

<論 文>

複合組織鋼의 破壞舉動에 미치는 微視組織 크기의 영향

金 楨 圭*

(1981年 4月 2日 接受)

The Influence of Microstructural Size on the Tensile Fracture Behavior of Dual Phase Steel

Jung Kyu Kim

Abstract

A study has been made of the fracture strength and ductility of the dual phase microstructure, in which the martensitic phase encapsulated islands of ferritic phase in association with the cleavage cracking of ferrite grains.

It was found the final fracture occurred in a brittle manner, starting from the Griffith crack which consisted of the cleavage crack in the ferrite grains and the cracks in second phase.

Furthermore, the effects of the ferrite grain sizes on the Griffith crack were also discussed.

1. 緒 論

近年, 産業의 長足の 발달에 따라 使用材料의 안전성 확보 및 신뢰성의 향상이 중요한 과제로 되어있고, 材料에 충분한 強度와 靱性を 부여하는 것이 材料設計의 基本의 하나로 되어 있다. 한편 實用되고 있는 鋼의 諸性質은 微視組織의 성질이 각각 다른 2개以上の 相으로 구성된 混合組織에 의해 개선되고 있고,⁽¹⁾ 그 一例로서 鋼에 延性を 주는 페라이트相과 鋼의 強化를 발휘하는 말텐사이트相으로 구성된 페라이트-말텐사이트複合組織鋼(dual phase steel)은 자동차의 輕量化 材料로서 최근 세계적으로 주목을 받고 있다.⁽²⁾ 또한 이 鋼의 破壞舉動 및 機械的 性質등에 관해서도 활발히 연구가 진행되고 있다.⁽³⁾⁻⁽¹²⁾ 이를테면 Kunio,⁽³⁾ 金⁽⁴⁾ Davies,⁽⁵⁾ Hayden⁽⁶⁾ 들에 의한 靜的 및 충격破壞舉動 友田,⁽⁷⁾ Kalsson,⁽⁸⁾ 皆川,⁽⁹⁾ 齊藤⁽¹⁰⁾ 들에 의한 變形舉動 및 靱性 그리고 Yamada,⁽¹¹⁾ Suzuki⁽¹²⁾ 들에 의한

疲勞破壞舉動 등이다.

그러나 組織因子와 破壞舉動과의 관련성에 관한 기초적 현상의 파악이 불충분하기 때문에 強度, 延性 등의 諸문제에 대해서는 미해결의 문제가 많다. 이를테면 말텐사이트相이 페라이트相을 완전히 둘러싼 형태를 가진 複合組織鋼(이하 MEF 鋼이라고 함)에 있어서는 劈開크랙의 形成難易가 破壞強度 및 延성을 지배하는 基本적 要因으로 지적되고 있다.⁽⁴⁾

그렇지만, 이들 劈開크랙이 變形과정중 페라이트 結晶粒을 單位로서 안정적으로 形成되어짐을 고려해 보면, 破斷延性의 大小를 지배하는 이들 크랙의 形成難易가 同一하여도 페라이트粒徑의 變化에 따른 劈開크랙의 길이의 大小에 의해서도 破壞舉動에 相違가 생기리라 기대되어 지며, 또한 안정적으로 形成된 크랙이 불안정破壞와 어떠한 관련성을 갖고 있는지 등의 문제에 대해서는 아직도 검토할 여지가 많다.

그래서 本研究에서는 이러한 의문점을 해결하고, 材料개발을 위한 基本적 지식을 얻기 위해 MEF 組織鋼을 준비하여 破壞舉動에 미치는 微視組織의 크기의 영향 및 微視크랙의 形成舉動에 대하여 檢討하였다.

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

2. 實驗方法

微視組織의 크기가 다른 MEF 組織은 SM20C 低炭素鋼(化學成分; 0.2%C, 0.24%Si, 0.47%Mn, 0.16%S, 0.017%P)을 사용하여 以下の 熱處理에 의하여 調整하였다.

먼저, 母相粒徑의 크기를 변화시키기 위해 1000°C에서 6時間(A材), 1100°C에서 3時間(B材), 1200°C에서 1時間(C材) 그리고 1300°C에서 3時間(D材)의 각각 다른 溫度 및 保持時間에서 燒鈍을 행한후, 平行部 길이 10mm, 直徑 $\phi 8$ 의 引張試驗片으로 機械加工을 하였다. 다음에 MEF 組織鋼을 얻고, 破壞學動을 지배하는 因子인 第二相* 體積率 및 形狀, 그리고

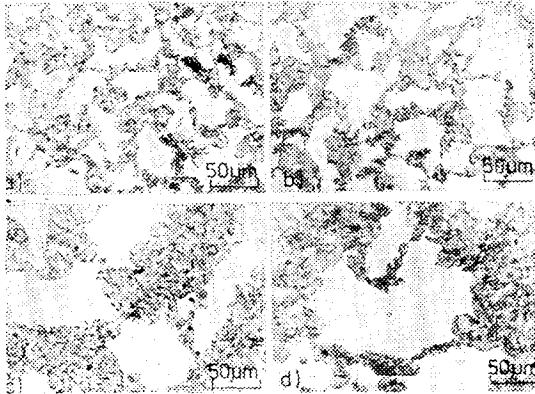


Fig. 1 Martensite encapsulated islands of ferrite (MEF microstructure)

Typical microstructures of dual phase steels.
(a) Series A, (b) Series B, (c) Series C,
(d) Series D

Table 1 Metallurgical properties.

Metallurgical properties	Series			
	A	B	C	D
Ferrite grain size μm	93	35	60	93
Martensite volume fraction %	45	55	30	50
Hardness of martensite Hrc	573	585	595	669
Hardness of ferrite Hf	200	201	199	203
Hardness ratio Hrc/Hf	3.4	3.4	3.3	3.4
Connectivity %	95	95	97	98

* 本 論文에서는 強度, 硬度的 大小에 따라 페라이트 組織을 母相, 마르텐사이트組織을 第二相으로 함.

各相의 強度를 일정하게 하기 위하여 780°C에서 50分間 保持後 空冷하고, 그후 800°C에서 1時間 保持後 물에 담금질 하였다. 그 결과 Fig.1과 같은 MEF 組織을 얻었다. Table 1은 이들 組織의 特性을 나타낸 諸量으로서, 結晶粒徑, 體積率 및 連結度는 線分析法에 의한 下記의 (1)~(3)式, 즉

$$d = \sum_{i=1}^n L_{Fi} / m \quad (1)$$

$$V_M = L_{Lp} = \sum_{j=1}^n L_{Pj} / L_T \quad (2)$$

$$\varphi = N_g / N_g + N_b \quad (3)$$

여기에서

d ; 每相*의 結晶粒徑

V_M ; 第二相* 體積率

φ ; 連結度⁽³⁾

L_{Fi} ; i 번째의 페라이트 結晶粒이 test line 上에서 접하는 길이

L_{Lp} ; Test line 上에 말텐사이트가 접하는 길이

L_{Pj} ; j 번째의 말텐사이트가 test line 上에서 접하는 길이

L_T ; Test line의 전 길이

m ; Test line 上에 존재하는 페라이트 結晶粒數

N_g ; Test line과 말텐사이트 境界와의 交點數

N_b ; Test line과 페라이트境界(단 第二相과의 境界는 제외)와의 交點數

을 이용하였고, 各相의 硬度는 마이크로 비커스(Micro Vickers, 25g, 100點)에 의해 측정된 결과이다. 이와 같은 微視組織을 가진 供試材에 대해서 常溫에서 靜的 引張試驗($\epsilon = 1 \times 10^{-4}$ /sec)을 실시하였다. 또한 負荷變形의 증가에 따른 微視크랙의 발생 및 安定成長은 所定의 크기의 變形率에서 除荷한 후의 試驗片의 表面과 縱斷面을 光學顯微鏡($\times 400$)에 의해 관찰하였고, 破面解析(fractography)은 走査顯微鏡에 의하여 행하였다.

3. 實驗結果 및 檢討

3.1. 強度 및 破斷延性に 미치는 母相粒徑의 영향

Fig. 2는 A,B,C,D材의 應力-變形率曲線이다. 이 Fig.로 부터 巨視的인 變形舉動은 母相粒徑의 大小에 무관계이나 引張強度, 破壞強度 및 斷面收縮率로서 나타내는 破斷延性は 母相粒徑이 微細할수록 增加하는 경향을 보여주고 있다. 또한 Fig. 3은 應力-變形率曲

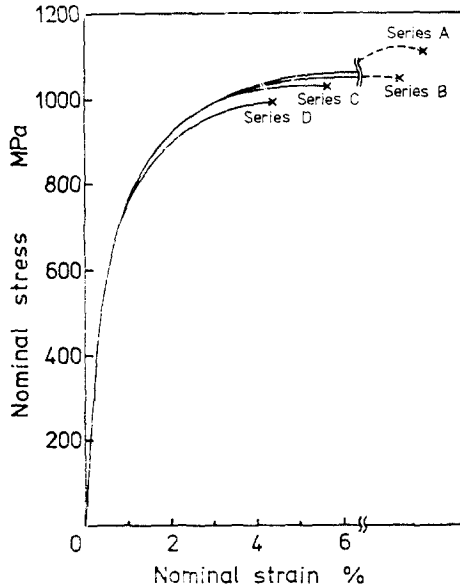


Fig. 2 Stress-Strain relationship of dual phase steels.

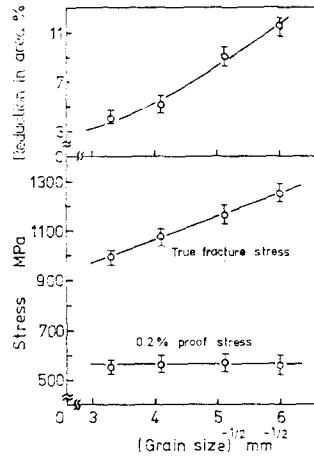


Fig. 3 Mechanical properties of dual phase steels.

線으로부터 이들 鋼의 機械的 性質의 變化를 더욱 명확히 나타내기 위하여 母相粒徑 $d^{-1/2}$ 에 대해서 표시한 결과로서 d 가 微細할수록 破斷延性 및 破壞強度는 增大하고 있고, 특히 破壞強度와 $d^{-1/2}$ 과의 사이에는 직선적 관계임을 알 수 있다. 즉, 母相粒徑이 最小인 A材에서는 破斷延性 11.6%, 破壞強度 1250MPa 임에 반하여, 粒徑이 最大인 D材에서는 破斷延性 4.2%, 破壞強度 930MPa로서 보다 脆性的인 樣相을 나타내고 있다. 한편 0.2%耐力는 Fig. 2, 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 Petch의 式⁽¹³⁾에 따르지 않고 d 의 大

小에 무관제이다.

MEF 組織鋼의 破斷延性 및 破壞舉動은 第二相의 體積率 및 母相과 第二相과의 強度比의 大小에 의해 支配된다⁽⁴⁾고 생각되어져 왔으나, 上述의 結果는 이들 微視因子가 同一하여도 組織의 微細化, 즉 母相粒徑의 大小에도 의존한다고 생각할 수 있다.

그래서, 다음에 이러한 鋼에 있어서 微視組織의 變化가 破斷延性의 大小 및 破壞舉動에 미치는 要因을 찾기위해 各試料의 破面解析 및 微視크랙의 形成舉動에 대하여 검토하였다.

8.2. 破面解析에 의한 檢討

構造物의 破斷面에는 微視破壞의 過程이 기록되어 있고, 이것을 검토함으로써 巨視的 破壞特性을 지배하는 微視크랙의 舉動에 관한 귀중한 정보를 얻을 수 있으므로, ⁽¹⁴⁾ 먼저 各試料의 微視破面에 대해서 破面解析을 행하였다. Fig. 4는 A~D材의 微視破面樣相의 대표 예이다. 同 Fig.로부터 이들 鋼에 있어서는 組織 微細化에 차이가 있음에도 불구하고 모든 供試材의 微視破面은 dimple을 가진 延性的 영역과 river pattern을 동반한 劈開 facet를 主體로 하는 脆性破面이 形成되어 있음을 알 수 있고, 이들은 Fig. 5에 보인 바와 같이, dimple을 가진 영역은 말단사이트크랙이고 劈開 facet는 페라이트 結晶粒의 크랙임을 나타내고 있다. 그러나 母相粒徑이 粗大할수록 劈開 facet의 單位數는 적어지고, 單位 facet의 크기는 粒徑의 大小와 對應關係가 있음을 보여주고 있다. 또한 Fig. 6는 이들

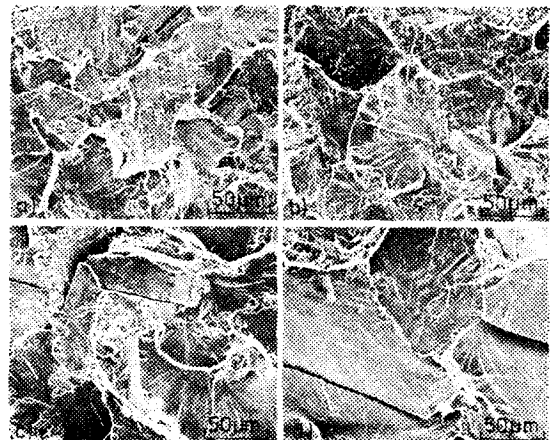


Fig. 4 Scanning electron micrographs of typical fracture surface of (a) series A, (b) series B, (c) series C, and (d) series D specimens, respectively.

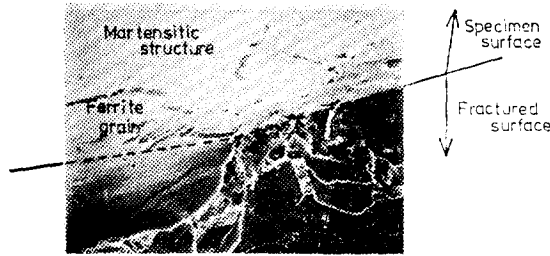


Fig. 5 Scanning electron micrograph showing the correspondence between the fractured surface and the microstructures.

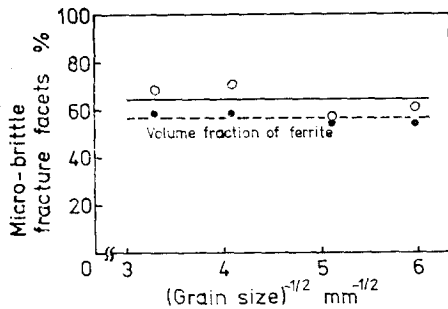


Fig. 6 Relationship between the fraction of cleavage facets and the volume fraction of ferrite as a function of (grain size).^{-1/2}

破面の脆性破面率을 線分析法에 의해 구하여 母相粒徑 $d^{-1/2}$ 에 대해서 표시한 결과로서, 破斷延性の 大小를 지배하는 脆性破面率は 粒徑의 大小에 의존하지 않고, 그리고 이들은 페라이트 體積率(面積率)보다 높은 값을 나타내고 있다. 以上の 결과로부터 이들 供試材의 巨視的 破壞舉動은 모두가 脆性的 樣相을 나타내고 있다고 할 수 있고, 또한 破斷延性 및 破壞強度의 차이는 微視破壞舉動의 相違에 의존한다고 생각되어진다.

3.3. 微視破壞舉動의 母相粒徑 의존성

먼저, 應力-變形率 曲線상의 最大荷重點 直下에서 除荷한 C材의 表面 및 縱斷面에서 관찰한 微視크랙의 樣相에 대하여 설명한다. Fig. 7은 이 段階에서 안정적으로 형성된 수많은 크랙중의 1例를 보인 것이며, 이들 微視크랙의 樣相을 종류별로 분류하여 模式圖로서 나타낸 것이 Fig. 8이다.

同 Fig.에서 F Type는 페라이트粒의 劈開크랙만이 존재하는 형태, FM Type는 劈開크랙과 第二相크랙이 연결되어 있는 형태, M Type는 第二相크랙만이

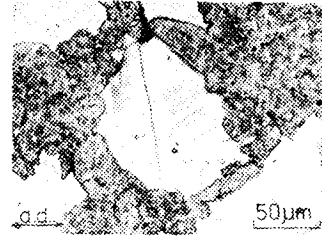


Fig. 7 Example of leavage crack in the ferrite grain formed surface. The specimen. (series C: unloaded from 1009 MPa)

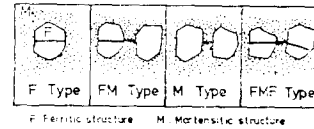


Fig. 8 Schematic illustration of microcrack aspects.

존재하는 형태 그리고 FMF Type는 第二相크랙을 사이에 두고 2개의 劈開크랙이 연결되어 있는 형태를 가리킨다. 이러한 微視크랙의 樣相에 있어서 MEF組織鋼의 破斷延性は 劈開크랙의 形成舉動과 밀접한 관계가 있다⁽⁴⁾는 점을 고려하여, 다음에 母相페라이트粒의 劈開크랙의 形成 과정에 대하여 주목하여 검토하였다. Fig. 9는 單位面積(1cm²)에 形成된 劈開크랙의 數를 負荷變形率에 대해서 표시한 결과이다. 同 Fig.로부터 劈開크랙은 負荷變形率의 增大와 함께 直線的으로 增加하지만 破斷延性の 大小와 관련이 있는 그 直線의 勾配, 즉 劈開크랙의 增加率⁽⁴⁾($\alpha_F = \Delta N_F / \Delta \epsilon$)은 粒徑의 大小에 관계없이 거의 일정하고, 또한 破斷點에 있어서 예상되는 크랙은 粒徑이 組大化할수록 적은 數임을 알 수 있다. 한편 粒徑이 클수록 單位面積內에 존재하는 結晶粒의 數가 적어지므로 結晶粒徑이 각각 다른 試料에 있어서는 負荷變形率에 대한 크랙의 數가 동일하여도 破壞舉動에 미치는 영향에는 相違가 있다고 생각된다. 그래서 單位面積內에 존재하는 페라이트 結晶粒의 數 N 에 대한 劈開크랙의 數 N_F , 즉 劈開크랙의 形成率 $R_c (= N_F / N)$ 를 정의하여 이것을 負荷變形率에 대해서 표시하였다. 이 결과를 Fig. 10에 나타내지만 R_c 는 負荷變形率의 增加와 함께 直線的으로 上昇하고, 또한 그 경향은 粒徑이 클수록 현저함을 알 수 있다. 여기에서 이들 劈開크랙은 Fig. 7에서 보인 바와 같이 페라이트 結晶粒을 單位로 하여 形成되므로 R_c 가 높을수록 안정적으로 形成된 劈開크랙의 數는 길어지고 破斷點에 있어서도 마찬가지로 생각할 수 있다. 따라서, 負荷變形率의 增大에 따라 안정적으로

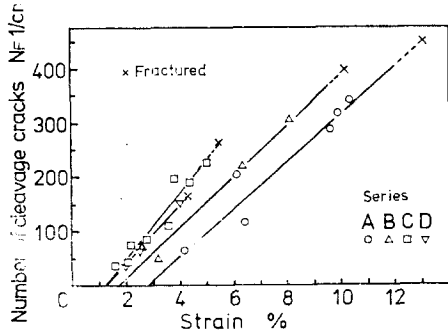


Fig. 9 Increasing rate of the number of cleavage cracks as a function of applied strain.

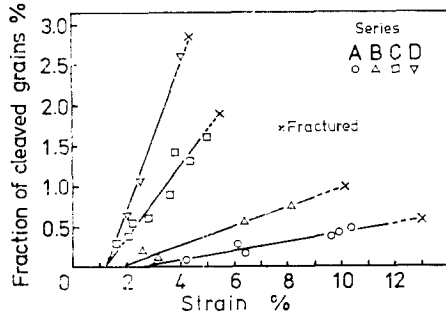


Fig. 10 Fraction of cleaved ferrite grains as a function of applied strain.

形成된 劈開크랙은 第二相 크랙과 함께 그 數를 增加하고, 더욱 연결하여 어떤 一定值의 크랙길이, 즉 臨界 크랙길이에 달했을 때 불안정破斷이 일어난다고 생각할 수 있다. 즉, 불안정 破斷을 誘導하는 臨界크랙의 길이는 粒徑이 클수록 길어지고, 이때 필요로 하는 劈開크랙의 數는 적어진다고 할 수 있다.

이렇게 해서, 組織의 微細化에 따른 MEF 組織鋼의 破斷延性 및 破斷強度의 相違는 安定적으로 形成된 微視크랙의 연결에 의한 最終破斷을 誘導하는 臨界크랙 길이의 大小에 의해 지배된다고 생각되어 진다.

3. 4. 破斷延性和 Griffith 破斷條件과의 관계

本節에서는 이들 鋼의 破斷延性 및 破斷強度와 臨界 크랙길이의와의 關係를 더욱 明確하게 밝히기 위하여 前節까지의 실험결과로부터, 本 複合組織鋼의 破壞舉動을 平面變形狀態의 Griffith 破斷條件式⁽¹⁵⁾

* 第二相의 두께는 페라이트粒徑의 變化에 따른 값으로, MEF 組織을 二重球(compound sphere)로 想定하여 간단한 기하학적 계산으로부터 구함.

$$\sigma_F = \left[\frac{G_{IC} \cdot E}{\pi(1-\nu^2)c} \right]^{1/2} \tag{4}$$

여기에서 σ_F ; 破斷應力

G_{IC} ; 平面變形狀態의 破壞韌性

E ; 彈性係數

ν ; 포와송 比

c ; Griffith 크랙 길이의 半

을 도입하여 검토하였다.

먼저 上式에 있어서 σ_F 는 各試料의 破斷應力을, 그리고 G_{IC} 는 MEF 組織鋼의 破壞韌性值 K_{IC} ⁽¹⁶⁾로 부터 Griffith 크랙 ($2c$ =臨界크랙길이)을 산출하였다. 그 값을 母相粒徑 $d^{-1/2}$ 에 대해서 표시한 결과가 Fig.11 이나, 母相粒徑이 粗大化 할수록, 결국 보다 脆性的 일수록 臨界크랙길이는 길어지고, 이들은 페라이트 結晶粒徑의 數倍의 값을 알 수 있다.

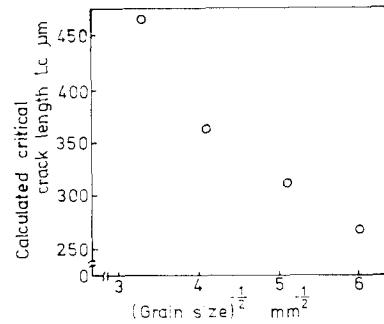


Fig. 11 Relationship between calculated critical crack length and (grain size)^{-1/2}

이것은 前節에서 說明한 바와같이 最終破斷은 몇개의 微視크랙의 合體에 의한 것임을 의미하고 있다고 할 수 있다.

그래서, Griffith 破斷條件을 만족시키는 臨界크랙길이와 이를 구성하는 劈開크랙을 가진 結晶粒의 數를 다음과 같이 하여 구하였다. 즉 페라이트 結晶粒은 t^* 의 두께를 가진 第二相 말단사이트에 의해 둘러싸여 있는 形狀에 주목하고, 또한 變形過程中, 脆性的破斷舉動을 나타낼수록 第二相 크랙보다 母相 劈開크랙이 많이 形成된다⁽⁴⁾는 점을 고려하여 Fig. 12와 같은 模式圖에 의해 次式으로 부터 구하였다.

$$L_c = (d+2t)N_f - 2t \tag{5}$$

그 결과가 Table 2이다. 同 Table로부터, 臨界크랙길이의 形成에 필요로 하는 劈開크랙의 數는 粒徑이 微細化 할수록 많아지고, 각각 8, 7.5 및 4임을 알 수 있다. 따라서 불안정 破斷은 이 정도의 페라이트粒에

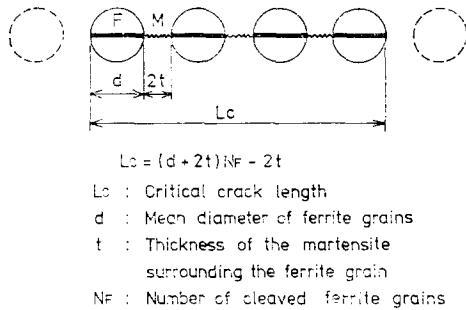


Fig. 12 Schematic illustration of critical crack length.

Table 2 Estimated number of cleaved ferrite grains calculated from Griffith equation.

Series	Ferrite grain size d μm	Thickness of second phase t μm	$L_c (=2c)$ μm	N_f
A	28	4.2	270	8 (7.6)
B	38	5.7	312	7 (6.5)
C	60	10.6	364	5 (4.7)
D	93	16.0	432	4 (3.7)

L_c : Critical crack length (Griffith crack length $2c$)
 N_f : Number of cleaved ferrite grains
 () : Calculated value of the No. of ferrite from the equation (2)

형성된 劈開크랙이 母相을 둘러싼 第二相의 크랙과 함께 연결되어 Griffith 크랙길이, 즉 臨界크랙의 길이에 달했을 때 일어난다고 생각 되어진다.

다음에 이들의 관계를 더욱 밝히기 위하여, MEF組織鋼의 2개의 試驗片을 각각 준비하여 검토하였다. 즉, 하나는 破斷直前に 除荷한 것이고, 또 다른 하나는 破壞한 試驗片이다. 前者에 있어서는 이 試驗縱斷面에 대하여 주의깊은 관찰을 행한 결과, 上述과 같은 크랙은 관찰되지 않았다.

그러나 後者の 試驗片에 있어서는 Fig. 13에 代表例를 보인바와 같이 破斷面近傍의 縱斷面에 있어서 A材: 5~7, B材: 4~6, C材: 3~4 및 D材: 2~3의 劈開크랙이 第二相 크랙과 함께 연결한 微視크랙이 관찰되었다. 따라서 불안정 破壞를 誘導하는 臨界크랙의 길이는 최소한 이들 縱斷面에서 관찰된 크랙의 길이보다 길어야만 하는 것으로, 이들 實驗結果는 上述의 理論値와 좋은 對應關係가 있음을 알 수 있다. 따라서 以上の 結果로부터 組織微細化에 따른 MEF組織鋼의 破壞舉動의 相違는 臨界크랙길이의 大小에 의해 지배되어지며, 이들의 관계는 平面變形率狀態에 있어서의 Griffith 破壞條件에 의해 설명될 수 있다고 생각된다.

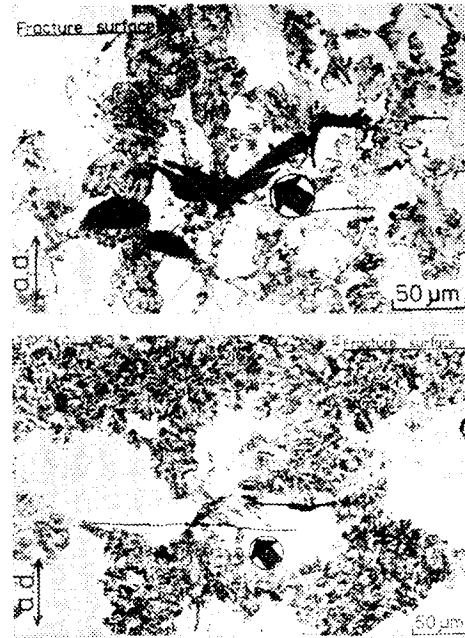


Fig. 13 Typical coalesced microcracks observed on the longitudinal sections near fracture surface of tensile specimens (above: series A, below: series D).

4. 結 論

MEF組織鋼에 있어서, 組織因子의 微細化가 破壞舉動에 미치는 영향을 검토하고, 또한 이들의 영향을 Griffith 破壞條件을 이용하여 考察을 행하였다. 그 結果를 요약하면 다음과 같다.

1) 破斷延性 및 破壞強度는 組織의 微細化에 의하여 改善되어진다. 즉 組織이 微細化할수록 破斷延性 및 破壞強度는 상승하며, 특히 破壞強度는 母相粒徑의 $(d)^{-1/2}$ 에 대하여 直線的인 경향을 나타낸다.

2) 本研究의 組織의 범위에 있어서 破壞樣式은 어느 것이나, river pattern을 동반한 劈開크랙을 主體로 하는 脆性的이다.

3) 이들의 破斷延性 및 破壞強度의 低下는 제라이트粒의 劈開크랙과 第二相크랙이 연결하여 이루어진 臨界크랙길이의 大小에 기본원인이 있고, 이들 크랙의 길이는 組織이 微細化 할수록

짧아진다.

4) 上述의 臨界크랙길이의 大小와 破壊學動의 相違와의 關係는 Griffith 破壞條件에 의해 설명되어진다.

參 考 文 獻

- 1) 鈴木, 國尾, 複合組織을 有する 鋼의 微視的 破壞學動에 對하여, 金屬學會報, Vol. 14, pp. 665~671, 1975.
- 2) 丸山, 自動車가 輕くなる 複合組織鋼, Nikkei Mechanical, Vol. 4, pp. 42~46, 1979.
- 3) T. Kunio, et al. An Effect of the Second Phase morphology on the Tensile Fracture Characteristic of Carbon Steel, Eng. Fract. Mech. Vol. 7, pp. 411~417, 1975.
- 4) 金, 國尾外 3名, マルテンサイト-フェライト複合組織鋼의 延性·脆性遷移學動을 支配する 第二相의 役割에 對하여, 日本機械學會論文集(A), Vol. 45, No. 393, pp. 415~422, 1979.
- 5) R.G. Davies, Influence of Martensite Composition and Content on the Properties of Dual Phase Steels, Met. Trans., Vol. 9A, pp. 671~679, 1978.
- 6) H.W. Hayden and S. Floreen, The Influence of Martensite and Ferrite on the Properties of Two Phase Stainless Steels having Microduplex Structure, Met. Trans., Vol. 1, pp. 1955~1970.
- 7) 友田外 2名, 二相混合組織鋼의 引張變形學動에 對하여, 鐵と鋼, Vol. 61, No. 1, pp. 107~117, 1975.
- 8) B. Karlsson and B.O. Sundström, Inhomogeneity in Plastic Deformation of Two-Phase Steels, Mat. Sci. Eng., Vol. 16, pp. 161~167, 1974.
- 9) 皆川, 國尾外 2名, 破壊じん性を 支配する 金屬組織因子의 研究, 日本機械學會論文集, Vol. 41, No. 351, pp. 303~3038, 1975.
- 10) 齊藤, 內山, 二相混合組織をもつ 0.2% C-Ni-Cr-Mo 鋼의 引張特性と 破壊靱性에 對하여, 鐵と鋼, Vol. 63, pp. 478~487, 1977.
- 11) K. Yamada and T. Kunio, Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Nonpropagating Fatigue Cracks in Martensitic-Ferritic Structure, ASTM STP 675, pp. 342~370, 1979.
- 12) 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.
- 13) N.J. Petch, The Cleavage Strength of Polycrystals, JISI, Vol. 174, pp. 25~28, 1953.
- 14) SEM/TEM Fractography Handbook, Metals and Ceramics Information Center, pp. 5~22, 1975.
- 15) G.R. Irwin, Structural Mechanics, Pro. 1st Sympo. on Naval Structural Mechanics, Fracture Mechanics, Pergamon, pp. 557~565, 1960.
- 16) 井出外 3名, 安定き裂成長을 考慮した 複合組織鋼의 破壊靱性評價에 對하여, 日本機械學會講演論文集, No. 184, pp. 64~64, 1978.