

AFM을 이용한 발전소용 저압 터빈 블레이드의 파손해석에 관한 연구

홍순혁*, 최우성*, 문성준**, 조석수**, 주원식***

A Study on Failure Analysis of Low Pressure Turbine Blade in Nuclear Plant using AFM

Soon Hyeok Hong*, Woo Sung Choi*, Sung Jun Moon**, Seok Swoo Cho**, and Won Sik Joo***

ABSTRACT

Turbine blade in nuclear plant is subject to cyclic bending fatigue by high steam pressure. Especially, fatigue fracture is caused by low stress below yielding stress. Photograph by SEM doesn't have striation but photograph by AFM has striation on the fatigue fractured surface of 12% Cr steel used in turbine blade. Surface roughness R_q has the linear relation with respect to stress intensity factor range ΔK and is increased linearly according to load amplitude ΔP . In this study loading condition applied to turbine blade is predicted by the relation between the gradient of R_q to ΔK and load amplitude ΔP .

Key Words : AFM(Atomic force microscope : 원자간력 현미경), SEM(Scanning electronic microscope : 주사형 전자현미경), Nanofractography(나노프랙토그래피), Turbine blade(터빈 블레이드), R_q roughness (자승평균평방근거칠기), Stress intensity factor range(응력확대계수범위).

1. 서론

최근 전력 수요는 생활수준의 향상과 산업 생산 설비의 꾸준한 확대에 의하여 매년 증가하고 있다. 1999년 현재 국내 전력 생산량의 43%를 담당하고 있는 원자력 발전소는 해마다 노후화 되고 있다.

원자력 발전소에서 발생하는 사고는 해마다 감소되지 않아 계획예방정비가 훨씬 더 필요할 뿐만 아니라 파손된 원자력 관련 기기에 대한 공학적 해석이 요구되고 있다.^{(1)~(2)}

특히, 터빈 블레이드의 파손은 사고 파급 확대와 터빈의 출력감소와 효율저하 및 비정기적인 수

리기간의 발생으로 부대 비용이 증가되나 그 설계나 제조에 있어 많은 기술적 발전을 이루었다. 그러나 사용 수량이 많기 때문에 파손 사고 건수가 다른 부품에 비하여 많다. 터빈 블레이드의 파손은 피로파괴, 부식피로, 응력부식, 침식, 제작 및 조립 불량, 운전과실, 설계상 문제등 다양한 원인이 존재하고 있으나 이러한 원인 중에서도 피로에 의한 사고가 대부분을 차지하고 있다.

피로파손된 부품은 파면에 일정 간격의 스트라이에이션이 형성되기 때문에 주사형 전자현미경(SEM)을 이용하면 파면의 종류나 부하 하중을 추정할 수 있다.

2001년 1월 26일 접수

* 동아대학교 대학원

** 삼척대학교 기계·정밀기계·자동차공학부

*** 동아대학교 기계·산업 시스템공학부

그러나 파손 재료가 취성 재료이거나 균열성장 속도범위가 파손 해석 범위를 벗어나는 경우 파면에서 스트라이에이션을 관찰하기 어렵다. 이러한 경우 파손기구를 구명하기 위해서는 피로 균열의 생성과 성장과정을 3차원 공간상에서 고배율로 관찰할 수 있는 나노프랙토그래피(Nano fractography)의 필요성이 요구되고 있다.

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. 재료강도평가분야의 경우 균열선단 부근의 소성 변형에 따른 전위의 방출 과정을 관찰함으로써 미시적 변형 기구를 구명하였고(3) Masuda등(4)은 STM을 이용하여 부식 피로 피트의 발생과 성장 과정을 nm로 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소에 설치 가동 중인 비틀림 마운트형(Torsion-mounted type) 터빈 블레이드(Turbine blade)의 파손원인을 구명하고자 저압 터빈 블레이드 실기 부품 재료인 12% Cr강을 사용하여 응력확대계수 범위와 스트라이에이션 간격 및 파면의 표면거칠기 관계를 원자간력 현미경으로 검토한 뒤 터빈블레이드에 부하되는 하중이력을 구하였다.

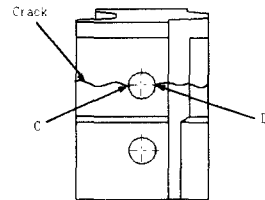
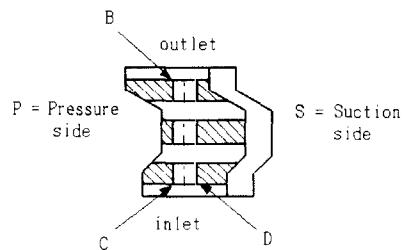
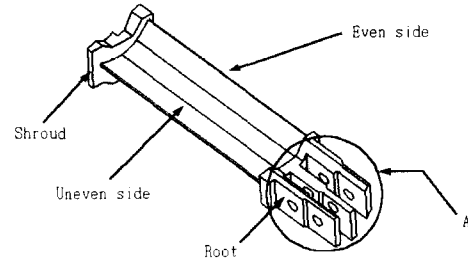
2. 저압 터빈 블레이드의 파손 사고

본 연구에서 고려하는 원자력 발전소용 저압 터빈 3단은 표준형인 비틀림 마운트형 블레이드를 사용하고 있다. Table 1은 상술의 저압 터빈 3단에 관한 일반적 제원을 나타낸 것으로 이것을 터빈 블레이드의 파손해석과 유한요소해석의 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 (EA)	fixed wing (EA)
1800	252	0.827	33.3	0.0051	143	36×2

Fig. 1은 블레이드 전방 루트 부근에서의 균열 발생과 성장 위치를 나타낸 것으로 균열은 응력 집중이 높은 상측 핀 구멍(Pin hole) 부근인 C 또는 D 점에서 시작하여 CD를 연장한 선에 평행하게 로터 (Rotor)의 원주 방향으로 성장하고 있다. 이러한 현상은 유사한 형상의 블레이드에서도 자주 발생되고 있다.⁽⁵⁾



Part A

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

3. 실험 장치 및 방법

3.1 재료와 시험편

본 실험에 사용한 재료는 원자력 발전소용 축류형 증동 저압 터빈에서 사용되는 12% Cr강이다.

Table 2는 12% Cr강의 화학적 조성을 나타낸 것이고 Table 3은 저압 터빈이 사용되는 저압 터빈 입구 온도인 252℃와 출구 온도인 33.3℃를 모의한 12% Cr강의 인장시험 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 파손된 저압 터빈 블레이드의 건전부에서 채취하여 제작한 피로시험편의 형상과 치수를 나타내었다.⁽⁶⁾

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 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

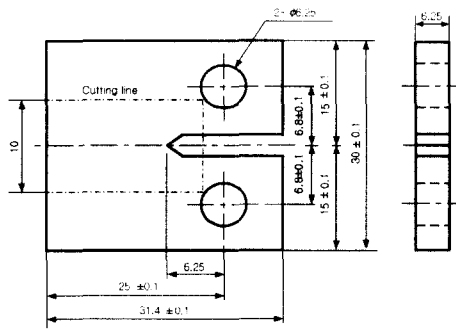


Fig. 2 Geometry and dimension of CT specimen (mm)

3.2 피로시험

파손해석을 수행하기 위한 피로시험은 정격하중이 49kN인 유압 서보식 피로시험기 (Shimadzu : EHF-EB5-10L)를 이용하였다. 시험은 일정하중범위 방법으로 실시되었으며 반복속도는 터빈의 회전수가 1800rpm을 고려하여 30Hz로 설정하였다.⁽⁷⁾ 또한, ASTM E647-93에서 제안하고 있는 일정하중범위 시험의 경우 모든 시험조건에 대하여 하중폭은 일정한 상태로 유지하면서 응력비의 영향을 평가하는 것이 일반적인 피로균열성장시험법이다.⁽⁶⁾ 그러

나 본 연구의 경우 파손해석을 수행하여야 하므로 터빈 블레이드에 가해진 평균응력과 응력진폭을 구하는 것이 대단히 중요하다. 터빈 블레이드의 편구멍에서 발생하는 평균응력은 로터의 회전속도에 의한 원심력과 비틀림 마운트에 의한 비틀림 변위에 의하여 발생되며 이에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 3.8 MPa이었다.⁽⁸⁾ 따라서 최소공칭응력을 기초로 하는 최소하중을 항상 일정하게 한 뒤 최대하중을 변화시킴으로서 파손해석상 요구되는 하중 조건을 구할 수 있다. 즉, 3.8 MPa을 최소공칭응력으로 하는 편진하중폭을 각각, 1.5kN, 4.7kN, 7.6kN, 22.7kN의 네 단계로 나누어 피로시험을 실시하였다. 피로균열길이 a는 이동식 망원 현미경을 이용하여 측정하였다. 파괴역학 파라미터로 사용하는 응력확대계수 K는 균열 길이 a 및 작용하중에 의하여 결정되며 다음 식으로 결정한다.⁽⁶⁾

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

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

여기서, $a = a/W$

a : 균열길이, W : 시험편폭, B : 시험편 두께

3.3 원자간력 현미경

Fig. 3은 원자간력 현미경의 형상과 측정원리를 나타낸 것이다. 재료 표면의 형상에 따라 외팔보 형식의 작은 막대 끝 부분에 달려 있는 탐침과 재료 표면의 원자 사이에 발생하는 힘에 의하여 외팔보가 아래나 위로 휘게 되는 데 이때 레이저 광선이 외팔보 윗면에서 반사되는 각도를 포토다이오드 (Photodiode)로 측정함으로써 재료 표면의 굴곡 정도를 알아 낼 수 있다.

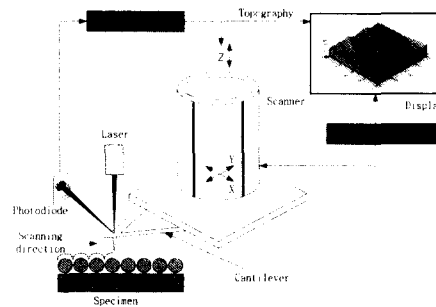
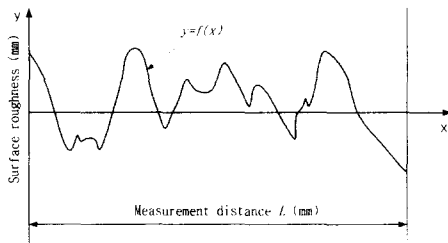


Fig. 3 Schematic diagram of atomic force microscope

3.4 파손 해석 실험

피로 파손된 터빈 블레이드에 대한 파면해석을 수행하기 위하여 일차적으로 주사형 전자현미경(JEOL : JSM-35CF)을 1000배까지 사용하였다. 또한, 나노스케일 영역의 피로 파면은 원자간력 현미경(PsIA model : AutoProbe CP Research)을 사용하였다. 균열성장방향 및 시험편 두께방향을 따라 스트라이에이션을 반복적으로 측정하여 3차원 영상의 스트라이에이션 간격과 응력확대계수범위의 관계를 검토하였다. 또한, 원자간력 현미경으로 주사영역내의 표면 거칠기를 0.1nm의 정밀도로 측정하여 파괴역학적 파라미터와의 상관관계도 고찰하였다. Fig. 4는 원자간력 현미경에서 관찰할 수 있는 거칠기 곡선에서 자승평균평방근거칠기 R_q 를 구하는 방법을 나타낸 것이다.⁽⁹⁾



$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L f(x)^2 dx}$$

Fig. 4 Schematic representation of various surface roughness parameter for fracture surface

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로균열성장특성과 파면

Fig. 5는 12% Cr강의 피로균열성장속도와 응력확대계수범위의 관계를 나타낸 것이다. 균열성장속도는 동일 응력확대계수에 대하여 편진하중폭이 증가할수록 균열성장속도는 증가하고 있다. 이러한 결과는 본 실험조건이 최초의 최소공칭응력에서 계산된 최소하중을 일정하게 한 뒤 최대하중을 증가시켜 편진하중폭을 증가시키므로서 평균응력과 응력진폭을 동시에 증가시켰기 때문이다.

Fig. 6은 주사형 전자현미경을 이용하여 동일 하중폭 7.6kN에 대한 각 응력확대계수범위의 피로 파면을 각각 나타내었다. 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.⁽¹⁰⁾ 즉, 12% Cr강의 피로균열은 균열선단이 균열성장방향의 수직방향으로도 분리된 후 수평 방향으로의 균열도 발생하여 성장되고 있다.

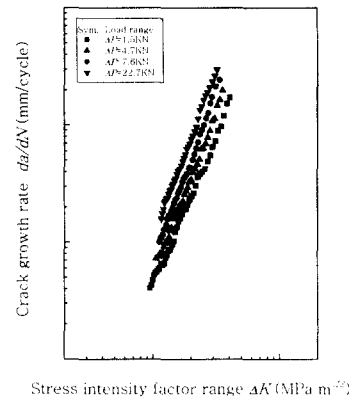
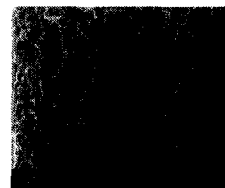
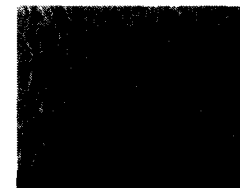


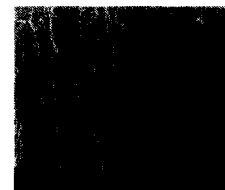
Fig. 5 Relation between stress intensity factor range and crack growth rate



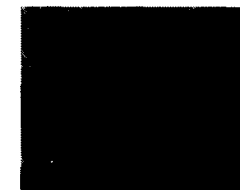
(a) $\Delta K = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(b) $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(c) $\Delta K = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$



(d) $\Delta K = 25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 6 SEM fractographs of 12% Cr steel at $\Delta P = 7.6 \text{ kN}$

Fig. 7은 각 하중폭에 대하여 응력확대계수범위와 미소균열간격의 관계를 심볼로, 균열성장속도의 관계를 실선으로 각각 나타낸 것이다. 동일 응력확대계수범위에 대하여 미소균열간격은 균열성장속도에 비하여 최소 133배에서 최대 16666배 정도의 차이를 나타내고 있으므로 미소균열은 균열성장예 따라 간헐적으로 형성되고 있음을 알 수 있다. 따라서 미소균열간격을 이용하여 파면해석을 수행하기에는 부적당하다고 생각된다.

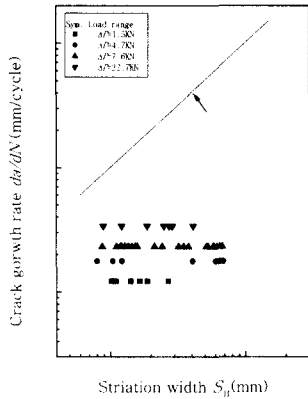


Fig. 7 Relation between 3-dimensional striation width and crack growth rate at $\Delta K = 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 8는 피로 파손된 터빈 블레이드의 핀 구멍을 원점으로 하는 각 파면 영역을 주사형 전자현미경으로 관찰한 것이다. 그림에서 Fig. 6에서 나타나는 것처럼 미소균열의 분포는 상당히 불규칙적이면서 그 형태가 명확하지 않으므로 사용 응력 레벨이 고하중폭에 해당하는 것으로 생각된다. 그러나 정량적 값으로 추정하기에는 어렵다. 따라서 본 연구에서 사용하는 주사형 전자현미경으로는 저압터빈 블레이드에 대한 파손해석을 수행할 수 없음을 알 수 있다. Fig. 9는 동일하중폭에 대한 파면을 원자간력 현미경으로 관찰한 것이다. 주사형 전자현미경으로는 파면해석에 유용한 자료를 확보하기 어려웠던 영역임에도 불구하고 원자간력 현미경으로는 명확한 스트라이에이션을 관찰할 수 있다. 즉, 주사형 현미경으로는 하나의 플래토(Plateau)였던 영역에 미세한 스트라이에이션이 관찰됨을 알 수 있다. 따라서 스트라이에이션을 발견하기 어렵다는 취성 재료의 경우에도 원자간력 현미경을 이용하면 국부

적 스트라이에이션이 형성되고 있음을 관찰할 수 있다. 그러나 그림에서 원자간력 현미경으로 관찰한 스트라이에이션의 단면 특성은 하중폭에 대한 의존성을 보이지 않는다.

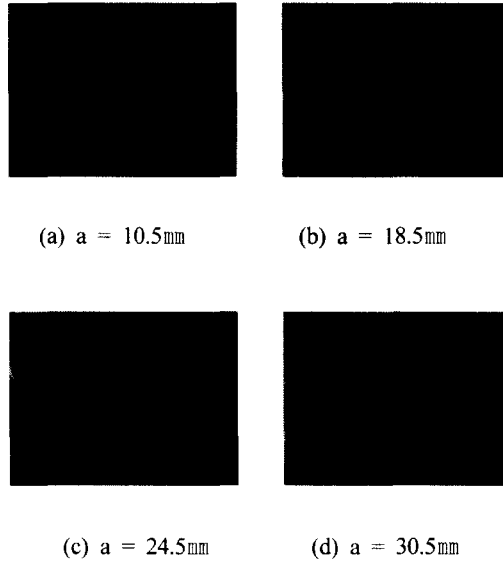
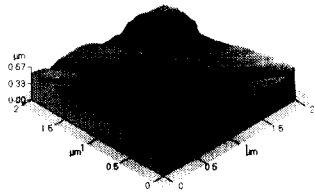
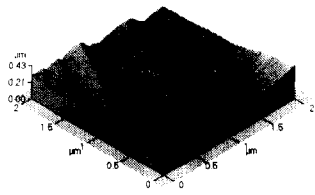


Fig. 8 Photographs around pin hole of fractured turbine blade by SEM (a : distance from fractured turbine blade)

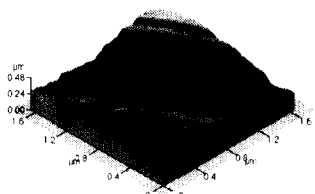
Fig. 10은 원자간력 현미경으로 관찰한 스트라이에이션 간격과 균열성장속도를 응력확대계수범위에 대하여 나타낸 것이다. 스트라이에이션 간격은 응력확대계수범위와 하중폭에 관계없이 상당히 분산되고 있다. 이러한 결과는 연성 스트라이에이션이 결정 방위에 랜덤하게 의존하는 반면 취성 피로 파면은 결정 방위보다는 하중 방향에 상당히 민감하여 균열성장방향으로 스트라이에이션이 형성되나 동시에 개수가 상당히 적고 분포도 불규칙적이기 때문이라 생각된다. 또한, 스트라이에이션 간격은 균열성장속도보다 대략 최고 10배 이상의 적은 값을 나타내고 있다. 따라서 원자간력 현미경으로 측정된 스트라이에이션 간격으로 저압 터빈 블레이드에 부하된 하중의 크기를 예측할 수 없음을 알 수 있다. 상술의 문제를 해결하기 위해서 Fig. 11은 원자간력 현미경을 이용하여 각 응력확대계수범위 10, 15, 20, 25 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 대하여 균열성장



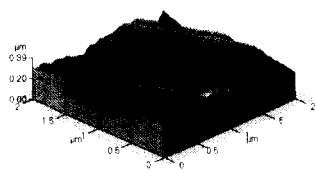
(a) $\Delta K = 10 \text{MPa}\sqrt{m}$



(b) $\Delta K = 15 \text{MPa}\sqrt{m}$



(c) $\Delta K = 20 \text{MPa}\sqrt{m}$



(d) $\Delta K = 25 \text{MPa}\sqrt{m}$

Fig. 9 Photographs of fatigue fractured surface at $\Delta P=7.6 \text{kN}$ by AFM

방향으로 250개 영역을 관찰하여 구한 표면거칠기 곡선을 하나의 거칠기 곡선으로 가정하여 구한 표면거칠기를 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 편 구

멍으로부터의 길이에 대한 자승평균평방근거칠기 R_q 의 데이터를 최소자승법으로 회귀한 선이며 점선은 CT 시험편으로 피로실험하여 구한 자승평균평방근거칠기 분포를 나타낸 것이다. 터빈 블레이드의 파손부분에서 구한 자승평균평방근거칠기의 분포는 CT 시험편으로 피로실험하여 구한 구한 자승평균평방근거칠기 범위에 존재하고 있다.

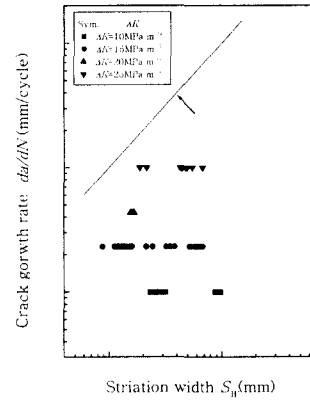


Fig. 10 Relation between 3-dimensional striation width and crack growth rate at $\Delta P=7.6 \text{kN}$

또한, Fig. 11에서 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근거칠기 곡선의 기울기는 하중폭에 관계없이 거의 일정하고 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근거칠기 곡선은 하중폭이 증가함에 따라 자승평균평방근거칠기 축의 양의 방향으로 평행이동하고 있다.

따라서 터빈 블레이드의 부하를 추정하는 데 있어 상술의 특성과 피로균열성장이 하한계응력확대계수범위 ΔK_{th} 이상의 하중이 부재에 부하되면 시작된다는 특성을 이용하기로 한다. 터빈 블레이드의 하한계응력확대계수범위는 스테인레스강의 하한계응력확대계수범위가 $4.1 \sim 6.0 \text{MPa}\sqrt{m}$ 임을 고려하여⁽¹¹⁾ 그 값의 평균값인 $5.0 \text{MPa}\sqrt{m}$ 로 가정한다.

Fig. 12는 응력확대계수범위에 대한 자승평균평방근거칠기를 각 하중폭에 대하여 나타낸 것으로 점선은 파손된 터빈 블레이드 핀 구멍 부분의 자승평균평방근거칠기 분포를 표시한 것이다. A지점은 응력확대계수범위가 $5.0 \text{MPa}\sqrt{m}$ 인 지점과 파손된 터빈 블레이드 핀 구멍의 시작점에서의 자승평균평

방근거칠기와 교차하는 지점을 나타낸 것으로 본 연구에서 피로균열의 시작점으로 가정한 지점이다. 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 최대응력확대계수범위가 27.8 MPa√m가 됨을 알 수 있다.

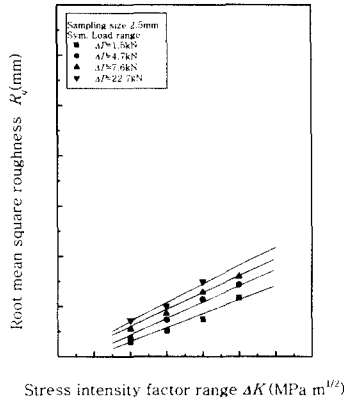


Fig. 11 Relation between ΔK and R_q in 12% Cr steel

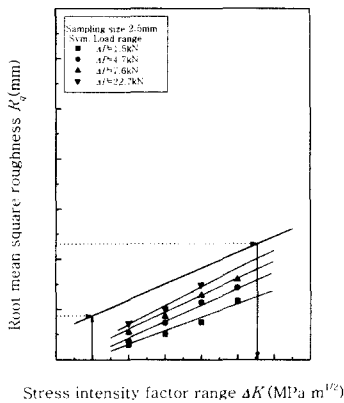


Fig. 12 Relation between R_q and gradient of R_q to ΔK

Fig. 13은 각 하중폭에 대하여 Fig. 12의 자승평균평방근거칠기 축 절편을 각각 나타낸 것으로 직선 회귀시킨 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = 5589 \times R_q + 23.3 \quad (2)$$

따라서 터빈 블레이드에 부하된 하중폭은 Fig. 11에서 터빈 블레이드에 대한 자승평균평방근거칠기 곡선의 수직 축 절편 0.004를 식 (2)에 대입하면 얻을 수 있으며 45.7kN이다.

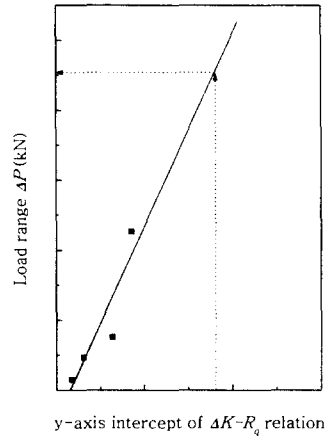


Fig. 13 Prediction of in-service load range using y-axis intercept of $\Delta K - R_q$ diagram

5. 결론

본 연구에서는 원자력 발전소용 저압 터빈에서 사용하는 비틀림 마운트형 터빈 블레이드의 파손원인을 구명하고자 저압 터빈 블레이드용 재료인 12% Cr강에 대한 피로균열성장실험을 수행하여 응력확대계수범위와 원자간력 현미경으로 측정된 자승평균평방근거칠기의 관계에서 터빈 블레이드에 부하된 하중조건을 예측하였다.

- 1) 취성 스트라이에이션은 주사형 전자 현미경으로 관찰하기 어려웠으나 원자간력 현미경을 이용하면 작은 반복슬립대에 의한 미세한 스트라이에이션을 관찰할 수 있다.
- 2) 원자간력 현미경으로 추정된 취성스트라이에이션 간격과 응력확대계수범위 사이에는 선형적 관계가 성립하지 않고 있다.
- 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, “스텝터빈 블레이드의 개요 및 설계,” 기계저널, 제38권, 제8호, pp. 44~49, 1998.
2. 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, pp. 582~594, 1991.
3. 박성일, 홍재완, 노영길, “Scanning probe microscopy,” PSIA, pp. 3~15, 2000.
4. Masuda, H., Nagashima, N. and Matsuoka, S., “In-situ observation on metal surface in aqueous solutions with electrochemical STM,” JSME, Vol.57, pp. 2270~2277, 1991.
5. 한전기공주식회사, “제3회 터빈 기술 세미나, 한전기공(주),” pp. 141~162, 1999.
6. ASTM Standard E647-93, “Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates,” ASTM standards Sec.3, Vol. 03.01, pp. 591~596, 1994.
7. Shimadzu, “EHF-EB5-10L形 造作説明書,” 鳥津製作所, pp. 54~55, 1993.
8. 최우성 외 4인, “AFM과 유한요소법을 이용한 터빈 블레이드의 파손해석에 관한 연구,” 한국정밀공학회 2000년도 추계학술대회논문집, pp. 489~493, 2000.
9. 박준호, “정밀측정시스템공학,” 야정문화사, pp. 257~286, 1996.
10. 小寺澤, 森, “クリ-ブき裂傳ばを支配する破壊力學的因子,” 材料, 第26卷, 第289號, pp. 948~954, 1977.
11. H.O.Fuchs, R.I.Stephens, “Metal fatigue in engineering,” Willy-inter science publication, p. 301, 1980.