

피로하중을 받는 터빈 블레이드의 X선 프랙토그래피에 관한 연구

김성웅*(동아대 대학원), 이동우(동아대 대학원), 홍순혁(동아대 대학원), 조석수(삼척대 기계·정밀·자동차공학부), 주원식(동아대 기계·산업시스템공학부)

A Study on the X-Ray Fractography of Turbine Blade under Fatigue Load

S. W. Kim(Mech. Eng. Dept., DAU), D. W. Lee(Mech. Eng. Dept., DAU), S. H. Hong(Mech. Eng. Dept., DAU), S. S. Cho(Vehi. Eng. Dept., SNU), W. S. Joo.(Mech. Eng. Dept., DAU)

Abstract

Turbine blade is subject to cyclic bending force by steam pressure. Stress analysis by fractography is already established technology as means for seeking cause of fracture and has been widely employed. In the X-ray fractography, plastic deformation and residual stress near the fracture surface can be determined and information of internal structure of material can be obtained. Therefore, to find a fracture mechanism of torsion-mounted blade in nuclear power plant, based on the information from the fracture surface obtained by fatigue test, the correlation of X-ray parameter and fracture mechanics parameter was determined and then the load applied to actual broken turbine blade was predicted.

Key Words : X-ray fractography(X-선 파면해석), Stress intensity factor(응력확대계수), Turbine blade(터빈 블레이드), Fatigue fractured surface(피로파면)

1. 서론

발전소용 터빈 블레이드는 비틀림 마운트에 의한 비틀림 하중과 회전속도에 의한 원심력 및 증기력에 의한 반복 굽힘하중이 중첩되어 복잡한 하중 양상을 보이고 있어 파손과 파괴가 반복적으로 발생하고 있으며, 이러한 반복 굽힘하중은 피로 파손을 일으킬 수 있는 사이클 의존형 하중으로서 가동 초기 정상적 운전을 유지하다가도 운전시간이 증가함에 따라 터빈 블레이드에 균열이 발생되어 성장함과 동시에 터빈 가동 환경 특성상 크리프(Creep), 응력부식균열(SCC), 뜨임취화(Temper embrittlement), 침식(Erosion) 등 복잡한 손상형태를 보이고 있다.¹⁾ 이와 같은 파손 형태 및 환경의 터빈 블레이드는 기존의 전자현미경을 이용한 파면해석 수법으로는 파괴에 관여한 응력을 추정하는 것은 어렵다.

따라서 재료의 파면해석을 비접촉, 비파괴적으로

구명할 수 있는 X선 회절실험을 수행하여 파면 근방에서의 결정구조를 거시 및 미시적으로 검출하여 잔류응력과 소성 변형량의 변화 값을 결정할 수 있고, 또한 재료 내부 구조의 정보를 얻을 수 있는 X선 프랙토그래피(X-ray fractography)에 의한 파손해석 방법을 이용하여 연구할 필요가 있다. 특히, 피로 파괴된 부품에 대하여 설계응력과 실제 작용응력을 비교할 수 있으며 사고 대책 수립에 대한 구체적인 기준이 될 수 있다.

Chiaki Tsubouchi²⁾등은 피스톤의 회전운동을 크랭크 축의 회전운동으로 변환시키는 자동차용 컨넥팅로드(Connecting rod)에 대하여 X선 프랙토그래피 방법에 의한 정량적 해석을 수행하여 파괴에 관여한 작용응력을 구하여 실기 파손부품에 적용 가능함을 구명하였다.

Kazuyuki Matsui³⁾등은 실기부품 사고 파면의 파면해석에 X선 프랙토그래피를 적용하여 파괴원인의

규명 수단으로서 그 유효함을 증명하였다.

본 연구에서는 원자력 발전소에 설치 가동 중인 비틀림 마운트형 터빈 블레이드의 파손 원인을 구명하고자 저압 터빈 블레이드 실기 부품 재료인 12% Cr강을 사용하여 피로균열성장거동과 파괴역학적 조건과의 관계를 고찰하여, 파면상 및 파면하의 X선 파라미터와 파면 형성시의 파괴역학 파라미터의 관계를 비교하고 또한, X선 파라미터의 변화로부터 소성역 크기를 검토하여 부재의 파괴시 K_{max} 및 ΔK 의 추정을 통하여 실제 작용하중을 구하고자 한다.

2. 저압 터빈 블레이드의 파손 사고

본 연구에서 고려하는 원자력 가압 경수로형 저압 터빈 3단은 전자의 형식을 취하는 비틀림 마운트형 블레이드를 사용하고 있다. Table 1은 상술의 저압 터빈에 관한 일반적인 재원을 나타낸 것으로 이것을 터빈 블레이드의 파손해석의 기준으로서 이용하였다.

Table 1 General properties at third stage of low pressure turbine

RPM	Steam condition				Number of blade	
	Inlet		Outlet		3 stage	
	operating temp. (°C)	pressure (MPa)	operating temp. (°C)	pressure (MPa)	Rotary wing	Fixed wing
1800	252	0.827	33.3	0.0051	143	36×2

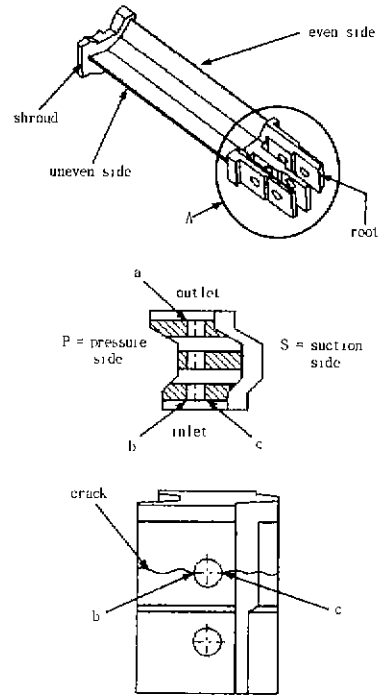
Fig 1은 전방 루트 부근에서의 균열발생과 성장 위치를 나타낸 것으로 균열은 응력 집중이 높은 상측 핀 구멍(Pin hole) 부근인 b또는 c점에서 시작하여 bc를 연장한 선에 평행하게 로터(Rotor)의 원주 방향으로 성장하고 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 원자력 발전소용 축류형 충동 저압 터빈에서 사용되는 12% Cr강이다. Table 2은 12% Cr강의 화학적 조성을 나타낸 것이고 Table 3는 저압 터빈이 사용되는 저압 터빈 입구 온도인 252°C와 출구 온도인 33.3°C를 모의한 12% Cr강의 인장시험 결과를 나타낸 것이다.

피로시험편의 재료는 파손된 저압 터빈 블레이드의 전전부에서 채취하였으며 Fig. 2에 형상과 치수를 나타내었다⁴⁾



Detail A

Fig 1 Crack initiation and growth position at third stage of LP turbine

Table 2 Chemical composition of 12% Cr steel. (wt.%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	P	S
0.21	0.50	0.55	0.55	12.0	1.0	0.3	0.025	0.02

Table 3 The mechanical properties of 12% Cr steel

Temp. (°C)	Yield strength σ_{ys} (MPa)	Tensile strength σ_{ts} (MPa)	Poisson's ratio ν	Elongation ϵ_f (%)	Young's modulus E (GPa)
20	670	700	0.29	26.4	203
252	596	745	0.288	10.8	202

3.2 피로실험

파손해석을 수행하기 위한 피로시험은 정격하중이 49kN인 유압 서보식 피로시험기 (Shimadzu EHF-EB5-10L)를 이용하였다. 실험은 일정하중진폭 방법으로 실시되었으며 하중반복속도는 10Hz로 설정하였다.⁵⁾ 파괴역학 파라미터로 사용하는 응력확대계수 K는 균열 길이 a 및 작용하중에 의하여 결정되며 다음 식 (1)로 결정한다.⁶⁾

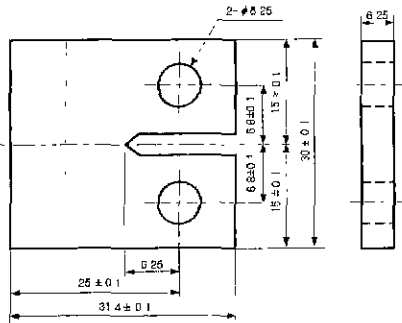


Fig. 2 Geometry and dimension of specimen

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} \quad (1)$$

$$(0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4)$$

단, $a = a/W$

a : 균열길이, W : 시험편폭, B : 시험편 두께

Fig. 3는 터빈 블레이드에 작용한 비틀림 마운트에 의한 비틀림과 로터의 회전력에 의한 원심력 및 증기압력에 의한 힘을 각각 나타낸 것이다. 핀 구멍이 상하로 인장력을 받아 핀 구멍에 균열이 발생하여 성장하는 것으로 가정할 수 있다.

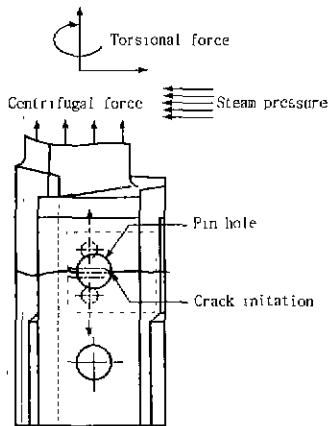


Fig. 3 Schematic representation of load component for turbine blade root and CT specimen

3.3 X선 회절실험

Table 4는 X선 파라미터를 측정하기 위한 X선 회절조건을 나타낸 것이다.

3.3.2 피로파면에서의 X선 파라미터 측정

Fig. 4는 12% Cr강의 피로파단면과 터빈 블레이드 루트 파면에 대한 X선 관찰의 모식도를 나타내고 있다. X선 조사면적은 $\phi 2\text{mm}$ 의 원형으로 하였다. 파면상의 X선 파라미터 측정은 두께방향의 파단 중

Table 4 X-ray diffraction condition of 12% Cr steel

Test condition	Parallel-beam method
Diffraction angle	156.40°
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	(211)
Filter	V
Tube voltage	30 kV
Tube current	8 mA
Irradiated area	$\phi 2\text{mm}$
Soller slit	1°
Time constant	5 sec

양부에서 X선을 조사하여 균열성장방향으로 파면상의 잔류응력을 측정하였다.

파면하의 소성역 깊이 측정은 시험편의 경우 최대응력확대계수 $K_{max}=19.94$, 27.44MPa 에서, 파손 루트부의 경우는 기점부, 진진부, 급속파단부의 파단면 표층면을 순차적으로 전해면마하면서 파단면의 X선 파라미터를 반복적으로 측정하였다.

소성역 깊이는 소성변형을 받지 않는 부재의 X선 파라미터 값에 상응하는 양으로 하였다.

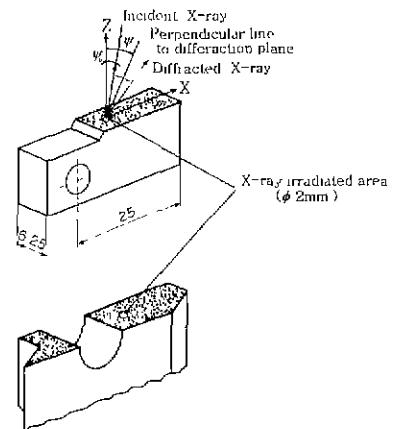


Fig. 4 Schematic illustration of X-ray irradiated area on fatigue fractured surface of 12% Cr steel

4. 실험결과 및 X선 회절에 의한 파손해석

4.1 피로실험 결과

Fig. 5은 12% Cr강의 피로균열성장속도와 응력확대계수범위의 관계를 나타낸 것이다

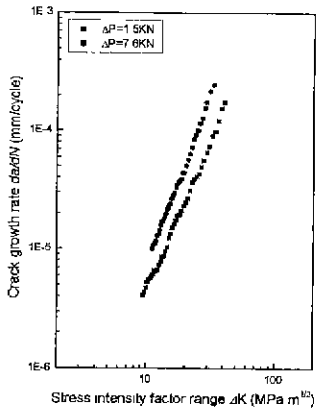


Fig. 5 Relationship between stress intensity factor range and crack growth rate

4.2 피로파면상의 X선 파라미터 변화거동

4.2.1 피로파면의 잔류응력 분포

편진하중진폭을 각각, 1.5kN, 7.6kN의 두 단계로 나누어 피로시험을 수행한 후 피로파면에서의 균열 전진방향의 잔류응력을 X선 회절법에 의하여 측정 한 결과를 최대응력확대계수 K_{max} 로 정리하여 Fig. 6에 나타내었다

파면상의 잔류응력은 모두 인장이며, 하중진폭이 높을수록 잔류응력도 크게 분포하고 있다. 파면상의 잔류응력 σ_r 는 최대응력확대계수에 대하여 하중진폭의 의존성을 나타내고 있으며 이러한 결과는 Oh⁶⁾등의 SS41제와 Y.Sekita⁷⁾등의 SNCM439제의 연구결과와 동일한 경향을 보이고 있다.

Fig 7은 피로시험에서 얻어진 파면상의 잔류응력을 응력확대계수범위 ΔK 로 정리한 결과를 나타내었다 하중진폭이 클수록 잔류응력은 높게 나타났으며, ΔK 의 증가에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 하중진폭에 관계없이 ΔK 가 증가함에 따라 응력반전에 의한 역항복력으로 인한 압축잔류응력이 발생되어 인장잔류응력과 압축잔류응력이 중첩되어 인장응력이 상쇄된다고 생각된다

4.3 피로파면하의 X선 파라미터의 변화 거동

4.3.1 파면하의 잔류응력 분포

파면하의 잔류응력 σ_r 를 파면으로부터의 깊이 y 에 대하여 Fig 8 (a), (b)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 파면하의 잔류응력은 파면내부로 들어감에 따라 인장잔류응력은 초기에 증가하다가 점차 감

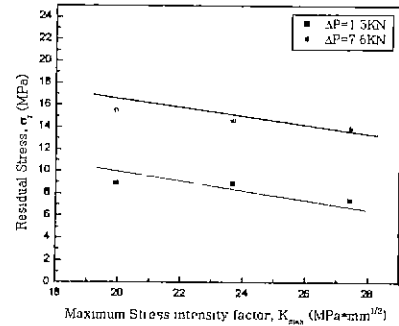


Fig 6 Variation of residual stress with maximum stress intensity factor on fatigue fractured surface.

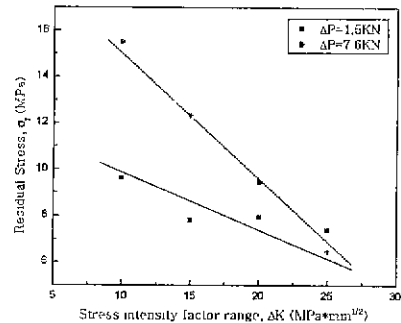


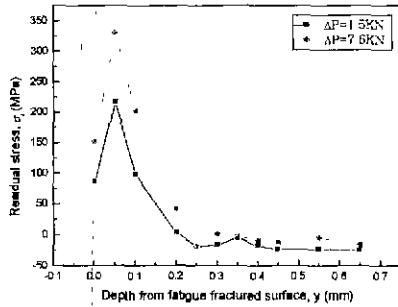
Fig. 7 Relationship between residual stress and stress intensity factor range on fatigue fractured surface

소하고 있으며, 하중진폭이 증가할수록 동일 K_{max} 에서 잔류응력이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

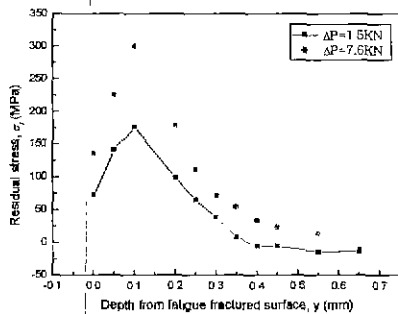
이는 ΔK 가 동일 K_{max} 에서 저하중진폭 쪽이 크기 때문에 이것이 역항복에 의한 압축변형으로 작용하기 때문이라 생각된다. 파면하의 소성역 깊이는 잔류응력이 감소하여 거의 일정하게되는 값으로 정할 수 있는데, 본 연구의 경우는 Fig 8 (a), (b) 모두 잔류응력이 초기치 값에 해당하는 지점을 소성역 깊이로 각각 결정하였다.

4.3.2 소성역 깊이 ω_y 와 최대응력확대계수 K_{max} 의 관계

본 연구에서는 하중진폭 1.5kN, 7.6kN에서 각각의 최대응력확대계수 K_{max} 에 대하여 잔류응력 σ_r 이 재료의 초기치 잔류응력 σ_{r0} 로 되는 파면깊이를 최대소성역 깊이 ω_y 로 하고, 측정된 소성역깊이 ω_y 와 (K_{max}/σ_y) 와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 σ_y 는 Table 3에서 나타낸 것과 같이 670MPa이고,



(a) $K_{max} = 19.94 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b) $K_{max} = 27.44 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 8 Residual stress plotted against the depth from fatigue fractured surface for 12% Cr steel

최대소성역 깊이 ω_y 는 소규모항복조건하에서 (K_{max}/σ_y) 의 제곱에 비례하여 증가하고, 다음 식 (2)와 같은 관계가 성립한다.

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

본 실험에서 α 값을 최소자승법으로 구하여 보면, $\alpha=0.040$ 이 된다. 이 값은 Levy⁸⁾ 등의 유한요소해석값인 $\alpha=0.15$ 나, Von Mises의 항복조건에 의한 평면변형률 조건하에서의 균열면의 수직방향의 소성역 치수 $\alpha=0.132$ 보다는 작은 값으로 되고 있다.⁹⁾ α 값은 재료 특성에 의존하여 실험적으로 구하여지며¹⁰⁾ 일반적으로 항복점이 높은 강이 낮은 강보다 크게 되는 경향이 있으며, 본 실험에서도 $\alpha=0.040$ 으로 S48C재 $\alpha=0.126$ 보다 작게 되는 경향을 보였다.

따라서 식 (2)에서 알 수 있듯이 파면아래의 잔류응력 분포로부터 구해진 최대소성역깊이 ω_y 로부터 최대응력확대계수 K_{max} 을 추정할수 있다.

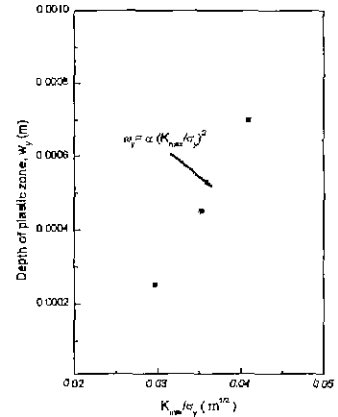


Fig. 9 Relationship between plastic zone depth and maximum stress intensity factor to yield strength

4.4 터빈 블레이드 피로파면의 정량해석

Fig. 10은 파손된 터빈 블레이드의 파면을 깊이 방향으로 전해연마하여 구한 잔류응력을 나타낸 것이다. 터빈 블레이드 파면이 전해연마됨에 따라 잔류응력은 급격히 감소되고 있으며 대략 $\omega_y = 600\mu\text{m}$ 부근에서 잔류응력이 거의 0에 가까워짐을 알 수 있다. 이러한 ω_y 를 식 (2)에 대입하여 파면의 최대응력확대계수 K_{max} 을 구해보면 $82 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 를 얻을 수 있다.

파면의 작용 응력을 추정하기 위하여 터빈 블레이드 핀 구멍 내면을 균열기점부로 하는 표면균열과 핀 구멍과 루트 측면이 교차되는 핀측균열의 두 경우를 고려할 수 있으며, 표면균열길이 $2a$, 깊이 방향의 균열길이 b 의 표면균열을 가진 구조물이 동일한 인장응력 σ 를 받는 경우 응력확대계수 K 는 Newman이 제안한 식 (3)로 나타낼 수 있다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi b} \frac{M}{\phi} \quad (3)$$

단, t : 균열이 존재하는 판 두께

$$M = (1.13 - 0.09\alpha) + \left[-0.54 + \frac{0.89}{(0.2 + \alpha)} \right] \beta^2 + \left[0.5 - \frac{1}{(0.65 + \alpha)} \right] + 14.0(1 - \alpha)^{2.4} \beta^4$$

$$\phi^2 = 1 + 1.464 \alpha^{1.65}, \quad \alpha = \frac{b}{a}, \quad \beta = \frac{b}{t}$$

X선을 조사한 균열기점부의 위치에서 균열형상을 측정된 결과 $a=0.009\text{m}$, $b=0.0045\text{m}$ 였으며 판 두

께 t 는 터빈 블레이드 루트의 두께 $t=0.01235\text{m}$ 로 하였다. 루트 파단부의 소성역 깊이로부터 구한 최대 응력확대계수 K_{\max} 에서 측정 위치에서의 최대 응력 $\sigma_{\max} = 709\text{MPa}$ 로 추정할 수 있다.

한편 길이 c 의 편축균열을 가진 구조물이 동일한 인장응력 σ 을 받는 경우의 응력확대계수 K 는 식(4)으로 주어진다.

$$K = 1.12\sigma\sqrt{\pi c} \quad (4)$$

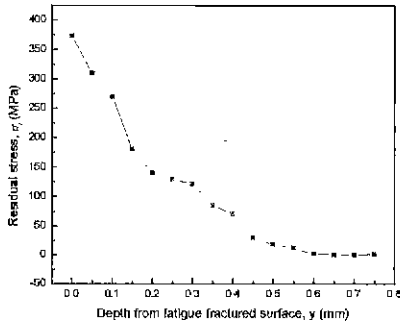


Fig 10 Relation between plastic region depth ω_y and $(K_{\max}/\sigma_y)^2$

식 (4)에서 균열길이 c 는 0.0045m 로 가정한다. 소성역 깊이로부터 구한 최대응력확대계수 K_{\max} 로부터 측정 위치에서의 최대응력 σ_{\max} 을 614.6MPa 로 추정할 수 있다. 또한 터빈 블레이드 루트 파단면의 면적 400mm^2 을 적용하면 파손된 실기부품에 부하된 최대하중은 283.6kN 이 된다. 이 값들은 부품의 설계 응력 보다 큰 값으로 평가되어 허용응력을 벗어나고 있다. 위의 두 경우 균열을 가정해서 구한 작용응력의 추정값은 표면균열의 경우가 더 큰 값으로 추정된다

6. 결론

본 연구는 원자력 발전소 저압 터빈에 사용하는 비틀림 마운트형 터빈 블레이드의 파손 원인을 구명하고자 실기부품 재료인 12% Cr강에 대한 피로균열 성장실험과 X선 회절실험을 수행하여 응력해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 피로균열진전실험에서 얻어진 파면에서의 잔류응력은 최대응력확대계수 K_{\max} 및 응력확대계수범위 ΔK 가 증가할수록 감소하였다.

2) 파면의 소성역깊이 ω_y 는 파면상의 잔류응력에 의해 결정되고, 본 연구에 사용된 12% Cr강에서는 최대응력확대계수 K_{\max} 와 항복강도 σ_y 와의 사이에는 다음 식의 관계식을 얻었다

$$\omega_y = 0.0402(K_{\max}/\sigma_y)^2$$

3) 터빈 블레이드 파면의 X선 프랙토그래피에 의한 응력해석 결과 작용된 최대응력은 709MPa 이고, 하중은 283.6kN 이었다.

참고문헌

1. 박인규, 원자력발전소 기기의 노화손상 평가, 대한기계학회지, 제33권, 제5호, 1993.
2. Chiaki Tsubouchi, Takeshi Horikawa, "Analysis of Connecting Rod Fatigue Fracture Surface by X-Ray Fractography", J Society Matenal Science, Japan, Vol. 49, No. 10. pp. 1143-1147, 2000.
3. 松田和幸, 廣瀬幸雄, 茶谷明義, 田中啓介, "機械構造部品の破壊事故解析とX線フラクトグラフィ", 材料, 第39卷, pp 1240~1246, 1988.
4. ASTM Standards E647-93, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM Standards Sec.3, Vol.03.01, pp 591~596, (1994).
5. Shmadzu, "EHF-EB5-10L形 造作説明書", 鳥津製作所, pp 54~55, 1993.
6. 오세욱 외4인, "X-선 회절에 의한 SS41강의 피로 파면해석", 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, pp. 114~122, 1994
7. 關田裕次, 兒玉昭太郎, 三澤啓介, X線解析による疲勞破面の研究", 材料, 第32卷, pp.258~263, 1983.
8. N Levy, P. V. Marcal, W. J. Ostengren and J R Rice, Int. T Fracture. 7, p 143, 1971.
9. 李東寧, "金屬強度學", 文運堂, p.240, 1991
10. 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卷, pp 244~250, 1982.