

YSZ를 응용한 액체 납-비스무스 내의 산소분압 조절  
- I. 이론적 기반

Theoretical Basis of Oxygen Pressure Control in Liquid Pb-Bi  
using YSZ

정승호, 황일순, 박병기  
서울대학교  
서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1

요 약

납-비스무스 액체금속로를 구현하기 위해서는 액체 납-비스무스에 의한 재료의 부식문제를 해결해야 한다는 것이 알려졌다. 본 실험은 부식문제 해결의 방안으로 알려진 구조재 표면에서의 산화피막 형성을 실제로 검증하기 위해 기초적인 현상들을 살펴보았다. 산화피막 형성에 의한 구조재의 부식억제는 일반적으로 냉각재(액체 납-비스무스) 내의 용존 산소량을 조절하여 구조재로 쓰이는 주요 금속 성분이 냉각재로 녹아나가는 것은 막고 냉각재가 산화되어 슬러그가 생기지 않도록 하는 방법이다. 본 논문에서는 cover gas에서의 산소분압을 YSZ로 조절하는 방법을 검증하고 이론적으로 cover gas 산소 분압에 따른 액체 납-비스무스 내의 용존 산소량을 유도하였다.

Abstract

To develop a liquid Pb-Bi cooled reactor, it is necessary to solve the structural material corrosion problem caused by Pb-Bi. This experiment examine the fundamental behaviors to practically test the oxide film formation on the surface of structural materials known as solution of corrosion inhibition in liquid Pb-Bi. The corrosion inhibition through oxide film formation is to prevent metals from dissolving into liquid Pb-Bi though not forming coolants slug resulted from oxidation. In this paper, we examined the oxygen pressure controllability using YSZ in cover gas, and theoretically derived the relationship between oxygen cover gas pressure and dissolved oxygen in liquid Pb-Bi.

## 1. 서론

최근 경수로 및 중수로에서 나온 사용후연료를 처리하는 방안의 하나로 소멸처리 방식이 활발히 의논되고 있다. 국내에서도 높은 중성자 스펙트럼으로 사용후연료에 포함된 Np, Pu, Am, Cm 등을 핵분열을 통해 분쇄하고 Tc, I 등을 안정한 원소로 변환하는 개념이 개발되었고 이에 안전성 및 경제성을 함께 고려한 납-비스무스 냉각 고속로인 PEACER가 주목받기 시작하였다.<sup>1)</sup> 납, 납-비스무스 등 비활성 액체 금속은 초기 고속로 개발 당시 나트륨 등과 함께 고속로의 냉각재로 고려되었으나 심각한 부식 문제 등 재료적 문제의 한계를 극복하지 못하였다. 러시아에서는 잠수함 등으로의 응용에 성공하였으며 알려진 바로는 구조재의 표면에 보호 피막인 산화막을 형성시키는 방법을 통해 이를 해결하였다.<sup>2)</sup> 구조재의 주 성분인 Fe, Cr, Ni 등은 그 산화물의 형성 자유에너지가 냉각재인 Pb, Bi의 산화물에 비해 음의 방향으로 훨씬 크므로 Pb, Bi의 산화물 형성은 일어나지 않으면서 Fe, Cr, Ni 등의 산화물을 형성시킬 수가 있다. Leipunsky는 이에 착안하여 냉각재 내 용존 산소량을 조절함으로써 이러한 금속 산화물을 구조재 표면에 형성시키고 이 산화막이 구조재들의 부식을 막는 방법을 개발하였다.<sup>3)</sup>

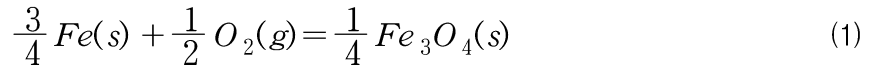
이미 이에 대한 많은 연구가 과거에 수행되었으며 최근 다시 활발하게 국외에서 이뤄지고 있다. 대체적으로 소용량의 Pb 혹은 Pb-Bi loop을 제작하고 실제 원자로 상태를 모사하는 실험이거나 도가니에 Pb 혹은 Pb-Bi를 녹여 넣고 정적실험을 하는 경우로 나눌 수 있다.<sup>4),5),6),7),8)</sup> 원자로심을 거대한 냉각재의 pool로 간주할 경우, pool 위쪽은 기체가 존재하며 이와 같이 컵 속의 물 위로 공기가 존재하는 것처럼 액체 Pb-Bi 위를 덮고 있는 기체를 cover gas라 부른다. 이들의 실험은 공통적으로 Yttria-Stabilized Zirconia(YSZ)를 산소 센서로서 사용하고 있으며 장치 내의 H<sub>2</sub> 와 H<sub>2</sub>O 압력을 조절함으로써 cover gas 내 산소분압을 조절하고 있다. 이에 따른 액체 Pb-Bi 내 용존 산소의 활동도를 YSZ를 이용하여 측정하고 구조재료의 산화를 관찰한다.

본 실험에서는 기존 연구의 경향과는 달리 cover gas의 산소 분압 조절을 YSZ를 이용하여 산소 pump 기능을 달성하고자 하였다.

## 2. 열역학적 근거

Pb-Bi에서 구조재료의 부식억제는 적절한 산소농도제어를 통하여 형성된 산화막에 의하여 가능한 것으로 알려져 있다. 즉 적절한 산소의 열역학적 활성도에서 구조재료 표면에는 Fe가 산화하여 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>를 형성, 보호막을 만들고 Pb-Bi에서는 PbO 등의 산화물이 슬러그(slug)를 형성하지 않아 원활한 냉각재 흐름을 유지할 수 있다.<sup>3),9)</sup> 따라서 Pb-Bi에 용해된 산소의 열역학적 활동도는 부식 억제 효과를 발현하기 위한 매우 편리한 지표이며 산소센서를 이용한 측정을 통해 정량화가 가능하다. 그러나 산소농도의 조절은 Pb-Bi에서의 열역학적 활성도 조절뿐만 아니라 이와 평형을 이루고 있는 산소기체의 분압을 조

절하여도 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있다. 즉 산소기체의 분압과 Pb-Bi에서 산소의 열역학적 활성도 사이의 관계를 아는 것은 효과적인 산소제어기술의 확립에 유용할 것이다. 적절한 산소의 열역학적 활성도는 산화물을 형성하는 열역학적 원리로부터 얻어질 수 있다. 일반적으로 구조재료에서 보호막으로 작용할 피막의 주된 원소는 Fe로 볼 수 있으며 Fe 산화막의 형성은 다음 반응식 및 평형상수로 표현할 수 있다.



$$K = \frac{a(Fe_3O_4)^{1/4}}{a(Fe(s))^{3/4} a(O_2(g))^{1/2}} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{P(O_2)^{1/2}} = \exp\left(-\frac{1/4 \Delta G_f(Fe_3O_4)}{RT}\right)$$

Pb-Bi 내에서 PbO의 슬러그가 형성되는 반응은 다음과 같이 표현된다.



$$K = \frac{a(PbO(s))}{a(Pb)a(O_2(g))^{1/2}} = \frac{1}{P(O_2)^{1/2}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_f(PbO)}{RT}\right) \quad (4)$$

$\Delta G_f$ 는 형성 자유에너지(Gibb's free energy of formation)로서 표 1에 정리되어 있다. Pb-Bi에서 반응물을 생성하는 여러 원소들의 용해도(solubility)는 표 2에 정리된 바와 같이 온도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 식 (2) 및 식 (4)에 나타난 바와 같이 산화막을 형성하기 위한 산소분압은  $P(O_2)$ 로 표현하였다. 여러 가지 산화물에 대한 산소분압의 값은 표 2에 정리되어 있다.<sup>7)</sup> 이하 모든 단위는 표들에 나타난 바와 같이 J/mol, wt%, atm 등을 사용하기로 한다.

Henry의 법칙에 Sievert의 법칙을 결합하면 다음과 같이 된다.<sup>4),5),6),7)</sup>

$$K = \frac{a(PbO(s))}{a(Pb)a(O_2(g))^{1/2}} = \frac{1}{P(O_2)^{1/2}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_f(PbO)}{RT}\right) \quad (5)$$

$$a(O) = \frac{C(O)}{C(s, O)} = \frac{P(O_2)^{1/2}}{P(s, O_2)^{1/2}} \quad (6)$$

여기서  $C(O)$ 는 용해도 제한에 이르기 전의 Pb-Bi내 용존산소 농도를 의미하며  $C(s, O)$ 는 용해도 한계에 도달한 상태의 용존산소 농도(즉, solubility)를 의미한다.  $P(O_2)$ ,  $P(s, O_2)$  역시 각각의 경우에 대한 cover gas 내 산소 분압을 의미한다. 식 (6)과 용해도 관계식을 표현한 IPPE 자료<sup>9)</sup>인 표 3, 산화막 형성 산소분압을 표현한 표 2 등을 이용하면 아래와 같이 용해도 한계에 이르기 전의 Pb-Bi 내 용존산소 농도를 산소분압에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
C(O) &= C(s, O) \frac{P(O_2)^{1/2}}{P(s, O_2)^{1/2}} \\
&= 10 \left( 1.2 + \frac{-3400}{T} - \frac{10.55}{2} - \frac{-23060}{2T} \right) \cdot P(O_2)^{1/2} \\
&= 10^{-4.075 + \frac{8130}{T}} \cdot P(O_2)^{1/2}
\end{aligned} \tag{7}$$

그러므로 산소분압 조절로 Pb-Bi 내 산소농도를 조절코자 할 경우, 만일 Pb-Bi 의 산소 농도가 충분한 난류조건과, 산소의 확산 등에 의해 균일하게 유지되기만 한다면 식 (7)을 이용하여 최적화된 운전 조건에 필요한 cover gas 내 산소분압 값을 찾을 수 있다.

이제 구조재료의 부식은 억제하고 PbO 슬러그의 생성은 방지할 수 있는 최적의 산소 활동도 조절영역을 구하도록 하겠다.

식 (5)에서 산소분압은 용해도 한계에서의 산소분압이므로,

$$\frac{1}{P(s, O_2)^{1/2}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_f(PbO)}{RT}\right) \tag{8}$$

그러므로 식 (6)에 식 (8)의 결과를 대입하면 산소의 활동도는 다음과 같이 나타난다.

$$a(O) = P(O_2)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta G_f(PbO)}{RT}\right) \tag{9}$$

여기서 산소의 활동도  $a(O)$ 는 Pb-Bi 내의 산소 활동도이며 보호피막인  $Fe_3O_4$ 가 생성되기 위한 최소한의 활동도여야 하므로 산소 분압  $P(O_2)$ 는 식 (2)의 산소분압과 일치하여야 한다. 이를  $P(O_2, Fe_3O_4)$ 라고 둔다면 다음과 같이 보호피막 형성을 위한 최소 산소 활동도를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
a(O, \min) &= P(O_2, Fe_3O_4)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta G_f(PbO)}{RT}\right) \\
&= \exp\left(\frac{1/4\Delta G_f(Fe_3O_4) - \Delta G_f(PbO)}{RT}\right)
\end{aligned} \tag{10}$$

표 1의 결과를 이용하면 수식 (11)과 같이 최소 활동도의 값을 구할 수 있다.

$$\log a(O, \min) = -1.19 - \frac{2948}{T} \tag{11}$$

용존산소의 농도에 따른 산소의 활동도는 표 2의 결과를 이용하면 다음과 같다.

$$\log a(O) = \log C(O) - \log C(s, O) = \log C(O) - 1.2 + \frac{3400}{T} \tag{12}$$

또한 Pb-Bi 내 Fe의 농도에 따른 산소의 활동도는  $Fe_3O_4$ 와 Pb 간의 산소 교환 반응에 의해 다음과 같이 나타난다.<sup>8),9)</sup>

표 1 산화물의 형성 자유에너지(free energy of formation), oxide handbook 자료<sup>8)</sup>

$\Delta G_f = A_1 + B_1/T$ [J/mol]	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	NiO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
A <sub>1</sub>	-582070	-220670	-237520	-1108300	-1137700	-245570	-420370
B <sub>1</sub>	282.0	101.0	88.04	313.3	260.5	54.45	145.6

표 2 산화물 형성을 위한 산소 분압<sup>8)</sup>

$\log P(O_2) = A_3 + B_3/T$ [atm]	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	NiO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
A <sub>3</sub>	9.82	10.55	9.20	8.19	9.07	15.22
B <sub>3</sub>	-20275	-23060	-24821	-28954	-39630	-43929

표 3 여러 원소들의 Pb-Bi 내에서의 용해도(solubility), IPPE 자료<sup>9)</sup>

$C_s = A_2 + B_2/T$ [wt%]	Ni	Fe	Cr	O
A <sub>2</sub>	1.53	2.01	-0.02	1.2
B <sub>2</sub>	-843	-4380	-2280	-3400

$$\begin{aligned}
 \log a(O) &= -\frac{3}{4} (\log C(Fe) - \log C(s, Fe)) \\
 &+ \frac{1/4 \Delta G_f(Fe_3O_4) - \Delta G_f(PbO)}{2.303RT} \\
 &= -\frac{3}{4} \log C(Fe) + 0.318 - \frac{6233}{T}
 \end{aligned} \tag{13}$$

이상의 결과를 종합하여 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. 여기서  $\log a_{min}$ 은 식 (11)에서 구한 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 보호피막 형성을 위한 최소의 산소 활동도이며  $\log c(O) = -4, -6, -8$  등으로 표시된 그래프는 용존산소 농도를 일정하게 유지할 경우의 산소 활동도이다. 이와 반대방향으로 그려진 그래프는, Pb-Bi 내 용존 Fe의 농도가 일정한 것으로서  $\log c(Fe) = -4, -6, -8$  등으로 표시되어 있다.

최소 활동도 이하 영역에서는 Fe가 Pb-Bi 쪽으로 녹아 나오는 부식 현상이 진행되며 (Corrosion 영역) 활동도가 1이 되면 PbO의 슬러그가 형성되어 (Contamination 영역) 냉각재의 흐름이 방해받게 된다. 그림 2에서 운전온도 영역을 350°C에서 500°C로 잡은 것과 같이 냉각재 순환 계통의 특징에 따라 온도 영역을 설정할 경우 설정 온도 내에서 구조재의 부식은 억제하면서도 슬러그에 의한 냉각재 오염을 막을 수 있는 산소의 활동도 조절 영역을 찾을 수 있게 된다.

그림 2에서 나타내었듯이 냉각재 순환계통의 저온부에서 산소 활동도를 거의 1이 되도록 (즉 PbO 슬러그가 생성되기 직전의 상태) 용존산소의 농도를 일정하게 유지하면

Pb-Bi 내 solubility limit보다 매우 낮은 농도(10의 거듭제곱 배 이상 차이)로 Fe의 용존량을 유지할 수 있으므로 구조재의 부식을 막는 데에 더욱 효과적이다.<sup>8)</sup>

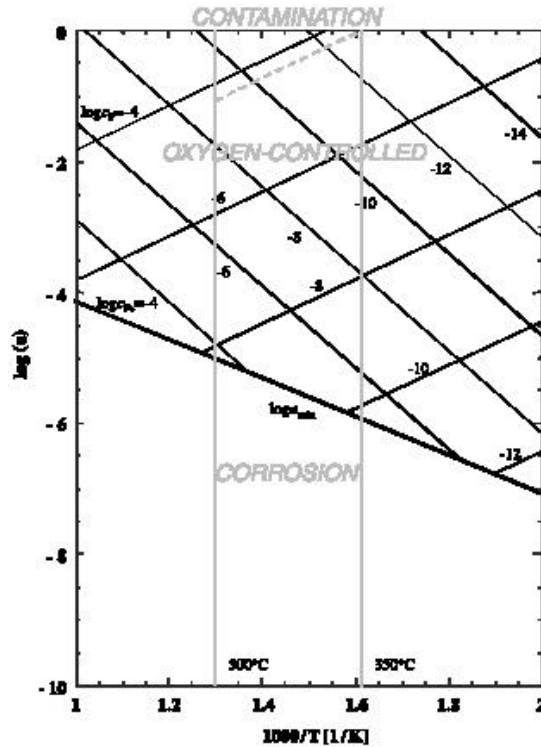


그림 1 구조재 부식 억제 및 슬러그 생성 방지를 위한 Pb-Bi 내 산소 활동도 조절 영역<sup>8),9)</sup>

### 3. 검증실험 장치 구성

산소 이온의 전도체로서,  $ZrO_2-5\%Y_2O_3$ 의 조성을 가지며, 10시간동안  $1500^\circ C$ 에서 소결한 두께 1mm, 지름 20mm의 안정화 지르코니아를 사용하였다. Ar 기체( $O_2 < 1$  ppm), 0.1% 산소를 가지는 Ar 기체를 이용하여 산소 분압 조절 및 측정 분위기를 조성하였다.

Pb-Bi 합금의 용융온도 이상의 고온에서도 안정하고, 산소를 투과시키지 않는 알루미늄이나 도가니를( $Al_2O_3$ , 내경 16mm, 외경 20mm, 깊이 12mm, 높이 14mm) 사용하여 셀을 구성하였다. 각각의 금속선 시편들은 Pb-Bi가 녹아도 부력에 의해 떠오르지 않도록 셀 바닥에 세라믹 접착제를 사용하여 고정시켰다.

Pb-Bi를 셀 높이의 80%까지 채운 뒤 서로 접촉하지 않도록 시편을 배치하였다. 전류인가와 측정을 위해 YSZ의 양면에 silver paste를 바르고 소결하여 금속선을 부착시켰다.

알루미나 도가니와 YSZ 사이의 밀봉을 위해 유리분말을 이용하였다. 이를 용매와 섞어 셀 상단과 YSZ, 그리고 알루미나 링에 도포하고 약 1,100 °C 전기로에서 10 시간 동안 녹인 후 식혀 고체 상태로 굳혔다. 실험이 시작되어 온도가 상승하면 도포된 유리분말은 550 °C에서 700 °C 사이에서 경화되면서 셀, 금속선, 알루미나 링, YSZ 사이의 밀봉을 담당한다.

그림 3에 각 전극들의 배선도가 개략적으로 나타나 있다. 그림에서 A는 type K형 열전대로써 온도를 측정하며 B는 YSZ 양면에 연결된 백금선이다. 전류를 인가하여 cell 내의 산소 분압을 조절한 뒤, 열린 회로상태에서 양단의 전위를 측정하면 그 분압을 계산할 수 있다. 그림의 C는 금속선을 나타내며, Pb-Bi 내에서 각 선에 형성된 산화막의 두께에 따른 임피던스를 측정하게 된다. 이와 같이 배선 작업된 셀을 아르곤 분위기에서 봉합한 뒤, 승온하였다. 전체 시스템 구성도는 그림 4에 나타내었다. 승온되는 동안 금속선 사이의 저항을 Solatron 1286 potentiostat과 HP digital multimeter로 측정하여 셀 내의 Pb-Bi의 상태를 추정하였다. 한편, Solatron 1260 FRA(Frequency Response Analyzer)를 이용하여 고온에서 YSZ의 임피던스를 측정하였다. Pb-Bi가 완전히 용융되면 YSZ 양단에 일정 시간동안 전류를 인가하여 셀 내의 산소를 제거한 뒤, 전류를 끊고 안정된 전위를 측정한다. 실험에서 탐침선들의 인덕턴스 효과를 줄이기 위하여 각 금속선들을 셀에 근접한 위치에서 두 갈래로 분기하여 4-probe 방식을 사용하였다.

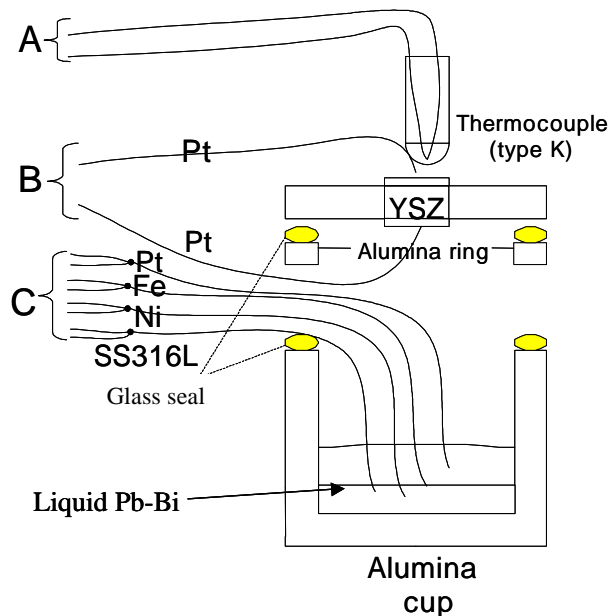


그림 2 구조재 산화막 평가 실험에 사용된 고온 Pb-Bi 액체금속 cell

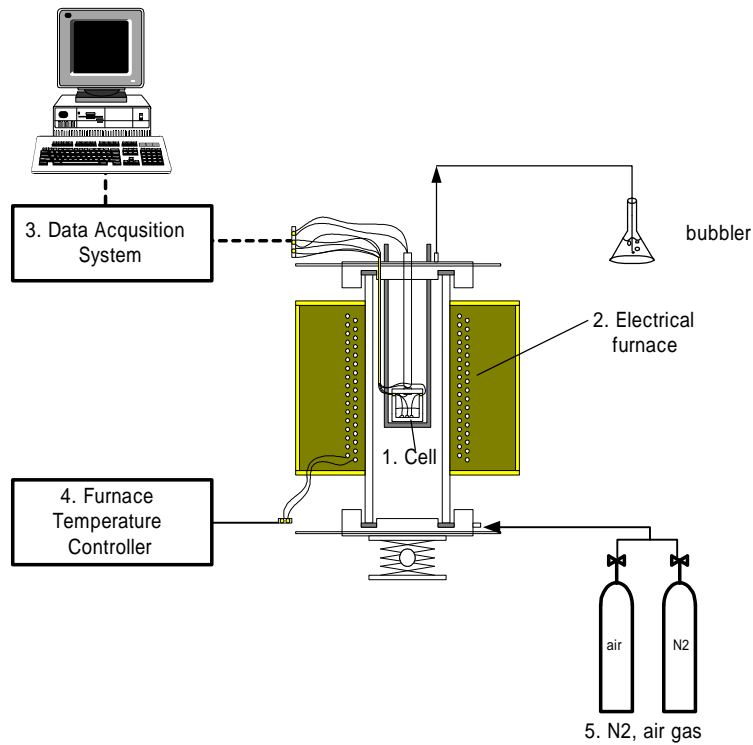


그림 3 산소 pump 실험장치 구성

#### 4. 산소분압 조절 실험

산소분압 조절을 이용한 액체 납-비스무스 내 금속 시편의 산화막 변화를 impedance spectroscopy를 통해 측정하고자 하였다. 산소분압을 조절하고자 하는 대상은 알루미늄 컵 내부의 액체금속과 YSZ membrane 사이에 존재하는 기체이며 이를 cover gas라 부른다.

이전 서너 차례의 실험에서 대기와 같이 산소가 많은 환경에서는 납-비스무스가 산소와 활발히 반응하여 산화막을 형성, 온도를 올려도 용융이 되지 않는 현상이 발생하거나 lead wire를 쉽게 산화시켜 손상을 주거나 glass seal이 손상되는 등 여러 가지 문제를 발생하였기에 우선적으로 1 ppm의 산소 불순물을 포함한 Ar 기체를 흘려 분위기를 조성하였다.

그림 5는 Ar을 흘려주면서 온도를 500 °C로 상승시켜 일정 시간 유지하는 동안 측정한 YSZ membrane의 임피던스 특성이다. 이론적인 계산에 의하면 보통 3개의 반원을 예상할 수 있으며 실제 측정에서는 2개의 반원만을 얻을 수 있었다. 복소 평면에서 허수축으로 양의 방향을 가지는 값들은 고주파수 부분에서의 인덕턴스 성분이라 생각된다.

앞서 설명한 바와 같은 산소의 침투로 인한 문제점을 미연에 방지하기 위해서 Ar 기체



를 충분히 흘려주는 방안 외에도 glass seal이 충분히 softening 되는 영역이라 여겨지는 700 °C로 온도를 올려 seal을 확실하게 한 후 온도를 내리며 실험하는 방법을 택하였다. 기존 실험에서 나타난 바로는 초기에 밀봉이 동작하지 않는 온도 영역에서 장시간의 실험을 할 경우 잔존해 있는 다량의 산소에 의해 이미 언급한 문제를 발생시킬 가능성이 있었기 때문이다.

초기 산소분압이  $10^{-20}$  atm 이하로 나오자 여러 번의 pumping 시행(시행번호 GS01에서 GS18)을 통해 분압을 증가시키는 실험을 하였으며 전압을 YSZ 양단에 가한 후 open circuit potential을 살폈다. 첫 수 차례의 시도(시행번호 GS18까지의 pumping) 이후 산소 분압이  $10^{-15}$  atm 부근에서 변하지 않자 이 현상을 다른 측면에서 보기 위하여 시행번호 GS16, GS17, GS18에 해당하는 것과 같은 양의 전하를 흘려 산소를 밖으로 버려 보았다. 이것이 시행번호 GS19, GS20, GS21이며 그림 6에 나타난 바와 같이 산소를 안으로 집어 넣을 때와 달리 전하량에 따른 산소 분압 변화가 좀더 민감한 것으로 나타났다.

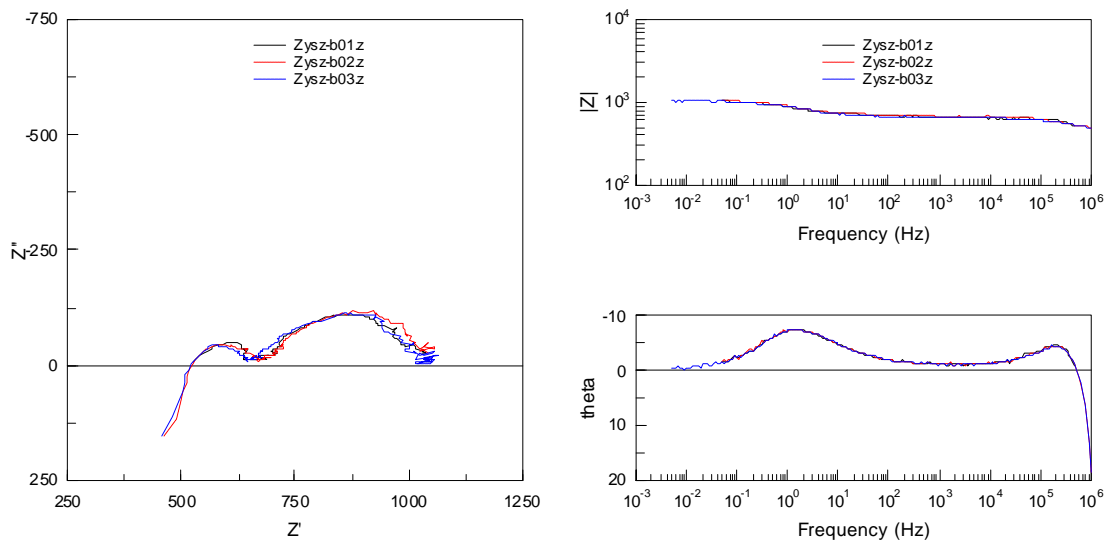
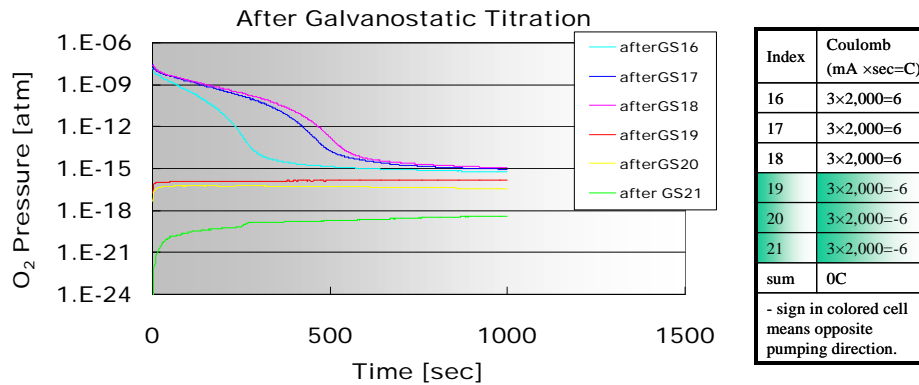


그림 4 500 °C에서 YSZ membrane의 임피던스 특성 그래프

표 4 같은 양의 전하를 cell 안으로 집어 넣은 후 다시 빼냈을 때의 산소 분압 변화

시행번호	GS16	GS17	GS18	GS19	GS20	GS21	합계
전하량 [C]	6	6	6	-6	-6	-6	0 C



### 700 °C, Ar(0.1ppm O<sub>2</sub> impurity)

그림 5 700 °C에서 같은 양의 전하를 cell 안으로 집어넣은 후 다시 cell 밖으로 빼내는 과정에서의 cover gas 내 산소 분압의 변화

## 5. 결론 및 요약

액체 Pb-Bi 냉각재 내에서 산화막 형성을 통한 구조재의 부식을 방지하기 위한 방안을 위해 cover gas 산소분압에 따른 액체 Pb-Bi 내의 용존산소량 변화의 관계식을 열역학적 기초식에 근거하여 유도하였다. 산소센서 및 펌프의 기능을 하는 것으로 널리 알려진 YSZ(Yttria-Stabilized Zirconia)를 이용하여 기존의 산소분압 조절 방법인 H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O의 압력 비율 조절 방법과 다른 산소펌프의 활용 가능성을 검증하였다. 액체 Pb-Bi 내 용존 산소의 용해도 한계치가 높기 때문에 Pb-Bi 용융 후 용해되어 있는 산소를 전처리해야 하는 것으로 나타났으며 이는 YSZ pump의 촉매 전극의 용량 한계로 인해 pumping 전류가 제한되므로 cover gas 내의 산소분압 조절을 YSZ 전극으로 수행하기 위해서는 매우 중요한 작업임을 알 수 있었다.

## 6. 감사

본 연구는 원자력연구소와 공동으로 수행한 KISTEP의 NERI 과제인 “STAR, STAR 원자로 설계를 위한 요소기술 개발”의 지원을 받았습니다. 연구 진행 과정에서 조언을 해주신 서울대 유한일 교수님께 감사의 뜻을 전합니다.

## 7. 참고문헌

- 1) I.S. Hwang, S.H. Jeong, B.G. Park, et. al. "The Concept of Proliferation-resistant, Enviroment-friendly, Accident-tolerant, Continual, and Economical Reactor(PEACER)", Prog. Nucl. Energ. vol. 37, No. 1-4, pp. 217-222, 2000.
- 2) B.F. Gromov, V.I. Subbotin and G.I. Toshinskii, "Use of Melts of Lead-Bismuth Eutectic and Lead as Nuclear-Power-Plant Coolants", Atomnaya Energiya, Vol. 73, No. 1, pp. 19-24, July, 1992.
- 3) J. R. Weeks and C. J. Klamut, "Liquid Metal Corrosion Mechanisms", International Atomic Energy Agency, pp. 105-132, 1962.
- 4) G. Müller, G. Schumacher, F. Zimmermann, "Investigation on oxygen controlled liquid lead corrosion of surface treated steels", Journ. Nucl. Mat. 278, 85-95, 2000.
- 5) V. Ghetta, F. Gamaoun, et. al., "Experimental setup for steel corrosion characterization in lead bismuth", Journ. Nucl. Mat., 296, 295-300, 2001.
- 6) Y. Kurata, M. Futakawa, et. al., "Corrosion studies in liquid Pb-Bi alloy at JAERI: R&D program and first experimental results", Journ. Nucl. Mat., 301, 28-34, 2002.
- 7) J. Konsys, H. Muscher, et. al., "Development of oxygen meters for the use in lead-bismuth", Journ. Nucl. Mat., 296, 289-294, 2001.
- 8) Ning Li, "Active Control of Oxygen in Molten Lead-Bismuth Eutectic Systems to Prevent Steel Corrosion and Coolant Contamination", J. Nucl. Mat., Vol. 300, pp73-81, 2002.
- 9) B.F. Gromov, Y.I. Orlov, et. al., "The Problems of Technology of the Heavy Liquid Metal Coolants(Lead, Lead-Bismuth)", Proc. of Conf. on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology(HLMC) 99, vol 1. 1999.