

# Analysis of Turbine Blade Damage at Ravic Power Plant, Saudi Arabia

## 사우디 라빅발전소 터빈 블레이드 파손 분석기술 현장 적용

Jun Su Park  
 박준수

### Abstract

한전에서 운영중인 사우디아라비아발전소에서 저압터빈 블레이드가 파손되었다. 블레이드의 경우 터빈의 핵심부품으로서 증기를 활용하여 발전기를 회전시켜 전기를 생산하는데 필수 부품이다. 반복적인 사고발생을 예방하기 위해 조직분석, 운전신호 분석등을 활용하여 원인을 규명하였고, 대책을 제시하였다.

Keywords: 터빈 블레이드, 증기터빈, RCA, 손상분석, 진동분석, SCC, 저압터빈

### I. 개요

사우디 아라비아 라빅시에 위치한 한국전력공사에서 운영 중이 증유발전소(600MW×2기) 증기터빈 블레이드 일부가 2013년 4월 준공 이후 약 6년 경과 시점에서 탈락되었다. 블레이드가 탈락되면 파급손상으로 확대되며 이로 인해 발전손실과 장기간의 정비기간에 따른 비용이 발생하게 된다. 증기터빈은 보일러로부터 공급된 증기를 기계적 에너지로 변환시켜 발전기에 전달하는 역할을 담당하는 설비이다. 일반적으로 산업용 대형 증기터빈의 구성은 고중압터빈과 저압터빈으로 구성되어 있다. 증기터빈 구조 및 형상을 Fig. 1에 명시하였다. 블레이드 손상 발생 전 진동 변화를 고찰하였으며, 블레이드 파단면 분석을 통해 손상의 직접적인 원인 규명과 대책을 수립하였다.

운전 중 터빈진동이 한계치를 초과하면 설비보호를 위해 자동으로 터빈이 정지된다. 블레이드가 탈락할 경우 심한 질량불평형으로 인해 진동이 변하게 되는데 이 경우 특수한 진동 패턴(STEP)을 나타낸다 이러한 진동현상에 대해 Fig. 2에 명시하였다. 라빅시에 위치한 증유발전소 증기터빈이 운전 중 진동이 STEP으로 변화함에 따라 정지 후 점검을 통해 일부 블레이드 탈락을 확인하였다. 블레이드 탈락 양상은 Fig. 3에 명시하였다. 탈락된 블레이드는 저압터빈 4단이며 파급으로 5단 블레이드까지 손상되었다.

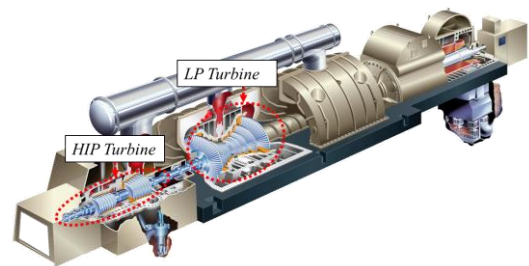


Fig. 1. 국내 표준화력 터빈 구조 및 형상

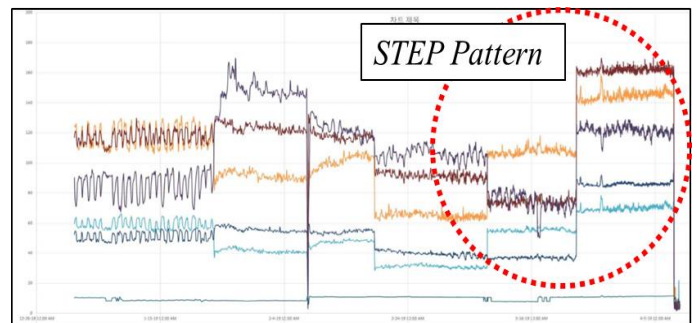


Fig. 2. Step Pattern의 진동 신호



저자 박준수 | 한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 전문기술센터

박준수는 전문기술센터에서 근무하는 연구원으로서 국내외 증기터빈, 가스터빈 기술지원업무를 수행 중에 있습니다. 발전소에서 발생하는 고질적인 문제를 해결하기 위한 다양한 연구과제를 수행 중에 있고, 최근 터빈에서 발생하는 벤딩을 교정하는 전용장비를 세계최초로 개발하여 국내 발전소 정비업체에 기술이전을 완료하였습니다.

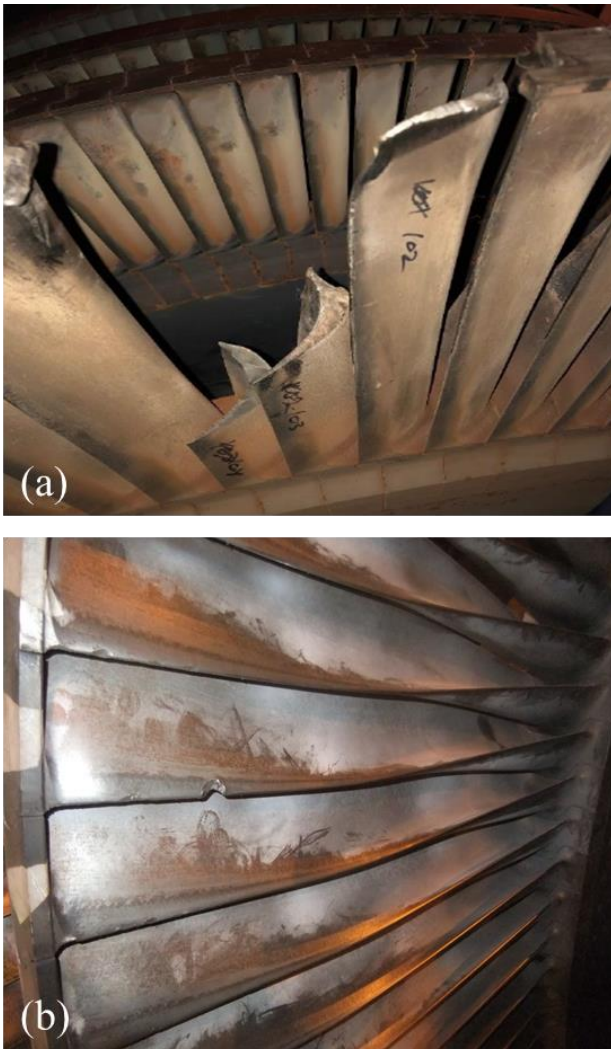


Fig. 3. Blade 파손 형태, (a) 4 단, (b) 5 단

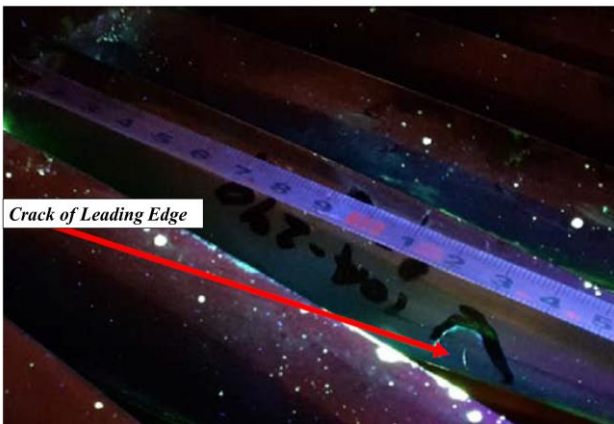


Fig. 4. Blade 비파괴 검사

균열이 발생한 블레이드에 대한 비파괴 검사를 통해 균열이 발생한 현상을 확인하였다. 비파괴 검사를 진행한 모습에 대해서 Fig. 4에서 명시하였다. 확인 결과 블레이드의 Leading Edge에서 대부분의 균열이 발생한 것을 확인하였다.

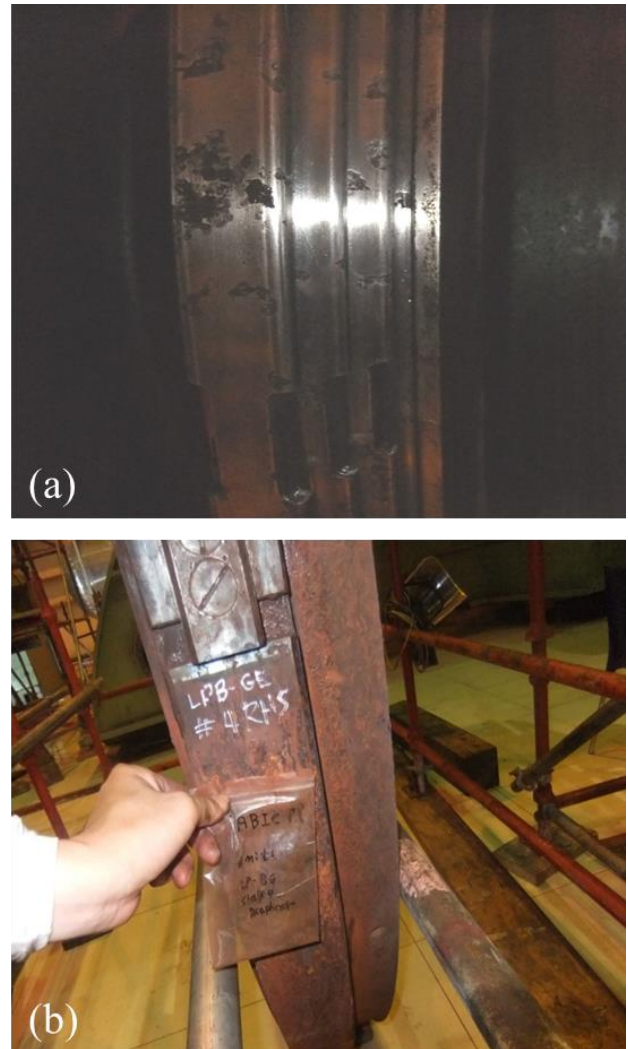


Fig. 5. 현장 설비점검 결과. (a) 터빈로터, (b) 다이어프램

사고가 발생한 주변현장에 대해서도 점검을 진행하였다. 점검 결과 블레이드 외 터빈로터, 다이어프램에 대해서도 부식에 의한 침식 및 파손된 블레이드에 의한 2차사고등으로 손상이 많이 된 것을 확인하였다. 파손된 현장의 모습에 대해 Fig. 5에 표시하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 블레이드 탈락으로 인해 터빈 설비의 전체적인 손상이 발생한 것을 확인하였고, 동일한 사고가 발생하지 않도록 원인 규명을 수행하였다.

## II. 터빈 손상 메커니즘

원인을 분석하기 위해서는 블레이드에서 발생할 수 있는 손상 메커니즘에 대해서 이해가 필요하다. 터빈 블레이드의 경우 다양한 원인에 의해 발생한다. 초기 제작결함부터 재료불량 등 다양한 원인이 존재한다. 기존의 연구자들이 연구한 터빈에서 발생할 수 있는 손상 메커니즘의 비율에 대해서 Fig. 6에서 명시하였다. 파손이 발생할 경우 하나의 원인이 아닌 복합적인 원인에 의해 발생한다. 각각의 원인이 중첩적으로 작용하여 파손을 발생시킨다. 손상 원인 중 대표적인 원인은 진동에 의한 파괴, 피로파괴, SCC이다.

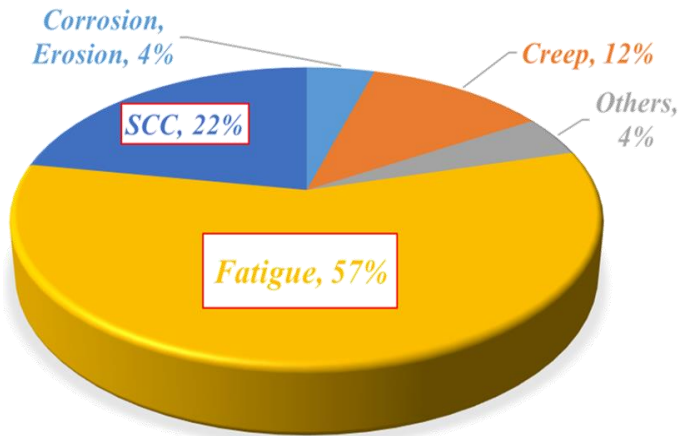


Fig. 6. 블레이드 파손원인

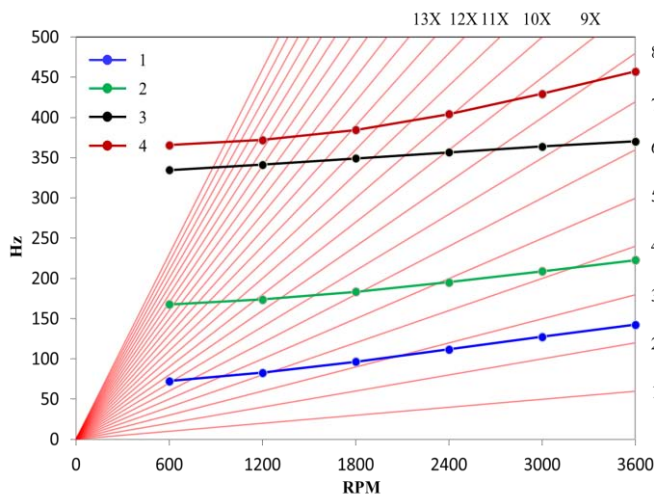


Fig. 7. RPM 변화에 따른 블레이드 공진분석(Campbell)

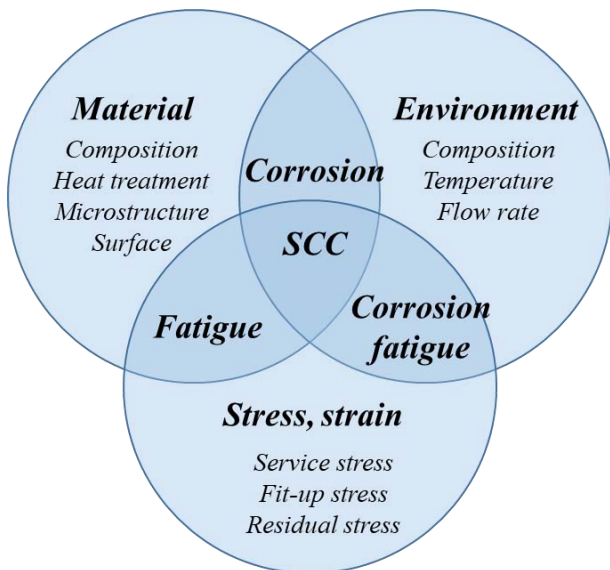


Fig. 8. SCC 발생 원인

각각의 원인에 대해서 세부적으로 설명하였다. 이외에도 다양한 원인이 있지만, 의심되는 원인에 초점을 두고 해당사항이 없는 원인을 소거하는 형태로 손상원인 분석을 진행하였다

TABLE 1  
Blade material

	C	S	Cr	Ni	Cu
RABIGH BLAEDE	0.065	0.035	14.8	3.73	2.9
17-4PH (EPRI)	0.07	0.03	15	3	3

TABLE 2  
Yield stress of blade material

	17-4PH	AISI Type 403	Titanium	Duplex stainless
Yield Strength [MPa]	1070	585	88	676

A. 진동에 의한 파괴

블레이드마다 설계 오류 등으로 인해 고유진동수와외의 공진으로 인해 설비의 파손이 발생할 수 있다. 초기설계에는 문제없었지만, 재질결합, 제작결함으로 고유진동수가 변경되어 설비가 파손되는 경우도 있다. 분석을 하기위해서는 블레이드 설계 후 FEM 해석을 통해 RPM 변화에 따른 차수 별 고유진동수 공진을 분석한다. Fig. 7 에서 RPM 차이에 따른 고유진동수를 분석한 예시에 대해 표시하였다. 차수 별 고유진동수가 최종적으로는 3600RPM일 때와 공진이 발생하면 안 된다.

B. 피로파괴

원심력에 의해 회전하면서 터빈은 지속적인 반복응력을 받게 된다. 기동 정지에 의해 0RPM ~ 3600RPM으로 속도가 변화할 때, 항복응력이상으로 응력이 발생할 수 있다. 이럴 경우 저주기 피로파괴에 의해 손상발생이 가능하다. 고주기 피로파괴는 항복응력 이하의 반복적인 응력이 발생할 때 생긴다. 고주기 피로파괴는 정상운전 중일 때는 크게 영향이 없지만 부식에 의한 Dent 발생 또는 침식, 균열 등 취약부분이 생길 경우 설비에 작용하여 문제를 발생시킨다.

C. 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking)

파손원인 중 가장 취약한 원인이다. 고중압터빈에서 습분이 없는 증기가 저압터빈으로 오게 되면 압력과 온도의 변화에 의해서 습분(humidity)이 발생하게 된다. 또한 장기간의 운전기간 동안 증기의 불순물, 습분으로 인해 부식피트가 발생하게 되고, 원심력에 의한 응력으로 인해 균열이 진전하게 된다. 이와 같이 SCC의 경우에는 부식환경, 응력, 재료에 의한 복합적인 영향에 의해 균열이 발생하게 된다. 각각의 상관관계에 대해 Fig. 8에서 명시하였다.

III. 물성치, 설비 외관, 균열 분석

손상원인 분석에 필요한 재료의 물성치 및 균열이 존재하는 블레이드에 대한 분석을 먼저 수행하였다.

A. 재료 물성치

라빅발전소에서 사용되는 블레이드 재료에 대한 성분함유량에 대해서는 설비공급사로 확인하였지만, 재료의 기계적 물성에 대해서는 확인을 하지 못하였다. 따라서 성분함유량과 비슷한 블레이드 재료를 EPRI에서 제공한 보고서를 활용하여 확인하였고, 일반적으로 사용되는 블레이드 재료의 항복강도를 비교하였다. 성분 함유량과 항복강도를 비교한 내용에 대해 TABLE 1,2에서 명시하였다.

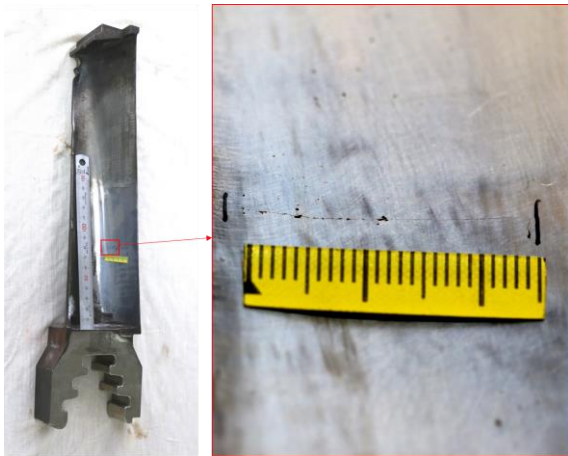


Fig. 9. 블레이드 형상 및 균열

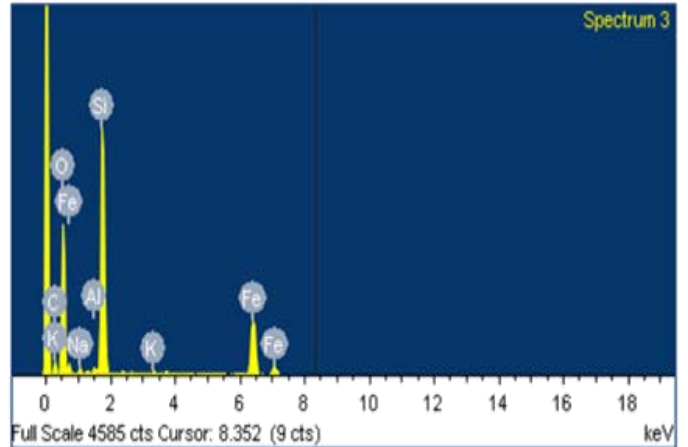


Fig. 12. 균열시작지점 화학분석

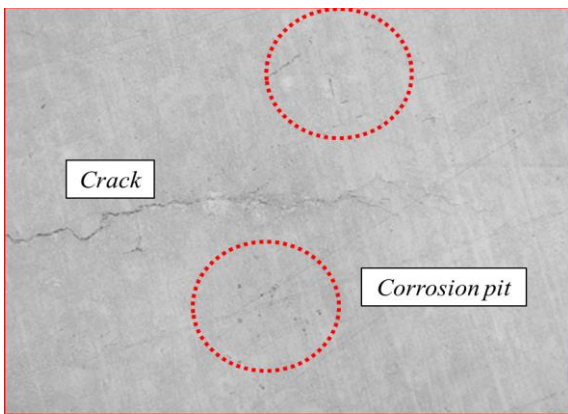


Fig. 10. 균열부 주위 부식 피트

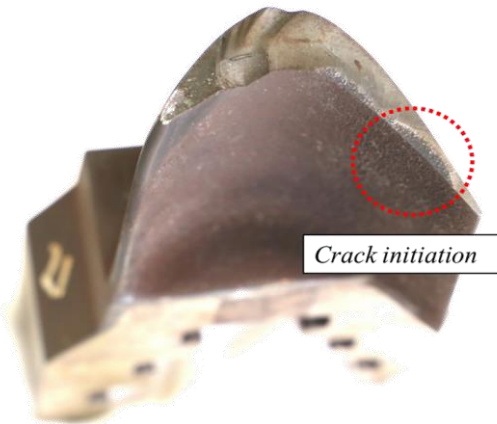


Fig. 11. 파손된 블레이드 외관형상

라빅발전소에 사용된 재료의 경우 일반적인 발전소에서 사용되는 블레이드 대비 항복강도가 높은 것을 알 수 있다. 재료의 항복강도가 높을 경우 일반적으로 SCC에는 더욱더 취약하다고 알려져 있기 때문에 라빅발전소 블레이드가 SCC에 취약하다고 판단하였다.

#### B. 균열분석

표면에 균열이 있는 블레이드에 대해 분석을 진행하였다. 분석을 수행한 블레이드에 대해서 Fig. 9에 표시하였다.

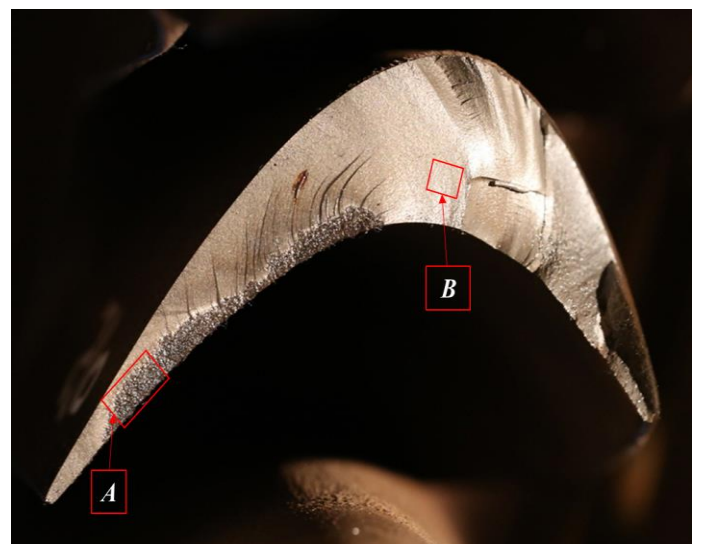


Fig. 13. 파손블레이드 단면

발생한 균열 주위 부분에 확대부위를 Fig. 10에 표시하였다. 표면을 확인한 결과 균열이 발생한 주위에 많은 부식피트가 확인되었다. 이러한 결과를 기반으로 블레이드 파손이 발생하기 전 응력부식에 의해 균열이 발생 중이었다고 판단하였다. 향후 이러한 균열이 진전하게 된다면 현재 발생한 파손사고와 같은 현상이 발생할 수 있다.

#### IV. 손상 해석

##### A. 외관분석

손상된 블레이드 외관 분석을 수행하였다. 외관 형상에 대해서는 Fig. 11에 명시하였다. 그림에 표시한 바와 같이 균열이 시작되는 지점을 확인할 수 있었다. 균열이 시작되는 지점에 대해 스케일 분석을 진행한 결과 Na, K 등 부식성 물질이 검출되는 것을 확인하였다. 균열이 시작되는 지점 반대편을 확인한 결과 스케일부착 상태가 양호한 것을 확인하였다. 화학분석을 진행한 결과에 대해 Fig. 12에 표시하였다.

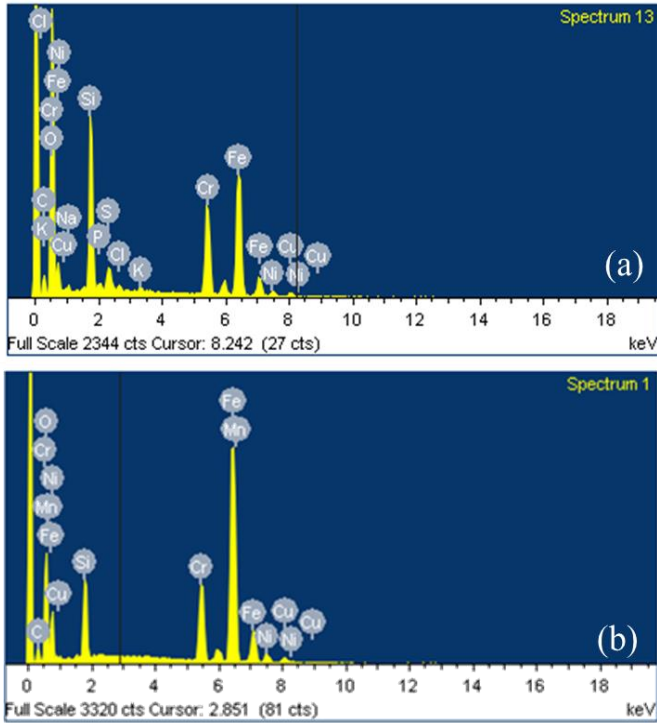


Fig. 14. 파손단면 성분분석, (a) A 지점, (b) B 지점

B. 파단면 분석

정확한 분석결과를 얻기 위해 파단면에 대해서 분석을 수행하였다. 분석을 수행한 파단면에 Fig. 12에 표시하였다. 파단면을 확인하였을 때 명확하게 균열개시시점에 대해서 확인을 할 수 있었다. 또한, 파단면에서 보는 균열개시시점 부분과 균열개시시점 주변에 대해서 성분 분석을 수행하였다. 성분분석 결과 균열이 개시한 부분(A지점)에서는 부식성 물질인 Na, K 등이 검출이 되었고, 균열개시 주변지점(B지점)에는 부식성 물질이 검출되지 않는 것을 확인하였다. 화학성분 검사 결과에 대해서는 Fig. 14에서 명시하였다.

파면분석 결과를 토대로 SCC에 의해서 균열이 시작하였고, 시작한 균열이 피로균열 형태로 진전하여 최종적으로 블레이드 파손에 이르렀다고 판단하였다.

V. 결론 및 대책제시

A. 결론

1. 재료의 항복강도가 높을 경우 SCC에 취약할 수 있다. 라빅에서 사용하는 블레이드 재료의 항복강도는 일반적으로 사용되는 블레이드 재료대비 항복강도가 높아 SCC에 취약할 것으로 판단된다.
2. 블레이드 외 터빈설비(로터, 다이어프램등)에 대해 점검 결과 부식이 많이 발생한 것을 확인하였다. 블레이드 파손이 발생하기 전 설비의 침식이 많이 발생하였던 것으로 판단된다.
3. 균열있는 블레이드 분석 결과 균열주위에 부식피트가 분포되어있는 것을 확인하였다. SCC가 발생이 진행되고 있는 것으로 판단된다. 또한 Leading Edge에는 부식성스케일이 관찰되지만 Trailing Edge에서는 부식성 물질이 관찰되지 않는다. 증기에 포함된 불순물등으로 인해 부식이 발생할 가능성이 있다.

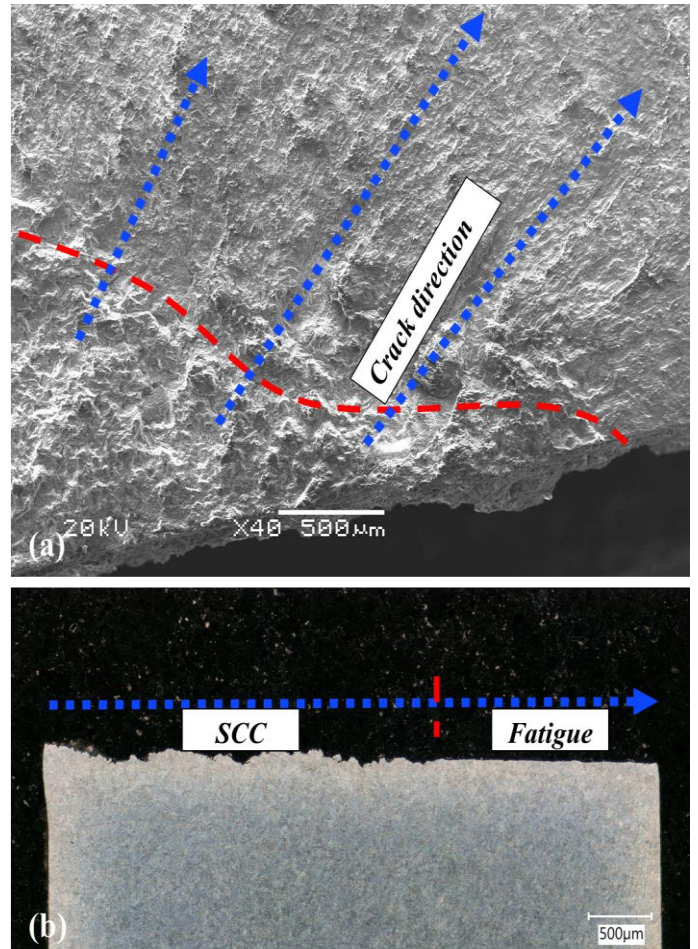


Fig. 15. 균열 원인분석, (a) 조직분석, (b) 단면 분석

4. 파단면 조직분석 및 조성분석 결과 균열개시점에서는 부식성 물질이 있었고, 피로균열로 분석되는 위치에서는 부식성 물질이 관찰되지 않았다.

이러한 결과를 바탕으로 초기 균열 시작은 SCC에 의해 시작되었고, 발전소 운전중 블레이드에 피로응력이 발생하여 최종적으로 블레이드가 파손되는 형태로 진행되었다.

B. 대책제시

계획예방정비 기간 중 블레이드 블라스팅을 통해 표면의 스케일 제거 진행 및 비파괴 검사를 통한 균열검사가 필요하다. 또한, 발전소 수처리 계통에 대한 정기적인 관리가 필요하다. 터빈의 진동신호에 대해서도 정기적인 분석을 통한 설비의 지속적인 관리가 필요하다.

Acknowledgment

이 보고서는 해외발전기술처 부서의 요청으로 '2019년. 8월. ~ '2019년. 11월까지 수행한 "사우디 라빅발전소 1호기 저압터빈 고장복구 기술지원" 수행 결과를 바탕으로 작성되었음.

## References

- [1] Gee Wook Song, Woo Sung Choi, Wanjae Kim, Nam Gun Jung, "Damage analysis for Last-Stage blade of low pressure turbine", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 37, No. 12, pp. 1153~1157, 2013
- [2] Mukhopadhyay, N. K., Chowdhury. G. S., Das, G.,, "An Investigation of The Failure of Low Pressure Steam Turbine Blades," Engineering Failure Analysis, Vol. 5, No. 3, pp.181~193, 1998
- [3] Epri Report "Low-Pressure Turbine blade Design Evaluation"
- [4] Epri Report "Steam turbine blade failure root cause analysis guide"
- [5] Epri Report "Low pressure blade/Disk Design audits and Inspection"