

터빈 운전 신뢰성 향상을 위한 응력부식균열 평가

강용호*, 송정일**

*창원대학교 기계공학과 대학원(gohkang@daum.net), **창원대학교 메카트로닉공학부
기계공학전공(jisong@changwon.ac.kr)

The Evaluation of the Stress Corrosion Cracking for Improvement of Reliability in Turbine Operation and Maintenance

Kang, Yong-ho*, Song, Jung-il**

*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Changwon National University(gohkang@daum.net),
**Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University(jisong@changwon.ac.kr)

Abstract

In case of low pressure steam turbine used in power plant, it was operated in wet steam and high stress condition. Therefore, it is possible that the corrosion damage of low pressure was induced by this condition. According to previous study, about 30% of total blade failure correspond to corrosion fatigue or SCC(stress corrosion cracking) in low pressure turbine. Especially, LSB(last stage bucket) of low pressure turbine has a higher hardness to prevent erosion damage due to water droplet however, generally this is more dangerous for SCC damage. Therefore, to improve reliability of turbine blade, various methods for SCC evaluation has been developed. In this study, the crack found in LSB during in-service inspection was evaluated using microstructure analysis and stress analysis. From the stress analysis, the optimum size of fillet to remove the crack was proposed. And also, the reliability was evaluated for modified LSB using GOODMAN diagram.

Keywords : 증기터빈(Steam Turbine), 최종단 회전익(last Stage Bucket), 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking), 습증기(Wet Steam), Fatigue Damage(피로손상)

기 호 설 명

K_f : Fatigue Notch Factor

S_e : Material Fatigue Limits

σ_{max} : Maximum Stress

$2\sigma_L$: Load Scatter Band

$2\sigma_{sx}$: Material Strength Scatter Band

a : Material Constants

r : Notch Radius

1. 서 론

발전용 증기터빈 블레이드의 경우 고온/고압에서 고속회전으로 장기간 운전될 뿐만 아니라 저압터빈의 경우 습증기 상태에서 운전

되기 때문에 부식손상에 노출되어 있다. 기존의 증기터빈 블레이드 사고사례를 분석해 볼 때 손상의 대부분은 습증기 영역인 저압 터빈에서 발생되었으며, 이중 응력부식균열 (stress corrosion cracking) 및 부식피로균열 (corrosion fatigue cracking)이 전체 파손의 30%에 해당된다⁽¹⁾. 따라서, 습증기 영역에서 운전되는 저압터빈 블레이드의 운전 신뢰성을 향상시키기 위해서는 이러한 부식 손상을 정확하게 예측하는 것은 중요하다. 특히 응력부식 균열은 재질 특성, 부식 환경, 작용응력의 3가지 인자가 결합되어 발생하기 때문에(Fig.1 참조), 이를 정확하게 평가하는 것은 매우 어렵다. 특히 현재 사용중인 대형 증기 터빈의 최종단 블레이드의 경우, 습분에 의한 Erosion 방지를 위하여 고경도 재질인 Self Shield Material을 사용하고 있으며, 이러한 고경도 재질의 경우 상대적으로 응력부식균열에 취약한 것으로 알려져 있다^{(2),(3)}. 따라서 LSB 블레이드에 대한 응력부식균열 평가와 이에 대한 보수/정비 방안 수립을 통한 터빈의 운전 신뢰성 확보는 매우 중요하다.

본 논문에서는 발전소 운전 중에 저압터빈 LSB에 발생된 응력부식균열을 미세조직 평가법을 적용하여 분석하고, 응력해석 및 고유진동 해석 결과를 바탕으로 보수/정비 방안을 제시하였으며, 최종적으로 피로수평 평가를 수행하여 보수 후의 건전성을 검증하였다.

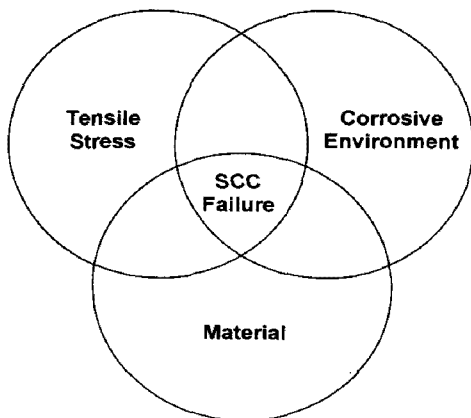


Fig. 1 The Major Factor of SCC Failure

2. 균열발생 원인분석

2.1 균열발생개요

균열은 증기터빈의 LSB(last stage bucket)의 No.37 Blade에서 발견되었으며, 균열 발생위치는 Tip과 Vane부가 연결되는 Trailing Edge Fillet 부에서 발생하였다(Fig.2).

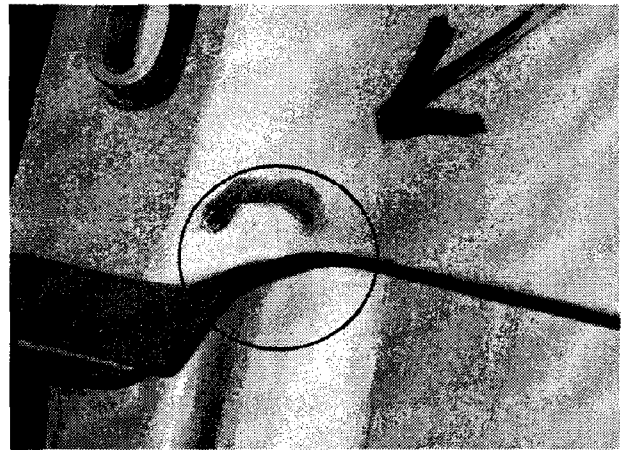


Fig. 2 Crack Location of LSB

발생된 균열의 크기는 Concave면에서 약 2mm, Convex면에서 약4mm로 Concave와 Convex를 관통하는 형상을 보여주고 있으며, Trailing Edge에서 최대 4mm 깊이까지 진전하였다. 균열이 발생된 LSB의 제원은 Table 1과 같으며, 재질의 화학성분은 Table 2와 같다.

Table 1 The Design Information of LSB

Type	Self Shielded LSB
Wheel Rim Diameter	14,000 mm
Blade Quantity	98 ea/row
Dovetail Type	Finger Type
Vane Type	335HOT (A.L. = 33.5 inch)
Cover Type	Axial Type (Z-Cover)
Tie-Wire Type	Sleeve Type

Table 2 Chemical Composition of LSB Material

C	Mn	Ni	Cr	Mo	V	N	Si
0.1~	0.65~	2.25~	11.25~	1.5~	0.25~	0.02~	0.1~
0.17	1.05	3.25	12.75	2	0.4	0.45	0.35

2.2 균열발생 원인분석

균열발생의 원인분석을 수행하기 위하여 균열부에 대한 표면복제(replication)을 수행한 후 광학 현미경과 전자현미경을 이용한 정밀 분석을 수행하였다. 균열부에 대한 미세조직 분석 결과 파손이 발생한 LSB는 마르텐사이트 조직으로 12Cr Alloy Steel의 전형적인 미세조직 형태를 가지고 있었으며, 열처리 및 성분 분량에 의하여 발생될 수 있는 Large Grain이나 이상 조직을 발견할 수 없었다. 또한 미세조직 내에 델타 페라이트나 비금속 개재물 등을 확인할 수 없었으며, 균열 주변에서 발견된 불순물 들은 균열이 발생된 후 균열부에 고착된 산화 스케일로 분석 되었다. 균열의 진전 형태는 Trailing Edge로부터 Bucket의 내부로 진전하는 양상을 보여주고 있었으며, 진행 방향은 원심응력의 수직방향으로 Fillet부의 주응력(principal stress) 방향으로 예상되어 진다. 균열은 시작부위에서부터 Sub 균열을 확인할 수 있었으며, 계속 가지를 치며 진전하는 양상을 보여주고 있다. 또한 Crack Tip부위에서 결정입계를 따라 진전하는 Inter-granular Crack의 형태를 보여주고 있다. 균열부에 대한 표면복제 결과는 Fig.3과 같다.

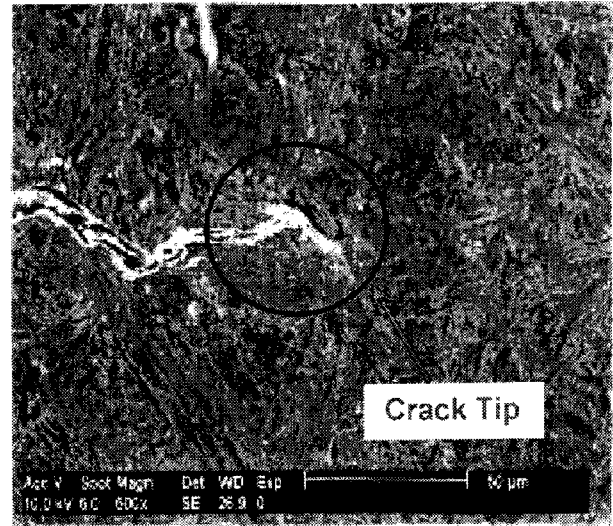
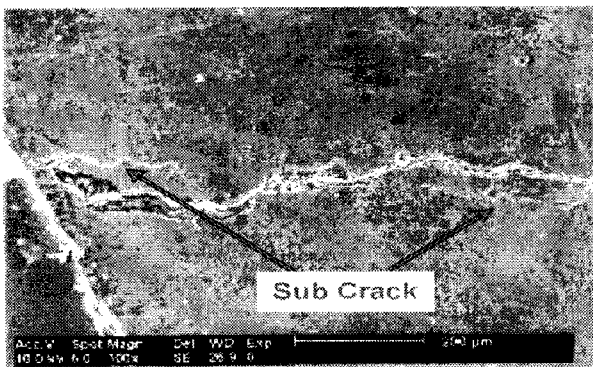


Fig. 3 Microstructure of LSB Crack

표면복제 분석 결과로 볼 때 LSB에 발생된 균열은 터빈 운전 중 작용된 응력과 부식 환경이 조합되어 발생하는 응력부식균열(stress corrosion cracking)로 추정된다. 육안점검 결과 주위의 인접 블레이드에 비하여 균열이 발생된 블레이드의 Fillet 반경이 상대적으로 작았으며, Trailing Edge Thickness역시 상대적으로 얇은 것으로 확인 되었다. 또한 구조적으로 취약한 Fillet 영역이기 때문에 응력집중이 예상되며, 이러한 응력집중과 습분 영역에서 운전되는 LSB의 부식환경이 SCC를 유발한 것으로 추정되어 진다. 하지만, 전체 94개 블레이드 중 1개 블레이드에서만 균열이 발생된 점을 고려할 때, 응력집중과 부식환경 외에 Material Property도 균열발생에 영향을 미친 것으로 추정된다. Probability of Failure의 관점에서 분석하면, 모든 재질의 Material Property는 통계학적 분포를 가지고 있고, 균열이 발생된 블레이드의 경우 이러한 통계학적 분포의 낮은 영역에 Material Property가 분포될 것으로 추정되어 진다 (Fig.4 참조).

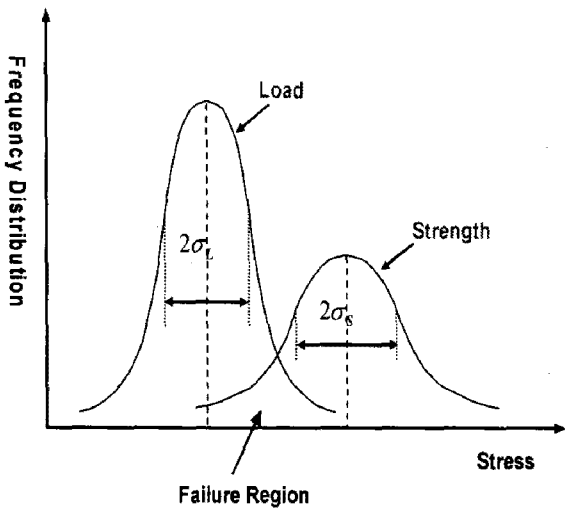


Fig. 4 Probability of Failure for Material Property

3. 응력/진동 해석

현재 LSB에 발생된 응력부식균열의 경우 균열진전해석 등을 통한 잔여수명평가가 불가능하고, 발생된 균열의 크기가 4mm 이내이므로, 기계가공을 통하여 균열의 제거가 가능할 것으로 판단되어 진다. 따라서 균열 제거시 발생될 수 있는 손상을 평가하기 위하여 FEM(finite element method)를 이용한 응력해석과 진동 해석을 수행하였다.

3.1 Fillet부 응력해석

응력해석은 균열이 발생된 Fillet부의 제거 크기 및 깊이에 따라 3가지 모델을 가정하여 해석을 수행하였다. Table 3에는 해석모델을 요약하였으며, Fig. 5에는 각 모델에 대한 FEM 해석 모델을 제시하였다.

Table 3 Fillet Radius & Depth of Analysis Model

Model	Fillet Radius	Remove Depth
Model I (Original)	0.5 inch	0 inch
Model II	0.45 inch	0.2 inch
Model III	0.25 inch	0.2 inch

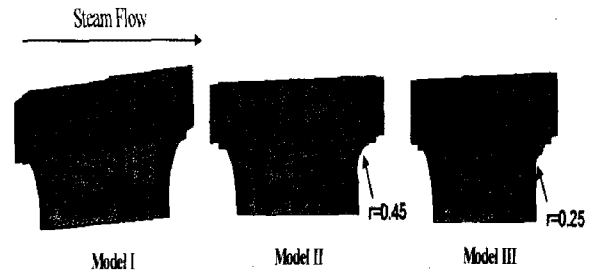


Fig. 5 FEM Analysis Model of New Fillet

해석은 Single Bucket에 대한 3차원 모델을 대상으로 수행하였으며, Bucket이 체결되었을 경우를 가정하여 경계조건을 적용하였다. 또한 최대 Stage KW를 기준으로 Steam Force를 계산하여 Pitch Diameter에 적용하였으며, 3,600rpm의 회전력을 전체 버킷에 적용하였다. 해석에 적용한 모델을 Fig. 6에 나타내었다

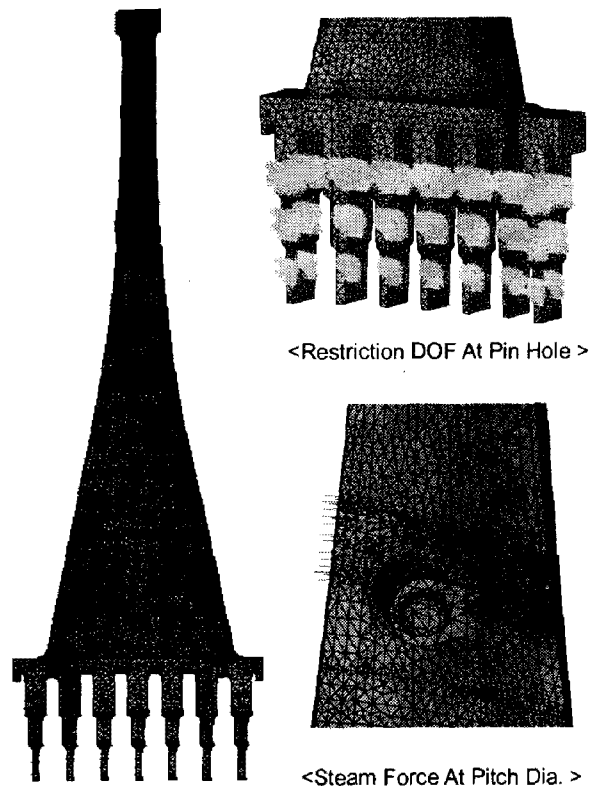


Fig. 6 The Boundary Condition of FEM Model

Fillet부의 응력해석 결과를 Fig.7과 Table 4에 제시하였으며, 전체 LSB 응력해석 결과를 Fig.8에 제시하였다.

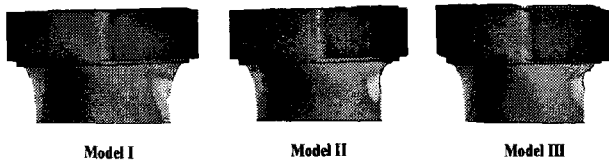


Fig. 7 Stress Analysis Results of Fillet Area

Table 4 Stress Analysis Results of Fillet Area

Model	Fillet Radius (inch)	Fillet Max. Stress (psi)
Model I	r=0.5	102,469
Model II	r=0.45	111,528
Model III	r=0.25	112,396

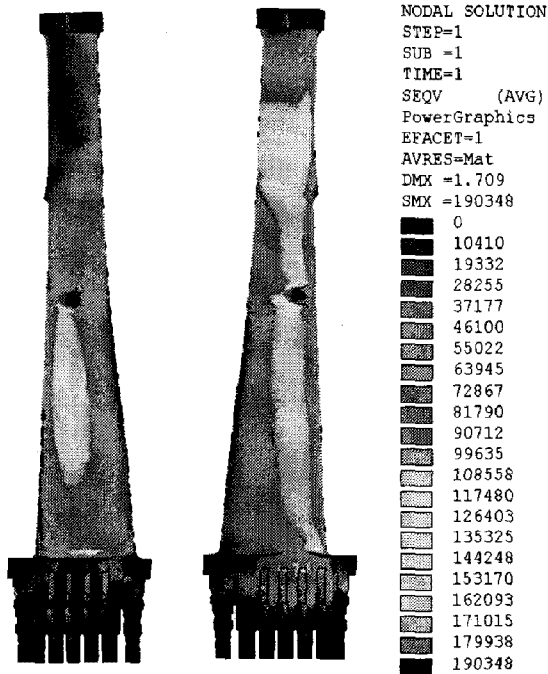


Fig. 8 Stress Analysis Results of LSB

3.2 LSB 진동해석

균열을 제거하기 위하여 LSB Fillet부를 가공할 경우 형상변화 및 질량 변화에 따른 고유진동수 변화를 수반하게 된다. 따라서, 가공된 블레이드에 대한 고유진동수 해석을 수

행하여 가공전과 가공후 진동수 변화를 평가하였다. 계산은 각 모델에 대하여 3차까지의 고유진동수를 산출하였으며, 해석 모델은 응력해석 모델과 동일한 FEM 모델을 사용하였다. 진동 결과는 Table 5와 Fig. 9에 제시하였다.

Table 5 Frequency Analysis Results

Mode	Natural Frequency (Hz)				
	Model I	Model II		Model III	
1	44.308	46.049	*3.9 %	46.060	4.0 %
2	90.392	91.898	1.7 %	91.912	1.7 %
3	250.30	257.80	3.0 %	257.80	3.0 %

*Model I 대비 Frequency Deviation %

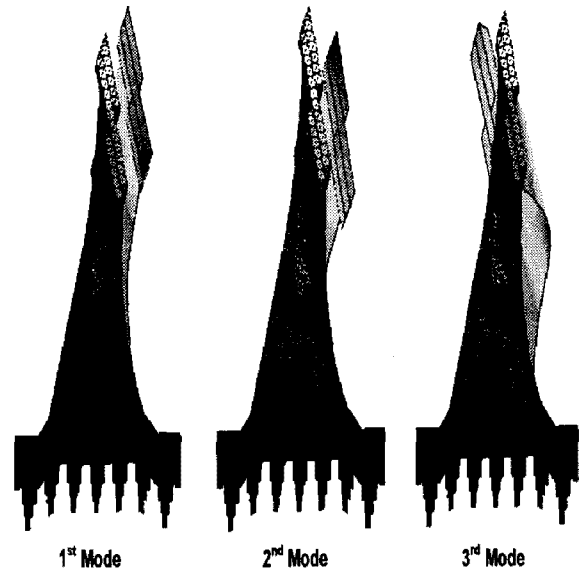


Fig. 9 The Mode Shape of Model I Blade

진동해석 결과 균열제거를 위하여 Fillet 반경을 감소시킨 모델의 경우 Original 모델 대비 저차모드에서 최대 약 4.0%의 Frequency Deviation이 발생하는 것으로 계산되었다. 이 값은 회전 주파수(60Hz) 대비 공진에 대한 충분한 마진을 가질 것으로 사료된다.

4. 건전성 평가

응력해석 결과를 바탕으로 Fillet부의 균열 제거에 대한 건전성 평가를 수행하였다. 건전성 평가는 GOODMAN Diagram을 이용한 HCF(high cycle fatigue) 평가를 수행하였으며, 평가에 적용된 GOODMAN Diagram은 블레이드 재질의 174°F 선도를 적용하였다. 일반적으로 응력집중 영역의 GOODMAN 선도는 응력집중에 대한 피로수명 감소를 고려하여 수정되어야 하기 때문에 본 평가에서는 균열제거 전의 Original Model을 Nominal 상태로 가정하고, Model II와 Model III에 발생하는 응력집중 값을 고려하여 건전성 평가를 수행하였다.

4.1 Fatigue Notch Factor 계산

GOODMAN 선도에서 응력집중에 대한 피로 수명 감소는 Fatigue Notch Factor K_f 를 적용하여 계산한다⁽⁴⁾. Fatigue Notch Factor는 Fig.10과 같이 Notch 형상에서의 피로 수명 감소를 나타내는 계수로서 식(1)과 같이 계산되며, 응력집중계수 및 재질 상수와 Notch Radius의 상관관계로 산출할 수 있다. Fatigue Notch Factor를 안전율로 적용할 경우 Fig. 10과 같이 GOODMAN 선도가 수정될 수 있다.

$$K_f = \frac{S_e^{unnotched}}{S_e^{notched}} \quad (1)$$

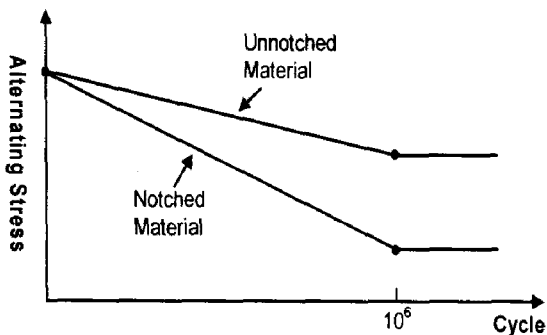


Fig. 10 Fatigue Life Degradation due to Notch Effect

응력집중부의 형상에 따른 Fatigue Notch Factors를 식(2)와 식(3)을 이용하여 산출할 수 있다. Fatigue Notch Factor는 식(2)와 같이 표현되며, 응력집중계수는 식(3)과 같이 표현된다. 아래 식을 이용한 계산 결과를 Table 6에 정리하였다.

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{\left(1 + \frac{a}{r}\right)} \quad (2)$$

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{S} \quad (3)$$

위식에서 r = Notch Radius

a = Material Constants

Table 6 Calculation Results of Fatigue Notch Factor

Model	Fillet Radius (inch)	Fillet Max. Stress (psi)	Fatigue Notch Factor (K_f)
I	r=0.5	102,469	1
II	r=0.45	111,528	1.089
III	r=0.25	112,396	1.098

4.2 GOODMAN Diagram 평가

계산된 Fatigue Notch Factor를 이용하여 기존의 GOODMAN Diagram을 수정하면 Fig.11과 같다.

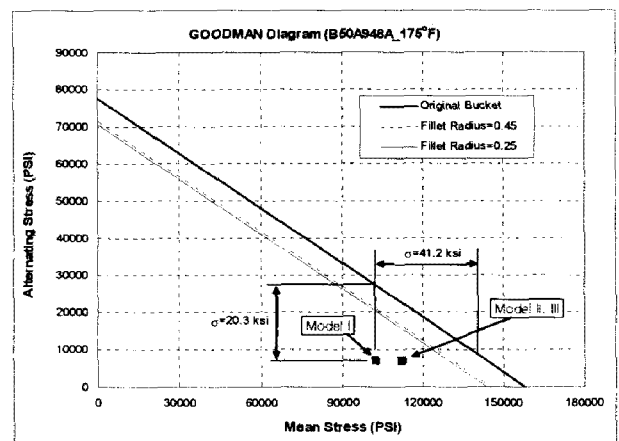


Fig. 11 Fatigue Life Degradation due to Notch Effect

수정된 GOODMAN Diagram에 응력계산 결과를 적용하여 평가한 결과 Model I 및 Model II, III 모두 GOODMAN 선도 아래에 위치하는 것으로 평가 되었다. 따라서 균열 제거 후에도 피로 손상에 대하여 안전할 것으로 예상 되어 진다. 하지만 균열 발생 전의 Model I이 GOODMAN 선도에 대한 최소 Stress Margin을 약 40%를 가지고 있는 것 대비 Model II와 Model III는 최소 Stress Margin을 약 17%와 15% 가지는 것으로 계산되었다(Table 4 참조). 이러한 결과로 볼 때 균열 제거 시 약 절반 수준으로 Stress Margin이 감소되는 것을 알 수 있다. 이러한 Stress Margin의 감소는 결국 Probability of Failure를 증가시키기 때문에 장기간 사용에 대한 안전성을 보장할 수 없다. 따라서 최대한 응력 집중을 완화시킬 수 있는 Fillet Radius를 적용하여 균열을 제거하는 것이 바람직하기 때문에 Model III 보다 Model II와 같이 균열을 제거하는 것이 타당할 것으로 사료 된다

Table 7 Results of GOODMAN Diagram Evaluation

Model	Stress Deviation (ksi)		Margin (%)	
	Mean	Alternating	Mean	Alternating
I	41.2	20.3	40.21	294.29
II	19.2	9.5	17.22	137.72
III	17.1	8.4	15.21	121.77

5. 결론

증기터빈 LSB에 발생한 균열의 평가 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) LSB에 발생한 균열은 진전형태 및 Sub 균열 발생 등을 고려할 때 응력부식균열

로 추정되며, LSB의 부식 환경과 Fillet 부의 응력집중이 복합적으로 작용하여 발생된 것으로 사료된다.

- 2) 균열부 제거를 위하여 Fillet 반경을 0.25inch와 0.45inch로 변경하여 응력해석을 수행한 결과 Original Bucket 대비 Fillet부의 응력이 0.25inch에서는 약 10%, 0.45inch에서는 약 9% 증가되는 것으로 계산 되었다.
- 3) 균열제거 모델에 대한 고유진동수 평가 결과 Original Bucket 대비 고유진동 변화가 저차모드에서 최대 약 4.0% 발생되는 것으로 계산되었으며, 회전주파수 대비 충분한 마진을 가질 것으로 추정된다.
- 4) 균열제거 모델에 대한 건전성 평가 결과 Fillet 반경이 0.25inch인 모델과 0.45inch 모델 모두 GOODMAN 선도를 만족하였다. 하지만 Stress Margin의 경우 Original Bucket 대비 0.25inch모델은 58%, 0.45inch 모델의 경우 53% 감소되는 것으로 계산 되었다.
- 5) 이상의 평가 결과에서 Fillet 반경이 0.45inch로 균열을 제거하는 것이 타당하며, Bucket에 대한 주기적인 점검과 이상 징후 발견 시 교체가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Brose, W.R., Marshall, L.S., and Sarber, R.L., 1994, "Simplified Methods of Steam Turbine Blade Root Life Analysis," PWR-Vol. 26, Advances in Steam Turbine Technology for the Power Generation Industry, pp. 213-221.
- (2) Kim, Hyo-Jin et al., 1998, "Analytic Procedure for Preventing Turbine Blade Failures," Proc. of POWER-GEN ASIA '98, New Delhi, India, Vol. 1, pp.

661-668.

- (3) Stress Corrosion Cracking(Material Performance and Evaluation), Russell H. Jones, 1992, ASM International
- (4) Metal Fatigue Analysis , Julie A Bannantine, 1990, Prentie-Hall Inc.
- (5) Yoon, K.S., 1992, "Ultrasonic Inspection of Fatigue Cracking in Turbine Blade Root Area," EPRI Steam Turbine and Generator NDE, Life Assessment, and Maintenance Workshop.
- (6) Shirmohamadi, M., Chaney, C., 1992, "Cracking and Fracture of Turbine Rotor Blade-Fit Area,"EPRI Steam Turbine and Generator NDE, Life Assessment, and Maintenance Workshop.
- (7) Sanders, W. P. 1997, The Procurement of Replacement Steam Turbine Blading, Turbomachinery International Publications, Norwark.
- (8) JSME, 1984, "Corrosion and Fracture," JSME, Japan Industrial Publish Co. pp.71-74
- (9) 한국전력공사 기술연구원, 1987, "터빈-로타 수명예측연구에 관한 연구"
- (10) Source Book in Failure Analysis, 1974, American Society for Metals
- (11) Mechanical and Metallurgical Advantages of Shot-Peening, O.J. Horger, Iron Age, 1945