

유도가열식 저온용융로 내부 용융유리의 열유동 해석

최석모, 김천우, 황태원

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1번지

csm7921@khnp.co.kr

1. 서론

유도가열식 저온용융로(CCM: Cold Crucible Melter)는 고주파 유도전류 열원을 이용 방사성폐기물을 유리화하기 위하여 사용되고 있다.[1,2] 유리화시 CCM 내부 용융유리는 1,000℃ 이상의 온도를 유지하고 있기 때문에 물리적 감지기기들을 이용한 내부현상 관찰 및 계량화는 많은 어려움이 있다. 따라서 폐기물별 유리화 최적운전조건 수립과 양질의 유리고화체 생산을 위하여 전산 프로그램을 이용한 CCM 용융유리 열유동 해석을 해야 할 필요성이 대두되었다.

2. 해석 및 결과

CCM 내부 용융유리의 전자기장 해석을 위하여 MAXWELL 프로그램을 사용하였고 이 결과를 온도분포 등으로 수치화하기 위하여 FLUENT 프로그램을 사용하였다. 해석을 위해 사용한 주요변수로는 CCM의 사양을 포함한 용융유리의 전기전도도, 버블링율, 전원공급장치의 출력과 주파수이다. 해석에 사용한 CCM 내부지름은 55 cm, 용융유리 전기전도도는 0.30 S/cm, 버블링율은 0.5~1.0 Nm³/h, 출력은 100~300 kW, 사용주파수는 100~400 kHz 이다. 그림 1은 출력의 변화(190 & 300 kW)에 대한 CCM 내부 용융유리온도 분포를 나타낸다. 동일 주파수 상에서 출력이 증가함에 따라 CCM 내부에 분포하는 용융유리의 최고 온도가 증가함을 알 수 있었다. 전체적인 온도분포 경향은 유사하나 최고 온도가 분포하는 코어 영역에서의 절대값 차이가 존재한 것을 알 수 있었다. CCM 외벽 및 바닥은 냉각수의 영향에 의하여 온도가 현저히 낮아짐을 알 수 있었다.

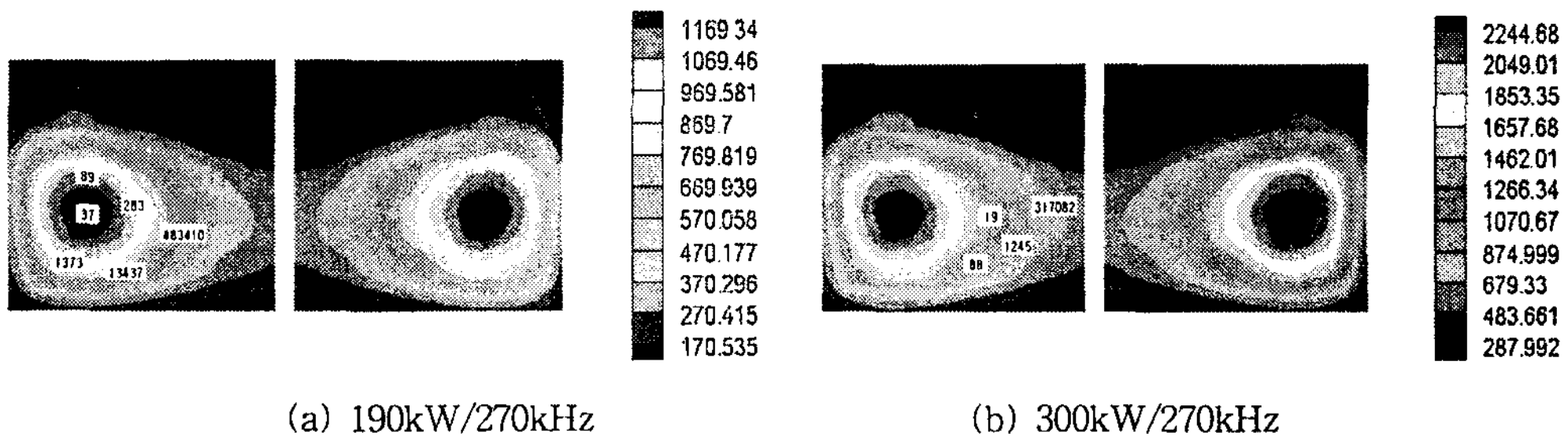


그림 1. 출력변화에 따른 CCM 내부 용융유리의 온도분포

CCM 내부 용융유리 온도분포의 또 다른 변수는 주파수이다. 표 1은 고정출력(100 kW)에 대해 주파수의 변화에 따른 CCM 내부 최고온도를 나타내고 있다. 지름 55 cm CCM의 경우 주파수가 높아질 경우 용융유리의 온도가 높아짐을 알 수 있었다.

표 1. 주파수 변화에 따른 용융유리의 최고점 온도변화(출력 100kW 일 때)

100 kHz	200 kHz	270 kHz	300 kHz	400 kHz
136.14 °C	381.59 °C	604.84 °C	705.36 °C	1031.73 °C

용융유리에 버블링을 주입할 경우 현상을 모사하기 위하여 100 kW/ 270 kHz 상태에 버블유량을

0.5 Nm³/h로 유지하였을 때 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 수직 단면 온도 분포의 변화를 살펴보면 버블 상승에 의해 고온부가 분리되면서 상대적으로 CCM 중앙쪽으로 확장되는 것을 알 수 있었다. 이는 버블에 의한 혼합효과가 발생하면서 나타나는 형상이며 이로 인해 CCM 내부 용융유리의 유동이 발생하고 폐기물 투입시 폐기물과 용융유리의 혼합이 더욱 잘 일어날 수 있게 하는 원인이 됨을 알 수 있었다. 그림 2(a) 좌측 영역의 경우 버블러와 버블러 중간영역으로 인근 버블러의 영향에 의해 혼합효과가 발생하여 고온부가 공기와의 경계면으로 상승하는 것을 알 수 있었다. 이 효과는 상대적으로 저온인 경계면의 온도를 증가시킴으로써 CCM 내부의 온도를 균일하게 분포시키는 역할을 하며, 버블유량이 증가되면 이러한 효과는 증가함을 알 수 있었다. 버블링의 효과로 인해 공기 온도와 CCM 내부 온도가 열전달을 하기 때문에 버블이 상승하는 인근의 온도는 버블링이 없을 때 보다 다소 낮아지게 됨을 알 수 있었다. 그림 2(b)의 결과를 살펴보면 버블은 용융유리의 점도 때문에 정체 과정을 거치며 제트 형상을 지니며 상승하게 됨을 알 수 있었다. 이는 버블의 상승에 의한 효과를 지속적으로 나타낼 수 있게 하는 원인이 되며 실제 CCM 운영 시와 마찬가지로 경계면에서의 플룸이 연속적으로 발생하게 한다. 버블이 경계면에 도달하여 플룸을 형성할 때 경계면 인근에서 열이 CCM 중심부 및 벽면으로 확산되고 주변에 균일한 온도분포를 만든다. 따라서 이런 현상은 자연대류에 의한 혼합효과에 비해 많은 열 및 물질 전달을 가능케 함을 알 수 있었다.

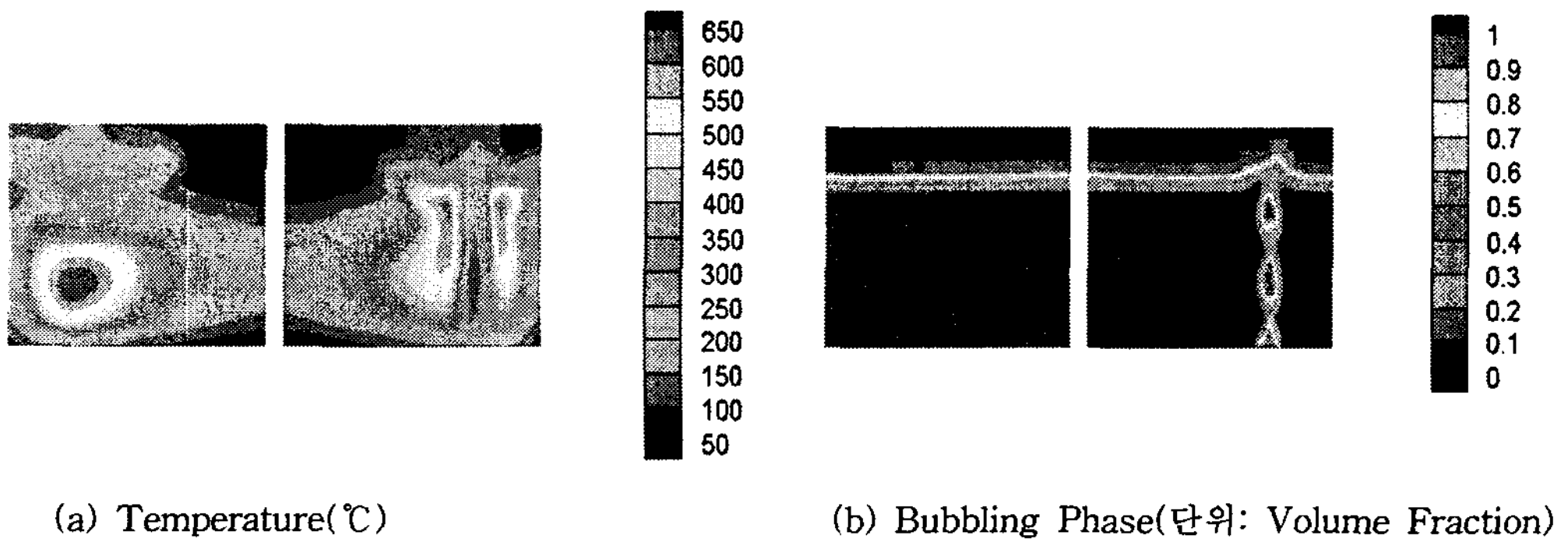


그림 2. 버블링을 0.5 Nm³/s 일 때 온도분포(a)와 버블링 상변화(b)

3. 결론

CCM 내부 용융유리의 열유동 해석은 방사성폐기물 유리화시 혼합효과 극대화과 최적운전조건 확립을 위해 중요한 부분이다. 본 연구에서는 두 가지 프로그램(MAXWELL/FLUENT) 조합을 통하여 자기장의 분포에 의한 온도분포 형성과 버블링에 의한 유동발생에 현상을 시뮬레이션 하였다. CCM 내부 온도분포는 주파수 및 출력에 따라 절대값이 달라짐을 알 수 있었다. 버블링 효과를 모사하기 위하여 용융유리/공기 경계면에서의 온도 분포 및 버블에 의해 발생하는 유동장의 영향을 정량적으로 표현할 수 있었다. 온도분포에 대한 실험적 검증결과와 시뮬레이션의 결과는 상호 일치하는 것으로 나타났다. 향후 본 시뮬레이션은 보다 많은 변수 즉, 버블러의 개수 및 위치, 코일의 위치 및 치수에 대한 변화에도 대응할 수 있을 것으로 보이며 다양한 유리조성에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Myung-Jae Song, "The Vitrified Solution," *Nuclear Engineering International*, pp. 22-26, February, (2003).
- [2] Myung-Jae Song & Sang-Woon Shin, "Heart of Glass," *Nuclear Engineering International*, pp. 25-28, December, (2005).