

산소분압에 따른 액체 납 속에서의 Fe 및 Ni의 부식특성 (Corrosion resistance of Fe and Ni in liquid lead)

정광진*, 임정연, 정승호, 황일순
서울대학교 원자핵공학과

1. 서론

원자력의 취약점인 사용 후 연료처분과 우라늄자원의 유한성을 극복할 수 있는 기술적 방안으로 액체금속로가 있다. 이러한 미래형 원자력 설비에서 액체금속 냉각재 기술은 장치의 성능 및 안전성 확보를 위해 핵심적 요소이다. 그러나 지금까지 주로 연구된 액체금속은 Na, K, Li 등으로 열적 특성은 우수하나 화학적 활성이 높아 고속로에 적용되었을 때, 화재에 의한 안전성 문제를 불러 일으켰다. 비활성 액체금속은 화재를 일으키지 않고 물과 반응하여도 수소 방출이 없어 원자력 안전에 매우 바람직한 냉각재이다. 그러나 이들의 고유한 화학적 특성상 steel 등 주요 구조재료를 부식하기 때문에 현재까지는 구 소련만이 산소분압을 조절한 방식기술을 이용하여 기술개발에 성공하였으나 대부분 실험적 접근을 사용하여 기초적 이해가 부족하며, 체계적 database가 발표되지 않아 미래 원자로를 개발하는데 응용할 수 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비활성 액체금속중 원자력냉각재중 Pb-Bi와 용존산소 조절에 의한 부식억제 측면에서 유사한 성질을 가진 액체상태의 Pb에 대하여 Yittria Stabilized Zirconia를 통한 산소분압 조절 및 이때의 Pb 내에서의 Fe 및 Ni wire의 부식특성에 대하여 실험을 수행하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는, 산소 분압을 조절하기 위하여 Yittria Stabilized Zirconia (YSZ)를 통해 전류를 흘려 산소를 전기화학적으로 pumping하는 방식을 썼고, 또 zirconia 양단에 걸린 Nernst전압을 측정함으로써 아래의 식과 같이 산소 분압을 측정하였다.

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2-cell}}{P_{O_2-ref}}$$

위 식에서 R은 gas 상수, F는 Faraday 상수, P_{O_2-cell} 및 P_{O_2-ref} 는 각각 알루미나(alumina) 컵속과 밖의 산소분압을 지칭한다(그림 1). 실험의 온도 범위는 600 ~ 700 °C로 잡았는데 그 이유는 YSZ가 동작할 수 있는 최저 온도이자 산소 반응 전극으로 쓰인 silver가 안정되게 동작할 수 있는 범위이기 때문이다. 산소 분압을 조절하고 그때의 lead내에서 대표적 구조재 금속의 부식정도를 측정하기 위해 Ferritic Stainless-steel (60% Fe)과 Ni-Cr (66% Ni)의 조성을 갖는 직경 200 μ m의 wire를 사용하였다. 그림 1과 같이 lead를 가두고 있는 load cell 및 이의 가열을 위한 furnace, 그리고 power controller와 data acquisition system 및 cell이 glass에 의해 봉합되기전 질소 분위기를 만들 수 있는 N₂ gas cylinder와 air를 흘려 air 분위기를 만들 수 있는 air gas cylinder가 장치 구성의 전부이다. Load cell은 내경 16mm, 외경 20mm이고 깊이 12mm 높이 14mm인 Al₂O₃, 즉 알루미나 컵으로 이루어 지고, Fe, Ni-Cr 및 Pt wire를 lead의 부력에 의해 떠오르지 않도록 알루미나가 주성분

인 세라믹 본드를 이용하여 바닥에 부착시켰다.

그림 2에 각 전극들의 배선도가 개략적으로 나타나 있다. A는 type K thermocouple로써 ice junction을 거쳐 voltmeter와 연결되어 온도를 측정하고 B는 zirconia 양면에 연결된 silver wire이다. B에 전류를 흐르게 하여 oxygen pumping을 하고 pumping이 끝나면 전류를 끊고 oxygen potential을 측정하게 된다. 그림의 C는 Fe wire와 Ni-Cr wire 및 Pt wire를 보이고 있다. Lead내에서 Fe 및 Ni-Cr의 산화막의 두께에 따른 AC impedance 및 DC resistivity를 측정하게 된다. 즉 Fe 와 Pt, 혹은 Ni-Cr 과 Pt, 혹은 Fe 와 Ni-Cr을 양극으로 impedance 및 resistivity를 측정하였다. AC impedance 측정을 위해서는 Solartron model 1260을 썼으며 DC resistivity 측정을 위해서는 Solartron model 1286 과 electrometer를 병용하였다. 여기서 Solartron에서 probe wire 길이의 inductance 효과를 줄이기 위하여 각 wire들을 cell에 근접한 위치에서 두 갈래로 분기하여 4-probe 방식을 사용하였다.

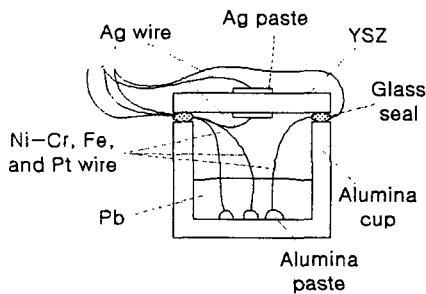


그림 1 Load cell 구성도

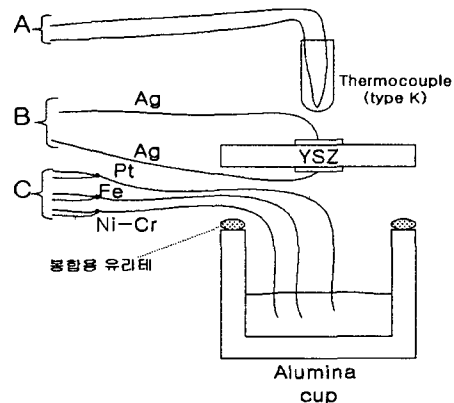


그림 2 전극 배선도

3. 결과요약

본 연구에서 고온에서 산소에 대한 선별적 투과막인 Yttria-stabilized Zirconia (YSZ)를 이용하여 전기화학적으로 산소를 pumping하고 분압을 10^{-37} 기압까지 측정하는데 성공하였다. 이로써 구조재료의 부식 및 유로 침전 현상에서 산소의 영향을 연구하는 기반을 구축하였다. YSZ를 사용하여 산소를 pumping 하는 온도를 통상 700 °C 이상으로 간주하였으나 본 연구에서는 silver 촉매를 이용하여 570 °C의 낮은 온도에서도 효과적인 작동을 확인하였다. AC Impedance 방법으로 YSZ의 전기화학적 특성을 이론적 경향과 일치하게 측정할 수 있었다.

구조재료의 용해를 억제하는 산화막의 형성을 AC Impedance 방법으로 관측하는데 성공하였다. 산화 피막의 형성은 저항성분 및 capacitance 성분을 함께 보여서 저항이 주파수의 증가에 따라 체계적으로 감소하는 이론적 특성을 보여주었다. 실험의 종료후 시료의 현미경 관찰에서 산화막 형성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 AC Impedance방법의 적용을 약 2년 먼저 착수한 미국의 Los Alamos National Laboratory 보다 앞서 성공한 것일 뿐아니라, 전기화학 기법의 새로운 시도로서 학술적 가치가 높다고 판단된다. 또한 앞으로 산화막 형성 연구 및 재료 개발에 긴요한 기술로 활용될 것이다.