

전산유체역학기법에 의한 석탄가스화기 내화재 형상 설계 Geometry Design of Coal Gasifier Refractory using Computational Fluid Dynamics

이진욱, 박병수, 윤용승, 안달홍*

고등기술연구원 에너지/환경연구실, 전력연구원 수화력발전연구실*

요 약

전산유체역학 기법을 이용하여 석탄가스화기 내화재내에서의 온도분포 해석 및 열손실량 계산을 수행하였다. 일차원 이론적 해석, 이차원 전도열전달 해석 및 삼차원 대류-전도 복합열전달 해석 등 세가지 방법론으로 전산해석을 수행하고 그 결과들을 서로 비교하였으며, 또한 해석결과들을 석탄가스화기 실험결과와 비교하였다. 결과의 정확성, 수치해석상의 편리성(수렴성 및 계산시간) 등을 종합적으로 검토하여, 이차원 전도열전달 해석이 공학적 설계에 적용하기 적절한 방법론임을 제시하였다. 전산해석 결과를 3톤/일급 석탄가스화기에 적용해 본 결과, 총 열손실량은 설계치 운전기준으로 약 1% 정도인 것으로 판별되었다.

1. 서론

석탄가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC) 시스템은 현재의 미분탄 발전방식에 비하여 발전효율은 5-10%이상 높고, SOx, NOx 및 분진을 각각 90%, 75% 및 95%이상 감소시킬 수 있는 새로운 석탄화력 발전방식이다^{1,2)}. 이와 같이 IGCC 시스템은 환경친화적이면서도 발전효율이 높은 특성으로 인하여, 전세계적으로 차세대 미분탄 발전방식으로 주목받고 있다. 국내에서도 최근에는 IGCC 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며³⁾, 특히 석탄가스화기의 설계 및 운전기술을 개발하기 위한 노력이 진행되고 있다⁴⁾. 일반적으로 석탄가스화기는 고온/고압에서 운전되는 특성상 두터운 내화재에 둘러싸여 있으며 반응영역과 바로 접촉하는 내벽부분에는 고온 및 침식에 견딜 수 있는 강도가 높은 내화재가 설치된다. 그러나 만약 강도가 높은 내화재만으로 전 영역을 시공하게 되면 높은 밀도로 인하여 중량이 무거워지고 또한 열전도계수가 크기 때문에 대기로의 열손실량이 많아지게 될 것이다. 따라서 반응영역과 접한 일부 영역을 제외한 대부분의 영역에는 강도가 낮고 열전도계수도 낮은 내화재를 설치하여 열손실 및 중량 감소의 효과를 최대화한다. 즉, 강도 및 열손실이 종합적으로 고려된 내화재 재질 선정 및 두께 결정은 가스화기 설계의 중요한 부분중의 하나로 간주되고 있다.

내화재내에서는 열전달에서 가장 간단하고 기본적인 전도열전달만이 존재한다는 물리적 상황을 고려할 때, 가스화기 내벽의 온도를 적절한 경계조건으로 처리할 수만 있다면 가스화기내의 복잡한 반응을 포함하지 않더라도, 전도열전달 해석 또는 대류-전도 복합열전달 해석 등의 간략화된 기법으로 내화재 내부

달 해석 또는 대류-전도 복합열전달 해석 등의 간략화된 기법으로 내화재 내부의 온도분포를 상당히 정확하게 해석할 수 있다는 특징이 있다. 본 연구에서는 고온/고압의 석탄가스화 실험에서 확보한 가스화기 내부의 온도를 경계조건으로 활용하고, 이론해석 및 전산해석 기법을 이용하여 내화재 내부의 온도분포 및 가스화기의 총합 열손실량을 계산하고자 시도하였다. 이를 위하여 일차원 이론적 해석, 이차원 전도열전달 해석 및 삼차원 대류-전도 복합열전달해석을 수행하였으며, 해석결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경 및 지배 방정식

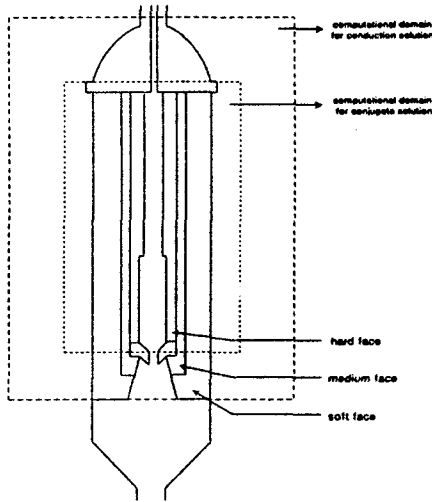


Figure 1 Schematic diagram of the 3 ton/day-class coal gasifier.

2-1 이론적 해석

Fig. 1은 본 연구에 적용된 가스화기의 개략도를 나타내고 있다. 가스화기는 안쪽으로부터 반응영역, 강내화재(hard face refractory), 중간내화재(medium face refractory), 약내화재(soft face refractory) 및 이들을 둘러싸고 있는 탄소강 계열의 셸(shell)로 구성되어 있다. Fig. 1과 같은 원통형 용기에서 축방향으로의 열전달을 무시하면 열전달을 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$q_r(x) = -2\pi rk \frac{dT}{dr} dx$$

위의 방정식에 대하여 가스화기 내벽의 온도 및 외벽에서의 열손실정산법의 경계조건이 주어지면 반경방향으로 흐르는 열전달량 및 온도분포가 구해진다.

2-2 전도열전달 해석

내화재 내부에서는 축방향으로도 어느 정도의 온도구배가 존재하며 특히 반응영역을 벗어난 하부와 상부에서는 비교적 심한 축방향으로의 온도구배가 존재한다. 이러한 현상을 보다 정확하게 해석할 수 있는 방법으로서 이차원 전도열전달 해석을 들 수 있다. 가스화기와 같은 원통형 용기내에서 축 및 반경 방향의 온도구배를 포함한 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 열전도방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

전도열전달 방정식은 수치해석상 절대적으로 안정하고 계산시간이 적게 걸리는

특성상 비교적 쉽게 전산해석을 수행할 수 있다.

2-3 대류-전도 복합열전달 해석

가스화기 내벽의 온도분포를 알 수 없는 경우에는 반응, 유동 및 전도가 복합된 해석을 수행하는 것이 유일한 방법이지만, 수치해석상 많은 어려움이 따른다. 본 연구에서는 가스화기 반응영역 및 출구에서는 열역학적 계산과 설계자료 등에 의하여 근사온도를 확보할 수 있다는 점을 고려하여 삼차원 대류-전도 복합열전달 해석을 수행하여 대류열전달의 영향을 파악하여 보았다. 원통형 좌표계에서 대류-전도 복합열전달을 지배하는 방정식은 다음과 같다⁵⁾.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w \phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S_{\phi} \end{aligned}$$

본 연구에 적용된 가스화기내에서는 강선회유동이 동반되므로, 이를 보다 정확하게 예측하기 위하여 난류 선회유동에서의 비등방성이 충분히 고려된 레이놀즈 응력모델(Reynolds Stress Model)을 적용하여 전산해석을 실시하였다. 또한 본 연구에서는 미분탄의 화학반응을 고려하지 않은 대신에 기체의 유동장에 대해서 역학적 상사를 고려하여, 특히 물리적 변수로서 가장 중요한 변수인 선회수의 상사⁶⁾를 유지하여, 반응유동장을 최대한 반영하고자 시도하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 이차원 전도열전달 해석에 의한 가스화기 내화재 및 셸(shell)에서의 온도분포도를 나타내고 있다. 우선 반경방향의 분포를 살펴보면, 열전도도가 비교적 큰 강내화재 영역에서는 온도구배가 비교적 약한 반면에 열전도도가 작은 중간내화재 및 약내화재 영역에서는 온도구배가 비교적 큰 결과를 보여주고 있다. 대부분의 영역에서 축방향으로는 온도구배가 상당히 약하지만 가스화기의 반응영역의 반경이 변하는 부분 및 가스화기의 상단/하단 부분에서는 축방향으로도 온도구배가 관찰된다. Fig. 3는 삼차원 대류-전도 복합열전달 해석에 의한 가스화기의 반응영역 및 내화재/셸 영역에서의 온도분포도를 나타내고 있다. 기체의 온도는 주입구를 기준으로 상하로 진행하면서 대류 및 전도열전달에 의한 손실의 영향으로 인하여 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 가스화반응 영역에서는 최악 흡열반응을 열소멸항으로 대체한 방법론의 특성상 출구로 진행하면서 서서히 온도가 강하하여 출구에서는 실제 운전상태인 약 1200°C로 빠져나가는 모습을 보여주고 있다. 고체영역(내화재 및 셸)에서는 정성적으로는 Fig. 2에 나타난 전도열전달 해석의 결과와 유사함을 보여주고 있다. 그러나 기체와 인접한 영역인 강내화재 영역에서의 온도가 전도열전달의 경우에 비하여 비교적 낮은 결과를 보여주고 있는데 이는 가스화기의 내벽근처에서는 대류의 영향으로 기체와 고체벽사이에 온도차이가 존재하기 때문이다.

Fig. 4는 가스화기 외벽의 표면온도를 나타내고 있다. 우선 순수한 이론적 해석에 의한 값이 약간 높은 값을 나타내고 있으며, 전도열전달 해석의 경우 가스화기 하단부를 제외한 영역에서는 이론적 해석과 비교적 유사한 결과를 보여주고 있다. 복합 대류열전달 해석에 의한 결과는 정성적으로는 전도열전달의 경우와 유사하지만 정량적으로는 표면온도가 약간 낮은 것으로 나타났다. 이는 내벽의 경계조건 대신에 기체의 온도가 경계조건으로 이용되었기 때문이다. Fig. 5는 주어진 축방향 위치에서 반경방향을 따른 내화재의 온도분포를 보여주고 있다. 이론적 해석결과와 전도열전달 해석결과는 거의 같은 분포를 보여주고 있으며 복합열전달 해석결과는 가스화기 내벽 근처에서 어느 정도의 차이를 보여주고 있다. 실험결과는 내벽에 인접한 부분을 제외하면 해석결과에 비해 약간 낮은 값을 나타내고 있다. 이와 같은 오차는 수치해석상에서 열전도도 값의 불확실성 및 실험상에서 외부공기의 유입등의 가능성으로 발생한 것으로 판단된다.

이와 같은 이론 및 전산해석 결과를 분석하여 외부로의 총 열손실량을 계산하여 Table 1에 나타내었다. 표 1의 계산결과에 의하면, 가스화기 설계치인 3톤/일 가스화에 투입되는 석탄의 총 화학적 에너지의 약 1%(LHV 6000 kcal/kg 기준으로, 투입되는 총열량은 872kW) 정도의 열손실이다. 이 정도의 열손실량은 Bench Scale급의 가스화장치에서는 적정수준의 열손실량인 것으로 판단된다.

Table 1 Comparison of total heat loss from 3 ton/day-class coal gasifier.

방법 \ 영역	슬래츨출구 이하 영역	반응영역 측벽	가스화기 출구 이후 영역	계
이론적 해석	N/A	7.43	N/A	N/A
전도열전달 해석	1.03	6.43	2.08	9.54
복합열전달 해석	0.89*	5.12	2.30*	8.31

unit : kw

N/A : Not Available

* : 기하학적 형상의 단순화에 의한 해석 결과

상기와 같이 해석결과가 측정결과와 유사한 점을 고려해 볼 때, 본 전산해석에 적용된 방법론은 비록 반응을 직접적으로 고려하지는 않았지만 신뢰할 만한 수준인 것으로 판단된다. 그리고 내화재의 온도분포 및 열손실량 계산의 측면에서는 이차원 전도열전달 해석이 계산의 효율성 및 정확성 등을 고려할 때 상당히 적절한 방법론으로 판단된다. 왜냐하면, 삼차원 복합열전달의 경우에는 워크스테이션(모델 : HP9000/755)에서 12시간 이상 계산이 진행된 후에도 약간의 수치적 진동(oscillation)이 관찰된 반면에 이차원 전도열전달의 경우에는 약 2-3분의 CPU 시간내에 완전히 수렴된 해를 얻을 수 있었다. 그 결과도 복합열전달 해석결과와 큰 차이가 없고, 가스화기 및 내화재의 실제형상을 정확하게 반영하고, 전 영역을 해석대상으로 하여 열손실 계산을 수행할 수 있기 때문이다.

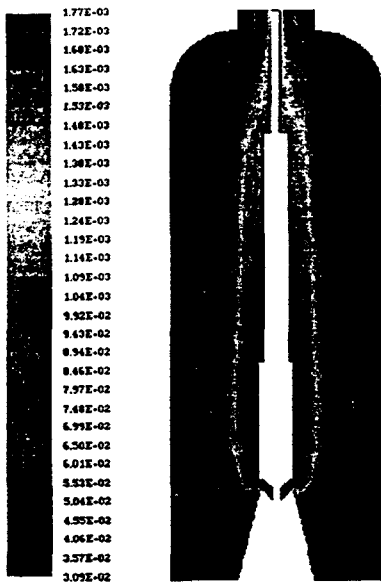


Figure 2 Contour plot of temperature by conduction analysis in the refractory layers and shell.

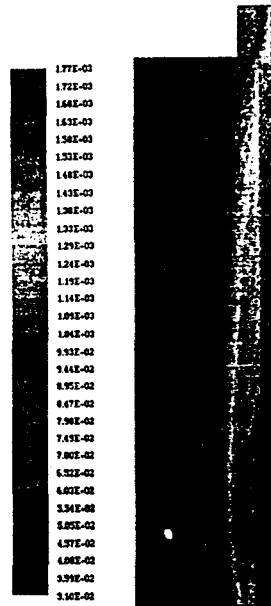


Figure 3 Contour plot of temperature by conjugate heat transfer analysis in the gasifier.

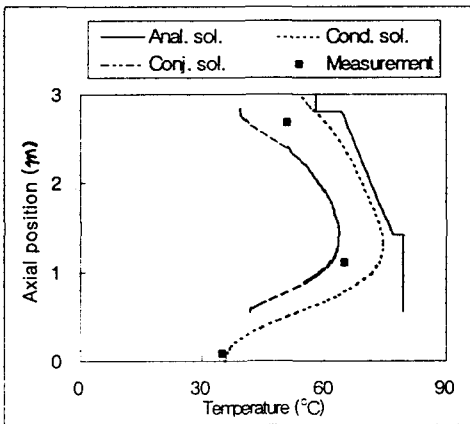


Figure 4 Surface temperature profiles of the gasifier.

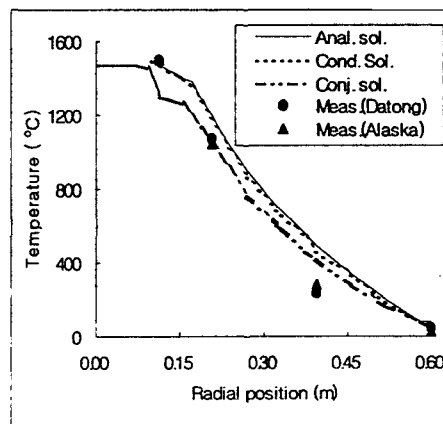


Figure 5 Temperature profiles of the gasifier along the radial direction.

4. 결론

이론적해석, 이차원 전도열전달 해석 및 삼차원 복합열전달 해석에 의하여 가스화기 내화재내의 온도분포 및 열손실량을 계산하였으며, 그 결과를 측정자료와 비교하였다. 전산해석 결과는 측정자료와 정성적 및 정량적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 계산결과의 정확도, 수렴성, 계산시간의 효율성 및 기하학적 형상 처리의 우수성 등을 종합적으로 고려할 때, 가스화기의 내화재 설계시에는 이차원 전도열전달 해석방법이 실용적일 것으로 판단되었다. 현재 운영되고 있는 석탄가스화기에서 설계치인 3톤/일 처리시 전체 열손실량은 약 1% 정도임을 실제 측정한 가스화기 표면온도 수치를 기준으로 계산한 결과 판별할 수 있었다. 향후 상업용 발전소에 적용될 대용량 가스화기의 기본설계시에는 본 연구에서 제안된 방법론 및 축적된 경험을 활용하여 내화재의 재질 및 두께, 즉 가스화기의 크기 및 중량을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사

본 연구는 전력연구원에서 지원한 “3톤/일급 건식 석탄가스화기 운전특성 연구” 과제에 의뢰하여 수행되었습니다. 전력연구원 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Zon, G. D., “Integrated Coal Gasification Combined Cycle Demonstration Project, Buggenum”, Conference on New Power Generation Technology, October, San Francisco, California, 1995
2. 이진욱, “석탄가스화 복합발전 기술의 현황 및 개발동향”, 대한기계학회지, Vol. 35, No. 12, pp. 1133-1154, 1995
3. Ji, P. S., Kim, J. J., Ahn, D. H., Kim, N. H., and Song, K. S., “A Prospect of IGCC Commercial Application to Korea”, 10th Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Taejeon, Korea, pp. 55-63
4. 오세기 등, “Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술개발(I)”, 통상산업부, 1997
5. Patankar, S. V. and Spalding D. B., “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corp., Washington, 1980
6. 이진욱, 나혜령, 윤용승, “선회분류층 석탄가스화기내의 비반응 난류 선회유동장 해석”, 한국에너지공학회지, Vol. 6, No. 2, pp. 137-144, 1997