

複合組織鋼의 微視組織變化가 疲勞破壞傳播에 미치는 影響

吳世旭* · 金雄執**

(1991년 10월 12일 접수)

The Effects of the Microstructural Change of Dual Phase Steel on Fatigue Fracture Propagation

Sae-Wook Oh and Woong-Jib Kim

Key Words : Plastic constraint Effect(塑性拘束效果), Fatigue Limit(疲勞限度), Initial Fatigue Crack(初期疲勞龜裂), Fatigue Crack Propagation(疲勞龜裂傳播), Crack Propagation Rate(龜裂傳播速度), Stress Intensity Factor(應力擴大係數)

Abstract

Not only difference of fatigue crack growth and propagation behavior resulted from the grain size, the hardness ratio and volume fraction in M. E. F. dual phase steel composed of martensite in hard phase and ferrite in soft phase, but also the effects of the plastic constraint were investigated by fracture mechanics and microstructural method.

The main results obtained are as follows :

- 1) The fatigue endurance of M. E. F. steel increases with decreasing the grain size, increasing the ratio of hardness and volume fraction.
- 2) The initiation of slip and crack occurs faster as the stress level goes higher. These phenomena result from the plastic constraint effect of the second phase.
- 3) The crack propagation rate in the constant stress level is faster as the grain size gets larger, the ratio of hardness lower and volume fraction smaller.

1. 緒 論

일반적으로 反復應力에 의한 鋼의 疲勞破壞過程은 初期龜裂의 發生, 成長 및 最終破斷에 이르는 3段階로 區分된다.

이러한 疲勞破壞過程에 있어서 微視龜裂은 불규칙적으로 성장하며 結晶粒界가 龜裂성장의 障害 또는 促進의 요인이 되므로 巨視的인 龜裂의 성장은 結晶粒 크기인 微視龜裂의 생성과 성장에 의해 지배된다고 본다.

한편, 공업적으로 중요한 材料중에는 軟質相과

* 정희원, 동아대학교 공과대학

** 정희원, 동아대학교 대학원 기계공학과

硬質상으로 구성된 2相混合組織鋼인 非均質材가 많으며 이들 非均質材의 疲勞破壞과정은 均質材와는 달리 金屬組織의^{1,2)} 및 破壞力學的³⁾인 방법에 따라서 破壞 형태가 다르다고 보고 되고 있다.

특히, 硬質相인 第2相인 軟質相인 母相을 둘러싼 連結形態인 M. E. F(Martensite encapsulated ferrite)複合組織鋼은 微視組織因子에 따라서 微視, 巨視의인 龜裂傳播學動에 많은 차이가 있으며, 母相 페라이트에 대한 第2相마르텐사이트의 塑性拘束性^{4,5)}의 要因인 第2相의 硬度, 體積率 및 母相의 粒徑변화에 따라서 母相에서의 微視龜裂의 生成에 대한 塑性拘束力의 크기가 다르므로 微視龜裂에 의한 巨視의인 龜裂傳播과정을 평가하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 저탄소강(SM20C)을 소재로 일련의 열처리 과정을 통하여 第2相體積率과 硬度 및 母相의 結晶粒徑을 변화시킨 連結材형태의 複合組織鋼을 이용하여 應力레벨의 변화에 따른 微視龜裂의 발생과 巨視의인 龜裂의 傳播과정에 대하여 檢討하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

試驗片의 素材는 構造用鋼(SM20C)이며, 지름 20mm의 熱間壓延材로서 化學成分은 Tabel 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen material(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.21	0.23	0.41	0.02	0.006

素材의 熱處理過程은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 組織의 粒徑만을 변화시킬 目的으로 A₃變態點 이상의 溫度에서 一定 時間 維持시킨 後 爐冷하였다. 다음에 硬質相인 第2相 마르텐사이트가 軟質相인 母相 페라이트를 둘러싼 組織을 얻기 위하여 A₁과 A₃變態點 사이의 溫度에서 30分씩 維持시킨 後 公냉 및 담금질(quenching)을 하였다.

또한, 第2相의 硬度를 변화시키기 위하여 200°C, 400°C 그리고 600°C에서 각각 2시간씩 유지시킨 후 公냉하였다.

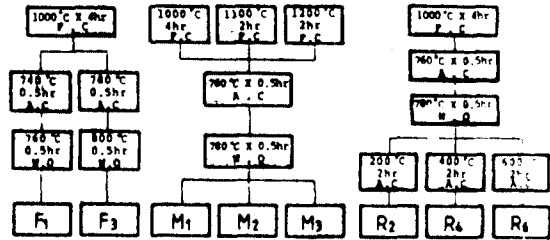


Fig. 1 Process of the heat treatment

母材를 A, 複合組織鋼에서 第2相의 體積率 變化를 F, 硬度 變化를 R 그리고 粒徑 變化를 M으로 표시하였다.

Fig. 2는 熱處理過程에서 얻어진 金屬組織이다.

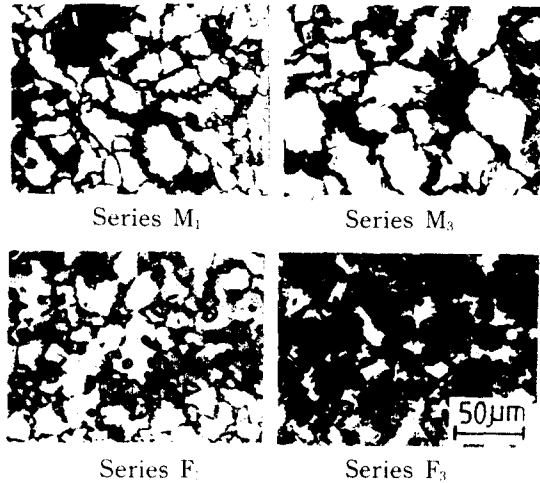


Fig. 2 Microstructure of specimen

Table 2는 金屬學的 性質로서 微視組織의 크기인 第2相의 體積率과 連結度 및 母相의 粒徑은 線分析法를 利用하여 구하였고, 各 成分의 硬度는 마이크로 비커스 硬度計(25gf, 50點)로써 測定한 平均값이다. Table 3은 機械的 性質을 나타낸 것으로 體積率(F)이 낮을수록, 溫度가 높을수록 Table 2와 Table 3에서 硬度比(R)와 機械的 性質은 低下하였다. 그러나 粒徑(M)만을 변화시킨 경우, 硬度 차이는 同一하나 機械的 性質에는 차이가 있음을 알수있다. 이러한 性質의 鋼을 Fig. 3과 같은 形狀의 試驗片으로써, 疲勞龜裂發生領域을 局限하고, 龜裂의 觀察을 하기 쉽도록 지름 0.5

mm, 깊이 0.5mm의 圓孔노치로 加工하였다.

Table 2 Metallurgical properties of M.E.F.

Series	Ferrite grain size (μm)	Martensite volume fraction (%)	Connectivity (%)	Hardness(HV)		
				Ferrite	Martensite	Ratio
F ₁	31	39	91	187	337	1.8
M ₁	31	52	97	192	543	2.8
F ₃	30	65	96	234	724	3.1
M ₂	46	53	96	192	543	2.8
M ₃	63	52	95	192	541	2.8
R ₂	31	52	97	231	689	3.0
R ₄	31	52	97	195	370	1.9
R ₆	31	52	97	160	220	1.4

Table 3 Mechanical properties of M.E.F.

Series	A	F ₁	M ₁	F ₃	M ₂	M ₃	R ₂	R ₄	R ₆
Tensile strength(MPa)	465.8	602.7	724.0	824.2	752.5	724.0	829.6	676.6	528.5
Elongation(%)	29.6	26.2	15.8	7.6	9.8	8.0	16.3	25.9	35.7

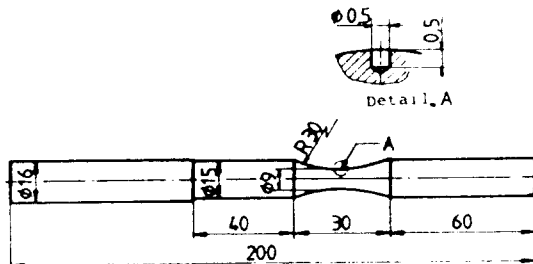


Fig. 3 Shape and dimension of testing specimen

본 실험에 使用한 疲勞試驗機는 自作한 片持式 回轉굽힘 疲勞試驗機(Cantilever type rotated bending fatigue testing machine)를 使用하였다.

龜裂 길이는 軸에 대하여 直角方向으로 龜裂發生曲面을 따라 光學顯微鏡으로 測定하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 疲勞限度曲線에 미치는 微視組織의 영향

Fig. 4와 Table 4는 각 材料에 대한 回轉굽힘疲

勞試驗결과와 疲勞限度를 나타낸 것이다.

第2相의 體積率(F)을 變化시켰을 경우, 體積率 變化가 疲勞限度에 미치는 Tomota⁶⁾의 실험결과 結晶粒徑이 일정할 때 體積率이 32%이하와 67% 이상에서의 疲勞強度는 거의 동일한 결과를 나타내며 32%와 67% 사이에서는 體積率이 증가할수록 疲勞限度가 증가 한다고 하였다.

본 실험에서도 마찬가지로 體積率(F)이 증가할수록 疲勞限度가 증가하며 F₁材에 비해 F₃材의 疲勞限度는 1.43배 증가하였다.

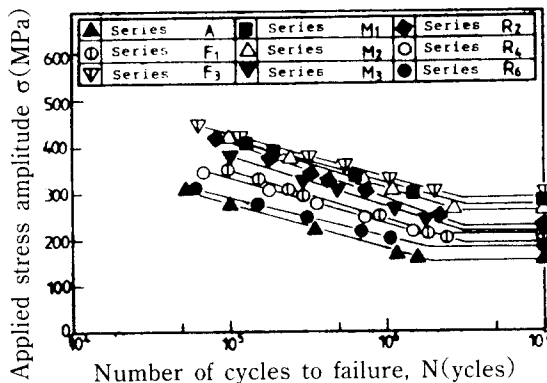


Fig. 4 S-N curves of specimen

Table 4 Fatigue limit of specimens

Series	A	F ₁	M ₁	F ₃	M ₂	M ₃	R ₂	R ₄	R ₆
σ Limit (MPa)	152	201	274	289	259	216	225	210	182

이러한, 體積率 變化에 대한 疲勞強度의 차이는 硬質相 粒子的 硬度, 形相 및 분포상태 등의 因子에 의존하는 것으로 보아진다.

母相粒徑(M)을 變化시켰을 경우 硬度比가 동일 하더라도 粒徑(M)이 微細할수록 疲勞限度가 증가 하며 M₃재에 비해 M₁재는 1.27배 증가하였다.

第2相의 硬度(R)를 變化시켰을 경우, R₆재는 均質材인 母材의 硬度 175와 거의 동일한 硬度比이나 疲勞限度가 1.20배 증가하였으며, R₆재에 비해 R₂재는 1.24배 증가하였다.

Nishitani⁷⁾등은 S-N曲線에서의 分岐點은 結晶粒徑이 微細할수록 수명이 긴 領域으로 이동한다고 보고하고 있는데 본 실험의 경우 結晶粒徑이

微細할수록 수명이 긴 領域에 위치하며, 硬度比가 큰 경우에도 동일한 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 結晶粒徑 및 硬度比 변화에 따른 停留時期 차이 때문인 것으로 알려져 있다.

결과적으로 第2相의 體積率과 硬度가 클수록 그리고 母相의 粒徑이 적을수록 疲勞限度는 증가하였다.

이러한 強度 차이는 靜的引張시험에서와 마찬가지로 母相에서의 劈開龜裂의 형성 난이에 의한 塑性拘束의 결과로서 疲勞龜裂의 진행거동과 연관된다고 생각된다.

3.2 各 應力레벨에서의 初期슬립, 初期龜裂의 相互關係

彈性限度가 다른 2가지 構成相에 外力을 가하면 彈性限度가 낮은 相의 粒子内에서 우선적으로 슬립이 발생하며, 반복회수의 증가와 함께 슬립의 수가 증가하고 명확히 나타나며 龜裂로 성장하여 다른 龜裂과 合體된다.

Fig. 5는 粒徑變化 (M_1)材의 疲勞限度를 基準으로 各 應力레벨에서의 初期슬립 - 初期크랙 - 破斷

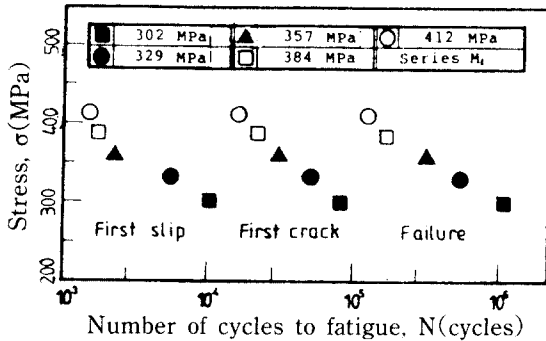


Fig. 5 Relation between various stages of progressive fatigue damage in series M_1

壽命들의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 6은 이들의 슬립을 나타낸 것으로 케라이트相의 結晶粒界内에서만 발생, 정지하였다.

Fig. 7은 M_1 재의 龜裂傳播舉動을 나타낸 것으로 應力이 증가할수록 슬립의 수와 폭이 증가하였다.

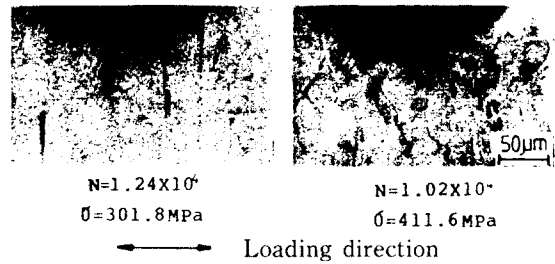


Fig. 6 Initiation of fatigue crack of series M_1

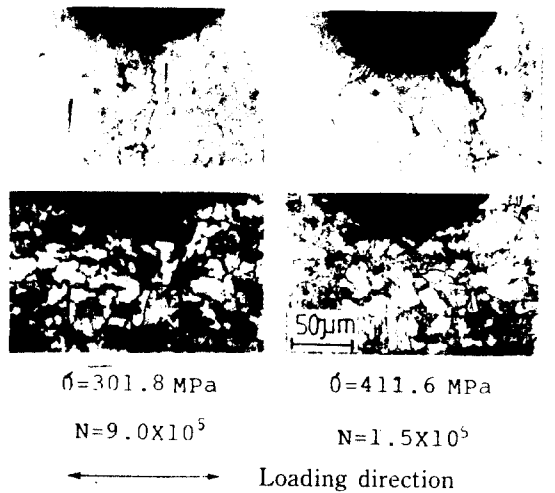


Fig. 7 Micro photograph of crack propagation of series M_1

이러한, 현상은 應力레벨이 증가할수록 슬립면의 轉位가 集積하여 破斷應力이 더욱 증가하기 때문에 龜裂이 早期에 발생하여 傳播함에 따라 母相 케라이트에 미치는 第2相마르텐사이트의 塑性拘束力이 弱화되어 破斷壽命이 減少된 것으로 생각된다.

3.3 各 應力레벨에서의 反復回數와 疲勞龜裂 傳播길이와의 關係

各 材料에 있어서 疲勞限度의 1.1배를 低應力, 1.5배를 高應力 그리고, M_1 材의 疲勞限度의 1.1배 應力에서 각각의 破斷壽命에 대한 龜裂發生壽命의 비(N_i/N_0)를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Ratio of crack initiation and fracture number of cycles (N_i/N_f)

Series	A	M ₁	M ₃	R ₂	R ₆	F ₁	F ₃
$\sigma = 303MPa$	0.123	0.126	0.042	0.108	0.082	0.031	0.090
Low stress	0.174	0.126	0.069	0.116	0.094	0.108	0.134
High stress	0.129	0.040	0.058	0.062	0.087	0.083	0.031

Fig. 8은 각 재료에 대해 동일한 응력인 $\sigma = 302$ MPa에서 실험한 결과로서 微視組織의 변화에 관계없이 全破斷壽命의 3~13%에서 初期龜裂이 發生하였다. 이때, 初期龜裂은 노치의 直徑을 포함하지 않은 主龜裂의 길이를 0.05mm로 하였다.

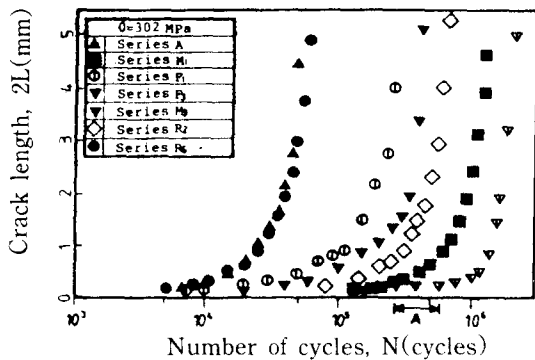


Fig. 8 Crack length vs. number of cycles

Fig. 9는 각 재료에 대해 疲勞限度의 1.1배와 1.5배의 응력레벨에 대한 것으로 高應力의 경우 N_i/N_f 가 Table 5와 같이 4~9%이며, 低應力의 경우 7~13%에서 初期龜裂이 發生하였고 初期단계에서 一時的인 停留現象이 일어나며, 특히, Fig. 8의

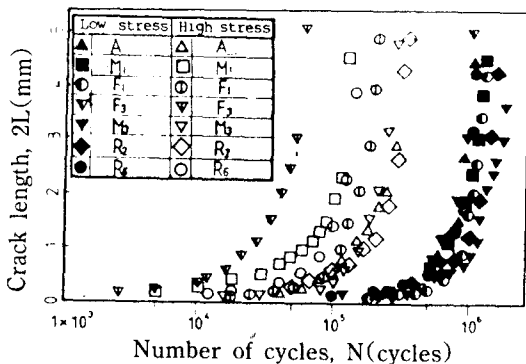


Fig. 9 Crack length vs. number of cycles

F₃材는 A部에서 全壽命의 12.5%에 차지한 停留現象이 관찰되었다. 또한, 龜裂길이 0.5mm 이하의 初期단계에서는 거의 完만한 水平이며 그 이후의 龜裂길이에서는 急速히 傳播됨을 알 수 있다. 이 상에서 結晶粒徑이 크고 體積率과 硬度比가 작을 수록 龜裂은 早期에 發生하는데 이는 龜裂發生領域과 관계가 있다고 생각된다. 한편, 微視龜裂分布領域길이(Ls)와 巨視龜裂길이(L)에 대한 관계는 微視組織因자의 영향에 관계없이 高應力의 경우, 初期龜裂길이(0.1mm)에서는 Ls/L의 비가 4~5배로 微視龜裂길이가 廣範圍하게 發生되나 初期龜裂부터 主龜裂길이 2mm까지는 Ls/L의 비가 감소하는 경향으로 나타났다.

低應力의 경우, 初期龜裂길이에서는 高應力에 비하여 Ls/L가 다소 감소된 2.5~3.5배의 微視龜裂길이 발생하나 初期龜裂에서 龜裂길이 0.5mm까지는 급속히 감소하였으며 龜裂길이 1mm 이상에서는 거의 1.05배 정도인 直線관계로 슬립의 진보에 따라 主龜裂이 형성되어 나가는 경향으로 나타났다.

결과적으로, 微視龜裂은 微視組織因자의 영향보다는 應力레벨의 변동에 따라서 많은 영향을 받을 수 있다.

이상의 결과에서 微視組織因자의 변화에 대한 巨視的인 龜裂에 대해 고찰하면, 龜裂發生領域은 母相의 結晶粒徑에도 依存하므로 結晶粒徑이 클수록 龜裂은 早期에 發生하는 것으로 생각된다.

金⁸⁾은 破斷延性 및 破壞強度는 組織의 微細化에 의하여 개선되어 지며, 組織이 微細할수록 破斷延性 및 破壞強度는 증가한다고 하였다.

따라서, 슬립대 龜裂은 페라이트相에 발생하며 인접한 페라이트粒內로 진보하여 페라이트相과 마르텐사이트相의 경계에서 정지하였다.

第2相의 硬度를 변화시켰을 경우, Ishihara⁹⁾는 疲勞龜裂의 母相選擇性의 要因은 第2相에 의해 母相이 塑性 變形拘束을 받으므로 劈開龜裂이 發生한다고 하였다. 따라서 硬度比가 작을수록 龜裂이 早期에 發生하는 原因은 硬度比가 작은 R₆材의 경우 Fig. 8에서와 같이 동일 應力레벨에서 R₆材가 A材보다 初期龜裂發生은 빠르나 龜裂의 傳播過程은 거의 동일한 경향이므로 R₆材는 거의 均質材에

가까운 組織임을 알 수 있다. 따라서 塑性拘束性이 낮은 경우 龜裂은 母相에서 쉽게 슬립이 일어나므로 슬립變形性에 의해 第2相에서도 용이하게 傳播된다고 본다. 즉, 龜裂傳播速度는 龜裂先端에서 슬립變形의 난이성 만큼 母相에 대한 第2相의 塑性拘束性에 의존함을 알 수 있다.

體積率 變化의 경우 第2相의 體積率이 클수록 境界벽이 크므로 疲勞壽命은 증가한다. 金⁵⁾은 硬度比 및 體積率이 저하할수록 塑性拘束효과는 저하하며 内部應力이 증가하여 母相粒內的 應力을 증가시키므로 劈開龜裂의 形成을 촉진시켜 破斷延性的 低下를 가져온다고 하였다.

3.4 微視龜裂特性和 傳播舉動

Fig. 10은 노치(notch)부근에서, Fig. 11은 중기단계에서 龜裂과 슬립에 대한 관계를 나타낸 것이다.

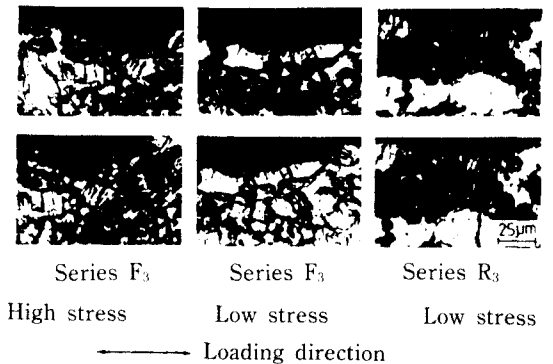


Fig. 10 Crack initiation and crack propagation of fatigue

슬립發生에 대해, Tomota⁶⁾는 初期단계에서 反復回數의 증가와 함께 슬립의 수가 증가하며 페라이트相에 發生되어 마르텐사이트相 粒子的 境界近處에서 밀도가 높아진다고 하였다.

한편, 이들 슬립은 熱處理과정에서 오우스테나이트가 마르텐사이트로 變態할때 體積膨脹에 의해 생기는 母相粒內에 대한 微視的 内部殘留應力이 作用하여 마르텐사이트와 페라이트의 境界에서 優先的으로 슬립이 發生한다고 하였다.

따라서, 슬립은 페라이트相에 塑性變形이 發生하기 쉬우므로 界面 근처에서 應力集中이 作用하여 슬립이 傳播된다고 본다. 또한, 界面의 結合力

이 弱한 경우 界面에 龜裂이 發生하는 可能性이 높다고 본다. 즉, 이들 슬립은 第2相의 境界에서 發生傳播하여 停止되며 初期단계에서는 應力이 증가 할수록 슬립수가 증가하는 경향으로 나타났다.

Fig. 11은 R₂材와 R₆材와의 龜裂傳播舉動을 나타낸 것으로 R₂材의 경우 高應力레벨이지만 R₆材의 低應力에 비해 슬립의 수가 적음을 알 수 있다. 따라서, 이들 슬립은 同一材料에 대해서는 應力레벨에 관계가 있으나 硬度比가 다른 경우, 즉, R₂材와 같은 硬度比가 적은 材料에 대해서는 많은 슬립이 發生集의하여 龜裂이 傳播해 나감을 알 수 있다.

한편, 龜裂은 마르텐사이트상 내부의 界面이 약한곳으로 傳播하는 경우 zig-zag현상이 적으며 第2相과의 境界벽이 약한곳으로 진파되는 경우 zig-

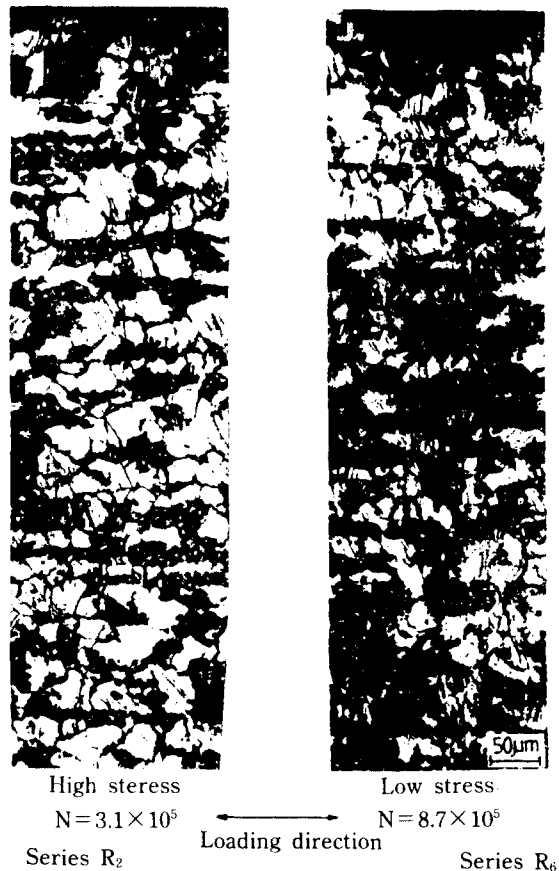


Fig. 11 Crack propagation of II stage

zag형상이 크게되었다.

또한, 페라이트相에서는 直線으로 急速하게 傳播되는 경향임을 알 수 있었다.

따라서, 이들 현상은 外部應力の 作用力에 대한 各粒子들의 内部抵抗力의 結果로 보아진다.

3.5 疲勞龜裂傳播速度와 應力擴大係數와의 關係

回轉굽힘 疲勞試驗에 있어서 應力擴大係數의 關係식은 $Oh^{10,11)}$ 와 $Tokagi^{12)}$ 등에 의해 보고되고 있는데, 引張應力이 作用하여 中央에 노치를 포함한 龜裂이 發生하였을 때의 應力擴大係數를 간편식으로 표시하면 $\Delta K = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$ 로서, da/dn 와 ΔK 의 關係를 Paris법칙으로 표시하면 다음과 같다. $da/dn = C(\Delta K)^m$ 이다. (여기서, C는 材料定數이고, m은 K의 指數로서 不變定數이다.)

本 實驗의 Fig. 12~15에 있어서 m의 값은 1.5~2.5의 범위이고, C의 값은 高, 低應力레벨에서는 큰 차이가 없으나 同一應力인 302MPa에서는 큰 차이가 나타났다.

Fig. 12, 13 및 14는 各材料의 疲勞限도의 1.1배, 1.5배의 應力을 부하한 경우로서 同一 ΔK 領域에 있어서의 龜裂傳播速度는 應力레벨이 증가할수록 빠르다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 $\sigma = 302MPa$ 를 적용하였을 때의 關係로서 硬度比와 體積率이 적을수록 그리고 結晶粒徑이 클수록 제2단계 領域까지는 龜裂傳播速度는 빠르지만, 그 이후에는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 結果는 第2相이 어느정도 延性을 가지고 있는 퍼얼라이트(pearlite) - 페라이트(ferrite)鋼에 대해 研究한 K. Hamborg¹³⁾, Y. Nakai¹⁴⁾의 結果와는 相反된 現象을 나타내는 것으로서 強度와 變形舉動이 현저히 다른 페라이트와 마르텐사이트 組織으로 이루어진 M. E. F. 鋼의 특이성에 의한 것으로 생각된다.

以上の 結果에서 第2相의 마르텐사이트가 母相 페라이트를 둘러싼 複合組織鋼에서의 疲勞龜裂傳播速度는 同一 ΔK 領域에 있어서 應力레벨과 結晶粒徑이 증가할수록, 硬度比와 體積率이 감소할수록 빠르다는 것을 알 수 있었다.

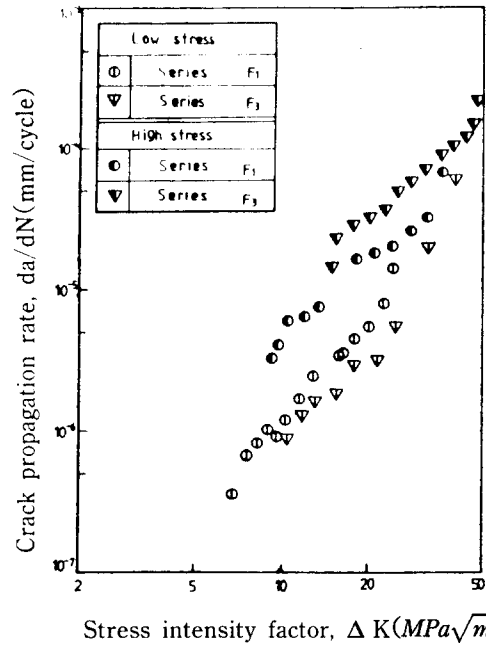


Fig. 12 Crack propagation rate vs. stress intensity factor of F series

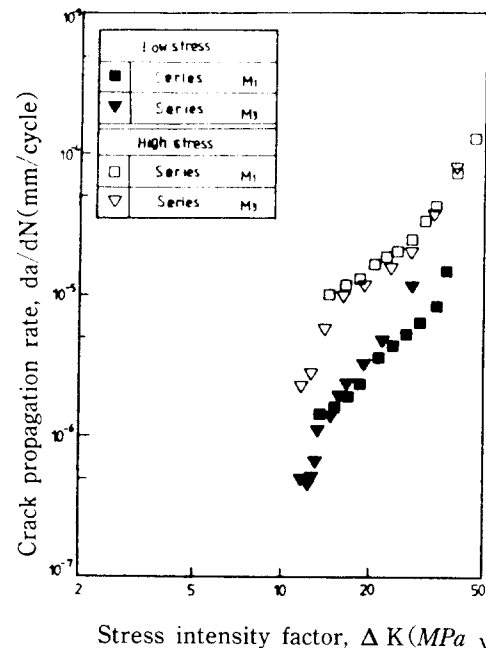


Fig. 13 Crack propagation rate vs. stress intensity factor of M series

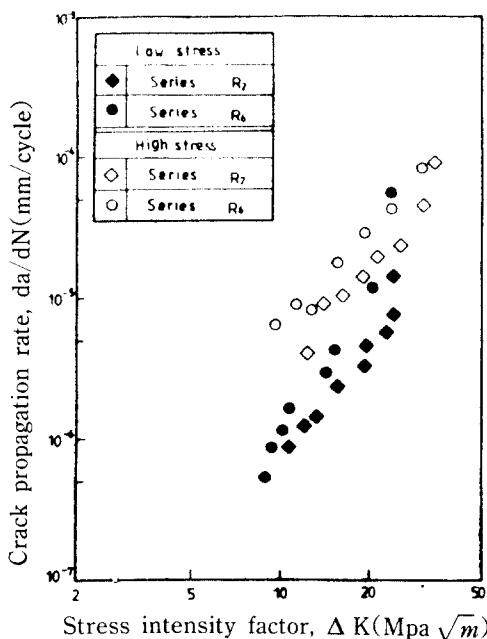


Fig. 14 Crack propagation rate vs. stress intensity factor of R series

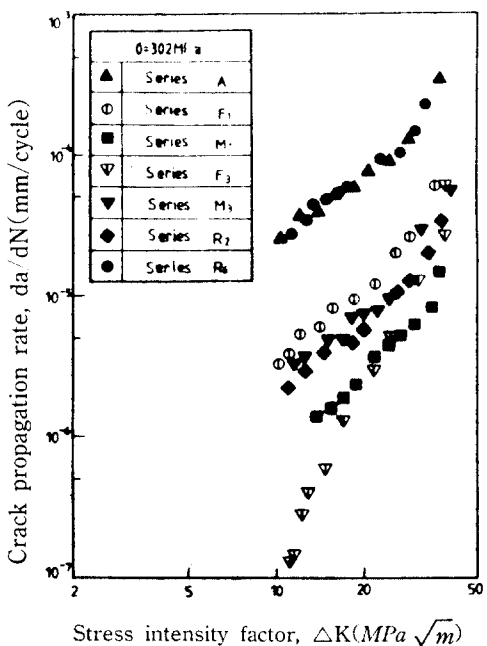


Fig. 15 Crack propagation rate vs. stress intensity factor on $\sigma=302MPa$

3. 6 靜的引張 및 疲勞試驗破斷面에서의 破面 관찰

Fig. 16은 靜的引張試驗후의 破斷面 形狀으로서 母材와 R₆材는 거의 딴플(dimple)形狀으로 同一性質의 現象임을 알 수 있다. 그 외의 材料에서는 F₁材와 마찬가지로 페라이트相에는 劈開크랙을 동반한 脆性的인 리버패턴(river pattern) 形相이며, 마르텐사이트相에서는 延性的인 딴플(dimple) 形狀으로 나타났다.



Fig. 16 Fracture surface on tensile test

Fig. 17은 疲勞試驗후의 疲勞破壞過程에 나타난 스트라이에이션(striation) 形狀으로 低應力레벨에서는 폭이 좁고 명확하게 관찰되나 高應力레벨에서는 폭이 크고 명확하게 관찰되지 않았다. 또한 結晶粒界에서도 스트라이에이션의 影響을 받음을 알 수 있으며, 페라이트相에서는 스트라이에이션이 명확하게 관찰되나 마르텐사이트相에서는 명확하지 않음을 알 수 있다.

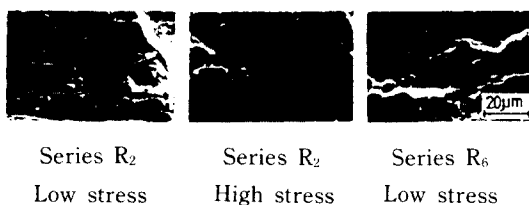


Fig. 17 Crack initiation

4. 結 論

SM20C 一般構造用鋼을 素材로 熱處理過程을 통해 얻은 M. E. F. 複合組織鋼에서 母相의 結晶粒徑, 第2相의 體積率 및 硬度比를 變化시킨 試驗片의 片持式 回轉굽힘 疲勞試驗의 結果, 微視組織變化가 疲勞龜裂發生 및 傳播에 미치는 塑性拘束

의 영향을 考察한 結果는 다음과 같다.

1) 結晶粒徑이 클수록, 硬度比와 體積率이 작을수록 疲勞強度가 低下하며 疲勞強度는 微視組織의 영향을 받음을 알 수 있었다.

2) 同一試驗片에서 作用應力레벨이 증가할수록 塑性拘束力이 弱화되어 슬립 및 龜裂은 早期에 發生하며, 그 發生領域은 擴大된다. 또한, 이들 슬립은 微視組織의 變化에 따라 많은 차이가 있었다.

3) 龜裂은 第2相의 境界壁에서 優先的으로 發生, 傳播하는 경향이 크며 마르텐사이트相에서는 傳播速度가 느리거나 停留한 후 다시 進展하며 페라이트相에서는 급속히 傳播하였다.

4) 龜裂傳播速度는 同一 ΔK 領域에 있어서 母相의 結晶粒徑 및 應力레벨이 증가할수록 그리고 第2相의 硬度比와 體積率이 적을수록 빠르다.

5) 疲勞破壞過程에서 스트라이에이션은 低應力레벨 및 페라이트相에서는 명확하나 高應力레벨 및 마르텐사이트相에서는 명확하지 않았다. 또한 이들은 境界壁이나 第2相의 壁에서는 一時停留現像으로 明確하지 않았다.

參考文獻

- 1) Tokaji, K., T. Ogawa and S. Osako, "The Growth of Microstructurally small fatigue cracks in a Ferrite-Pearlitic steel", *Fatigue Fract. Engng. Struct.* Vol. 11, No. 5, pp. 331~342, 1988
- 2) 戶梶惠郎, 小川武史, 大迫修二, "フェライト・パーライト鋼における微視組織的微小疲勞龜裂の成長舉動", *日本機械學會論文集*, 第51卷, 第501號, pp. 884~891, 1985
- 3) Frost, N.E., L. P. Pook and K. Denton, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 3, pp. 109~118, 1971
- 4) Dutta, V. B., S. Suresh and R. O. Ritchie, "Fatigue Crack Propagation in Dual-Phase Steels: Effects of Ferritic-Martensitic Microstructures on Crack Path Morphology", *Met. Trans.*, Vol. 15A, pp. 1193~1207, 1984
- 5) 金楨圭, "複合組織鋼의 破斷延性에 미치는 塑性拘束에 의한 内部應力의 影響", *大韓機械學會論文集*, 第7卷, 第2號, pp. 123~129, 1983
- 6) Tomota et al, "Fatigue Strength of Steels Composed of Two Phases", *鐵斗鋼*, 第6號, pp. 64~72, 1977
- 7) 西谷弘信, "低炭素鋼의 疲勞龜裂發生および傳播に及ぼす 結晶粒大きさ의 影響", *日本機械學會論文集*, 第51卷, 461號, pp. 3~9, 1985
- 8) 金楨圭, "複合組織鋼의 破壞舉動에 미치는 微視組織 크기의 影響", *大韓機械學會論文集*, 第5卷, 第3號, pp. 223~229, 1981
- 9) 石原豪, "2相鋼의 高平均應力下における 疲勞龜裂의 組織選擇性", *日本金屬學會論文集*, 第47卷, 第1號, pp. 67~72, 1983
- 10) 吳世旭, 廉永夏, "回轉굽힘을 받는 스프링鋼의 疲勞限度와 균열전파에 관한 研究(第1報)", *大韓機械學會誌*, 第14卷, 第2號, pp. 149~161, 1974
- 11) 吳世旭, 安光珠, "疲勞크랙의 傳播期의 研究", *大韓工業教育學會誌*, 第7卷, 第2號, pp. 56~61, 1982
- 12) Tokaji, K., T. Ogawa, Y. Harada, Z. Ando, "Limitation of Linear Elastic Fracture Mechanics for Growing Small Fatigue Cracks and Its Dependence on Microstructure", *Metal*, Vol. 34, No. 385, pp. 1160~1166, 1985
- 13) Hamberg, K. and B. Karlsson, "Crack Propagation in coarse Two-Phase Steels", *Strength of Metals and Alloys*, Pergamon Press, Vol. 2, pp. 1261~1266, 1979
- 14) Nakai, Y. and K. Tanaka, "The Effects of Stress Ratio and Grain Size on the Near-Threshold Fatigue Crack Propagation in Low-Carbon Steel", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, pp. 291~302, 1981