

CFD 를 활용한 수냉자켓이 설치된 가스화기의 열전달 해석

김나람, 김성현, 주지선
고등기술연구원 Plant Engineering센터

Heat Transfer Analysis of Water-cooled Gasifier by Using CFD

Na-rang Kim, Sung-hyun Kim, Ji Sun Ju
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서론

본 연구센터에서는 폐기물의 무해화 처리 및 합성가스 제조를 통한 에너지화를 목적으로 가스화용융시스템의 개발을 진행중에 있다. 현재까지 개발된 가스화용융시스템은 분류층(Entrained bed) 방식의 가스화용융로를 핵심장치로 하고 있으며, 폐유, 중질잔사유, 액상슬러리등의 액상폐기물과 건조하수슬러지, 소각재등의 입자상 폐기물을 대상으로 개발되었다.

가스화용융로는 폐기물중의 불연물인 회재의 용융처리를 위하여 노내온도를 벽면기준으로 1450-1500℃의 고온에서 운전하는데 이러한 조건에서 반응기 형상을 유지하고, 작업자를 고온으로부터 보호하기 위해서는 고온에서도 견딜 수 있는 내화벽돌 또는 부정형 내화재의 사용이 일반적이다. 본 연구에서 이미 개발을 완료한 1톤/일급 가스화기용융로는 내열층과 단열층으로 구성된 2개 층의 부정형 내화물층과 그 외부에 철판을 사용하여 반응기 본체를 구성하였다. 그러나 이렇게 단열재와 철판만을 사용하여 노본체를 구성하는 경우에는 가스화용융로의 벽 두께가 증대되어 구조물의 크기가 커지게 되고, 내화물의 손상에 따른 유지보수에도 어려움이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 가스화 용융로 외부 벽체에 수냉자켓을 설치하는 경우에 대하여, 가스화용융로 벽체온도에의 영향을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 적인 방법을 이용하여 검토하고, 검토결과를 5톤/일급 가스화용융로의 설계에 적용하고자 하였다.

2. 전산해석방법

2.1 수학적 모델

본 연구에서는 가스화 용융로 본체 외벽에 수냉자켓을 설치하는 경우 열전달에 의한 내화재에서의 온도 분포와 수냉자켓내부에서 흐르는 냉각수의 온도변화를 동시에 계산하기 위해 질량보존, 운동량보존, 에너지보존의 법칙을 이용하여 유체이동현상 및 열전달을 해석할 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)의 방법을 이용하였다. 수냉자켓에서의 열전달을 계산하기 위한 에너지식은 난류의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) - \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu_T}{\sigma_H} + \frac{\lambda}{c_p} \right) \nabla H \right] = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

λ 는 열전전도, C_p 는 정압열용량, σ_H 는 엔탈피에 대한 난류 Prandtl 수, μ_T 는 난류점도를 나타낸다.

고체에서의 에너지식은 다음과 같다.

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T) \quad (2)$$

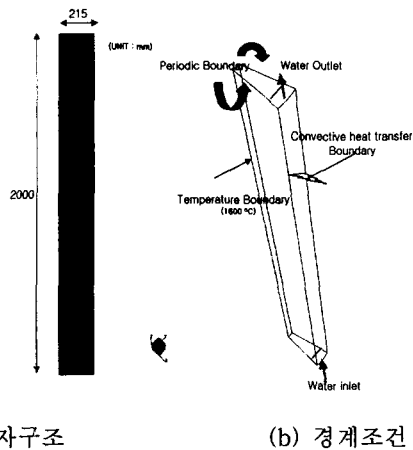
여기에서 ρ_s , C_s , λ_s 는 각각 고체의 밀도, 열용량, 열전도도를 나타낸다. 해석시 격자는 정열화된 육면체구조를 사용하였고, 해석 code는 영국 AEA Technology에서 개발된 CFX4.4[2]를 사용하였다. 계산에 사용한 물과 내화재의 물성은 [표 1]에 나타내었다.

<표 1> Physical properties

		unit	value
water	density	kg/m ³	9.966E+02
	viscosity	kg/ms	6.095E-01
	thermal conductivity	W/m · K	6.095E-01
	specific heat coefficient	J/kg · K	11140-60.84T+0.1753T ² -1.66x10 ⁻⁴ T ³
castable1	max. service temperature	℃	2000
	thermal conductivity	kcal/m · h · ℃	1.18(at 1200 ℃)
	density	kg/m ³	3120
castable2	max. service temperature	℃	1400
	thermal conductivity	kcal/m · h · ℃	1.18
	density	kg/m ³	3120

2.2 경계조건 및 해석방법

해석대상은 내열층과 단열층 및 수냉자켓으로 구성된 실린더형태의 용융로를 대상으로 하였다. 이의 계산을 위한 간략화한 모델은 수냉자켓에서 물의 흐름을 Plug flow 형태로 일정하게 보고 구성할 수 있다. 본 연구에서는 먼저 해석대상을 축대칭으로 가정하여 해석영역의 일부분만을 대상으로 해석을 수행하였다([그림 1-a] 참조). 해석시의 가변변수로는 냉각수량을 0.1 ton/h에서 1 ton/h로 변화시키면서 내화재에서의 온도분포, Shell 표면온도분포 및 냉각수 출구에서의 온도를 계산하였다.



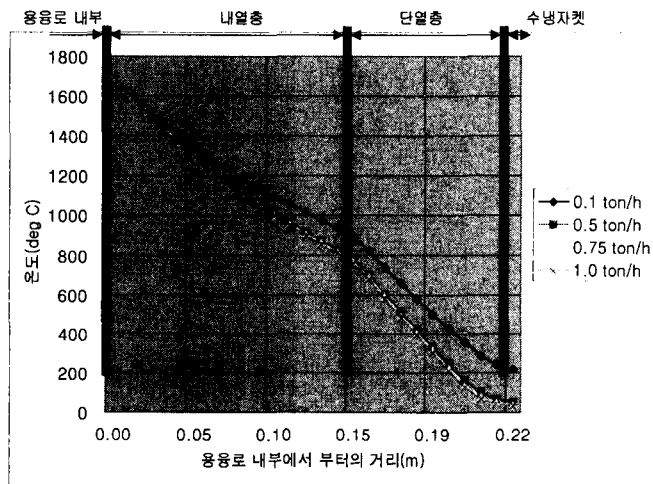
[그림 1] 수냉자켓 설치시 영향검토를 위한 격자구조 및 경계조건

3. 해석결과

3.1 수냉자켓 설치시 온도 분포특성

냉각수량을 0.1, 0.5, 0.75 및 1.0 ton/hr 사용하는 경우에 따른 내화제에서의 온도분포를 <그림 2>에 나타내었다.

냉각수량을 0.1 ton/h 사용하는 경우는 물의 출구온도가 212 °C 계산되어 냉각수량이 부족한 것으로 나타났고, Shell 표면온도도 220 °C로 목적으로 하는 80 °C 이하를 만족시키지 못하였다. 냉각수량을 0.5 ton/hr 사용하는 경우에는 냉각수 출구온도는 53 °C 정도로 유지됨을 알 수 있고, 이때 내화제에서의 온도분포는 내열층 열출구부에서 778 °C, 단열층 열출구부에서 160 °C로 나타났다.



[그림 2] 용융로 내부에서의 거리에 따른 온도분포

3.2 수냉자켓구조 검토

위의 계산에서는 수냉자켓에서의 물의 흐름 형태를 plug flow 형태로 가정하고 구조를 단순화하여 계산하였으나, 이 해석에서는 수냉자켓의 유입구의 형상 및 내부 guide의 형상 설계를 위한 자료도출을 위해 용융로 전체를 대상으로 하여 전산해석을 수행하였다. 해석은 냉각수량을 0.5 ton/h 사용하는 경우에 대하여 수냉자켓 냉각수 유입방향의 영향 및 수냉자켓 내부에 guide를 설치하는 경우의 영향등을 검토하였다.

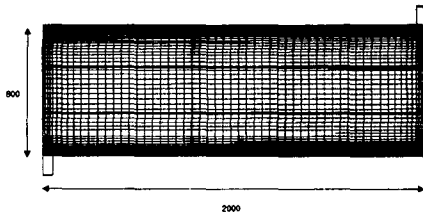
해석에 사용한 형상 및 mesh를 [그림 3]에 나타내었고, 각 case 별 Shell 표면에서의 온도분포를 [그림 4] ~ [그림 6]에 나타내었다.

수냉자켓의 냉각수 유입부와 자켓내부 구조를 고려하는 것은 냉각수의 편류현상에 의한 Shell 표면에서의 온도편차를 줄이고, 냉각수와 내화제의 열전달 효율을 최대로 할 수 있는 구조로 설비를 설계하고자하는데 주요 목적이 있다고 할 수 있는데, 이를 정량화하여 비교하기위해 Shell 표면온도의 최대치 및 최소치와 냉각수 출구온도를 <표 2>에 나타내었다.

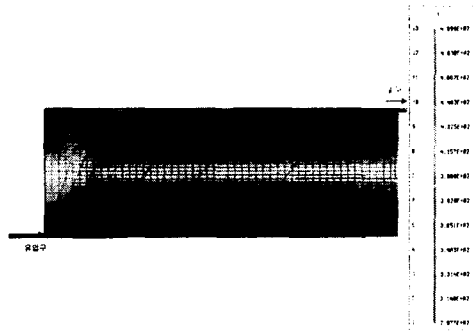
<표 2>에서 보면 냉각자켓 내부에 guide를 설치하여 U 자형의 유로를 형성하는 경우 Shell 표면에서의 최대온도는 92 °C, 냉각수 출구온도는 83 °C로 나타나 전체적으로 균일한 냉각효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

<표 2> 수냉자켓 해석 case 별 온도값

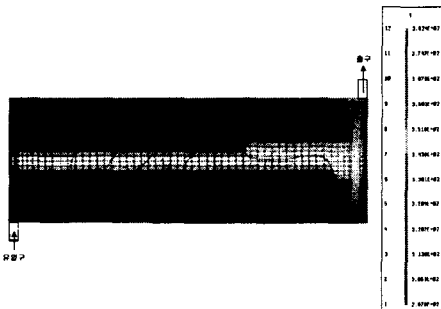
구 분	Shell 표면 온도 분포(℃)		냉각수 출구온도 (℃)
	최대	최소	
Case 1	185	25	58
Case 2	109	25	73
Case 3	92	25	83



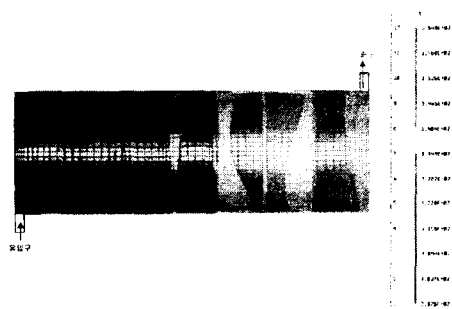
[그림 3] 수냉자켓 유로해석을 위한 mesh 구조



[그림 4] 수냉자켓 표면에서의 온도분포(case 1)



[그림 5] 수냉자켓 표면에서의 온도분포(case 2)



[그림 6] 수냉자켓 표면에서의 온도분포(case 3)

5. 결론

가스화 용융로 외부 벽체에 수냉자켓을 설치하는 경우에 대하여, 가스화 용융로 벽체온도에의 영향을 전산유체역학적인 방법을 적용하여 검토할 수 있었다.

계산결과 내열층 150 mm, 단열층 50 mm 및 수냉자켓으로 용융로 외벽을 구성하고, 냉각수량을 0.5 톤/hr 사용하는 경우에 냉각수 출구온도는 53 ℃ 정도로 유지할수 있음을 알 수 있었고, 이때 내화제에서의 온도분포는 내열층에서 778 ℃, 단열층에서 160 ℃ 로 나타났다. 수냉자켓의 구조에 따른 온도 분포를 해석한 결과 냉각 자켓 내부에 guide를 설치하여 U 자형의 유로를 형성하는 경우 Shell 표면에서의 최대온도는 92 ℃, 냉각수 출구온도는 83 ℃ 로 나타나 전체적으로 균일한 냉각효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

감사

본 연구는 과학기술부 산하 한국과학기술평가원에서 지원한 국가지정연구실 “가연성 폐기물처리용 5톤/일급 가스화용융 공정기술개발” 과제의 일환으로 추진되었습니다. 지원에 감사드립니다.