

화력발전소 장수명화를 위한 부식저감 대책 기술

하 정 수

전력연구원 수화력발전연구실

Anti-corrosion Technology for Life Extension of Fossil Power Plant

Jeong Soo Ha

Power Generation Research Lab., KEPRI, Taejeon 305-380

A large percentage of fossil power plants have been in operation for such long durations that they are currently used beyond their of failures that engineer should take into account for the development of life extension technique. Corrosion is one of main concern in old power plants, and causes of breakdown can be stress corrosion cracking, caustic attack, oxygen pitting, hydrogen damage, high temperature corrosion, fire-side corosion, corrosion fatigue, and the combination of these damages, Understanding the cause of failures can help to prompt corrective measures. Another key ingredient in plant life extension is the remaining-life-assessment technology. To improve the accuracy of life evaluation, corrosion term should be considered and modified with the conventional mechanical terms. This investigation is describing a new method of life evaluation which incorporates corrosion concept for life extension.

Keywords : fossil power plant, boiler Tube, Turbine blade, corrosion damage, failure analysis, life assessment, damage mechanisms.

1. 서 론

노후 화력발전소를 폐기하고 새로운 발전소를 건설하려면 막대한 투자비가 소요되는 등 경제적 부담 외에도 신축에 따른 법적 절차가 까다로운 것은 물론 입지확보에 따른 민원 발생의 우려가 높아 기존의 장기간 사용한 노후 설비를 폐지하지 않고 수명을 연장하여 사용하는 추세 가 국내외적으로 증가하고 있다. 현재 국내에서는 25년의 화력발전소 경제수명을 35년 이상으로 연장하여 사용하고 있다.

화력 발전설비는 고온·고압 환경 하에서 운전 되는 특성 때문에 재료 열화가 발생되어 설비의 강도 저하로 인한 노후화가 진행되고 있다. 재료 열화를 발생시키는 요인은 고온 상태의 운전조건, 과도한 운전시간, 부하조건, 설비 부식 등을 들 수 있다. 특별히 화력발전소에서 발생하는 부식 현상은 설비 및 재료의 종류, 운전조건 및 정지기간 등에 따라 크게 상이하므로 이에 대한 특성을 평가하여 적절한 대책을 수립하여야 화력발전소의 장수명화를 이룰 수 있게 된다.

화력발전소는 주로 보일러, 터빈, 발전기 등의

주기와 각종 펌프류, 송풍기류, 열교환기류, 취수시설 등의 보조기기, 그리고 전기 및 제어 설비, 운반 및 저장설비 기타 배관시설등이 있는데 이들의 운전조건, 재료 및 환경등에 따라 다양한 형태의 부식현상이 발생되므로 이의 원 인별 적합한 부식저감 기술이 강구되어야 한다. 이러한 주요 발전설비 중 보일러에서는 튜브와 그리고 터빈에서는 블레이드가 가장 핵심적인 설비이면서도 사고의 빈도가 높은 설비로서 부식에 의한 영향에 의하여 더욱 취약하게 된다.

따라서 본고에서는 화력발전 설비의 보일러 튜브 및 터빈 블레이드의 주요 손상원인 중 부식 손상의 원인과 이에 따른 대책과 함께 부식 손상을 고려한 수명평가 기술에 대하여 알아보 고자 한다.

2. 보일러 튜브의 부식발생과 저감대책

2.1 튜브 파열사고의 현황

보일러 튜브는 수냉벽관, 과열기, 재열기, 절 단기 튜브등 다양한 종류 및 방대한 길이를 가 지고 있어서 각종의 튜브 파열사고가 일어나고 있다. 다음의 분석은 Riley Stoker Corp.의 Met- allurgy Depart.에서 1980년 까지의 경험을 바 탕으로 한 것이다.¹⁾ 우선 기계적 파손과 부식 파손으로 구분하고 파손 종류별, 위치별과 재질 별로 다시 세분하였다.

○ 기계적 파손 : 81%

○ 부식 파손 : 19%

기계적 파손의 원인을 세분하면 단기간 고온 이 65.8%로 가장 빈번하고 크리프(고온/장기), 마모, 흑연화, 피로, 용접문제등의 원인으로 파 손되고 있음을 보여 주고 있다. 부식 파손은 다 음과 같이 세분하였다.

- 보일러 공급수 37.2%
- 수소 손상 20.0%
- Ash 19.2%
- oil 9.2%

coal 10.0%

- Oxygen pitting 10.8%
- 응력 부식 균열 8.1%
- Caustic Attack 4.5%
- 기타 4.0%

위에서 부식 파손의 총계는 100%가 넘는데 이는 몇 몇 문제들이 하나의 원인으로 구분하기 어려워 이중으로 집계되었기 때문이다. 예를 들어 보일러 공급 수처리의 문제가 수소손상이나 caustic attack을 야기시키기 때문이다.

○ 위치별 파손

- 수냉벽 29.4%
- 과열기 44.8%
- 재열기 13.5%
- 절단기 4.8%
- Roof 1.9%
- Floor 1.4%
- 기 타 4.2%

○ 재질별 파손

- 탄소강 40.4%
- 탄소 + $\frac{1}{2}$ Mo 9.5%
- $1\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 18.0%
- $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 24.0%
- Stainless steel 5.1%
- 기타 3.0%

2.2 보일러 튜브 수축 부식의 저감대책

보일러 튜브의 수축에 기인하는 부식은 보일 러 튜브 내부의 물이나 증기와 관련되어 일어나 는 것으로 설비의 운전조건에 따라 다양한 원인 을 가지고 발생하고 있다. 주요 원인은 대기에 의한 부식, 기동시의 산소부식, 해수누입 부식, 알카리 부식, 수소취화, 응력부식등이 주요 원인 이 된다. 부식등에 의하여 생성된 스케일이나 이물질에 의하여 튜브의 과열이 발생하고 팽출 및 파열이 발생하기도 한다. 이에대한 자세한 손상사례에 따른 원인별 대책은 Table 1과 같 다.²⁾

Table 1. Corrosion damages at water-side of boiler tube

손상사태	발생부위	원 인	대 책	비 고
용존 산소에 의한 부식	보일러 본체, 절탄기등	급수 중에 용존산소의 존재	급수의 기계적 탈기 및 화학적 탈기의 완전화	운전적 요인, 급수의 성분등에 의해 촉진
급수, 보일러 수처리 불량에 의한 부식	상 동	pH불량, 염화물 이온 농도과대등	급수, 보일러 수처리의 완전화	해수 누설에 의한 염화물 이온의 과대, pH가 저하되는 경우.
알카리에 의한 부식	수냉벽관	Hot spot 등에 의한 보일러 수의 농축	Hot spot 발생제거로 저염화처리	Hot spot의 발생에는 설계, 운전, 내면 불결이 영향 미침
	과열기관등	알카리의 농축, 축적	Carryover 방지 온수세정	보일러 수의 저염화처리는 부식을 제어
과열부 금속재료의 취화	수냉벽관, 과열기관	과열부의 존재	과열 방지 재질 선택	취화발생이 부식과 병행되면 위험
탄산·아황산·황화수소에 의한 부식	급수가열기, 복수기관	CO ₂ ·SO ₂ 등에 의한 pH저하, H ₂ S의 존재	급수·복수의 pH처리 SO ₂ ·H ₂ S 발생제거	용존산소의 공존은 부식을 증가시키고 pH처리 효과를 감소
과열에 의한 팽창과열	수냉벽관	Deposit, Sludge, 유지등의 부착과 축적	급수·보일러 수처리의 완전화 화학세정등의 청소	해수 누설방지, 건설·수리후의 완벽한 청소 필요
	과열기관	증기중의 불순물 관내 축적	Carryover 발생방지 온수·화학세정등 청소	상 동
관류손실증가	수냉벽관	노벽관, 유량제어 밸브용 오리피스의 탄화물 deposit	오리피스 형상 재질의 변경	산화처리의 변환에 의한 개선
Ammonia Attack	복수기 튜브 저압급수가열기관	고농도 암모니아 수의 생성과 산소의 공존	산소누설 방지 pH과대 방지	암모니아 농축이 되지않는 설계적 고려중요

2.2 보일러 튜브 가스측 부식의 저감대책

2.2.1 고온부식

고온부식은 유전소 보일러에서 심각한 문제중 하나로서 과열기관이나 재열기관 등의 고온의 전열면이 고온의 연소가스나 부착회에 의해서 부식을 일으키는 현상을 말한다. 대개 부착회중의 Vanadium에 의해서 그 부식 속도가 증가하는 경우가 많다.

고온부식이 주로 발생하는 위치는 다음과 같은 부위로서 대개 과열기나 재열기 부위가 된다.

- 금속표면 온도가 높은 장소
- 가스온도가 높은 장소
- Flue gas의 편류가 일어나는 장소
- Ash가 부착하여 잘 제거 되지 않는 장소

이러한 고온부식의 발생에 따른 저감대책은 사용연료, 운전조건, 설계시에 다음과 같이 부식 발생을 줄일 수 있다.

- 연료중의 바나듐, 알칼리염, 유황의 제거
- 내식성재료의 사용
- 가스온도 및 금속표면 온도의 변화
- 저 O₂ 운전
- 바나듐회회의 용점상승
- 전열면 청소 및 내열강관의 Protector 부착
- 고온의 과열기 및 재열기부의 정기 점검을 통한 고온부식 경향파악

2.2.2 저온부식

연료중에 포함되어 있는 유황분이 연소되어 가스로 변화하였다가 금속표면 온도가 노점이하

지역에서 응축하여 금속의 부식을 급격히 증가시키는 부식현상을 말하며 절탄기, 공기에열기 등 출구쪽의 저온부에서 흔히 일어난다.

연료중의 유황성분이 SO_3 로 되어 부식을 유발하는 것으로 증유중에 포함되어 있는 유황분은 대부분, 그리고 석탄중의 유황분은 70~90%가 연소에 의하여 SO_2 와 SO_3 로 되는데 SO_3 는 전 유황산화물의 대략 5% 이하이다. 연소가스중의 생성된 SO_3 는 수증기와 화합하여 유산(H_2SO_4)로 되며 온도가 노점이하로 되면 금속표면에 응축하여 부식을 일으킨다.

저온부식의 대책은 운전조건을 개선하거나 연료시의 첨가제를 사용하므로 부식손상을 저감할 수 있다.

○ 저 과잉공기를 운전

과잉공기율을 적게 할수록 SO_3 의 생성을 방지할 수 있다.

○ 배기가스 온도의 조정

공기에열기의 금속표면 온도를 높여 연소배기가스를 노점 이상의 온도로 하여 배출하면 부식을 감소시킬 수 있다.

○ 첨가제 사용

노내에서 생성되는 SO_3 증기를 중화시켜 농도를 낮추고 부식을 작게하는 데는 dolomite나 탄산마그네슘, 마그네시아 등의 파우더를 증유나 연소가스에 첨가하거나 또는 값이 싼 암모니아 가스를 공기에열기 직전에서 350~200℃ 정도의 연소가스에 불어 넣는다.

○ 수세시에 세정수가 보일러의 고온부에 유입 농축되지 않도록 한다.

2.3 부식을 고려한 튜브 수명평가 기술

정상적인 운전조건에서 보일러 튜브의 수명은 주로 크리프 또는 응력-파단 기구에 의해 소비가 되므로 튜브의 수명을 평가하는 현재의 방법은 보일러 튜브를 절취하여 크리프 실험을 실시하여 그 결과를 이용하고 있다. 크리프 실험결과는 Larson-Miller Parameter를 이용하여 등가

온도법으로 해당온도에서의 잔존 수명을 평가하고 있다. 이러한 과정은 현재 부식의 영향을 고려하지 않고 있는 실정에 있다.

운전중 발생하는 튜브 내면의 산화 스케일의 열전도도는 튜브의 열전도도 보다 더 작다. 이러한 스케일의 열전도 효과는 튜브 금속온도를 상승시킨다. 스케일 두께가 두꺼울수록, 튜브 금속의 온도증가는 더 커지게 되고 수명에 영향을 미치게 되므로 수명평가시 이를 고려하여야 한다. 과열기 튜브내의 수명소비 및 경년열화 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 증기는 튜브의 내부를 따라 산화철을 형성하기 위하여 철과 반응한다. 스케일의 열전도도는 철의 열전도도의 약 5% 정도이며, 증기에 의한 냉각으로부터 튜브를 격리시키게 된다.

2. 튜브의 가스측 화염부분을 따라 발생하는 산화 또는 부식은 연소가스 또는 연소재에 대한 철의 반응에 의해 발생하며, 이러한 감육의 효과는 튜브벽 내에서 후프응력을 증가시키거나 튜브벽 두께를 줄이게 된다.

3. 증가된 금속온도와 응력의 효과는 증기부의 산화율과 연소가스 쪽의 부식율을 증가시킨다. 1단계와 2단계를 통해 증가율이 지속되며 튜브 금속온도를 증가시킨다.

4. 응력과 온도의 증가는 파단에 대한 시간 또는 크리프 수명을 감소시킨다.

5. 과열기 튜브등은 크리프 또는 응력-파단 기구에 의해 파괴된다.

응력-파단 데이터를 나타내는데 있어서 편리한 방법은 Larson-Miller parameter로 시간과 온도를 혼합한 것이다.

$$P = (T + 273)(20 + \text{Log}t) \quad (1)$$

$P = \text{Larson-Miller Parameter}$

$T = \text{온도, } ^\circ\text{C}$

$t = \text{파단시간, hr}$

20 = 상수값

튜브내의 응력계산은 비교적 단순하게 계산할 수 있으나 현실적으로 더욱 알기 어려운 것은 과열기 튜브의 평균 운전온도이다. 보일러 튜브로 주요 사용되는 Cr-Mo강의 저합금강에 대한 스케일 두께와 관련된 식은 다음과 같다.

$$\text{Log } X = 0.00022(T + 460)(20 + \text{Log } t) - 7.25 \quad (2)$$

X 는 스케일 두께

벽두께는 산화와 부식으로 인해 감소하므로 시간에 따라 비례하는 것으로 간주한다. 어떤 시간에서 벽두께는 다음과 같다.

$$W = W_0 - C_R t \quad (3)$$

W_0 = 초기 벽두께, in

C_R = 부식율, in/hr

스케일로 인한 온도 증가분 δT 는 스케일 성장계수 k 를 이용하고 시간 t 와 상수 C 를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta R = k C t^{1/2} \quad (4)$$

이와같이 증가된 온도를 고려하여 식 (1)의 Larson-Miller Parameter를 이용하면 튜브에서의 부식을 고려한 수명을 계산할 수 있게 되어 더욱 정확한 잔존 수명을 예측할 수 있다.

3. 터빈 블레이드의 손상기구와 사고사례

3.1 터빈 블레이드의 손상기구

발전설비중 가장 중요한 회전체인 터빈에서 발생하는 손상사고는 블레이드에서 가장 많이 발생하는데 손상원인은 고중압 터빈 블레이드에서는 erosion 등에 의한 사고가 많고 저압 터빈 블레이드에서는 부식에 의한 손상이 많은 것으

로 분석되고 있다. 이러한 원인을 손상기구별로 구분하면 원인불명 26%, 응력부식균열 22%, 고주기피로 20%, 부식피로균열 7%, 크리프 균열 6%, 저주기 피로 5%, 부식 4%, 기타 10% 등으로 분류되어 부식에 의한 영향이 많음을 알 수 있다.

3.2 미국에서의 블레이드 손상사례 분석

3.2.1 조사배경

증기 터빈에 있어서 불시정지 원인중 가장 큰 요인으로 터빈의 블레이드 손상사고를 들 수 있다. 미국 EPRI에서는 미국 전역에서의 발전소를 대상으로 하여 블레이드 손상사례를 체계적으로 자세히 조사하였다.³⁾ 이 조사의 대상은 300MW 급 이상으로 한 개 이상의 블레이드가 안전성 또는 신뢰성에 문제가 생겨 제 기능을 못하는 경우를 대상으로 하였다. 블레이드에서의 손상사고라 함은 Fig. 1에서와 같은 블레이드 설비에서 vane 부분과 tiewire, tenons, shrouds, 블레이드 root 부분을 포함한 전체 블레이드에서의 정비 보수를 요구하는 손상을 말한다.

125개의 발전소를 대상으로 앙케이트 조사를 하였으나 80개 발전소만 응답하였으며 69개 발전소에서 손상사고가 발생하여 이용할 만한 자료를 파악할 수 있었다. 발전소 호기로는 192 unit에서 보고가 되었으며 블레이드 손상사고는 423회로 조사되었다. 블레이드 정비를 위하여 216,380시간 동안 발전소를 정지하였으며 이 정지시간 동안 발전손실에 따른 금액은 1조 1천억 원 정도이며 블레이드 정비에 소요된 금액은 8백7십억 원 정도로 추산되었다.

3.2.2 설비별 손상사고

터빈별로 조사한 바로는 저압터빈에서 가장 많은 사고가 발생하고 있음을 Table 2로 부터 알 수 있다. 블레이드 정비를 위한 평균비용은 저압 터빈이 가장 많이 소요되나 정비에 소요되

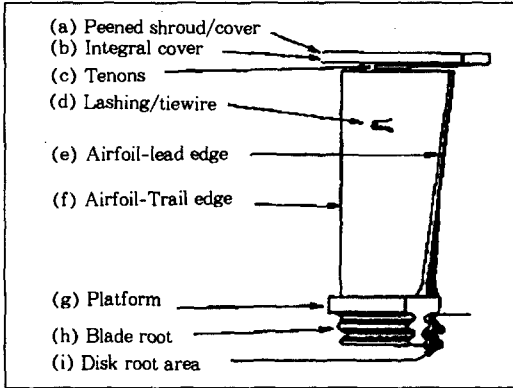


Fig. 1. Typical turbine blade figure.

Table 2. Summary of blade damage

구 분	저압터빈 블레이드	중압터빈 블레이드	고압터빈 블레이드
전체 정지 회수	345	47	54
평균 정지 시간	428 hrs	671 Hrs	644 Hrs
평균 정지 비용	226,100천원	117,500천원	73,000천원
평균 전력 손실 비용	2,307,700천원	3,750,200천원	3,411,400천원

는 시간은 고중압 터빈이 많이 소요되고 있어 발전손실로 발생하는 비용이 고중압 터빈이 많은 것으로 조사되었다.

저압 터빈에 있어서 사고는 최종단과 그 전단에서의 사고가 75%를 차지하고 있어서 대부분의 사고가 마지막 두단에 집중되고 있었다. 중압 터빈에 있어서는 58%가 제일단에서 발생하였으며 고압 터빈에서는 44%가 제일단에서 발생하였다. 따라서 고중압 터빈에서는 첫단에서 사고가 집중되는 현상을 보여주고 있다.

3.2.3 사고원인별 손상발생 현황

블레이드에서의 손상원인은 주로 저압 터빈에서는 부식에 관계되는 원인이 많고 고중압 터빈에서는 erosion에 관계되는 손상이 많이 발생하고 있다. 운용회사에 의하여 분류된 사고원인별 손상현황은 다음과 같다.

원인불명	36%
용력부식	22%

설계불량	13%
erosion	6%
시스템 공진	5%
유동가진	4%
급수처리불량	4%
water induction	3%
노즐 공진	2%
기타	5%

3.3 블레이드 수명평가 기술

블레이드의 상태를 진단하고 수명을 평가하기 위하여는 결합 탐지 기술과 수명 상태 평가 기술이 필요하다. 터빈 블레이드의 root, 몸체, tenon, shroud, tie wire 등의 부위는 파손에 이르는 많은 결합들이 발생할 가능성이 높은 부품이므로 미연에 적절한 비파괴 검사방법을 통하여 파손 예방에 많은 기여를 해오고 있다. 그러나 블레이드 구조의 복잡성 및 검사 방법의 한계성으로 인하여 미세한 결합검출에 어려움이 따르고 있는 실정이다. 기존의 비파괴 검사 방법으로 블레이드 검사에 주로 사용되고 있는 방법은 육안검사, 액체침투검사 및 자분 검사로써 표면 결합 탐지에 많이 사용되고 있다. 체적검사는 초음파 검사가 블레이드 몸체, tenon, shroud 부위에 사용되고 있고 root 부 검사는 원자력 발전소를 대상으로 기술이 개발되어 있으나 root 부위의 형상을 알아야 하는 문제가 있다. 여기에서는 비파괴 결합탐지 기술에 대하여는 생략하기로 하고 수명상태 평가 기술에 대하여 설명하고자 한다.

3.3.1 컴퓨터 프로그램에 의한 방법

컴퓨터의 구조해석용 프로그램을 이용하여 블레이드의 수명을 평가하기 위하여는 블레이드의 수명에 영향을 미치는 다음과 같은 변수들을 알아야 한다.⁴⁾

- 1) 원심력, 증기에 의한 굽힘력, 열구배, 조립 공차, geometric untwist, 결합 공차, 결합 구속

력 및 tenon 냉간 가공 등에 의하여 발생하는 정응력(정상상태 응력).

2) 비정상 증기력, nozzle wakes, 열적 과도현상, 기동-정지 과도현상, 연속적인 아크 작용, per-revolution diaphragm harmonics 및 유동 불안정 등에 의한 동적 응력. 이러한 응력들은 리벨팅과 조립 오차에 의한 예 잔류하중의 효과 뿐만 아니라 root attachment, vane-platform fillet, tie-wire fillet 또는 구멍선단 및 cover나 결합의 불일치 등에서 발생하는 기하학적인 응력 상승의 효과를 포함한다.

3) 블레이드의 형상에 의한 구조적 강성과 체적 특성과 블레이드의 그룹에 의한 주파수와 회전속도에 의한 주파수와의 조화.

4) 극한강도, 피로강도, 크리프강도, 인성, 계의 감쇄특성 및 블레이드 재질의 내부식성/내침식성 등과 같은 재료 특성.

5) 과도한 원심력, 과속도 기동 및 운전의 기동-정지 사이클 등으로 생기는 하중-이력 명세. 그리고, diaphragm 유동 분산, 연속적인 아크 인정 및 유동 불안정 등으로부터 일어나는 여차 스펙트럼으로 생기는 하중-이력 명세.

위와같은 여러 가지 블레이드 형상에 대한 정응력과 동응력 계산과 누적 손상을 계산하는 과정을 통하여 실제 응력을 해석한 결과가 Fig. 2와 같다. 재료 물성, 운전 이력 및 응력 값등의 불확실 정보 때문에 현재 알고 있는 지식을 이용한 블레이드 수명 평가는 실제 수명의 3-4 배 내에서 가능하므로 그 정확성은 매우 낮은 상태에 있다. 이러한 관점에서 피로응력, 크리프 응력 및 균열발생에 미치는 이들의 영향에 대한 컴퓨터 해석은 블레이드의 최적 설계에 이용되는 것은 가능하지만, 정확한 수명을 예측하기에는 상당히 어려운 면이 있다. 그러나 이런 프로그램 해석에 의하여 블레이드 root의 내부 표면에서 균열이 발생하는 시점을 예측하여 정밀 검사주기를 결정하는데는 이용할 수 있다.

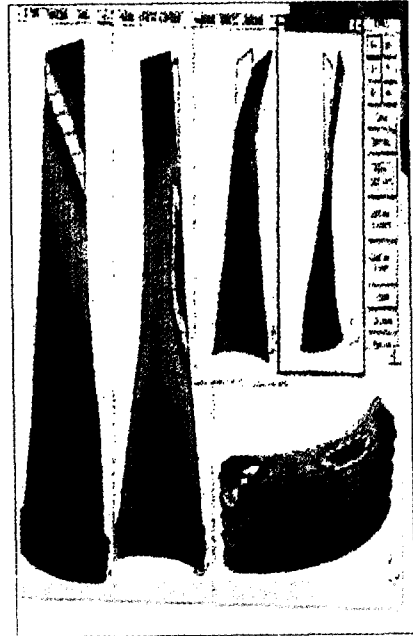


Fig. 2. Stress analysis results of blade.

4. 결 론

세계적으로 화력발전소의 수명연장을 위하여 노력하고 있는 가운데 주요 설비인 보일러 튜브, 터빈의 블레이드 설비에서의 부식저감 기술에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 보일러 튜브에서의 부식에 의한 손상은 전체 사고중 19%에 해당되며 튜브의 수축에서는 용존산소, 알칼리 및 암모니아에 의한 부식등이 발생하고 있다.

2) 보일러 튜브의 가스측에서의 부식은 고온 부식과 저온 부식으로 크게 구분되어 발생하므로 운전 및 재질선택에 있어서 각각의 경우를 고려하여 운전하여야 한다.

3) 보일러 튜브의 수명을 예측할 때 단순한 온도와 사용 시간만을 고려하는 것이 아니라 부식현상을 고려하여 스케일의 두께를 고려한 온도상승분 까지 계산하여 정확한 수명을 예측하여야 한다.

4) 블레이드의 손상은 고압 터빈에서는 erosion에 의하여 저압 터빈에서는 부식에 의하여 주로 사고가 발생하고 있다.

5) 블레이드 수명예측 기술은 아직 정확성이 떨어지지만 컴퓨터 해석에 의한 프로그램 개발 시 재질의 내마모성, 내침식성을 고려하여 수명을 평가하여야 할 것이다.

References

1. D. N. French, Metallurgical Failures in Fossil Fired Boilers, 2nd Ed, p. 2~3, John Willey & Sons, New York (1993).
2. Corrosion and Countermeasure of Power Plant, Water-side Corrosion and Countermeasure of Boiler Tube, Fossil and Nuclear Power Generation, Vol. 47, No. 7, p. 784, 1996.
3. R. P. Dewey, N.F.Rieger, Survey of Steam Turbine Blade Failures, EPRI Report CS-3891, p. 3~5, 1985.
4. R.Viswanathan, Damage Mechanisms & Life Assessment of High Temperature Components, p. 314~317.