

(論 文)

## 2 1/4 Cr-1Mo鋼 劣化材의 微小 疲勞龜裂의 發生 및 進展舉動

곽상국\* · 장재영\*\* · 권재도\*\*\* · 최선호\*\*\* · 장순식\*\*\*\*

(1991년 7월 31일 접수)

### Initiation and Growth Behavior of Small Fatigue Cracks in the Degraded 21/4 Cr-1Mo Steel

Sang-Guk Kwak, Jae-Young Jang, Jae-Do Kwon, Sun-Ho Choi and Soon-Shik Jang

**Key Words:** Degraded Material(열화재), Recovered Material(회복재) Fatigue(피로), Small Crack Initiation(미소균열 발생), Small Crack Distribution(미소균열분포), Crack Coalescence(균열합체), Statistics(통계학)

#### Abstract

Material can be degraded by using it for a long service under the high temperature and pressure circumstances, Therefore, material degradation can affect the strength of mechanical structures.

At present, the life prediction of the degraded structures is considered as an important technical problem. In this paper, the degraded 21/4Cr-1Mo steel is the material used for about 10 years around 400°C in an oil refinery plant. The recovered one was prepared out of the above degraded steel by heat treatment for one hour at 650°C. The degradation effect was investigated through the tension test, Hardness test and Charpy impact test. On the smooth surface material, the fatigue crack initiation, growth and coalescence stages of the distributed small cracks were investigated with photographs, and the crack length and density were measured. The measuring results were analyzed by quantitative and statistical methods.

#### 1. 서 론

최근 기계 구조물, 연료 저장탱크, 에너지 변환, 또는 생산, 운송 전달 장치들은 설치 당시에 기대했던 자체 수명을 능가 하거나 그 수명에 근접하고 있는 것들이 증가하고 있으며, 이에 따른 기계구조물들의 교환시기와 방법의 결정, 교체, 보수 및 검사기간의 최적기 선택과 잔여 수명의 평가는 안정성과 경제성을 고려할 때 중대한 필수 요건으로 대

두 되고 있다. 실례로 국내에서도 화력 발전설비, 석유화학플랜트등의 주요부는 고온고압하에서 장기간 사용되고 있으며, 따라서 경년 재질열화현상이 발생되어 잔존 수명에 미치는 영향이 큰 문제로 대두되고 있다. 최근 점점 가혹한 사용조건 하에서 사용 되는 기계구조물의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 경년열화와 누적손상을 정도높게 평가하고, 이것에 근거한 기기(機器)의 수명관리가 요구되고 있다. 이러한 관점에서 수명 예측을 위한 제 방법들이 제시되고 있으나 열화된 구조물의 수명예측을 위한 연구는 현시점에서의 기술적 과제로 대두되고 있다. 재료의 열화평가에 대한 연구 동향은 재료의 재질열화는 그 종류가 매우 많으며, 이와같은 각종열화에 대한 파피역학적 연구의 예는

\*정회원, 영남전문대 자동차과,

\*\*정회원, 현대자동차(주)

\*\*\*정회원, 영남대 기계설계학과

\*\*\*\*한국 원자력안전기술원

많이 있다<sup>(1~6)</sup>. 특히 뜨임취화(temper embrittlement)에 대한 열화기구<sup>(7~9)</sup> 및 파괴 형태 등에 대한 연구예와<sup>(10~11)</sup> 결정입계에 따른 취성과 파괴를 방지하기 위한 각종원소들이 열화에 미치는 영향 등에 대한 연구결과들이 종래 연구의 주종을 이루고 있다. 또한 장기사용한 열화재의 피로 거동과 수명 예측에 대한 연구도 다수 시도 되고 있다<sup>(12,13)</sup>.

그런데 경연열화에 대한 수명예측의 정도를 향상시키기 위해서는 장기 사용에 의한 열화 특성을 파악할 필요가 있다. 그러나 이와 같은 열화현상은 실제 구조물에서 수십년에 걸쳐 진행되는 것이기 때문에 실험실적인 가속 시험에서는 열화 특성을 재현하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 약 10년 정도 사용하여 경연 열화가 되었다고 예상되는 실 구조물의 일부를 입수하였으며 열화재의 특성과 비교하기 위하여 열처리에 의해 충격치를 회복시킨 재료를 회복재로 하여 두가지 재료에 대해 시험편을 제작하였다. 열화현상을 파악하기 위하여 평항재의 피로과정, 즉 미소 균열의 발생, 진전 및 복수 균열이 간섭합체하여 파단에 달하는 과정에 대하여 파괴역학적 견지에서 열화재와 회복재를 해석하고 이결과로부터 확률변수를 추정하여 통계학적인 수명예측방법의 하나를 제시하여 실 구조물에 적용하는 방법에 대해 시도해 보았다.

## 2. 실험용 재료 및 시험편

### 2.1 실험 재료

일반적으로 뜨임취화(temper embrittlement) 현상은 고강도 저합금강을 375~575°C의 온도역(실제 경우 경고 범위를 고려하여 300~600°C의 온도역)에서 장시간 유지한후 서냉할 경우 나타나는 현

상<sup>(8,9)</sup>으로 가역적특성을 가진다.

따라서 본 실험에 사용될 시험편의 재료는 고강력 저합금 강인 2 1/4Cr-1Mo 강으로 사용온도 400°C 내의에서 내압 약 160Kgf/cm<sup>2</sup>의 범위에서 약60,000시간 사용되었던 석유 화학 플랜트의 고온 고압용기의 일부로서 200mm×190mm×120mm의 크기로 절단하여 얻었으며 뜨임취화된 재료이다. Table 1은 2 1/4 Cr-1Mo강의 화학적 성분을 나타낸 것이다.

시험편의 모재는 서어보 밴드 쏘 머신(Servo band saw M/C)으로 절단하여 실험에 사용하였다. 그리고 강도평가 실험에 있어서 열화재(degraded teel)의 결과와 비교하기 위한 동일 재료의 건전한 재료가 필요하다. 그러나 10여년 이상 사용한 열화재와 동일한 건전재를 구할수 있는 방법이 없기 때문에 열화재를 두 부분으로 절단하여 그 절반을 열화재로 사용하고 나머지 부분을 650°C에서 1시간 유지후 공냉하는 방법, 즉 탈취화 처리를 하여 충격치를 회복시킨후 회복재(recovered steel)로 명명하여 건전재의 대응으로 사용하였다.

Table 2는 열화재 및 회복재의 기계적 성질을 나타낸 것으로 재질 열화의 영향이 인장강도에는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 열화재와 회복재를 각각 60점에 대해서 비커스 경도실험(KSB 0811)을 행한 결과, 열화재의 경우 평균 HV=191.2, 회복재의 경우 평균 Hv=189.4로서 재질 열화에 따라 경도는 미소하나마 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었다.

이값의 표준편차는 열화재는 5.29, 회복재는 4.54로 나타났다.

Fig. 1은 40°에서 살피충격시험으로 파단된 시험편의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 100배 확대하여 관찰한 사진이다. 여기서 (a)는 열화재의 파

Table 1 Chemical composition of 2 1/4Cr-1Mo steel

|     |     |     |      |      |     |      |     |      |       |    | w(%) |      |       |
|-----|-----|-----|------|------|-----|------|-----|------|-------|----|------|------|-------|
| C   | Si  | Mn  | P    | S    | Ni  | Cr   | Cu  | Mo   | Al    | As | Sn   | Sb   |       |
| .16 | .29 | .55 | .014 | .010 | .17 | 2.40 | .20 | 1.04 | <.005 |    | .30  | .027 | .0041 |

Table 2 Mechanical properties of 2 1/4 Cr-1Mo steel

| Material        | Yildstrength               | Tensile strength           | Elongation | Reduction of area |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|------------|-------------------|
| Degraded steel  | 43.8(Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 63.8(Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 28.0(%)    | 68.6(%)           |
| Recovered steel | 43.9(Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 63.5(Kgf/mm <sup>2</sup> ) | 28.1(%)    | 68.6(%)           |

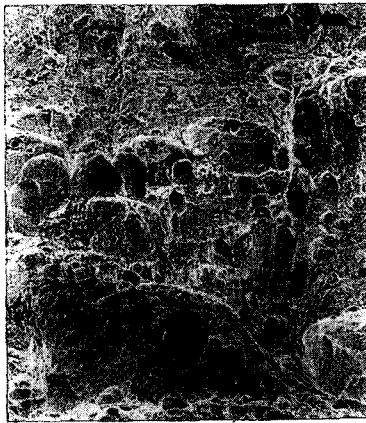


Fig. 1 Specimen's fracture surface shape after Charpy impact test

면 형상으로 입계파면이 주종을 이루고 있고, (b)는 회복재의 파면 형상으로 연성파괴가 되어 덩플(dimples)형상의 파면을 나타낸다. 이것으로 본 연구에 사용한 재료가 충분히 열화 되었다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 2는 KSB 0809의 샤피 충격 시험편을 사용한 열화재 및 회복재의 충격 시험결과로서 동 그림에서 1/4T, 1/2T, 3/4T는 모재(200mm×190mm×120mm) 외부 표면으로부터의 두께를 나타낸다.

이 그림에서 샤피 충격치의 천이 온도가 재료의 열화에 따라 높은 쪽으로 이동함을 알 수 있고 대표적으로 40°C에서 열화재와 회복재의 충격치를 비교하여 보면, 재질열화에 따라 충격치가 매우 현저하게 저하됨을 알 수 있다.

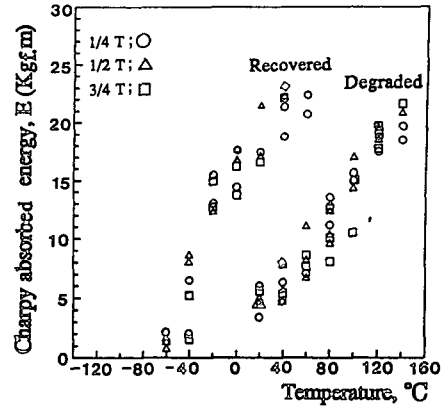


Fig. 2 Charpy absorbed energy for various temp. between the degraded and recovered material

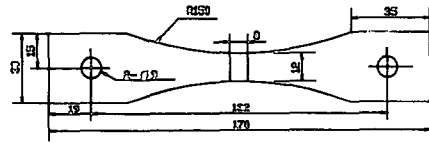


Fig. 3 Specimen geometries(all demensions : mm)

### 2.2 피로 시험편

Fig. 3은 피로 시험편의 형상을 나타낸 것이며, 절단된 시험편의 모재를 방전가공기(Electricity discharge machine : 정밀도 3/1000)를 사용하여 두께 4.0mm 정도로 절단후 밀링 가공하여 길이 170mm, 폭30mm로 가공하고 연삭기를 사용하여 정밀도 3/1000범위 내에서 두께 3.6mm로 가공하였다. 그리고 다시 방전가공기로 곡률반경 150mm로 가공하였다.

제작된 시험편은 그 표면을 에머리 페이퍼 #100에서 #1200까지 순서대로 사용하여 연마하고 산화알루미늄 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)으로 마지막 연마를 한다음 피크린 산 1g, 염산 5ml, 에탄올 100ml를 잘 혼합한 입계 부식액을 이용하여 에칭(etching)을 시켜 미소 균열 발생 및 진전을 정확하게 관찰 할 수 있게 하여 실험에 사용하였다.

### 3. 피로 실험

#### 3.1 피로 실험 방법

본실험에 사용된 피로 시험기는 Instron사 제품

의 유압서어브 시험기(hydraulic-servo fatigue test machine ; Model 1332)로 최대 용량은 25KN (5500lb)이다. 실험은 실내온도  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 상대습도  $50\% \pm 5\%$ 로 일정하게 하여 실험을 하였다. 실험 조건은 사인 파형(sine wave)의 인장-인장(tension-tension)하중 제어방식으로, 주파수 10 HZ, 응력비( $P_{min}/P_{max}$ ) $R=0.05$ 로 일정하게 유지하면서 실험을 수행하였다. 그리고 응력레벨은 최대 응력이  $\sigma_{max}=44\text{kgf}/\text{mm}^2$ ,  $50\text{kgf}/\text{mm}^2$  및  $54\text{kgf}/\text{mm}^2$ 인 경우 열화재와 회복재에 대하여 각각 실행하였다. 초기균열의 길이 정의는 광학현미경으로 100배 확대하여 관찰이 용이한 범위인 균열길이  $30\mu\text{m}$ 로 하였다. 미소균열의 발생 및 진전과정을 관찰하기 위하여 레프리카(replica)법에 따라 실험 도중 파단수명비( $N/N_f$ )가 약 0.1 정도씩 증가할 때 마다 시험기를 일시 정지시켜 시험편 중앙부의  $8\text{mm} \times 10\text{mm}$ 의 관찰영역을 레프리카로 8회에서 13회 정도 채취하였다. 레프리카를 광학현미경에서 50배 배율로서 촬영, 확대 인화한 50여장의 사진을 조합하여 채취한 관찰영역의 형상을 복구시킨후 사진상에 나타난 균열형상을 트레이싱하여 미소균열의 발생, 진전, 간섭 및 합체 하는 과정을 도시화(圖視化)하였다. 즉 광학 현미경과 도시화(圖視化)한 그림을 병행하여 미소균열의 분포 및 진전거동을 수명의 말기에서 초기로 관찰하고, 균열의 길이와 균열의 밀도를 측정 하였으며 응력 레벨에 따른 균열의 밀도 변화, 길이 변화, 진전 속도 등을 추적하고 이들 결과로부터 통계적 파라미터를 추정하였다. 균열길이 측정시 결정입계의 영향으로 불규칙하게 성장한 균열을 주응력축에 수직방향으로 투영시켜 그투영된 길이를 균열길이  $2a$ 로 정의한다. 또한 두개의 균열이 합체하는 경우는 하나의 균열로 간주하여 그 길이와 밀도를 구하였다.

### 3.2 재질열화와 S-N<sub>f</sub> 특성

특성 Fig. 4는 열화재와 회복재에 대한 평활시험편을 사용하여 피로시험을 수행하여 얻은 S-N<sub>f</sub> 곡선으로 종축은 최대공칭응력  $\sigma_{max}$ 를 횡축은 파단수명  $N_f$ 를 나타낸다. Fig. 4에서 열화재가 회복재 보다 피로수명이 짧게 나타나는 경향이 확인되었으며 특히 고응력 레벨에서는 열화재와 회복재의 수명 사이에는 큰 차이가 나타났으나 저응력 레벨에서는 열화재와 회복재의 수명차이에는 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 이와같은 현상은 뜨임 취화의 특

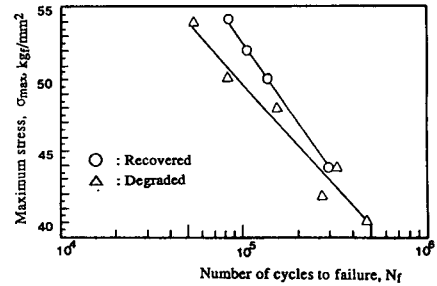


Fig. 4 S-N<sub>f</sub> curves in the Cr-Mo steel

성인 입계파괴가 고응력레벨에서 일어나기 쉽다는 것을 의미한다.

## 4. 재질열화와 미소 표면 균열의 발생 및 진전 거동

### 4.1 미소균열의 발생특성

$\sigma_{max}=44\text{kgf}/\text{mm}^2$ ,  $50\text{kgf}/\text{mm}^2$  및  $54\text{kgf}/\text{mm}^2$ 인 경우 열화재와 회복재에서 평활재로 시험중 트링 최대응력에 대하여 미소표면균열의 발생, 진전 및 합체과정을 관찰하였다. Fig. 5 및 6은 각각 열화재와 회복재에 대해 최대 인장 응력이  $\sigma_{max}=54\text{kgf}/\text{mm}^2$ 에 대하여 피로시험 도중 채취한 레프리카를 광학현미경으로 50배의 배율로 촬영, 확대인화한 50여장의 사진을 조합하여, 관찰영역의 형상을 복구시킨후 트레이싱하고, 이를 다시 축소하여 미소균열의 발생, 진전, 간섭 및 합체 하는 과정을 도시화(圖視化)한 그림이다. 이들 그림을 살펴보면 같은 응력에서 회복재보다 열화재의 크랙밀도가 현저히 더 높음을 알 수 있다. 또한 열화재 및 회복재에 대해 공히 주균열이  $N/N_f=0.2$  부근에서 나타나 있는 것으로 보아 재질열화에 관계없이 기 연구된 결과와<sup>(14)</sup> 유사하여, 주균열의 발생은 재질 열화에 관계없이 파단수명비의 극히 초기에 발생한다고 추정할 수 있으며, 실제 광학 현미경으로  $N/N_f=0.2$  이전에 채취한 레프리카를 관찰해 본 결과 미소균열은 파단수명비의 극히 초기인  $N/N_f=0.1$ 과  $N/N_f=0.2$  사이에서 발생함을 확인하였다. 또한 피로수명의 대부분이 균열의 발생과 진전과정에 소비되고 있는 것이 관찰된다. 진전하는 형태는 입계의 영향으로 불규칙하게 진전하고 파단수명비가 증가함에 따라 균열이 발생, 진전, 간섭 및 합체를 하며 소수의 균열이 파단수명비의 말기에 진전속도가 가속화하여 파단하는 것을 관찰할 수 있

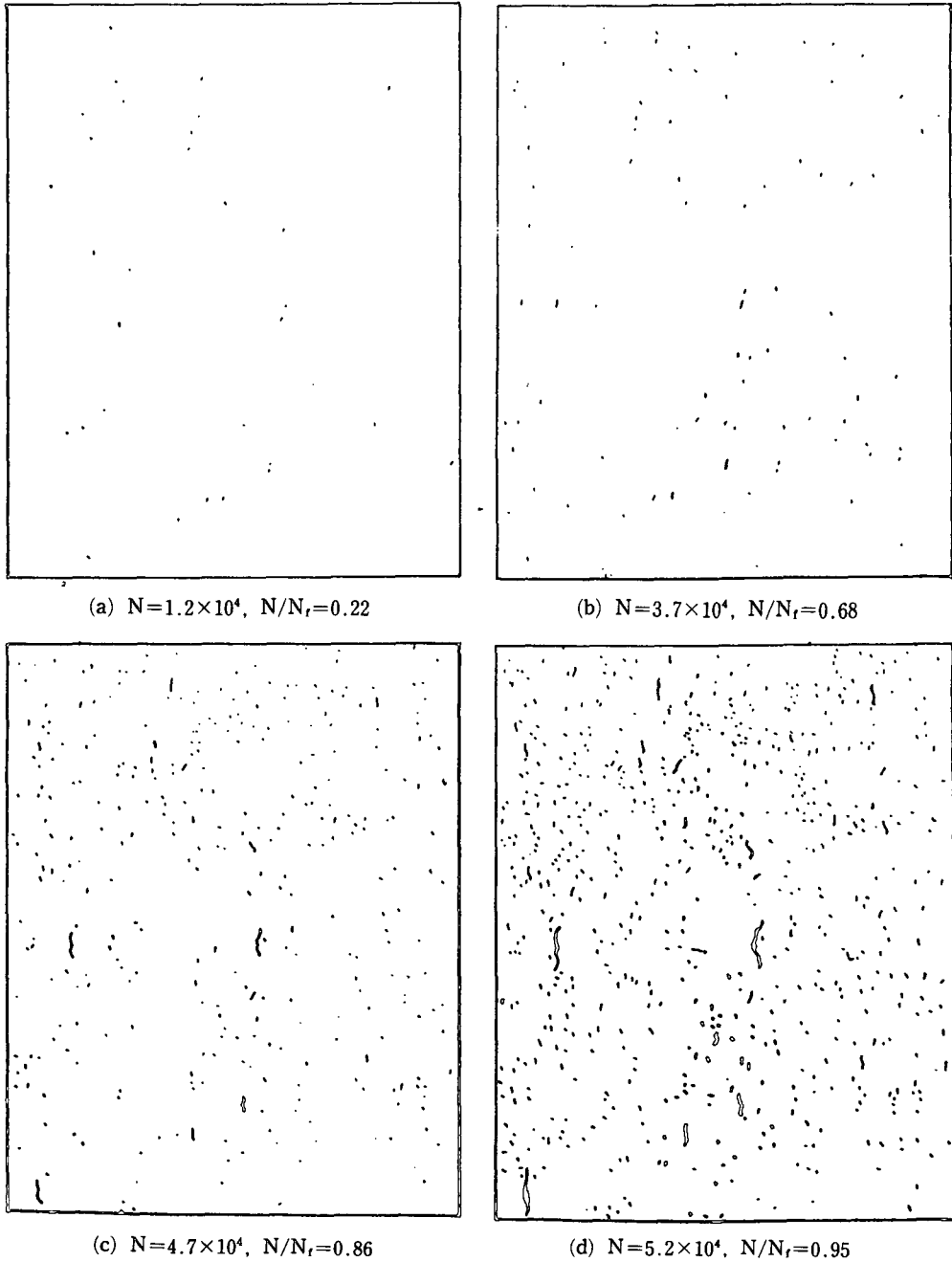


Fig. 5 Initiation, growth, interaction and coalescence of many micro-fatigue-cracks distribution on the smooth surface of the degraded material(Cr-Mo,R=0.05,  $\sigma_{max}=54\text{kg}_t/\text{mm}^2$ )

다. 회복재는 열화재에 비해 균열밀도가 일정하게 증가하게 증가하고, 열화재는 파단 수명비의 말기에 급속도로 증가하는 경향을 보인다. 또한 다른 미소균열들에 비해 현저히 크게 나타나는 주균열들

의 길이는 열화재가 대체로 짧은 경향을 보인다. 따라서 열화재는 최종파단으로 이르게 하는 주균열들의 길이가 회복재 보다는 짧지만 높은 밀도로 인하여 최종파단시 급속한 합체를 하여 열화재의 수

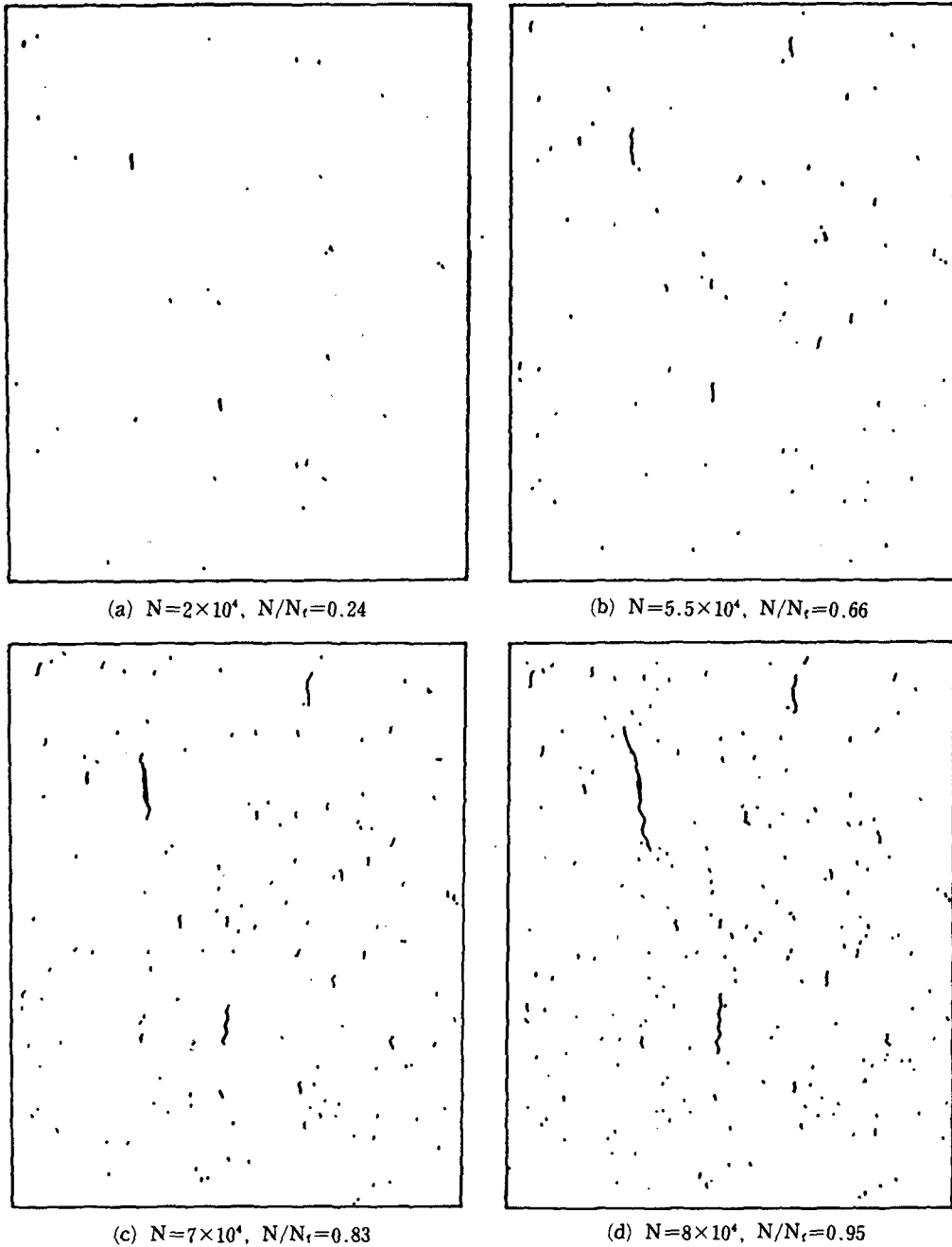


Fig. 6 Initiation, growth, interaction and coalescence a stage of many distributed small crack on the smooth surface to the recovered materials (Cr-Mo,  $R=0.05$ ,  $\sigma_{max}=54\text{kg}_f/\text{mm}^2$ )

명이 보다 단축된다고 생각된다.

#### 4.2 미소균열밀도 및 평균균열 길이의 변화

Fgi. 7 및 8은 최대응력  $\sigma_{max}=54\text{Kg}_f/\text{mm}^2$ ,  $50\text{Kg}_f/\text{mm}^2$

및  $44\text{Kg}_f/\text{mm}^2$ 의 세 가지 응력레벨에서 피로시험을 행한 결과 열화재 및 회복재의 균열 밀도 즉  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 에 대한 균열의 수를 나타낸 것이며 열화재와 회복재 모두 파단수명 비가 증가할수록, 그리

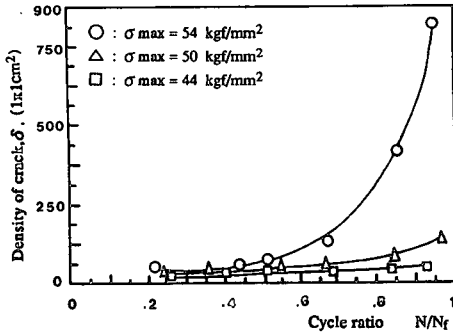


Fig. 7 Increment of crack density against the cycle ratio to the degraded material

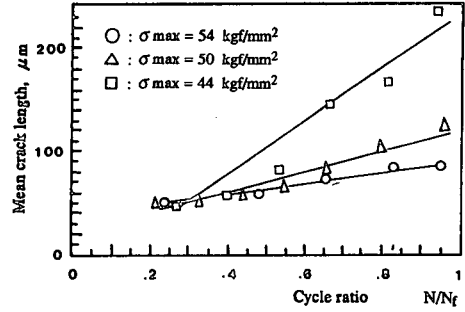


Fig. 9 Increment of mean crack length against the cycle ratio in the recovered material

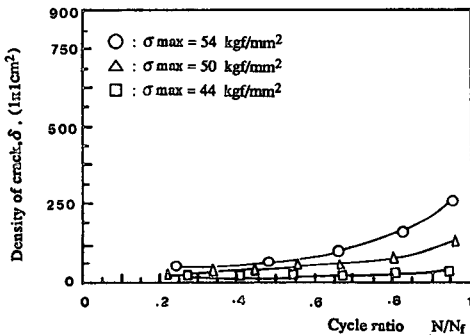


Fig. 8 Increment of crack density against the cycle ratio to the recovered material

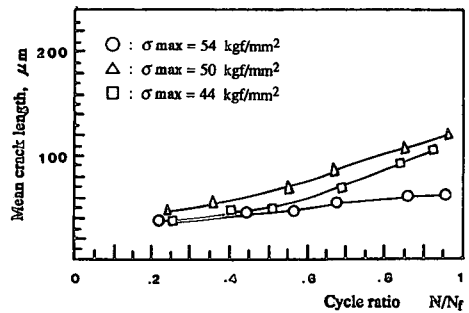


Fig. 10 Increment of mean crack length against the cycle ratio in the degraded material

고 응력레벨이 높아질수록 밀도가 커지는 경향을 보인다. 또한 회복재의 밀도증가는 일정한 비율로서 완만하게 증가하나, 열화재의 경우에는 고응력레벨에서 파단직전에 밀도가 급격하게 증가하는 경향을 보인다

Fig. 9 및 10은 최대응력  $\sigma_{max}=54\text{Kg}_t/\text{mm}^2$ ,  $50\text{Kg}_t/\text{mm}^2$  및  $44\text{Kg}_t/\text{mm}^2$ 의 세가지 응력에서 열화재 및 회복재의 평균 균열길이를 나타낸 것이다. 평균 균열길이는 열화재와 회복재 모두 파단수명비가 증가함에 따라 직선적으로 증가하고

고응력레벨의 실험에서 평균 균열길이가 짧아지는 경향을 보인다. 특히 고응력레벨에서는 파단 수명의 마지막 까지도 평균 균열 길이가  $100\mu\text{m}$  이하인 점이 주목된다. 열화재의  $\sigma_{max}=50\text{Kg}_t/\text{mm}^2$ 의 경우  $\sigma_{max}=44\text{Kg}_t/\text{mm}^2$  보다 평균 균열길이가 더 큰 이유를 관찰해 본 결과, 1개의 현저한 주균열의 영향으로 평균 균열길이가 더 큰것으로 나타났다. 이상으로 균열밀도 및 평균 균열길이의 변화를 관찰해 본 결과 고응력레벨일수록 평균 균열길이가 짧고, 밀도가 높게 되는 것을 알 수 있었으며, 열

화재의 경우 회복재보다 평균 균열길이가 짧고, 밀도가 더높게 되는 것을 알 수 있다. 그리고 파단수명의 비가 증가함에 따라 고응력과 저응력의 밀도 및 평균 균열길이의 차이가 점점 더 커지며, 열화재와 회복재의 균열밀도 및 평균 균열길이의 차이가 점점 더 커지는 현상이 관찰 되었다.

### 4.3 a-N 선도

위와 같은 피로실험을 통하여 평활표면에 발생한 피로균열길이와 하중반복 회수 사이의 관계 즉, a-N선도를 Fig 11 및 12에 나타내었다. Fig. 11은  $\sigma_{max}=54\text{kg}_t/\text{mm}^2$ 인 경우 회복재와 열화재에 있어서의 시험편 표면 주균열(Main crack)의 진전 및 합체과정을 표시한 것이다. Fig. 12는  $\sigma_{max}=44\text{kg}_t/\text{mm}^2$ 인 경우 열화재와 회복재의 미소 주균열의 진전 및 합체과정을 비교한 것이다. □과 ○는 각각 열화재 및 회복재의 주균열의 진전과정이고, ⊠과 ⊙는 각각 열화재와 회복재의 주균열의 주위에 미소균열이 발생하여 진전하는 특성을 나타낸다 여기서, 동일 응력레벨에서 회복재가 열화재보다 수명

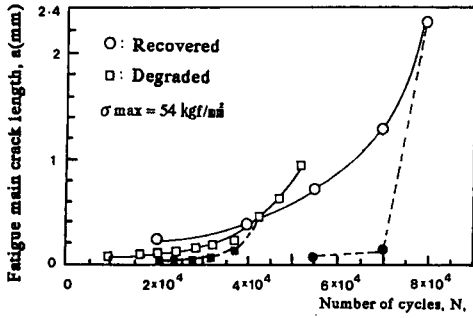


Fig. 11 a-N curves between the recovered and the degraded in the Cr-Mo steel

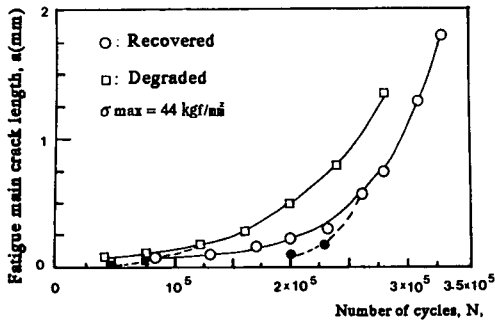


Fig. 12 a-N curves between the recovered and the degraded in the Cr-Mo steel

이 길다는 것을 알 수 있다. 그리고, 동 선도에서 실선은 주 균열의 진전 특성을 나타내며, 점선은 주 균열주위에 발생하는 다수의 미소 균열중에서 진전하여 합체되는 것만을 나타낸 것이다. 그 차이점은 대체적으로 열화재는 주 균열이 그대로 진전하나 회복재에서는 주 균열의 주위에 많은 미소 균열이 합체하면서 진전하는 것을 알 수 있다. 또한 응력이 높을수록 주 균열 주위에 미소 균열이 현저히 많이 발생하여 합체 현상을 이루는 것을 알 수 있다.

4.4 균열길이 분포

Fig. 13 및 14는 각 응력레벨별로 파단수명비  $N/N_f$ 에 따른 열화재와 회복재의 균열길이의 분포를 와이불(weibull) 확률지상에 프로트한 것이다. 종축은 균열 개수에 대한 누적확률이며 횡축은 균열길이(2a)를 나타낸다. 또한, 와이불 분포함수는 다음식으로 나타낸다.<sup>(15,16)</sup>

$$F(2a) = 1 - \exp[-(2a - \gamma)^m / \alpha] \quad (1)$$

여기서 m은 형상 계수(shape parameter),  $\gamma$ 는 위치계수(location parameter), 이며  $\alpha$ 는 척도 계수

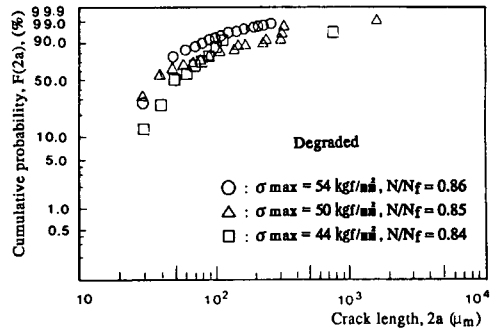


Fig. 13 Weibull distribution of crack length for stress variation in the degraded Cr-Mo steel

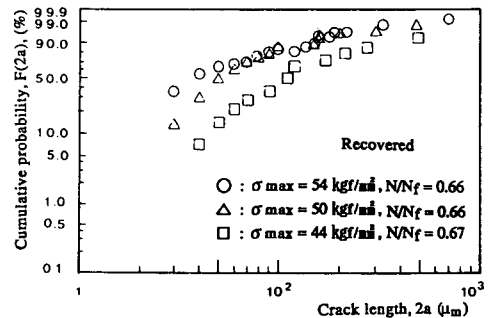
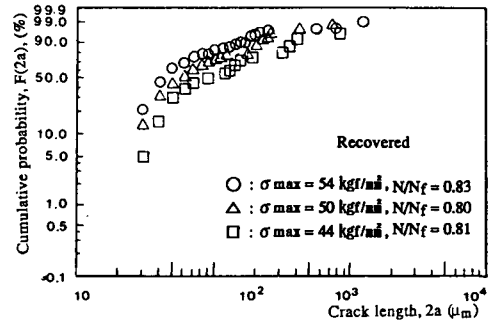
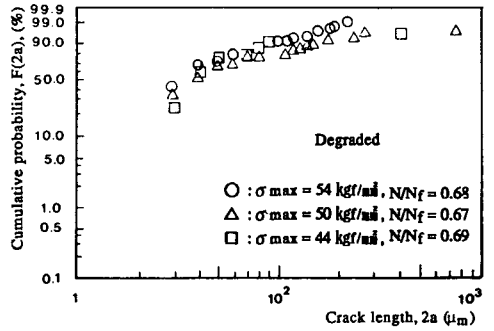


Fig. 14 Weibull distribution of crack length for stress variation in the Recovered Cr-Mo steel



Table 3 The value of  $m$ (Shape parameter) subjected to fracture life ratio for the degraded and recovered steel

| $\sigma_{max}=54\text{Kg}_f/\text{mm}^2$ |      |                   |      | $\sigma_{max}=50\text{Kg}_f/\text{mm}^2$ |      |                   |      | $\sigma_{max}=44\text{Kg}_f/\text{mm}^2$ |      |                   |      |
|--|------|-------------------|------|--|------|-------------------|------|--|------|-------------------|------|
| Recovered material                       |      | Degraded material |      | Recovered material                       |      | Degraded material |      | Recovered material                       |      | Degraded material |      |
| N/Nf                                     | m    | N/Nf              | m    | N/Nf                                     | m    | N/Nf              | m    | N/Nf                                     | m    | N/Nf              | m    |
| 0.95                                     | 0.54 | 0.95              | 0.54 | 0.96                                     | 0.61 | 0.97              | 0.41 | 0.94                                     | 0.68 | 0.93              | 0.7  |
| 0.83                                     | 0.57 | 0.86              | 0.66 | 0.80                                     | 0.77 | 0.85              | 0.54 | 0.81                                     | 0.86 | 0.84              | 0.89 |
| 0.66                                     | 0.72 | 0.68              | 0.92 | 0.66                                     | 0.86 | 0.67              | 0.63 | 0.67                                     | 1.16 | 0.69              | 1.27 |
| 0.48                                     | 0.73 | 0.51              | 1.22 | 0.55                                     | 0.91 | 0.55              | 0.7  | 0.54                                     | 1.2  | 0.51              | 1.07 |
| 0.24                                     | 0.93 | 0.44              | 1.26 | 0.33                                     | 1.47 | 0.36              | 0.86 | 0.40                                     | 1.32 | 0.40              | 1.54 |
|  |      | 0.22              | 1.53 | 0.22                                     | 3.1  | 0.24              | 1.42 | 0.27                                     | 2.29 | 0.25              | 1.85 |

(scale parameter)이다. 여기에서 형상계수  $m$ 의 값은 해석 방법에 따라 복합 와이불분포와 단일 와이불분포로써 구할 수 있다. 본 연구에서는 이들 계수의 결정을 위한 와이불확률지에 대한 컴퓨터 프로그램상에서 위치계수  $\gamma$ 를 변화시켜 가면서 그때마다 일차 회귀분석을 하고 상관계수가 최대가 되는  $m$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ 를 결정하였다.

와이불분포에서 작용력레벨 별로 파단수명비에 따른 형상계수  $m$ (shape parameter)의 값을 Table 3에 나타내었다. 그 결과 Table 3에서 형상계수  $m$ 의 값은 1 전후의 값을 보이며, 파단수명비의 증가와 더불어 감소하는 경향을 보인다. 즉 파단수명의 초기에는  $m > 1$ 의 값을 가지고, 파단수명의 말기에는  $m < 1$ 의 값을 가진다.

Fig. 13과 Fig. 14에서 수명비가  $N/N_f = 0.83$ ,  $N/N_f = 0.67$ 부근에서 열화재와 회복재 모두 응력이 낮을수록 우측으로 이동하는 경향을 보이며, 그 차이가 열화재는 작게 나타나고, 회복재는 열화재에 비하여 차이가 크게 나타나며 수명비의 초기에 뚜렷한 차이를 보였다가 수명비의 말기로 갈수록 차이가 작아지는 경향을 보인다. 균열길이 분포의 범위는 응력이 높을수록 넓게 분포하고 있다.

## 5. 결 론

뜨임취화된 고강도 저합금강인 2 1/4Cr-1Mo강의 열화특성을 알아보기 위해 정적실험과 충격실험 및 평활재의 피로실험을 하였으며 피로실험에서는 미소 균열의 발생, 진전, 간섭 및 파단에 이르는 과정을 정량적 해석과 통계학적 해석을 한 결과는 다음과 같다.

(1) 샤피(Charpy) 충격 실험에서 천이온도는 재

료의 열화에 따라 고온쪽으로 이동하고 샤피충격 시험한 파단면의 관찰에서 회복재가 연성파괴의 특징인 딴플 파면을 이루고 열화재는 입계 파면이 주종을 이루고있어 취화가 현저함을 보이고 있다.

(2) 평활재의 피로실험에서의 응력별 파단수명을 나타내는 S-N<sub>r</sub> 특성에서 열화재의 피로수명이 회복재에 비교하여 떨어지며 고응력일수록 그 차이가 현저함을 보인다.

(3) 평활재의 피로실험에서 미소균열의 발생, 진전, 간섭 및 합체 파단 하는 과정을 도시화(圖視化)하여 균열의 밀도, 평균 균열길이를 정량적으로 해석한 결과 열화재와 회복재 모두 파단 수명비의 극히 초기인  $N/N_f = 0.2$ 보다 전단계에서 균열이 발생하였다.

(4) 열화재와 회복재 모두 평균 균열길이가 직선적으로 증가하고, 균열밀도에 있어서 열화재와 회복재 모두 파단 수명비가 증가 할수록, 응력이 높아 질수록 밀도가 높아지는 경향이 있으며, 열화재는 파단수명의 후기에 밀도가 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 즉 고응력 일수록 평균 균열길이가 짧고 밀도가 높다. 또한 열화재의 경우 회복재보다 평균 균열길이가 짧고 밀도가 높다.

(5) 균열길이의 분포는 와이불(welibull) 확률지에서 통일적으로 정리되며, 또한, 열화재가 회복재보다 균열길이의 분포가 짧은쪽인 좌측에 있고, 균열길이 분포범위가 더 좁게 나타난다. 또한 열화재와 회복재 모두 응력이 높을수록 균열길이 분포가 짧은 좌측으로 이동한다.

## 참 고 문 헌

(1) 北川英夫, 權在度, 島岐剛, 1986, “長期使用 クロ

- ムモリブテソ 鋼劣 化材の 疲勞龜裂進展壽命豫測”, 日本機械學會論文集, A 第52-480 ; pp. 1749~1756.
- (2) 權材度, 中曾根祐司, 北川英夫; 1987, “長期 使用劣化材の 信賴性 工學的 疲勞 壽命豫測”, 材料, 第26卷, 408號, pp. 927~933.
- (3) 北川英夫, 結成良治, 高橋進, 徐昌敏, 1979, “平滑表面に發生, 成長する微小疲勞き裂の 疲勞力學的 研究”, 日本機械學會論文集, No. 790-9, pp.25~32.
- (4) Kitakawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M. and Miyasita, S., 1979, “Quantitative Analysis of Fatigue Process-Micro Crack and Slip Lines under Cyclic Strains”, ASTM STP 675, pp. 420~449.
- (5) Usami, S., Fukuda, Y. and Shida, S., 1981, “Initiation and Growth of Small Crack on the Smooth Specimen in High Temperature Plastic Fatigue”, Proc. Japan Soc. Mechanical Engineers. No.810-7, pp. 219~224.
- (6) 村上賀國, 1983, “壓力用器用厚肉3Ni-Cr-Mo鐵鋼品の焼もどせい性壓力容器に関する研究”, 第23巻, 第6號, pp. 43~84.
- (7) McMahan, C.J., Jr., 1967, “Temper Brittleness-An Interpretive Review”, A.S.T.M STP, No.407, pp. 127~167.
- (8) Erwin, W.E and Kerr, J.G, Feb., 1982, “The use of Quenched and Tempered 2 1/4 Cr-1Mo Steel For thick wall Reactor Vessels in Petroleum Refinery Processes”, An Interpretive Review of 25 Years of Research and Application”, W.R.C. 275, pp. 1~58.
- (9) 神祭川眞, 1985 “高温 高壓下で使用される壓力用器の破壊防止” 日本安全工學 協會, pp. 1~14.
- (10) 岡田光弘, 權在度, 内山修, 鴻巢眞二, 北川英夫; 1987, “疲勞き裂進展を考慮した 材質の劣化材の 壽命評價の 一検討”, 日本材料學會 第1回機械構造物の強度設計安全性評價 シンポジウム 論文集, pp. 119~123.
- (11) Youshitaka Iwabuchi, Nobuo Chiba, Takashi Hatano, 1983, “Estimation of Long-Term Degradation of Cr-Mo-V Steel Castings”, 材料, 第35巻 390號, pp. 52~57.
- (12) Akira Tsurui and Hiroaki Tanaka, 1988, “Probabilistic Analysis for the Propagation of Surface Cracks of Semi-Elliptic Type”, 材料, 第37巻 420號, pp. 996~1002.
- (13) Masahiro Jono, Atsushi Sugeta, Kenichi Miyazaki and Takeshi Ohmori, 1988, “Probabilistic Properties of Small Surface fatigue Crack Initiation Life and Growth Rate on Structural Steels”, 材料, 第37巻 420號, pp. 1003~1009.
- (14) Suh C.M. and Hwang B.W., 1990, “Surface Micro Cracks in a Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature,” Proc. of 2nd Conf. of APCS, pp. 221~226.
- (15) 腐食防食協會編, 1984, 裝置材料の壽命豫測入門; 丸善株式會社, pp. 174~178.
- (16) 眞壁筆, 1984, “ワイブル確率紙の使い方”, 日本規格協會