

<論 文>

鋼의 微視 및 巨視的 破壞舉動에 미치는 第二相形態의 영향

金楨圭\* · 宋森弘\*\* · 李漲鉉\*\*\*

(1982年 5月 20日 接受)

The Effect of the Second Phase Morphology on the Micro and Macro Fracture Behaviour of Dual Phase Steel

Jung Kyu Kim, Sam Hong Song and Chang Hyun Lee

Abstract

The effect of the second phase morphology on the fracture ductility of dual phase steel was studied by means of tensile tests carried out room temperature.

In this case the second phase morphology is characterized by two kinds; one is the MEF microstructure in which martensite encapsulated islands of ferrite, the other is the FEM microstructure in which ferrite encapsulated islands of martensite.

The fracture ductility is improved by variation of the second phase morphology, but is essentially unaffected in the range of high strength ratio (4.7). Also the variation of ductility is well understood according to the difficulty of cleavage crack formation of the ferrite grain and to the brittleness of the martensitic structure.

1. 緒 論

오늘날 資源 및 에너지의 절약이 요구되는 사회적 경제적인 입장에서 機械, 機器 및 構造物의 輕量化를 위한 輕量材料의 채용이 絶실히 要求되고 있다. (1) 輕量재료의 제작방법은 여러가지가 있으나 특히 構造用材料로서 가장 많이 사용되는 金屬材料는 熱處理에 의한 組織學的 微細構造의 변화에 의해 強度, 韌性 등의 기계적 성질이 향상되어 지고 있다. 그 一例로서 延性이 풍부한 페라이트(ferrite)組織과 強度가 높은 말텐사이트(martensite)組織으로 이루어진 이른바 “鋼의 複合材料”로서의 複合組織鋼은 최근 自動車의 輕量化를 위한 재료로서 變形舉動, 破壞舉動에 관하여 많은 관심을

갖고 있다(4)~(14). 그런데 이들 실험결과에 대해서는 微視的 因子와 破壞舉動과의 관련성에 관한 기초적 현상의 파악이 불충분하기 때문에 더욱 검토를 가 할 필요가 있다고 생각된다.

이러한 말텐사이트 조직(이하 第二相이라 함)이 어느 정도 연성을 띠고 있는 複合組織鋼의 경우에 있어서는 常溫상태이라 할 지라도 第二相의 형태의 차이에 의해 延性, 脆性이라고 하는 巨視的인 파괴거동에 변화가 생기며(7)(15), 또한 疲勞舉動에 있어서도 이 인자는 크랙의 형성거동 및 진전거동에 현저한 영향을 미치고 있다고 보고하고 있다(12)~(14)(16). 또한 이러한 거동의 차이를 가져오는 微視要因은 페라이트(이하 母相이라 함)의 塑性變形에 대한 第二相의 구속 효과에 의해 일어난다고 알려져 있다. 그러나 변형에 대한 구속성은 第二相의 형태에만 의존하는 것이 아니라 強度, 體積率 및 粒徑의 大小 등에 의해서도 현저한 영향을 받고 있음이 알려져 있어(10)(17) 이하의 破壞舉動 및 破斷延性 등

\* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

\*\* 正會員, 高麗大學校 工科大學

\*\*\* 漢陽大學校 大學院

의 諸性質에 미치는 第二相形態의 영향에 있어서는 이들 因子를 고려하여 검토할 필요성이 요구된다.

그래서, 本 研究에서는 페라이트-말텐사이트複合組織鋼에 있어서, 上述의 문제점 해결의 일환으로서 第二相 強度의 대소를 고려한 組織의 形態에 주목하여 第二相 形態의 변화가 破壞舉動에 미치는 영향을 微視組織學的 觀點으로부터 검토를 행하였다.

2. 實驗方法

사용한 재료는 Table 1에 화학성분을 나타낸 2種의 市販構造用 炭素鋼이다. 먼저 이들 재료를 1200°C에서 2~4h 동안 유지하여 풀립을 행한 후, 표점간의 길이 10mm, 직경 8mm의 引張試驗片으로 가공하였다. 다음에 第二相의 체적율, 결정립경, 各相의 強度를 일정하게 하고 第二相의 形態만이 다른 複合組織鋼을 얻기 위하여 Fig. 1의 熱處理과정의 단계에 의하여 물에 담금질을 행하였다. 그 결과 第二相의 形態가 다른 複合組織, 즉 第二相이 母相을 둘러싼 連結形態(이하 MEF 組織이라 함)와 第二相이 母相에 의해 둘러싸인 孤立形態(이하 FEM 組織이라 함)의 組織을 얻었다. Fig. 2는 얻어진 MEF 및 FEM 組織의 대표예이다. 이들의 조직에 대하여 線分析法에 의하여 定量的 評價를 행하고, 또한 各相의 硬度를 측정하여(micro Vickers Hardness 25g, 100점), 이들의 결과를 정리한 것이 Table 2이다. 이 Table로부터 MEF 組織인 15A材, FEM 組織인 15B材는 거의 동일한 體積率 및 母相의 結晶粒徑, 그리고 強度比(硬度比)가 3.7 정도이고, 한편 MEF 組織의 30A材, FEM 組織의 30B材에 있어서는 역시 體積率 및 粒徑은 동일한 상태이며, 強度비가 4.7 정도로서 第二相 形態만이 다른 複合組織鋼임을 알 수 있다. 이러한 複合組織으로 이루어진 시험편에 대해서 常溫에서 引張試驗을 행 하였다.

그리고 各相의 크랙 形成舉動은 각 試驗片의 應力-變形率線圖上的 임의의 應力에서 荷重을 제거한 후, 表面 및 引張軸을 포함한 縱斷面의 단위 면적에 대해서

光學顯微鏡을 사용하여 관찰하고, 또한 크랙의 安定形成舉動에 있어서의 크랙數는 첫번째의 측정후, 母相粒徑의 2~3배의 크기로서 다시 면마하여, 2번째의 측정

Table 1 Chemical compositions (wt %).

Material	C	Si	Mn	S	P
SM15C	0.15	0.24	0.44	0.021	0.016
SM30C	0.31	0.27	0.76	0.026	0.017

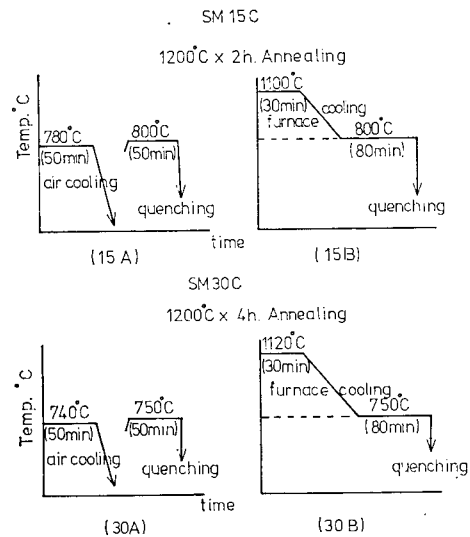


Fig. 1 Heat treatments.

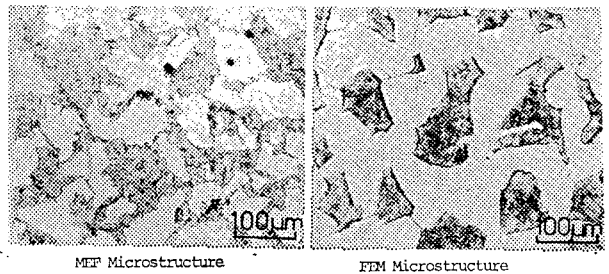


Fig. 2 Typical microstructures of dual phase steel.

Table 2 Metallurgical properties.

Series	Morphology	Volume fraction of martensite	Ferrite grain size	Hardness (25g)		Hardness ratio
				Martensite	Ferrite	
15A	MEF	47%	49um	660	178	3.7
15B	FEM	45%	47um	642	175	3.7
30A	MEF	48%	35um	887	185	4.8
30B	FEM	44%	32um	900	195	4.6

을 행하고 이들 평균치를 측정치로서 하였다. 그리고 破面解析은 走査電子顯微鏡에 의하였다.

### 3. 實驗結果 및 檢討

#### 3.1. 機械的 性質의 변화

Fig. 3은 각 시험편의 應力-變形率線圖들이다. 이들 線圖에 있어서 5.5%이상의 變形율의 값은 斷面收縮率로 부터 계산에 의해 구하였다.

먼저 MEF 組織을 가진 15 A 材는 應力상승중에 파단하는 대신, FEM 組織을 가진 15 B 材는 最大引張應力에 달한 후, 應力하강중 상당한 變形율을 가진 후에 파단하고 있음을 알 수 있다. 한편 強度비가 높은 MEF 組織인 30 A 材 및 FEM 組織의 30 B 材에 있어서는 第二相의 形態에 현저한 차이가 있음에도 불구하고 脆性的인 파괴양상을 나타낸 15 A 材와 마찬가지로 應力上昇중에 파단하고 있음을 나타내고 있다. Table 3은 Fig.3의 線圖들로부터 얻어진 機械的 性質의 結果를 정리한 것이다. 強度비가 비교적 낮은 15 A 材와 15 B 材에 있어서, 15 B 材는 15 A 材에 비하여 破斷延性的

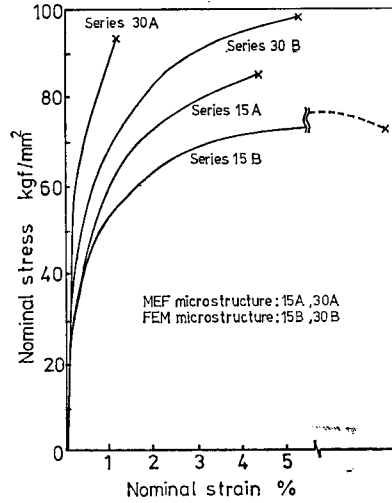


Fig. 3 Stress-strain curves.

대표값인 단면수축율에 있어서 약 6.4 배에 달하는 현저한 延性的 상승을 나타냄에 반하여 15 A 材는 15B 材에 비하여 높은 引張強度를 나타내어 強度上 개선되고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Mechanical properties.

Mechanical properties		15A	15B	30A	30B
0.2% proof stress	kgf/mm <sup>2</sup>	45	44	62	51
Tensile strength	kgf/mm <sup>2</sup>	85.3	77.2	92	98.3
Nominal bseaking stress	kgf/mm <sup>2</sup>	85.3	72.3	92	98.3
True breaking stress	kgf/mm <sup>2</sup>	99.5	89.2	93.2	103.5
Nominal breaking strain	%	4.5	37.1	1.6	6
True breaking strain	%	4.4	31.5	1.6	5.8
Reduction in area	%	4.3	27	1.6	5.6

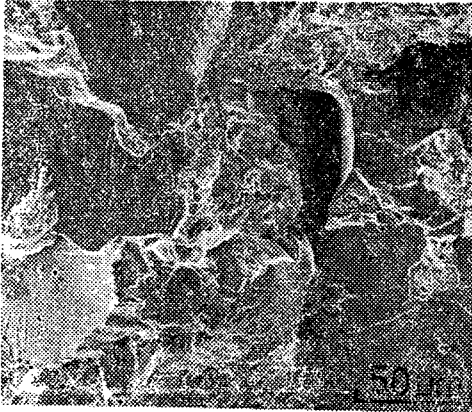
한편 15 B 材와 第二相 形態가 동일한 30 B 材는 30 A 材에 비하여 높은 引張強度와 破斷延性を 보여주고 있지만 脆性的破壞舉動을 나타내고 있다. 이상과 같이 強度가 낮은 15 A 材 및 15 B 材의 경우에 있어서는 第二相形態의 차이에 의해 延性, 脆性이라는 破壞舉動에 변화가 생겨 Suzuki들<sup>(7)</sup>에 의해 보고된 巨視的 파괴거동의 결과와 거의 일치한다고 생각된다. 그러나 強度비가 높은 複合組織의 경우에는 第二相의 형태는 破壞舉動에 크다란 영향을 미치지 않고, 즉 第二相形態의 변화에 관계없이 모두 脆性的인 파괴거동을 나타낸다고 할 수 있다.

그래서, 다음에 張度比의 大小를 고려한 第二相形態와 破壞舉動과의 관계를 더욱 밝히기 위하여 微視破面樣相에 대하여 주목하였다.

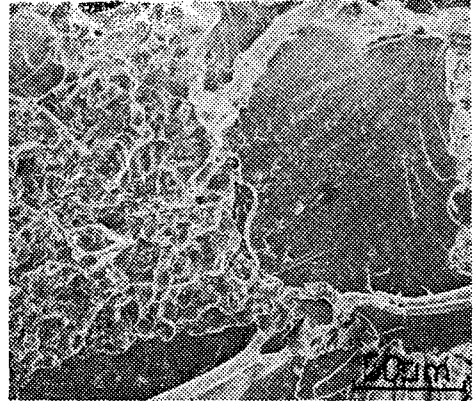
#### 3.2. 微視破面에 의한 考察

Fig. 4 및 Fig. 5는 각 시험편의 微視破面形狀의 대표적인 예를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 4에 있어서 脆性破壞舉動을 나타낸 15 A 材에 있어서는 脆性破面의 대표적 양상인 리버모양(river pattern)을 동반한 벽계 파면(leafage facet)과 미세한 덩플(dimple)에 의해 구성되어 있음에 대하여, 15 B 材는 破面의 전체가 延性破壞의 대표적 양상인 덩플에 의해 구성되어 있어 앞의 절에서 설명한 巨視的 破壞舉動과 대응하고 있음을 알 수 있다.

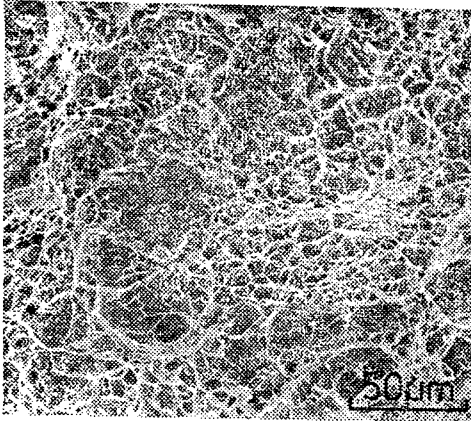
한편 強度비가 높은 30 A 材, 30 B 材의 微視破面に 있어서는 Fig.4에 보인 바와 같이 第二相의 形態에 차이가 있음에도 불구하고 모두 劈開破面을 형성하고



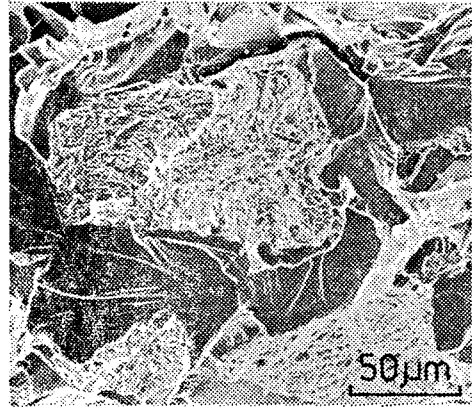
MEF Microstructure (series 15A)



MEF Microstructure (series 30A)



FEM Microstructure (series 15B)



FEM Microstructure (series 30B)

**Fig. 4** Scanning electron micrographs of typical fracture surfaces.

**Fig. 5** Scanning electron micrographs of typical fracture surfaces.

있다.

이상의 결과는 第二相이 母相중에 분산되어 있는 형태, 즉 FEM 組織이라 할 지라도 항상 延性的破壞舉動을 나타내는 것이 아니고 이들 FEM 組織鋼의 破壞舉動은 분명히 強度比의 大小에도 의존하고 있음을 나타낸 것이라고 할 수 있다.

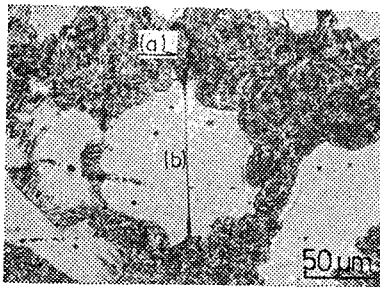
### 3.3. 強度比의 변화에 따른 微視破壞舉動의 차이

強度比의 大小를 고려한 第二相形態의 차이가 破壞舉動에 변화를 가져오는 원인을 검토하기 위해 미시적 破壞舉動에 주목하였다.

먼저 應力-變形率線圖상의 最大荷重點直下로 부더 荷重을 제거한 후의 각 시험편의 표면에 대하여 관찰한 微視크랙의 특징을 설명한다.

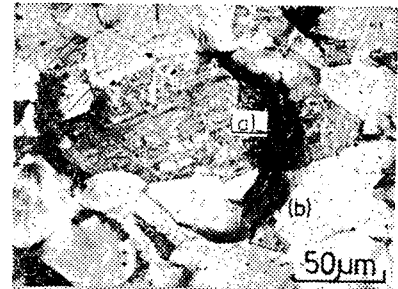
Fig.6 및 Fig.7은 MEF 및 FEM 組織鋼의 微視크랙과 結晶粒의 변형거동의 대표예를 나타낸 것이다. MEF 組織鋼에 있어서는 強度比의 大小에 관계없이 Fig. 5에 보는 바와 같이 第二相크랙과 함께 母相의 劈開크랙이 관찰되었다. 그러나 FEM 組織鋼에 있어서는 Fig. 6과 같이, 強度比가 낮은 15B 材에서는 第二相크랙이 대부분이고 母相의 크랙은 관찰되지 않았지만, 強度比가 높은 30B 材에서는 第二相크랙과 함께 여기에서 확대된 것으로 생각되는 劈開크랙이 관찰되었다. 또한 Fig. 8은 30B 材의 微視破面과 組織과의 대응관계를 나타낸 것으로, 리버모양(riven pattern)을 가진 劈開破面은 페라이트組織이고, 말텐사이트組織은 微小디플과 脆性破面樣相으로 구성되어 있음을 알았다. 따라서 第二相形態 및 強度比의 大小에 따른 이들 鋼의 破壞舉動의 차이는 微視크랙의 形度舉動과 관련이 있다고 생각된다.

그래서 다음에 負荷變形率과 크랙의 형성거동과의 관계를 조사하였다 Fig. 9는 MEF 및 FEM 組織鋼의 중단면에 있어서 측정된 단위면적당의 各相의 크랙수를 부하변형률에 대하여 나타낸 것이다. 먼저 취성과파괴거동을 나타낸 MEF 組織鋼에 있어서 15 A 材, 30 A 材는 부하변형률이 커짐에 따라 第二相크랙과 劈開크랙이 직선적으로 증가하지만 15 A 材서는 第二相크랙보다 劈開크랙의 형성이 負荷變形率에 대하여 민감한 반면, 30 A 材에서는 이와 반대로 第二相크랙의 형성이 민감하며, 또한 強度比가 높은 30 A 材가 15 A 材에 비하여 劈開크랙 및 第二相크랙의 형성이 용이함을 알 수 있다. 한편 FEM 組織鋼에 있어서는 強度比의 大小에 따라 다음과 같은 크랙형성거동에 차이를 보이고 있다. 즉 延性

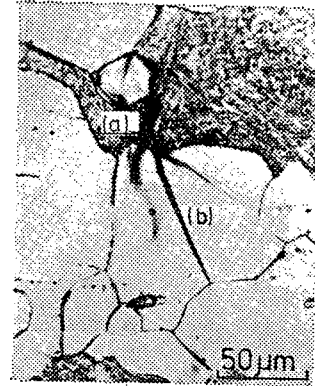


series 30A (unloaded at 92 kgf/mm<sup>2</sup>)  
 (a) second phase crack  
 (b) cleavage crack

Fig. 6 Example of cleavage crack and slip character in ferrite grain formed specimen surface.



series 15B (unloaded at 77.2 kgf/mm<sup>2</sup>)  
 (a) second phase crack  
 (b) wavy slip



series 30B (unloaded at 96 kgf/mm<sup>2</sup>)  
 (a) second phase crack  
 (b) cleavage crack

Fig. 7 Examples of microcracks and slip characters formed specimen surface.

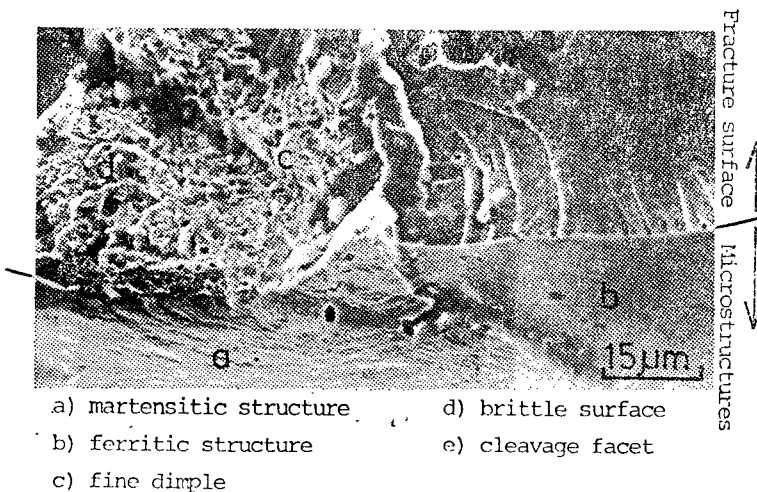


Fig. 8 Scanning electron micrograph showing the correspondence of the fracture appearance of to the microstructures.

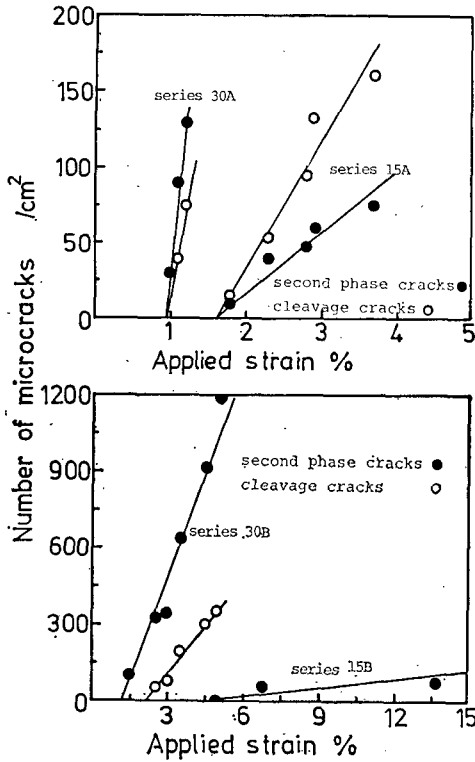


Fig. 9 No. of microcracks as a function of applied strain.

破斷舉動을 나타낸 15 B 材는 파단에 도달할 때까지 第二相의 크랙이 직선적으로 증가함에 반하여 母相의 크랙은 거의 형성되지 않으며, 脆性破壞를 보인 30 B 材에서는 第二相크랙과 함께 劈開크랙이 직선적으로 증가하고 30 A 材와 마찬가지로 母相의 크랙보다 第二相크랙의 형성이 용이함을 알 수 있다. 여기에서 15A 材에 있어서의 劈開크랙이 第二相크랙보다 부하변형률에 대하여 형성수가 많은 것은 벽계크랙이 第二相의 크랙에서 형성될 뿐 아니라 第二相크랙과는 관계없이 단독으로 형성이 가능하다는 사실<sup>(11)</sup>을 고려하여 보면 쉽게 이해된다. 그리고 30 A 材, 30 B 材에 있어서 第二相크랙이 劈開크랙보다 형성이 민감한 것은 Fig.8의 組織과 破面과의 대응관계에서 보인 바와 같이 第二相強度의 상승에 따른 말렌사이트組織의 취화에 원인이 있다고 생각된다. 따라서 強度比의 大小에 따른 破斷延性的 大小 및 破壞舉動의 변화는 劈開크랙의 형성난이와 第二相組織의 취화와 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다.

3.4. FEM 組織鋼의 破壞舉動과 強度와의 관계 앞의 절에서 第二相이 母相중에 분산하고 있는 형태,

즉, FEM 組織이라 할지라도 항상 延性的인 파괴거동을 나타내는 것이 아니고 第二相의 強度가 높은 경우에는 劈開크랙을 동반한 脆性破壞를 나타냄을 알았다. 그래서 이 절에서는 FEM 組織鋼의 巨視的破壞舉動은 第二相強度의 大小에 의해 延性·脆性이라고 하는 현저한 변화가 일어난다는 것을 밝히기 위하여 脆性的破壞舉動을 나타낸 30 B 材에 대하여 200°C(30B<sub>2</sub>材), 300°C(30B<sub>3</sub>材) 및 400°C(30B<sub>4</sub>材)에서 각각 1시간씩 뜨임(tempering)을 행하여 第二相에 強度의 변화를 주어, 이 강도의 저하에 따른 파괴거동의 변화를 검토하였다. Fig. 10은 뜨임온도에 따른 각상의 硬度的 변화 및 이들 경도를 가진 시험편의 기계적성질을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 第二相이 母相중에 분산되어 있는 FEM 組織이라 할지라도 第二相硬度的 저하에 따라 破斷延性は 급격히 상승함과 동시에 引張 및 降伏強度는 현저히 저하함을 알 수 있다.

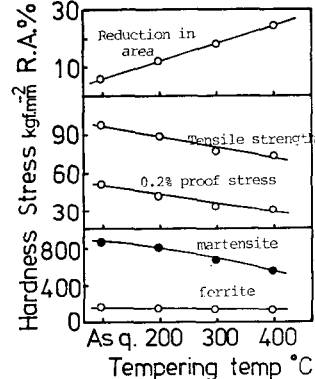
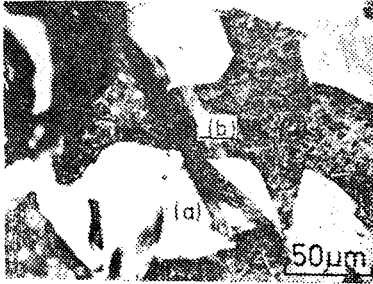


Fig. 10. Variation of mechanical properties and hardness as a function of tempering temp.

근년 MEF 組織의 破壞舉動에 있어서 劈開크랙의 형성난이는 열처리과정에서 도입되는 微視的內部應力<sup>(11)</sup>과 母相의 塑性變形에 대한 第二相의 拘束效果<sup>(7)(17)(18)</sup>에 의한 母相粒內의 應力上昇에 의한다고 보고되고 있다. 특히 Suzuki 들<sup>(7)</sup>은 複合組織의 最初의 微視크랙은 第二相에서 형성되며, MEF 組織에 있어서는 이 크랙이 劈開크랙을 유기하지만, FEM 組織에 있어서는 페라이트의 현저한 塑性變形에 의해 第二相의 크랙은 延性破壞를 일으킨다고 보고되고 있다. 따라서 巨視的相壞舉動을 지배하는 미시크랙의 형성거동은 적어도 페라이트의 變形難易를 나타내는 슬립의 특성으로부터 검토가 가능하리라 생각된다.

그래서 30 B<sub>4</sub>材를 最大引張荷重부근에서 제하하여 페라이트의 變形舉動과 微視크랙양상에 대하여 거의 동일한 強度比와 破壞舉動을 나타낸 15 B 材와 함께 검토

를 행하였다. Fig. 11은 이것의 대표예로서, 30B<sub>4</sub>材의 슬립특성과 微視크랙의 양상은 延性破壞舉動을 나타낸 Fig. 7의 15B材의 것과 동일함을 보여주고 있다. 즉 強度比가 높은 30B材에서는 第二相크랙으로 부터의 劈開크랙의 형성과 함께 脆性破壞를 일으키지만, 強度

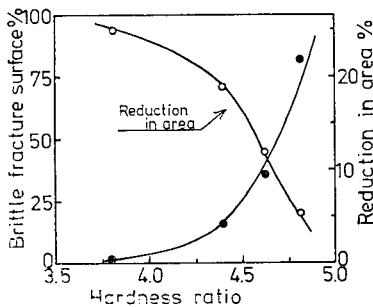


series 30B<sub>4</sub> (unloaded at 76kgf/mm<sup>2</sup>)  
(a) wavy slip  
(b) second phase crack

**Fig. 11** Example of second phase crack and slip character formed specimen surface.

比의 저하에 따라 第二相크랙은 母相 페라이트 結晶粒의 현저한 塑性變形에 의해 억제되어 15B材와 같은 延性破壞를 나타낸다고 생각된다.

그래서 이 破壞舉動의 변화를 더욱 명확히 하기 위해 30B, 30B<sub>2</sub>, 30B<sub>3</sub> 및 30B<sub>4</sub>材의 微視破面에 대하여 검토를 가하였다. Fig.12는 무작위로 선택한 몇개의 微視破面에 대하여 線分析法에 의해 脆性破面率을 구



**Fig. 12** Variation of micro-fracture facet and reduction in area as a function of hardness ratio.

하고, 이것을 破斷延性的의 대표값인 斷面收縮率과 함께 強度比에 대해서 나타낸 것이다. 이 그림으로 부터 脆性破面率은 強度比의 증가와 함께 급격히 상승하고 이것에 대응하여 破斷延性は 크게 저하하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이상의 결과를 고려하여 보면 FEM組織鋼은 항상 延性的인 破壞舉動을 나타내는 것이 아니고 第二相強度의 大小에 의해 延性·脆性이라고 하는 巨視

的 破壞舉動에 변화가 생김이 명확하다고 할 수 있다.

#### 4. 結 論

페라이트-말텐사이트複合組織鋼의 破壞舉動 및 破斷延性的의 본성을 찾기 위하여 第二相 強度의 大小를 고려한 第二相形態란이 다른 複合組織鋼, 즉 第二相이 母相을 둘러싼 MEF組織鋼 및 이와 반대의 形態를 가진 FEM組織鋼을 준비하여 이들 鋼의 巨視的 및 微視的 破壞舉動에 대하여 검토를 행하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 第二相의 強度가 낮은 경우(硬度比 3.7), 第二相 形態의 변화는 巨視的 破壞舉動에 변화를 가져온다. 즉, MEF組織鋼에 있어서는 脆性的 破壞舉動을 나타냄에 반하여, FEM組織鋼에서는 높은 破斷延性を 동반한 延性破壞舉動을 나타낸다. 그러나

2) 第二相의 強度가 높은 경우(硬度比; 4.7)에서는 MEF組織이든 FEM組織이든 第二相形態의 변화에 관계없이 脆性的 破壞舉動을 나타낸다.

3) 따라서 FEM組織鋼의 破壞舉動은 항상 延性的이 아니고 強度의 大小에 의해 지배된다. 즉, 第二相의 強度가 클수록 脆性破面率의 증가와 함께 破斷延性は 크게 저하하여 破壞舉動은 延性에서 脆性으로 변화한다.

4) 이러한 破壞舉動의 변화는 변형과정중 劈開크랙의 형성거동에 의해 지배되는 것은 물론이고, 第二相 強度의 상승에 따른 말텐사이트組織의 脆化에도 원인이 있다고 생각한다.

#### 後 記

本 研究는 1981年度 韓國科學財團의 支援에 의하여 이루어진 것으로, 關係諸位에게 深心한 謝意를 表한다

#### 參 考 文 獻

- 1) 中川, 自動車工業의 展望, 日本機械會誌, Vol.83, No.743, pp.45-50, 1980.
- 2) 武智, 最近의 自動車用高張力鋼板의 特徵と性能, 機械の研究, Vol.33, No.2, pp.257-260, 1981.
- 3) 吉田, 自動車車體의 薄鋼板とプレス成形의 戰後小史, 日本機械會誌, Vol. 84, No. 748, pp.261-257, 1981.
- 4) 曾山, 多賀, 遊離フェライ中に硬質領域が存在する鋼の下降伏點, 材料, Vol. 67, No.142, pp.542-548, 1965.

- 5) B. Karlsson and B.O. Sundstrom, Inhomogeneity in Plastic Deformation of Two-Phase Steels, *Met. Sci. Eng.*, Vol.16, pp.161—167, 1974.
- 6) I. Tamura et al, On the Strength and Ductility of Two-Phase Iron Alloys, *Tsans. ISIJ.*, pp. 283—292, 1973.
- 7) 鈴木外 3人, 不均質組織を有する鋼材の變形破壊舉動について, *日本機械學會論文集*, Vol.40, No. 292, pp.23—30, 1974.
- 8) R.G. Davies, The-Deformation Behavior of a Vanadium-Strengthened Dual Phase Steel, *Met. Trans.*, Vol. 9A, pp.41—52, 1978.
- 9) R.G. Davies, Influence of Martensite Composition and Content on the Properties of Dual Phase Steels, *ibid*, Vol. 9A, pp.671—679, 1978.
- 10) 金外 4人, マルテンサイト-フェライト複合組織鋼の延性・脆性遷移舉動を支配する第二相の役割, *日本機械學會論文集*, Vol.45, No. 393, pp. 415—422, 1979.
- 11) 金外 2人, 複合組織鋼の破壊舉動に及ぼす内部應力の影響について, *日本機械學會論文集*, Vol.46, No. 402, pp.173—179, 1980.
- 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) 續木外 3人, 疲勞微視き裂生成舉動に及ぼすべり特性の影響, *日本機械學會論文集*, Vol.46, No. 408, pp.870—877, 1980.
- 14) 酒本 外3人, フェライト・マルテンサイト鋼の初期段階疲れ舉動について, *日本機械學會講演論文集* No.805—2, pp. 53—60, 1980.
- 15) 富田外 2人, 低炭素 Ni-Cr-Mo 鋼におけるマルテンサイトと残留フェライト二相混合組織の静引張性質について, *鐵と鋼*, Vol.63, No.8, pp.1321—1330, 1977.
- 16) K. Yamada and K. Kunio, Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Nonpropagating Fatigue Cracks in Martensitic-Ferritic Structure, *ASTM STP 675*, pp.342—370, 1979.
- 17) 金外 2名, 第二相組織の拘束性がへき開割れ形成舉動におよぼす影響について, *日本機械學會講演論文集*, No.790—13, pp.33—35, 1979.
- 18) 金楨圭, 塑性拘束性 $\sigma$  鋼의 破壊舉動, *大韓機械學會秋季學術講演論文集*, pp.50—54, 1981.