

SP-Creep 시험에 의한 고온 크리프 특성 평가 기술 개발 (I)

- 보일러 과열기 튜브 -

백승세* · 나성훈** · 나의균*** · 유효선†
(2001년 2월 16일 접수, 2001년 9월 24일 심사완료)

Development of Evaluation Technique of High Temperature Creep Characteristics by Small Punch-Creep Test Method (I)

- Boiler Superheater Tube -

Seung-Se Baek, Sung-Hun Na, Eui-Gyun Na and Hyo-Sun Yu

Key Words: Small Punch Test(소형펀치시험), Miniaturized Specimen(미소시험편), SP-Creep Test(소형펀치-크리프시험), Equivalent Fracture Strain(ϵ_{qf} , 등가 파괴변형률), Initial Strain(ϵ_{qfo} , 초기 변형률), SP-Creep Rate($\dot{\epsilon}_{qf-ss}$, SP-크리프 속도), Creep Rupture Life(tr, 크리프 파단수명), Load Exponent(n, 하중지수), Activation Energy(Q_{SPC} , 활성화 에너지), Boiler Superheater tube(보일러 과열기 튜브), 2.25Cr-1Mo Steel

Abstract

In this study, a small punch creep(SP-Creep) test using miniaturized specimen($10 \times 10 \times 0.5\text{mm}$) is described to develop the new creep test method for high temperature structural materials. The SP-Creep test is applied to 2.25Cr-1Mo(STBA24) steel which is widely used as boiler tube material. The test temperatures applied for the creep deformation of miniaturized specimens are between $550 \sim 600^\circ\text{C}$. The SP-Creep curves depend definitely on applied load and creep temperature, and show the three stages of creep behavior like in conventional uniaxial tensile creep curves. The load exponent of miniaturized specimen decreases with increasing test temperature, and its behavior is similar to stress exponent behavior of uniaxial creep test. The creep activation energy obtained from the relationship between SP-Creep rate and test temperature decreases as the applied load increases. A predicting equation of SP-Creep rate for 2.25Cr-1Mo steel is suggested, and a good agreement between experimental and calculated data has been found.

1. 서론

에너지변화 설비부재의 재질열화 및 수명 평가의 접근방법에는 크게 해석적 방법, 비파괴적 방법 그리고 파괴적인 방법이 있다. 이들 방법들은

각기 나름대로의 고유한 장점과 단점을 지니고 있으며, 국내·외의 수많은 연구기관에서 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 위의 세 가지 접근 방법 중 파괴적인 수명평가 방법은 기계구조물의 열화 및 수명을 최종적으로 평가, 관리할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있음에도 불구하고 실기부재에 적용하는 데에는 많은 문제점들을 갖고 있다. 그의 주요한 원인은 일반적인 재료실험 및 파괴역학적 개념에 기초하여 재료의 물성치를 파악하기 위해서는 ASTM이나 ASME에서 요구하는 비교적 대형의 시험편을 필요로 하기 때문이다.

* 회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과
** 전북대학교 대학원 정밀기계공학과
*** 회원, 군산대학교 기계공학과
† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학과, 자동차 신기술 연구소
E-mail : yuhs@moak.chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388

그러나, 설비부재의 건전성에 큰 영향을 주지 않는 범위에서 미소시험편을 채취하여 가동 중에 있는 설비의 현상태 진단과 수명을 정확히 평가할 수 있다면, 수명평가 분야에 있어 매우 유용한 하나의 시험법이 될 것이다.

한편, 종래 보다 소형화된 시험편을 이용하여 재료 및 설비의 기계적 성질 또는 건전성을 평가하기 위해 수많은 노력들이 행해져 왔으며, 이러한 노력들의 대표적인 결실이 소형펀치(small punch : SP) 시험법이다.^(1,2) 소형펀치 시험법은 핵융합로벽의 조사손상(irradiation damage) 영역이 시험편 표면 층에 한정되기 때문에 기존의 재료 시험 방법에 비해 이를 보다 효과적으로 평가하기 위해 개발된 시험방법이다.^(3,4)

소형펀치 시험법은 일반적인 인장시험이나 샐피충격 시험에서 요구하는 시험편의 크기에 비하여 매우 작은 시험편(10×10×0.5mm)을 이용하는 준 비파괴 시험법으로, 개발 초기단계에는 재료의 강도(strength)와 연성(ductility)을 구하고자 하는 연구가 행해졌으며,⁽⁵⁾ 그 이후에는 많은 재료시험 분야 즉, 발전설비 부재의 재질열화도 및 응력부식균열(stress corrosion cracking : SCC) 감수성 그리고 세라믹과 경사기능성재료와 같은 신소재의 재료특성과 강 용접부의 국부조직에 대한 파괴인성 평가 등에 적용되어 왔다.^(6~9)

본 연구에서는 현재 국내·외적으로 미소역학(micromechanics) 물성 평가분야에서 많은 관심을 보이고 있는 미소 시험편을 사용하는 소형펀치 시험법을 이용하여 우선적으로 보일러 과열기 튜

브 재료의 고온 크리프 특성을 평가하고, 이들의 시험결과를 단축 인장 크리프 시험거동과 비교, 검토함으로써 소형펀치-크리프(SP-Creep) 시험^(10,11)의 새로운 크리프 평가 기술의 개발 가능성을 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험재료와 시험편

본 연구에서 사용된 시험재료는 현재 화력 발전설비의 보일러 과열기 튜브 재료로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo(STBA24)강의 신재이다. Table 1에 시험재료의 화학적 조성을 나타내었다. 고온 크리프 시험편의 크기는 소형펀치 시험편의 규격인 10×10×0.5mm로 하였다.

2.2 SP-Creep 시험장치의 구성과 실험방법⁽¹⁰⁾

본 대학에서 자체적으로 설계 구성한 SP-Creep 시험장치는 Fig. 1과 같으며, 주요구성은 고온 소형펀치 시험지그, 가열장치, 정하중 부하장치, 미소변위 측정장치(linear variable differential transducer : LVDT), 냉각장치 그리고 제어장치 등이다. 또한 GPIB(general purpose information

Table 1 Chemical compositions of 2.25Cr-1Mo steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.13	0.01	0.42	0.02	0.29	0.12	2.23	1.12	bal.

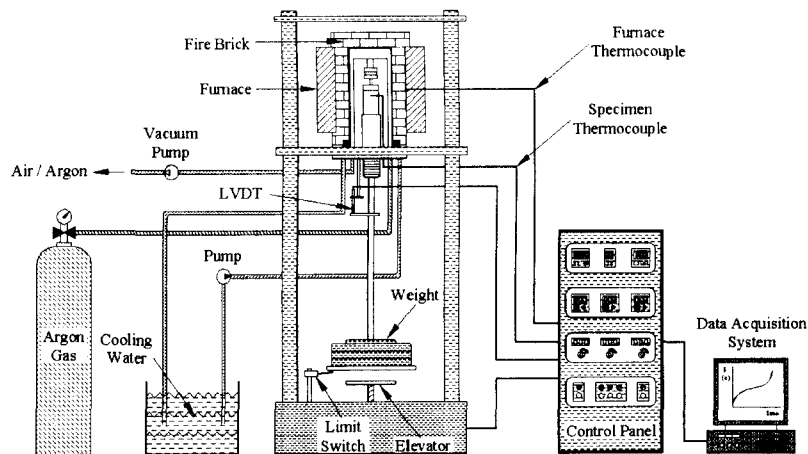


Fig. 1 The Schematic diagram of SP-Creep test equipment⁽¹⁰⁾

board)를 사용하여 크리프 시험 도중 발생한 모든 데이터는 실시간으로 컴퓨터에 저장된다. 크리프 시험장치에서 중요한 부분은 소형편치 시험지그와 가열장치 그리고 부하 시스템이며, 이중 미소시험편을 체결하는 소형편치 시험지그는 1100℃까지 시험이 가능하도록 인코넬(inconel) 재질을 사용하여 제작하였다. 또한 시험편의 상부에 $\phi 2.4\text{mm}$ 의 Si_3N_4 세라믹 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로서 시간에 따른 시험편의 크리프 변형 거동을 조사하였다. 고온 크리프 시험 온도는 550~600℃ 범위로 하였으며 시험편 가열 온도의 오차범위는 약 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어하였다. 하중은 40~100kg범위에서 부가하였으며, 시험도중 시험편의 중앙변위(central displacement : δ)는 LVDT 시스템을 이용하여 최소 1 μm 까지 정밀 계측하였다. 또한 시험 중 미소시험편의 표면산화에 따른 시험오차를 제거하기 위해 아르곤(Ar) 분위기에서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 과열기 튜브 재료의 SP-Creep 곡선과 초기 변형률 거동

2.25Cr-1Mo강을 대상으로 550℃와 600℃의 고온환경에서 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 등가 파괴변형률(ϵ_{df})대 시간(t)의 대표적인 크리프 곡선 거동을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 이때 등가 파괴변형률, ϵ_{df} 는 페라이트 합금강계에 적용이 가능한 다음 식으로부터 산출하였다.⁽³⁾

$$\epsilon_{df} = 0.15(\delta/t_0)^{3/2} \quad (1)$$

여기서, δ 는 시험편의 중앙변위, t_0 는 시험편의 초기 두께이다. 실험결과, SP-Creep 곡선의 전체적인 변형거동은 작용하중 및 시험온도에 의존하여 뚜렷하게 변화함을 알 수 있다. 시험조건에 따라 차이는 있지만, 종래 단축 인장 크리프 시험에서의 변형거동과 같이 1차 크리프(primary creep), 2차 정상상태 크리프(steady state creep) 그리고 3차 가속 크리프(accelerating creep) 영역을 명확히 보이고 있다.

Fig. 4는 SP-Creep 시험을 행한 시험편의 SEM 파면사진을 보여주고 있다. 먼저 거시적인 SEM 사진(x20)인 Fig. 4 (a)에서 SP-Creep 시험편은 모

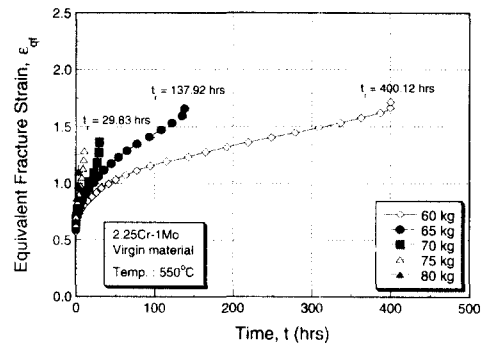


Fig. 2 The SP-Creep curves for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 550℃

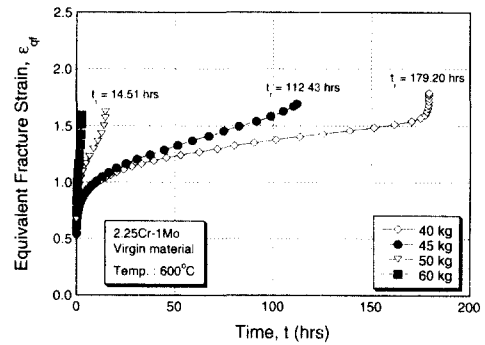


Fig. 3 The SP-Creep curves for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 600℃

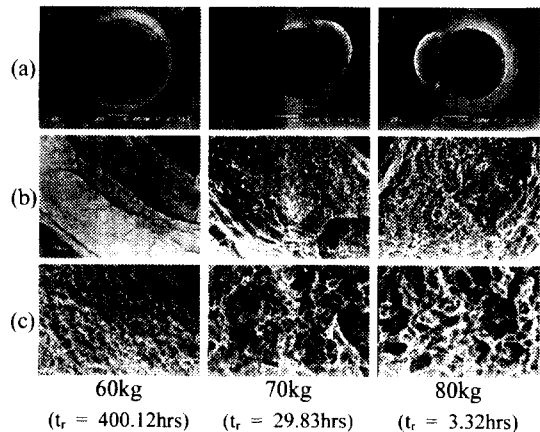


Fig. 4 The SEM fractography for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 550℃

두 화산구 모양으로 파괴가 됨을 관찰할 수 있다. 또한 시험시간이 비교적 짧은 경우, 즉 80kg의 조건에서는 원주방향의 균열이 지배적이나, 시험시간이 길어질수록 원주방향의 균열과 더불어

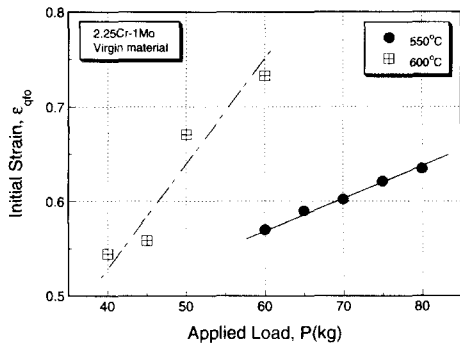


Fig. 5 The relationship between initial strain and applied load for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel

어 반경방향의 균열이 증가하고 있음을 Fig. 4 (b)의 SEM 사진에서 볼 수 있다. 그리고, 하중이 증가할수록 딴플(dimple)의 크기가 커짐을 Fig. 4 (c)의 미시적 파면사진(x3000)에서 볼 수 있는데 이는 단축 인장 크리프 시험에서의 결과와 유사하다.

Fig. 5는 미소 시험편의 초기 변형률(initial strain : ϵ_{q0})을 작용하중에 따라 나타낸 그림이다. 여기서 초기 변형률은 하중을 작용한 후 1분이 경과되었을 때의 등가 파괴변형률 값으로 정의하였다. 그림에서 작용하중이 증가함에 따라 초기 변형률도 증가하고 있음을 알 수 있으며, 온도가 높을 수록 작용하중의 증가에 따른 초기 변형률의 변화가 큼을 알 수 있다.

3.2 작용하중과 SP-Creep 변형속도의 관계

일반적으로 단축 인장 크리프 시험에서 정상 상태의 크리프 속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)와 작용 응력의 관계는 $\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n$ 과 같이 멱수법칙(power law) 형태로 표현된다. 여기서 n ,는 응력지수(load exponent)로서 시험재의 크리프 변형특성을 대변하는 인자이다.

Fig. 6은 SP-Creep 시험에 있어서의 정상 상태의 2차 크리프 속도($\dot{\epsilon}_{qf-ss}$)와 작용하중의 관계를 나타낸 결과로서 크리프 속도는 하중의 의존도가 매우 뚜렷함을 관찰할 수가 있다.

여러 시험 온도에서 시험하중에 대한 크리프 속도를 나타낸 $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ vs. P 의 그림으로부터 크리프 하중지수는 최소 자승법에 의해 구한 결과 550°C, 575°C 그리고 600°C에서 각각 14.82, 13.18

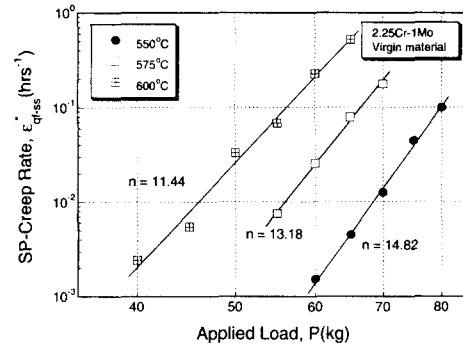


Fig. 6 The relationship between SP-Creep rate and applied load for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel

그리고 11.44를 나타내어, 시험온도의 증가에 따른 하중지수 값의 감소를 보이고 있다. 이 같은 하중지수 값의 감소는 온도가 증가함에 따라 시험편의 전위밀도가 감소하고, 이에 따라 하중의 감소 효과가 높아지기 때문으로 사료된다. 또한 이러한 결과는 단축 인장 크리프 시험에서의 응력지수 거동과 같으므로 SP-Creep 시험의 유용성을 확인할 수 있다. SP-Creep 시험으로부터 구한 $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ vs. P 의 정량적 상관 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 550^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 6.45 \times 10^{-30} P^{14.82} \\
 575^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 9.06 \times 10^{-26} P^{13.18} \\
 600^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 9.48 \times 10^{-22} P^{11.44}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

3.3 작용하중과 SP-Creep 수명의 관계

화력발전 설비중 보일러 설비부재의 튜브는 가혹한 운전도중 변형이 생겨도 기능상 문제가 없다면 파단에 이를 때까지의 수명에 의해 설계조건을 결정한다. 따라서 보일러 튜브재의 설계조건에서 크리프 시험에 의한 파단수명은 매우 중요한 비중을 차지한다.

Fig. 7은 SP-Creep 시험에 있어서의 파단수명(t_r)의 작용하중에 대한 의존성을 조사하여 나타낸 결과이다. 그림으로부터 크리프 파단수명은 하중의 의존도가 매우 뚜렷함을 관찰할 수가 있다.

여러 시험 온도에서 시험하중에 대한 파단수명을 나타낸 t_r vs. P 의 관계로부터 크리프 하중지수는 550°C, 575°C 그리고 600°C에서 각각

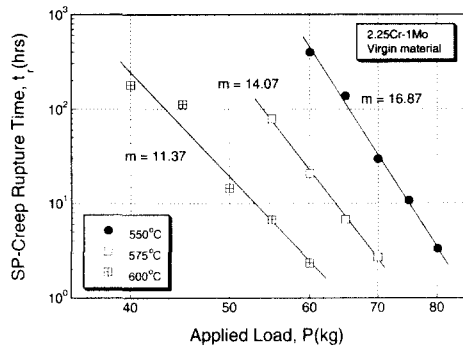


Fig. 7 The relationship between rupture time and applied load for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel

16.87, 14.07 그리고 11.37을 나타내어, 시험온도가 증가함에 따라 하중지수가 감소함을 보이고 있다. 그리고 SP-Creep에서 작용하중(P)과 크리프 파단수명(t_r) 사이의 정량적 상관관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} 550^\circ\text{C} : t_r &= 4.54 \times 10^{32} P^{-16.87} \\ 575^\circ\text{C} : t_r &= 2.46 \times 10^{26} P^{-14.07} \\ 600^\circ\text{C} : t_r &= 4.00 \times 10^{20} P^{-11.37} \end{aligned} \quad (3)$$

3.4 SP-Creep 시험의 활성화에너지 거동

크리프 변형은 고온에서 외부하중 혹은 응력에 의해 나타나는 원자들의 국부적인 확산과 회복에 의한 전위들의 이동으로 인해 발생하는 시간에 따른 열적 활성화 변형 거동이다.

일반적으로 정상상태 크리프 속도의 온도 의존성은 다음 식과 같은 Arrhenius-type 식에 의해 나타낼 수가 있다.⁽¹²⁾

$$\dot{\epsilon}_{ss} = B \cdot \exp(-Q_C/RT) \quad (4)$$

여기서, Q_C : 크리프 활성화 에너지, T : 절대 온도, R : 일반기체상수(8.314J/mol·K), B : 재료상수이다.

본 연구에서는 일정한 하중하에서 다양한 온도로 크리프 시험을 실시하여 얻은 SP-Creep 속도 ($\dot{\epsilon}_{sp}$)와 온도($1/T$)의 관계로부터 활성화에너지를 구하였다. Fig. 8은 이러한 관계를 보여주는 그림으로 60kg과 65kg에서 각각 597.1kJ/mol과 569.4kJ/mol의 활성화에너지 값을 얻을 수 있었

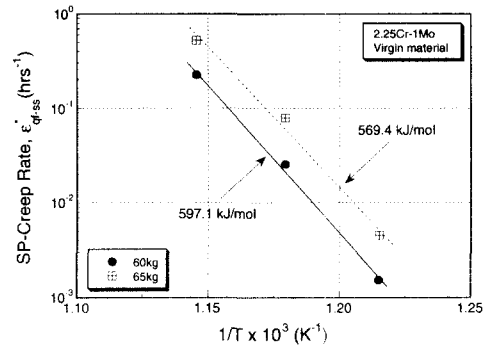


Fig. 8 The relationship between SP-Creep rate and test temperature for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel

다. 여기서 SP-Creep 시험으로부터 측정되어진 활성화에너지 Q_{SPC} 는 2.25Cr-1Mo(STBA24) 동일 강종에 대한 단축 인장 크리프 시험에서 얻어지는 467.4~533.4kJ/mol의 활성화 에너지 값⁽¹³⁾과 비교할 때 다소 큰 값을 보였으나, 하중이 증가할수록 활성화 에너지가 감소하는 경향은 단축 인장 크리프 시험 거동과 유사하여 SP-Creep 시험의 유용성을 또 한번 확인할 수가 있다. 앞으로 더 많은 D/B가 구축되어진다면 두 시험결과와의 보다 정확한 비교해석이 가능하리라 생각된다.

3.5 SP-Creep 시험의 Monkman-Grant 관계

다음은 미소시험편에 대한 Monkman-Grant 관계를 살펴본다. Monkman-Grant 관계는 크리프 시험에서 파단수명과 정상상태의 크리프 속도의 관계를 나타낸 것으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$t_r \cdot \dot{\epsilon}_{ss}^M = C \quad (5)$$

대부분의 금속재료의 경우에 상수 M 은 약 1.0의 값을 갖는다고 알려져 있다.⁽¹⁴⁾

Fig. 9는 2.25Cr-1Mo강을 대상으로 SP-Creep 시험과 단축 인장 크리프 시험⁽¹³⁾으로부터 얻어진 Monkman-Grant의 관계를 함께 도시한 것이다.

단축 인장 크리프 시험의 경우에는 상수 M 값은 0.963이고 SP-Creep 시험의 경우에는 1.05의 값으로, 두 시험 모두 1에 접근함을 알 수 있다. 이 같은 시험결과는 SP-Creep 시험의 유용성을 증명하는 중요한 시험결과라 할 수 있다. 향후, Monkman-Grant의 관계를 이용한 크리프 수명 평가에 대한 연구결과가 주목된다.

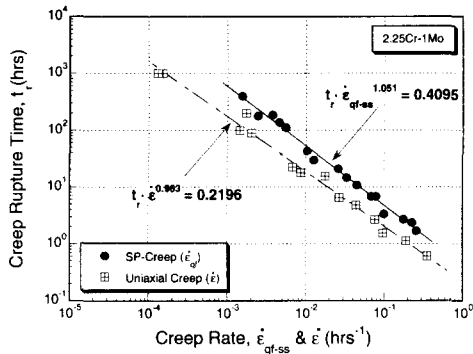


Fig. 9 The Monkman-Grant relationship obtained from SP-Creep and uniaxial tensile creep tests for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel

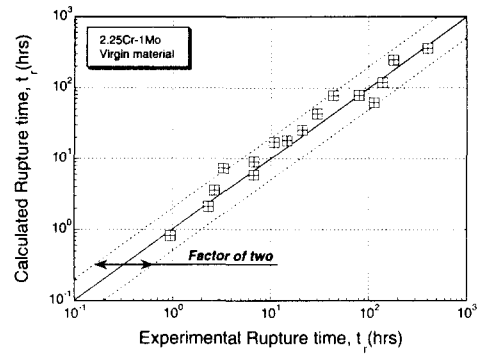


Fig. 10 The relationship between calculated and experimental values of SP-Creep rupture time for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel

3.6 SP-Creep 시험의 크리프 수명 예측

C.F. Shih⁽¹⁵⁾ 등은 크리프 속도가 온도와 응력 및 재료의 구조적 요소 등에 의해 결정되는 함수라 하였으며, J.J. Kanter⁽¹⁶⁾는 이러한 요소들에 의한 크리프 수명 관계를 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$t_r = A(\sigma, T, ST) \cdot \sigma^{-n(\sigma, T, ST)} \cdot \exp\left[-\frac{Q(\sigma, T, ST)}{RT}\right] \quad (6)$$

여기서, T는 절대온도, ST는 구조적 인자이다.

본 연구에서는 식 (6)에서 σ 를 P로 대치한 후 보일러 과열기 튜브재인 2.25Cr-1Mo강에 대해 다음과 같은 크리프 수명 예측 식을 구성할 수 있었다.

$$t_r = \exp[(232.8 + 2.05P) - (0.35 + 1.75 \times 10^{-3}P)T] \cdot P^{-(107.4 - 0.117T)} \cdot \exp\left[-\frac{(844.8 - 3.82P) \times 10^3}{RT}\right] \quad (7)$$

Fig. 10은 실험 값과 계산 값 사이의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 실험 값과 계산 값 사이에는 좋은 일치성을 보이고 있다.

향후, 위의 실험식 중 하중 P항을 미소시험편의 등가응력(equivalent stress : σ_{eq})으로 변환하는 연구가 필요하다고 사료되며, 현재 이에 대한 연구가 본 대학에서 진행중이다.

4. 결론

본 연구에서는 미소역학 시험기법을 이용한 새로운 크리프 시험법의 개발을 위해 발전소 과열기 튜브 재료로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo (STBA24)강을 대상으로 다양한 온도와 하중 조건에서 SP-Creep 특성을 조사하였다. 본 연구에서 얻은 시험결과들은 다음과 같다.

(1) 미소시험편에 의한 SP-Creep 곡선 거동은 작용하중과 시험온도에 의존하였으며, 종래의 단축 인장 크리프 시험과 같이 3단계의 크리프 거동을 보였다.

(2) SP-Creep 시험의 초기 변형률(ϵ_{qf0})은 작용하중이 커짐에 따라 증가하였으며, 온도가 상승함에 따라 그 증가율이 상승하였다.

(3) SP-Creep 시험의 크리프 속도(ϵ_{qf-ss})는 하중에 매우 뚜렷하게 의존하며, 이때 하중지수(n)는 시험온도가 550℃, 575℃, 600℃로 증가함에 따라 각각 14.82, 13.18, 11.44로 감소함을 보여 단축 인장 크리프 시험의 응력지수의 거동과 같아 SP-Creep 시험의 가능성을 확인할 수 있었다.

(4) 크리프 파단수명(t_r)은 대수좌표 상에서 작용하중이 증가할수록 직선적으로 감소하였다. 또한 온도가 상승함에 따라 그 감소율은 증가하여, 단축 인장 크리프 시험결과와 같이 멱수법칙(power law)이 성립하였다.

(5) SP-Creep 변형에 대한 활성화 에너지(Q_{SPC})는 60kg과 65kg에서 각각 597.1kJ/mol 및 569.4kJ/mol로 하중이 증가함에 따라 감소하였다.

(6) SP-Creep 시험에 있어 2.25Cr-1Mo 강의 Monkman-Grant 관계식은 $t_r \cdot (\dot{\epsilon}_{cr-ss})^{1.051} = 0.4095$ 으로 얻어졌으며, 지수 값은 1에 가까운 1.05를 보여 SP-Creep 시험법의 유효성을 확인할 수 있었다.

(7) J.J. Kanter의 크리프 수명 관계식을 이용하여 SP-Creep 시험에서의 크리프 수명 예측 식을 구성하였으며, 실험 값과 계산된 값 사이에 좋은 일치를 보였다. 향후 많은 데이터 베이스가 구축되어 SP-Creep 시험이 정립된다면, 이러한 수명 예측식은 크리프를 고려한 설계에 유용하게 활용되리라 생각된다.

후 기

본 연구는 1999년 전북대학교 국제공동학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- (1) Mao, X., Takahashi, H. and Kodaira, T., 1991, "Estimation of Mechanical Properties of Irradiated Nuclear Pressure Vessel Steel by use of Sub-sized CT Specimen and Small Punch Specimen," *Scripta Metallurgica*, Vol. 25, pp. 2487~2490.
- (2) Ha, Jeong Soo and Fleury, Eric, 1998, "Small Punch Tests on Steels for Steam Power Plants - Ductile Brittle Transition Temperature," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 818~826.
- (3) JAERI-memo(62-193), 1987, "小型パンチ(SP)試験法(案)," 日本原子力研究所, pp. 1~135.
- (4) Okada, A., Yoshiie, T., Kojima, S., Abe, K. and Kiritani, M., 1985, "Correlation among a Variety of Miniaturized Mechanical Tests and their Application to D-T Neutron-Irradiated Metals," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 133 & 134, pp. 321~325.
- (5) Manahan, M.P., Argon, A.S. and Harling, O.K., 1981, "The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Post-Irradiation Mechanical Properties," Vol. 103 & 104, pp. 1545~1550.
- (6) Baik, Jai-Man, Kameda, J. and Buck, O., 1983, "Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel," *Scripta METALLURGICA*, Vol. 17, pp. 1443~1447.
- (7) 竹田頼正, 高野勇作, 藤田明次, 1988, "微小パンチ試験による長時間使用Cr-Mo-Vロータ-の衝撃特性の推定," 材料, 第37巻, 第421號, pp. 48~54.
- (8) 松下敬, 四辻美年, 庄子哲雄, 高橋秀明, 1989, "シャルビ-衝撃試験と小型パンチ試験における破面遷移挙動の相關について," 日本機械學會論文集(A編), 55巻, 515號, pp. 1619~1622.
- (9) Yu, Hyo-Sun, Na, Eui-Gyun, and Chung, Se-Hi, 1999, "Assessment of Stress Corrosion Cracking Susceptibility by Small Punch Test," *Journal of Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, European Structural Integrity Society*, Vol. 22, No 10, pp. 889~896.
- (10) 유효선, 백승세, 이송인 외 2인, 2000, "소형 펀치-크리프 시험기 및 고온부재의 크리프 특성 평가 방법," 특허출원 제 24756호.
- (11) 유효선, 백승세, 이송인, 하정수, 2000, "미소 시험편을 이용한 고온 크리프 특성 평가법 개발," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A, pp. 43~48.
- (12) Jean-Paul Poirier, 1985, "Creep of Crystal : High-Temperature deformation process in metals, ceramics and minerals," *Cambridge University Press*, pp. 76~79.
- (13) 한국전력연구원, 1997, "고온재료의 크리프 손상 측정기술 개발" 보고서.
- (14) Evans, H. E., 1984, "Mechanisms of Creep Fracture," *Elsevier Applied Science Publishers*, pp. 18~22.
- (15) Shih, C.F., 1977, "A Stabel Computational Scheme for Stiff Time-Dependence Constitutive Equations," 4th ed..
- (16) Kanter, J.J., 1938, *Trans. AIME.*, Vol. 143.