

# 페라이트-마르텐사이트 이상조직강의 피로파괴거동에 미치는 노치효과

도영민

두원공과대학 자동차학과  
(2003. 8. 7. 접수 / 2003. 9. 8. 채택)

## The Notch Effects on the Fatigue Fracture Behaviour of Ferrite-Martensite Dual Phase Steel

Young-Min Do

Department of Automobile Engineering, Doowon Technical College  
(Received August 7, 2003 / Accepted September 8, 2003)

**Abstract** : For the tensile tests of the F.E.M., microvoids are created by the boundary separation process at the martensite boundary or neighborhood and at inclusions within the ferrite, to grow to the ductile dimple fracture. For the case of the M.E.F., microvoids created at the discontinuities of the martensite phase which exists at the grain boundary of the primary ferrite are grown to coalescence with the cleavage cracks induced at the interior of the ferrite, which as a result show the discontinuous brittle fracture behavior.

In spite of their similar tensile strengths, the fatigue limit and the notch sensitivity of the M.E.F. is superior to those of the F.E.M. The M.E.F. is much more insensitive to notch than F.E.M. from the stress concentration factor( $\alpha$ ).

**Key Words** : Martensite Encapsulated islands of Ferrite(M.E.F.), Ferrite Encapsulated islands of Martensite(F.E.M.), notch, stress concentration factor, fatigue strength, fatigue limit

### 1. 서 론

연질인 페라이트(ferrite)조직에 제2상 마르텐사이트(martensite)조직이 서로 다르게 분포되어 있는 두 복합조직강은 외력에 대하여 단상에서와 같이 자유로운 변형을 할 수 없으며, 두 상간의 금속적·역학적 성질 차이로 인하여 복합재료적 거동을 나타낸다<sup>1)</sup>. 따라서, 이들 두 복합조직강은 고강도·고인성 재료개발 및 파괴본질을 이해하는 데 좋은 모델이 될 수 있으며, 이에 대한 연구도 활발하게 진행되어 왔다. 야금학적 입장에서 합금원소(Mn, Si, Cr)첨가에 의한 금속적 성질변화<sup>2)</sup>, 페라이트 입경 및 마르텐사이트 체적률 변화에 따른 기계적 성질<sup>3)</sup>, 2상 형태에 기인한 인장 및 피로거동의 고찰<sup>4)</sup> 등이 그 일례이다. 한편, 회전굽힘 피로응력을 받는 부재는 표면에서 굽힘 인장·압축응력이 최대이고, 공기와의

접촉에 의한 산화, 개재물 및 연질조직에서의 우선적 피로손상(fatigue damage) 등의 이유로 인하여 크랙이 표면에서 내부로 진전한다. 특히, 실제 사용되는 구조물은 핀 구멍(pin hole), 나사, 키홈, 필릿(fillet)과 같은 기하학적 불연속 요소를 대부분 가지게 된다. 정적 인장실험에서 노치가 있으면 응력집중효과(stress concentration effect)로 인하여 노치저부에는 국부항복이 발생함으로써 집중응력은 대체로 완화되지만, 피로실험에서는 피로크랙이 대부분 노치저부에서 파단수명의 비교적 초기에 발생하기 때문에 피로크랙수명은 파단수명의 대부분을 차지한다. 이와 같은 표면균열과 노치부재의 피로문제와 관련된 연구는 많이 보고되고 있으나<sup>5,6)</sup>, 이들 연구는 단일 시험체에 대한 것이 대부분이며 금속조직적 파라메타인 제2상 형태변화에 따른 표면균열 및 응력집중계수 변화에 의한 두 복합조직강의 노치효과에 대한 상호 비교는 미흡한 실정이다.

본 연구는 이와 같은 관점에서 거시적·미시적 파괴거동에 영향을 주는 제반 금속조직적 파라미터는 동일수준이며 단지 제2상 마르텐사이트의 분포 형태만이 서로 다른 두 복합조직강에 대하여 초기 크랙 형성위치, 합체 및 파괴양식에 관한 상이점을 고찰하였으며, 응력집중계수 및 제2상 형태변화에 따른 파괴거동과 노치효과와의 관계에 대해서 검토·고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

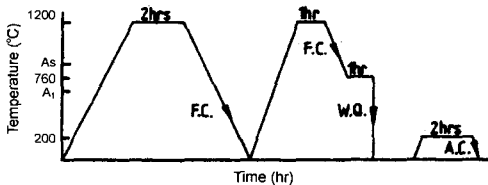
본 실험에 사용된 소재는 직경 25mm의 열간압연봉재인 SM20C이며, 이의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 복합조직강을 만들기 위하여 행한 열처리 과정을 나타낸 것이다. 이 열처리 과정에 의하여 제2상인 마르텐사이트가 모상인 페라이트를 3차원적으로 둘러싸고 있는 연결형의 조직(M.E.F.복합조직강)과 제2상이 모상 중에 단독으로 존재하는 고립형의 조직(F.E.M.복합조직강)을 얻었다. 특히, 페라이트 입경 및 마르텐사이트 체적률, 두상간 경도비가 동일조건이 되도록 담금질 온도 및 냉각속도에 세심한 주의를 하였다.

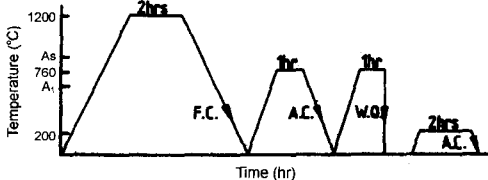
Fig. 2는 이들 두 복합조직강의 대표적인 조직사진이며, Table 2, 3은 이들 복합조직강에 대하여 조사된 금속적 성질 및 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical composition of specimen.

material	Chemical composition (wt. %)				
	C	Si	Mn	P	S
SS41	0.19	0.20	0.53	0.029	0.042

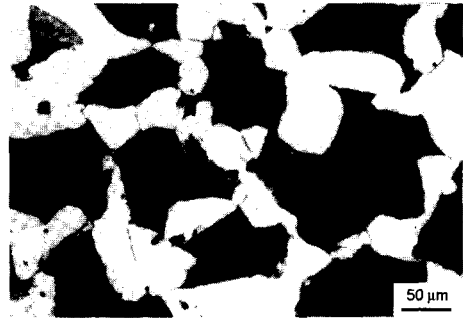


(a) F.E.M. dual phase steel



(b) M.E.F. dual phase steel

Fig. 1. Heat treatment process of F.E.M. and M.E.F. dual phase steels.



(a) F.E.M. Microstructure



(b) M.E.F. Microstructure

Fig. 2. Optical micrographs of dual phase steels.

Table 2. Metallurgical properties of specimen materials.

	ferrite grain size (μm)	martensite grain size (μm)	martensite volume fraction (%)	Hardness(Hv), 25gf		
				ferrite	martensite	ratio
F.E.M.	65	140	50.20	151	623	4.05
M.E.F.	65	-	51.60	151	623	4.05

Table 3. Mechanical properties of specimen materials.

	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Poisson's ratio (μ)
F.E.M.	726.77	406.60	$1.98 \times 10^5$	10.21	22.78	0.2704
M.E.F.	745.09	449.13	$2.03 \times 10^5$	7.19	10.26	0.2770

Fig. 3은 피로시험편의 형상 및 치수를 나타낸 것으로서 각 시험편에 대한 응력집중계수는 Peterson 선도<sup>7)</sup>에서 구하였다. 응력집중계수  $\alpha=1.01$  시험편을 편의상 평활재로 하였고, 환상 원호노치재의 경우  $\alpha=1.42$ , 횡공 노치재의 경우  $\alpha=1.97$ , 환상 V홈 노치재의 경우  $\alpha=3.2$ 로 하였다. 실험에 사용된 기기는 편지식 회전굽힘 피로시험기(cantilever type rotary bending fatigue test machine)이며, 주파수는 20Hz, 파형은 정현파형, 응력비  $R=-1$ 이며, 분위기는 실온·대기중이었다. 피로시험 전 시험편에 대한 유효단면적 측정과 가공의 정밀도 검정은 공구현미경

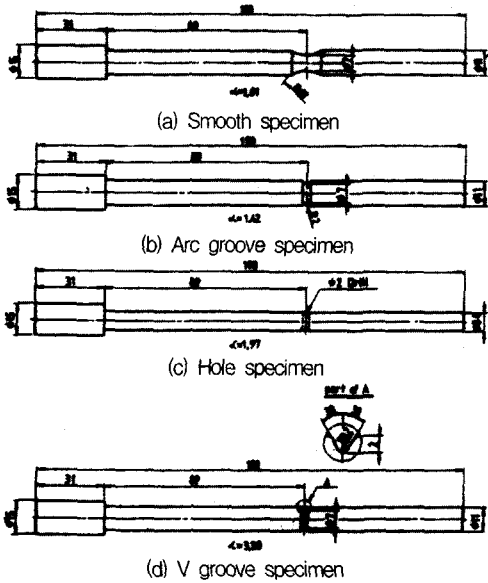


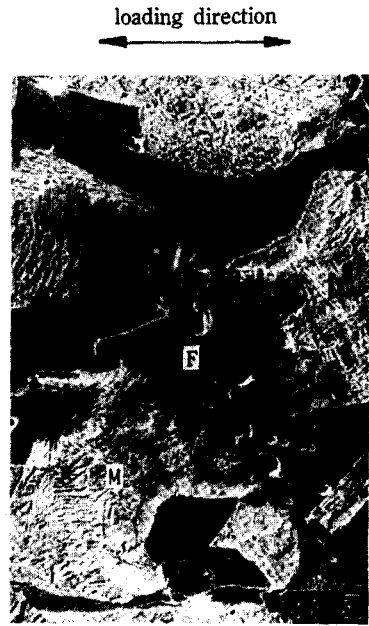
Fig. 3. Shape and dimensions of fatigue test specimens.

(Mitutoyo model MS)과 옵티컬 컴퍼레이터(Mitutoyo model PJ-300)를 이용하였다. 그리고 시험편에 부과된 응력은 유효단면적을 기준으로 한 공칭응력을 적용하였다. 피로실험에 의한 두 복합조직강의 초기 미소피로크랙 형성거동 및 피로크랙진전거동은 금속현미경(Seiwa model SM-600)으로 관찰하였다. 크랙길이 측정은 금속현미경을 피로시험기에 부착한 상태에서 시험편을 분리하지 않고 실험 도중에 측정 및 관찰하였다. 또한 초기미소크랙형성, 성장, 합체 및 파괴양식을 입체적으로 관찰하기 위하여 인장 및 피로파단된 시험편에 대하여 응력축에 평행한 종단면을 먼저 에칭한 뒤, 파면과 대응시켜 주사식 전자현미경으로 촬영하였다.

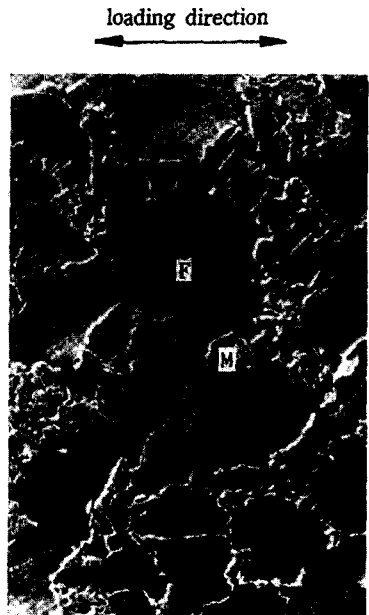
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 인장 및 피로실험에 의한 초기미소크랙 형성 및 미시적 파괴거동

Fig. 4는 응력-변형률 선도상에서 국부항복이 발생한 뒤의 임의점에서 하중을 제한한 뒤, 인장축에 평행한 종단면상에 관찰된 초기미소크랙 형성위치를 보여주는 사진이다. F.E.M.복합조직강의 경우 마르텐사이트 입계 및 입계근방과 페라이트에 존재하는 개재물에서 초기미소크랙이 미소공동(microvoid)의 형태로 존재하여 있으며, 마르텐사이트 조직 내



(a) F.E.M. dual phase steel

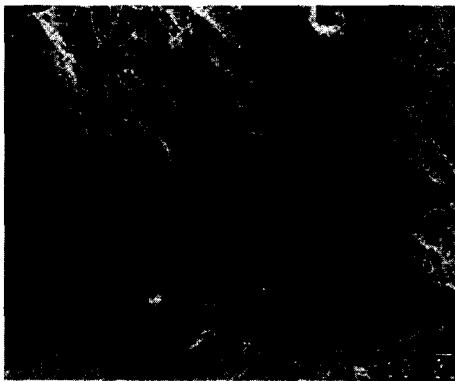


(b) M.E.F. dual phase steel

Fig. 4. Micrographs showing the crack initiation site formed during the tensile test (F : ferrite, M : martensite).

에는 전혀 손상이 없음을 알 수 있다. 또한, 응력축에 대략 45° 방향으로 초기미소크랙이 발생하려는 경향이 있음도 확인할 수 있다. M.E.F.복합조직강의 경우 초기미소크랙은 제2상 마르텐사이트 입계 및

입계근방에서 미소공동의 형태로 존재하여 있으며 페라이트는 전혀 손상되지 않았음을 관찰할 수 있다. 모상입경, 마르텐사이트 체적률, 상간 정도비, 인장강도가 동일함에도 불구하고 이러한 상반된 결과가 나타나는 이유는, 비슷한 강도를 가진 2상 형태의 변화 때문이다. 즉, 연질상인 페라이트에는 담금질로 인한 내부응력의 차이가 생기고, 마르텐사이트에 의한 페라이트의 소성구속효과의 정도가 다르기 때문에 페라이트의 소성유동은 외력에 대하여 각각 다른 거동을 나타낸다. 또한, F.E.M. 및 M.E.F. 복합조직강이 공통적으로 페라이트와 마르텐사이트 경계에서 크랙이 생성되는 이유는, 마르텐사이트 조직은 무확산변태에 의하여 합금원소 및 탄화물이 과포화되어 있으며, 기지조직인 페라이트에 비하여 불균일한 표면을 이루고 있다. 따라서 미시적으로 판단될 수 있을 정도의 응력집중이 상의 경계에서 우선적으로 일어나기 때문인 것으로 생각된다.



(a) F.E.M. dual phase steel



(b) M.E.F. dual phase steel

Fig. 5. S.E.M. micrographs showing the fracture appearance with the corresponding microstructure formed during the tensile test.

Fig. 5는 인장실험에 의하여 파단된 파단면과 그 종단면과를 대응시켜 SEM으로 입체촬영한 사진이다. F.E.M. 복합조직강의 경우 Fig. 4에서 고찰된 바와 같은 위치에 초기미소크랙이 미소공동의 형태로 성장 및 합체하였고, 전단파단(shear rupture)형식의<sup>8)</sup> 전형적인 연성 덩플(dimple)파괴가 일어났음을 알 수 있다. 반면 M.E.F. 복합조직강의 경우 Fig. 4의 실험결과와 마찬가지로 마르텐사이트 입자의 불연속 연결부에서 미소공동의 형태로 초기미소크랙이 형성된 후, 응력증가에 따라 인접 페라이트에서 형성된 벽개크랙(cleavage crack)과 일체가 되어 단위크랙을 형성하였다. 이 단위크랙은 다시 합체되면서 최종파단 직전까지 성장하였음을 알 수 있다. 본 실험에서 확인되어진 최종파단에 이르기 전의 한계크랙길이는 페라이트 5~6개 정도의 결정입(325~390  $\mu\text{m}$ )에 해당되었다. 따라서 최종파단면은 나선전위(screw dislocation)에 의하여 형성된 벽개단(cleavage step)과<sup>9)</sup> 리버패턴이 존재하는 벽개파단(cleavage rupture)<sup>8)</sup> 및 마르텐사이트의 불연속 연결부에서 형성된 미소 공동에 의한 전단파단이 혼재하는 불연속적 취성 파단임을 알 수 있다.

Fig. 6은 동일한 평활재 피로시험편에 대하여  $5 \times 10^5$  시간강도 응력을 계속 부하하였을 때 응력축에 직각방향으로 피로크랙이 진전되고 있는 상태에서 시험기로부터 시험편을 분리한 후, 응력축에 평행한 종단면을 연마, 에칭함으로써 형성된 피로크랙 진전과정의 사진이다. F.E.M. 복합조직강의 경우 연질인 페라이트에서 초기미소피로크랙이 형성된 후, 페라이트 입내 또는 입계를 따라 크랙이 지그재그로 진전하면서 크랙분기 현상이 관찰된다.  $\Delta K$ 에 관계없이 크랙 분기가 확인되어지며 전체적으로 striation 기구에 의하여 진전하였음을 알 수 있다. 한편, F.E.M. 복합조직강의 페라이트는 M.E.F. 복합조직강의 페라이트에 비하여 제2상 마르텐사이트의 분포 형태에 의한 소성구속이 적으므로 어느 정도 소성유동이 가능한 상태이다. 따라서 연질인 페라이트가 시험편 원주면상에 노출됨으로서 파단수명의 초기에 피로손상을 받게 되며 응력집중계수가 높아질수록 이러한 경향은 보다 심할 것으로 추측된다. M.E.F. 복합조직강의 경우 초기미소피로크랙이 마르텐사이트 입계 및 입계근방에서 형성되어 크랙이 저 $\Delta K$ 영역에서는 마르텐사이트와 페라이트가 공히 일체가 되어 조직선택성 없이 striation 기구에 의하여 진전하다가 고 $\Delta K$ 영역에서는 피로크랙선단에서의 슬립영역 확대에 의하여 페라이트 입내에는

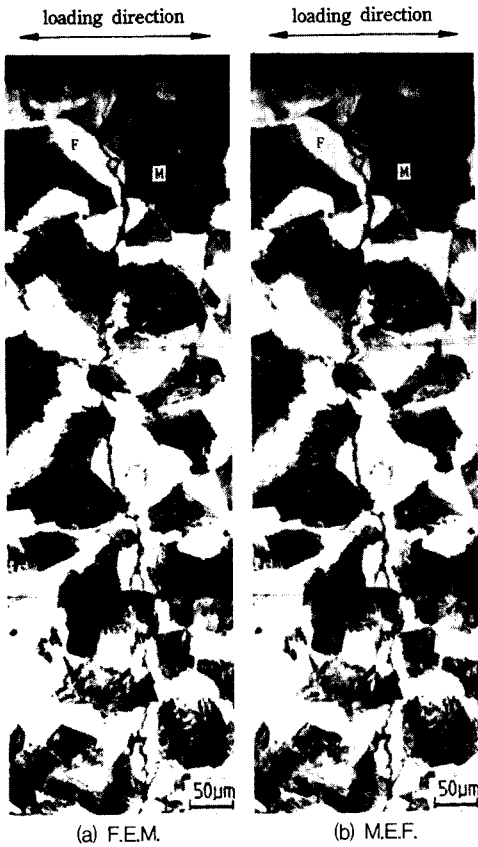


Fig. 6. Cracks of the dual phase steels propagated into the interior of the fatigue test specimen. (a :  $\sigma=306.52$  Mpa, b :  $\sigma:328.26$ MPa) (F : ferrite, M : martensite)

벽개크랙이 유도되며, 점차적으로 cleavage기구조 천이하기 때문에 급속한 진전을 하게 되어, 그 결과 피로크랙이 직진하는 경향성이 있다. 이와 같이 M.E.F. 복합조직강의 파괴거동의 경우, 페라이트 입 내에는 담금질로 인한 내부응력 및 제2상 형태에 기인한 소성구속으로 인하여 응력이 상승된 상태이다. 따라서 초기피로크랙발생은 지연되고 제2단계 피로크랙으로 안정적 전파를 하게 되면, 크랙선단에서는 연질조직에 의한 크랙 분기 및 둔화현상이 적어진다.

### 3.2. 응력집중계수변화에 의한 피로수명 및 노치효과

Fig. 7, 8은 응력집중계수( $\alpha$ )를 parameter로 한 F.E.M. 및 M.E.F. 복합조직강의 피로강도곡선(S-N곡선)으로서, 두 복합조직강 모두 응력집중계수가 증가할수록 피로강도는 저하한다.

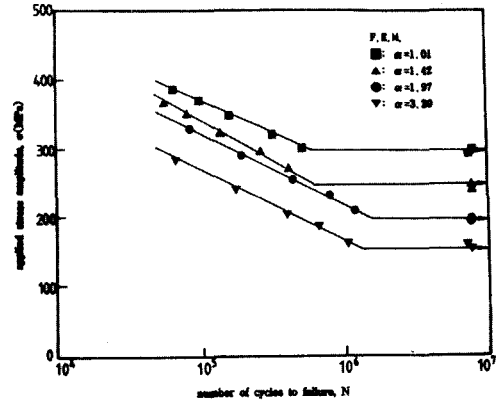


Fig. 7. S-N curves for F.E.M. dual phase steel

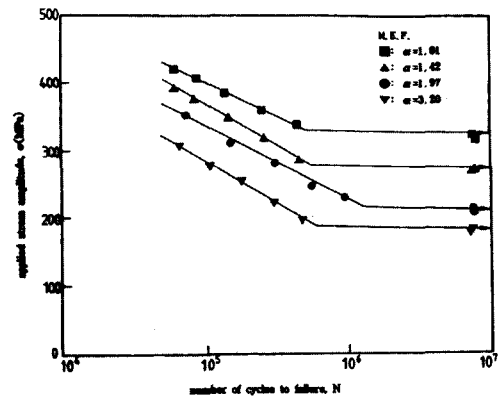


Fig. 8. S-N curves for M.E.F. dual phase steel

전체적으로 M.E.F. 복합조직강이 F.E.M. 복합조직강보다 피로한도는 높았으며, 각각의 평활재 피로한도에 대한 노치계의 감소율 역시 M.E.F. 복합조직강이 우수하였다. 이와 같이 두 복합조직강의 정적 인장강도가 비슷함에도 불구하고 피로한도 및 평활재 피로한도에 대한 노치계의 피로한도 감소율이 서로 차이가 나타나는 이유는 제2상 마르텐사이트 분포형태에 따른 페라이트 입내에 유도된 소성구속 및 열처리에 의한 내부응력 차이로 인하여 F.E.M. 복합조직강이 M.E.F. 복합조직강보다 조기에 연질인 페라이트, 마르텐사이트 입계 및 입계근방에서 피로크랙이 유도되었기 때문이다.

Fig. 9는 F.E.M., M.E.F. 복합조직강에 대한 응력집중계수 변화에 따른 피로한도와와의 관계를 나타낸 것으로서, 참고로 일본철강협회 환경강도부회가 실시한 내식성 고장력강인 HT80, HT50재에 대한 결과도<sup>10,11)</sup> 같이 표시하였다. 응력집중계수가

낮을 때에는 인장강도 레벨순으로 피로한도는 결정되지만, 응력집중계수가 높아질수록 본 시험재의 경우가 HT80, HT50재에 비하여 피로한도는 완만하게 감소하는 경향이 있었다. 특히, HT80재와 비교하여 보면 M.E.F. 복합조직강의 경우  $\alpha=2.4$  부근에서 응력집중계수가 높아질수록 정적 인장강도 레벨이 HT80재보다 낮음에도 불구하고 피로한도는 높아지며, F.E.M. 복합조직강의 경우  $\alpha=3.2$  부근에서 인장강도 레벨이 낮음에도 불구하고 응력집중계수가 높아질수록 HT80재와 비슷한 수준의 피로한도 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 HT80재의 경우 본 시험재와 같이 제2상 마르텐사이트 분포형태에 의한 소성구속 및 열처리에 따른 내부응력이 페라이트 입내에 유도됨으로서 재료의 강인화는 표시하지 않으나, 페라이트 입경의 미세화(약  $20 \mu\text{m}$ ) 및 합금원소(Ni, Cr, Mo)에 의한 고용강화가 주원인이 되어 응력집중계수가 낮을 때에는 HT80재의 피로한도는 우수한 것으로 판명된다. 그러나, 응력집중계수가 높을수록 본 시험재의 페라이트 입내에 유도된 응력상승으로 인한 재료의 강인화가 HT80재의 페라이트 입경 및 합금원소에 의한 재료 강인화보다 상대적으로 개선되었기 때문에 M.E.F. 복합조직강의 피로한도는 HT80재보다 현저하게 높아지는 것으로 생각된다.

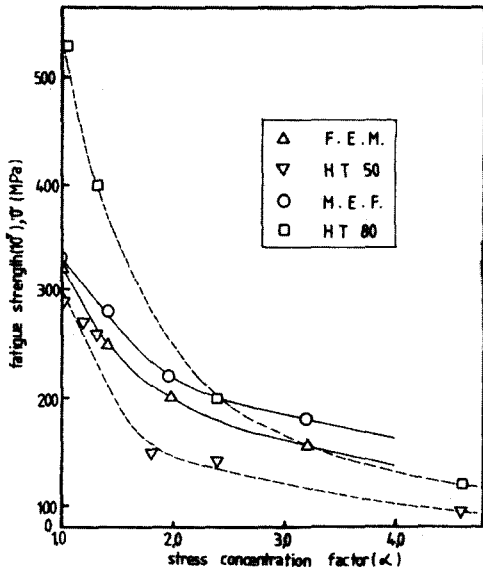


Fig. 9. Relation between stress concentration factor and fatigue strength.

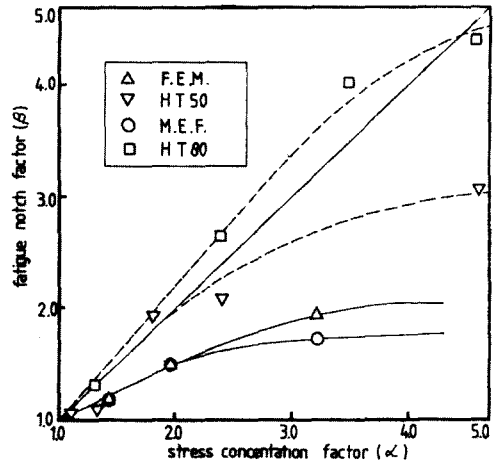


Fig. 10. Relation between stress concentration factor and fatigue notch factor.

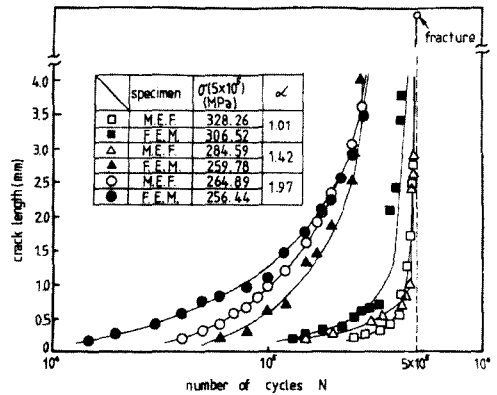


Fig. 11. Crack length vs. number of cycles for F.E.M. and M.E.F. dual phase steels loaded with the fatigue strength at  $5 \times 10^5$  cycles.

Fig. 10은 F.E.M., M.E.F. 복합조직강에 대한 응력집중계수와 노치계수와의 관계를 나타낸 것으로서, HT80 및 HT50재의 실험결과도 같이 표시하였다. 본 시험재의 경우가 HT80, HT50재보다 현저하게 노치에 둔감하다는 것을 알 수 있다. 환상 원호노치 재부터 응력집중계수 증가 순서대로 M.E.F. 복합조직강의 노치감도 계수는 0.43, 0.52, 0.34이었고 F.E.M. 복합조직강의 경우 0.48, 0.52, 0.43으로 나타났다. 이와 같이 전체적으로 M.E.F. 복합조직강의 노치감도가 F.E.M. 복합조직강보다 둔감하며,  $\alpha=2.0$  이상이 되면 M.E.F. 복합조직강이 F.E.M. 복합조직강보다 훨씬 둔감해 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 F.E.M., M.E.F. 복합조직강에 대하여 응력집중계수를 파라미터로 하였을 때 반복회수 증가

에 따른 피로크랙길이 변화와의 관계를 나타낸 것이다. 모든 시험재에 대하여 S-N곡선 상에서 구한  $5 \times 10^5$  시간강도 응력으로 부하하였다. 응력집중계수가 증가할수록 크랙발생수명은 짧아지며, F.E.M. 복합조직강이 M.E.F. 복합조직강보다 더 짧아짐도 알 수 있다. 그 원인은 F.E.M. 복합조직강의 표면은 소성구속이 적고 소성유동이 어느 정도 가능한 페라이트가 노출되어 있기 때문이다. 따라서 M.E.F. 복합조직강보다 초기에 피로손상을 받으며, 응력집중계수가 증가할수록 Notch 선단에는 상당한 실용력의 상승이 수반되므로 페라이트의 변형은 보다 용이하게 된다. 피로크랙 진전수명의 경우는 응력집중계수가 증가할수록 길어지며 F.E.M. 복합조직강이 M.E.F. 복합조직강보다 긴 것을 알 수 있다. 즉, 피로크랙 발생시기는 노치저부에 부하된 실용력에 의하여 결정되지만 피로크랙으로 안정적 전파를 하게 되면 전 시험편의 응력집중은 동일수준이 되며, 단지 공칭응력으로 계산되어진 부하 하중에 의존하여 피로크랙이 진전한다. 따라서 응력집중계수가 증가할수록 부하 하중이 적어지기 때문에 피로크랙 진전수명은 길어지게 된다.

#### 4. 결론

제2상 마르텐사이트 분포형태가 서로 다른 F.E.M., M.E.F. 복합조직강에 대하여 인장 및 피로실험을 한 후, 초기미소크랙 형성위치, 합체 및 파괴양식에 대한 상이점과 응력집중계수를 변화시켰을 때 미시적·거시적 파괴거동 및 노치효과에 관하여 고찰한 결과는 다음과 같다.

1) 인장실험에 의한 초기 미소크랙 형성 및 미시적 파괴거동은 F.E.M. 복합조직강의 경우는 마르텐사이트 입계 및 입계근방과 페라이트 입내에 존재하는 개재물에서 계면분리에 의하여 미소공동이 형성, 성장되면서 연성 덩플파괴가 일어난다. 반면, M.E.F. 복합조직강은 초석 페라이트 결정입계에 존재하는 제2상 마르텐사이트 불연속부에서 형성된 미소공동과 페라이트 입내에 유도된 벽개크랙이 성장, 합체하면서 불연속적 취성파괴가 일어난다.

2) 회전굽힘 피로실험에 의한 초기미소크랙 형성 위치는 인장실험의 경우와 비슷하였고, 피로크랙 진전경로는 F.E.M. 복합조직강의 경우  $\Delta K$ 에 관계없이 연결인 페라이트를 따라 진전하였으며 피로크랙

분기현상도 일어났다. 그러나, M.E.F. 복합조직강의 경우는 저 $\Delta K$ 영역에서는 striation 기구에 의하여 진전하다가 고 $\Delta K$ 영역에서는 cleavage 기구로 천이하면서 페라이트 입내에는 벽개크랙이 동반되었다.

3) 정적 인장강도가 비슷함에도 불구하고 피로한도 및 노치감도는 M.E.F. 복합조직강이 F.E.M. 복합조직강보다 우수하며, 응력집중계수  $\alpha=2.0$  이상이 되면 M.E.F. 복합조직강이 훨씬 노치에 둔감해진다.

4)  $5 \times 10^5$  시간강도 응력을 F.E.M., M.E.F. 복합조직강에 동일하게 부하하였을 때 페라이트 입내에는 제2상 마르텐사이트 분포형태에 기인한 소성구속 및 열처리로 인한 내부응력 차이로 인하여 F.E.M. 복합조직강의 피로크랙 발생시기가 M.E.F. 복합조직강보다 빨라지며, 응력집중계수가 높을수록 이러한 경향은 더욱 심하다.

#### 참고문헌

- 1) 김정규, "미시적 파괴현상으로 본 재료개발의 기본", 대한기계학회 논문집, 제20권, 제4호, pp. 288~295, 1980.
- 2) 성장현, "복합조직강의 열처리 경로와 합금원소 첨가가 조직학적 인자와 인장성질에 미치는 영향", 부산대학교 박사학위논문, 1984.
- 3) T. Kunio and H. Suzuki, "Effect of Microduplex Structure Size on Tensile Fracture Behavior of Steels with Ferrite-Martensitic Structures", JSMS, Vol. 28, No. 309, pp. 478~484, 1979.
- 4) M. Saika and M. Shimizu, "Effect of Microstructure on Ductility and Fracture Mechanisms of Dual Phase Steels", JSME, Vol. 54, No. 507, pp. 2034~2038, 1988.
- 5) B.M. Wundt, "Effect of Notches on Low-cycle Fatigue", A Literature Survey, ASTM STP 490, pp. 11~16, 1972.
- 6) F.W. Smith, A.F. Emery and A.S. Kobayashi, "Stress Intensity Factors for Semicircular Crack", J. Appl. mech., Trans. of ASME, E, Vol. 89, pp. 950~953, 1967.
- 7) R.E. Peterson, "Stress Concentration Design Factors", John Willy & Sons, New York, pp. 48, 49, 50, 104, 1965.
- 8) A.S. Tetelman and A.J. McEvily, "Fracture of Structural Materials", John Willy & Sons, New

York, p. 40, 1967.

9) 北川英未, 小寺澤良一, “フラクトグラフィ”, 破壊力學と材料強度學講座, 培風館, pp. 61~65, 1977.

10) T. Okada, S. Hattori, S. Yamagishi, “The Notch Effect on Corrosion-Fatigue Strength of High-

Strength Steels”, JSME, Vol. 52, No. 473, pp. 124~130, 1986.

11) T. Okada, S. Hattori, S. Yamagishi, “Corrosion Fatigue of Notch Structural Steel Specimens in Seawater”, JSMS, Vol. 36, No. 409, pp. 1097~1103, 1987.