

93-PCGC-2을 이용한 천연가스 연소와 미분탄 연소 모사

조석연 · 서경원 · 이진욱*

아주대학교 화학공학과, *고등기술연구원

Simulation of Natural Gas and Pulverized Coal Combustion using 93-PCGC-2

Seok Yean Cho, Kyung Won Seo and Jin Wook Lee*

Department of Chemical Engineering, Ajou University

*Institute for Advanced Engineering

요 약

향상되어진 93-PCGC-2는 기존의 PCGC-2와 같이 미분탄 연소를 포함하는 다양한 반응성흐름과 비반응성 흐름을 설명하기 위해 2차원 정상상태 모델로 제시되어 졌다.

93-PCGC-2는 실린더형의 축 대칭계에 응용되어질 수 있고, 난류(Turbulence)는 유체역학식과 연소 기구 양쪽을 위해 고려되어졌으며, 불연속 세로좌표 방법(Discrete Ordinates Method)을 이용하여 기체, 벽 및 입자들로부터의 복사열(Radiation)을 모사하였다. 입자상은 입자 무리들의 평균 경로들을 따라 해석하는 Lagrangian계의 해석법으로 모델화되어졌다. 석탄의 팽윤(Swelling)과 촉의 반응성에 관한 부모델과 더불어 새롭게 일반화된 석탄 탈휘발화 부모델(FG-DVC)도 첨가되어졌다. 비균일 반응기구는 확산과 화학반응 둘 모두를 고려하였다. 주요 기상반응은 국부 순간 평형을 가정하여 모델화하였다. 그래서 반응속도는 혼합의 난류속도에 의해 제한되어진다. Thermal NO_x과 Fuel NO_x의 유한속도 화학론(Finite Rate Chemistry)에 대한 부모델은 화학반응속도론과 난류성의 통계치를 통합하여 만들어져 있다. 기상은 반복적인 line-by-line기교에 의해 풀려지는 elliptic partial differential equation으로 묘사되어진다. 수치적인 안정을 고려하기 위해 under-relaxation이 이용되어졌다. 이렇게 코드화된 93-PCGC-2는 연소를 위해 모사되어졌다. 또한 더 나아가 이 수치모델의 활용범위는 미분탄의 가스화에도 활용되어질 것으로 기대되어진다.

1. 서 론

PCGC-2를 이용하여 미분탄 연소, 석탄가스반응 및 여러 기-고, 기-기 반응성 흐름내지 비반응성 흐름을 묘사할 수 있다. 93-PCGC-2는 기상확산 화염 연소와 등은 2상 유체역학을 보다 엄밀하게 묘사할 수 있도록 보장되어 졌다.

이 모델화 구도는 기상에 대해서는 Eulerian계 해석법 그리고 입자상에 대해서는 Eulerian계와 Lagrangian계의 혼합 해석법을 바탕으로 하고 있으며, 이 접근법은 난류성 화염내의 난류 유체역학과 난류 연소과정을 강조하였다. 대부분의 기상 반응은 혼합정도에 의해 제한되어진다고 가정하였기 때문에 기상의 연소는 혼합분율을 근거로 하는 통계적 확률밀도 함수(Statistical Probability Density Function)로 모델화되었다. 기상에 대해서는 $(\kappa - \epsilon)$ 의 두 난류 등식이 사용되어졌으며, 입자상은 공기역학적 입자 drag와 난류성 입자 분산의 영향을 포함하고 있다. 입자의 반응은 기상의 난류 시간크기에 비해 느리다고 고려하였다. 슬러리 액체의 증발화, 석탄의 탈휘발화, 촉의 반응에 대한 속도과정은 시간 평균 기체특성들을 근거로 고려되어졌다. 좌표계는 비등방성이고 다중 산란인 입자와 기체의 복사열도 포함되어졌다.

2. 기존의 PCGC-2와 93-PCGC-2의 차이

기존 PCGC-2를 다음과 같이 발전, 변화시켰다.

첫째, 석탄의 팽윤과 촉의 반응성과 함께 일반화된 석탄의 탈휘발화 부모모델을 세웠다.

둘째, 정확한 에너지 방정식의 첨가하였다.

세째, 층류영역과 전이영역에 대한 해석을 첨가하였다.

네째, 일반화된 1차흐름이상의 inlet에서의 고체 주입을 고려하였다.

다섯째, thermal NO 부모모델 첨가하였다.

3. 93-PCGC-2의 한계 사항

첫째, 흐름장, 기하학적 구조, body force들은 축 대칭이다.

둘째, 흐름은 음속이하(subsonic)이다. 그래서 팽창을 무시한다. 최고 마하(Mach number) 0.3보다 작아야 한다.

세째, 화학반응속도는 운동속도론(kinetic)아니라 난류 혼합에 의해서 제한되어진 다.

네째, 입자는 기상에 분산되어져 있고, 입자와 입자사이의 상호작용은 무시한다.

다섯째, 난류를 다루는 submodel들은 매우 빈약하다. 특히 난류 $(\kappa - \epsilon)$, 난류의 입자분산, 난류의 화학적 상호작용은 아직 모든 경우에 있어서 정확한 결과를 만들어 낼 수 없다.

4. 93-PCGC-2 이용한 모사 결과

천연가스와 미분탄을 Fig. 1과 같은 연소기에서 연소시켰을 때의 93-PCGC-2의 모사결과는 다음과 같았다.

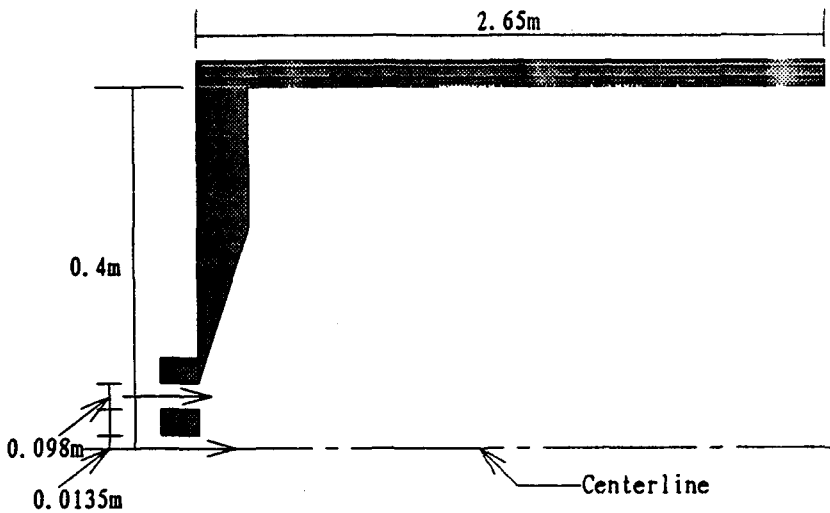


Fig. 1. Schematic diagram of the Combustor

4-1. Natural Gas Combustion의 모사

Fig2~3은 Natural Gas을 연소시켰을 때의 모사결과이다. 입구에서는 Primary tube inlet과 Secondary tube inlet이 존재하며 Primary stream은 CH_4 , CO_2 , C_2H_6 , C_3H_8 , N_2 등이 각각 0.501, 0.1163, 0.22, 0.154, 0.0088의 몰분율을 갖는 0.002611kg/s 흐름으로 공급되고, Secondary Stream은 O_2 , N_2 등이 각각 0.233, 0.767 몰분율의 0.15kg/s 속도로 공급된다.

Fig.2는 연소기내의 기체의 속도장을 나타내고 있다. Secondary 흐름에 의한 영향으로 Primary, Secondary 흐름 입구와 연소기 벽근처에서 와류가 형성됨을 볼 수 있다. Fig.3은 연소기내의 온도분포를 나타내고 있다. Primary와 Secondary stream의 주입 온도가 각각 298 K이었을 때 그 연소기내의 온도분포는 연소에 의해서 398 ~ 1790K의 분포를 형성하였다.

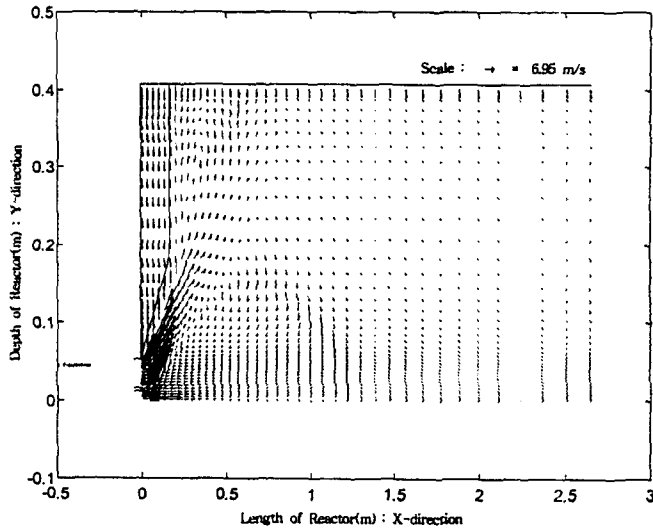


Fig.2. Gas Phase Velocity Field in the Combustor

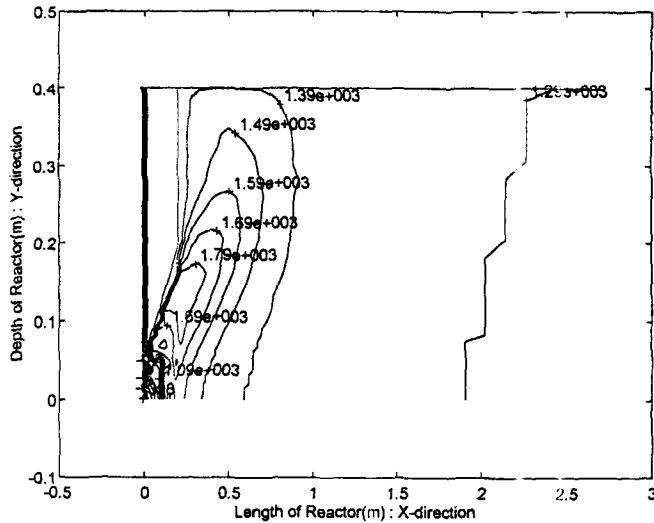


Fig.3. Gas Phase Temperature Contours in the Combustor

4-2. Pulverized Coal Combustion의 모사

Fig.4~6은 Pulverized Coal을 연소시켰을 때의 모사결과이다. 입구에서는 Primary tube inlet과 Secondary tube inlet이 존재하며 Primary stream은 Gas ($H_2O:0.062$, $N_2:0.72$, $O_2:0.219$)와 Coal등이 각각 $0.00417kg/s$, $0.003169kg/s$ 유량으로, Secondary Stream은 O_2 , N_2 등이 각각 0.233 , 0.767 몰분율의 $0.035kg/s$ 유량으로 공급된다.

Fig.4는 연소기내의 기체의 속도장을 나타내고 있다. 전의 Natural gas와 비슷하게 Secondary 흐름에 의한 영향으로 Primary, Secondary 흐름 입구와 연소기 벽근처에서 와류가 형성됨을 볼 수 있다. Fig.5는 연소기내의 온도분포를 나타내고 있다. Primary와 Secondary stream의 각각 온도는 298 K, 423K이었을 때 그 연소기내의 온도분포는 연소에 의해서 946 ~ 1590K의 분포를 형성하였다.

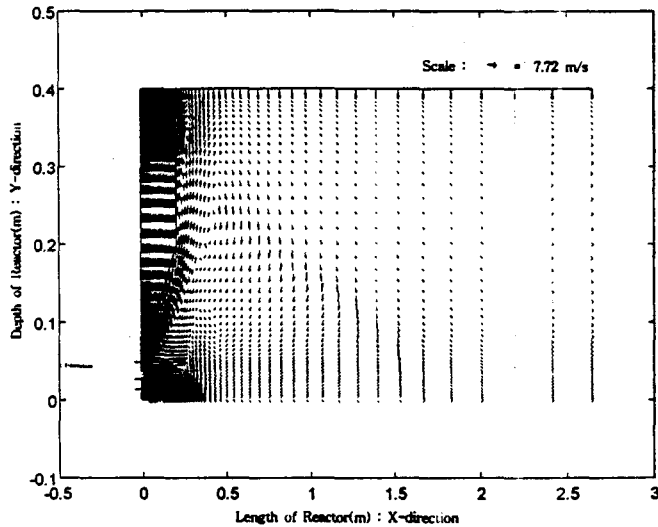


Fig.4. Gas Phase Velocity Field in the Combustor

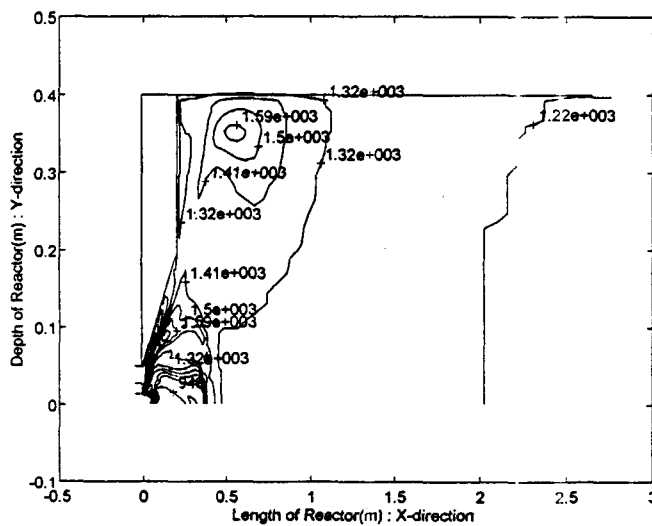


Fig.5. Gas Phase Temperature Contours in the Combustor

5. 결론 및 향후 연구

지금까지는 93-PCGC-2에 대한 소개 및 설명 그리고 간단한 예로서 비말동반층에서 천연가스 연소와 미분탄의 연소를 모사하여 연소기내 유동장과 온도분포에 대한 결과를 보았다. 이를 바탕으로 석탄 가스화에 대해서도 연구가 가능하다. 이렇게 준비된 석탄 가스화를 최근에 사용되어지고 있는 분류층 가스화기를 모델로 하여 모사를 하고, 이렇게 실제 조업되고 있는 조건에 맞추어 모사를 실행하여 각 변수에 대한 민감도 분석도 가능할 것으로 사료되어진다.

참고문헌

1. Smoot, L.D. and Smith, P.J. : "User's Manual for a Computer Program for 2-Dimensional Pulverized Coal Gasification and Combustion Model (93-PCGC-2)", Combustion Laboratory, Brigham Young University, 1993.
2. Badzioch, S. and Hawksley, P.G.W. : "Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles", IEC Proc. Des. Dev., 9, 521-30, 1970.
3. Smoot, L.D. and Smith, P.J. : "Coal Combustion and Gasification", Plenum Press, New York, pp. 245-264, 349-371, 1985.
4. Sunavala, P.D. : "Mixing and Combustion in Pulverized Coal Flames", J. Institute of Fuel, 41, pp. 477-482, 1968.
5. Thurgood, J.R. : "Mixing and Combustion of Pulverized Coal", Ph.D. Dissertation, Brigham Young University, 1979.
6. Launder, B.E. and Spalding, D.B. : "Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, London, 1972.
7. Roache, P.J. : "Computational Fluid Dynamics, Hermosa Publishers, Albuquerque, NM, 1976.