

<論 文>

微視組織에 敏感한 疲勞균열進展舉動

金 楨 圭* · 黃 惇 永** · 朴 榮 祖*

(1986年 1月 16日 接受)

Microstructurally Sensitive Fatigue Crack Propagation Behavior

Jung Kyu Kim, Don Young Hwang and Young Jo Park

Key Words: Crack Deflection(균열휨), Roughness Induced Crack Closure(破面거칠기로 인한 균열 단합), Linear Roughness Parameter(선형거칠기계수), Dual Phase Steel(複合組織鋼), Fatigue Crack Propagation Resistance(疲勞균열進展抵抗), Reversed Plastic Zone Size(週期塑性領域크기)

Abstract

Characteristics of fatigue crack propagation in martensite-ferrite dual phase steels have been investigated.

In low ΔK region, fatigue crack propagation resistance increases with increasing volume fraction of martensite, but the difference of crack propagation resistance resulted from the volume fraction decreases with increasing ΔK . Also, threshold stress intensity factor range ΔK_{th} increases with increasing volume fraction of martensite, But fatigue crack propagation rates of dual-phase steels in terms of ΔK_{eff} are independent to volume fraction of martensite.

These phenomena can be explained by the roughness induced crack closure due to crack deflection.

1. 緒 論

공업상으로 중요한 二相混合組織鋼의 破壞거동에 있어서 균열선단의 塑性領域이 微視組織의 크기보다 작은 경우에는, 연속체역학의 개념에 의해 도입된 線形破壞力學의 적용이 문제시된다. 이러한 대표적인 예가 下限界 값 부근에서의 피로균열진전거동이며, 이때 피로균열선단은 結晶粒界, 第二相等의 微視組織의 영향을 크게 받아 균열진전경로의 휨(deflection)을 유발시킨다는 것이 보고되고 있다⁽¹⁻⁵⁾. Suresh 등⁽⁴⁻⁵⁾은 이갈

은 균열휨(crack deflection)이, 균열진전경로의 굴곡에 의해 겉보기 균열진전속도(apparent crack propagation rate)를 감소시키며, 또한 疲勞균열進展에 동반되는 Mode II 변위에 의해 파면접촉으로 인한 균열 단합이 존재하게 되어 有效進展力(effective driving force)을 감소시킨다고 보고하고 있다. 특히 結晶粒徑이 크고 強度가 높은 第二相을 가지고 있는 混合組織鋼에 있어서 이같은 현상이 두드러진다. 대표적인 예로서 마르텐사이트-페라이트 複合組織鋼(martensite-ferrite dual phase steel)에서는 靜的인 強度가 클수록 第二相 마르텐사이트의 균열진전저지역할로 인하여 피로균열진전경로의 휨이 발생하여 疲勞균열進展抵抗이 一般 構造用 鋼보다 상승한다고 보고하고 있다⁽⁴⁻¹⁰⁾.

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學 機械設計學科

** 漢陽大學校 大學院

著者등도 이에 주목하여 마르텐사이트-페라이트 複合組織鋼의 페라이트 結晶粒徑의 영향에 대하여 검토한 결과, 이들 鋼의 強度가 同一함에도 불구하고 母相에 대한 第二相의 硬度가 높은 경우, 낮은 ΔK 영역에서는 結晶粒徑이 큰 쪽이 疲勞균열進展速度가 빠르나⁽¹¹⁾, 硬度가 낮은 경우에는 균열진전속도의 차이가 없어진다 는 것⁽¹²⁾을 疲勞균열의 組織선택성의 정도를 나타내는 균열의 우선진전경로도에 의해 밝힌 바 있다. 그러나 균열진전경로에 미치는 微視組織의 영향 및 이에 의한 破壞力學的 결과와의 관계에 대해서는 아직도 미흡한 점이 많다. 이것은 疲勞균열進展舉動에 미치는

- (1) 第二相의 균열진전저지효과와^(6, 7, 11, 12)
- (2) 균열휨(crack deflection) 및 균열닫힘(crack closure) 효과^(4, 5, 8, 9, 10, 13).

등의 파악이 불충분하기 때문이다. 따라서 複合組織鋼의 疲勞균열進展抵抗에 있어서는 微視組織에 따른 微視破壞機構를 거시적 破壞거동에 연관지어 검토할 필요성이 있다고 생각된다.

본 연구에서는 二相混合組織鋼에 있어서 피로균열진전거동의 微視組織 의존성을 밝히기 위하여 第二相 마르텐사이트가 母相 페라이트를 둘러싼 마르텐사이트-페라이트 複合組織鋼을 준비하고 미시조직이 각각 다른 4 종류의 시험편에 대하여 피로시험을 실시한후 이에 의해 얻어진 疲勞균열進展速度를 균열휨과 균열닫힘을 통하여 검토하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 두께가 16 mm 인 일반구조용 압연강판(SS 41 P)으로 그 化學성분은 Table 1 과 같으며 시험편의 채취방향은 L-T 방향이다. 1200°C에서 균질화어닐링을 행한후 ASTM E 647-83⁽¹⁴⁾에 따라 두께 10 mm 의 CT 시험편으로 제작하였다. 다음 Table 2 와 같이 열처리하여 마르텐사이트가 페라이트를 둘러싼 複合組織鋼과 마르텐사이트組織鋼을 얻었다. Fig. 1 은 이같은 열처리에 의하여 얻어진 微視組織의 대표적 예이다. Table 3 은 線分析法에 의한 組織의 정량적 평가 및 마이크로비커스경도계(25 g, 30 점)로서 측정 한 각 組織의 硬度의 평균값과 함께 각 재료의 기계적 성질을 정리한 것으로, 기계적 성질은 KS B 0801-7 호 시험편을 사용하여 변위속도 1 mm/min 일정의 상온인 장시험으로부터 얻어진 것이다. Fig. 2 는 열처리로 인한 산화막을 제거하기 위하여 시험편의 양표면을 0.25 mm 씩 연삭한후의 CT 시험편의 형상 및 치수를 나타

Table 1 Chemical composition

						wt%
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
0.17	0.18	0.64	0.02	0.01	0.04	0.02

Table 2 Heat treatment procedure

Series Heat treatment	A	B	C	D
	Air cooling	760°C×30min.	780°C×30min.	800°C×30min.
Water quenching	780°C×50min.	800°C×50min.	820°C×50min.	950°C×30min.
Tempering	200°C×60min.			

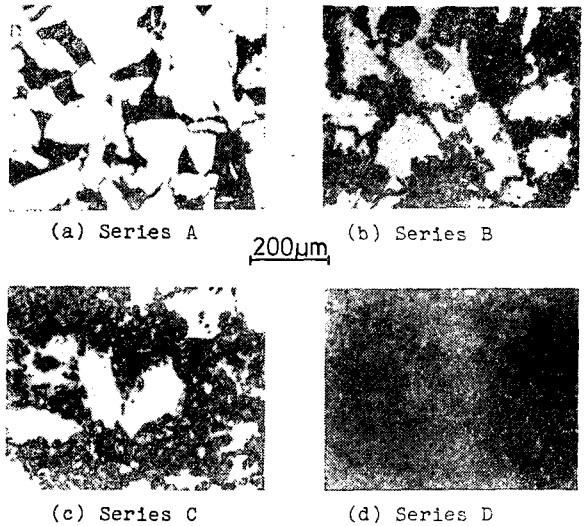


Fig. 1 Typical microstructure

낸 것이다.

피로시험은 MTS 社製 10 톤용 유압서어보식 피로시험기를 사용하여 하중비 $R=0.3$ 에서 하중반복속도가 11 Hz 인 正弦파형으로 荷重제어방식에 의하여 행하였다. ΔK 감소방식⁽¹⁵⁾에 의하여 疲勞균열進展의 下限界 값 ΔK_{th} 를 찾은후 ΔK 증가방식에 의하여 疲勞試驗을 하였다. 균열길이 및 균열닫힘의 측정은 콤파라이언스법을 사용하여 前報^(11, 12)와 같은 방법으로 하였다. 應力擴大係數범위 ΔK 는 다음식에 의해 산출하였다⁽¹⁴⁾.

$$\Delta K = \frac{AP(2+\alpha)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} (0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \tag{1}$$

여기서, $\alpha = a/W$ (a : 균열길이, W : 시험편의 폭)

Table 3 Metallurgical and mechanical properties

Properties Series	Vm (%)	D (μm)	C (%)	Hardness		Hardness ratio	0.2% Proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
				Martensite	Ferrite				
A	25	181	91	671	225	3.0	365	670	4.89
B	46	142	99	660	156	4.2	558	817	4.13
C	69	107	99	614	178	3.5	690	982	5.68
D	100	—	—	516	—	—	1011	1226	13.17

D : Ferrite grain size
 C : Connectivity
 Vm : Volume fraction of martensite

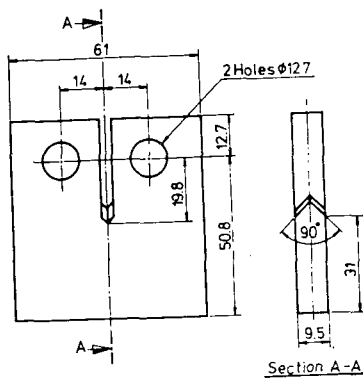


Fig. 2 Configuration of test specimen, (unit : mm)

ΔP : 하중폭, B : 시험편의 두께

또 有效應力擴大係數범위 ΔK_{eff} 는 컴플라이언스(compliance)법을 사용하기 위한 감산회로를 이용하여 얻어진 荷重-變位 히스테리시스(hysteresis)곡선으로부터

더 有效應力擴大係數 범위 U 를 측정하여 $\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$ 에 의해 구하였다. 疲勞균열進展速度 $\frac{da}{dN}$ 는 시이컨트법으로, 그리고 $\frac{da}{dN} - \Delta Y$, $\frac{da}{dN} - \Delta K_{eff}$ 의 관계식은 최소자승법에 의해 구했다. ΔK 값에 따른 피로균열진전거동과 微視組織과의 관계는 시험편의 표면을 연마한후 5% 나이탈(nital)용액으로 부식하여 光學顯微鏡으로서 관찰하였고 실제의 균열길이는 곡선계(curvimeter)를 사용하여 광학현미경으로부터 관찰한 균열경로사진으로부터 평가하였다. 破面관찰은 走査電子顯微鏡을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 疲勞균열進展速度

Fig. 3(a)~(d)는 複合組織鋼 A, B, C材 및 마르텐사이트鋼 D材의 疲勞균열進展速度 $\frac{da}{dN}$ 를 應力擴大係數범위 ΔK 에 대해서 정리한 것이며, 疲勞균열進展

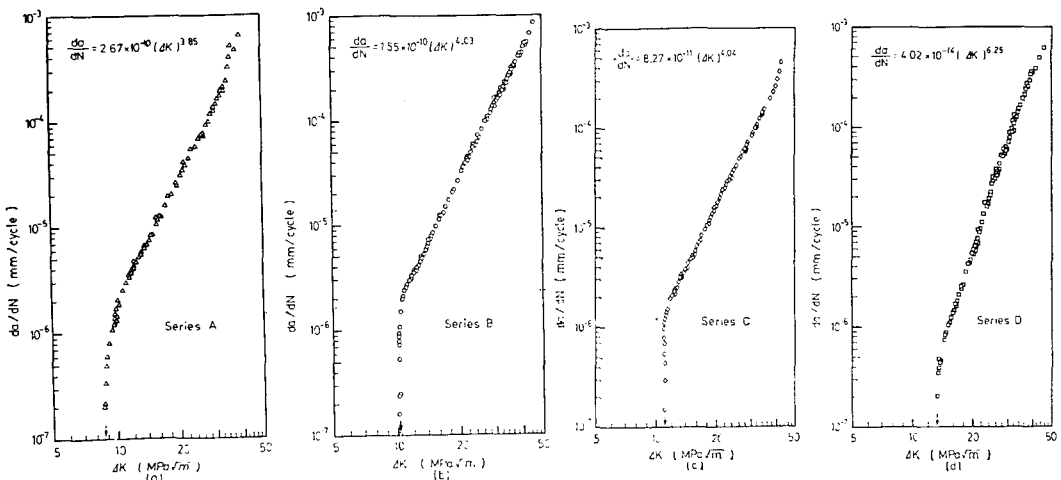


Fig. 3 Stress intensity factor range (ΔK) vs. fatigue crack propagation rate (da/dN)

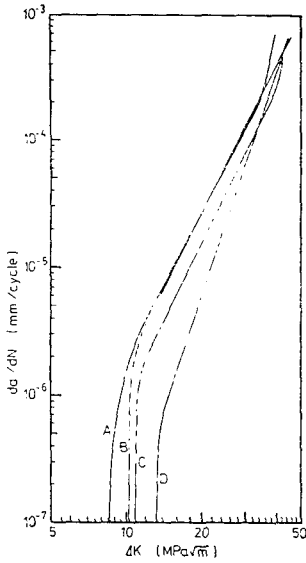


Fig. 4 Stress intensity factor range (ΔK) vs. fatigue crack propagation rate (da/dN)

의 2 단계영역에서 최소자승법에 의해 구한 회귀곡선의 식은 그림에 나타낸 바와 같다. 이같은 결과로부터 微視組織의 변화에 따른 피로균열진전거동의 차이를 비교하기 위하여 회귀곡선으로 나타낸것이 Fig. 4이다. 이 그림으로부터 알수 있는 바와 같이 낮은 ΔK 영역에서는 第二相 마르텐사이트의 체적율이 증가할수록 疲勞균열進展速度는 저하하지만, ΔK 가 증가함에 따라 그 차이가 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 第二相의 체적율의 증가에 따라 疲勞균열進展의 下限界값 ΔK_{th} 는 상승함을 보여주고 있다.

한편 複合組織鋼에 있어서 피로균열진전거동은 균열 단합현상과 밀접한 관련이 있음⁽⁴⁻⁹⁾을 고려하여 이들 재료의 $\frac{da}{dN}$ 를 有效應力擴大係數범위 ΔK_{eff} 에 대해서 정리해 보면 Fig. 5(a)~(d)와 같이 나타낼 수 있으며 회귀곡선의 식은 그림에 나타낸 바와 같다. Fig. 6은 Fig. 5의 결과들을 비교검토하기 위하여 최소자승법으로 구한 $\frac{da}{dN}$ 와 ΔK_{eff} 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 複合組織鋼은 第二相의 체적율에 변화가 있음에도 불구하고 全 ΔK_{eff} 영역에서 疲勞균열進展速度가 거의 같다. 그러나 마르텐사이트鋼의 $\frac{da}{dN}$ 는 全 ΔK_{eff} 영역에 걸쳐서 複合組織鋼의 $\frac{da}{dN}$ 보다 빠르다. 또한 제 2 단계 疲勞균열進展거동에 있어서는 複合組織鋼 A材는 $\Delta K_{eff} \approx 15 \text{ MPa}\sqrt{m}$, B材는 $\Delta K_{eff} \approx 20 \text{ MPa}\sqrt{m}$, C材는 $\Delta K_{eff} \approx 30 \text{ MPa}\sqrt{m}$

의 부근에서 천이합이 생기고 이 영역에서부터 $\frac{da}{dN}$ 는 Fig. 3의 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 관계에 근접하는 것으로 보아 균열단합현상이 소멸 되어지고 있다고 볼 수 있다. 또한 균열단합을 고려했을 때의 疲勞균열進展의 下限界값 $[\Delta K_{eff}]_{th}$ 는 第二相의 체적율의 크기에 차이가 있음에도 불구하고 거의 일정한 값을 나타내지만 마르텐사이트組織만으로 이루어진 D材의 경우는 이들에 비하여 현저히 저하 했음을 알 수 있다. 따라서 각 재료들에 대한 疲勞균열進展의 下限界값 ΔK_{th} 및 $[\Delta K_{eff}]_{th}$ 와 第二相의 체적율과의 관계를 명확히 하기 위하여 第二相의 체적율에 따라 변화하는 降伏強度⁽¹⁶⁾와 ΔK_{th} 및 $[\Delta K_{eff}]_{th}$ 와의 관계에 대하여 검토하였다. Fig. 7은 이들의 관계를 나타낸것으로서, ΔK_{th} 와 降伏強度 σ_s 와의 관계는 다음식과 같다.

$$\Delta K_{th} = 6.07 + 7.22 \times 10^{-3} \sigma_s \quad (2)$$

이것은 村上⁽¹⁷⁾등이 보고한 炭素鋼의 경우와 유사한 양상이지만 Ritchie⁽¹⁸⁾, Vosikovsky⁽¹⁹⁾, 橋內⁽²⁰⁾등의 降伏強度의 증가에 따라 ΔK_{th} 가 감소한다는 보고와는 상반된 결과이다. 그러나 균열단합현상을 고려하면 複合組織鋼의 $[\Delta K_{eff}]_{th}$ 는 降伏強度의 변화에도 불구하고 거의 일정한 값을 가지며 마르텐사이트鋼은 이들보다 낮은 값을 나타내고 있어 ΔK_{th} 와 $[\Delta K_{eff}]_{th}$ 와의 차이는 降伏強度가 증가할수록 커짐을 알 수 있다.

이상의 결과들은 第二相 체적율의 변화에 의한 균열 단합효과와 크기와 관련이 있다고 할 수 있다.

3.2 균열합과 균열단합

Fig. 8은 第二相의 체적율의 증가에 따른 균열단합의 정도를 명확히 하기 위하여, K_{op}/K_{max} (K_{op} : 균열열립점의 應力擴大係數, K_{max} : 最大應力擴大係數)와 ΔK 와의 관계를 정리한 것이다. 이 그림에서 보면 ΔK 값이 낮을수록, 그리고 第二相의 체적율이 증가할수록 균열단합현상이 현저함을 알 수 있다. 또한 앞에서 설명한 바와 같이 A材는 $\Delta K \approx 15 \text{ MPa}\sqrt{m}$, B材는 $\Delta K \approx 20 \text{ MPa}\sqrt{m}$, C材는 $\Delta K \approx 30 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서부터 K_{op}/K_{max} 는 일정한 값을 보여주고 있으며, 따라서 균열 단합현상이 거의 소멸 되어짐을 알 수 있다. 한편 마르텐사이트組織인 D材는 複合組織인 A, B, C材에 비하여 현저하게 균열단합효과가 큼을 알 수 있다.

균열단합은 산화물의 영향, 잔류응력의 영향, 표면 거칠기의 영향에 의한 것등으로 구분될 수 있다.^(8-13, 21-23) Fig. 9는 Suresh⁽⁵⁾가 균열합에 의해 발생하는 균열단합을 모델화한 것으로서 인장에 의한 U_1 변위에도

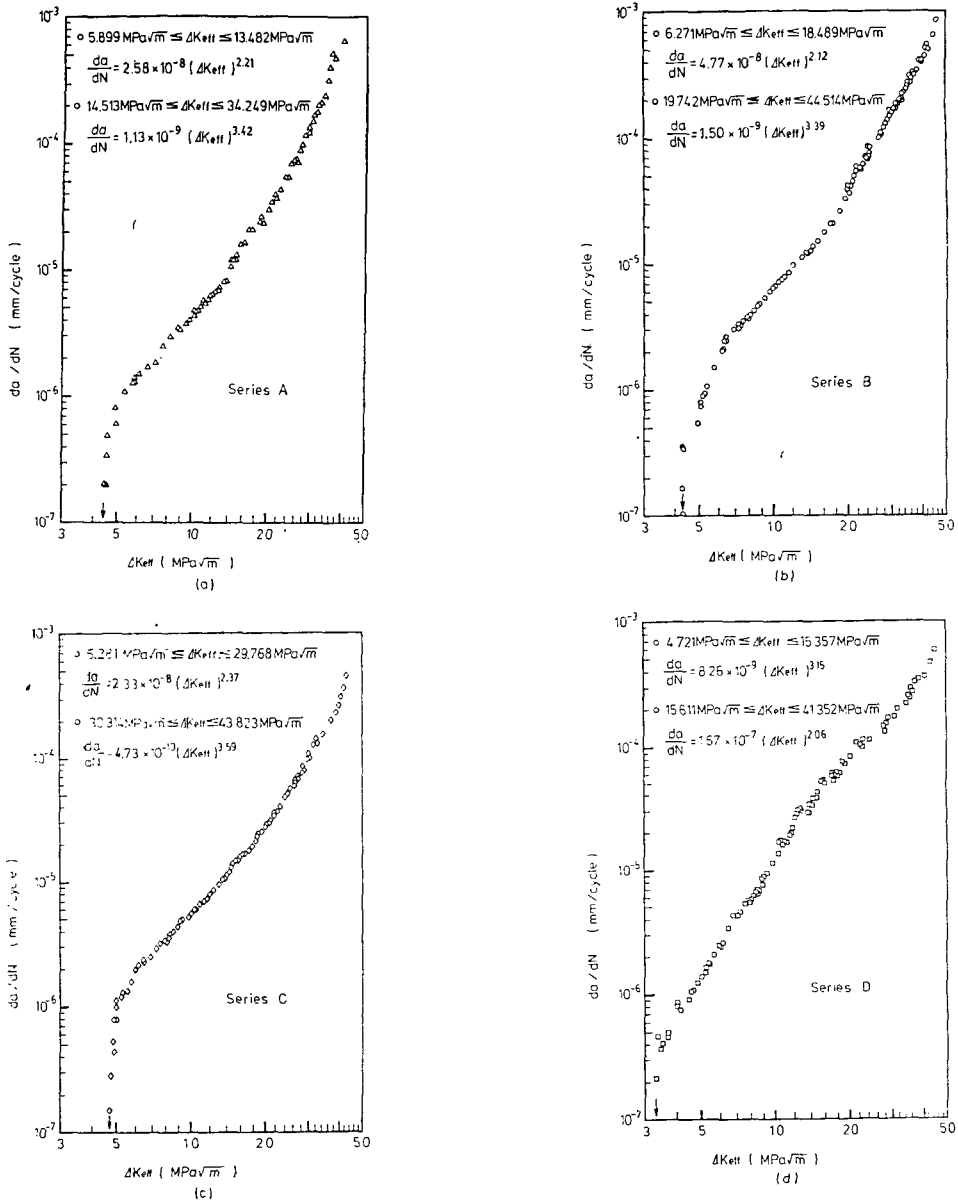


Fig. 5 Effective stress intensity factor range (ΔK_{eff}) vs, fatigue crack propagation rate (da/dN)

불구하고 운동학적인 비가역성(kinematic irreversibility)에 의해 생기는 破面사이의 상대 미끄럼 변위인 U_{II} 변위와 휘어진 균열경로로 인해 파면이 접촉하여 균열 단합이 일어남을 설명하고 있다. 또 이같은 파면접촉은 균열면에 마찰로 인해 산화물을 형성시켜 균열단합을 증가시킨다⁽⁵⁾. 본 연구에서는 複合組織鋼의 疲勞균열進展이 微視組織의 영향을 크게 받아 균열진전경로의 됨이 현저하다는 사실에^(4~9) 주목하여 破面 거칠기

로 인한 균열단합에 대하여 검토할 필요가 있다고 생각된다.

Fig 10은 A, B, C材 및 D材에 있어서 低 ΔK 영역과 高 ΔK 영역에서의 피로균열진전경로를 비교한 것으로서, 각각의 재료를 모두 ΔK 가 상승함에 따라 균열됨이 증가함을 알 수 있고 또한 이들의 경향은 第二相의 체적율이 증가할수록 저하한다. 이와 같은 균열경로의 됨을 정량적으로 평가하기 위하여, 선형거칠기

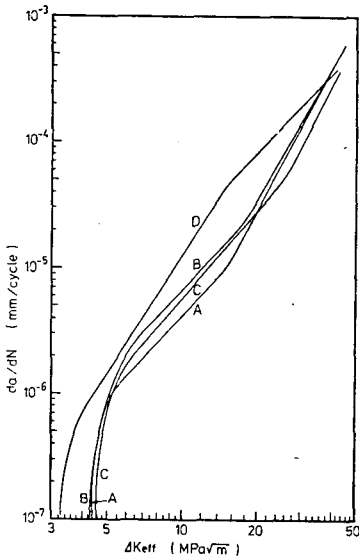


Fig. 6 Effective stress intensity factor range (ΔK_{eff}) vs. fatigue crack propagation rate (da/dN)

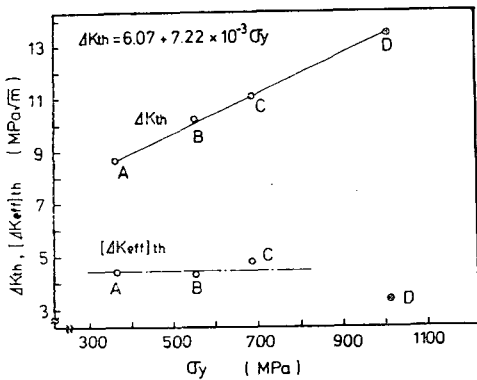


Fig. 7 Variation of threshold values with yield strength (σ_y)

계수 (linear roughness parameter)⁽²²⁻²⁴⁾ $\frac{L_c}{L_i}$ (L_c : 실재의 균열길이, L_i : 결보기(수평)균열길이)를 구한 후 이 값을 ΔK 에 대해서 나타낸 결과가 Fig. 11이다. 그림에 나타낸 곡선은 각 재료의 ΔK 에 따른 파면거칠기의 영향을 검토하기 위하여, $\frac{L_c}{L_i}$ 와 ΔK 사이의 관계를 최소자승법에 의하여 구한 것이다. 여기에서 보는바와 같이 ΔK 가 상승함에 따라 $\frac{L_c}{L_i}$ 는 증가하며, 동일한 ΔK 에서는 第二相 마르텐사이트의 체적율이 낮을수록 $\frac{L_c}{L_i}$ 가 커지는 경향을 보이고 있다. 또한, Fig. 12는 A, B, C材 및 D材의 破面을 관찰한 사진으로써

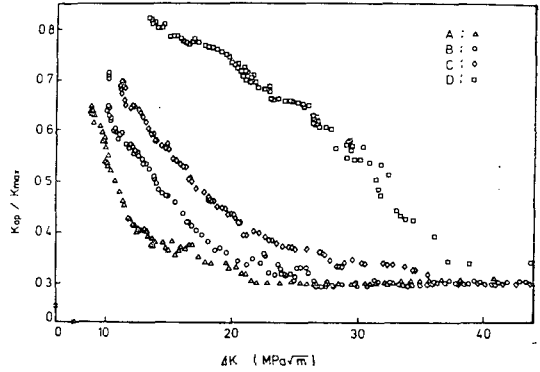


Fig. 8 Ratio of crack opening to maximum stress intensity factor as a function of the stress intensity factor range (ΔK)

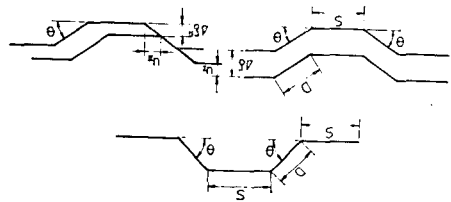


Fig. 9 Schematic diagram of deflected crack and contact crack closure

동일한 ΔK 에서 체적율이 낮을수록 굴곡이 심한 破面을 나타내고 있다. 즉, ΔK 가 상승할수록, 그리고 第二相의 체적율이 감소할수록 균열힘이 증가하고, 이로 인해 破面이 거칠어짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 第二相의 체적율이 증가할수록 균열단합효과가 크게 나타나는 Fig. 8의 결과와는 상반된 양상을 보이고 있으므로 균열단합의 정도를 균열힘으로 인한 파면거칠기만으로써 평가함에는 문제가 있는 것으로 생각된다.

破面거칠기로 인한 균열단합은 週期塑性領域의 크기 (RPZS) 또는 균열선단開口變位 (CTOD)의 크기와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다^(4,5,21). 따라서 균열힘 즉, 破面거칠기와 그로 인한 균열단합과의 관계는 週期塑性領域의 크기나 균열선단開口變位 등과 연관시켜 평가하여야 한다고 생각된다.

Fig. 13은 이론적인 해석과 실험적인 결과가 잘 일치되고 있는, Hahn 등⁽²⁵⁾이 제안한 週期塑性領域의 크기

$$RPZS = 0.132 \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 σ_y 는 除伏強度

를 평가하여 이 값으로 線形거칠기係數를 나눈 값을 ΔK 에 대해 정리한 것이다. 이 그림에서 $(L_c/L_i)/$

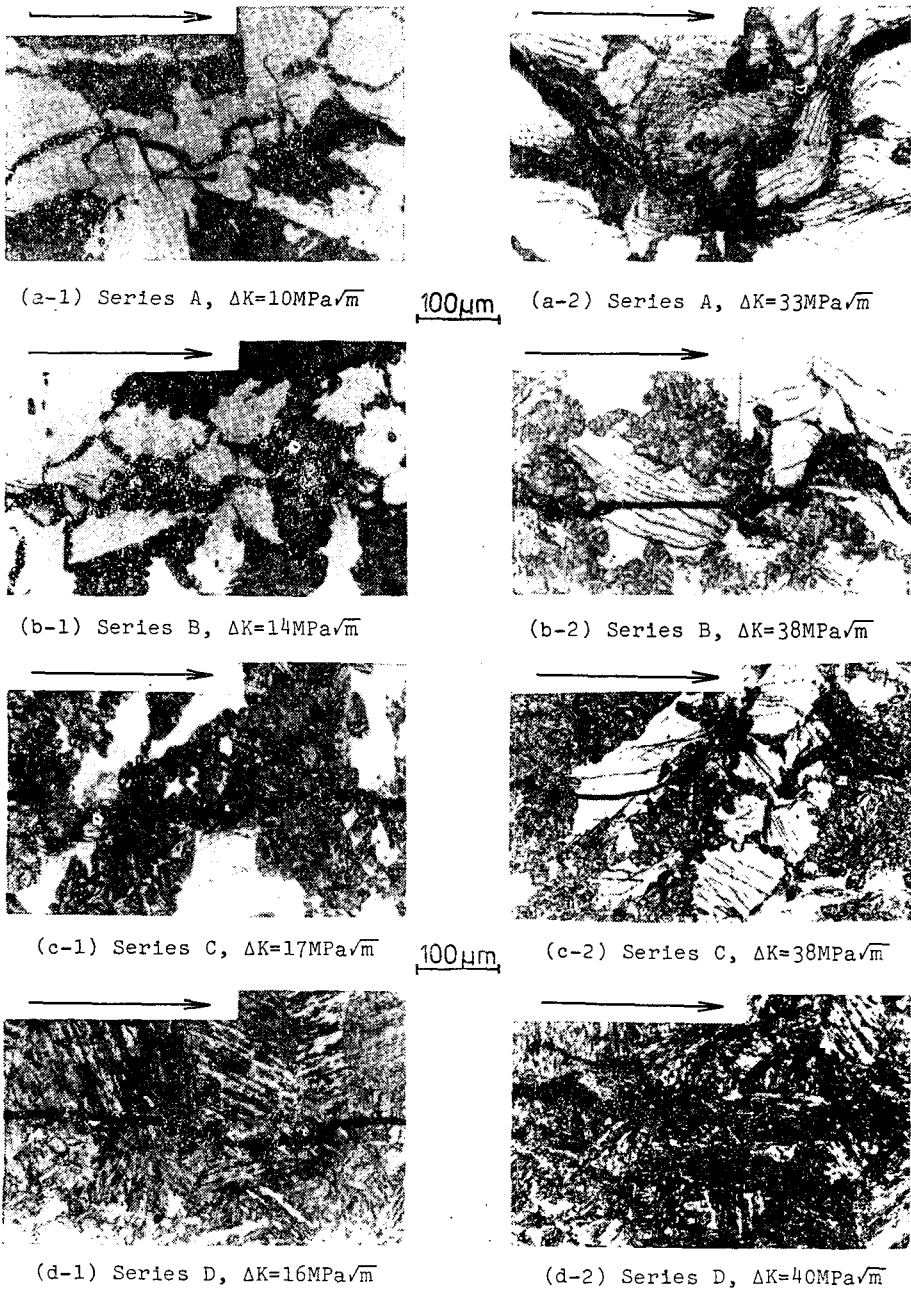


Fig. 10 Appearance of fatigue crack. Arrow indicates direction of macroscopic crack propagation

RPZ는 ΔK 가 증가함에 따라 감소하며, 또한 동일한 ΔK 에서 비교할 때 第二相의 체적율이 증가함에 따라 RPZ가 작아 지므로써, 이의 크기에 대한 상대적인 破面거칠기가 증가한다고 할 수 있다. 이것은 Fig. 8의 결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 第二相의

체적율이 증가함에 따라, 疲勞균열進展抵抗이 향상되는 것은 週期變性領域의 크기에 대한 균열립의 정도가 커지므로써 破面접촉으로 인한 균열닫힘이 증가되기 때문이라고 할 수 있다.

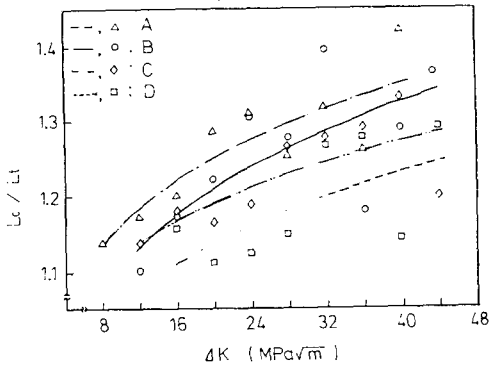


Fig. 11 Fracture surface roughness as a function of stress intensity factor range

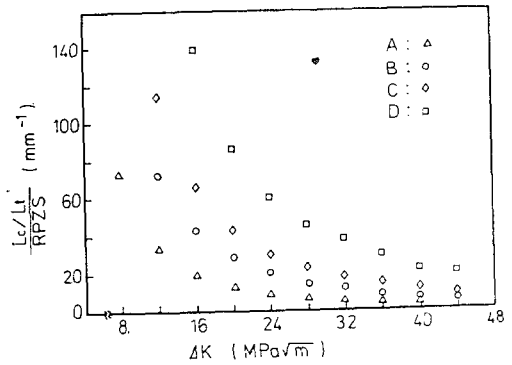
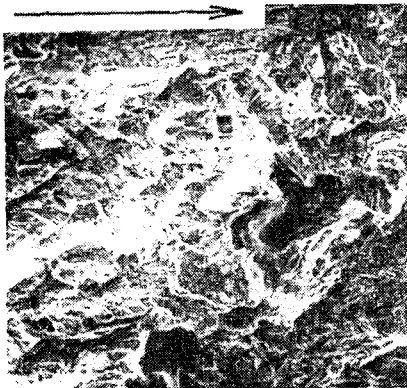
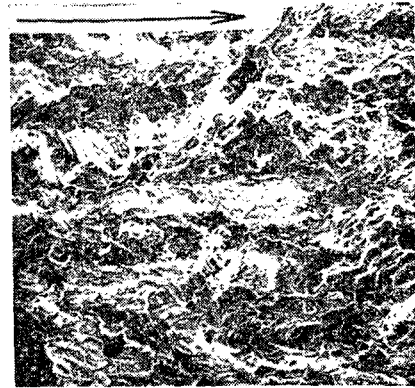


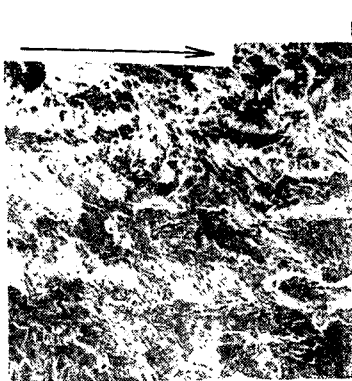
Fig. 13 Stress intensity factor range (ΔK) vs. ratio of fracture surface roughness (L_c/L_t) to reversed plastic zone size (RPZS)



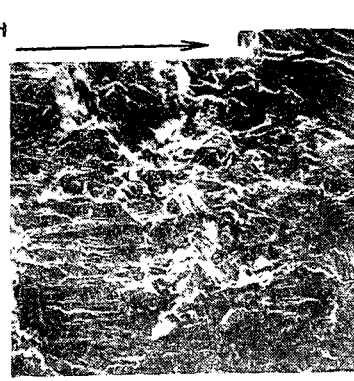
(a) Series A, $\Delta K = 15.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$



(b) Series B, $\Delta K = 15.9 \text{ MPa}\sqrt{m}$



(c) Series C, $\Delta K = 16 \text{ MPa}\sqrt{m}$



(d) Series D, $\Delta K = 16 \text{ MPa}\sqrt{m}$

Fig. 12 Fracture appearance. Arrow indicates direction of macroscopic crack propagation

4. 結 論

複合組織網의 疲勞균열進展거동에 미치는 微視組織의 영향을 밝히기 위하여 第二相 마르텐사이트가 母相

페라이트를 둘러싼 複合組織을 기본모델로 하여 微視組織이 각각 다른 4가지 재료를 준비한후, 피로시험을 통하여 疲勞균열進展抵抗에 미치는 微視組織의 영향을 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 낮은 ΔK 영역에서는 第二相의 체적율의 증가에

따라 疲勞균열進展抵抗이 증가하지만, ΔK 의 증가와 더불어 그 영향은 감소한다. 그러나 균열단합을 고려한 $\frac{da}{dN} - \Delta K_{eff}$ 관계에서는 마르텐사이트-페라이트複合組織鋼의 경우는 거의 동일한 疲勞균열進展抵抗을 나타내지만 第二相의 체적율이 100%인 마르텐사이트組織鋼은 疲勞균열進展速度가 複合組織鋼에 비하여 빠르다.

(2) 疲勞균열進展의 下限界값 ΔK_{th} 는 第二相의 체적율이 증가함에 따라, 즉 降伏強度가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 $[\Delta K_{eff}]_{th}$ 는 複合組織鋼의 경우 第二相의 체적율의 변화에 무관하여 $[\Delta K_{eff}]_{th} \approx 4.5 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 의 거의 일정한 값을 보여주며 마르텐사이트組織鋼에 있어서는 이들보다 낮은 값 $[\Delta K_{eff}]_{th} = 3.3 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 를 갖는다.

(3) 균열단합현상은 第二相의 체적율이 증가함에 따라, 또 낮은 ΔK 영역일수록 현저하며 複合組織鋼 A材는 $\Delta K \approx 15 \text{ MPa} \sqrt{m}$, B材는 $\Delta K \approx 20 \text{ MPa} \sqrt{m}$, C材는 $\Delta K \approx 30 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 부근에서부터 균열단합현상이 거의 소멸되어 K_{op}/K_{max} 는 일정한 값에 도달한다.

(4) 균열단합현상은 週期塑性領域의 크기에 대한 破面거칠기의 정도가 클수록 현저하다.

후 기

本 研究수행에 있어서 적극적으로 도와준 金忠明君에게 감사한다.

참 고 문 헌

- (1) G.R. Yoder, L.A. Cooley, T.W. Crooker, 50-Fold Difference in Region II Fatigue Crack Propagation Resistance of Titanium Alloys, A Grain Size Effect, Journal of Engineering and Technology, Trans. of ASME, Vol. 101, pp. 86~90, 1979
- (2) G.R. Yoder, L.A. Cooley, and T.W. Crooker, Observations on Microstructurally Sensitive Fatigue Crack Growth in a Widmanstätten Ti-6 Al-4 V Alloys, Met. Trans., Vol. 8A, pp. 1737~1743, 1977
- (3) G.R. Yoder, L.A. Cooley and T.W. Crooker, Quantitative Analysis of Microstructural Effects on Fatigue Crack Growth in Widmanstätten Ti-6 Al-4 V and Ti-8 Al-1 Mo-1 V, Eng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 805~815, 1979
- (4) V.B. Dutta, 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. 15 A, pp. 1193~1207, 1984
- (5) S. Suresh, Fatigue Crack Deflection and Fracture Surface Contact: Micromechanical Models, Met. Trans., Vol. 16 A, pp. 249~260, 1985
- (6) H. Suzuki and A.J. McEvily, Microstructural Effects on Fatigue Crack Growth in a Low Carbon Steel, Met. Trans., Vol. 10A, pp. 475~481, 1979
- (7) K. Minakawa, Y. Matsuo, and A.J. McEvily, The Influence of a Duplex Microstructure in Steels on Fatigue Crack Growth in the Near-Threshold Region, Met. Trans., Vol. 13A, pp. 439~445, 1982
- (8) J.A. Wasynczuk, R.O. Ritchie, and G. Thomas, Effects on Microstructure on Fatigue Crack Growth in Duplex Ferrite-Martensite Steels, Mater. Sci. Eng., Vol. 62, pp. 79~92, 1984
- (9) J.L. Horng and M.E. Fine, Near-Threshold Fatigue Crack Propagation Rates of Dual Phase Steels, Mater. Sci. Eng., Vol. 67, pp. 185~195, 1984
- (10) S. Suresh, Crack Deflection: Implications for the Growth of Long and Short Fatigue Cracks, Met. Trans., Vol. 14A, pp. 2375~2385, 1983
- (11) 김정규, 황돈영, 박승락, 복합조직강의 피로균열 진전저항에 미치는 미시조직의 영향, 대한기계학회 논문집, 제 8권, 제 1호, pp. 34~40, 1984
- (12) 김정규, 황돈영, 박승락, 피로균열진전속도와 미시파괴기구에 관한 연구, 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 61~64, 1983
- (13) S. Suresh, G.F. Zamiski, and R.O. Ritchie, Oxide Induced Crack Closure: An Explanation for Near Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior, Met. Trans., Vol. 12A, pp. 1435~1443, 1981
- (14) ASTM E 647-83, Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle
- (15) Proposed ASTM Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM STP 738, Appendix II, pp. 341~356, 1981
- (16) G.R. Speich and R.L. Miller, Mechanical Pro-

- erties of Ferrite-Martensite Steels, The Met. Soc. of AIME, pp.145~182, 1979
- (17) 村上, 小林, 小峰, 中澤, 鋼板の疲労き裂速度を支配する微視組織的因子ならびに微視破壊機構の影響, 日本機械学会論文集, 第43巻, 第367号, pp.799~809, 1977
- (18) R.O. Ritchie, Influence of Microstructure on Near Threshold Fatigue Crack Propagation in Ultra-High Strength Steel, Met. Sci., pp.368~381, 1977
- (19) 橋内, 炭素鋼の疲労き裂進展挙動に及ぼす微視組織の影響, 材料, 第29巻, 第325号, pp.64~69, 1977
- (20) O. Vosikovsky, The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in Steels, Eng. Fract. Mech., Vol. 11, pp.595~602, 1979
- (21) R.O. Ritchie and S. Suresh, Some Considerations on Fatigue Crack Closure at Near-Threshold Stress Intensities due to Fracture Surface Morphology, Met. Trans., Vol. 13A, pp.937~940, 1982
- (22) E. Zaiken and R.O. Ritchie, On Development of Crack Closure and Threshold Condition for Short and Long Cracks in 7150 Aluminium Alloy, Met. Trans., Vol. 16 A, pp.1467~1477, 1985
- (23) R.D. Rendse and R.O. Ritchie, A Study of Fatigue Crack Propagation in Prior Hydrogen Attacked Pressure Vessel Steels, Met. Trans., Vol. 16 A, pp.1491~1501, 1985
- (24) Victor W.C. Kuo and E.A. Starke Jr, The Development of Two Texture Variants and Their Effect on the Mechanical Behaviour of a High Strength P/M Aluminium Alloy, X7091, Met. Trans., Vol. 16A, pp.1089~1103, 1985
- (25) G.T. Hahn, R.G. Hoagland, and A.R. Rosenfield, Local Yielding Attending Fatigue Crack Growth, Met. Trans., Vol. 3, pp.1189~1202, 1972