

소형편치실험을 이용한 CrMo강의 인장 및 연취성전이특성의 평가

에릭 플러리 · 하정수

전력연구원 수화력발전연구소

Assessment of Tensile & Ductile-Brittle Transition Characteristics of CrMo Steel Using Small Punch Test

Eric Fleury, Jeong-Soo Ha

Power Generation Research Lab., KEPRI, Taejeon 305-380

(1997년 9월 20일 받음, 1997년 12월 2일 최종수정본 받음)

초 록 사용중인 중화학 설비의 재료물성의 경년열화적 특성을 평가하기 위하여 기존 실험법의 인장시험편이나 충격시험편을 채취하기는 실제적으로 불가능하다. 따라서 미소 시험편을 채취하여 소형편치실험을 실시하므로 기존의 재료물성과 비교하는 연구를 수행하였다. 인장강도등 인장특성과 비교한 결과 인장강도, 연신율, 항복강도, 종탄성계수와 소형편치실험의 각 특성과 선형적 관계를 얻을 수 있었다. 또한 경년열화도를 평가하는 도구인 파면전이온도(FATT)와 비교하기 위하여 저온 소형편치실험을 실시한 결과 충격실험을 통하여 구한 FATT 온도와 소형편치실험의 전이온도(T_{sp})와 일정한 관계가 있음이 밝혀져 사용재의 열화도를 평가할 수 있었다.

Abstract Conventional test methods for measuring tensile strength and fracture toughness require the removal of large material samples from in-service component. However, recent developments of small punch test technique using miniature specimens have proved its usefulness and accuracy to evaluate the mechanical properties of component. Correlations have been obtained between small punch test and mechanical properties obtained from uniaxial tensile test, and the study showed that an appropriate empirical based-approach could be used to evaluate the material FATT of as-received and ex-service materials from small punch test.

1. 서 론

화력발전소를 포함하여 노후 중화학설비가 증가하면서 설비의 건전성 평가 및 잔존 수명평가를 위한 기술의 개발이 절실히 요구되고 있으며 정확성 향상을 위한 지속적인 노력이 이루어지고 있다. 노후 설비의 수명연장 운전을 통한 경제성 확보, 설비 손상에 의한 돌발 정지의 감소, 설비의 효율적인 관리체계 확보 등의 효과를 얻을 수 있을 것이다.

특히 발전설비는 고온·고압 환경하에서 운전되는 특성 때문에 경년열화가 발생되어 설비의 강도저하로 인한 노후화가 진행되고 있다. 경년열화를 발생시키는 요인은 고온상태의 운전조건, 과도한 운전시간등을 들 수 있으며 대부분 여러 요인들이 복합작용하여 열화를 촉진시키게 된다. 특히 화력발전소의 경우는 고온 배관, 헤더, 튜브, 증기 터빈의 로터, 케이싱, 블레이드 등의 설비에서 설비의 노후화 현상이 두드러지게 발생하므로 설비의 열화정도를 정량적으로 평가할 수 있는 기술을 개발하고 있다^{1,2)}.

표면복제를 이용한 조직대비법, 경도측정법, 기공대비법 등 비파괴적 방법이 주로 사용되고 있으나 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 파괴실험을 정기적으로 수행하여 평가하는 것이 가장 정확하기는 하나 상대적으로 형상이 큰

종래의 시험편을 운전중인 설비에서 채취하기는 사실상 불가능하다.

그러므로 인장시험편이나 충격 시험편보다 상대적으로 아주 작은 소형편치 시험편을 채취하여 실험한 후 기존의 취성과파괴 거동의 변수인 파면전이온도(FATT) 또는 파괴인성(K_{IC}) 값과의 비교를 시도하는 연구가 활발히 진행되고 있다³⁻⁵⁾.

따라서 본 논문에서는 보일러와 터빈 등에서 주로 사용되고 있는 CrMo강을 이용하여 실제 발전소에서 장기간 사용한 사용재와 신재를 대상으로 고온 및 저온에서의 소형편치 실험을 실시하여 인장실험은 물론 FATT 등 기존의 재료물성과의 관계를 규명하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용된 재료는 고온 설비에서 주로 사용되는 재료인 CrMo강으로서 그 화학 조성은 표 1과 같다.

시험편은 보일러의 과열기와 재열기 헤더에서 채취하였으며 신재와 사용재로서 실제 사용된 사용재의 운전이력은 표 2와 같다.

일반적인 소형편치 시험편인 10mm×10mm×0.5mm를 사용하였으며 절단된 시험편의 표면은 1200번의 연마지로 연마를 하였다. 소형편치실험을 위한 장치는 그림 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of the different steels.

Composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	W	V	Pb
1Cr0.5Mo	.18	.25	.7	.015	.016	.1	.93	.45	.1	.006	-	-	-
2.25Cr1M	.15	.4	.43	-	-	-	.25	.01	.2	.008	.1	.02	.011
12Cr1Mo	.21	.34	.59	.018	.004	.61	11.5	.85	-	-	.05	.24	-

Table 2. Service conditions of the materials.

Steel	Pressure	Temperature	Service time
1Cr0.5Mo	100kg/cm ²	515°C	143,000hr
2 1/4Cr1Mo	195kg/cm ²	502°C	86,000hr

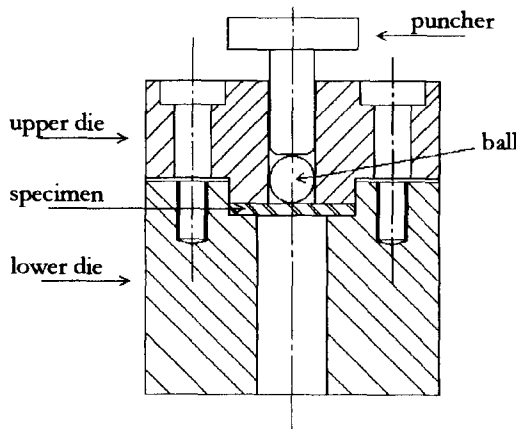


Fig. 1. Sketch of the small punch test device.

실험기구는 STD 11강으로 제작된 상·하부의 다이와 WC강 재질의 볼을 사용하였다. 시험편을 하부다이의 홀더에 올려놓고 상부다이를 통하여 네개의 볼트로 하중을 일정하게 체결하여 실험중 순수한 펀치 현상이 시험편에서 일어나도록 균일하게 고정하였다. 하부다이 보아의 직경은 4mm로서 실험중 변형된 시험편이 하부다이와 접촉하지 않도록 하였다.

고온 실험을 위하여는 가열용 고주파발생 유도장치(Induction heating)를 이용하여 600°C까지 가열하였으며 저온 실험을 위하여는 액체질소를 이용하여 -196°C까지 실험을 실시하였다. 온도의 측정은 상온이상의 고온에서는 0.2mm의 K-type 열전대를, 그리고 저온에서는 T-type 열전대를 시험편에서 2mm 정도 떨어진 부위의 양쪽에 점용접하여 측정하였다. 펀칭속도는 0.25mm/min의 균일한 속도로 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

인장실험결과와의 비교

본 실험을 통하여 얻어진 하중-변형률 곡선은 다른 소형 펀치 실험에서 얻을 수 있는 곡선과 유사한 형태로 상온이

상의 고온에서 결과가 그림 2에 나타나 있다. 일반적인 소형펀치 하중-변형률 곡선은 네 개의 영역, 즉 국부적인 표면항복과 관련된 탄성굽힘 변형영역, 소성굽힘영역, 박막 스트레칭(membrane stretching) 영역, 소성 불안정영역으로 구분하여 분석한다¹⁾. 그림 2에서 처럼 발전소의 주요 재질인 CrMo강의 고온 실험에서도 이 네 영역이 모두 존재하나 II 단계인 소성굽힘영역의 기울기가 온도가 높아질수록 점차 작아지는 경향이 나타났다¹⁾.

소형펀치 실험에서 얻은 최대 하중과 최대 변형률을 이용하여 인장실험에서의 기계적 성질과 비교하는 연구가 최근에 수행되었다²⁻⁴⁾. 본 실험에서도 이러한 연구결과와 유사한 관계를 얻을 수 있었는데 그림 3에서는 소형펀치 실험에

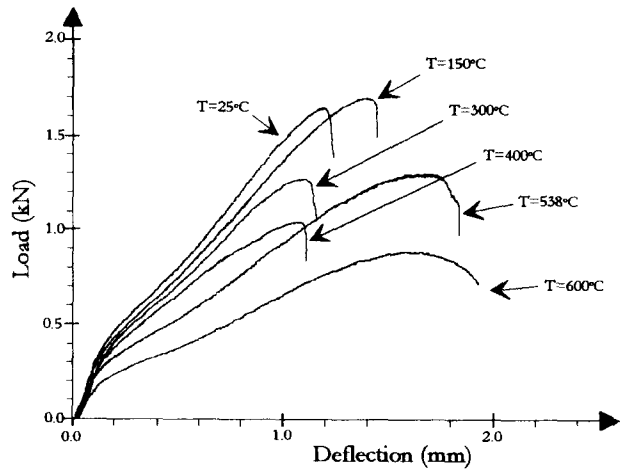


Fig. 2. Load-deflection curves on 12Cr1Mo steel.

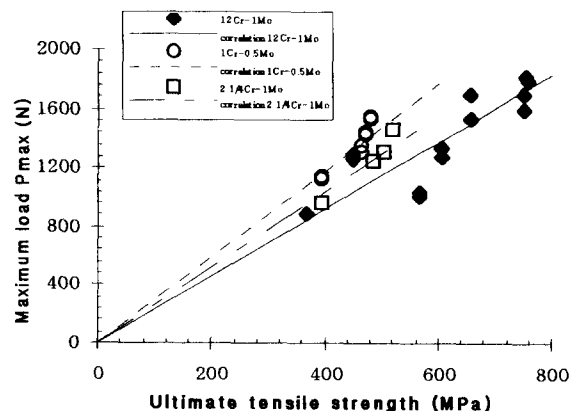


Fig. 3. Comparison between small punch test maximum load and ultimate tensile strength.

서의 최대 하중과 인장강도와 비교한 것으로서 세가지의 강에서 약간의 차이는 있으나 전체적으로 선형적인 관계를 얻을 수 있었다^{10,11)}.

그림 4에서는 소형편치실험에서의 최대 변형량과 인장실험에서의 연신율(%)과 비교하였다. 그림 3에서의 최대하중과 인장강도와의 관계보다 더욱 선형적인 관계를 얻을 수 있었다.

소형편치 실험의 하중-변형량 곡선의 첫 번째 영역은 탄성 변형이 지배하므로 이 영역에서의 특성과 인장실험의 탄성 특성값과도 비교할 수 있다는 점에 착안하여 이를 비교하기로 하였다. 이러한 비교 목적을 위하여 소형편치 실험에서의 탄성영역 기울기와 탄성영역 마지막 부분의 하중을 측정하였다. 그림 5에서는 인장실험에서의 종탄성계수와 소형편치 하중-변형량 곡선에서의 I 단계 탄성영역의 기울기와의 상관관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있었으며 강의 종류에 따라 약간의 차이는 있으나 좋은 선형적인 관계가 있음을 알 수 있었다.

또한 그림 6에서는 소형편치 하중-변형량 곡선에서의 I 단계 탄성영역의 최고 하중과 인장실험의 항복강도와 비교한 결과이다. 그림을 통하여 매우 좋은 선형적 관계가 두 실험사이에 있음을 알 수 있었다. 따라서 소형편치 실험을

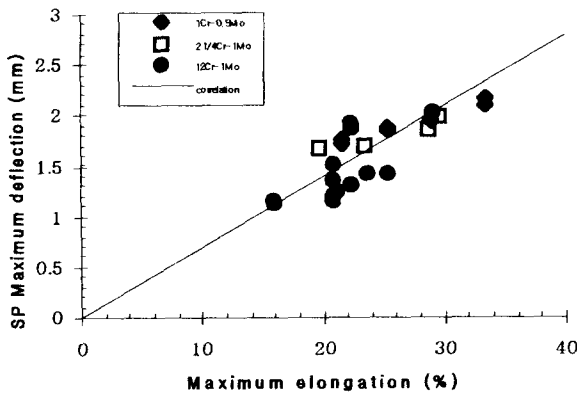


Fig. 4. Comparison between small punch test maximum deflection and maximum elongation in measured in tensile test.

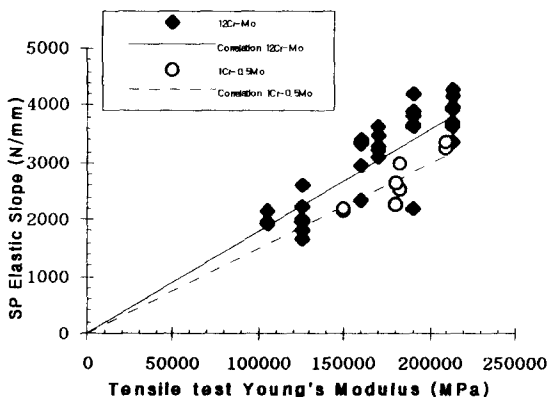


Fig. 5. Correlation between slope in small punch elastic regime and Young's Modulus.

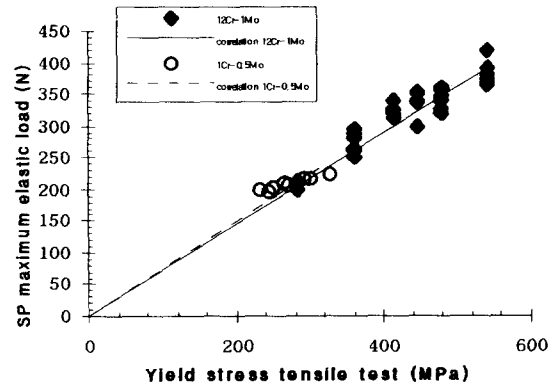


Fig. 6. Correlation between maximum load measured in the elastic domain in small punch test with the material yield stress measured in tensile test.

통하여 인장실험의 대표적 재료물성 값인 인장강도, 연신율, 항복강도, 종탄성계수등을 구할 수 있음을 확인하였다.

연취성 천이온도 특성

소형편치실험의 주된 사용 목적은 재질의 건전성을 평가하기 위한 것으로 파면천이온도(FATT) 또는 파괴인성(K_{IC})을 평가하는데 있다. 샬피 충격실험에 의하여 파면천이온도를 구하듯이 상온에서부터 -196℃까지 온도를 저하시키며 소형편치 실험을 실시하였다. 파면천이온도 결정을 위한 파괴 에너지는 소형편치 하중-변형량 곡선 아래의 면적으로 계산하였다.

그림 7에서는 12CrMo강의 온도의 변화에 따른 파괴 에너지의 변화량을 보여주고 있다. 시험편의 A, B, C 형태는 고온 배관의 원주방향, 축방향, 반경방향을 나타낸 것으로 시험편의 방향에 따라서는 일정한 거동을 나타내지는 않고 있었다⁹⁾.

그러나 전체적으로는 샬피 충격실험을 하여 얻는 연취성 천이온도 곡선과 유사한 경향을 얻을 수 있었다.

그림 8에서는 1Cr0.5Mo강의 각 실험온도에서의 에너지 변화량을 보여 주고 있다. 12Cr1Mo강과 달리 1Cr0.5Mo강에서는 상온 이하의 저온으로 갈수록 파괴에너지가 점차

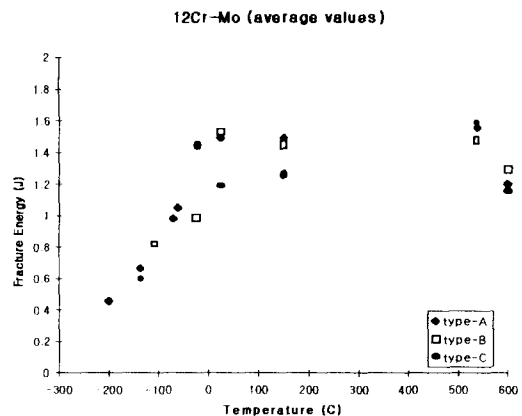


Fig. 7. Evolution of the fracture energy versus temperature for 12Cr-1Mo steel.

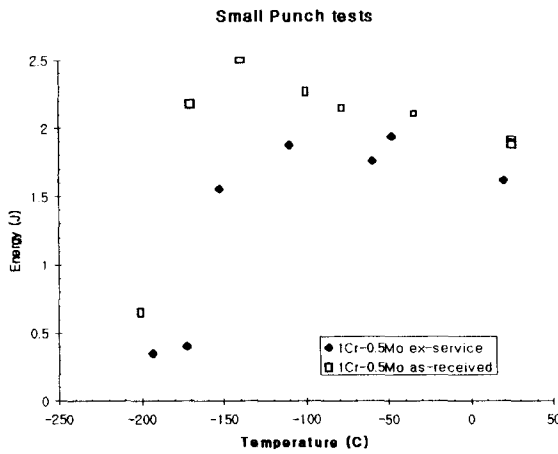


Fig. 8. Evolution of the fracture energy versus temperature on 1Cr-0.5Mo steel.

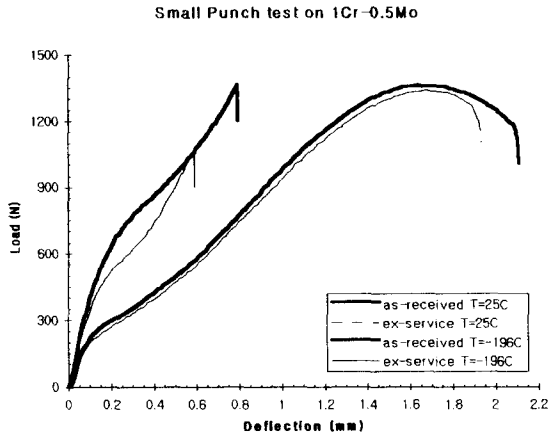


Fig. 9. Comparison between load-deflection response on 1Cr-0.5Mo steel in as-received and ex-service conditions, at 25 and -196°C.

증가하다가 -150°C에서 최고치에 달하는 특이한 모습을 보여주고 있다. 그러나 -150°C 이하의 저온에서는 파괴 에너지가 급격하게 저하하는 양상을 나타내고 있었다.

특히 515°C에서 143,000시간 사용한 재질과 사용하지 않은 신재와는 연취성천이온도에 있어서 분명한 차이점을 보여 주고 있다. 연취성천이온도는 사용한 재질에 있어서는 신재와 비교하여 고온으로 상승하여 열화되었음을 확인할 수 있었다.

신재와 사용재의 거동을 정확히 파악하기 위하여 하중-변형량 곡선을 이용하여 비교하기로 하였다. 그림 9에서는 25°C와 -196°C에서의 신재와 사용재의 하중-변형량 곡선의 차이로서 상온에서는 최대 하중에 있어서 약간 낮아졌으나 큰 차이는 없었다. 그러나 -196°C에서는 최대 하중이 상당히 저하하고 변형량도 작아졌음을 알 수 있었다.

살피 충격 실험에서 얻어진 파면천이온도(FATT)와 소형편치실험에서 얻어진 천이온도(T_{SP})와 비교하는 노력이 있었다. 이러한 결과로 저합금강에 있어서 다음과 같은 상관관계가 있음이 보고되고 있다^{4,13)}.

$$\frac{T_{SP}}{FATT} = 0.35 \quad (1)$$

다른 연구자가 본 실험에서와 동일한 재질로 실험을 수행하여 얻은 실험값인 살피 충격실험의 FATT와 비교한 결과 식 (2)와 (3)과 같은 결과를 얻을 수 있었다¹²⁾. 이렇게 소형편치 실험에서 얻은 천이온도(T_{SP})가 상대적으로 낮은 것은 살피 충격실험에서의 변형률 속도가 빨라서 상대적으로 고온에서도 취성파괴가 일어나기 때문으로 생각된다³⁾.

$$\text{신 재 : } \frac{T_{SP}}{FATT} = 0.3336 \quad (2)$$

$$\text{사용재 : } \frac{T_{SP}}{FATT} = 0.354 \quad (3)$$

소형편치 실험을 통하여 얻은 파면천이온도는 신재와 사용재에 있어서 약 25°C 정도 약간 증가한 것으로 나타났지만 이는 충격실험에서 얻은 연취성천이온도의 약 절반이 되는 수준이다.

연취성 파면의 특성

소형편치실험을 수행한 후 각 온도에서의 시험편의 균열 형상을 주사전자현미경으로 분석한 결과는 그림 10과 같다. 연성영역에서의 균열의 특성은 볼의 형상에 따라 원형으로 균열이 생성하고 성장하는 것을 보여준다. 또한 취성 파괴 영역의 저온에서는 균열이 급격하게 생성하여 진전하므로 원형의 균열이 발견되지 않고 거의 선형적인 균열이 발생하고 있음을 볼 수 있었다. 천이 구간에서는 두 형태가 혼재되어 원형 균열 주위에 선형의 이차균열이 발생하였음을 확인하였다.

이러한 온도에 따른 균열의 특성은 파단면을 분석한 그림 11에서도 나타났다. 파단면의 표면을 관찰한 결과 저온에서는 입내균열에 의한 벽개파면이 나타나고 있으며 점차 온도가 증가함에 따라 벽개파면이 감소하고 소성변형이 나타나며 혼재하다가 천이온도 이상에서는 벽개파면은 찾아 볼

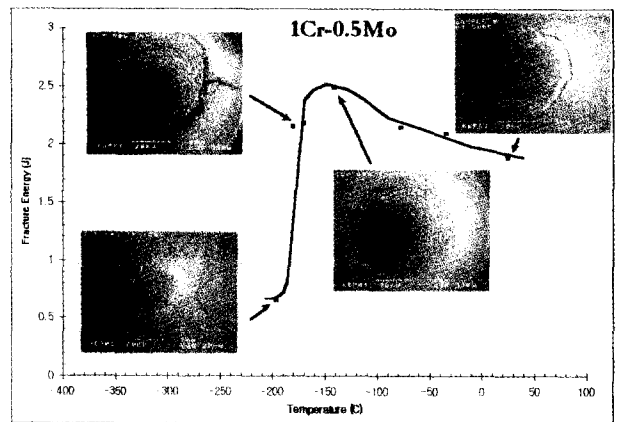


Fig. 10. SEM micrographies showing the crack path in SP specimen at several temperature.

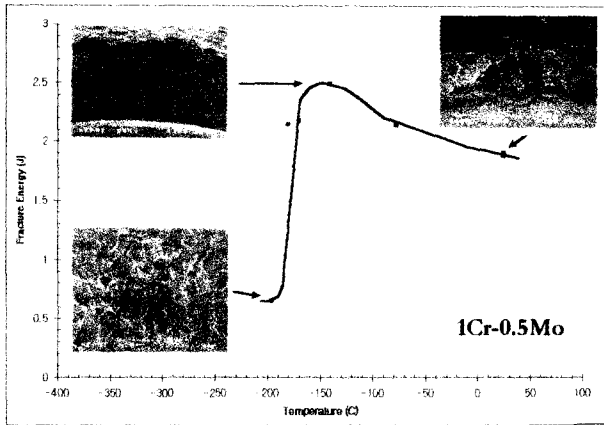


Fig. 11. SEM micrographies showing the fracture surface in SP specimen at several temperature.

수 없게 되었다.

4. 결 론

화력 발전소의 주요 재질인 세 종류의 CrMo강을 사용하여 고온, 저온에서의 소형편치 실험을 수행하여 인장실험과 연취성전이온도등과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소형편치 실험과 인장실험 사이에는 선형적인 관계가 있음이 밝혀졌다. 소형편치 실험에서의 최대 하중과 최대 변형량은 인장실험의 인장강도와 연신율과 각각 선형적인 관계가 있었다.
- 2) 인장실험의 종탄성계수와 항복강도를 소형편치 실험 결과로부터 얻기 위하여 시도한 결과 소형편치 실험의 1 단계 탄성영역의 기울기와 최대하중과 좋은 선형적 관계가 있음을 확인하였다.
- 3) 신재와 사용재를 비롯하여 모든 재질에서 저온 소형편치 실험 결과의 파괴에너지를 이용하여 파면전이온도를 구할 수 있었으며 이렇게 구한 전이온도는 샬피충격실험으로 구한 전이온도와 일정한 관계를 가지고 있었다.
- 4) 샬피 충격실험에서 얻은 전이온도에 비하여 저온이었는데 이는 양 실험간의 변형률 속도의 차이에 의한 것으로 빠른 변형률 속도에서 수행되는 충격실험은 상대적으로 고온에서 취성파괴가 일어나기 때문으로 생각된다. 시험편의 표면 및 파단면을 관찰한 결과 연성파괴와 취성파괴의 특징을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Viswanathan R. and Wells C.H., Life "Prediction of Turbine Generator Rotors, Technology for the '90s", The ASME Pressure Vessels and Piping Division, M.K. Au-Yang, Ed., 1993, pp. 140-177.
2. Iwadata T., Tanaka Y., Takemata H., "Prediction of Fracture Toughness Kic Transition Curves of Pressure Vessel Steels From Charpy V-notch Impact Test Results, Journal of Pressure Vessel Tech-

nology, November 1994, Vol. 116, pp. 353-358.

3. Baik J. M., Kameda J., and Buck O., "Development of Small Punch Tests for Ductile-brittle Transition Temperature Measurement of Temper Embrittlement Ni-Cr Steels", The Use of Small scale Specimens for Testing Irradiated Material, ASTM STP 888, W.R. Corwin and G.E. Lucas, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 92-111.
4. Foulds J. and Viswanathan R., "Small Punch Testing for Determining the Material Toughness of Low Alloy Steel Components in Service", Journal of Engineering Materials and Technology, Oct. 1994, Vol. 116, pp. 457-464.
5. Mao X., Saito M. and Takahashi H., "Characterization of Fracture Behavior in Small Punch test by Combined Recrystallization-Etch method and Rigid Plastic Analysis", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 15, no.1, 1987, pp. 30-37.
6. 하정수, 에릭 플러리, "Small Punch Test on Steels for Steam Power Plant ; Part II : Modeling", 1997, 전력연구원 중간보고서
7. Lucas G.E., "Review of Small Specimen Test Techniques for Irradiation Testing", Metallurgical Transactions A", 1990, vol. 21 A, pp. 1105-1119.
8. Eto M., Takahashi H., Misawa T., Susuki M., Nishiyama Y., Fukaya Y., and Jitsukawa S., "Development of a Miniaturized Bulge Test (Small Punch Test) for Post-Irradiation mechanical Property Evaluation", Small Specimen Tests Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension, ASTM STP 1204, W.R. Corwin and F.M. Haggar, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, pp. 241-255.
9. 하정수, 에릭 플러리, 외 3인, "High Temperature Small Punch Behaviors of 12Cr Steel for Supercritical Power Plant", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1997, pp. 259-264.
10. "A Study on the Conservation Method of Thermal Power Plant During Idle Period", Final Report, KRC-84G-J03, KEPRI Taejon, August 1985.
11. Yoo Jin, Creep Experiments on High Chromium Steel for Fossil Power Plant, Final Report, KRC-93G-J02, KAIST Taejon, December 1996.
12. Choi H.C., Chung Y.K., Kim H.K., and Park J.J., "Material Property Studies of a Retired Superheater Header for Remaining Life Assessment", in Risk, Economy and Safety, Failure Minimisation and Analysis, Fenny Eds., 1996 Rotterdam, pp. 337

- 348.
13. Masushita T., Saucedo, M.L. Joo Y.H. and Shoji T., 1991, "DBTT Estimation of Ferritic Low Alloy Steels in Service Plant by Means of Small Punch Test", Fracture and Strength-1990 Key Engineering Materials, Vol. 51-52, Trans. Tech. Publ., Zurich, Switzerland, p. 259.