

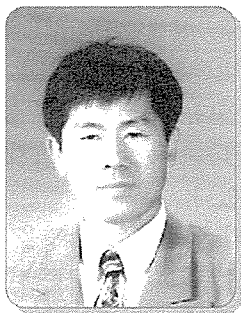
염 배출물질의 억제를 고려한 운전계획이 이루어져야만 한다. 일반적으로 전력시스템에서 화력기의 경제급전문제에서 환경을 고려하여 해결할 경우 목적함수나 제약조건에 환경오염물질의 배출을 억제하는 방향에서 수리적으로 모델링하여 추가하는 경우가 있다. 열병합발전시스템에서도 환경항목을 목적함수에 추가하는 다목적함수를 수립하든 제약조건으로 첨가시키든 이를 만족시키는 조건에서 운전해야 하므로 운전비의 상승은 불가피하게 된다. 특별히 소형 및 건물용 열병합발전시스템은 전기와 열 수요가 기본적으로 동시에 많이 존재하는 도심지 빌딩이나 호텔 및 병원 등에서도 도입하는 경우가 많고 시스템의 운전에 따라 발생하는 NOx, SOx 및 소음 등이 많으므로 이에 대한 환경적 대책이 필수적으로 이루어져야 한다.

5. 결론

열병합발전시스템은 투자모형에 근거하여 적정규모의 용량 및 보조설비의 용량을 결정하여 운전에 들어

가야만 한다. 그러나 산업과 경제의 규모에 따라 전기 및 열수요는 다양하게 변화하므로 이를 최소의 운전비용으로 충족시키는 운전계획을 수립하기 위해서는 단순히 오랜 경험이나 일부의 항목만을 최적화하는 기법으로는 접근하기에 복잡하다. 따라서 여러 대가 상호 다른 용량과 특성을 지니고 있는 열병합발전시스템과 상호 다른 용량과 특성을 지닌 각종 보조운전설비들이 연계하여 운전하는 경우들이 많으므로 이러한 경우에서의 운전계획수립은 반드시 최적화 이론을 도입하여야만 한다. 열병합발전시스템은 용도에 따라 종류와 규모가 다양하고 특성도 상이하나 어느 경우에도 적용할 수 있는 것이 최적화 이론이다. 기존에 국내에서 운전되고 있는 여러 종류의 열병합발전시스템에서도 이러한 이론을 도입하여 보다 최적적인 운전계획을 수립한다면 상당한 양의 연간 운전비 절감효과를 가져올 것이며 국가적인 이익은 물론 최적운전에 따른 운전효율 향상효과로 인하여 환경물질의 상당한 절감효과도 가져올 것으로 기대된다.

보일러튜브의 수명평가기술



한전전력연구원 발전설비지원그룹
과장 김범수
Tel : (042)865-5316

1. 서론

국내 열병합 발전설비의 대부분이 10년을 초과함에 따라 설비의 안정성 및 신뢰성을 확보하기 위한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 발전설비에 사용하는 보일러튜브의 경우에도 설비의 안정성측면에서 검토가 필요하나 현재까지 보일러튜브의 설계기준인 100,000 시간 사용의 설계개념의 도입으로 보일러튜브를 설비

의 일부라기 보다는 소모재로 간주하는 경향이 팽배되어 있다. 그러나 보일러튜브의 가격이 적지않은 상태이며 장기적인 사용을 위해 튜브재료의 보수적인 선정을 하는 추세에 따라 과, 재열기튜브의 경우도 30년 이상을 사용하는 경우가 빈번하게 발생하고 있어 설비의 경제적이고 안정적인 운영을 위해 정확한 수명평가를 통해 튜브의 교체기준을 설정하는 것이 무엇보다 중요하다.

보일러튜브는 고온에서 사용하는 설비로 상온에서 사용하는 재료에서 일반적으로 고려하는 응력-파단 성향을 따르지 않고 시간-응력-온도의 Creep 변형에 따른 재질열화를 수반한다. 이와 같은 재질열화기구에 대한 해석법 및 수명평가법 등이 다양하게 소개되고 있으며, 최근에는 UT기술과 접목하여 비파괴적 방법에 의해 보일러튜브의 수명평가를 하고 있다.

비교적 오래된 정성적 재질열화평가법인 조직시험법, 경도시험법 및 정량적으로 잔존수명을 예측할 수 있는 Creep시험법에 부가하여 최근에는 보일러튜브 내면의 산화스케일 두께를 초음파에 의해 측정함으로써 비파괴적인 방법으로 수명평가를 할 수 있는 방법이 도입되어 신뢰성 있는 수명평가가 행해지고 있다. 한편에서도 기존의 정성적인 방법과 Creep시험법을 주로 사용하여 보일러튜브의 잔여수명을 평가하였으나 1996년부터 산화스케일평가법을 적용하여 자체 프로그램을 개발하여 저합금강과, 재열기튜브의 수명평가에 적용하여 왔으며, 본 논문에서는 이와 관련하여 보일러튜브의 열화기구 및 열화기구를 평가할 수 있는 기법을 소개하고 한편에서 적용하고 있는 산화스케일 평가법의 개요 및 삼천포 1호기 재열기 튜브에 적용한 수명평가 사례를 설명하고자 한다.

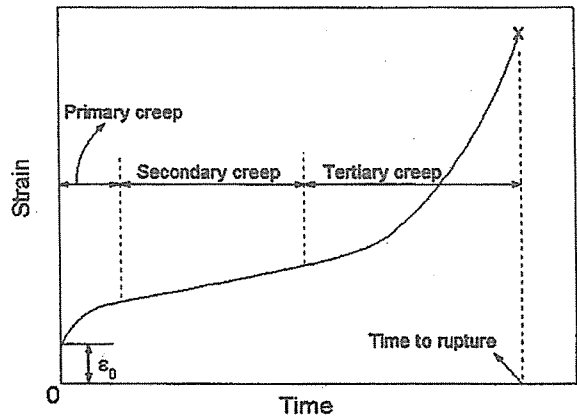
2. 보일러튜브의 열화기구

보일러 튜브의 열화기구는 주로 Creep에 의해 발생하며 일정하중하에서 열적 활성화에 의해 재료가 서서히 연속적으로 변형하여 최종적으로 파단에 이르게 된다. Creep 특성은 일반적으로 일정하중이나 응력에 시간에 대한 변형의 관계를 실험에 의해 결정하며 전형적인 Creep곡선 형태는 <그림 1>과 같다.

그림과 같이 재료는 변형경화, 연화, 회복, 재결정 등의 여러 가지 반응에 의해 응력부과시 초기에 나타나는 순간적인 변형율 $\dot{\epsilon}_0$ 로 변형하며, 이후에 1차 Creep 단계인 변형율이 감소하는 단계를 지나 정상적인 최소변형율을 나타내는 2차 Creep 단계를 거쳐 최종적으로 변형율이 증가하는 3차 Creep 단계를 지나 파단에 이르게 된다. Creep 곡선의 모양은 가해진 하중과 온도에 따라 다르며 응력과 온도가 높을수록 Creep속도가 증가한다.

이러한 Creep변형은 재료내부에서의 조직변화로 인해 발생하는데 이것은 불순물의 입계편석, 탄화물의 석출 및 조대화로 인한 연화 또는 전위밀도의 변화, 기공생성과 성장 등으로 발생하며 이중 기공의 생성과

성장이 재료의 수명에 가장 직접적인 영향을 준다.



<그림 1> 전형적인 Creep 거동 곡선

3. 보일러튜브의 재질열화 분석기법

보일러튜브가 열화됨에 따라 강도와 인성이 감소하며 이런 기계적성질이 감소하는 정도를 분석하는 기술이 수명평가지 주로 사용되고 있다. 보일러튜브의 재질열화 분석법으로는 재료적 분석법인 기공측정법, 조직검사법, 석출물 검사법 등과 기계적 시험법인 경도측정법, Creep시험법, 산화스케일평가법이 있으며 정밀 수명평가를 위해서는 Creep시험법, 산화스케일평가법을 이용하고 기공측정법, 조직검사법, 경도시험법 등을 보완적으로 활용하고 있다.

3.1 조직검사법

고온에서 응력이 부과되면 재료내 탄화물등의 석출물과 기공이 변화하는데 이런 특성을 이용하여 재료의 표면을 연마하여 탄화물의 분포변화, 크기, 기공의 분포를 측정하여 표준화된 표를 이용하여 재질열화도를 판단하는 방법이다. 이 방법은 실험실에서 재질을 열화시켜 사용재와 비교하는 방법으로 실험실과 사용환경의 차이, 재료의 연마가공 등의 한계로인하여 그 정확도를 유지하기에는 많은 어려움이 있다.

3.2 기공 측정법

기공의 형태나 밀도를 측정하여 실험결과와 비교하여 수명을 판단하는 방법으로 재료의 손상정도를 정량화하기 용이하나 비파괴적으로 관찰하는 것이 어렵고 관찰배율에 매우 의존하는 단점이 있다.

○ 기공형태 분류법

기공의 형태에 따라 손상정도를 4단계로 분류하고

각 단계마다 조치사항을 제시한 방법으로 간편하게 이용할 수 있으나 정확한 손상정도의 추정이 어렵다.

○ 기공 밀도 측정법

단위 면적당 기공의 밀도를 측정한 후 그래프와 비교하여 수명소비율을 추정하는 방법으로 수명소비율이 50%이하는 측정되지 않는 단점이 있다.

3.3 경도측정법

재료를 고온에서 장기간 사용하면 탄화물의 조대화 등 조직변화가 일어나며 이들 조직변화는 재료의 경도값을 변화시킨다. 이 경도 감소량과 Creep손상량과의 관계가 실험적으로 구해져 있는 경우 쉽게 사용재료의 열화정도를 추정할 수 있다.

그런데 경도감소량과 Creep손상과의 관계가 각 온도조건과 응력조건에 따라 달라지기 때문에 여러 온도 및 응력조건에서 경도 변화값과 Creep 손상량을 한 개의 변수인 G-Parameter로 표현하고, 사용재의 경도비를 측정하여 G값을 구하고 사용온도, 사용시간을 대입하여 사용응력을 Larson-Miller Parameter에 적용하면 잔존수명을 예측할 수 있다.

$$G = \log T + \log(20 + \log t) + 0.00217(\sigma - 11)$$

t : 사용시간

그러나 여러조건에서의 G-Parameter를 구하기 위해서는 많은 실험을 해야하며 재질열화도에 따라 경도가 거의 변화하지 않는 재료의 손상정도를 파악하기에는 어려운 점이 있다.

3.4 크리프 가속시험법

실제 보일러튜브에서 시험편을 채취하여 Creep 파단시험을 실시하는 방법으로 정량적으로 수명을 평가할 수 있는 시험법이다.

Creep 파단시험에서는 실제 응력과 같은 응력조건에서 시험온도를 실제보다 높이 설정하여 실험하고, 실험결과를 실제 온도에 외삽하여 잔존수명을 구하는 Iso-stress법이 많이 사용된다.

종래에 많이 사용하던 방법은 가속조건하에서 사용재의 단일 시험편 파단시험으로 해당설비의 수명소비율은 사용재의 파단실험과 같은 조건하에서의 신재의 파단시간의 비로 계산되며 잔존수명비는 1에서 수명소비율을 뺀 값이 된다.

$$D_c = 1 - \frac{t}{t_r}, D_c : \text{잔존수명분율}, t : \text{사용시간}, t_r : \text{파단시간}$$

Creep가속시험법은 튜브에 부가된 과거의 온도와 응력조건이 미래에도 동일하게 유지될 것임을 전제하고 있다. 그러나 보일러 튜브의 경우 부식으로 인하여 두께가 계속 감육됨에 따라 작용응력이 변화하고 튜브내면의 산화스케일이 형성되어 사용온도도 계속 변화하게 되어 정확한 결과를 예측하기에는 한계를 지니고 있으며 실험에 장기간이 소요된다.

3.5. 내면산화스케일 평가에 의한 방법

전술한 바와 같이 보일러튜브는 내면에 산화스케일이 형성되어 같은 Steam조건을 유지하기 위해서는 Metal온도가 지속적으로 증가되며 사용온도에 따라 튜브의 수명소진율은 지수함수적으로 감소하게 된다. 또한 튜브두께의 감육에 따라 사용응력도 지속적으로 변하게 되어 이에대한 정확한 평가가 요청된다.

여러 가지 실험 결과에 따르면 상대적으로 순수한 증기가 등열적조건하에 있을때 산화스케일성장은 사용온도와 시간의 함수로 나타나며 특별한 법칙을 따르는 것으로 나타났다.

보일러의 과, 재열기튜브를 흐르는 증기는 이물질이 없는 순수한 증기로 이런 관계를 이용하면 현재의 산화스케일두께, 열부하 등을 알고 있을때 사용온도를 추정할 수가 있다.

이 관계를 이용하여 사용시간을 작은 등간격으로 구분하고 일정 time span동안 사용온도, 응력이 일정하게 유지된다고 가정하여 산화스케일 형성기구에 의해 온도의 증가, 응력 증가를 계산하고 해당 온도와 응력에 대한 Larson-Miller Parameter를 산출하여 수명소진율을 계산하고 수명누진법에 의해 잔여수명을 평가하는 방법이다.

이 방법에 사용되는 주요인자로는 다음과 같은 것들이 있으며 수명평가의 정확성을 기하기 위해서는 타당성있는 인자들을 선정해야 한다.

- 응력파단 곡선과 응력공식
- 산화스케일 형성 kinetics
- 수명분율법(life fraction rule)
- 화염측 부식/침식법칙
- 스케일두께 측정

4. 산화스케일법 적용사례

4.1 개요

'98년 3월에 삼천포화력본부 1호기 보일러 2차 재열기 88-3열 하부 곡관부가 파열되어 파열된 튜브에 대

해 산화스케일 평가법의 신뢰성을 입증하기 위해 수명평가를 수행하였다.

삼천포화력 재열기튜브의 설계 및 운전자료는 다음과 같다.

- 튜브 설계규격 : SA213T22 ϕ 63.5×4.6t
- 튜브 사용 시간 : 101,000Hr
- 재열증기 조건 : Pr. 38kg/cm², 541°C

4.2 응력과단파선과 응력식 선정

Creep 파단자료는 ASTM Creep Data를 외삽하여 다음과 같이 수식화 하였고, 응력식은 여러 가지 실험결과에 의해 튜브의 다축응력상태를 유사하게 평가하고 있는 튜브내경을 적용한 평균경공식을 적용하였다.

$$LMP = (4.8035 - \text{Log}(/1000)) \times 10000 / 1.04, \sigma : \text{부가응력}$$

4.3 수명분율법 선정

등응력상태에서 수명소모누계는 1보다 적게되나 보수적인 결과예측을 위해 $\frac{\sum t_i}{t_r} = 1$ 의 식을 적용한다.

4.4 내면스케일 성장식 선정

여러 가지 산화스케일 성장식 중에 측정결과와 유사한 값을 나타내는 다음식을 사용하고 시간간격은 1000시간을 적용했다.

$$\text{Log } X = 0.000283(T+460)(13.6396 + \text{Log } t) - 6.839896$$

X : 누적 스케일 두께 (Mils), T : 해당 기간의 온도(°F),
t : 누적운전시간(Hr)

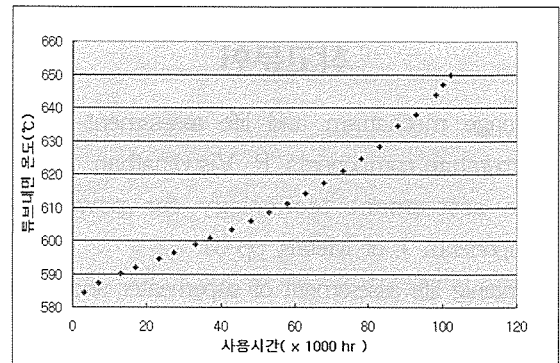
4.5 두께 감육을 결정

튜브 외면은 제작시 소성가공에 의한 조직변화, 합금성분의 탄화에 의한 부식 가속, 부식성 물질의 침투 등으로 급속한 부식이 일어날 경우 부식물 층에 Porosity가 많다든지 모재 경계면이 랜덤 하다든지 하는 특징이 있을 수 있는데 이러한 형태는 발견되지 않았다. 스케일의 주성분은 마그네타이드(Fe₃O₄)로 크롬 탄화물의 농축 층이 포함되어 있어 외표면의 혼입회와 스케일 층에 확산된 Ca에 의한 부식 문제는 고려하지 않고 최초 및 현재 두께를 선형적 감육관계로 나타내었다.

4.6 결과 고찰

자체 개발한 산화스케일평가 프로그램에 의한 수명평가 결과 튜브의 내면 금속온도는 <그림 2>와 같이

초기에는 585°C, 최종에는 650°C이었으며, 현장에서 측정한 Heade쪽의 증기온도는 550°C이었다.



<그림 2> 사용시간에 따른 튜브내면 금속온도 변화

일반적인 과, 재열기 보일러튜브의 해석자료에 사용되는 증기막온도 30°C, 스케일의 열전도도 0.342BTU/hr ft °F를 적용할 경우 초기 평균증기온도 555°C, 1.6mm의 스케일이 끼어 있는 경우 스케일로 인해 온도가 60°C 상승하여 최종평균증기온도는 560°C가 되어 현장계측결과와 5~10°C 오차를 나타낸다.

또한 그래프에서 보는 바와 같이 튜브금속온도가 높아지는 수명의 후반부에 수명소모가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며 이와 같은 경향은 Creep 파단시험 등의 기타 방법으로는 모사가 불가능하여 다른 수명평가법보다 정확한 수명예측을 할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

발전소 고온설비에 적용되는 대부분의 수명평가 기법들이 재료자체의 불균질성, 다양한 사용환경 등으로 인해 불완전성을 갖고 있으며 평가결과 역시 상당한 오차를 포함하고 있다. 산화스케일평가법 역시 여러 가지 전제와 가정을 내포하고 있기 때문에 불확실성을 가지나 보일러튜브의 온도변화 및 두께 감육 등을 고려하여 수명을 평가할 수 있는 유용한 도구로 미국, 일본, 유럽 등에서는 보일러튜브 수명평가법의 기본으로 사용하고 있다.

고크롬강 보일러튜브의 산화스케일 형성기구가 아직 규명되지 않아 전 보일러튜브에 적용은 어려운 실정이나 주로 저합금강을 사용하고 있는 열병합발전소의 보일러튜브 수명평가에는 아주 강력한 도구가 될 것으로 판단된다.

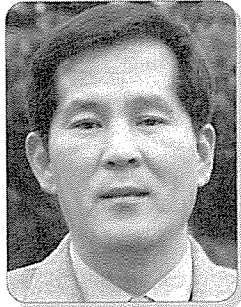
또한, 보일러내부의 접근이 어려워 실제운전값을 측정하기 어려운 상황에서 이러한 환경여건을 반영하는 산화스케일을 적절히 해석함으로써 보일러의 운전상

태 등을 평가 및 조정하므로써 전체설비의 안정적인 운영 측면에서도 상당히 유용한 도구로 사용될 것이다.

참고문헌

1. Damage mechanism and life assessment of high-temperature components, R. Viswanathan, 1993
2. Life assessment technology for power plant components, J. of Metals, pp 34- 42
3. Remaining life assessment of superheater and reheater tubes, EPRI CS-5564, 1988
4. Metallurgical failures in fossil fired boilers, David, N. French , 1982
5. Life assessment of superheater and reheater tubes in fossil boilers, R. Viswanathan, 외 ,Journal of pressure vessel technology, 1994, 2
6. Boiler tube failures theory and practice Vol. I, II, III, R. P Dooley, 1995
7. 2.25Cr-1Mo강의 열화와 기계적 성질변화에 관한 연구, 정호돈 외, 1999
8. A study of carbides in low alloy Cr-Mo steels, ASME, MPC-21, pp117-128
9. A temperature-time relationship for rupture and creep stresses, ASME, pp 765-775
10. Creep damage and remaining life assessment of superheater and reheater tubes, Steve R. Paterson, 1987
11. Modelling of creep damage to estimate remaining life, H. C. Furtado외, 1997

베어링과 윤활유 계통에 발생하는 문제점과 대책(Ⅱ -2)



한전기공(주) 기술개발원
전문원 실장 정재원
Tel : (031)710-4390

마. 과열(Overheating)

과열은 두 가지 손상 형태가 있는데 Babbitt 성분 중의 하나가 연화점(Softening Point) 이상의 온도에 노출되어 생기는 손상과 과도한 열적 변화에 의해 Babbitt에 Crack이 발생하는 손상이 그것이다.

(1) Mechanism

고온은 베어링 손상의 직접적인 원인이 될 수도 있고, 간접적인 원인이 될 수도 있다. 첫째는 Babbitt의 강도 특성이 감소되어 생기는 문제들로서 온도가 올라가면 Babbitt의 표면은 물결 모양으로 변형되고 Wiping이 일어나기 쉽게 된다. 온도가 충분히 올라가면 베어링의 일부가 용융되며 합금의 한 성분이 용융

되어 조직에서 새어나오게 될 때 “Sweating”이 발생했다고 말한다. 열적 피로라고도 불리는 간접적인 손상 형태는 재료의 이방성(방향에 따라 탄성 등의 성질이 달라지는 것) 때문에 발생된다. Tin-Based Babbitt를 포함하여 이방성을 가지고 있는 재료들은 각각의 결정 방향(Crystal Axis)에서의 열팽창 계수가 다르다. 열응력이 생기면 이러한 이방성에 의해 입계의 변형(Grain Distortion)이 생기면서 반복적으로 열에 노출되면 베어링 표면에 얼룩반점이 생기는데 이것은 보통 베어링 성능에 나쁜 영향을 주지는 않는다. 그러나 입계 변형이 극심하게 되면 입계의 경계면을 따라 베어링 표면에 균열이 발생되는데 이러한 열적 균열의 형태(열적 피로 형태)를 “Ratcheting”이라고 부른다. (그림-25).