모든 부요소에 대하여 동일한 값을 갖는다고 가정할 수 있다. 따라서, 일반적인 재료의 이력곡선에서 나타나는 이동성 및 등방성 경화현상은 m_i 와 R 를 이용하여 모사할 수 있다.

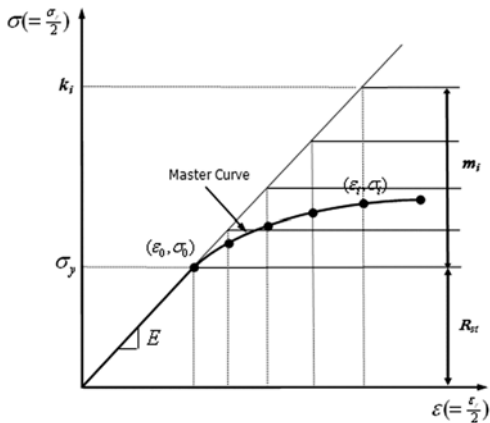


Fig. 3 Scaled stabilized cyclic stress-strain curve²⁰⁾

3. 등은 재료 상수 추출

본 연구에서는 등은 재료 상수 추출을 위하여 참고문헌^{2,16,18)}의 스테인레스 400계열의 각 온도별 시험 데이터를 이용하였으며, 이 과정에서 이전 논문²⁰⁾에서 제시한 재료 상수 추출 방법을 사용하였다.

3.1 이동성 경화(Kinematic Hardening)

비선형 구간에 관련된 성분인 각 부요소의 응력

m_i 와 분율 ϕ_i 는 Fig. 3의 안정화된 이력곡선으로부터 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$m_i = E\epsilon_i - R_{st}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

$$m_0 = 0$$

$$\phi_i = \frac{1}{E} \left(\frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\epsilon_i - \epsilon_{i-1}} - \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i} \right) \quad (6)$$

$$\phi_0 = \frac{1}{E} \left(E - \frac{\sigma_1 - \sigma_0}{\epsilon_1 - \epsilon_0} \right)$$

여기서, R_{st} 는 안정화된 이력곡선의 탄성 한계를 의미한다.

그러나, ϕ_i, m_i 를 계산하기 위하여 시험에서 구한 안정화된 이력곡선 값들을 바로 사용할 경우, 데이터간의 변동으로 인하여 재료 상수 추출시에 많은 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 안정화된 이력곡선의 비선형 구간에 대한 수학적 맞춤 곡선(Fitting Curve)을 사용하기 위해 Chaboche 재료모델¹⁾의 역응력(Back Stress) 발전식과 유사한 식 (7)과 같은 이력곡선을 도입한다.

$$\sigma_{rep} (= \sigma_r - 2R_{st}) = \sum_{i=1}^2 C_i \cdot (1 - e^{-\gamma_i \epsilon_{rep}}) \quad (7)$$

여기서, σ_{rep} 는 역 탄소성 응력(Reversed Elasto-Plastic Stress), ϵ_{rep} 는 역 탄소성 변형률(Reversed Elasto-Plastic Strain)을 나타내며, C, γ 는 이동성 경화에 관련된 상수이다.

이후의 과정을 단계별로 기술하면, 먼저 1 단계로 복잡한 내부변수의 도입 없이 변은 재료상수 추출을 위하여 소성 변형률의 크기에 따라 2개의 소 변형률(Small Strain) 및 대 변형률(Large Strain) 구간으로 나누고, 이들 구간 특성을 이용하여 맞춤 곡선의 상수를 구한다. 즉, 대 변형률 구간에서는 소 변형률 구간을 모사하는 맞춤 곡선이 안정화되어 상수 취급이 가능하다고 가정하면, 식 (7)을 역 탄소성 변형률로 미분함으로써 식 (8)과 같이 재료 상수 C_2, γ_2 만의 함수로 표현이 가능하다. 또한 식 (8)의 양변에 자연 로그를 취하면 역 탄소성 변형률에 대한 선형 방정식으로 변환이 가능하므로, 식 (8, 9)를 이용하여 대 변형률 영역에서의 재료 상수 C_2, γ_2 값을 추출할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{rep}}{\partial \epsilon_{rep}} = C_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2 \epsilon_{rep}} \quad (8)$$

$$\ln\left(\frac{\partial \sigma_{rep}}{\partial \epsilon_{rep}}\right) = \ln(C_2 \gamma_2) - \gamma_2 \epsilon_{rep} \quad (9)$$

동일한 방법으로 소 변형률 구간에서의 재료 상수 C_1, γ_1 는 식 (10)과 같이 유도가 가능하며, 역 탄 소성 변형률에 대한 선형 함수로는 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. 따라서, 앞에서 추출된 재료 상수 C_2, γ_2 값 및 식 (10, 11)에 의하여 대 변형률 구간을 모사하기 위한 재료 상수 C_1, γ_1 값을 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{rep}}{\partial \epsilon_{rep}} - C_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2 \epsilon_{rep}} = C_1 \gamma_1 e^{-\gamma_1 \epsilon_{rep}} \quad (10)$$

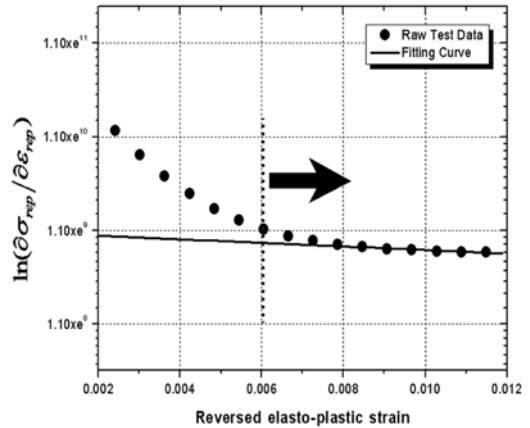
$$\ln\left(\frac{\partial \sigma_{rep}}{\partial \epsilon_{rep}} - C_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2 \epsilon_{rep}}\right) = \ln(C_1 \gamma_1) - \gamma_1 \epsilon_{rep} \quad (11)$$

Fig. 4는 식 (9)와 (11)에 의하여 재료 상수를 추출하는 절차의 한 예를 나타내며, Fig. 5는 4개의 기준 온도별(20°C, 200°C, 400°C, 600°C) 시험에 의한 실제 이력곡선과 본 연구에서 제시한 방법에 의하여 추출된 맞춤 이력곡선을 보여주고 있다.

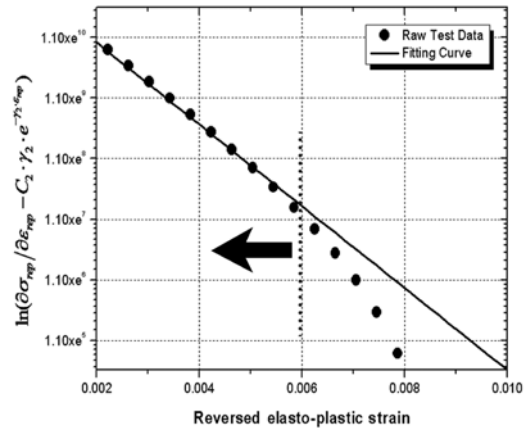
2단계로, 앞에서 구해진 맞춤 이력곡선을 이용하여 다층 모델용 재료상수 추출을 위하여, 각 기준 온도별 부 요소 개수 및 항복 위치를 결정한다. 다층 모델에서 소성 영역의 맞춤 곡선을 효과적으로 모사하기 위한 부요소의 개수 및 항복 위치 선정은 이동성 경화 현상을 모사하는데 매우 중요하며, 이렇게 선형화된 구간의 개수 및 추출 위치에 따라 이력곡선의 정확성이 결정된다. 따라서, 식 (12)와 같이 선형화된 영역과 실제 이력곡선의 변형률 에너지 오차 θ 를 정의하고 부요소의 개수 증가에 따른 해석 시간을 고려하여, 초기 사용자가 지정한 부요소의 개수(N=7)와 오차의 허용한계를 만족하는 최적의 부 요소 위치를 결정하였다.²⁰⁾

$$\theta = 1 - \frac{1}{2} (\sigma_{i+1} + \sigma_i) (\epsilon_{i+1} - \epsilon_i) / \int_{\epsilon_i}^{\epsilon_{i+1}} \sigma d\epsilon \quad (12)$$

이렇게 추출된 부요소의 항복 위치 및 변수 값의 한 예가 Fig. 6 및 Table 1에 기술되어져 있다.



(a) C_2, γ_2 Parameters for the description of the large strain region



(b) C_1, γ_1 Parameters for the description of the small strain region

Fig. 4 Kinematic hardening parameters : C_1, γ_1 (Ref. Temp. 200°C)

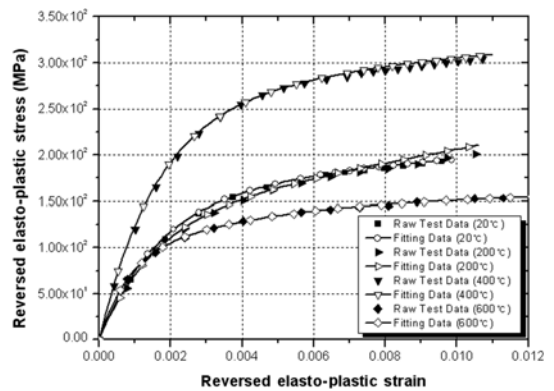


Fig. 5 Experiments vs. fitting functions according to temperatures

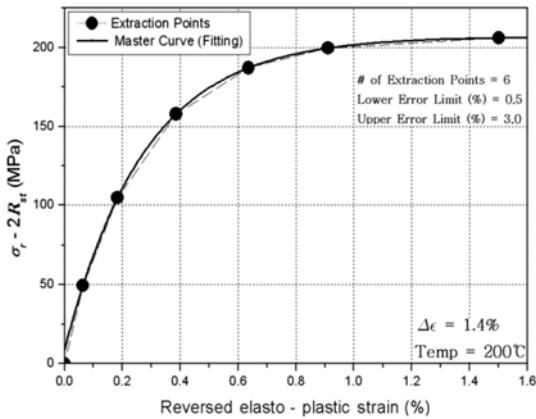


Fig. 6 Extraction points for master curve (200°C)²⁰⁾

Table 1 Kinematic hardening parameters (200°C)²⁰⁾

N	m_i (MPa)	ϕ_i
0	0.00	0.684
1	78.56	0.101
2	207.20	0.081
3	405.50	0.069
4	631.60	0.038
5	870.60	0.020
6	1372.00	0.007

3.2 등방성 경화(Isotropic Hardening)

재료의 반복 거동인 경화 및 연화 현상에 의한 응력 진폭(Stress Amplitude)의 변화는 탄성한계 R 의 변화에 의하여 발생한다고 가정할 수 있으며, 이러한 탄성 한계의 변화는 누적 소성변형률 p 와 소성 변형률 진폭 $\Delta\epsilon^p$ 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다.^{2,19)} 이것을 식으로 표시하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(\Delta\epsilon^p, p) = Q(\Delta\epsilon^p) \cdot (1 - e^{-bp}) + \sigma_{y0} \quad (13)$$

이 때 σ_{y0} 는 초기 항복 응력 값이며, Q 는 R 이 안정화 될 때까지의 최대 증가분을 의미한다. b 는 누적 소성 변형률 p 에 따른 경화 속도를 나타낸다. 본 연구에서는 소성 변형률 진폭에 따른 Q 의 변화에 대한 영향은 고려하지 않았다.

4. 변온 재료 상수 추출

본 논문에서는 변온 상태의 비선형 이력곡선을

예측하기 위하여, 등온 상태의 이력곡선을 이용한 변온 재료 상수의 효과적인 추출 방법을 제시하였다.

4.1 이동성 경화 상수

변온 조건에서의 이동성 경화현상을 모사하기 위하여, 비선형 구간의 이력곡선 형상을 온도에 따라 보간 함으로써 재료 상수를 추출하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 단순히 수치적인 기법을 적용하여 변온 조건에서의 재료 상수를 추출하는 방법에 비해 보다 논리적이며 직관적인 장점이 있다. 먼저, 각 기준온도(20°C, 200°C, 400°C, 600°C)에서 추출된 등온 재료상수를 이용하여, 변온 조건에서의 이력곡선을 식 (14) 및 식 (15)를 사용하여 구현한다.

$$\gamma(T) = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \gamma(T_1) + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \gamma(T_2) \quad (14)$$

$$\ln(C\gamma)_{(T)} = \frac{T_2 - T}{T_1 - T_1} \ln(C\gamma)_{(T_1)} + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \ln(C\gamma)_{(T_2)} \quad (15)$$

여기서, T_1, T_2 는 기준 온도를 T 는 보간 온도를 의미한다. 또한, 온도 T 에서 각 부요소의 항복 위치를 선정하기 위하여, 식 (16)을 이용하여 등온 조건의 값으로부터 변온 조건에서의 역 탄소성 변형률 위치 ϵ_{rep}^i 를 계산한다.

$$\epsilon_{rep}^i(T) = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \epsilon_{rep}^i(T_1) + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \epsilon_{rep}^i(T_2) \quad (16)$$

여기서, $\epsilon_{rep}^i(T_i)$ 는 온도 T_i 에서 각 부 요소의 초기 항복점의 역 탄소성 변형률을 의미한다.

최종적으로 식 (14), (15), (16)에서 $C, \gamma, \epsilon_{rep}$ 값을 이용하여 식 (8)에서 온도 T 에서 구한다. 따라서, 온도 T 에 해당하는 m_i, ϕ_i 값은 식 (5), (6)을 이용하여 구할 수 있다.

본 논문에서 제시한 변온 조건으로의 확장 방법은 이력곡선 및 각 부 요소의 추출 위치를 직접적으로 추출함으로써 재료 상수 결정의 난해함을 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 이동성 경화현상을 보다 정확히 모사할 수 있는 장점이 있다. 특히, 윤삼손이¹⁸⁾ 제안한 이력곡선 수정방법과 상이하게 맞춤 곡선과

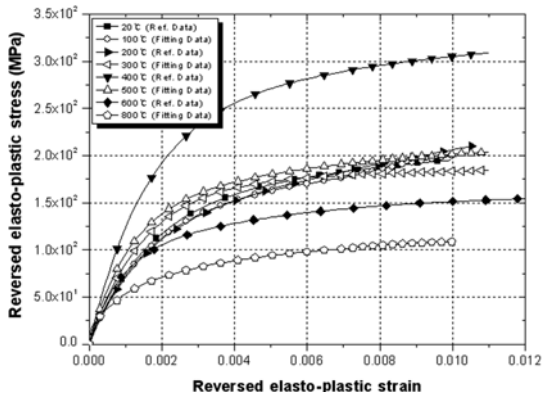


Fig. 7 Master curves according to temperatures

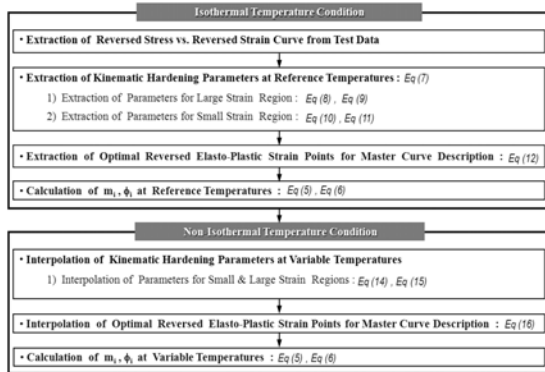


Fig. 8 Flow chart for the kinematic material parameter extractions for the non-isothermal temperature condition

각 부요소의 항복 위치를 동시에 보간 함으로써, 고정된 부요소의 항복 위치를 사용함에 따라 발생할 수 있는 오차를 최소화 할 수 있다. 기준 온도와 보간된 온도에서의 이력곡선을 Fig. 7에 나타내었으며, 이동성 경화용 재료 상수 추출 절차 및 방법을 간단히 요약하면 Fig. 8과 같다.

4.2 등방성 경화 상수

다층모델의 반복 연화 및 경화현상을 표현하기 위하여 Chaboche 모델의 비선형 등방성 경화모델식 (17)을 이용하였으며, 기준 온도별 특정 진폭 ($\Delta\epsilon = \pm 0.7\%$)에서의 시험 데이터에서 등방성 경화 재료 상수를 추출하였다.

$$R(p, T) = Q(T) \cdot (1 - e^{-b(T)p}) + \sigma_{y0}(T) \quad (17)$$

Table 2는 200°C에서 추출된 등방성 경화지수를

Table 2 Isotropic Hardening Parameters (200°C)

Parameter	Q (MPa)	b
Value	94.49	16.806

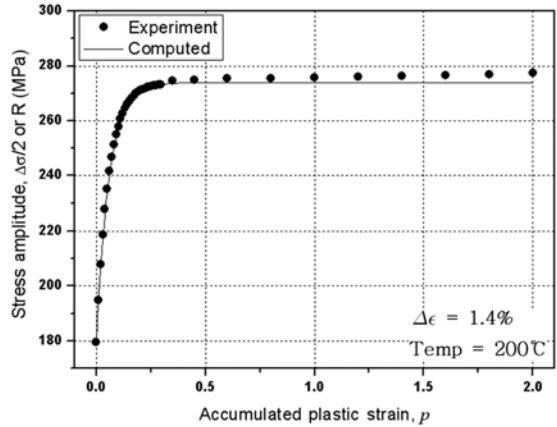


Fig. 9 Stress amplitude vs. accumulated plastic strain

나타내며, 이들에서 구해진 탄성한계 $R(p, T)$ 는 Fig. 9에서와 같이 시험값과 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

3.1절에서 상세히 기술한 변온 상태의 이동성 경화 상수를 추출하는 방법과 동일한 방식으로, 식 (18), (19), (20)을 이용하여 변온 조건에서의 등방성 경화지수를 추출할 수 있다.

$$\sigma_{y0}(T) = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \sigma_{y0}(T_1) + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \sigma_{y0}(T_2) \quad (18)$$

$$b(T) = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} b(T_1) + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} b(T_2) \quad (19)$$

$$\ln(Qb)_{(T)} = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \ln(Qb)_{(T_1)} + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \ln(Qb)_{(T_2)} \quad (20)$$

여기서, T_1, T_2 는 기준 온도를, T 는 보간 온도를 의미한다.

5. 다층 모델을 이용한 재료 상수 검증

앞 절에서 제안한 변온 조건에서의 재료 상수 추출방법에 대한 효용성을 검증하기 위하여 상용유한 요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 사용

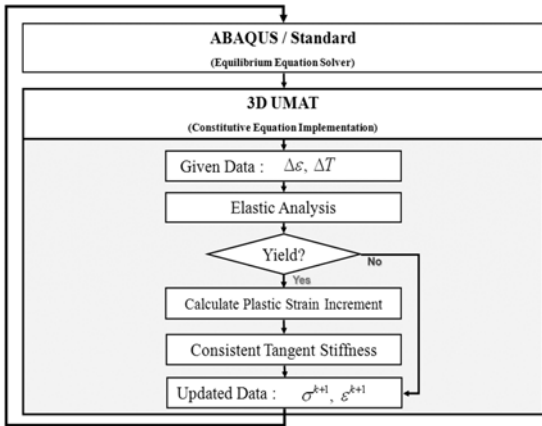


Fig. 10 Flow chart for 3D ABAQUS/UMAT program

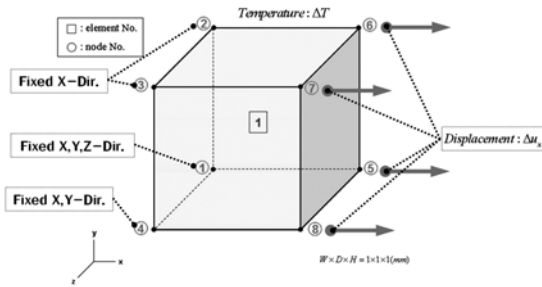
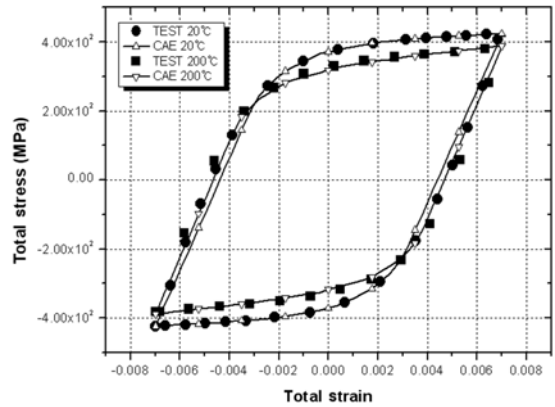


Fig. 11 Boundary condition for the 3D finite element analysis

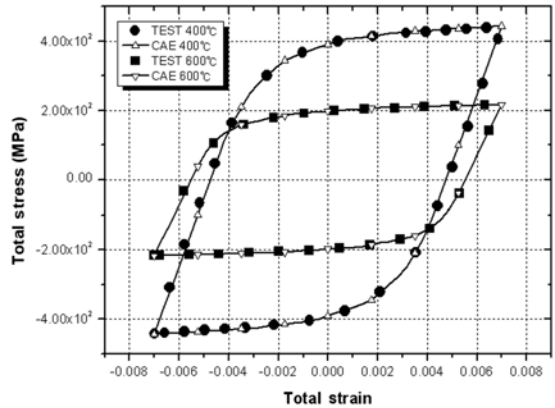
자 정의 서브루틴인 ABAQUS/UMAT(User Material Subroutine)을 이용하여 다중 재료모델을 구현하였다. 이 과정에서 필요한 수치해석기법^{2,18)}은 참고문헌에 자세히 기술되어져 있다. ABAQUS와의 연동 과정은 Fig. 10과 같으며, 유한요소 해석의 편의성을 위하여 1개의 육면체요소(C3D8)를 사용하였다. 재료 시험데이터가 인용된 참고 문헌^{2,18)}의 시험 조건을 모사하기 위하여, 해석 모델의 각 절점(Node) 변위에 대한 구속 및 하중 경계조건은 Fig. 11과 같이 적용 하였다. 또한, 1축 이력 거동에 대한 유한요소 해석결과 값은 요소의 중심점(Central Point)을 기준으로 추출하였으며, 시험과 비교 및 검증을 수행하였다.

5.1 기계적 하중 해석(등온 조건)

먼저 등온 조건에서 추출한 재료 상수의 타당성을 검증하기 위하여, 기준 온도에서 일축 인장에 대한 반복 하중 해석을 수행하였다. Fig. 12와 같이 안



(a) Comparison of 20°C & 200°C (Stabilized Hysteresis Loop)



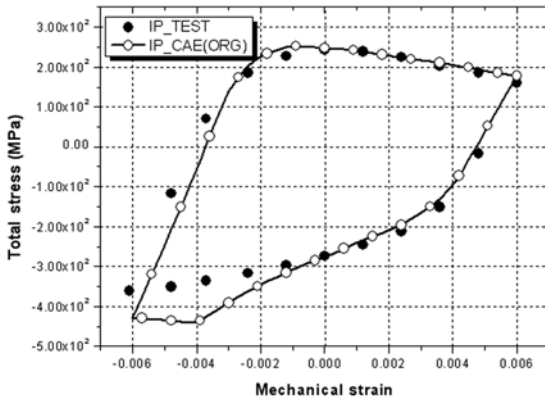
(b) Comparison of 400°C & 600°C (Stabilized Hysteresis Loop)

Fig. 12 Experimental vs. Analysis Results at Reference Isothermal Temperature Conditions (20°C, 200°C, 400°C, 600°C)

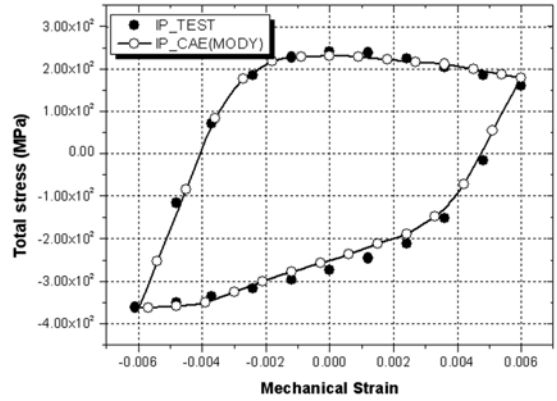
정화된 이력곡선의 시험과 해석 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 따라서 기준 온도에서 추출한 재료 상수 및 본 연구과정에서 개발된 다중 재료모델용 ABAQUS/UMAT의 정확성을 확인할 수 있다.

5.2 열적·기계적 하중 해석(변온 조건)

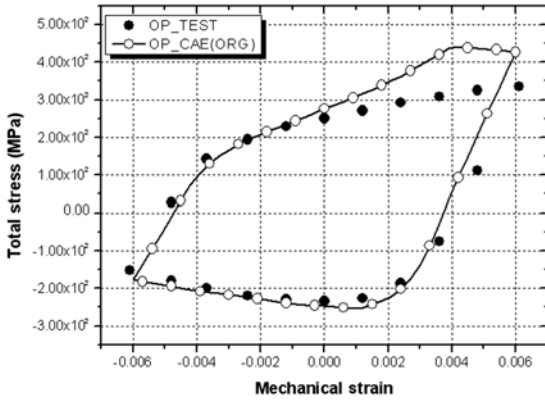
동상(In-Phase) 및 이상(Out-Of-Phase) 조건에 대하여 열적 기계적 하중 해석을 진행하였으며, 시험 결과와의 검증을 위하여 참고 문헌^{18,22)}의 시편 정보 및 시험 조건(변온 조건: 350-650°C, 기계적 변형률: $\Delta\epsilon_{mech} = \pm 0.6\%$)을 기준으로 해석 경계 조건을 선정 하였다. 해석 결과 Fig. 13에서 보듯이 400°C 근방에서 시험 결과와 매우 상이한 경향을 보이고 있



(a) In-Phase(IP) mode : 350 ~ 650°C, $\Delta\epsilon_{mech} = \pm 0.6\%$

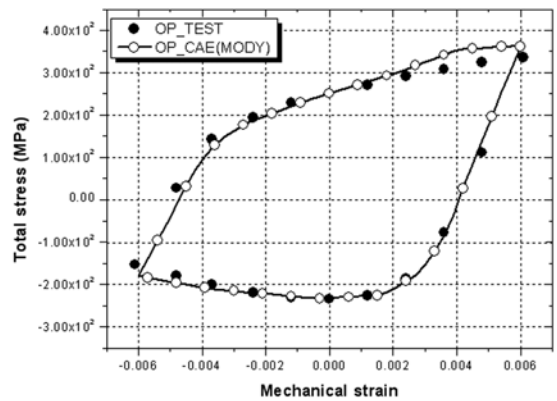


(a) In-Phase(IP) mode : 350 ~ 650°C, $\Delta\epsilon_{mech} = \pm 0.6\%$



(b) Out-Of-Phase(OP) Mode : 350 ~ 650°C, $\Delta\epsilon_{mech} = \pm 0.6\%$

Fig. 13 Experimental vs. analysis results at Thermo-Mechanical conditions (Stabilized hysteresis loop)



(b) Out-Of-Phase(OP) mode : 350 ~ 650°C, $\Delta\epsilon_{mech} = \pm 0.6\%$

Fig. 14 Experimental vs. Analysis Results with Modified Isotropic Hardening Parameters at 400°C (Stabilized Hysteresis Loop)

며, 특히 이 특정 온도 영역은 400계열의 페라이트계 스테인레스 강에서 동적 변형 시효(DSA: Dynamic Strain Aging)^{21,22)}에 의한 반복 경화현상이 가장 크게 나타나는 온도 구간으로 알려져 있다.

실제로 400°C 등온 조건에서의 비정상적인 응력 증가 현상이 뚜렷이 나타나고 있음을 Fig. 7, 12에서 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 등온 상태에서 추출한 재료상수를 열적 기계적 하중에 대한 이력거동 예측에 적용할 때 발생할 수 있는 오차(Fig. 13)의 가장 큰 원인으로 유추할 수 있다. 즉, Fig. 13에서 보듯이 참고 문헌^{18,22)}에서 사용한 열적 기계적 하중조건 하에서는 400°C 영역의 DSA 현상이 이력곡선에 충분히 반영되지 않는 것으로 판단되며, 따라서 DSA가 발생하는 온도 구간에 대한 충분한 유지시

간이 매우 중요한 검토 변수임을 유추할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 200°C와 600°C의 재료 상수를 선형 보간하여 구해진 400°C의 반복 경화계수를 열적 기계적 하중해석에 적용함으로써, 특정 온도 영역에서의 비정상적인 반복 경화현상에 대한 영향을 제거하였다. 이렇게 재 추출된 400°C 등방성 경화계수를 적용하여 이력거동 해석을 재 수행하였으며, 이에 대한 해석 결과는 Fig. 14와 같다.

Fig. 14에 나타난 바와 같이 재료의 열적 기계적 이력거동 과정에서 DSA 현상이 충분히 반영되기 위해서는, 이 특정 온도 구간에 대한 유지시간이 매우 중요한 변수임을 알 수 있다. 따라서, 변온 조건에서 재료의 이력거동을 정확히 예측하기 위해서는

재료의 구동 온도 조건이 매우 중요한 변수이며, 이에 대한 검토가 충분히 선행되어야 한다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 다층 모델(Overlay Model)을 적용한 변온 상태의 재료거동을 예측하기 위하여, 등온 이력곡선에서 변온 재료 상수를 추출하는 효과적인 방법을 제안하였다. 즉, 이동성 경화현상을 모사하기 위하여, 역응력 발전식과 유사한 이력곡선을 이용하여, 2가지 변형을 영역으로 나누어, 쉽게 정확하게 맞춤곡선을 얻었다. 또한, 온도에 따른 이력곡선의 형상을 직접 보정하는 방법을 적용함으로써, 보다 직관적인 변온 조건에서 이력곡선의 추출이 가능하였다. 이렇게 추출된 다층 모델용 재료 상수를 상용 프로그램에 적용하기 위하여, ABAQUS에서 제공하고 있는 사용자 정의 재료 서브루틴인 UMAT을 이용하여 다층 재료모델을 구현하였다. 또한 추출된 재료 상수의 유용성을 검증하기 위하여 UMAT을 이용한 유한요소 해석을 수행하였으며, 등온 및 변온 조건에서 모두 재료 시험과 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

그러나 등방성 경화상수의 경우, 400°C 등온 상태에서 발생하는 비정상적인 반복 거동현상이 특정 변온 조건에서는 발생하지 않았으며, 이 결과로부터 등온 상태의 비정상적인 반복 경화현상이 발생하기 위해서는 충분한 온도 유지 시간이 요구된다는 것을 알 수 있었다. 즉, 구동 온도 조건(온도 유지 시간)에 따라 등온 재료 상수의 보간에 따른 주의가 필요하며, 재료 시험을 통한 검증이 요구된다. 이러한 재료의 이력거동 특성은 구조물의 열적 기계적 거동 및 열피로 수명 예측의 정확도에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서, DSA에 의한 비정상 반복 거동이 발생하는 온도 영역이 존재하는 스테인레스 400계열의 재료의 경우, 구동 온도 조건에 대한 검토가 필수적임을 알 수 있었다.

본 연구에 제시한 변온 조건에서의 재료 상수 추출과정 및 다층 모델에의 적용은 재료의 열적 기계적 이력거동을 정확하게 모사할 수 있으므로, 촉매 삽입형 대형상용 소음기 및 스테인레스 배기매니폴

드 시스템 등의 자동차 부품 개발에 적용 시 정량적인 열피로 수명예측이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 환경부 연구과제(ECO-STAR PROJECT)의 지원 하에 수행되어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

References

- 1) J. L. Chaboche, "Time-independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity," *Int. J. Plasticity* Vol.2, No.2, pp.149-188, 1986.
- 2) S. S. Yoon, S. G. Hong and S. B. Lee, "Phenomenological Description of Cyclic Deformation Using the Overlay Model," *Material Science and Engineering*, A364, pp.17-26, 2006.
- 3) A. K. Miller, *Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity*, Elsevier Applied Science, London, 1987.
- 4) A. S. Krausz and K. Krausz, *Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation*, Academic Press, 1996.
- 5) K. Schiffner, "Overlay Models for Structural Analysis under Cyclic Loading," *Computer & Structures*, Vol.56, pp.321-328, 1995.
- 6) J. F. Besseling, "A Theory of Elastic, Plastic, and Creep Deformations of an Initially Isotropic Material Showing Anisotropic Strain Hardening, Creep Recovery, and Secondary Creep," *Journal of Applied Mechanics*, pp.529-536, 1958.
- 7) M. Orits and J. C. Simo, "An Analysis of a New Class of Integration Algorithms for Elastoplastic Constitutive Equations," *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol.23, p.353, 1986.
- 8) K. Hornberger and H. Stamm, "An Implicit Integration Algorithms with a Projection Method for viscoplastic Constitutive Equation," *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol.28, p.2397, 1989.
- 9) J. L. Chaboche and G. Cailletaud, "Integration Methods for Complex Plastic Constitutive Equations," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, p. 125, 1996.
- 10) D. R. J. Owen, A. Prakash and O. C. Zienkiewicz

- wicz, "Finite Element Analysis of Non-linear Composite Materials by Use of Overlay Systems," *Computer & Structures*, Vol.4, pp.1251-1267, 1974.
- 11) S. S. Yoon, S. B. Lee and J. B. Kim, "Generalization of Integration Methods for Complex Inelastic Constitutive Equations with State Variables," *Transaction of the KSME (A)*, Vol.24, No.5, pp.1075-1083, 2000.
 - 12) S. S. Yoon and S. B. Lee, "A Semi-Implicit Integration for Rate-Dependent Plasticity with Non-linear Kinematic Hardening," *Transaction of the KSME (A)*, Vol.27, No.9, pp.1562-1570, 2003.
 - 13) S. S. Yoon and S. B. Lee, "Comparison of Semi-Implicit Integration Schemes for Rate-Dependent Plasticity," *Transaction of the KSME (A)*, Vol.27, No.11, pp.1907-1916, 2003.
 - 14) L. G. Zhao, J. Tong, B. Vermeulen and J. Byrne, "On the Uniaxial Mechanical Behaviour of an Advanced Nickel Base Superalloy at High Temperature," *Mechanics of Materials*, Vol.33, pp.593-600, 2001.
 - 15) J. Tong, Z. L. Zhan and B. Vermeulen, "Modeling of Cyclic Plasticity and Viscoplasticity of a nickel-based alloy using Chaboche Constitutive Equations," *Int. Journal of Fatigue*, Vol.26, pp.829-837, 2004.
 - 16) S. S. Yoon, S. G. Hong, S. B. Lee and B. S. Kim, "Low Cycle Fatigue Testing of 429EM Stainless Steel Pipe," *Int. Journal of Fatigue*, Vol.25, pp.1301-1307, 2003.
 - 17) ABAQUS, *User & Theory Manual Ver.6.7*, HKS, USA, 2008.
 - 18) S. S. Yoon, *Inelastic Analysis and Life Prediction for Structures Subject to Thermo-Mechanical Loading*, Ph. D. Dissertation, KAIST, 2003.
 - 19) J. Y. Lim and S. B. Lee, "Applicability Evaluation of Modified Overlay Model on the Cyclic Behavior of 316L Stainless Steel at Room Temperature," *KSME Transaction (A)*, Vol.28, No.11, pp.1603-1611, 2004.
 - 20) S. H. Kim, S. M. Kabir and T. I. Yeo, "Study on the Material Parameter Extraction of the Overlay Model for the Low Cycle Fatigue (LCF) Analysis," *Transactions of KSAE*, Vol.18, No.1, pp.66-73, 2009.
 - 21) K. O. Lee, K. H. Bae, S. B. Lee and S. H. Kim, "Constitutive Modeling of Ferritic Stainless Steels for Automotive Engine Application," 2007 SEMC International Conference, 2007.
 - 22) K. O. Lee, *A Novel Description of Thermo-Mechanical Fatigue Behavior in Dynamic Strain Aging Region*, Ph. D. Dissertation, KAIST, 2007.
 - 23) G. Calilleteaud and J. L. Chaboche, "Macroscopic Description of the Microstructural Changes Induced by Varying Temperature, Mechanical Behavior of Materials," *Proc. 3rd. Int. Conf. Cambridge*, Vol.2, p.23, 1979.
 - 24) N. Ohno and J. D. Wang, "Transformation of a Nonlinear Kinematic Hardening Rule to Multi-Surface from under Isothermal and Nonisothermal Conditions," *Int. J. Plasticity*, Vol.7, p.879, 1991.
 - 25) J. Lin, F. P. E. Dunne and D. R. Hayhurst, "Physically Based Temperature Dependence of Elastic-Viscoplastic Constitutive Equation for Copper Between 20°C and 500°C. *Philosophical Magazine A*," Vol.74, No.2, p.359, 1996.