

열화에 따른 파괴인성치의 연성-취성 전이거동 평가

석창성*, 김형익#, 김상필**

Evaluation of the Ductile-Brittle Transition Behavior of Fracture Toughness by Material Degradation

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

ABSTRACT

As the huge energy transfer systems like as nuclear power plant and steam power plant are operated for a long time at a high temperature, 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.

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

1. 서론

각종 기계, 구조물 및 설비가 대형화·고성능화 되고 사용환경이 가혹하고 다양화됨에 따라 설비의 안전성 확보 및 신뢰성 향상에 관심이 증가하고 있다¹. 산업설비의 안전운전을 지속적으로 확보하기 위해서는 현재 상태의 재료물성치와 재질열화도를 평가하고, 이를 바탕으로 설비의 건전성 및 잔존수명을 평가하여야 한다. 또한 산업설비의 취성 벽개

파괴를 방지하기 위하여 반드시 연성-취성전이온도(DBTT) 이상의 온도에서 가동하여야 하며, 이러한 설비의 건전성을 확보하기 위한 DBTT의 평가는 매우 중요하다².

그러나, 사용 중인 설비에서 시험편을 채취하여 열화정도를 평가한다는 것은 대부분의 경우 불가능하며, 가능하다 하더라도 많은 경비와 시간을 투자해야 한다는 문제점을 가지고 있다³. 따라서 이러한 단점을 보완할 수 있는 방법으로 감시시편을 이용

** 2002년 7월 31일 접수
* 성균관대학교 기계공학부
교신저자, 성균관대학교 대학원 기계설계학과
Email bluebear@skku.edu Tel. (031) 290-7477
** (주)현대자동차

하는 시험법에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 감시시편을 이용한 방법은 원자로와 같이 안전성이 매우 중요시되는 구조물의 내부에 구조물과 같은 환경에서 열화되도록 미리 시편을 제작해 두었다가 필요시 이 시편을 이용하여 열화정도를 평가하는 방법이다. 이 경우 시편의 크기 및 수량의 제한으로 인하여 미소시편을 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 전이거동과의 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 4종류의 시험편을 준비하여 시험을 수행하였다.

2.2 인장시험

모재와 각 열화단계별로 제작된 열화재의 인장 특성의 변화를 관찰하기 위해서 ASTM E8-95a (KS B 0801)의 인장시험 규격에 준하여 직경이 8.9mm, 축소단면길이(length of reduced section)는 44.5mm가 되도록 각 열화 단계별로 시험편을 제작하였다⁴. 25ton 용량 전기모터식 인장시험기(Shimadzu:

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	

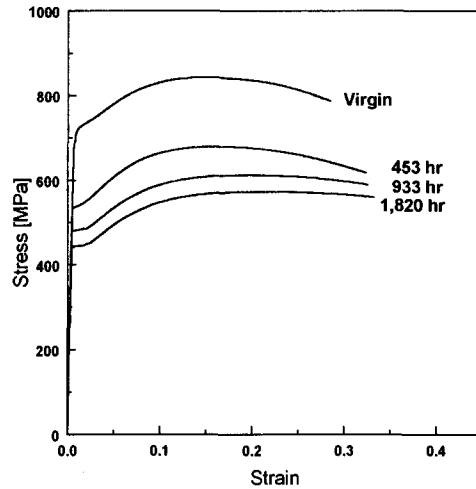


Fig. 1 Effect of the aging time on the stress-strain curve

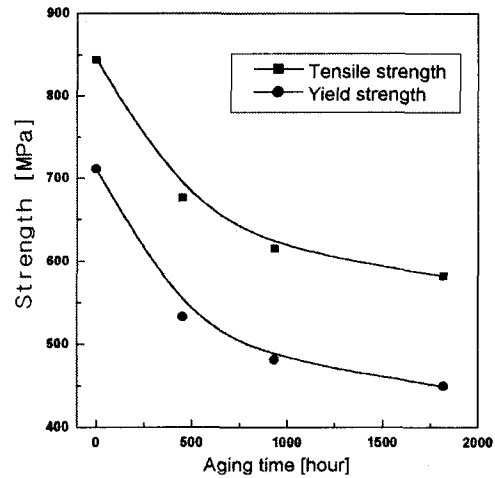


Fig. 2 Effect of the aging time on the tensile strength and yield strength

AG-25TG)를 사용하여 상온에서 1mm/min의 속도로 인장시험을 수행하였으며, 인장시험이 진행되는 동안 하중 신호와 변위 신호를 제어기를 통하여 컴퓨터에 연속적으로 기록하였다. 이로부터 하중-변위 선도, 응력-변형률 선도, 연신률(elongation), 항복강도(0.2% offset법), 인장강도 등을 구하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 모의 열화단계에 따른 공칭응력-공칭변형률 선도과 항복강도, 인장강도를 나타

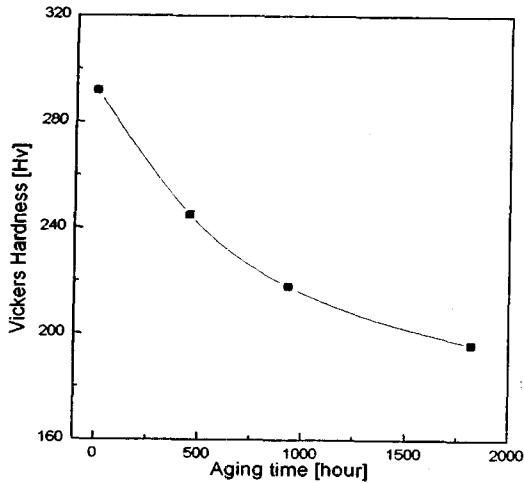


Fig. 3 Effect of the aging time on Vickers hardness

낸 것이다. 이 결과들로부터 열화가 진행됨에 따라 항복강도와 인장강도 등의 재료물성치가 저하되는 것을 알 수 있다.

2.3 경도시험

경도측정에는 미소 비커스 경도시험기(Agsshi : MVK-H2)를 사용하였다. 파괴인성시험을 수행한 CT시험편에서 경도시험편을 채취하여 측정하고자 하는 면을 #800에서 #1500까지의 사포로 연마한 후, 0.5 μ m 크기의 알루미나 분말을 이용하여 습식으로 경면 제작하여 표면 거칠기를 일정하게 하여서 표면 거칠기에 의한 경도값의 변화를 배제하였다. 압입점과 압입점간의 거리가 경도값에 미치는 영향을 배제하기 위해서 압흔의 5배이상의 충분한 간격을 두고 현미경과 모니터로 관찰하면서 상하, 좌우 방향으로 정확한 거리만큼 움직여 원하는 위치의 경도를 측정하였다. 신재와 열화단계별로 4개의 시험편에 대해 시험편당 10회의 압입을 하였으며, 1kg_f까지의 하중을 10초 동안에 가하였다.

Fig. 3에는 열화된 시험편을 사용하여 상온하에서 측정한 비커스 경도값의 변화를 나타내었다. 열화시간이 증가할수록 인장 시험의 결과에서와 같이 경도값의 저하가 둔화되는 것을 알 수 있다.

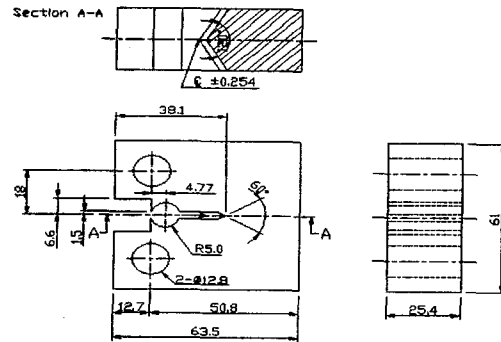


Fig. 4 Dimensions of the specimen for fracture toughness test specimen

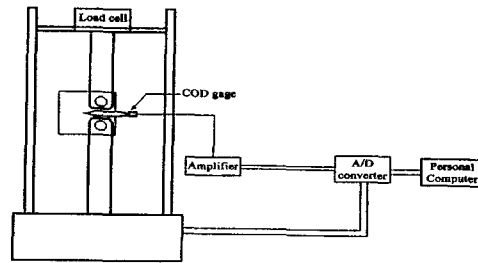


Fig. 5 Schematic diagram of the testing system for fracture toughness test

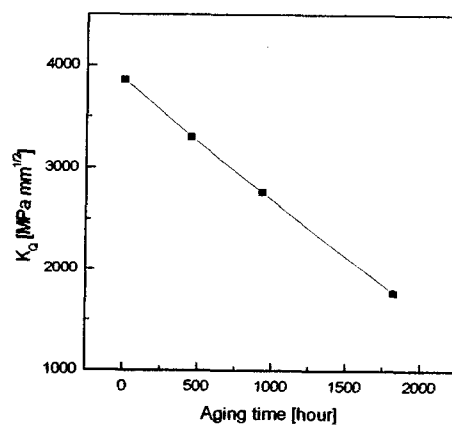


Fig. 6 Effect of the aging time on the fracture toughness

2.4 표준시편 파괴인성시험

모의 열화재에 대한 파괴인성치의 변화를 관찰하기 위해서 ASTM E1820-01의 시험방법에 따라 상온에서 K_{IC} 시험을 수행하였다⁵. ASTM 규격에 준하여 CT(Compact Tension) 표준 시험편을 제작하였으며, 25ton 용량의 전기 유압식 재료시험기(Instron model 1332)를 사용하여 실험을 하였다. 시험편의 형상 및 규격을 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 5에는 사용한 시험기의 개략도를 나타내었다.

파괴인성시험을 수행하여 P_Q 를 결정된 후, ASTM E1820-01에 제시된 식(1)에 따라 K_Q 를 결정하였다.

$$K_Q = \frac{P_Q}{B W^{1/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \dots\dots(1)$$

그러나, $K_Q = K_{IC}$ 를 만족시키기 위한 시편형상 관계식 $B \geq 2.5(K_Q/\sigma_y)^2$ 의 조건을 만족하지 못하였으므로 K_Q 로 표시하였다. Fig. 6은 열화시간에 따른 K_Q 값의 변화를 표시한 선도로서 열화시간이 증가함에 따라 K_Q 값이 감소함을 나타내고 있다.

3. 연성-취성 전이거동 평가

3.1 실험장치 구성

ASTM E1820-01의 시험 규격에 따라 표준시편의 크기를 비례적으로 변화시킨 미소시편을 저온시험을 위하여 각 열화단계 별로 12개씩 제작하였다. 사용한 미소시편의 형상 및 규격을 Fig. 7에 나타내었다.

미소시편 파괴인성시험의 정밀한 제어와 측정을 위하여 0.1ton 용량의 유압식 만능시험기(Instron : model 8841)를 사용하였고, 미소시편 크기에 맞는 소형 3점 굽힘시험용 치구를 제작하였다. 또한 온도에 따른 전이거동을 평가하기 위한 저온 시험용 소형 환경로를 제작하여 사용하였으며, 냉매로 액체질소를 이용하였다. LVDT를 이용하여 하중선 변위를 측정하였으며, COD gage를 이용하여 균열개구변위를 측정하였다. 사용한 시험장비를 Fig. 8에 나타내었고, 소형 3점 굽힘시험용 치구를 설치한 시험장비를 Fig. 9에 나타내었다.

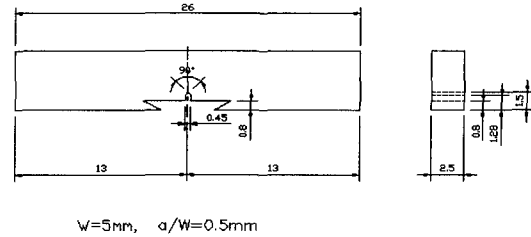


Fig. 7 Dimension of the sub-sized specimen for fracture toughness test

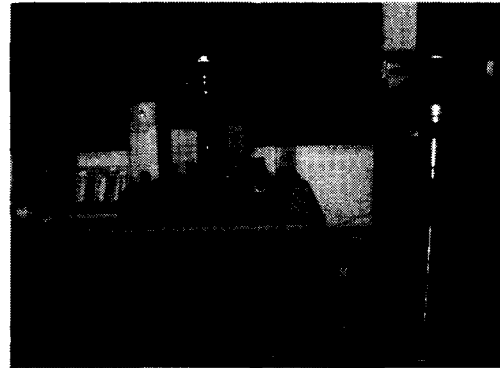


Fig. 8 Material testing system for the sub-sized specimen test

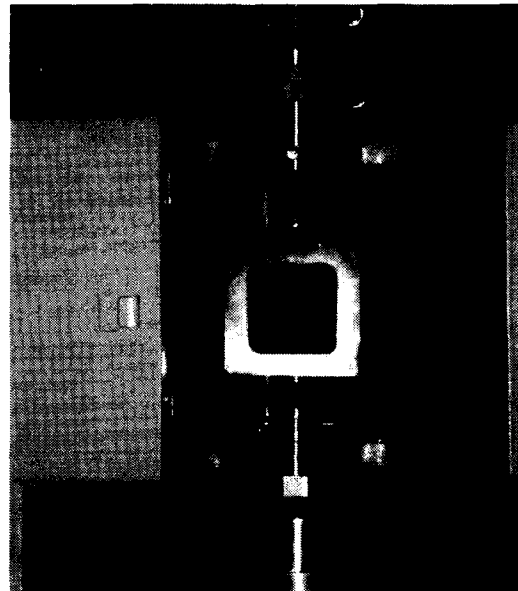


Fig. 9 Test fixture for the 3-point bending test

Table 2 Fracture toughness K_{IC} test results for the subsized specimen

Temperature [°C]	a_0/W	$f(a_0/W)$	P_Q [N]	K_Q [MPa mm ^{1/2}]	Validity
20	0.502	2.679	645	1545.5	×
-50	0.504	2.679	648	1552.7	×
-100	0.501	2.671	612	1462.1	×
-150	0.502	2.679	559	1339.5	×

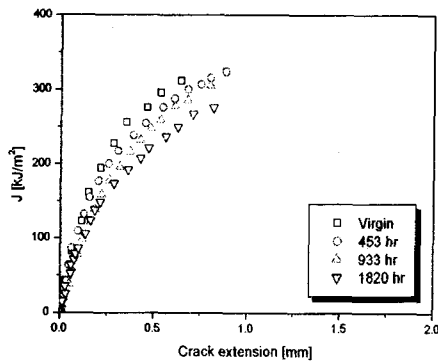


Fig. 10 Effect of aging time on the J-R curve tested at 20°C

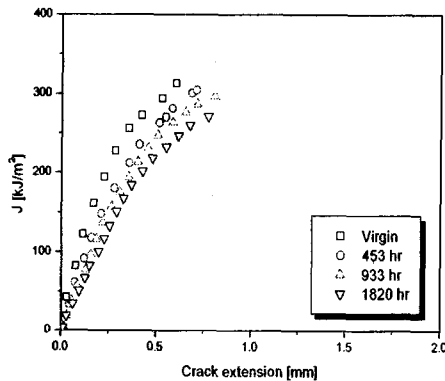


Fig. 11 Effect of aging time on the J-R curve tested at 0°C

3.2 파괴인성치, K_{IC}

미소시편을 이용하여 파괴인성치 K_{IC} 시험을 수

행하고, ASTM E1820-01에 제시된 식(2)에 따라 P_Q 를 결정한 후 K_Q 를 결정하였다.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{B W^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad \dots\dots(2)$$

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 표시하였고, 시험결과를 Table 2에 나타내었다. 온도에 따른 결과를 비교해보면 선형탄성 파괴역학에 의한 응력확대계수는 온도에 따른 1Cr-1Mo-0.25V 강의 파괴거동을 정확하게 해석할 수 없을 것으로 판단되었다. 따라서 탄소성 파괴인성치인 J -적분값의 임계값 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. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 시험결과에서 열화가 진행됨에 따라 J -R 선도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. ASTM E1820-01에 제시된 식(3)에 따라 J_Q 를 결정하였다. 그러나, 시편의 크기로 인해 충분한 균열진전이 이루어지지 않았으며, $J_Q = J_{IC}$ 가 되기 위한 조건인 $B > 25(J_Q/\sigma_y)$ 을 만족하지 못하므로 J_Q 로 나타내었다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad \dots\dots(3)$$

여기서, $J_{el} = K^2 (1 - \nu^2) / E$

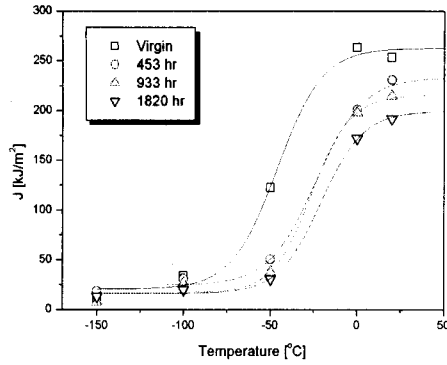


Fig. 12 Effect of test temperature on J_Q value

$$J_{pl} = 2A_{pl} / (B_N b_0)$$

A_{pl} : 하중-하중선 변위곡선하 면적

B_N : 시편의 실제두께

b_0 : 시편의 리가먼트

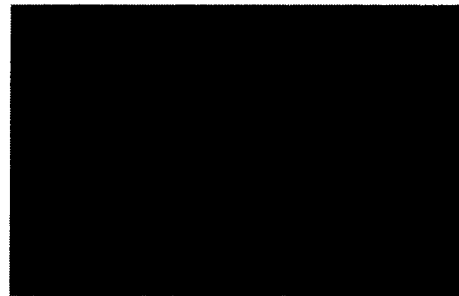
S : 시편 지지점간의 거리

또한 -50°C 이하에서는 시험도중 취성 파괴로 인해 J-R 선도를 얻을 수 없었기 때문에 취성 파괴 시점에서의 J 값을 J_Q 로 나타내었다.

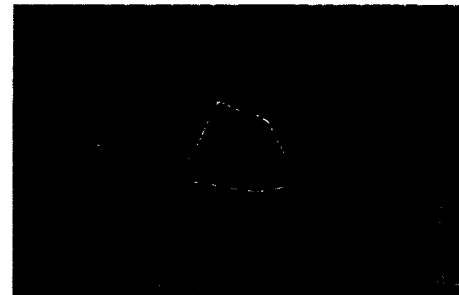
파괴인성치에 미치는 온도의 영향을 고찰하기 위해 여러 온도에서 실험으로 구한 J_Q 값을 열화단계별로 구분하여 Fig. 12에서 나타내었다.

4. 미세조직 관찰

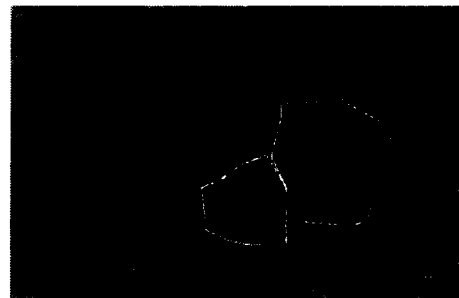
각 단계별 열화재에 대해 가속 열화시간에 따른 미세조직의 변화 과정을 광학현미경을 통해서 관찰하였다. 현미경 조직검사에서는 표준절차에 준하여 실시하였으며 ASTM E 407에 제시되어 있는 부식액인 나이탈(질산+알코올) 4%로 부식시킨 후 현미경으로 관찰하여 열화의 진행에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다. Fig. 13은 각 단계별 열화재에 대해 열화시간에 따른 미세조직의 변화 과정을 광학현미경을 통해서 관찰한 그림들이다. 그림에서와 같이 재료가 열화될수록 결정립 경계면에 석출물이 증가되고, 결정립이 성장되고 있음을 알 수 있다. 특히, Fig. 13의 (b)에서와 같이 453시간 열화재에서 결정립이 급격히 성장되고 있으며, 933시간 이후에는 결정립의 성장이 둔화되어짐을 알 수 있다. 이



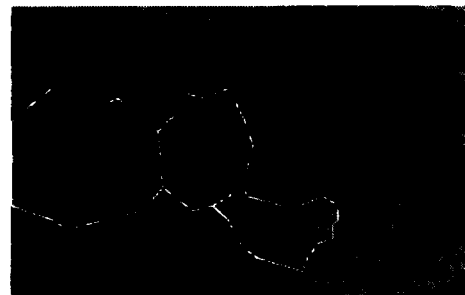
(a) Virgin material



(b) Aging material(453 hour)



(c) Aging material(933 hour)



(d) Aging material(1,820 hour)

Fig. 13 Micro structure of the 1Cr-1Mo-0.25V steel with magnification of 400

러한 경향은 열화재의 강도와 경도값의 감소 경향과 잘 일치하고 있으며, 재료의 강도 및 경도값은 결정립의 크기와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

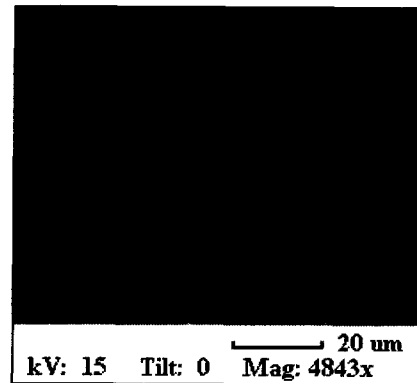
앞에서 관찰된 바와 같이 열화에 따라 재료강도와 파괴인성치의 저하원인을 알아보기 위해 원시편과 열화재의 기지조직부(matrix) 및 석출물이 나타난 입계부를 EDAX(Philips CM2000, energy dispersive analysis X-ray)로 분석하였다. Fig. 14에서와 같이 열화 진행에 따라 결정립 경계면에 Cr, S 등과 같은 특정원소들이 열화재의 결정립계에서 다량 석출되고 있었다. 즉 결정립 경계면에 특정원소들의 석출과 그 화합물 형성에 따른 입계취화(intergranular brittleness)의 원인으로 재료강도 및 파괴인성치가 감소되고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 시험결과는 기존의 연구 결과와 일치하고 있음을 알 수 있었다⁶.

5. 고찰

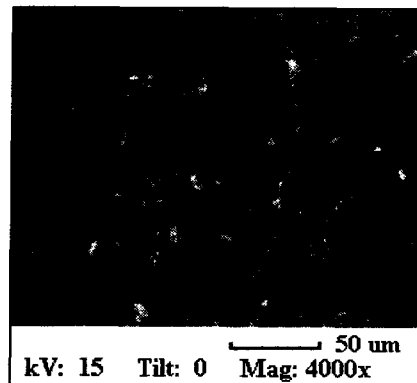
미소시편 파괴인성시험으로 구한 J_Q 값의 연성-취성 천이거동 선도인 Fig. 12를 살펴보면 열화가 진행됨에 따라 각 단계별로 파괴인성치가 낮아지는 현상을 볼 수 있다. 또한 점차 열화가 진행됨에 따라 파괴인성치의 천이온도가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 재료의 열화에 의한 고온 노화, 취화 현상 때문으로 판단되며, 그 결과 파괴인성치가 저하되고, 연성-취성 천이온도가 변화된 것으로 판단된다^{7, 8}.

열화에 따른 파괴인성치의 천이거동을 파악하기 위해 각 열화단계별 적합 곡선식의 변곡점에서 연성-취성 천이온도를 구하여 Table 3에 나타내었으며, 파괴인성치의 천이온도를 Fig. 15에 비교하여 나타내었다. 열화단계별 변화를 살펴보면 J_Q 값의 천이온도는 열화가 진행됨에 따라 점차 상승하는 것을 알 수 있으며, 또한 500 시간까지는 급격히 상승하나 그 이후 부터는 상승이 둔화되는 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행한 바와 같이 안전성이 중요시되는 구조물의 내부에 감시시편을 이용하여 미소시편 파괴인성시험을 수행한다면 파괴인성치의 연성-취성 천이거동 및 재료의 열화에 따른 취화 정도를 파악할 수 있을 것이다.



(a)



(b)

Fig. 14 Analysis of chemical components of virgin(a) and 1,820 aging material(b) at grain boundary using EDAX

Table 3 Transition temperature of fracture toughness

Aging time [hour]	0 (virgin)	453	933	1820
Transition temperature [°C]	-46.2	-26.3	-24.1	-20.8

6. 결론

본 연구에서는 화력발전소의 터빈로터용 소재 인 1Cr-1Mo-0.25V 강을 가속열화시켜 열화재를 제

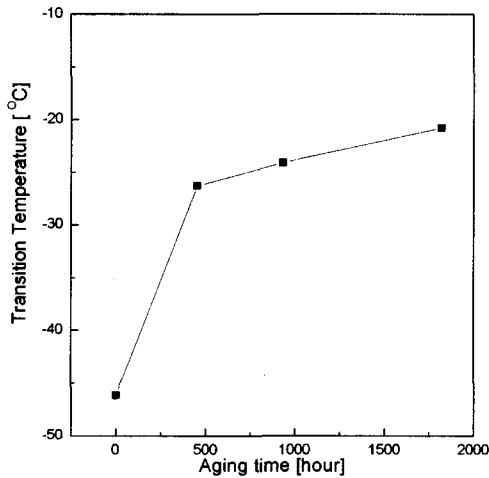


Fig. 15 Effect of aging time on the ductile-brittle transition temperature

작하였으며, 이 열화재를 이용한 파괴시험을 수행하여 재료물성치를 얻고, 미소시편을 이용한 파괴인성시험을 수행하여 연성-취성 전이거동을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1Cr-1Mo-0.25V 강의 모의 열화재에 대한 파괴시험 결과 열화가 진행됨에 따라 항복강도, 인장강도 및 Vickers 경도값이 저하되며, 파괴인성치가 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 열화가 진행됨에 따라 재료가 취약해지기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 미소시편을 이용한 파괴인성시험결과 응력 확대계수 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 전이온도가 상승하는 것으로 나타났다.

(3) 재료가 열화됨에 따라 결정립의 크기가 성장되었으며, 결정립 경계면에 S, Cr 등과 같은 석출물이 증가되고 있었다. 이와 같은 입계취화의 원인으로 열화에 따라 인장강도와 파괴인성치가 감소하고 있었다.

(4) 미소시편을 이용한 파괴인성시험으로 구조물의 연성-취성 전이거동을 고려한 열화도 평가를 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김정규, "산업설비의 수명평가 기술," 산업설비 안전성평가 연구센터 기술분석 보고서, SAFE 97-1, pp. 3, 1997.
2. 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법," Journal of KSME, Vol. 31, No. 3, pp. 251-260, 1991.
3. R. Viswanathan and S. Gehl, "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, 1991.
4. "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM E8-95a, pp. 56-76, 1995.
5. "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," ASTM E 1820-01, 2001.
6. 홍경태, 도정만, 허성강, 김건영, "Cr-Mo 저합금강에서 탐화물의 변화 양상과 경년 열화와의 관계," 제 1회 경년열화 및 수명평가 심포지움 논문집, pp. 105-109, 1991.
7. 권재도, 박중철, 이우호, 박윤원, 원전기기용 CF8M의 430°C 열화 특성에 관한 연구, 원전기기 워크샵, pp. 129-142, 1998.
8. 서창민, 윤기봉, 윤석호, 김승태, "열화시킨 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, 1992.