

## 시효 열화시킨 터빈 로터강의 피로강도에 관한 연구

서 창 민\* · 허 정 훈\*\* · 이 해 무\*\*\* · 서 덕 영\*\*\*\*

(96년 1월 28일 접수)

### Fatigue Strength in Aged Turbine Rotor Steel

Chang-Min Suh\* · Jeong-Hoon Huh\*\* · Hae-Moo Lee\*\*\* · Duck-Young Suh\*\*\*\*

**Key Words** : Degradation(열화), Cr-Mo-V강, Fatigue Strength(피로강도), Major Crack(주균열), SEM(Scanning Electron Microscope), EDS(Energy Dispersive Spectrometer), Fatigue Crack(피로균열)

### Abstract

The estimation of the remaining life for the aged components in power plant as well as chemical and petroleum plants has been recently concerned. The raw materials used in this study are the 1Cr-1Mo-0.25V rotor steel which intensified P and S compositions along with the nominal compositions of ASTM A470 standard. Five kinds of specimens with the different degradation levels were prepared by isothermal aging heat treatment at 630°C. The mechanical properties and fatigue strength of virgin and aged 1Cr-1Mo-0.25V rotor steel have been investigated through the hardness, tensile, fatigue test, SEM fractograph and EDS analysis at room temperature. Thus, the data of aged specimens were compared with those of virgin specimen to evaluate the aging effects.

The main results obtained in this study are as follows: The decrease of the hardness due to degradation was distinguished until 50,000hrs simulated service time. And it was confirmed that the considerable amount of P, Mn, Cr and S was precipitated at the grain boundary of aged material through the SEM and EDS analysis. The fatigue strength of 25,000, 50,000, 75,000 and 100,000hrs aged material was decreased 29.5%, 24.4%, 28.6%, 35.7% than that of virgin material at  $10^7$  cycles of room temperature.

The major cracks of virgin and aged materials initiated at the inclusions including Si, P and Mn compositions which were located at the outer periphery of the specimen.

\* 경북대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 한국 표준과학 연구원

\*\*\*\* 두원 공업 전문대학

## I. 서 론

최근, 노후화된 화력, 원자력 발전소 및 석유화학 공장등의 잔여수명 평가 및 상태진단 기술의 개발이 관심의 대상이 되고 있다<sup>1)2)</sup>. 이것은 60년대부터 시작된 공업화에 따라 많은 발전소와 중화학 플랜트가 건설된지 20여년이 지난 우리의 실정에 비추어 보면 당연한 결과라 하겠다. 기기 및 구조물들의 안전성과 경제성을 고려할 때 수명예측에 대한 필요성과 이에 대한 여러방법들이 제안되고 있다<sup>3)</sup>. 그러므로 실제 "열화문제를 기기 및 구조물의 시스템에 어떻게 도입 할 것인가?"라는 문제는 현 시점에서 기술적인 중요한 과제로 남아있다.

특히, 고온·고압용기, 원자력 발전설비 및 특수 환경하에 있는 기기 및 구조물의 파괴원인은 열화(gradation)가 동반된 피로파괴가 주종을 이루고 있다. 일반적으로 열화가 진행될수록 재질은 탄화물의 조대화, 불순물의 입계편석 등과 같은 미세조직의 변화를 수반하게 되어 파괴인성치(fracture toughness) 등의 기계적 성질이 저하하게 된다. 이와같은 이유로 열화재의 수명예측에 관한 연구는 기기 및 구조물의 건전성 평가가 대단히 중요하지만 아직 그 연구결과의 축적이 미흡하다.

본 연구에서는 고온에서 장시간 사용하여 발생하게되는 열화현상이 재료강도 및 피로수명에 미치는 영향을 알아 보기위하여 실험적 연구를 수행하였다. 즉 터빈로터의 대표적인 재료인 1Cr-1Mo-0.25V강을 사용하여 등온열화 열처리(isothermal aging heat treatment)방법으로 재료를 열화시켜 열화정도가 각각 다른 5종의 시험편을 준비,

제작하여 상온에서 회전굽힘 피로시험을 실시하여 피로강도와 균열성장 특성을 비교 검토하였다.

## II. 실험 방법

### 2.1 실험용 재료 및 시험편의 열화방법

본 연구의 시험재료는 터빈로터용의 대표적인 재료 1Cr-1Mo-0.25V강이다. 이 재료는 고주파 진공 용해법으로 제조되었으며 시험재의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

현재의 진공용해기술로는 재료의 열화에 영향을 주는 것으로 알려진 P 및 S의 양을 매우 작게 조절 할 수 있으나, 본 연구에서는 1960~1970년대에 생산되었던 로터소재를 모사(simulate)하기 위해 이들의 첨가량을 의도적으로 증가시킨 재료를 제작 사용하였다. 이 강재의 제조공정은 먼저 고주파 진공 용해법으로 강괴를 만들고 이를 1,200℃에서 15시간 동안 유지시키면서 열처리를 한 다음 단조비 5.4로 1,000~1,200℃에서 단조하였다.

이를 1,050℃에서 7시간 노멀라이징한 후 680℃에서 6시간 템퍼링하여 필요한 크기로 절단하였다. 이를 다시 960℃에서 5시간 노멀라이징하여 강재 공냉시킨 후 685℃에서 18시간 뜨임하여 공냉시킨 것을 시험편으로 사용하였다.

로터강의 경우 실제 발전소에서 사용된 열화재를 열화된 종류별로 입수하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 이와 유사한 미세조직을 갖는 재질을 얻기 위해서 사용온도(538℃)보다 높은 온도(630℃)에서 등온열화열처리방법을 실시하여 열화재를 제작하였다. 이 때 열화시간은 Fe의 자기확산(self

Table 1 Chemical compositions(wt %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Sb
Composition	0.31	0.29	0.80	0.015	0.022	0.015
ASTM A470	0.25~0.35	0.15~0.35	1.00 max	0.015 max	0.018 max	-

N	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Sn	As
0.013	0.12	0.39	1.19	1.42	0.25	0.004	0.015
-	-	0.75 max	0.09~1.50	1.00~1.50	0.20~0.30	-	-

diffusion)이론에 의한 식(1), (2)에 근거하여 각 온도에서 Fe의 확산량이 같다는 조건으로부터 결정했다<sup>4),5)</sup>.

즉, 538℃와 630℃에서 각각 식 (1), (2)로 되고, 확산계수(diffusion coefficient)  $D_1 = D_2$  이면 630℃에서의 열화시간  $t_2$ 는 식 (3)과 같이 유도된다.

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

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

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

단, 여기서 R은 기체상수, Q는 Fe의 자기확산에 필요한 활성화 에너지,  $D_0$ , C는 상수,  $T_1$ ,  $T_2$ 는 열화온도,  $t_1$ ,  $t_2$ 는 열화시간이다.

Table 2에 538℃에서 장시간 사용된 것과 동일한 열화조직을 얻기 위해 필요한 630℃에서의 열처리 시간을 표시하고있다. 즉 538℃에서 10만시간 열화된 조직은 630℃에서 1,820시간 열처리함으로써 소기의 시료를 얻었다.

Table 2 Determination of aging time at 630℃ for equivalent microstructure serviced at 538℃

Time served at 538℃ (h)	25,000	50,000	75,000	100,000
Aging time at 630℃ (h)	453	933	1,322	1,820

시험편을 Fig. 1(a)와 같이 단조한 원통형 재료로부터 시험편의 길이 방향이 재료의 원주방향과 일치되도록 가공하였다. 피로시험편은 Fig. 1(b)와 같은 형상으로 가공되었고 피로시험중 시험편의 표면에서 발생, 성장하는 피로균열의 길이 측정을 용이하게 하기 위하여 시험편 표면을 에머리 페이퍼 1200번까지 연마한 후 산화크롬으로 버핑하였다.

## 2.2 실험방법

Fig. 1(b)와 같은 피로시험편을 오노(Ono)식 회전굽힘피로시험기를 사용하여 일정한 반복하중레벨에서 상온피로시험을 수행하였으며 회전속도는 3,450rpm이다.

본 실험에서 상온에서 응력진폭-파단반복수(S-N<sub>r</sub>)관계를 얻음과 동시에 피로균열의 성장속도를 파괴역학적으로 해석하였다. 이 때문에 예상되는 파단수명의 일정단계마다 시험기를 일시 정지시켜 표면상의 변화를 레프리카필름으로 복제하여 보관하였다. 이 레프리카를 광학현미경으로 면밀하게 관찰하여 시험편의 수명을 좌우하는 주균열(major crack)에 대해서 피로수명의 후기에서 초기로 역추적하여 평활표면상의 미소균열의 성장거동을 정밀하게 측정하였다. 이러한 피로시험기의 일시적 정지 및 상온까지의 냉각에 따른 피로수명에 미치는 영향은 거의 없다고 보고되고 있다<sup>6)</sup>.

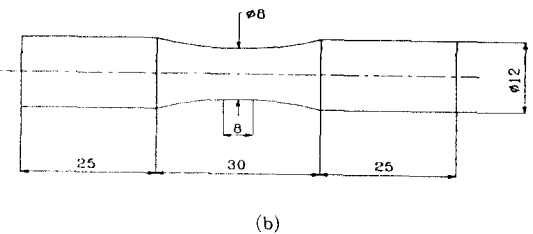
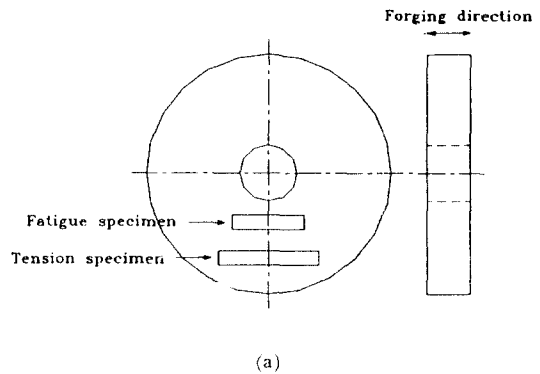


Fig. 1 Configuration of the specimen(unit : mm)

- (a) Specimen orientation
- (b) Fatigue specimen

### Ⅲ. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열화에 의한 기계적 성질의 저하

열화현상이 재료의 기계적 성질에 미치는 영향을 알아 보기 위해 경도시험을 실시하여 비커스 경도값을 Fig. 2에 나타내었다.

이 Fig. 2는 신재(virgin material)와 4가지의 열화된 시험편을 상온에서 마이크로 비커스 경도기로 측정된 경도치를 나타내는 그림으로 열화시간이 길수록 신재에 비해 경도값이 현저히 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 10만시간 열화시킨 경우는 신재보다 15.6%, 5만시간의 경우에는 8.1% 감소하였다.

또한, 75,000시간과 100,000시간 열화재는 열화시간이 증가할수록 경도값의 저하가 둔화되어 두 경도값의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

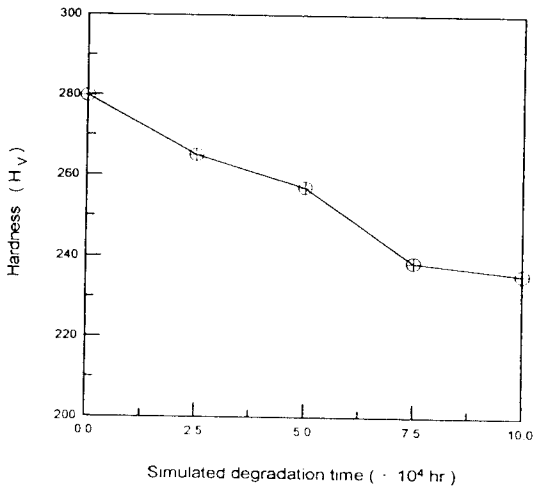


Fig. 2 Decrease of Vickers hardness as simulated degradation time

#### 3.2 S-N선도

Fig. 3은 평활한 피로시험편으로서 열화시간(degradation hours)을 달리한 4가지 시험편에 대해서 상온하에서 회전굽힘피로시험을 실시했을 때의 굽힘응력과 피로파단수명의 관계를 나타낸 S-N선도이다.

Fig. 3에서 열화시간에 따라 피로강도가 감소함을 알 수 있다. 특히 열화재의 경우에는 보통 강재에서 나타나는 절점(knee point)이 나타나지 않고 반복응력과 회전수에 따라 계속해서 하강함을 알 수 있다. 또, 50,000시간의 열화재가 신재에 비하여 뚜렷한 피로강도의 감소를 나타내었고, 75,000시간, 100,000시간에서는 더욱 감소하였다. 그러므로 상온에서 10<sup>7</sup>사이클에서 신재의 피로강도를 기준으로 25,000시간 열화재는 약 29.4%, 50,000시간 재는 약 24.4%, 75,000시간과 100,000시간 열화재는 각각 28.6%, 35.7% 감소하였다.

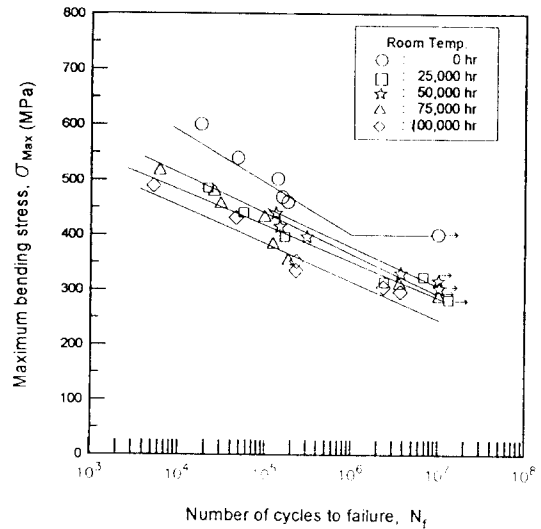


Fig. 3 Relationship between maximum bending stress,  $\sigma_{max}$  and the number of cycles to failure,  $N_f$  at room temperature

이와같이 상온에서 피로수명이 감소하는 것은 열화가 진행됨에 따라 탈탄(decarburizing)의 영향이 증대되고 재질의 강도와 경도(hardness)의 감소와 더불어 결정립이 조대화되며 또한 불순물의 입계편석등이 그 원인이라고 생각된다.

Fig. 4는 열화시간에 따른 10<sup>7</sup>회 피로강도와와의 관계를 도시한 것이다. 이 그림에서 피로강도는 열화시간의 증가에 따라 크게 감소함을 알 수 있는데 이것은 비교적 큰 응력레벨이 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

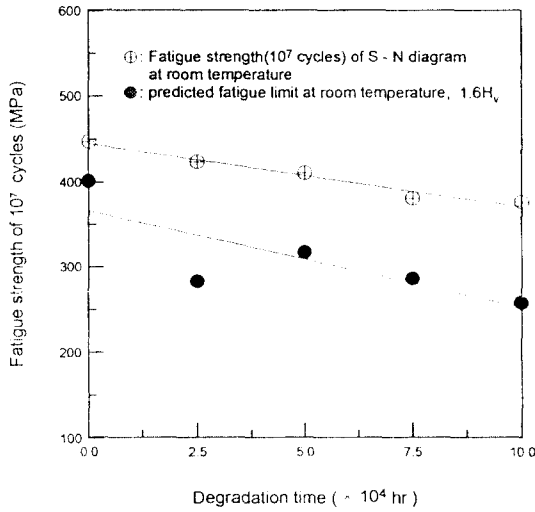


Fig. 4 Relationship of fatigue strength of  $10^7$  cycles and degradation time at room temperature

Fig. 4에는 통상 비커스경도가 400이하 일때 피로하중을 받는 기계부품 설계시에는 Soderberg선도의 양진피로한도는 식 (4)를 사용하고 있다. 따라서 열화재에 대해 양진피로한도  $\sigma_w = 1.6H_v$  관계식으로 추정된 피로강도와 실제 S-N선도의 피로강도와 비교한 자료를 Fig. 4에 동시에 나타내고 있다.

$$\sigma_w = 1.6H_v \quad (4)$$

이 그림에서 열화시키지 않은 신재의 경우 비커스경도로서 추정된 피로강도와 실제 S-N선도의 피로강도와와의 오차가 적지만 열화시간이 증가할수록 그 오차가 커짐을 알 수 있다.

### 3.3 피로균열의 길이와 반복수 및 반복수비와의 관계

Fig. 5는 열화시간에 따라 평활재 표면상에서 발생, 성장하는 주균열의 균열길이(2a)와 반복수비( $N/N_f$ )의 관계를 나타낸 그림이다.

다른 연구자에 따르면 상온의 경우 전체수명의 약 10~20%에서 크랙이 발생(initiation)하는 것으로

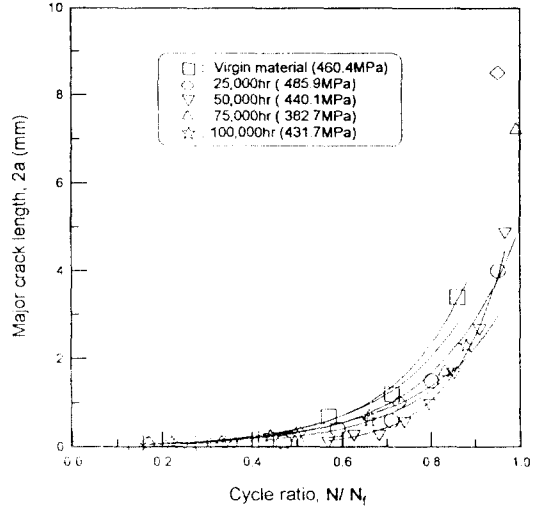


Fig. 5 Relationship between major crack, 2a and cycle ratio,  $N/N_f$  at various simulated degradation specimens

보고하고 있는데<sup>7),8)</sup> 본 연구에서도 상온의 경우에 크랙이 전체수명의 15~35%에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

또, 균열길이(2a)와 반복수(N)과의 관계를 균열길이(2a)와 반복수비( $N/N_f$ )의 관계로 나타내면 데이터들이 좁은 범위에 모이는 것도 관찰되었다. 이러한 경향은 다른 연구결과와 유사하다<sup>7),8),9)</sup>. 아울러, 대부분의 크랙들은 전체수명의 약 80%에 달하는 크랙길이 2mm까지는 안정한 성장을 하고 그 다음은 불안정한 성장으로 파단되었다. 이러한 이유로 피로수명의 70~90%를 차지하는 미소균열 (small crack)의 성장문제가 최근 연구대상이 되고 있다<sup>7),8)</sup>.

### 3.4 미소 표면 피로균열의 발생, 성장거동

Fig. 6는 본 피로시험에 사용된 열화재중 25,000시간 열화재의 표면상에서 관찰된 표면균열의 예를 나타낸것이다. 예로 제시한 그림은 시험편에 관찰된 가장 큰 주균열의 표면균열의 사진으로 응력레벨은 485.88MPa이고 파단수명은  $N_f = 2.15 \times 10^7$ 이다. 다른 연구결과와 같이 초기 16.7%에서 0.081mm와 0.016mm의 미소균열이 발생하여 수명

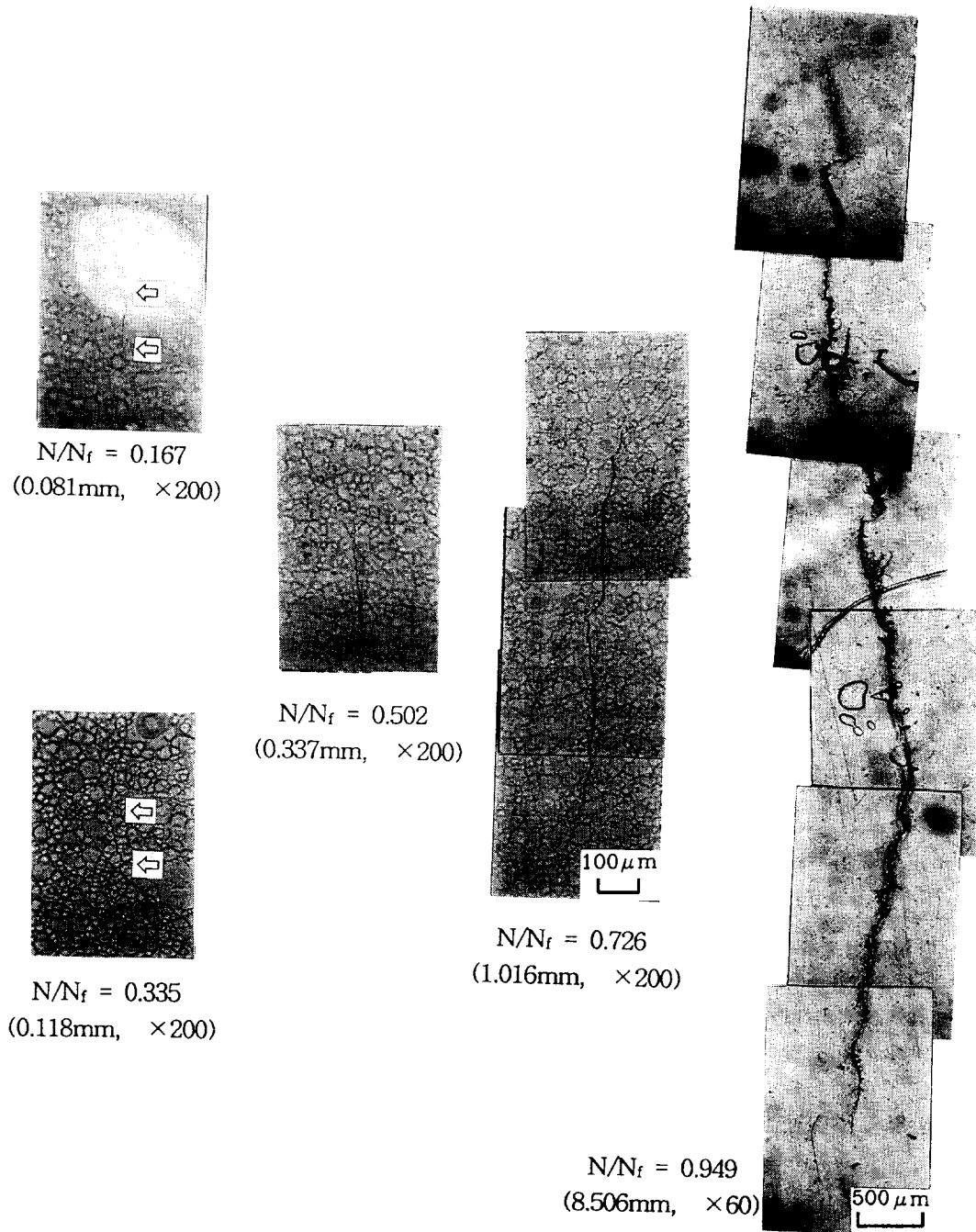


Fig. 6 An example of initiation and growth behavior of major micro surface fatigue crack in 25,000 hours simulated degradation specimen at stress level 485.88MPa and room temperature( $N_f = 2.15 \times 10^4$ )

비 80%이후 급격하게 성장하여 파단에 이르고 있음을 알 수 있다.

이 사진은 시험편의 수명을 좌우하는 주균열의 발생과 성장 거동을 나타내기 위해 피로시험중에 채취, 보관한 레프리카를 광학현미경으로 확대, 촬영하여 연결시킨 것이다. 이 그림상의 화살표는 미소균열의 균열선단을 나타내고 있다.

#### IV. 표면균열의 성장속도에 대한 파괴역학적 정리

본 실험으로 얻어진 연구결과를 기초로 하여 표면균열의 발생, 성장 및 합체에 이르는 과정에 대해 파괴역학적인 평가를 시도하였다.

굽힘하중을 받는 중실형축은 반지름의 변화에 따라 임의의 분포하중의 상태에 놓이게 되고 이때 발생한 표면크랙의 성장은 하중분포의 임의성 및 시험편 형상등의 영향에 의해 크랙의 형상비가 연속적으로 변하는 복잡한 형태의 타원크랙으로 나타나게 된다.

이와같이 굽힘하중을 받는 중실형축에서 응력확대계수에 대한 연구는 이론해석시 고려해야할 경계조건의 복잡성등으로 인해 이론해는 전무한 실정이고 수치해석을 통한 연구결과 또한 모델형상의 어려움등으로 인해 거의 찾아보기 어렵다. 따라서 표면균열의 응력확대계수의 평가는 Shiratori 등<sup>10)</sup>의 환봉에 대한 유한요소해석으로 산출한 결과를 이용하여 해석했으며 이 때 응력확대계수범위( $\Delta K$ )는 식(5)와 같이 계산된다.

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

여기서,  $\Delta \sigma$ : 응력범위, a: 표면균열 길이, F: 수정계수이다.

##### 4.1 da/dN - $\Delta K$ 특성

Fig. 7은 신재 및 열화재의 균열진전거동을 검토하기 위해서 Shiratori 등의 유한요소식<sup>10)</sup>을 이용하여 구한  $\Delta K$ 에 대하여 표면피로균열의 성장속도 (da/dN)을 나타낸 그림이다.

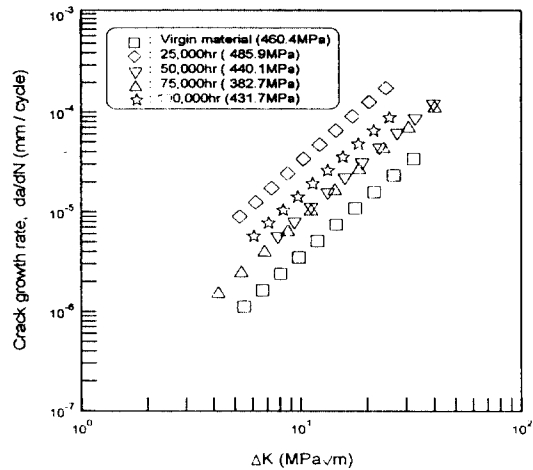


Fig. 7 Dependence of crack growth rate upon stress intensity factor range with various simulated at room temperature

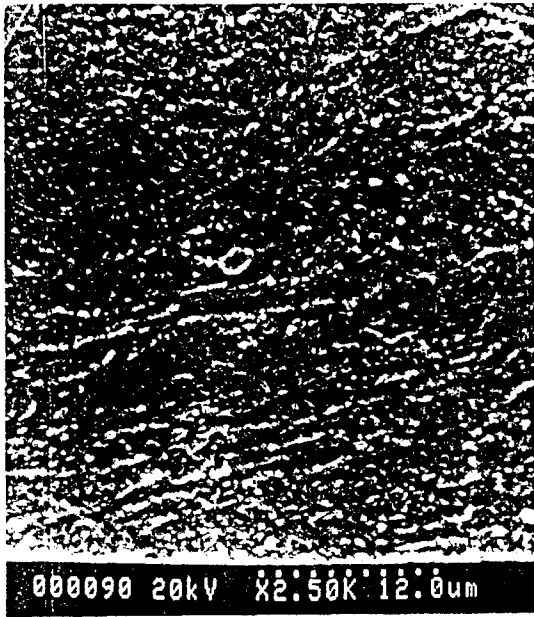
이 그림에는 각각 신재와 50,000시간, 75,000시간 및 100,000시간 열화재의 표면피로균열의 성장률과 표면균열의 응력확대계수범위의 관계를 양대수 좌표상에 나타내었는데 같은 응력확대계수범위에서 크랙성장속도는 열화시간이 변화할수록 신재에 비하여 더 빠르며 25,000시간의 경우는 응력레벨의 영향이 다소 나타나고 있다.

##### 4.2 SEM 및 EDS에 의한 열화도 평가

앞의 S-N선도에서 관찰한 바와 같이 열화정도에 따라 기계적 성질 및 피로강도가 저하하는 원인을 규명하기위해 신재와 열화된 재료의 표면을 4% 질산용액으로 부식시켜 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 8(a),(b),(c)에 나타내었다.

Fig. 8(a)은 신재의 조직사진으로서 결정립계상에 석출물이 관찰되지 않았으나 열화도가 증가할수록 100,000시간 열화재의 Fig. 8(c)에 보인 바와 같이 결정입계에 석출물이 증가하였다. 이와같이 입계에서의 석출물의 증가가 균열의 발생 및 전파를 쉽게하여 기계적 성질, 피로강도 및 파괴인성값이 저하된 것으로 추측된다.

Fig. 9(a),(b)는 10만시간 열화된 시험편의 석출



(a)



(c)

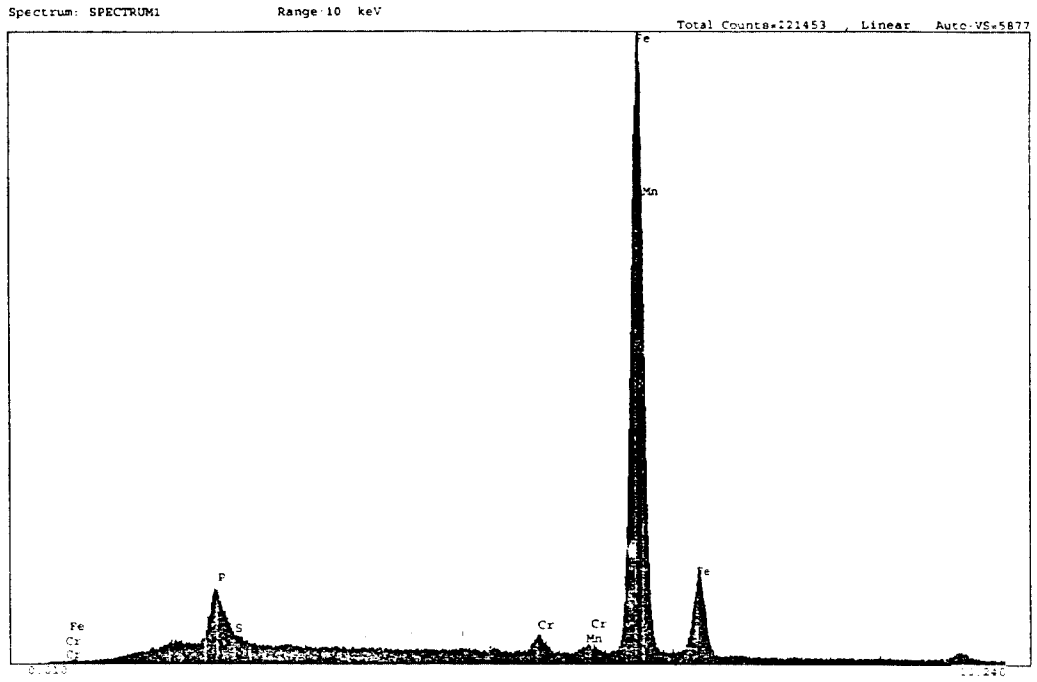


(b)

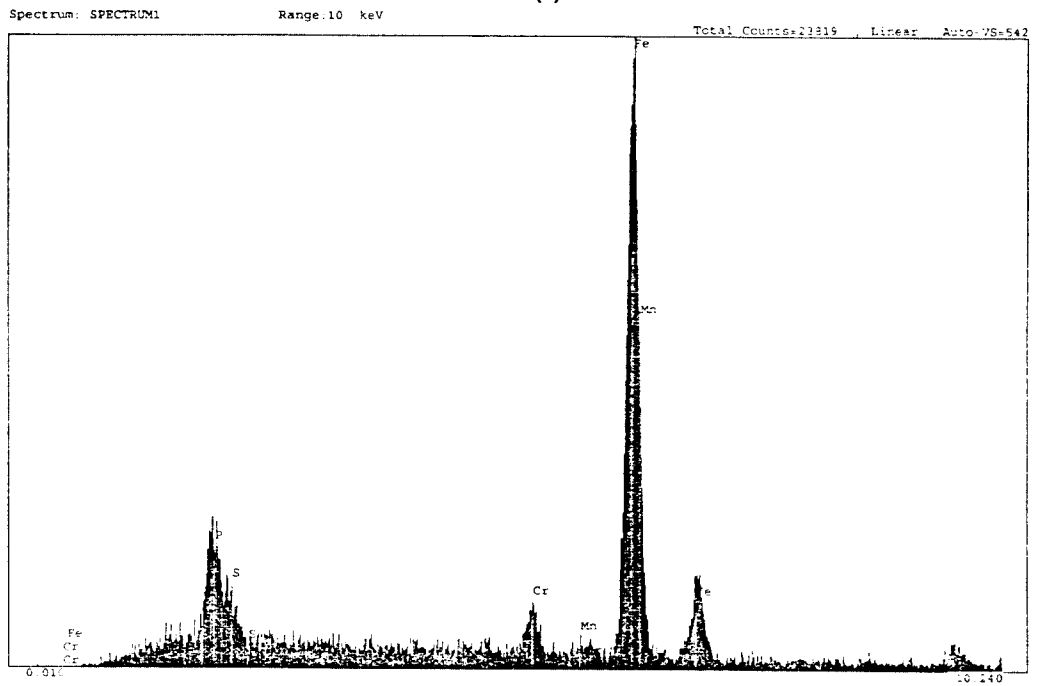
Fig. 8 Scanning electron microscope of 1Cr-1Mo-0.25V steel at various simulated at 538°C ( $\times 2,500$ )  
(a) virgin specimen (b) 50,000hr simulated specimen (c) 100,000hr simulated specimen



시효 열화시킨 터빈 로터강의 피로강도에 관한 연구



(a)



(b)

Fig. 9 EDS analysis of the virgin and 100,000hr simulated degradation specimen  
(a) Matrix (b) Grain boundary

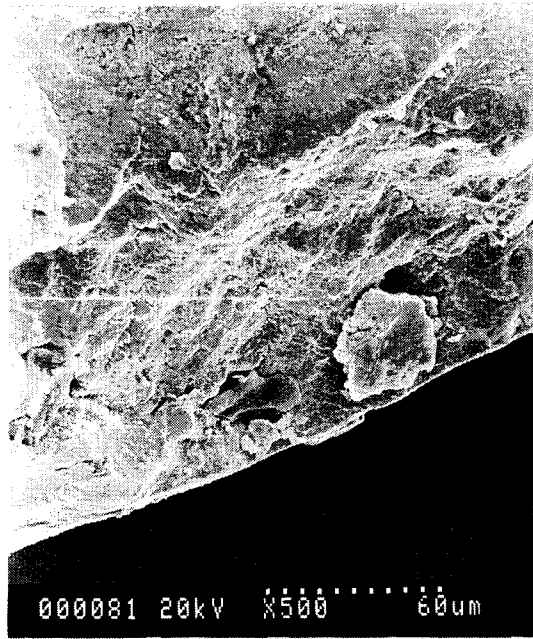
물을 EDS로 분석한 자료이다. 이 10만시간 열화재의 결정입계부분의 성분을 EDS로 분석한 결과를 보면 입계와 기지의 성질이 불균일함을 알 수 있다.

즉, 열화된 재료의 결정입계에서는 다량의 P, Mn, Cr, S 등이 피크값을 취하므로 각 성분이 석출되며 P 및 S등의 불순물이 입계에서 Cr, Mn계 석출물의 석출을 촉진한 것을 알 수 있다.

이와같이 결정입계에서의 불순물의 편석량이 사용시간에 따라 점차 증가하며 이로 인해 고온에서 장시간 사용한 재료의 경우 기계적성질과 피로강도 파괴인성 값이 점차적으로 감소하게 된다. 즉, 사용시간에 의존하는 입계석출물이나 불순물의 크기 및 분포거동이 재질열화를 유발하는 미시구조로 작용하여 재료의 기계적인 특성을 변화시키고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(a)~(c)는 각각 상온하에 신재 및 열화재상에서 발생된 주균열의 발생위치를 SEM으로 촬영한 사진이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 신재와 열화재 모두 표면근처의 개재물이 존재하는 곳에서 주 균열이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 연구결과는 다



(b)



(c)



(a)

Fig. 10 SEM fractographs on crack initiation site at room temperature

(a) virgin specimen (b) 50,000hr simulated specimen (c) 75,000hr simulated specimen

른 보고서<sup>11,12)</sup>와 유사한 결과이다. 또한 이들의 성분을 EDS로 분석한 결과 Si가 주성분임이 확인되었다. 그리고 P, Mn성분이 약간 포함되어 있다.

## V. 결 론

터어빈 로터강으로 널리 사용되고 있는 1Cr-1Mo-0.25V강을 등온열화열처리하여 열화시간이 다른 5가지(신재, 25,000, 50,000, 75,000, 100,000시간)의 시험편을 준비하여 회전굽힘 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열화시간이 증가할수록 재질이 열화하여 경도값이 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 SEM의 관찰과 EDS로 분석한 결과 재질이 열화될수록 결정입계에서 P, Mn, Cr 및 S등이 석출함을 알았다.

2)  $10^7$  회전수의 피로강도는 신재의 경우가 401.8 MPa로서 25,000, 50,000, 75,000, 100,000시간 열화재의 피로강도는 신재보다 각각 29.5%, 24.4%, 28.6%, 35.7% 감소하였다.

3) 표면균열길이의 성장속도  $d(2a)/dN$ 을  $\Delta K$ 로 정리하면 약간의 응력존성이 있으나 여러 데이터가 좁은 밴드내에 모이는 특성을 보이고, 또 열화시간이 증가할수록 더 큰 피로균열 성장속도를 나타내었다.

4) 신재 및 열화재의 상온 및 고온하의 주균열이 발생하는 위치는 결정입계에서 발생하였다. 이 발생 위치는 표면근처의 개재물이 존재하는 곳이었으며 이 개재물의 주성분은 SEM분석결과 Si였고, P, Mn성분이 약간 포함되었다.

## 후 기

이 연구는 한국표준과학연구원에서 시행한 연합협동연구사업의 연구결과로서 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 경년열화 및 수명평가 연구회, 제1회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집, pp. 1~5, 1991
- 2) 서창민, 신형섭, 권형태, "304 스테인리스강의

고온에서의 표면 균열성장특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 11권, 제3호, pp. 355~361, 1987

- 3) 권재도, "장기사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성평가와 수명 예측", 대한기계학회논문집, 제 16권, pp. 1421~1428, 1992
- 4) Abdel-Latif, A. M., Corbett, J. M., Siedy, D. and Taplin, D. M. R., "Effect of Microstructural Degradation on Creep Life Prediction of 2 1/4Cr-1Mo Steel", Fifth Canadian Conference on Fracture, pp. 1631~1620, 1981
- 5) Abdel-Latif, A. M., Corbett, S. M. and Taplin, D. M. R., Metal Science, Vol. 16, pp. 90~96, 1982
- 6) 서창민, 김영호, "고온하 304 스테인리스강의 작은 표면균열의 성장거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 14권, 제 1호, pp. 87~95, 1990
- 7) C. M. Suh, J. J. Lee and Y. G. Kang, "Fatigue Microcracks in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature" Fatigue Fract. Engng. struct. Vol. 13, No.5, pp. 487~496, 1990
- 8) 北川英夫, 結城良治, 徐昌敏, "小さな人工缺陷からの疲労き裂成長挙動", 日本材料學會の第14回 疲労Symposium, pp. 26~30, 1980
- 9) Lankford, J., Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 6-15, 1983
- 10) 白鳥正樹, 三好俊良, 酒井義明, 張 光榮, "任意分布力を受ける表面龜裂の應力擴大係數", 日本機械學會論文集(A), 53-488, pp. 779~785, 1987
- 11) C. M. Suh, J. J. Lee and Y. G. Kang, "Fatigue Microcracks in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature" Fatigue Fract. Engng. Struct. Vol. 13, No. 5, pp. 487~496, 1990
- 12) 서창민, 권오현, 이정주, "작은 표면결합에서 발생, 성장하는 표면피로균열의 성장 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 11-2권, pp. 191~197, 1989