

소형편치-크리프 시험에 대한 응력해석과 일축 크리프 시험과의 상관성에 관한 연구

이송인[†] · 백승세* · 권일현** · 유효선**
(2002년 3월 9일 접수, 2002년 10월 7일 심사완료)

A Study on Stress Analysis of Small Punch-Creep Test and Its Experimental Correlations with Uniaxial-Creep Test

Song-In Lee, Seoung-Se Baek, Il-Hyun Kwon and Hyo-Sun Yu

Key Words: Creep(크리프), Small-Punch Test(소형편치 시험), Finite Element Analysis(유한요소해석), Miniaturized Specimen(소형 시험편), 9Cr1MoVNb Steel(9Cr1MoVNb강), Uniaxial-Creep Test(일축 크리프 시험)

Abstract

A basic research was performed to ensure the usefulness of Small Punch-creep(SP-creep) test for residual life evaluation of heat resistant components effectively. This paper presents analytical results of initial stress and strain distributions in SP specimen caused by constant loading for SP-creep test and its experimental correlations with uniaxial creep(Ten-creep) test on 9Cr1MoVNb steel. It was shown that the initial maximum equivalent stress, $\sigma_{eq \cdot max}$ from FE analysis was correlated with steady-state equivalent creep strain rate, $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$, rupture time, t_r , activation energy, Q and Larson-Miller Parameter, LMP during SP-creep deformation. The simple correlation laws, $\sigma_{SP} - \sigma_{TEN}$, $P_{SP} - \sigma_{TEN}$ and $Q_{SP} - Q_{TEN}$ adopted to established a quantitative correlation between SP-creep and Ten-creep test data. Especially, the activation energy obtained from SP-creep test is linearly related to that from Ten-creep test at 65 0°C as follows : $Q_{SP-P} \approx 1.37 Q_{TEN}$, $Q_{SP-\sigma} \approx 1.53 Q_{TEN}$.

1. 서론

고온·고압의 환경 하에서 장시간 사용되는 부재의 대표적인 재질열화(material degradation) 현상인 크리프(creep)에 의한 손상의 평가는 그 부재의 안전성 및 신뢰성 평가, 현 상태의 진단을 위하여 매우 중요하다. 현재 고온부재의 잔여수명 평가를 위하여 표준화된 일축 크리프(uniaxial creep test : 이하 Ten-creep)시험법 이외에 실기부

재로부터 시료채취가 용이한 소형편치-크리프 시험(small punch-creep test : 이하 SP-creep 시험)법이 개발되어 많은 연구^(1~5)가 진행되고 있으며, 국내외적으로 유용한 데이터들이 축적되고 있다.

SP-Creep 시험에서는 다양한 온도와 하중조건에서 대하여 파단시간, 크리프 변형률속도, 활성화에너지 등이 평가되어 대상재료의 열화 정도에 따른 명확한 의존성과 그 전반적인 경향이 기존의 Ten-creep 시험에서 얻어진 거동과 일치하고 있음이 입증되고 있다. 또한 SP-Creep 시험을 통해 크리프에 의한 재질열화의 정성적인 평가는 물론 가속시험에 의한 크리프 파단수명의 직접적인 평가가 가능함이 관련 연구결과들에서 얻어져 그 유용성이 확인되고 있다.

한편 SP-creep 시험에서 얻어지는 크리프 특성

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부
E-mail : leepine3000@hanmail.net

TEL : (062)270-2367 FAX : (062)270-2388

* 회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

*** 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부

들은 통상 시험편에 가하여지는 일정하중에 대하여 정리되고 있으며 이로 인해 SP-creep 시험 결과들은 표준 Ten-creep 시험과 같이 고온부재의 설계나 수명평가 시 그의 직접적인 적용이 제한되어 왔다. 그러나 그간의 연구결과들을 살펴볼 때, 현재의 SP-creep 시험법이 기존의 Ten-creep 시험 특성을 예측할 수 있는 잠재적인 유용성을 내포하고 있음에 주목할 필요가 있다. 따라서 두 방법사이의 정량적인 연계성을 확보하기 위해서는 SP-creep 시험편에 대한 자세한 응력-변형률 해석과 두 방법에서 얻어진 결과들을 정량적으로 상호 관련시키는 것이 요구된다.⁽²⁾

그간 소형편치(small punch : 이하 SP)시험에 대한 이론적, 해석적 연구들을 살펴보면, 반구형 편치에 의하여 변형되는 금속박판의 응력과 변형률 분포를 소성증분이론(theory of incremental plasticity)과 수치해석적 기법을 이용하여 해석한 Wang의 연구,⁽⁶⁾ 그리고 Mao 등⁽⁷⁾은 재결정법(recrystallization method) 및 강-소성해석(rigid-plastic analysis)을 이용하여 SP 시험편의 변형과정(deformation process)을 규정하고 고유한 파괴특성값으로서 등가파괴변형률(equivalent fracture strain : 이하 ϵ_{eff})을 도입하였다.

이와 함께 Manahan 등⁽⁸⁾은 소형 디스크 굽힘시험(miniaturized disk bend test)에서 편치에 의한 벌징(bulging) 거동을 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 최근 들어 Li 등,⁽⁹⁾ Brookfield 등,⁽¹⁰⁾ 그리고 Cheon⁽¹¹⁾에 의하여 SP 시험편의 하중-변위 거동과 응력분포 등에 대한 연구결과들이 보고되었다. 한편 SP-creep 시험과 관련하여 Tettamanti 등⁽¹²⁾은 ASTM A335 P12강에 대하여 SP-creep 시험을 수행하고 동일 파단시간에서 SP-creep 시험의 하중과 Ten-creep 시험의 응력과의 유용한 관계를 제안하였다. 또한 Park 등⁽¹³⁾은 9Cr강의 Ten-creep 시험에서 얻어진 특성값을 SP-creep 유한요소모델에 입력하여 그 거동을 해석하고 크리프

상수와 지수의 평가절차에 대하여 언급하였다.

SP-creep 시험에 대한 연구결과들만을 살펴볼 때, SP 시험을 크리프 특성평가에 적용하기 위하여 다양한 온도조건에서 부과된 일정하중에 따른 시험편의 응력분포는 제시되지 않고 있으며, 이러한 해석결과들이 SP 시험에서 얻어진 주요 크리프 특성값들과 상호 관련되지 않고 있다.

본 연구는 내열재료의 크리프 특성평가 및 고온 부재의 잔여수명 예측 시 SP-creep 시험의 적용을 위한 기초연구로서, 유한요소해석을 통해 SP-creep 시험편의 초기 응력분포와 변형거동을 파악하고 SP 시험에서 얻어진 크리프 특성값들의 응력 의존성을 고찰하였다. 또한 SP-creep 시험과 Ten-creep 시험 결과와의 상호 관련성에 주목하고 응력(하중)과 활성화에너지, Larson-Miller Parameter (LMP)간의 상호 관계에 기초하여 두 시험 결과의 정량적 상관성을 조사하였다.

2. 시험재료 및 SP-creep 시험

최근 발전효율의 향상을 위하여 초초임계압 발전이 요구되면서 기존의 2.25Cr1Mo강이나 1.25Cr0.5Mo강을 대체하는 9Cr1Mo강이나 12Cr강 등이 개발되어 활용이 증가되는 추세에 있으나 이들 강종의 고온 물성에 대한 연구는 국내에서 아직 미진하다. 따라서 본 연구에서 적용된 재료는 초초임계압 화력발전소의 배관 및 증기발생기의 부품용으로 사용되는 내열강으로서 V와 Nb를 첨가하여 고온강도, 용접성과 가공성 등을 향상시킨 개량형 9Cr강(9Cr1MoVNb steel)이며, 향후 발전설비용 주요 소재로 활용될 것으로 예상되는 재료이다. Table 1에 고온 인장실험에서 얻어진 9Cr1MoVNb강의 기계적 특성값들을 나타내었다.

표준 SP 시험편(10mm×10mm×0.5mm)을 대상으로 본 대학에서 자체적으로 설계, 제작된 시험장치를 이용하여 SP-creep 시험을 수행하였다. 시

Table 1 Mechanical properties of 9Cr1MoVNb steel in high temperature conditions

Test temperature, T (°C)	Young's mod., E (GPa)	Poisson's ratio, ν	Yield strength, σ_y (MPa)	Ultimate strength σ_{UTS} (MPa)
600	116.3	0.3	269.23	317.31
625	104.33	0.3	257.69	286.99
650	99.74	0.3	230.77	255.20

험장치 및 절차에 대한 자세한 사항은 이전의 관련 문헌(3,4)에 수록되어 있으며 이에 준한다.

시험온도는 600 °C ~ 650 °C의 범위로 하였으며, 196 N ~ 686 N의 범위에서 시험편에 일정하중을 가하여 SP-creep 시험을 수행하였다.

3. 유한요소해석

SP-creep 시험 초기에 일정 하중에 따라 시험편에 분포되는 응력을 유한요소 해석을 통해 계산하였다. 작용하중에 따라 극심한 변형이 예상되는 SP 시험편의 특성 상 탄-소성 해석을 수행하였으며 이를 위해 상용 MARC K7.1 S/W를 사용하였다. Fig. 1과 같이 SP 시험편의 대칭성을 이용하여 시험편 형상의 1/2만을 모델링하였고 axisymmetric 조건 하에서 해석을 수행하였다.

모델링에 사용된 요소는 4-node quadrilateral element이고, 요소 수는 1100개, 절점 수는 1195개였다. 핀치에 의하여 일정 하중이 부과되는 ϕ 2.4mm의 세라믹볼과 시험편을 지지하는 상·하부 다이들은 강체로, 시험편은 변형체로 정의하여 접촉되도록 하였다. 또한 접촉부에서의 쿨롱마찰 계수는 0.3으로 하였다.

유한요소 모델에서 시험편의 y축 방향 최상단면과 강체인 볼의 하중제어 절점들을 y축 방향으로 변위 구속하였다. 또한 크리프 시험이 수행되는 온도와 같은 조건에서 고온 인장 시험을 수행하고 여기에서 얻어진 진응력-진변형률(true stress-true strain) 특성을 재료의 유동특성으로 입력하였다.

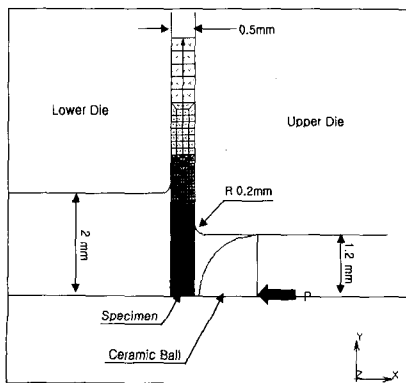


Fig. 1 Finite element model of SP-creep test

4. 결과 및 고찰

4.1 일정하중 하에서 초기 응력 및 변형률분포

Fig. 2에 유한요소해석을 통해 600 °C에서 490 N의 일정하중에 따라 시험편에 발생하는 등가 von-Mises 응력(equivalent von-Mises stress : σ_{eq})의 분포를 나타었다. 시험편은 급격한 변형양상을 보이고 있으며, 그 최대값인 $\sigma_{eq \cdot max}$ 는 시험편의 중심부로부터 반경방향으로의 각도, θ_{FEM} 이 약 25° 인 외부 원호부에서 발생하고 있다.

Fig. 3은 3가지 시험온도에서 유일하게 동일 적용되었던 392 N의 하중이 가해질 때 arc length에 따라 발생하는 σ_{eq} 의 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 arc length는 시험편 외표면의 중심부로부터 세라믹 볼에 의해 변형된 반경방향 외부 원호의 궤적을 나타낸 길이로서 Fig. 2에 보인 A점에서 B점까지의 경로이다. 전반적으로 시험온도가 증가함에 따라 발생하는 $\sigma_{eq \cdot max}$ 는 감소하고 있음을 볼 수 있다.

650 °C에서는 arc length가 약 0.6 mm인 지점 (node No. 949)에서 $\sigma_{eq \cdot max}$ 가 발생되었으나, 온도가 낮아질수록 그 최대값을 나타내는 node No.의 위치가 시험편의 중심쪽으로 다소 이동되었다. 또한 최대응력의 발생 이후 arc length가 증가될수록 σ_{eq} 값은 급격히 감소하고 있다.

625 °C의 조건에서 작용된 하중들에 따른 σ_{eq} 의 분포상태를 시험편 외 표면의 arc length에 따라 Fig. 4에 나타내었다. 이때 최대응력 발생지점

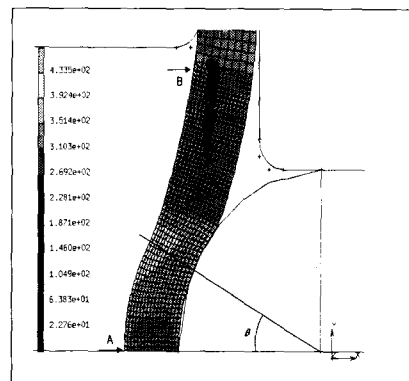


Fig. 2 Deformed shape and σ_{eq} contour at 490 N and 600 °C

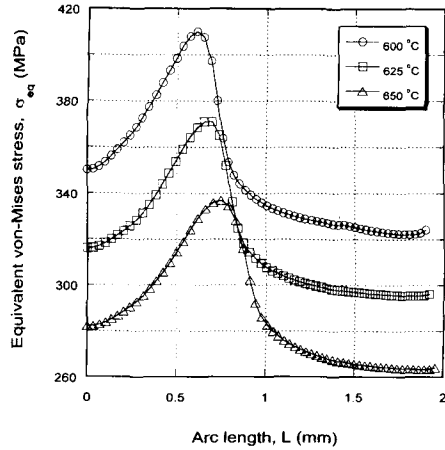


Fig. 3 The distributions of σ_{eq} along the arc length at 392 N

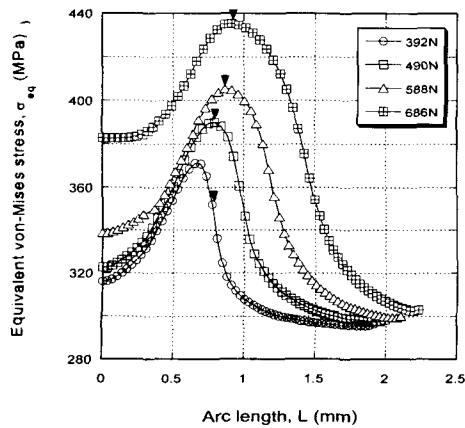


Fig. 4 The distributions of σ_{eq} along the arc length at 625 °C

에 따른 node No.의 위치 이동을 확인하기 위하여 편의상 node 번호 949의 위치를 ▼ 표로 표기하였다. 부과하중 490 N 이상에서 σ_{eq} 의 최대값이 모두 node No. 949에서 발생하고 있다. 여기서 부과하중이 증가됨에 따라 node No. 949의 arc length상의 위치점이 그림의 ▼ 표와 같이 증가하고 있다. 그러나 저하중영역에서는 최대값을 나타내는 node No.의 위치가 시험편의 중심쪽으로 이동하고 있다. 즉, 고하중영역에서 부과하중이 증가함에 따라 σ_{eq} 와 ϵ_{eq} 의 최대값을 나타내는 node의 No.는 불변하나 arc length상의 그 위치점은 변화하여 중심점으로부터 그 node점까지의



Fig. 5 A cross section of SP-creep with creep time, 84hrs at 600 °C

반경방향 각도, θ_{FEM} 은 증가하리라는 것을 예상할 수 있다. 실제로 Fig. 4에 나타난 625 °C의 조건에서 하중이 490 N에서 686 N으로 증가할 때 θ_{FEM} 은 28° 에서 33° 로 증가하였다.

Fig. 5는 Fig. 2의 해석과 동일 조건에서 SP-creep 시험 도중 가속 크리프영역에서 시험을 중단시킨 후 시험편의 횡단면을 절단하여 나타낸 사진으로서 거시 균열이 발생하여 두께방향으로 거의 관통에 가까운 모습을 보여주고 있다. 여기서 시험편의 중심선으로부터 균열개시점까지의 반경방향 각도, θ_{TEST} 는 약 33° 로 측정되었다. Fig. 2에서 θ_{FEM} 이 약 25° 근방에서 최대의 초기 응력이 발생되었으나 실제적으로는 시간이 경과됨에 따라 시험편 반경방향으로의 신장과 함께 두께방향의 폭이 감소되면서 최대응력 발생지점이 arc length를 따라 이동되어 균열개시 각도, θ_{TEST} 가 증가되고 이어서 균열의 개시와 진전이 일어나는 것으로 판단된다.

이상의 시험결과로부터 3가지 시험온도에서 각 하중, P_{SP} 와 $\sigma_{eq, max}$ 의 관계를 Fig. 6에 나타내었으며 온도에 따라서 뚜렷한 의존성과 상관관계를 보이고 있다. SP-creep 시험온도 (T)와 P_{SP} 의 함수로서 $\sigma_{eq, max}$ 는 식 (1)과 같이 선형적으로 표현될 수 있다. 여기서 A, B, C 그리고 D 는 재료상수로서 본 연구에서 각각 1935.6, 1.84, 0.43, 0.00072의 값을 보였으며, T 는 절대온도이다.

$$\sigma_{eq, max} = (A - BT) - (C - DT) \cdot P_{SP} \quad (1)$$

4.2 응력과 SP-creep 특성값과의 상관관계

4.2.1 $\sigma_{eq, max} - \dot{\epsilon}_{qt-ss}$ 관계

일반적으로 Ten-creep 시험에서 정상상태 크리프 변형률 속도(steady-state creep strain rate :

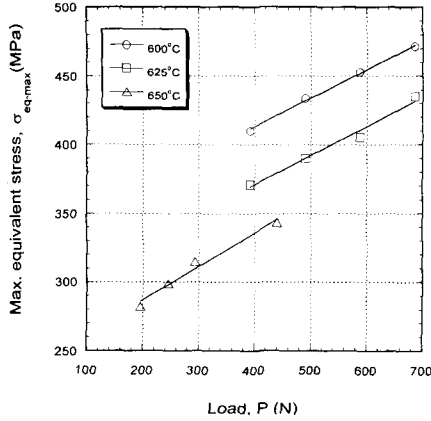


Fig. 6 Relationship between $\sigma_{eq,max}$ and P_{SP}

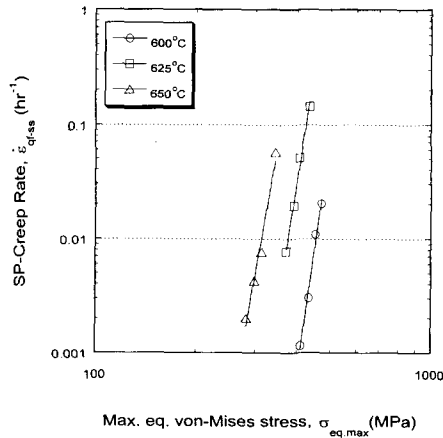


Fig. 7 Relationship between $\sigma_{eq,max}$ and $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ in SP-creep test

$\dot{\epsilon}_{ss}$ 와 파단시간(rupture time : t_r)의 응력 의존성은 다음 식 (2), (3)과 같은 멱수법칙(power law)으로 표현될 수 있다. 여기서 A, B 는 재료 상수, n 과 m 은 응력지수이다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \cdot \sigma^n \tag{2}$$

$$t_r = B \cdot \sigma^{-m} \tag{3}$$

유한요소해석에서 얻어진 $\sigma_{eq,max}$ 와, SP-creep 시험에서 얻어진 $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ 의 상관관계는 Fig. 7과 같다. 여기서 $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ 는 $\dot{\epsilon}_{qf}$ 를 이용하여 얻어진

정상상태 등가파괴변형률속도(equivalent fracture strain rate)이다. $\dot{\epsilon}_{qf}$ 는 소형편치 시험에서 재료의 파괴과정과 특성을 대변하는 중요한 물리량으로서 재결정(recrystallization)법과 해석적 기법을 통해 다음 식과 같이 얻어진다.⁽⁷⁾

$$\dot{\epsilon}_{qf} = 0.15 \left(\frac{\delta}{t_0} \right)^{3/2} \tag{4}$$

여기서 δ 는 소형편치 시험편의 부하축 변위, t_0 는 시험편의 초기 두께(0.5mm)이다. $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$ 는 $\sigma_{eq,max}$ 에 대해 뚜렷한 의존성을 보이고 있다. 이들의 상관관계는 다음 식 (5)와 같이 표현되며, Ten-creep 시험에서의 거동과 동일하게 시험온도가 증가함에 따라 하중지수, n 값이 감소하고 있다. 이같은 응력지수값들은 일반적인 Ten-creep 시험결과와 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 하중지수와 응력지수, 활성화에너지의 측면에서 두 시험결과사이의 유사성이 보고^(1,2,5)되고 있음을 볼 때, 정성적 측면에서 이러한 결과의 유효성을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} 600^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 3.37E-59 \cdot \sigma^{21.25} \\ 625^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 1.20E-59 \cdot \sigma^{18.62} \\ 650^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 4.45E-59 \cdot \sigma^{16.97} \end{aligned} \tag{5}$$

4.2.2 $\sigma_{eq,max} - t_r$ 관계

t_r 의 경우에도 $\sigma_{eq,max}$ 에 대해 뚜렷한 의존성을 보였으며, Ten-creep 시험과 같이 시험온도가 증가함에 따라 하중지수, m 값이 감소하는 경향을 보였다. $\sigma_{eq,max}$ 와 t_r 사이의 상관관계는 다음 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} 600^\circ\text{C} : t_r &= 3.28E60 \cdot \sigma^{-22.19} \\ 625^\circ\text{C} : t_r &= 7.71E60 \cdot \sigma^{-21.80} \\ 650^\circ\text{C} : t_r &= 5.39E60 \cdot \sigma^{-21.64} \end{aligned} \tag{6}$$

4.2.3 $\sigma_{eq,max} - LMP$ 관계

600, 625, 650 °C의 세가지 크리프 온도조건에

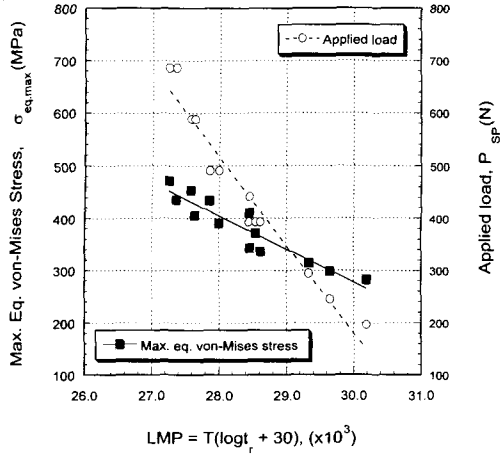


Fig. 8 The relationship of $\sigma_{eq,max}$ and P_{SP} versus LMP on SP-creep test

서, SP 시험편에 부과되는 다양한 하중 (P_{SP}), 그에 따라 유한요소해석에서 구한 $\sigma_{eq,max}$ 와 SP-creep 시험에서 얻어진 t_r 을 이용하여 계산된 LMP와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

여기서 $\sigma_{eq,max}$ 와 P_{SP} 의 증가에 따라 LMP 값은 감소하고 있으며, 데이터 분포에 있어 약간의 분산은 존재하나 모두 온도에 상관없이 LMP 와 일정한 상관성을 보이고 있다.

4.2.4 $\sigma_{eq,max}$ - 활성화에너지 관계

고온에서의 크리프 변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 활성화에너지는 재료나 시험조건에 따른 고유한 크리프 특성값의 하나이다. 본 연구에서는 SP-creep 및 Ten-Creep 시험편이 동일한 열적 활성화과정에 의해 크리프 변형된다고 가정하고, 활성화에너지를 도입하여 SP-creep 시험편의 초기 응력이나 하중과의 관련성을 살펴 보았으며 나아가 Ten-creep 시험결과와의 상관성 도출을 위해 활용하고자 한다. 활성화에너지는 정상상태의 크리프 속도, $\dot{\epsilon}$ 와 파단시간, t_r 에 근거하여 다음 식 (7), (8)과 같이 Arrhenius type의 식으로 나타낼 수 있다. 여기서, Q_{cs} 와 Q_{cr} 는 각각 변형률과 파단시간에 관련된 활성화에너지, A 는 재료상수, R 은 기체상수(8.314 kJ/mol·K), T 는

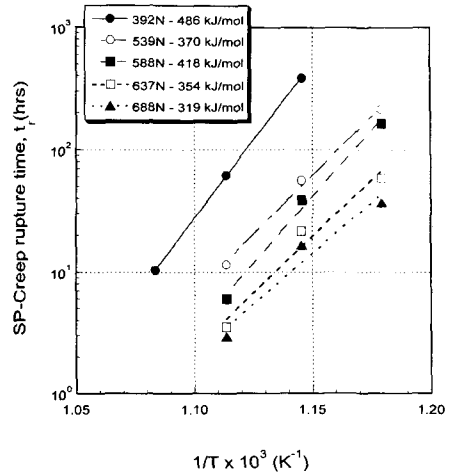


Fig. 9 The relationship between t_r and $1/T$ at several loads on SP-creep test

절대온도(K)이다.

$$\dot{\epsilon} = A \exp \left(-\frac{Q_{cs}}{RT} \right) \quad (7)$$

$$t_r = A \exp \left(\frac{Q_{cr}}{RT} \right) \quad (8)$$

Fig. 9는 SP-creep 시험에서 파단시간, t_r 에 근거한 활성화에너지, Q_{SP} 의 거동으로서 P_{SP} 에 따라 얻어진 t_r 과 온도($1/T$)와의 관계를 나타낸 그림이다. 대체적으로 P_{SP} 가 증가함에 따라 Q_{SP} 는 감소하고 있다. 여기서 얻어진 P_{SP} 와 Q_{SP} 와의 관계, 그에 상응하는 $\sigma_{eq,max}$ 와 Q_{SP} 와의 관계를 Fig. 10에 함께 나타내었다.

$P_{SP}-Q_{SP}$ 관계에 비하여 $\sigma_{eq,max}-Q_{SP}$ 관계의 데이터 분산폭이 더 크나 대체적으로 P_{SP} 와 $\sigma_{eq,max}$ 는 Q_{SP} 와 각기 하나의 직선으로 나타낼 수 있으며 그 관계식은 식 (9), (10)과 같다.

$$Q_{SP-P} = 746.74 - 0.6287 P_{SP} \quad (9)$$

$$Q_{SP-\sigma} = 1317.33 - 2.1976 \sigma_{eq,max} \quad (10)$$

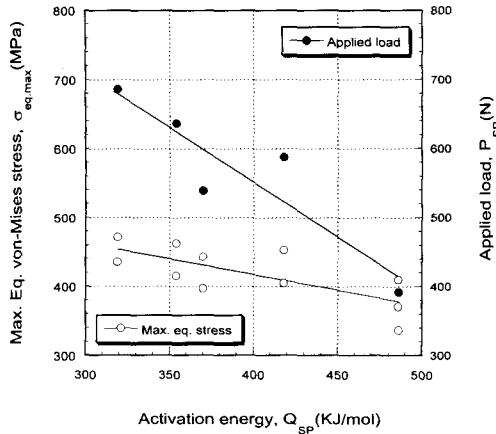


Fig. 10 The relationship of $\sigma_{eq,max}$ and P_{SP} versus Q_{SP} on SP-creep test

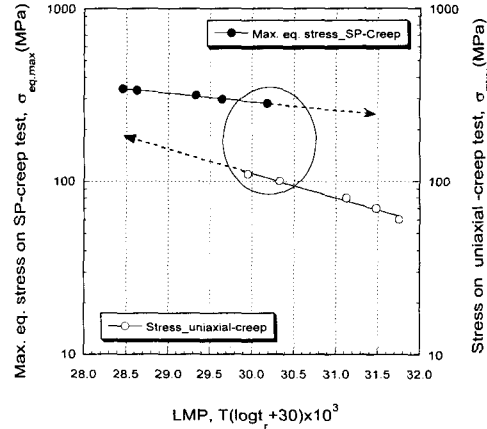


Fig. 12 The relationship of $\sigma_{eq,max}$ and σ_{TEN} versus LMP at 650 °C

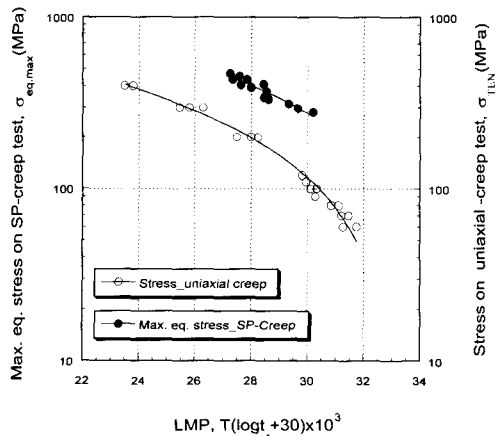


Fig. 11 The relationship of $\sigma_{eq,max}$ and σ_{TEN} versus LMP

4.3 SP-creep 시험과 Ten-creep 시험의 상관성

이상의 SP-creep 시험과 유한요소해석 결과를 바탕으로 SP-creep 시험과 Ten-creep 시험 결과와의 상관 관계를 도출하기 위하여 SP-creep 시험에서의 $\sigma_{eq,max}$ 와 동일 강종에 대한 일본 NRIM의 Ten-creep 응력 데이터⁽¹⁴⁾를 LMP에 대하여 Fig. 11에 나타내었다. 두 시험결과들은 거의 일정한 간격을 두고 상호 관련되고 있으나 동일 온도에서 두 시험 결과의 직접적인 비교는 불가능함을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 650 °C와 700 °C의 조건에 대하여 입수된 NRIM의 Ten-creep 시험결과⁽¹⁴⁾를 참조하여 SP-creep 시험결과와의 상관

성을 살펴보고자 한다.

Fig. 12는 650 °C의 온도에서 SP-creep 시험 및 SP-creep 시험 및 Ten-creep 시험으로부터 얻어진 LMP 값과 응력과의 관계를 나타낸 그림이다. 두 시험법에서 각각의 응력과 LMP 사이의 선형적 관계를 볼 수 있으나 그림 상의 원형으로 표기된 바와 같이 동일한 LMP 값에서 직접적인 비교가 가능한 영역이 매우 한정되어 있다.

따라서 두 시험결과 사이의 정량적 관계를 좀 더 포괄적이고 심도있게 고찰하기 위하여 Fig. 12 상의 화살표로 표기한 방향으로 데이터들을 외삽(extrapolation)하고 그 결과들을 Table 2에 수록하였다. 여기서 σ_{SP} 는 SP-creep 시험편에 대하여 초기 부과하중에 따라 유한요소해석에서 구한 $\sigma_{eq,max}$ 를 의미하며, σ_{TEN} 은 Ten-creep 응력을 의미한다. 그림과 표에서 볼 수 있는 바와 같이 외삽이 이루어질 경우에 LMP 값이 커질수록 $\sigma_{SP} - \sigma_{TEN}$, $P_{SP} - \sigma_{TEN}$ 의 비는 점차 커지거나 감소하고 있다. 그러나 이들 관계는 두 시험결과 사이의 상관성 도출에 이용될 수 있을 것이다.

그러나 여기서 주목할 점은 Fig. 12에 원형으로 나타난 바와 같이 두 시험 결과가 상호 겹치는 영역, 즉 LMP 값이 약 30×10^3 근방의 영역에서 약간의 차이는 있으나 Tettamanti⁽¹²⁾ 등이 제안한 SP-creep 하중, P_{SP} 와 Ten-creep 응력, σ_{TEN} 사이의 관련식인 다음 식 (11)의 관계가 성립된다는 것이다.

Table 2 Creep properties on SP-creep test and uniaxial-creep test at 650°C

LMP (× 10 ³)	SP-creep test				Uniaxial-creep test		σ_{SP}/σ_{TEN}	P_{SP}/σ_{TEN}	$Q_{SP-\sigma}/Q_{TEN}$	Q_{SP-P}/Q_{TEN}
	σ_{SP}	P_{SP}	$Q_{SP-\sigma}$	Q_{SP-P}	σ_{TEN}	Q_{TEN}				
28.5	342.36	418.4	564.87	483.68	149.8	362.2	2.29	2.79	1.56	1.34
29.0	323.06	348.3	607.29	527.76	136.3	383.3	2.37	2.55	1.58	1.38
29.5	305.2	278.27	646.54	571.79	119.2	415.4	2.56	2.33	1.55	1.38
30.0	288.5	208.2	683.24	615.84	108.0	440.7	2.67	1.93	1.55	1.40
30.5	273.0	138.14	717.3	659.89	95.3	480.5	2.86	1.45	1.49	1.37
31.0	258.6	68.07	748.94	703.95	82.5	517.9	3.13	0.82	1.45	1.36

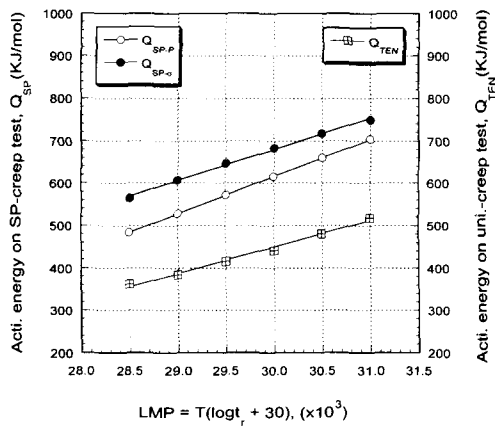


Fig. 13 The relationship between activation energy and LMP on SP-creep & uniaxial-creep test

동일한 방법으로 $\sigma_{SP}-\sigma_{TEN}$ 관계는 다음 식 (12)와 같이 표현될 수 있을 것이다.

$$P_{SP} \approx 2 \sigma_{TEN} \tag{11}$$

$$\sigma_{SP} \approx 2.67 \sigma_{TEN} \tag{12}$$

따라서 상기 두 식을 이용하면 제한적이기는 하나 동일 LMP, 즉, 동일 파단시간에 대해 SP-creep 하중 및 초기 응력과 Ten-creep 시험에서의 응력을 선형적으로 관련시킬 수 있다. 단, 고 응력 또는 저응력 영역으로의 데이터 외삽이 이루어질 경우에 식 (11)의 적용에 대해서는 향후 좀더 다양한 온도와 부하조건에서 관련 DB가 충분히 확보되어 이 식의 적용에 대한 충분한 검토와 고찰이 반드시 선행되어야 할 것이다.

한편, Table 2에 수록된 바와 같이 두 시험법에서 얻어진 활성화에너지의 비, $Q_{SP-\sigma}/Q_{TEN}$ 와 Q_{SP-P}/Q_{TEN} 를 동일 LMP 값에 대하여 고려 할

경우에는 다음 식 (13), (14)와 같이 두 시험법 사이에서 일정한 상관관계를 얻을 수 있다. 여기서 P_{SP} 와 σ_{SP} 에 대한 활성화에너지, Q_{SP} 는 식 (9)와 (10)의 관계식을 이용, 외삽하여 얻어진다.

$$Q_{SP-P} \approx 1.37 Q_{TEN} \tag{13}$$

$$Q_{SP-\sigma} \approx 1.53 Q_{TEN} \tag{14}$$

두 시험법에서 얻어진 활성화에너지와 LMP 사이의 관계를 Fig. 13에 나타내었다. 두 시험에서 얻어진 활성화에너지는 LMP와 선형적으로 뚜렷한 상관관계를 보이고 있어 이를 통해 정량적 측면에서 SP-creep 시험과 Ten-creep 시험결과를 상호 관련시킬 수 있을 것으로 보인다.

끝으로 본 연구에서 얻어진 SP-creep 시험과 Ten-creep 시험 결과 사이의 정량적 관계는 일부의 시험조건에서 얻어진 결과로서 향후 다양한 시험온도 및 부하조건에서 관련 DB를 확보하여 연구 결과에 대한 확인과 검토절차가 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 600~650 °C의 온도와 196~686 N의 하중조건에서 내열강재인 9Cr1MoVNb 강의 SP-creep 시험과 유한요소해석을 수행하여 초기 응력과 주요 크리프 특성값과의 관계를 알아보고 Ten-creep 시험결과와의 상관관계를 도출하여 보았다.

SP-creep 시험에서 얻어진 정상상태 등가 크리프 변형률속도, $\dot{\epsilon}_{eff-s}$ 와 파단시간, t_r , 활성화에너지, Q_{SP} , 그리고 LMP 값은 초기 최대등가응력, $\sigma_{eq,max}$ 에 대해 뚜렷한 의존성과 상관성을 보였다. 650 °C의 온도에서 SP-creep 시험에서

얻어진 부과하중, P_{SP} 와 응력, $\sigma_{eq. max}$, Ten-creep 시험에서의 응력, σ_{TEN} 은 동일한 LMP 값에 대하여 두 시험결과가 공존하는 영역 내에서 간단한 선형적 관계로 상호 관련되었다. 특히 고유한 크리프 특성치로서 외삽을 통해 얻어진 활성화에너지, Q 는 동일 LMP 값에서 두 시험결과를 상호 선형적, 정량적으로 직접 관련시킬 수 있는 유용한 평가인자로서 주목된다.

참고문헌

- (1) Ule, B., Šuštar, T and Rodič, T., 1997, "Copernicus-Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Life of Service Exposed Components(ERB CIPA CT94 0103)," Technical Report : Round Robin of Small Punch Creep Tests, IMT Ljubljana.
- (2) Komazaki, S., Hashida, T and Shoji, T., 2000, "Development of Small Punch Tests for Creep Property Measurement of W Alloyed 9% Cr Ferritic Steels," *J. of Testing & Evaluation*, V. 28, Pt4, pp. 249~256.
- (3) Baek, S. S., Na, S. S., Na, E. G and Yu, H. S., 2001, "Development of Evaluation Technique of High Temperature Creep Characteristics by Small Punch-Creep Test Method(I)-Boiler Superheater Tube-," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 12, pp. 1995~2001.
- (4) Baek, S. S., Lee, D. H., Yu, H. S and Ha, J. S., 2002, "Development of Evaluation Technique of High Temperature Creep Characteristics by Small Punch-Creep Test Method(II)-Boiler Header-," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 1, pp. 55~60.
- (5) Parker, J. D and James, J. D., 1994, "Creep Behavior of Miniature Disc Specimens of Low Alloy Steel," *ASME PVP*, Vol. 279, Developments in a Progressing Technology, pp. 167~172.
- (6) Wang, N. M., 1970, "Large Plastic Deformation of a Circular Sheet Caused by Punch Stretching," *J. of Applied Mechanics*, 70-APM-KK., pp. 431~440.
- (7) Mao, X., Shoji, T and Takahashi, H., 1987, "Characterization of Fracture Behavior in Small Punch Test by Combined Recrystallization-Etch Method and Rigid Plastic Analysis," *J. of Testing & Evaluation*, Vol. 15, No. 1, pp. 30~37.
- (8) Manahan, M. P., Argon, A. S and Harling, O. K., 1981, "The Development of a Miniaturised Disk Bend Test for the Determination of Post-Irradiation Mechanical Properties," *J. of Nuclear Materials*, Vol. 103 & 104, pp. 1545.
- (9) Li, W., Rodgers, B and Brookfield, D. J., 1999, "A Finite Element and Experimental Study of Punch and Bulge Testing," *Key Engineering Materials*, Vol. 167-168, pp. 55~63.
- (10) Brookfield, D. J., Li, W., Rodgers, B., Mottershead, J. E., Hellen, T. K., Jarvis, J., Lohr, R., Howard-Hildige, R., Carlton, A and Whelan, M., 1999, "Material Properties from Small Specimens Using the Punch and Bulge Test," *J. of Strain Analysis*, Vol. 34, No. 6, pp. 423~435.
- (11) Cheon, J. S., 2000, "Inverse Analysis Approach to Flow Stress Evaluation by Small Punch Test," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 7, pp. 1753~1762.
- (12) Tettamanti, S and Crudeli, R., 1998, "Small Punch Creep Test : A Promising Methodology for High Temperature Plant Components Life Evaluation," *Proc. of BALTICA VI Plant Maintenance for Managing Life & Performance*, Vol. 2, pp. 501~509.
- (13) Park, T. G., Yoon K. B., Shim, S. H and Jeong, I. S., 2001, "Assessment of Creep Properties of 9Cr Steel Using Small Punch Test," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 9, pp. 1493~1500.
- (14) KIST, 2000, "Development of High Pressure-Temperature Valve with 9Cr1MoVNb Casting Steel," UCN 1872-6553-1.