

피로하중을 받는 터빈 블레이드의 X선 프랙토그래피에 관한 연구

홍순혁*, 이동우*, 조석수**, 주원식***

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

Soon Hyeok Hong*, Dong Woo Lee*, Seok Swoo Cho**, and Won Sik Joo***

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 stress intensity factor 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 하중양식을 보이고 있다.

특히 이러한 하중양식 중 반복 굽힘하중은 피로파손을 일으킬 수 있는 사이클 의존형 하중으로서 가동 초기 정상적 운전을 유지하더라도 운전시간이 증가함에 따라 터빈 블레이드에 균열이 발생되어 성장함과 동시에 터빈 가동 환경 특성상 크리프(Creep), 응력부식균열(SCC), 뜨임취화(Temper embrittlement), 침식(Erosion)등의 복잡한 손상형태를 보이고 있다.¹⁾

이와 같은 파손형태 및 환경의 터빈 블레이드는 기존의 전자현미경을 이용한 파면해석 방법등으로 는 파괴를 일으키는 응력의 크기를 추정하기가 어렵다.²⁾ 따라서 파단된 재료에 대한 파면해석을 비접촉, 비파괴적으로 수행할 수 있는 방법이 요구된다. 이러한 방법중 X선 프랙토그래피(X-ray fractography)에 의한 파손해석 방법은 파면 근방에서의 결정구조를 거시 및 미시적으로 검출하여 잔류응력과 소성변형률을 결정할 수 있으므로 재료 내부 구조의 정보를 얻을 수 있다. 특히, 피로 파괴된 부품에 대하여 X선 프랙토그래피 방법을 적용하면 설계응력과 실제 작용응력을 비교할 수 있어 사고원인 해석과 대책 수립에 대한 구체적인 기준을 마련

나· 2001년 6월 21일 접수

* 동아대학교 대학원 기계공학과

** 삼척대학교 기계·정밀기계·자동차공학부

*** 동아대학교 기계·산업 시스템공학부

할 수 있다.

Chiaki³⁾ 등은 피스톤의 왕복운동을 크랭크 축의 회전운동으로 변환시키는 자동차용 컨넥팅 로드(Connecting rod)에 대하여 X선 잔류응력에 의한 정량적 해석을 수행하여 파괴를 일으킨 실제 작용응력을 구함으로써 실기 파손부품에 적용할 수 있음을 밝혔다. Kazuyuki⁴⁾ 등은 파손된 기어에 대한 파면해석에 X선 프랙토그래피를 적용하여 피로파손을 일으킨 부하응력을 추정하였다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소에 설치 가동 중인 비틀림 마운트형 터빈 블레이드의 파손 원인을 구명하고자 저압 터빈 블레이드 실기 부품 재료인 12% Cr강을 사용하여 피로균열성장기동과 파괴역학적 조건과의 관계를 기초로, 파면상 및 파면하의 X선 파라미터와 파면 형성시의 파괴역학 파라미터의 관계를 비교하며, X선 파라미터의 변화로부터 소성역 크기를 검토함으로써 부재의 파괴시 최대응력확대계수 K_{max} 및 응력확대계수범위 ΔK 를 추정하고자 한다.

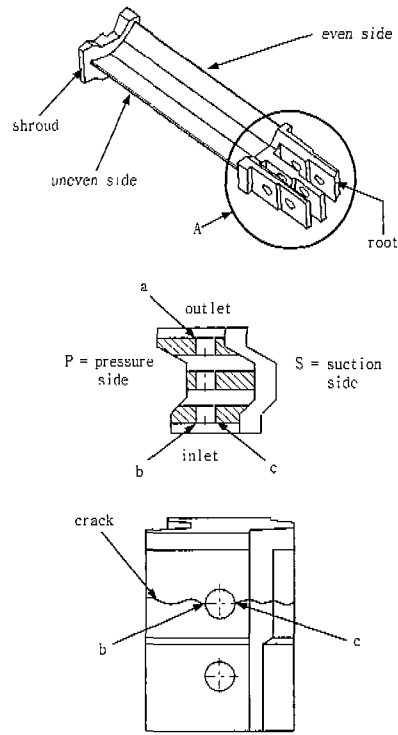
2. 저압 터빈 블레이드의 파손 사고

본 연구에서 고려하는 원자력 가압 경수로형 저압 터빈 3단은 전자의 형식을 취하는 비틀림 마운트형 블레이드를 사용하고 있다. Table 1은 상술의 저압 터빈에 관한 일반적인 제원을 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 b 또는 c점에서 시작하여 bc를 연장한 선에 평행하게 로터(Rotor)의 원주 방향으로 성장하고 있다.



Detail A

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

3. 실험장치 및 방법

3.1 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 원자력 발전소용 축류형 증동 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 나타내었다.⁵⁾

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 (%)	Young's modulus E (GPa)
20	670	790	0.29	26.4	203
252	596	745	0.288	10.8	202

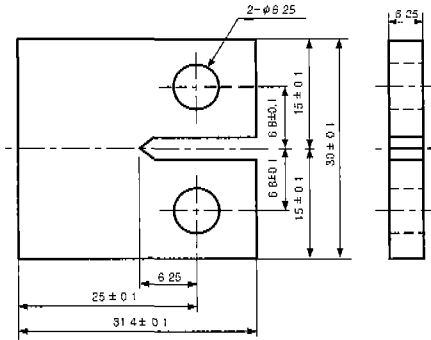


Fig. 2 Geometry and dimension of specimen

3.2 피로시험

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

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

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

단, $\alpha = a/W$

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.

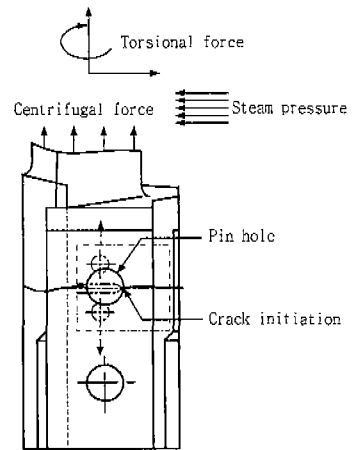


Fig. 3 Schematic representation of load component for turbine blade root and CT specimen

3.3 X선 회절시험

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

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	φ 2 mm
Soller slit	1°
Time constant	5 sec

3.3.1 피로파면에서의 X선 파라미터 측정

Fig. 4는 12% Cr강의 피로파단면과 터빈 블레이드 루트 파면에 대한 X선 관찰의 모식도를 나타내고 있다. X선 조사면적은 직경 2 mm의 원형으로 하였다. 파면상의 X선 파라미터 측정은 두께방향의 파단 중앙부에서 X선을 조사하여 균열성장방향으로 파면상의 잔류응력을 측정하였다.

파면하의 소성역깊이는 피로시험편의 경우 최대응력확대계수 $K_{max} = 19.94, 23.69, 27.44 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

에서 파손된 터빈 블레이드의 경우 균열기점부분, 균열성장부분, 급속파단부분의 파단면 표층면을 순차적으로 전해연마하면서 파단면의 X선 잔류응력을 반복적으로 측정하여 깊이에 따른 X선 잔류응력이 변화되지 않는 위치를 소성역 깊이로 결정하였다.

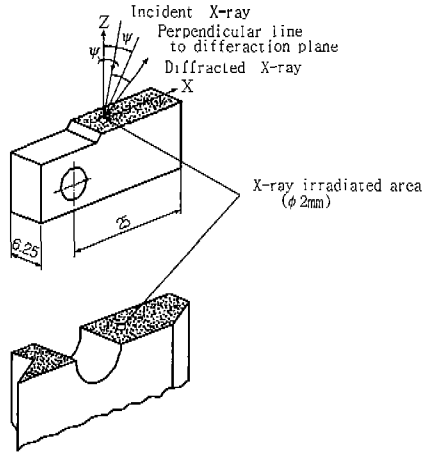


Fig. 4 Schematic illustration of X-ray irradiated area on fatigue fractured surface of 12% Cr steel

4. X선 회절에 의한 파손해석

4.1 피로실험

Fig. 5은 터빈 블레이드 재료로 사용된 12% Cr강의 피로균열성장속도와 응력확대계수범위의 관계를 나타낸 것이다.

4.2 피로파면의 X선 잔류응력 분포

편진하중폭을 각각, 1.5 kN, 7.6 kN의 두 단계로 나누어 피로시험을 수행한 후 피로파면에서의 균열진전방향의 잔류응력을 X선 회절법에 의하여 측정된 결과를 최대응력확대계수 K_{max} 로 정리하여 Fig. 6에 나타내었다.

파면상의 잔류응력은 모두 인장이며, 하중폭이 높을수록 잔류응력도 크게 분포하고 있다. 파면상의 잔류응력 σ_r 는 최대응력확대계수에 대하여 하중폭의 의존성을 나타내고 있으며 이러한 결과는 Oh⁷⁾등의 SS41재와 Sekita⁸⁾등의 SNCM439재의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

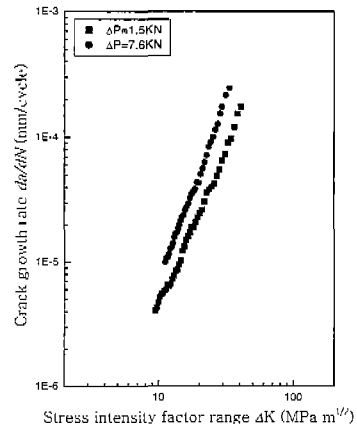


Fig. 5 Relationship between stress intensity factor range and crack growth rate

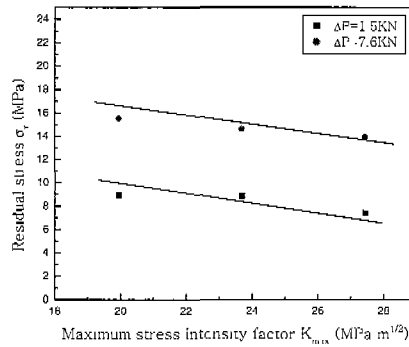


Fig. 6 Variation of residual stress with maximum stress intensity factor on fatigue fractured surface.

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

4.3 피로파면하의 X선 파라미터의 변화

4.3.1 파면하의 잔류응력 분포

파면하의 잔류응력 σ_r 를 파면으로부터의 깊이 y 에 대하여 Fig. 8 (a), (b), (c)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 파면하의 잔류응력은 파면내부로 들어감에 따라 인장잔류응력은 초기에 증가하다가 점차 감소하고 있으며, 하중폭이 증가할수록 동일 K_{max} 에서 잔류응력이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 ΔK 가 동일 K_{max} 에서 저하중폭 쪽이 크기 때문에 이것이 역항복에 의한 압축변형으로 작용하기 때문이라 생각된다. 파면하의 소성역 깊이는 잔류응력이 감소하여 거의 일정하게 되는 값으로 결정할 수 있는데, 본 연구의 경우는 Fig. 8 (a), (b), (c) 모두 잔류응력이 초기 잔류응력 σ_{r0} 에 해당하는 지점을 소성역 깊이로 각각 결정하였다.

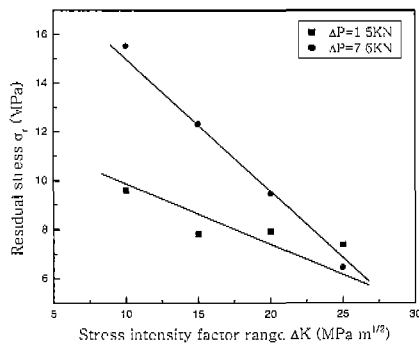
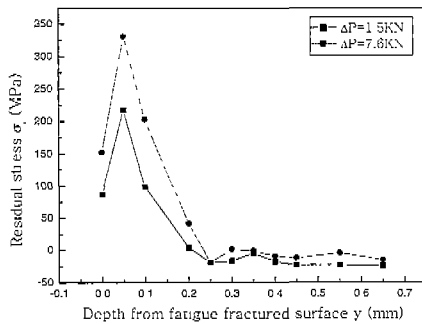
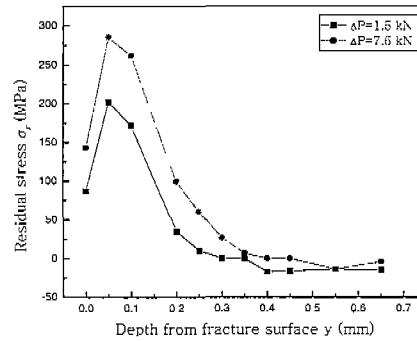


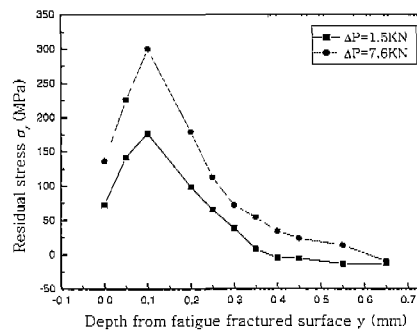
Fig. 7 Relationship between residual stress and stress intensity factor range on fatigue fractured surface.



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



(b) $K_{max} = 23.69 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



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

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

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

본 연구에서는 하중폭 1.5 kN, 7.6 kN에서 각각의 최대응력확대계수 K_{max} 에 대하여 잔류응력 σ_r 이 재료의 초기 잔류응력 σ_{r0} 로 되는 파면깊이를 최대 소성역 깊이 ω_y 로 하고, 측정된 소성역 깊이 ω_y 와 (K_{max}/σ_y) 와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

여기서 σ_y 는 Table 3에서 나타낸 값과 같이 596 MPa이고, 최대소성역깊이 ω_y 는 소규모 항복조건 하에서 (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 유한요소 해석값인 $\alpha = 0.15$ 나, von Mises의 항복조건에 의한 평면변형을 조건하에서의 균열면 수직방향의 소성역치수 $\alpha = 0.132$ 보다는 작은 값으로 되고 있다.¹⁰⁾

α 값은 재료 특성에 의존하므로 실험적으로 구하며¹¹⁾ 항복점이 높은 강이 낮은 강보다 크게되는 경향이 있으며, 본 실험에서도 α 가 0.040으로 S48C에 대한 α 값 0.126보다 작게됨을 알 수 있다.

따라서 식 (2)에서 알 수 있듯이 파면아래의 잔류응력 분포에서 구한 최대소성역깊이 ω_y 로부터 최대응력확대계수 K_{max} 을 추정할 수 있다.

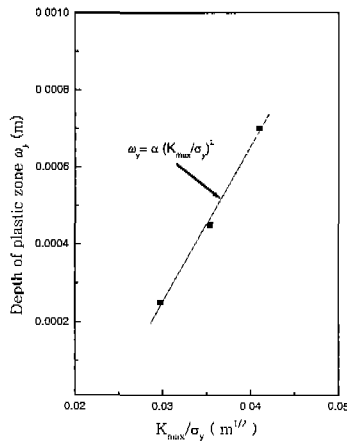


Fig. 9 Relationship between plastic zone depth and maximum stress intensity factor to yield strength

4.4 터빈 블레이드 피로파면의 정량해석

Fig. 10은 파손된 터빈 블레이드의 파면을 깊이 방향으로 전해연마하여 구한 잔류응력을 나타낸 것이다. 터빈 블레이드 파면이 전해연마로 표면이 제거됨에 따라 잔류응력은 급격히 감소하였고 파면으로부터 600 μm 부근에서 잔류응력이 거의 0에 가까워짐을 알 수 있었다. 잔류응력이 0이 되는 깊이 ω_y 를 식 (2)에 대입하여 터빈 블레이드에 가해진 최대응력확대계수 K_{max} 을 구하면 73 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 를 얻을 수 있다.

또한 터빈 블레이드의 하중조건인 로터의 회전 속도에 의한 원심력, 비틀림 마운트에 의한 비틀림 변위 및 증기에 의한 증기압력과 경계조건을 기초로 응력해석한 결과²⁾ 응력비 0.34로부터 파손된 편

구멍 근방의 최소응력확대계수 K_{min} 는 24.8 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이고, 응력확대계수범위 ΔK 는 48.2 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 임을 알 수 있다.

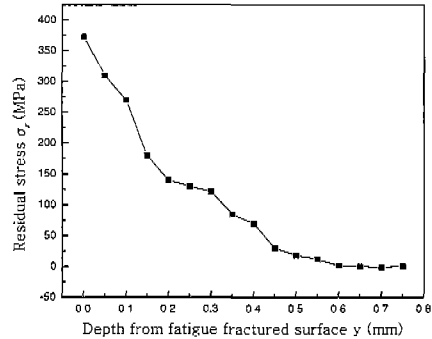


Fig. 10 Relation between plastic region depth ω_y and $(K_{max}/\sigma_y)^2$

5. 결론

본 연구는 원자력 발전소 저압 터빈에 사용하는 비틀림 마운트형 터빈 블레이드의 파손 원인을 구명하고자 실기부품 재료인 12% Cr강에 대한 피로 균열성장실험과 X선 회절실험을 수행하여 파손해석한 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 파손해석 결과 최대응력확대계수 K_{max} 은 73 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이고, 응력확대계수범위 ΔK 는 48.2 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 추정되었다.

참고문헌

1. 박인규, 원자력발전소 기기의 노화손상 평가, 대한 기계학회지, 제33권, 제5호, pp. 414~420, 1993.
2. 최우성 외4인, "AFM과 유한요소법을 이용한 터빈 블레이드의 파손해석에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 489~493, 2000.
3. Chiaki Tsubouchi, Takeshi Horikawa, "Analysis of Connecting Rod Fatigue Fracture Surface by X-Ray Fractography," J. Society Material Science, Japan, Vol. 49, No. 10. pp. 1143-1147, 2000.
4. 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.
5. 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.
6. Shimadzu, "EHF-EB5-10L形 造作説明書," 鳥津製作所, pp. 54~55, 1993.
7. 오세욱 외4인, "X-선 회절에 의한 SS41강의 피로 파면해석," 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, pp. 114~122, 1994.
8. 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.
9. N. Levy, P. V. Marcal, W. J. Ostengren and J. R. Rice, Int. T. Fracture. 7, p. 143, 1971.
10. 李東寧, "金屬強度學," 文運堂, p. 240, 1991.
11. 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.