

유한요소해석을 이용한 소형펀치-크리프 시험에 관한 연구 (II)

- SP-Creep 시험과 일축 크리프 시험의 상관성을 중심으로 -

이송인* · 권일현* · 김연직* · 안병국** · 안행근** · 백승세*** · 유효선*

A Study on Small Punch-Creep Test Using Finite Element Analysis II

Song-In Lee, Il-Hyun Kwon, Yon-Jig Kim, Seung-Se Baek,
Byung-Guk Ahn, Haeng-Keun Ahn and Hyo-Sun Yu

Key Words: Creep(크리프), Small-Punch Test(소형펀치시험), Finite Element Analysis(유한요소해석), Equivalent von-Mises Stress(등가 von-Mises 응력), Miniaturized Specimen(소형시험편), Activation Energy(활성화에너지), Larson-Miller Parameter(LMP), 9Cr1MoVNb Steel(9Cr1MoVNb강)

Abstract

Small punch-creep(SP-Creep) test technique has been applied for evaluating the creep characteristics for high temperature materials. However, in order to evaluate the damage and predict the remaining life, it is necessary to establish a quantitative correlation between SP-Creep and uniaxial-creep test results. This paper presents analytical and experimental results of useful correlation between SP-Creep and uniaxial-creep properties for 9Cr1MoVNb steel at 600~650°C in terms of stress(load) and activation energy during creep deformation. Especially, the activation energy obtained from SP-Creep test is linearly related to that from uniaxial-creep test at 650°C as follows : $Q_{SP-P} \approx 1.37 Q_{TEN}$, $Q_{SP-\sigma} \approx 1.53 Q_{TEN}$.

1. 서론

고온·고압의 가혹한 환경하에서 장시간 사용되는 부재의 대표적인 재질열화(material degradation) 현상으로 알려져 있는 크리프(creep)에 의한 손상의 평가는 그 부재의 안전성 및 신뢰성 평가, 현 상태의 진단을 위하여 매우 중요

하다.

일반적으로 고온 부재의 크리프 강도 평가를 위해서는 일축 크리프 시험(uniaxial creep test)법이 표준화되어 있으며, 초음파나 경도, 탄화물 분석 등을 이용한 비파괴적 시험법도 활발히 적용되고 있다. 특히 최근에는 실기 부재로부터 시료 채취가 용이한 소형펀치-크리프 시험(small punch-creep test : SP-Creep test)법이 새로이 개발되어 국내외적으로 연구가 진행되고 있으며, 유용한 데이터들의 축적이 지속적으로 진행되고 있다^(1,2).

SP-Creep 시험을 통하여 파단시간, 크리프 변형

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부
E-mail : leesonin@hanmail.com
TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388
* 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소
** 회원, 전북대학교 신소재공학부
*** 회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

를 속도, 활성화에너지 등이 평가되어 기존의 일축 크리프 시험과 정성적으로 동일한 결과들이 얻어지고 있으며, 가속시험에 의한 크리프 파단 수명의 직접적인 평가가 가능하여 그 유용성이 확인되고 있다.

이러한 평가의 정확성이나 실기 적용성, 경제성 측면에서의 많은 장점에도 불구하고 아직까지 SP-Creep 시험에서 얻어진 결과들은 고온 부재의 설계나 수명평가 시 그의 직접적인 적용이 제한되어 왔다. 그러나 그간의 연구결과들을 살펴볼 때, 현재의 SP-Creep 시험법이 고온용 소재의 크리프 특성은 물론 기 확보되어 있는 일축 크리프 시험 특성의 예측 등 잠재적인 유용성을 내포하고 있음에 주목할 필요가 있다.

따라서 고온 부재의 설계 및 관련 DB의 효율적 이용을 위하여 SP-Creep 시험법과 일축 크리프 시험법 사이의 정량적인 연계성을 확보하기 위해서는 SP-Creep 시험편에 대한 자세한 응력-변형률 해석이 필요하며, 두 방법에서 얻어진 데이터들을 정량적으로 상호 관련시키는 것이 요구된다⁽³⁾.

이러한 관점에서 Tettamanti 등⁽⁴⁾은 ASTM A335 P12강에 대하여 SP-Creep 시험을 수행하고 동일한 파단시간, t_f 에서 SP-Creep 시험의 하중, P 와 일축 크리프시험의 응력, σ 와의 유용한 관계를 제안하였다. 또한 Park 등⁽⁵⁾은 9Cr 강의 일축 인장 및 크리프 시험에서 얻어진 특성 값들을 SP-Creep 유한요소 모델에 입력하여 SP-Creep 거동을 해석하고 크리프 상수의 평가 절차, SP-Creep 시험에 적용된 P 와 일축 크리프시험에서의 σ 에 대한 관계에 대하여 보고한 바 있다.

이러한 연구 결과들은 SP-Creep 시험법의 유용성 확보에 매우 중요하다고 보이며, 더 나아가 다 강종을 대상으로 다양한 하중 조건과 관련 파라미터를 적용하여 SP-Creep 시험 결과와 일축 크리프 시험 결과와의 상호 연계성에 대한 심도 있는 고찰이 필요하다.

본 연구는 내열재료의 크리프 특성 평가 시 SP-Creep 시험의 적용을 위해 SP-Creep 시험 결과와 일축 크리프 시험 결과와의 상호 관련성에 주목하여 수행되었다. 즉, 유한요소해석 결과를 이용하여 SP-Creep 시험에서 얻어진 크리프 특성 값들의 응력 의존성을 고찰한 이전의 연구⁽⁶⁾에 이어서 응력(하중)과 활성화에너지, Larson-Miller Parameter (LMP)간의 상호 관계에 기초하여 두 시험 결과의 정량적 상관성을 살펴보았다.

2. 시험재료 및 SP-Creep 시험

최근 발전효율의 향상을 위하여 초초임계압 발전이 요구되면서 기존의 2.25Cr1Mo강이나 1.25Cr0.5Mo강을 대체하는 9Cr1Mo강이나 12Cr강 등의 적용이 대두되면서 이들 강종의 고온 물성에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서 적용된 재료는 초초임계압 화력 발전소의 배관 및 증기발생기의 부품용으로 사용되는 내열강으로서 V와 Nb를 첨가하여 고온강도, 용접성과 가공성 등을 향상시킨 개량형 9Cr1MoVNb 강이다. Table 1은 9Cr1MoVNb강을 대상으로 고온 인장실험에서 얻어진 기계적 특성을 수록한 표이다.

SP-Creep 시험은 표준 SP 시험편(10mm×10mm×0.5mm)을 대상으로 본 대학에서 자체적으로 설계, 제작된 시험장치를 이용하여 수행되었다. 시험장치 및 절차에 대한 자세한 사항은 이전의 관련 문헌⁽²⁾에 수록되어 있으며 이에 준한다. 재료에 적용된 시험온도는 600℃~650℃의 범위로 하였으며, 196N~686N의 범위에서 시험편에 일정 하중을 가하여 SP-Creep 시험을 수행하였다.

3. 유한요소해석

SP-Creep 시험 초기에 편치에 가한 다양한 하중에 따라 시험편에 분포되는 최대 등가응력을

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

Test Temp. (℃)	Young's Mod. (GPa)	Poisson's ratio	σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)
600	116.30	0.3	269.23	317.31
625	104.33	0.3	257.69	286.99
650	99.74	0.3	230.77	255.20

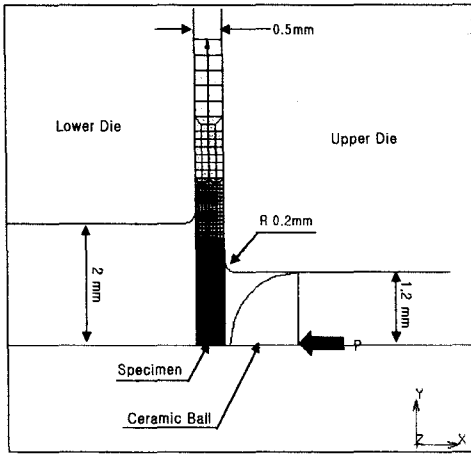


Fig. 1 Finite element model of SP-Creep test

계산하여 실험에서 얻어진 크리프 특성치 및 관련 파라미터와의 상호 관련성을 살펴보기 위하여 유한요소해석이 수행되었다.

작용 하중에 따라 극심한 변형이 예상되는 SP 시험편의 변형 거동을 고려하여 탄-소성 유한요소해석이 수행되었으며 이를 위해 상용 MARC K7.1 S/W가 사용되었다.

유한요소해석을 위한 모델은 Fig. 1과 같으며, 해석 방법, 기타 절차 등에 관한 사항과 결과들은 이전의 연구⁽⁶⁾에서와 동일하며 이하 생략하기로 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 초기 응력과 LMP의 관계

600, 625, 650°C의 세가지 크리프 온도조건에서, SP 시험편에 부과되는 다양한 하중(P_{SP}), 그에 따라 유한요소해석에서 구한 최대 등가 von-Mises 응력(max. equivalent von-Mises stress : $\sigma_{eq,max}$)과 SP-Creep 시험에서 얻어진 파단시간 (rupture time : t_r)을 이용하여 계산된 Larson-Miller Parameter(LMP)와의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 LMP는 응력에 대해 크리프 파단장도를 표현하는 대표적인 파라미터로서 사용 온도(T)와 파단시간(t_r)에 대하여 하나의 파라미터 값으로 계산된다.

여기서 $\sigma_{eq,max}$ 와 P_{SP} 의 증가에 따라 LMP 특성 값은 감소하고 있으며, 데이터 분포에 있어 약간

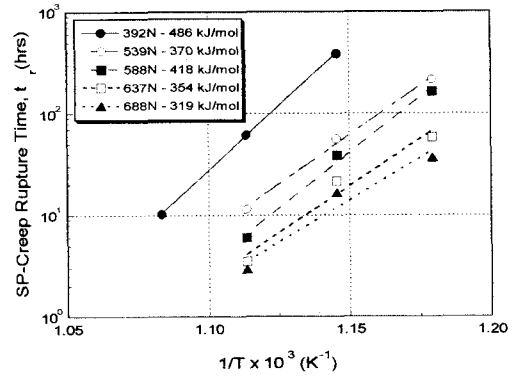


Fig. 2 The relationship between rupture time and test temperature at several loads on SP-Creep test

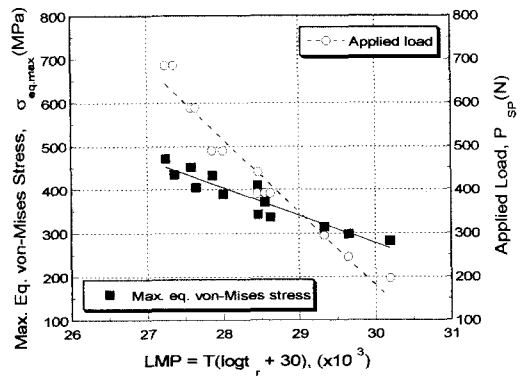


Fig. 3 The relationship of max. eq. von Mises stress and applied load versus LMP on SP-Creep test

의 분산은 존재하나 공히 온도에 상관없이 LMP와 일정한 상관성을 보이고 있다.

4.2 초기 응력과 활성화에너지의 관계

고온에서의 크리프 변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 활성화에너지는 재료나 시험조건에 따른 고유한 크리프 특성값의 하나이다. 따라서 본 연구에서는 활성화에너지를 도입하여 SP-Creep 시험편의 초기 응력이나 부과 하중과의 관련성을 살펴보고 나아가 일축 크리프 시험결과와의 상관성 도출을 위해 활용하고자 한다. 활성화에너지는 정상상태의 크리프 속도, $\dot{\epsilon}$ 와 크리프 파단시간, t_r 에 근거하여 다음식 (1), (2)와 같이 Arrhenius type의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (1)$$

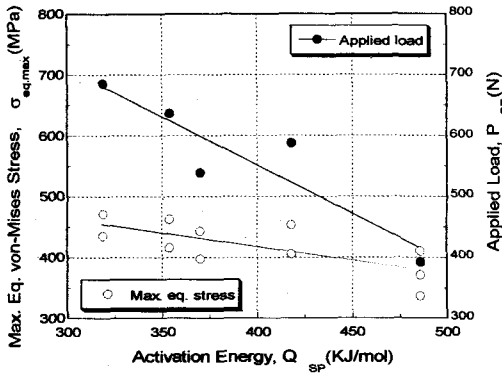


Fig. 4 The relationship of max. eq. von Mises stress and applied load versus activation energy on SP-Creep test

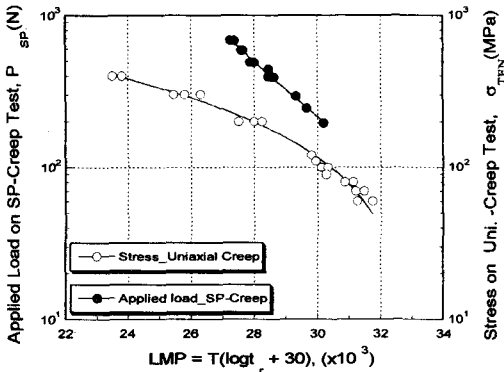


Fig. 5 The relationship of applied SP-Creep load and Uniaxial-Creep stress versus LMP

$$t_r = A \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, Q_c 는 활성화에너지, A 는 재료상수, R 은 기체상수(8.314J/mol·K), T 는 절대온도(K)이다.

Fig. 3은 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. 4에 함께 나타내었다.

P_{SP} - Q_{SP} 관계에 비하여 $\sigma_{eq,max}$ - Q_{SP} 관계의 데이터 분산폭이 더 크나 대체적으로 P_{SP} 와 $\sigma_{eq,max}$

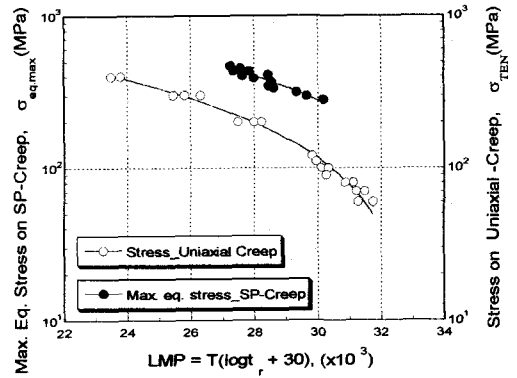


Fig. 6 The relationship of SP-Creep stress and Uniaxial-Creep stress versus LMP

는 Q_{SP} 와 각기 하나의 직선으로 나타낼 수 있으며 그 관계식은 다음 식 (3), (4)와 같다.

$$Q_{SP-P} = 746.74 - 0.6287 P_{SP} \quad (3)$$

$$Q_{SP-\sigma} = 1317.33 - 2.1976 \sigma_{eq,max} \quad (4)$$

4.3 SP-Creep 시험과 일축 크리프시험의 상관성

이상의 SP-Creep 시험과 유한요소해석 결과를 바탕으로 SP-Creep 시험과 일축 크리프 시험 결과와의 상관 관계를 도출하기 위하여 먼저 SP-Creep 하중, P_{SP} 와 동일 강종에 대한 일본 NRIM의 일축 크리프 응력 데이터⁽⁷⁾를 LMP에 대하여 Fig. 5에 나타내었다.

동일 온도조건에 대한 두 시험 결과의 직접적인 비교는 불가능하나 전체적으로 LMP 값이 감소함에 따라, 즉, 고 응력에 의하여 파단시간이 감소함에 따라 두 시험 결과의 차이는 점차 커지고 있음을 볼 수 있다.

그러나 Fig. 5의 P_{SP} 를 $\sigma_{eq,max}$ 로 대체하여 나타낸 Fig. 6의 경우, Fig. 5의 경우에 비하여 두 시험결과들은 거의 일정한 간격을 두고 상호 관련되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5와 6에서 보는 바와 같이 SP-Creep 시험결과와 일축 크리프 시험결과를 대표적인 크리프 특성 파라미터인 LMP에 대하여 전체적으로는 직접적인 비교가 곤란하므로 본 연구에서는 650℃와 700℃의 조건에 대하여 입수된 NRIM의 일축 크리프 시험결과⁽⁷⁾를 참조하여 SP-Creep 시험결과와의 상관성을 살펴보고자 한다.

Fig. 7은 650℃의 크리프 시험온도에서

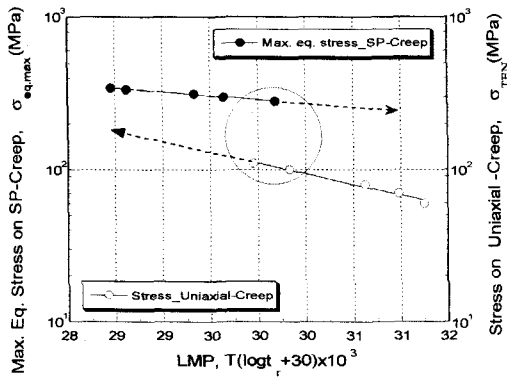


Fig. 7 The relationship of SP-Creep stress and Uniaxial-Creep stress versus LMP at 650°C

SP-Creep 시험 및 일축 크리프 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 좀더 포괄적이고 심도있게 고찰하기 위하여 Fig. 7 상의 화살표로 표기한 바와 같이 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 일축 크리프 응력을 의미한다. 관련 그림과 표에서 볼 수 있는 바와 같이 외삽이 이루어질 경우에 LMP값이 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. 7에 원형으로 나타난 바와 같이 두 시험 결과가 상호 겹치는 영역, 즉 LMP값이 약 30×10^3 근방의 영역에서

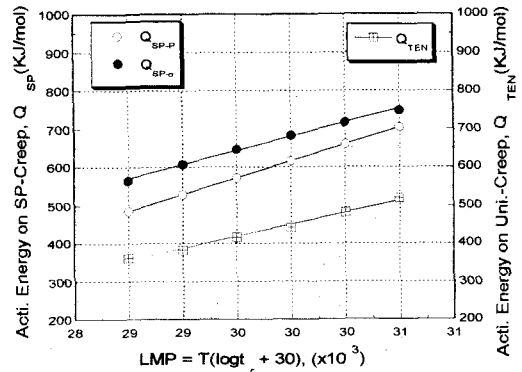


Fig. 8 The relationship between activation energy and LMP on SP-Creep and Uniaxial-Creep test

약간의 차이는 있으나 Tettamanti⁽⁴⁾ 등이 제안한 SP-Creep 하중, P_{SP} 와 일축 크리프 응력, σ_{TEN} 사이의 관련적인 다음 식 (5)의 관계가 성립된다는 것이다. 동일한 방법을 적용하면 $\sigma_{SP}-\sigma_{TEN}$ 관계의 경우 다음 식 (6)과 같이 표현될 수 있을 것이다.

$$P_{SP} \approx 2 \sigma_{TEN} \quad (5)$$

$$\sigma_{SP} \approx 2.67 \sigma_{TEN} \quad (6)$$

따라서 상기 두 식을 이용하면 제한적이기는 하나 동일 LMP, 즉, 동일 과단시간에 대해 SP-Creep 하중 및 초기 응력과 일축 크리프 시험에서의 응력을 선형적으로 관련시킬 수 있다. 단, 고응력 또는 저응력 영역으로의 데이터 외삽이 이루어질 경우에 식 (5)의 적용에 대해서는 향후 좀더 다양한 온도와 부하조건에서 관련 DB가 충분히 확보되어 이러한 경향에 대한 검토와 고찰이 반드시 선행되어야 할 것으로 사료된다.

한편, Table 2에 수록된 바와 같이 두 시험법에서 얻어진 활성화에너지의 비, Q_{SP-P}/Q_{TEN} 과

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

LMP	SP-Creep test				Uniaxial-Creep test		σ_{SP}/σ_{TEN}	P_{SP}/σ_{TEN}	Q_{SP-P}/Q_{TEN}	Q_{SP-P}/Q_{TEN}
	σ_{SP}	P_{SP}	Q_{SP-P}	$Q_{SP-\sigma}$	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

Q_{SP-d}/Q_{TEN} 을 동일 LMP값에 대하여 고려할 경우에는 다음 식 (7), (8)과 같이 두 시험법 사이에서 일정한 상관관계를 얻을 수 있다. 여기서 P_{SP} 와 σ_{SP} 에 대한 활성화에너지, Q_{SP} 는 식 (3)과 (4)의 관계식을 이용, 외삽하여 얻어졌다.

$$Q_{SP-P} \approx 1.37 Q_{TEN} \quad (7)$$

$$Q_{SP-\sigma} \approx 1.53 Q_{TEN} \quad (8)$$

두 시험법에서 얻어진 활성화에너지와 LMP 사이의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 두 시험에서 얻어진 활성화에너지는 LMP와 선형적으로 뚜렷한 상관관계를 보이고 있어 이를 통해 정량적 측면에서 SP-Creep 시험과 일축 크리프 시험결과를 상호 관련시킬 수 있을 것으로 보인다.

끝으로 본 연구에서 얻어진 SP-Creep 시험과 일축 크리프 시험 결과 사이의 정량적 관계는 단일 온도 조건에서 얻어진 결과로서 향후 다양한 시험온도 및 부하조건에서 관련 DB를 확보하여 연구 결과에 대한 확인과 검토절차가 요구된다.

5. 결론

600~650℃의 온도와 196N~686N의 하중조건에서 내열강재인 9Cr1MoVNb강의 SP-Creep 시험과 유한요소해석을 수행하여 응력과 크리프 특성값과의 관계를 알아보고 일축 크리프 시험결과와의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SP-Creep 시험의 부과하중, P_{SP} 와 유한요소 해석에서 얻어진 $\sigma_{eq,max}(\sigma_{SP})$ 는 온도에 상관없이 LMP 값과 일정한 상관 관계를 나타내었다.

(2) SP-Creep 시험에서 P_{SP} 와 $\sigma_{eq,max}$ 는 활성화에너지, Q_{SP} 와 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{SP-P} = 746.74 - 0.6287 P_{SP}$$

$$Q_{SP-\sigma} = 1317.33 - 2.1976 \sigma_{eq,max}$$

(3) 650℃의 시험 온도에서 외삽하여 얻어진 $Q_{SP-\sigma}$, $P_{SP}-\sigma_{TEN}$ 의 비는 LMP 값의 증가에 따라 각각 증가하거나 감소하는 경향을 보였으나, 동일한 LMP 값에 대하여 두 시험 결과가 공존하는 영역에서 P_{SP} 와 σ_{SP} 는 σ_{TEN} 과 다음과 같은 관계를 나타내었다.

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

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

(4) 650℃의 온도에서 SP-Creep 시험과 일축 크리프 시험에서의 활성화에너지, Q_C 는 동일 LMP 값에서 다음 식과 같이 정량적인 상관 관계를 나타내었다.

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

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

(5) 본 연구를 통하여 SP-Creep 시험과 일축 크리프 시험결과 사이의 유용한 상관 관계를 얻을 수 있었으며, 향후 관련 DB의 확보를 통한 연구 결과의 검증과 고찰이 요구된다.

참고문헌

- (1) B. Ule, T. Šuštar and T. Rodič, 1997, Technical Report : Round Robin of Small Punch Creep Tests, IMT Ljubljana.
- (2) 유효선 외 3인, 2000, 대한기계학회, 2000년도 춘계학술대회 논문집, pp. 61~66.
- (3) S. Komazaki et al., 2000, J. of Testing & Evaluation, V. 28, Pt4, p. 249~256.
- (4) S. Tettamanti and R. Crudeli, 1998, BALTICA VI Plant Maintenance for Managing Life & Performance, Vol. 2, pp. 501~509.
- (5) 박태규, 마영화, 윤기봉, 정일석, 2001, 2001년도 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 511~516.
- (6) 이송인, 백승세, 권일현, 나익균, 유효선, 2001년, 대한기계학회 제 2회 재료 및 파괴 부문 학술대회 논문집, pp. 127~132.
- (7) 한국과학기술연구원, 2000년, 과학기술부 연구보고서.