

발전용 CrMo 주증기관의 용접부 잔여수명평가

(Life Prediction of CrMo Pipe in Power Plant)

백 수곤(전력연구원)*, 홍 성인(충남대학교)

1. 서론

현재 국내에서 운전되고 있는 화력발전소의 65% 이상이 시운전 후 10년을 넘고 있으며, 15년 이상을 경과한 것도 55%를 상회하고 있는 실정으로 노후 설비를 폐기하고 새로운 설비를 건설하려면 경제적 부담 외에도 Nimby현상등에 따른 공장 부지선정등 어려움이 많으므로, 기존의 노후설비를 폐기하지 않고, 수명을 연장하여 사용하는 경우가 많으며 설계수명을 20년에서 30년 내지 60년정도까지 연장하는 방안을 연구중이다. 현재 운전되고 있는 화력발전소 보일러는 대부분 기저부하용으로 개발되어 있어 보일러 본체 구조의 간소화와 고온배관의 저응력 설계가 요구되고 있는 형편이다. 발전용 배관의 경년열화를 발생시키는 요인은 고온상태의 운전조건, 과도한 운전시간, 부하조건, 설비 부식 등을 들 수 있으며 대부분 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 열화를 촉진시키게 된다.

화력발전소에서 주증기관은 보일러의 최종 과열기 출구로 부터 터빈입구까지 연결된 고온 배관으로서 고압의 증기를 수송하는 역할을 하며 Y-piece 관이나 각종 밸브 및 드레인 라인등이 연결되고 여러 부분들이 용접되어 연결되는 시스템으로 발전소 배관중에는 가장 길고 중요한 배관으로 15년 이상 사용된 발전소의 정밀진단시 필수적으로 상태를 평가하는 중요설비이다. 장기간 사용한 석탄화력 발전소인 [가] 발전소는 전체 열화도가 80% 정도에 이르고 있으나 폐지계획이 99년 1월로 계획되어 전체적으로 주증기관을 교체하는 것은 경제성이 없는 것으로 평가되었다. 따라서, 매년 정기검사시 본 배관의 상태진단을 수행하고 있어 배관 내부에 작용하는 압력등에 의한 일차응력과 고온에 의한 이차응력등이 설비 수명에 미치는 영향을 해석하고자 한다.

2. 설비현황 및 운전이력

본 논문의 대상발전소인 [가] 발전소는 독일 DIN 규격으로 13CrMo44 인 1Cr0.5Mo 강으로서 외경과 두께는 부위별로 약간 달라 세가지 종류로서 대부분은 218mm와 19mm이다. 전체적인 길이는 약 50m로서 현장 용접부위와 배관의 개략도는 Fig. 1과 같다. 설계온도는 515℃, 설계압력은 106kg/cm²로서 93년도 최초 수명평가를 위한 정밀진단 이전까지 1호기는 149,000시간의 운전시간과 345회의 기동정지 회수를 가지고 있으며, 그후 관련 설비의 정확한 수명평가 기술을 개발하고 있다.

3 주증기관의 응력해석

3.1 주증기관의 허용응력

화력발전소 배관은 ANSI B31.1 Power Piping Code와 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. I 을 따라 배관자중, 온도효과 등에 기인하는 허용응력을 산출할 수 있다. 발전소의 기동·정지에 따른 배관계의 파괴는 저주기피로(Low-cycle fatigue)에 의한 것으로 생각할 수 있으며, 그러한 반복응력에 의한 피로강도의 경우, ANSI B31 Piping Code에서는 최대응력과 최소응력의 차, 즉 응력범위(Stress range) S_A 를 설정, 다음과 같이 기

동·정지에 따른 사이클 수에 의한 보정계수 f 를 사용하여 다음과 같은 허용응력범위 S_A 로 나타낸다. 열응력, 압력, 배관자중, 기타 외력에 의한 응력의 조합을 고려할때의 허용응력 범위 S_A 는 다음식에 의한다.

$$S_A = 1.25 f (S_c + S_H) \quad (1)$$

ANSI B31.1 Appendix A, Table A-2로부터 1Cr0.5Mo강의 경우

$$\begin{aligned} S_A &= 1.25 \times 1 \times (15 + 11) \\ &= 32.5 \text{ ksi를 얻는다.} \end{aligned}$$

3.2 주증기관의 모델링 및 경계조건

배관에 작용하는 응력을 해석하기 위하여 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모델링하였다. 모델링 시작점을 보일러 노즐로 하고 끝점을 터빈노즐로 하여 고정점으로 설정한후 각 지지장치가 있거나 현장용접부위를 Nodal Point로 하고 지지장치가 있는 곳에 Spring hanger setting값을 일정하중으로 입력하며, Table 1과 같이 배관지지장치별로 경계 조건을 설정하였다. 자중해석은 배관을 지지하고 있는 각 행거의 하중을 구하기 위하여 상온과 운전압력에 의해 수행되며 발전용 배관은 고온고압에서 운전되기 때문에 고온상태의 배관변위와 응력을 해석하여 그에따른 수명소비를 계산한다.

3.3 해석결과

응력해석결과 Fig. 2에서 보는바와 같이 터빈입구에서 배관이 분기되는 T-joint용접부에서 최대응력 11.676ksi가 발생하며, 터빈 근처 배관에서 전반적으로 높은 수준의 응력이 발생한다. 본 응력은 전절에서 설명한 배관의 허용응력 범위내에 있으므로 열응력에 의하여 과도한 수명소비가 발생했다고는 볼 수 없다. 최대 변위는 Fig. 3에서 알 수 있는바와 같이 보일러와 터빈이 만나는 엘보우부위에서 가장 심하지만 이는 자유팽창이 허용되는 곳이므로 문제가 되지 않는다.

4. 주증기관 용접부의 잔여수명

주증기관의 용접부에 작용하는 최대 응력이 허용응력범위내에 있으므로 본 설비는 소요의 설계수명까지 운전하는데 무리가 없을 것이다. 그러므로, 지금까지 본 응력이 배관 수명에 얼마나 영향을 미쳤는지를 평가한다.

4.1 크리프 수명

크리프 수명을 평가하기 위하여 ANSYS해석으로부터 구해진 최대 응력에 안전율을 0.25를 적용하여 Larson-Miller Parameter 중 안전한 하한치를 적용하여 파단시간을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L.M &= 35.9 = T(20 + \log t_r) \times 10^{-3} \\ t_r &= 191,289 \text{시간} \end{aligned}$$

실제 본 배관의 운전시간은 149,000 시간으로 '93년 이후 약 5년의 잔여 수명이 남아있는 것으로 평가된다. 그러나, 재료 물성치를 상하한치의 평균이나 상한치를 적용할 경우에는 크리프수명이 각각 244,000시간과 423,000시간으로서 본 배관의 시운전후 최대 약 50년까지 사용할 수 있어 본 발전소의 경우 앞으로도 20년을 더 사용할 수 있어 수명해석에 대한 추가 자료를 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 금속의 사용기간에 따른 열화도 평가자료로서 금속의 조직상태를 평가하여 비교하였다.

4.2 금속의 조직변화에 따른 수명

일반적으로 고온 배관에 작용하는 금속조직의 손상형태는 크리프 기공 또는 크리프 기공 연결에 의한 미소균열 형태의 Intercritical 영역 또는 열영향부 Type IV 균열이 발생할 수 있다. 또한 기동 정지가 심한 발전소의 경우 피로 손상과 크리프 손상이 혼합되어 나타날때도 있지만, 피로 손상은 크리프 손상 취약부와 무관하게 독립적으로 나타나기도 한다. 특히, 저합금강을 고온에서 오래 사용하면 금속 조직이 점차 과시효되어 열화현상이 나타난다. 이때 탄화물(carbide) 간격이 넓어지고 크기가 커져서 재료 강도의 저하를 유발한다. 이와같은 배관의 손상이나 조직변화를 관찰하기 위하여 그림 1에서 보이는 바와 같이 용접부나 응력이 많이 작용하는 보일러 Y-piece, 주증기관 안전밸브 및 스톱밸브, T-piece, 터빈 Y-piece, Girth weld 및 굴곡부등에 육안검사, 자분탐상(MPI), 칫수 측정, 표면복제검사, 경도측정, 입계부식 특성 검사 등을 수행하였다. 이상 언급한 검사결과는 다음과 같다.

4.2.1 육안검사

주증기관 용접부 주위의 단열재를 제거한 후 냉각 상태에서 육안 검사를 실시하였다. 파이프 유지부(support)는 모두 파손된 곳이 없었으며 행거도 모두 정상이었다.

4.2.2 자분탐상(MPI)

대부분의 용접부에 대하여 자분 탐상을 실시한 결과 많은 맞대기 용접부에서 길이방향의 균열이 발견되었다. 1호기에서 발견된 길이방향 균열은 2호기에서 발견한 균열과 동일하였다. 파이프 맞대기 용접부의 열영향부를 따라 발생한 파이프의 원주 방향 균열도 다수 발견되었다.

4.2.3 칫수 측정

주증기관의 많은 부위에서 외경과 두께에 대해 칫수 측정을 실시하였다. 두께측정 결과 두께는 설계 허용값 내에 있었다. 외경 측정 결과 외경은 설계 허용값 상한선보다 크게 나타났다.

4.2.4 표면복제 및 경도측정

맞대기 용접부의 많은 부위를 보수하였기 때문에 보일러와 터빈 Y-piece중에서 갈아내지 않은 맞대기 용접부의 몇 곳을 선택하여 표면복제를 하였다. 길이방향 맞대기 용접균열에서 채취한 래프리카를 관찰한 결과 균열선단에서 크리프 기공손상이 발견되므로 입계에서 균열 생성이 일어났음을 알 수 있었다. 열영향부나 모재부에서 크리프 기공손상이 발견되진 않았으나 균열표면이 산화되어 있었다. 모재부의 미세조직 관찰결과 탄화물의 구상화와 응집 정도가 중간 수준이었다(미세조직 분류 C). 경도값은 미세조직의 열화도와 잘 일치하였다. 왼쪽편에 위치한 터빈 입구쪽 플랜지와 오른쪽편에 위치한 터빈 터미널 용접부 혹은 굴곡부에서 크리프 손상이 발견되지 않았으며, 과도한 연화나 미세조직 열화도 관찰되지 않았다. 보일러와 터빈 Y-piece의 갈라진 용접부에서 크리프 기공이 발견되었다. 모재의 미세조직과 경도로는 미세조직의 열화나 연화가 없는 것으로 판단되나, 터빈과 보일러 Y-piece의 용접부에 대한 경도값은 상당히 낮았다. 1차 정밀진단이 끝난 후 4년제인 '97년에 실시한 표면복제 시험의 경우에도 터빈 입구 T-joint부위에서 Fig. 4와 같이 균열이 발견되었으며 금속 조직이 구상화되어 열화정도는 E/F등급으로 수명이 거의 소진된 것으로 평가되었다. 또한, 보일러와 터빈이 만나는 엘보우부위에서는 Fig. 5와 같이 크리프 기공이 발견되는 것으로 보아 크리프 수명소비가 컸음을 증명한다.

5. 결론

1) 주증기관의 잔여 크리프 수명은 재료물성의 하한치를 사용하여 계산한 경우 수명이 소진된 것으로 판단되지만, 실제 배관의 비파괴적 건전성 평가 결과 높은 응력을 받는 용접부는 수명소비 등급이 E/F로서 설계수명이 다 되었다 할 수 있으나, 기타부위는 건전한 조직 상태를 유지하고 있다. 그러므로, CrMo 배관 용접부의 크리프 수명은 재료 물성의 하한치를 적용한 Larson-Miller Parameter가 잘 일치한다. 그러나, 용접부에서 떨어진 비용접부의 경우에는 모재가 건전한 상태를 유지하고 있으므로 재료물성의 평균치 또는 그 이상과 Larson-Miller Parameter를 적용하여야 한다.

2) 주증기관의 맞대기 용접부에서 상당량의 길이 방향 용접부 균열 및 크리프 손상이 발견되었다. 이들의 형상, 방향, 갯수, 간격등으로부터 판단해 볼 때, 이는 크리프 연성의 소진으로 인하여 원주 방향 응력에 의해 용접부에서 파손이 일어날 위험이 있다.

참고문헌

- (1) 김건영, 백수곤의 4인, 1993, "노후화력발전소 정밀진단 및 수명평가" 전력연구원 최종보고서, pp. 56 - 68.
- (2) Becker F.L. et al., 1987, "Industry Experience and overview of Steam Pipe Activities", Conference proceedings of Life extension, pp. 839-852.
- (3) 김건영, 백수곤 외 6인, 1991, "보일러 후속부 및 고온 배관계 수명예측에 관한 연구", 전력연구원 최종보고서, pp. 125- 153.
- (4) Eggeler G.F., Hurst R.C., 1994, "Development and Validation of Models for the Lifetime Assessment of Steam Power Plant Components", Conference of Materials for Power Engineering, pp. 109-132

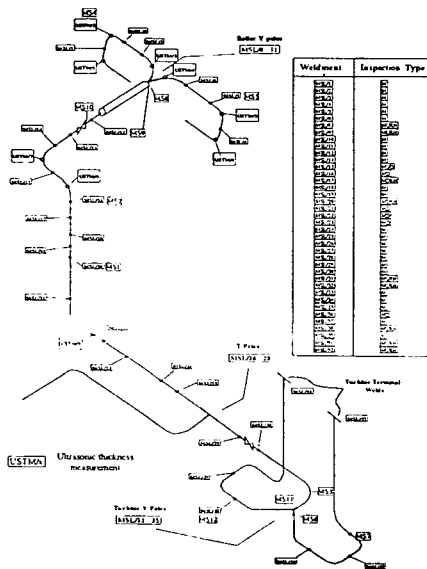


Fig. 1 Isometric Drawing

Table 1 배관 지지장치의 분류

구분	명칭	용도	ANSYS 적용
Hanger 또는 Support	Rigid Hanger	수직방향 변위가 극히 적은 개소에 사용	수직방향 변위를 완전 구속
	Spring Hanger (Variable Hanger)	수직방향 변위가 적은 개소에 사용	스프링 계수를 구하여 행거하중에 산입 ($F = k/\delta$ (k :스프링계수, δ :변위))
	Constant Spring Hanger	수직방향 변위가 적은 개소에 사용	행거가 일정하중을 유지하므로 배관의 수직방향으로 행거하중을 적용
Restraint	Anchor	완전히 배관계의 일부를 고정하는 경우에 사용	고정되는 방향의 변위만 구속
	Guide	배관이 축을 따라 회전하는 것을 방지하는 경우에 사용	배관의 회전방향(Rotx, Roty, Rotz)만을 구속
	Restraint (Stop)	배관의 회전은 허용하지만 직선운동을 방지하는 경우에 사용	배관의 직선방향(Ux, Uy, Uz)만을 구속

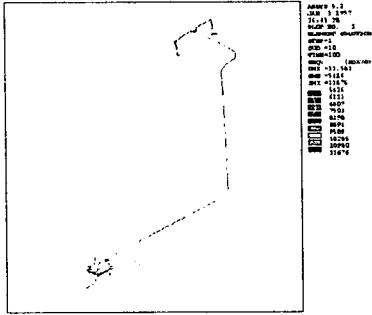


Fig. 2 stress analysis(hot state)

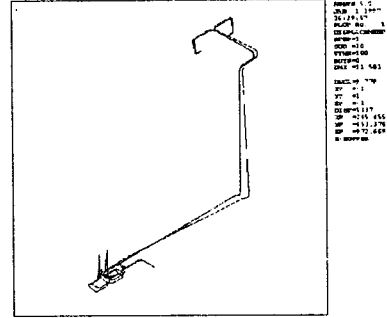


Fig. 3 Displacement analysis(hot state)

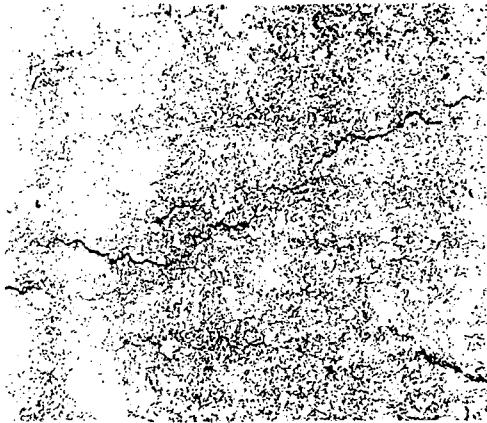


Fig. 4 Crack at Welding Point



Fig. 5 Creep Cavity