

## 미소원공을 갖는 선박 추진축재의 피로크랙 전파 거동에 관한 연구

정 재 강\* · 김 건 호\*\*

A Study on the Behavior of Fatigue Crack Propagation in Marine Propeller  
Shaft Materials with Small Circular Defect

J. K. Chung · G. H. Kim

**Key words** : Carbon steel forgings(탄소강단조재), Fatigue strength(피로강도), Number of cycles(피로수명), Cycle ratio(피로파단수명비), Fatigue crack propagation rate(피로크랙전파속도), Fatigue crack propagation life(피로크랙전파수명)

### Abstract

In this paper, fatigue crack propagation behaviors were investigated experimentally for the materials, carbon steel forgings (SF45A, SF50A, SF60A) which are used in the marine propeller shaft. The results obtained are as follows : The number of cycles required to grow crack length 1.30mm from microcrack initiation was about 60% of the total fatigue life. Fatigue crack propagation rate was expressed by the equation  $d(2a)/dN = B \cdot 2a/N_f$  and the result was agreed well with the experimented data. And the equation  $d(2a)/dN = C \sigma_a^m (2a)^n$  was evaluated also. Obtained material property  $m$  and  $n$  are 3~5 and 1~1.5 respectively, and the result was reasonably agreed to the data obtained from experiments.

### 1. 서 론

최근 조선공업의 발전과 함께 선박은 다양화, 대형화, 고속화 및 자동화되어 감에 따라 박용기관에 사용되는 재료들도 그 받는 부하가 가혹해지고 있다. 특히 추진축계에 있어서는 장시간의 운전과 반복적인 부하변화 및 비틀림 진동 등에 의해 피로크

랙 또는 피로파괴가 일어난 사례들이 보고되고 있다<sup>1),2),3)</sup>. 따라서 선박 추진축과 같은 기계 및 구조물 등의 피로파괴에 대한 안전성 확보를 위하여는 이들 재료에 대한 피로크랙의 발생과 전파과정에 대한 이해가 필요하다. 또한 이들의 기계나 구조물의 재료는 여러가지 형태의 결함을 흔히 갖게 되는데, 각종 크랙, 개재물, 기공, 2상입자, 및 입계층 등 금

\* 정회원, 조선대학교

\*\* 정회원, 군산대학교

속조직학적 결합과 나사구멍, 기름구멍, 및 키홈 등 기계가공상에서 의도적으로 생성되는 결합들의 예를 들 수 있다<sup>4),5)</sup>. 이러한 결합들로부터 발생 성장하는 크랙에 대한 그 재료의 특성을 파악하는 것은 피로크랙의 성장속도나 피로수명을 예측하기 위해 필요하다. 송등<sup>6)</sup>은 회전굽힘피로시험을 통해 미소원공 크기와 재료의 미시결합 및 결정입 크기 등의 관계를 비교하여 50 $\mu\text{m}$  이하의 미소원공 노치는 재료가 갖는 기존의 결합에 대처할 수 있다고 하였다. 한편, 村上<sup>7)</sup>은 원공결합의 크기에 따른 피로한도의 변화와 정류크랙에 대하여 관찰하였다. 이밖에 원공결합재가 피로강도에 미치는 영향<sup>8)</sup>, 그리고 이외의 결합의 기하학적 모양과 크기에 대한 많은 연구가 있다. 위와 같은 연구결과를 종합하여 보면 결합이 작을수록 응력집중계수는 크고, 피로한도는 더 낮으며, 같은 크기의 결합에서는 응력집중계수가 큰 쪽의 피로수명이 작다는 것을 알 수 있다. 한편 피로파괴의 수명은 대부분 초기크랙의 발생과 크랙의 성장에 소비된다. 그러므로 이러한 전파과정의 해석 및 예측이 중요시되며 파괴역학의 중요한 응용분야로 되어 있다. 따라서 피로크랙전파속도를 실험 해석하여 구한 파라미터를 이용하여 분석하면 실제의 결합, 전파 개시조건, 전파속도, 피로수명등을 예측할 수 있게 된다. Irwin<sup>9)</sup>은 응력확대계수의 개념을 확립하였으며, 이러한 개념의 도입은 평판재에 있어서 재료의 수명예측과 크랙전파거동을 파괴역학적으로 평가하는데 커다란 기여를 하였다. Kitagawa등<sup>10)</sup>은 히스테리시스곡선에서 안정된 반복변형을 값을 사용한 반복변형율확대계수범위  $\Delta K_{th}$ 를 제안하였다. 또한, 西谷등<sup>11)</sup>은 역학적 변수를 사용하여 여러 가지 재료에 대해 피로크랙전파거동에 적용하였으며, Frost<sup>12)</sup>에 의하여 처음 실험적으로 적용하였다. 그러나 회전굽힘응력이 작용하는 환봉재의 경우에는 현재 정확한 응력확대계수식이 정립되어 있지 않은 상태에서 일부 연구자들이 일반적으로

가정하여 사용하고 있으나, 무한평판에 대한 최대 응력확대계수식을 사용하여 크랙전파속도를 파괴역학적으로 정리하면 응력의 의존성이 발생하여 피로크랙전파 거동을 예측하는데 적합하지 않은 실정이다. 그러므로 많은 연구자들이 회전굽힘시험에서 받는 부재의 응력 의존성을 소멸시키는 파라미터들을 도입하여 사용하고 있다. 이러한 연구결과들은 회전굽힘시험에서 받는 부재의 피로크랙전파 거동을 통일적으로 정리하는데 있어 어느 정도 좋은 결과들을 얻어 왔으나 아직까지 보완할 사항들이 많은 실정이다.

본 연구에서는 선박 추진축 재료로 주로 사용되고 있는 탄소강단조재인 SF45A, SF50A 및 SF60A재에 대해 피로시험을 수행하여 피로강도에 미치는 금속조직학적인 영향, 피로크랙의 발생 및 전파거동, 피로크랙전파에 영향을 미치는 역학적인 변수들과 피로크랙전파속도의 관계 및 본재료에 대한 피로크랙전파수명의 적용 가능성 등을 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 연구의 시험재료는 탄소강단조재(Carbon steel forgings)로서 강괴를 40mm인 round bar로 열간 자유단조한 것이다. 실험에 사용된 재료는 최저인장강도가 다른 3종류 즉, SF45A, SF50A 및 SF60A재이며, 이들을 885 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2.5시간 불림(normalizing) 열처리를 실시하여 사용하였다. 이의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. Photo. 1은 각 재료의 금속조직 사진이다.

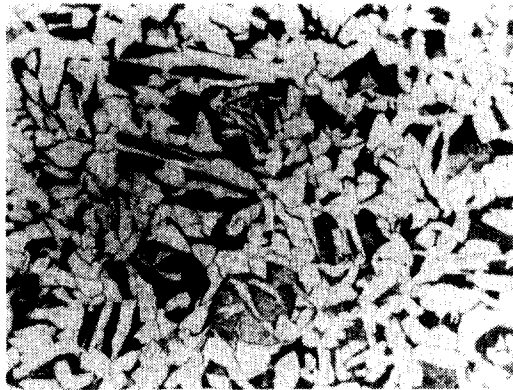
시험편의 형상은 Fig. 1과 같다. 중앙의 평활부는 CNC선반으로 가공하였으며, 크랙 전진 거동을 관찰 조사하기 위해 이 부분을 emery paper #600

Table 1 Chemical composition of materials

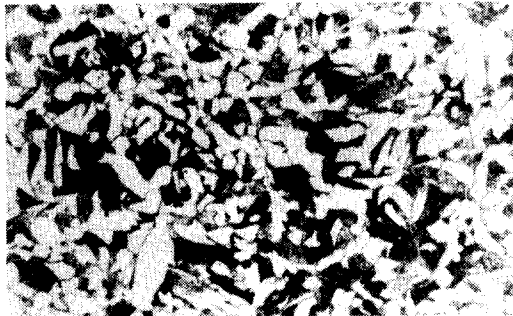
Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SF45A	0.19	0.25	0.81	0.020	0.009	0.17	0.04	0.06
SF50A	0.26	0.29	0.51	0.015	0.011	0.16	0.05	0.06
SF60A	0.37	0.31	0.82	0.015	0.008	0.08	0.04	0.05

Table 2 Mechanical properties of materials

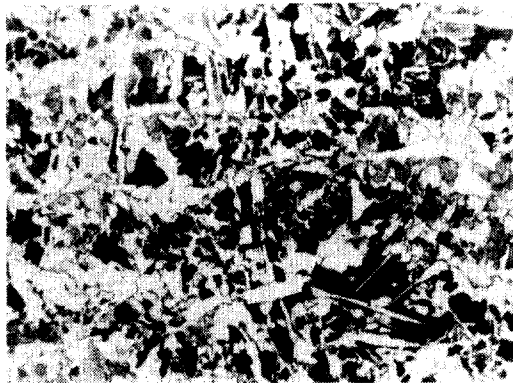
Material	Yield Streng. (MPa)	Tensile Streng. (MPa)	Elonga. (%)	Reduction of Area (%)	Hardness (H <sub>B</sub> )
SF45A	272.7	475.8	27.2	56.8	134
SF50A	338.4	531.7	26.4	55.6	147
SF60A	379.6	622.0	22.2	52.0	174



SF 45A

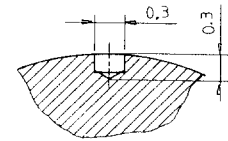


SF 50A



SF 60A

Photo. 1 Micro - structure of transverse section for experiment materials(×200)



Detail of A

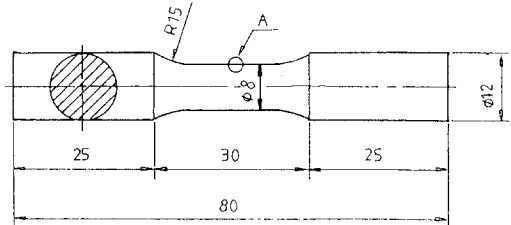


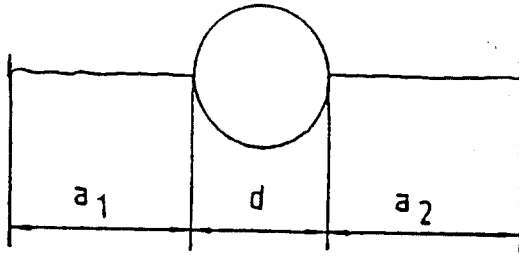
Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

~#2000까지 연마한 후 산화알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)로 래핑 가공한 다음 전해연마 하였다. 이를 다시 슬립밴드 및 미시크랙 생성을 쉽게 관찰할 수 있도록 그의 중앙에 소형 고속드릴링머신으로 직경 300μm 깊이 300μm로 드릴링 하여 미소원공결함을 가공하여 실험에 사용하였다.

2. 2 실험방법

본 실험은 Ono's 회전굽힘피로시험기(Shimadzu, Model H-7, 10kgf-m)를 사용하였다.

표면크랙길이 측정은 replica법 및 특수 제작한 이동현미경에 OSM(접안이동측미계)를 부착하여 관찰 하였으며, 크랙길이는 피로파단수명비  $N/N_f = 0.01$  내지 0.02마다 시험기를 정지하고 측정하였다. 또한 피로크랙진전속도( $d(2a)/dN$ )는 7점 다항식 근사법(Seven point incremental method)<sup>13)</sup>를 사용하였다. 크랙길이는 Fig. 2와 같이 표면상의 전 크랙길이를 2a로 하였다. Fig. 3은 SF45A, SF50A 및 SF60A제에 대한 S-N선도이다. 피로한도는 반복횟수 10<sup>7</sup>까지 반복하중을 받



Crack length  $2a = a_1 + a_2 + d$

Fig. 2 Crack length measurement

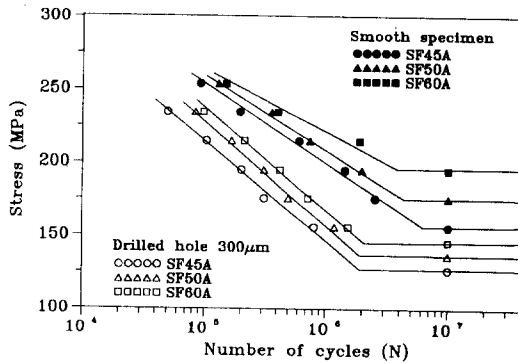


Fig. 3 S - N diagram

Table 3 Fatigue limit and applied stresses for experiments

Materials	Fatigue limit(MPa)		Applied stress level(MPa)		
	Smooth	Drilled hole	175.6	195.1	214.6
SF45A	Smooth	156.1			
	Drilled hole	126.9			
SF50A	Smooth	175.6			
	Drilled hole	136.6			
SF60A	Smooth	195.1			
	Drilled hole	146.4			

(\* Size of micro drilled hole : = 300µm, h = 300µm)

있을 때까지 파단하지 않는 경우를 피로한도로 적용하였다. 본 실험에서 사용한 실험응력은 Fig. 3의 S-N선도로부터 결정하였으며, 이 값은 Table 3과 같다. S-N선도에서 알 수 있는 바와 같이 SF45A, SF50A재 및 SF60A재의 미소원공 결합재에 대한 피로한도는 거의 비슷하다. 따라서, 실험에 적용한 실험응력은 모든 재료에 대해 공히 SF50A재의 피로한도를 기준하여 1.29, 1.43 및 1.57배로써 175.6MPa, 195.1MPa, 및 214.6MPa의 실험 수준응력을 선정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로크랙의 성장거동

Fig. 4, 5 및 6은 SF45A, SF50A 및 SF60A 시험편에 있어서 각각의 실험응력에 대한 크랙길이와

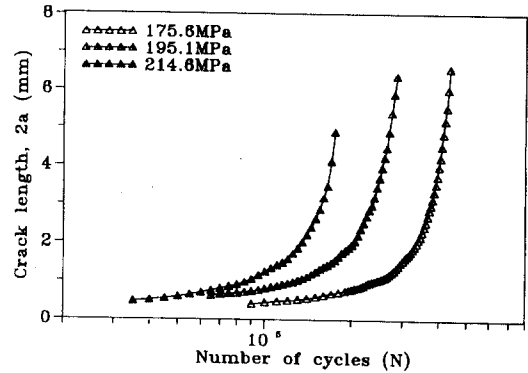


Fig. 4 Relation between crack length and number of cycles for SF45A

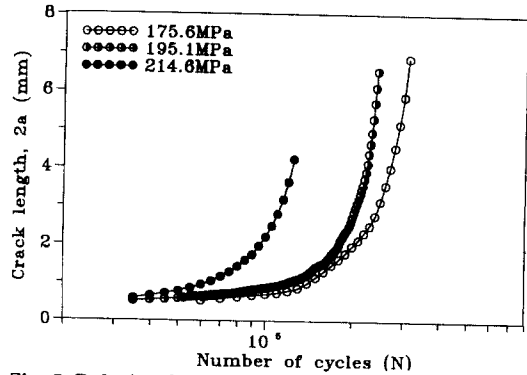


Fig. 5 Relation between crack length and number of cycles for SF50A

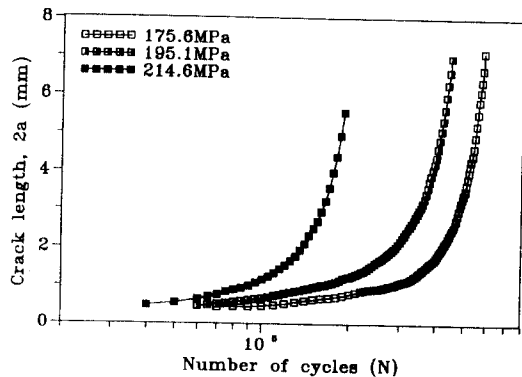
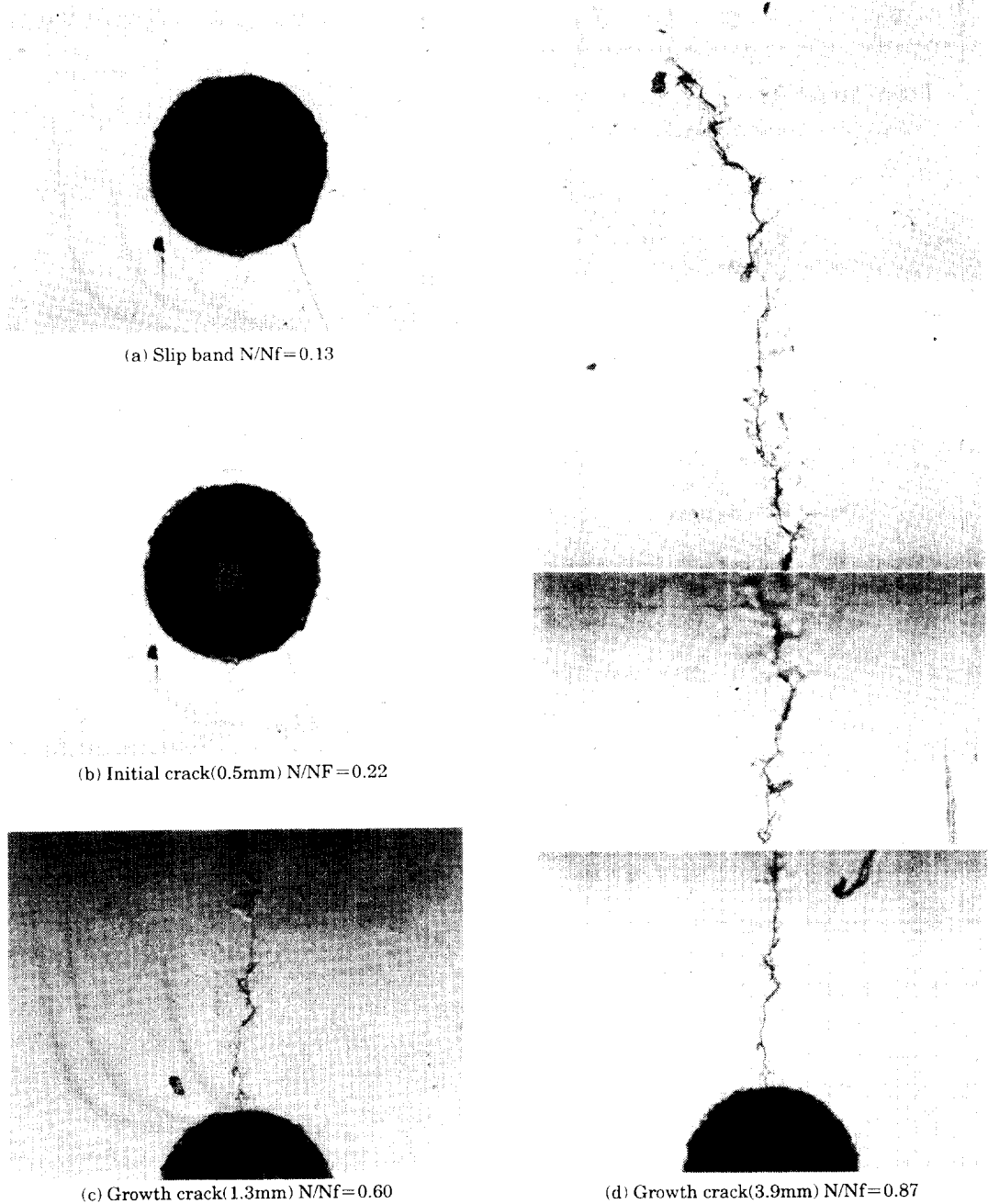


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycles for SF60A

피로수명의 관계를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SF60A재가 초기크랙의 발생시기가 가장 늦고 피로수명도 가장 길었다. 이

는 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 피로강도 차이와 일치한다. 한편 Photo. 1에서도 알 수 있는 바와 같이 한국공업규격 KS D 0209로 규정(1964. 4. 9 제

Longitudinal direction of specimen : →

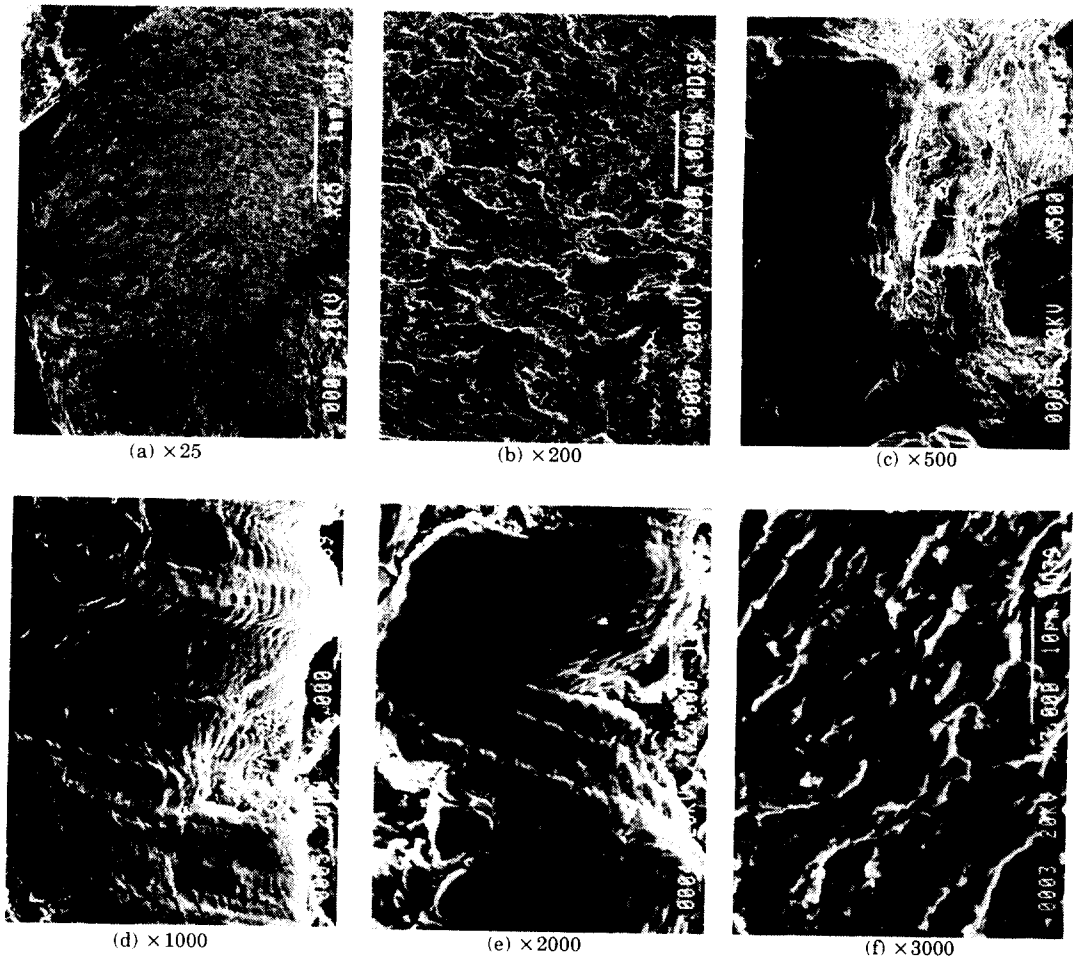


**Photo. 2 Behavior of slip band, initial crack and long crack in SF50A**

( $\sigma_a = 195.1 \text{ MPa}$ ,  $N_f = 230000 \text{ cycle}$ ,  $(2a) = 6.8 \text{ mm}$ )  $\times 100$

정)되어 있는 “강의 페라이트 결정입도 시험방법”의 비교법에 의해 측정된 결정입도는 SF45A, SF50A 및 SF60A재가 각각 7, 7.5 및 8로써 SF60A재로 갈수록 결정립이 미세하고, 결정립 모양은 불림 처리한 조직으로 입상의 표준조직을 갖고 있으며, 또한 페라이트에 대한 퍼얼라이트 양은 Table 1에서 보는 바와 같이 탄소함유량의 증가와 더불어 불림 열처리에 의해 SF45A, SF50A 및 SF60A재에 있어서 각각 26.78, 34.57 및 43.93%의 비율로 균일하게 분포하였다. 따라서 본 재료의 피로수명은 탄소강재에 있어서 탄소함유량, 퍼얼라이트량 및 결정입도 등과 관련이 있는 것으로 나타내었다<sup>14)</sup>. Photo. 2는 replica법에 의해 SF50A

재의 크랙전파 과정을 관찰한 사진의 일례로서 슬립 밴드, 초기크랙 및 피로크랙전파 등의 거동을 보여준다. 이 사진에서 보이는 바와 같이 슬립 밴드는 미소원공 주위의 축 직각방향에서 많은 수가 발생하는 것을 볼 수 있으며 이 때는 피로파단수명비  $N/N_f=0.13$ 이다. 피로크랙길이  $2a=0.50\text{mm}$ 의 초기미소크랙은 슬립 밴드 가운데에서 발생하였으며 이 때는  $N/N_f=0.20$ 이다. 그리고, 피로크랙전파 과정에서 피로크랙길이  $2a=1.30\text{mm}$ 일 때 이 때는  $N/N_f=0.60$ 이다. 따라서 슬립 밴드 발생으로부터 미소크랙길이  $2a=1.30\text{mm}$ 의 피로크랙전파 과정이 피로크랙전수명의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. Photo. 3은 주사형 전자현미경으



Direction of crack propagation : →  
**Photo. 3 Fractography of fatigue fracture surface in SF50A**

로 파단 면을 촬영한 것이다. Photo. 3 (a)~(b)에서는 미소원공으로부터 파면에 형성된 방사상파면흔<sup>15)</sup>을 볼 수 있고, 또한 미소원공 부근에서는 입상파면을, 그리고 중앙부에서는 기계적인 급속파면을 볼 수 있다. Photo. 3 (c)~(e)는 입상파면영역으로 벽개파면으로서 striation 및 tire track을 볼 수 있다<sup>16)</sup>. 그리고 Photo. 3 (f)는 기계적인 급속파면인 dimple 파단 면을 나타낸다. 이러한 파단 면은 저탄소강의 전형적인 파면을 나타내고 있다.

3.2 피로크랙길이와 피로파단수명비의 관계

Fig. 7, 8 및 9는 피로크랙길이와 피로파단수명비의 관계를 나타낸 것으로써, 피로파단수명비  $N/N_f$ 와 표면크랙길이  $\log 2a$  사이에 비례적인 관계가 있음을 알 수 있으며, 西谷等<sup>11)</sup>은 이들의 관계를 아래와 같이 나타냈다.

$$\log 2a = A + B(N/N_f) \quad (1)$$

西谷等<sup>11)</sup>은 지름과 깊이가 0.3mm인 미소원공을 갖는 일반 강재 및 황동재에서, 표면에 존재하는

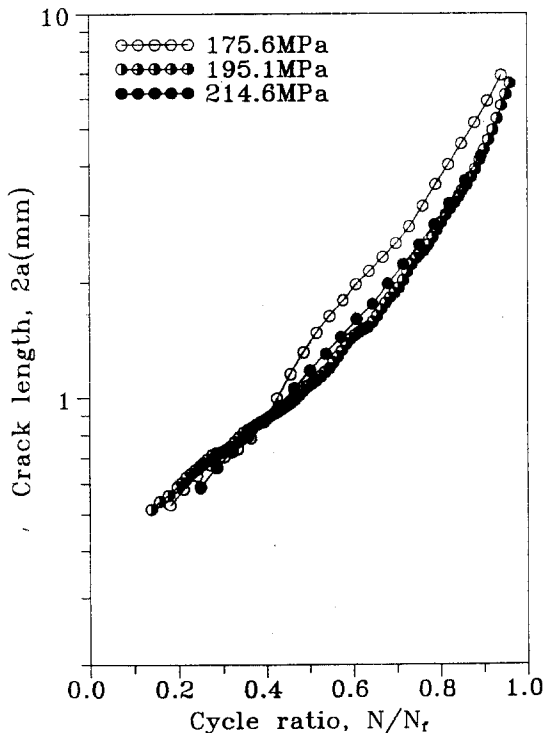


Fig. 7 Relation between crack length and cycle ratio for SF45A

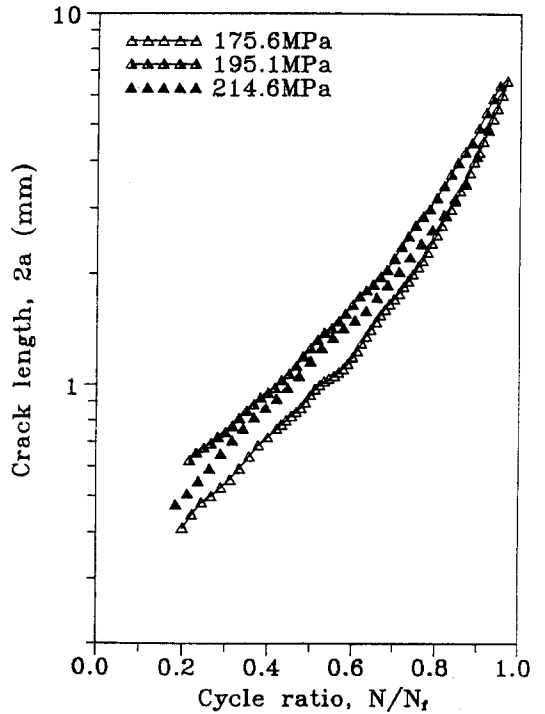


Fig. 8 Relation between crack length and cycle ratio for SF50A

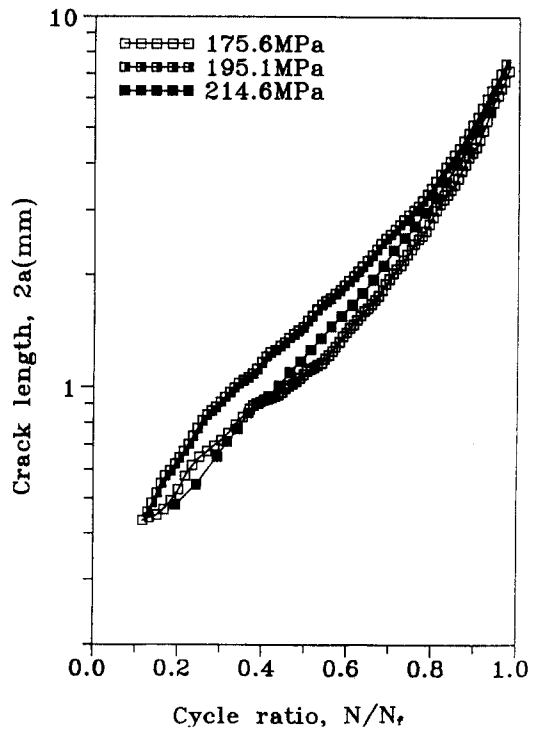


Fig. 9 Relation between crack length and cycle ratio for SF60A

미소원공이 피로크랙전파에 영향이 미치지 않는 크랙길이 0.5mm 이후의 반복수 범위에서 비례상수  $B \approx 1.0 - 1.3$ 의 값을 가짐을 보고하였다.

본 실험에서 얻어진 데이터를 사용하여 식(1)에 적용하여 보았다. 본 실험에서 얻어진 상수값들은 다음과 같다. SF45A재는  $A = -0.55$ ,  $B = 1.28$ , SF50A재는  $A = -0.64$ ,  $B = 1.35$ , SF60A재는  $A = -0.52$ ,  $B = 1.29$  정도의 값을 나타냈다. 여기서 식(1)을 미분하면 아래와 같다.

$$d(2a)/dN = B \cdot 2a/N_f \quad (2)$$

이것은 식(1)이 크랙전파속도  $d(2a)/dN$ 와 크랙길이  $2a$ 가 비례한다는 것을 의미한다.

### 3.3 피로크랙전파속도에 의한 피로크랙 전파수명의 관계

Fig. 10, 11 및 12는 피로크랙전파속도  $\log d(2a)/dN$ 와 피로크랙길이  $\log 2a$ 의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 보여주는 바와 같이 피로크랙전파속도는 SF60A, SF50A, SF45A재의 순으로 늦어지고, 각각의 재료에 있어서 낮은 실험응력인 175.6 및

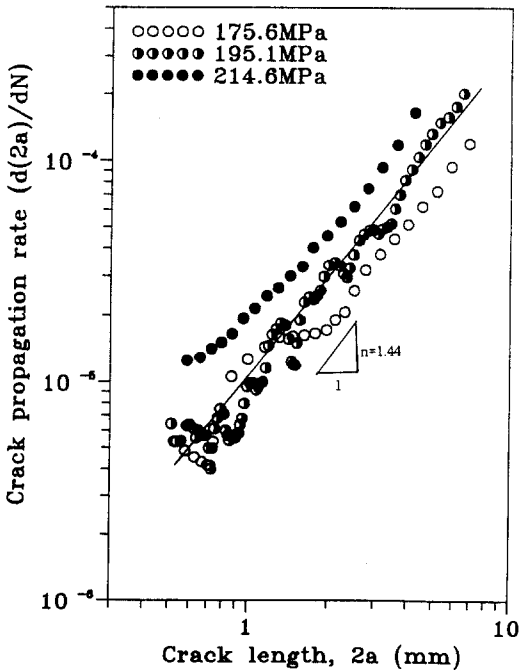


Fig. 10 Relation between crack propagation rate and crack length for SF45A

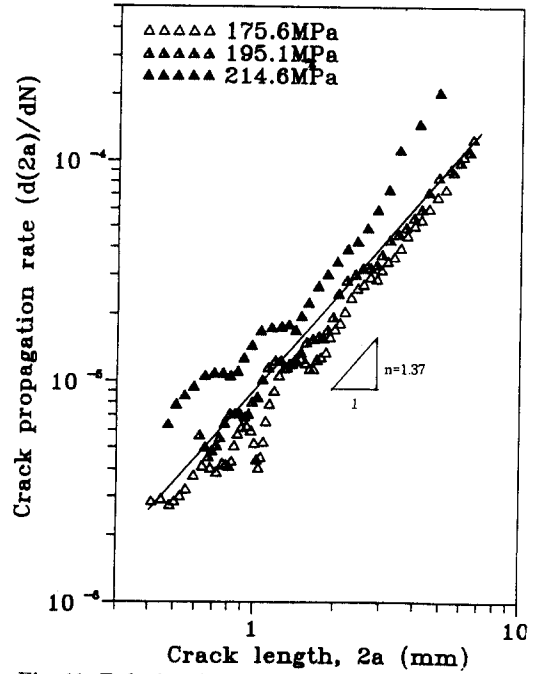


Fig. 11 Relation between crack propagation rate and crack length for SF50A

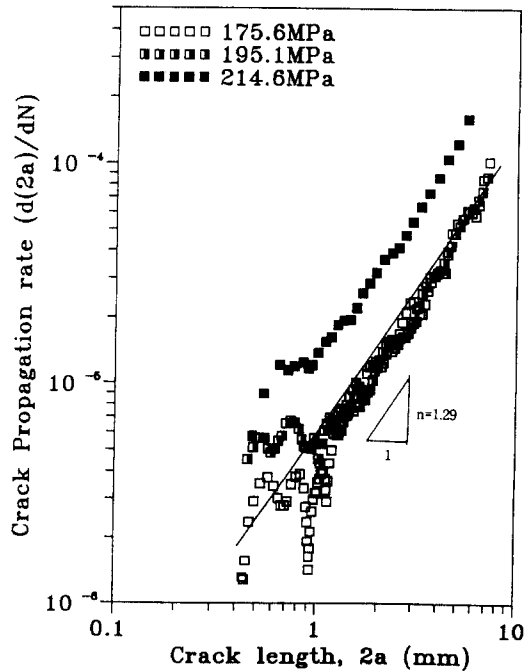


Fig. 12 Relation between crack propagation rate and crack length for SF60A



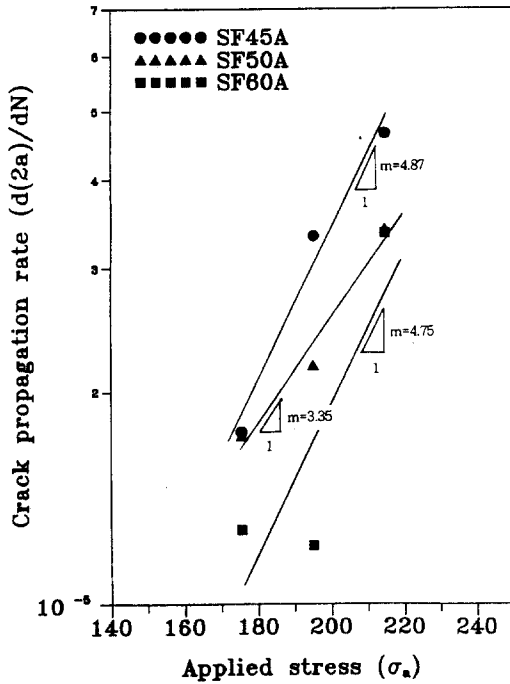


Fig. 13 Crack propagation rate versus applied stresses at crack length  $2a=2\text{mm}$  for experiment materials

195.1MPa에서는 1mm 이하에서 불안정성장의 구간을 나타내고 있다. 그러나 크랙길이 1mm 이상 또는 214.6MPa의 높은 실험응력에서는 안정된 성장의 모습을 보이고 있다. 특히 각각의 재료에서 실험응력이 낮을수록 불안정 폭이 커지는데 이 현상의 원인으로는 Photo. 2 (a) 및 (b)에서 보는 바와 같이 미소원공 주위에서 발생한 슬립 밴드 및 초기 미시크랙들이 폭 넓게 분포하여 이들이 합체, 지연 현상을 일으키는 과정에서 불안정 성장거동을 나타내는 것으로 생각된다. 그러나, 각 재료들은 실험응력에 상관 없이 피로크랙전파속도와 피로크랙길이의 관계가 거의 같은 기울기를 갖는다. Fig. 13은 피로크랙전파속도가 안정 구간이라고 생각되는 영역에서 피로크랙길이  $2a=2\text{mm}$ 일 때 각 재료의 피로크랙전파속도  $\log d(2a)/dN$ 와 실험응력  $\sigma_a$ 의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림은 피로크랙전파속도와 실험응력의 관계를 비례적인 관계로 나타낸 것이다. 피로크랙전파수명에 미치는 영향은 위의 식(2)에서 보여 주는 바와 같이 크랙길이 이 외에도 부하응력의 영향도 지대하다고

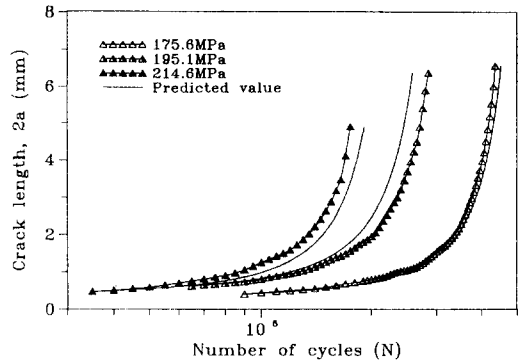


Fig. 14  $2a-N$  curves showing estimation of experiment data by equation of fatigue propagation life with mechanical parameters for SF50A

Table 4. Experimentally determined coefficients for the equation  $d(2a)/dN = C\sigma_a^m (2a)^n$

Experimental stress(MPa)	Coefficient		
	C	m	n
SF45A	$5.73 \times 10^{-12}$	4.87	1.44
SF50A	$3.67 \times 10^{-11}$	3.35	1.37
SF60A	$5.09 \times 10^{-12}$	4.75	1.29

생각된다. 따라서 피로크랙전파수명에 영향을 미치는 역학적인 변수들과의 관계를 나타내면 아래와 같은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$d(2a)/dN = C\sigma_a^m (2a)^n \quad (3)$$

여기서 C, m 및 n은 재료의 고유상수들이며, 위의 Fig. 10~13으로부터 구한 결과 Table 4와 같다. 西谷<sup>11)</sup> 등은 그의 연구보고에서 S50C인 탄소강 담금재는  $m \approx 3$ , 기타 탄소강 풀림재 및 7.3황동 풀림재 등은  $m \approx 7 \sim 8$ 을, 그리고 그들이 실험한 재료들에 대해  $n \approx 1$ 의 값을 갖는다고 하였는데, 본 연구의 실험재료들은 S50C인 탄소강 담금재에 가까운 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

위의 식(3)은 본 연구의 재료들에 대해 피로크랙전파속도를 정량적으로 나타낼 수 있으며, 이를 적분함으로써 피로크랙전파수명식을 얻을 수 있다. 이 피로크랙전파수명식은 초기 및 최종 피로크랙 길이와 피로사이클수(피로수명)를 적분구간으로 경계조건을 대입함으로써 피로수명을 검증하거나

또는 예측할 수 있다. 이에 대한 각 SF45A, SF50A 및 SF60A재의 피로크랙전파수명식은 Table 4의 상수를 아래의 식(4)에 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$N_f = \frac{(2a)_f^{1-n} - (2a)_i^{1-n}}{(1-n) C \sigma_a^m} + N_i \quad (4)$$

Fig. 14는 위의 식(4)에 의해 SF50A재에 대해 본 실험에 얻어진 자료들을 적용하여 피로크랙전파거동을  $2a-N$ 선도로 검증한 결과의 일례이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 피로크랙전파수명은 실험치와 실험식의 예상치 결과가 거의 근사함을 알 수 있다. 그러므로 본 연구의 재료는 이러한 피로크랙의 전파특성인 표면피로크랙의 발생, 성장 및 파단 등에 대한 검증 및 예측의 가능성을 보여주며, 정량적인 분석 검토에 의하여 피로크랙전파 거동 특성 및 피로수명 예측 등의 자료로 활용 가능하다고 생각된다.

#### 4. 결 론

선박의 추진축재로 사용되고 있는 3종류의 탄소강단조재(SF45A, SF50A, SF60A)에 대해 회전굽힘피로시험을 수행하여, 피로크랙전파거동, 피로크랙전파속도 및 피로크랙전파수명 등을 검토하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 피로강도가 증가할 수록 피로크랙 발생시기는 늦고 피로수명은 길었으며, 슬립 밴드 발생으로부터 미소크랙길이( $2a=1.3\text{mm}$ )까지의 피로크랙 성장은 피로크랙전파수명( $N/N_f \cong 0.60$ )의 대부분을 차지하였다.

2. 본재료의 경우 피로크랙길이  $2a$ 와 피로파단수명비  $N/N_f$ 의 관계는 각 응력수준과 거의 무관하게 나타남으로써 피로크랙전파속도는  $d(2a)/dN = B 2a/N_f$ 의 식으로 나타낼 수 있다.

3.  $d(2a)/dN = C \sigma_a^m (2a)^n$ 의 관계에서 본재료의 경우 얻어진  $m$ 과  $n$ 은 각각 3~5, 1~1.5의 범위에 있었으며 실험결과와 잘 일치하였다.

#### 후 기

본 논문은 1994년도 조선대학교 교내연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) 鹽原禮次郎, "船舶の信頼性と海難事故", 日本船舶機關學會論文集, 第18卷, 第9號, pp. 669 - 706, 1983 - 9.
- 2) 吉井 弘, "過去10年の發達とその展望 -軸系-", 日本船舶機關學會論文集, 第21卷, 第11號, pp. 59 - 65, 1986.
- 3) 木村隆義, 岩元 勝, "船舶機關部の安全と保全 - 船舶機關の損傷について", 日本船舶機關學會論文集, 第18卷, 第9號, pp. 747 - 751, 1983 - 9.
- 4) 宋森弘外 3人, "低炭素鋼のマルテンサイト組織の疲れ舉動におよぼす舊オステナイト結晶粒度の影響", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第324號, pp. 2291 - 2298, 1973.
- 5) J. J. Bush., "Microstructural and Residual Stress Changes in Hardened Stress due to Rolling Contact", Trans. ASME, Vol. 54, pp. 390 - 398, 1961.
- 6) 宋森弘, 吳煥燮, "表面缺陷에서 發生하는 疲勞크랙 舉動 -低炭素鋼材를 中心으로 -" 大韓機械 學會論文集, 第9卷, 第2號, pp. 1088 - 1094, 1985 - 5.
- 7) 村上敬宜, 福田四郎, 遠藤達雄, "疲勞強度に及ぼす微小缺陷の影響", 日本機械學會論文集, 第44卷, 第388號, pp. 4003 - 4013, 1978.
- 8) 村上敬宜外 2人, "切削き材の疲勞強度に及ぼす人工微小欠の影響" 日本機械學會論文集(A編), 第49卷, 第444號, pp. 901 - 910, 1983.
- 9) G. R. Irwin, "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate", Trans., ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, p. 361, 1957.
- 10) Kitagawa, H., Suh., C. M., "Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels", Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 9, No. 6, pp. 409 - 424, 1987.
- 11) 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き試験片の回轉曲げ試験によるき裂傳ば特性の評価", 日本機械學會論文集, 第42卷, 第354號, pp. 328 - 334, 1976.

- 12) Frost, N. E., "Effects of Mean Stress on the Rate of Growth of Fatigue Cracks in Sheet Materials", *Journal of Mechanical Eng. Science*, Vol. 4, No.1, pp. 22 - 35, 1962.
- 13) "Standard test method for measurement of Fatigue Crack Growth Rates" *Annual Books of ASTM Standards*, Vol.0301, E647 - 8a, pp. 646 - 666, 1988.
- 14) Richard W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", 2 ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 477 - 485, 1983.
- 15) H. O. Fuchs, R. I. Stephens, "Metal Fatigue in Engineering" John Wiley & Sons, New York, pp. 14 - 36
- 16) R. Koterazawa, etc., "Fractographic Study of Fatigue Crack Propagation" *Journal of Engineering Materials and Technology* pp.202 - 212, 1973.