

SP 크리프 시험의 유한요소해석을 이용한 재료물성 평가

박태규*·마영화*·윤기봉**·정일석***

Assessment of Material Properties Using Finite Element Analysis for Small Punch Creep Testing

Tae Kyu Park*, Young Wha Ma*, Kee Bong Yoon**, and Ill Seok Jeong***

Key Words: Creep(크리프), Time-Dependent Fracture Mechanics(고온파괴역학), Small Punch Test(소형편치 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 신기 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 소형화하거나, 표준 크리프 시험 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있는 다른 소형시편 시험법 개발이 필요하게 되었다. 가장 적은 재료를 채취하여 잔여 크리프 수명을 측정할 수 있는 방법으로서 소형 디스크 크리프 시험법(miniature disc creep test)이 제안되어 연구되고 있다.^(3,4) 이 방법은 소형편치 크리프 시험법(small punch creep test) 또는 SP 크리프 시험법으로도 불리며 파괴인성 평가에 사용되던 SP 시험법을 고온 분위기 및 불활성 가스환경에서의 정하중 시험으로 수정한 것이다.^(3~9) SP 크리프 시험법은 보통 $10 \times 10 \times$

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

Table 1. Material properties of the tested 9Cr steel at 566°C.

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

$$\text{Note: } \varepsilon_{\text{plastic}} = D\sigma^m, \quad \varepsilon_{\text{creep}} = A\sigma^n$$

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-Grant식의 적용성, 크리프 수명 예측을 위한 활성화 에너지의 측정 등의 연구가 수행되었다.⁽⁶⁾ 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 길과를 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°C에서 실측한 9Cr강의 고온 물성 실제 데이터기도 하다. 탄소성-크리프 해석시 소성 변형 구간은 빠른수 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 모델링하였다. 해석에 사용된 요소는 4 절점 축대칭 요

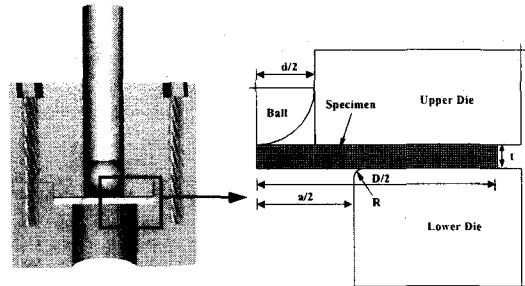


Fig. 1 Finite element modeling of small punch testing.

소이며 4-node reduced integration element (ABAQUS Library Element Type CAX4R)를 사용하였다. 시험편의 요소 수는 총 1000개, 절점 수는 총 1111개 였다. 시험편과 볼, 시험편과 다이 사이의 접촉면에는 모두 접촉요소면(ABAQUS Library Contact Surface)을 배치하였다. 볼과 다이는 강체로 가정 하였으며 시험편 만이 Table 1에 보인 재료 물성값을 갖는다고 가정하였다. 시험편과 상부다이 및 하부다이 표면의 접촉면에서 클램핑(clamping) 하중은 부가되지 않는 것으로 가정하였다. 볼과 시편, 시편과 다이 사이의 쿨롱 마찰계수는 일반적인 강과 강 표면의 마찰계수인 0.2를 사용하였다. Fig. 1에 유한요소 모델링을 위한 상세 그림을 나타내었다. 이때 d는 2.4 mm, D는 5 mm, a는 4 mm, t는 0.5 mm, R은 0.2 mm 이다.

2.2 시험편 및 실험방법

유한요소해석 결과 얻은 관계식의 유효성을 검증하기 위해 SP 크리프 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 재료는 고온용 설비에 사용되는 9Cr강이다. SP 시험편은 10×10×0.5 mm의 크기로 제공되었으며 연마지를 이용하여 시험편 양쪽 표면을 연마하였다. 최종 연마시에 No. 2000번 연마지를 사용하였다. 566°C의 시험온도에서 515N,

550N, 645N, 685N의 정하중을 편치를 통해 불에 각각 부가하여 SP 크리프 시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석 결과

가) SP 크리프 해석에 의한 변위-시간선도

Fig. 2에 4가지의 하중조건에 대하여 유한요소해석을 수행하여 얻은 부하시간에 따른 SP 편치의 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 변形이 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 시험의 경우와 마찬가지로 최종 파단시의 비선형구간에서는 단면적의 감소, 즉 시험편 두께의 감소로 인해 크리프 속도가 현저하게 증가하는 현상이 나타났다.

나) 크리프 상수의 평가

SP 크리프 변위곡선에서 선형구간의 크리프 속도는 일반적인 일축 크리프 시험에서와 마찬가지로 멱급수법칙(power law)을 따른다고 보고되고 있다.^(4,6,9) Fig. 2에서처럼 선형구간 변위 속도는 작용하중에 의존하였으며 관계는 (1)식으로

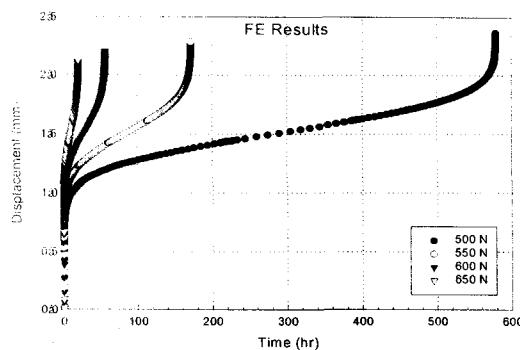


Fig. 2 Punch displacement vs. time curve obtained by FEA.

표현할 수 있었다.

$$\delta = \bar{A} \cdot P^n \quad (1)$$

여기에서 \bar{A} 는 선형구간의 SP 크리프 상수, P 는 작용하중, n 은 SP 크리프 하중지수이다. 선형구간에서의 SP 크리프 상수 \bar{A} 는 $1.193E-37 N^{-n} hr^1$, 하중지수 n 은 12.57을 나타내었다. 위와 같은 값은 일축 크리프 상수와 비교하면 상당한 차이가 있다. 특히 \bar{A} 가 많은 차이를 보였다. 따라서 크리프 상수를 측정할 때 일축 크리프 시험을 SP 크리프 시험으로 대체하려면 편치의 작용하중을 일축 크리프 시험의 응력에 해당하는 값으로 또한 편치 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. 3에서는 시험편의 두께가 최소가 되는 부분(중심에서 0.65 mm 떨어진 위치)에서 각각의 작용하중에 대해 부하시간의 경과에 따른 유효응력의 변화를 시험편의 중간면과 하부면에서 나타내었다. Fig. 4에는 Fig. 3과 동일한 위치에서 부

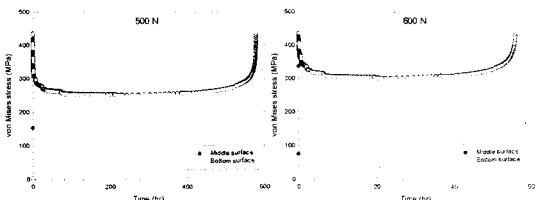


Fig. 3 Von Mises stress vs. time curves under several applied load levels of SP creep analysis.

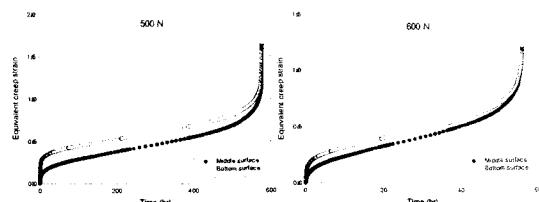


Fig. 4 Equivalent creep strain vs. time curves under several applied load levels of SP creep analysis.

하시간의 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 중반부에는 단면적의 급격한 감소에 의해 유효응력이 급격히 증가하였다. 따라서 SP 크리프 시험의 대부분의 구간에서 von Mises 응력이 일정하므로 SP 크리프 시험은 정응력 시험으로 볼 수 있다. Fig. 4에서 보인바와 같이 등가 크리프 변형률 대 부하시간 곡선에서 보면 일정 시간이 경과한 후에는 변형률 속도가 일정한 값을 나타내는 구간이 존재하였다. 이 구간은 Fig. 2의 선형 구간과 동일한 구간이다. 등가 변형률은 (2)식으로 표현된다.

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

표준시험인 일축 크리프 시험에서는 SP 크리프 시험과는 다르게 작용하중 대신 응력을 선형 구간에서의 변위 속도 대신 정상상태 크리프 변형률 속도를 사용하여 크리프 상수 A 및 n 값을 결정한다. 따라서 SP 크리프 시험의 편치하중을 네킹 발생부의 유효응력으로, 선형구간에서의 변위 속도를 네킹 발생부의 유효변형률 속도로 변환할 수 있는 관계식을 유도하여 본다. Fig. 5에 선형구간에서의 소형편치 작용하중과 SP 시험편의 네킹 발생부에서의 von Mises 유효응력의 관계를 나타내었고, Fig. 6에서는 선형구간의 편치변위 속도와 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도

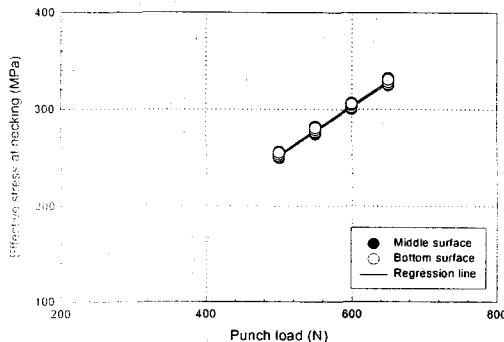


Fig. 5 Relationship between punch load and von Mises stress at necking location.

의 관계를 나타내었다. 편치하중이 증가함에 따라 네킹부의 유효응력은 식(3)과 같이 선형적인 관계가 성립하였으며 선형구간의 편치 변위 속도가 증가함에 따라 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도도 식(4)와 같이 선형적 관계가 성립되었다.

$$\text{middle surface : } \sigma_e = 0.501P + 3.352 \quad (3)$$

$$\text{bottom surface : } \sigma_e = 0.497P + 4.116 \quad (3)$$

$$\text{middle surface : } \dot{\varepsilon}_e = 0.780\delta + 2.893E-5 \quad (4)$$

$$\text{bottom surface : } \dot{\varepsilon}_e = 0.713\delta + 9.247E-5 \quad (4)$$

따라서 (3)식과 (4)식으로부터 다음과 같은 변환식을 얻을 수 있다.

$$P = 2\sigma_e \quad (5)$$

$$\delta = 1.34 \dot{\varepsilon}_e \quad (6)$$

(5)식은 편치하중을 유효응력으로 변환시킬 수 있는 관계식이며 (6)식은 선형구간에서의 편치변위 속도를 SP 시험편의 네킹 발생부의 등가크리프 변형률 속도로 변환시킬 수 있는 관계식이다. 식(5)는 유럽의 COPERNICUS Project⁽⁵⁾에서 SP 크리프 파단수명과 일축 크리프 파단수명을 비교하여 구한 SP 크리프 시험의 편치하중과 일축 크리프 시험의 응력과의 관계식과 동일함을 알 수 있다.

Fig. 7은 시험편의 두께가 최소가 되는 네킹발생부분, 즉 파단이 예측되는 부분에서의 유효크리프 변형률 속도와 von Mises 유효응력 사이

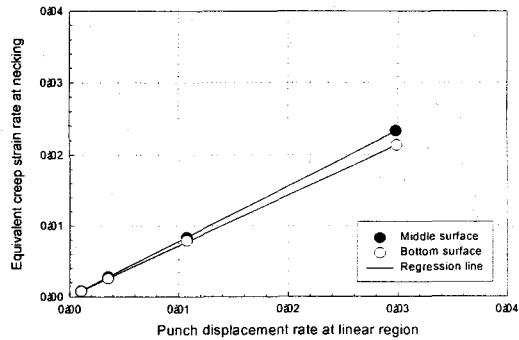


Fig. 6 Relationship between punch displacement rate at linear region and equivalent creep strain rate at necking location.

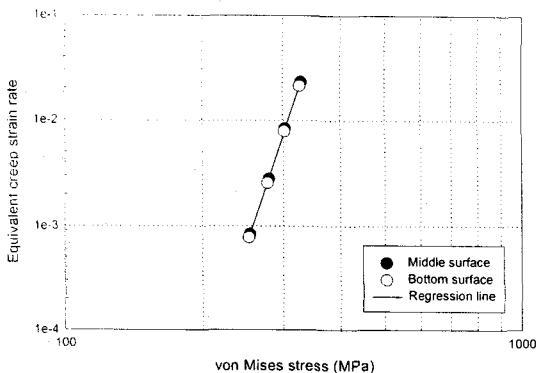


Fig. 7 Creep constants determined from P- δ curves obtain by FEA.

의 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 $1.223E-34$ MPaⁿhr¹, n은 12.82의 값으로 나타났으며 구하였으며 시험편의 아래 부분에서 A는 $1.122E-34$ MPaⁿhr¹, n은 12.82의 값으로 나타났다. 이 값들은 물론 입력값인 일축 크리프 시험의 정상상태 크리프 상수 A와 응력지수 n과 매우 비슷하다. 작은 오차는 SP 크리프 시험이 다축 응력상태에서 크리프 변형이 발생하기 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 이 값들은 SP 크리프 변위 곡선으로부터(5), (6)식을 사용한 데이터의 환산없이 직접 하중과 변위 속도로 구한 값 \bar{A} , $1.193E-37$ Nⁿhr¹ 및 $n=12.57$ 의 값과는 상당한 차이가 있음을 주목해야 한다. 따라서 SP 크리프 시험을 사용하여 크리프 상수를 결정하고자 할 때에는 (5), (6)식을 사용하여 P- δ 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 실현 결과로부터 크리프 상수를 측정해서 그 정확성을 검증해 보면 다음과 같다. 566°C의 온도에서 515N, 555N, 645N, 685N의 정하중 조건에서

SP 크리프 시험을 실시하여 측정된 SP 편치의 변위선도를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 변위선도의 선형 크리프 구간에서 구한 편치의 변위 속도와 편치하중 데이터 및 식(5), (6)을 사용하여 환산한 σ_e , $\dot{\varepsilon}_e$ 데이터를 Table 2에 나타내었다. 변환된 σ_e , $\dot{\varepsilon}_e$ 데이터를 이용하여 정상상태 크리프 상수 A와 하중지수 n을 구하면 Fig. 9에 보인 그래프로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

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

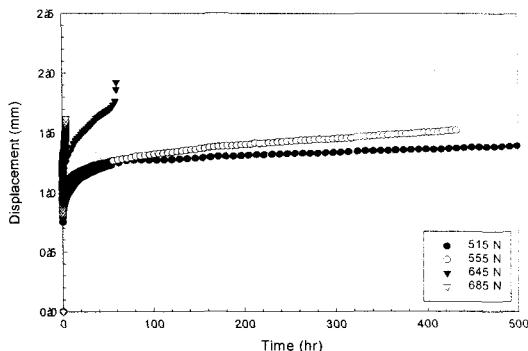


Fig. 8 Experimentally measured punch displacement -time curves of 9Cr steel at 566°C.

Table 2. Experimentally measured P and δ values and converted σ_e , $\dot{\varepsilon}_e$ values.

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

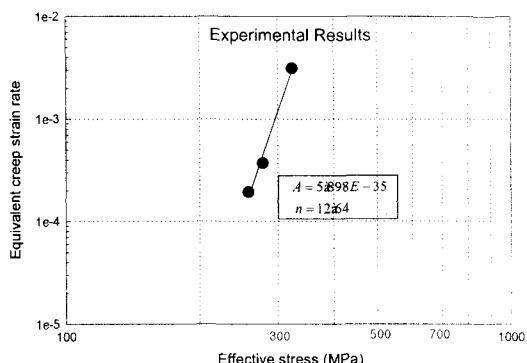


Fig. 9 Creep constants determined from converted σ_e , $\dot{\varepsilon}_e$ values obtained by experiment.

즉, SP 크리프 시험 결과와 본 연구에서 제안한 변환식을 이용하여 구한 정상상태 크리프 상수와 응력지수는 일축 크리프 시험으로부터 구한 값과 매우 유사하다. 오차의 원인으로 고려되어 적야 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. 결론

본 연구에서는 SP 크리프 시험을 사용하여 얻은 편치 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 편치하중이 증가함에 따라 네킹부의 유효응력은 선형적으로 증가하였으며 편치 변위 속도가 증가함에 따라 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도도 선형적으로 증가하였다.

(2) SP 크리프 시험의 편치하중과 선형구간 변위 속도를 일축 크리프시험의 작용응력과 등가크리프 변형률 속도로 변환할 수 있는 다음과 같은 관계식을 구하였으며 SP 크리프 시험의 결과로부터 재료의 2차 크리프 상수와 응력지수를 결정할 수 있는 절차를 제안하였다.

$$\sigma_e = 0.5P$$

$$\dot{\epsilon}_e = 0.745 \delta$$

후기

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) 윤기봉, 한상인, 정세희, 1997, “일계부식법에 의한 사용중인 화력발전소 요소의 잔여수명 평가”, 대한기계학회논문집 A, 21권, 1호, pp. 22~31.
- (3) J. D. Parker and J. D. James, 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.
- (4) J. D. Parker et. al, 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.
- (5) S. Tettamanti and R. Crudeli, 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.
- (6) B. Ule et.al, 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.
- (7) W. Li et al., 1999, “A finite element and experimental study of punch and bulge testing” Key Engineering Materials Vol 167-168, pp. 55~63.
- (8) D J Brookfield, W Li, B Rodgers, 1999, “Material properties from small specimens using the punch and bulge test”, J. of strain analysis, Vol.34, No.6, pp. 423~435.
- (9) F. Dobes & K. Milicka, 2000, “Comparison of creep properties of power plant pipe bends after long term exposure”, 26th MPA-Seminar, pp. 24.1~24.10.