대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 A pp. 37~42 KSME 00S007

소형펀치법에 의한 고온배관재료의 크리프열화 평가

유근봉, 장성호, 송기욱, 하정수*· 김재훈**

The Evaluation of Creep Degradation for the High Temperature Pipe Material by Small Punch Test

K.B.Yoo, S.H.Jang, G.W.Song, J.S.Ha and J.H.Kim

Key Words : Small Punch Test(소형펀치시험), Creep Degradation(크리프열화), R Life(잔존수명), Life Assessment(수명평가)

Abstract

The boiler tubes and steam pipes operating both at high temperature and pressure for a long period of time in a power plant are degraded by creep because of internal pressure. So, the remaining life of a component is evaluated by the creep rupture strength. Although the conventional method to evaluate the creep damage is widely used, it has some disadvantages such as requires large size specimen and long employed to evaluate the correlation between fracture toughness and evaluation time. Recently, new method so called "small punch test' is used to evaluate degradation of creep.

In this study, a conventional creep test and a small punch test are conducted using 2.25Cr-1Mo steel which is mainly used for the boiler tubes and steam pipes in power plant. The creep life, approximately 1,500 hrs, is determined by conventional method under a severe condition then specimens for a small punch test are obtained after certain time intervals such as 1/4, 1/2 and 3/4 of final rupture time, respectively.

기호설명

DBTT : Ductile Brittle Transition Temperature
LMP : Larson Miller parameter
Δ DBTT : Difference of DBTT between virgin and degraded material

1. 서 론

고온 고압하에 운전되는 내열 구조 설비들은 가동시간의 증가에 따른 재료의 미세조직 변화에 의해 우수한 재질특성이 저하되는 재질열화가 발생되어 설비의 고온강도 및 파괴인성 저하로 인한 설비 파손이 우려되고 있다.

국내 화력발전소의 경우 60% 이상이 운전년수가 10년을 넘고 있으며, 15년을 경과한 것도 55%를 상회하고 있는 실정으로 고온설비의 경년열화 평가 및 잔여 수명예측은 노후화된 고온설비의 안정 운전조건을 확보하기 위하여 매우 중요한 문제로 대두되고 있으며, 설비의 노후화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 기술을 개발하여 설비의 열화도 평가에 대한 표준화 기술을 확보할 필요성이 요구되고 있다[1].

재질열화 현상은 설비 사용온도 및 사용시간, 부식환경 그리고 불규칙적인 부하변동 등에 의해 지배되는데, 크게 응력이 원인이 되어 일어나는 기계적인 열화와 열적 활성화에 의해 일어나는 경년열화로 대별되며, 실제 운전조건에서는 대부분 두 가지가 동시에 발생되고 있다[2].

* 한전전력연구원
** 충남대학교

이러한 재질열화를 평가하기 위해 실제 운전설비에서 시험편을 채취하기가 매우 어려우므로 입계부식법, 전기화학법, 탄화물분석법 등 비파괴적으로 고온설비의 경년열화를 평가할 수 있는 기술이 미국이나 일본 등에서 많이 연구되고 있으며[3], 최근에는 미소시험편을 실기 설비에서 채취하여 정량적으로 열화도를 평가하고자 소형펀치 시험법이 개발되어 강제 열화시킨 재료와 실기 설비를 대상으로 재질 열화도를 평가하기 위한 많은 실험이 수행되고 있다[4]. 그러나 아직 크리프 수명과 소형펀치법과의 명확한 관계가 규명되지 않아 소형펀치시험에서 구한 열화도를 실제 설비의 크리프 수명과 연관시키기는 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 가혹한 운전조건에서 장시간 사용되고 있는 노후설비의 경년열화 평가를 위해 발전소의 주증기관이나 헤더에 주로 사용되고 있는 고온 재료인 2.25Cr-1Mo강을 대상으로 크리프 파단시험 및 파단 시간의 1/4, 1/2, 3/4에 해당하는 크리프 중단시험을 실시하였다. 또한 크리프중단 재료에 대해 소형펀치 시험을 통해 SP 에너지와 온도 의존곡선으로부터 연성 및 취성 영역의 파괴특성을 분석하고 $[\Delta DBTT]_{SP}$ 를 구하여 크리프 수명과의 연관성을 알아봄으로써 크리프 열화 및 수명평가의 가능성을 조사하였다.

2. 실 험

2.1 실험재료

발전소 주증기관 및 헤더에 널리 사용되고 있는 2.25Cr-1Mo 강의 화학적 조성은 Table 1과 같으며, 기계적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Composition of 2.25Cr-1Mo steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.12	0.2	0.46	0.02	0.014	2.19	0.98

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
650	535	24	197

2.2 크리프시험

2.2.1 시험방법

크리프 파단시험을 먼저 실시하고, 소형펀치 시험용 크리프 인공열화 시험편의 확보를 위한 시험은 크리프 파단시험 결과를 이용하여 크리프 파단 주곡선을 작성한 후 크리프 파단 시간의 1/4, 1/2, 3/4에 해당하는 시간에서 각각 시험을 중단하였다.

크리프시험에 사용된 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다

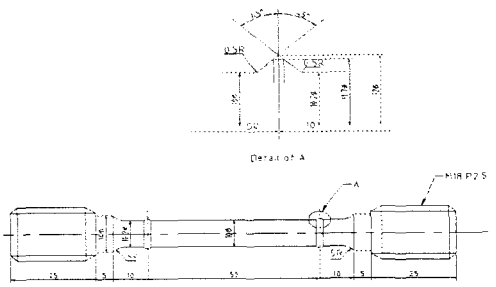


Fig. 1 Creep test specimen

2.2.2 시험결과

Table 3은 크리프파단시간 및 각각의 중단시간이다. 신재와 비교하여 각각 조직을 관찰한 결과 1/4, 1/2 수명 중단 시험편의 경우는 결정립의 형상 및 크기 등 미세조직의 차이가 보이지 않으나 크리프 시험시간이 증가하는 3/4 수명 중단 시험편 및 파단재의 경우는 결정립이 응력축 방향으로 늘려져 있음이 관찰되었다. 또한 3/4 수명 중단 시험편은 크리프 손상이 발생하게 되면서 기공이 입계에서 부분적으로 발생하고 있으며, 시험시간이 증가하여 크리프 수명 말기인 파단된 시험편에서는 기공이 점점 커지고 응력방향으로 기공의 발생이 증가하여 이들 기공들의 합체에 의해 미세균열로 성장하고 있음을 확인하였다.

Table 3 Creep test results

Test type	Temp. (℃)	Stress (MPa)	Test time (Hr)
Rupture	550	137	1552.8
1/4 life interruption			388.5
1/2 life interruption			776.5
3/4 life interruption			1164.0

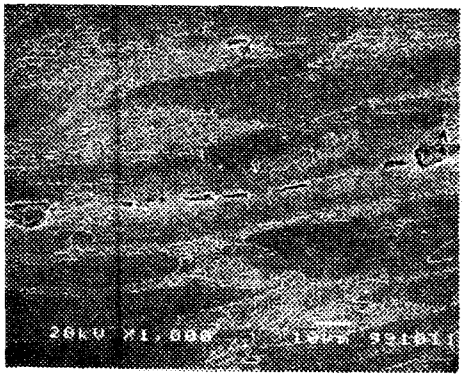


Fig. 2 SEM microstructures of creep rupture specimen(x1000)

2.3 소형펀치시험

2.3.1 시험편

소형펀치 시험편은 크리프 파단시험과 크리프 중단시험이 완료된 시험편에서 파단 또는 네킹(necking)이 일어난 부위에서 Fig. 3과 같이 각각 채취하여 ϕ6㎜×0.5㎜, 두께의 허용오차는 0.5±0.05㎜의 크기로 제작하였다.

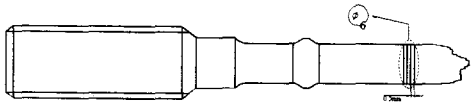


Fig. 3 Schematic representation of small punch test specimens

2.3.1 시험장치 및 시험방법

소형펀치 시험은 Fig. 4와 같이 제작된 소형펀치시험용 장치를 이용하였다. 시험기구는 상부다이(upper die)와 하부다이(lower die) 그리고 펀치(punch)와 볼(ball)로 구성되어 있으며, 하부다이 구멍의 직경은 4㎜로서 시험중 변형된 시험편이 하부다이와 접촉하지 않도록 하였다.

소형펀치 시험은 신재, 크리프파단 시험편 및 3/4, 1/2, 1/4수명 크리프중단 시험편에 대해 -100, -125, -150, -175, -196℃에서 실시하였다.

시험중의 각 온도에서 하중-변위 관계는 자동으로 기록되도록 하고 각 온도에서 부하속도는 0.25㎜/min로 크로스헤드 속도로 조절하였다.

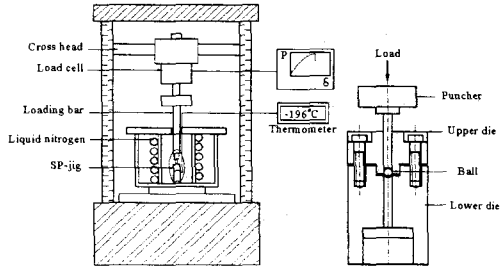


Fig. 4 Schematic diagram of small punch test equipment

3. 결과 및 고찰

3.1 하중-변위거동에 미치는 온도의 영향

국부 네킹 이후 관통크랙의 발생으로 시험편이 흡수에너지를 해방하여 부하능력을 소실하는 최대하중까지의 하중-변위곡선의 면적인 소형펀치 에너지(SP energy)는 재료의 파괴특성을 나타낼 수 있는 물리적 의미를 갖기 때문에 소형펀치시험중에는 하중과 변위가 기록되어 진다. 이 하중-변위곡선을 네 영역으로 나누어 Ⅰ영역을 탄성굽힘영역, Ⅱ영역을 소성굽힘영역, Ⅲ영역을 소성막신장영역, Ⅳ영역을 소성불안정영역으로 구분한다[5]. 소형펀치 시험에서 얻은 하중-변위 곡선의 형상은 Fig. 5와 같이 일반적인 인장시험에서 얻어지는 것과 유사한 형태이며, 이 곡선은 소형펀치 시험에서 얻어지는 전형적인 재료의 변형특성을 나타내고 있는데 시험재의 파괴거동은 모두 시험온도에 크게 의존함을 관찰할 수 있었다.

-100, -125℃에서의 하중-변위 곡선은 전형적인 연성파괴거동을 보이는데 이때는 최대하중 부근에서 미소균열이 발생하여 성장해 감에 따라 하중의 감소와 함께 파괴가 일어나게 된다. 반면, -196℃의 저온측으로 갈수록 연성영역이 적어지고 취성적인 재료유동특성을 보이고 있으며, 특히 크리프 시험 시간이 긴 열화재 일수록 이러한 특성이 -196℃보다 시험온도가 더 높은 곳에서부터 나타나기 시작하는데 최대하중에 도달한 후 하중이 급감하므로 미시균열이 성장되는 즉시 시험편 두께를 관통하는 전형적인 취성파괴거동을 보이고 있어 이들 곡선의 거동은 SP 에너지의 온도 의존성을 예측할 수 있었다.

또한 Fig. 6은 온도변화에 따른 최대하중을 비

교한 결과로 온도가 내려감에 따라 최대하중은 약간 증가하다가 온도가 계속 내려가면 최대하중도 명확하게 연성에서 취성으로 거동천이가 급격히 감소함을 관찰할 수 있었다. 특히 열화재 일수록 이러한 특성이 급격하게 나타나고 있고 신재보다 시험온도가 더 높은 곳에서부터 나타났는데 이는 연취성천이온도가 열화의 진행에 따라 높아지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 경향은 최대하중이 SP 에너지를 결정하는 중요한 특성중의 하나라는 것으로서 SP 에너지의 온도변화 거동을 통하여 연취성천이온도를 구할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 온도변화에 따른 최대 변위를 비교한 그림으로 -196℃의 저온측으로 내려감에 따라 최대변위가 급격히 감소하고 있으며, 열화재 일수록 이러한 특성이 신재보다 시험온도가 더 높은 곳에서부터 나타나는 것으로 보아 이 온도에서 균열성장이 발달됨을 확실히 알 수 있었다.

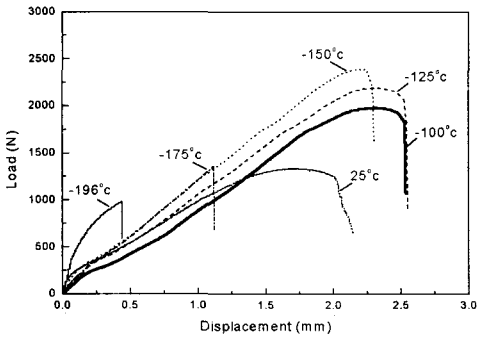


Fig. 5 Load-displacement curves with various temperatures on interruption material at 3/4 creep life

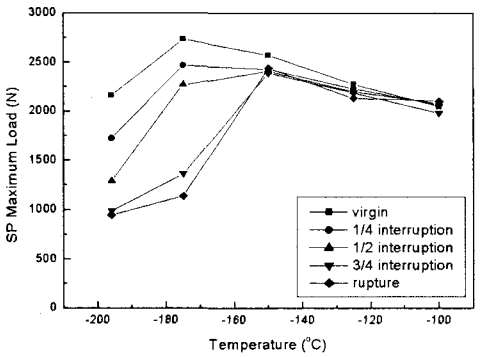


Fig. 6 Variation of maximum load according to the test temperatures

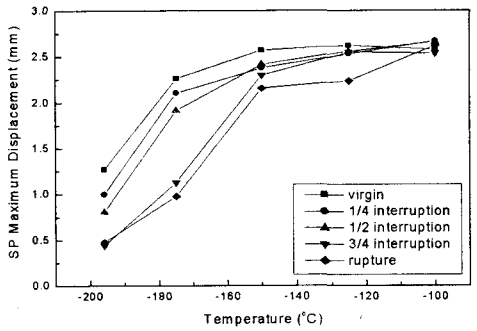


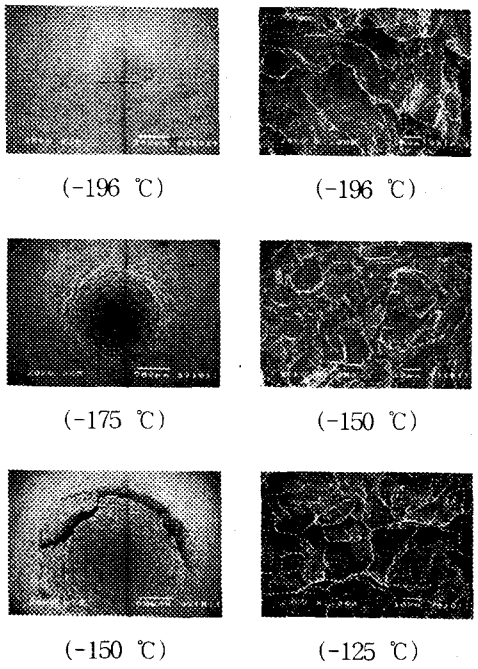
Fig. 7 Variation of maximum displacement according to the test temperatures

3.2 파면조사에 의한 파괴거동 특성

Fig. 8에서 (a)의 거시적 파괴거동을 살펴보면 -196℃에서는 시험편의 반구 정점으로부터 약간 떨어진 위치에서 소성유동이 적어 반구의 형성이 매우 작은 상태에서 균열이 발생하여 반경방향으로 크랙이 전파해 나가는 전형적인 취성파괴 거동을 보이고, 온도가 높아짐에 따라 점점 반구가 더 크게 형성된 상태에서 균열이 생성되었으며, -125℃이상에서는 많은 소성유동 이후 반구 정점에서 다소 멀리 떨어진 시험편의 두께감소가 현저한 위치에서 원둘레 방향으로 균열이 생성되어 성장해 나가는 연성적인 파괴거동을 보였다. 그리고 각 연취성천이온도 영역부근에서는 적은 소성유동량과 함께 균열이 생성되어 있어 연성파괴거동과 취성파괴거동의 중간거동을 보이고 있다.

여기서 -196℃에서도 시험편의 파괴기점이 반구정점으로부터 약간 편위하는 것은 파괴가 하중-변위 곡선상의 탄성굽힘영역에서 일어나지 않고 다소의 소성변형을 수반하여 소성굽힘영역에서 일어나기 때문이다.

또한 (b)의 최대, 최소 에너지에서와 평균에 해당하는 온도에서의 미시적 파면사진을 살펴보면 최소에너지를 보이는 하부영역의 온도에서는 취성파괴인 전형적인 벽개파면을 나타내고 이에 대해 최대에너지를 보이는 상부영역의 온도에서는 전형적인 연성파괴인 딤플(dimple)파면을 보이고 있다. 한편, 최대에너지와 최소에너지의 중간에 해당하는 연취성천이온도 부근에서는 벽개파면과 딤플파면이 혼재된 유사벽개파면(quasi-cleavage fracture surface)을 보여, 연취성천이온도 부근에서 재료의 파괴거동의 천이를 관찰할 수 있었다.



(a) Macro-fractographs (x35)
(b) Micro-fractographs (x1000)

Fig. 8 SEM fractographs according to the test temperatures on virgin material

3.3 크리프 열화 및 수명평가

열화도는 얻어진 에너지-온도곡선에서 사용재와 신재의 $[DBTT]_{SP}$를 각각 측정하여 그 $[DBTT]_{SP}$의 이동량인 $[\Delta DBTT]_{SP}$를 구하여 평가하였으며, 또한 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)에 의해 SP시험재의 각 시험온도에서 거시적, 미시적 파면관찰을 실시하여 연취성 천이거동에 따른 시험재의 파면거동을 조사하였다. 하중-변위 거동으로부터 계산된 SP 에너지를 시험온도에 따라 나타내면 Fig. 9와 같다.

시험재의 천이거동을 보면, 크리프 열화재의 천이곡선은 신재의 천이곡선보다 우측에 위치하여 열화정도를 예측할 수 있다. 이때 신재의 소형펀치시험 연취성천이온도인 [DBTT] sp는 -186℃이고, 파단시간의 1/4, 1/2, 3/4인 크리프 열화재의 [DBTT] sp는 각각 -184℃, -181℃, -166℃ 그리고 파단재의 [DBTT] sp는 -164℃임을 알 수 있다. 따라서 열화도 즉, $[\Delta DBTT]$ sp는 파단재의 경우 22℃이며, 3/4 크리프 열화재의 경우 20℃를 나타내고 있어 상당량의 열화정도을 보이고 있다. 또한 1/2 크리프 열화재의 열화도는 5℃, 1/4 크리프 열화재의 열화도는 2℃를 보여 열화정도가 적음을 알 수 있다. 이상의 소형펀치시험 의해 얻은 각 크리프 열화재의 [DBTT] sp 및 열화도인 $[\Delta DBTT]$ sp를 잔존수명, 그리고 해당시간에서의 LMP와 함께 Table 4에 나타내었다.

이와 같이 Fig. 10의 크리프 잔존수명과 $[\Delta DBTT]$ sp와의 관계에서 보는 것처럼 파단재 및 3/4 크리프 열화재와 1/2 및 1/4 크리프 열화재의 열화도가 크게 차이가 있는 것은 저 크리프 연성재의 경우는 기공의 생성 등이 수명 초기부터 나타나지만 Cr-Mo 강과 같은 고 크리프 연성재에서는 수명이 상당히 소진될 때까지 기공이 생성되지 않고 대부분 입내 변형만 일어나기 때문인 것으로 판단되는데 즉, 크리프 열화의 특성이 크리프 수명 말기에서는 명확하게 나타나고 그 이전에서는 뚜렷하게 열화의 특성이 나타나지 않기 때문이다.

또한, 고온환경에 처해 있는 내열설비의 실험실적인 크리프손상 정도를 나타내는 LMP와 소형펀치시험에 의해 얻은 $[\Delta DBTT]$ sp와의 관계를 살펴보면, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 LMP가 증가하면 열화정도를 나타내는 $[\Delta DBTT]$ sp는 감소하는데 두 인자 사이에 밀접한 관계가 있음을 확인 할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 소형펀치시험에 의해 얻은 $[\Delta DBTT]$ sp와 잔존수명이나 LMP와의 관계를 활용하여 사용된 재료의 크리프 열화상태 및 잔존수명을 파악하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

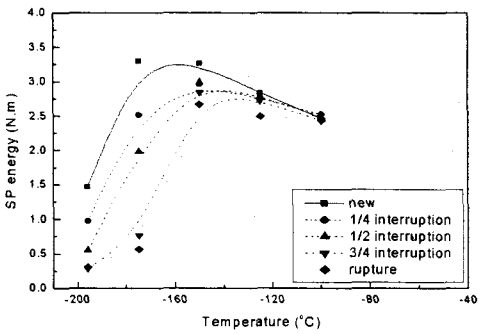


Fig. 9 Transition behavior of SP energy with various test conditions

Table 4 Small punch test results

Material Condition	[DBTT] sp (℃)	[⊿DBTT] sp (℃)	LMP	Creep Remaining Life (%)
virgin	-186	0	19.086	100
1/4 life	-184	2	18.983	75
1/2 life	-181	5	18.839	50
3/4 life	-166	20	18.591	25
rupture	-164	22	17.283*	0

* : 10hr interruption

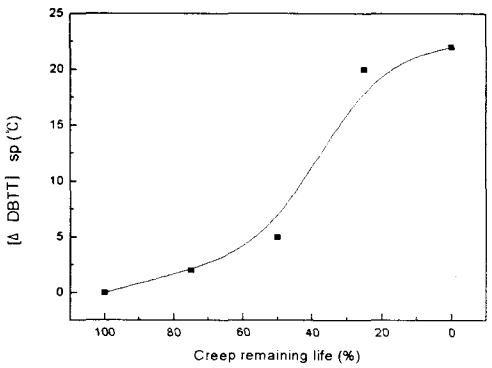


Fig. 10 Variation of SP energy according to the creep remaining life

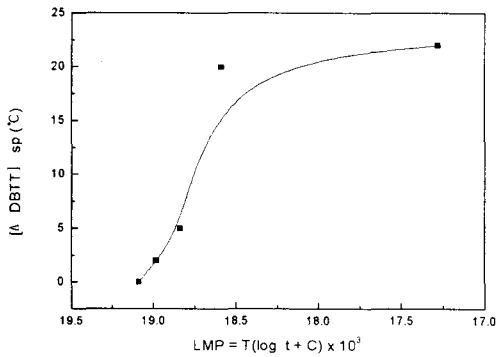


Fig. 11 Variation of SP energy according to the LMP

4. 결론

(1) 시험온도가 내려가면 파괴점은 소성 불안정 영역에서 소성 굽힘 영역으로 변화하고, 연취성거동 사이의 천이현상이 파괴에너지의 변화와 연관되어 있음을 관찰할 수 있었다.

(2) -196℃에서는 소성유동이 적은 전형적인 취성파괴거동을 보이고, 온도가 높아짐에 따라 많은 소성유동량으로 인하여 연성파괴거동이 나타났으며, 연성취성천이온도 부근에서는 벽개파면과 딤플파면이 혼재된 유사벽개파면(quasi-cleavage fracture surface)을 보여 파괴거동의 천이현상이 명확하게 관찰되었다.

(3) 저온 소형펀치 시험에서 최대하중은 온도가 저하됨에 따라 약간 증가하다가 온도가 계속 감소되면 파괴기구가 연성에서 취성으로 천이되고 있어 최대하중도 급격히 감소하였다. 또한 연취성천이온도는 재료의 열화된 시간이 길어짐에 따라 높아지고 있었다.

(4) 소형펀치시험에 의해 얻은[⊿DBTT] sp는 크리프 손상정도를 나타내는 Larson-Miller Parameter가 증가함에 따라 감소하는 특성이 있으므로 두 인자 사이에는 크리프 수명에 밀접한 관계가 있으며, 크리프 잔존수명을 소형펀치시험법에 의하여 평가가 가능함을 확인하였으며, 이상과 같이 연구를 통해 얻은 결과는 고온에서 장기 사용한 기계설비의 크리프 열화상태를 평가하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) 김종영, 김재철, 김승태, 김의현, 배병홍, "고온사용설비의 비파괴진단 기술개발", 전력연구원, KRC-89G-J05, 1993

(2) R. Viswanathan and S. M. Gehl, "Life-Assessment Technology for Power Plant Componets", Journal of Materials, Vol. 44, No. 6, pp. 34~42. 1992

(3) R. Viswanathan, "Damage Mechanism and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM, Metals Park, Ohio, pp. 59~105. 1989

(4) G. E. Lucas, "Review of Small Specimen Test Techniques for Irradiation Testing", Metallurgical Transactions A, Vol. 21A, pp. 1105~1119. 1990

(5) J. M. Baik, J. Kameda and O. Buck, "Development of Small Punch Tests for Ductile-Brittle Transition Temperature Measurement of Temper Embrittled Ni-Cr Steels", ASTM STP 888, pp. 92~111. 1986