

재료열화에 따른 파괴인성치의 연성-취성 전이거동 평가

김상필* · 김형익** · 석창성***

The Evaluation of Ductile-Brittle Transition of Fracture Toughness by Material Degradation

Sang Pil Kim, Hyung Ick Kim and Chang-Sung Seok

Key Words: Fracture toughness(파괴인성), Sub-sized specimen(미소시편), Ductile-brittle transition temperature(연성-취성 전이온도)

Abstract

As the huge energy transfer systems like as nuclear power plant and steam power plant are operated for a long time, mechanical properties are changed and ductile-brittle transition temperature is raised by degradation. So it is required to estimate degradation in order to assess the safety, remaining life, and further operation parameters. The sub-sized specimen test method using surveillance specimen was developed for evaluating the integrity of metallic components. In this study, we would like to present the evaluation technique of the ductile-brittle transition temperature by the sub-sized specimen test. The four classes of the thermally aged 1Cr-1Mo-0.25V specimens were prepared using an artificially accelerated aging method. The tensile test and fracture toughness test were performed. The results of the fracture toughness tests using the sub-sized specimens were compared with the evaluation technique of the ductile-brittle transition temperature.

1. 서 론

산업설비의 안전운전을 지속적으로 확보하기 위해서 현재 상태의 재료물성치와 재질열화도를 측정하고, 이를 바탕으로 설비의 건전성 및 잔존 수명을 평가하여야 한다. 현재 사용중인 설비에 대한 정확한 잔존수명을 예측하기 위해서는 설계 및 제조 당시의 재료물성치, 운전 이력, 열화 메카니즘, 현재의 물성치 등이 확보되어야 한다. 그러나 이러한 데이터가 모두 확보된 경우는 극히 드물며, 따라서 대부분의 경우 현재의 재료물성

치를 구하여 설비의 잔존수명을 평가해야 한다. 또한 산업설비는 취성 벽개파괴를 방지하기 위하여 반드시 DBTT 이상의 온도에서 가동되어야 하며, 이러한 설비의 건전성을 확보하기 위하여 DBTT의 평가는 매우 중요하다⁽¹⁾.

재료의 파괴인성을 평가할 수 있는 방법은 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 나눌 수 있다. 파괴적인 방법은 직접 파괴시험을 수행함으로써 설비의 재료물성치를 정확히 평가할 수 있다는 장점이 있으나, 사용 중인 설비에서 시험편을 채취한다는 것은 대부분의 경우 불가능하며, 가능하다 하더라도 많은 경비와 시간을 투자해야 한다는 문제점을 가지고 있다^(2,3). 따라서 파괴시험의 이러한 단점을 보완할 수 있는 방법으로 감시시편을 이용하는 시험법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 감시시편을 이용한 방법은 원자력과 같이 안전성이 매우 중요시되는 구조물의 내부에 구조물과 같은 환경에서 열화되도록

* (주)대우전자

** 성균관대학교 기계설계학과 대학원

*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : csseok@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

미리 시편을 제작해 두었다가 필요시 이 시편을 이용하여 열화정도를 평가하는 방법이다. 이 경

Table 1 Chemical composition of 1Cr-1Mo-0.25V steel [wt. %]

Composition										
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Sn	
0.29	0.01	0.74	0.004	0.007	0.060	1.29	1.24	0.25	0.0047	

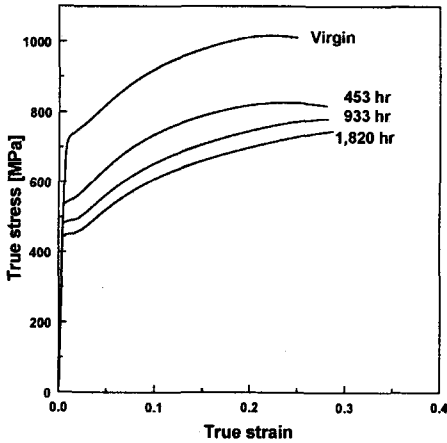


Fig. 1 Effect of degraded time on the true stress-true strain curve

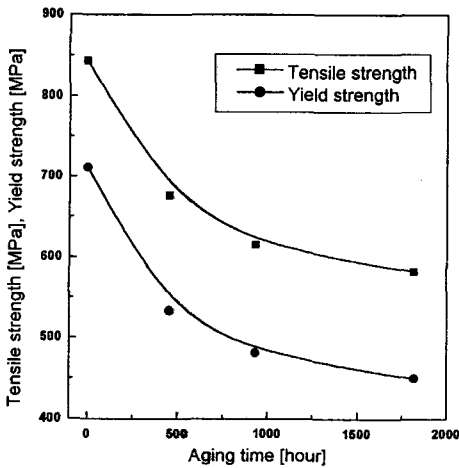


Fig. 2 Effect of degraded time on the tensile strength and yield strength

우 시편의 크기 및 수량의 제한으로 인하여 미소 시편을 이용하는 경우가 많으며, 실제 사용중인 재료에 대해 파괴시험을 수행하는 것이므로 보다 정확한 평가가 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 화력발전소 터빈 로터 재료로 많이 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V 강을 가속 열화시켜 모의 열화재를 제작하였다. 이 열화재를 이용하여 파괴시험으로부터 재료 물성치를 구하고, 이를 바탕으로 상온 및 저온에서 미소시편을 이용한 파괴인성시험을 수행하여 연성-취성 전이 거동과의 관계를 관찰하였다.

2. 열화재의 기계적 성질 평가

2.1 모의 열화재 제작

시험에 사용된 재료는 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V강으로써 화학적 성분조성비는 Table 1과 같다.

이 재료를 630℃의 전기로에서 등온열화열처리 (isothermal aging heat treatment) 방법으로 453시간, 933시간, 1820시간 열화시켜 원시편과 함께 4개의 시험편을 준비하여 시험을 수행하였다.

2.2 인장시험

모재와 각 열화단계별로 제작된 열화재의 인장 특성의 변화를 관찰하기 위해서 ASTM E8-95a (KS B 0801)의 인장시험편 규격에 준하여 시험편을 제작하였다⁽⁴⁾. Shimadzu사의 25ton 용량 전기 모터식 인장시험기(AG-25TG)를 사용하여 상온에서 1mm/min의 속도로 인장시험을 수행하고 하중-변위 선도, 연신률(elongation), 항복강도(0.2% offset법), 인장강도 등을 구하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 모의 열화단계에 따른 진응력-진변형률 선도와 항복강도, 인장강도를 나타낸 것이다. 이 결과들로부터 열화가 진행됨에 따라 항복강도와 인장강도 등의 재료물성치가 저하하는 것을 알 수 있다.

2.3 표준시편 파괴인성시험

모의 열화재에 대한 파괴인성치의 변화를 관찰하기 위해서 ASTM E399-905의 시험방법에 따라

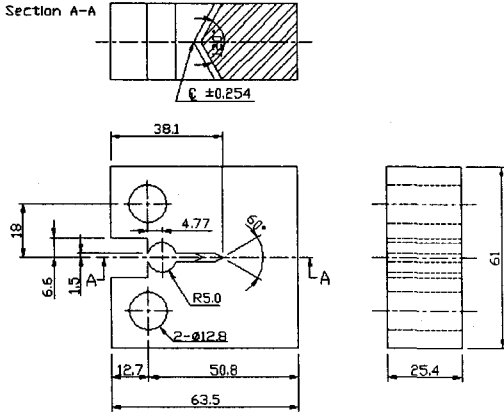


Fig. 3 Fracture toughness test specimen

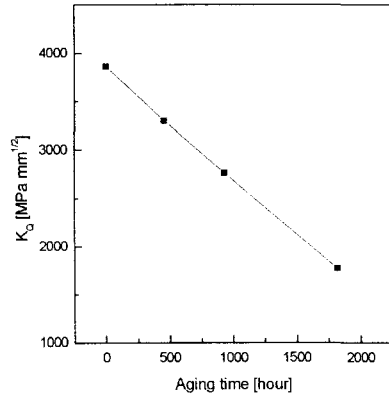


Fig. 5 Effect of degraded time on the fracture toughness

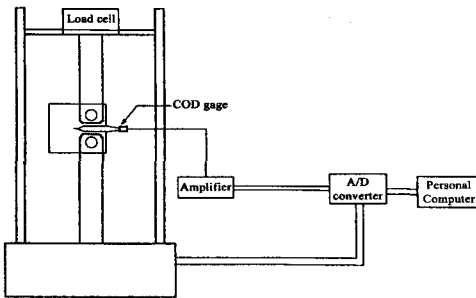


Fig. 4 Schematic diagram of a fracture toughness testing system

상온에서 K_{IC} 시험을 수행하였다⁽⁵⁾. ASTM 규격에 준하여 CT(Compact Tension) 표준 시험편을 제작하였으며, 25ton 용량의 전기 유압식 재료시험기(Instron model 1332)를 사용하였다. 시험편의 형상 및 규격을 Fig. 3에 나타내었으며, Fig. 4에 사용시험기의 개략도를 나타내었다.

파괴인성시험을 수행하여 P_Q 를 결정한 후 K_Q 를 결정하였다. 그러나 $K_Q = K_{IC}$ 를 만족시키기 위한 $B \geq 2.5(K_Q/\sigma_y)^2$ 의 조건을 만족하지 못하였으므로 K_Q 로 표시하였다. Fig. 5는 열화시간에 따른 K_Q 값의 변화를 표시한 선도로서 열화시간이 증가함에 따라 K_Q 값이 감소함을 나타내고 있다.

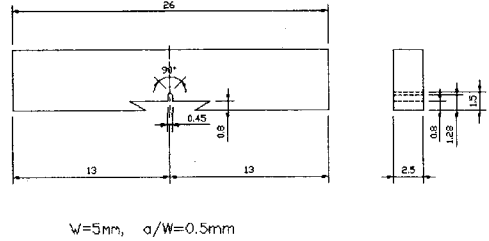


Fig. 6 Sub-sized specimen for fracture toughness test

3. 연성-취성 천이거동 평가

3.1 실험장치 구성

ASTM E813과 E1152의 시험 규격에 따라 표준 시험편의 크기를 비례적으로 변화시킨 미소시험편을 제작하였으며, 저온시험을 위하여 각 열화단계별로 12개씩 제작하였다^(6,7). 사용한 미소시험편의 형상 및 규격을 Fig. 6에 나타내었다.

미소시험 파괴인성시험의 정밀한 제어와 측정을 위하여 시험 장치로 0.1ton 용량 유압식 만능시험기(Instron model 8841)를 사용하였고, 미소시험편 크기에 맞는 소형 3점 굽힘시험용 치구를 제작하였다. 또한 온도에 따른 천이거동을 평가하기 위한 저온 시험용 소형 환경로를 제작하여 사용하였으며, 냉매로 액체질소를 이용하였다.

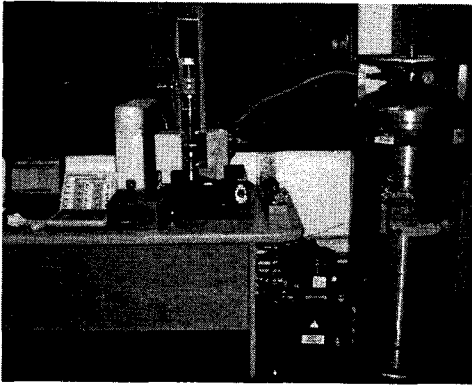


Fig. 7 Material testing system for sub-sized specimen test and BI test

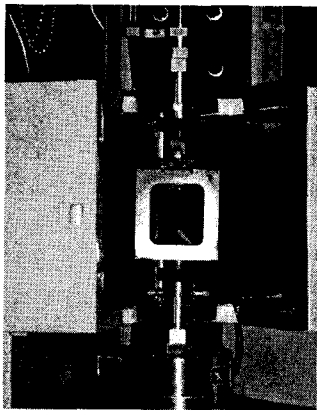


Fig. 8 Test fixture for 3-point bending test

LVDT를 이용하여 하중선 변위를 측정하였으며, COD gage를 이용하여 균열개구변위를 측정하였다. 사용한 시험장비를 Fig. 7에 나타내었고, 소형 3점 굽힘시험용 치구를 설치한 시험장비를 Fig. 8에 나타내었다.

3.2 파괴인성치, K_{IC}

미소시편을 이용하여 파괴인성치 K_{IC} 시험을 수행하고, P_Q 를 결정한 후 K_Q 를 결정하였다. 그러나, 모든 시편에 대하여 K_{IC} 의 충족 조건인 $B \geq 2.5(K_Q/\sigma_y)^2$ 의 조건을 만족하지 못하였으므로 K_Q 로 표시하였다.

상온에서의 미소시편시험 결과인 K_Q 값과 표준 CT시편의 시험결과를 비교해보면, 표준시편의

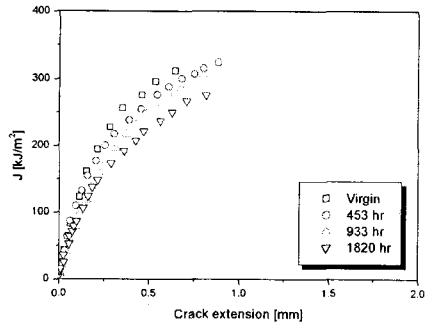


Fig. 9 Effect of degraded time on the J - R curve tested at 20°C

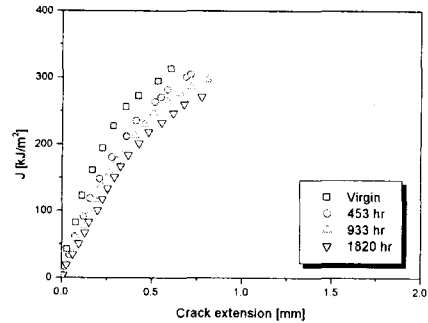


Fig. 10 Effect of degraded time on the J - R curve tested at 0°C

K_Q 값의 약 40%에 해당하는 값을 나타내고 있으며, 이는 시편의 크기차이에서 오는 결과로 판단된다. 또한 온도에 따른 결과를 비교해보면 선형 탄성과파괴역학에 의한 응력확대계수로는 온도에 따른 1Cr-1Mo-0.25V 강의 파괴거동을 정확하게 해석할 수 없는 것으로 판단된다. 따라서 탄소성 파괴역학의 파괴인성치인 J -적분값의 임계값인 J_{IC} 를 비교해 보았다.

3.3 파괴인성치, J_{IC}

미소시편을 이용한 J 시험을 수행한 결과 상온 및 0°C에서는 J - R 선도를 얻을 수 있었으며, 그 시험 결과를 열화시간에 따라 Fig. 9 ~ Fig. 10에 나타내었다. 시험결과를 살펴보면 열화가 진행됨에 따라 J - R 선도가 낮아지는 것을 볼 수

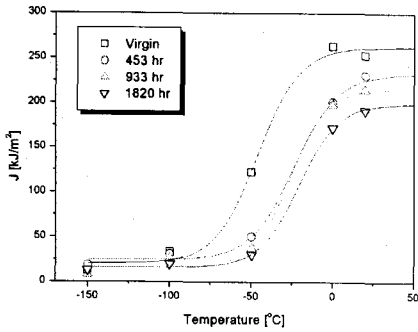


Fig. 11 Effect of test temperature on J_Q value

Table 2 Transition temperature of fracture toughness

Degraded time [hour]		0	453	933	1820
Transition temperature [°C]	Fracture test	-46.2	-26.3	-24.1	-20.8

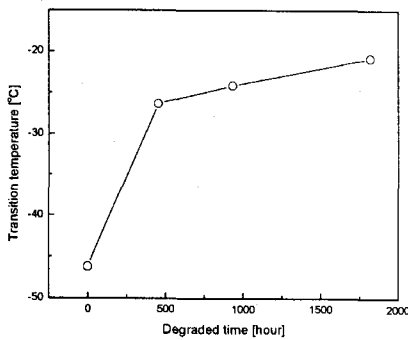


Fig. 12 Effect of degraded time on the ductile-brittle transition temperature

있다. 그러나, 시편의 크기로 인해 충분한 균열전 전이 이루어지지 않았으며, $J_Q = J_{IC}$ 가 되기 위한 조건인 $B > 25(J_Q/\sigma_Y)$ 을 만족하지 못하므로 J_Q 로 나타내었다. 또한 -50°C 이하에서는 시험도 중 취성 파괴로 인해 J - R 선도를 얻을 수 없었기 때문에 취성 파괴시점에서의 J 값을 J_Q 로 나타

내었다.

파괴인성치의 시험온도에 대한 영향을 살펴보기 위해 Fig. 11에서는 실험으로 구한 J_Q 값을 열화단계별로 구분하여 나타내었다. 그 결과 기존의 충격시험을 통해 얻을 수 있는 충격흡수에너지의 온도에 따른 전이거동과 동일한 파괴인성치의 전이거동을 얻을 수 있었다.

4. 고찰

미소시편 파괴인성시험으로 구한 J_Q 값의 연성-취성 전이거동 선도인 Fig. 11를 살펴보면 열화가 진행됨에 따라 각 단계별로 파괴인성치가 낮아지는 현상을 볼 수 있으며, 열화가 진행됨에 따라 파괴인성치의 전이온도가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 재료의 열화에 의한 고온 노화, 취화 현상 때문으로 판단되며, 그 결과 파괴인성치가 저하되고, 연성-취성 전이온도에 영향을 미치는 것으로 판단된다^(8, 9).

각 열화단계별로 연성-취성 전이온도를 구하여 Table 2에 나타내었으며, 파괴인성치의 전이온도를 Fig.12에 비교하여 나타내었다. 열화단계별 변화를 살펴보면 J_Q 값의 전이온도는 열화가 진행됨에 따라 점차 상승하는 것을 알 수 있으며, 또한 500~1000시간 사이의 범위부터 전이온도의 상승이 둔화되는 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구와 같이 안전성이 중요시되는 구조물의 내부에 구조물과 같은 환경에서 열화시킨 감시시편을 이용하여 미소시편 파괴인성시험을 수행한다면 파괴인성치의 연성-취성 전이거동 및 재료의 열화에 따른 취화 정도를 파악할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물에 손상을 최소화하며 재료의 열화에 따른 연성-취성 전이거동 및 전이온도를 평가할 수 있는 방법을 제시하기 위한 기초 연구를 수행하였으며 화력발전소의 터빈로터용 소재인 1Cr-1Mo-0.25V 강을 가속열화시켜 파괴시험을 수행하여 재료물성치를 얻고, 미소시편을 이용한 파괴인성시험을 수행하여 다음과 같은 결

론을 얻었다.

- (1) 1Cr-1Mo-0.25V 강의 모의 열화재에 대한 파괴시험 결과 열화가 진행됨에 따라 항복강도와 인장강도가 저하되며, 파괴인성치가 낮아지는 현상을 나타냈다. 이러한 현상은 열화가 진행됨에 따라 재료가 취약해지기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.
- (2) 미소시편을 이용한 파괴인성시험결과 응력확대계수 K_Q 값으로는 온도에 따른 1Cr-1Mo-0.25V 강의 파괴거동을 정확하게 평가할 수 없었으며, J_Q 값을 비교해본 결과 시험 온도가 낮아짐에 따라 급격히 감소하는 현상을 나타내고 있으며, 재료의 열화가 진행됨에 따라 천이온도가 상승하는 결과를 얻을 수 있었다.
- (3) 미소시편을 이용한 파괴인성시험은 구조물의 특정 부위에 대한 평가를 수행할 수 있으므로, 취약부위에 대해 연성-취성 천이거동을 고려한 열화도 평가에 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) 정희돈, 1991, Apr., "고온설비의 경년열화와 측정법", Journal of KSME, Vol. 31, No. 3, pp. 251-260.
- (2) R. Viswanathan, S. Gehl, 1991, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of CrMoV Rotor Steels Based on Composition", Journal of Engineering Materials and Technology (Transactions of the ASME), Vol. 113, pp. 263-270.
- (3) S. H. Nahm, A. Kim, K. M. Yu, C. M. Suh, J. S. Park, 1996, Fall, "Evaluation of Toughness Degradation of Cr-Mo-V Steel Using Electric Resistivity", KSME, pp. 292-297.
- (4) "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM E8-95a, 1995, pp. 56-76.
- (5) "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM E399-90, 1995, pp. 412-442.
- (6) "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", ASTM E813-87, 1995, pp.

646-660.

- (7) "Standard Test Method for Determining J-R Curves", ASTM E1152-87, 1995, pp. 763-773.
- (8) 권재도, 박중철, 이우호, 박윤원, 1998, "원전 기기용 CF8M의 430℃ 열화 특성에 관한 연구", 원전기기 워크샵, pp. 129-142.
- (9) 서창민, 윤기봉, 윤석호, 김승태, 1992, "열화 시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온에서의 JIC 및 Tmat 평가", Proceeding of the 2nd Symposium on Material Degradation and Life Prediction, 경년열화 및 수명평가연구회, pp. 27-55.