

## 페라이트-마르텐사이트 복합 조직강의 피로한도에 미치는 마르텐사이트 조직형태의 영향

### Effects of the Type of Martensite on Fatigue Limit of Ferrite-Martensitic Steel

김민건\* 지정근\*\*  
Kim, Min-Gun Ji, Jueng-Keun

#### Abstract

A study has been made on the behavior of microscopic fatigue crack growth at the stress level of the fatigue limit with ferrite-martensitic structures.

For the above purpose, two types of the microstructures were prepared ; one is the microstructure having the ferrite encapsulating the islands of second phase martensite (FEM), the other is the microstructure with the martensite encapsulating the islands of ferrite(MEF). It has been pointed out that the fatigue limits of these microstructures are related to the critical stress at which the microcrack in the ferrite proceeds to the martensite. The high fatigue limit might be expected for the MEF microstructure in which the critical crack length would be restricted within the second phase spacing in contrast with the FEM microstructure. However, the fatigue tests shows that no appreciable difference of the fatigue limits among them were recognized.

Also, it turned out from the metallographic observations that the micro crack path is very much affected by the microstructures, so that the microcracks grow according to the 3-dimensional situation of its microstructures.

키워드 : 페라이트-마르텐사이트 강, 피로한도, 미시균열

Keywords : ferrite-martensitic steel, fatigue limit, micro-crack

#### 1. 서론

금속의 피로강도는 미시적인 표면변화와 깊은 관계가 있다. 따라서, 피로현상을 파악하기 위해서는 미시적 관찰은 필수적인 것이다.

반복응력(피로부하)을 받는 평활재 표면을 미시적으로 관찰해 보면, 응력반복수의 증가와 더불어

슬립의 발생, 슬립의 성장, 균열의 발생, 균열의 전파, 파단으로 이어지는 과정을 거침을 알 수 있다. 그러나, 균열의 발생단계 및 전파단계와의 구별은 명료하지 않다. 그래서 Forsyth[1]는 피로파괴라는 현상을 균열발생으로부터 최대전단응력 방향에 따라 전파하기까지의 제1단계 균열전파(stage I crack growth), 이후의 최대인장응력의 직각방향으로 전파하는 제2단계 균열전파(stage II crack growth)으로 분류하고, 그것은 제1단계, 제2단계, 파단이라고 하는 일련의 현상임을 밝혔다.

그런데 철강재료 등에서는 균열이 발생되었다

\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 교수

\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 강사

하더라도 그 후의 응력부하에 의하여 필히 파단에 이른다고는 할 수 없고, 무한회의 반복응력 후에도 정류균열로서 관찰되는 경우도 있다. 이점으로부터, 재료가 무한회의 반복응력에 견디는 한계응력 즉 피로한도는 생성된 균열이 전파를 개시하느냐 안 하느냐의 한계응력에 의하여 결정됨을 알 수 있다[2]. 따라서, 재료의 피로한도를 정확하게 인지하고 그의 개선을 꾀하기 위해서는 이러한 미시균열의 확대개시조건을 명확하게 하는 것이 중요하다고 생각된다.

미시균열을 정류시키는 요인에 대해서는 지금까지 많은 연구가 있어서, 균열팁에서의 곡률둔화[3], 균열팁 부근에서의 재료의 가공경화, 및 그것에 수반되는 변형시효[4], 제1단계로부터 제2단계로의 천이[5], 금속조직인자로서의 결정립계[6]와 제2상[7]경계등을 들 수 있다.

한편, 균열을 포함한 재료에 있어서의 균열전파조건의 연구는 Frost[8]에 의해서 상세하게 수행되어서, 균열길이  $L$ 과 균열의 전파한계응력  $\sigma$ 의 사이에는  $\sigma^n L = \text{const.}$ 의 관계가 있음이 밝혀졌는데,  $n$ 의 값으로서는 3[8], 3.6[6], 4[9]등이 알려지고 있어서 통일적인 견해는 얻어져 있지 않다. 또한, 최근에는 선형파괴역학의 개념을 적용하여, 응력확대계수에 의한 균열의 전파조건을 파악하려는 연구가 활발하다[10]. 그런데, 평활제에서 관찰되는 정류균열과 같은 미소균열의 전파, 정류조건에 대해서는 아직 불분명한 점이 다수 남아있다.

2상 조직강의 피로거동은 단상의 그것보다 훨씬 미시조직적 인자에 영향 받기 쉽고, 통일적인 견해는 꽤 얻기 곤란하다. 그 인자들에는 제2상의 체적분율, 제2상의 형상, 결정립 크기, 각상의 강도비, 계면의 강도등이 있어서, 그것들이 서로 복잡하게 영향을 미치고 있다고 생각되어진다[11]. 이들 중에서 비교적 많은 연구가 이루어져 있는 것은 제2상 체적분율, 및 결정립 크기일 것이다.

결정립 크기의 영향에 대해서는 피로에 대한 경우에도 정적인장의 경우와 같이 Hall-Petch형의 관계가 있음이 알려져 있다[12]. 그러나, 2상 조직강에서 제2상 체적분율이 큰 경우에는 이 관계로부터 어긋나서, 결정립 크기보다 오히려 평균 모상(母相)자유거리에 좌우된다는 보고가 있다[13]. 한편, 제2상 체적분율의 피로한도에의 영향에 대해서는 Borik[14], Hyden[15], 友田[11] 등의 연구가 있지만, 그 결과는 재료의 차에 의하여 큰 차이가 보여서, 통일적인 해석은 나와있지 않다. 그 밖의 인

자에 관해서는 거의 연구가 이루어지고 있지 않아서, 이들에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 하겠다.

한편, 2상 조직강에서 미시 피로균열의 전파, 정류거동을 조사한 연구는 매우 적다. 山田[16]는 고주파 담금질한 잔류 페라이트(Ferrite)를 포함하는 2상 조직강에 대하여 피로시험을 수행하여, 피로한도의 응력을  $10^7$ 회 부하한 시험편에는 페라이트 중에서 생성되어 마르텐사이트(Martensite)에 의하여 전파를 저지당한 타입의 정류균열이 존재하는 것으로부터, 이들의 미시 균열이 주위의 마르텐사이트를 돌파하는 한계응력에 의하여 피로한도의 크기가 정해지고 있음을 분명히 했다. 그래서, 페라이트 중에 발생된 균열이 마르텐사이트를 돌파하는 조건이 균열길이 0.5mm 이상일 때 선형파괴역학의 개념을 적용하여 응력확대계수  $K$ 로 정리될 수 있음을 밝혔다. 그런데, 이들의 균열은 피로한도 근방의 응력에서는 제2상 마르텐사이트를 우회하는 패턴으로 전파하기 때문에, 그것이 마르텐사이트를 돌파할 때의 길이는 제2상 간격으로부터 일률적으로는 정해지지 않는 것으로 되어 있다.

山田[16]의 연구에서는, 제2상 마르텐사이트가 모상 페라이트 중에 섬 모양으로 고립된 조직형태를 가진 시험편을 사용했기 때문에, 균열이 제2상 마르텐사이트를 우회하여 전파하여, 0.5mm 이상의 길이를 가진 균열에 대해서 마르텐사이트를 돌파하는 조건을 결정할 수 없었다(Fig. 1). 이러한 문제를 해결하기 위해서, 균열을 우회하여 전파할 수 없는 조직형태를 갖는 재료를 준비할 필요가 있다. 저탄소강을 A3 변태점과 A1 변태점의 중간의 온도에서 잠시동안 방치함에 의해서, 탄소가 결정립계를 따라 확산해 간다. 이 상태에서 담금질조작을 수행함에 의해서, Fig. 2에서와 같은 제2상 마르텐사이트가 서로 연결하여 모상 페라이트를 둘러싼 조직이 만들어져서, 이 재료를 사용함으로써 앞에 제시한 문제가 해결될 수 있다. 또한, 마르텐사이트를 돌파할 때의 균열길이를 제2상 간격 내에 억제할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 이러한 재료를 준비해서 피로시험에 제공하여, Fig. 1의 재료와 비교하면서 균열이 마르텐사이트를 돌파해서 확대를 개시하는 조건을 구해서, 금속조직학적 인자와 함께 피로한도와 관련된성을 밝히는 것을 그 목적으로 하였다.

2. 시험편의 준비 및 실험방법

시험편으로 Table 1에 그 화학성분을 제시한 탄소강 S25C의 환봉을 사용하였다. Fig. 3에 나타낸 열처리를 실시하고, Fig. 4에 보인 형상으로 가공하였다.

표면관찰을 용이하게 하기 위해서, 시험부를 에머리페이퍼(Emery paper)로 연마한 후 전해연마를 실시하였다. 얻어진 조직사진을 Fig. 5의 (a), (b)에 제시하였다. (a)는 제2상이 고립된 조직형태를 갖는 고립재(FEM ; Ferrite Encapsulated Martensite), (b)는 마르텐사이트가 서로 연결된 연결재(MEF ; Martensite Encapsulated Ferrite)이다.

피로시험기는 회전굽힘식 피로시험기(3500rpm)이며, 균열길이는 광학현미경을 이용하여 측정하였으며, 그 길이는 시험편 축 직각방향으로 투영한 길이이다.

Table. 1. Chemical compositions of materials

(wt %)

	C	Si	Mn	S	P
S25C	0.25	0.24	0.43	0.035	0.030

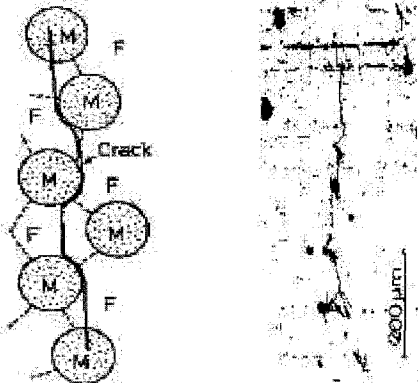


Fig. 1 The model of FEM structure and typical feature of non-propagating crack

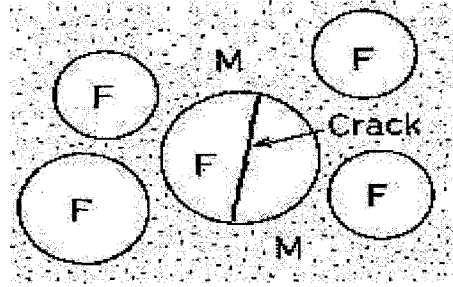


Fig. 2 The model of MEF structure

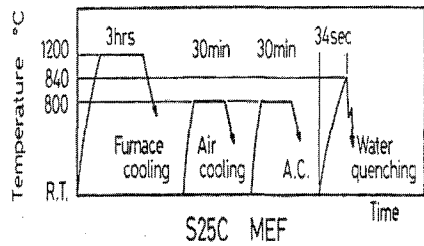
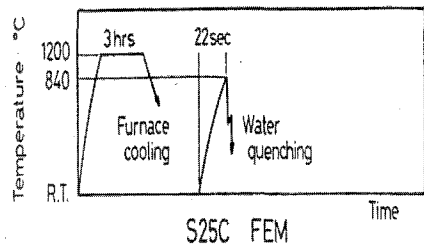


Fig. 3. Schematic representation of heat treatments employed

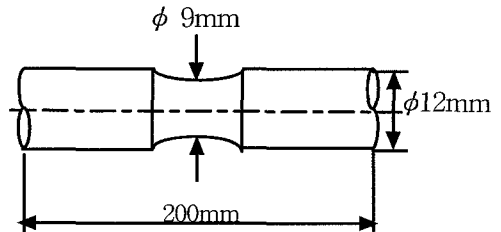
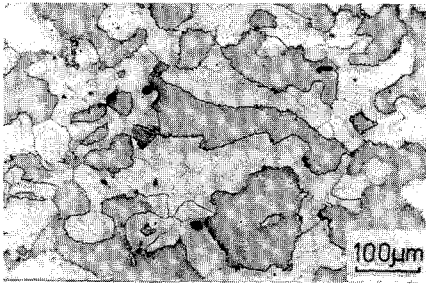
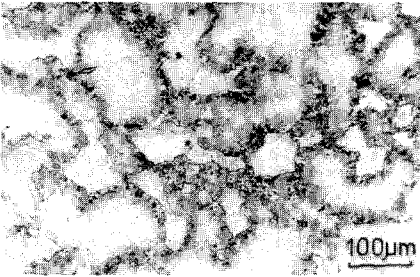


Fig. 4 Specimen geometry



(a) S25C FEM



(b) S25C MEF

Fig. 5 Microstructure of specimens

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 피로한도의 균열확대저항

고립재에서는 균열이 제2상 마르텐사이트를 우회하여 전파하기 때문에, 제2상 간격 그 자체가 정류균열의 길이가 되지는 않지만, 연결재에서는 균열이 제2상을 우회해서 전파하지 못하므로, 제2상 간격이 그대로 정류균열의 한계길이에 대응하는 것으로 생각되어진다. 따라서, 균열이 제2상을 돌파할 수 있을 것인가 아닌가가 피로한도를 결정하고 있다면, 연결재에서는 피로한도의 상승이 기대된다.

S25C 고립재에 있어서 제2상의 균열확대저항은, 선형파괴역학의 개념으로부터 간단한 형태의 응력 확대계수

$$K = \sigma \sqrt{\pi L} / 2 \quad (1)$$

으로 표현할 수 있고, 그 값은  $7.75 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  이었다[16]. 지금, 이 값이 제2상의 경도가 같은 정도의 어떤 재료에 대해서 일반성이 있는 것이라면,

연결재에 대해서도 식(1)을 변형한 다음 식으로부터 피로한도의 크기를 예측할 수 있게 된다.

$$\sigma_{wo} = K_{thm} / \sqrt{\pi L c} / 2 \quad (2)$$

여기서  $L$  의 값은 조직사진으로부터 약 0.25~0.3 mm으로 판단되기 때문에,  $K_{thm}$ 의 값과 함께 식(2)에 대입함에 의해서

$$\sigma_{wo} = 360 \sim 390 \quad [\text{MPa}]$$

가 얻어진다. 이러한 단순한 발상이 과연 적용될 수 있을가의 여부를 확인하기 위해서, 연결재에 대해서 피로시험을 수행하여 피로한도를 구하였다. S-N곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

그 결과, 연결재의 피로한도는, 예상과는 달리, 고립재 보다는 다소 크지만 거의 차이가 없음을 알 수 있고, 위에서 예측한 값에는 훨씬 도달하지 못했다. 이 원인으로서는, 연결재의 제2상 균열확대저항이 고립재의 그것과 비교해서 저하했기 때문이든지, 아니면 조직형태를 연결형태로 했음에도 불구하고 한계균열길이를 제2상 간격의 범위 내로 억제할 수 없었던지 둘 중에 하나일 것으로 생각된다.

그러므로 우선, 제2상 마르텐사이트의 균열확대저항을 구해본 결과, Fig. 7에 나타낸 바와 같이, 0.5mm이상의 길이를 가진 균열에 대해서는 고립재의 경우와 거의 같은 값을 갖고 있어서, 제2상의 균열확대저항은 저하하고 있지 않음을 알 수 있었다.

다음으로, 피로한도에 있어서의 한계균열길이를 구하기 위해서, 여러 개의 시험편에 대해서 피로한도 응력을  $10^7$  회 부하한 후의 시험편 표면을 관찰하여, 각 시험편 중에 관찰되는 최장의 정류균열(NPC)을 택하여, 그 길이의 빈도분포를 조사한 것이 Fig. 8이다. 이 그림으로부터, 고립재 및 연결재의 한계정류균열길이는 0.5mm의 근처로 서로 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 조직형태를 연결형태로 하더라도 한계균열길이를 제한할 수 없다는 것을 보여주고 있다. 그럼 중, 연결재에 들어있는 헛칭(hatching)은, 균열이 일단 마르텐사이트를 돌파한 후 다음의 마르텐사이트에 의해서 전파가 지지당해 정류한 균열을 나타내고 있다. 그 일례를 Fig. 9에 나타내었다. 이러한 균열이 존재한다는

것은, 표면 마르텐사이트를 돌파하더라도 꼭 파단 되지는 않는다는 것을 보여주어 주고 있다. 그렇다면, 왜 연결재를 사용함에도 균열길이를 한정시킬 수 없는 것일까? 이 원인을 밝히기 위해서 다음과 같은 실험을 행하였다.

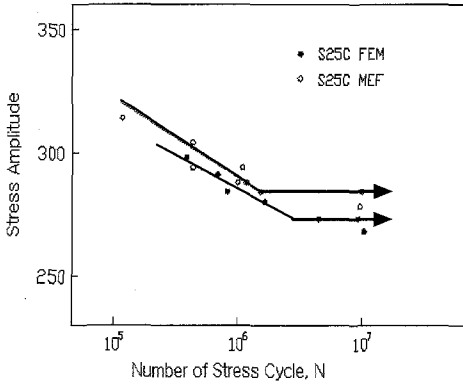


Fig. 6 S-N curves

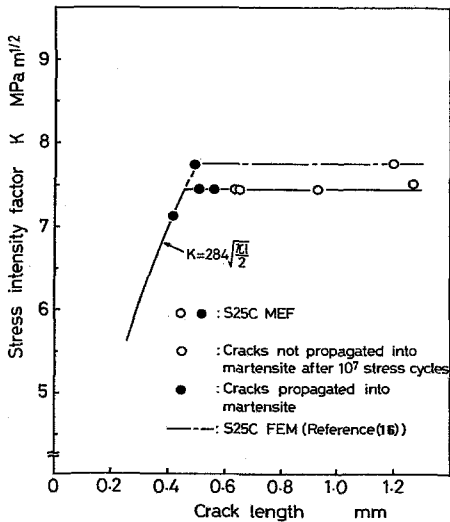


Fig. 7 The relationship between crack growth resistance of the martensite and the SIF of non-propagating cracks

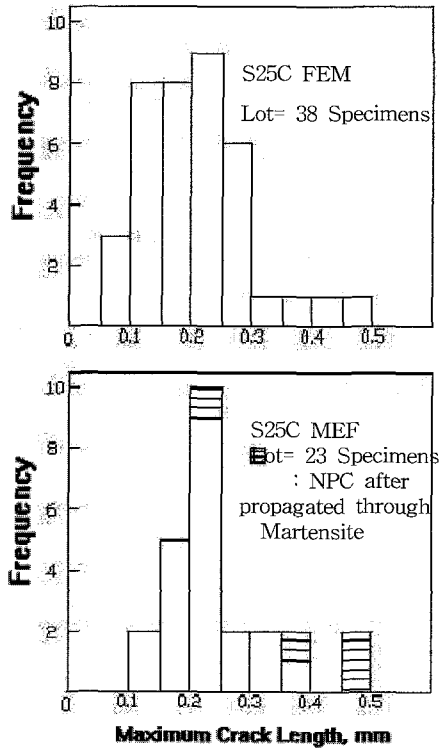
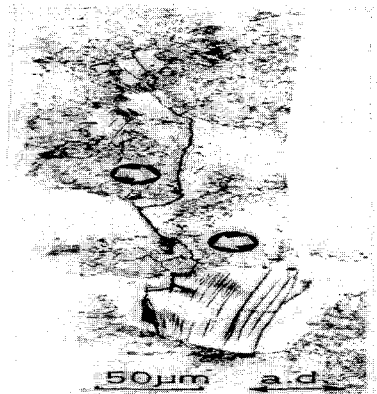


Fig. 8 Histograms of the maximum length of non-propagating cracks



S25C MEF, L = 0.32 mm

Fig. 9 Typical feature of non-propagating crack after propagated through martensite

3.2 균열전파거동의 관찰

앞 절에서 제시했던 Fig. 9을 보면, 균열은 비교적 짧은 길이일 때에도 마르텐사이트를 돌파하고 있다. 이렇게 돌파된 마르텐사이트 부분은 금속조직학적으로 무엇인가 취약한 부분일 가능성이 있다. 그러한 구체적인 예로서, 저 경도 영역, 구(舊) 오스테나이트(Austenite) 입계(粒界), 3차원적 조직의 형태 등을 생각할 수 있다. 각각에 대하여 이하에 검토를 진행하겠다.

3.2.1 마르텐사이트의 저 경도 영역에 대하여

본 실험에 사용한 시험편의 마르텐사이트 경도는 일정하지 않고, S25C 연결재의 경우 Hv = 400~900의 범위에서 분포하고 있다. 따라서, 마르텐사이트의 균열확대저항은 일정하지 않고, 저 경도 영역에서는 당연히 저하되어 있는 것으로 생각된다. 그러므로, 균열이 돌파한 부분의 경도를 측정하였다. Fig. 10은 모상 페라이트에 발생한 균열이 A, BC구간, D에서 제2상 마르텐사이트를 돌파하고 있고, 옆 모식도에는 경도의 측정점을 나타내고 있다. Table 2는 측정된 경도값을 보이고 있다. 측정된 경도값들은 편차는 있지만 평균값과 크게 다르다고 할 수 없다. 따라서, 균열에 의해서 돌파 당한 마르텐사이트부가 저 경도 영역이라고는 할 수 없다.

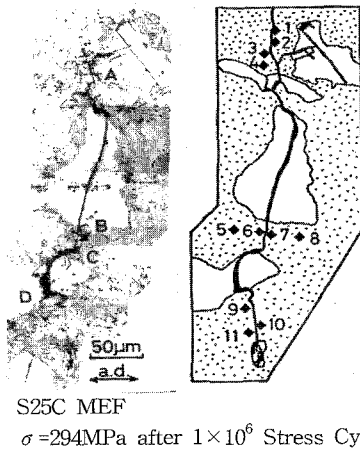


Fig 10. Typical feature of crack propagated into martensite

Table 2 Vickers hardness of point shown in Fig.10

Point	Hv	Point	Hv
1	729	7	388
2	946	8	870
3	797	9	787
4	952	10	767
5	661	11	514
6	340		

3.2.2 구오스테나이트 입계에 대하여

마르텐사이트 조직 중에 존재하는 불균질 영역으로서 구오스테나이트 입계는, 재료의 탄소농도 및 담금질 온도가 낮은 경우, 균열의 우선 발생장소가 된다고 알려져 있다.[17] 본 복합조직강의 경우도 저탄소강이면서 담금질 온도도 낮기 때문에, 구오스테나이트 입계는 약화되어 있을 것이다. 그러므로, 전해연마 후 특수한 부식액[18]을 사용해서 구오스테나이트 입계를 현출(現出)시킨 시험편을 사용하여 피로시험을 수행하였다.

그 결과, 구오스테나이트 입계를 따라 전파한 균열이 발견되었다. 그 일례를 Fig. 11에 보였다. 화살표로 표시한 부분이 마르텐사이트 중의 구오스테나이트 입계를 따라 전파한 균열의 모습이다.

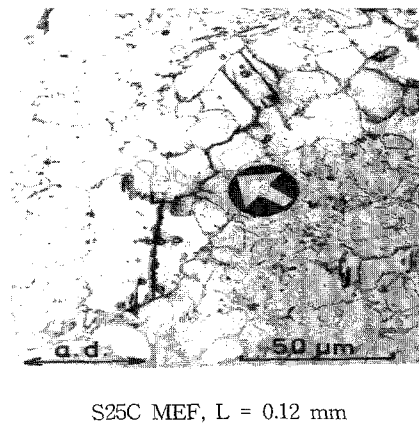


Fig. 11 Typical feature of crack propagated into martensite on the PAG boundary

3.2.3 3차원적 조직형태에 따른 균열전파 거동

일반적으로, 균열이 전파할 때는 전체적으로 반 타원 모양을 띄면서 깊이방향으로도 전파하기 때문에, 균열전파 거동을 관찰 할 때는 깊이 방향의 관찰도 빼놓을 수 없다.

균열이 발생한 시험편을 축을 포함하는 단면으로 절단하여 균열의 깊이 방향을 관찰한 결과, 표면 마르텐사이트 중에는 균열이 지나가지 않았는데, 표면 바로 밑의 페라이트 중에는 균열이 존재하고 있는 경우가 발견되었다. 그 예를 Fig. 12에 나타내었다. 균열이 내부로부터 발생했다고는 우선 생각할 수 없으므로, 균열과 조직과의 관계는 Fig. 13과 같이 되어 있다고 생각할 수 있다. 또 한가지 현상은, 표면에서 균열에 의해 돌파 당한 마르텐사이트 조직은 그 두께가 매우 얇다는 사실이다. 이 예는 Fig. 14에 나타내었다.

이상의 사실들로부터, 연결제에서는 고립제에서 보여지는 균열의 조직 선택적 전파가 3차원적으로 이루어지고 있다고 생각된다. 즉, 균열은 내부에서 마르텐사이트를 우회하여, 또는 취약한 마르텐사이트부를 골라서 전파한다고 볼 수 있다.

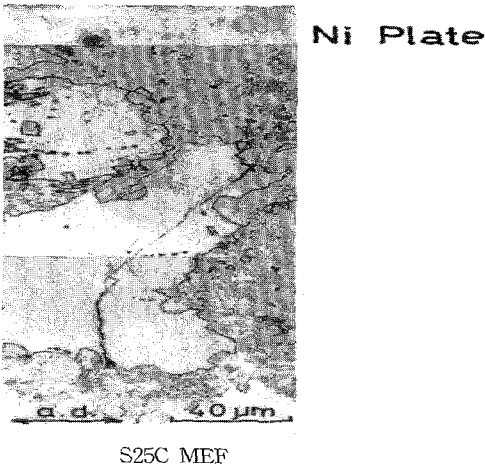


Fig.12 Feature of crack view in longitudinal section surface martensite has not cracked

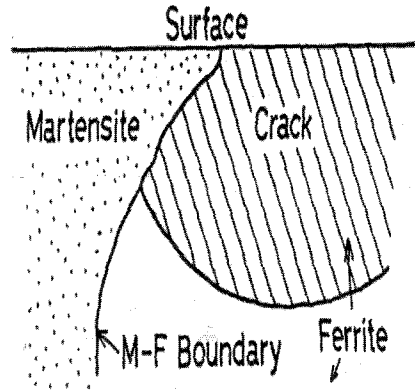


Fig. 13 Illustration of the crack shape

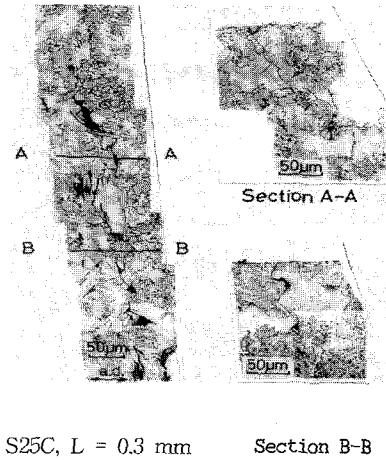


Fig. 14 Typical feature of non-propagating crack view in surface and longitudinal section

4. 결론

페라이트·마르텐사이트 2상 복합조직강에 있어서, 제2상 마르텐사이트의 조직형태에 착목하여, 마르텐사이트가 서로 연결되어 모상(母相) 페라이트를 둘러싼 형태의 이른바 연결제를 준비하였다. 이렇게 준비된 조직형태가 피로한도의 크기에 어떤 영향을 미치는지 조사함과 아울러, 그 영향의 원인을 미시균열의 전파거동을 미시조직과 결부시

켜 고찰함으로써 밝히고자 하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 제2상 마르텐사이트를 연결형태로 하여 페라이트 중의 균열길이를 한정시키더라도, 예상했던 피로한도의 상승은 보이지 않는다.

2) 마르텐사이트의 연결재와 고립재에서 발생하는 한계정류균열의 길이는 서로 비슷하였다. 이것은 마르텐사이트를 연결형태로 하더라도 한계정류균열의 길이를 제한시킬 수 없다는 것이며, 피로한도가 상승하지 않은 원인이 되고 있다.

3) 연결재에서는 고립재에서 보여지는 균열의 조직 선택적 전파가 3차원적으로 이루어지고 있다고 생각된다. 즉, 균열은 내부에서 마르텐사이트를 우회하거나, 또는 구오스테나이트 입계와 같은 취약한 마르텐사이트부를 골라서 전파한다고 볼 수 있다.

### 참고문헌

[1] P.J.E. Forsyth., "A Two Stage Process of Fatigue Crack Growth", Proc. Crack Propagation Symp., Cranfield, 1 pp.76. 1961

[2] M. Hempel, "Metallographic Observation on the Fatigue Metal", Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals, pp.54, 1956

[3] 大久保, 地内, 北岡, 日本機械學會論文集, 34-264, pp.1349. 1968

[4] 西谷, 西田, "疲勞限度う存在と微視的停留き裂の關係", 日本機械學會論文集, 39-321, pp.1385. 1973

[5] 中尺, 小林, 森田, 飯倉, 宮内, 石井, "結晶體の大きさを變えた低炭素鋼平滑および缺陷き材の疲勞き裂の舉動と疲勞限度", 日本機械學會論文集, 40-329, 9. 1974

[6] P.G. Forrest., A.E.L. Tate., "Crack Propagation in High Stress Fatigue", J. Inst. Metals, 1964-65 vol. 93, pp.438. 1965

[7] 山田, 清水, 中村, 國尾武, "二相組織鋼における停留き熱の舉動", 日本機械學會論文集, 20-10, pp.996. 1976

[8] N.E. Frost., "A Relation Between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel", Proc. Inst. Mech. Engrs. 173-35, pp.811. 1959

[9] 小林英男, 中尺一, "金屬の疲勞き裂の舉動", 機械の研究, 20-10, pp.1384. 1968

[10] 北川英夫, 西谷弘信, 松本年男, "疲勞き裂成長の下限界應力擴大係數  $\Delta K_{th}$  とき裂材・缺陷

材の疲勞限度との關係について", 日本機械學會論文集, 42-356, pp.996. 1976

[11] 友田, 立花, 田名, 黒木, 鐵と鋼, 63 pp.962. 1977

[12] 立花, 川地, 山田, 國尾, "強レベル, 異なる炭素鋼における耐久限度の結晶立經存在性について", 日本機械學會論文集, 54-507. pp.1954. 1988

[13] 辛男, 小川情六林 夫, 日本金屬學會誌, 44-3, pp.239, 1980

[14] F.Borik, Chapman, R.D, Jominy, W.E, Trans, ASM, 50(1958), 242

[15] H.W. Hayden, S.Floreen, "The Fatigue Behavior of Fine Grained Two-phase Alloys", Met, Trans., 4(1973), 561.

[16] T.Kunio, K.Yamada, "Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Non-propagating Fatigue Cracks in Martensitic-Ferrite Structure" ASTM STP 675, PP.342, 1979

[17] 清水, 矢田, 中村, 鈴木惠, 日本機械學會論文集, 36-281, PP.17, 1970

[18] 宋森弘, 山田, 清水, 國尾武, "旧材-ステナイト粒界の新しい現出法", 日本機械學會論文集, 40-330, 407, 1974