

유도가열식저온로 열유동 모사 컴퓨터 코드 개발

박종길, 맹성준, 황태원
 한수원(주) 원자력환경기술원, 대전광역시 유성구 덕진동 150
 gospel77@khnp.co.kr

유도가열식저온로(CCM)는 중·저준위 및 고준위 방사성폐기물을 유리화(vitrification)하는데 적용하기 위해 최근에 프랑스 SGN사와 한수원(주)이 공동으로 개발한 용융로이다. CCM은 수냉각 유로가 있는 긴 사다리꼴 형태의 스테인레스 격자(sector)를 수십개 조합하여 원형의 용융로를 만들고 용융로 외부에 고주파전류가 흐르는 유도코일(inductor)을 설치하여 용융로 내부의 유리를 가열하는 용융로이다. 한수원(주)은 CCM을 이용하여 중·저준위 방사성폐기물을 유리화하기 위한 공정을 개발해 왔는데 중·저준위 방사성폐기물의 물리, 화학적 특성이 다양하기 때문에 용융 유리를 혼합하고 충분한 산소를 공급하기 위하여 산소 버블러를 설치하였다. 이로 인해 CCM내 용융유리의 열유동 현상이 매우 복잡하게 되었고 CCM의 크기나 운전변수가 변경되었을 때 용융 유리내 온도 및 점도변화를 예측할 수 있는 컴퓨터 코드를 개발하게 되었다[1].

본 연구에서는 CCM의 제반 운전변수인 고주파발생기 출력 및 주파수, 버블러 유량, 유리 조성 등이 변화할 때 용융유리의 온도 및 점도 변화를 모사할 수 있는 컴퓨터 코드를 개발하였다. 용융 유리의 열유동에 영향을 미치는 변수의 다양성으로 인해 계산시간이 길어지는 문제점을 해결하고자 사전 검토를 통해 계산 결과에 크게 영향을 미치지 않는 요소들을 단순화하여 격자수를 최적화하였다. 본 연구에 사용된 상용 소프트웨어는 전자기 해석을 위한 Maxwell과 열유동 해석을 위한 Fluent이다.

- 모델링

실제 CCM의 크기에 맞추어 모델링을 실시하였다. 용융유리만이 내부에 존재하는 원형 실린더 형태의 CCM과 외부의 코일을 모사하였으며, CCM의 코일 형태가 고리형태이므로 Maxwell의 해석시 전체 코일을 하나의 코일로 가정하고 모델링을 실시하였다(그림 1 참조). 용융로 지름은 550mm이고, 외부코일 두께는 10mm로 설정하였다. CCM과 외부코일 사이의 거리는 50mm이기 때문에 모델링 총 지름은 670mm이다. 모델 생성시 코일 부분은 제외하였으며, 코일에 흐르는 전류에 의한 영향은 경계조건에서 입력해주는 방식을 선택하였다.

Fluent 계산을 위한 모델링은 Maxwell의 치수와 동일하다. Fluent의 경우 격자생성 및 계산 시간의 단축을 위하여 sparger 부분을 연장하여 용융유리 높이와 같다고 가정하였는데, 이렇게 해도 CCM 내부 열유동에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 검토되었기 때문이다. 또한 버블러의 입구 지름을 21.5mm로 설정한 후 유량에 맞게 주입 기체의 속도를 조절하였다.

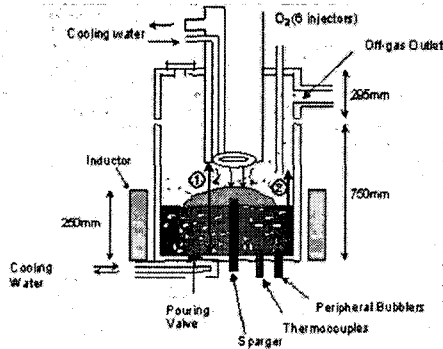


그림 1. CCM 개략도

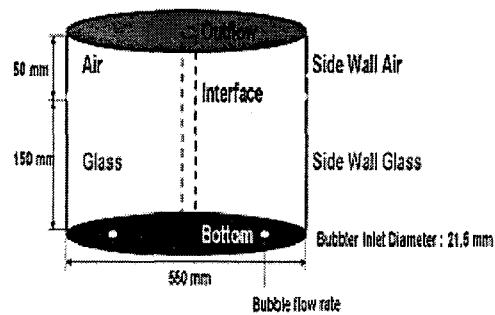


그림 2. 경계조건

- 경계조건

본 연구에서 사용된 물성치 및 경계조건은 표 1 및 2와 같다. Maxwell에 입력되는 경계조건은 CCM 내부 전자기장 분포를 계산하기 위한 것이다. Maxwell로부터 power-loss 결과를 source 형태로 UDF를 사용하여 Fluent에 입력하여 온도분포 및 버블링을 모사하였다. CCM 외부의 냉각 조건은 주어진 온도에 따른 열전달 계수를 계산하여 입력하는 방식으로 열유동 모사에 영향을 주게 된다. 벽면의 냉각색터의 단순화를 통해 계산 시간 및 비용의 절감효과를 얻을 수 있다. 표 2에서 유리 표면(interface)의 열전달계수는 폐기물이 연소될 때 용융유리에 전달되는 열량계산에 사용된다.

표 1. 물성치

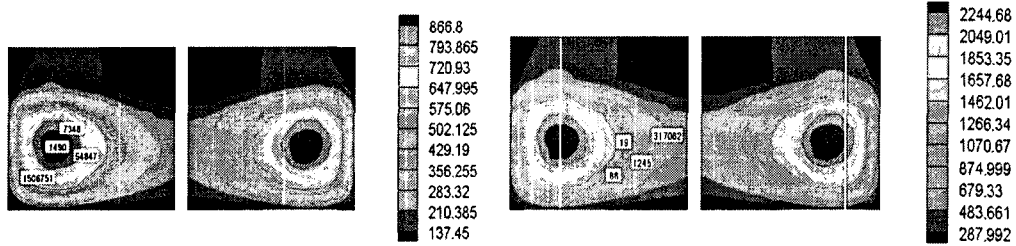
구분	밀도 (kg/m ³)	Cp (J/kg-K)	열전도도 (W/m-K)	점도 (kg/m-s)	분자량 (kg/kg · mol)
공기	1.225	1006.43	0.0242	1.7894e-5	28.966
유리	2350	1290	3.0	4.278	69.62

표 2. 열전달계수(W/m²-K)

Interface	Bottom wall	Side Wall Air	Side Wall Glass
80	300	80	30

- 시뮬레이션 결과

그림 3은 버블링을 고려하지 않고 입력 주파수를 270kHz(현재 CCM 운전 조건)로 고정시킨 상태에서 출력 변동에 따른 CCM 내부 온도 분포를 모사한 결과이다. 유리는 잠고체와 저방사성 폐수지를 동시에 공급하여 유리화할 때 사용하는 AG8W1 유리[2]를 사용하였다. 결과로부터 알 수 있듯이 동일 주파수 상에서 출력이 증가함에 따라 CCM내부의 최고 온도가 증가하지만 전체적인 온도 분포의 경향은 매우 유사하다. 그림에 나타나 있는 숫자는 해당 지점에서의 점도값을 나타낸다. 점도는 유리조성과 온도를 변수로 유도된 관계식에 의해 계산되었다.

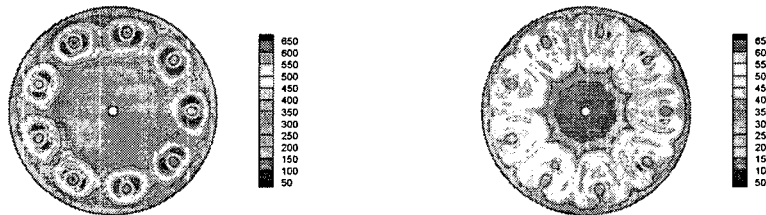


(a) 150kW, 270kHz

(b) 300kW, 270kHz

그림 3. 출력 변동에 따른 용융유리 표면(CCM 바닥에서 15 cm 높이)의 온도 및 점도 분포

그림 4는 버블링 효과를 고려하여 시뮬레이션한 결과이다. 출력과 주파수를 일정하게 고정시키고 버블러 유량을 변화시켰을 때 CCM 바닥으로부터 100 mm 높이 단면에서의 온도분포를 계산하였다. 계산결과 유량이 많아지면 수평방향의 열유동이 활발해져 온도분포의 폭이 커짐을 알 수 있다.



(a) 버블러 유량 0.5 Nm³/h

(b) 버블러 유량 1.0 Nm³/h

그림 4. 버블러 유량변화에 따른 수평 단면 온도 분포 (출력 : 100 kW, 주파수 : 270 kHz,)

- 결론 및 활용방안

본 연구에서 개발된 컴퓨터 코드는 CCM에서 버블링을 고려한 용융유리의 온도와 점도분포를 모사하기 위하여 최초로 시도된 것이다. 난이도가 큰 과제이었지만 실제 상황과 매우 유사한 온도 및 분포를 모사할 수 있는 컴퓨터 코드를 개발하게 되었다. 향후 입력변수 등의 정확도를 제고하여 계산 결과의 정확도를 높일 예정이다. 본 컴퓨터 코드는 CCM내에서 발생하는 제반 현상에 대한 이해도를 높일 수 있어 운전원의 교육훈련, 대용량 CCM 개발 등에 활용할 예정이다.

참고문헌

1. 김천우, 최관식, 박종길, 신상운, 송명재, 이병철, 류봉기 “고주파 유도가열에 의한 방사성폐기물의 유리화,” *Ceramist*, 5[1], pp. 49-55, 3월 (2002).
2. Cheon-Woo Kim, Ji-Yean Kim, Sung-Jun Maeng, Jong-Kil Park, Tae-Won Hwang, “Evaluation of Chemical Durability of Vitrified Forms for Simulated Radioactive Waste Using Product Consistency Test(PCT) and Vapor Hydration Test(VHT),” *J. Kor. Rad. Waste Soc.* 4[3], pp. 227-234, (2006).