

미소시험편을 이용한 고온 크리프 특성 평가법 개발

유효선*, 백승세**, 이송인*, 하정수***

Development of High Temperature Creep Properties Evaluation Method using Miniature Specimen

Hyo-Sun Yu, Seung-Se Baek, Song-In Lee, and Jeong-Soo Ha

Key Words : Miniaturized Specimen(미소시험편), Small Punch Creep Test(소형펀치 크리프시험), Creep Properties(크리프 특성), Creep Life Fraction(크리프 수명 소비율), Steady State Creep Rate($\dot{\delta}_{ss}$, 정상상태 크리프속도), Creep Activation Energy(Q_{SPC} , 크리프 활성화 에너지), Initial Displacement(δ_0 , 초기변위), Creep Rupture Time(t_r , 크리프 파단시간), Creep Displacement(δ , 크리프 변위), 2.25Cr-1Mo Steel

Abstract

In this study, a small punch creep(SP-Creep) test using miniaturized specimen($10 \times 10 \times 0.5\text{mm}$) has been described for the development of the newly semi-destructive 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 2.25Cr-1Mo(STBA24) steel used widely as boiler tube material and the creep test temperature are varied at $550^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$. The overall deformations of SP-Creep curves are definitely depended with applied load and creep test temperature and show the creep behaviors of three steps like conventional uniaxial creep curves. The steady state creep rate($\dot{\delta}_{ss}$) of SP-Creep curve for miniaturized specimen increases with increasing creep temperature, but the exponential value with creep loading is decreased. The activation energy(Q_{spc}) during SP-Creep deformation with various test temperatures shows 605.7kJ/mol that is greater than 467.4kJ/mol reported in uniaxial creep test. This may be caused by the difference of stress states during creep deformation in two creep test. But from the experimental results, e.g. SP-Creep curve behaviors, the steady state creep rate($\dot{\delta}_{ss}$) with creep temperature, and the exponential value(n) with creep loading, 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.

1. 서론

에너지변화 설비부재의 재질열화 및 수명 평가의 접근방법에는 크게 해석적 방법, 비파괴적 방법 그

리고 파괴적인 방법이 있다. 이들 방법들은 각기 나름대로의 고유한 장점과 단점을 지니고 있으며, 국내·외의 수많은 연구기관에서 많은 관심과 연구가 진행되고 있다. 위의 세 가지 접근방법 중 파괴적인 수명 평가 방법은 최종적인 기계구조물의 열화 및 수명을 평가·관리할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있음에도 불구하고 실기부재에 적용하는 데에는 많은 문제점들을 갖고 있다. 그의 주요한 원인은 일반적

* 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

** 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 한국전력연구원(KEPRI)

인 재료시험 및 파괴역학적 개념에 기초하여 재료의 물성치를 파악하기 위해서는 비교적 대형의 시험편을 필요로 하기 때문이다. 그러나, 설비부재의 건전성에 큰 영향을 주지 않는 범위에서 미소시험편을 채취하여 가동 중에 있는 설비의 현상태 진단과 수명을 정확히 평가할 수 있다면, 수명평가 분야에 있어 매우 유용한 하나의 시험법일 것이다.

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^(1,2). SP시험법은 핵융합로벽의 조사손상(irradiation damage) 영역이 시험편 표면 층에 한정되기 때문에 기존의 재료시험 방법에 비해 이를 보다 효과적으로 평가하기 위해 개발된 시험방법이다^(3,4).

소형편치 시험법은 기존의 인장시험이나 CVN 시험에서 요구하는 시험편의 크기에 비하여 매우 작은 크기의 시험편(10×10×0.5mm)을 이용하는 준비파괴 시험법으로 개발 초기단계에는 재료의 강도(strength)와 연성(ductility)을 구하고자 하는 연구가 행해졌으며⁽⁵⁾, 그 이후에는 수많은 재료시험 분야 즉, 발전설비 부재의 재질 열화도 평가 및 응력부식 균열(stress corrosion cracking : SCC) 감수성 평가 그리고 세라믹과 FGM과 같은 신소재의 재료특성 평가와 강용접부의 국부조직에 대한 파괴인성 평가 등에 적용되고 있다⁽⁶⁻⁹⁾.

본 연구에서는 현재 국내외적으로 미소 역학물성 평가분야에서 많은 관심을 보이고 있는 미소 시험편을 사용하는 소형편치 시험법을 이용하여 고온 환경하에서 2.25Cr-1Mo강의 내열재료를 대상으로 크리프 특성을 평가하고, 이들의 시험결과를 단축 크리프 시험 특성과 비교·검토함으로써 새로운 크리프 시험방법의 개발 가능성을 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험재료와 시험편

본 연구에서 사용된 시험재료는 현재 화력 발전 설비의 내열재료로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo (STBA24)강의 신재이다. Table 1에 재료의 화학적 조성을 나타내었다. 고온 크리프 시험편의 크기는 SP 시험편의 규격인 10mm×10mm×0.5mm로 하였다.

Table 1 Chemical composition of 2.25Cr-1Mo steel. (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.13	0.01	0.42	0.02	0.29	0.12	2.23	1.12

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. 또한 GPIB(general purpose information board)를 사용하여 IBM PC와 interface되어 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 incoel 재질을 사용하여 제작하였다. 또한 시험편의 상부에 ϕ 2.4mm의 Si₃N₄ 세라믹 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로써 시간에 따른 시험편의 크리프 변형 거동을 조사하였다. 그리고 시험편 가열온도의 오차범위는 약 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위로 하였다. 고온 크리프 시험온도는 550℃~600℃로 하였으며, 하중조건은 40kg~80kg으로 제어하였다. 시험도중 시험편의 중앙변위(central displacement : δ)는 LVDT 시스템을 이용하여 최소 0.001mm까지 정밀 계측하였다. 또한 시험중 미소시험편의 표면산화에 따른 시험오차를 제거하기 위해 아르곤(Ar) 분위기에서 실시하였으며, 비교를 위해 대기상태에서도 크리프 시험을 수행하였다. 초기변위량(initial displacement : δ_0)은 하중을 부하한 후 1분이 경과되었을 때의 변위값으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미소 시험편에 의한 SP-Creep 곡선 거동

2.25Cr-1Mo강의 신재를 대상으로 550℃와 600℃의 고온환경에서 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 중앙변위(δ)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

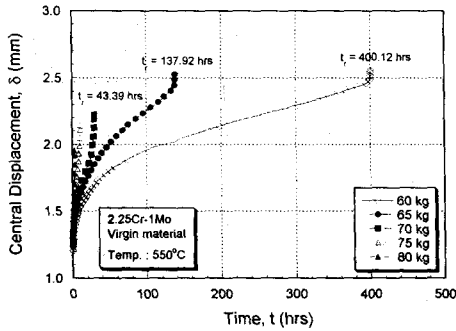


Fig. 1 The central displacement vs. time curve for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 550°C.

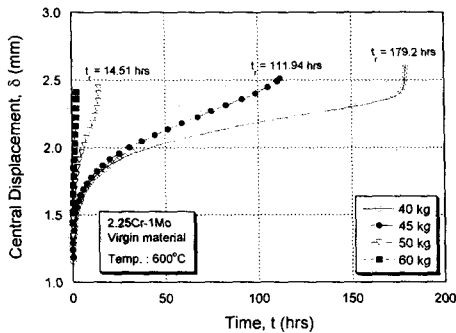


Fig. 2 The central displacement vs. time curve for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 600°C.

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. 동일 시험하중에서 시험온도가 증가함에 따라 정상상태의 2차 크리프 거동은 감소되고 있다. Fig. 3은 단축 크리프 시험의 초기변형률에 대응하는 SP-Creep의 초기변위(δ_0)를 부하조건에 따라 살펴본 그림으로 부하하중이 증가함에 따라 초기변위는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 같은 거동은 시험온도가 증가함에 따라 더욱 증가함을 관찰할 수가 있었다.

Fig. 4는 크리프 변위(creep displacement : δ_c)와 크리프 수명소비율(creep life fraction : t/t_r)과의 상관곡선의 한 예로써 하중크기가 증가함에 따라 크

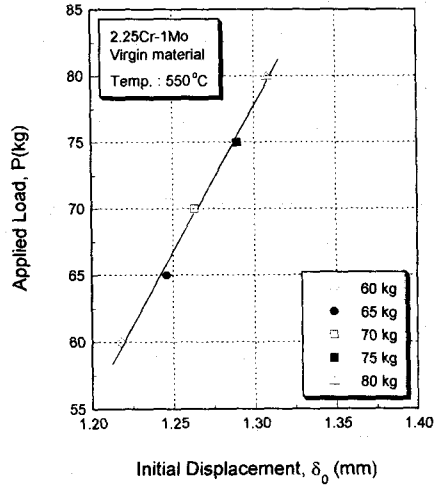


Fig. 3 The relationship between applied load and initial displacement for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 550°C.

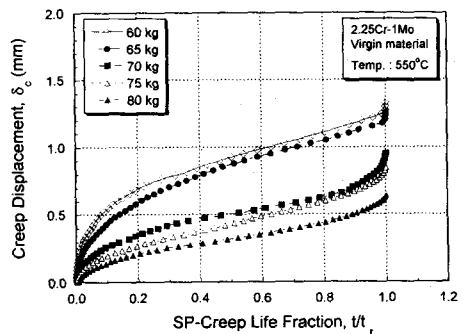


Fig. 4 The creep displacement as a function of the creep life fraction for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 550°C.

리프 변형량은 감소함을 알 수 있다. 여기서 δ_c 는 크리프 중앙변위(δ)에서 크리프 초기변위(δ_0)를 뺀 값이다. 곡선 거동을 볼 때 모든 하중조건에서 뚜렷한 3단계의 크리프 거동을 보이고 있으며, 하중이 감소함에 따라 2단계의 정상 크리프 변형거동이 증가함을 관찰할 수 있다.

3.2 크리프 하중과 정상 크리프 속도와의 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 응력 의존성은 $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ 과 같이 표현된다. 여기서 n 은 응력지수로서 크리프 변형특성을 대변하는 인자이다.

Fig. 5는 SP-Creep 시험에 있어 정상 크리프 속도 (steady state creep rate : $\dot{\delta}_{ss}$)의 부하하중에 대한 의존성을 조사하여 나타낸 결과이다. 대수좌표에서 정상 크리프 속도는 하중에 대해 매우 뚜렷하게 의존함을 관찰할 수가 있다. 이 관계도에서 두인자 사이의 관계는 다음과 같은 식으로 표현 가능하다. 여기서, A 는 재료상수, P 는 작용하중, n 은 하중지수이다.

$$\dot{\delta}_{ss} = A \cdot P^n \dots\dots\dots (식 1)$$

따라서, 다양한 시험하중에 대한 정상 크리프 속도를 나타낸 $\dot{\delta}_{sp}$ vs. P 의 관계도에서 크리프 하중지수는 최소자승법에 의해 구한 결과 550°C, 575°C 그리고 600°C에서 각각 14.65, 13.27 그리고 11.73을 나타내어, 시험온도 증가에 따라 하중지수가 감소함을 보이고 있다. 이같이 하중지수 값이 감소되는 이유는 온도가 증가함에 따라 시험편의 전위밀도가 감소하고, 이에 따라 하중의 감소 효과가 높아지기 때문으로 사료된다. 이 같은 결과는 단축 크리프 시험결과와 전반적으로 같은 거동이므로 SP-Creep 시험의 유효성을 확인할 수 있다. SP-Creep 시험으로부터 구한 $\dot{\delta}_{ss}$ vs P 의 정량적 상관관계 경험식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} 550^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} &= 1.633 \times 10^{-29} P^{14.65} \\ 575^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} &= 7.063 \times 10^{-26} P^{13.27} \\ 600^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} &= 3.467 \times 10^{-22} P^{11.73} \end{aligned} \dots\dots\dots (식 2)$$

3.3 크리프 하중과 크리프 수명과의 관계

화력발전설비는 크게 터빈부재와 보일러부재로 구분된다. 이중 보일러 설비부재의 튜브는 가혹한 운전도중 변형이 생겨도 기능상 문제가 없다면 파단에 이를 때까지의 수명에 의해 설계조건을 결정한다. 따라서 보일러 튜브재의 설계조건에서 크리프 시험에 의한 파단수명은 매우 중요한 비중을 차지

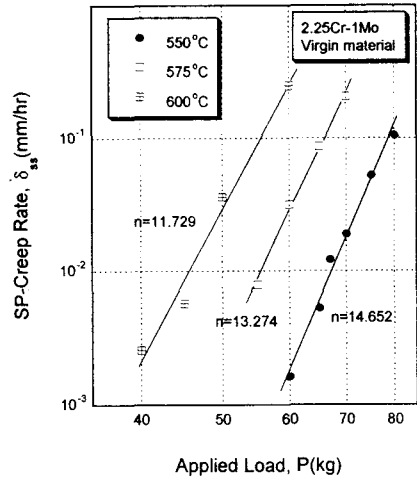


Fig. 5 The relationship between SP creep rate and applied load for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at various temperature.

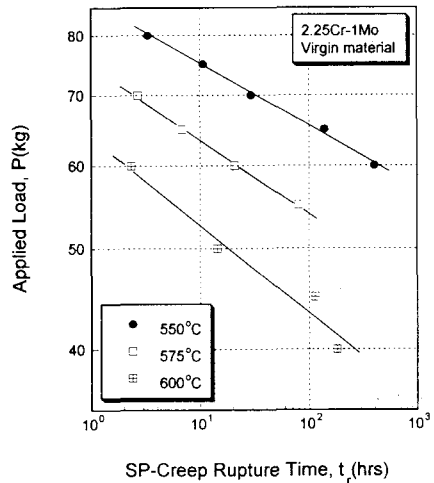


Fig. 6 The relationship between applied load and rupture time for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at various temperature

한다. Fig. 6은 시험온도 조건에 따른 하중과 크리프 파단수명(creep rupture life : t_r)의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 크리프 파단수명은 본 연구의 작용하중 조건 범위에서 하중이 증가할수록 직선적으로 감소하고 있으며, 온도가 상승함에 따라 그 감소율은 증가하고 있어 단축 크리프 시험결과와 매우 유사한 거동을 보이고 있다. 그러나 SP-Creep 시험편의 응력상태가 단축 크리프 시험편과 달리 변형

과정 동안 변화됨을 고려할 때 단축 크리프 시험의 응력과 변형률에 상당한 새로운 인자의 도출과 두 시험결과 사이에 대한 실험적 상관 관계도를 필요로 한다. 현재 본 대학에서는 이에 대한 시험이 진행중에 있다. 본 연구에서 얻은 크리프 하중과 크리프 수명과의 관계식은 다음과 같다.

$$550^{\circ}\text{C} : P = 86.26 t_r^{0.060}$$

$$575^{\circ}\text{C} : P = 74.75 t_r^{0.071}$$

$$600^{\circ}\text{C} : P = 63.97 t_r^{0.084}$$

..... (식 3)

3.4 SP-Creep 시험의 활성화에너지 거동

앞서 설명하였듯이 크리프 변형은 열적 활성화 과정에 의해 진행되므로 크리프 변형속도의 온도의존성은 다음 식과 같은 Arrhenius식에 의해 나타낼 수가 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \exp(-Q_c/RT) \dots\dots\dots (식 4)$$

여기서, Q_c : 크리프 변형에 필요한 활성화 에너지, T : 절대온도, R : 기체상수(2cal/mol·K), A : 재료상수이다. 활성화 에너지를 구하는 방법은 몇 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 여러 개의 시험편을 이용하여 일정한 외력하에서 다양한 온도에서 크리프 시험을 실시한 후 얻은 정상상태 크리프 변형속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)와 온도($1/T$)와의 관계도에서 활성화 에너지를 구하였다. Fig. 7은 그의 시험결과를 나타낸 결과도이다. SP-Creep 변형에 대한 활성화 에너지(Q_{SPC})를 구하면 605.7kJ/mol으로 측정되어졌다.

SP-Creep 시험으로부터 측정되어진 Q_{SPC} 는 2.25Cr-1Mo (STBA24) 강종에 대한 단축 크리프 시험을 수행하여 얻은 응력에 따른 467.4~533.4kJ/mol의 값보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 이것은 현재까지의 실험결과이고, 두 시험에 있어 활성화 에너지의 비교는 더 많은 D/B가 구축되었을 때 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

그러나 본 연구에서 얻은 실험결과들, SP-Creep 곡선거동, 시험온도에 따른 정상상태 크리프 속도($\dot{\epsilon}_{ss}$) 그리고 작용하중별 하중지수(n)와 초기변형(δ_0) 거동 등의 결과로부터 미소시험편을 이용한 SP-Creep 시험법은 고온부재의 크리프 특성 평가를

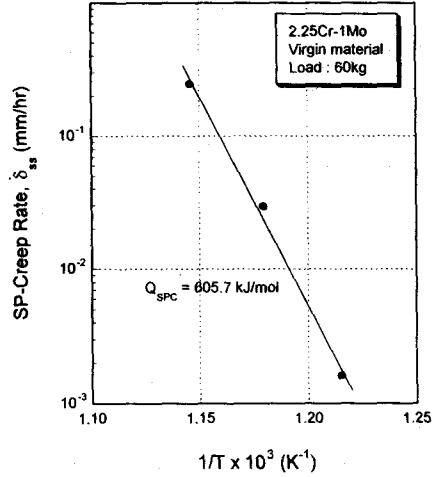


Fig. 7 The relationship between SP creep rate and test temperature for virgin material of 2.25Cr-1Mo steel at 60kg.

위한 새로운 시험법으로 그 가능성을 확인할 수가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 에너지 변환 고온설비 부재의 준비파괴적인 새로운 크리프 시험법의 개발을 위해 발전소 내열재료로 널리 사용되는 2.25Cr-1Mo강을 대상으로 다양한 온도와 하중 조건에서 미소시험편을 이용한 SP-Creep 특성을 조사하였다. 본 시험에서 얻은 시험결과들을 다음과 같다.

1. 미소시험편에 의한 SP-Creep 곡선의 전체적인 변형거동은 작용하중 및 시험온도에 따라 변화하였으며, 종래의 단축 크리프 곡선의 변형거동과 같이 3단계의 크리프 거동을 뚜렷하게 보였다.
2. 크리프 시험지 초기변위(δ_0)는 하중이 증가함에 따라 증가하였고, 이 같은 거동은 크리프 시험온도가 증가함에 따라 더욱 상승하였다.
3. SP-Creep 시험에 있어 정상 크리프 속도(steady state creep rate : $\dot{\epsilon}_{ss}$)는 하중에 매우 뚜렷하게 의존함을 관찰할 수가 있었다. 이때 크리프 하중지수

(n)는 550°C, 575°C 그리고 600°C에서 각각 14.65, 13.27 그리고 11.73을 나타내어 시험온도 증가에 따라 하중지수가 감소함을 보여 단축 크리프 시험결과와 같은 거동을 보였다.

4. SP-Creep 시험으로부터 구한 $\dot{\delta}_{ss}$ vs P 의 정량적 상관관계 경험식은 다음과 같이 표현되었다.

$$550^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} = 1.633 \times 10^{-29} P^{14.65}$$

$$575^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} = 7.063 \times 10^{-26} P^{13.27}$$

$$600^\circ\text{C} : \dot{\delta}_{ss} = 3.467 \times 10^{-22} P^{11.73}$$

5. 크리프 파단수명(t_r)은 본 연구의 작용하중 조건 범위에서 하중이 증가할수록 직선적으로 감소하고 있으며, 온도가 상승함에 따라 그 감소율은 증가하고 있어 단축 크리프 시험결과와 매우 유사한 거동을 보였다.

6. 다양한 온도에서 행한 크리프 시험으로부터 얻어진 SP-Creep 변형에 대한 활성화 에너지(Q_{spc})는 605.7kJ/mol로 측정되어, 단축 크리프 시험을 수행하여 얻은 응력에 따른 467.4~533.4kJ/mol의 값에 비교해 상대적으로 크게 나왔다. 그러나 두 시험에 있어 활성화 에너지의 비교는 SP-Creep 시험의 보다 많은 D/B가 구축되었을 때 정확한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

7. SP-Creep 곡선거동, 시험온도에 따른 정상상태 크리프 속도($\dot{\delta}_{ss}$) 그리고 작용 하중별 하중지수(n)와 초기변형(δ_0) 거동 등의 결과로부터 미소시험편을 이용한 SP-Creep 시험법은 고온부재의 크리프 특성 평가를 위한 새로운 시험법으로 그 가능성을 확인할 수가 있었다.

참고문헌

(1) X.Mao, H.Takahashi and T.Kodaira, 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.

- (2) Jeong Soo Ha and Eric Fleury, 1998, "Small Punch Tests on Steels for Steam Power Plants - Ductile Brittle Transition Temperature, KSME International Journal, Vol. 12, No. 5, pp.818~826.
- (3) JAERI-memo(62-193), 1987, "小型パンチ(SP)試験法(案)", 日本原子力研究所, pp. 1~135.
- (4) A.Okada, T.Yoshiie, S.Kojima, K.Abe and M.Kiritani., 1985 "Correlation among a Variety of Miniaturized Mechanical Tests and their Application to D-T Neutron-Irradiated Metals", Journal of Nuclear Materials, Vol. 133 & 134, pp. 321~325.
- (5) M.P.Manahan, A.S.Argon and O.K.Harling., 1981, "The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Post-Irradiation Mechanical Properties", Vol. 103 & 104, pp. 1545-1550.
- (6) Jai-Man Baik, J.Kameda and O.Buck., 1983, "Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel", Scripta METALLURGICA, Vol. 17, pp. 1443~1447.)
- (7) 竹田頼正, 高野勇作, 藤田明次, 1988, "微小パンチ試験による長時間使用Cr-Mo-Vロータの衝撃特性の推定", 材料, 第 37卷, 第 421號, pp. 48~54.
- (8) 松下 敬, Maribel L.SAUCEDO, 四辻美年, 庄子哲雄, 高橋秀明, 1989, "シャルピ-衝撃試験と小型パンチ試験における破面遷移挙動の相關について", 日本機械學會論文集(A編), 55卷, 515號, pp. 1619~1622.
- (9) 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.