

# 1Cr-1Mo-0.25V 강의 열화거동에 관한 연구

석창성<sup>†</sup> · 구재민<sup>\*</sup> · 김동중<sup>\*\*</sup> · 안하늘<sup>\*\*\*</sup> · 박은수<sup>\*\*\*\*</sup>

성균관대학교 기계공학부 · <sup>\*</sup>대림대학 기계공학부 · <sup>\*\*</sup>LG전자(주) · <sup>\*\*\*</sup>기아자동차(주) · <sup>\*\*\*\*</sup>현대정공(주)  
(2000. 2. 25. 접수 / 2000. 12. 26. 채택)

## A Study on Degradation Behavior of 1Cr-1Mo-0.25V Steel

Chang-Sung Seok<sup>†</sup> · Jae-Min Koo<sup>\*</sup> · Dong-Joong Kim<sup>\*\*</sup> · Ha-Neul Ahn<sup>\*\*\*</sup> · Eun-Su Park<sup>\*\*\*\*</sup>

Division of Mechanical Engineering, Sungkwunkwan University

<sup>\*</sup>Division of Mechanical Engineering, Daelim College · <sup>\*\*</sup>LG Electronics · <sup>\*\*\*</sup>KIA Motors · <sup>\*\*\*\*</sup>Hyundai Mobis

(Received February 25, 2000 / Accepted December 26, 2000)

**Abstract :** The remaining life estimation for the aged components in power plants as well as chemical plants are very important because mechanical properties of the components are degraded with time of service exposure in the high temperature. Since it is difficult to take specimens from the operating components to evaluate mechanical properties of components, accelerated aging technique are needed to estimate and analyse the material degradation. In the this study, test materials with 4 different degradation levels were prepared by isothermal aging heat treatment at 630°C. And tensile test,  $K_{IC}$  test, hardness test and Scanning Electron Microscope analysis were performed in order to evaluate the degradation of 1Cr-1Mo-0.25V steels.

**Key Words :** degradation, tensile test,  $K_{IC}$ , hardness test, SEM

### 1. 서 론

고온, 고압 환경하에서 사용되는 산업설비 재료 들은 역학적, 화학적, 열적 효과에 의해 초기의 조직상태 등이 변화되어 기계적 성질이 저하되는 재료열화(material degradation) 현상<sup>1,2)</sup>을 수반하게 된다. 재료열화는 설비노후의 가장 큰 원인 중 하나이며, 고온환경, 부하조건, 부식환경 등의 복합적 원인에 의하여 재료의 특성이 변화되어 발생된다. 이러한 변화는 탄화물의 조대화, 금속간 화합물 생성 원소의 석출, 그리고 불순물 원소의 입계 편석 등을 수반하며, 특히 입계 석출물은 입계의 강도에 큰 영향을 미친다. 이러한 재료열화는 부하상태가 지속됨에 따라 가속화되며, 이로 인해 고온·고압용기, 원자력 발전설비, 특수 환경 하에 있는 기기 및 구조물 요소는 고온 노화(aging), 취화(temper embrittlement) 및 조사 취화(radiation embrittlement) 등의 손

상을 받게 되어, 재료의 인성 및 강도 저하로 인한 수명 및 안전성이 저하하게 된다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V 강을 이용하여 고온에서 장시간 사용함으로써 발생하는 열화현상이 재료의 강도와 인성에 미치는 영향을 알아보기 위해 등온 열화 열처리(isothermal aging heat treatment) 방법으로 모의 열화(simulated degradation)시켜 열화 정도가 다른 시험편을 제작하였다. 이 시험편을 이용하여 인장시험, 경도시험, 파괴인성시험, 미세조직 관찰시험 등을 수행하였으며, 그 결과를 고찰하였다.

### 2. 시험방법

시험에 사용된 강재는 화력발전소 터빈로터에 많이 사용되는 1Cr-1Mo-0.25V 강으로 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. 모든 시험편은 터빈로터용 단조재료로부터 열화되지 않은 상태로 T-L 방향으로 채취되었는데, 재료가 파괴에 대하여 최소

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
csseok@yurim.skku.ac.kr

**Table 1.** Chemical composition of 1Cr-1Mo-1/4V steel (wt%)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	V	Sn	Heat Treatment
0.29	0.01	0.74	0.004	0.007	0.060	1.29	1.24	0.25	0.0047	1. Fan cooled at 950°C for 11.5 hours 2. Tempered at 680°C for 15hours

한의 저항을 갖도록 시험편의 길이 방향이 압연방향에 수직하도록 하고 노치의 진행방향은 grain의 신장 방향과 일치하도록 하였다.

**2.1. 가속열화**

발전설비와 같은 고온기기는 부재에 응력이 작용하지 않아도 시간이 경과함에 따라서 재질이 열화되며, 이러한 재질의 변화를 통틀어 경년열화라고 한다. 고온 기기의 사용중에 발생하는 열화는 응력이 원인이 되는 열화와 열적활성 에너지에 의해 발생하는 열화로 나누어진다. 여기서 전자의 경우를 기계적 열화라 하며 후자의 경우를 조직적 열화라 한다.

조직열화는 그 자체가 진행된다 하더라도 응력이 작용하지 않는 한 파손까지는 도달되지 않으나 부하상태에서 가속된다고 알려져 있으며, 설비의 수명을 결정할 때 허용 상한치의 감소나 기계적 열화 속도 등에 영향을 미치게 된다. 조직열화에는 탄화물의 생성이나 편석 등에 의한 재료의 연화 또는 취화 그리고 고온 부식 등이 있다.

본 연구에서는 실제 발전소 터빈에서 오랜 기간 사용된 재료와 유사한 미세조직을 갖도록 열처리를 수행하였다. 여러 연구자<sup>4-7)</sup>들의 논문을 참고로 하여 재료를 일반 사용온도(538°C)보다 높고 재결정온도(뜨임 온도)보다 낮은 630°C의 고온에서 인위적으로 모의 가속 열처리를 수행하여 고온에서 장시간에 걸쳐 사용한 재료와 같은 미세조직을 갖도록 시뮬레이션 하였다. 가속 열화처리에 소요되는 시간은 실제 사용온도에서 철이 자기확산(self diffusion)되는 양과 동일한 양이 가속열처리 온도에서 발생하도록 선택했다. 그리고 실제 운전 시간에 대응하여 필요한 가속 열화시간을 Arrhenius형 확산식을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

538°C와 630°C에서 각각 확산계수(diffusion coefficient)  $D_1$ 과  $D_2$ 는 식 (1), (2)와 같고,  $D_1$ 과  $D_2$ 가 일치하도록 하면 식 (3)과 같이 유도되며, 이 식에서 가속열화 온도인 630°C에서의 가속 열화시간  $t_2$ 를 계산할 수 있다.

**Table 2.** Determination of aging time at 630°C for simulating equivalent microstructures serviced at 538°C

Simulated Service Time at 538°C (hour)	0	25,000	50,000	100,000
Aging Time at 630°C (hour)	0	453	933	1,820

$$D_1 = D_0 \exp\left[-\frac{Q}{RT_1}\right] = \frac{C}{t_1} \tag{1}$$

$$D_2 = D_0 \exp\left[-\frac{Q}{RT_2}\right] = \frac{C}{t_2} \tag{2}$$

$$t_2 = t_1 \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \tag{3}$$

여기서 절대온도  $T_1$ 은 811.5K(538°C),  $T_2$ 는 903.5 K(630°C),  $t_1$ (hour)은 온도  $T_1$ 에서의 열화시간,  $t_2$  (hour)는 온도  $T_2$ 에서의 열화시간,  $R$ 은 기체상수 (8.3143 J/kmol/K),  $Q$ 는 철의 자기 확산활성화 에너지(272 kJ/mol)를 나타낸다.

본 연구에서는 냉각방법으로 슬로우 쿨링(slow cooling)방법<sup>8)</sup>을 사용하여 30°C/hr의 냉각속도로 서냉 후 노냉시켰다. 그리고 재료 열화를 평가하기 위해 열처리 시간에 따라 4단계(0, 25000, 50000, 100000 시간)로 모의 열화시켜 파괴시험 재료를 준비하였다. Table 2에는 실제 사용온도에서 장시간 사용된 것과 동일한 미세조직을 얻기 위해 630°C에서 가속열화처리를 수행한 시간을 나타내었다.

**2.2. 인장시험**

신재와 각 열화단계별로 제작된 열화재의 인장 특성의 변화를 관찰하기 위해서 ASTM E 8-95a<sup>9)</sup> (KS B 0801)에 따라 각 열화단계별로 2개씩의 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험에 사용된 시험기로는 25ton 용량의 전기유압식 만능시험기를 사용하였으며, 상온에서 1mm/min의 속도로 시험을 수행하여 하중-변위 선도, 연신율(elongation), 항복강도(0.2% offset) 및 인장강도 등

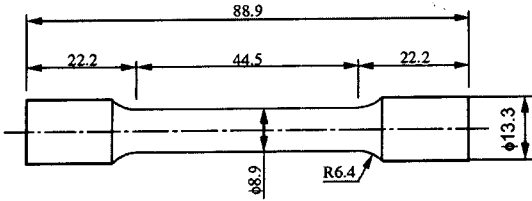


Fig. 1. Shape and dimensions of a tensile test specimen (unit : mm)

을 구하였다. 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.3. 경도시험

재료의 열화도를 평가하기 위해 경도시험을 수행하였다. 경도측정에는 Micro Vickers hardness tester를 사용하였다. 충격시험을 수행한 후 과단된 시험편을 사용하여 시험을 수행하였으며, 측정면을 #800에서 #1500까지의 사포로 연마한 후 0.5  $\mu$ m 크기의 알루미나 분말을 이용하여 습식으로 경면 제작하여 표면 거칠기에 의한 경도치의 변화를 배제하였다. 압입점간의 거리가 경도치에 미치는 영향을 배제하기 위해서 압흔의 5배 이상의 충분한 간격을 두고 현미경과 모니터로 관찰하면서 원하는 위치에서 경도를 측정하였고, 압자에 의한 압입 형상이 뚜렷한 사각형상( $\diamond$ )이 되도록 하였다. 압입 횟수는 신재와 열화단계별로 4개의 시험편에 대해 시험편 당 10회로 하였으며, 시험하중은 10초 동안에 1kg까지의 하중이 작용하도록 하였다.

### 2.4. 파괴인성시험

각 열화 단계별로 2개의 CT 표준시험편을 사용하였으며, 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 파괴인성시험에 사용된 시험기는 25ton 용량 전기유압식 재료시험기이며 ASTM E 399-90<sup>(10)</sup>의 KIC 시

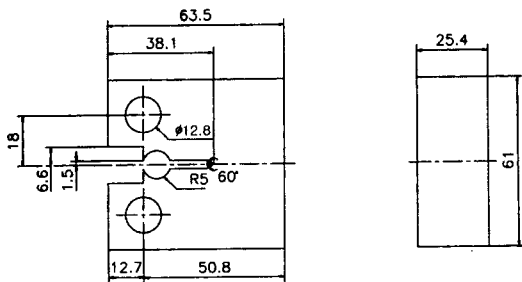


Fig. 2. Shape and dimensions of a fracture toughness test specimen

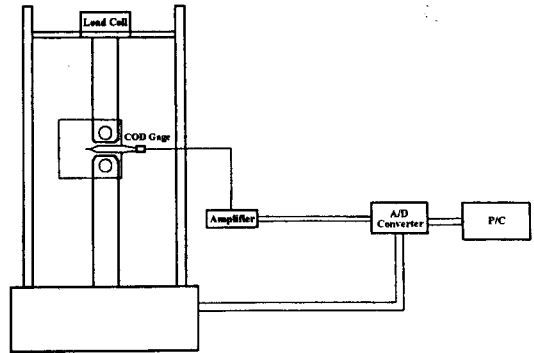


Fig. 3. Schematic diagram of a fracture toughness test system

험방법에 따라 시험을 수행하였다. 모든 시험의 제어, 데이터 처리 및 결과해석에는 A/D 변환기와 PC를 사용하였다. Fig. 3에는 파괴인성 실험장치를 도식적으로 나타내었다.

### 2.5. 미세조직 관찰시험

재료의 장시간 사용에 따른 열화현상을 먼저 조직의 변화와 탄화물 분석을 통해서 확인할 수 있다. 탄화물 분석방법에는 형태 분석방법과 조성 및 조직 분석 방법이 있다. 형태 분석은 탄화물의 평균 크기, 구상화 정도, 평균 간격 등을 측정하는 것이며, 조직 및 조성 분석 방법은 탄화물의 구조와 탄화물내의 Cr, Fe, Mo, V과 P 등의 함량을 측정하고, 탄화물의 결정구조를 분석하여 열화 정도를 측정하는 것이다.

본 연구에서는 탄화물의 구조를 분석하고, 열화 단계에 따른 탄화물의 형태 및 탄화물내의 조성 변화 등을 조사하기 위해 각 단계별 열화재에 대해 가속 열화시간에 따른 미세조직의 변화 과정을 광학현미경과 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)을 통해서 관찰하였다.

현미경 조직검사에서는 표준절차에 준하여 mounting, grinding, polishing을 실시하였고 ASTM E 407에 제시되어 있는 부식액인 나이탈(질산+알코올) 4%로 부식시킨 후 현미경으로 관찰하였고, 조직사진을 비교하여 열화의 진행에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였다.

## 3 결과 및 고찰

### 3.1 인장시험 결과

Table 3에는 1Cr-1Mo-0.25V 강의 신재와 각 단계

Table 3. Tensile test results

Degraded Time (hour)	Uniform Elongation (%)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)
0	25.3	844	711
25,000	26.8	676	533
50,000	27.8	615	481
100,000	30.7	582	450

별 열화재에 대한 인장시험의 결과인 연신율(uniform elongation), 항복강도(yield strength), 인장강도를 나타내었고 Fig. 4에는 공칭응력-공칭변형률 선도를, Fig. 5에는 진응력-진변형률 선도를 도시하였다. 그리고 Fig. 6에는 연신율을, Fig. 7에는 항복강도와 인장강도를 모의 열화 단계별로 동일 선도에 나타내었다.

Table 3과 Fig. 4~Fig. 7의 인장시험 결과에서와 같이 항복강도와 인장강도는 재료 열화가 진행됨에 따라 감소하고, 연신율은 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, Fig. 7에서 인장강도는 25,000시간 열화재가 신재에 비해 약 20% 감소하였으며 50,000시간의 경우는 약 27% 정도 감소하였다. 그리고 100,000시간에서는 약 31% 감소하였다. 그리고 항복강도는 25,000시간 열화재가 신재에 비해 약 25% 감소하였으며 50,000시간의 경우는 약 33% 정도 감소하였다. 그리고 100,000시간에서는 약 37% 감소하였다.

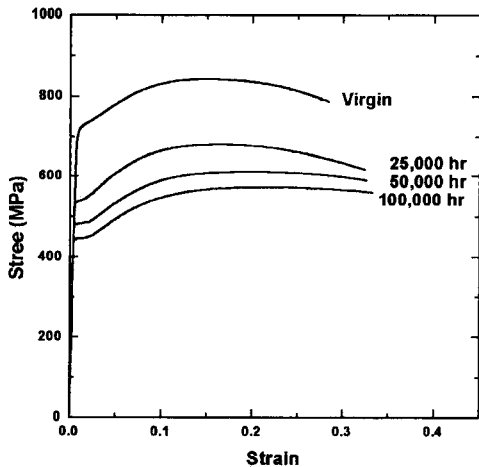


Fig. 4. Effect of degraded time on nominal stress-nominal strain curve

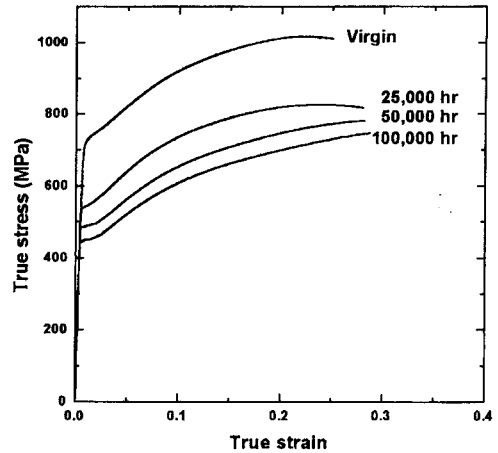


Fig. 5. Effect of degraded time on true stress-true strain curve

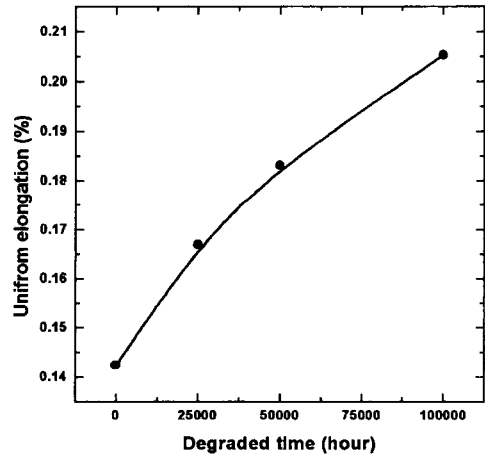


Fig. 6. Effect of degraded time on elongation

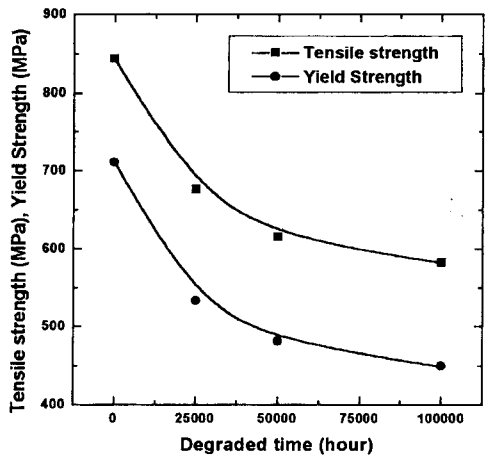


Fig. 7. Effect of degraded time on tensile strength and yield strength

즉 고온 열화의 경우 50,000시간까지는 연신율의 증가와 항복강도와 인장강도의 감소가 두드러지며 50,000시간 이후에는 연신율의 증가율과 강도의 감소율이 둔화되어짐을 알 수 있다.

**3.2. 경도시험 결과**

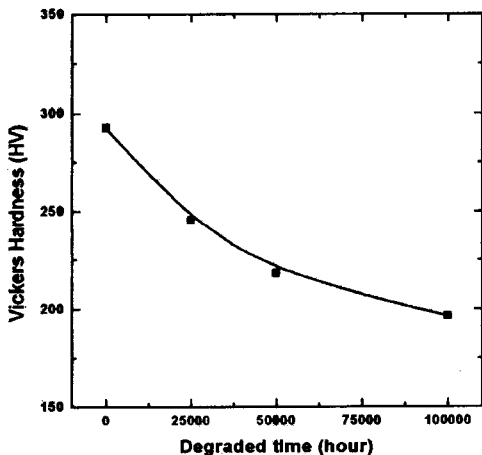
Table 4에는 단계별로 열화된 시편의 비커스 경도와 브린넬 경도를 나타내었다. 브린넬 경도는 ASTM-E 140 환산표에 의해서 환산하였다. Fig. 8에 각 열화 단계별로 상온에서 측정된 비커스 경도를 나타내었다. 열화가 진행됨에 따라 인장강도와 유사한 경향으로 경도치가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 각 단계별 경도치가 25,000시간, 50,000시간, 100,000시간에 대해 신재보다 16%, 25%, 33% 감소하였다.

**3.3. 파괴인성시험 결과**

상온에서 KIC 시험을 수행하였으며 ASTM E 399에 따라 PQ를 결정된 후 이로부터 KQ를 결정하

**Table 4.** Hardness test results

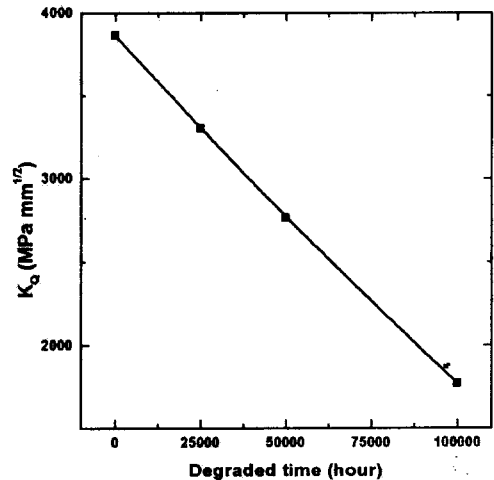
Degraded Time (hour)	Vickers Hardness (HV)	Brinell Hardness (HB)
virgin	292	277
25,000	245	233
50,000	218	207
100,000	196	186



**Fig. 8.** Effect of degraded time on Vickers hardness

**Table 5.** Fracture toughness test results

Degraded Time (hour)	Crack Length (mm)	a/W	f(a/W)	P <sub>Q</sub> (kN)	K <sub>Q</sub> (MPa mm <sup>1/2</sup> )	Validity
0	28.32	0.557	11.63	47.4	3863	×
25,000	28.00	0.551	11.39	41.4	3304	×
50,000	28.20	0.555	11.54	34.1	2761	×
100,000	28.08	0.553	11.45	22.1	1771	×

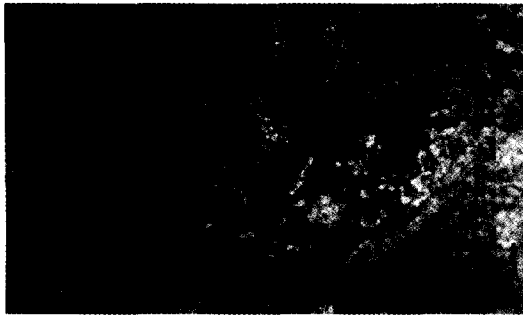


**Fig. 9.** Effect of degraded time on fracture toughness

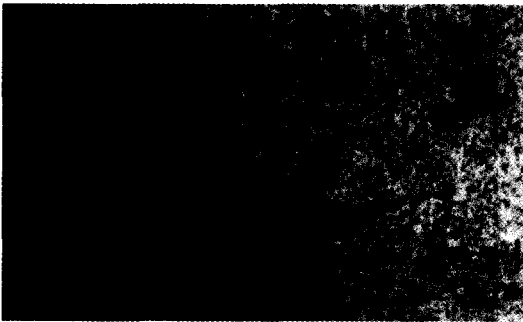
였다. 이때 모든 경우에 KIC의 충족 조건인  $B \geq 2.5(K_Q/\sigma_f)^2$ 의 조건을 만족하지 못하였으므로 KQ로 표시하였다. 이 실험결과를 Table 5에 나타내었다.

Fig. 9는 열화시간에 따른 KQ값의 변화를 나타내며 열화가 진행될수록 파괴인성치 KQ가 지속적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 먼저 25,000시간 열화시킨 경우에는 신재보다 14.5%, 50,000시간은 28.5%, 100,000시간은 53.1%가 감소하였다. 즉 열화의 진행에 따라 KQ값의 변화는 거의 직선적으로 감소함을 알 수 있으며, 이는 인장시험이나 경도시험 결과와는 조금 다른 경향이였다.

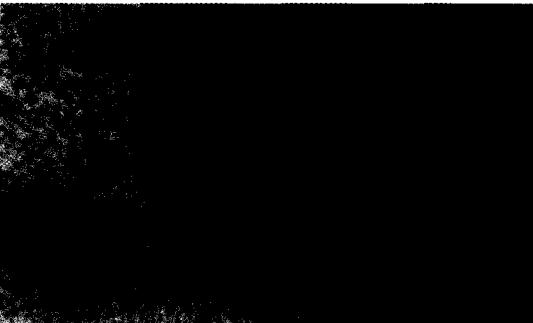
그러나 전반적인 파괴시험 결과를 살펴보면 열화가 진행됨에 따라 기계적인 성질이 감소하는 현상이 나타나는데, 이는 열화시간이 경과하면서 나타나는 석출물의 발생, 조직의 구상화, 그리고 결정립 경계의 성장에 따른 조직의 조대화 등의 영향으로 분석된다.



(a) virgin



(b) 25,000 hr



(c) 50,000 hr



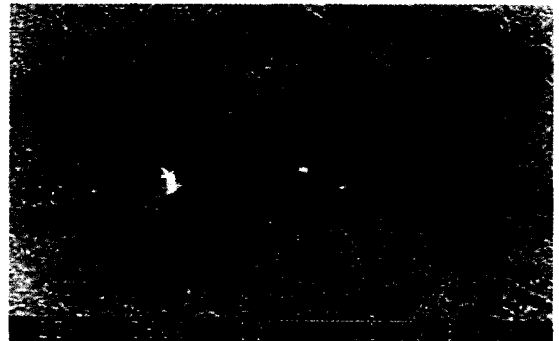
(d) 100,000 hr

Fig. 10. Optical micrographs of the degraded 1Cr-1Mo-0.25V steel

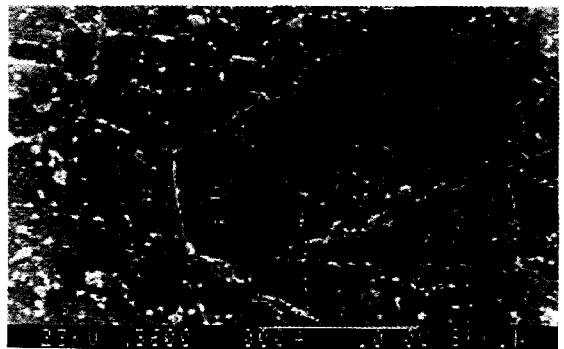
### 3.4. 미세조직 관찰시험 결과

Fig. 10(a)~(d)는 열화 시간에 따른 미세조직의 변화모습을 광학현미경을 통해 관찰한 것이다. 사진이 선명하지 않아서 탄화물의 분석은 불가능하였고 정성적인 비교만이 가능하였다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(d)를 비교해보면 열화가 진행됨에 따라 A와 같이 결정립계 부근에서의 석출물의 양이 증가하고 조직이 조대화되는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 11은 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰한 것이다. 광학현미경의 결과와 마찬가지로 열화가 진행됨에 따라 조직이 조대화되고 또한 구상화되는 것을 관찰할 수 있다.

이처럼 열화에 의한 입계의 석출물 증가는 확산 작용에 의한 물질의 이동상태를 나타내는 것으로써, 이러한 석출물 증가는 재료를 연화시켜 재료의 경도와 인장강도 및 파괴인성치와 같은 기계적 성질을 감소시키는 것으로 생각된다. 그러므로 미세조직의 변화를 재료열화의 직접적인 원인으로 볼 수 있다.



(a) virgin



(b) 100,000 hr

Fig. 11. SEM micrographs of the degraded 1Cr-1Mo-0.25V steel

#### 4. 결론

본 연구에서는 재료의 열화도를 평가하기 위한 기초연구로 가속열화 시킨 1Cr-1Mo-0.25V강에 대하여 파괴시험법인 인장시험, 경도시험, 파괴인성 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재료의 열화가 진행됨에 따라 재료의 연성은 증가하였으나 인장강도와 항복강도는 감소하였다. 이러한 경향은 열화의 진행에 따라 50,000시간까지는 그 영향이 크게 나타났으나 그 이후에는 그 영향이 감소되었다.

(2) 재료의 열화에 따른 경도값의 변화는 인장특성과 유사한 경향을 나타냈으며, 이를 통해 미소경도시험을 통한 재료의 열화도 평가의 가능성을 확인할 수 있었다.

(3) 열화시간이 증가할수록 파괴인성치의 경우에는 선형적으로 감소하였으며, 100,000시간 열화재가 모재에 비해서 약 53% 정도 감소하였다.

(4) 재료의 열화가 진행됨에 따라 조직이 구상화되어가며, 입계 석출물이 증가되었다. 이는 열화에 따른 인장강도의 저하와 파괴인성치 감소의 원인이라고 생각된다.

**감사의 글 :** 이 논문은 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- 1) R. Viswanathan, S. Gehl, "A Method for Estimation of the Fracture Toughness of Cr-Mo-V Rotor Steels Based on Composition", *Journal of Engineering Materials and Technology*, (Transactions of the ASME), Vol. 113, pp. 263~270, 1991.
- 2) R. Viswanathan, S. M. Bruemmer, "In-service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors", *Journal of Engineering Materials and Technology*, (Transactions of the ASME), Vol. 107, pp. 316~324, 1985.
- 3) 정희돈, "고온설비의 경년열화와 측정법", *대한기계학회지*, Vol. 31, No. 3, pp. 251~260, 1991.
- 4) 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.
- 5) 서창민, 허정훈, 이해무, 남승훈, 서덕영, "시효 열화시킨 1Cr-1Mo-0.25V강의 고온하의 피로 강도에 관한 연구", *Proceeding of the 5th Symposium on Material Degradation and Life Prediction*, pp. 46~63, 1995.
- 6) A. M. Abdel-Latif, J. M. Corbett, D. Sidey and D. M. R. Taplin, "Effects of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2-1/4Cr-1Mo Steel", *Advanced in Fracture Research*, (Proc. Of 5th Int. Conf. On Fracture(ICF5)), Vol. 4, pp. 1613~1620, 1981.
- 7) A. M. Abdel-Latif, S. M. Corbett, and D. M. R. Taplin, "Analysis of Carbides Formed During Accelerated Aging of 2.25Cr-1Mo Steel", *Metal Science*, Vol. 16, pp. 90~96, 1982.
- 8) 진영준, 류승우, 권재도, 장순식, "Cr-Mo 강의 모의 열화 방법과 재료강도에 미치는 영향", 제 2회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집, pp. 2~16, 1992.
- 9) "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM E 8-95a, Annual Book of ASTM Standard, pp. 56~76, 1995.
- 10) "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM E 399-90, Annual Book of ASTM Standard, pp. 412~442, 1995.