

〈論 文〉

재질열화가 표면 균열 진전에 미치는 영향과 수명 예측에 관한 연구

권 재 도*

(1989년 5월 24일 접수)

Effect of Temper-Embrittlement on Surface Crack Growth and Fatigue Life Prediction

Jae-Do Kwon

Key Words : Temper-Embrittlement(템퍼링 취화), Degradation(열화), Surface Fatigue Crack Growth(표면 피로 크랙 진전), Statistics(통계해석), Life Prediction(수명 예측)

Abstract

One of the most important problems in recent life prediction is to introduce the degradation effects into life prediction procedure. In the present paper, the effect of the material degradation on the fatigue surface crack growth and fatigue life prediction in a $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel were investigated. The $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel has been used in a plant having operated for over 60000hours and subjected to material degradation due to temper-embrittlement. A Monte-Carlo simulation was made on the basis of the data obtained in the experiment in order to determine the *P-S-N* diagrams of surface crack growth for the degraded and recovered steels.

1. 서 론

고도 급속 성장을 거듭해온 공업 여건을 생각할 때 멀지 않은 장래에 고도급속 성장기에 건설된 기계 구조물들은 그 수명을 다할것으로 생각되며, 따라서 이들 기계 구조물들에 대한 안전성 확보나 교체들에 따른 경제성을 고려할때 수명 예측에 대한 관심은 점점 증가되고 있다. 이와 같은 관점에서 수명예측을 위한 시스템(system)들이 제안^(1~3)되고 있으나 실제 열화문제를 이 시스템에 어떻게 도입할 것인가가 현 시점에서의 기술적 과제로 남아 있다.

그러나 재질열화가 수명예측에 미치는 영향에 대한 연구의 일환으로서, 관통 균열(crack) 발생특성에 미치는 재질열화의 영향, 균열의 진전특성에 미치는 재질 열화의 영향등에 대해서는 저자들의 일련의 연구^(4,5) 결과가 있다. 특히, 반복 하중이 작용하는 고온에서 사용되는 압력 용기, 고압 배관 등에서 재료의 재질 열화와 표면 결함이 동시에 발생할 경우 두가지의 위험 요소가 중복해서 일어남으로 특별한 연구 검토가 필요하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 피로 균열의 진전 특성 및 표면 균열과 같은 3차원 균열의 진전 특성에 나타나는 재질 열화의 영향, 열화와 피로 파괴 형태의 관계, 균열진전 속도의 분산(scattering)과 열화의 관계등에 주목해서 열화재와 회복재의 2종류의 재

* 정회원, 영남대학교 공과대학 기계설계학과

료를 사용해, 피로 시험에 의한 균열진전의 실험적 특성을 고찰하였다. 또한, 저자들의 종래 관통 균열 진전 특성에 대한 연구 결과를 응용해서 열화와 균열진전의 확률특성을 고려한 표면균열 진전에 대한 시뮬레이션(simulation)을 행해서 피로 수명 예측에 미치는 열화의 영향에 대해 검토해 보았다.

2. 공시재 및 시험편

공시재는 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강으로, 실제 플랜트(plant)에서 장시간 운전후 사용을 중지한 압력 용기로 부터 채취한 것이다. 이 재료는 400~500°C의 온도범위에서 약 60000시간 정도 사용한 것으로 템퍼링열화(temper-embrittlement)한 재료로서 본 논문에서는 이 재료를 열화재의 한 종류로 생각해서 “열화재”로 명명하였다. 또한 열화의 영향을 추출하기 위해서, 열화재와 비교할 미 사용 미 열화의 동일재(건전재)가 필요하지만, 실제 10년정도 사용한 열화재이기 때문에 이와 동일한 건전재의 입수가 불가능 했기 때문에 열화재를 650°C에서 1시간 보존후 수냉에서 충격치를 회복한 재료를 건전재의 대신에 사용해서 “회복재”로 명명하였다.

Table 1에는 상기 열화재의 화학 성분, Table 2에는 열화재 및 회복재의 기계적 성질을 나타냈다. 그 결과 인장 강도에는 열화에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다. 또한 Fig. 1에는 표준 충격 시험편을 사용하여 실험한 샬피(Charpy)충격치와 온도와의 상관 관계를 나타냈다. 두 종류의 재료에는

Table 1 Chemical composition of the SCMV 4 steel tested.

Chemical composition of SCMV 4, %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	As	Sn	Sb
0.17	0.24	0.65	0.015	0.016	2.59	1.01	0.028	0.027	0.005

Table 2 Mechanical properties of the SCMV 4 steel tested.

Materials	Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
Degraded SCMV 4	568	716	24
Recovered SCMV 4	549	686	23

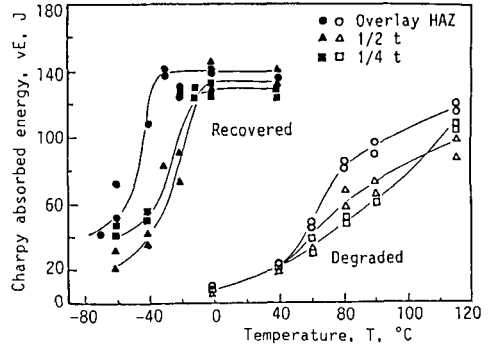


Fig. 1 Charpy V-notch energy absorption behavior for impact loading on the degraded and recovered SCMV 4 steels

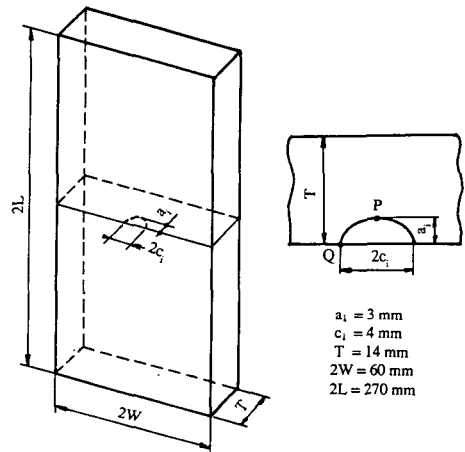


Fig. 2 Specimen geometries

상온 부근에서 충격치의 현저한 차이가 나타나서 적어도 충격치를 기준으로 생각하면 한 종류의 재료는 열화재 또한 종류의 재료는 회복재로 보는 것이 좋을 것으로 생각된다.

한편 Fig. 2에는 본 연구에 사용된 3차원 표면 균열을 가지는 피로 시험편의 형상을 나타내었으며, 인공 노치 깊이 3mm, 표면 길이 8mm(b/a = 0.75), 노치(notch)의 곡률 반경 0.3mm의 반 타원 표면 균열을 방전 가공에 의해 열화재 및 회복재에 가공 하였다.

3. 피로시험

3.1 피로시험방법

3차원 표면 균열의 피로 시험은 20톤 유압 서보

피로 시험기를 사용하여, 상온에서 응력비 $R=0.05$, 주파수 10Hz, 평균응력 진폭 $\sigma=200\text{MPa}$ 에서 피로 시험을 행했다. 피로 균열의 표면 길이의 측정은 적당한 반복 횟수마다 시험기의 변동하중 성분만을 0으로 해서, 시험편 표면의 레프리카(replica)을 채취해서 피로 시험 종료후 광학 현미경에 부착한 접안 이동측미계를 사용해서 1/100mm까지 측정하였다.

또한 피로 균열의 길이 방향의 길이 측정은 시험도중 수차 최대 하중은 일정하게 유지한 채로, 하중 진폭을 1/2로 감소 해서 균열 길에 따라 2000~25000 회 정도 변화 시켜가면서 반복 하중을 가해서 얻은 비치 마크(beach mark)로부터 균열면 형상의 형상비(aspect ratio)를 측정하였다.

3.2 관통 균열의 진전속도 특성

관통 균열을 갖는 피로 시험편은 열화재의 연구라는 제약상 시험편 1개에 3개의 노치를 넣어서 제작한 피로 시험편을 각 재료에 대해 4개씩 사용하여 ΔK 증가법에 따라 피로 시험을 실행하면서 균열의 길이 측정을 위하여서 표면 레프리카법에 따라 레프리카를 채취하였다. 표면 레프리카로부터 얻은 각 균열의 길이 a 와 하중반복 횟수 N 을 가

지고, 피로 균열 진전 곡선 $a-N$ 선도를 작성해서 ASTM E 647을 참고로 해서 Secant법에 따라 열화재 및 회복재에 대해 각각 균열진전속도 da/dN 를 구한후 응력 확대계수 폭 ΔK 와의 관계선도를 얻었다. 이 경우 K 값은, 일정변위와 인장을 받는 평판의 판 중앙에 등간격의 평행 균열에 대한 응력 확대계수 K 에 대한 Isida의 해⁽⁶⁾를 사용해서 구하였다.

이상과 같은 실험 결과를 이용한 재질 열화와 수명 예측에 대한 연구의 일환으로서 저자등의 기존 연구 보고^(4,5)가 있다. 이 결과중 본 연구와의 관계상 기 보고된 바 있는⁽⁵⁾ $\Delta K-da/dN$ 선도를 Fig. 3 및 4에 나타내었다. Fig. 3 및 4는 회복재 및 열화재에 대해 각각 24개(4개 시험편 \times 6개 균열 선단)의 $\Delta K-da/dN$ 의 관계를 동일 선도상에 나타내었으며, 아울러 $\Delta K-da/dN$ 관계의 99% 신뢰구간을 통계학적으로 해석한 결과를 곡선으로 나타내었다. 또한 관통 균열에 대한 실험결과로부터 피로 균열 진전 법칙에 있어서 상수 C 와 m 에 관한 통계학적 특성에 관한 연구 결과⁽⁴⁾를 요약하면, 다음과 같다.

(1) 제 2영역에 있어서 개개의 균열단에서 $\Delta K-da/dN$ 관계는 회복재의 경우는 양대수 선도상

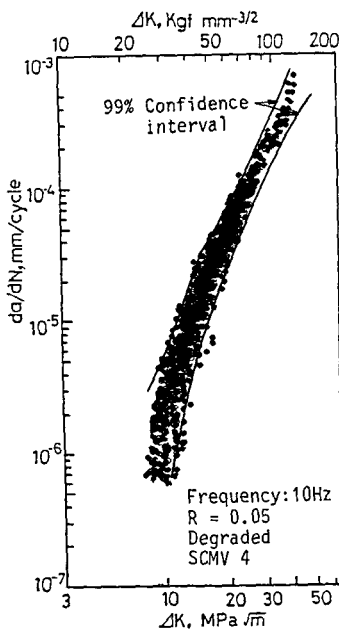


Fig. 3 Statistical $\Delta K-da/dN$ relationships of through-thickness cracks in the degraded SCMV 4 steel

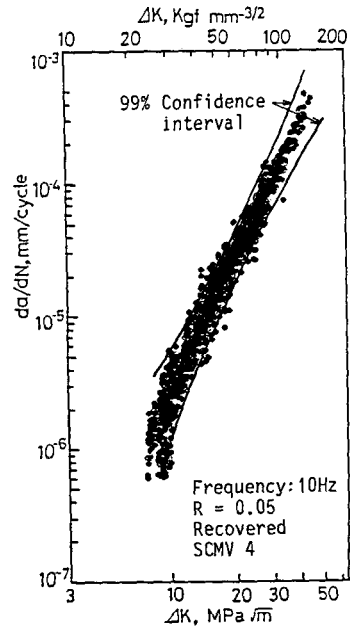


Fig. 4 Statistical $\Delta K-da/dN$ relationships of through-thickness cracks in the recovered SCMV 4 steel

에 일직선으로 나타났으며, 열화재의 경우는 $\Delta K = 14 \text{MPa}\sqrt{m}$ 부근에서 굴곡점에 존재해서 그보다 낮은 ΔK 범위에서는 큰 구배의 m 이, 그보다 큰 ΔK 범위에서는 작은 구배 m 의 값을 가지는 2개의 직선으로 표시되었다.

(2) 그림에도 불구하고 상기 각 직선에 대해서 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 이 성립되며, 회복재 및 열화재의 $\Delta K > 14 \text{MPa}\sqrt{m}$ 와 $\Delta K < 14 \text{MPa}\sqrt{m}$ 에 대해서, 3종류의 $\Delta K - da/dN$ 선도로 부터 C 와 m 의 통계적 분포 특성을 얻을 수 있었고, 그 결과 m 은 정규 분포에 따르고, C 는 대수 정규 분포에 따르는 것을 알았다.

(3) 또한 상기 3종류의 m 과 $\log C$ 사이에는 각각 직선 관계가 성립되어서 $C = A \cdot B^m$ (A, B 은 정수)의 식이 성립되며, 그와 같은 직선은 3종류 선도 상호간에 거의 일치 하였다.

3.3 표면 균열의 피로시험 결과

Fig. 5에는 피로 시험결과 얻어진 파단면의 사진을 나타내었는데, 파단면에는 피로 균열이 진전한 형태인 비치 마크가 보이고 있다. 열화재 및 회복재에 대한 피로 시험 도중에 채취한 레프리카로부터 얻은 표면 균열의 길이 c 와 하중 반복 횟수 N

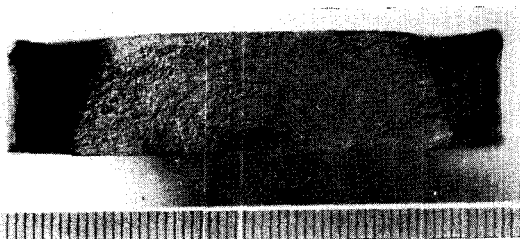


Fig. 5 Example of the surface crack growth pattern

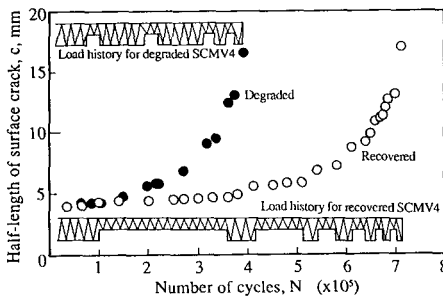


Fig. 6 Fatigue surface crack growth curve and load history in the recovered and degraded steel

이의 관계를 Fig. 6에 나타내었으며, 비치마크를 넣기 위해 가한 하중 이력도 그림 내부에 표시하였다. 동 선도로 부터 열화재의 파단시까지의 하중 반복 횟수가 회복재보다 적게 나타났다. 여기서 파단수명까지의 하중 반복 횟수는 비치마크를 넣기 위해 응력 진폭을 1/2로 감소시킨 횟수도 포함되어 있으므로 전 반복 횟수만으로 수명을 비교하기는 곤란하다. 또한 피로 시험결과로 부터 비치마크를 1회 넣은 이후의 하중 이력에 따른 열화재 및 회복재에 대한 $a-N$ 및 $c-N$ 선도를 각각 Fig. 7 및 8에 나타내었다. 여기서 ●표는 레프리카로부터 얻은 열화재 및 회복재에 대한 균열의 표면 길이 C 를 측정된 값을 나타내고, ■표는 실험 종료 후 비치마크에서 측정된 3차원 균열의 깊이 a 를 나타낸다.

4. 3차원 피로 균열의 진전 수명예측

4.1 3차원 균열의 $a-N$ 선도의 예측

우선 확률 통계적 피로 균열 진전특성을 고려를

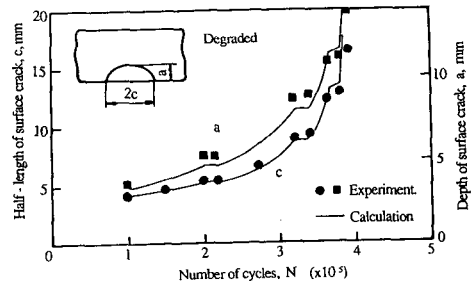


Fig. 7 Experimental and calculated fatigue surface crack growth curve in the degraded steel

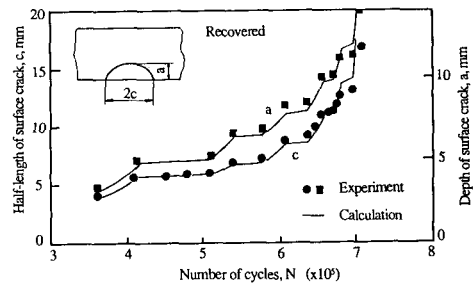


Fig. 8 Experimental and calculated fatigue surface crack growth curve in the recovered steel

하지 않은 상태에서 3차원 표면균열의 진전 특성에 대한 시뮬레이션을 다음과 같이 행해 보았다. 표면 균열의 최심부 P점 및 판 표면 부근 Q점(Fig. 2 참조)에서의 응력확대계수 K를 각각 K_{1p} , K_{1q} 라 하고 균열의 진전 속도를 각각 da/dN , dc/dN 라고 할것 같으면, 양자 사이에는 다음과 같은 지수 법칙이 성립할것으로 생각된다.

$$da/dN = C(K_{1p})^m \quad (1)$$

$$dc/dN = C(K_{1q})^m \quad (2)$$

먼저 피로 시험을 통하여, 균열 진전 중의 균열면의 형상은 Fig. 6의 비치 마크에서 나타낸 바와 같이 반 타원 형상을 가지는것으로 가정해서 계산을 행하고자하며, K_{1p} , K_{1q} 는 Raju-Newman의 근사식⁽⁷⁾을 이용해서 구한다. $a-N$ 선도에 대한 시뮬레이션은 식(1)에서 ΔN 에 대한 Δa 를 구하고, 아울러 식(2)에서 ΔN 에 대한 Δc 을 구하는 방법을 반복해서 계산을 행하였다. 또한, 사용한 C와 m의 값은 저자가 종래 연구한 결과의, 중앙 관통 노치를 가지고 있는 평판시험편에서 통계적으로 구한 C와 m의 평균치를 그대로 사용하였다. 이와 같이 하여 표면 균열의 진전 과정중 방전 가공한 노치로부터 균열 발생수명을 확실히 추정할수 없었기 때문에 비치 마크를 1회 넣은 이후의 실험과정에 대한 데이터를 이용하여 열화재 및 회복재에 대해 행한 시뮬레이션 결과를 Fig. 7 및 8에 실선으로 나타내었다.

여기서 시뮬레이션 결과의 예를 Fig. 7 및 8의 실험에서 얻은 실험 결과의 예와 비교하면, 양자의 차이는 열화재 및 회복재에 대해 공히 10% 범위 이내에 들었다. 또한, $a-N$ 및 $c-N$ 선도상의 평행부로 보이는 곳은 비치마크를 넣기 위해 하중진폭을 1/2로 감소시켜 실험을 행했으므로 균열 진전 속도가 늦기 때문에 나타나는 현상이다. 이와 같은 결과로부터 평판 중앙관통균열의 피로균열 진전특성에서 얻은 C와 m의 값을 이용해서 3차원 표면 균열의 진전에 대해적용해 보아도 어느 정도의 정도 높은 시뮬레이션이 될 가능성이 있음을 시사한다고 해도 좋을 것이다.

4.2 3차원 균열의 P-S-N선도

장기 사용한 열화재의 피로 수명을 평가하고자할 경우 피로 균열 진전특성의 확률 통계적인 성질의 중요성에 대해서는 저자의 일련의 연구 보고 결과

가 있다. 따라서 여기에서는 저자들의 회복재 및 열화재에 대한 평판 중앙 관통 균열의 피로 균열 진전 특성에 대해 정리한 통계적인 데이터를 사용해서, 재질열화 및 피로 균열 진전에 있어서 통계적 특성의 두문제를 동시에 고려한 표면 균열 진전에 대한 수명 예측의 시뮬레이션을 행해 보았다. 여기서 P-S-N선도라고 하는것은 파괴 확률이 첨부된 S-N선도를 의미한다.

이 경우의 계산 모델로서는 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo강제의 석유정제 설비의 압력 용기를 단순화하여 재질열화가 발생한 경우를 가정해서, 중앙에 균열길이 $2c = 80\text{mm}$, 균열 깊이 $a = 30\text{mm}$, 즉 $a/c = 0.75$ 의 표면 균열을 가지는 판 두께 $T = 150\text{mm}$, 판의 폭 $2W = 10,000\text{mm}$ 의 평판이 1축 반복 인장응력이 걸리는 경우를 시뮬레이션을 대상으로 선정 했다.

4.1절에서 관통 피로 균열의 피로 균열진전 특성

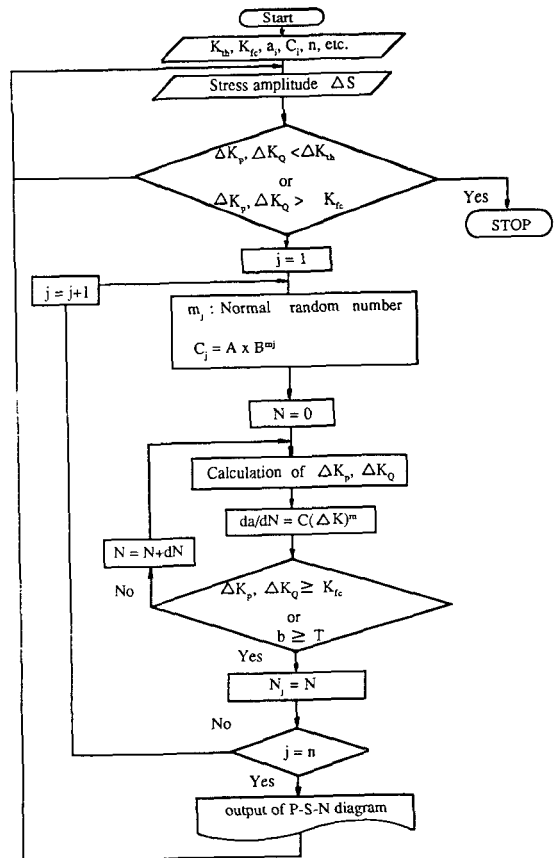


Fig. 9 Flow chart of the present statistical fatigue life prediction procedure

Table 3 Input data for the present statistical fatigue life prediction

	Degraded		Recovered
	$\Delta K < 14\text{MPa}\sqrt{m}$	$14\text{MPa}\sqrt{m} < \Delta K$	
Mean of m , μ_m	0.64	3.05	3.06
Standard deviation of m , σ_m	0.60	0.26	0.16
Threshold condition, K_{th} , $\text{MPa}\sqrt{m}$	4.7		4.7
Critical condition, K_{fc} , $\text{MPa}\sqrt{m}$	120		250
A^*	1.25×10^{-5}		
B^*	1/13.1		
Initial depth of surface crack, a_i , mm	30		
Initial half-length of surface crack, c_i , mm	40		
Plate thickness, T , mm	150		
Half-width of cracked plate, W , mm	5000		
Number of output data, n	50		

* A and B are constants in the relationship between C and $m : C = A \times B^m$

을 이용해서 표면 피로 균열의 진전 거동의 예측이 가능하다는 결과가 있었으므로 이 방법을 확장 사용해서 행하고자 한다.

Fig. 9에는 본 시뮬레이션의 흐름도(flow-chart)을 나타내고 있고, Table 3에는 본 시뮬레이션 계산에 이용한 입력 데이터를 나타내고 있다. 여기서 파단 수명 N_f 는 (1) 표면 균열의 깊이가 판 두께를 관통할 경우, (2) 또는 K_{1p} , K_{1q} 의 어느 값이든지 계산하여 피로 균열의 파괴 조건에 해당하는 K_{fc} 을 초과할 경우로 가정 하였다. 이때 K_{fc} 의 값은 Fig. 1의 살피 충격치를 환산식에 따라 환산한 값을 채용 하였다. 또한 C 와 m 을 확률 변수로 간주하는 방법에 대해서는 다음과 같이 3 종류의 방법을 생각할 수 있다.

(1) m 을 평균 μ_m , 표준편차 σ_m , 정규 분포에 따르는 확률 변수로 간주해서 $C = A \cdot B^m$ 의 관계를 이용하는 방법

(2) m 은 확정치 μ_m 으로 하고, $\log C$ 의 평균 $\mu_{\log C}$ 의 정규 분포(즉 대수 정규 분포)에 따르는 확률 변수로 간주하는 경우

(3) $\log C$ 을 확정치 $\mu_{\log C}$ 로 해서, m 을 평균 μ_m , 표준편차 σ_m 의 정규 분포를 따르는 확률 변수로 간주하는 경우

상기의 세가지 경우중 본 연구에는 우선 제 (1)번의

경우를 선정하여 열화재 및 회복재에 대해, 각 응력 범위에 대해서 파단 수명 N_f 를 구하였다. 각 응력범위에서 Monte-carlo법에 따라 m 의 값을 난수를 발생시켜가면서 선정하고 $C = A \cdot B^m$ 의 관계에 따라 C 를 계산한다. 이와같이 하여 일정 응력에 대해 각각 50개의 C 와 m 의 조합에 대해 수명을 계산하고 다음 응력치에 대해 동일한 방법으로 계산을 반복하는 과정을 거쳐 Fig. 10 및 11에 표면 균열을 가진 열화재 및 회복재의 $P-S-N$ 선도를 플롯트 하였다.

그림에서는 ●표는 각응력 범위에서 1회 계산시 1점씩 계산하여 동일응력치에 대해 50점이 플롯트 됐다. 각 응력범위의 계산치의 중앙부에 있는 □의 표시가 각 응력 범위에서는 평균 수명에 해당되며, ○표는 파단확률 5%의 수명에 해당되며, ○표는 확률 95%의 수명을 나타낸다. 또한 Fig. 10 및 11에서 열화재 및 회복재의 $P-S-N$ 선도상의 수명을 비교하면, 열화재의 경우가 평균 파단 수명에서 회복재 보다 짧게 나타나고, 특히, 고 응력 범위가 되면 될수록 열화재는 회복재보다 단 수명 측에 존재하고, 저 응력 범위가 되면, 양자의 차이도 점점 적게 나타나는 특징이 있었다. 또한 C 와 m 의 분산의 차이에서도 예측된것과 같이 전 응력 범위에서 열화재의 수명이 회복재의 수명보다 분산

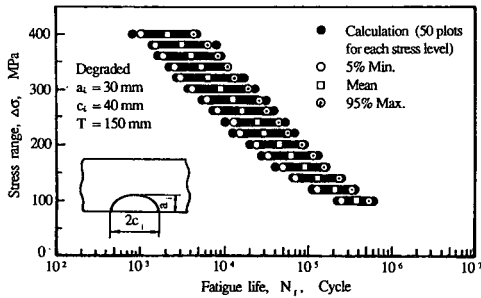


Fig. 10 Predicted $P-S-N$ diagrams of the surface crack in the degraded steel

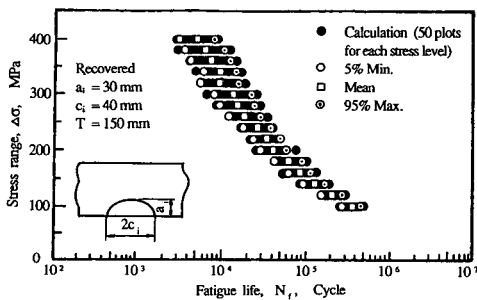


Fig. 11 Predicted $P-S-N$ diagrams of the surface crack in the recovered steel

이 심하게 나타났다.

5. 결 론

이상과 같은 표면 균열 진전에 대한 피로 시험과 시뮬레이션에 의한 수명 예측 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) Raju-Newman의 3차원 표면 균열에 대한 응력 확대 계수 K 와 Paris법칙에 병용하여, 열화재 및 회복재에 대한 3차원 피로균열의 진전 수명을 시뮬레이션 한 결과 실험에서의 표면 균열의 진전 과정을 근사적으로 재현할 수 있었다. 이와같은 결과로부터 관통균열의 피로균열진전특성에서 얻은 통계적 확률 변수 C 와 m 을 사용해서 3차원 균열의 진전 과정을 회복재 및 열화재에 대해서도 예측할 수 있다는 전망을 얻었다.

(2) 피로 균열 진전의 통계적 데이터를 이용해서 현재까지 별로 시도되어 있지 않다고 생각되는 열화재를 포함한 표면 피로 균열 진전의 통계적 수명 예측의 시뮬레이션을 행하여, $P-S-N$ 선도를 얻었다. 이 결과 열화재와 회복재의 균열 진전 특성이

통계적 성질의 차이로부터 예측되었던 바 있으나, 진응력 범위에서 열화재의 수명의 분산이 회복재보다 크게 나타났고, 열화재가 회복재보다 단 수명 측에 속함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1988년 문교부 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Kitagawa, H., Nakasone, Y., and Miyashita, S., 1982, "Measurement of Fatigue Damage by Randomly Distributed Small Cracks Data", ASTM. STP 811, pp. 233~263.
- (2) Brazill, R., Simmons G.W., 1979, "Fatigue Crack Growth in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Exposed to Hydrogen Containing Gases", ASME Jour. of Engineering Materials and Technology, Vol. 101, pp. 199~204.
- (3) 市川昌弘, 中村武夫, 1985, "疲労亀裂伝播法則 $da/dN = C(\Delta K)^m$ における パラメータの確率變數化の方法", 材料, 第24卷, 第364号, pp. 8~13.
- (4) 北川英夫, 權在度, 中曾根祐司, 島崎剛, 1986, "長期使用クロムモリブデン鋼劣化材の疲労き裂進展寿命豫測", 日本機械学会論文集, A, 第52卷, 第480号, pp. 1749~1756.
- (5) 權在度, 中曾根祐司, 北川英夫, 1987, "長期使用劣化材の信頼性工学的疲労寿命豫測", 材料, 第36卷, 第408号, pp. 927~933.
- (6) Isida, M., 1971, Internal J. Fracture Mechanics, Vol. 7, No. 3, pp. 301.
- (7) Newman, J.C. and Raju, I.S., 1981. "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185~302.
- (8) Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., 1970, "Correlations between K_{IC} and Charpy V-Notch Test Results in the Transition Temperature Range" ASTM. STP 446, pp. 281~302.
- (9) Iwodate, T., Karaushi, T., Watanabe, J., 1977, "Prediction of Fracture Toughness K_{IC} of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Pressure Steels from Charpy V-Notch Test Results", ASTM. STP 631, pp. 493~506.