

## 피로하중을 받은 저압 터빈 블레이드의 파손해석에 관한 연구

홍순혁\* · 이동우\* · 조석수\*\* · 주원식\*\*\*

\* 동아대학교 대학원 기계공학과  
 \*\* 삼척대학교 기계·정밀기계·자동차공학부  
 \*\*\* 동아대학교 기계·산업시스템공학부

### A Study on Failure Analysis of Low Pressure Turbine Blade Subject to Fatigue Load

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

\* Graduate School of Mechanical Eng., Donga University, Pusan 604-714, Korea  
 \*\* Dept. of Vehicle Eng., Samchok National University, Samchock 245-711, Korea  
 \*\*\* Dept. of Mechanical Eng., Donga University, Pusan 604-714, Korea

#### Abstract

Turbine blade is subject to force of three types; the torsional force by torsional mount, the centrifugal force by the rotation of rotor and the cyclic bending force by steam pressure. The cyclic bending force was a main factor on fatigue strength. SEM fractography in root of turbine blade showed micro-crack width was not dependent on stress intensity factor range. Especially, fatigue striation did not exist on SEM photograph in root of turbine blade. To clear out the fracture mechanism of turbine blade, nanofractography was needed on 3-dimensional crack initiation and crack growth with high magnification. Fatigue striation partially existed on AFM photograph in root of turbine blade. Therefore, to find a fracture mechanism of the torsion-mounted blade in nuclear power plant, the relation between stress intensity factor range and surface roughness measured by AFM was estimated, and then the load amplitude  $\Delta P$  applied to turbine blade was predicted exactly by root mean square roughness.

(Received January 30, 2001)

Key Words : Turbine blade, Nanofractography, SEM(Scanning electronic microscope), AFM(Atomic force microscope), RMS(Root mean square) roughness.

#### 1. 서 론

원자력 발전소는 다른 수력 발전소나 화력 발전소에 비하여 고도의 안전성이 요구되므로 원자력 기기에 대한 높은 신뢰성을 확보하는 것은 소련의 체르노빌 원전 사고와 같은 대형 사고를 방지하는 데 지대한 공헌을 할 것이다. 그러나 원자력 발전소에서 발생하는 사고는 해마다 감소되지 않아 계획예방정비가 훨씬 더 필요할 뿐만 아니라 파손된 원자력 관련 기기에 대한 공학적 해석이 요구되고 있다<sup>1-4)</sup>.

특히, 발전소용 설비는 고온, 고압 환경 하에서 고속

으로 가동되기 때문에 복합적인 응력을 받으며 운전되고 손상은 회전체 운동 특성상 지속적으로 발생될 수 있고 2차 손상으로 확대되는 특징이 있다.

피로파손된 부품은 파면에 일정 간격의 스트라이에이션을 형성하지만 재료의 종류와 균열성장속도 범위에 따라 파손 해석이 용이한 영역과 그렇지 못한 영역이 존재하게 된다. 즉, 연성재료에 대한 파손 해석은 파손 재료의 재현 시험과 이에 따른 스트라이에이션 간격이 필요하다.

이러한 경우 파손기구를 구명하기 위해서는 피로 균열의 생성과 성장과정을 3차원 공간상에서 고배율로 관찰할 수 있는 나노프랙토그래피(Nanofractography)

의 필요성이 요구되고 있다.

종래의 파면해석은 육안으로 관찰하는 기초적 정성 해석과 2차원 정량해석이 대부분이었다. 2차원 정량 해석을 수행할 경우 파면 높이 방향에 관한 정보를 얻을 수 없으므로 파면 손상 평가가 대부분 불충분하다.

따라서 최근 원자 크기의 해상도를 가지면서 표면의 3차원 측정이 가능한 주사형 터널링 현미경(STM : Scanning tunneling microscope), 원자간력 현미경(AFM : Atomic force microscope)과 같은 주사형 탐침 현미경(SPM : Scanning probe microscope)이 다양한 분야에 폭 넓게 이용되고 있다. 재료강도 평가 분야의 경우 균열선단 부근의 소성 변형에 따른 전위의 방출 과정을 관찰함으로써 미시적 변형 기구를 구명하였고<sup>5)</sup> Komai등<sup>6)</sup>은 AFM을 이용하여 오스테나이트 스테인레스강 및 알루미늄 합금의 나노스케일(Nanoscale) 영역에서의 응력부식균열성장기구를 관찰한 결과, 입계 삼중점 근방에서의 균열성장이 균열 분지에 의하여 훨씬 더 느려진다는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 원자력발전소 비틀림 마운트형(Torsion-mounted type) 터빈 블레이드(Turbine blade)의 파손원인을 밝히고자 저압 터빈 블레이드 실기 부품 재료를 사용하여 응력확대계 수범위에 대한 스트라이에이션 간격 및 파면의 표면거칠기 관계를 원자간력 현미경으로 검토하여 부하 하중을 구하였다.

## 2. 저압 터빈 블레이드의 파손 사고

터빈 블레이드의 쉬라우드(Shroud)에서 균열을 발견한 1989년 이후, 이 터빈에 대한 계획예방정비를 실시한 결과, 1단과 2단 및 3단 터빈 블레이드에 대한 초음파 검사에서 전방(Uneven side)과 후방(Even side) 루트(Root) 부근에서 1991년에 29개, 1998년에 24개가 파손되어졌다<sup>7)</sup>.

Fig. 1은 전방 루트 부근에서의 균열발생과 성장 위치를 나타낸 것으로 균열은 응력 집중이 높은 상측 핀구멍(Pin hole) 부근인 C 또는 D점에서 시작하여 CD를 연장한 선에 평행하게 로터(Rotor)의 원주 방향으로 성장하고 있다. 이러한 현상은 GE(General Electronics)사에서 제공한 고리 1~4호기 터빈에서도 자주 발생되고 있다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 재료와 시험편

본 실험에 사용한 재료는 원자력 발전소용 축류형 중

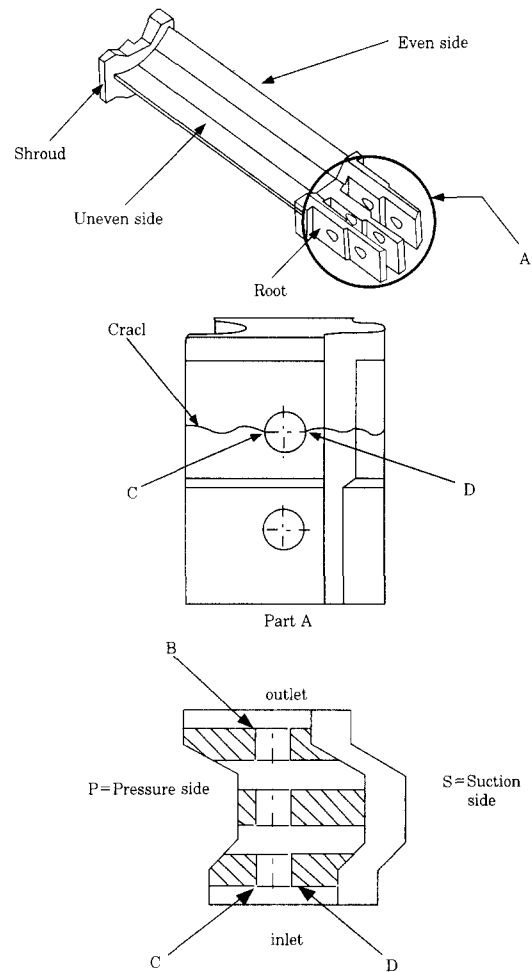


Fig. 1 Crack initiation and growth position at third stage of LP turbine

동 저압 터빈에서 사용되는 12% Cr강이다. Table 1은 12% Cr강의 화학적 조성을 나타낸 것이고 Table 2는 저압 터빈이 사용되는 저압 터빈 입구 온도인 252℃와 출구 온도인 33.3℃를 모의한 12% Cr강의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 테이블에서 252℃의 연신율은 20℃의 경우보다 59%의 감소를 보이고 있으며 인장 시험편의 파단면이 작용하중에 대하여 거의 수직인 상태를 이루고 있다. 이러한 결과는 12% Cr강이 터빈 블레이드의 사용 온도영역인 252℃에서 취화된다는 것을 나타내고 있다.

피로시험편의 재료는 파손된 저압 터빈 블레이드의 건전부에서 채취하였으며 Fig. 2에 형상과 치수를 각각 나타내었다<sup>8)</sup>.

Table 1 Chemical composition of 12% Cr steel(wt.%)

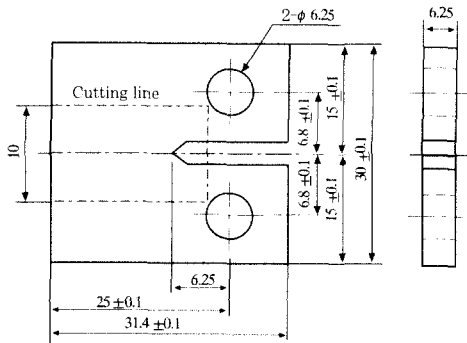
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	P	S
0.21	0.50	0.55	0.55	12.0	1.0	0.3	0.025	0.02

**Table 2** Mechanical properties of 12% Cr steel

Temp. (°C)	Yield strength $\sigma_{ys}$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_{ts}$ (MPa)	Elongation $\epsilon_r$ (%)	Young's modulus $E$ (GPa)
20	670	790	26.4	203
252	596	745	10.8	202

3.2 피로시험

파손해석을 수행하기 위한 피로시험은 정격하중이 49 kN인 유압 서보식 피로시험기 (Shimadzu : EHF-EB5-10L)를 이용하였다. 시험은 일정하중 진폭방법으로 실시되었으며 반복속도는 터빈의 회전수가 1800 rpm을 고려하여 30 Hz로 설정하였다<sup>9)</sup>. 또한, 터빈 블레이드는 일정한 증기 압력에 의하여 하중진폭을 일정하게 유지하므로 ASTM E647-93에서



**Fig. 2** Geometry and dimension of CT specimen

제안하고 있는 일정하중진폭시험을 본 연구에서도 채용하였다. 파괴역학 파라미터로 사용하는 응력확대계수  $K$ 는 균열 길이  $a$  및 작용하중에 의하여 결정되며 다음 식으로 결정한다<sup>9)</sup>.

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} (0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (1)$$

단,  $\alpha = a/W$ ,  $a$  : 균열길이,  $W$  : 시험편 폭,  $B$  : 시험편 두께

3.3 파손 해석 실험

피로 파손된 터빈 블레이드에 대한 파면해석을 수행하기 위하여 우선 주사형 전자현미경 (JEOL : JSM-35CF)을 1000배까지 사용하였다. 또한, 나노스케일 영역의 피로 파면은 원자간력 현미경 (PSIA model : AutoProbe CP Research)을 사용하였다. 파면에 대하여 주사하기 위하여 사용하는 콘택 울트라레버(Contact-ultralevers, ULCT-AUMT-AB)는 폭이 38  $\mu\text{m}$ , 길이

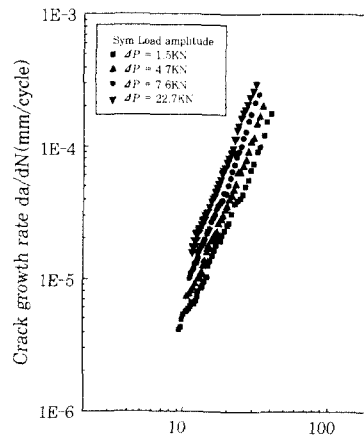
가 180  $\mu\text{m}$ , 두께가 1  $\mu\text{m}$ , 팁의 반경이 0.01  $\mu\text{m}$ 이며 시험편의 주사 영역을 결정하는 스캐너는 X축과 Y축으로 100  $\mu\text{m}$  정도로 움직일 수 있다. 또한, 원자간력 현미경으로 주사영역내의 표면 거칠기를 0.1 nm의 정밀도로서 측정하여 파괴역학적 파라미터와의 상관 관계도 고찰하였다<sup>10)</sup>.

4. 실험결과 및 고찰

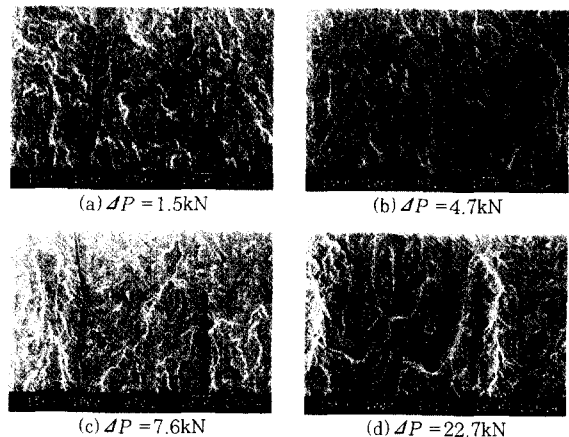
4.1 피로균열성장특성과 파면

Fig. 3은 12% Cr강의 피로균열성장속도와 응력 확대계수범위의 관계를 나타낸 것이다. 균열성장속도는 동일 응력확대계수에 대하여 하중진폭이 증가할수록 균열성장속도가 증가하고 있어 본 재료가 하중진폭의 영향을 현저히 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 주사형 전자현미경을 이용하여 동일 응력 확대계수범위 15 MPa $\sqrt{\text{m}}$ 에 대한 각 하중진폭의 피로 파면을 각각 나타내었다.



**Fig. 3** Relationship between stress intensity factor range and crack growth rate



**Fig. 4** SEM fractographs of 12% Cr steel at  $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

사진에서 전형적인 연성 스트라이에이션(Ductile striation)은 나타나지 않고 하중 사이클에 대응하지 않는 스트라이에이션과 비슷한 경향을 보이는 미소 균열이 균열성장방향과 수직인 파면 깊이방향으로 반복적으로 형성되고 있다<sup>11)</sup>. 이러한 결과는 균열성장 방향과 그 수직방향으로 재료의 이방성이 존재하기 때문이라 생각된다.

Fig. 5은 응력확대계수범위에 대하여 모든 실험 조건에서 관찰한 미소균열간격을 나타낸 것이다. 측정할 수 있는 하중진폭은 4.7 kN까지이며 그 이상의 하중진폭에서는 미소균열의 간격을 측정할 수 있을 정도의 미소균열을 관찰할 수 없으므로 파면해석에 이용할 파라미터로서 미소균열간격은 부적당하다고 생각된다.

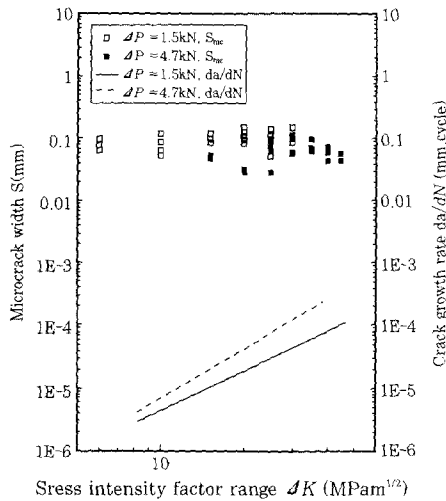


Fig. 5 Relationship between microcrack width and crack growth rate

Fig. 6는 피로 파손된 터빈 블레이드 루트(Root)에 대한 파면의 각 영역을 주사형 전자현미경으로 관찰한 것이다. 그림에서 Fig. 4에 나타나는 것처럼 미소균열의 분포는 상당히 불규칙적이면서 그 형태가 명확하지 않으므로 사용 응력 레벨이 고하중진폭에 해당하는 것으로 생각된다. 그러나 정량적 값으로 사용하기에는 어렵다.

Fig. 7은 동일 응력확대계수범위에 대한 파면을 원자간력 현미경으로 관찰한 것이다. 주사형 전자현미경으로는 파면해석에 유용한 자료를 확보하기 어려웠던 영역이 있으나 원자간력 현미경으로는 명확한 스트라이에이션을 관찰할 수 있다. 그러나 그림에서 원자간력 현미경으로 관찰한 스트라이에이션의 단면 특성은 하중진폭에 대한 의존성을 보이지 않는다.

최등<sup>12)</sup>이 수행한 Al 2017-T351에 대한 피로파면 관찰에서도 스트라이에이션이 응력비에 대한 의존성을 보이고 있지 않아 본 실험 조건과 비슷한 경향을

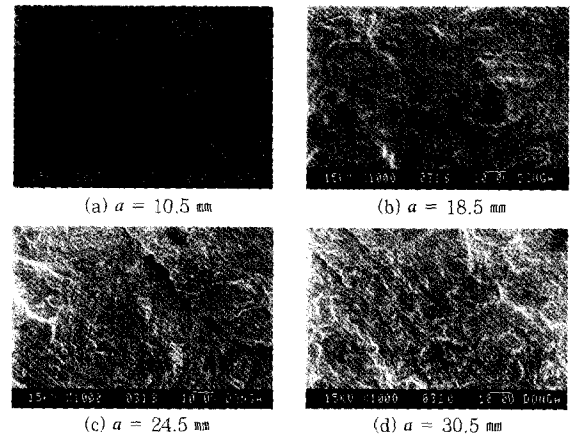


Fig. 6 SEM fractographs of fatigue fractured turbine blade(a : distance from center of pin hole)

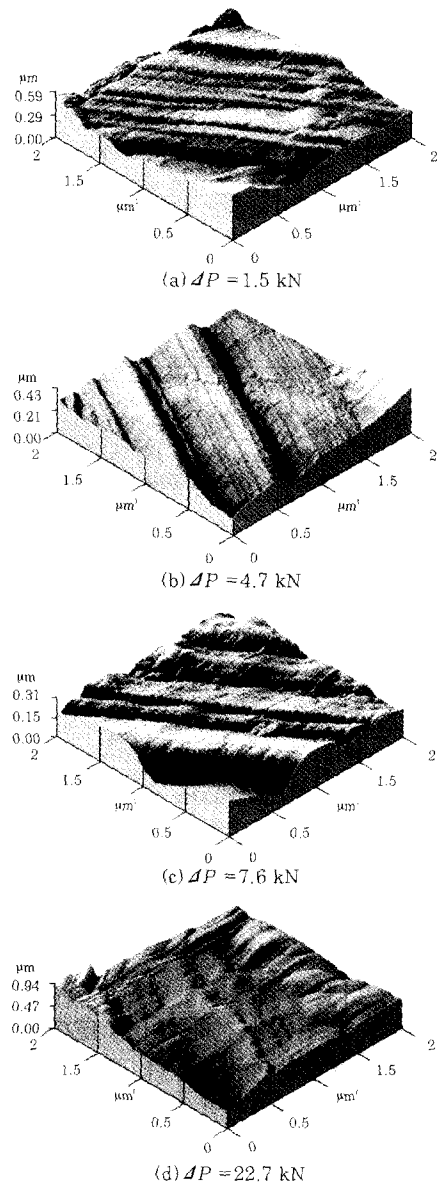


Fig. 7 AFM fractographs of fatigue fractured surface at  $\Delta K=15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

나타내고 있다 이러한 결과는 스트라이에이션이 재료 내부에 미시적으로 형성된 석출물등에 큰 영향을 받기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 응력확대계수 범위와 자승평균평방근 거칠기의 관계에 미치는 원자간력 현미경의 관찰 영역 (Sampling area)의 영향을 검토하기 위하여 관찰영역을 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ 로 설정하여 각 하중 진폭별로 나타낸 것이다. 자승평균평방근거칠기는 미소균열간격이나 스트라이에이션 간격처럼 응력확대계수범위와 하중진폭에 대한 의존성을 보이고 있지 않다. 이러한 결과에서 응력확대계 수범위와 같은 거시적 파괴역학 파라미터와 원자간력 현미경으로 측정된 미시적 파라미터 사이에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 상술의 문제를 해결하기 위해서 Fig. 9는 원자간력 현미경을 이용하여 각 응력확대계수범위에 대하여 균열성 장방향으로 250개 영역을 관찰하여 구한 표면거칠기 곡선을 하나의 거칠기 곡선으로 가정하여 구한 표면 거칠기를 나타낸 것이다.

Fig. 8과는 달리 대체적으로 응력확대계수범위의 증가에 따라 표면 거칠기는 증가하고 있다. 즉, 표면거칠기는 단일 주사영역의 경우, 원자 지름의 영역인 수십 nm정도로 원자와 원자 사이의변형에 영향을 받으나<sup>13)</sup> 다수의 주사영역을 이용하는 경우 거시적 슬립 밴드에 영향을 받음으로서 후자가 전자에 비하여 역학적 파라미터인 응력확대계수범위에 대하여 더 좋은 상관관계를 보이는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 단일 주사영역을 이용하는 경우보다 다중 주사영역을 이용하는 것이 파면 해석에 훨씬 더 유리할 것으로 생각되어져 파손 해석 파라미터로 다중 주사영역을 이용하는 자승평균평방근거칠기를 터빈 블레이드의 부하 추정 파라미터로 가정한다.

또한, Fig. 9에서 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근거칠기 곡선의 기울기는 하중진폭에 관계없이 거의 일정하고 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근 거칠기 곡선은 하중진폭이 증가함에 따라 자승평균평방근거칠기 축의 양의 방향으로 평행이동하고 있다. 따라서 터빈 블레이드의 부하를 추정하는 데 있어 상술의 특성과 피로균열성장이 하한계 응력확대계수범위  $\Delta K_{th}$  이상의 하중이 부재에 부하되면 시작되지는 특성을 이용하기로 한다. 터빈 블레이드의 하한계 응력확대계수범위는 스테인레스강의 하한계응력확대계수범위가 4.1~6.0MPa $\sqrt{\text{m}}$  임을 고려하여<sup>14)</sup> 그 값의 평균값인 5.0MPa $\sqrt{\text{m}}$  로 가정한다.

Fig. 10은 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근거칠기를 각 하중진폭에 대하여 나타낸 것으로 점선은 파손된 터빈 블레이드 핀 구멍 부분의 자승평균평방근거칠기 분포를 표시한 것이다.

응력확대계수범위가 5.0MPa $\sqrt{\text{m}}$  인 지점과 파손된 터빈 블레이드 핀 구멍의 시작점에서의 자승평균평방근거칠기와 교차하는 지점이 피로균열이 전파되기 시작하는 지점으로 그림에서 A지점이 된다. A지점에서 각 피로시험에서 구한 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근거칠기의 평균 기울기를 그린 뒤 파손된 터빈 블레이드 핀 구멍의 마지막 지점에서의 자승평균평방근거칠기와 만나는 지점이 B지점으로 터빈 블레이드 핀 구멍에 부하된 최대 응력확대계수범위가 27.8MPa $\sqrt{\text{m}}$  가 됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 각 하중진폭에 대하여 Fig. 10의 평균자승평방근 축 절편을 각각 나타낸 것으로 직선 회귀시킨 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = A \times R_q + B \tag{2}$$

단,  $A = 5.589$ ,  $B = 23.3$

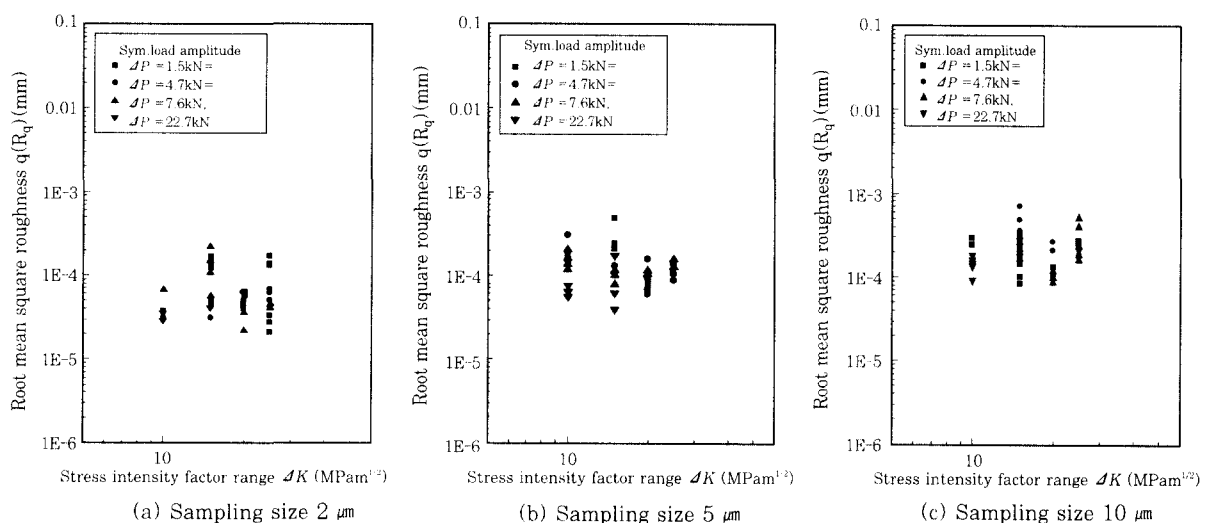


Fig. 8 Relationship between stress intensity factor range and root mean square roughness

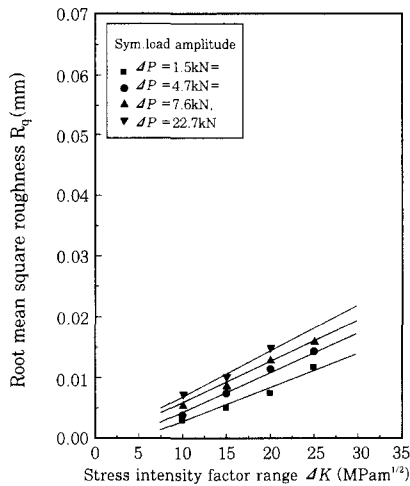


Fig. 9 Relationship between  $da/dN$  and  $R_q$  in 12% Cr steel

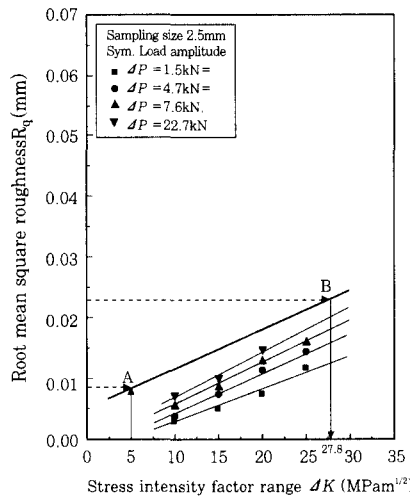


Fig. 10 Relationship between  $R_q$  and gradient of  $R_q$  to  $\Delta K$

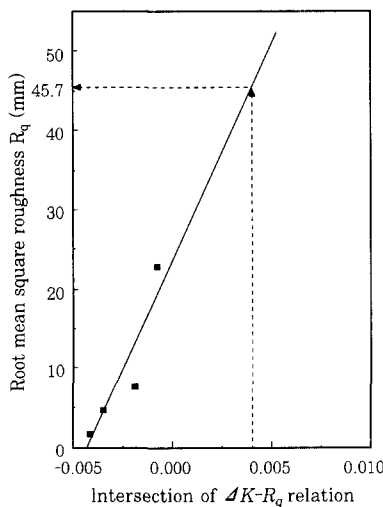


Fig. 11 Prediction of in-service load amplitude using intersection point of  $\Delta K-R_q$  relation

$\Delta P$  : 하중진폭(kN),

$R_q$  : 자승평균평방근거칠기(mm)

따라서 터빈 블레이드에 부하된 하중진폭은 Fig. 9에서 터빈 블레이드에 대한 자승평균평방근거칠기 곡선의 수직 축 절편 0.004를 식 (2)에 대입하면 얻을 수 있으며 45.7 kN이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소용 저압 터빈 블레이드용 재료인 12% Cr강에 대한 피로균열성장실험을 수행하여 응력확대계수범위와 원자간력 현미경으로 측정된 자승평균평방근거칠기의 관계에서 터빈 블레이드에 부하된 하중조건을 예측하였다.

- (1) 터빈 블레이드에 형성된 스트라이에이션은 SEM으로는 관찰하기 어려웠으나 원자간력 현미경을 이용하면 미세한 스트라이에이션을 관찰할 수 있다.
- (2) AFM으로 측정된 스트라이에이션 간격은 응력확대계수범위에 대하여 선형적 관계를 보이고 있지 않다.
- (3) 원자간력 현미경을 이용하여 측정된 자승평균평방근거칠기는 응력확대계수범위와 좋은 선형 관계를 가지고 있으므로 파손된 터빈 블레이드의 하중조건을 예측할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. 박종포, "스팀 터빈 블레이드의 개요 및 설계", 기계저널, 제38권 제8호(1998), 44~49
2. 전재영, "파괴 및 피로해석을 통한 터어빈 로우터의 운전수명 계산 (1)", 대한기계학회논문집, 제11권 제4호(1987), 537~548
3. P. J. Walker and J A Hesketh, "Design of low-reaction steam turbine blades", Proc Instn Mech Engrs, Vol 213, Part C(1999), 157~174
4. H. C. Teichman, "Analytical and experimental simulation of fan blade behavior and damage under bird impact". Journal of engineering for gas turbines and power, Vol. 113(1991), 582~594
5. 박성일, 홍재완, 노영길, "Scanning probe microscopy", PSIA(2000), 3~15
6. Komai, K., Minoshima, K. and Itoh, M., "Nanosopic In-situ Visual ization of stress corrosion crack Growth by STM/AFM", J. Metal, Vol. 43, No.486(1994), 336~342
7. 한전기공주식회사, "제3회 터빈 기술 세미나", 한전기공(1999), 141~162.
8. ASTM Standard E647-93, "Standard test method for

- measurement of fatigue crack growth rates", ASTM standards Sec.3, Vol.03.01(1994), 591~596
9. Shimadzu, "EHF-EB5-10L形 造作説明書", 鳥津製作所 (1993), 54~55
  10. 박준호, "정밀측정시스템공학", 야정문화사 (1996), 257~286
  11. 小寺澤, 森, "クリープき裂傳ばを支配する破壊力學的因子", 材料, 第26卷, 第289號(1977), 948~954
  12. 최성중, 권재도, H. Ishi "원자력 현미경(AFM)에 의한 알루미늄 합금의 피로스트라이에이션 관찰", 대한기계학회논문집, 제24권, 제4호(2000), 955~962
  13. Fujihara, M., Kondo, Y. and Hattori, T., "Quantitative evaluation of applied stress by surface roughness for fatigue fracture", J. Metal, Vol.40, No.453(1990), 712~717
  14. H.O.Fuchs, R.I.Stephens, "Metal fatigue in engineering", Willy-inter science publication (1980), 301.