

고온 용융염 액위, 밀도, 동적표면장력 동시 측정장치 개념 설계

이진홍, 김중윤*, 박태홍, 배상은

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*k jy@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로공정과 같이 고온의 부식성이 높은 용융염 물질을 취급하는 공정에서는 용융염의 거동을 감시할 수 있는 다양한 공정제어변수를 측정하는 것이 공정운영의 건전성을 확보하기 위하여 반드시 필요하다. 제 4차 원자력연구개발 5개년 계획에 의거하여 수행 중인 “용융염 내 악티나이드 화학 연구”과제에서는 악티나이드 및 란타나이드 등을 포함하는 고온 용융염의 점도, 전기전도도, 녹는점, 밀도, 표면장력, 열역학적 활동도계수 등 다양한 기초 물성을 측정할 수 있는 측정 시스템 구축을 위하여 노력하였고, 현재 다성분계 용융염에 대한 측정자료를 생산하고 있다 [1]. 이에 덧붙여 공정에 직접적으로 적용할 수 있는 공정분석용 측정장치를 개발함으로써 공정감시 측면에서의 활용성이 우수한 기술개발을 위하여 다양한 개선의 노력을 수행 중이다.

본 연구에서는 하나의 측정 장치로 3가지 서로 다른 공정변수를 측정할 수 있는 장치의 개념을 설계하고자 한다. 우리는 선행연구를 통하여 동적 관압력 측정 시스템을 자체 개발함으로써 고온의 용융염의 액체 높이과 밀도를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 연구하였다. 고온의 부식성이 강한 용융염의 표면장력을 측정하기 위해서는 관의 입구가 막히지 않으면서 최대한 정밀한 최대기포내압 측정이 가능해야 하기 때문에 동적 관압력 측정 시스템에서 필요한 소프트웨어 및 하드웨어 측면에서의 다양한 요구조건을 조사하였고 시스템 설계에 반영하였다.

2. 본론

2.1 실험 장치 및 방법

액위, 밀도, 표면장력 동시 측정 시스템의 구축을 위한 장치 제어 및 측정자료 입수를 위한 소프트웨어 요구 사양과 관의 직경, 길이, 압력 센서 성능 등 하드웨어적인 요구 사양을 확인하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험실에서 자체 설계한 원형 측정장치를 제조하였고, 고온의 용융염 중 상대적으로 부식성이 낮은 KNO_3 를 측정에 활용하였다.



Fig. 1. Prototype molten salt measurement system.

동적 관압력 측정 시스템은 관을 위아래로 이동시키기 위한 스테퍼모터, 기포발생을 위한 공기압축기, 스테인리스 재질의 압력관, 관 내부의 압력을 측정하기 위한 압력센서, 소형전기로 및 반응 용기로 이루어져 있다. 공기압축기로부터 유입되는 공기의 유속을 제어하기 위하여 질량유속제어기를 사용하였다. 또한, Programmable Logic Controller와 LabView 프로그램을 이용하여 스테퍼모터의 속도를 제어하였고, 압력관에 연결되어 있는 압력센서의 측정값을 표시하고 저장하기 위하여 사용하였다. 다양한 튜브 직경과 길이를 사용함으로써 최적의 시스템 구축을 위한 인자를 조사하였다.

KNO_3 를 스테인레스 재질의 실린더형 반응용기에 담고, 500, 600, 800°C에서 각각 녹인 후 30분 정도 일정 온도를 유지시킨 후, 측정하였다. 압력관을 스테퍼모터를 사용하여 액체의 표면으로 이동시켜 액체의 표면에 닿았을 때의 급격한 압력 변화로부터 표면의 위치를 정확히 감지하고, 이때까지 움직인 거리를 정확히 측정함으로써 용액의 높이를 결정할 수 있다. 또한, 표면의 위치를 정확히 감지하고, 표면으로부터 특정 거리 간격으로 압력관을 액체 내부로 잠기게 함으로써 각 깊이에서의 압력을 측정한 다음 원래의 위치로 이동할 수 있도록 프로그래밍하였다.

고온 용융염의 밀도 측정을 위하여 용액 내의 깊이별 압력을 측정하고, 아래의 관계식을 이용함으로써 밀도값을 결정하였다.

$$\rho = \frac{P_2 - P_1}{g(H_2 - H_1)} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 용융염의 밀도이고, g 는 중력가속도이며, H_1 과 H_2 는 압력관이 잠긴 깊이이고, P_1 과 P_2 는 각 잠긴 깊이에서 측정된 압력값이다. 각 온도에 따른 관 내부의 압력을 측정하여 밀도를 결정한 후, 기존 문헌값과 비교하였다.

액체의 표면장력을 결정하기 위해서는 아래의 Young-Laplace식을 이용하였다.

$$\sigma = \frac{r}{2}(P - \rho g H) \quad (1)$$

여기서, σ 는 표면장력이고, r 은 압력관 내부의 반경, P 는 최대기포내압, H 는 압력관이 잠긴 깊이이다.

2.2 실험결과

동적 관압력 측정 시스템을 이용한 밀도 측정에서는 관의 직경은 밀리미터 이하부터 수 밀리미터의 관을 사용하여도 무관하였다.

본 연구는 동적 관압력 측정 시스템을 사용해 깊이별 압력을 측정하여 고온 용융염의 밀도를 측정하는 것이다

전기로 온도제어기를 500°C에 설정하고 KNO_3 의 밀도를 측정하였을 때에는 상온의 압력관의 표면에 닿았을 때 실제 액체의 표면온도가 녹는점보다 낮은 경우가 발생하여 액체가 고화되어 막히면서 압력이 크게 증가하는 현상이 나타났다. 600°C에서 측정하였을 때의 시간에 따른 압력의 변화는 Fig. 2에 나타내었다.

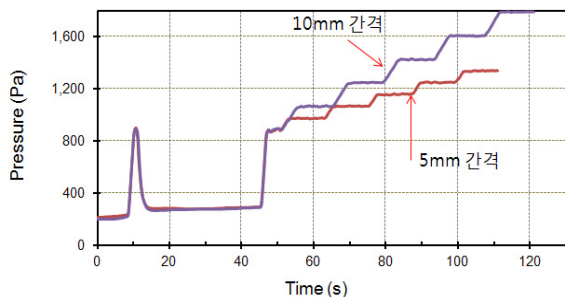


Fig. 2. Pressure vs. time curve at 600°C.

측정된 밀도는 5 mm간격으로 측정하였을 때 1.86 g/cc, 10 mm간격으로 측정하였을 때 1.85 g/cc이었다. Janz의 측정값은 1.798 g/cc이었다 [2].

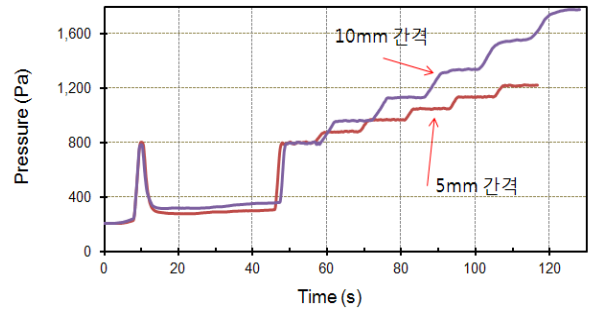


Fig. 3. Pressure vs. time curve at 800°C.

800°C에서의 측정결과는 Fig. 3에 나타내었다. 압력관의 잠긴 깊이를 5 mm 간격에서 측정하였을 때의 밀도는 1.76 g/cc이었고, Janz의 측정값은 1.68 g/cc이었다 [2]. 10 mm 간격에서는 압력값의 변동이 커지면서 밀도값을 측정할 수 없었다.

표면장력을 측정하기 위해서는 1 mm 이상의 압력관을 사용하는 경우에는 최대기포내압을 측정하기 어려운 수준이었고, 직경 0.26 mm의 모세관을 사용해야만 정밀하고 정확한 최대기포내압의 측정이 가능하였다. 또한, 측정자료입출력과 관련한 소프트웨어는 10 ms 이하의 응답속도가 요구되었다.

3. 결론

본 연구에서는 단일 측정장치를 이용하여 액위, 밀도, 동적/정적 표면장력을 측정할 수 있는 동적 관압력 측정 시스템의 개념설계를 위하여 기초실험을 통하여 다양한 실험변수를 조사하였다.

4. 감사의 글

이 논문은 미래창조과학부와 한국연구재단의 원자력연구개발사업(No. 2012M2A8A5025923)의 지원으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] J.-Y. Kim et al., Asian J. Chem. Vol. 25(12), 7028, 2013.
- [2] G.J. Janz, et al., J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 4, 871, 1975.