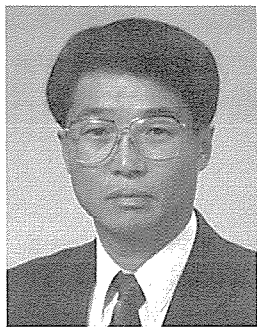


보일러설비 손상진단

The Damage Assessment of Boiler



한전기공(주) 기술개발처
기획협력팀장 공학박사 김 승 태
T : (0342)710-4141

1. 서 론

발전설비는 장시간사용에 따라 다양한 손상을 경험한다. 발전설비의 건전성을 확보하기 위하여 손상정밀진단, 수명평가, 그리고 정비 및 교체의 세 가지가 필수적이다. 여기에서는 발전설비중 보일러설비를 예로 들어 보일러설비의 손상의 원인 및 진단기술을 소개하고, 한전기공(주)에서 수행하는 발전설비 손상진단 기법을 간략하게 소개하였다. 본 자료는 1999년 9월 3일에 있었던 한국열병합발전협회 강의 내용중 일부를 요약한 것이다.

보일러 설비의 손상원인은 오랜 사용시간, 고온환경, 부하조건, 부식환경 등이 있으며, 대개의 경우 복합적으로 작용하여 손상이 발생한다. 또한 버너의 정렬불량 등의 실수에 의한 손상도 있다. 이러한 원인에 의해서 발생하는 보일러 설비의 손상기구는 산화부식, 크리프, 피로, 응력부식균열, 부식피로 등이 있으며 이 역시 복합적으로 발생한다. 따라서 보일러 설비의 수명평가가 필요하며, 이를 위해서는 손상형태를 조사하고, 손상 기구 및 원인을 정확히 분석하는 것이 필수적이다. 즉, 보일러 설비의 수명평가의 목적은 손상원인을 찾아내어 정량화 하는 것이다.

일반적으로 재료물성의 변화를 알아내어 이를 정량화 하는 것이 수명평가이므로 수명평가방법은 파괴적 방법, 비파괴적방법, 해석적방법으로 대별된다. 파괴

적방법은 설비에서 직접 시험편을 채취하여 파괴적으로 검사하는 방법이고, 비파괴적방법은 직접 시험편을 채취하지 않고 현장에서 간접적으로 손상형태를 검출하는 방법이며, 해석적방법은 계산을 통해 온도, 응력분포를 알아내고, 가상적인 균열을 형성시켜 피로수명을 알아내는 방법이다. 수명평가에 사용되는 공통적인 세부기술과 요소기술을 표 1에 정리하여 나타내었다.

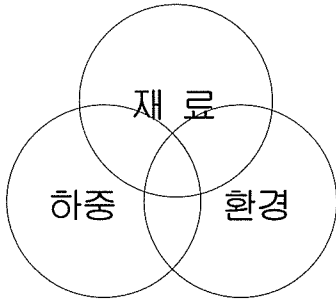
<표 1> 수명평가에 사용되는 공통적 세부기술 및 요소기술

공통적 세부기술	적용 요소기술
사용 중인 설비의 실제 응력분포 조건 및 요소 응력을 알아내는 기술	유한요소해석 , 고온변형계이지 등을 이용한 응력측정법
설비구성 재료의 사용시간 또는 조건에 따른 재료물성의 변화를 알아내는 기술	파괴적 방법, 비파괴적 방법
정량적으로 수명을 평가하는 기술	균열 발생 및 성장 해석

2. 보일러의 손상기구

재료의 손상은 그림 1과 같이 재료, 하중, 환경의 3 요소가 중첩되었을 때 나타난다.

<그림 1> 재료손상 요소



이러한 재료의 손상은 크게 내형적 변화와 외형적 변화로 나눌 수 있으며, 내형적 변화에는 결정립 변화, 석출물, 탄화물 등의 조대화, 용질 소실구역의 존재, 그리고 재질 열화 등을 들 수 있다. 외형적 변화는 그 원인에 따라 화학적, 기계적요인으로 분류된다. 화학적 요인에 의한 손상에는 부식 및 두께 감육, 피팅, 응력 부식균열(SCC), 부식피로, 수소취성 등이 있으며, 기계적 요인에 의한 손상에는 피로, 크리프, 마모, 침식 등이 있다. 이밖에 재질열화에 의한 취성파괴가 있다.

보일러에서 문제가 되는 부위는 주로 고온·고압부에서 연소가스와 수증기에 의한 산화부식환경에 접하는 과열기, 재열기 등의 열교환기 튜브 및 비가열 내압부인 헤더, 배관 등이다.

<표 2> 부품별 손상비율

부 품	비 율
화로	32%
과열기	31%
재열기	20%
절탄기	4%
드럼 외	13%

표 2의 통계자료는 보일러 내압부의 부품별 손상 정도를 분류한 자료이고 표 3은 원인별 손상정도를 분류한 자료로서 종합적으로 살펴보면 경년열화를 유발하는 주요 손상기구는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 크리프
- 피로
- 부식 및 침식

<표 3> 원인별 손상정도 비율

원인	비율
열피로	47%
부식,마모	16%
재료, 시공불량	16%
크리프	11%
(역학적) 피로	5%
기타	5%

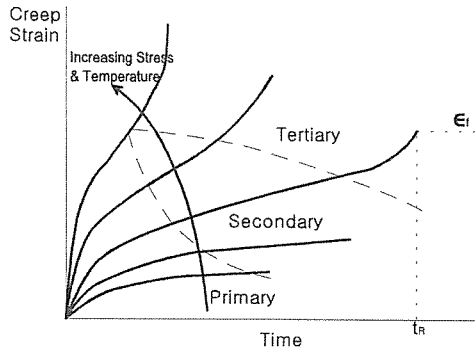
가. 크리프손상 형태

크리프는 고온에서 힘을 받아 시간이 경과됨에 따라 변형률이 누적되어 가는 손상으로서 고온·고압부에서는 내부유체압력에 의해 진행되는 크리프손상이 수명소비의 주 요인이 된다. 이때 크리프손상은 튜브의 팽창 등과 같은 변형이나 결정입계에 존재하는 기공(void) 등의 형태로 나타난다.

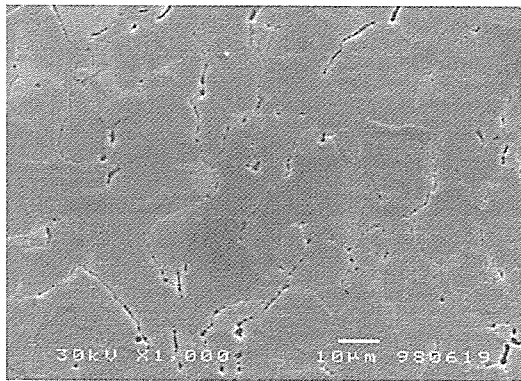
크리프손상은 기공의 발생과 합체를 거쳐 미소균열이 발생하고 그것이 성장해 파손에 이르는 과정을 밟는다. 이와 같은 크리프손상과 함께 탄화물이나 석출물의 석출거동과 관련된 재질열화도 진행되어 재료의 강도 저하를 유발시키기도 한다. 이외에도 보일러 튜브에서는 스케일과 관련된 국부적인 과열에 의하여 크리프파괴가 일어날 수 있다. 크리프변형은 사용시간에 따라 그림 2와 같이 명확히 구분된 세 영역(Primary, Secondary, Tertiary)으로 나타나며, 온도 및 응력의 증가에 따라 기울기가 증가한다.

그림 3에는 SA-210 탄소강 보일러 튜브에서의 크리프 기공을 보여주고 있다. 크리프 기공은 주로 결정립계에서 나타났다.

<그림 2> 응력 및 온도변화에 따른 크리프양상 변화



<그림 3> 보일러 튜브의 크리프 기공



나. 피로손상 형태

피로손상은 응력이 반복적으로 작용되어 균열이 발생, 성장되어 일어나는 손상을 총칭하는 것으로서, 보일러의 경우 온도분포와 온도변화에 의한 열응력의 반복에 의해 발생하는 열피로가 주로 문제가 된다. 특히 헤더, 배관 등의 후육부에서는 기동정지와 부하변동 등의 가혹한 운전에 따라 생기는 열피로 손상이, 정격 운전시의 크리프손상과 중첩되어 수명 소비의 주원인이 된다. 이것을 크리프·피로의 상호작용이라 하는데, 더욱 DSS(일일기동정지) 등과 같은 빈번한 운전시에는 대단히 중요한 문제가 된다. 또한 보일러 튜브에서는 구조적으로 열팽창이 구속되거나 내외측 표면의 온도차에 의하여 열응력이 반복됨으로써 열피로의 발생 원인이 된다. 이와 함께 부식과 중첩되어 부식피로의 형태를 취할 때도 있다.

<그림 4> 전형적인 S-N 피로곡선

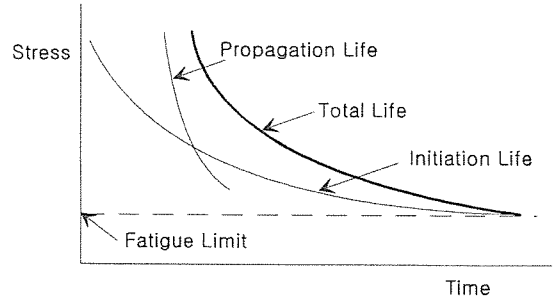


그림 4와 같이 피로수명은 피로균열발생수명과 피로균열성장수명으로 나뉘며, 대부분의 구조용 재료에서는 피로균열이 더 이상 성장하지 않은 피로한계가 존재한다.

<그림 5> 보일러 튜브의 부식피로균열

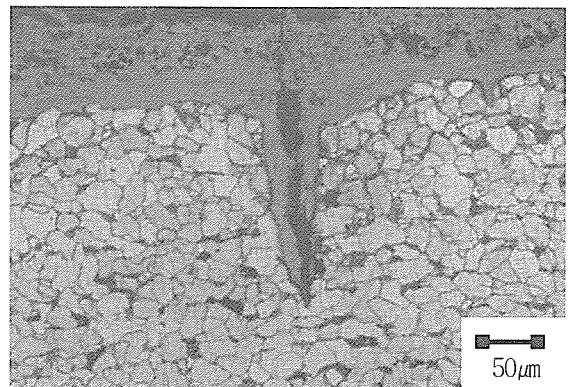


그림 5는 보일러 튜브에서 나타나는 부식피로균열을 보여주고 있다. 이 경우에서 피로는 열피로로 판명되었다.

다. 부식·침식의 형태

부식환경 하에서 사용되는 보일러 튜브의 경우 연소가스에 접하는 외면에서 고온부식, 저온부식, Ash Cut 등이 생기고, 물이나 증기에 접하는 내면에서는 수증기 산화와 알칼리 부식 등이 문제가 된다. 이와 같이 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)은 응력과 부식분위기의 조건이 아래 그림과 같이 중첩되면 발생하게 되고, 이로 인해 피로한도가 감소 또는 소멸되는 현상이 생기게 되며, 일반적으로는 부식피트(pit)로부터 균열이 발생하게 되어 내측에서 외측면으로 진전된다. 이러한 응력부식균열은 대부분의 보일러튜브

에서 자주 발견되며, 주로 결정립계를 따라 성장한다.

라. 핀홀

보일러 튜브 내외면에서 점식이 국부적으로 발생할 때나, 재질결함 또는 용접결함부위, 그리고 재 및 배출수에 의한 국부적인 마모부위에서 주로 나타나며, 그림 6에 보일러 튜브에서 발견된 핀홀결함이 나타나 있다.

3. 손상진단법

<그림 6> 보일러 튜브 핀홀



일반적으로 손상진단은 파괴적방법, 비파괴적방법, 그리고 해석적방법으로 대별할 수 있으며, 대부분의

발전설비에서의 시편채취의 어려움으로 비파괴적인 방법이 주로 사용되고 있다. 보일러 튜브의 경우 주기적으로 시편을 채취하여 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법을 병행하고 있다.

각 손상진단법의 종류, 장단점, 평가항목 등을 표 4에 정리하여 나타내었다.

가. 파괴적 방법

1) 크리프 가속시험

보일러 튜브와 같이 비교적 용이하게 시편채취가 가능한 경우에는 채취 시험편을 직접 손상평가 시험하여 그 결과로서 손상상태를 진단한다. 이 방법은 손상진단 결과를 발전소 운용대책에 신속하게 반영하여야 하므로 정기점검 기간과 같은 단기간 내에 결과를 얻을 필요가 있다. 따라서 평가 대상기기의 사용조건이나 온도, 응력을 높은 가속조건에서 시험을 행하게 된다. 이러한 가속시험을 이용하여 시간, 온도 변수에 의한 잔여수명을 평가하는 방법으로 대표적으로 Lason-Miller Parameter 방법이 많이 사용되고 있다.

<표 4> 수명평가법의 분류

구 분		장 단 점	평 가 항 목
파괴적 방법	크립파단시험 파괴인성시험 - 샤프피 충격시험 - 소형편치시험	- 샘플채취가 가능한 부위 적용 - 가장 정밀도가 높은 평가방법	- 크리프강도 평가 - 파괴인성치 평가 (FATT, DBTT 등)
비파괴적 방법	표면복제법 - 조직대비법 - 결정립변형법 - A 변수법 - 기공면적율법 - 기공면밀도법 - 미시균열법 경도법 입계부식법	- 파괴법에 비해 효율적, 경제적인 평가 가능 - 기기 내부 및 장소가 협소한 부분은 적용이 곤란	- 크리프 및 피로손상 정도 평가 - 입계부식법은 파괴인성치 평가
해석적 방법	균열발생해석 균열진전해석	- 운전형태변화에 따른 평가에 적합 - 손상의 진행에 따른 합리적 운전형태 제시가능	- FEM을 통한 결함의 정성적 평가

2) 소형편치 시험법

보일러 튜브처럼 시편채취가 용이하지 않은 헤더, 배관 등의 후속 부품에 대하여는 부분적으로 시편을 채취하여 손상을 진단한다. 이때에는 대상기기의 기능 및 성능을 저하시키지 않을 정도의 소형시편을 채취하는 경우가 많으며, 특히 크리프 손상진단에 많이 사용되고 있다.

3) 열피로시험

고온고압 운전조건에서의 발전설비 손상원인을 살펴보면, 기계적응력과 함께 열응력을 받고 있으므로 외부 응력의 변화와 함께 온도의 변화도 수반되는 열피로현상에 의한 손상이 가장 심각한 것으로 나타나고 있다. 따라서 기동, 정상운전, 정지의 반복으로 나타나는 고온 저주기 피로의 균열전파특성을 갖는 고온 저주기 피로의 균열전파특성은 입자내 파괴를 일으키는 반복수 의존성과 입계 크리프파괴를 일으키는 시간의존성으로 구별된다.

나. 비파괴 손상진단법

1) 경도측정법

대부분의 재료에서 그 경도를 알면 강도, 내마모성, 변형저항 등을 알 수 있기 때문에 경도값 자체를 알기 위해서 뿐만 아니라 그 밖의 다른 성질을 추측하기 위하여 경도시험을 한다.

이러한 경도값과 다른 성질과의 관계는 이론적인 것이기보다는 경험적인 것이며, 측정조건에 따라 많은 변화를 보이므로 시험조건을 항상 일정하게 해 주어야 한다.

경도시험법은 시험하는 방법에 따라 압입경도, 동적경도, 굽기경도 등으로 나뉘어진다.

- 압입경도시험법 : 압자로 시험편을 누를 때 나타나는 변형저항의 크기를 경도로 나타내는 것으로 브린넬, 로크웰, 비커스 경도 등이 있다.
- 동적경도시험법 : 압자로 시험편을 충격적으로 압입할 때 나타나는 변형저항의 크기 또는 압자의 반발정도를 경도로 나타내는 것으로, 쇼아, 에코팁 경도 등이 있다.

이 중 현장에서 직접 경도값을 얻기 위하여는 주로 전자식 쇼아 경도계나, 에코팁 경도계를 많이 이용하

며, 근래에는 측정기술의 발달로 초음파경도계를 많이 사용하고 있다.

이러한 경도시험을 통하여 손상평가하는 경우에는 경도값과 다른 성질과의 관계를 나타내어주는 수식, 표, 그림 등의 데이터베이스가 필수적이다.

2) 표면복제법

고온설비에서의 금속조직학적 방법은 손상을 직접 검출할 수 있기 때문에 실용성이 크고, 높은 정확도의 수명평가가 가능하다. 특히 보일러 재질의 경우에는 용접성을 높이기 위하여 탄소함유량이 적은 재질을 많이 사용하는데, 이러한 재질에서는 사용에 따른 물성치의 변화가 작기 때문에 물성치의 변화보다는 금속조직의 변화를 관찰하는 것이 더 적합하다. 그러나 대부분의 경우에는 설비로부터의 시험편 채취에 제약을 받기 때문에 이를 위하여 현장에서 이용할 수 있는 포터블 현미경을 사용하기도 하지만, 해석능력이 떨어지게 된다. 따라서 금속표면조직을 다른 물질에 복제시켜 실험실에서 간접적으로 조직을 관찰, 분석하는 레플리카법을 많이 사용한다. 손상진단에 이용하는 비파괴적인 레플리카법은 단지 표면만을 관찰 가능하다.

레플리카법을 이용한 손상진단법에는 다음과 같은 종류가 있다.

- ① 크리프에 의한 석출물, 탄화물 등의 변화에 착안하여 표준조직과의 대비 또는 변화율과 크리프 손상량과의 상관성을 이용하는 조직대비법,
- ② 크리프에 의한 결정립의 변화정도를 이용하는 결정립변형법,
- ③ 관찰 결정립계 총수에 대한 크리프 기공발생 입계수의 비(A 파라메타)와 크리프 손상량과의 상관성을 이용하는 A 파라메타법,
- ④ 관찰면적에 대한 크리프기공 면적의 비와 크리프 손상과의 상관성을 이용하는 크리프 기공 면적률법,
- ⑤ 단위 면적당 크리프기공의 수와 손상과의 상관성을 이용하는 크리프 기공 면밀도법,
- ⑥ 피로에 의한 미소균열길이와 피로손상량과의 상관성을 이용하는 미시균열법.

다. 해석적 손상진단 방법

과과적, 비과과적 방법은 평가시점에서의 손상상태를 직접 평가하는 것이지만, 그 후의 발전소 운용형태에 따른 손상평가에는 반드시 적합하다고는 할 수 없다. 이에 반하여 간접적인 평가방법이지만, 과제 및 향후의 운용형태에 따른 손상평가가 가능하며, 손상의 진행에 따른 합리적인 운용법 등을 제시할 수도 있다.

또한 해석적평가는 실기의 임의 부위에 적용할 수 있고, 비과과적 평가를 실시해야 하는 손상누적 부위를 명확히 설정할 수 있다. 이 외에도 크리프, 피로 손상의 진행정도를 온라인으로 모니터링할 수도 있다. 그러나 해석적평가에는 재료강도 특성 등과 같은 해석에 필요한 데이터와 관련되어 오차가 유발될 수 있다는 단점이 있다.

해석적 평가는 다음과 같은 순서로 진행시킨다.

1) 유한요소법을 이용한 컴퓨터해석 :

이 단계에서는 응력 및 변형 집중부위를 찾아내어 비과과검사 또는 진단 부위를 설정할 수 있으며, 다음단계에 필요한 변형 및 응력값을 산출한다.

2) 비과과검사에 의한 결함의 유무 판정

과거의 손상경험이나, 유한요소해석의 결과를 토대로 선정된 부위를 중심으로 비과과검사를 행한다. 이 단계에서 결함이 검출되지 않으면, 균열발생수명을, 결함이 감지되는 경우에는 파괴역학적 해석에 의한 균열성장수명을 산출한다.

3) 크리프 및 피로 조건을 가미한 균열발생 및 성장 평가

운전이력, 부품형태, 재료물성치 등을 근거로 수행된다.

해석절차의 첫 번째 단계는 잠재적인 손상범위와 손상 과도상태(transients)를 명확하게 설정할 필요가 있다. 이러한 분석이 없을 경우에는 비과과검사를 통해 문제점을 찾아야 하지만, 이 경우에는 손상원인을 규명하기에는 상당한 어려움이 있게 된다.

라. 손상진단 절차

발전설비 손상진단은 다음과 같은 절차로 이루어진다.

1) 자료 검토

- 손상이력 및 추이분석

- 운전이력(예를 들면, hunting이 빈번히 발생, 빈번한 기동/정지 등)

2) 현장진단

- 튜브 육안검사, 두께측정
- 보일러 팽창량 측정 및 상태 점검
- 배관지지 상태 점검

3) 정밀진단

- 손상튜브 채취 : 자료검토 및 현장진단 결과를 토대로 튜브시편을 채취한다.
- 미세조직, 균열, 파면조사

4) 파괴기구 결정

- 주요 손상기구 결정

5) 손상원인규명

- 현장진단, 정밀진단, 파괴기구로 미루어 가장 타당한 손상원인을 규명한다.

6) 수명평가

- 해석적 피로수명평가
- 교체결정

7) 정비 및 방지대책

- 튜브 교체
- 지지장치 개조
- 기타 설비개선

손상원인은 표 5와 같은 시험을 통하여 분석된다.

4. 결론

발전설비의 손상진단은 단순히 연구실에서만 연구되는 학문적 가치를 추구하는 분야가 아니라 발전소 실무현장과 정비분야 전문가 및 연구인력이 양성되어야 차질 없이 수행될 수 있다.

따라서 현재까지 언급한 손상진단의 방법 및 절차는 현장실무자, 감독자를 위한 기술의 이해 차원에서 단순화된 개념과 검사기법에 대해 기술한 것으로 이해하기 곤란한 분야나 명확하게 규명되지 않은 분야는 생략하였다.

<표 5> 재질시험을 통한 손상원인분석

시험종류	시험목적	상세항목
육안검사	손상된 부품의 외관을 관찰하여 그 특징을 파악	- 표면부식상태 : 산화물 두께 - 균열 시작점 - 피로파괴 등
미세구조 검사	재료열화정도 파악	- 미세구조특성검토 · 결정립 형상 및 분포 · 기공, 개재물, 균열부위 검사 · 취화상 생성여부
성분분석	기지, 부식생성물 등의 성분분석을 통하여 파괴간접원인 검토	- EDS 분석 : 기지, 입계, 산화스케일의 성분분석 - 습식분석 : 재료성분의 정량분석
기계적시험	계속사용을 위한 기준값 만족여부 판단	- 경도시험 : 경도값으로 사용재의 경화정도 파악 - 인장시험 : 항복강도, 인장강도, 연신율
파면검사	직접적인 파괴원인 분석	- 파괴원인에 따라 파면은 특정형태를 보임 · 피로파면 : Beach mark, striation · 크리프파면 : 입계파괴 등

그러나 실제로 손상진단을 수행할 경우 어떠한 설비에 대해 일부의 기술만을 적용하게 되면 그 정확도가 낮아져 신뢰성을 확보하기가 어렵기 때문에 여러가지의 방법을 복합적으로 사용하여 정확도를 향상시키는 것이 바람직하다.

현재 국내에 한전의 설비중 15년 이상된 노후발전설비는 약 30여기 정도 있는 것으로 파악되고 있다. 이 들중 상당수가 체계적인 정비서비스를 받지 못한 설비로서 설비의 많은 문제점을 안고 현재 운전되고 있다. 누차 강조하다시피 발전설비 부속기기는 크리프, 피로, 부식 등 여러 가지 원인으로 손상되며, 사용기간이 경과함에 따라 손상정도(열화)도 심화된다. 설비 손상은 균열, 파괴의 형태로 나타나고 불시정지를 야기시킬 뿐 아니라 운전/유지비용을 상승시켜 설비의 경제적 운영을 저해시킨다. 따라서 설비의 현재 상태를 정확하게 파악하는 것은 대단히 중요한 일이고 이를 위하여 설비의 정밀진단을 수행한 후 이로부터 주요 손상기구 및 원인을 찾아내어 향후 동일형태의 손상

발생을 억제하고 향후 적절한 검사주기 및 교체주기를 설정하는 방지대책을 수립해야 한다.

5. 회사소개

한전기공(주)은 93년 본사에 사업개발처 발족을 계기로 그 동안 산업설비업체의 문제발생시의 기술 및 인력지원 형태에서 벗어나 공기업으로서 우수정비기술을 국가와 사회에 환원하겠다는 경영자의 의지 하에 산업설비 업체의 정비에 참여하고 있다. 설비 수명진단 및 개보수, O/H 공사 등 정비에 관심이 있는 업체는 다음 주소로 연락바랍니다.

한전기공(주) 사업개발처 국내사업팀
 부장 송주척(0342-710-4471)
 Home Page : www.kps.co.kr