

소형편치 크리프 시험중 측정하는 변수에 대한 연구

박태규[†] · 심상훈* · 윤기봉** · 장창희***

(2001년 5월 19일 접수, 2001년 10월 19일 심사완료)

A Study on Parameters Measured during Small Punch Creep Testing

Tae Gyu Park, Sang Hoon Shim, Kee Bong Yoon and Chang Hee Jang

Key Words: Creep(크리프), Time-Dependent Fracture Mechanics(고온파괴역학), Small Punch(소형편치), Power Law Creep(멱급수 크리프), FEA(유한요소해석)

Abstract

An effort is made in this study to deepen understanding of small punch(SP) creep testing which has been a round for about 10 years as a substitute for the conventional uniaxial creep testing. Even though considerable numbers of SP creep test program have been performed, most of the tests were aimed at measuring creep rupture lives only. Very few studies showed interest on the meaning of what we were really measuring during the SP creep tests. In this paper meanings of the parameters measured during the SP creep testing, such as punch load and punch displacement rate are investigated using finite element analysis. It was shown that the measured parameters must represent the stress and strain rates of the material at the annular region located at about 0.65 mm from the center of the SP specimen. The material in this location would go through constant maximum stress and strain rate during the testing. Experimental verification is also discussed.

1. 서 론

고온 설비 재료의 사용중 재질열화도 및 잔여 수명 평가법으로 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)으로 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.^(4~13) 이 방법은 소형편치 크리프 시험법(small punch creep test) 또는 SP 크리프 시험법으로도 불리며 파괴인성평가에 사용되던 SP 시험법을 고온 분위기 및 불활성 가스환경에서의 정하중 시험으로 수정한 것으로 처음에는 증기터빈로터의 고온 크리프 사용수명을 효과적으로 평가하기 위해 개발된 시험법이다.^(5,6) SP 크리프 시험법은 보통 10×10×0.5 (mm)의 작은 디

[†] 책임저자, 회원, 중앙대학교 대학원
E-mail : tkpark@ms.cau.ac.kr
TEL : (02)821-1547 FAX : (02)812-6474

* 회원, 중앙대학교 대학원

** 회원, 중앙대학교 기계공학부

*** 회원, 한전 전력연구원

Table 1 Material properties of the tested 0.5Cr-0.5Mo-0.25V casting steel at 538°C

Elastic Modulus (GPa)	ν	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	D (MPa ^{-m})	m	A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
112	0.2	227	373	1.524E-20	7.27	7.500E-33	11.64

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

스크형 시편이 사용되므로 실기에서 시편 채취가 매우 용이할 뿐만 아니라 직접적인 크리프 잔여 수명을 측정할 수 있다.

SP 크리프 시험에 관한 연구는 1994년부터 수행된 유럽공동연구인 COPERNICUS 프로젝트가 대표적이며^(7,10) 이외에도 유럽 몇 개의 연구팀이 실험연구를 수행하고 있다.^(9,13) 이들의 연구는 SP 크리프 시험을 사용하여 크리프 파단수명을 결정하는 방법에 대한 연구가 대부분이다. 즉, 크리프 수명에 관한 Monkman-Grant 식의 적용성, 크리프 수명식의 활성화에너지 값의 측정 등의 연구가 수행되었다.^(7,10) 일축 크리프 시험에서는 시험응력(σ)과 온도(T)를 변화시키면서 파단수명(t_f)을 측정하여

$t_f = A_f \cdot \sigma^{-n_f} \exp(Q_f/RT)$ 로 표현되는 Dom 방정식의 상수인 A_f , n_f 와 파단 활성화에너지 Q_f 를 측정하였다. 또한 SP 크리프 시험 결과로부터는 펀치하중(P)과 온도(T)를 변화시키면서 SP 크리프 파단수명(t_f)을 측정하여 $t_f = B_f \cdot P^{-n_f} \exp(Q_f/RT)$ 로 표현되는 식에서 상수 B_f 와 n_f 를 측정하고 활성화에너지 Q_f 값을 측정하였다. 이들 연구 결과에서는 두 시험에서 n_f 와 Q_f 의 측정값이 유사함을 근거로 SP 크리프 시험으로 이 상수들을 일축 크리프 시험 대신 측정할 수 있음을 주장하고 있다.

그러나 A_f 와 B_f 값은 상이하므로 결국은 SP 크리프 시험으로 일축 크리프 시험에서와 동일한 파단수명을 측정하기 위해서는 A_f 측정을 위한 연구가 필요하다고 하겠다. 이외에도 SP 크리프 시험에 의해 실제로 측정되고 있는 변수인 SP 하중 및 펀치변위 등이 의미하는 것이 무엇인지, 즉 이들 측정값으로 어떤 재료물성을 예측할 수 있는지에 대한 고찰이 부족하다고 볼 수 있다. 또한 SP 크리프 시험으로 크리프 상수인 멱급수 크리프 지수 및 멱급수 크리프 계수 등을 측정하

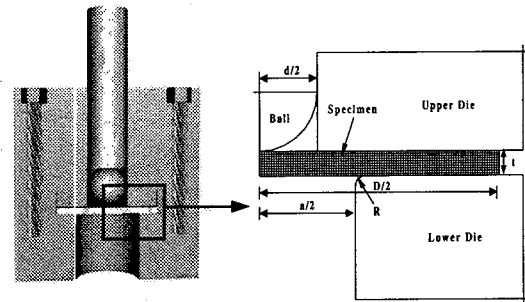


Fig. 1 Finite element modeling of small punch testing

는 방법에 대해서는 연구 결과가 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 우선 SP 크리프 시험 중에 시편에 발생하는 응력 및 변형률 상태와 측정되는 변수의 의미에 대해 상세히 고찰하여 SP 크리프 시험에 대한 이해도를 높이고 향후 크리프 상수를 측정하는 방법을 연구하는 방향에 대한 근거를 제시하고자 한다.

본 연구에서는 일정 하중조건에서 부하시간 경과에 따른 최대응력부의 유효응력 및 등가 크리프 변형률의 변화와 반경방향 위치에 따른 응력 및 변형률의 변화 등을 유한요소해석을 통해 연구하였으며, 실험으로 검증하였다.

2. 유한요소해석 및 실험

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소의 터빈케이싱 재료로 사용되는 0.5Cr-0.5Mo-0.25V강이다. 유한요소해석에 사용할 재료의 입력 물성 데이터를 Table 1에 나타내었다. Table 1의 재료물성은 538°C에서 실측한 0.5Cr-0.5Mo-0.25V강의 고온 물성 데이터이다.⁽¹⁴⁾ 탄성-크리프 및 탄소성-크리프 해석을 수행하였으며 탄소성-크리프 해석시 소성 변형 구간은 멱급수 소성변칙(power law plasticity)에 따른다고 가정하였다. 일정하중 조건

에서 450N, 550N, 650N의 정하중을 펀치에 부가하여 SP 크리프 변위곡선을 측정하고 주요 부위에서 응력 및 변형률을 조사하였다. 하중유지시간은 1000 시간까지 해석하였다.

유한요소해석에는 등방성 탄소성 재료를 사용하였으며 대변형 이론을 적용하였다. 사용된 모델은 축대칭 조건을 이용하여 Fig. 1에 보인바와 같이 SP 크리프 시험부의 축대칭면을 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 1111개였다. 시험편과 볼, 시험편과 다이 사이의 접촉면에는 모두 접촉요소면(ABAQUS Library Contact Surface)을 배치하였다. 볼과 다이는 강체로 가정하였으며 시험편 만이 Table 1에 보인 재료 물성값을 갖는다고 가정하였다. 시험편과 볼의 대칭축상 절점들은 대칭축에 수직방향 성분을 구속하여 축대칭 조건을 만족시키도록 한 후에, 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. 이때 볼의 직경 d 는 2.4 mm, 시편 크기 D 는 5 mm, 하부다이의 구멍 직경 a 는 4 mm, 시편 두께 t 는 0.5 mm, 다이 모서리 반경 R 은 0.2 mm 이다.

또한 유한요소해석을 수행한 형상과 동일한 SP 크리프 시험기를 사용하여 538℃의 시험온도에서 450N의 정하중을 펀치를 통해 볼에 부가하여 SP 크리프 시험을 실시하여 부하시간에 따른 펀치 변위곡선을 측정하였다. 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. 지그는 시험편을 지지하는 상부 다이(die) 및 하부 다이, 그리고 시험편에 하중을 부가하기 위한 펀치와 볼로 구성되

어 있다. 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 μm의 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 불활성가스 분위기에서 시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 결과

3.1.1 SP 크리프 해석에 의한 시간-변위선도

Fig. 2에 3개의 하중에 대하여 탄소성-크리프 유한요소해석을 수행하여 얻은 부하시간에 따른 SP 펀치의 변위선도를 나타내었다. 하중이 높은 경우 부하시간이 경과함에 따라 초기 비선형구간, 선형구간, 파단시의 비선형구간의 세 단계 크리프 거동이 일축 크리프 시험의 경우와 유사하게 나타났으며, 이는 작용하중이 작은 경우에도 해석시간을 연장하면 동일하게 나타났다. 작용하중이 증가함에 따라 시험편의 초기 변형은 증가하고 부하시간이 경과 후 2차 크리프 거동과 유사하게 크리프 변형 속도가 일정한 선형구간이 나타났다. 하중이 증가함에 따라 이러한 선형구간의 크리프 속도도 증가한다. 또한 최종 파단시

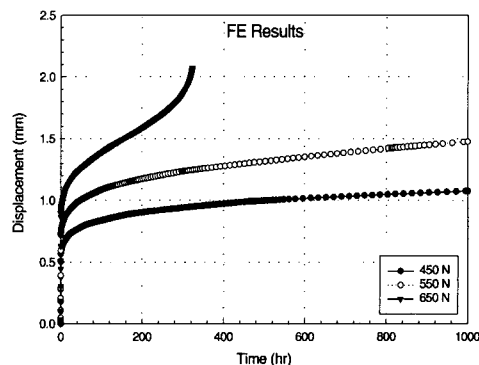


Fig. 2 Punch displacement vs. time curve obtained by FEA

의 비선형구간이 시작되는 점에서는 SP 시험편의 단면적의 감소, 즉 네킹이 발생하여 SP 시험편 두께의 감소로 인해 크리프 속도가 현저하게 증가하는 현상이 나타났다. 이는 SP 크리프의 실험중에 관찰되는 것과 동일하다. 즉 탄소성-크리프 유한요소해석으로 실제 SP 크리프 실험시에 발생하는 여러 현상들을 동일하게 모사할 수 있음을 확인하였다.

3.1.2 탄성-크리프와 탄소성-크리프 해석의 비교
 실제 실험재료는 고온에서는 무시할 수 없을 정도의 소성 변형을 동반하는 탄성-소성-크리프 거동 재료이다. 따라서 소성의 영향을 고려하기 위해서 일반적으로 수행되는 탄성-크리프 해석 외에 소성을 고려한 탄소성-크리프 해석을 각각 수행하였다. Fig. 3에 두 결과를 비교하였다. 부하된 하중이 편치 하부의 시편에 초기 소성변형을 발생시키므로 두 해석 결과를 비교하면 초기 변위에 약간의 차이가 나타났다. 그러나 부하된 하중의 크기에 관계없이 Fig. 3에 보였듯이 부하 시간의 경과에 따른 SP 편치 변위와 변위속도의

차이는 거의 발생하지 않았다. 따라서 SP 크리프 시험의 시간-변위선도를 구함에 있어서는 소성의 고려가 해석결과에 크게 영향을 미치지 않는 듯이 여겨진다. 그러나 시험편의 중앙에서 0.55 mm 떨어진 부분의 시험편 상부표면 및 하부표면에서 유효응력의 변화를 부하시간에 따라 나타낸 Fig. 4의 결과를 보면 두 해석 결과에 상당한 차이가 있다. 탄성-크리프 및 탄소성-크리프 곡선의 유효응력을 비교하여 보면 탄성-크리프 해석의 경우 초기에 1200 MPa 이상 응력이 크게 상승했다가 급속히 이완되나, 탄소성-크리프 해석의 경우에는 400 MPa 정도만 응력이 상승했다가 이완됨을 볼 수 있다. 전자는 볼 하부의 시편사이에 점접촉에 의해 큰 탄성응력이 발생하게 되므로 이점에서 소성변형 거동을 무시해서 발생하는 비현실적인 현상이다. 따라서 국부적인 응력 등을 연구할 때에는 소성을 고려하여야만 실제 현상을 모사할 수 있음을 알 수 있다. 이상의 이유 때문에본 논문에서는 소성의 영향을 고려한 탄소성-크리프 해석을 수행하였다.

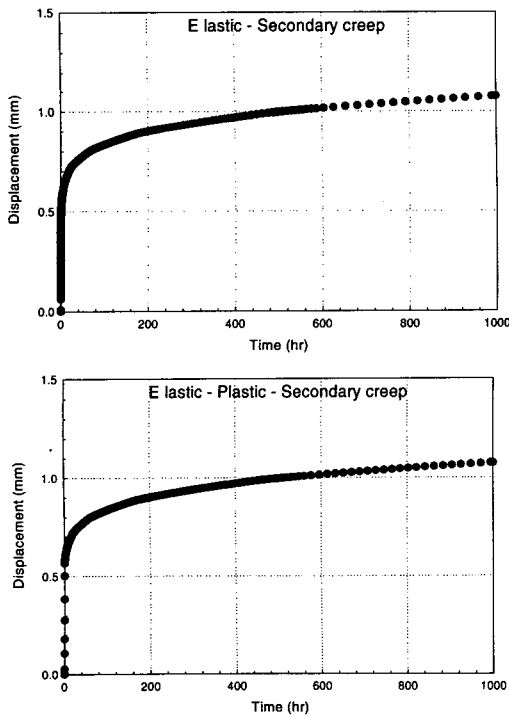


Fig. 3 Difference of displacement vs. time curves between elastic-creep and elastic-plastic-creep analysis

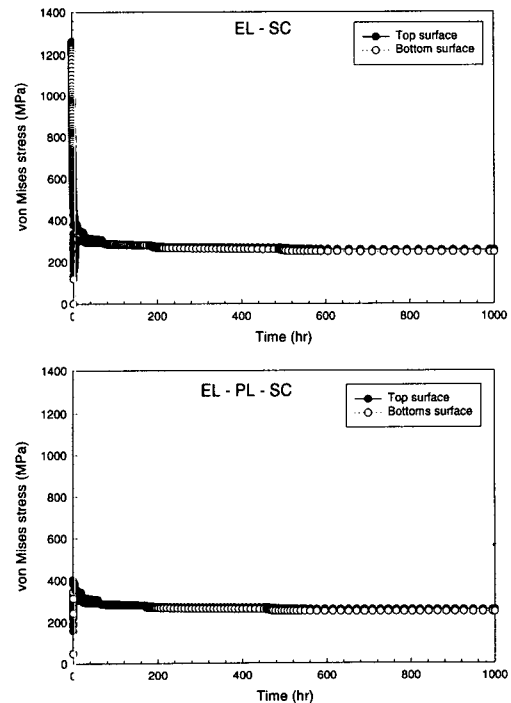


Fig. 4 Difference of Von Mises stress vs. time curves between elastic-creep and elastic-plastic-creep analysis

3.1.3 Von Mises 응력 및 등가 크리프 변형률

Fig. 5는 450N의 일정하중이 작용하고 부하시간 1000 시간 경과후의 시험편의 반경방향 거리에 따른 Von Mises 응력과 등가 크리프 변형률을 나타내었다. 유효응력의 급격한 변화가 발생한 점이 나타나는데 이는 시험편의 하부면과 다이의 접촉에 의한 것이다. 이점 외에는 최대 유효응력 및 최대 등가 크리프 변형률은 시험편의 중심이 아닌 중심에서 벗어난 거리가 0.65 mm 정도인 부위에서 발생하며 응력이 최대인 점과 변형률이 최대인 위치가 두 경우 모두 일치하고 있다. 부하시간이 경과함에 따라 이 부분에서 시험편의 두께가 최소가 되면서 네킹이 발생하고 파단이 발생한다. 이상의 해석 결과를 볼 때 최대응력과 최대 크리프 변형률이 발생하는 부분, 즉 볼의 중심에서 0.65 mm 정도 떨어진 부분에서 파단의 발생을 예측할 수 있었으며, 실제의 SP 크리프 실험 결과에서도 동일한 부위에서의 파단의 발생을 확인할 수 있었다. 따라서 SP 크리프 시험은 시험중 이 부분의 재료에 대한 크리프 시험으로 간주 할 수 있다.

이를 일축 크리프 시험의 경우와 비교해 보면 유사성을 찾을 수 있다. 즉 일축 크리프 시험편도 단면이 최소이면서 단면이 일정한 게이지부에서만 정응력 크리프 시험을 수행하는 것이며 게이지부 이외의 지그(jig)부는 일정한 하중을 가하기 위한 수단으로만 존재하는 것과 같이, SP 크리프 시험도 볼을 사용하여 하중을 가하는 부분의 시험편, 즉 볼과 접촉하는 부위와 상하 다이로 클램핑된 시험편부위는 시험대상이 아니며, 시험부위에 시험중에 최대응력이 일정하게 가해지도록 하는 지그의 역할을 하는 것이다. 즉 SP 크리프 시험에서 시험부위는 크리프 특성 시험을 수행하는 시험부위는 중심에서 0.65 mm 떨어진 부근의 띠 영역(annular region)이 된다.

SP 크리프 시험에서도 일축 크리프 시험에서와 같이 부하시간이 경과됨에 따라 최대응력 및 최대 변형률이 발생하는 위치가 일정해야 하므로 부하시간이 195 시간부터 1000 시간까지 변화하는 동안 최대변형률 발생위치가 일정인지 확인하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig 6에서 볼 수 있듯이 최대변형률이 발생하는 위치는 부하시간이 경과

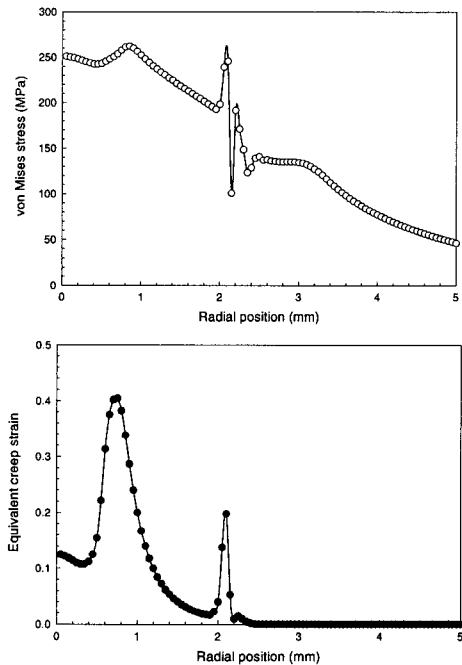


Fig. 5 Variation of Von Mises stress and equivalent creep strain along the radial position of the specimen

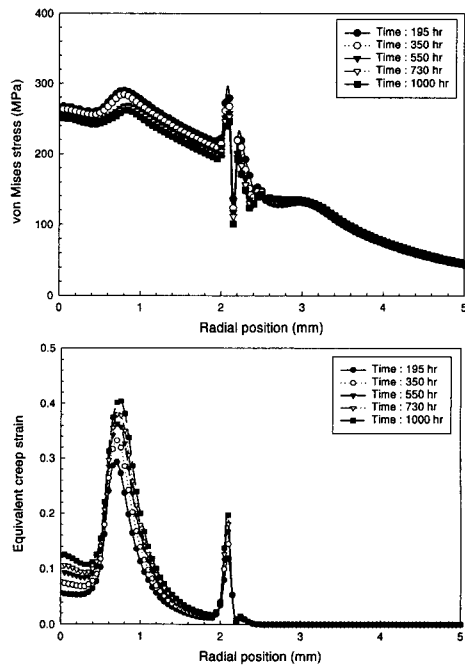


Fig. 6 Variation of Von Mises stress and equivalent creep strain with respect to the elapsed time(bottom surface)

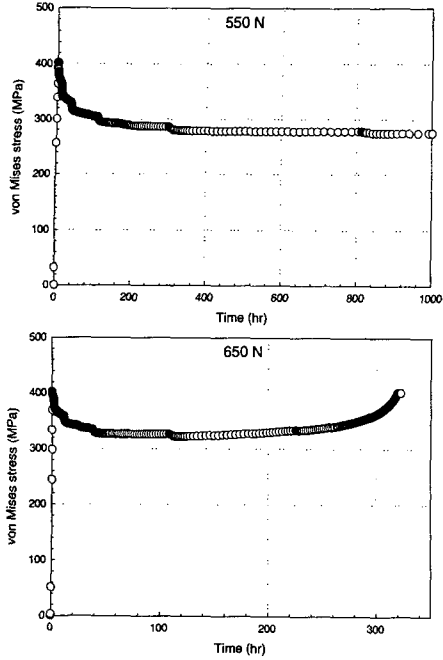


Fig. 7 Von Mises stress vs. time curves under two applied load levels of SP creep analysis

하여도 0.65 mm 부근에서 바뀌지 않음을 알 수 있다. 또한 부하시간에 따른 시험응력의 변화 정도를 알아보기 위해 Fig. 7에 최대응력이 발생하는 위치에서의 유효응력을 부하시간의 경과에 따라 표시하였다. 부하후 초기와 내킹이 발생하는 후기 외에는 대부분의 부하시간동안 시험부의 응력값이 일정함을 알 수 있다. 따라서 일축 크리프 시험과 마찬가지로 SP 크리프 시험도 등응력 크리프 시험으로 간주할 수 있다.

Fig. 8에 부하시간 경과에 따라 단계별로 유효 응력 값이 일정한 값 이상인 영역 및 시편의 변화 형상 과정을 보였으며 Fig. 9에 등가 크리프 변형률에 대해 단계별 변화 형상을 보였다. 중심부에서 0.65 mm 정도 떨어진 부위에서도 시편 상부보다 하부에 비교적 넓은 영역의 최대 변형 부위가 형성됨을 알 수 있다. 따라서 SP 크리프 시험중 측정하는 하중은 이 시험부의 응력 상태를 결정해 주게되며 펀치 변형속도의 대부분도 이 시험부의 변형속도를 반영하게 될 것이다. 즉 SP 크리프 시험으로 파단수명을 측정하거나 크리프 상수를 측정하는 상세 연구를 수행하려면 이 시험부에 대해 연구하여야 한다.

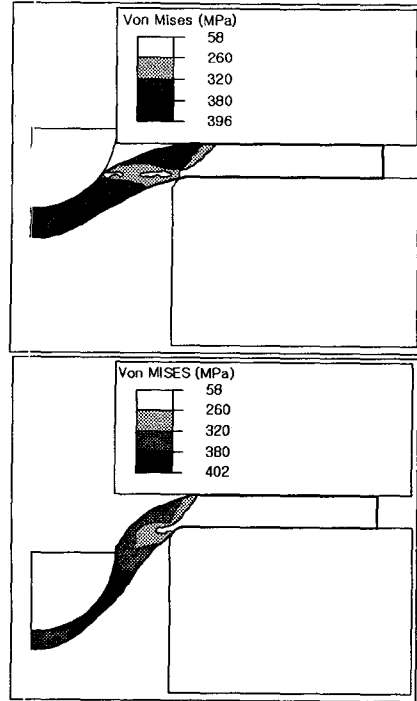


Fig. 8 Contour plots of Von Mises stress at SP load of 650N

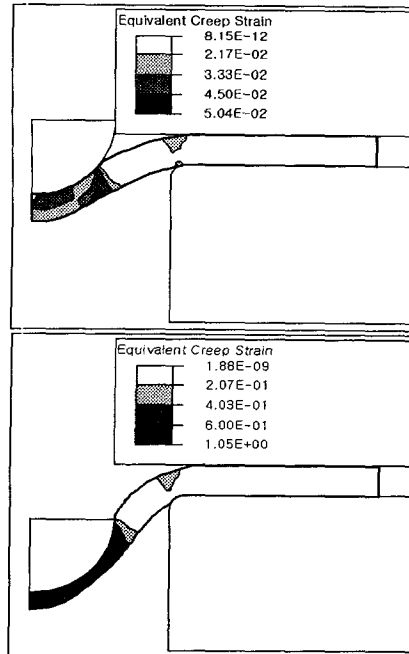


Fig. 9 Contour plots of equivalent creep strain at SP load of 650N

3.2 SP 크리프 시험 결과와 비교

538℃, 450N의 하중조건에서 SP 크리프 시험을 실시하여 파단된 시험편의 파단위치를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 파단이 발생한 위치는 유한요소해석을 통해 예측한 최대 크리프 변형 위치와 동일하였다. SP 시험편 파단전에 SP 시험편의 중심부를 지나도록 시험편을 절단하여 Fig. 11에 보인 방향으로 시험편의 두께를 측정하였으며 측정된 두께 감소량을 Fig. 12에 나타내었다. 이 측정 결과를 보면 Fig. 5에 보인 등가 크리프 변형률 선도와 경향이 일치함을 알 수 있다.



Fig. 10 Photographs showing fracture of a disc specimen of 0.5Cr-0.5Mo-0.25V steel at 538℃ and 450N load

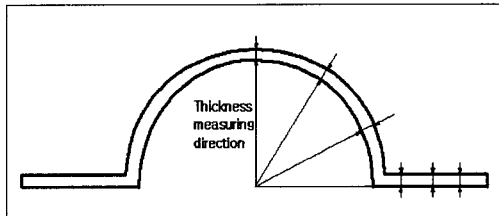


Fig. 11 Measurement of thickness along radial position

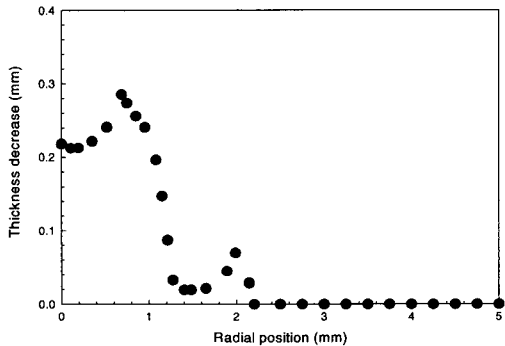


Fig. 12 Thickness decrease measurements along radial position

4. 결 론

본 연구에서는 SP 크리프 시험중 최대 유효응력, 최대 크리프 변형률의 발생 위치가 실험시 시험편의 파단위치와 일치함을 보였으며, SP 크리프 시험중 시험편의 응력 및 변형 거동에 대해 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SP 크리프 시험중 시험편 내의 응력 및 변형거동을 모사하기 위해서는 해석 과정에 소성거동을 필히 고려하여야 하므로 탄소성-크리프 해석을 수행하여야 한다.

(2) SP 크리프 시험중 최대 응력 및 최대 변형률이 발생하는 위치는 중심에서 약 0.65 mm 벗어난 부위이며, 실험중 실제 파단도 이 위치에서 발생하였다.

(3) SP 크리프 시험하중의 부가시간이 경과하여도 최대 응력 및 최대 변형률 발생 위치는 불변하였으며 이 위치에서의 응력값도 시험 초기와 파단 직전 외에는 거의 일정하였다.

(4) 따라서 SP 크리프 시험은 중심에서 0.65 mm 정도 떨어진 부위의 등응력 크리프 시험으로 간주할 수 있다.

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 기술 개발,” 과학기술처 보고서, KRISS-92-88-IR.
- (2) 한상인, 정세희, 윤기봉, 1997, “입계부식법에 의한 사용중인 화력발전소 요소의 잔여수명 평가,” 대한기계학회논문집 A, 제21권, 1호, pp. 22~31.
- (3) 김효진, 정용근, 박종진, 2000, “발전소 고온부의 수명 평가를 위한 소형 시험용 크리프 시험기의 개발,” 대한기계학회논문집 A, 제24권, 10호, pp. 2597~2602.
- (4) 박태규, 윤기봉, 2000, “소형편치 크리프 시험

- 에 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 $\frac{1}{2}\text{Cr}\frac{1}{2}\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$ 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) 권진오, 윤기봉, 이해부, 2000, "0.5Cr-0.5Mo-0.25V 구조강의 크리프-피로 균열성장 거동 모델링," *대한금속재료학회지*, 제38권 2호, pp. 285~291.