

보일러 튜브 잔존수명 평가



한전전력연구원
엔지니어링센터
기계설비진단팀
책임전문원 김용찬
Tel : (042) 865-7520

1. 서론

보일러 튜브 파열을 방지하기 위해서는 초기 튜브 재질수명에 대한 이해와 사용 중인 튜브의 압력 및 온도 조건에서 계산된 잔존수명에 대한 이해가 필요하다.

잔존수명을 평가하는 방법은 최종파단 기준과 손상의 누적에 따라, 현재의 손상정도를 추정한다. 파손 방지와 교체 결정을 위해서는 튜브 각각에 대하여 정기적으로 수행된 평가가 행해져야만 한다.

따라서 보일러 튜브의 잔존수명을 산출하는데 사용되는 방법은 대하여 살펴보고자 한다. 튜브는 크리프 영역에서 운전되는 과열기와 재열기 튜브와 크리프 영역 아래의 낮은 온도에서 운전되는 수냉벽과 절탄기 튜브로 나누어진다.

2. 크리프 영역에서 운전되는 튜브들의 평가

가. 개요

과열기 및 재열기 튜브는 크리프 영역에서 사용되며, 크리프 변형은 온도와 응력 증가에 따라 악화된다. 튜브의 금속온도는 증기 측에 형성된 산화물이 튜브 재질과 증기와의 단열역할을 하여 운전시간이 증가함에 따라 상승한다. 또한, 응력도 화염 측의 부식 또는 침식과정에 의한 두께 감소로 증가할 수 있다.

과열기 및 재열기 튜브는 보수적인 크리프 기준에 따라 제한된 수명으로 설계된다. 따라서 가속 손상 메커니즘 조건이 발생되지 않더라도 파손이 발생할 수 있다.

크리프-파단 수명은 궁극적으로 특정 튜브에 대한 응력과 온도의 이력이 결정되면 감소될 것이다.

지난 20여 년간 고온 크리프와 부식 조건에서 사용되는 과열기와 재열기 튜브의 잔존수명을 평가하는 많은 기술이 개발되었다. 표 1은 44가지 방법 중에서 현재 널리 사용되고 있는 3가지 방법을 제시하였다. 제시된 평가기술의 주된 목적은 튜브가 사용되고 있는 온도를 결정하는데 있다. 이러한 온도 조건과 튜브재질의 크리프-파단치를 기초로 하여 소비된 수명 및 잔존 수명의 예측이 가능하다.

하지만, 정확한 온도를 추정하는 것은 어려운 일이다. 예를 들면, 튜브 온도는 실제 사용 조건과 증기 측에 생성되는 산화물 등에 의해 급격하게 변화되며, 또한 설치된 수백 개의 튜브에 흐르는 가스 유량과 금속온도가 서로 다르기 때문에 잔존 수명을 해석하는 것은 더욱더 복잡해진다.

내부 산화스케일 평가에 기초한 방법을 다른 평가방법들과 병행하여 사용할 경우에는 개별적인 평가방법들의 장점들을 명확하게 인식하여 장점들이 서로 잘 반영될 수 있는 방법들이 선택되어야 한다. 예를 들면, 미세조직에 기초한 평가방법(구상화 정도, 탄화물 분해, 크리프 캐비테이션 정도)과 경도를 기초로 한 평가방법

[표 1] 일반적인 과열기/재열기 잔존수명 평가 기법

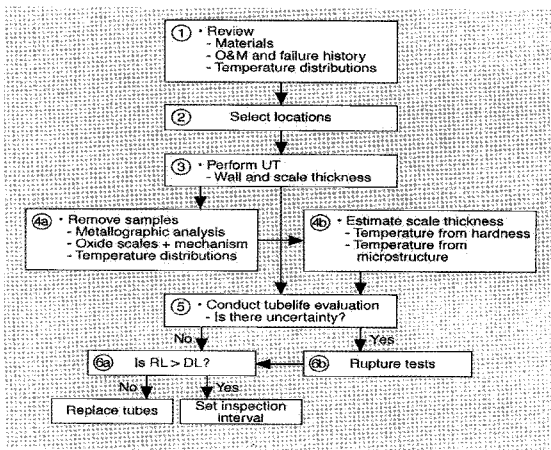
1. 튜브 벽과 스케일 두께의 NDE 또는 파괴적인 방법, 그리고 미세조직 분석, 산화 스케일 분석방법(43%)
2. UT에 의한 벽 두께 측정: 몇 년을 주기로, 적어도 2번이 측정이 필요함(34%)
3. 열전대에 의한 튜브 온도의 직접적인 측정(25%)
4. 미세조직 기법(25%)
 - 기동
 - 탄화물
 - 미세조직 카탈로그
 - 경도
5. 파손비율의 외삽법(16%)
6. 코달 시험편에 대한 일방향 축 시험(14%)
7. 파열 시험(2%)
8. 운전이력에 대한 계산

은 튜브의 상태에 대한 평가가 보완될 때 유용하다. 스케일이 박리되거나 이전에 수행된 화학세정으로 정확한 산화물 두께 측정이 어려울 경우에는 증기 측 산화물 측정 기술을 사용할 수 없을 것이다. 적절한 화학세정에 따른 잔존수명의 증가에 대한 예측도 고려할 필요가 있을 것이다. 여기서는 주로 산화물 스케일을 측정하는 방법을 중심으로 기술하고자 하며, 과거의 파손 사례를 통계적으로 해석하는 방법에 대해 일부 덧붙였다.

나. 산화 스케일 평가방법을 사용하여 과열기/재열기 튜브의 잔존수명 평가

과열기/재열기 튜브의 잔존 크리프 수명을 예측하는 방법 중에서 증기 측 산화물 두께와 튜브 벽 두께를 측정하는 방법이 가장 널리 사용되고 있는 평가방법이다. 과열기와 재열기 튜브에 대한 상태를 평가하는 방법 중 산화물 스케일을 사용하는 방법이 가장 적은 비용을 투입하고도 높은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

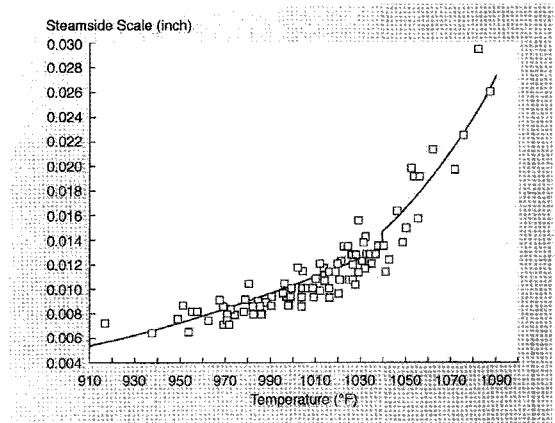
[그림 1]은 전체적인 흐름을 도식화 한 것이다. 스테인리스강과 이종금속 용접에 관한 절차도 개발되고 있다. 첫 번째 단계는 튜브와 튜브의 조합 중 위험 개소를 식별해야 한다. 다시 말하면, 증기 측 산화물의 두께가 가장 두꺼운 부분과 두께가 가장 얇은 개소를 파악하는 것을 말한다(그림 1]의 1, 2, 3단계). 과열 튜브군의 수백 개의 튜브에 흐르는 연소가스 및 금속온도의 분포는 보일러의 운전조건의 함수로 나타날 것이다. 결과적으로 크리프와 부식 속도의 차이가 발생된다. 잔존 수명 평가의 목적 중 하나는 튜브 손상에 따른 예측되지 않은 정지를 예방하기 위함이다. 따라서 성공적인 평가를 위하여서는, 평균적인 조건이 아닌 가장 가혹한 운전조건에 있는 가장 위험성이 큰 개소를 조사하는 것이 필요하다.



[그림 1] 과열기/재열기 튜브의 잔존수명평가 개요 (RL : 잔존수명, DL : 요구수명)

예측의 정확성은 증기 측 산화물 두께에 대한 지식에 달려있다. 초기에는 산화물 측정을 위하여 샘플링과 파괴적인 방법을 사용하였다. 이러한 파괴적인 시험법은 여러 가지 문제를 발생시켰는데, 그 중 한 가지는 샘플링 튜브 위치선정과 통계적 분석을 위한 많은 수의 튜브가 필요하게 되는 등이 문제시되어 왔다. 지난 수년간, 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법을 사용하여 측정된 데이터 간에 서로 비교하는 연구들이 진행되어 왔다. UT 방법은 산화물 두께가 최소 0.05mm~0.1mm 이상에서 적용이 가능한 방법이다.([그림 2] 참조)

튜브 샘플링은 입력정보 또는 분석과정 중 불확실한 부분을 증명하고자 할 때 일반적으로 추천된다. 샘플링 튜브를 가지고 금속조직 시험과 가속시험 등을 수행한다. 잔존수명 평가의 최종단계는 결정 단계이다. 튜브의 잔존수명(RL)이 요구수명(DL)보다 크다면, 재검사 주기를 선정하고, 그렇지 않다면 튜브 교체를 검토하도록 한다.



[그림 2] 금속온도와 산화물 두께의 관계

다. 산화 스케일 성장법칙

증기측 산화물의 성장 역학에 관한 여러 가지 식이 존재한다. 이러한 식은 산화 스케일의 형상을 기준으로 예측하였다. [표 2]는 다양한 식의 일반적인 형태를 나타내었다.

다음은 Paterson, Moser, Rettig에 의해 제안된 산화성장 식이다.

$$x = kt^n$$

여기서, x = 산화물 두께(mils)

t = 시간(Hr)

n = 1/2.6에서 1/3.0 = T/4390°R

k = 비례상수 = A U^{P^{0.2}} exp (T/C₂) / C₃

A = 2,25Cr-1Mo와의 대비 산화의 상대 속도 지수

U = 설비 특성과 관련된 상수(일반적인 범위는 0.8~1.2임)

P = bulk steam pressure, psi

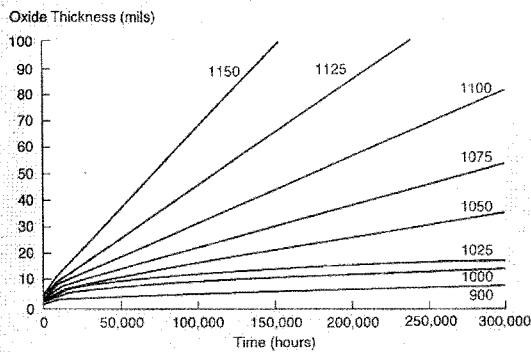
T = 절대 온도, °R

C_2, C_3 = 실험 계수
= 243° R 와 9.535×10^6

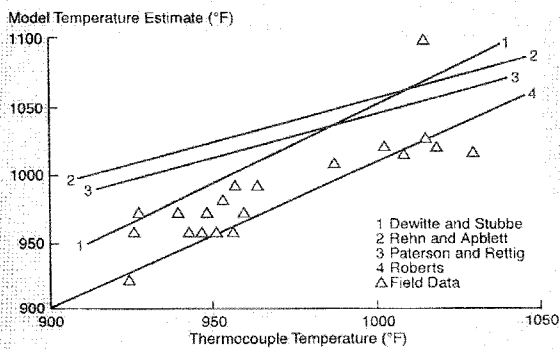
[표 2] Cr-Mo 강에 대한 산화물 생성 관련 식

일반적 표현식	개략적 관계	연구자
$\log x = A + B(LMP)$	$x^3 = kt$	Rehn and Apblett
$\log x = A + B(LMP)$	$x^{2.1 \text{ to } 2.6} = kt$	Paterson and Rettig
$x^2 = kt$	$x^2 = kt$	Dewitte and Stubbe
$x = \frac{At}{B+Ct} Dt$	$x = kt$	Roberts
$x = k(t, A, P)^{0.30 \text{ to } 1.26}$	$x^{2.6 \text{ to } 3.0} = kt$	Paterson

where x = oxide scale thickness, mils
 t = time, hrs.
 k = oxide scale growth law rate constant
 A, B, C, D = coefficients
 LMP = Larson-Miller Parameter
 P = bulk steam pressure, psi



[그림 3] 2.25Cr-1Mo강에 대한 산화물 성장예측 곡선 (중기압력 151kg/cm²)



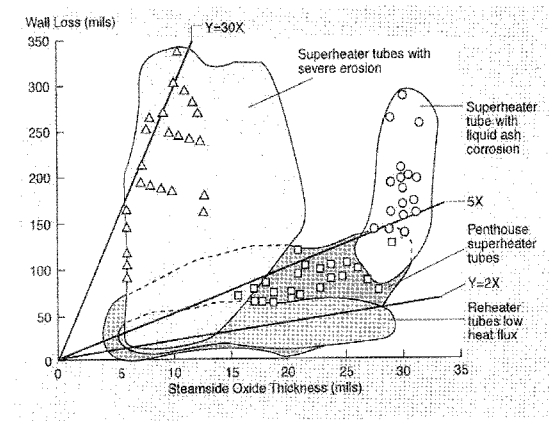
[그림 4] 산화물 성장법칙에 대한 열전대 측정값의 비교 ([표 2]의 공식과 기준값 참조)

[그림 3]은 위의 모델에 의하여 시간에 따른 산화물 두께를 구한 그림이다.

다양한 산화 스케일 분석방법으로 온도를 예측하기 위한 실험이 수행되었다. 이 실험은 가스연소 보일러의 펜트 하우스에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였는데, 이러한 위치는 열 유속이 존재하지 않아, 전체 벽 두께를 통하여 온도가 일정하다고 보이기 때문이다. 그 결과는 다섯 가지 중 네 가지 산화 스케일 분석방법은 측정된 온도보다 더 높은 값을 예측하고 있었으며, 나머지 하나는 측정된 값과 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있었다. [그림 4]는 측정된 값과 다양한 예측값을 비교하는 그림이다. 그러나 주의해야 할 점은 산화 스케일의 두께는 몇 cm만 떨어져 있어도 다를 수 있으므로, 위치와 샘플 선택이 응력공식이나 산화물 성장 법칙을 선택하는 것만큼 아주 중요하다는 것을 인지해야 한다.

라. 화염 측 두께 감소와 감소율의 선정

과열기/재열기 튜브의 잔존수명은 부식, 비회 또는 제매기 침식, 그리고 산화작용에 의해서 화염 측의 두께 감소에 의해서 잔존수명이 영향을 받게 된다. 증기 측 산화물의 박리는 또한 튜브 소모에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 소모 메커니즘은 가장 민감한 온도의 함수가 된다. [그림 5]는 어떻게 튜브 두께의 감소율이 극적으로 나타나는 지에 대해서 나타내고 있다.



[그림 5] 다양한 두께 감육에 대한 벽두께 감소와 증기 측 산화물 두께와의 상관관계(심볼들은 알려진 메커니즘에 대한 실험을 통하여 얻은 수치임)

화염 측 소모(증기 측 산화물 생성 두께에 대한 벽두께 감소의 비율)는 보일러 튜브의 열화 및 파손에 영향을 미치는 가장 우세한 메커니즘을 진단하는 도구로 사용되어 질 수 있다. 이 방법은 과열기/재열기 튜브에 있어서 화염 측 부식과 장기 과열을 분별하는데 특히 중요하다.

마. 크리프 파손(Creep Rupture) 시험

잔존수명을 평가하는 추가적인 방법은 사용 중인 튜

브에서 샘플링된 튜브들에 대해 실제 재질의 특성을 측정하는 방법이다. 이런 시험들은 다음의 세가지

- 잔존수명의 직접적인 측정
- 신규재질에 대한 응력 파손 특성의 측정
- 다른 튜브들에 적용하기 위한 선노출(post-exposure) 시험

으로부터 유도된 응력-파손 알고리즘을 유도하기 위하여 사용되어진다.

이 시험은 잔존수명을 예측하는데 과다한 보수적인 시각을 제기하기 위하여, 산화 스케일 시험법과 함께 사용되도록 추천되어 진다. 그러나 단독적인 시험에 대한 신뢰성은 보증되지 않고, 그러한 시험법에 대한 다음에서 열거하는 불확실성을 명확히 인지하여야 한다. 인지해야 할 불확실한 사항들은 시험에 대한 어떤 응력과 온도를 선택해야 하는지의 문제, 가속시험의 결과를 어떻게 현장의 상태들과 연관시킬 것인지에 대한 문제, 그리고 샘플링된 위치와 관심 있는 다른 위치들과의 관계를 어떻게 연관지을 수 있는지에 대한 것들이다. 이러한 문제들은 활발히 진행 중인 연구 노력들의 관심사항이며 시험의 세부사항과 해석방법에 대한 상당한 통찰을 통해서 이용 가능할 것이다.

바. 통계적인 분석방법

보일러 튜브의 파손이력에 기초로 파손에 대한 고찰을 할 수 있는 통계적인 방법이 추가적으로 있다. 이러한 과거 보일러 튜브 파열에 대한 이력과 운전상태들을 분석하는 방법은 설비의 고유 특성을 강조하면서 잔존수명을 더 정확하게 평가할 수 있는 보조적인 수단으로서 간과되어져서는 아니 된다. Davison은 다음과 같은 단계들을 통하여 통계적인 방법의 적용 가능성을 검토하였다.

- 시공 중에 발생된 파손 리스트
- 재질 결함, 용접 결함, 마힘, 잘못된 재질 선정과 같은 임의의 원인들과 제매기 부식 또는 순간적인 과열 등과 같은 효과가 빠른 원인들을 포함하는 부적합한 메커니즘에 대한 사고 이력의 집계
- 파손되지는 않았지만 손상된 튜브의 교체는 결과적으로 추후 발생될 위험요소를 감소시키는 것에 주의함
- Weibull 분포도(시간대 파손의 로그값 대 축적위험의 로그값)의 작성 및 비교
- 제외된 변수들에 대한 중요도의 고려

- 직선 곡선을 얻기 위한 분포변수의 보정

이런 방법은 파손을 단순화시키는 장점은 있지만, 동일한 메커니즘에 의해 위험성이 있는 튜브들은 제외시켜야 하며, 분석에 의해서 파손이 일어나지 않은 일련의 다른 부위들도 제외시켜야 한다.

이러한 방법은 과열기 크리프와 질탄기 피로균열과 같은 파손 메커니즘에는 적용할 수 있다.

3. 크리프 영역이 아닌 튜브의 잔존수명 평가

수냉벽 튜브는 최고 사용 금속온도가 450℃ 정도로 일반적으로 탄소강과 저합금강을 사용하는, 크리프 변형이 일어나지 않는 영역이다. 결과적으로 부식이 발생하지 않는다는 가정 하에서 영구수명으로 설계한다. 잔존수명 평가는 수냉벽 튜브가 부식이나 침식 등에 의해 두께 감소(특히 40nm/hr, 0.35mm/년)정도를 초과하는 감속속도가 발생하는 경우에만 실시한다.

수냉벽 튜브의 잔존수명은 증가한 원주방향 응력(hoop stress)이 설계재질의 강도와 연관이 있는 임계값보다 작은 경우를 제한하는 방법에 의해서 구해진다. 수냉벽 튜브의 잔존수명 평가는 CEGB에 의해 개발된 방식을 따른다.

$$R = \frac{W_2(2F_c - P) - P(D - 2W)}{C(2F_c - P)}$$

여기서, W = 초기 튜브 두께(mm)

W_2 = 현재 튜브 두께(mm)

C = 부식 속도(mm/hr)

D = 튜브의 초기 외경(mm)

P = 내부 압력(N/mm²)

F_c = 재료 파단 기준(N/mm²)

R = 잔존수명(hrs)

권장되는 값 F_c 는 $F_c = 1/2K_t(F_{uts} - F_{ps})$

단, F_{uts} = 재료의 극한강도(N/mm²)

F_{ps} = 재료의 항복강도(N/mm²)

K_t = 안전 계수

연강의 경우, 450℃의 온도에서 $K_t = 1.25$, $F_c = 227 \text{ N/mm}^2$ 을 일반적으로 적용한다.

4. 결론

보일러 튜브는 가혹한 운전조건에서 운전되고 있으므로 주기적인 잔존 수명평가를 통하여 설비 상태를 파악

하고 적절한 설비관리를 해야 보일러 설비의 심각한 문제를 방지할 수 있다.

특히 온도 압력이 높은 발전용 보일러는 과·재열기 튜브의 수명소비가 많고 사용연료가 열악한 산업용 보일러(소각로, 부생가스, 바이오 매스 등) 등은 크리프 영역이 아닌 증발기 튜브에서 부식, 마모 등에 의한 수명 소비가 많다.

따라서 보일러 튜브의 잔존 수명평가는 설비의 특성에 적절한 방법으로 평가되고 설비 관리 자료로 활용되어야 할 것으로 사료된다.

본 원고는 EPR에서 발간한 boiler tube failure and theory의 “보일러 튜브 잔존 수명평가” 내용을 번역하고 필자가 주석한 것임

대형 천연가스엔진 고효율화를 위한 기술개발

* 본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

1. 머리말

앞서 개최한 洞爺湖 Summit에서 선진국 G8은 2050년까지 세계전체의 CO₂ 배출량을 적어도 50% 삭감 달성목표를 UN기후변화협약 전 체결국과 공유하고 채택할것을 요청하기로 합의하였다. 이와같은 장기적 목표를 향한 계획은 단기적으로는 기존의 에너지절약기술을 전개하는데 있어서 가속이 필요하다. 그 중에서 보급이 촉진되고있는 천연가스 Cogeneration System의 누적 설치량은 전국적으로 약 4,000kW에 달하고 특히 발전효율이 높은 중 대형 (1~6MW) 가스엔진의 도입사례가 현저하다. 그 이유로 (1) 종래에는 전기와 함께 증기 등의 열수요가 많아 가스터빈의 도입사례가 많이 보였으나 근래에는 전기를 많이 소비하는 금속가공이나 금속가

공 업종의 고객을 중심으로 보다 발전효율이 높은 가스엔진의 수요가 높아졌다. (2) 도시부분에서의 고기능빌딩이나 대형 복합시설, 공공 중요시설 등의 전력 Security의 확보 관점에서 대형 분산전원의 설치 Needs가 높아진것 등의 배경을 생각할 수 있다(그림-1).

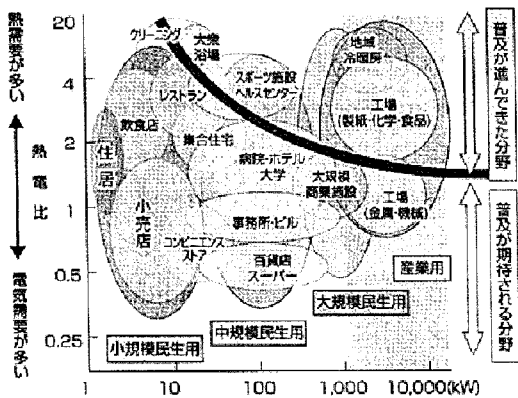
이와같은 수요경향 하에서 독립행정법인 신에너지·산업기술종합개발기구와의 공동연구로 사단법인 일본가스협회와 미쓰비시중공업(주)가 「超고효율 천연가스엔진 Combined System 기술개발」사업 (이하: 사업)을 수탁하여 2005~2007년도 말에 걸친 기술개발사업에 착수하였다.

여기서는 이 사업추진의 성과에 관하여 보고한다.

2. 기술개발성과

2.1 개발성과의 개요

본 사업에서는 발전출력과 발전효율이 세계 최고수준인 超고효율 가스엔진(천연가스 연료)과 가스엔진 Combined System(엔진의 배열을 재 이용하여 출력·효율향상을 시키는 시스템)의 기술개발을 실시하였다. 사업의 개발목표를 [표-1]에 표시하였다. 본 사업에서는 8MW급 기술의 실증으로서 6MW급 가스엔진으로 실증시험을 실시하였으므로 그의 개발목표를 [표-2]에 표시하였다.



[그림-1] Cogeneration 시장분석