

## X-선 회절에 의한 SS41 불림재와 M.E.F. 복합 조직강의 피로 파단면 해석에 관한 연구

오세욱\*, 박영철\*, 박수영\*\*, 김득진\*\*\*, 허선철\*\*\*

\* 동아대학교 기계공학과

\*\* 동아대학교 재료실험실

\*\*\* 동아대학교 대학원

요 약 본 연구에서는 SS41 불림재와 M.E.F. 복합 조직강에 대해서 파괴 역학 파라미터와 X-선 파라미터 사이의 관계를 규명하였다. 피로 균열 진전 실험이 수행되었고, X-선 회절 방법이 피로 파단면에 적용되었다. 피로 파단면을 순차적으로 전해 연마하면서 깊이에 따른 X-선 파라미터(잔류응력, 반가폭)의 변화를 관찰하였다. 최대 소성역 깊이  $w_y$ 는 SS41 불림재에서는 반가폭의 분포로, M.E.F. 복합 조직강에 대해서는 잔류 응력의 분포로 결정할 수 있었다. 피로 파단면의 깊이 방향에 따른 X-선 파라미터의 분포로부터  $K_{max}$ 과  $w_y$ 의 관계식이 실험 데이터로부터 얻어지고, 이 식들로부터  $K_{max}$ 은  $w_y$ 의 측정에 의하여 추정되어질 수 있다.

### 1. 서론

자동차 산업의 발달과 더불어 복합 조직강과 같이 높은 강도를 가지면서 우수한 성형성과 간단한 열처리에 의하여 재질 개선이 가능한 자동차 구조 재료에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 M.E.F. (martensite encapsulated island of ferrite) 복합 조직강은 연질상인 페라이트(ferrite)와 이를 둘러싼 경질상인 마르텐사이트(martensite)조직으로 구성된 2상 혼합 조직이며, 이와 반대의 형태를 가진 F.E.M. 복합 조직강보다 항복 및 인장 강도가 높으며, 피로 크랙 전파 저항이 더 우수한 것으로 보고되고 있다.<sup>1)</sup>

복합 조직강에 대하여 피로 실험, 파괴 인성 실험, 부식 조건하에서의 실험 등의 데이터가 많이 보고되고 있지만, 재료의 파손 해석을 비접촉, 비파괴적으로 하는 X-선 회절 실험에 의한 연구 보고는 극히 미흡하며

이에 대한 연구가 절실히 요구된다. 또한 기존의 파괴 역학적인 파손 해석 방법과 X-선 회절에 의한 파손 해석방법을 상호 보완하여 비교 연구할 필요가 있다.

설계자나 생산 기술자가 사고의 조사 결과로부터 재발 방지 대책을 결정하는 경우, 그 사고품의 파면으로부터 재료 파괴시 작용한 부하 응력을 구할 수 있다면 아주 유용한 자료가 된다. 특히 피로 파괴된 부품에 대해서 설계 응력과 실제 작용한 응력을 비교할 수 있다면, 사고 대책에 대한 구체적인 지침이 될 수 있다. 따라서 피로 파단면에 X-선을 조사하여, 파면 표층부의 소성 변형량, 잔류 응력 등의 재료의 내부 구조에 관한 정보를 구하여, 피로 파괴시 부하 응력과 관계되는 응력 확대 계수 K와 연관시켜 고찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 불림 처리하여 내부 잔류 응력을 제거하고 결정 조직을 균질화시킨 SS41 불림재와 경질

상인 마르텐사이트상이 연질상의 페라이트상을 둘러싸고 있는 M.E.F. 복합 조직강에 대해서 파괴 역학 파라미터와 X-선 파라미터(잔류응력, 반가폭)의 상관 관계를 조사하였다. 또한 피로 균열 진전 거동과 파괴 역학적 조건과의 관계를 고찰하여, 파면하의 X-선 파라미터와 파면 형성시의 파괴 역학 파라미터를 비교 검토하였고, 피로 파면을 순차적으로 전해 연마하면서 X-선 파라미터의 변화로 소성역 크기 추정 의 가능성을 검토하였다. 이러한 실험 결과는 금속 재료의 파괴 시  $K_{max}$ 의 추정에 유용하게 이용될 것으로 생각된다.

2. 실험 방법

2.1. 재료 및 시험편

시험편 재료는 일반 구조용 탄소강으로 널리 쓰이고 있는 두께 16mm SS41강의 열간 압연 판재로서 화학적 성분은 Table 1과 같다. 시험편은 SS41강을 불림(normalizing) 열처리하여 잔류 응력을 제거하고, 금속 조직을 균질화시킨 SS41 불림재와 담금질-뜨임 열처리하여 경질의 마르텐사이트상이 연질의 페라이트상을 둘러싼 형태의 두개의 상으로 이루어진 M.E.F. 복합 조직강으로 만들어 가공하였으며, 시험편 채취 방향은 L-T방향으로 하였다.

Table 1. Chemical composition (wt.%).

C	Si	Mn	P	S
0.19	0.096	0.84	0.01	0.009

Table 2는 SS41 불림재와 M.E.F. 복합 조직강의 미세조직의 주요 변수들을 나타내었다.

Table 2. Metallurgical properties.

Material	Ferrite grain size ( $\mu\text{m}$ )	Martensite volume fraction(%)	Hardness(Hv), 25gf		
			Ferrite	Martensite	Pearlite
Normalized SS41 steel	30	.	151	.	270
M.E.F. dual-phase steel	30	51	151	560	.

결정입경의 크기는  $30\mu\text{m}$  정도이다. Table 3은 SS41 불림재, M.E.F. 복합 조직강의 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 3. Mechanical properties.

Material	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_u$ (MPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio ( $\nu$ )	Young's modulus (GPa)
Normalized SS41 steel	262.74	434.73	31.81	0.268	224.75
M.E.F. dual-phase steel	390.85	781.84	14.96	0.27	185.19

2.2. 피로 균열 진전 실험

피로 균열 진전 실험에 사용한 시험기는 전기유압서어보식 만능 피로시험기이며, 일직 진폭 하중 제어 방식으로 반복 인장 하중을 가하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 CT시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, 실험 조건은 주파수 10Hz, 정현파, 응력비는  $R=0.1$  및  $0.5$ 로 실은 대기 조건하에서 실험하였으며, 하중폭  $\Delta P$ 는 SS41 불림재는 5831 N, M.E.F. 복합 조직강의 경우는

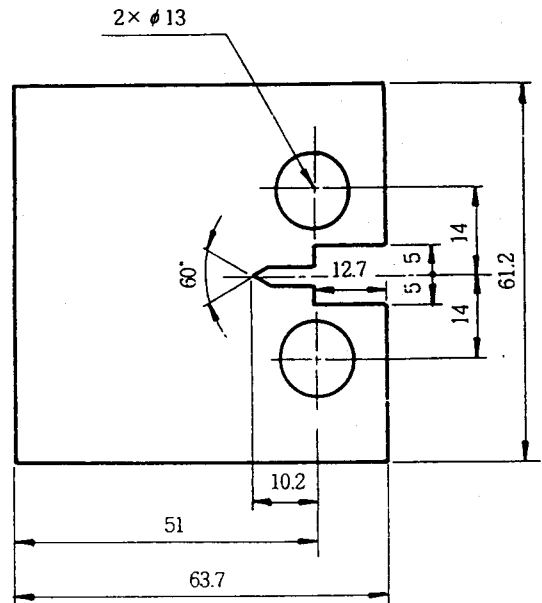


Fig. 1. Geometry and dimensions of CT specimen(unit : mm, thickness=12mm).

7585.2 N으로 하여 실험하였다. 균열 길이 측정시 주파수는 0.1Hz로 낮추었고, 배율 50배인 이동식 망원현미경을 시험편 양측면에 배치하여 균열 길이를 측정하였다.

2.3. X-선 회절 실험

2.3.1. X-선 회절 조건의 결정

SS41 불림재와 M.E.F. 복합 조직강은 페라이트계 철강 재료로서 체심 입방 구조이며, 결정 구조가 입방 구조인 경우, 특정 (hkl)면의 면간 거리는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 SS41 불림재와 M.E.F. 복합 조직강은 격자상수  $a=2.8664\text{\AA}$  과 Cr- $K_{\alpha}$  선  $\lambda=2.29092\text{\AA}$  을 이용하였을 때, Bragg의 조건식  $n\lambda=2d\sin\theta$  를 만족하는 회절면과 회절각  $2\theta$  값을 실험에 이용하였다. 본 실험에서는 SS41 불림재와 M.E.F. 복합 조직강의 경우는 (211)면의 회절을 이용하였다. X-선 파라미터를 측정하기 위하여 설정된 실험 조건을 Table 4에 나타내었다. 잔류 응력과 반가폭의 측정에 쓰인 장비는 X-선 회절 장치(X-ray diffractometer)이며, X선 응력 측정법 표준<sup>2)</sup>에 따라 회절각  $2\theta$  의 결정은 반가폭법(half-value breadth method)으로 하였으며, 병경법의 광학계로 4점입사( $\phi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )에 의하여  $\sin^2\phi$ 법으로 잔류 응력을 산출하였다. 반가폭은 잔류 응력 측정시 입사각  $\phi_0=0^\circ$ 에서의 회절 강도 곡선으로부터 구하였다.

Table 4. X-ray diffraction condition.

Test condition	Parallel-beam method
Characteristic X-ray	Cr- $K_{\alpha}$
Diffraction plane	(211)
Filter	V
Tube voltage	30KV
Tube current	10mA
Divergence angle	0.5°
Height limit slit	5mm
Scanning speed	2°/min
Chart speed	20 mm/min
Time constant	5sec

2.3.2. 피로 균열 진전 시험편에서의 X-선 파라미터 측정

Fig. 2는 피로 파단면에 대한 X-선 관찰의 모식도를 나타내고 있다. X-선 조사 면적은 피로 파단면의 두께 중앙부에  $1\text{mm}\times 7\text{mm}$ 의 직사각형으로 하였다.

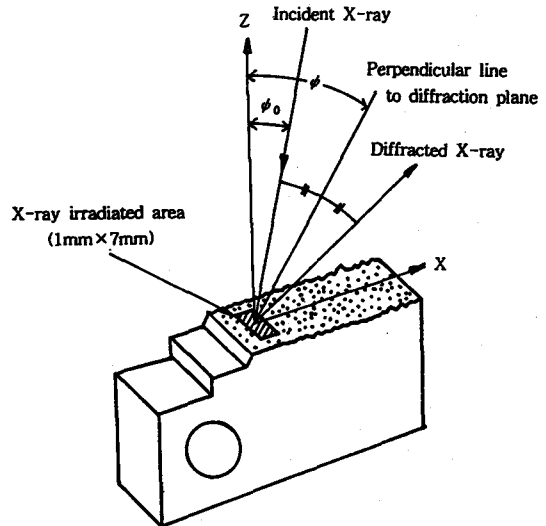


Fig. 2. Schematic illustration of X-ray irradiated area on fatigue fractured surface.

파면 아래의 소성역 깊이의 측정은 SS41 불림재의 경우 최대 응력 확대 계수  $K_{max}=20.9, 25.0, 29.7\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  에서 그리고 M.E.F. 복합 조직강의 경우는  $K_{max}=22, 32, 45\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  에서 피로 파단면의 표면층을 순차적으로 전해 연마하면서 파단면 아래의 X-선 파라미터를 반복 측정하였다. 소성역 깊이는 소성 변형을 받지 않은 부재의 X-선 파라미터값에 도달하는 양으로 하였으며, 피로 실험전 소성 변형을 받지 않은 부재의 X-선 파라미터의 값을 Table 5에 표시하였다. 그리고 전해 연마량은 마이크로 미터로서 단위 시간당 노치 평행부의 치수 감량을 기준으로 1/1000mm 정밀도로 측정하였다.

Table 5. X-ray parameters under no loading condition.

Materials	X-ray parameters	
	Normalized SS41 steel	M.E.F. dual phase steel
Residual stress, $\sigma_{r0}$	1.0 MPa	-45 MPa
Half-value breadth, $E_0$	1.51°	1.89°

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 피로 균열 진전 거동

피로 균열 진전 속도  $da/dN$ 과 응력 확대 계수 범위  $\Delta K$ 와의 관계를 응력비  $R=0.1$ 과  $0.5$ 의 경우에 대해서 SS41 불림재는 Fig. 3(a)에, M.E.F. 복합 조직강은 Fig. 3(b)에 각각 나타내었다. 그리고 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 표시된 실험점은 모두 ASTM의 소규모 항복 조건(SSY)을 만족하고 있다.<sup>3)</sup>

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이  $\Delta K$ 의 증가와 함께  $da/dN$ 은 직선적으로 증가하고 있으며, 응력비가 높은  $R=0.5$ 가  $R=0.1$ 보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 여기서  $R=0.1$ 과  $R=0.5$ 가 모두 동일 하중폭임에도 불구하고 피로 균열 진전 속도의 차이를 보이고 있는데, Fig. 3(a)의 SS41 불림재의 경우는 피로 균열 진전 속도의 차이가 작게 나타났으나 Fig. 3(b)의 M.E.F. 복합 조직강의 경우는 응력비에 의한 피로 균열 진전 속도의 차이가 아주 현저하였다. 이것은 첫째로 응력비가 높을수록 최대 하중의 증가로 인하여 균열 진전 속도가 빨라지는 것으로 생각되며, 둘째로는  $R=0.1$ 에서는 균열 단합에 의한 피로 균

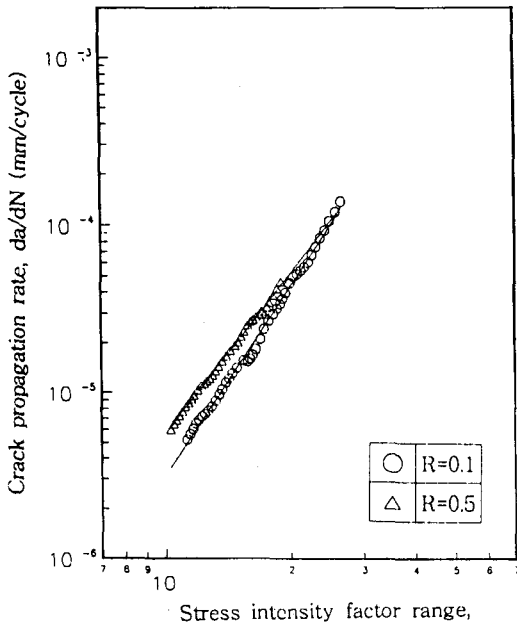
열 진전 속도의 감소에 기인한 것으로 생각된다.

또 SS41 불림재의 경우에는 높은  $\Delta K$  영역에서는 응력비의 영향이 거의 보이지 않으나, M.E.F. 복합 조직강의 경우는 높은  $\Delta K$  영역에서도 의존성이 나타났다. 이것은 M.E.F. 복합 조직강에서  $da/dN$ 의 응력비의 의존성이 일반 구조용에 비하여 크다고 하는 실험 결과<sup>4)</sup>와 잘 일치하고 있다.

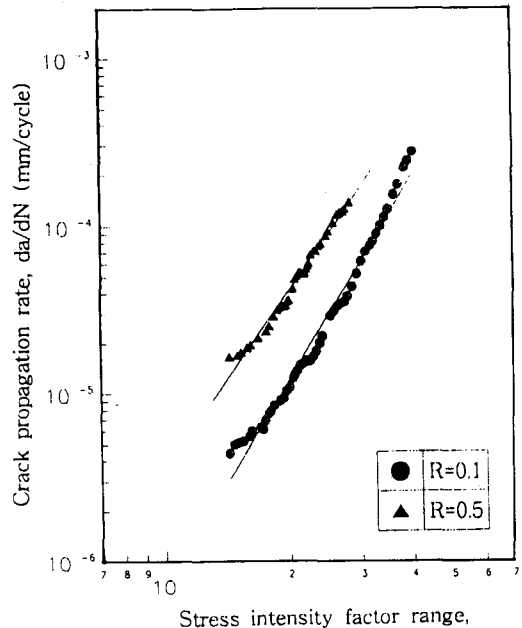
3.2. 파면하의 X-선 파라미터의 변화 거동

3.2.1. 파면하의 잔류 응력 분포

파면하의 잔류 응력  $\sigma_r$ 를 파면으로부터의 깊이  $y$ 에 대하여 SS41 불림재는 Fig. 4(a),(b)에, M.E.F. 복합 조직강은 Fig. 5(a),(b)에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 파면하의 잔류 응력은 파면 내부에 들어감에 따라 인장 잔류 응력이 감소하고 있으며,  $R=0.1$ 의 경우가  $R=0.5$ 보다 동일  $K_{max}$ 에서 잔류 응력이 낮게 나타나고 있는데, 이것은  $\Delta K=K_{max}(1-R)$ 가 동일  $K_{max}$ 에서  $R=0.1$ 쪽이 크기 때문에 역항복에 의한 압축 변형으로 작용하기 때문이라고 생각된다. 파면하의 잔류응력의 소성역 깊이는 잔류 응력이 감소하여 거의 일정하



(a) Normalized SS41 steel

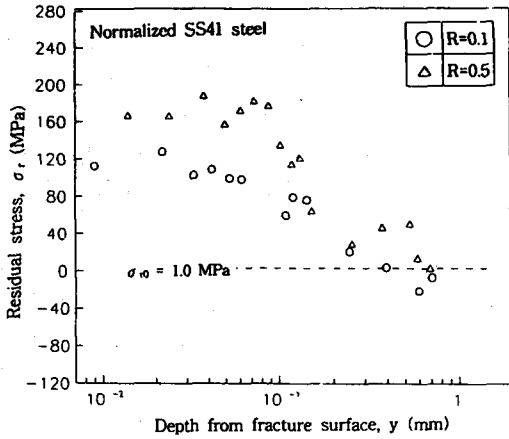


(b) M.E.F. dual phase steel

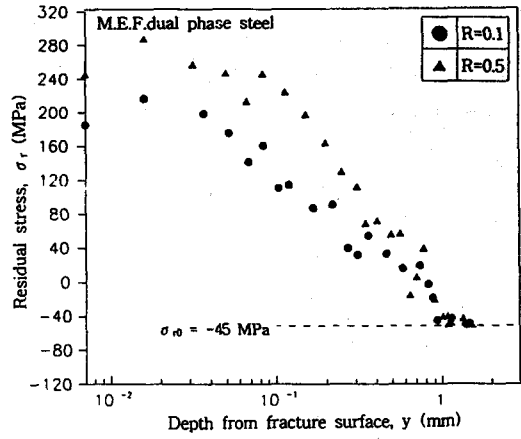
Fig. 3. Relation between stress intensity factor and crack propagation rate.

게 되는 값으로 정할 수 있는데, 본 연구의 SS41 볼림재의 경우는 Fig. 4(a)의  $K_{max}=20.93 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서는 대략 이러한 경향을 보여주고 있으나, Fig. 4(b)의  $K_{max}=25.03 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서는 잔류 응력의 분포 형태가 명확하지 않고 거의 일정하게 되는 값을 정할 수 없

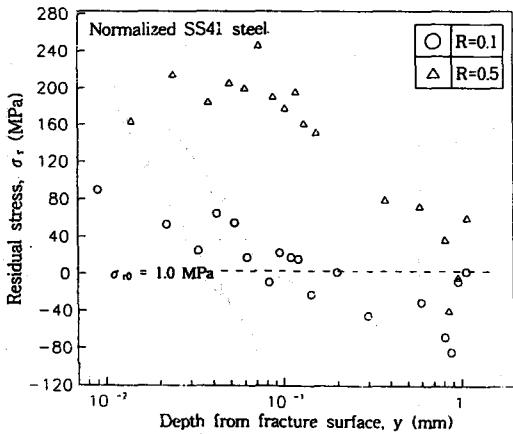
었다. 그러나 M.E.F. 복합 조직강의 경우는 잔류 응력이 일정하게 되는 값을 정할 수 있었으며, Fig. 5(a)의  $K_{max}=32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 와 Fig. 5(b)의  $K_{max}=45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  모두 잔류 응력이 모재의 초기값인  $-45 \text{ MPa}$ 되는 곳에서 거의 일정하게 되었으며 일정하게 되는 이 지점을



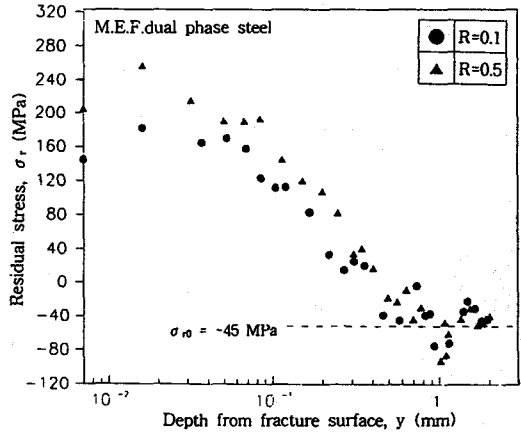
(a)  $K_{max} = 20.93 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(a)  $K_{max} = 33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b)  $K_{max} = 25.03 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

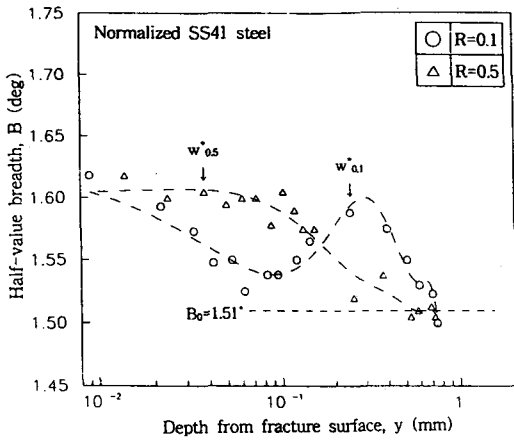


(b)  $K_{max} = 45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

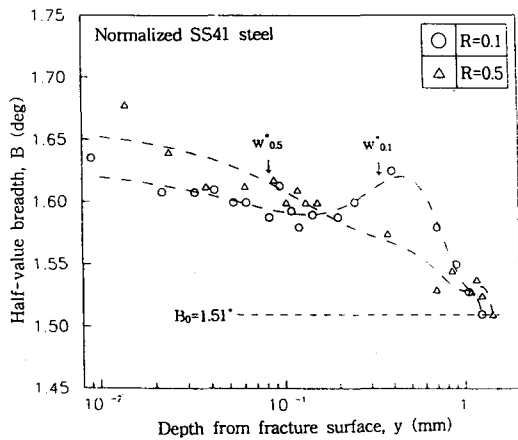
Fig. 4. Residual stress plotted against the depth from fatigue fractured surface for normalized SS41 steel.

Fig. 5. Residual stress plotted against the depth from fatigue fractured surface for M.E.F. dual phase steel.

소성역 깊이로 결정하였다. 이러한 실험 결과는 田中<sup>5)</sup> 등의 고강도강 및 연강에 대한 실험 결과와 유사하며, 이것은 잔류 응력에 의한 소성역 깊이의 결정은 고강도·저인성 재료에서는 유효하다는 것은 보여주나, 연강등의 저강도강에 대한 소성역의 측정에는 거칠기의 영향이 크고 잔류 응력을 파라미터로서 사용하는 것은 곤란하다고 생각된다.



(a)  $K_{max} = 20.93 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

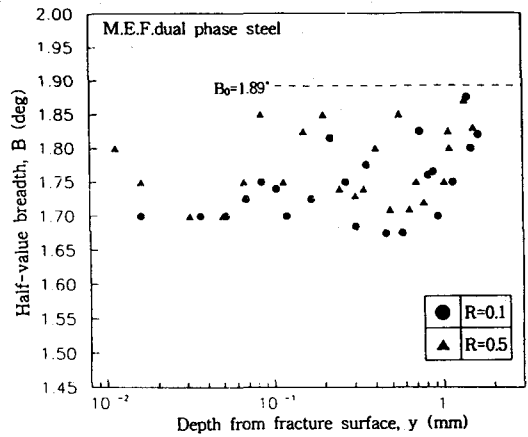


(b)  $K_{max} = 29.57 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

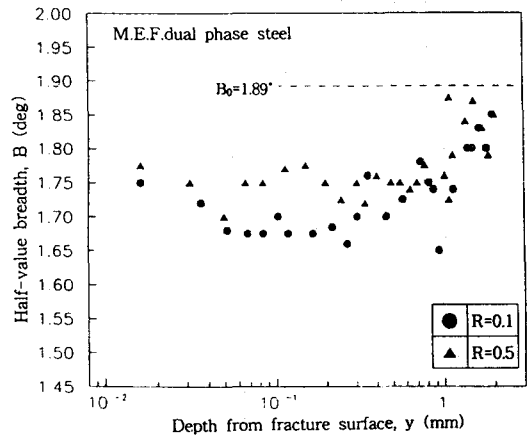
Fig. 6. Half-value breadth plotted against the depth from fatigue fractured surface for normalized SS41 steel.

3.2.2. 파면하의 반가폭 분포

파면하의 반가폭 B를 파면으로부터의 깊이 y에 대하여 SS41 볼림재는 Fig. 6(a),(b)에, M.E.F. 복합조직강은 Fig. 7(a),(b)에 각각 나타내었다. SS41 볼림재의 경우는 Fig. 6(a),(b)에서 알 수 있듯이 반가폭 B가 파면 깊이 방향으로 들어감에 따라 모재의 초기치 반가폭  $B_0=1.51^\circ$ 에 도달하는 경향이 보여졌으나, M.E.F. 복합.



(a)  $K_{max} = 32 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b)  $K_{max} = 45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 7. Half-value breadth plotted against the depth from fatigue fractured surface for M.E.F. dual phase steel.

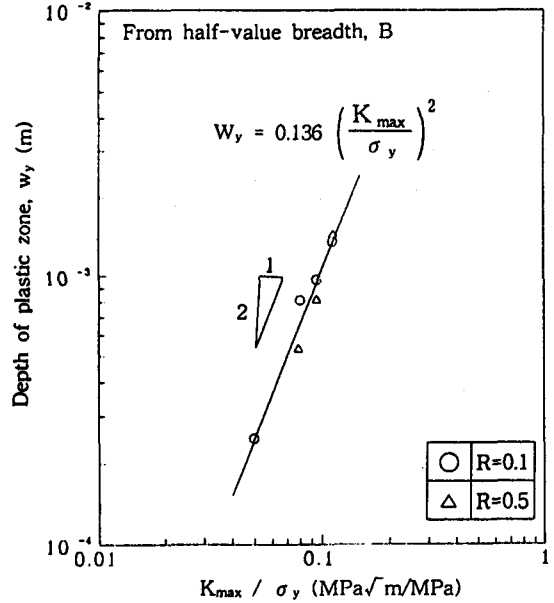
조직강의 경우는 Fig. 7(a),(b)에서 알 수 있듯이 파면 깊이가 방향에 대한 반가폭의 변화가 무질서하고 모재의 초기치 반가폭  $B_0=1.89^\circ$ 로 되는 곳을 정할 수 없었다. 따라서 파면하의 반가폭 B의 분포에 의한 소성역 깊이의 결정은 SS41 불림재는 가능하였으나, M.E.F. 복합 조직강의 경우는 명확하지 않았다. SS41 불림재의 경우 Fig. 6(a),(b)에서 보여지듯이 반가폭 B는 파면상에서 최대값을 나타낸 후, 전해 연마로 인하여 파면 내부로 들어감에 따라 감소하여 결국 모재의 초기치 반가폭  $B_0(=1.51^\circ)$ 에 도달하였다. 또한,  $B_0$ 에 도달하는 파면 깊이 y는 응력비에 관계없이 동일  $K_{max}$ 에 있어서는 거의 일치하고 있으며,  $K_{max}$ 이 증가할수록 파면깊이 y는 크게 되고 있다. 파면 깊이값은 나중에 검토하게 될 파면에 수직한 방향의 최대 소성역(maximum plastic region)크기  $w_y$ 와 일치하고 있다. 한편, 역소성역(reversed plastic region)크기  $w^*$ 는 응력 확대 계수 범위  $\Delta K$ 와의 관계에서 다음 식과 같이 성립한다.<sup>6)</sup>

$$w^* = a \left( \frac{\Delta K}{2 \sigma_y} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

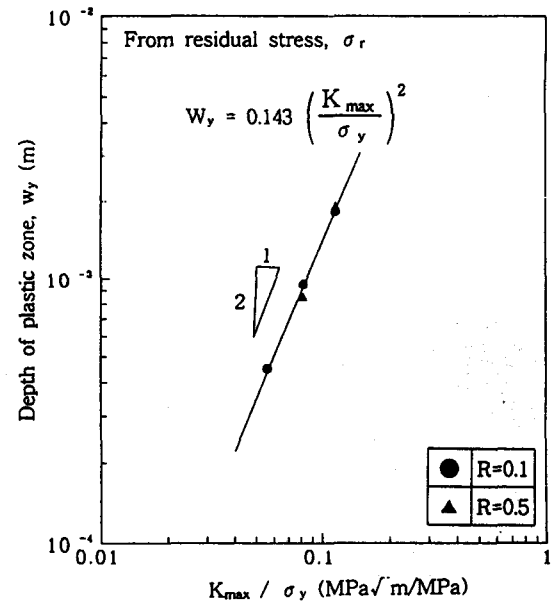
이 값을 Fig. 6에 표시하였다. R = 0.1의 경우, 반가폭이 파면 내부로 들어감에 따라 감소하다가 곧 증가하여 극대치를 나타낸 후, 다시 직선적으로 감소하여 초기치의 반가폭  $B_0(=1.51^\circ)$ 에 도달하였다. 여기서, 반가폭 B가 극대치로 되는 위치가 역소성역  $w^*$ 와 거의 일치하고 있다. 반가폭 B가 역소성역  $w^*$  근방에서 극대치로 되는 이유는  $K_{max}$ 에 의한 반가폭 변화 분포에  $\Delta K$  지배의 반복 변형에 의한 반가폭값의 감소가 중첩되기 때문이라고 생각된다. 이러한 경향은 田中<sup>7)</sup>등이 실시한 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 그러나 R=0.5인 경우, R=0.1과 같이 극대치를 나타내지 않았다. 단지  $\Delta K$  지배의 반복 하중 영역내에서 반가폭 B가 대략 일정한 값을 나타낸 후,  $w^*$ 근방에서 서서히 감소하여 초기치 반가폭  $B_0$ 에 도달하였다. 이것은 동일  $K_{max}$ 에서 반복 하중 영역의  $\Delta K$ 가 R=0.1에 비해 상당히 작기 때문에  $K_{max}$ 에 의해 형성된 단조소성역(monotonic plastic region)에 뚜렷한 감소 효과를 나타내지 못한 것이다. 그리고 Fig. 6에서 동일  $K_{max}$ 에 대해  $w^*$ 영역내에서 R=0.1이 R=0.5보다 반가폭 B가 작게 되는 이유도 R=0.1이 R=0.5보다  $\Delta K$ 가 크기 때문이라고 생각된다.

3.2.3. 소성역깊이  $w_y$ 와 최대응력확대계수  $K_{max}$ 과의 관계

응력비 R=0.1, 0.5에서 각각의 최대 응력 확대 계수  $K_{max}$ 에 대하여 SS41 불림재에서는 반가폭 B가 모재



(a) Normalized SS41 steel



(b) Normalized SS41 steel

Fig. 8. Relation between plastic zone depth and maximum stress intensity factor divided by yield strength.

의 초기치 반가폭  $B_0(=1.51^{\circ})$ 로 되는 파면 깊이  $y$ 를, M.E.F. 복합 조직강에서는 잔류 응력  $\sigma_r$ 이 모재의 초기치 잔류 응력  $\sigma_0(=-45 \text{ MPa})$ 로 되는 파면 깊이  $y$ 를 최대 소성역 깊이  $w_y$ 로 하고, 측정된 소성역 깊이  $w_y$ 와  $(K_{\max}/\sigma_y)$ 와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서,  $\sigma_y$ 는 Table 3에서 나타낸 것과 같이 SS41 볼림재는 262.74 MPa이고, M.E.F. 복합 조직강은 390.85 MPa이다. 최대 소성역 깊이  $w_y$ 는 소규모 항복 조건 하에서  $(K_{\max}/\sigma_y)$ 의 제곱에 비례하여 증가하고, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$w_y = \alpha \left( \frac{K_{\max}}{\sigma_y} \right)^2 \dots\dots\dots(3)$$

본 실험에서  $\alpha$  값을 최소 자승법으로 구하여 보면, SS41 볼림재는  $\alpha=0.136$ 이고 M.E.F. 복합 조직강은  $\alpha=0.143$  이 된다. 이들의 값은 Levy 등의 유한 요소 해석 값인  $\alpha=0.15$  이나, Von Mises의 항복 조건에 의한 평면 변형률 조건하에서의 균열면의 수직 방향의 소성역 치수  $\alpha=0.132$ 에 상당히 가까운 값으로 되고있다.<sup>8)</sup>  $\alpha$  값에 대해서는 각종 재료에 대해서 실험적으로 구하여지고 있는데<sup>9)</sup>, 대체로 항복점이 높은 강종이 낮은 강보다도 크게 되는 경향이 있으며, 본 실험에서도 M.E.F. 복합 조직강이  $\alpha=0.143$ 으로 SS41 볼림재의  $\alpha=0.136$  보다 크게 되는 경향이 보여졌다. 따라서 식(3)에서 알 수 있듯이 파면 아래의 잔류 응력 및 반가폭의 분포로부터 구해진 최대 소성역 깊이  $w_y$ 로부터 최대 응력 확대 계수  $K_{\max}$ 의 추정이 가능하다고 생각된다.

**4. 결론**

본 연구에서는 볼림 처리하여 결정 조직을 균질화시킨 SS41 볼림재와 경질인 마르텐사이트상이 연결된 페라이트상을 둘러 싸고 있는 복합 조직으로 이루어진 M.E.F. 복합 조직강에 대해서 파괴 역학 파라미터와 X-선 파라미터의 관계를 검토하였다. 피로 균열 진전 실험을 실시하고 각각의 시험편 파단면에 X-선을 조사하여, 파단면 깊이 방향의 X-선 파라미터(잔류 응력, 반가폭)의 변화를 고찰하였으며, 그 실험 결과는 다음과 같다.

1. 피로 균열 진전 실험시 SS41 볼림재는 응력비 의존성이 별로 보이지 않았으나, M.E.F. 복합 조직강의

경우는 응력비 의존성이 보여졌다.

2. SS41 볼림재는 파면 수직 방향의 소성역 크기의 결정은 파면하의 잔류 응력의 분포로는 할 수 없었으나, 반가폭의 분포로는 가능하였다.
3. M.E.F. 복합 조직강은 파면 수직 방향의 소성역 크기의 결정은 파면하의 반가폭의 분포로는 할 수 없었으나, 잔류 응력의 분포로는 가능하였다.
4. 파면하의 X-선 파라미터(잔류응력, 반가폭)의 분포로부터 최대 응력 확대 계수  $K_{\max}$ 에 의해 형성된 단조 소성 변형 영역에 대응하는 파면 수직 방향의 소성역 크기  $w_y$ 를 결정할 수 있고, 다음 식으로부터  $K_{\max}$ 의 추정이 가능하였다.

$$\text{SS41 볼림재} : K_{\max} = \sigma_y \left( \frac{w_y}{0.136} \right)^{1/2}$$

$$\text{M.E.F. 복합 조직강} : K_{\max} = \sigma_y \left( \frac{w_y}{0.143} \right)^{1/2}$$

**후 기**

본 논문은 1996년도 동아대학교 교내 학술 연구 조성비(공모과제)에 의하여 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

**참고 문헌**

- 1) T. Kunio, K. Yamada, "Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Nonpropagation Fatigue Cracks in Martensitic Ferritic Structures", ASTM STP 675 (1979), pp.342~370.
- 2) 日本材料學會編, 材料強度部門委員會, "X線應力測定法標準", (1981).
- 3) ASTM Standard E647-88, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM (1988), pp.1~6.
- 4) 김정규, 황돈영, "복합 조직강의 피로 균열 진전 거동과 균열 닫힘 조건에 미치는 응력비 및 미시 조직 크기의 영향", 대한기계학회 논문집, 제12권, 제6호 (1988), pp.1343~1349.
- 5) 田中啓介, 畑中伸夫, "高強度鋼および軟鋼の疲勞破面近方の残留應力", 材料, 第31卷(1982), pp.215~220.



- 6) J.R. Rice, "Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue", ASTM STP 415 (1967), pp.247~310.
- 7) 田中啓介, 秋庭義明, 西澤英和, 金多 潔, "軟鋼における疲労破面近方の塑性変形に関するX線の研究", 材料, 第35巻(1986), pp.2~8.
- 8) 李東寧, "金屬強度學", 文運堂 (1991), p.240.
- 9) 日本材料學會 X線材料強度部門委員會, "X線フラクトグラフィ(X線回折法による破面解析)", 材料, 第31巻(1982), pp.244~250.

## A Study on the Fatigue-Fractured Surface of Normalized SS41 Steel and M.E.F. Dual Phase Steel by an X-ray Diffraction Technique

Sae-Wook Oh\*, Young-Chul Park\*, Soo-Young Park\*\*,  
Deug-Jin Kim\*\*\* and Sun-Chul Hue\*\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

\*\* Material Laboratory, Dong-A University

\*\*\* Dept. of Mechanical Engineering Graduate School, Dong-A University

**Abstract** This study verified the relationship between fracture mechanics parameters and X-ray parameters for normalized SS41 steel with homogeneous crystal structure and M.E.F. dual phase steel(martensite encapsulated islands of ferrite). The fatigue crack propagation test were carried out and X-ray diffraction technique was applied to fatigue fractured surface. The change in X-ray parameters(residual stress, half-value breadth) according to the depth of fatigue fractured surface were investigated. The depth of maximum plastic zone,  $w_y$ , were determined on the basis of the distribution of the half-value breadth for normalized SS41 steel and that of the residual stress for M.E.F. dual phase steel.  $K_{max}$  could be estimated by the measurement of  $w_y$ .

---

(Received : August 12, 1995)