

## 소형편치실험법을 이용한 고온재료의 크리프 손상 평가

유효선 · 이송인 · 백승세 · 나성훈  
전북대학교 기계공학부

### Creep Damage Evaluation of High Temperature Material Using Small Punch Test Method

Hyo-Sun Yu, Song-In Lee, Seung-Se Baek, and Sung-Hun Na  
Mechanical Engineering School, Chonbuk National University

#### Abstract

In this study, a small punch creep (SP-Creep) test using miniaturized specimen has been described for the development of the new creep test method for high temperature structural components such as headers and tubes of boiler, turbine casing and rotor, and reactor vessel. The SP-Creep testing technique has been applied to 1Cr-0.5Mo steel used widely as boiler header material and the creep test temperature are varied at 550°C ~ 600°C. From the experimental results, e.g. SP-Creep curve behaviors, the creep rate in steady state and creep rupture life with test temperature and load, the load exponential value( $n$ ,  $m$ ), the activation energy( $Q_{SPC}$ ), the Monkman-Grant relation and the creep life assessment equation etc., it can be summarized that the SP-Creep test may be a useful test method to evaluate the creep properties of the heat resisting material such as boiler header.

험 방법에 비해 이를 보다 효과적으로 평가하기 위해 개발된 시험방법이다.

SP시험법은 기존의 인장시험이나 CVN 시험에서 요구하는 시험편의 크기에 비하여 매우 작은 크기의 시험편(10×10×0.5mm)을 이용하는 준 비파괴 시험법으로 개발 초기단계에는 재료의 강도(strength)와 연성(ductility)을 구하고자 하는 연구가 행해졌으며, 그 이후에는 수많은 재료시험 분야 즉, 발전설비 부재의 재질 열화도 평가 및 응력부식균열(stress corrosion cracking : SCC) 감수성 평가 그리고 세라믹과 FGM 과 같은 신소재의 재료특성 평가와 강용접부의 국부 조직에 대한 파괴인성 평가 등에 적용되고 있다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 현재 국내외적으로 미소 역학물성 평가분야에서 많은 관심을 보이고 있는 미소 시험편을 사용하는 소형편치실험법을 이용하여 발전설비의 대표적인 내열재료인 1Cr-0.5Mo강을 대상으로 다양한 온도와 하중조건하에서 고온 크리프 특성을 평가하고, 시험결과를 토대로 새로운 크리프 시험방법의 개발 가능성을 조사하였으며, 또한 크리프 평가인자의 정립과 크리프 속도 및 수명 예측식 등을 제안하였다.

#### 1. 서론

종래 보다 소형화된 시험편을 이용하여 재료 및 설비의 기계적 성질 또는 건전성을 평가하기 위해 수많은 노력들이 행해져 왔는데, 이러한 노력들의 대표적인 결실이 소형편치(small punch : SP) 시험법이다<sup>(1,2)</sup>. SP시험법

은 핵융합 로브의 조사손상(irradiation damage) 영역 이 시험편 표면 층에 한정되기 때문에 기존의 재료시

#### 2. 본론

##### 2.1 재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 시험재료는 현재 화력 발전설비의 보일러 헤더 재료로 널리 사용되는 1Cr-0.5Mo 강인 신재와 인공열화재이다. Table 1에 시험재의 화학적 조성을 나타내었다. 고온 크리프 시험편의 크기는 SP 시험편의 규격인 10×10×0.5mm로 하였다.

Table. 1 Chemical Composition(wt.%)

Steel	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
1Cr-0.5Mo	0.10~ 0.18	0.10~ 0.35	0.4~ 0.7	0.70~ 1.10	0.45	bal.

2.2 SP-Creep 장치의 구성과 실험방법

SP-Creep 시험장치의 구성은 크게 고온 SP 시험지그, 가열장치(furnace part), 정하중 부하장치(constant loading part), 미소변위 측정장치(linear variable differential transducer : LVDT), 냉각장치(cooling part) 그리고 제어장치(control part)로 구성되어 있다. 크리프 시험 도중 얻는 모든 데이터는 실시간적으로 컴퓨터에 저장된다. 크리프 시험장치에서 중요한 부분은 SP 시험지그와 가열장치 그리고 부하 시스템이며, 이중 미소시험편을 체결하는 SP 시험지그는 1300℃까지 시험이 가능하도록 inonel 재질을 사용하여 제작하였다. 또한 시험편의 상부에  $\phi 2.4\text{mm}$ 의  $\text{Si}_3\text{N}_4$  세라믹 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로서 시간에 따른 시험편의 크리프 변형 거동을 조사하였다. 고온 크리프 시험온도는 550℃~600℃로 하였으며, 하중조건은 40kg~90kg으로 제어하였다. 시험도중 시험편의 중앙변위(central displacement :  $\delta$ )는 LVDT 시스템을 이용하여 최소 0.001mm까지 정밀 계측하였다. 또한 시험중 미소시험편의 표면산화에 따른 시험오차를 제거하기 위해 아르곤(Ar) 분위기에서 실시하였다.

2.3 SP-Creep 곡선 거동

1Cr-0.5Mo강의 신재를 대상으로 550℃와 575℃의 고온환경에서 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 중앙변위( $\delta$ )대 시간( $t$ )과의 대표적인 크리프 곡선 거동을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. SP-Creep 곡선의 전체적인 변형거동은 작용하중 및 시험온도에 따라 뚜렷하게 변화되고 있음을 알 수 있다. 시험조건에 따라 차이는 있지만, 종래의 크리프 곡선의 변형거동과 같이 1차 크리프 천이거동(transient creep behavior)과 2차 정상상태 크리프 거동(steady state creep behavior) 그리고 3차 가속 크리프 거동(accelerative creep behavior)을 명확히 보이고 있다. 또한 동일 시험하중에서 시험온도가 증가됨에 따라 정상 상태의 2차 크리프 거동은 크게 감소되고 있다.

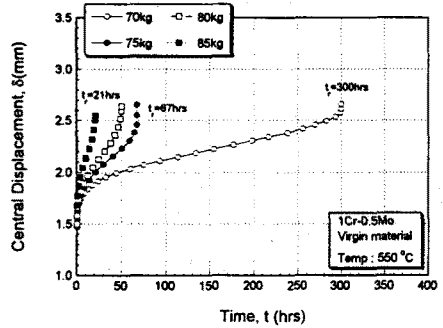


Fig. 1 The central displacement vs. time curves for virgin material at 550℃.

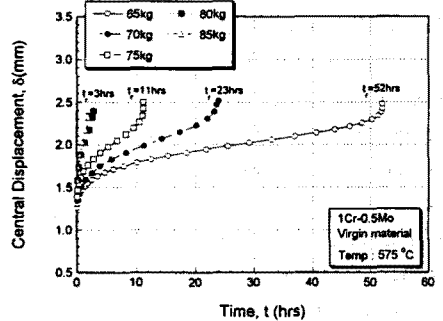


Fig. 2 The central displacement vs. time curves for virgin material at 575℃.

2.4 하중과 정상 크리프 속도의 관계

크리프 변형은 고온에서 외부하중 혹은 응력에 의해 나타나는 원자들의 국부적인 확산과 회복에 의한 전위들의 이동에 기인한 시간에 따른 변형거동 즉, thermally activated time-dependent plastic deformation이라고 말할 수 있다. 일반적으로 단축 크리프 시험에서 정상 크리프 변형률 속도( $\dot{\epsilon}$ )의 응력의존성은  $\dot{\epsilon} = A\sigma^{n_s}$ 과 같이 표현된다. 여기서  $n_s$ 는 응력지수로서 크리프 변형특성을 대변하는 인자이다.

Fig. 3은 SP-Creep 시험에 있어 정상 크리프 속도(steady state creep rate :  $\dot{\epsilon}_{ss}$ )의 부하하중에 대한 의존성을 조사하여 나타낸 결과이다. 대수좌표에서 정상 크리프 속도는 하중에 대해 매우 뚜렷하게 의존함을 관찰할 수가 있다. 550℃, 575℃ 그리고 600℃에서 각각 14.60, 12.93 그리고 9.99의 하중지수( $n$ ) 값을 나

타내어, 단축 인장 크리프 시험의 응력지수( $n_c$ ) 거동과 같이 시험온도가 증가함에 따라 하중지수가 감소하고 있다. 이 같은 결과는 SP-Creep 시험의 유용성을 확인할 수 있는 매우 중요한 시험결과이다. 이때 하중지수 값이 감소되는 이유는 온도가 증가함에 따라 시험편의 전위밀도가 감소하고, 이에 따라 하중의 감소 효과가 높아지기 때문으로 사료된다.

SP-Creep 시험으로부터 구한  $\dot{\delta}_{ss}$  vs  $P$ 의 정량적인 상관 관계식은 식(1)과 같이 표현된다.

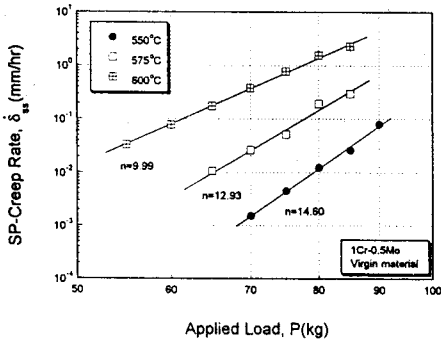


Fig. 3 The relationship between SP-Creep rate and applied load for virgin material at various temperatures.

$$550^{\circ}\text{C} : \dot{\delta}_{ss} = 2.25 \times 10^{-30} P^{14.60}$$

$$575^{\circ}\text{C} : \dot{\delta}_{ss} = 3.80 \times 10^{-26} P^{12.93}$$

$$600^{\circ}\text{C} : \dot{\delta}_{ss} = 1.38 \times 10^{-19} P^{9.99}$$

----- (식 1)

Fig. 4는 다른 내열 강종인 2.25Cr-1Mo강과 9Cr-1Mo강의 결과와 비교하기 위해 몇몇 크리프 하중 조건에서 얻은 2차 크리프 속도의 거동을 나타낸 결과이다. 먼저 2.25Cr-1Mo강과 비교해 볼 때 동일 온도와 하중조건에서 크리프 변형률 속도는 1Cr-0.5Mo강이 보다 낮음을 알 수가 있는데, 이는 강화조직의 차이로 인한 결과로 판단된다. 그러나 9Cr-1Mo강과 비교해볼 때 정상상태의 최소 크리프 변형률 속도는 상대적으로 매우 큼을 알 수가 있다. 이같이 동일 크리프 온도조건에서 낮은 2차 크리프 속도를 보이는 이유는 고온 크리프 변형이 강화열처리에 의해 생성된 미세 탄화물과 용질원자에 의한 전위 활주(glide)속도에 율속되기 때문에 나타나는 결과로 사료된다. 따라서 NT 처리제는 노말

라이징 재료보다 그리고 조질강 중 고합금강은 저합금강보다 내 크리프 변형 특성을 보이는 것으로 판단된다.

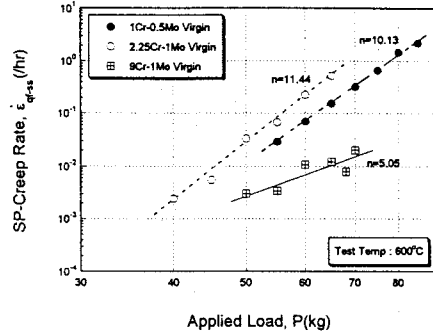


Fig. 4 The relationship between SP-Creep rate and applied load for 1Cr-0.5Mo, 2.25Cr-1Mo and 9Cr-1Mo steels.

## 2.5 Monkman-Grant 관계

Monkman-Grant 관계는 크리프 시험에서 크리프 파단시간과 정상상태의 크리프 속도의 관계를 나타낸 것으로  $t_r \cdot \dot{\epsilon}_{ss}^m = C$ 의 관계가 성립한다. 종래 금속재료에 있어 Monkman-Grant 관계선도의 기울기에 해당되는 지수( $m$ ) 값은 약 1에 수렴한다고 보고되고 있다. 1Cr-0.5Mo강을 대상으로 SP-Creep 시험결과 두 인자의 관계선도는 Fig. 5와 같으며, 다음과 같은 Monkman-Grant 관계식이 성립하였다.

$$t_r \cdot \dot{\delta}_{ss}^{1.06} = 0.46 \text{ ---- (식 2)}$$

여기서 지수 값은 1에 가까운 1.06임을 알 수 있으며, 이 같은 데이터는 SP-Creep 시험법이 내열재료의 크리프 특성 평가에 적용 가능함을 뒷받침해 주는 중요한 시험결과라고 사료된다.

## 2.6 크리프 속도 및 수명 예측식

본 연구에서 얻은 실험적 결과들을 근거하여 크리프 속도 및 수명 예측식을 얻을 수 있었으며, 이 중 크리프 수명 예측식은 다음과 같다. 그리고 실험데이터와 계산된 값 사이에는 좋은 일치성을 보였다.

$$t_r = \exp[(123.3 + 0.80P) + (-0.21 - 0.60 \times 10^{-3}P)T] \cdot P^{-(61.2 - 0.057T)}$$

$$\exp\left[\frac{(763.6 - 2.10P) \times 10^3}{RT}\right]$$

----- (식 3)

### 참고문헌

- (1) JAERI-memo(62-193), 1987, "小型パンチ(SP) 試験法(案)", 日本原子力研究所.
- (2) X.Mao and H.Takahashi, 1991, "Estimation of Mechanical Properties of Irradiated Nuclear Pressure Vessel Steel by use of Subsize CT Specimen and Small Punch Specimen", Scripta Metallurgica, Vol. 25, pp. 2487~2490.
- (3) Hyo-Sun Yu, Eui-Gyun Na, and Se-Hi Chung, 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.

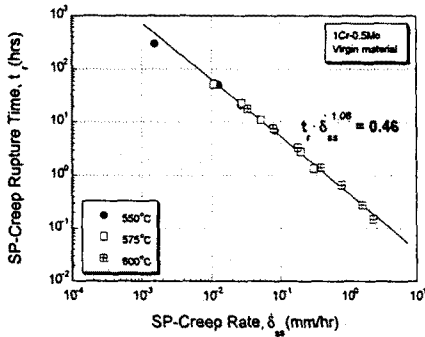


Fig. 5 The Monkman-Grant relation-ship in SP-Creep test for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel.

### 3. 결론

본 연구에서는 소형펀치-크리프 시험법(SP-Creep test method)을 이용하여 발전설비의 내열재료에 대한 고온 크리프 특성을 평가하였으며, 얻어진 실험결과 즉, ①소형펀치-크리프곡선 거동 ②크리프 초기 변형량( $\delta$ ) 거동 ③크리프 하중과 정상 크리프 변형속도( $\delta_{ss}$ ) 관계 ④크리프 하중과 크리프 파단수명( $t_r$ ) 관계 ⑤활성화 에너지 거동( $Q_{spc}$ ) ⑥ Monkman-Grant 관계 ⑦정상상태의 크리프 속도 및 수명 예측식 ⑧인공열화재의 크리프 특성평가, ⑨미소시험편의 파단면 관찰 ⑩SP-Creep 시험의 변형기구 등으로부터 미소시험편에 의한 새로운 고온 크리프 평가인자의 정립과 함께 평가기법의 개발 가능성을 확인할 수가 있었다.

향후, 크리프 손상의 새로운 평가기법의 정립과 규격화 그리고 실기구조물에 대한 현상태의 크리프 수명 평가기법으로 활용하기 위해서는 다양한 종류의 발전소 부재에 대한 평가와 검증 그리고 데이터 베이스(D/B)의 확립이 필요하다고 사료된다.