

# 장기 사용 보일러 헤더의 열화거동 평가에 관한 연구

권재도\* · 배용탁\*\* · 최성종\*\*\*  
(1999년 6월 22일 접수)

## Evaluation of Degradation Behavior of the Long-Term Serviced Boiler Header

Jae Do Kwon, Yong Tak Bae and Sung Jong Choi

**Key Words:** Boiler Header(보일러 헤더), 1Cr-0.5Mo Steel(1Cr-0.5Mo 강), Degradation(열화), Reheat-Treated Material(회복재), Fatigue Crack Growth(피로균열진전)

### Abstract

The degradation of a boiler header constructed by a material, 1Cr-0.5Mo steel in a fossil power plant is observed when the header is exposed for a long period to the high temperature and pressure. The present investigations are for evaluating the effect of the degradation on the material, such as its strength changes. Reheat-treated metal is used to compare the mechanical properties of the degraded and that of reheat-treated materials. Through the investigation, following results are obtained; 1) the area ratio of ferrite in the reheat-treated material is larger than that of the degraded material, 2) the hardness and tensile strength of the degraded material are lower than that of the reheat-treated material, 3) the ductile-brittle transition temperature(DBTT) increased toward high temperature region, 4) the fatigue crack growth rate(FCGR) of the degraded material is higher than that of the reheat-treated material in the region of low  $\Delta K$  value while FCGR of the both materials are similar in high  $\Delta K$  region.

### 1. 서론

화력 및 원자력 발전설비와 같은 에너지 변환 설비에는 Cr-Mo강, Cr-Mo-V강 및 스테인리스강과 같이 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 내열강이 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 내열 구조부재들은 고온에서 장시간 노출되며, 이에

따라 재료의 미세 조직이 변화되어 재질열화현상을 나타내고, 그 결과 고온 설비부재의 파손사고를 초래한다.<sup>(1)</sup> 따라서 화력발전설비의 적절한 보수관리와 계획적이고 효율적인 운용을 위한 재질 열화의 연구<sup>(2,3)</sup>는 필수적이라고 할 수 있다.

그 대표적인 연구로, M. Katsumata는 장기사용에 따른 조직 결정입계에서의 P, Sb 및 Sn 등의 편석에 의한 템퍼링 취화에 관한 연구<sup>(4)</sup>를, Y. Murakami는 Cr-Mo강의 취화 거동에 관한 연구에서 530℃로 약20년간 사용된 1Cr-0.5Mo강의 취화 감수성이 인정되지 않는다고 보고하였다.<sup>(5)</sup> 또한 V. A. Bißs와 T. Wada는 거의 같은 온도조건과 기간동안 사용되어진 1Cr-0.5Mo강에서 페라이트 내의 Cr 및 Mo의 고용량이 각각 72%, 32%로 감

\* 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jdkwon@yucc.yeungnam.ac.kr

TEL : (053)810-2462 FAX : (053)813-3703

\*\* 영남대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 영남대학교 공업기술 연구소

소하여 탄화물  $M_2C$  및  $M_7C_3$ 를 형성한다고 보고하였다.<sup>(6)</sup> 즉 재료의 열화는 탄화물의 구상화와 같은 형상변화와 시효에 의한 탄화물의 생성과 양의 증가에 기인한다고 설명하고 있다. Y. Nishizaka는 이러한 탄화물의 형상과 분포변화에 따르는 인장강도 및 충격인성을 구한 연구에서, 인장강도, 연율 및 단면수축율은 재열처리한 회복재와 열화재에서 거의 유사한 값을 나타냈으며, 항복강도와 FATT(Fracture Appearance Transition Temperature)는 다소 차이를 나타냈다고 밝히고 있다.<sup>(7)</sup> 열화재에서 FATT가 높게 나타난 것은 초석 페라이트(proeutectoid ferrite)내의 탄화물 생성과 결정입계에서의 구상화 탄화물 형성에 의한 것이며, 항복응력이 낮은 이유는 미세한 탄화물이 합제하여 구상화되는 과정에서 미세한 탄화물의 수가 줄기 때문이라고 설명하고 있다.

본 연구에서는 재료의 열화과정이 위에서 언급한 탄화물의 형상변화 및 분포변화와 더불어 결정조직이 조대화되는 점에 착안하여 고온, 고압하에서 장기 사용된 1Cr-0.5Mo강의 열화재에 대하여 적절한 재열처리로 회복재를 제작한 후 열화재와 회복재에 대하여 조직 및 입도관찰, 충격, 인장, 경도 및 피로균열진전시험을 수행하여 열화에 의한 결정립 조대화가 재료의 강도에 미치는 영향을 검토함으로써 잔여수명추산, 보수 및 설계의 기초자료로 활용될 수 있는 정보를 제공하고자 하였다.

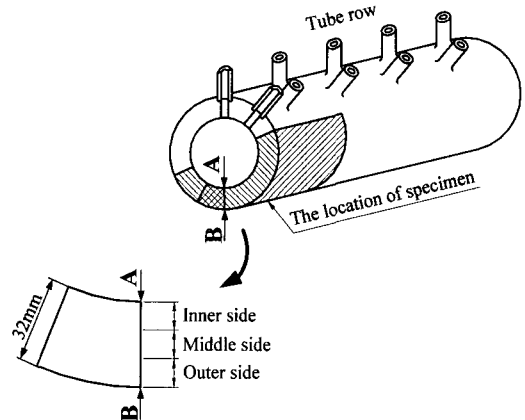
## 2. 실험용 재료

본 연구에 사용된 재료는 화력발전소의 보일러 헤더(boiler header)에 사용된 재료로서, 인발에 의해 제작된 ASTM A182 Grade F12 1Cr-0.5Mo강이다. 그리고 515°C에서 10.3 MPa의 압력으로 실제 약 22만 시간(약 25년) 동안 장기 사용된 열화재(degraded material)를 사용하였다. 이 1Cr-0.5Mo강 열화재의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

그러나, 열화된 보일러 헤더용 1Cr-0.5Mo강의 강도와 비교하기 위한 동일 재료의 건전재를 구할 수 없으므로 재열처리에 의하여 기계적 특성을 회복시킨 재료를 사용하여 열화의 특성을 규명하고자 하였다. 따라서 열화재를 900°C에서 1시간 동안 유지시키고, 700°C에서 3시간 동안 유지시킨 후 공냉하는 방법으로 불림(normalizing)

**Table 1** Chemical composition of degraded 1Cr-0.5Mo Steel

Composition, wt. %									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
0.18	0.27	0.68	0.016	0.014	0.095	0.94	0.44	0.12	0.008



**Fig. 1** Schematic diagram of inside, middle side and outside for degraded and reheat-treated material

및 뜨임(tempering)처리를 하여 충격치를 회복시킨 회복재(Reheat-treated material)를 건전재로 간주하였다. 이 방법은 Nishizaka에 의해 불림 및 뜨임 처리하여 회복재를 제작하는 방법에 관한 연구 결과<sup>(7)</sup>와 ASTM A 182/A 182M F12에서 요구하는 재료의 열처리과정을 인용하여 선정하였다.

## 3. 열화와 조직변화

열화재와 회복재의 조직을 비교하기 위하여 2% 나이탈(nital) 용액을 사용하여 20초(sec) 동안 에칭(etching)을 하였다. 그리고 Fig. 1과 같이 열화재와 회복재의 두께방향에 따라 내부와 중간 및 외부 부분으로 구별하여 200배의 광학현미경으로 관찰한 조직사진을 각각 Fig. 2의 (a), (b) 및 (c)에 나타내었다.

Fig. 2에서 나타난 바와 같이 열화재와 회복재 모두 위치에 따른 내부와 중간 및 외부의 조직 차이는 미세하여 구별하기가 어려운 반면, 열화재와 회복재 조직을 비교하면 회복재에 비하여 열화재의 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite) 조직이 상당히 조대해져 있음을 알 수 있었다.

이와 같은 열화재 조직의 조대화 정도를 알아 보기 위하여 열화재와 회복재에 대하여 내부, 중간 및 외부의 조직사진에서 선분법(linear analysis)을 이용하여 페라이트의 결정입도번호를 결정<sup>(8)</sup>하여 비교했다.

결정입도번호의 결정은 배율 100배의 광학현미경 사진 상에서 서로 교차하는 일정길이  $L_1$ 과  $L_2$  (각각 100 mm)의 직선들을 그어, 이것과 교차하는 입도수를 세고, 각각의 평균을  $i_1, i_2$ 로 하여  $1 \text{ mm}^2$ 내의 결정입수  $n$ 을 식 (1)에 의하여 구하였다. 또한 결정입의 크기는 실제 길이가 아닌 번호로 나타내기도 하는데, 그 결정입도번호는 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$n = 0.8 \cdot m^2 \left( \frac{i_1 \times i_2}{L_1 \times L_2} \right) \quad (1)$$

$$n = 2^{N+3} \quad (2)$$

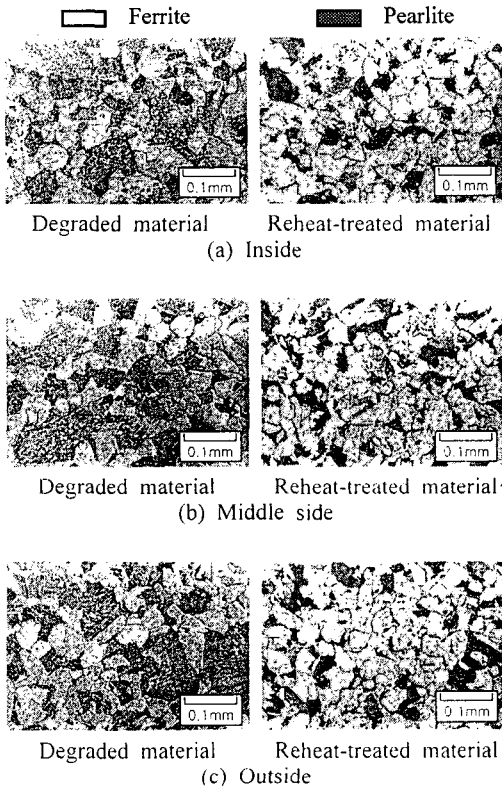


Fig. 2 Optical micrographs for degraded and reheat-treated materials

여기서,  $m$ 은 광학현미경의 배율,  $N$ 은 결정입도의 번호이다.

이와 같은 방법으로 구한 열화재와 회복재의  $1 \text{ mm}^2$  당 결정입의 수와 입도번호를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 보듯이 열화재의 입도번호는 6, 회복재의 입도번호는 7로 열화재의 조직이 회복재에 비하여 조대해져 있음을 알 수 있었다.

Table 2 The ferrite grain size determined by the method of linear analysis for degraded and reheat-treated material

Material	Grain size number (N)	Number of grain per $1\text{mm}^2$	Mean area of grain ( $\text{mm}^2$ )
Degraded	In	6	416
	Middle	6	401
	Out	6	538
Reheat-treated	In	7	989
	Middle	7	1332
	Out	7	1032

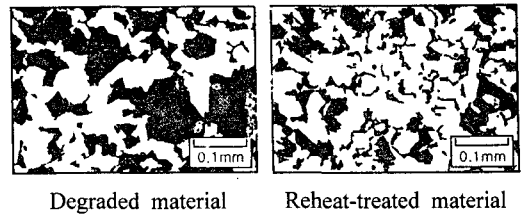


Fig. 3 The ferrite(white area) obtained by the method of image-processing from optical micrographs, at the Fig. 2 (c)

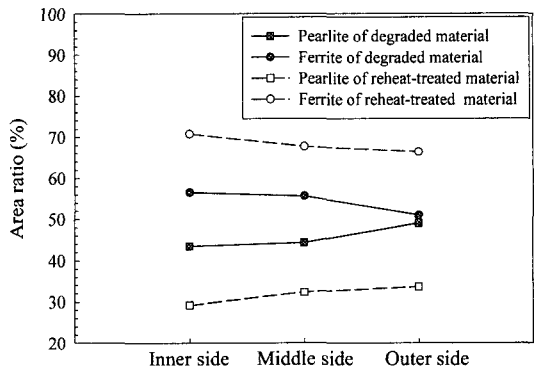
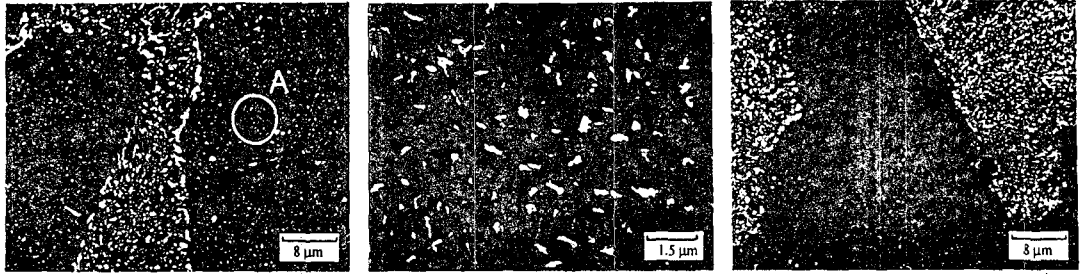


Fig. 4 Area ratios of pearlite and ferrite in the materials



(a) Degraded material (b) Magnification view of A in (a) (c) Reheat-treated material

Fig. 5 SEM micrographs of carbides in 1Cr-0.5Mo steel

Fig. 3은 열화재와 회복재에 대한 페라이트와 펄라이트의 면적율을 컴퓨터(computer)의 화상처리 기법(image-processing methods)을 이용하여 구한 일례를 나타낸 것으로 Fig. 2의 (c)에 해당된다. 이 방법은 광학현미경으로 얻은 조직사진을 컴퓨터에 입력시킨 후, 소프트웨어(software) HANAKO9로 펄라이트 부분만을 드로잉(drawing)하여 면적을 산출하였다. 그 결과는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 열화재가 회복재에 비하여 페라이트의 면적율이 약 15% 이상 더 적게 나타났다. Table 2 및 Fig. 4의 결과로부터 본 시험에 사용된 재료는 열화가 됨에 따라 페라이트, 펄라이트 구분 없이 입자의 조대화가 진행되었을 뿐만 아니라, 페라이트의 면적율 감소도 재질 열화 및 기계적 특성치 저하의 한 원인으로 작용하고 있다고 여겨진다.

Fig. 5은 열화재와 회복재에 대하여 표면을 연마한 후 에칭하여 SEM으로 관찰한 사진이다. 이때 사용한 에칭용액은 에탄올(ethanol)용액 속에 5%의 피크린 산(picric acid)과 2.5%의 질산(nitric acid)을 혼합하여 사용하였다.

Fig. 5(a)는 열화재를 나타낸 것으로서 페라이트 내에 다수의 미세한 탄화물과 입계에 구상화된 조대한 탄화물을 관찰할 수 있었다. (b)에는 (a)에 표시한 A부를 확대해서 관찰한 탄화물의 형상 및 분포를 나타낸 것이다. 반면, (c)는 회복재를 관찰한 것으로서 페라이트 내의 탄화물은 거의 발견할 수 없었다.

#### 4. 열화와 경도 및 인장특성

열화재와 회복재의 경도를 검토하기 위하여 SHIMADZU사의 마이크로 비커스 경도 시험기

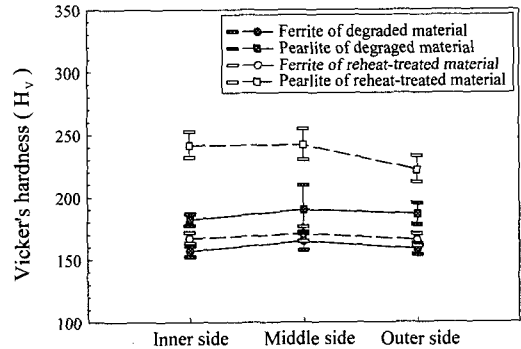


Fig. 6 The results of hardness test for pearlite and ferrite

(micro Vickers hardness tester : HMV-2000)를 사용하여 경도시험을 수행하였다.

아울러, 보일러 헤더의 두께 방향 내·외부의 위치에 따른 재질 열화 정도가 경도치에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 열화재와 회복재에 대해 내부, 중간 및 외부로 세분하여 하중 50 g, 하중 작용시간은 20초(sec)로 페라이트와 펄라이트에서 각각 20점씩을 수행하여 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 ■ 및 ●는 경도치(Hv)의 평균값이고, I 표시는 분포범위를 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 펄라이트의 경도치는 열화재에 비하여 회복재가 상당히 크게 나타났다. 페라이트의 경도치는 거의 일치하는 경향을 보였다.

보일러 헤더의 내부, 중간 및 외부를 부위별로 경도시험 및 조직관찰을 한 결과, 그 차이가 미세하였으므로 인장, 충격 및 피로균열진전 시험은 위치에 따른 구분 없이 열화재와 회복재만으로 구분하여 실험에 임하였다.

**Table 3** Mechanical properties of degraded and reheat-treated material

Material	0.2% Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Degraded	315	492	32	67
Reheat-treated	422	565	27	40

열화재와 회복재의 인장특성의 변화를 관찰하기 위하여 KS B 0801의 비례 시험편 14B호의 규격에 준거하여 폭 10 mm, 평행거리 32 mm, 모서리 반경 16 mm, 두께 3 mm인 소형 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다.

인장시험에 사용된 시험기는 Instron사의 8516이며, 1 mm/min의 속도로 25 mm 변위계(strain gage extensometer)를 부착하여 시험을 수행하였다.

1Cr-0.5Mo강의 열화재 및 회복재에 대한 인장 시험결과로부터 얻은 항복응력, 인장강도, 연신율 및 단면 수축률을 Table 3에 나타내었다.

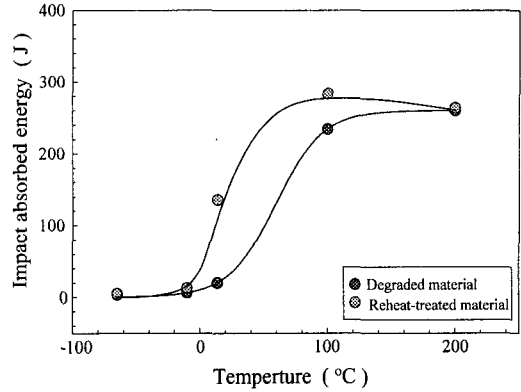
열화재의 항복 및 인장강도가 낮고 연신율과 단면수축률이 큰 이유로는 결정립 내에 탄화물의 규모가 회복재에 비하여 커지고, 미세한 입자수가 상대적으로 적어졌기 때문<sup>(7)</sup>이라고 사료된다.

5. 열화와 충격특성

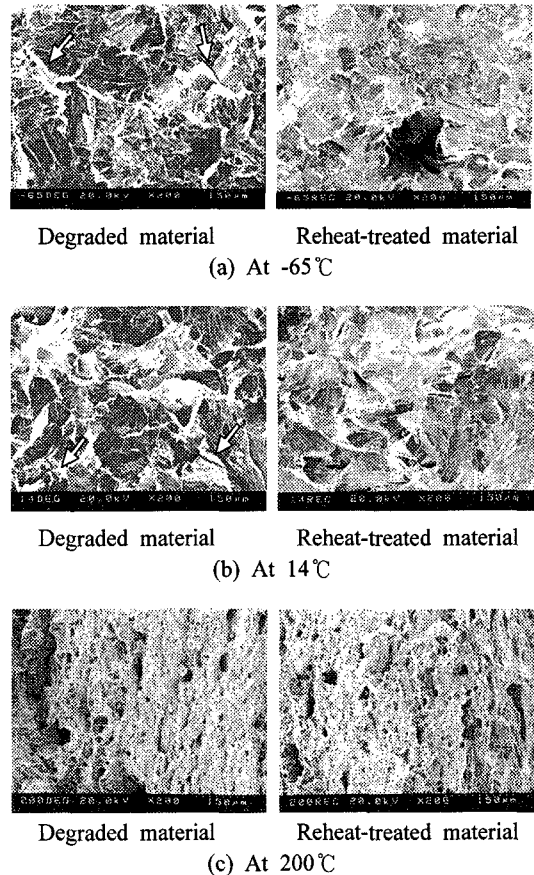
재료의 열화거동을 평가하는 방법으로서 충격 특성의 검토가 많이 행하여지고 있다. 본 연구에서도 1Cr-0.5Mo강 열화재와 회복재의 충격특성을 평가하여 열화거동을 규명하고자 하였다.

시험에 이용된 시험기는 Instron사의 계장화 살피 충격 시험기(Instrumented Charpy impact test machine)로서, 시험기의 용량은 300 J이다. 충격 시험편은 KS B 0809에 의거하여 가공하였다. 또한 노치(notch)의 형상을 일정하게 가공하기 위하여 와이어 컷(wire cut)을 사용하였다. 시험온도는 -65℃, -10℃, 14℃(실온), 100℃ 및 200℃에서 수행하였다.

Fig. 7은 열화재와 회복재의 충격 흡수 에너지와 온도와의 관계를 나타낸 것이다. 장기 사용으로 인한 재질열화는 통상적으로 충격 흡수 에너지의 상부단 값이 감소하는 현상과 DBTT가 고온으로 천이하는 현상의 두 가지 종류가 있다. 본 연구에서도 Fig. 7에 나타난 바와 같이 회복



**Fig. 7** Relationship between temperature and impact absorbed energy



**Fig. 8** SEM micrographs of impact fracture surface

재에 비하여 열화재의 충격흡수에너지가 동일 온도 영역에서 감소하였으며, 열화재의 DBTT가 회복재에 비하여 고온측으로 이동하는 경향을 알

수 있었다.

Fig. 8은 충격시험 후의 파면을 나타낸 것으로서 (a)는 -65℃에서 파괴된 열화재와 회복재의 취성파면 영역의 대표적인 사진이다. 열화재의 경우에는 SEM사진 내의 화살표가 지시하는 곳과 같이 입계파괴의 흔적들이 파면에서 다수 관찰되었으나 회복재에서는 관찰할 수 없었다. (b)는 상온인 14℃에서 얻어진 파면으로 취성파면과 연성파면의 특징인 덤플(dimple)이 혼재하는 영역에서 관찰된 사진이다. 이 경우에도 열화재의 파면에서 입계파괴의 흔적들이 관찰되었으나 그 규모나 수는 (a)보다 적었다. (c)는 200℃에서 덤플이 나타나는 연성파면 영역의 대표적인 사진으로 이 영역에서의 파면형상은 열화재와 회복재에 있어서 큰 차이점은 발견되지 않았다.

이들 충격시험의 결과를 보면, 회복재에 비하여 열화재의 DBTT가 상당히 고온으로 이동하였으며, 충격흡수에너지의 상부단 값은 열화재와 회복재가 유사하였다. 이와 같은 결과는 열화에 관한 많은 보고들<sup>(9,10)</sup>과 일치하고 있으며, DBTT가 열화재에서 크게 나타나는 현상은 앞에서 언급한 바와 같이 열화과정 중에 페라이트 내의 탄화물 생성과 형상변화 특히, 입계에 규모가 큰 탄화물이 편석되었기 때문으로 사료된다.

### 6. 열화와 피로균열진전 특성

화력발전소 보일러 헤더는 가동 정지 등에 의한 피로환경의 지배로 피로파괴를 발생시킬 수 있다. 따라서 재료열화가 피로파괴에 미치는 영향에 대한 규명은 매우 중요하다.

본 피로균열진전 시험에 사용된 시험편은 CCT 시험편(Center Cracked Tension specimens)으로서, 중앙 노치는 피로균열발생 특성에 미치는 영향과 가공경화(work hardening)를 최소화하기 위해서, 우선 센터 드릴로 중앙에 홀(hole)을 뚫은 후, 와이어 가공으로 인공노치 길이,  $2a=6.6$  mm, 곡률반경,  $\rho=0.2$  mm로 일정하게 가공하였다. 또한 피로균열길이의 정확한 측정을 위하여 시험편의 표면을 조직관찰에서와 같은 방법으로 연마를 하여 본 시험에 사용하였다.

본 시험에 사용된 피로 시험기는 Instron사의 유압 서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine : model 8516)로서 최대 용량은 10톤(ton)

이고, 시험조건은 응력비  $R=0.05$ 의 정현파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였다. 주파수는 10 Hz로 일정하게 하고, 상온에서 습도  $50 \pm 5\%$ , 응력레벨은  $\Delta\sigma=101$  MPa, 초기 응력확대계수 범위  $\Delta K_i=10.2$  MPa  $\sqrt{m}$ 의 동일조건하에서 피로균열진전 시험을 수행하였다.

균열길이의 측정은 1/100 mm까지 측정이 가능한 이동식 광학현미경(microscope)에 CCD 카메라를 연결한 모니터로 관찰하였다.

Fig. 9는 응력확대계수범위와 균열진전속도와와의 관계를 나타낸  $\Delta K$ - $da/dN$  선도로서, 저 $\Delta K$  영역에서 열화재의 균열진전속도가 회복재에 비하여 빠르고, 고 $\Delta K$  영역에서는 열화재와 회복재의 균열진전속도가 유사하게 나타났다. 이러한 현상은 저 $\Delta K$  영역에서 균열진전이 반복하중의 영향보다는 재료조직에 영향을 크게 받는다는 사실을 고려할 때, 앞에서도 언급한 열화재의 조직 조대화와 탄화물 증가가 그 원인으로 사료된다. 그리고 고 $\Delta K$  영역에서 열화재와 회복재의 피로균열진전속도가 유사하게 나타난 것은 조직의 영향보다는 반복하중의 영향을 강하게 받았기 때문으로

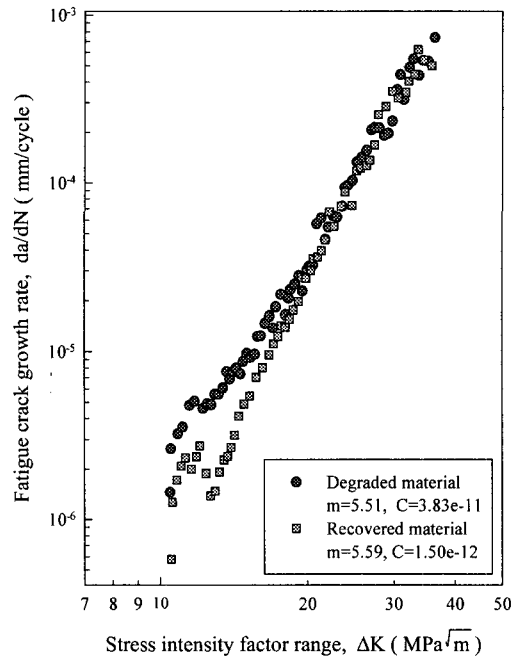
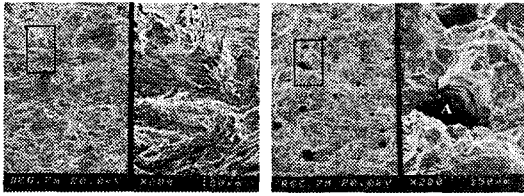


Fig. 9 Relationship between fatigue crack growth rate,  $da/dN$  and stress intensity factor range,  $\Delta K$



(a) Degraded material (b) Reheat-treated material

Fig. 10 SEM micrographs of the fatigue fracture surface

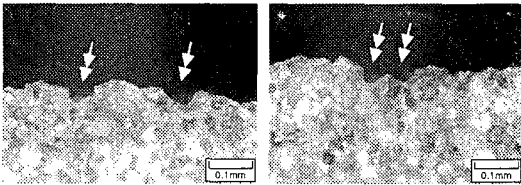


Fig. 11 Fractured side face of the specimen for reheat-treated material

사료된다.

Fig. 10은 약  $26 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 의  $\Delta K$  영역에서 관찰된 파면 사진으로서, 열화재와 회복재 모두 스트라이에이션(striation)이 관찰되는 전형적인 피로파면으로 유사한 양상을 띄고 있었다. 그러나 회복재의 경우에는 (b)와 같이 파면에서 검은 부분이 다수 관찰되었으며, A로 표시한 부분과 같이 펠라이트의 일부라고 생각되는 곳도 있었다. 또한 광학현미경의 측면 관찰로부터 얻어진 Fig. 11의 화살표가 지시하는 곳과 같이 펠라이트가 탈락했을 것으로 생각되어지는 부분도 있었다. 열화재의 파면에서는 펠라이트의 취성파괴된 평탄한 부분이 국부적으로 관찰되었으나 탈락에 의한 흔적은 관찰되지 않았다.

이것은 Fig. 6에 나타난 경도시험 결과에서도 알 수 있듯이, 경도가 큰 회복재의 펠라이트가 피로파면 형성시 국부적으로 취성파괴를 일으켜 탈락한 것으로 사료된다.

### 7. 결 론

화력발전소의 보일러 헤더용 1Cr-0.5Mo강의 장기 사용으로 인한 열화거동을 평가하기 위하여 열처리에 의한 회복재를 제작하고, 열화재와 회복재에 대하여 조직관찰, 경도시험, 인장시험, 충격시험 및 피로균열진전시험을 통하여 다음과 같

은 결론을 얻었다.

(1) 조직 조대화의 기구는 명확하지 않으나 회복재에 비하여 열화재가 조대해져 있었고, 펠라이트의 면적율은 회복재에서 크게 나타났다. 경도시험에서는 열화재와 회복재에 있어서 펠라이트부의 정도치는 거의 일치하였으며, 펠라이트에서는 열화재가 더 낮았다.

(2) 인장시험에서는 회복재에 비하여 열화재의 인장강도가 낮게 나타났으며, 연신율과 단면수축률은 크게 나타났다. 그 이유로는 결정립 내에 탄화물의 규모가 회복재에 비하여 커지고, 미세한 입자수가 상대적으로 적어졌기 때문이라고 사료된다.

(3) 샐피 충격시험 결과, 회복재에 비하여 열화재의 DBTT가 고온측으로 이동하고, 상부단의 충격흡수에너지는 열화재와 회복재가 유사하게 나타나는 경향이 있었다.

(4) 열화재 및 회복재에 대하여 피로균열진전시험을 수행한 결과, 저 $\Delta K$ 영역에서는 열화재의 균열진전속도가 회복재에 비하여 빠르며, 고 $\Delta K$ 영역에서 두 재료의 피로균열진전속도는 유사함을 알 수 있었다. 이는 조직의 조대화 및 탄화물 석출과 형상변화로 나타나는 재질열화가 저 $\Delta K$ 영역에 있어서 피로균열 진전에 미치는 영향을 시사하는 것으로 사료된다.

### 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Watanabe, Y., and Shoji, T., 1991, "The Evaluation of in-service Materials Degradation of Low Alloy Steels by The Electrochemical Method," *Met. Trans.*, Vol. 22A, pp. 2097~2106.
- (2) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Sidey, D., Taplin, D. M. R., 1981, "Effect of Microstructural Degradation in Creep Life Prediction of 2.25Cr-1Mo Steel," *Proceeding of the 5th ICF, Cannes, France*, Vol. 4, pp. 1613~1620.

- (3) Burghad, H. C., McCann, D. R., 1984, "Fractographic Analysis of a Steam Turbine Disk Failure," *ASTM STP 827*, pp. 106~114.
- (4) Katsumata, M., Takada, H., et al., 1981, "Temper Embrittlement in Pressure Vessel Steel," *JHPI*, Vol. 12, No. 3, pp. 8~14.
- (5) 村上賀國, 1983, "壓力容器用Cr-Mo鋼の焼屯脆性に関する研究," 大阪大學工學部 博士學位論文.
- (6) Bišs, V. A., and Wada, T., 1985, "Microstructural Changes in 1Cr-0.5Mo Steel after 20 Years of Service," *Met. Trans.*, Vol. 16A, pp. 109~114.
- (7) Nishizaka, Y., Hara, Y., Hori, A., Tsukahara, H., Miyano, K., Wada, T., Cox, T. B., 1985, "Changes in Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Mo Reactor Vessel Steels During Long-Term Services," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 107, pp. 285~294.
- (8) JIS G 0552 (ISO 643), 1998, "Methods of Ferrite Grain Determination Test for Steel," pp. 1~23 (*in japanese*).
- (9) 권재도, 1992, "장기사용 Cr-Mo강 열화재에 과 피인성평가와 수명예측," 대한기계학회논문집, 제16권, 18호, pp. 1421~1426.
- (10) 권재도, 진영준, 류승우, 장순식, 1993, "다 단계 모의 열화재의 재료강도 평가와 수명예측," 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, pp. 2271~2279.