

Numerical Analysis of Off-Gas Flow in Hot Area of the Vitrification Plant

유리화공정 고온영역에서의 방사성 배기체 유동해석

Seung-Chul Park, Won-Gu, Kang* and Tae-Won Hwang

Nuclear Engineering & Technology Institute, 25-1, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon

*ATES CFD Engineering Division, Woolim e-biz center 2, 184-1, Guro 3-dong, Guro-gu, Seoul, Korea

scpark@kaeri.re.kr

박승철, 강원구*, 황대원

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

ATES(주) 기업부설연구소, 서울시 구로구 구로3동 184-1, 우림 e-biz 센터 II *

(Received December 26, 2005/Approved August 8, 2007)

Abstract

Appropriate numerical models for the simulation of off-gas flow in hot area of the vitrification plant have been developed in this study. The models have been applied to analyze the effect of design parameters of real plant and numerical analyses have been performed for CCM(Cold Crucible Melter), pipe cooler and HTF(High Temperature Filter). At first, the effect of excess oxygen and the ratio of oxygen distribution on combustion characteristics in the CCM has been studied. Next, solidification behavior of radio nuclide in the pipe cooler has been numerically modeled and scrutinized. Finally, flow pattern in accordance with the location of off-gas entrance of the HTF has been compared.

Keywords : Vitrification Plant, Radio nuclide, CCM, Pipe Cooler, HTF, CFD

요 약

유리화공정 고온영역에서의 방사성 배기체 유동해석을 해석하기 위하여 상용 수치해석 범용 툴인 FLUENT를 이용하여 적용성을 검토하여 보았다. 수치해석을 통하여 유리화공정 원형설비에 영향을 미치는 인자를 파악하였는데, 저온용융로, 배관냉각기 및 고온필터 등의 세 단계로 나누어 해석을 수행하였다. 저온용융로의 경우 폐기물 처리용량에 따른 해석과 저온용융로 내부 과잉 산소 공급 비에 따른 연소지연 가능성에 대한 수치해석을 수행하였다. 배관냉각기의 경우에는 각종 수치 모델 및 외벽 열전달계수를 확보하였으며 또한 방사성 핵종의 거동을 모사할 수 있는 수

치적 기업을 검토 하였다. 이러한 방법론을 적용하여 핵종의 열교환기 내부에서의 응고 특성에 대하여 고찰하였다. 수평 유입형식의 인입관이 있는 일반적인 형상과 유입구가 필터 내부에 수직으로 있는 고온필터의 수치해석을 통하여 인입관의 위치에 따른 고온필터의 작동 특성을 비교하였다.

중심단어 : 유리화공정 설비, 핵종, 저온용융로, 배관냉각기, 고온필터, 전산유체역학

I. 서론

방사성 폐기물 유리화 시에 저온용융로(CGM) 내부에서는 복잡한 물리화학적 현상이 발생한다. 하부에는 유리가 용융상태로 존재하고, 용탕의 하부 및 상부에서 공급된 산소(또는 공기)와 고체 폐기물이 연소 화학반응을 일으킨다. 연소과정에서 생성된 방사성 무기물질은 유리 용탕에서 유리화(vitrification)된다. 방사성 폐기물이 유리화되는 저온용융로 내부에서는 핵종인 미량의 세슘과 유리물질인 소듐과 보론 등의 일부 휘발물질들이 유동장을 따라서 진행하게 된다. 이러한 물질들은 배관냉각기를 지나면서 냉각되어 고체물질로 전환되어 고온필터 집진기에서 제거된다.

상기와 같이 복잡한 내부 현상을 나타내는 설비에 대한 설계 기술을 확보하기 위해서는 내부의 각종 현상에 대한 선행 이해가 필요하다. 이러한 내부 현상을 이해하기 위한 목적 및 경험의 축적을 위하여 방사성 폐기물 유리화 실증설비에서의 실험이 수행되었으며, 실증설비에서의 경험을 바탕으로 하여 방사성 폐기물 유리화 원형설비를 설계하고 제작할 예정으로 있다 [Reference 1,2]. 그러나 유리화공정 설비는 고온 환경에서 운전되는 특성상 유동장, 온도장 또는 미세 입자 거동 등에 대한 현상을 관찰하고 측정하기에는 제약이 많기 따르며, 실험하는 시간과 비용이 필요하게 되는 어려움을 안고 있다. 제약 조건을 보완하여 줄 수 있는 방법으로서 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)방법에 의한 수치해석을 들 수 있다.

본 연구에서는 우선 실증설비에 대한 수치해석을 통하여 저온용융로, 배관냉각기 및 고온 필터 내부의

현상을 해석함과 동시에 내부의 제반 현상에 대한 이해를 높이고자 하였다.

II. 수치이론

유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다. 운동량 해석에 있어서는 난류 유동해석을 위한 방정식을 포함하여야 하며, 또한 복사 열전달 및 화학반응을 위한 방정식을 포함하여야 하므로 이에 대하여 요약하면 다음과 같다[Reference 3, 4].

- 질량 보존방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m$$

- 운동량 보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) \\ = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \end{aligned}$$

- 에너지 보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} (k \frac{\partial T}{\partial x_j}) \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_{j,i} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \end{aligned}$$

- 난류 모델 (Standard k-ε 모델)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{m_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{2\epsilon}) G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned}$$

- 복사열전달 모델 (P1 모델)

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4\sigma T^4 = 0$$

본 연구에서는 유리화 실증설비에 대한 다양한 해석을 통하여 저온용융로의 해석을 가능하게 하는 수치모델을 정립하였는데, 이를 Table 1에 요약하였다.

Table 1 CFD Analysis Model.

| 구 분 | MODEL |
|-------|---|
| 저온용융로 | segregated 3D steady |
| | energy equation |
| | standard k-epsilon model |
| | radiation model(P1 + WSGGM cell based) |
| | species transport model |
| | gaseous combustion modeling for solid waste |
| | finite rate/eddy dissipation combustion model |
| | mass source term for waste gas |
| 배관냉각기 | segregated 2D/3D steady |
| | energy equation |
| | standard k-epsilon model |
| | radiation model(P1 + WSGGM cell based) |
| | species transport model |
| | heat transfer coefficient boundary condition |
| 고온필터 | segregated 3D steady |
| | standard k-epsilon model |
| | porous zone - inertial resistance |

II. 유리화공정 원형설비

Figure 1은 유리화공정 원형설비 개략도이다. 폐기물은 폐기물 공급 장치를 통하여 유도가열식 저온용융로에 공급되며, 유리용탕에 의해 연소된 폐기물의 배기체는 배관냉각기로 유입된다. 배관냉각기로 유입된 배기체중 휘발성분들은 배기체가 냉각되면서 분진형태의 입자로 변화되며, 분진형태의 입자는 고온필터에서 걸러지게 된다.

공급되는 폐기물은 저온용융로의 하부에 위치한 유리용탕에 의해 연소되며, 각각 6개의 인젝터(Injector)와 스파저(Sparger) 그리고 9개의 버블러(Round bubbler)를 통하여 과잉 공급된 산소를 이용하여 완전연소를 가능하게 만든다. 저온용융로에서 연소된 폐기물 배기체는 배관냉각기를 거치며 방사성 물질은 고온 기체 상태에서 저온 고체 상태로 급속하게 전환되어 고온필터에서 포집될 수 있는 상태로 된다. 배관냉각기를 통과한 배기체는 고온집진기 상부까지 유입되어 급속필터에 손상을 주는 문제점을 해결함과 동시에 고온에서 휘발되는 일부 방사성 핵종이나 유리 성분들이 배관냉각기에서 고체상태의 분진으로 변화되었기 때문에 고온집진기에서 회수가 가능하다.

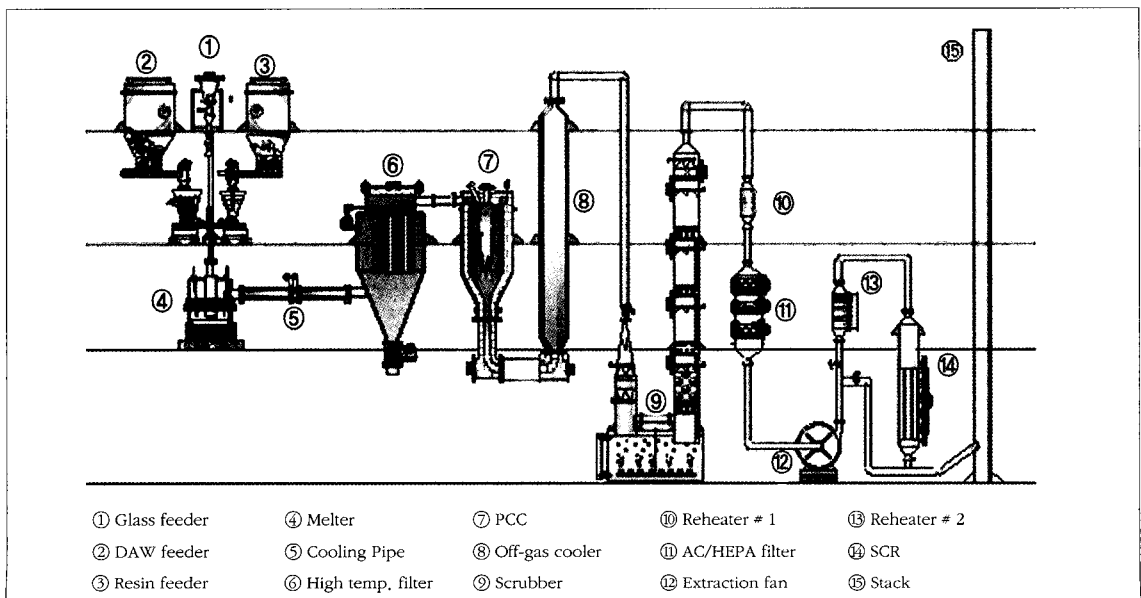


Fig. 1. Schematic of Vitrification Plant.

III. 수치 해석 결과

가. 저온용융로 수치해석 결과

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 해석 모델을 이용하여 본 연구의 핵심 주제인 원형설비에 대한 수치해석을 수행하고 이를 통하여 원형설비의 설계에 도움이 될 설계인자들의 영향을 고찰하고자 하였다. 각각 60도의 각을 이루면서 여섯 개가 설치되어 있는 인젝터는 유리용탕 중심으로 5도 기울어져 유리용탕 상부에서 산소를 공급되게 된다. 또한 유리용탕 하부에서는 아홉 개의 버블러와 여섯 개의 스파저에서 산소가 공급된다. 유리용탕 하부는 본 연구의 해석 대상이 아니므로 버블러는 해석영역에서 생략되었다.

Figure 2는 저온용융로의 격자구성을 나타낸 그림이다. 저온용융로 해석을 위하여 대부분의 영역에서 육면체 격자를 사용하였으며, 용융로 외벽 및 출구 부분과 같이 곡면이 심하거나 다소 형상이 복잡한 영역에서는 사면체 격자를 사용함으로써 약 14만개 정도의 격자를 사용하였다. 폐기물이 연소되는 유리용탕과 스파저에서 산소가 분사되는 영역에서는 연소 반응 및 복잡한 유동현상이 일어나므로 계산의 정확성을 높이기 위하여 많은 수의 격자를 사용하였으며, 유리용탕 영역에서 격자를 밀집시켰다.

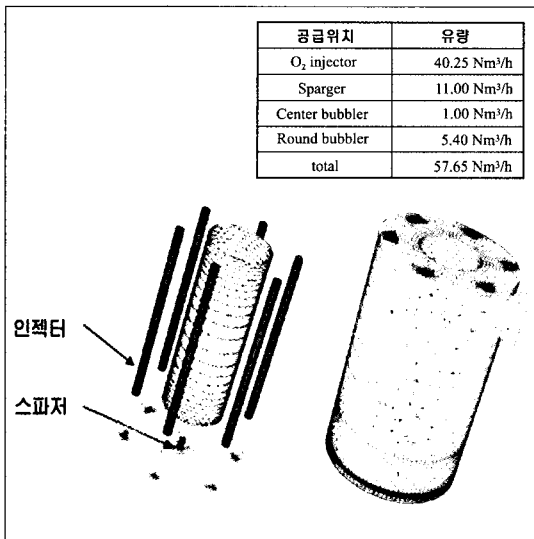


Fig. 2. Mesh for Analysis of CCM.

본 연구에서는 폐기물 처리 용량에 따라 두 가지 조건(W1: 20kg/h, DAW: 25kg/h)을 기준으로 하였으며, 저온용융로 내부의 유동 및 온도 분포를 해석하고 두 결과를 비교하였다.

저온용융로 수치해석 방법으로는 유리용탕 윗부분의 약 50%(면적 기준)에 해당하는 영역을 폐기물 영역으로 설정하고, 폐기물 처리 용량에 따라 가연성 기체가 폐기물 영역에서 생성될 수 있도록 수치적으로 처리(mass source)하여 해석을 수행하였다.

폐기물 처리 용량에 따른 해석 결과로서 출구 중심 단면에서의 온도 분포도, 이산화탄소 농도 분포도 및 배기체의 진행 경로를 각각 Figure 3 ~ Figure 5에 나타내었다. Figure 3은 출구 중심을 지나는 단면에서의 온도 분포를 나타내고 있는데, 이 단면은 인젝터와 인젝터의 사이의 단면으로서 인젝터에서 분사되는 산소의 영향을 받지 않기 때문에 고온 영역이 저온용융로의 외벽 쪽으로 치우치는 경향을 보여주

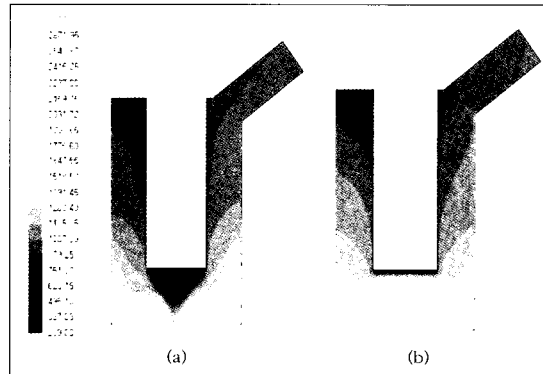


Fig. 3. Contour of Temperature. (a) W1 20kg/h, (b) DAW 25kg/h)

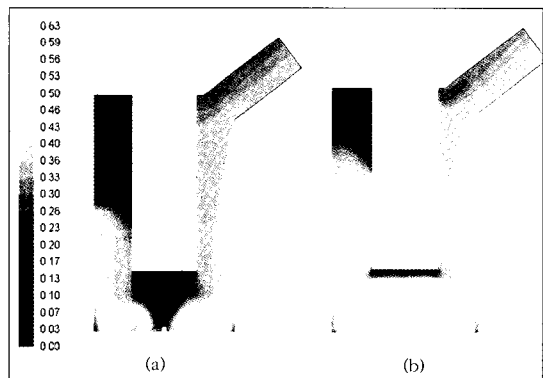


Fig. 4. Contour of CO₂ Distribution. (a) W1 20kg/h, (b) DAW 25kg/h)

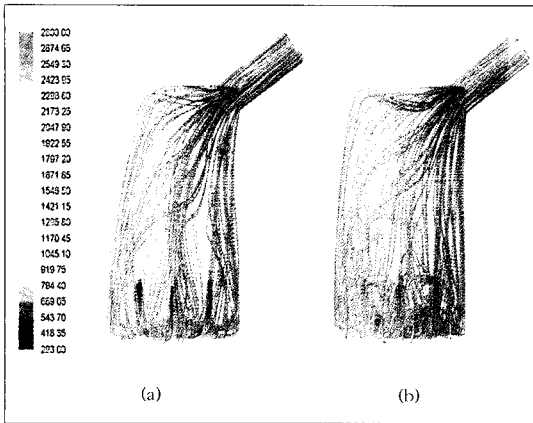


Fig. 5. Inner Path Line of CCM. (a) W1 20kg/h, (b) DAW 25kg/h)

고 있다. 폐기물 입구 아래 영역에서는 DAW 25kg/h 인 경우 저온 영역이 축소되어 W1 20kg/h인 경우보다 상대적으로 높은 온도분포를 보여주고 있다. 그리고 스파저에서 분사된 산소가 가연성 기체와 급격히 반응하여 아주 높은 온도 영역이 발생하고 있다. 특히 2800K 가량의 고온 영역이 관찰되고 있는데, 이것은 폐기물과 산소와의 반응을 비가역(two step irreversible reaction)으로 모델링 하여 고온 영역에서의 중간 생성물질의 존재 및 열해리(dissociation) 등의 영향을 고려하기에 힘이 드는 수치모델의 한계 때문인 것으로 판단되며, 실제 저온용융로에서는 이와 같은 고온 영역은 관찰되지 않는다. 연소된 배기체는 저온용융로 상부로 올라감에 따라 배기체의 온도가 급격히 감소되는 경향을 보여주고 있는데, 이는 산소를 반응 기체로 활용하는 특성상 배기체에서 복사에 관여하는 매질인 이산화탄소와 수증기의 체적분율이 높고 또한 상부 쪽으로 가면서 커지게 되어 저온용융로 벽면으로 향하는 복사량이 아주 크기 때문인 것으로 보인다. Figure 4는 W1 20kg/h와 DAW 25kg/h인 경우 저온용융로 내부의 이산화탄소 농도 분포를 비교하여 나타내고 있다. DAW 25kg/h인 경우 저온용융로 상부로 올라감에 따라 이산화탄소의 발생이 지연되는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 경향은 실제 시스템에서는 완전연소가 되지 않을 가능성이 상대적으로 높아질 수 있다는 점을 의미하므로 바람직하지 않은 경향이라고 말할 수 있다. 이와 같이 상이한 결과를 나타내는 원인에 대하여 과잉산

소의 비율을 들 수 있다. W1 20kg/h인 경우에 과잉 산소의 비율은 78%인데 반하여 DAW 25kg/h인 경우에는 68%의 산소를 과잉으로 공급하고 있으며, 또한 폐기물 처리량의 증가에 따라 증가하는 산소를 모두 인젝터를 통하여 공급하고 있다. 즉, 폐기물량에 따른 과잉 산소비의 변화 및 인젝터와 스파저의 공급 산소량의 비율 변화가 원인이라고 판단된다.

Figure 5는 저온용융로 내부의 배기체의 진행경로(pathline)를 나타낸 것이다. 인젝터가 중심으로 기울어져 있는 특성으로 인하여, 인젝터에서 분사되는 산소는 중심으로 분사된다. 일부는 저온용융로 내부에서 상부로 진행하게 되며, 일부는 외벽 방향으로 향하여 상 방향으로 방향을 전환하는 유동이 발생하게 된다. 저온용융로의 진행경로는 폐기물 량에 상관없이 거의 유사한 것을 볼 수 있다.

나. 산소공급 비율 변경에 따른 해석 결과

폐기물 처리 용량에 따른 산소 분배비율이나 과잉 산소 비에 따라 생성된 이산화탄소의 농도 분포 차이가 존재함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 인젝터와 스파저의 산소 공급비율 및 과잉산소의 변화에 따른 저온용융로 내부의 체반 형상의 변화를 고찰하고자 하였다. Figure 6은 폐기물 처리량 DAW 25kg/h 조건에서 과잉산소 비율 및 인젝터와 스파저의 분배 비율을 위에 나타나 있는 W1 20kg/h의 조건과 동일하게 설정하여 수행한 경우(model-1)의 수치해석 결과를 나타내고 있다. 즉, 폐기물 처리량의 증가에 따라 운전 변수도 동일한 비율로 증가시켜 유체역학적 상사(Similarity)조건이 갖추어진 경우라고 할 수 있다. 이와 같이 상사가 이루어진 경우 저온용융로 내부의 온도 및 농도 분포도는 유사한 결과를 나타내었다. 즉, 특정 폐기물 처리 용량에서 최적 운전 조건을 확보하였다면 이후에 처리 용량이 변경될 경우에는 최적의 운전 조건을 유지하기 위해서는 위와 같은 상사 조건을 만족시키는 것이 필요함을 나타내고 있다.

다. 배관냉각기 해석 결과

저온용융로에서 연소된 고온의 가스가 고온필터

로 유입되기 전 배관냉각기를 거치며 이때 방사성 물질은 고온 기체 상태에서 저온 고체 상태로 급속하게 전환하여 고온필터에서 포집된다. 따라서 유리화공정 설비에서 방사성 물질의 배출을 막기 위해서는 배기체를 적절한 온도 이하까지 충분히 냉각시켜 주어야 한다. 본 연구에서는 배관냉각기 내부에서 배기체의 온도 강하 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며 또한 이때 방사성 핵종도 배기체의 온도에 강하에 따라 충분히 냉각되는지의 여부를 확인하고자 하였다.

배관냉각기의 2차원 해석에 사용한 격자계 및 3차원 해석에 사용한 격자계를 Figure 7에 나타내었다.

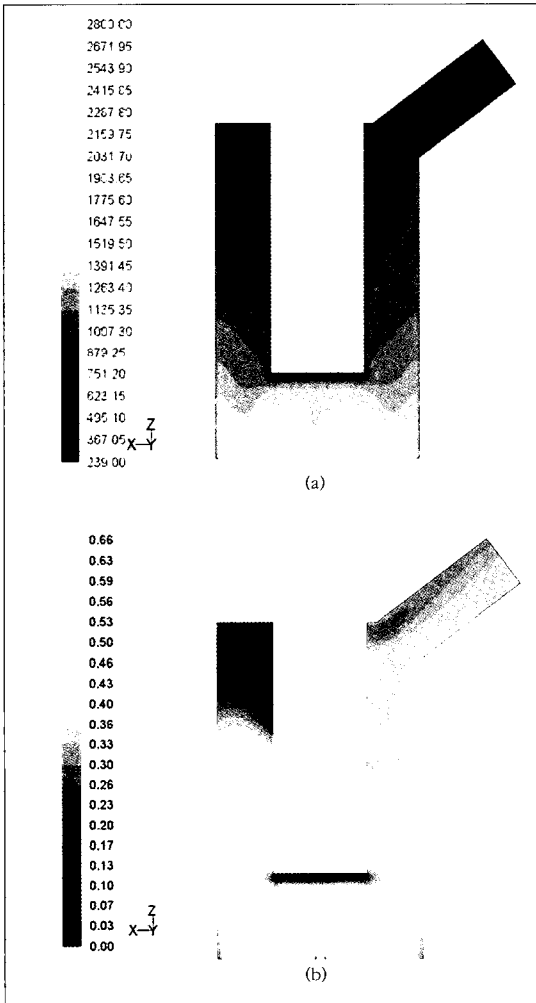


Fig. 6. Model-1 (DAW 25kg/h). (a) Contour of Temperature (b) Contour of CO₂ Distribution

열전달에서 가장 중요하고 열경계층이 형성되는 배관냉각기의 벽면 근처에서는 격자를 밀집시켰다. 배관냉각기의 수치해석에서는 3차원 해석과 2차원 해석을 각각 수행하고 온도와 속도를 비교하였는데, 3차원 및 2차원 해석결과는 거의 동일한 온도 및 속도 분포도를 보여주었기에 본 연구에서는 대부분의 경우 2차원 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 배관냉각기의 내부에 핵종 입자의 온도 이력을 알아보기 위해 '비열 모델링 기법'을 적용하여 핵종 입자의 온도를 계산하였다. 핵종 입자의 물성치에 대한 정보의 확보에 어려움이 있었기에, 비열과 증발/용융 잠열의 값은 극한치라고 볼 수 있는 물의 비열 및 잠열을 적용하였다. 또한 입자의 밀도에 대해서도 CsCl의 밀도(3990kg/m³)보다 훨씬 큰 밀도인 강철(steel)의 밀도(8030kg/m³)를 설정하여 해석을 수행하였다. 즉, 열용량에 대하여 극한 조건을 산정하여 해석을 수행하였다.

Figure 8은 핵종 입자의 크기에 따른 배관냉각기 내부에서의 핵종 입자의 온도 이력을 체류시간에 따라 나타내었다. 핵종 입자의 크기가 작은 경우(Figure 8(a))에는 핵종 입자의 온도와 동일 위치에서의 배기체 온도가 거의 동일하고, 핵종 입자의 크기가 큰 경우(Figure 8(b))에는 핵종 입자의 온도가 배기체의 온도에 비하여 조금 늦게 떨어지는 것을 잘 보여주고 있다. 특히 입자가 큰 경우에는 용융점 근처에서 비열 모델링 기법 상으로 용융구간으로 설정한 온도 영역에서 상변화 특성과 유사한 경향을 잘 보여주고 있으며 또한 배관냉각기 출구에서 핵종 입자의 온도와 배기체의 온도와는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 배관냉각기 출구의 온도를 핵종의 용

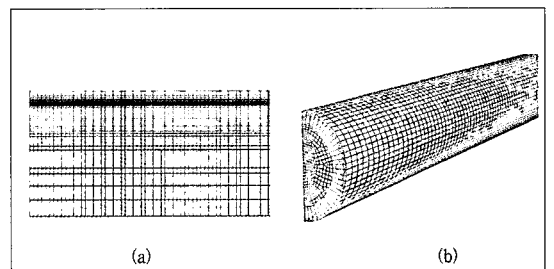


Fig. 7. Mesh for Analysis of Pipe Cooler. (a) 2D Meshed, (b) 3D Meshed.

용온도보다 어느 정도 이상만 낮게 유지한다면 핵종이 액체 상태 또는 기체 상태로 고온 필터로 진입할 가능성은 전혀 없다고 판단할 수 있었다. 그리고 핵종의 물성치 선정에 있어서 최악의 조건(비열 및 잠열이 아주 큰)을 선택한 점을 고려하면 이러한 판단에 더욱 확신을 부여할 수 있었다.

라. 고온필터 해석 결과

본 연구에서는 Figure 9와 같이 필터 외벽에 수평 유입형식의 인입관이 있는 일반적인 형상(Filter A)과 고온필터의 내부의 상부 영역에서 수직 유입형식의 인입관이 있는 형상(Filter B)인 경우에 대한 수치해석을 수행하였다.

방사성 폐기물 유리화공정 시스템에서의 고온필터의 경우 일반적인 폐기물 처리 시스템의 집진기에

비하여 비교적 높은 압력차를 유지하는 특성이 있다. 본 연구에서 높은 압력차를 가지고 운전하는 고온필터 내부의 속도 분포 및 재순환영역의 존재 여부 등의 유동 특성을 파악하였다.

Figure 10은 인입구의 위치에 따른 고온필터 내부 배기체의 진행경로를 나타내고 있다. 일반적인 형상인 Filter A의 경우에는 인입구가 고온필터 외벽의 한쪽 면에서 다른 방향으로 유입되는 비대칭성으로 인하여 유동 분포가 균일할 수가 없다. 또한 배기체가 외부에서 유입되는 특성상 호퍼 부근에서의 재순환영역이 상당히 크게 형성되며, 이로 인하여 각 필터의 집진 부하의 차이를 가져올 수 있으므로 바람직하지 않다고 할 수 있다. 반면에 Filter B에서는 배기체가 고온필터 내부에서 상부로 유입되는 특성으로 인하여 기학적 및 유동 특성상 대칭에 가까운 특성을 지니게 된다. 결과로서 Filter B의 경우에는 Filter A에 비하여 내부의 유동 분포가 훨씬 균일함을 알 수 있으며, 따라서 각 필터에 고른 집진 부하가 걸릴 것으로 예상된다. 또한 유동 해석 결과를 이용하여 정량적으로 표시할 수는 없지만, 진동 및 소음의 측면에서도 우수하다고 판단된다.

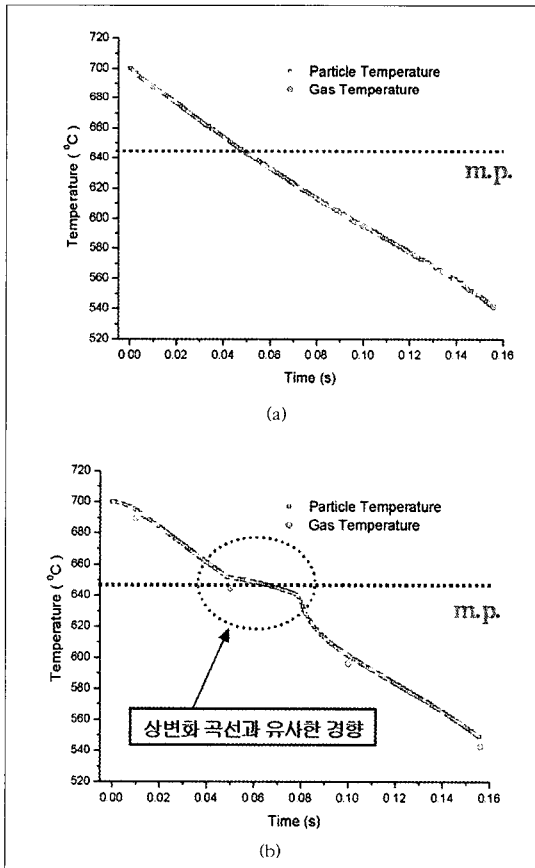


Fig. 8. Particle Temperature, Inside of Pipe Cooler. (a) Particle Diameter = 0.1 μ m, (b) Particle Diameter = 10 μ m

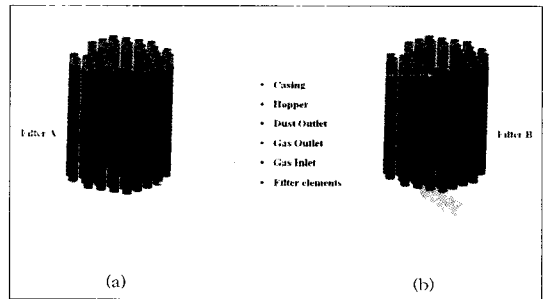


Fig. 9. Schematic of HTF

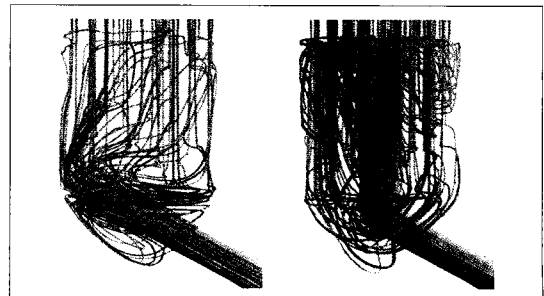


Fig. 10. Path Lines of HTF, through Difference of Inlet Position.

IV. 결 론

유리화공정 실증설비에서의 자료 및 경험을 바탕으로 하여 유리화공정 고온영역에서의 배기체의 거동을 수행할 수 있는 수치 모델을 개발하고 이를 원형설비에 적용하여 설계인자의 영향을 고찰하는 연구를 수행하였으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

저온용융로 내부의 해석 결과로부터, 폐기물 처리 용량이 변경되는 경우에는 과잉 산소 비율과 인젝터와 스파저의 산소 분배 비율을 최적 조건에서 설정한 값과 동일하게 유지하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

배관냉각기의 수치해석은 3차원 및 2차원 결과가 거의 유사하였으며, 동일한 유동특성을 관찰할 수 있었다. 핵종 거동 모델링 기법을 개발하여 배관냉각기 내부에서 핵종의 거동을 관찰하여 본 결과, 배관냉각기 출구의 핵종 입자의 온도는 배기체의 온도와 거의 동일함을 알 수 있었다. 따라서 배관냉각기에서 배기체의 출구 온도가 핵종의 용융점보다 어느 정도 이상만 낮게 유지된다면 핵종이 액체 상태 또는 기체 상태로 고온필터로 유입될 가능성은 없다고 판단할 수 있었다.

고온필터의 유입구가 외벽에 위치하여 수평으로 배기체가 유입되는 경우에는 고온필터 내부의 유동이 불균일하며 비교적 크기가 큰 재순환영역이 형성됨을 알 수 있었다. 유입구가 고온필터 내부에 위치하여 상 방향으로 배기체가 유입되는 경우에는 고온필터 내부의 유동 특성이 우수함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 한수원(주) 원자력환경기술원, “중·저준위 방사성폐기물 유리화 기술개발(Ⅱ),” 최종보고서, (2002).
- [2] 한수원(주) 원자력환경기술원, “중·저준위 방사성폐기물 유리화 원형플랜트 개발(Ⅰ),” 최종보고서, (2004).
- [3] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and

Fluid Flow, McGRAW-HILL, (1980)

- [4] "Modeling Species Transport and Finite-Rate Chemistry", Fluent manual(vol.2)
- [5] 한수원(주) 원자력환경기술원, “유도가열식 저온용융로를 이용한 혼합모의 방사성폐기물의 유리화 공정 특성”, (2004).
- [6] 한수원(주) 원자력환경기술원, “방사성폐기물 유리화 공정 및 유리화고체 특성”, (2004).
- [7] 한수원(주) 원자력환경기술원, “저온용융로 내부 용융유리 모사를 위한 컴퓨터 코드 개발”, (2006).