

# 윤활유 냉각튜브 이중금속 용접부의 손상원인 분석

부명환 · 박치용\* · 박상규\*\* · 이요섭\*\*

GNEC기술사 사무소 · \*한전전력연구원 · \*\*한국수력원자력(주)

## 1. 서론

대형기계의 구동장치에서 하중을 지지하기 위해 트러스트 베어링을 사용하고 있으며, 베어링의 성능 유지를 위해 윤활유가 공급되고, 이를 냉각하기 위한 냉각장치로 물을 순환시켜 사용한다. 본 연구에서는 냉각장치로 이용되는 윤활유 냉각튜브의 이중금속 용접부 손상에 대하여 전자현미경을 이용한 파면분석을 통하여 손상원인을 분석하였다.

## 2. 윤활유 냉각튜브 이중금속 용접부

윤활유 냉각튜브는 그림 1과 같이 둥근 홀라후프 모양을 하고 있으며, 손상부위는 냉각기 튜브와 블록간의 용접부위이다. 튜브의 재질은 티타늄 계열, 블록의 재질은 황동 계열이라고 보고 되었다. 그림 2에 손상된 윤활유냉각기 용접부의 사진을 나타내고 있다. 외형적 관찰에서 트러스트 베어링과 연결되는 나사산이 있는 부위는 완전히 파손되어 분리되어 있으며, 바깥쪽에는 냉각수 누설에 따른 침전물이 관찰되고 있다.

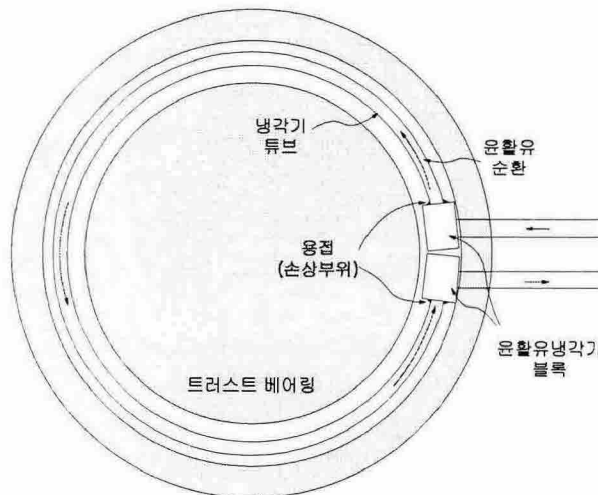


그림 1 트러스트 베어링 및 용접부(손상부위)

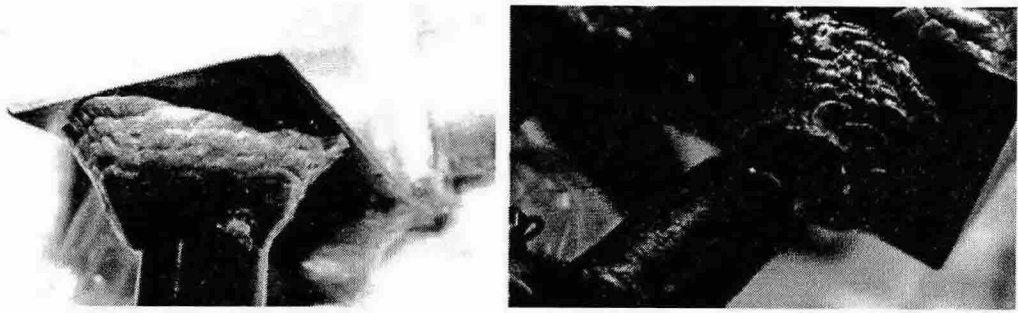


그림 2 유탄유냉각기 용접부 손상사진

### 3. 이종금속 용접부의 손상원인 분석

#### 3.1 광학현미경을 이용한 거시적 파면관찰

그림 3은 용접부 단면의 확대사진을 나타낸 것이다. 용접부에는 많은 단면에서의 내부결함이 육안으로 관찰되고 있다. 그림에서 12시 방향으로는 미세균열이, 6시 및 9시 방향에는 기공과 더불어 튜브모재와 용접재의 경계에는 용접후 냉각시 열팽창의 차이에 의한 발생된 것으로 보이는 균열이 관찰된다. 또한 5시에서 6시 방향 범위에서는 튜브의 일부가 용해되어 있는 흔적이 일부 관찰된다. 일반적으로 용접금속균열은 응고온도범위 또는 직하에서 발생하는 고온균열과 300℃이하에서 나타나는 저온균열로 나누어진다. 고온균열은 응고직후 또는 연성이 적은 용접금속이 수축응력에 의해 인장되어 결정입계에서 균열이 발생하며 육안으로 관찰이 가능할 정도로 균열이 벌어지는 것이 보통이다<sup>1)</sup>.

#### 3.2 전자현미경(SEM)에 의한 미시적 파면관찰

그림 4는 그림 3의 12시 방향을 확대한 사진을 나타낸 것이다. 그림에서 틈새부식이 상당히 진행된 곳으로 파악되며 틈새부식과 함께 흰색의 침전물과 같은 물질이 부착되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4의 침전물을 포함하여 시편 단면에 대한 성분을 확인하기 위하여 각각의 시편에서 3시, 6시, 9시 및 12시 방향에 대하여 튜브 및 용접금속에 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)로 성분을 분석하였다.

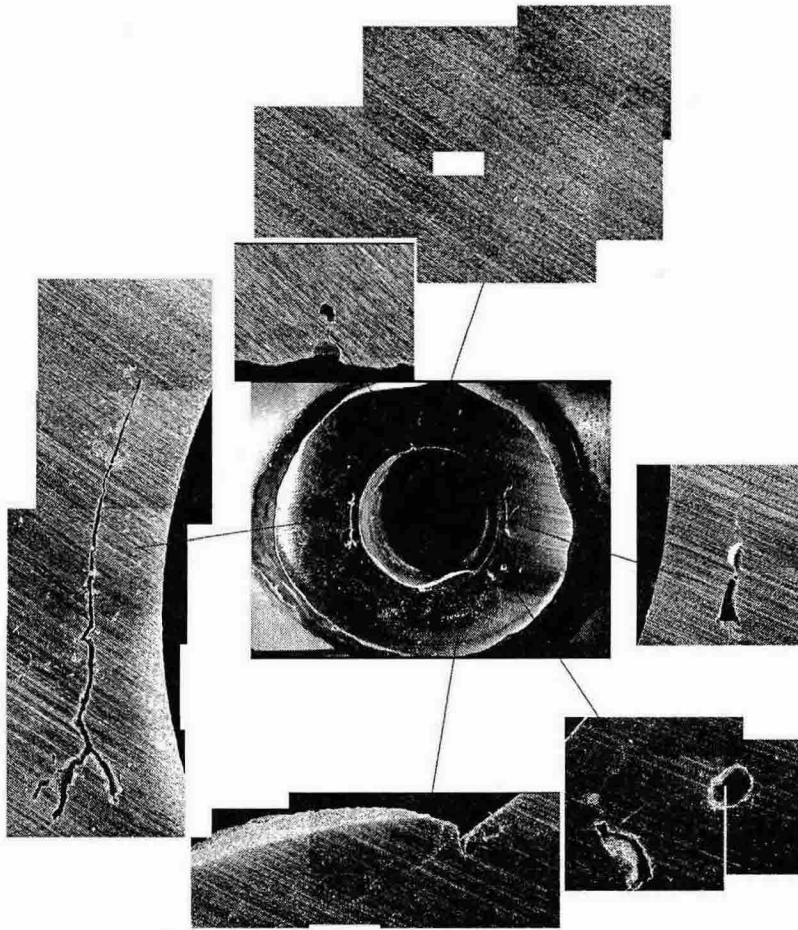


그림 3 용접부 단면의 확대

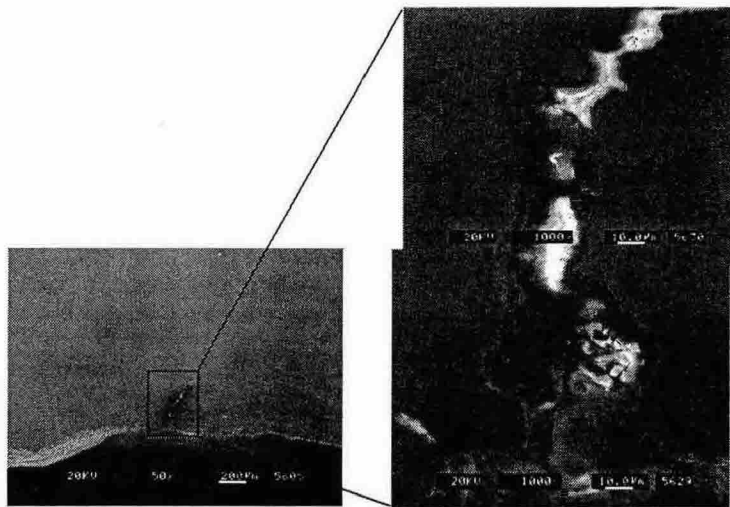


그림 4 용접부 단면의 12시 방향 확대사진(그림 3)

### 3.3 EDX를 이용한 성분분석

표 1은 용접부 단면에 대한 EDX로 분석한 성분의 일부를 나타낸 것이다. 정량적으로 정확한 값은 아니지만 튜브의 경우 약 Cu 70%, Ni 30%의 성분을 나타내고 있으며, 성분분석 결과 튜브의 재질은 NiCu alloy(니켈구리합금, 큐프로니켈)로 추정되며, 제품 사양서와 상이한 것을 확인하였다. 참고로 큐프로 니켈(백동)은 가공성이 좋아서 두께 25mm에서 1mm까지 중간소둔하지 않고 압연할 수 있을 수 있으며, 내식성이 좋고 화폐, 고성능복수기, 열교환기 등에 사용한다.

용접금속의 경우 주성분은 Cu 90%, Sn 18%로 구성되어 있으며, 용접봉의 종류가 용접성격에 따라 다양한 재질의 용접봉이 있기 때문에 정확한 재질은 확인하기가 어려운 실정이다. 튜브재질에 대한 부적절한 정보에 의해 잘못된 용접조건을 설정하게 되었고 이에 따른 용접결합의 발생과 해수에 의한 부식으로 운할유냉각기 용접부에서 누설이 발생한 것으로 판단된다.

표 1 용접부단면의 EDX 성분분석 결과

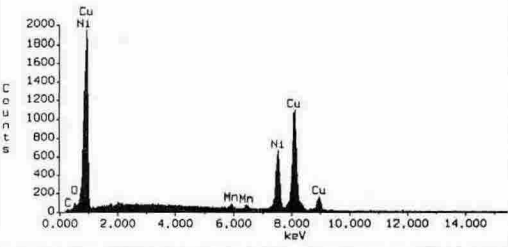
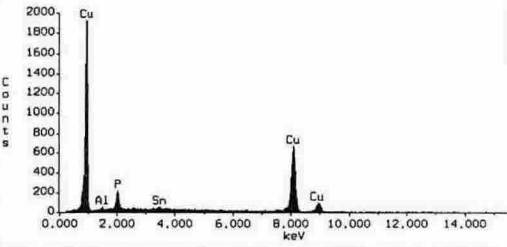
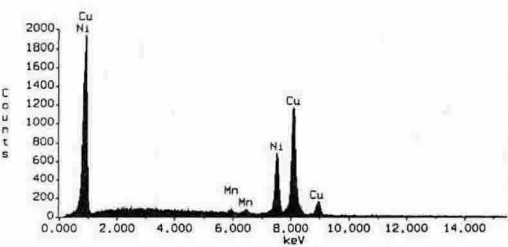
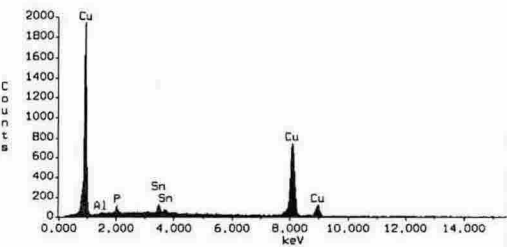
방향	튜브	용접금속
3시	 <p>Cu 67.71%, Ni 31.05%, Mn 1.25%</p>	 <p>Cu 91.69%, Sn 1.25%, P 6.73%</p>
9시	 <p>Cu 60.06%, Ni 30.30%, Mn 0.64%</p>	 <p>Cu 92.19%, Sn 5.92%, P 1.89%</p>

그림 5는 용접부 단면의 12시 방향(그림 4의 흰색부분)의 EDX 성분분석결과를 나타낸 것이다. 용접부 단면의 12시 방향의 침전물의 경우 표 1의 튜브 및 용접부 분석결과와 달리 산소(O), 칼슘(Ca), 탄소(C)가 주성분으로 이루어져 있다.

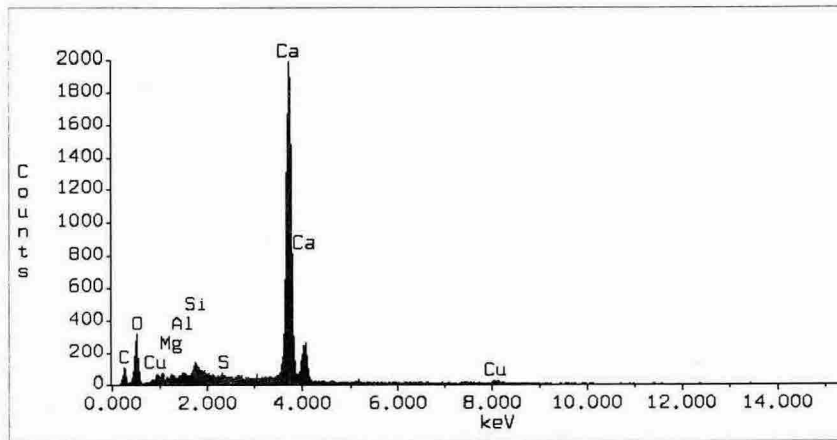


그림 5 용접부 단면의 12시 방향(흰색부분)의 성분  
(O 49.67%, Ca 38.66%, C 8.73%, Cu 1.35%, Mg 0.38%, S 0.23%)

해수의 염분성분 중 NaCl, MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub> 등은 수용성으로 물에 잘 분해 되며, CaSO<sub>4</sub>는 난용성으로 알려져 있다. 용접부에 대한 시편을 제작하기 위해서는 절단, 연마, 세척과정을 거치게 되며, 세척은 주로 증류수와 아세톤을 이용한다. 시편의 세척과정에서 NaCl, MgCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub> 등이 제거되었다고 가정하면 CaSO<sub>4</sub>의 존재는 해수의 누수흔적으로 판단되어 진다.

### 3.4. 손상기구 분석

#### 3.4.1 용접균열 발생

EDX를 이용한 튜브재질의 성분분석 결과, 약 Cu 70%, Ni 30%의 성분을 나타내고 있으며, 튜브의 재질은 NiCu alloy(니켈구리합금, 큐프로니켈)로 추정되며, 용접금속(용접봉)의 경우 주성분은 Cu 90%, Sn 18%로 구성되어 있다. 튜브(인동)와 블록(황동)에 대한 용접에서 Cu를 주성분으로 한 용접봉의 선택은 적절한 것으로 판단된다.

튜브의 경우 두께가 1mm로 얇기 때문에 블록과의 용접에 있어서 튜브(모재)를 용해시키지 않고 블록과 접합을 시켜야 하는 기술적인 문제가 있다. 일반적으로 모재를 용해시키지 않고 용접하는 방법으로 납땜(Soldering)과 접합(Brazing)이 있다. 튜브(인동)의 녹는점은 1155~1065℃이며 황동의 녹는점은 1020~1045℃ 정도로 알려져 있다.

브레이징의 온도는 용접재에 따라 다르지만 700~800℃로 튜브나 블록이 녹지 않는 온도이며, 튜브의 재질이 티타늄 계열이라는 부정확한 정보에 의해 부적절한 용접 전처리와 용접조건(1000℃ 이상의 고온)에서 용접을 실시하여 그림 5에서와 같이 튜브와 용접금속의 용작불량(기공)과 용접금속균열이 발생한 것으로 판단된다.

### 3.4.2 손상기구 고찰

일반적으로 틈새부식과 공식(pitting)은 유사한 메카니즘을 가지고 있으며, 공식(pitting)은 비커 중의 시험편에서 발생하는데 비해 틈부식은 실제 사용 환경에서 생기므로 가동부품의 측면에서 중요한 의미를 가진다. 공식기구(pitting mechanism)로는 중성용액중에서 이온(Cl<sup>-</sup>등)이 표면의 부동태막에 작용하여 피막을 파괴함에 의해 공식(pitting)이 발생하며 조직, 개재물 등 불균일한 부분이 공식(pitting)의 기점으로 되기 쉽다. 일반적인 Cu 합금의 경우 틈새부식은 특정 이온에 의해 피막이 파괴되고, 내부 금속이 용해되어 틈내부에 금속이온이 농축하여 틈내 외의 이온농도차에 의해 형성되는 농도차전지작용(濃度差電池作用)에 의해 부식이 진행된다<sup>2)</sup>.

이상의 손상기구에 대한 정보를 바탕으로 볼 때, 미세한 용접균열을 매개체로 바닷물이 틈새로 들어감에 따라 공식(pitting)이 진전되고 이온차에 의해 부식이 진전되어 균열면이 확장되는 과정으로 진전될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 시나리오는 틈새부식(crevice corrosion)에 의한 손상기구를 입증할 수 있다.

## 4. 결론

본 유탄유냉각기 용접부의 외형관찰, 미세관찰 및 EDX 분석결과를 근거로 손상원인은 다음과 같은 이유로 초기결함, 부식의 진행 및 누수가 발생한 것으로 판단된다.

- 가. 용접시 1000℃ 이상의 고온으로 용접함으로서 1050℃~1100℃의 녹는점을 가지는 인동계열의 튜브에 과도한 열이 가해져 수축에 의한 결정입계 균열이 발생하였다. 이때 미세한 용접금속균열과 기공이 발생하였으나 가압실험이나 비파괴 평가에서 검출될 정도는 아닌 것으로 추정된다.
- 나. 미세한 용접금속균열 내부로 해수가 스며들기 시작하면서 틈새부식(crevice corrosion)이 발생하여 진전이 이루어진다.
- 다. 틈새부식이 용접금속균열을 따라 진행하여 틈새확장이 이루어지며, 용접결함에 의한 기공 등과 합체하여 냉각수의 누설이 발생된 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 금속재료의 균열과 파괴, 김정근, 박해웅, 도서출판 골드, 2003.
2. 금속부식, 박용수, 민음사, 1988.