

<論 文>

微小圓孔材의 疲勞크랙 舉動과 페라이트 結晶粒度

宋 森 弘\* · 吳 煥 燮\*\*

(1985年 3月 7日 接受)

Behavior of Fatigue Crack around Micro-Hole and Ferrite Grain Size

Sam Hong Song and Hwan Sub Oh

**Key Words:** Magnitude of Ferrite Grain Size and Fatigue Limit(結晶粒 大小와 疲勞限度), Shear Type Crack(剪斷型 크랙), Stress Level and Fatigue Crack(應力레벨과 疲勞크랙), Magnitude of Ferrite Grain Size and Crack Propagation(結晶粒 大小와 크랙傳播)

Abstract

This study has been made to investigate into the relation between fatigue crack behavior and ferrite grain size. As experimental observation of the low-carbon steel specimen with the drilled micro-hole under rotating bending stress was made to accomplish this investigation.

Obtained results are as follows;

- (1) The fatigue limit of micro-hole depends upon the magnitude of ferrite grain size, as indicated by the Hall-Petch formula.
- (2) The fatigue crack occurring around the micro-hole is of shear type, and the frequency of fatigue crack initiation depends upon the ferrite grain size.
- (3) The magnitude of ferrite grain size affects the behavior of fatigue crack propagation up to the crack size of 0.3mm. The effect, however, is negligible for the crack size larger than 0.3mm.

1. 서 론

재료의 강도향상책의 일환으로는 특수 합금원소를 첨가하는 방법과 열처리에 의한 방법으로 나눌수 있고 전자의 경우는 그 제조과정이 복잡한 반면, 후자의 경우는 전자에 비하여 요구되는 강도를 손쉽게 얻을 수 있다. 그러나 열처리에 의하여 재료의 강도를 어느 정도 향상시킬 경우, 재료의 강도는 금속조직학적인 인자에 의존하고, 이때, 열처리온도, 유지시간 등에 따라 결정입도는 변화한다. 이러한 문제와 관련된 강

도 및 피로거동에 대한 연구로서는 다음과 같은 연구들을 대표로 들수 있다.

즉, 결정입의 크기가 작아질수록 항복강도, 인장강도등이 향상된다는 Hall-Petch<sup>(1,2)</sup>의 연구를 비롯하여 H. Fujita<sup>(3)</sup>는 다결정 Al 계의 평활시험편을 준비하여 결정입의 크기를 변화시키고, 단순인장하에서 기계적인 성질과 결정입도와의 관계를 조사한 결과, Hall-Petch 식은 결정입 크기가 어떤 제한된 범위에서만 적용된다고 하였고, P.G. Forrest<sup>(4)</sup>, B.Z. Weiss<sup>(5)</sup> 등은 70-30 황동 및 실리콘합금등의 평활시험편을 사용하여 일정진폭의 교변인장압축하에서 피로에 대한 결정입의 영향을 조사하였는데 Al, Cu 등의 경우는 결정입의 영향이 없고, 황동, 구리합금, 스테인레스강 Ti 저탄소강등의 경우는 결정입 크기가 감소함에 따라 피로한

\* 正會員, 高麗大學校 工科大学 機械工學科

\*\* 正會員, 慶熙大學校 工科大学 機械工學科

도는 증가 한다고 하였다. 萩原<sup>(6)</sup>, 福原<sup>(7)</sup>, 鹿毛<sup>(8)</sup> 등은 원주노치를 갖는 저탄소강시험편을 준비하고 캔티베릭식 회전굽힘에서 결정입도와 피로거동과의 관계를 조사하였는데, 평활재나 둔한 노치재인 경우의 최대응력은 결정입의 크기에 의존하나, 예리한 노치인 경우의 최대응력은 결정입의 크기에 무관하게 일정하다고 하였다. 또 송<sup>(9,10)</sup> 등은 저탄소강재에 고주파열처리를 실시한 평활시험편을 준비하고, 회전굽힘피로하에서 구오스테나이트 결정입도와 피로거동과의 관계를 조사한 결과, 결정입도와 피로한도 사이에는 최적 강도를 나타내는 최적 결정입도가 존재하고, 구오스테나이트, 결정입계가 피로크랙의 발생원이 된다고 보고하였다.

이상의 결과들에서 재료의 강도는 결정입도와 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 지금까지의 연구들은 주로, 평활시험편이나 원주노치시험편을 대상으로 하고 있는게 특징이라고 할 수 있다.

그러나 평활시험편에 表面缺陷이 존재할 경우 缺陷 주위에 발생전파하는 피로크랙과 결정입의 大小와는 어떠한 관계를 가지는가에 대한 연구결과는 거의 찾아 볼 수 없다.

또 재료의 최소강도가 응력집중원이 되는 表面缺陷에 의존하는 것이 분명하므로<sup>(11)</sup>, 결함의 크기와 결정입도와의 관계를 규명하는 것은 이 계통의 연구를 발전시켜나가는 데 매우 중요한 과제라고 생각된다.

본 연구에서는 缺陷에서 발생전파하는 피로크랙거동과 결정입 大小와의 관계를 검토하기 위하여, 페라이트 결정입을 열처리에 의하여 변화시킨 재료에, 우선  $\phi 0.3\text{mm}$ 의 미소원공을 가공한 시험편을 준비하고, 피로

한도거동, 피로크랙발생거동, 피로크랙전파거동, 응력레벨의 고저에 따른 피로크랙의 발생, 전파거동등과 페라이트 결정입의 大小와의 관계등을 금속현미경 관찰을 토대로 상세히 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

실험용 재료는 國產構造用 低炭素鋼( $c=0.17\%$ )으로서 화학성분은 Table 1 과 같다. Table 2는 페라이트 結晶粒度(ferrite grain size)를 변화시킨 후의 시험편의 기계적 성질을 표현한 것이다.

시험편은 열처리를 통하여 결정입도를 변화시킨 후 Fig. 1과 같은 모양으로 절삭한 후 샌드페이퍼의 메시 순서(150#, 320#, 450#, 600#, 800#, 1000#)대로 研磨하고 그 후에 다시 電解研磨하였다.

또한 그 후에 마이크로 드릴을 사용하여 고속드릴링 머시인에서 미소원공노치를 시험편 중앙부에 1,200rpm의 고속에서 가공하였다. 이 때 微小圓孔의 치수는  $d=h=0.3\text{mm}$ 로 하였다. 그 후, 미소원공의 圓周先端條

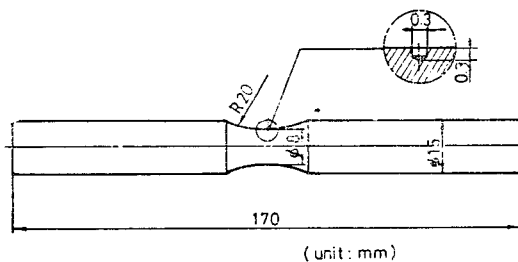


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

Table 1 Chemical composition of specimen

Mild steel	Composition (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
	0.17	0.12	0.53	0.01	0.01	0.18	0.23	0.13	0.14

Table 2 Mechanical properties of specimen

Series	Tensile strength (kg·f/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Heat treatment condition	Remark
A	45.18	37.6	10.7	900°C 1hr furnace cooling	Smooth specimen
A <sub>0.3</sub>					Notch specimen
B	31.78	52.4	19.8	1,150°C 6hrs furnace cooling	Smooth specimen
B <sub>0.3</sub>					Notch specimen

件을 가능한 일정하게 유지하기 위하여, 시험편을 가볍게 전해연마하여 鏡面으로 완성하였다. 이 때 전해연마량은 1 $\mu$ m 정도 이하이므로 가공에 의한 경화층은 존재할 것으로 예상되며 이와같은 영향을 포함하고 있다.

시험재료의 均質化 및 페라이트 結晶粒의 大小를 얻기 위한 시험편의 처리과정은 Table 3 과 같다.

편리상 900°C, 1 시간, 풀림(annealing)하여 페라이트 결정입이 작게 얻어진 재료를 A材, 1,150°C, 6 시간, 풀림하여 페라이트 결정입이 크게 얻어진 재료를 B材라 하고, 각각의 미소원공 노치재를 A<sub>0.3</sub> B<sub>0.3</sub>이라 한다. 결국 4 종류의 시험편을 준비하였다.

그리고 페라이트 결정입도 측정에는 페라이트 결정입도 측정법<sup>(12)</sup> 중에서 切斷法을 택하였다. A, B材의 페라이트 결정입의 형태는 Fig. 2와 같고 페라이트 결정

입도 측정결과는 Table 4와 같다.

실험에 사용한 시험기는 오노(小野)型 回轉굽힘 疲勞試驗機(Ono's type Rotary Bending Fatigue Testing Machine)이고 최대용량은 10kgf-m, 회전속도는 3,000 rpm이다. 피로크랙의 측정 및 관찰은 금속현미경의

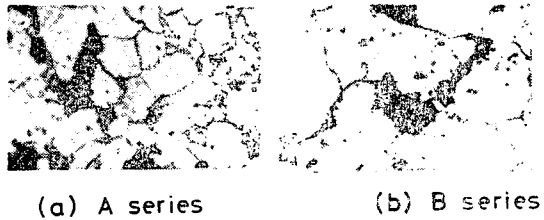


Fig. 2 Micro structure obtained by etching

Table 3 A procedure of heat treatment and specimen preparation

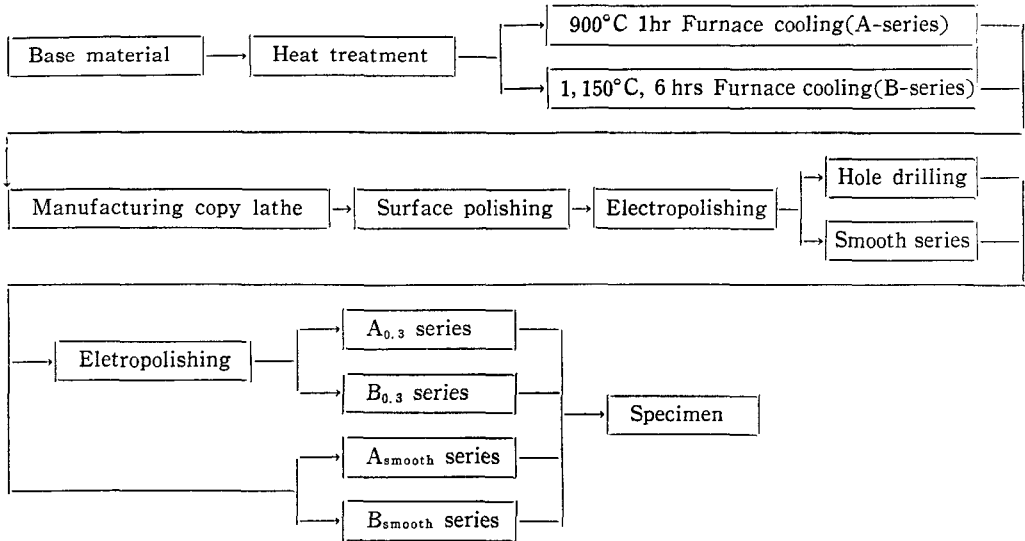


Table 4 Grain size of experimental materials

Symbol of specimen	Diameter of average grain (mm)	Ferrite grain size ASTM No.	$1/\sqrt{\delta}$ (mm <sup>-1/2</sup> )	The condition of heat treatment	Micro-Vickers hardness(100gr) H <sub>v</sub> (mean)
Series A A <sub>0.3</sub>	0.041	6.7	4.94	900°C 1hr Furnace cooling	151
Series B B <sub>0.3</sub>	0.095	4.2	3.24	1,150°C 6hrs Furnace cooling	123

400 배의 배율에서 관찰하였고, 사진의 촬영은 100 배에서 하였다. 또 크랙의 길이는 시험편 축직각방향에 투영한 길이이다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1. 피로한도 거동에 대한 페라이트 결정입도의 영향

우선 平滑試驗片과 微小圓孔노치를 갖는 시험편의 크기에 따른 S-N 곡선의 특징을 기술하기로 한다.

Fig. 3, 4는 回轉굽힘 피로시험결과를 도시한 S-N 곡선이다. 900°C, 1시간 풀림(annealing)한 평활시험편인 A材의 疲勞限度는  $\sigma_w=22\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  이고,  $\phi$  0.3mm의 微小圓孔노치를 갖는 시험편인 A<sub>0.3</sub>材의 피로 한도는  $\sigma_{w0.3}=16\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  를 얻었다(Fig. 3).

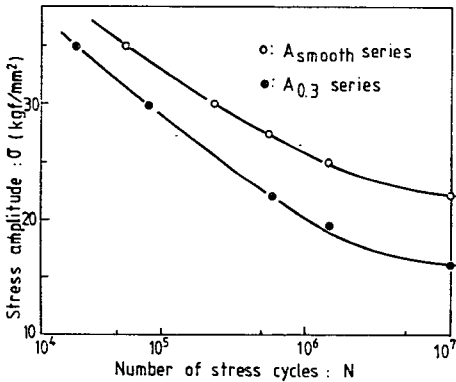


Fig. 3 S-N curve of A series

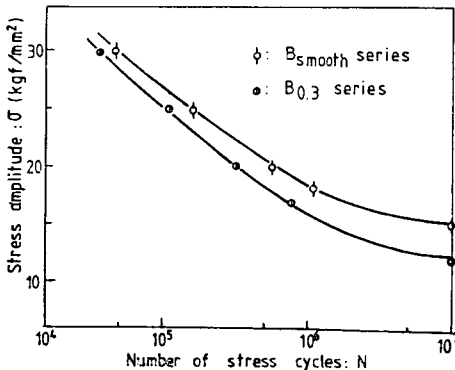


Fig. 4 S-N curve of B series

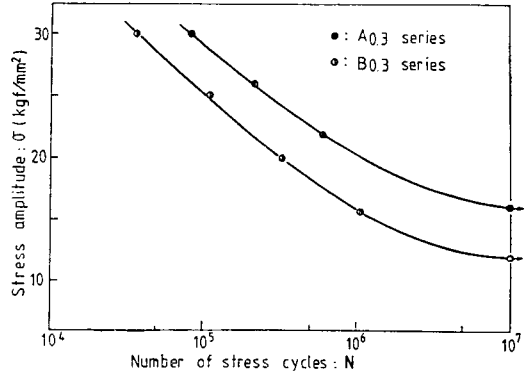


Fig. 5 S-N curve of 0.3 series

또한, 1, 150°C, 6시간 풀림(annealing)하여 페라이트결정입이 큰 평활시험편인 B材의 피로한도는  $\sigma_w=15\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  이고,  $\phi$ 0.3mm의 微小圓孔노치를 갖는 B<sub>0.3</sub>材의 피로한도는  $\sigma_{w0.3}=12\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$  를 얻었다(Fig. 4 참조).

Fig. 5는 페라이트 결정입도는 다르나  $\phi$ 0.3mm 미소 원공을 갖는 미소원공 노치시험편의 피로한도를 圖示한 것이다. 위에 提示한 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5를 관찰하면 다음과 같은 특징을 발견할 수 있다. 즉 Fig. 3, Fig. 4인 경우 평활시험편과 미소원공노치시험편 사이에는 피로한도의 차이가 나타나고 이 결과는 종래의 연구 결과와 유사하다.<sup>(13)</sup> 그러나 결정입의 크기의 관점에서 볼 때, 시간강도의 영역에서 결정입의 크기가 작은 A材가 B材에 비하여 피로수명의 차이는 크다. 또 피로수명에 대한 미소구멍의 영향은 응력레벨이 낮아질수록 크고, 피로한도 부근에서 가장 크게 나타나고 있다.

Fig. 5에서는 同一 미소원공노치를 갖는 시험편일지라도 페라이트의 결정입도가 큰 것이 작은 것보다 피로한도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 결과에서 결정입의 크기에 대한 피로한도의 거동은 동일한 노치에 대하여 결정입이 작을수록 응력레벨이 낮을수록(피로한도의 응력레벨) 민감함을 알 수 있다.

결합의 크기와 결정입도에 대한 문제는 현재 검토중에 있으나, 이와같은 표면미소구멍이 피로한도에 기여하는 의미는 치수효과<sup>(11)(14)</sup>와 노치효과<sup>(15)</sup>라고 생각되고 이들이 결정입의 크기에 의존한다고 생각된다.

피로강도에 대한 미소구멍의 영향으로서 입도 의존성을 생각하고 우선 페라이트 결정입이 피로거동에 미

치는 영향에 대하여 집중적으로 조사하였다.

### 3.2. 결정입의 大小와 피로한도 거동

Fig. 6은 페라이트 결정입도의 大小와 각 재료의 피로한도와와의 관계를 도시한 것이다(○, ⊙는 본 실험에 사용한 것과 동일한 실험제이고 압연한 그대로의 것을 회전굽힘 피로 시험한 결과이며, ◐는 평활제, ⊖는 0.3mm 미소구멍재를 각각 표시한다)

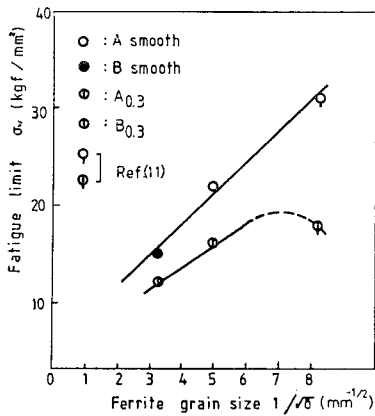


Fig. 6 Relation of fatigue limit and ferrite grain size

우선 Fig. 6에서 알 수 있듯이 시험편의 종류에 관계없이 평활시험편과 미소원공노치 시험편의 피로한도에 대한 페라이트 결정입의 영향은 페라이트 결정입의 크기가 클 수록 작고, 페라이트 결정입이 작을수록 크게 나타남을 알 수 있다.

또 결정입도의 크기에 따른 피로한도의 거동은 평활재의 경우 직선적거동을 나타내지만  $\phi 0.3$ mm의 미소원공노치재의 경우 본 실험의 범위에서는 직선적 거동을 하고 있다.

한편, Fig. 7은 페라이트 결정입의 大小에 따른 피로한도의 저하정도를 나타내는 것으로서  $\sigma_{w0.3}/\sigma_w$ 과  $1/\sqrt{\delta}$ 과의 관계를 표시한 것이다(●: Fig. 6의 냉간 압연한 그대로의 것에 대한 피로한도 비이다).

여기서,  $\sigma_{w0.3}$ ,  $\sigma_w$ ,  $\delta$ 는 각각  $\phi 0.3$ mm 미소원공노치재의 피로한도, 평활재의 피로한도, 평균 페라이트 결정입도이다. 페라이트 결정입의 크기( $1/\sqrt{\delta}$ )와 피로한도비( $\sigma_{w0.3}/\sigma_w$ )는 직선적 거동을 하고 반비례 관계가 있음을 알 수 있다.

즉 페라이트 결정입이 큰 B材는,  $\sigma_{w0.3}/\sigma_w=0.80$ 이고 페라이트 결정입이 작은 A材인 경우는  $\sigma_{w0.3}/\sigma_w=$

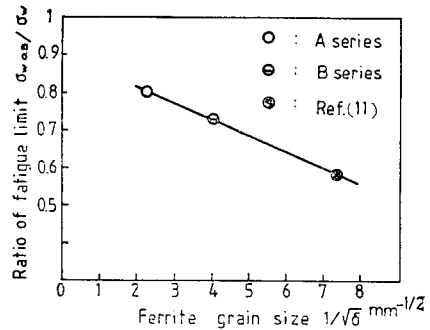


Fig. 7 Declining level of fatigue limit due to the variation of rain size

0.73이므로 페라이트 결정입이 큰 경우가 작은 경우에 비하여 미소구멍으로 인한 피로한도의 低下程度가 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과는 미소원공시험편이라도 피로한도는 페라이트 결정입의 大小와 밀접한 관계를 가지고 있음을 예측할 수 있다.

이상과 같은 결과는 평활재의 경우 일반적으로 피로한도  $\sigma_w$ 는 항복응력  $\sigma_y$ 가 결정입의 크기  $\delta$ 의 제곱근의 역수에 직선적으로 비례한다는 Hall-Petch<sup>(14,22)</sup>의 연구결과와 거의 동일한 거동<sup>(6,7,8)</sup>을 나타내고 있다. 그리고 피로한도와 결정입도와의 관계도 표면결합을 갖는  $\phi 0.3$ mm의 미소노치재의 Fig. 6에서와 같이 그 구배는 다르더라도 동일한 거동을 하고 있으므로 Hall-Petch 형의 의존성을 나타낸다고 생각된다.

### 3.3. 피로크랙 발생에 대한 페라이트 결정입 大小의 영향

미소원공주위에서 슬립을 포함한 微視크랙이 발생한 형태의 일례를 Fig. 8에 표시하였다.

Fig. 8의 (a)(b)는 모두 동일한 응력  $\sigma=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 이고 반복수  $N\approx 2\times 10^4$ 에서 조사한 것이다. 여기

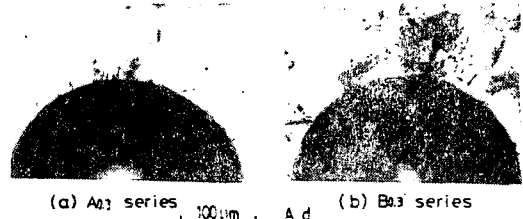


Fig. 8 Behavior of slip and crack at micro hole tip:  
(a)  $\sigma=18\text{kgf}/\text{mm}^2$   $N=2.03\times 10^4$   
(b)  $\sigma=18\text{kgf}/\text{mm}^2$   $N=2.12\times 10^4$   
A.D.: Axial direction

서 미소구멍 선단의 슬립 및 미시크랙의 발생영역은 응력의 크기가 동 하면 결정입의 크기에 무관하게 A<sub>0.3</sub>材나 B<sub>0.3</sub>材 모두 거의 같게 나타난다. 또 (b)가 (a)에 비하여 발생영역이 크게 보이는 것은 반복수는 같지만 실제로 반복수(N)와 피로파괴수명(N<sub>f</sub>)의 비는

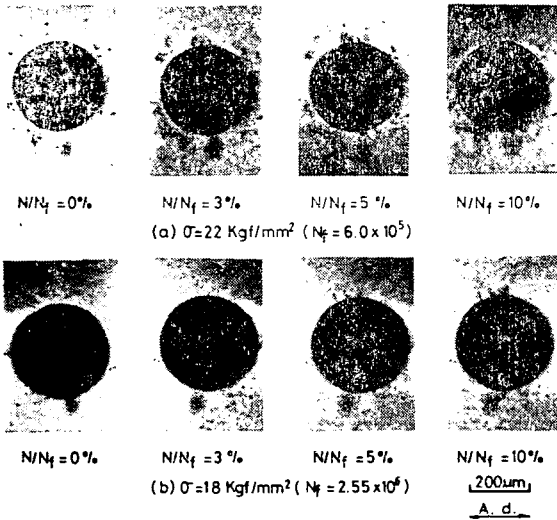


Fig. 9 Behavior of slip and crack initiation of A<sub>0.3</sub> series (N: Number of cycle, N<sub>f</sub>: Life of fatigue fracture, A. d.: Axial direction)

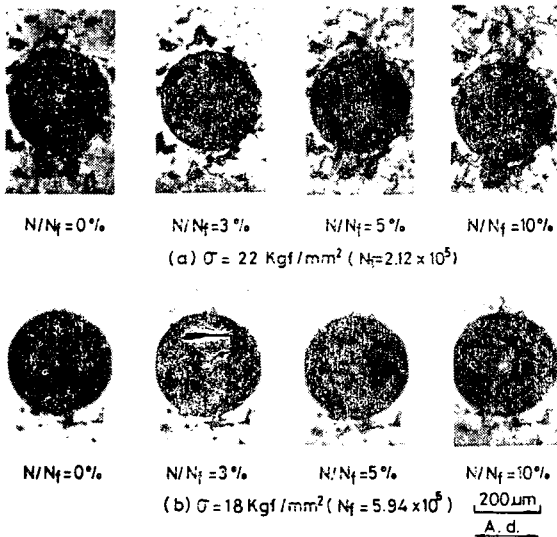


Fig. 10 Behavior of slip and crack initiation of B<sub>0.3</sub> series (N: Number of cycle, N<sub>f</sub>: Life of fatigue fracture, A. d.: Axial direction)

(a)의 A<sub>0.3</sub>材의 경우 N/N<sub>f</sub>=1.5%, (b)의 B<sub>0.3</sub>材의 경우 N/N<sub>f</sub>=3.5% 이고 피로수명에 대한 반복수의 영향이라 생각된다(Fig. 9, Fig. 10).

또 미소구멍 선단에 발생하는 크랙의 양상은 A<sub>0.3</sub>材의 경우 B<sub>0.3</sub>材에 비하여 슬립 및 미시크랙의 발생간격이 크고 발생빈도가 작은 데 비하여 B<sub>0.3</sub>材는 슬립 및 미시크랙의 발생빈도가 크고 간격이 좁기 때문에 Fig. 8(b)와 같이 겹치게 나타나 있다.

미시피로크랙은 임의의 각을 가지고 최대응력이 작용하는 노치중앙선단을 포함한 局部領域에서 관찰되는 슬립밴드 중에서 발생하며 그 영역은 미소구멍의 기하학적 모양에 의하여 결정되는 응력분포와 응력구배에 의한 제한된 범위에서 발생된다고 생각된다.

이러한 결과는 평활시험편의 개재물 주위에 발생하는 크랙거동과 일치하고<sup>(10)</sup> 따라서 미소원공 주위에 발생하는 슬립과 미시크랙은 최대전단응력에 의존한다는 것이 지배적임을 예측할 수 있다<sup>(16)</sup>.

이상과 같은 관찰결과를 요약하면 크랙발생 거동은 페라이트 결정입도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다

### 3. 4. 응력레벨에 따른 피로크랙 발생과 페라이트 결정입도

Fig. 9 와 Fig. 10 은 미소원공 노치선단에서의 미소 피로크랙 발생거동과 페라이트 결정입도의 大小 및 응력레벨의 高低와의 관계를 검토하기 위하여 유한수명 범위에서  $\sigma=22\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 의 고응력 레벨과  $\sigma=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 의 저응력 레벨에서 슬립 및 미소크랙 발생거동을 연속적으로 관찰한 일례이다.

여기서 공통적인 특징으로서는 시험편 종류 및 응력레벨의 高低에 관계없이 슬립 및 미시피로크랙은 각 응력레벨에서 각 시험편이 갖는 유한피로수명의 초기 (N/N<sub>f</sub>=3%)에 이미 발생하고<sup>(15)</sup> 있다는 사실이다.

특히 고응력레벨인 경우는 저응력레벨인 경우에 비해 슬립라인 폭이 넓고 層狀의 슬립밴드를 형성하고 발생빈도가 많아서 짧고 검은 선의 모양으로, 관찰되고 저응력 레벨인 경우에는 고응력레벨인 경우에 비하여 슬립라인의 발생빈도가 훨씬 적게 나타나고 발생영역도 작게되는 것을 관찰할 수 있다.

한편 페라이트 결정입 大小의 관점에서 보면, 페라이트 결정입이 크고 응력레벨이 높을 수록 슬립라인은 치밀하며 슬립밴드의 발생수가 많아진다. 반면, 페라이트 결정입이 작고 응력레벨이 낮을수록 슬립라인은 치밀하지 않고, 슬립밴드의 발생수도 적어짐을 관찰할 수 있다.

또한 페라이트 결정입이 클수록 1개의 페라이트 결정입내에 발생된 슬립라인이나 미시크랙의 발생빈도는 증가함을 알 수 있다.

이상의 관찰결과로부터 페라이트 결정입의 크기는 응력레벨에 따른 피로크랙 발생거동에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 3.5. 페라이트 결정입의 크기와 피로크랙 전과거동

본 절에서는 피로크랙 전과거동을 관찰하기 위하여 미소원공의 크랙은  $\phi 0.3\text{mm}$  로 동일하고 페라이트 결정입의 크기가 다른  $A_{0.3}$ ,  $B_{0.3}$  두 종류의 시험편을 가지고, 응력 레벨( $\sigma=22\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ )과 저응력 레벨( $\sigma=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ )로 나누어 일정한 회전수, 즉 피로파단 수명 사이클의 3%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%..... 마다 크랙을 금속현미경( $\times 400$ )으로 관찰하면서 크랙 길이를 측정하였다. 이때 크랙길이는 미소구멍의 지름을 포함하는 전 크랙길이를  $2l$ 이라 하였다.

Fig. 11은  $A_{0.3}$  시험편과  $B_{0.3}$  시험편의  $l-N$  곡선을 표시한 것이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 크랙길이 약  $l < 0.3\text{mm}$  정도의 초기 크랙전파 단계에서의 피로크랙 전과거동은 차이를 나타내고 있으나, 약  $l > 0.3\text{mm}$  정도의 한계를 벗어난 후에는 피로크랙 전과거동은 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

또한, 페라이트 결정입이 클수록 초기전파단계에서의 피로크랙 전과속도는 빠르고, 페라이트 결정입이 작을수록 피로크랙전파 속도는 느리다는 것도 알 수 있다.

Fig. 12는  $\sigma=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 에서 미소원공을 중심으로 피로크랙이 발생전파하는 양상을 표시하는 일례이다. 여기서 전파하는 주크랙주위에 미시크랙거동은 동일

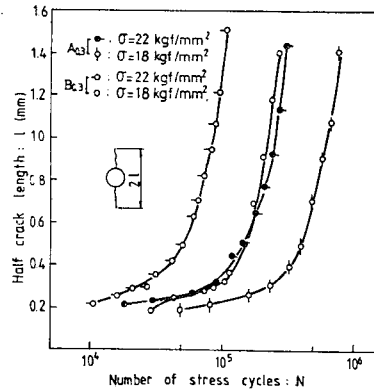


Fig. 11  $l-N$  curve of  $A_{0.3}$  and  $B_{0.3}$  series

응력레벨인 경우  $A_{0.3}$ 재는  $B_{0.3}$ 材에 비하여 경도치가 높고, 결정입의 크기가 작은 데도 불구하고(Table 4 참조) 표면에 나타나는 미시크랙의 발생영역은 넓으며 미시크랙의 발생빈도는 높고, 주크랙의 전파하는 경로를 따라 슬립과 미시크랙을 넓은 범위에서 동반하고 있는 것을 알 수 있다.

반면에  $B_{0.3}$ 材는 표면에 나타나는 미시크랙의 발생 폭은 좁으며 주크랙 주위에 관찰되는 슬립과 미시크랙의 발생 빈도가 적음을 관찰할 수 있다.

따라서 이상과 같은 결정입도의 대소에 따라 주크랙 주변의 미시크랙 발생거동은 크랙전파 거동에 밀접한 관계가 있고 또 페라이트 결정입의 크기는 피로크랙전파 거동에도 영향을 주는 인자의 하나라고 생각된다.

다만,  $l < 0.3\text{mm}$ 를 기준으로 해서 그전후 구간에서의 피로크랙전파 거동이 다른 이유에 대해서는 현재 실험적으로 구체적인 검토를 계속하고 있는 바 차후에 그 결과를 보고할 예정이다.

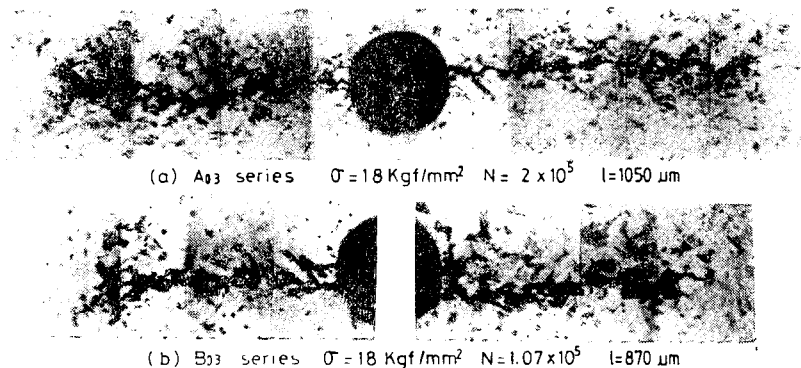


Fig. 12 Illustration of fatigue crack propagation of  $A_{0.3}$  and  $B_{0.3}$  series

3.6. 피로크랙 전파속도에 대한 결정입 크기의 영향

본 절에서는 페라이트 결정입의 크기에 따르는 피로크랙 전파거동 해석의 일환으로 피로크랙 전파속도의 변화에 따른 피로크랙의 전파거동을 조사하였다.

Fig. 13, 14는 각각 A<sub>0.3</sub>材, B<sub>0.3</sub>材의 피로크랙 전파속도  $dl/dN$ 과 크랙길이  $l$ 과의 관계를 나타낸 것이다 Fig. 13과 Fig. 14를 비교해 보면 시험편의 종류 및 응력레벨의 高低에 관계없이 피로크랙전파 단계에서 피로크랙의 전파속도는 일단 감소하였다 다시 증가하는 양상을 나타낸다. 이와같은 전파속도의 변화는 응력레벨의 차이에 따라서 그 정도가 다르고, 또한 동

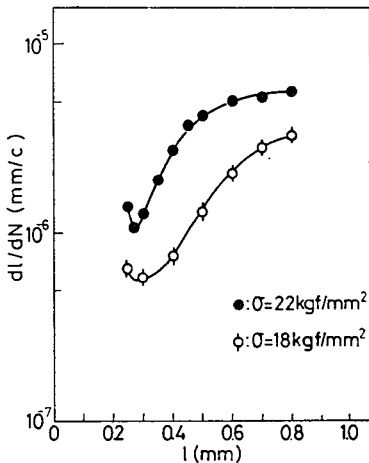


Fig. 13  $dl/dN-l$  curve of A<sub>0.3</sub> series

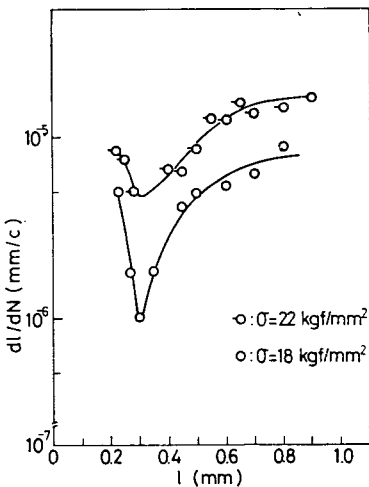


Fig. 14  $dl/dN-l$  curve of B<sub>0.3</sub> series

일 응력레벨이라 하더라도 전파속도의 변화는 페라이트 결정입이 큰 B<sub>0.3</sub>材인 경우가 결정입이 작은 A<sub>0.3</sub>材인 경우보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또 A材의 경우 평균 경도가  $H_v \approx 151$  인데 비하여 최대경도와 최소경도치의 차이는 약 40이고 B재의 경우는 평균 경도가  $H_v \approx 123$  인데 비하여 최대경도치와 최소경도치의 차이는 50이고 최대경도치가 A<sub>0.3</sub>材의 평균경도치와 근사하다(Fig. 15, 16).

이와같은 탄소강재료가 갖는 경도치의 불균일과 크랙 발생거동은 경도치가 비교적 낮은 곳에 발생하고<sup>(18)</sup> 결정입이 큰 B<sub>0.3</sub>재의 경우 미소원공과 그것에서 발생 전파하는 크랙에 의한 응력장의 특성에 B<sub>0.3</sub>재는 민감하고 A<sub>0.3</sub>재는 비교적 둔감하다고 생각된다. 경도치의 크기의 관점에서 페라이트 결정입의 크기는 피로크랙 전파속도를 변화시킬 수 있는 하나의 인자가 될 수 있다고 생각된다.

또한 Fig. 13, 14에서 공통적으로 관찰할 수 있는 것은 이러한 크랙전파속도의 변화현상은  $l < 0.3\text{mm}$  정도의 범위 내에서 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 초기 피로크랙전파 단계에서 크랙전파 속도변화가 현

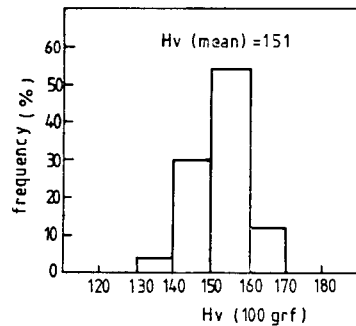


Fig. 15 Distribution of micro-Vickers hardness level of A series

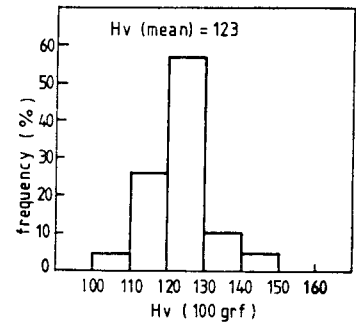


Fig. 16 Distribution of micro-Vickers hardness level of B series



저한 차이를 나타내는 이유에 대해서는 현재 검토중이나 미소원공노치 선단의 미시크랙과 금속조직학적인 인자, 치수효과(미소구멍의 大小) 등 복합적인 영향이 작용하기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는  $d=0.3\text{mm}$ 의 微小圓孔 주위에 발생, 전파하는 疲勞크랙 舉動과 結晶粒 大小와의 관계를 실험적으로 고찰하였는데 얻어진 結果를 요약하면 다음과 같다.

(1)  $d=0.3\text{mm}$ 인 微小圓孔材의 疲勞限度는 페라이트 結晶粒이 작을수록 向上된다. 즉, Hall-Petch 式을 만족한다.

(2) 微小圓孔 주위에 발생하는 疲勞크랙은 剪斷型크랙이고, 疲勞크랙 발생 빈도는 페라이트 結晶粒이 커질수록 높다.

(3) 應力레벨 및 疲勞壽命비가 일정할 경우, 1個의 페라이트 結晶粒內에 발생하는 微視크랙은, 結晶粒이 큰 쪽이 슬립선의 밀도가 크고 굵게 형성된다.

(4) 微視疲勞크랙은 페라이트 結晶粒의 大小에 관계없이 疲勞壽命의 5% 以內에 발생한다.

(5) 크랙길이  $l < 0.3\text{mm}$  구간에서는 페라이트 結晶粒 大小는 疲勞크랙 傳播에 영향을 주고,  $l > 0.3\text{mm}$  구간에서의 페라이트 결정입의 大小는 피로크랙 傳播에 거의 영향을 주지 않는다.

(6) 疲勞크랙의 傳播速度변화현상은  $l < 0.3\text{mm}$  구간에서는 현저한 차이를 나타내는데, 페라이트 結晶粒이 클수록 작은 경우에 비하여 그 變化는 크다.

#### 參 考 文 獻

(1) E.O. Hall, "The Deformation and Ageing of Mild Steel" Proc. Phys. Soc., London, Vol. B64, pp.747~753, 1951  
 (2) N.J. Petch, "The Cleavage Strength of Polycrystals," Journal of the Iron and Steel Institute, Vol. 174, No. 3, pp.25~28, 1953  
 (3) H. Fujita, "The Effect of Grain Size and Deformation Sub-Structure on Mechanical Properties of Polycrystalline Aluminum," ACTA. Metallurgica, Vol. 21, pp.355~365, 1973  
 (4) P.G. Forrest, "The Influence of Grain Size on

the Fatigue Behavior of 70/30 Brass," Journal of the Institute of Metals, Vol. 93, pp.438~444, 1965  
 (5) B.Z. Weiss, "Influence of Previous Austenite Grain Size on Initiation and Propagation of Fatigue Cracks in Silico-Manganese Steel," Journal of the Iron and Steel Institute, December, pp.1246~1261, 1967  
 (6) 萩原外 2人, "結晶粒度のすべり發生. き裂發生. 進展におよぼす影響について", 日本機械學會論文集, 第36卷, 第281號, pp.9~16, 1971  
 (7) 福原, "切欠材の疲れにおよぼす結晶粒大小の影響", 日本機械學會論文集, 第38卷, 第305號, pp.1~6, 1973  
 (8) 鹿毛, "低炭素鋼の疲勞強度におよぼす結晶粒大小の影響", 日本機械學會講演論文集, No. 810-2, pp.162~164, 1981  
 (9) 宋森弘外 3人, "低炭素鋼マルテンサイト組織の舉動におよぼす 舊オー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, 1974  
 (10) 宋森弘, "熱處理鋼材의 疲勞舉動에 관한 연구", 大韓機械學會誌, 第15卷 第2號, pp.114~121, 1975  
 (11) 宋森弘, 吳煥燮, "素面缺陷材의 疲勞크랙 舉動", 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第2號, pp.150~157, 1985  
 (12) 韓國工業規格, "KSD0709, Ferrite 結晶粒度測定法 1975  
 (13) 中村, 田中, 機械の疲れ壽命算出法, 養賢堂, pp.101~115, 1972  
 (14) 横堀, 市川, 金屬の疲勞破壊, 丸善 Co. pp.39~50, 1975  
 (15) 横堀, 金屬材料の強度と破壊, 丸善 Co., pp.340~350, 1978  
 (16) 宋森弘, 國尾武, "高硬度鋼のミクロ領域における疲れき裂生成過程", 日本機械學會論文集, 第40卷 第334號, pp.1503~1510, 1974  
 (17) 宋森弘, 成煥泰, "熱處理鋼材의 疲勞舉動에 관한 연구", 大韓機械學會誌, 第15卷, 第3號, pp.275~283, 1975  
 (18) 平修二外 2人, "焼入焼もどし炭素鋼材の疲勞破壊に関する研究", 日本機械學會論文集, 第38卷, 第312號, pp.3059~3066, 1972