

〈 논문 〉

## 리올로지 모델을 이용한 열적 기계적 변형 거동 모사

이금오\* · 홍성구\* · 이순복†

(2005년 8월 30일 접수, 2006년 5월 2일 심사완료)

### A Description of Thermomechanical Behavior Using a Rheological Model

Keum-Oh Lee, Seong-Gu Hong and Soon-Bok Lee

**Key Words:** Thermomechanical Fatigue(열적 기계적 피로), Elevated Temperature(고온), A Rheological Model, A Bi-linear Model

#### Abstract

Isothermal cyclic stress-strain deformation and thermomechanical deformation (TMD) of 429EM stainless steel were analyzed using a rheological model employing a bi-linear model. The proposed model was composed of three parameters: elastic modulus, yield stress and tangent modulus. Monotonic stress-strain curves at various temperatures were used to construct the model. The yield stress in the model was nearly same as 0.2% offset yield stress. Hardening relation factor,  $m$ , was proposed to relate cyclic hardening to kinematic hardening. Isothermal cyclic stress-strain deformation could be described well by the proposed model. The model was extended to describe TMD. The results revealed that the bi-linear thermomechanical model overestimates the experimental data under both in-phase and out-of-phase conditions in the temperature range of 350-500°C and it was due to the enhanced dynamic recovery effect.

#### 1. 서 론

에너지 효율의 극대화를 위해 고온 구조물의 작동 온도가 높아지면서 엔진 블록(engine block)이나 배기 매니폴드(exhaust manifold)에 사용되는 고온 재료들은 시스템의 운행 중에 고온 및 고압과 같은 심각한 환경에 노출되게 되었다. 이 경우 재료는 반복적인 구동과 정지를 통해서 반복 열응력을 온도 구배에 의해서 받게 되고, 응력 집중부에 손상이 누적되어 결국 파손에 이르게 된다. 온도변화와 응력변화에 의해 피로파손에 이르는

현상을 열적 기계적 피로(thermomechanical fatigue, TMF)<sup>(1)</sup>라 하며, 이것은 고온 구조물에서 대표적으로 발생하는 손상 중의 하나로 인식되고 있다.

열적 기계적 피로는 온도와 하중이 동시에 변하므로 이를 체계적으로 분류하는 것이 중요하다. 열적 기계적 거동(thermomechanical deformation, TMD)은 온도와 응력의 위상차에 따라 다음의 세 가지 상(phase)으로 분류되어 진다: (1) 온도와 응력의 위상차가 없는 동위상(In-phase, IP)의 경우 (2) 온도와 응력의 위상차가 180도인 비위상(Out-of-phase, OP)의 경우 (3) 온도와 응력의 위상차가 90도나 270도인 다이아몬드 상(Diamond phase, DP)의 경우<sup>(2)</sup>이다. 일반적으로 고온 구조물에서의 열적 기계적 피로 하중은 IP와 OP가 가장 많이 나타나며, 따라서 이 두 가지 상을 일반적으로 해석한다.

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sblee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3029

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

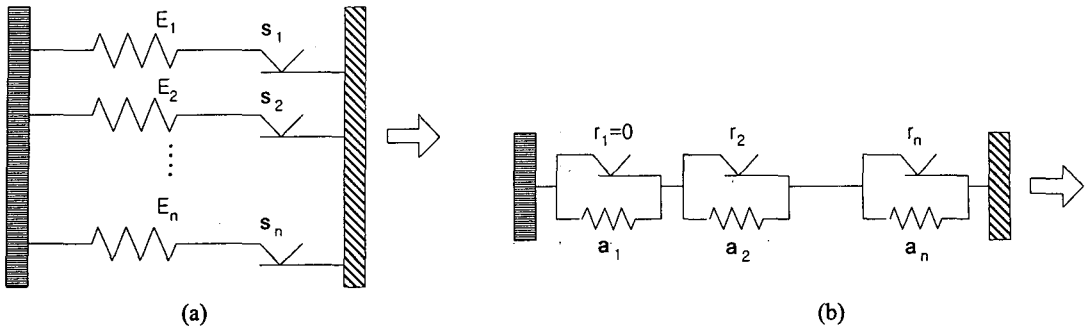


Fig. 1 The spring-slider models. (a) a parallel model, (b) a serial model

열적 기계적 피로를 해석하기 위해서 온도와 재료의 상태를 고려한 몇 가지 모델들이 있지만, 많은 경우, 식이 복잡하고, 연관되는 파라미터의 개수가 매우 많다. 모델이 복잡해질 경우, 실제로 현장에서 쓰기 매우 어려운 경우가 많으며, 유한 요소 해석에 걸리는 시간도 매우 많이 걸리기 때문에, 최소한의 파라미터를 가지고 열적 기계적 피로를 예측하는 것은 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 429EM 스테인리스강의 IP와 OP TMD를 해석하기 위해서 리올로지 모델 (rheological model)이 사용되었다.

## 2. 선형 리올로지 모델

구조물의 피로 손상을 정의하기 위해서는 응력과 변형률의 변화를 알고 있어야 한다. 그러나 대부분의 구조물은 해석하기에 매우 복잡한 형상을 가지고 있다. 일반적으로 응력-변형률 관계에는 Ramberg-Osgood 식을 많이 사용하며, 온도에 대해서는 Arrhenius 형태의 식을 많이 사용한다. 그러나 이러한 식은 비선형 함수형태이기 때문에 유한요소해석을 하기 위해서 매우 오랜 시간이 필요하다. 더욱이, 3차원 경우와 같이 복잡한 응력 상황에서는 해석이 더 어려워진다. 따라서 많은 연구자들은 스프링, 슬라이더, 대시풋(dashpot) 등의 간단한 구조로 이루어진 리올로지 모델을 사용하게 되었다. 시간 비의존적(time-independent) 거동에 대해서는 스프링-슬라이더 요소를 결합하여 응력과 변형률과의 관계를 선형화 할 수 있다. 크게 두 가지 종류의 스프링-슬라이더 모델들이 사용되고 있다(Fig. 1).

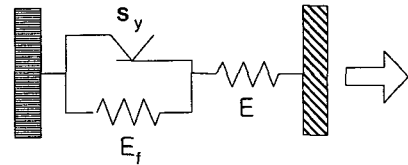


Fig. 2 Schematic diagram of a bi-linear model

(a) 병렬 모델 (다층 모델<sup>(3)</sup>): 이 모델은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이  $E_i$ 라는 강성을 가지고 있는 선형 스프링과  $s_i$ 로 구성된 미끄럼 요소들로 구성된 요소들이 병렬로 연결되어 있다. 각각의 요소들은 완전 탄소성 요소가 되며, 하나의 미끄럼 면으로 간주된다.

(b) 직렬 모델<sup>(4)</sup>: 이 모델은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이  $r_i$ 와  $a_i$ 가 병렬로 연결되어 한 요소를 구성하며 각각의 요소는 직렬로 연결되어 있다. 물리적으로 각각의 요소들은 kinematic hardening을 야기시키는 전위 집합으로 간주될 수 있다.

재료의 거동을 모사하기 위해 두 개의 요소 집합(element set)으로 구성된 직렬 스프링-슬라이더 모델을 사용한다면, Fig. 2와 같은 두 개의 스프링과 한 개의 슬라이더를 사용한 리올로지 모델을 구성할 수 있다. 모델에 의한 예측 결과를 응력-변형률 선도상에 그리면 두 개의 직선으로 구성되는 이중선형(bi-linear) 모델이 된다. 이 모델에서는 스프링 상수로서 탄성계수( $E$ )와 kinematic hardening modulus( $E_f$ )를 사용하며, 슬라이더 상수로서 항복응력을 사용한다. 이러한 파라미터들은 넓게 사용되는 재료의 특징과 연관이 있기 때문에 쉽게 구할 수 있다.

이중선형 모델을 구성하기 위해 단축 응력-변형률 곡선을 분석해 보면, 크게 Fig. 3과 같이 세 가지 방법으로 항복점(yield point)을 결정할 수 있다.

그림에서 (A)의 방법은  $E$ 와  $E_f$ 값을 응력-변형률 곡선의 탄성 영역과 소성 영역에 접선을 그어서 항복점을 정의한 경우이며, (C)의 방법은 응력-변형률 곡선 상에서 항복점을 정해서  $E$ 와  $E_f$ 값을 구하는 경우이다. (B)의 방법은 (A)와 (C)의 사이에서 실제 곡선과 모델과 차이가 많이 나지 않도록 항복점을 잡는 경우이다. 다중요소(multi-unit)를 사용하는 리올리지 모델에서는 (C)의 방법을 쓰는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 탄성계수와 tangent modulus 등의 일반적인 개념을 사용할 수

있고, 항복점을 유일하게 정의할 수 있는 (A) 방법을 사용하였다.

### 3. 단축 변형 상황에서의 이중선형 모델 구성

이중선형 모델을 구성하기 위해서 429EM 스테인리스강의 인장 시험이 20-800℃의 넓은 온도 범위 내에서 수행되었다. 화학적 조성과 실험 방법은 이전 논문에 나타나 있다.<sup>(5)</sup> Fig. 4(a)는 여러 온도에서의 단축 응력-변형률 곡선(monotonic stress-strain curve)을 보여주고 있다. 열적 기계적 피로는 주로  $\pm 1.0\%$ 의 변형률 범위에서 발생하기 때문에 1.0%에서의 tangent modulus가 kinematic hardening modulus  $E_f$ 로서 사용되었다. Tangent modulus( $E_t$ )와 kinematic hardening modulus( $E_f$ )의 관계는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{E_f} = \frac{1}{E_t} - \frac{1}{E} \quad (1)$$

인장 곡선을 통해 구한 429EM 스테인리스강의 재료 상수는 Table 1과 같다. 이 상수들을 통해서 Fig. 4(b)처럼 이중선형 응력-변형률 곡선을 구성하였다. 이 모델에서의 항복 응력은 0.2% 오프셋 항복 응력(offset yield stress)에서 실험적으로 구해진 값과 매우 유사하였으며(Table 1), 따라서 0.2% 오프셋 항복 응력을 이중선형 모델의 항복응력으로 사용할 수 있었다.

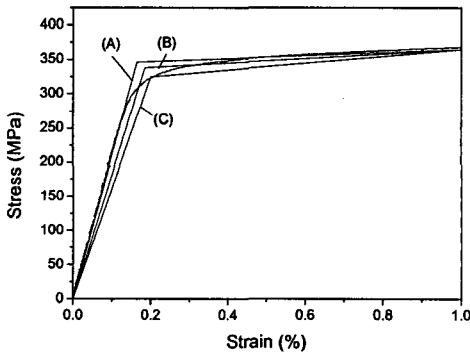


Fig. 3 Determination of a bi-linear curve

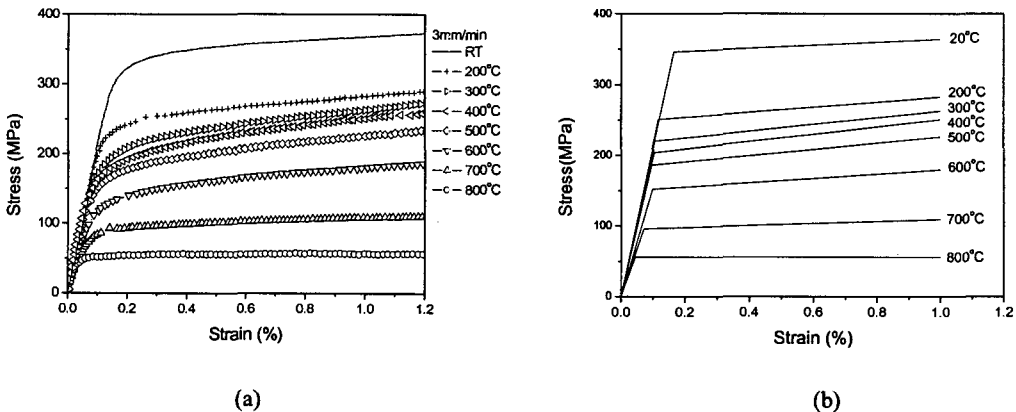


Fig. 4 Stress-strain curves at various temperatures: (a) experimental data, (b) bi-linear model

Table 1 Material constants of the bi-linear rheological model

Temperature (°C)	20	200	300	400	500	600	700	800
$E$ (GPa)	210	214	207	198	195	156	135	126
$E_f$ (GPa)	2.21	3.6	4.8	5.2	4.41	3.05	1.42	0.1
$E_s$ (GPa)	2.23	3.66	4.91	5.34	4.51	3.11	1.44	0.1
$\sigma_y$ (MPa)	346	251	220	204	186	152	96	56
0.2% offset yield stress (MPa)	346	254	223	207	189	150	96	54.4
Errors between yield stresses (%)	0	1.18	1.35	1.45	1.59	-1.33	0	-2.94
Maximum normalized peak stress	1.14	1.36	-	1.95	-	1.25	-	-
$m$ (stress increasing factor)	1.94	2.65	-	2.67	-	2.44	-	-

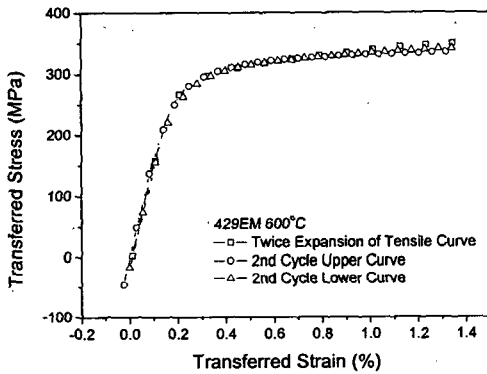


Fig. 5 Relationship between tensile curve and cyclic curves

#### 4. 등온 반복 변형 해석

재료에 반복 응력이 가해질 때 나타나는 이력(hysteresis) 곡선은 재료의 단축 인장 곡선을 이용해 모사할 수 있는 경우가 종종 있다. Yoon<sup>(3)</sup> 등은 316L 스테인리스강과 429EM 스테인리스강에서 인장 곡선을 이용해 여러 변형률 범위의 응력-변형률 이력곡선의 모사가 가능함을 보여주었으며, 사이클이 전개됨에도 불구하고 그것을 대표하는 주곡선(master curve)의 형태는 변하지 않는 것을 보여주었다.

이와 같은 방법을 따라 인장 시험을 통해 얻은 이중선형 곡선을 통해 반복 응력이 가해지는 저 사이클 피로 이력 곡선을 구성할 수 있었다. Fig.

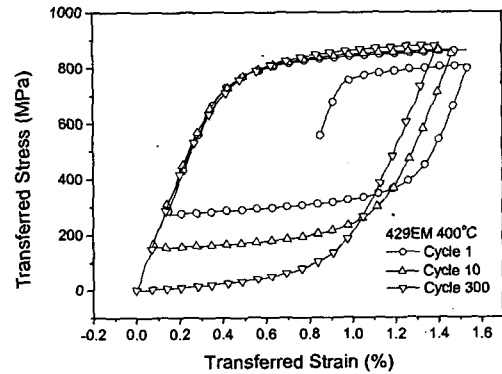


Fig. 6 Hysteresis loop evolution with the number of cycles

5에서는 인장 시험의 응력-변형률 곡선의 응력과 변형률을 각각 2배씩 하여 그린 곡선과 반복 응력-변형률 곡선의 인장변형에서의 곡선(upper curve)과 압축 변형에서의 곡선(lower curve)을 180° 회전하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 일축 인장 곡선과 반복 응력-변형률 곡선은 거의 같은 형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

또한 다른 고려사항으로서는 사이클에 따른 응력의 변화를 들 수 있다. 반복 변형 거동에서는 재료의 온도나 전위 밀도의 변화에 따라 반복 경화 또는 반복 연화 현상이 생기게 된다. Fig. 6은 400°C에서 사이클에 따른 재료의 이력 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 재료는 사이클이 진행할수록 소성 변형은 적어지고 응력은

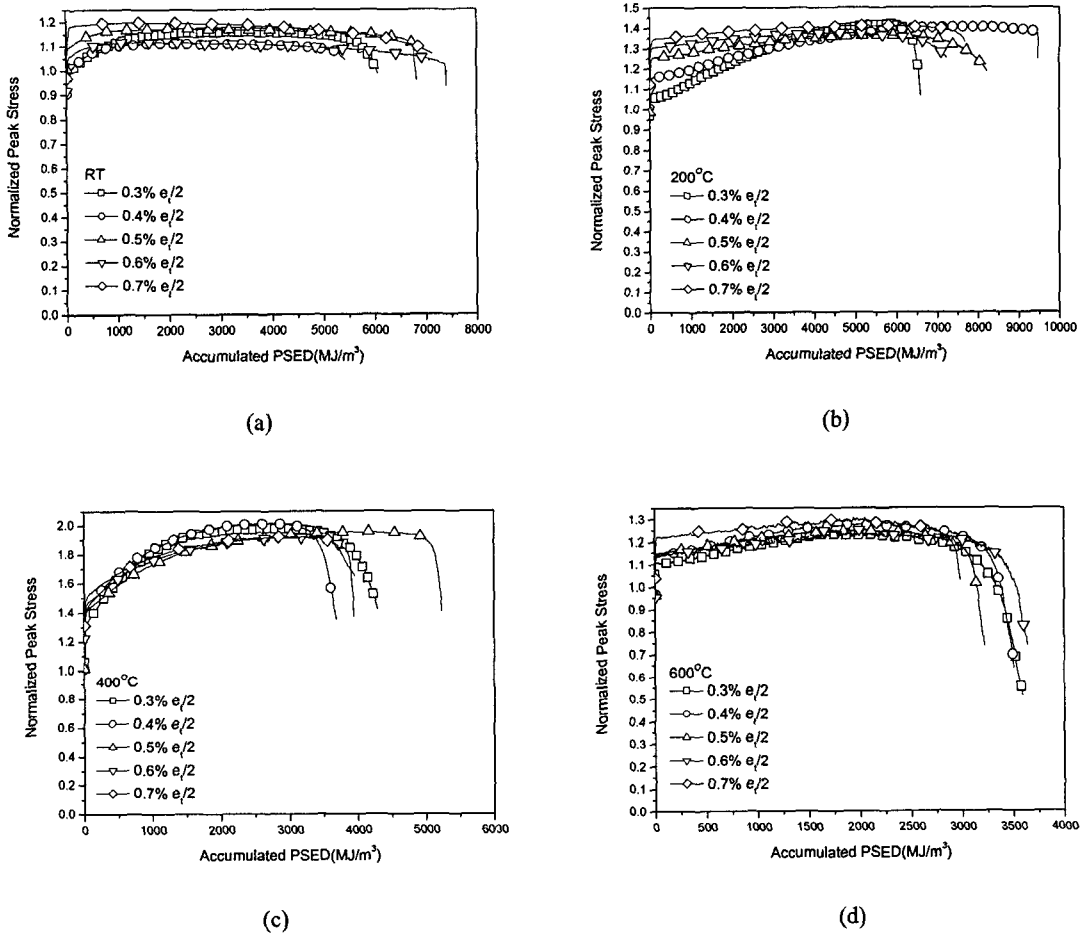


Fig. 7 Normalized peak stress evolution at various temperatures:  
 (a) room temperature(RT), (b) 200°C, (c) 400°C, (d) 600°C

커지는 반복 경화가 나타난다. 그러나 이력 곡선의 위쪽 곡선(upper curve)이 사이클이 변화하더라도 거의 일정한 것을 알 수 있다. 따라서 탄성 영역이 증가한다고 가정한다면, 전체적인 곡선의 형태는 변하지 않기 때문에, 인장 곡선을 가지고 전체 이력곡선을 구성할 수 있음을 알 수 있다.

Lee 등<sup>(5)</sup>은 이전 논문에서 429EM 스테인리스강은 Morrow 모델로 잘 표현될 수 있다고 하였다. 따라서 피로 손상을 소성 변형을 에너지 밀도(plastic strain energy density, PSED)로 표현하면 사이클에 따른 응력의 경화 정도를 알 수 있게 된다. Fig. 7은 사이클에 따른 응력의 증가를 PSED에 대해서 나타낸 것이다. 응력의 증가를 알기 쉽

게 하기 위해서 첫 사이클의 피크 응력으로 노멀라이징(normalizing) 하였다. 결과에 의하면 각 온도에 따라 각각 다른 형태로 피크 응력이 증가함을 알 수 있으며, 최대 피크 응력의 10% 내에서 피로 수명의 절반 이상이 소요됨을 알 수 있다. 각 온도에서의 최대 피크 응력 값은 Table 1에 제시되어 있다. 특히 200°C와 400°C에서는 응력의 경화 정도가 다른 온도에 비해 매우 큰 것을 알 수 있는데, 이는 동적변형시효(dynamic strain aging, DSA)로 인하여 나타나는 것이다. DSA는 소성 영역에서 나타나는 세레이션(serration) 효과 등으로 많이 알려져 있으며, DSA가 일어나는 온도범위에서는 고용된 용질 원자들이 이동 전위 주위로 확

산하여 분위기를 형성하여 전위의 이동을 방해함으로써 소성 변형을 일으키기 위한 응력이 증가하게 된다. 따라서 이러한 기구에 의해 재료의 취성화가 발생하게 되고(즉, 강도의 증가 및 연성의 감소), 재료 연성에 의해 지배되는 저사이클 피로 수명이 짧아지게 된다. Hong과 Lee<sup>(6)</sup>는 flow stress의 변화에 의해서 DSA가 일어날 수 있는 범위가 발견된다고 발표하였다. 따라서 flow stress의 변화와 반복 경화와의 관계를 정의할 수 있다면, 단축 응력-변형률 곡선으로 반복 응력-변형률 곡선을 예측하는 것이 가능하게 된다.

Fig. 8은 각 온도에서의 최대 노멀라이징 피크 응력(maximum normalized peak stress)과 flow stress의 증가폭을 나타내는 단순 인장 변형에서의 tangent modulus ( $E_f$ )를 온도에 따라 나타낸 결과이다. 결과에서 보듯이 두 하중 조건에 대한 경화는 비슷한 경향을 가지고 있는 것을 알 수 있으며, 이 관계를 온도에 따른 함수인 경화 관계 인자  $m$ 으로 정의할 수 있다.

$$m = \frac{E_f}{\text{max. normalized peak stress}} \quad (2)$$

여기에서  $m$ 은 200-600°C의 온도 범위에서 2.4-2.7의 비슷한 값을 가지고 있었다(Table 1). 따라서 이러한 특성을 통해, 다음과 같은 가정을 가지고 반복 응력이 가해질 때 재료의 변형 거동을 표현할 수 있다.

- 1) 200-600°C에서  $m$  값을 2.6의 상수로 가정한다.
- 2) 반복 응력이 경화되는 양은 항복응력의 증가와 같다.

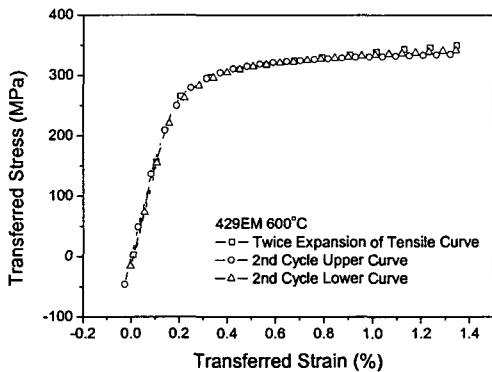


Fig. 8 Relationship between tensile curve and cyclic curves

3) 이 재료는 Masing의 가설<sup>(7)</sup>을 따른다.

위의 가정들을 통해 저사이클 변형에서의 최대 항복 응력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{y, \text{max}} = \frac{E_t}{m} \sigma_y \quad (3)$$

결과적으로, 반복 이력 곡선은 Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 상수  $m$ 과 단순 인장 곡선에서 사용되었던 세 개의 재료 상수를 가진 이중선형 모델로 구성할 수 있었다. Fig. 9는 400°C에서의 실험 결과와 제안된 모델의 예측결과를 보여준다. 결과에서 보는 것과 같이 이중선형 모델은 고온에서 안정화된 상태의 반복 이력 곡선을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

### 6. 열적 기계적 반복 변형 해석

열적 기계적 변형은 온도가 연속적으로 변하기 때문에, 여러 온도에서 단순 인장 변형의 파라미터들을 알아야 이중선형 모델을 구성할 수 있다. 따라서 인장 시험을 하지 못한 온도에서 응력-변형률을 시뮬레이션 하기 위해서, 탄성 계수와 항복 응력, flow stress를 선형 내삽(linear interpolation) 방법으로 구하여 이중선형 열적 기계적 변형을 구성하였다. 이 모델을 검증하기 위해서 429EM 스테인리스강의 TMF 시험을 350-550°C와 350-650°C의 온도 범위와 IP와 OP의 두 상황에서 수행되었다. 외경이 12mm이고 내경이 8mm이며, 표점거리가 10mm인 속이 빈 형태의 환봉형 시험

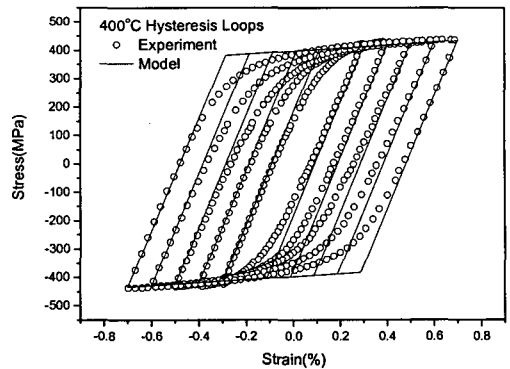


Fig. 9 Stabilized stress-strain hysteresis loops at various strain amplitudes

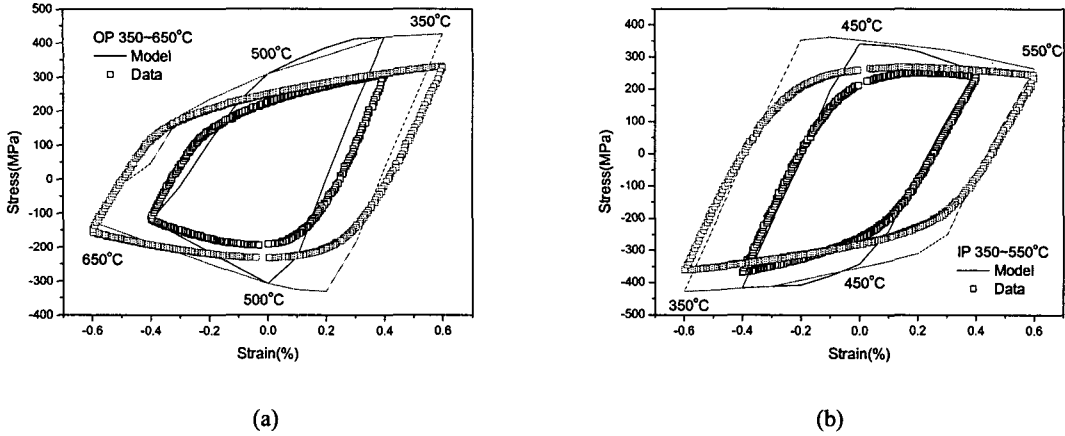


Fig. 10 Stabilized TMF hysteresis loops (a) OP 350~650°C, (b) IP 350~550°C

편이 TMF 실험을 위해서 사용되었다.<sup>(8)</sup> Fig. 10은 TMF의 실험적 결과와 이중선형 모델간에 관계를 보여주고 있다. 이 결과는 제시된 모델이 350-500°C의 구간에서 과대 예측하고 있음을 보여준다. 이 온도 영역에서 재료는 동적변형시효를 겪고, 따라서, 이동 전위들이 고용 환경에 의해서 고착화 되므로 전위 밀도가 점점 높아지면서, 반복 응력의 심한 증가를 야기하게 된다. 그러나 온도가 550°C를 넘게 되면, 공공의 움직임이 활발해져 전위 상층에 의해 전위의 제거현상(동적회복)이 일어나게 된다. 결과적으로 550°C 이상에서는 동적회복이 중요해져서 반복 경화 현상을 감소시키는 결과를 낳게 된다. 따라서, 재료거동 모델링시 동적회복 현상을 고려한다면, 실제와 가까운 열적 기계적 변형을 예측할 수 있으리라 여겨진다. 또한 현재의 모델은 429EM 스테인리스강에 해당되는 모델로서 차후 반복 연화 거동을 가지고 있는 다른 재료에 대하여 응용시키는 것들도 필요하다.

### 7. 결론

등온 일축 응력-변형을 곡선으로 구성한 이중선형 모델을 이용해 반복 응력-변형을 이력 곡선과 열적 기계적 피로 이력 곡선을 모사할 수 있는 새로운 모델을 제시하였다. 탄성계수, tangent modulus, 0.2% 오프셋 항복 응력의 세가지 재료 상수를 가지고 일축 응력-변형을 곡선으로 두 개의 직선으로 구성할 수 있었다. 429EM 재료는 대부

분의 온도에서 반복 경화가 일어나며, 고온에서의 반복 경화를 동적 경화로 표현하기 위해서 경화 관계 요소  $m$ 을 도입하여 구성할 수 있었다.  $m$ 은 동적 변형 시효가 일어나는 온도에서 일정함을 알 수 있었으며,  $m=2.6$ 으로 가정하여 온도에 관계 없는 재료의 반복 이력곡선을 구성할 수 있었다. 이중선형 모델과 경화 관계 요소  $m$ 을 사용하여 예측한 열적 기계적 피로 변형은 350-500°C에서 실제 거동을 과대 예측하였으며, 이는 고온에서 발생하는 동적 회복 효과가 모델링시 고려되지 않았기 때문이다.

### 후 기

본 연구는 CARE Lab.과 (주) 현대자동차의 지원 하에 수행되었으며 이에 감사사를 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Remy, L., Bernard, H., Malpertu, J. L., and Rezai-Aria, F., 1993, "Fatigue Life Prediction Under Thermal-Mechanical Loading in a Nickel-Base Superalloy," *Thermomechanical Fatigue Behavior of Materials*, ASTM STP 1186, pp. 3~16.
- (2) Zamrik, S. Y., Davis, D. C., and Firth, L. C., 1996, "Isothermal and Thermomechanical Fatigue of Type 316 Stainless Steel," *Thermomechanical*

- Fatigue Behavior of Materials: Second Vol.*, ASTM STP 1263, pp. 96~116.
- (3) Yoon, S., Hong, S. G., and Lee, S. B., 2004, "Phenomenological Description of Cyclic Deformation Using the Overlay Model," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 364, pp. 17~26.
- (4) Nagode, M. and Zingsheim, F., 2004, "An On-line Algorithm for Temperature Influenced Fatigue-life Estimation: Strian-life Approach," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, p. 155~161.
- (5) Lee, K. O., Yoon, S. Hong, S. G., Kim, B. S., and Lee, S. B., 2004, "Low Cycle Fatigue Behavior of 429EM Stainless Steel at Elevated Temperature," *KSME Transaction A*, Vol. 28, No. 4, pp. 427~434.
- (6) Hong, S. G. and Lee, S. B., 2004, "Dynamic Strain Aging Under Tensile and LCF Loading Conditions, and Their Comparison in Cold Worked 316L Stainless Steel," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 328, Issues 2-3, pp. 232~242.
- (7) Masing, G., 1926, *Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics*, Zurich.
- (8) Lee, K. O., Yoon, S. Hong, S. G., Lee, S. B., and Kim, B. S., 2006, "Thermomechanical Fatigue System Development," *KSME Transaction A*, to be submitted.