

## 소형펀치-크리프 시험에 의한 9Cr1MoVNb강의 고온 크리프 특성 평가 연구

유효선\* · 나성훈\*\* · 백승세\*\* · 권일현\* · 안병국\*\*\* · 나의균\*\*\*\*

### A Study on Evaluation of High Temperature Creep Properties of 9Cr1MoVNb Steel by Small Punch-Creep test

Hyo-Sun Yu, Sung-Hoon Na, Seung-Se Baek, Il-Hyun Kwon,  
Byung-Guk Ahn, and Eui-Gyun Na

**Key Words:** Small Punch-Creep Test(소형펀치-크리프 시험), High Temperature Creep Property(고온 크리프 특성), Initial Creep Displacement(초기 크리프 변위), Creep Rate(크리프 속도), Creep Rupture Life(크리프 파단수명), Load Exponent(하중지수), Power Law(멱수법칙), Activation Energy(활성화에너지), 9Cr1MoVNb Steel, 2.25Cr1Mo Steel

#### Abstract

This paper describes the high temperature creep characteristics for virgin material of 9Cr1MoVNb steel using small punch creep(SP-Creep) test technique which is developing recently. In addition, the several results of SP-Creep test are compared with that of 2.25Cr-1Mo steel which is widely used as boiler materials and that of conventional uniaxial creep test. The obtained SP-Creep curves show the creep behaviors of three regimes like that obtained from conventional uniaxial creep test, and SP-Creep properties are definitely depended on applied load and test temperature. The correlation of SP-Creep rate and creep rupture life with applied load has been determined like the correlation between creep rate/rupture life and stress in uniaxial creep test, and also is satisfied with Power law. The creep rupture times of newly 9Cr1MoVNb steel are higher than those of 2.25Cr1Mo steel at the same creep temperature and applied loading condition, and the decrease extent of creep rupture life with loads is very lower compared with 2.25Cr1Mo steel.

#### 1. 서 론

크리프(creep) 변형은 고온부재의 대표적인 열화 기구이다. 따라서 사용중인 실기부재나 새로이 개발 중인 내열재료의 고온 크리프 특성 평가는 고온·

고압 설비부재의 안전성 측면에서 매우 중요하다고 말할 수 있다. 또한 그의 새로운 평가방법의 개발은 경제적이고, 신뢰성 있는 고온 역학 데이터 베이스의 구축을 위해 매우 중요하며, 국내·외의 몇몇 연구기관에서 그에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>(1)</sup>.

일반적으로 화력발전 설비의 보일러 배관이나 헤더 그리고 증기밸브 등과 같은 고온·고압부에서는 저 Cr-Mo 강계가 널리 사용되어 왔으나, 최근에는 경제발전과 함께 초 임계압 증기조건의 사용에 따른 발전소의 효율 증가와 고온·고압부의 안전성을 증가시키기 위해 고 Cr-Mo 강계의 사용이 추천되고 있다<sup>(2,3)</sup>. 초초임계(ultra super critical : USC)압 화력발전소의 경우 증기압력은 16.6MPa → 24.1MPa → 31.0MPa → 34.5MPa 단계로 상승 중이며, 현재 초

\* 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

E-mail : yuhs@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388

\*\* 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*\* 전북대학교 신소재공학부

\*\*\*\* 군산대학교 기계공학부

임계 압력인 24.1MPa이 상용화 추세에 있다. 증기 온도는 538°C(1000°F) → 566°C(1050°F) → 593°C(1100°F) → 621°C(1150°F) → 649°C(1200°F) 단계로 상승이 예상되고 있다<sup>(4,5)</sup>. 국내의 경우는 538°C가 일반적인 온도이나, 566°C(1050°F)의 사용이 증가 예정에 있다. 이러한 초임계압 발전설비에 사용되는 재료는 고온 크리프 강도 및 열피로 특성이 우수한 9~12% Cr강재가 가장 적당한 재료로 평가받고 있다. 그러나 이들 내열재료의 신뢰성 평가를 위해 크리프 강도를 포함한 고온역학 물성에 대한 자료는 부족한 실정이며, 특히 열화재의 크리프 평가자료는 더욱 찾아보기 힘든 상태이다.

따라서 본 연구에서는 이 같은 배경 하에 먼저 발전설비의 국산 내열소재인 9Cr1MoVNb 강의 신재에 대한 고온 크리프 특성을 새로운 크리프 시험기법으로 현재 개발중인 소형편치-크리프(SP-Creep) 시험방법<sup>(1)</sup>을 이용하여 평가하였다. 또한 그의 시험결과를 종래 발전설비 재료로 널리 사용되어온 2.25Cr-1Mo 강 및 단축 인장 크리프 시험결과와도 비교하였다.

## 2. 실험재료와 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 시험재료는 국산 내열소재로 개발된 9Cr1MoVNb 주조강재의 신재이다. 시험편의 크기는 소형편치 시험편의 규격인 10×10×0.5mm으로 하였다.

### 2.2 실험방법

미소역학 시험기법을 이용한 SP-Creep 시험은 본 대학에서 개발·정비한 시험절차를 통해 수행되었다. 이때 본 연구에서 9Cr1MoVNb 재료에 적용된 시험온도는 초임계압의 발전설비 온도(566°C, 593°C 등)를 고려하여 575°C~625°C의 온도범위로 하였다. 그리고 시험편에 가해진 하중조건은 40kg~75kg의 범위에서 시험을 수행하였다. 크리프 시험도중 시험편의 변위는 LVDT 시스템을 통해 실시간적으로 컴퓨터에 저장되어 시간에 따른 시험편의 크리프 변형거동을 평가하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미소시험편에 의한 소형편치-크리프(SP-Creep) 곡선 거동

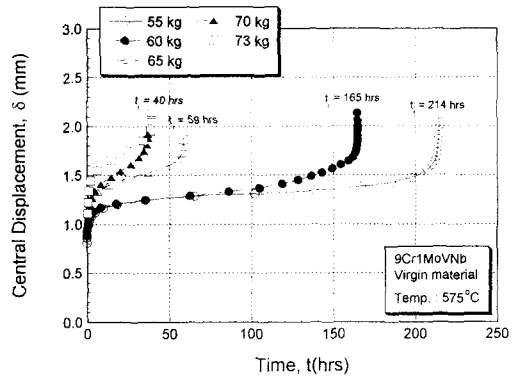


Fig. 1 The central displacement vs. time curves for 9Cr1MoVNb steel at 575°C

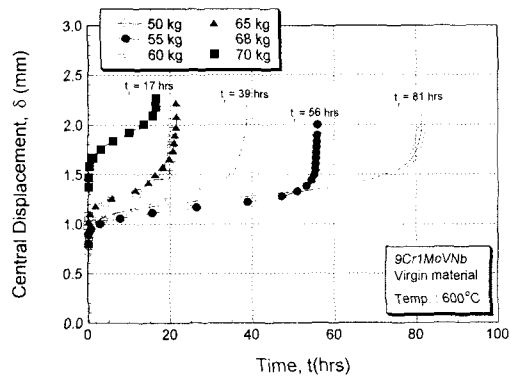


Fig. 2 The central displacement vs. time curves for 9Cr1MoVNb steel at 600°C

9Cr1MoVNb강의 신재를 대상으로 575°C와 600°C의 고온환경에서 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 미소시험편의 중앙변위( $\delta$ )대 시간( $t$ ) 사이의 크리프 곡선을 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. SP-Creep 곡선의 전체적인 변형거동은 작용하중 및 시험온도에 따라 매우 뚜렷하게 변화되고 있음을 알 수 있다. 시험조건에 따라 차이는 있지만, 동일 시험온도에서 크리프 하중이 감소함에 따라 정상상태의 2차 크리프 거동은 크게 증가되고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 정상상태의 크리프 변형은 소성변형에 기인한 전위밀도의 증가에 따른 가공경화 속도( $da/de$ )와 원자들의 국부적인 확산과 동적 연화에 따른 회복속도( $da/dt$ )가 균형을 이루는 단계이다. 시험재료의 정상상태의 2차 크리프 거동은 이들에 의해 결정되며, 시험온도와 하중, 그리고 재료의 고용강화원소(Cr, Mo, V, Nb, W 등)에 의해 크게 의존한다. 본 연구의 미소시험편에 의한 크리프 거

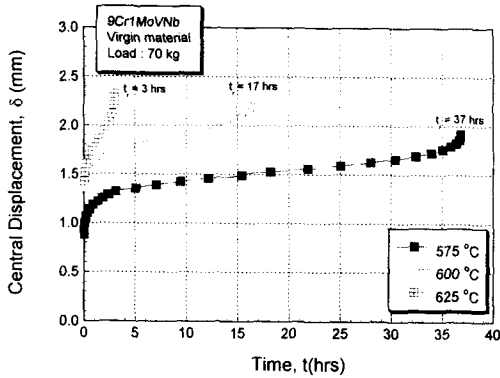


Fig. 3 The central displacement vs. time curves for 9Cr1MoVNb steel at 70kg

동 역시 하중이 증가함에 따라 재료 내에서는 전위의 활성화로 인해 반대부호의 전위의 결합에 의한 전위의 소멸, 전위의 재배열 등에 의해 크리프 변형 속도는 회복속도에 의해 지배를 받게 되고, 결국 크리프 속도의 증가와 함께 파단에 이르게 된 것으로 생각된다. 이 같은 거동은 크리프 시험온도가 증가함에 따라 더욱 뚜렷함을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 크리프 하중 70kg에서 시험온도에 따른 미소시험편의 크리프 변형거동을 좀더 자세하게 살펴보기 위해 나타낸 그림이다. 크리프 곡선은 매우 뚜렷하게 시험온도에 의존함을 관찰할 수가 있다.

### 3.2 크리프 초기 변형량( $\delta_0$ ) 거동

본 절에서는 크리프 시험온도에서 미소시험편에 외력이 작용할 때 나타나는 순간적인 변형량으로 시간과는 독립적인 변수이나 크리프 응력과 온도에는 민감한 초기 변형량( $\delta_0$ )의 거동을 시험조건에 따라 살펴보았다.

Fig. 4는 시험온도 600°C와 625°C의 경우, 단축 크리프 시험의 초기변형률에 대응하는 SP-Creep의 초기 변형량( $\delta_0$ )의 결과이다. 이때 초기변위량 (initial displacement :  $\delta_0$ )은 하중을 부하한 후 1분이 경과되었을 때의 변위 값으로 정의하였다. 전체적으로 볼 때 부하하중이 증가함에 따라 초기변위 값은 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기서 두 온도 모두 60kg 이하의 하중에서는 시험온도에 따라 초기 변형량은 큰 차이를 보이고 있지 않으나, 그 이상의 하중에서는 상당히 큰 초기변위 거동을 보이고 있음을 관찰할 수가 있다. 그러한 거동은 동일하중에서도 시험온도가 높은 625°C에서 더욱 증가하여 중

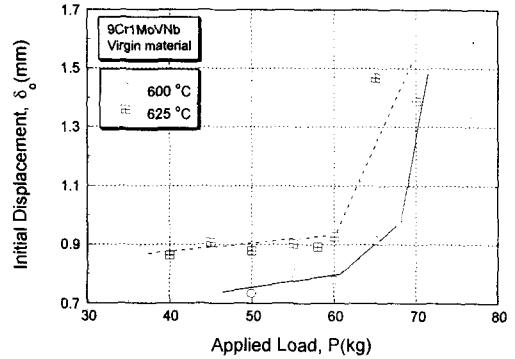


Fig. 4 The variation of initial displacement according to applied load at several test temperatures

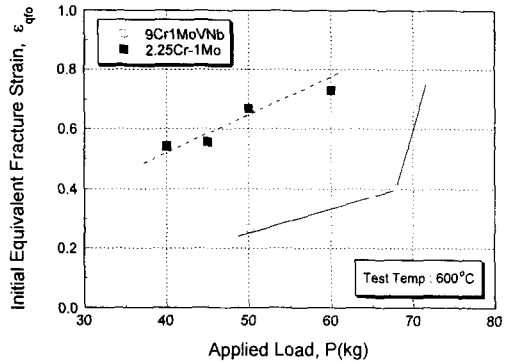


Fig. 5 The variation of initial displacement according to applied load for 9Cr1MoVNb and 2.25Cr-1Mo steels at 600°C

대 단축 인장 크리프 시험거동과 같음을 알 수 있다.

Fig. 5는 9Cr1MoVNb강과 2.25Cr1Mo강을 대상으로 600°C에서 얻은 초기변형률의 거동을 나타낸 결과이다. 동일하중에서 초기변형률의 거동은 Cr함량이 높은 9Cr1MoVNb강의 경우가 종래의 내열재료로 널리 사용되고 있는 2.25Cr1Mo강보다 크게 낮음을 관찰할 수 있어, 고온 환경에서의 내 크리프 변형특성을 예견할 수가 있다. 이 같은 시험결과는 미소시험편을 이용한 SP-Creep 시험법을 재료의 강화 원소의 함량에 따른 초기 변형률의 특성 평가에 사용 가능하다는 것을 말해준다.

### 3.3 크리프 하중과 정상 크리프 변형속도 관계

일반적으로 단축 인장 크리프 시험에서 정상 크리프 변형률 속도( $\dot{\epsilon}$ )의 응력 의존성은 멱수법칙 (power law)이 성립된다. 본 절에서는 9Cr1MoVNb강에 대해 SP-Creep 시험에서 얻은 정상 상태의 크리프 변형속도에 관해 알아본다.

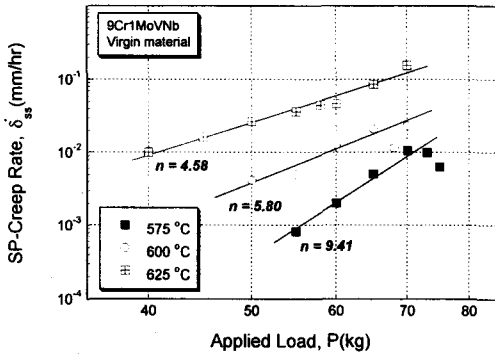


Fig. 6 The relationship between SP-Creep rate and applied load for 9Cr1MoVNb steel at several test temperatures

SP-Creep 시험에 있어 정상상태의 크리프 속도 (steady state creep rate :  $\dot{\delta}_{ss}$ )의 부하하중에 대한 의존성을 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. 대수좌표에서 정상상태의 크리프 속도는 하중에 대해 매우 뚜렷하게 의존함을 관찰할 수가 있다. 이 관계도에서 두 인자 사이의 관계는  $\dot{\delta}_{ss} = A \cdot P^n$ 으로 표현되는 멱승법칙이 성립되었으며, 여기서,  $P$ 는 작용하중 (applied load),  $n$ 은 하중지수(load exponent)이다. 이때, 크리프 하중지수는 575°C, 600°C 그리고 625°C에서 각각 9.41, 5.80 그리고 4.58을 나타내어, 단축 인장 크리프 시험과 같이 시험온도가 증가함에 따라 하중지수가 감소함을 보이고 있다. 이같이 하중지수 값이 감소되는 이유는 온도가 증가함에 따라 시험편의 전위밀도가 감소하고, 이에 따라 하중의 감소 효과가 높아지기 때문이다.

일반적으로 단축 인장 크리프 시험에서 응력지수 ( $n$ )는 순금속의 경우 5정도의 값을 갖고, 고용체 합금의 경우는 3~5정도의 값을 갖는다. 또 지수식에 의해 결정되는 Class I, Class II 합금에 있어 Class I 합금의  $n$ , 값은 4~5정도이며, 이 경우 크리프 변형은 원자들의 확산에 의한 전위의 상승 (climbing)에 의해 가속된다. 이에 대해 Class II 합금은 3정도의  $n$ , 값을 가지며, 용질원자와 전위의 상호작용에 의해 전위 활주(glide)가 방해되어, 결국 크리프 변형은 전위의 활주에 의해 가속된다고 알려져 있다. 또한 이러한 응력지수는 시험온도 및 미세조직내의 석출물의 거동 등에 의해 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 한편, 본 연구의 SP-Creep 시험에서 구한 하중지수가 4~10 정도의 넓은 범위를

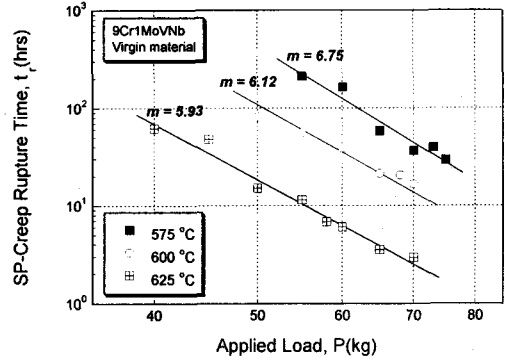


Fig. 7 The relationship between rupture time and applied load for 9Cr1MoVNb steel at several test temperatures

갖는 것은 9Cr강계에서 나타나는  $M_{23}C_6$ 와 같은 미세 탄화물에 기인한 결과로 사료된다. 그러나 SP-Creep 시험편은 2축 응력상태하에서 변형이 발생한다는 사실을 고려할 때, 보다 정확한 해석을 위해 향후 크리프 시험편의 EDX 및 TEM에 의한 분석이 필요하다고 사료된다.

이상의 결과는 단축크리프 시험결과와 전반적으로 같은 거동이므로 SP-Creep 시험의 유효성을 확인할 수 있다. SP-Creep 시험으로부터 구한  $\dot{\delta}_{ss}$  vs  $P$ 의 정량적 상관 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} 575^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} &= 3.76 \times 10^{-20} P^{9.41} \\ 600^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} &= 5.18 \times 10^{-13} P^{5.81} \\ 625^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} &= 4.14 \times 10^{-10} P^{4.58} \end{aligned} \quad (\text{식 1})$$

#### 3.4 크리프 하중과 크리프 파단수명( $t_r$ ) 관계

SP-Creep 시험에 있어서의 파단시간( $t_r$ )의 작용 하중에 대한 의존성을 조사하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림으로부터 미소시험편을 이용한 SP-Creep 파단수명 또한 단축 인장 크리프 시험결과와 같이 부하하중의 의존도가 매우 뚜렷함을 관찰할 수가 있다. 이때 크리프 하중지수( $m$ )는 575°C, 600°C 그리고 625°C에서 각각 6.75, 6.12 그리고 5.93을 나타내어, 크리프 변형속도에 의해 산출된 하중지수의 결과와 같이 시험온도가 증가함에 따라 하중지수가 감소하였다.

Fig. 8은 크리프 파단수명에 대한 하중지수( $m$ )의 온도의존성을 설명하고 있다. 이 같은 하중지수( $m$ ) 값의 감소는 단축 인장 크리프 시험의 응력지수 거동과 전반적으로 같은 거동이므로 SP-Creep 시험은

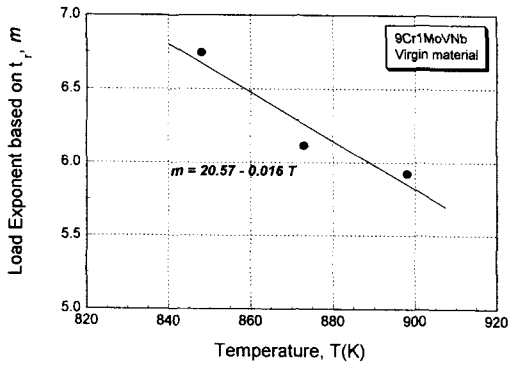


Fig. 8 The variation of load exponent according to test temperature for 9Cr1MoVNb steel

로부터 얻은 하중지수(m)가 내열재료의 크리프 특성 평가에 유효함을 알 수 있다. 이때 하중지수는  $m(t_r) = 20.57 - 0.016 T$ 로 표현되었으며, SP-Creep 시험으로부터 구한  $t_r$  vs.  $P$ 의 정량적 상관관계식은 다음과 같이 정리되었다.

$$\begin{aligned}
 575^\circ\text{C} : t_r &= 1.25 \times 10^{14} P^{-6.75} \\
 600^\circ\text{C} : t_r &= 2.65 \times 10^{12} P^{-6.12} \quad (\text{식 2}) \\
 625^\circ\text{C} : t_r &= 2.17 \times 10^{11} P^{-5.93}
 \end{aligned}$$

Fig. 9는 본 연구의 시험재인 9Cr1MoVNb 주조강과 종래 발전설비의 내열재료로 널리 사용되어온 2.25Cr1Mo강의 미소시험편에 의한 SP-Creep 시험결과를 비교하기 위해 나타낸 그림이다. 보는 바와 같이 9Cr1MoVNb강의 경우가 2.25Cr1Mo강보다 동일한 온도, 하중조건에서 크리프 파단수명이 매우 높음을 알 수 있는데, 이는 Cr 함량의 증가에 따른 결과로 사료된다. 또한 하중이 증가함에 따라 크리프 수명의 감소 정도가 2.25Cr1Mo강에 비해 크게 작음을 알 수 있다. 이 같은 결과는 고온 크리프 환경에서의 고 Cr 함량에 따른 미세 탄화물 형성거동에 의한 크리프 변형 과정중의 전위밀도와 전위활동 등의 차이에 의한 결과로 사료된다.

### 3.5 SP-Creep 시험의 활성화에너지 거동

크리프 변형은 고온에서 열적 활성화 과정에 의해 진행되므로 크리프 변형에 필요한 활성화 에너지는 Arrhenius type 식을 이용하여 설명된다. Fig. 10은 부하하중 55kg~70kg에서 얻어진 최소 크리프 속도( $\delta_{ss}$ )와 온도( $1/T$ )와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 활성화에너지( $Q_c$ )는 55kg, 60kg,

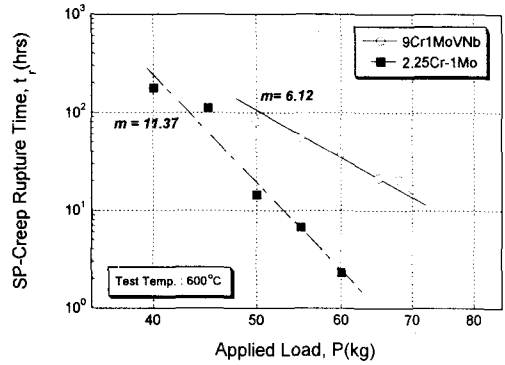


Fig. 9 The relationship between rupture time and applied load for 9Cr1MoVNb and 2.25Cr-1Mo steels at 600°C

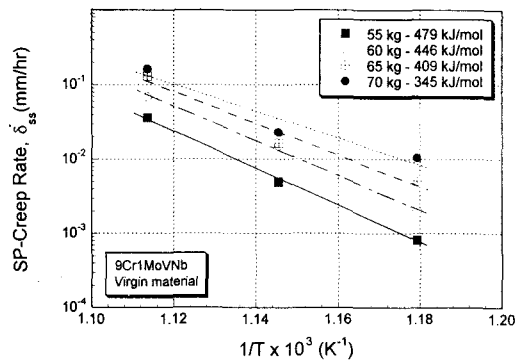


Fig. 10 The relationship between SP-Creep rate and test temperature for 9Cr1MoVNb steel at several loads

65kg 그리고 70kg에서 각각, 479kJ/mol, 446kJ/mol, 409kJ/mol 그리고 345kJ/mol로 얻어졌다. 따라서 하중이 증가할수록 활성화 에너지가 감소하는데 이는 단축 인장 크리프 시험결과와 같아 SP-Creep 시험의 유효성을 또한 확인할 수가 있다.

Fig. 11은 SP-Creep 시험시 활성화 에너지의 거동을 부하하중에 대해 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 하중 55kg에서 70kg로 변화될 때 활성화 에너지는 약 480kJ/mol에서 340kJ/mol로 변화되고 있어 30%의 하중변화에 대해 활성화 에너지의 변화가 약 140kJ/mol 정도로 큼을 알 수 있다. Fig. 12는 동일 계의 시험재인 9Cr1Mo0.2VNb (P91 Type)강재에 대한 단축 인장 크리프 시험에서 부하응력에 따른 활성화 에너지의 변화를 나타낸 결과이다<sup>6)</sup>. 부하응력 100MPa에서 400MPa로 변화될 때 활성화 에너지의 변화는 약 700kJ/mol에서 330kJ/mol로 변화하여 300%의 하중변화에 대해 활성화에너지는

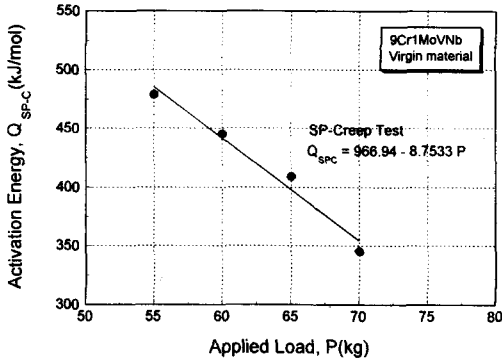


Fig. 11 The variation of activation energy according to applied load for 9Cr1MoVNb steel in SP-Creep test

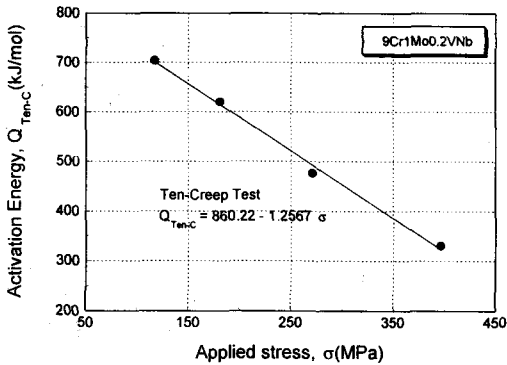


Fig. 12 The variation of activation energy according to applied load for 9Cr1MoVNb steel in uniaxial creep test

약 370kJ/mol를 보이고 있다. 따라서 외력의 변화에 따른 활성화에너지의 변화정도는 종래 인장-크리프 시험보다 SP-Creep 시험에서 보다 큼을 알 수 있다. 이 같은 이유는 두 시험방법에 있어 시험편의 변형 기구의 차이에 의한 결과로 사료된다. 즉, SP-Creep 시험편은 2축상태에서 변형이 되고, 최종적으로 파괴되기 때문에 단축 인장 크리프 시험에 비교해서 전위의 활성화 및 회복 속도 그리고 가공경화 속도가 클 것으로 사료되며, 이들 속도의 대수관계로 결정되는 정상상태의 크리프 속도와 활성화 에너지는 인장 크리프 시험보다 클 것으로 생각된다. 향후 이에 대한 보다 정확한 해석을 위해서는 더 많은 D/B가 필요하다고 사료되며, 현재 본 대학에서 다양한 방향으로의 연구가 진행중이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 현재 새로운 크리프 시험법으로 개발중인 소형편차-크리프(SP-Creep) 시험방법을 이용하여 9Cr1MoVNb 강 신재에 대한 고온 크리프 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 미소 시험편을 이용한 9Cr1MoVNb 강의 SP-Creep 곡선 거동은 크리프 하중 및 온도에 따라 명확하게 의존하며, 3단계의 크리프 변형 거동을 뚜렷하게 보였다.

(2) 동일 시험온도에서 9Cr1MoVNb 강의 초기 변형량은 종래의 내열재료로 널리 사용되는 2.25Cr1Mo 강보다 낮아, 미소시험편을 이용한 SP-Creep 시험법은 재료의 강화 원소의 함량에 따른 초기 변형을 평가에 사용 가능함을 알았다.

(3) SP-Creep 시험의 정상 상태의 크리프 속도 ( $\delta_{ss}$ )는 부하하중에 매우 뚜렷하게 의존하였고, 575°C, 600°C 그리고 625°C에서 각각 9.41, 5.80 그리고 4.58을 나타내어 단축 인장 크리프 시험과 같이 시험온도가 증가함에 따라 하중지수가 감소하였다.

(4) 파단시간( $t_r$ )의 작용하중에 대한 의존성은 단축 인장 크리프 시험결과와 같이 역수법칙(Power law)이 성립하였으며, 파단수명에 근거한 크리프 하중지수(m)는 575°C, 600°C 그리고 625°C에서 각각 6.75, 6.12 그리고 5.93을 나타냈다.

(5) 9Cr1MoVNb 강은 2.25Cr1Mo 강보다 동일 온도, 하중조건에서 크리프 파단수명이 높음을 알 수 있었으며, 또한 하중이 증가함에 따라 크리프 수명의 감소정도가 크게 작았다.

(6) 시험하중 55kg, 60kg, 65kg 그리고 70kg에서 정상 상태의 최소 크리프 속도( $\delta_{ss}$ )를 이용하여 얻은 SP-Creep 활성화에너지( $Q_c$ )는 각각, 479kJ/mol, 446kJ/mol, 409kJ/mol 그리고 345kJ/mol을 보였다. 이 같은 결과는 부하응력이 증가할수록 활성화 에너지가 감소하는 인장 크리프 시험결과와 같아 SP-Creep 시험의 유효성을 확인할 수가 있었다.

#### 참고문헌

- (1) 유효선, 이송인, 백승세 외 3인, 특허출원, 2000, "소형편차-크리프 시험기 및 고온부재의 크리프 특성 평가 방법", 제 10-2000-0024756호.