

AFM과 유한요소법을 이용한 터빈 블레이드의 파손해석에 관한 연구

최우성*, 이동우, 홍순혁(동아대 대학원)

조석수(삼척대 자동차공학과), 주원식(동아대 기계공학과)

A Study on Failure Analysis of Turbine Blade using AFM and FEM

W. S. Choi, D. W. Lee, S. H. Hong(Graduated school, DAU),

S. S. Cho(Auto. Eng. Dept., SCNU), W. S. Joo(Mech. Eng. Dept., DAU)

ABSTRACT

Turbine blade has trouble of cracking at root region. Fracture surface of blade root is surveyed by SEM and AFM to clear relation between fracture mechanical parameter and surface parameter (striation width and surface roughness). Service stress is predicted by maximum height roughness R_{max} on fractured surface and stress analysis on turbine blade. It is thought that turbine blade is fractured by abnormal condition such as incorrect fittings between pin and pin hole but isn't fractured by normal service conditions such as steam pressure, centrifugal force and torsional force.

Key Words : AFM(Atomic Force Microscope : 원자간력 현미경), Turbine Blade(터빈 블레이드), Maximum Height Roughness(최대높이거칠기) Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

99년 현재 국내 전력 생산량의 43%를 담당하고 있는 원자력 발전소는 해마다 노후화 되고 있다. 국내 발전소 중 가압경수로형(Pressurized water reactor : PWR)의 경우 저압 터빈에 비틀림 마운트형 블레이드를 사용하고 있으나 계획예방정비를 하는 동안 저압 터빈 1단과 2단 및 3단 블레이드에 대한 초음파 검사를 실시한 결과, 전방(Uneven side)과 후방(Even side) 루트(Root) 부근에서 1991년에 29개, 1998년에 24개의 블레이드가 파손되어졌다. 한편, 피로파손된 부품은 스트라이에이션이 파단면에 형성되지만 재료의 종류와 균열성장속도범위에 따라 파손 해석이 용이한 영역과 용이하지 않는 영역이 존재하게 된다. 이러한 경우 파손기구를 규명하기 위해서는 피로 균열의 생성과 성장과정을 공간적으로 고배율로 관찰하는 프랙토그래피(Fractography)가 필요하다.

SEM등에 의한 2차원 정량해석을 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 탐침 현미경(SPM)이 재료강도평가 분

야에 폭넓게 이용되고 있다.¹⁾

복잡한 형상을 가진 부품의 피로한도를 실험적으로 평가하는 것은 표준 피로 시험편을 이용한 것에 비하여 실험 장치가 복잡해지기 때문에 매우 어렵다. 서등²⁾은 서스펜션 너클에 대한 피로수명평가를 유한요소법으로 수행하여 최대주변형률과 표준 피로 시험편을 이용한 저사이클 피로시험에서 구한 피로 수명선도로 부품의 안전성을 평가하였으며 대체적으로 높은 신뢰성을 보이고 있다.

따라서 본 연구에서는 원자간력 현미경을 이용하여 저압 터빈 블레이드 실기 부품 재료인 12% Cr강에 대한 파손 해석을 수행하여 응력확대계수범위와 표면거칠기의 관계 및 CATIA Ver. 5.4를 이용한 터빈 블레이드에 대한 응력해석으로 부터 부하 응력과 파손 원인을 밝혔다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 재료와 시험편

본 실험에 사용한 재료는 ALSTOM사에서 제작하여 공급하는 원자력 발전소용 축류형 충동 저압 터빈에서 사용되는 12% Cr강이다. Table 1은 12% Cr

강의 화학적 조성을 나타낸 것이고 Table 2는 저압 터빈이 사용되는 온도를 모의한 12% Cr강의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 피로시험편은 ASTM E647-81³⁾의 형태인 표준 컴팩트 시험편(Compact-tension specimen)으로 제작하였고 Fig. 1에 각각 형상과 치수를 나타내었다. 원자간력 현미경으로 블레이드 파면을 관찰하기 위해서는 Fig. 1에 표시한 은선의 형태로 시험편을 가공하여 시험편이나 블레이드의 파면을 관찰하였다.

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)	Yielding 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	596.3	745.4	0.288	10.8	202

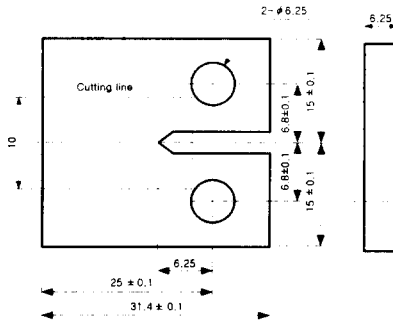


Fig. 1 Geometry and dimension of CT specimen

2.2 피로시험

파손해석을 수행하기 위한 피로시험은 정격하중이 49kN인 유압 서보식 피로시험기 (Shimadzu EHF-EB5-10L)를 이용하여 주파수 10Hz, 정현하중파형하에서 일정하중진폭방법으로 실시하였다. 또한, 응력비와 평균응력은 각각 0.42, 2.2MPa으로, 응력진폭은 각각 1.5kN, 4.7kN, 7.6kN, 22.7kN의 네 단계로 나누었다.

2.3 파손 해석 실험

Fig. 2는 원자간력 현미경을 도식적으로 나타낸 것이다. 원자간력 현미경(PSIA model : AutoProbe CP Research)모드는 절강재료에 대한 피로 파면을 관찰하는 경우 실험 재료 표면이 단단하여 원자간력에 미치는 표면 경도가 거의 영향을 미치지 못하므로

안정적 관찰 영상을 얻을 수 있는 접촉식(Contact-ultravers, ULCT-AUMT-AB)으로 설정한다.

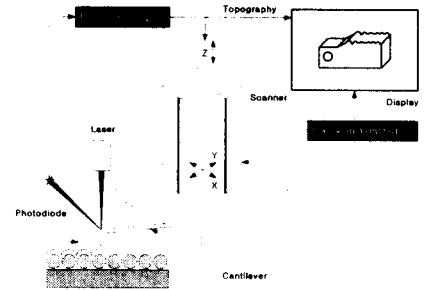


Fig. 2 Schematic of Atomic Force Microscope

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열성장특성과 파면

Fig. 3은 각 하중진폭 ΔP 에 따른 12% Cr강의 피로균열성장속도와 응력확대계수범위의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 동일 응력확대계수범위 $20 \text{ MPa}\sqrt{a}$ 에 대한 각 하중진폭의 피로파면을 나타내었다. 사진에서 전형적인 연성 스트라이에이션(Ductile striation)은 나타나지 않고 하중 사이클에 대응하지 않으면서 스트라이에이션과는 전혀 다른 미소균열⁴⁾이 실험조건에 관계없이 나타나고 있다.

Fig. 5는 피로 파손된 터빈 블레이드 루트(Root)에 대한 파면의 각 영역을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 나타나는 것처럼 미소 균열의 분포는 상당히 불규칙적이면서 그 형태가 명확하지 않아 정량적 값으로 계산하기는 어렵다.

Fig. 6은 미소균열 간격이 명확하지 않은 하중진폭에 대한 파면을 원자간력 현미경으로 관찰한 것이다. 전자현미경으로는 파면해석에 유용한 자료를 확보하기 어려웠던 영역임에도 불구하고 원자간력 현미경으로는 명확한 스트라이에이션을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 원자간력 현미경으로 관찰한 스트라이에이션 간격과 균열성장속도를 응력확대계수범위에 대하여 나타낸 것이다. 스트라이에이션 간격은 균열성장속도보다 대략 최대 10배 이상의 적은 값을 나타내고 있다. 또한, 원자간력 현미경으로 측정된 스트라이에이션 간격은 응력확대계수범위에 대하여 점차적으로 감소하는 경우도 있어 기존의 스트라이에이션과 응력확대계수범위의 관계와 반대의 경향을 나타내고 있어 스트라이에이션 폭과 응력확대계수범위의 관계를 정량화하는 것은 어렵다.

Fig. 8은 AFM을 이용하여 관찰하는 표면 거칠기의 관찰영역을 $2\mu\text{m}$ 로 설정하여 각 하중진폭별로 응

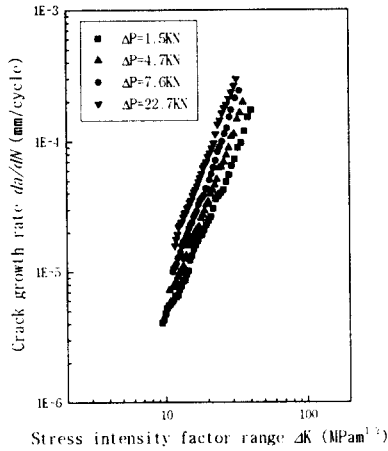
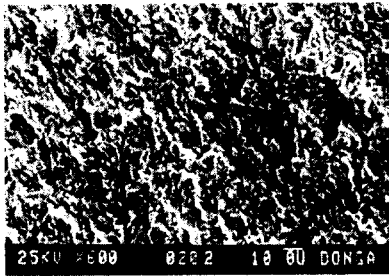
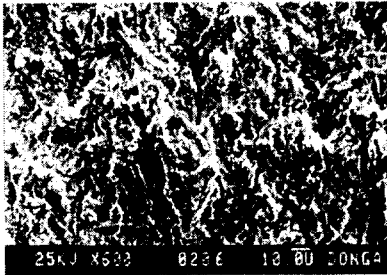


Fig. 3 Relation between stress intensity factor range ΔK and crack growth rate da/dN



(a) $\Delta P=1.5\text{kN}$, $\Delta K=20\text{MPa}\sqrt{m}$



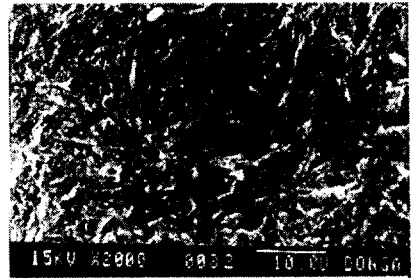
(b) $\Delta P=7.6\text{kN}$, $\Delta K=20\text{MPa}\sqrt{m}$

Fig. 4 SEM images of fracture surface under constant load amplitude fatigue crack growth test

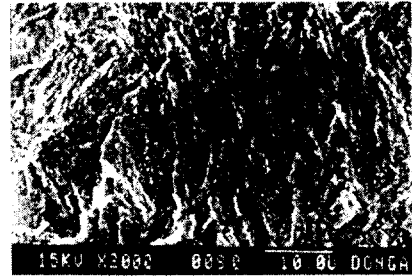
력확대계수범위에 따른 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 따라서 터빈 블레이드에 부하된 응력범위를 예측하기 위하여 응력확대계수범위 ΔK 와 최대높이 거칠기 R_{max} 의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$R_{max} = -4.26474 + 0.53868 \Delta K \quad (1)$$

Fig. 9는 피로 파손된 터빈 블레이드에 대한 최대 높이 거칠기를 루트의 핀 구멍에서의 길이로 나타낸 것이다. 최대높이 거칠기의 분포를 Fig. 8과 비교하여

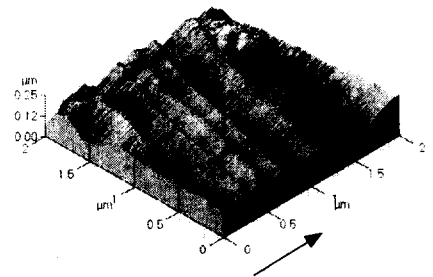


(a) $a=15\text{mm}$



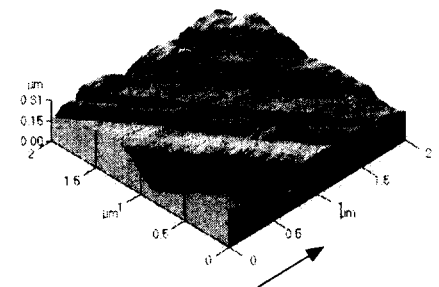
(b) $a=25\text{mm}$

Fig. 5 SEM images of fatigue fracture surface at turbine blade root



Crack growth direction

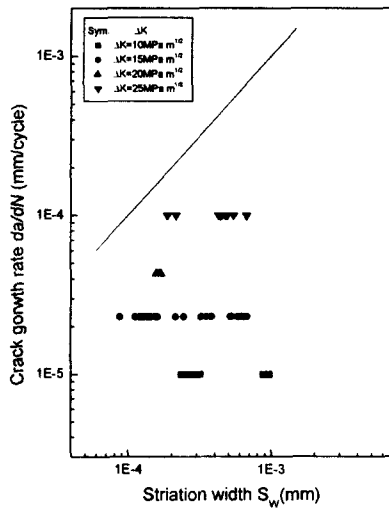
(a) $\Delta P=1.5\text{kN}$, $\Delta K=25\text{MPa}\sqrt{a}$



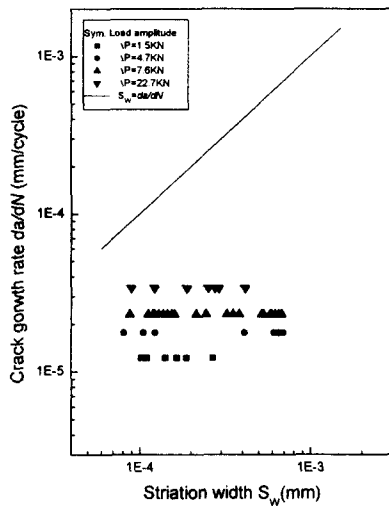
Crack growth direction

(b) $\Delta P=7.6\text{kN}$, $\Delta K=25\text{MPa}\sqrt{a}$

Fig. 6 AFM images of 3-dimensional fatigue crack growth pattern for 12% Cr steel



(a) ΔK



(b) ΔP

Fig. 7 Relation between striation width and crack growth rate

보 부하응력확대계수범위가 대략 $19 \text{ MPa}\sqrt{a}$ 에서 $25 \text{ MPa}\sqrt{a}$ 사이에 분포하고 있다. 따라서 터빈 블레이드의 루트영역을 CT 시험편으로 가정하면 그 균열 길이가 $6.5\text{mm} \sim 32.96\text{mm}$ 이므로 부하응력은 대략 59MPa 에서 175MPa 의 범위에 놓이므로 구조물의 안정성 측면에서 최대응력을 부하응력으로 가정하면 터빈 블레이드에 부하된 응력은 175MPa 로 예측할 수 있다.

3.2 터빈 블레이드에 대한 유한요소해석

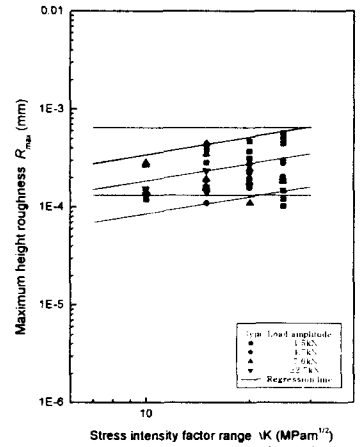


Fig. 8 Relation between stress intensity factor range and maximum height roughness

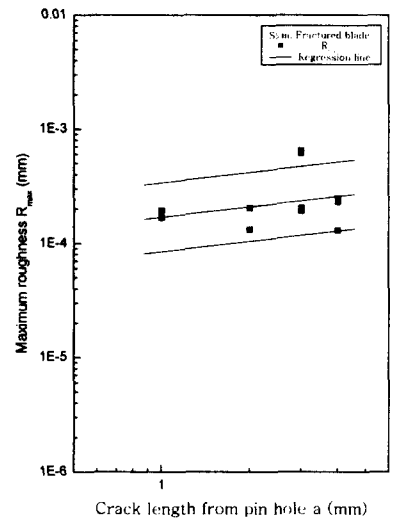


Fig. 9 Relation maximum roughness and crack length from pin hole at fracture surface of blade root

Fig. 10은 CATIA Ver 5.4의 Generative structure analysis에 있는 유한요소해석프로그램을 이용하여 터빈 블레이드에 대한 응력해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 핀 구멍에서의 최대 요소 응력은 Von-Mises 응력 기준으로 5.2MPa 이다. 또한, 터빈 블레이드에 대하여 작용하는 평균응력은 회전에 의한 원심력과 비틀림 마운트에 의한 비틀림 응력으로 2.2MPa 이다. 따라서 핀 구멍에 작용하는 최대 응력에 대한 최소응력의 비인 응력비는 0.42 이다. 이 값을 기준으로 12% Cr강에 대한 피로내구선도인 Soderberg 선도를 작성한 결과가 Fig. 11이다. 그림에

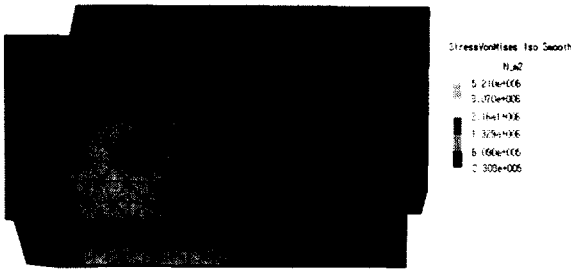


Fig. 10 Stress distribution around turbine blade root

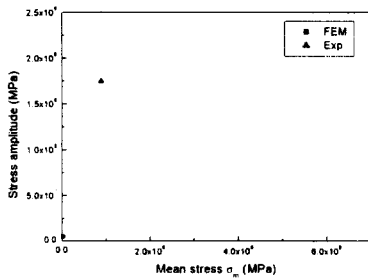


Fig.11 Sodberg's fatigue limit diagram

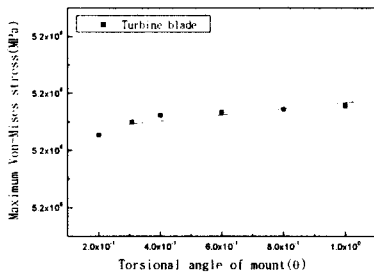


Fig.12 Relation between torsional angle and maximum Von-Mises stress at pin hole

서 알 수 있는 것처럼 응력해석에서 구한 최대 응력이 피로 한도 내구선도에 들어오고 있어 피로강도설계 관점에서는 전혀 문제가 없는 것으로 생각된다. 그러나 3.1절의 파손 해석에서 구한 실험 응력은 175MPa로 응력해석에서 구한 값과 34배의 차이를 보이고 있다. 또한 실험 응력에 의하여 구한 값을 Soderberg 선도에 표시한 결과를 살펴보면 피로한도 선도를 벗어나고 있다. 따라서 터빈 블레이드의 파손은 필연적임을 알 수 있다. 한편, 쉬라우드의 마운트를 로터에 조립할 때 발생하는 비틀림 각도가 파손 원인으로 제시되고 있다. 이에 대한 구체적 근거

를 마련하기 위하여 회전 속도에 의한 원심력과 증기압력을 부하한 상태에서 마운트의 비틀림 각도에 따른 핀 구멍의 최대 응력을 Fig. 12에 표시하였다. 그림에서 비틀림 각도가 증가함에 따라 핀 구멍의 최대 응력은 피로한도에 영향을 줄 만큼 변화되지 않으므로 비틀림 각도가 직접적 원인이 되지 못하는 것으로 생각된다. 그러나 본 연구를 통해 터빈 블레이드의 부가적 파손원인을 예상해 본다면 고온 환경이나 핀과 핀 구멍의 정확하지 않는 조립으로 인한 국부적 응력 집중 및 진동등을 들 수 있으며 차후에 이에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 가압경수로형 터빈에서 사용하는 비틀림 마운트형 터빈 블레이드의 파손원인을 구명하고자 응력확대계수범위와 원자간력 현미경으로 측정된 최대높이거칠기의 관계에서 터빈 블레이드에 부하된 응력을 추정하고 CATIA Ver. 5.4를 이용한 터빈 블레이드에 대한 응력해석을 수행함으로써 파손 원인을 밝혔다.

(1) 취성 스트라이에이션은 주사식 전자 현미경으로는 관찰하기 어려웠으나 원자간력 현미경을 이용하면 작은 반복슬립대에 의한 미세한 스트라이에이션을 관찰할 수 있었으나 응력확대계수범위와 취성 스트라이에이션 폭은 선형적 관계를 나타내지 못하고 있다.

(2) 원자간력 현미경을 이용하여 측정된 최대높이거칠기는 응력확대계수범위와 상당히 좋은 선형 관계를 가지고 있어 파손된 터빈 블레이드의 부하하중을 추정할 수 있다.

(3) 최대표면거칠기를 이용하여 핀 구멍에서 발생하는 최대실험응력은 유한요소법에 의하여 구한 설계 응력에 비하여 대략 34배 정도 증가하고 있어 부가적 파손원인이 존재하고 있다.

참고문헌

1. Minoshima, K., Endo, M., Miyawaki, T., and Komai, K., "Three-Dimensional Quantitative Analyses of Brittle Fracture Surfaces with SEM/STM/AFM", JSME, Vol.67, NO.2, pp.1587~1594, 1995.
2. 서상민, 김영진의 3인, "CAE 기법을 이용한 서스펜션 KNUCKLE의 피로수명 평가", 1993년도 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 373~378, 1993.

-이하 생략-