

微視的破壞現象으로 본 材料開發의 기본

金 楨 圭

〈漢陽大 工大·工博〉

1. 序 言

近年, 산업의 발달에 따라 材料의 사용조건이 多種多樣化하였기 때문에 사용材料의 安全性와 보 및 信賴性향상이 중요한 과제로 되었고, 따라서 強度 및 韌性 등에 대하여 사용목적에 맞는 특성을 가진 재료의 연구, 개발이 활발히 계속되어 지고 있다¹⁾.

構造物用的 材料로서 가장 널리 사용되고 있는 金屬材料 특히 鐵鋼에 있어서는 變態라고 하는 현상이 있어, 이것에 의한 微視組織學的構造의 변화에 의해 高強度 및 高韌性 등이 향상되고 있다²⁾. 이러한 과정으로서, 微視組織의 성질이 각각 다른 2개의 相(phase)으로 구성되어 있고, 또한 各相의 크기가 結晶粒徑 정도 ($10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$)인 이른바 複合組織으로 구성된 鋼에 대하여 많은 관심을 기울이고 있다³⁾. Martensite-Austenite, Martensite-Ferrite 등의 組織을 가진 담금질 硬化한 鐵鋼을 비롯하여 2相 Stainless 鋼, 9% Ni 鋼 등 각종 複合組織이 생기는 경우가 적지 않다. 그러나, 이들 複合組織鋼이 外力에 대하여 어떠한 變形 및 破壞舉動을 나타내는가에 대해서는 명확히 파악되어 있지 않으며, 또한 이들 複合組織을 가진 鋼의 強度, 延性 및 韌性 등에 관한 知見은 불충분한 상황이다.

이와같이, 複合組織鋼의 機械的性質 및 破壞舉動이 명확히 파악되고 있지 않은 이유로서는

① 外力에 대하여 單相에서 존재하는 경우와 같이 자유로운 變形을 할 수 없기 때문에 各相間에 力學的拘束性이 作用하고, 또한 이것에 미치

는 微視組織因자의 영향이 體系化되어 있지 않음. ② 各相의 微視的破壞過程과 巨視的破壞過程과의 관련성의 파악이 불충분함에 있다고 생각되어 진다.

本稿는 高強度, 高韌性 材料開發의 基本을 찾기 위해 複合組織鋼의 微視 crack 形成舉動과 巨視的破壞舉動에 주목하여 이들이 組織內의 各相의 性質, 分布상태에 의해 어떠한 영향을 받는가에 대한 연구를 중심으로 記述하고자 한다.

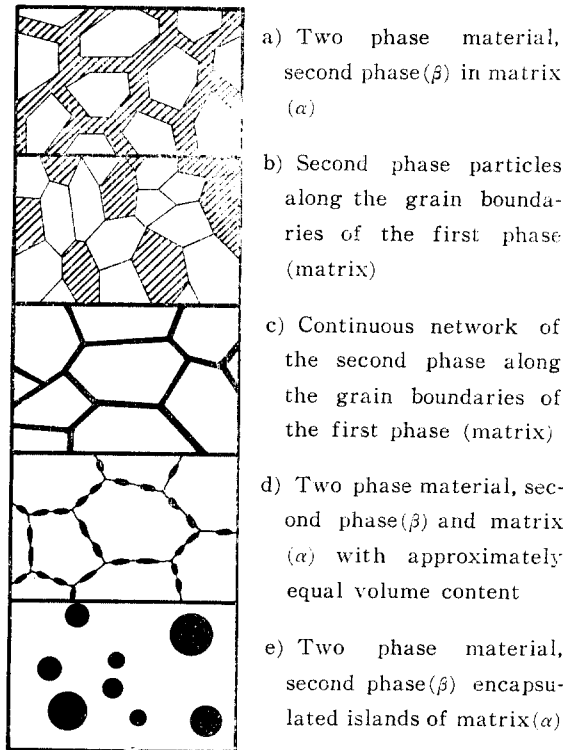


Fig. 1. Some types of microstructures of metallic materials,

本稿에서는 複合組織鋼을 구성하는 2개의 相을 硬度(혹은 降伏強度)의 大小에 의해 각각 第二相(second phase)과 母相(matrix)이라 부른다.

2. 微視 crack의 形成舉動

本文의 목적과 그 내용을 보다 쉽게 이해하기 위해, 먼저 硬質粒자를 가진 鋼의 微視的 破壞舉動에 대하여 간단히 설명한다.

일반적으로 鋼의 微視組織內에는 Fig. 1⁴⁾에 나타낸 것처럼 各種의 같은 相이 여러가지 分布형태를 가지고 구성되어 있고 이들이 破壞의 進행 과정에 있어서 支配的인 역할을 하고 있음이 밝혀져 있다. 鋼의 強度, 延性 및 韌性 등은 微視的 破壞過程과 밀접한 관계가 있고, 이들은

- (1) Crack의 核形成
- (2) Crack의 核成長
- (3) Crack의 傳播

의 3단계로 나누어 지고 있지만 보다 근본적으로는 Fig. 2에서⁵⁾ 보인 바와 같이 ① 微小空洞의 成長, 合體(slip 面分離) ② Cleavage라고 하는 2개의 基本機構로 나눌 수 있다. 따라서 強度, 延性 및 韌性 등의 향상은 이들 微視破壞舉動의 파악에 커다란 의미가 있다고 할 수 있다. 그래서 以下에 있어서는 이들 2개의 基本機構의 過

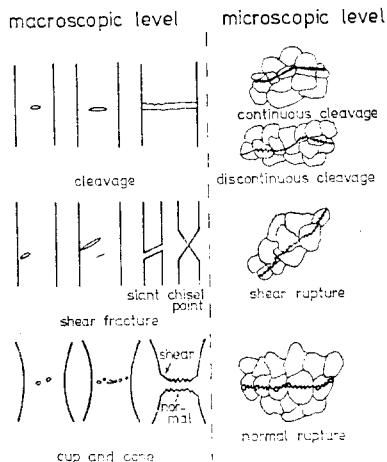


Fig. 2. Macroscopic and Microscopic level of fracture.

程에 미치는 微視組織의 要因의 영향을 중심으로 조사해 보기로 한다.

2.1. 微小空洞의 成長, 合體機構

이 機構에 있어서 最終破斷의 核으로 되는 微小空洞은 보통 第二相粒자를 起點으로 해서 形成되어 진다. 따라서, 微小空洞의 形成, 成長, 合體舉動에 미치는 第二相의 性質, 크기, 分布 상태 등의 영향을 아는 것이 가장 중요한 사항이 된다. 먼저 微小空洞의 形成에 대하여 說明한다.

第二相粒자를 起點으로 하는 微視空洞의 形成에는 1) 粒子界面의 分離⁶⁾ 2) 粒子自身の crack에 의한 것⁷⁾의 2종류의 形式이 존재하며, 이들은 轉位(dislocation)의 集積에 의한 應力集中效果에 의한 것으로 이들의 微小空洞이 어느 形式에 의한 것인가는 粒子의 強度, 境界의 接着力, 轉位の 舉動 등에 의해 좌우된다. 이와같은 關係에 의하면 第二相粒자는 다음과 같이 分類된다.⁸⁾

가) 接着性의 弱한 脆性粒子(例, 鐵中の 硫化物, 粉末冶金材料中の 酸化物)一界面의 분리에 의해 空洞形成.

나) 接着性이 強固한 脆性粒子(例, 鋼中の 球狀化炭化物)一粒子自身の crack에 의해 空洞形成.

한편, 微小空洞의 形成에 대하여 현저한 영향을 미치는 要因은 第二相粒자의 크기임이 알려져 있다. FeO 系介在物을 가진 純鐵시험편에 의한 小林⁹⁾의 實驗結果에 의하면, 微小空洞의 形成은 이 介在物과 母相과의 境界에 있어서 분리로부터 생기지만 空洞의 形成에 사용되는 介在物의 最小 크기는 0.3 μ m임이 밝혀져 있다.

끝으로, 空洞의 形成, 合體機構에 미치는 第二相粒자의 形狀의 영향을 대해서 살펴보자, Al 合金¹⁰⁾에 있어서, 球狀化粒子 보다 가늘고 긴 粒子가 crack의 形成이 쉽다. 따라서 球狀化粒子는 鋼의 破斷延性を 증가시키며 또한 韌性を 向上시킨다. 그러나 粒子의 微細化에 따라 平均 粒子의 間격에 변화가 일어나면 다음과 같은 문제점이 생긴다. 즉, 微小空洞의 合體는 空洞의

□ 解 說

起點이 되는 二相粒子的 平均間격이 작을수록 용이하기 때문에 破斷延性 및 韌性的 低下를 가져오게 되므로, 第二相粒자를 球狀化해서 分散할 경우, 粒자의 間격에 주의가 필요한 것이다.

2.2. Cleavage crack의 形成機構

일반적으로 cleavage crack가 形成되기 위해서는 그 領域內에서 수직引張應力이 임계치까지 上昇하는 것이 필요하다. 이 應力上昇을 가져오는 要因으로서는 溫度的 低下, 變形速度등의 增大에 따르는 降伏應力의 上昇이외에, 第二相의 形狀, 크기, 分布상태, 母相의 性質등에 의한 微視的 尺度에서의 塑性變形의 不均一, 더불어 巨視的 意味에서의 塑性變形의 구축에 의한 力學的 效果를 생각할 수가 있다.

이러한 意味에서의 應力上昇의 例로서는 ① 結晶粒界에서 阻止된 slip band와 先端에서 應力集中,¹¹⁾ 또는 ② 예리한 notch와 crack가 존재하는 경우에 나타내어 지는 수직應력의 상승¹²⁾ 등이 대표적이라 할 수 있다.

Slip band의 先端에서의 應力集中현상에 의한 cleavage crack의 形成舉動에 있어서는 Fe-C 合金의 低溫脆性이 잘 알려져 있다. ^{13~18)} Mc-Mahon¹³⁾들은 低溫에 있어서 第二相 cementite의 初生 crack이 cleavage crack으로서 母相 ferrite 中에 계속해서 擴大할 것인가 어떤가는 crack의 先端에 있어서 母相의 塑性流動에 의한 應力緩和가 抑制될 것인가 어떤가에 따라 支配된다고 지적하고 있다. 또한, 그이는 應力緩和가 抑制될 경우, 第二相 crack이 cleavage crack으로서 급격히 擴大할수 있는 第二相粒자의 크기는 平面變形率의 Griffith 式

$$\sigma = \left[\frac{2E\gamma}{(1-\nu^2)\pi C} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

E; 彈性係數, γ ; 表面 energy

ν ; Poisson's比, 2C; Griffith crack의 길이를 利用한 계산에 의해 3~4 μ m임을 보고하고 있다.

한편, Smith,¹⁷⁾ Oates¹⁸⁾들은 Fig. 3에서 보인 바와 같은 crack 形成 model을 提唱하고, 轉位の 集積에 의해서 形成된 第二相 crack이

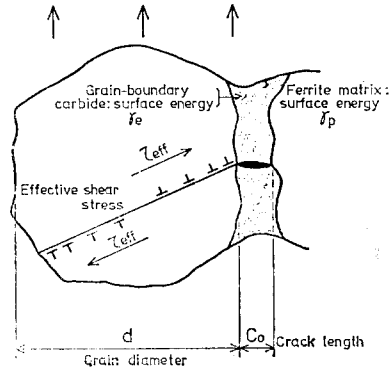


Fig. 3. Model for cleavage fracture initiation in a grain-boundary carbide

母相에 擴大하기 위한 條件으로서 次式을 밝히고 있다.

$$\left(\frac{C_0}{d} \right) \sigma_F^2 + \tau_{eff}^2 \left[1 + \frac{4}{\pi} \left(\frac{C_0}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\tau_i}{\tau_{eff}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] > \frac{4E\gamma_F}{\pi(1-\nu^2)d} \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, σ_F ; crack의 擴大에 要求되어 지는 應力의 임계치.

$\tau_{eff} = \tau_y - \tau_i$ 로서, τ_y ; 剪斷降伏應力
 τ_i ; 摩擦應力

式(2)의 左邊 第1項은 負荷應力에 의한 기여이고, 第2項은 轉位에 의한 기여이다. 上式으로부터, 第二相 crack이 擴大하기 위해서는 母相의 降伏을 지배하는 因子, 母相粒徑 및 第二相의 두께가 중요한 역할을 하게 되고, 第二相 두께를 크게하면 cleavage crack의 形成을 초래하여 破斷應力 및 韌性的 低下를 가져오게 됨을 쉽게 이해할 수 있다.

3. 複合組織鋼의 微視的 및 巨視的 破壤舉動

지금까지 설명한 破壤樣相은 第二相이 硬質粒子인 경우로서, 이들의 破壤舉動에 관한 사항을, 第二相이 어느 정도 延性を 가진 複合組織으로된 鋼의 舉動에 그대로 적용해서 이해하는 것은 곤란하다. 그러나 그 과정에 있어서 母相이 延性的일까 脆性的일까에 따라 破壤舉動에

차이점이 생김을 고려해 보면, 이들 鋼에 있어서도 第二相의 形狀, 分布상태에 따라 微視的 破壞舉動에 相異點이 보여 지리라 생각된다.

本章에서는 最近, 自動車の 輕量化的의 요구에 따라 日本의 新日本製鐵, 日本鋼管, 川崎製鐵에 있어서 실용화를 위하여 연구가 진행되고 있는 model 鋼으로서, 기대로부터 “현실”에 크게 전환할려고 하고 있는 martensite-ferrite 複合組織鋼¹⁹⁾ (以下, M-F 鋼이라 함)을 준비하였다. Fig.4는 新日本製鐵과 日本鋼管에서 행하고 있는 이들 鋼의 熱處理과정을 나타낸 代表例이다.¹⁹⁾ 즉, ferrite-pearlite 亞共析鋼은 ferrite와 austenite가 共存하는 A₁~A₃ 變態點사이의 온도에서 急冷하면 martensite 變態가 일어나고 ferrite 相과 martensite 相의 複合組織이

	新日本製鐵	日本鋼管
設 備	冷延鋼板用連續 燒鈍 LINE CAPL	冷延鋼板用連續 燒鈍 LINE CAL
添加元素	Mn	Si and/or P

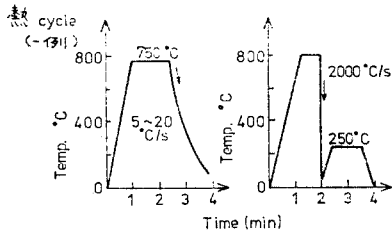


Fig 4. Heat treatments of dual phase steels.

된다. Martensite 組織은 引張強度 120kg/mm² 이상의 相으로 鋼의 強化를 발휘하고, Ferrite 組織은 引張強度 30~50kg/mm²로서 鋼에 延性を 주는 역할을 한다. 이와 같은 相으로 구성된 複合組織鋼은 最近, 10年間 日本을 비롯한 外國에서, 微視組織因子와 強度 및 延性과의 관계에 대해서는 田村²⁰⁾, 富田²¹⁾, 金²²⁾, Davies²³⁾들에 의하여, 靜的 및 충격破壞舉動과의 관계에서는 Carins,²⁴⁾ Hayden,²⁵⁾ Kunio²⁶⁾ 들에 의하여, 變形舉動에 대해서는 友田,²⁷⁾ 鈴木,²⁸⁾ Kalsson,²⁹⁾ 金,³⁰⁾ 등에 의하여, 靱성에 관해서는 皆川,³¹⁾

齋藤³²⁾들에 의하여 활발히 연구되어져 있다. *

以下에서는, 이들 鋼의 破壞舉動, 強度, 延性 및 靱성에 미치는 微視的 要因中, 第二相의 形狀 및 性質의 영향에 초점을 두고 이들 연구결과가 재료개발에 어떠한 의미와 유효성을 갖고 있는가에 대하여 생각해 보기로 한다.

3. 1. 變形, 破壞舉動 및 強度, 延性

第二相 martensite 組織의 形狀 및 性質은 鋼의 機械的 性質 및 破壞舉動에 중요한 역할을 한다.

먼저, 第二相의 形狀에 기인한다고 생각되어지는 變形舉動과 破壞樣式과의 관련성에 대하여 검토한 연구결과^{26) 28)}를 간단히 소개한다.

母相 ferrite의 結晶粒徑, 第二相의 體積率 및 各相의 硬度가 同一한 경우라 할지라도, 第二相의 形狀에 孤立形(Fig.5-a의 熱處理過程에서 얻어지는 組織으로 第二相이 母相에 둘러싸인 Fig. 1-d의 形狀) 또는 連結形* (Fig.5-b의 과정에서 얻어지는 組織으로 第二相이 母相을 둘러싼 Fig. 1-e의 形狀)이라고 하는 形狀의 차이가 있으면, 이들 鋼의 破壞舉動은 常溫, 靜的 下에서, 前者에 있어서는 ferrite 中의 現저한 塑性流動에 의해 初生 第二相 crack의 확대가 저지되어 延性的인 樣相을 나타냄에 반하여, 後者에 있어서는 母相 ferrite의 塑性變形이 第二相에 의해 억제

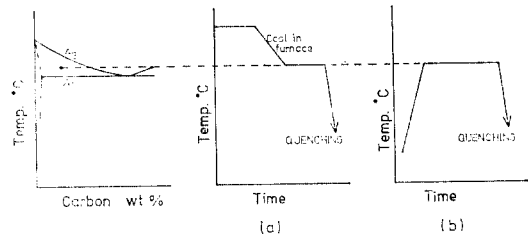


Fig. 5. Process of the heat treatment (a) for type FEM microstructure (ferrite encapsulated islands of martensite), (b) for type MEF microstructure (martensite encapsulated islands of ferrite).

* 疲勞舉動에 있어서는, Suzuki,³³⁾ Yamada³⁴⁾들의 報告가 있다.

□ 解 說

되어 {110} 면에 한정된 planar slip을 일으키고, 또한 第二相 crack이 cleavage crack으로서擴大하여 脆性的인 樣相을 나타내게 된다. 이들의 微視的 破壞舉動을 圖式的으로 나타낸 것이 Fig. 6 이고, 이들 鋼의 微視的 破面樣相이 Fig.7-a, b 이다.

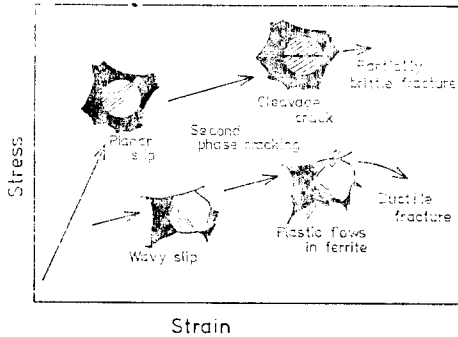


Fig. 6. Schematic illustration of microscopic fracture processes.

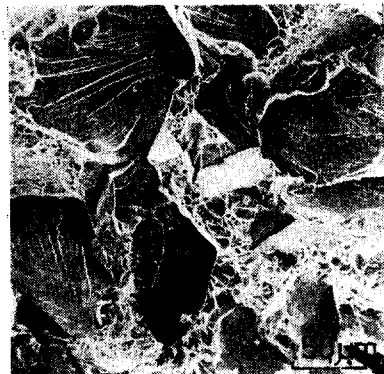
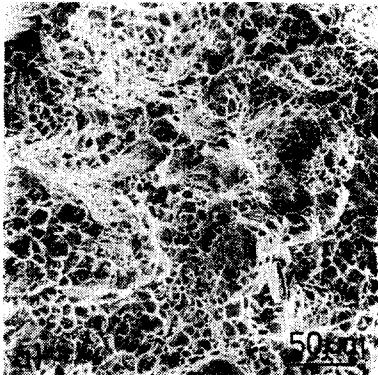


Fig. 7. Scanning electron micrographs of fracture surfaces (a: FEM microstructure b: MEF microstructure).

또한 이들 鋼의 機械的性質에 있어서도 上述의 破壞舉動의 樣相에 對應하여, 前者에 있어서는 降伏 및 引張強度가 낮은 반면 破斷延性이 높은 延性的인 舉動을, 後者에 있어서는 破斷延性이 낮고 降伏 및 引張強度가 높은 脆性的인 舉動을 나타낸다.

결국, 본래 energy 흡수원이 되어야 하고, 延性이 풍부한 ferrite 相이 높은 強度를 가진 Fig.1-e에서 보인 바와 같은 連結形의 組織中에 있어서는 常溫상태라 할지라도 용이하게 cleavage crack를 이르게 하여 energy 흡수원을 하지 않아 鋼의 延性을 低下시키게 하고, 孤立

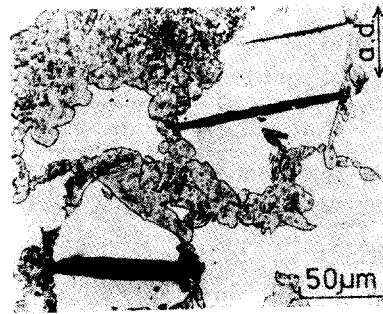


Fig. 8. Example of cleavage cracks in the ferrite grain formed inside the specimen.²²⁾

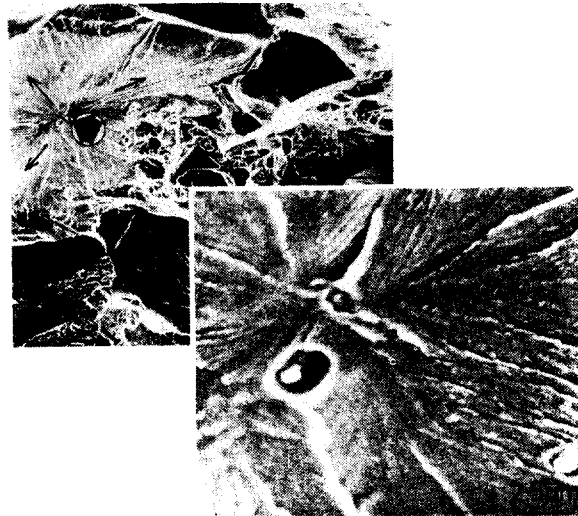


Fig. 9. Example of cleavage initiation at a nonmetallic inclusion indicated by broad arrow. Slender arrows indicate micro-fracture direction.³⁵⁾

形에 있어서는 延性으로서 本來의 역할을 하게 됨을 알 수 있다. Fig.8은 連結形에 있어서 縱斷面에 형성한 母相 cleavage crack의 代表例이다. 이들 cleavage crack은 前章에서 설명한 Fe-C 合金의 cleavage crack의 形成舉動과 마찬가지로 第二相 martensite의 crack으로 부터 擴大되어지는 경우도 많지만 이 機構 以外에, Fig.9에서 보인 바와 같이, 粒內에서 river pattern의 起點을 가진 cleavage facet가 破面上에 觀察되어 지기 때문에 母相 cleavage crack은 第二相 crack과는 關係없이 形成되어지는 경우도 적지 않음을 알 수 있다.³⁵⁾

이와같이, 第二相의 連結性的 存在에 의해, 常溫에서도 cleavage crack를 동반하는 脆性的인 舉動을 나타내는 基本的要因으로서는 降伏強度가 큰 第二相의 形狀에 기인한 降伏強度가 낮은 母相의 塑性拘束性에 의한 것으로 설명되고 있다.

한편, 이러한 變形拘束이라고 하는 생각에 따르면 ferrite를 둘러싼 第二相의 두께 및 強度의 大小가 함께 塑性拘束性에 기여하여야 한다고 생각된다. 金²⁹⁾들은 이點에 着目하여, 塑性拘束性은 第二相形狀만이 아니고, 第二相의 두께 및 強度에도 의존하고 있음을 定量的으로 評價하였다. 또한 이들 微視組織的因子的 變化에 따르는 破斷延性的 相異는 ferrite의 cleavage crack의 形成難易와 밀접한 關係가 있고, 또 이들의 形成難易를 支配하는 微視的要因은 上述의 塑性拘束性에 의해 생기는 內部應力^{28,30)}과 담금질할 때 martensite 變態에 의한 比容積의 變化로 부터 생기는 微視的 內部應力³⁵⁾에 의한 母相粒內의 應力上昇을 상세히 밝혔다.

3.2. 破壞靱性

從來, 2개의 相으로 構成되어 있는 複合組織鋼의 破壞靱性은 完全담금질한 martensite 鋼에 비하여 劣化한다고 생각되어져 왔다.³⁵⁾ 그러나,

* 완전한 連結形의 製作은 A₁~A₃ 變態點사이의 담금질溫度 이하에서 일정時間 保持하여 空冷한 後, 담금질을 행한다.

最近, 주목되어지는 것은 複合組織에 의한 強靱化가 試圖되어 一部 성공한 것이 있어, 今後의 強靱化에 하나의 방향을 나타내고 있다고 생각되어진다.³⁷⁾

M-F 鋼에 있어서는 Hayden²⁵⁾들에 의해, 第二相 martensite의 존재는 ferrite 結晶粒을 細分하는 효과를 가져와 單相 ferrite 보다 靱性에 向上을 준다고 밝혀져 있다. 그러나 結晶粒을 극한까지 微細化하면 notch 감수성 및 crack의 傳播특성이 악화해서 靱性的 低下를 가져오므로 微細化에도 限界가 있음을 주의하고 있다.³⁷⁾

또한 皆川³¹⁾은 脆性的인 相中에 延性的인 相이 存在하고 있어도 이들 鋼의 靱性은 반드시 向上하지 않음을 보고하고 있다. Fig. 10은 M-F 鋼 및 單相 martensite 鋼에 있어서, 平面變形率상태의 破壞靱性值 K_{IC}를 담금질온도에 대하여 표시한 것이다. Fig.10으로 부터 M-F 鋼의 K_{IC}는 母相 ferrite의 존재에 의해 單相의 martensite의 것에 비하여 현저히 低下하고 있음을 알 수 있다. 이 이유로서는 前節에서 설명한 바와 같이 母相과 第二相과의 塑性變形의 不均一性에 의한 cleavage crack의 형성(Fig.8, 9)을 지적하고 있다.

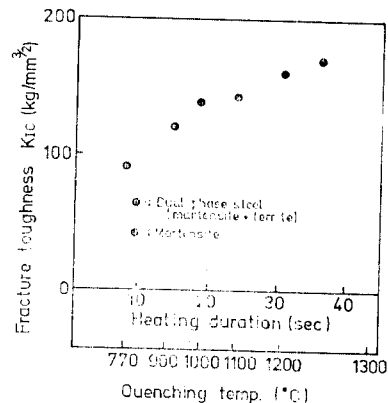


Fig. 10. Relationship between quenching temperature and fracture toughness.³¹⁾

따라서, 複合組織鋼의 破壞靱性은 延性的인 相이 脆性的인 相中에 있어도 반드시 向上한다고 말할 수 없으며, 또한 破壞靱性的 向上에 cleavage crack의 形成舉動에 관한 이해가 상

□ 解 說

당히 중요한 의미가 있음을 알 수 있다.

以上과 같이, 複合組織으로 구성된 鋼의 強度, 延性 및 靱성은 組織相互間의 力學的干涉效果를 생각하는 것이 材料開發에 있어서 하나의 중요한 사항이라고 말할 수 있다.

4. 結 言

本稿에서는 複合組織을 가진 鋼의 破壞學動 및 靱성에 미치는 微視 crack의 形成學動의 문제에 대하여, 材料開發이라고 하는 冶金學上의 분야에 있어서 微視組織學的觀點으로부터 검토하였다. 이와같이 문제를 한정시켜도 強度, 延性 및 靱性値의 평가에 대하여 통일적인 견해를 얻는 것은 대단히 어려우며, 이것은 序言에서 설명한 것과 같이 各相間의 力學的干涉效果를 충분히 검토한 후에 이해되어지리라 생각한다.

마지막으로, 이들 鋼의 最近의 進歩 및 疲勞破壞學動에 대한 상세한 記述은 다음 기회로 미루었으며, 그리고 原稿의 불충분한 點이 있다고 생각되나 複合組織을 가진 鋼의 破壞學動 및 靱성에 대하여 관심을 가지고 있는 분들에게 조금이라도 도움이 된다면 다행으로 생각하는 바이다.

參 考 文 獻

1. 藤井太一, 座古勝, 複合材料의 破壞와 力學, 實教出版社, 1978.
2. 田村今男, 鐵鋼材料強度學, 日刊工業社, 1970.
3. 日本金屬學會會報, Vol. 14, No. 9, 1974.
4. K.H. Schwalbe, "On the Influence of Microstructure on Crack Propagation Mechanisms and Fracture Toughness of Metallic Materials", Eng. Fract. Mech., Vol. 9, 1977, pp. 795.
5. A.S. Tetelman and A.J. McEvily, Jr., Fracture of Structural Materials, John Wiley & Sons, 1967, 40pp.
6. T.C. Johnston, R.J. Stoke and C.H. Li, "The Fracture Behavior of Silver Chloride-Alumina Composites", Trans. AIME, Vol. 221, August 1961, 792pp.
7. C.T. Liu and J. Gurland, "The Fracture Behavior of Spheroidized Carbon Steels", Trans. ASM, Vol. 61, 1968, 156pp.
8. G.T. Hahn, "Proc. 3rd International Conference on Fracture" PL III-211, München, 1973.
9. 小林, 清水, 國尾, "純鐵의 延性破壞에 關與する非金屬介在物의 大きさ의 效果", 機論, Vol. 42, No. 355, 1976-3, 656pp.
10. D. Broek, Elementary Fracture Mechanics, Noordhoff, Amsterdam, 1974, 46pp.
11. 예틀들먼, N.J. Petch, "The Cleavage Strength of Polycrystals", JISI, Vol. 173, May 1953, 25pp.
12. J.F. Knott, "Second Phase Particles and the Toughness of Structural Steel", Effect of Second Phase Particles on the Mechanical Properties of Steel, Scarborough, 1971, 37pp.
13. C.J. McMahon, Jr and M. Cohn, "Initiation of Cleavage in Polycrystalline Iron" Acta Met., Vol. 13, June 1965, 591pp.
14. L.E. Kaechele and A.S. Tetelman, "A Statistical Investigation of Microcrack Formation", Acta Met., Vol. 17, April 1969, 463pp.
15. T.C. Lindley, G. Oates and C.E. Richards, "A Critical Appraisal of Carbide Cracking Mechanisms in Ferrite/Carbide Aggregates", Acta Met., Vol. 18, November 1970 1127pp.
16. A.R. Rosenfield, E. Vatana and G.T. Hahn. "Slip-Induced Crack Formation in Mild Steel." Trans. ASM, Vol. 61, 1968, 807pp.
17. E. Smith, "The Nucleation and Growth of Cleavage Microcracks in Mild Steel", Yield and Fracture, Oxford, September 1966, 36pp.
18. G. Oates, "Effect of Temperature and Strain Rate on Cleavage Fracture in a Mild Steel and A Low-Carbon Manganese Steel", JISI, Vol. 207, March 1969, 353
19. 丸山, "自動車가 輕くなる 複合組織鋼", Nikkei Mechanical, Vol. 4, 1979, 42pp.
20. 田村, 友田外十人, "二相混合組織をもつ鐵合金の

- 強度と延性について,” 鐵と鋼, 第59年, 第3號, 1973, 454pp.
21. 富田, 沖, 岡林, “低炭素 Ni-Cr-Mo 鋼にをけるマルテンサイトと残留フェライト二相混合組織の靜的引張性質について,” 鐵と鋼, 第63年, 第8號 1977, 1321pp.
 22. 金, 國尾外3人, “マルテンサイト-フェライト複合組織鋼の延性-ぜい性遷移舉動を支配する第二相の役割について,” 機論, Vol. 45, No. 393, 1979-5, 415pp.
 23. R.G. Davies, “Influence of Silicon and Phosphorous on the Mechanical Properties of both Ferrite and Dual-Phase Steels”, Met. Trans., Vol. 10A, January 1979, 113pp.
 24. R.L. Carins and J.A. Charles, “Mechanical Properties of Steels with Controlled Martensite-Ferrite Microstructure”, JISI, Vol. 205, October 1967, 1051pp.
 25. 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, July 1970, 1955pp.
 26. T. Kunio and H. Suzuki, “An Effect of the Second Phase Morphology on the Tensile Fracture Characteristics of Carbon Steels,” Eng. Fract. Mech., Vol. 7, 1975, 411pp.
 27. 友田, 黒木, 田村, “二相混合組織鋼の引張變形舉動について,” 鐵と鋼, 第61年, 第1號 1975, 107pp.
 28. 鈴木, 國尾外2人, “不均質組織を有する鋼材の變形破壊舉動について,” 機論, Vol. 40, No. 329, 1974-1, 23pp.
 29. B. Karlsson and B.O. Sundström, “Inhomogeneity in Plastic Deformation of Two-Phase Steels”, Mat. Sci. Eng., Vol. 16, 1974, 161pp.
 30. 金, 清水, 國尾, “第二相組織の拘束性がへき開割れ形成舉動にをよぼす影響について” 機講論, No. 790-13, 1979, 33pp.
 31. 皆川, 國尾外2名, “破壊じん性を支配する金屬組織因子の研究,” 機論, Vol. 41, No. 351, 1975-11, 3033pp.
 32. 齋藤, 内山, “二相混合組織をもつ 0.2% C-Ni-Cr-Mo 鋼の引張特性と破壊靱性について,” 鐵と鋼, 第63年, 第3號, 1977, 477pp.
 33. H. Juzuki and A.J. McEvily, “Microstructural Effect on Fatigue Crack Growth in a Low Carbon Steel”, Met. Trans., Vol. 10A, April 1979, 475pp.
 34. T. Kunio and K. Yamada, “Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Non-propagating Fatigue Cracks in Martensitic Ferritic Structures”, ASTM STP 675, 1979, 342pp.
 35. 金, 清水, 國尾, “複合組織の破壊舉動にをよぼす内部應力の影響について,” 機論, Vol. 46, No.402, 1980-2, 173pp.
 36. 荒木 透, 鐵鋼材料學, 丸善, 1970.
 37. 山崎, 安中, “注目される混合組織と強靱性,” 金屬, No. 607, 1971, 33pp.

