

Electric Steam Boiler형 Heating Element 파손원인 규명

A Failure Analysis of Heating Elements in Electric Steam Boiler

김양수, 권택규, 이상혁, 한종만, 한상영
대우중공업(주) 옥포조선

1. 서론

통상 중소형 특수선박이나 군함 등은 작은 공간을 효율적으로 활용하여야 하기 때문에 소형화 및 고효율 보일러를 선택하고 있다. 이들 보일러는 가열장치가 연소방식과는 달리 전기저항체를 이용한 Tubular Heating Element로 구성되어 있다. 이러한 Heating Element를 원통형탱크에 넣어 물을 가열하여 증기를 만드는 장치이며, 증기를 이용하여 승무원의 취사, 해수용 배관의 Anti-fouling용, L.O 정류기 등에 주로 사용되는 장비이다.

Electric Steam Boiler의 구조는 Fig. 1에 보여주고 있으며, Heating Element가 4개 설치된 Boiler로서, 용존산소($\leq 0.05\text{ppm}$), pH(9~11), Chloride($\leq 50\text{ppm}$) 등이 조절된 관수를 사용하여 가열하고 Steam을 발생시키게 된다. 여기서 관수는 보일러 내의 Scale 방지 등의 목적으로 수처리제(인산염 성분)를 첨가하여 사용한다. 그리고 각각의 Heating Element는 Tube가 12개로 구성되어 있으며, 각 Tube의 내부 쪽은 분리나 접촉 방지를 위해 결속되어 있다. 내부는 발열체의 코일을 연결하는 철심과 알루미늄계의 절연 Powder Paste로 구성되어 있고, Heating Element Tube는 외경이 11 mm, 두께가 1 mm이며, 재질은 Stainless Steel(SUS) 321을 사용하였다. 여기서 문제된 Boiler의 Heating Element는 Tube가 부풀림되어 파손되었다. 특히 파손된 Heating Element는 상당히 변형되어 있었고, Steam과 관수의 경계선상에 있는 동일한 위치에서 Tube 표면에 1개이상의 단락된 흔적을 발견할 수 있었으며, 단락된 흔적은 Fig. 2에 나타내고 있다. 또한 Fig. 3에 보여 주고 있는 Heating Element Tube의 단면을 보면 저항용접에 의해 제작된 것으로 판단되며, 부풀림 되어 파손된 부위는 Seam 용접부가 아닌 모재부에서 Metal Flow Line을 따라 파손되어 있었다.

따라서 본 연구에서는 보일러의 Tubular Heating Element가 과열에 의한 파손 또는 부식에 의한 파손여부를 조사하기 위해 부식시험, 미세조직 관찰, 절연측정 등을 시험 및 평가하여 파손원인을 규명하고자 하였다.

2. 결과 및 고찰

Heating Element Tube의 직접적인 파단원인은 Tube의 부풀림 현상에서 알 수 있는 바와 같이 내부 팽창에 의한 재질의 고온강도의 감소와 연신을 초과에 의해 발생한 것으로 추정하고 있다. 그러나 이것은 초기 손상에 의한 2차적인 결과에 의한 것이므로, Heating Element의 급격한 파단을 발생시킬 수 있었던 1차 단락원인에 대해서 우선적으로 검토하였다.

첫째, 관수없이 Boiler를 작동하여 과열에 의한 Tube 파손이 일어날 가능성은 매우 희박하였다. 이것은 Boiler 시스템상 관수없이 작동될 수 없도록 Interlocking이 되어 있었으며, 설사 작동이 되었다고 가정하여도, 과열로 인한 열변형이 단락을 일으킬 수 있는 가능성은 매우 적었다. 왜냐하면 RT촬영에서 내부 절연 Paste의 충전과 발열체의 Arrangement가 양호하였고, 또한 180° 변형시험에서도 단락의 가능성이 없었다.

둘째, Pitting 부식에 의한 파손원인은 관수관리가 불량하여 관수 속에 철 Scale이 존재하고, 이들 Scale로부터 Pitting 부식을 야기시켜 단락이 발생하였는지를 검토하였다. 우선 화학성분을 분석하여 적정 재질이 사용되었는지를 확인하였으며, SUS 321의 규격을 만족하고 있었다. 그리고 Pitting 저항성은 ASTM G48에 의거하여 24시간동안 시험한 결과, 모두 Pitting이 발생되었다. 특히 Pitting이 발생된 장소는 모재보다는 Seam용접부에서 용접라인

을 따라 전체적으로 발생되었으며, 이것은 실제 모재에서 발생한 단락과는 거리가 멀다. 따라서 Pitting 부식에 의한 단락은 거의 불가능하다고 사료된다.

셋째, 변형시효에 의한 파손은 모재와 Seam용접부는 Hv 140정도로 용체화 처리시의 경도값과 유사하며, 파손부위는 Tube가 부풀릴 때 가공경화가 일어나 Hv 220정도로 경도가 다소 높게 나타났다. 따라서 변형시효에 의한 파손가능성은 매우 희박하다고 볼 수 있다.

넷째, 절연체의 절연불량에 의한 단락가능성을 검토하였다. 이러한 가능성은 Heating Element의 Cable 연결부의 구조가 대기에 노출되어 있었기 때문에 대기의 습기가 Tube의 절연체내로 유입될 수 있었다. 이들 절연측정은 80℃에서 2시간 건조상태와 건조후 80% 습도에서 2시간 흡습을 시켜 가속시험을 하였다. 저항 측정에는 Type 2404 Insulation Tester를 사용하였으며, 측정 범위는 2,000V/5,000M Ω 이다. 또 저항은 온도에 민감하므로 모든 측정은 가열 시편을 대기온도까지 냉각시켜서 실시하였다.

그 결과, 건조상태에서의 절연값은 100M Ω 이상이 측정되었고, 흡습상태에서의 절연값은 1.5M Ω 이하로 측정되었다. 이러한 현상은 실제 Electric Boiler 장비에서도 확인 가능하였고, 장시간 동안 작동하지 않을 경우에 절연저항이 1M Ω 이하이었다.

따라서 습기 등의 수분 침투로 인해 Heating Coil과 Tube를 절연시켜 주는 절연 Paste의 절연성이 약화되는 것을 알 수 있었으며, 궁극적으로 Heating Element의 파손원인은 절연체의 절연불량이 발생하여서 철심부와 Tube사이에 누설전류가 흘러 단락이 일어났다고 보여진다. 그리고 단락직후 철심부에 과전류가 흘러 급격한 과열과 동시에 절연체의 내부 팽창과 Tube가 부풀림 되면서 파손되었다고 판단된다.

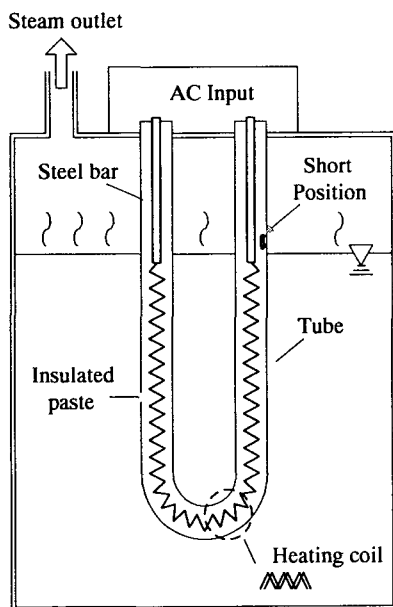


Fig. 1 Schematic diagram of electric steam boiler system

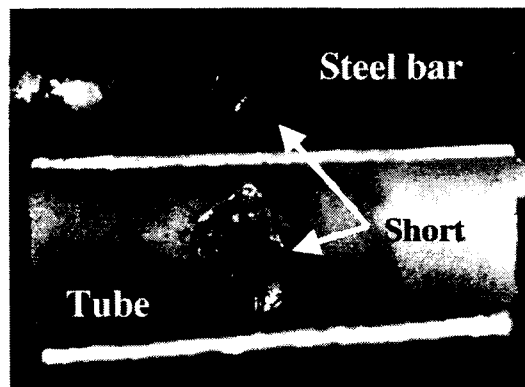


Fig. 2 Photograph of short between steel bar and tube in tubular heating element



Fig. 3 Macrostructure of failure tubular heating element by bulging