

X-ray 회절에 의한 사고파면의 정량적 해석에 관한 연구

최성대*, 권현규*, 정선환*

The Study on the Quantitative Analysis of Accident Fracture Surface by X-ray Diffraction

Seong Dae Choi*, Hyun Kyu Kweon* and Seon Hwan Cheong*

ABSTRACT

X-ray diffraction observation of fracture surfaces yields useful information to analyze the causes of failure accidents of engineering structures. This experimental technique, named X-ray fractography, has been developed especially in metal and mechanical engineering fields. The distributions of the residual stress and the half value breadth of diffraction profiles beneath the fatigue fracture surface were measured with SNCM 439, HT100 and Ti-6Al-4V alloy. The size of the maximum plastic zone was successfully determined on the basis of the measured distributions. This size was correlated to maximum stress intensity factor. The distributions of the half value breadth of diffraction profiles on the fatigue fracture surfaces were measured with SNCM 439, HT100. The equations of x-ray parameter distribution were possible to estimated fracture parameters of fatigue fracture surfaces.

Key Words : X-ray Diffraction (X-ray 회절), Fatigue Fracture Surface (피로파면), Residual Stress (잔류응력), Fractography (파면해석), Half Value Breadth (반가폭), Plastic Zone Size (소성역), Stress Intensity factor (응력확대계수)

기호설명

σ_r = residual stress
 HVB = half value breadth
 ΔK_{eff} = effective stress intensity factor range
 K_{max} = maximum stress intensity factor
 ω_y = plastic zone size
 σ_y' = yield stress in plastic zone size
 σ_y = engineering yield stress

1. 서론

실제로 이용하는 기계구조물이 파손되었을 경우, 사고의 경과상황의 조사 및 사고원인의 규명은 사고의 재발방지 및 기계구조물의 설계법과 재료제조법의 개선에 매우 중요한 것이다. 특히, 사고의 규명조사에는 여러 측면에서의 조사가 있으나, 구조물의 파면으로의 조사는 사고원인, 사고시기 및 사용이력 등을 추정할 수 있는 자료를 구할 수가 있다. 사고파면의 해석방법으로서 전자현미

2001년 8월 27일 접수

* 남오공과대학교 기계공학부

경을 이용한 전자현미경등 여러 가지의 방법이 있으나, 특히 X-ray 회절을 이용한 해석은, 표면 및 표면내부의 X-ray 회절상의 관찰에 의해 얻은 재료의 결정격자의 변위에 관한 정보를 가지고, 파괴양식의 판별, 파괴의 역학적인 조건의 추정, 균열전파속도 또는 구조물 수명의 평가와 파괴기구의 해석과 설명 등이 가능하다.⁽¹⁾

피로표면에 있어서 표면주위의 X-ray 회절 파라메타인 잔류응력과 반가폭에 대하여 파괴역학의 파라메타인 최대응력확대계수와 유효응력확대계수 범위와의 정량적인 관계가 페라이트계의 철강재료에 있어서 연구되고 있다.⁽²⁾ 이것은, X-ray fractography 로 명명하는 것으로 파괴시의 하중조건의 추정이 가능하다. 따라서 전자현미경에 의한 표면해석은 사고 표면의 스트라이에이션에 의하여 파괴역학적 파라메타의 추정이 가능하다. 그러나 전자현미경에 의한 표면해석이 곤란한 경우, 즉 스트라이에이션이 존재하지 않은 표면 또는 무특징 표면에 있어서 부하피로하중과 균열전진속도 등을 정량적으로 추정할 수 있는 것이 X-ray fractography 이다.⁽³⁾

본 연구에서는 기계구조용 합금강인 SNCM 439, 인장강도가 1000MPa 정도의 고장력강인 HT100 와 Ti-6Al-4V 합금을 이용하여 피로표면의 깊이방향의 X-ray 회절분포로부터, 파괴역학적 파라메타와의 정량적인 관계를 검토하였고, 피로표면에서의 X-ray 회절 파라메타와 파괴역학 파라메타와의 정량적인 관계식을 구하여, 부하하중과 피로균열전진속도의 추정의 가능성, 즉 피로표면의 정량적 해석의 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용한 재료는 3 종류로써 기계구조용 합금강 JIS SNCM 439 를 850℃의 담금질후의 600℃의 풀림 열처리한 재료와 인장강도가 1000MPa 급의 고장력강 HT100 그리고 비철금속으로써 비강도가 우수하여 항공재료, 해양탐사재료로 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금의 표준적인 열처리인 950℃의 용체화 처리후 540℃에서 시효 처리한 것으로 사용했다. 각 사용재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2 에 나타내었다. 피로 시험편은 Fig. 1 에 나타난 것과 같이 CT 시

Table 1 Chemical composition (wt%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
SNCM439	0.4	0.3	0.8	0.9	0.2	1.9	Bal.
HT100	0.1	0.3	0.9	0.9	0.4	-	Bal.

Material	Al	V	Fe	O	Ti
Ti-6Al-4V	6.21	4.16	0.16	0.14	Bal.

Table 2 Mechanical Properties

Material	SNCM 439	HT100	Ti-6Al-4V
Yield strength (MPa)	883	1088	965
Tensile strength (MPa)	1020	1165	1055
Elongation (%)	16.7	10.5	22.9

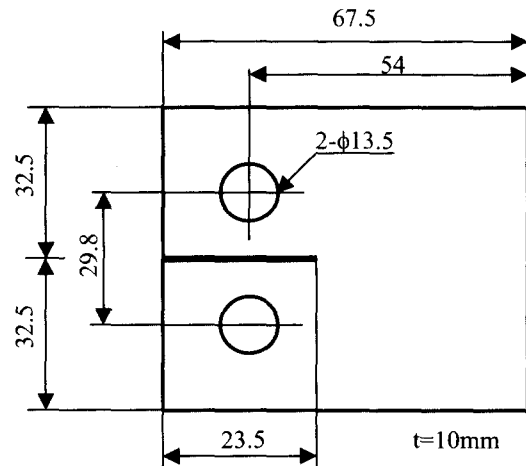


Fig. 1 Dimension of fatigue test specimen

험편을 이용했다.

2.2 피로시험 방법

피로시험은 하중일정시험으로, 응력비는 0.05 와 0.5 로 시험하고, 하중 파형은 정현파이고, 주파수는 1~30Hz 로 시험했다. 균열 개폐구 거동은

배면 strain gauge 를 이용하여 제하 탄성 컴플라이언스법에 의해 관찰했다.

2.3 X-ray 회절 실험 방법

X-ray 회절 실험에서 얻어지는 파라메타는 여러가지가 있으나 본 연구에 사용된 것은 두가지이며, 하나는 X-ray 회절되는 위치에 의존하는 산류응력이고, 하나는 X-ray 회절선의 1/2 위치의 폭인 반가폭이다. 이 파라메타들은 물리적인 의미를 갖는다. 전자인 X-ray 회절에 의한 산류응력은 재료를 구성하고 있는 원자간의 간격의 좁고 넓은 것에 따라 회절선의 위치는 변화된다. 따라서 재료구조의 원자간의 간격은 재료가 지니고 있는 응력, 즉 산류응력에 비례한다. 후자의 반가폭은 재료가 외력에 의해 일어나는 탄성적 범위를 넘어서 원자 구조의 흐트러짐, 즉 구조원자의 전위 분포량인 전위밀도의 정도를 나타낸다. 따라서 X-ray fractography 는 두가지의 파라메타의 물리적 의미를 참고하여 파면과 깊이방향의 정보를 입수하여 파면해석을 하는 방법이다. X-ray 회절실험에서, X-ray 산류응력측정은 PSPC (Position Sensitive Proportional Counter)가 부착된 장치를 이용하여 $2\theta - \sin^2\psi$ 방법으로 측정했다. X-ray 회절선의 반가폭은, X 선의 입사각 ψ 가 0 deg.일 때 회절강도의 1/2 지점의 폭으로부터 측정하였다. X-ray 회절조건을 Table 3 에 나타내었다. Fig.2 에는 X-ray 회절 실험장면을 나타내었다. 또한 피로파면에서의 깊이 방향의 X-ray 산류응력과 반가폭의 분포를 구하기 위하여 파면의 표면 층을 조금씩 전해연마를 하면서 측정하였다. 전해 연마량은 비접촉 레이저 변위계(KEYENCE LC2200)를 사용하였다.

Table 3 Condition of X-ray diffraction

Material	SNCM 439	HT 100	Ti-6Al-4V
Characteristic X-ray	Cr-K α		Co-K α
Diffraction plane	α -Fe 211		α -Ti 21-31
Filter	V foil		Fe foil
Counter	PSPC		PSPC
Tube voltage (kV)	30		30
Tube current (mA)	8		8
Irradited area (mm ²)	0.5 \times 2		1 \times 4
Preset time (sec.)	15		60



Fig. 2 Photography of X-ray diffraction device

3. 실험결과 및 고찰

3.1 최대응력확대계수(K_{max})의 추정

각 재료의 시험편의 배면 strain gauge 로 제하 탄성 컴플라이언스법을 이용한 균열 폐구비의 측정으로 계산한 유효응력확대계수범위와 피로균열 진전속도의 관계를 Fig. 3 에 나타내었다. 응력비가 $R=0.05$ 의 피로시험에서 구하여진 data 이지만, 각 재료의 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 는 응력비에 관계하지 않고 일치한다. 따라서, 피로파면의 정보로부터 ΔK_{eff} 를 추정할 수 있으면 피로균열진전속도의 추정이 가능하다.^{(2),(3)}

피로파면에서 깊이방향의 X-ray 파라메타의 내부분포를 구하여, 이 분포로부터 소성역의 크기를 결정할 수가 있다. 파면을 깊이방향으로 조금씩 전해 연마하여, 산류응력이 소멸하는 깊이, 또는 X-ray 회절선의 반가폭이 초기치(소재의 반가폭)되는 깊이가 소성역으로 대응할 수 있다. X-ray 회절선의 반가폭은, 소성변형의 결과로서 재료의 내부에 잔류하는 불균일의 미시변위성분에 대응하고, 거시적으로는 소성변위량에 대응한다고 생각할 수 있다.

각 재료에 대하여 피로파면에서 깊이방향의 거리와 X-ray 회절선을 이용한 파면의 산류응력 측정치의 관계를 Fig. 4 에 나타내었다. 각 재료의 세곳의 K_{max} 에 대하여 파면깊이방향의 산류응력의 분포를 나타내었다. 파면에서의 깊이방향의 거리가 증가하면 산류응력은 점점 감소하고 있다.

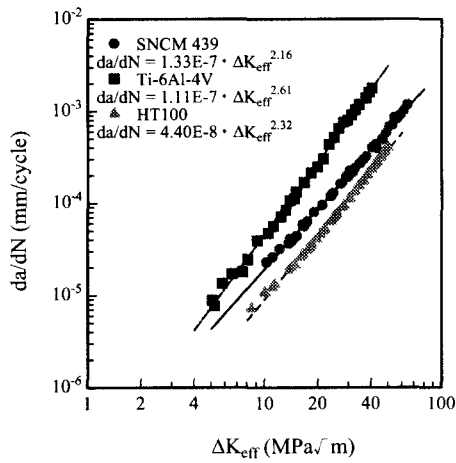


Fig. 3 Relation between da/dN and ΔK_{eff}

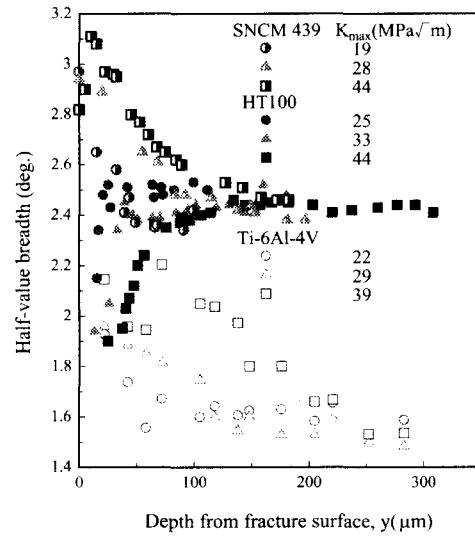


Fig. 5 Relation between half-value breadth and depth from fracture surface

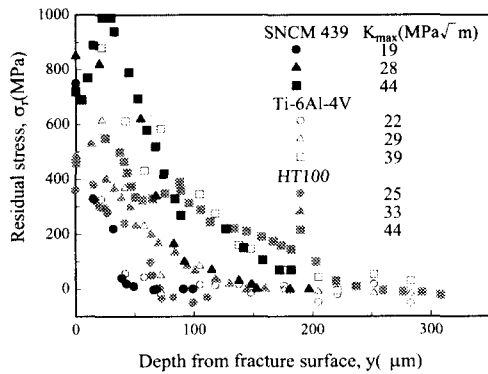


Fig. 4 Relation between residual stress and depth from fracture surface

어떤 깊이 이상에서의 잔류응력은 0 에 이른다. 이것은 피로균열선단에서 소성역의 크기에만 잔류응력이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그리고 K_{max} 가 증가하면 소성역의 깊이도 증가한다. 따라서 소성역의 크기에 따라 최대부하하중의 추정이 가능할 수 있다.

각각의 재료에 대하여 피로파면에서 깊이방향의 거리와 X-ray 회절선의 반가폭의 내부분포를 Fig. 5 에 나타내었다. SNCM 439 와 Ti-6Al-4V 합금은 파면보다 파면내부의 반가폭이 감소하고, 소성역의 깊이에 도달할 때의 반가폭은 소재의 반가폭과 일치하는 값을 나타낸다.

이것과 반대로, HT100 는 파면과 파면내부의 반가폭은 소재의 반가폭보다 작으며 이것 또한 소성역의 깊이에 도달하면 반가폭은 소재의 반가폭과 일치하는 값을 나타낸다. 파면과 파면내부의 반가폭의 분포가 소재의 반가폭보다 작은 경우는 반복가공연화의 현상을 나타내는 것이 보통이다. 그러나 SNCM 439 와 Ti-6Al-4V 합금은 파면의 반가폭이 소재의 반가폭보다 크므로 반복가공연화의 현상을 추정할 수 있다. 그러나 이 반가폭의 경향만으로는 반복가공연화, 경화의 구분은 아직 미완성적이라 할 수 있다. Ti-6Al-4V 합금은 반복가공연화재료이지만, 파면내부의 반가폭의 분포를 보면, 반복가공연화의 형태를 나타내고 있다.⁽⁴⁾ 여기서 반복가공연화/경화 현상이란 반복적인 외래하중에 의하여 재료의 성질이 본래보다 연화/경화 되는 성질을 말한다. 이상과 같이 X-ray 파라메타인 잔류응력과 반가폭으로 피로파면의 소성역의 크기를 구할 수가 있다. 피로파면에 대하여 최소소성역의 깊이 ω_y 와 K_{max} 의 관계는 소규모항복에 만족하는 조건에서

$$\omega_y = a (K_{max} / \sigma_y)^2 \quad \text{----- (1)}$$

여기서, σ_y 는 정적인장 항복응력을 나타내고, α 는 실험정수를 나타낸다.

Fig. 6 에는 Fig. 4 와 Fig. 5 에서 구한 각각의 K_{max} 에 있어서의 소성역의 깊이와 $(K_{max} / \sigma_y)^2$ 의 관계를 나타내었다. 여기에서 각각의 재료에 대하여 측정된 값들을 근사한 직선의 기울기 α 는, SNCM 439 는 0.19, HT100 은 0.12 이고 Ti-6Al-4V 합금은 0.17 이다.⁽⁵⁾ 평면변위의 탄소성체의 유한요소법에서 구한 α 값은 0.15 정도이고,⁽⁶⁾ 지금까지의 연구결과에서 얻은 철강재료의 α 값은 0.1~0.2 정도이다.⁽⁷⁾ 그러나, 반복가공경화 또는 반복가공연화 때문에 소성역의 내부에서의 항복응력은 일반적인 정적인장시험의 항복응력과는 일치하지 않는다. 종래의 결과에서, 반복가공경화재료의 경우는 α 값이 작고, 반복가공연화재료에서는 α 값이 크게 되는 경향이 있다. 식(1)을 이용하여 식(2), 식(3)와 같이 소성역의 내부의 항복응력 σ_y' 을 구할 수가 있다.

$$\omega_y = \alpha (K_{max} / \sigma_y')^2$$

$$= 0.15(K_{max} / \sigma_y)^2 \quad \text{----- (2)}$$

$$\sigma_y = (0.15 / \alpha)^{1/2} \sigma_y' \quad \text{----- (3)}$$

따라서, 정적인장 항복응력은 소성역의 내부의 항복응력 σ_y' 의 $(0.15 / \alpha)^{1/2}$ 에 비례한다.

이상과 같이 세가지 종류의 재료에 대하여 소성역의 크기로부터 균열진전의 최대응력확대계

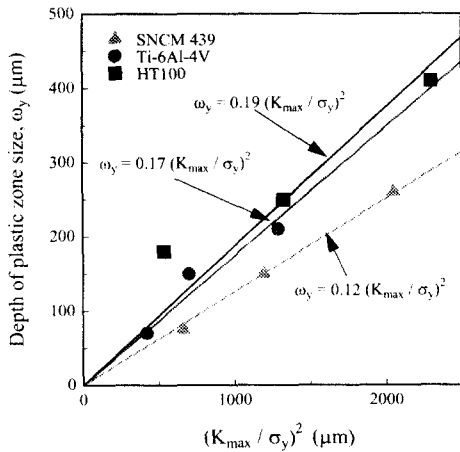


Fig. 6 Relation between monotonic plastic zone size and K_{max}

수를 구하는 것이 가능하다. 따라서 피로파면에 있어서 X-ray 파라미터에 의해 최대부하하중을 추정하는 것이 가능하였다.

3.2 유효응력확대계수 범위(ΔK_{eff})의 추정

Fig. 3 에 나타난 피로 균열 진전 속도와 유효응력 확대 계수 범위의 관계에서 X-ray 파라미터에 의해 유효응력확대계수범위가 추정이 가능하면 Fig. 3 에 의하여 피로파면에서의 균열진전속도도 추정할 수가 있다.

Fig. 7 에는 SNCM 439 의 피로파면에서의 K_{max} 와 X-ray 회절선의 반가폭과의 관계를 나타내었다. 피로시험의 조건으로서, 응력비가 5 종류의 피로시험, 두 종류의 ΔK_{eff} 일정 시험과 ΔK 일정 피로시험에서의 피로파면들로부터 측정된 결과이다. 이 그래프에서 ΔK_{eff} 가 $5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, $40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 일정시험의 결과를 근사한 곡선을 나타내고, 두 곡선식의 형태를 이용하여 다른 피로시험조건에서의 결과에서 ΔK_{eff} 가 일정한 값으로 근사한 곡선으로 나타내었다. 다시 말해서 응력비가 다섯 종류의 피로시험의 data 에서의 ΔK_{eff} 가 같은 data 를 연결하여 근사한 곡선식과 ΔK_{eff} 가 일정시험의 data 를 근사한 곡선식은 같은 형태의 곡선식으로 형성된다. 이 ΔK_{eff} 의 등고선에서 ΔK_{eff} 가 큰 경우, 그래프의 아래쪽에 위치한다. 따라서 K_{max} 가 증가에 따라 X-ray 회절선의 반가폭은 증가하고, ΔK_{eff} 의 증가에 따라 X 회절선의 반가폭

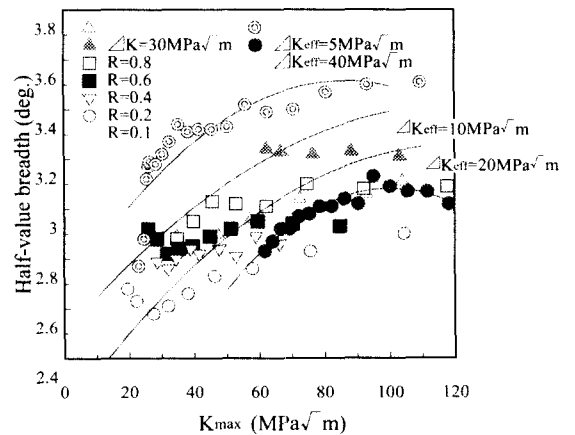


Fig. 7 Half-value breadth on the fatigue fracture surface of SNCM439

은 감소한다. 여기에서 피로파면상의 X-ray 회절선의 반가폭은 식(4)와 같은 K_{max} 와 ΔK_{eff} 의 함수관계의 식으로 표현이 가능하다.

$$HVB = f(\Delta K_{eff}) + g(\Delta K_{eff}) K_{max} + h(\Delta K_{eff}) K_{max}^2 \quad \text{-----}(4)$$

여기서, $f(\Delta K_{eff}) = f1 \cdot \text{LOG}(\Delta K_{eff}) + f2$
 $g(\Delta K_{eff}) = g1 \cdot \text{LOG}(\Delta K_{eff}) + g2$
 $h(\Delta K_{eff}) = h1 \cdot \text{LOG}(\Delta K_{eff}) + h2$
 HVB : X-ray 회절선의 반가폭

ΔK_{eff} 가 5, 10, 20, 30 MPa·m^{1/2}에서의 X-ray 회절선의 반가폭을 근사하는 등고선 식을 이용하여 각 실험정수를 계산할 수가 있다. 다시 말해서, ΔK_{eff} 가 일정한 값인 등고선의 식은 K_{max} 에 관한 이차 다항식으로 표현할 수 있다. 이 이차 다항식의 차수가 같은 항의 계수를 근사한 식은 ΔK_{eff} 에 관한 함수 $f(\Delta K_{eff})$, $g(\Delta K_{eff})$, $h(\Delta K_{eff})$ 로 표현이 가능하다. 함수 $f(\Delta K_{eff})$ 는 상수항의 계수를 근사한 식이고, 함수 $g(\Delta K_{eff})$ 는 일차항, 함수 $h(\Delta K_{eff})$ 는 이차항의 계수들을 근사한 식이다. X-ray 회절선의 반가폭으로 구한 식(4)의 실험 정수값들은 Table 4 에 나타내었다.

Fig. 8 에는 HT100 의 피로파면에서의 X-ray 회절선의 반가폭비(HVB/HVB₀)와 K_{max} 에 관하여 나타내었다. ΔK_{eff} 가 일정한 값들을 근사한 식의 형태를 이용하여, X 회절선의 반가폭비, ΔK_{eff} 과 K_{max} 관계를 식(5)에 나타내었다.

$$HVB/HVB_0 = f(\Delta K_{eff}) + g(\Delta K_{eff}) \cdot \ln(K_{max}) \quad \text{-----}(5)$$

여기서 $f(\Delta K_{eff}) = f1 \cdot \ln(\Delta K_{eff}) + f2$
 $g(\Delta K_{eff}) = g1 \cdot \ln(\Delta K_{eff}) + g2$
 $f1, f2, g1, g2$: 실험정수
 HVB_0 : 초기상태의 X 회절선의 반가폭
 HVB/HVB_0 : X 회절선의 반가폭비

HT100 의 X 회절선의 반가폭비, ΔK_{eff} 과 K_{max} 관계 함수의 실험정수도 SNCM 439 와 같은 방법으로 계산하면 구할 수 있다. 피로파면으로 부터 구한 실험정수는 Table 4 에 나타내었다.

Fig. 9 에는 SNCM 439 의 식(4)를 이용하여 X 회절선의 반가폭, ΔK_{eff} 과 K_{max} 관계 함수를 3 차원 그래프로 나타내었다. 피로파면의 X-ray 회절선의 반가폭이 ΔK_{eff} 과 K_{max} 의 변화에 의해 2.50 도부터 3.62 도까지 변동하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Experimental coefficients in equations (4) and (5)

Coefficients	SNCM439	HT100
f1	-1.1	-0.352
f2	3.6	1.556
g1	0.01	0.057
g2	0.00508	-0.056
h1	-0.00004485	
h2	0.00001682	

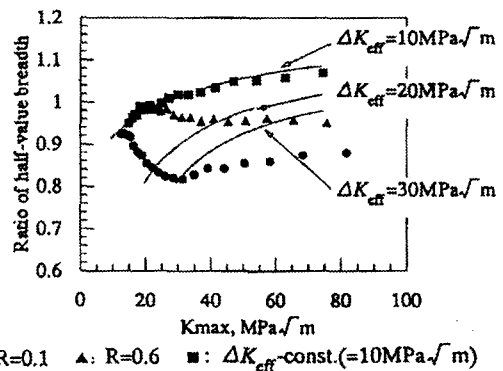


Fig. 8 Ratio of half-value breadth on the fatigue fracture surface of HT100

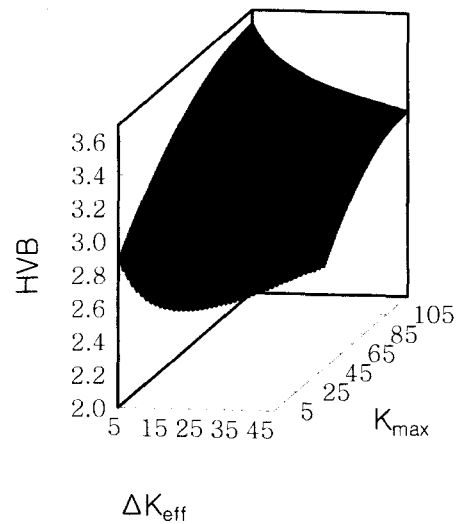


Fig. 9 Half-value breadth and fracture parameters on the fatigue fracture surface of SNCM439

또한, HT100 의 경우에는 X-ray 회절선의 반가폭비로 표현하는 것은 무차원화에 의한 것이다. X-ray 회절선의 반가폭비의 변동은 0.72 에서 1.23 까지이다.

이상과 같이 피로파면에 있어서의 부하하중과 균열진전속도를 추정하기 위해서는 먼저, 균열길이 a 에 대응하는 소성역의 크기를 X-ray 회절법에 의하여 구하고, 이 소성역의 크기를 소규모항복 조건에서의 선형 파괴 역학 이론식(1)에 의해 K_{max} 를 계산하여 구한 다음, 식(6)으로부터 최대부하응력의 계산이 가능하다.

$$\sigma_{max} = K_{max}/((\pi \cdot a)^{1/2} \cdot F) \quad \text{-----}(6)$$

단, a 는 균열길이, F 는 균열의 변형양식 또는 형상에 관한 계수이다.

이상과 같이 정량적으로 해석된 K_{max} 와 피로파면으로부터 측정된 X-ray 회절선의 반가폭을 식(4), 식(5)에 대입하여 ΔK_{eff} 를 구할 수 있다. 그리고 Fig. 3 에 나타난 da/dN 와 ΔK_{eff} 과의 관계에서 균열진전속도의 정량적인 해석이 가능하다.

4. 결론

두가지 종류의 철강재료와 Ti-6Al-4V 합금의 피로파면의 깊이방향의 X-ray 파라메타의 분포인 잔류응력과 반가폭으로부터 소성역의 크기를 구하여 최대응력확대계수를 정량적으로 해석하는 것이 가능하였다. 그리고 철강재료에서, 피로파면의 X-ray 회절선의 반가폭, ΔK_{eff} 과 K_{max} 의 관계에서 유효응력확대계수범위를 추정할 수 있는 수식을 제안하였으며, 이 수식으로 균열진전속도를 추정하는 것이 가능하였다.

이상과 같이, X-ray Fractography 는 피로파면의 파괴역학적 정량해석법으로서 유용하다는 것을 알았다.

후 기

본 연구에 도움을 주신 동경도립대학의 三澤啓志교수와 秋田 貢一 박사께 감사를 드리며, 본 연구는 2000 년도 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Akita, S. Kodama and H. Misawa, "Quantitative Analysis of the Fatigue Fractured Surface under Variable Amplitude Loading by X-Ray Fractography," Journal of Materials Science Japan, Vol. 43, No. 495, pp. 1584~1590, 1993.
2. S. D. Choi, H. Misawa, K. Akita and S. Takahashi, "The Effect of Heat Treatment on Residual Stress of Fracture Surface of Ti-6Al-4V Alloy," 日本材料學會 第 23 回 疲勞シンポジウム講演論文集, pp. 96~100, 1996.
3. K. Akita, S. Kodama, H. Misawa and S. Tobe, "Estimation of Fatigue Crack Propagation Rate by X-Ray Fractography Technique," 日本材料學會 第 28 回 X 線材料強度に關するシンポジウム講演論文集, pp. 106~164, 1996.
4. S. D. Choi, H. Misawa, K. Akita and S. Takahashi, "Ti-6Al-4V 合金의 피로파면에 있어서의 X 선 Fractography," 대한기계학회 1996 추계학술대회 논문집, pp. 31~35, 1996.
5. S. D. Choi, H. Misawa, K. Akita and S. Kodama, "Behavior of X-ray Parametas Near Fatigue Fractured Surface of Ti-6Al-4V Alloy," 日本材料學會 第 33 回 X 線材料強度に關するシンポジウム講演論文集, pp. 123~128, 1997.
6. Levy, P. V. Marcal, W. J. Ostengren and J. R. Rice, "Small scale yielding near a Crack in plane strain : a finite element analysis," Int. J. Frac., Vol. 7, pp. 143~150, 1971.
7. K. Tanaka, "昭和 62 年度科學研究費補助金總合研究(A)研究成果報告書," p. 48, 1988.