소형펀치 크리프 시험을 이용한 9Cr강의 크리프 상수 평가

윤기봉† · 박태규* · 심상훈* · 정일석**

(2001년 4월 10일 접수, 2001년 6월 23일 심사완료)

Assessment of Creep Properties of 9Cr Steel Using Small Punch Creep Testing

Kee Bong Yoon, Tae Gyu Park, Sang Hoon Shim and Ill Seok Jeong

Key Words: Creep(크리프), Time-Dependent Fracture Mechanics(고온파괴역학), Small Punch Test (소형펀치 시험), Power Law Creep(멱급수 크리프), Miniature Specimen(미소시험편)

Abstract

Recently small punch creep testing (or miniature disc bend creep test) has received much attention through European collaborative research projects. This method was considered as a substitute for the conventional creep rupture testing by which the residual creep life is measured from the specimen taken out from serviced components of high temperature plants. It would be beneficial if the material creep properties such as power law creep constants as well as the creep rupture life can be measured from the small punch creep test. In this paper a method of assessing creep constants from the small punch creep testing is proposed. Finite element analyses were performed to investigate evolution of stress and strain rate at the weakest locations of the small punch creep specimen. Elastic-plastic-secondary creep analyses were carried out. The estimation equations for creep constants by the small punch creep testing are proposed based on the finite analysis results. Small punch creep tests were also performed with 9Cr steel and the accuracy of the proposed equation was verified by the experimental results.

1. 서 론

고온 설비부재의 재질열화 및 수명평가 기법으로 다양한 종류의 기법들이 개발되고 있다.[1] 고온요소의 잔여수명 평가 기법중 잔여 크리프 수명을 직접 측정하는 방법으로는 실기에서 크리프 시편을 채취하여 표준 크리프 시험인 일축 크리프 시험(uniaxial creep testing)을 통해 크리프 수명을 실측하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 실기 부재에서 표준형 시편을 채취하려면 비교적 많은 양의 재료를 떼어 내야 하므로, 이 방법은 매우 제한적으로 사용되어 왔다. 또한 비파괴적 시험법인 표면복제법, 입계부식법, 경도시험법 등으로는 직접적인 크리프 강도와 잔여수명을 평가하기 어렵다.[2] 따라서 일축 크리프 시험을 소형화 하거나,[3] 표준 크리프 시험 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있는 다른 소형시편 시험법 개발이 필요하게 되었다.[4] 가장 적은 재료를 채취하여 잔여 크리프 수명을 측정할 수 있는 방법으로서 소형 디스크 크리프 시험법(miniature disc creep test)이 제안되어 연구되고 있다.[5,6] 이 방법은 소형펀치 크리프 시험법(small punch creep test) 또는 SP 크리프 시험법으로도 불리며 파괴인성평가에 사용되던 SP 시험법을 고온 분위기 및 불활성 가스환경에서의 정하중 시험으로 수정한

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : kbyoon@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474
* 회원, 중앙대학교 대학원
** 한전 전력연구원

Table 1 Material properties of the tested 9Cr steel at 566℃

Elastic modulus (GPa)	ν	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	D (MPa^{-m})	m	A ($MPa^{-n} \cdot hr^{-1}$)	n
145.6	0.3	374.8	421.2	4.370E-66	24.19	1.781E-34	12.76

Note) $\varepsilon_{plastic} = D\sigma^m$, $\dot{\varepsilon}_{creep} = A\sigma^n$

것이다.[4~14] SP 크리프 시험법은 증기터빈로터의 고온 크리프 사용수명을 효과적으로 평가하기 위해 개발된 시험법이다.[5] SP 크리프 시험법은 보통 10×10×0.5 (mm)의 작은 디스크형 시편이 사용되므로 실기에서 시편 채취가 매우 용이할 뿐만 아니라 직접적인 크리프 잔여수명을 측정할 수 있다.

현재까지의 연구는 SP 크리프 시험을 사용하여 크리프 파단수명을 결정하는 방법에 대한 연구가 대부분이다. 즉 Monkman-Grant 식의 적용성, 크리프 수명 예측을 위한 활성화 에너지의 측정 등의 연구가 수행되었다.[7,10] 그러나, 일축 크리프 시험의 크리프 곡선을 통해 크리프 상수를 구하는 것과 유사하게, SP 크리프 시험으로 얻은 SP 변위 곡선으로부터 크리프 상수를 결정하는 방법은 제시되고 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 SP 크리프 시험을 사용하여 얻은 변위 곡선을 사용하여 일축 크리프 시험 곡선으로부터 측정한 크리프 상수와 동일한 크리프 상수 측정 결과를 얻기 위한 방법을 연구하였다. 우선 유한요소해석을 통하여 두 시험법 사이의 관계를 연구하고 얻은 관계식을 실험결과를 통해 검증하는 연구를 수행하였다.

2. 유한요소해석 및 실험방법

2.1 유한요소해석 방법

유한요소해석에 사용할 재료의 입력 물성 데이터를 Table 1에 나타내었다. Table 1의 물성은 566℃에서 실측한 9Cr강의 고온 물성 실제 데이터이기도 하다. 탄소성-크리프 해석시 소성 변형 구간은 멱급수 소성법칙(power law plasticity)에 따른다고 가정하였다. 일정하중 조건에서 500N, 550N, 600N, 650N의 정하중을 볼에 부가하여 SP 크리프 변위 곡선을 해석하였다.

유한요소해석에는 등방성 탄소성 재료를 사용하였으며 대변형 이론을 적용하였다. 사용된 모델은 축대칭 조건을 이용하여 Fig. 1에 보인바와 같이 SP 크리프 시험부의 우측부 반만 모델링 하였다. 해석에 사용된 요소는 4 절점 축대칭 요소이며 4-node reduced integration element (ABAQUS Library Element Type CAX4R)를 사용하였다. 시험편의 요소 수는 총 1000개, 절점수는 총 1111개 였다. 시험편과 볼, 시험편과 다이 사이의 접촉면에는 모두 접촉요소면(ABAQUS Library Contact Surface)을 배치하였다. 볼과 다이는 변형이 발생하지 않는다는 가정하에 강체로 가정하였으며 시험편 만이 Table 1에 보인 재료 물성값을 갖는다고 가정하였다. 시험편과 볼의 대칭축상 절점들은 대칭축에 수직방향 성분을 구속하여 축대칭 조건을 만족시키도록 한후에, 볼에 일정하중을 가하였다. 시험편과 상부다이 및 하부다이 표면의 접촉면에서 클램핑(clamping) 하중은 부가되지 않는 것으로 가정하였다. 볼과 시편, 시편과 다이 사이의 쿨롱마찰계수는 일반적인 강과 강 표면의 마찰계수인 0.2를 사용하였다. Fig. 1에 유한요소 모델링을 위한 상세 그림을 나타내었다.

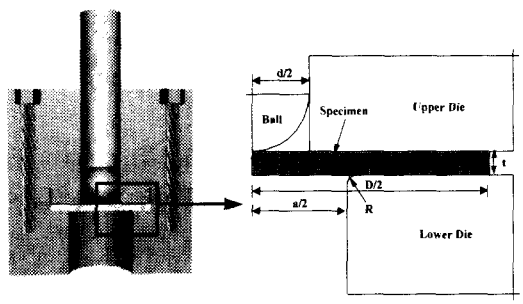

Fig. 1 Finite element modeling of small punch testing

2.2 시험편 및 실험방법

유한요소해석 결과 얻은 관계식의 유효성을 검

Table 2 Chemical composition of the tested 9Cr steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V
0.11	0.35	0.52	0.015	0.003	8.6	0.91	0.21	0.009	0.19	0.226

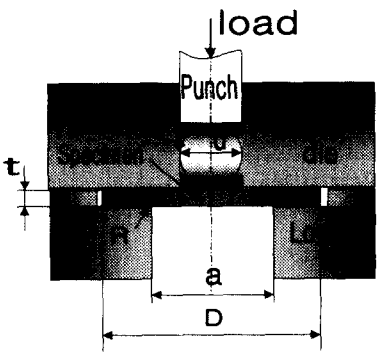

Fig. 2 Schematic diagram of small punch testing jig

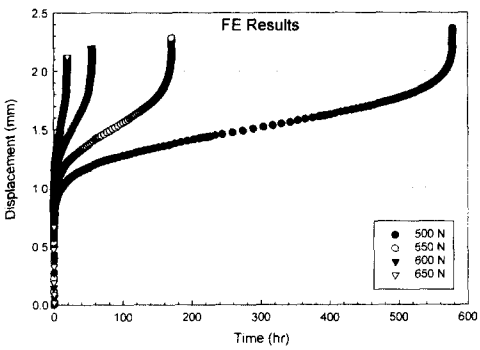

Fig. 3 Punch displacement vs. time curve obtained by FEA

증하기 위해 SP 크리프 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 재료는 고온용 설비에 사용되는 9Cr강 재료로서 Table 2에 시험 재료의 화학적 조성을 나타내었다. SP 시험편은 10×10×0.5 mm의 크기로 가공되었으며 연마지를 이용하여 시험편 양쪽 표면을 연마하였다. 최종 연마시에 No. 2000번 연마지를 사용하였다.

SP 크리프 시험장치는 최대하중 용량이 3000N이며 크리프 시험부 내의 지그와 펀치는 인코넬(inconel) 재질을 사용하여 제작하였다. 볼은 실험시 매번 교체하여 사용하였으며 실험후 볼의 변형은 거의 발생하지 않았다. Fig. 2에서와 같이 지그는 시험편을 지지하는 상부 다이(die) 및 하부 다이, 그리고 시험편에 하중을 부가하기 위한 펀치와 볼로 구성되어 있다. Fig. 2에서 d는 2.4 mm, a는 4 mm, D는 5 mm, t는 0.5 mm, R은 0.2 mm이다. 시험편을 상부 다이와 하부 다이 사이에 위치시킨 후에 4개의 볼트를 사용하여 다이 사이를 죄어서 고정시켰다. 펀치와 직경 2.4 mm의 볼을 통해 시험편에 일정하중을 가하면 시험편 중앙에서의 처짐을 1 ㎛의 분해능을 가진 LVDT(linear variable displacement transducer)를 이용하여 측정하여 일정한 시간주기로 컴퓨터에 측정값을 저장하였다. 시험편 온도의 오차범위는 ±1℃ 이며 고온에서 발생하는 시험편의 표면산화에 따른 두께감소 등의 오차를 제거하기 위해 알곤 불활성 가스 분위기에서 시험을 실시하였다. 566℃의 시험온도에서 515N, 555N, 645N, 685N의 정하중을 펀치를 통해 볼에 각각 부가하여 SP 크리프 시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 결과

3.1.1 SP 크리프 해석에 의한 변위-시간선도

Fig. 3에 4가지의 하중조건에 대하여 유한요소해석을 수행하여 얻은 부하시간에 따른 SP 펀치의 변위선도를 나타내었다. 부하시간이 경과함에 따라 초기 비선형구간, 선형구간 및 파단시의 비선형구간의 세 단계 크리프 거동이 일축 크리프 시험의 경우와 유사하게 나타났으며 작용하중에 따라 SP 크리프 곡선의 거동이 크게 변화함을 알 수 있었다. 작용하중이 증가함에 따라 시험편의 초기 변형이 증가하였으며 일정 시간 경과후 2차 크리프 거동과 유사하게 크리프 변형 속도가 일정한 선형구간이 나타났다. 하중이 증가함에 따라 이러한 선형구간의 크리프 속도는 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한 실제 SP 크리프 시험

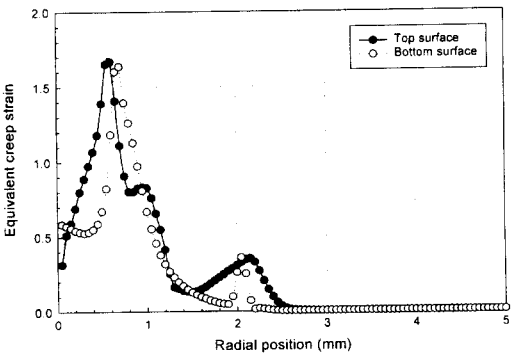

Fig. 4 Variation of equivalent creep strain along the radial position of the specimen

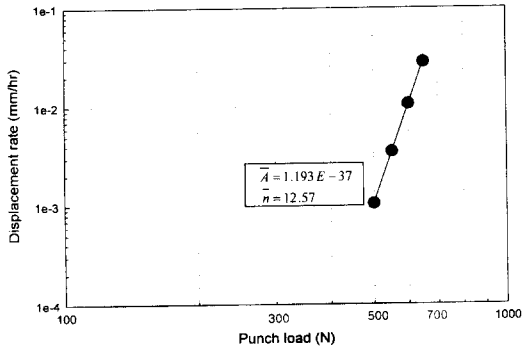

Fig. 5 Relationship between displacement rate and applied load at linear regime of SP displacement curves

의 경우와 마찬가지로 최종 파단시의 비선형구간에서는 단면적의 감소, 즉 시험편 두께의 감소로 인해 크리프 속도가 현저하게 증가하는 현상이 나타났다.

3.1.2 Von Mises 응력

Fig. 4는 500N의 일정하중이 작용하고 부하시간 380 시간 경과후의 시험편의 반경방향 거리에 따른 유효 크리프 변형률을 나타낸다. 이전 연구에서 알려진 바와 같이[14] 최대 크리프 변형률은 시험편의 중심이 아닌 중심에서 벗어난 거리가 0.65 mm 정도인 부근에서 발생한다. 따라서 이 부분에서 시험편의 두께가 최소가 되면서 네킹이 발생하였다. 이상에서 볼때 최대응력과 최대 크리프 변형률이 발생하는 부분, 즉 볼의 중심에서 0.65 mm 정도 떨어진 위치에서 파단의 발생을 예측할 수 있으며, SP 크리프 시험은 실제로는 이 부분 재료의 크리프 시험이라 할 수 있다.

3.1.3 크리프 상수의 평가

SP 크리프 변위곡선에서 선형구간의 크리프 속도는 일반적인 일축 크리프 시험에서와 마찬가지로 멱급수법칙(power law)을 따른다고 보고되고 있다.[6,10,13] Fig. 5에 작용하중과 선형구간의 크리프 변위 속도와의 관계를 나타내었다. 그림에서처럼 선형구간 변위 속도는 작용하중에 의존하였으며 관계는 식 (1)로 표현할 수 있었다.

$$\dot{\delta} = \overline{A} \cdot P^{\overline{n}} \qquad (1)$$

여기에서 $\overline{A}$는 선형구간의 SP 크리프 상수, P는 작용하중, $\overline{n}$은 SP 크리프 하중지수이다. 선형구간에서의 SP 크리프 상수 $\overline{A}$는 1.193E-37 $N^{-n}hr^{-1}$, 하중지수 $\overline{n}$은 12.57을 나타내었다. 위와 같은 값은 일축 크리프 상수와 비교하면 상당한 차이가 있다. 특히 $\overline{A}$가 많은 차이를 보였다. 따라서 크리프 상수를 측정할 때 일축 크리프 시험을 SP 크리프 시험으로 대체하려면 펀치의 작용하중을 일축 크리프 시험의 응력에 해당하는 값으로 또한 펀치 변위 속도를 크리프 변형률 속도에 해당하는 값으로 환산할 수 있는 식을 연구하여야 한다. SP 크리프 시험관련 연구로 지금까지 알려진 식들은 파단수명을 예측할 때에만 사용할 수 있는 환산식이며 크리프 상수를 결정할 때에는 사용할 수 없었다.

Fig. 6에서는 시험편의 두께가 최소가 되는 부분(중심에서 0.65 mm 떨어진 위치)에서 각각의 작용하중에 대해 부하시간의 경과에 따른 Von Mises 유효응력의 변화를 시험편의 중간면과 하부면에서 나타내었다. Fig. 7에는 Fig. 6과 동일한 위치에서 부하시간의 경과에 따른 등가 크리프 변형률의 변화를 타나내었다. 초기에는 유효응력이 탄소성 변형이 지배적이므로 매우 높지만 점차 시간이 경과할수록 크리프 거동이 지배적인 변형 거동이 되어 유효응력은 감소하고 일정 시간이 경과후 유효응력은 일정한 응력 값에 수렴하였다. 시험 종반부에는 단면적의 급격한 감소에 의해 유효응력이 급격히 증가하였다. 따라서 SP 크리프 시험의 대부분의 구간에서 유효응력

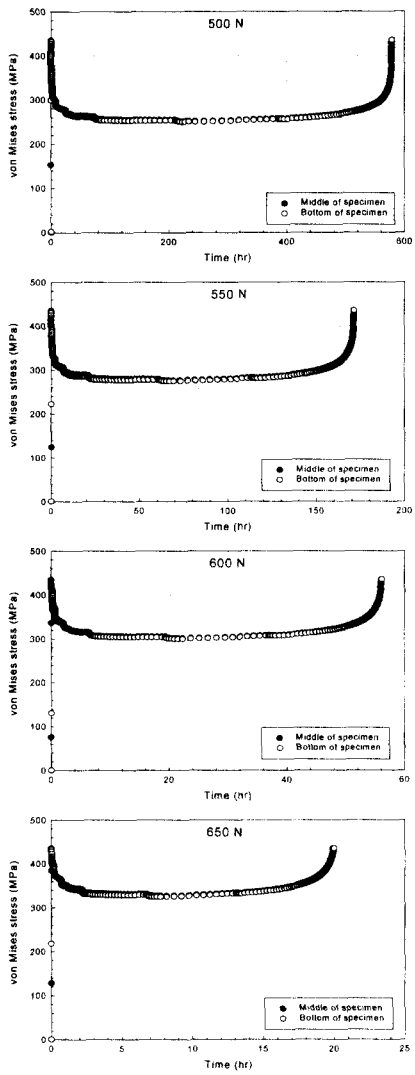

Fig. 6 Von Mises stress vs. time curves under several applied load levels of SP creep analysis

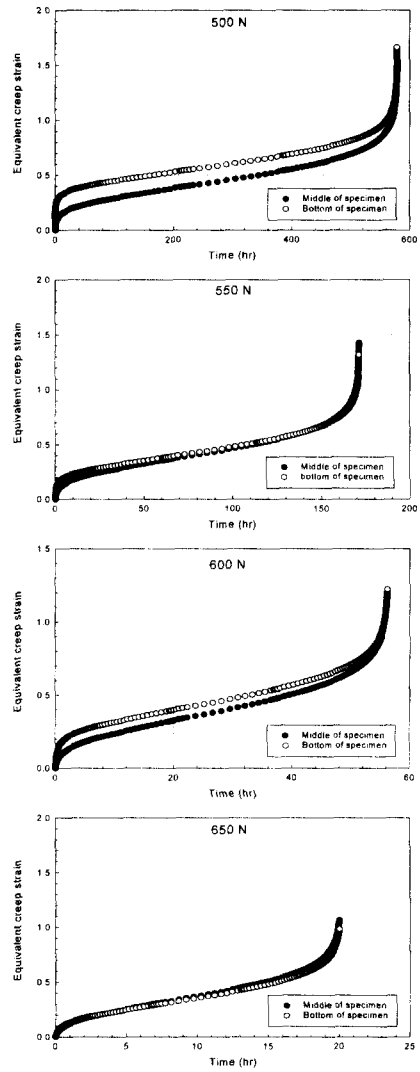

Fig. 7 Equivalent creep strain vs. time curves under several applied load levels of SP creep analysis

이 일정하므로 SP 크리프 시험은 정응력 시험으로 볼 수 있다.[4,14] Fig. 7에서 보인 바와 같이 등가 크리프 변형률 대 부하시간 곡선에서 보면 일정 시간이 경과한 후에는 변형률 속도가 일정한 값을 나타내는 구간이 존재하였다. 이 구간은 Fig. 6의 선형구간과 동일한 구간이다. 등가 변형률은 식 (2)로 표현된다.

$$\overline{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2]} \quad (2)$$

표준시험인 일축 크리프 시험에서는 SP 크리프 시험과는 다르게 작용하중 대신 응력을 선형구간에서의 변위 속도 대신 정상상태 크리프 변형률 속도를 사용하여 크리프 상수 A 및 n 값을 결정한다. 따라서 SP 크리프 시험의 펀치하중을 네킹 발생부의 유효응력으로, 선형구간에서의 변위 속도를 네킹 발생부의 유효변형률 속도로 변환할 수 있는 관계식을 유도하여 본다. Fig. 8에 선형구간에서의 소형펀치 작용하중과 SP 시험편의 네킹 발생부에서의 Von Mises 유효응력의 관

계를 나타내었고, Fig. 9에서는 선형구간의 펀치 변위 속도와 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도의 관계를 나타내었다. 펀치하중이 증가함에 따라 네킹부의 유효응력은 식 (3)과 같이 선형적인 관계가 성립하였으며 선형구간의 펀치 변위 속도가 증가함에 따라 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도도 식 (4)와 같이 선형적 관계가 성립되었다.

$$\begin{aligned} &\text{middle of specimen : } \sigma_e = 0.501P + 3.352 \\ &\text{bottom of specimen : } \sigma_e = 0.497P + 4.116 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} &\text{middle of specimen :} \\ &\qquad \dot{\varepsilon}_e = 0.780\dot{\delta} + 2.893E-5 \\ &\text{bottom of specimen :} \\ &\qquad \dot{\varepsilon}_e = 0.713\dot{\delta} + 9.247E-5 \end{aligned} \tag{4}$$

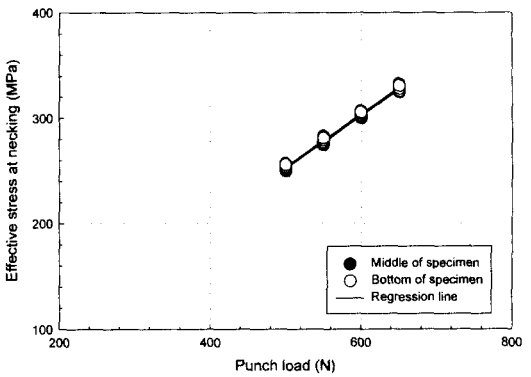

Fig. 8 Relationship between punch load and Von Mises stress at necking location

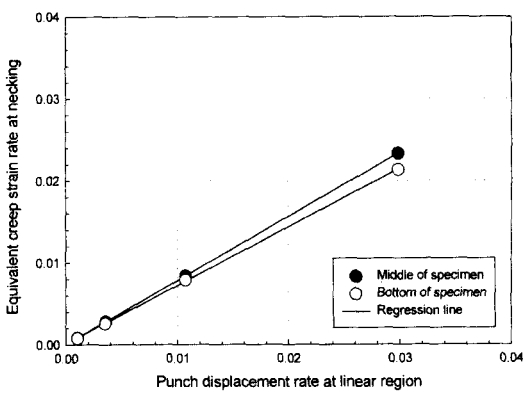

Fig. 9 Relationship between punch displacement rate at linear region and equivalent creep strain rate at necking location

따라서 식 (3)과 식 (4)로부터 다음과 같은 변환식을 얻을 수 있다.

$$P = 2\sigma_e \tag{5}$$

$$\dot{\delta} = 1.34\,\dot{\varepsilon}_e \tag{6}$$

식 (5)는 펀치하중을 유효응력으로 변환시킬 수 있는 관계식이며 식 (6)은 선형구간에서의 펀치 변위속도를 SP 시험편의 네킹 발생부의 등가 크리프 변형률 속도로 변환시킬 수 있는 관계식이다. 식 (5)는 유럽의 COPERNICUS Project[8]에서 SP 크리프 파단수명과 일축 크리프 파단수명을 비교하여 구한 SP 크리프 시험의 펀치하중과 일축 크리프 시험의 응력과의 관계식과 동일함을 알 수 있다.

Fig. 10은 시험편의 두께가 최소가 되는 네킹 발생부분, 즉 파단이 예측되는 부분에서의 유효 크리프 변형률 속도와 Von Mises 유효응력 사이의 관계를 나타내었다. 위의 관계를 이용하여 정상상태 크리프 상수 A와 응력지수 n을 구하면 그 값은 입력 데이터(Table 1에 보인 일축 크리프 시험의 A, n)의 값과 유사할 것이다. 시험편의 중간 부분에서 A는 1.223E-34 $MPa^{-n}hr^{-1}$, n은 12.82의 값으로 나타났으며 시험편의 아래 부분에서 A는 1.122E-34 $MPa^{-n}hr^{-1}$, n은 12.82의 값으로 나타났다. 이 값들은 물론 입력값인 일축 크리프 시험의 정상상태 크리프 상수 A, 1.78E-34 $MPa^{-n}hr^{-1}$와 응력지수 n, 12.76과 매우 비슷하다. 작은 오차는 SP 크리프 시험이 다축

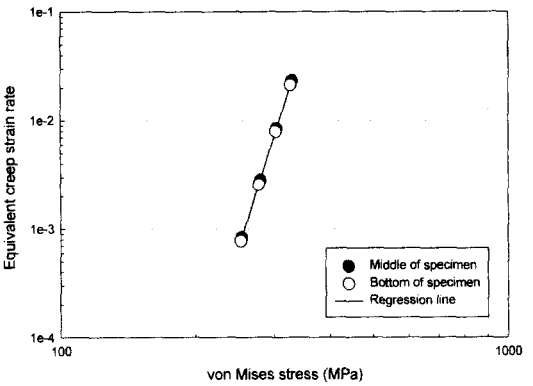

Fig. 10 Creep constants determined from P-δ curves obtain by FEA

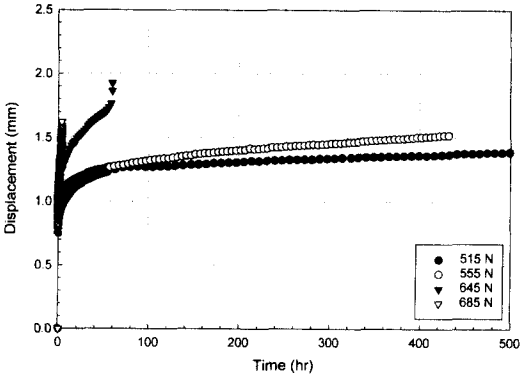

Fig. 11 Experimentally measured punch displacement -time curves of 9Cr steel at 566℃

응력상태에서 크리프 변형이 발생하기 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 이 값들은 SP 크리프 변위 곡선으로부터 식 (5), (6)을 사용한 데이터의 환산없이 직접 하중과 변위 속도로 구한 값 $\overline{A}$, 1.193E-37 $N^{-n}hr^{-1}$및 $\overline{n}$, 12.57의 값과는 상당한 차이가 있음을 주목해야 한다. 따라서 SP 크리프 시험을 사용하여 크리프 상수를 결정하고자 할 때에는 식 (5), (6)을 사용하여 $P-\delta$ 곡선을 $\sigma_e-\dot{\varepsilon}_e$ 곡선으로 변환한 다음 $\sigma_e-\dot{\varepsilon}_e$ 곡선을 일축 크리프 시험으로 얻은 $\sigma_e-\dot{\varepsilon}_e$ 곡선과 동일하게 보고 크리프 상수를 결정하여야 한다.

3.2 SP 크리프 실험에 의한 검증

SP 크리프 시험의 유한요소해석에 의해 얻은 관계식 (5), (6)을 검증해 보기 위해 9Cr강의 실험결과로부터 크리프 상수를 측정해서 그 정확성을 검증해 보면 다음과 같다. 566℃의 온도에서 515N, 555N, 645N, 685N의 정하중 조건에서 SP 크리프 시험을 실시하여 측정된 SP 펀치의 변위선도를 Fig. 11에 나타내었다. 또한 변위선도의 선형 크리프 구간에서 구한 펀치의 변위속도와 펀치하중 데이터 및 식 (5), (6)을 사용하여 환산한 σ_e, $\dot{\varepsilon}_e$ 데이터를 Table 3에 나타내었다. 변환된 σ_e, $\dot{\varepsilon}_e$ 데이터를 이용하여 정상상태 크리프 상수 A와 하중지수 n을 구하면 Fig. 12에 보인 그래프로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = 5.898E-35\sigma^{12.64} \quad (7)$$

Table 3 Experimentally measured P and $\dot{\delta}$ values and converted σ_e, $\dot{\varepsilon}_e$ values

P	σ_e	$\dot{\delta}$	$\dot{\varepsilon}_e$
515	257.5	2.601E-4	1.938E-4
555	277.5	5.039E-4	3.754E-4
645	322.5	4.224E-3	3.147E-3

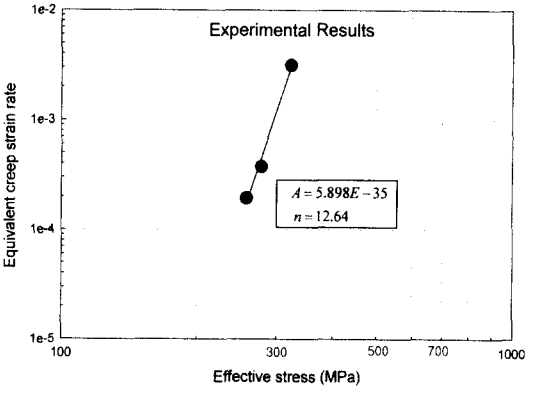

Fig. 12 Creep constants determined from onverted σ_e, $\dot{\varepsilon}_e$ values obtained by experiment

즉, SP 크리프 시험 결과와 본 연구에서 제안한 변환식을 이용하여 구한 정상상태 크리프 상수와 응력지수는 일축 크리프 시험으로부터 구한 값과 매우 유사하다. 오차의 원인으로 고려되어져야 할 부분은 일축 크리프시험은 일축 응력상태에서 크리프 변형이 발생하지만 SP 크리프 시험은 다축 응력상태에서 크리프 변형이 발생하기 때문에 정상상태 크리프 상수 및 응력지수에 약간의 차이가 발생하리라 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SP 크리프 시험을 사용하여 얻은 펀치 변위선도부터 일축 크리프 시험의 정상상태 크리프 상수 및 응력지수를 얻는 방안에 대해 연구하였으며 실험적 방법 및 해석적 방법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SP 크리프 시험의 선형구간에서 펀치하중이 증가함에 따라 네킹부의 유효응력은 선형적으로 증가하였으며 펀치 변위 속도가 증가함에 따라 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도도 선형적으로 증가하였다.

(2) SP 크리프 시험의 펀치하중과 선형구간 변위 속도를 일축 크리프시험의 작용응력과 등가 크리프 변형률 속도로 변환할 수 있는 다음과 같은 관계식을 구하였다.

$$\sigma_e = 0.5P, \quad \dot{\varepsilon}_e = 0.745\,\dot{\delta}$$

(3) SP 크리프 시험의 결과로부터 재료의 2차 크리프 상수와 응력지수를 결정할 수 있는 절차를 제안하였으며 실험에 의해 검증하였다.

후 기

본 연구는 2000년도 원자력 연구개발 중장기 계획사업인 "경년열화 손상관리 적용기술 개발" 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 윤기봉, 1992, "고온 사용설비 파손방지 기술개발," 과학기술처 보고서, KRISS-92-88-IR.

(2) 한상인, 정세희, 윤기봉, 1997, "입계부식법에 의한 사용중인 화력발전소 요소의 잔여수명 평가," 대한기계학회논문집 A, 제21권, 제1호, pp. 22~31.

(3) 김효진, 정용근, 박종진, 2000, "발전소 고온부의 수명 평가를 위한 소형 시편용 크리프 시험기의 개발," 대한기계학회논문집 A, 제24권, 제10호, pp. 2597~2602.

(4) 박태규, 윤기봉, 2000, "소형펀치 크리프 시험에 대한 수치해석 및 실험연구(I)," 대한기계학회 2000년도 제2회 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 178~183.

(5) Parker, J. D. and James, J. D., 1993, "Disc-Bend Creep Deformation Behavior of ½Cr½ Mo¼V Low Alloy Steel," *Fifth International Conference on Creep and Fracture of Engineering Material and Structures*, pp. 651~660.

(6) 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.

(7) Ule, B., Sustar, T., Dobes, F. and Milicka, F., 1997, "Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components: Outcomes from an Interlaboratory Exercise," *Intelligent Software System in Inspection and Life Management of Power and Process Plants*, pp. 263~276.

(8) Tettamanti, S. and Crudeli, R., 1998, "Small Punch Creep Test : A Promising Methodology for High Temperature Plant Components Life Evaluation," *BALTICA VI Plant Maintenance for Managing Life & Performance*, Vol. 2, pp. 501~509.

(9) Parker, J. D. and Stratford, G. C., 1998, "The Application of Miniature Disc Testing for the Assessment of Creep Damage in CrMoV Rotor Steel," *BALTICA VI Plant Maintenance for Managing Life & Performance*, Vol. 2, pp. 477~488.

(10) Ule, B., Sustar, T., Dobes, F. and Milicka, F., 1999, "Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components," *Technology. Law and Insurance*, Vol. 4. pp. 283~293.

(11) Li, W. and Rodgers, B., 1999, "A Finite Element and Experimental Study of Punch and Bulge Testing," *Key Engineering Materials*, Vol. 167-168, pp. 55~63.

(12) Brookfield, D. J., Li, W. and Rodgers, B., 1999, "Material Properties from Small Specimens Using the Punch and Bulge Test," Journal of Strain Analysis, Vol. 34, No. 6, pp. 423~435.

(13) Dobes, F., Milicka, K., 2000, "Comparison of Creep Properties of Power Plant Pipe Bends after Long Term Exposure," *26th MPA-Seminar*, pp. 24.1~24.10.

(14) 박태규, 윤기봉, 장창희, 2001, "소형펀치 크리프 시험중 측정하는 변수에 대한 연구" (submitted to KSME)