분류층 연소기내의 유동해석

○ 양 희 천*, 김 중 현**

Flow Analysis in a Entrained Flow Combustor

○ H. C. Yang*, J. H. Kim**

ABSTRACT

A numerical study was conducted to investigate the effects of flow parameters in a entrained flow combustor on the flow characteristics. The computational model was based on the gas phase Eulerian equations of mass, momentum and energy. The code was formulated with RNG k-ϵ model for turbulent flow. The calculation parameters were the magnitude of primary and secondary jet velocity and the height difference between primary and secondary jet. As the secondary jet velocity increased, the upper recirculation zone of the primary jet was strengthened. It was found that as the primary jet velocity increased, there was a critical jet velocity at which the size of upper and lower recirculation zone was changed.

1. 서 론

가용 에너지원으로부터 환경 친화적인 방법으로 경제성 높은 전력을 생산하는 문제는 전세계적인 주요 관심사이며, 에너지 부존자원이 부족한 우리의 입장에서는 대단히 절실한 과제이다. 발전설비의 주요 에너지원중의 하나인 석탄은 석유와는 달리 비교적 전세계적으로 고루 분포되어 있고 매장량도 풍부하다. 그러나 석탄은 황, 질소, 광물질 등의 함유량이 다른 연료에 비해 상대적으로 높기 때문에 종래의 미분탄 연소방식으로는 공해 물질의 배출량이 많아서 갈수록 강화되어 가는 환경규제를 만족하기 어려운 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 선진 업체들은 다양한 석탄연소 방식을 연구개발하고 있다.

일반적으로 연소기의 성능은 미분탄 입자와 산화제의 혼합특성, 연소기내 잔류시간 그리고 그 분포에 지배된다. 미분탄 입자의 연소기내 잔류시간과 그 분포는 혼합기구와 서로 밀접하게 연관되어 있다. 이론적인 혼합기구에 따라 유동은 플러그 유동(Plug Flow)과 Well-Stirred 유동으로 구분할 수 있다[1]. 플러그 유동에서는 노즐로 공급되는 관내 유동처럼 입자들이 일정한 유속으로 이동하면서 느린 혼합과정을 겪으며, 연소기내 상하류의 특성이 다른 유동장이 형성된다. Well-Stirred 유동은 이와 반대로 미분탄이 분사노즐 출구에서 빠르게 혼합되어 상하류의 특성이 균일한 유동장이 형성된다. 일반적으로 미분탄을 분사노즐로 공급하는 연소기내의 상류부는 큰 속도차를 갖는 전단류가 형성되고 벽면 부근에는 재순환 영역이 존재하는 등 복잡한 유동특성이 나타나게 된다.

석탄 연소기내에서의 혼합특성과 잔류시간 등에 따른 성능과 유동현상은 많은 연구자들

* 여수대학교 기계자동차공학부
** 전남대학교 대학원 기계공학과

의 주요 관심사였다. 실험적인 연구와는 달리 수치적인 연구는 컴퓨터 성능 및 수치해석 방법의 발달과 함께 1980년대 초에 이르러 본격화되었다. 수치해석은 기존 실험결과와의 비교를 통해 수치해석의 가능성과 그 타당성을 검증하고, 미분탄의 연소과정에 대한 모델제시와 검증, 미분탄 입자와 난류 유동간의 상호관계의 검증, NOx와 fly ash 등의 공해물질 배출특성 파악, 그리고 화염선단 위치의 예측 등이 수행되었다. Lockwood et al.[2]과 Lockwood와 Shen[3]은 실험결과를 바탕으로 미분탄 연소과정에 대한 수치해석을 수행하였다. 그들은 1차/2차 유동의 속도비, 분사각, 입자의 조성비에 따른 연소특성을 해석하였으며, 여러 가지 난류모델의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. Peters와 Weber[4]는 대용량 연소로에서의 미분탄 연소현상에 대한 수치해석 코드를 개발하고 수치적 연구결과를 발표하였다. 그들은 보다 정확한 입자거동을 해석하기 위하여 총 4000개의 미분탄 입자를 추적하였다. Govind과 Shah[5]는 분류층 연소기에서 미분탄 연소에 대한 수치해석을 수행하였다. 그들은 기상과 미분탄 입자에 대한 지배방정식을 유도하였다. Gosner와 Zinser[6]는 3차원의 실용보일러에서 실험결과와의 비교를 위한 수치해석 코드를 개발하였다. 그들 또한 기상과 입자에 대한 지배방정식을 유도하였으며, 난류는 k-ε 모델을 이용하여 해석하였다. 실험결과와의 비교를 통해 그들은 수치적인 방법이 미분탄 연소해석에서도 유용한 도구가 될 수 있음을 밝혔다. 국내에서는 양선규[7]가 입자가 부상된 2상 난류유동을 유동형태에 상관없이 일반적이고 정확하게 예측할 수 있는 전산해석방법을 개발하고, 전산해석의 정확성에 영향을 미치는 인자들의 특성을 체계적으로 비교 검토하는 연구를 수행하였다. 조한창[1]은 석탄 반응로에서의 혼합과 체재시간 특성에 따른 연소성능을 파악하기 위하여 실험적 연구와 수치적 연구를 병행하였다. 수치적 연구에서는 탈 휘발모델과 휘발분의 반응기구의 정확성 등에 대한 검증과정을 거쳐 개발된 수치해석 코드를 이용하여 선회강도에 따른 혼합특성과 연소성능을 파악하고, 이를 토대로 반응로의 성능과 유동영역과의 관계를 수치적으로 규명하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 분류층 석탄연소기내의 유동파라미터 변화에 따른 연소기내의 유동특성을 규명하고자 한다. 따라서 단순화시킨 연소기 모형에서 1, 2차 분류의 크기와 2차 분류의 위치 변화에 따른 연소기내의 유동특성을 정성적으로 해석하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 지배방정식

뉴톤 유체의 비정상 유동에 대해 일반 좌표계상에서 Cartesian 속도성분을 사용하여 시간평균된 압축성 난류 유동의 지배 방정식을 텐서 형식으로 나타내면 다음과 같다[8].

$$\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial t}(J\rho\phi)+\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial x^j}\left[\rho G_m\beta'^j_m\phi - \delta^j_n\frac{\Gamma_\phi}{J}\frac{\partial\phi}{\partial x^n}\beta^n_m\beta^j_m\right]=S_\phi \qquad (1)$$

위의 식에서 S_ϕ와 Γ_ϕ는 종속변수 ϕ에 대한 생성항과 확산계수이다. 본 연구에서 이용한 RNG k-ε 모델[9]의 난류 운동에너지 방정식은 k-ε 모델의 형태와 같고, 난류 운동에너지 소산율 방정식은 식(2)에 나타낸바와 같이 소산율 방정식의 생성항에 $-\rho R$ 항이 추가된 형태이다.

$$C_1\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+C_3\rho\varepsilon\frac{\partial U_l}{\partial x^l}-\rho R \qquad (2)$$

세부적인 내용은 양희천외[10]의 연구결과에 설명되어 있다.

2.2 수치해석 방법

액상이나 고상의 연료를 분사하는 분사연소 시스템에서는 분사된 연료 입자들과 고온의 주위 기상이 함께 유동하는 2상 유동이 형성되며, 두 상 사이에는 질량, 운동량 및 열전달

의 상호작용이 존재한다. 이와 같은 2상 유동을 해석하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 두 상간의 빠른 혼합으로 두 상이 운동학적으로나 열역학적으로 항상 평형을 이룬다는 가정 하에 해석하는 부분균질유동(locally homogenous flow : LHF) 모델이다. 이 모델은 기상에 입자를 부유시키는 경우에는 잘 맞지 않고 액상유동에 기상을 분사하는 경우에 주로 사용된다. 둘째는 각 상에 대한 해석을 수행하고, 두 상간의 유한한 율의 질량, 운동량 및 열전달을 고려하여 해석하는 분리유동(separate flow : SF) 모델로 부분균질유동 모델보다 더 논리적이고 물리적 타당성이 있다. 이 모델에서는 생성항을 처리하는 방식에 따라 여러 가지 모델로 분류된다. 대표적으로 물질의 상태에 관계없이 연속체의 가정하에 지배방정식을 유도하고 해석하는 방식이 있다. 또는 가스유동은 Eulerian 방법으로 해석하고 입자유동은 Lagrangian 방식으로 추적하면서 해석하는 PSIC(Particle-Source In Cell) 방법이 있다[11]. 이 방법은 입자간의 상호작용을 고려할 수 없기 때문에 입자밀도가 높은 유동장에서는 한계가 있지만 미분탄 연소의 해석에 많이 이용된다. 본 연구에 이용된 코드는 PSIC 방법으로 구성되어 있지만 본 논문의 계산에서는 기상만을 고려하였으므로 관련 생성항을 0으로 처리하여 계산하였다.

지배 방정식의 차분화는 지배 방정식을 검사 체적에 대해 체적적분으로 이산화시키는 유한 체적법을 사용하여 대수 방정식을 얻는다. 대류항에 대해서는 선형 상류 차분법을 사용하였고, 확산항은 중심 차분법을 사용하여 차분화시켜 지배 방정식을 이산화하였다. 이산화된 방정식은 SIP(Strongly Implicit Procedure)[12] 방법으로 풀어 각각의 변수 값들을 구한다. 압력과 속도의 연결에는 SIMPLE알고리즘을 사용하여 처리하였다.

2.3 경계조건

입구 경계에서의 속도분포는 실험결과를 이용하여 경계면에 수직한 값으로 주었다. 또한 실험결과에서 측정된 중심선의 난류강도를 이용하여 난류운동에너지와 난류에너지 소산율의 입구조건을 처리하였다. 작동 유체는 공기로서 입구면에서 대기압 상태인 1기압, 300K로 가정하였으며, 모든 벽면의 온도는 300K로 균일하게 가정하였다.

벽면 경계 조건은 점착 조건을 사용하여 운동량 방정식과 에너지 방정식에서 대류항을 소거시켰으며 확산항은 첫번째 격자점에서 벽마찰 응력 τ_w를 사용하여 처리하였다. 난류에너지에 대한 벽면 경계조건은 벽면에서의 구배가 0이며, 난류 에너지 소멸율은 벽면으로부터 첫 번째 계산점에 적용하여 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 해의 수렴조건은 압력보정 방정식에서 질량 생성항 및 운동량 방정식에서 잉여오차의 절대값의 총합과 입구에서 유입되는 대응량과의 차이가 0.0001이하이면 수렴되는 것으로 조건을 설정하였다.

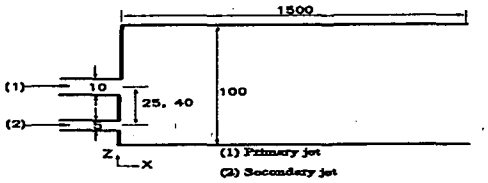

Fig. 1 Schematic calculation domain

Fig. 2 Calculation grid

계산 유동장은 Fig.1과 같이 높이 100mm, 길이 1500mm 사양의 연소기 모형이다. 1차 분류의 분사홀 크기는 10mm로 연소기의 중심축에 위치하며, 5mm의 크기를 갖는 2차 분류의 분사홀은 1차 분사홀로부터 25mm 또는 40mm 떨어진 하단에 위치한다. 본 계산에서는 유동장만을 해석하였으므로 1, 2차 분류 모두 공기로 가정하였다. Fig.2에 나타낸바와 같이 계산 영역을 49×300의 격자계로 구성하였

는데, 최초에 경계점을 주고 대수적 보간법에 의해 내부 격자점들을 생성하였으며, 격자 분포 또한 원하는 곳에 자유롭게 배치하여 격자 분포를 최적화 시켰다.

일반적으로 연소기내 유동분포는 혼합기구를 변화시키는 여러 인자, 즉 버너형상과 유동조건 등의 운전조건에 의해 지배된다. 본 연구에서는 유동변수를 1, 2차 분류의 크기와 2차 분류의 높이차로 설정하였는데, Table 1에 나타낸바와 같이 9가지 경우에 대해서 수치계산하였다.

Table 1 The conditions of calculation

	Primary jet velocity(m/s)	Secondary jet velocity(m/s)	Height difference(mm)
Case 1	15	0	0
Case 2	15	15	25
Case 3	15	30	25
Case 4	15	60	25
Case 5	15	15	40
Case 6	15	30	40
Case 7	15	60	40
Case 8	30	30	25
Case 9	60	30	25

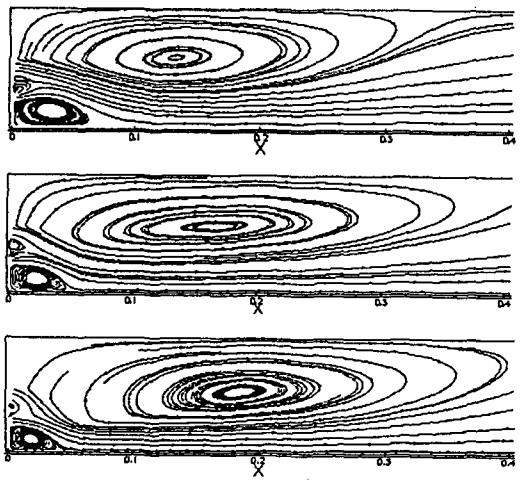

Fig. 3 Stream lines for Case 2, 3, 4

Fig. 3은 1차 분류의 속도가 15m/s이고, 1차 분류의 중심으로부터 25mm 하단의 2차 분류의 속도가 15, 30, 60m/s인 경우의 유선분포를 나타낸다. 1차 분류만 있는 경우에는 분류의 중심축 상하부에 2개의 재순환 유동이 대칭적으로 발달하지만, 본 결과에서는 1차 분류의 상부에 입구영역으로부터 하류영역까지 크게 영향을 미치는 재순환 유동이 발달하고, 2차 분류의 하단에는 보다 크기가 작은 재순환 유동이 발달하며, 1, 2차 분류 사이의 입구영역에 크기가 매우 작은 말발굽 모양의 재순환 유동이 발달하는 것을 볼 수 있다. 또한 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기가 점차 커지고 보다 하류까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 유동분포는 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류가 2차 분류내로 유입(entrainment)되는 강도가 커지기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 1차 분류에 미분탄 입자를 분사하는 실제의 석탄 연소기에서는 미분탄 입자의 확산율이 증가할 것으로 사료된다. 한편 2차 분류 하단의 재순환 유동은 위와 반대의 영향에 의해 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다.

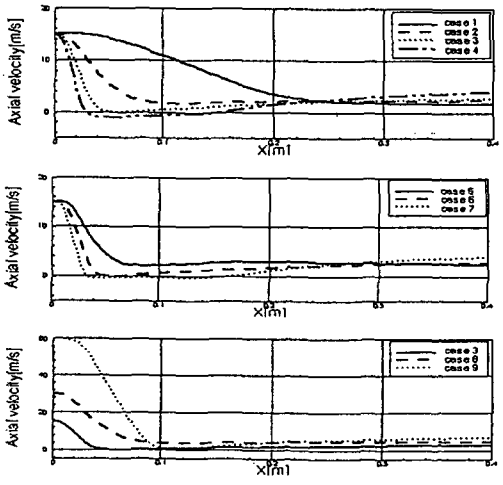

Fig. 4 Centerline axial velocity profiles

Fig. 4는 1차 분류의 중심을 통과하는 연소실 중심축에서의 축방향 속도분포를 나타낸다. 2차 분류의 속도가 증가하면 Fig. 3의 결과에서 설명한바와 같이 1차 분류가 2차 분류내로 유입되는 강도가 커지기 때문에 최소 축방향 속도가 나타나는 위치가 분류 출구쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 case 2, 3, 4의

경우에는 약 X=0.24, case 5, 6, 7의 경우에는 약 X=0.295를 기준으로 2차 분류의 속도증가에 따라 축방향 속도의 크기가 억전되는 것을 알 수 있다.

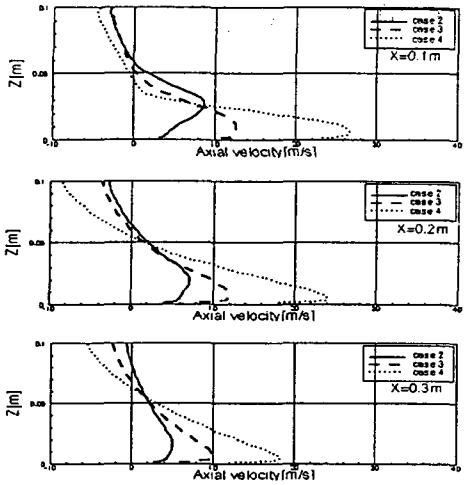

Fig. 5 Distributation of axial velocity for Case 2, 3, 4 at X=0.1, 0.2 and 0.3m

Fig. 5는 1차 분류의 속도가 15m/s이고, 1차 분류의 중심으로부터 25mm 하단의 2차 분류의 속도가 15, 30, 60m/s인 경우의 연소실내 위치변화에 따른 축방향 속도분포를 나타낸다. 2차 분류의 속도가 증가할수록 축방향의 최대속도가 커지며, 최대속도가 나타나는 위치가 점차 연소실 하단 벽쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 하류로 갈수록 최대속도가 나타나는 위치가 연소실 하단 벽쪽으로 더 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 1차 분류의 속도가 15m/s이고, 1차 분류의 중심으로부터 40mm 하단의 2차 분류의 속도가 15, 30, 60m/s인 경우의 연소실내 위치변화에 따른 축방향 속도분포를 나타낸다. Fig. 6은 Fig. 5와 비교하여 2차 분류의 높이차가 더 커진 경우로, 1차 분류 상부의 재순환 유동장이 Fig. 5와 거의 유사한 특성을 나타내고 있다. 반면에 2차 분류 하단의 재순환 유동장의 크기는 점차 작아져서 case 7의 경우에는 거의 소멸된다. Fig. 6의 경우는 Fig. 5와 비교하여 2차 분류의 위치가 보다 하단 벽쪽에 가깝기 때문에 축방향 최대속도가 더 커지고, 최대속도가 나타나는 위치는 하단 벽쪽으로 더 이동한 것을 알 수 있다. 따라서 미분탄이 1차 분류를 통해 분사되면 Fig. 5의 경우보다 미분탄의 확산율이 증가 될 것으로 생각된다.

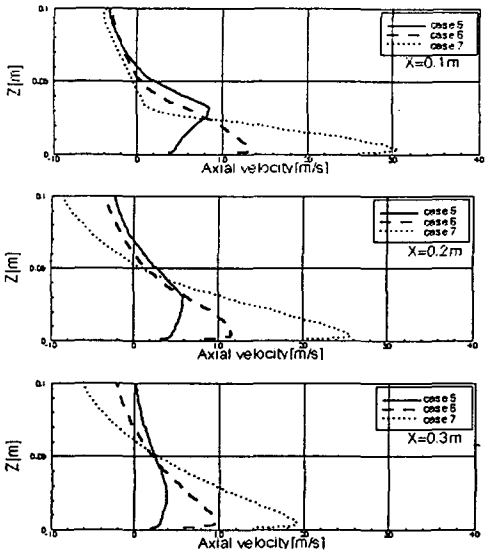

Fig. 6 Distributation of axial velocity for Case 5, 6, 7 at X=0.1, 0.2 and 0.3m

Fig. 7은 1차 분류의 속도가 15, 30, 60m/s이고, 1차 분류의 중심으로부터 25mm 하단의 2차 분류의 속도가 30m/s인 경우의 연소실내 위치변화에 따른 축방향 속도분포를 나타낸다. Fig. 5와 6의 경우와 마찬가지로 1차 분류의 상부, 2차 분류의 하단과 1, 2차 분류 사이에 각각 재순환 유동이 발달한다. 그러나 Fig. 5와 6의 경우와는 달리 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 1차 분류의 속도가 증가함에 따라 점차 작아지고 상대적으로 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기는 점차 커지는 것을 알 수 있다. 특히 1차 분류의 속도가 2차 분류의 속도보다 큰 case 9의 경우에는 2차 분류 하단의 재순환 유동이 입구영역으로부터 하류영역까지 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 1차 분류에 미분탄 입자를 분사할 경우, 미분탄 입자의 확산율은 Fig. 5와 6의 경우보다 감소할 것으로 사료된다. 또한 1차 분류 상부의 재순환 유동은 입구 부근에 비교적 큰 정

체 영역을 형성함으로서 확산율 저하에 중요한 영향 요소임을 알 수 있다. Fig. 7의 결과로부터 1차 분류의 속도를 증가시키는 경우에는 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기가 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기보다 작아지는 임계 속도가 존재함을 추론할 수 있다.

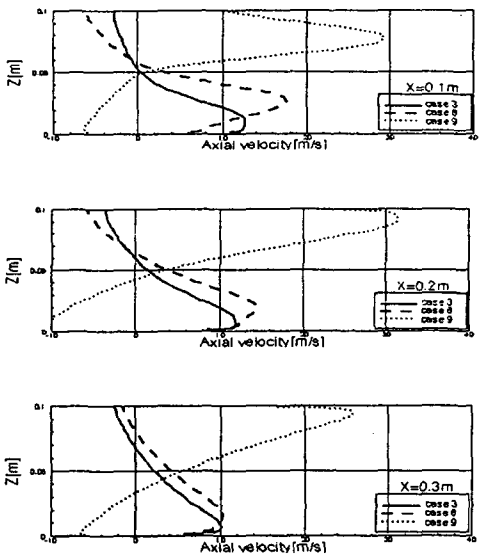

Fig. 7 Distributation of axial velocity for Case 3, 8, 9 at X=0.1, 0.2 and 0.3m

4. 결론

본 연구에서 분류층 석탄 연소기내의 유동 파라미터 변화에 따른 연소기내의 유동특성을 규명하기 위하여 단순화시킨 연소기 모형에서 1, 2차 분류의 크기와 2차 분류의 위치 변화에 따른 연소기내의 유동특성을 정성적으로 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1차 분류의 상부, 2차 분류의 하단에는 서로 반대로 회전하는 재순환 유동이, 1, 2차 분류 사이의 입구영역에는 말발굽 모양의 재순환 유동이 발달하는 것을 알 수 있다.

2차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 점차 커지고 보다 하류까지 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 1차 분류에 미분탄 입자를 분사하는 경우 미분탄 입자의 확산율이 증가할 것으로 사료된다.

1차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 점차 작아지고 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기는 점차 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 1차 분류에 미분탄 입자를 분사할 경우, 미분탄 입자의 확산율은 감소할 것으로 판단된다.

1차 분류의 속도를 증가시키는 경우에는 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기가 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기보다 작아지는 임계 속도가 존재함을 추론할 수 있다.

참고문헌

1. 조한창, 반응로내 미분탄과 산화제의 혼합과 연소성능에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위논문(1998).

2. Lockwood, F. C., Salooja, A. P., and Syred, S. A., A Prediction Method for Coal-Fired Furnaces, Combustion and Flames, 38, 1-15(1980).

3. Lockwood, F. C. and Shen, B., Performance Predictions of Pulverised-Coal Flames of Power Station FGurnace and Cement Kiln Types, The Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion, 503-509(1994).

4. Peters, A. A. F. and Weber, R., Methematical Modeling of a 2.4MW Swirling Pulverized Coal Flame, Combustion Science and Technology, 122, 131-182(1997).

5. Govind, R. and Shah, J., Modeling and Simulation of an Entrained Flow Coal Gasifier, AIChE Journal, 30, 79-91(1984).

6. Gosner, K. and Zinser, W., Prediction of Three-Dimensional Flows in Utility Boiler Furnaces and Comparison with Experiments, Combustion Science and Technology, 58, pp. 43-57(1988).

7. 양선규, 기체에 입자가 부상된 2상 난류유동의 해석과 실험, 고려대학교 박사학위논문(1987).

8. Peric, M., A Finite Volume Method for

the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts, Ph.D. Thesis, Univ. of London(1985).
9. Orszag, S. A., Yakhot, V., Flannery, W. S., Boysan, F., Choudhury, D., Maruzewski, J. and Patel, B., Renormalization Group Modeling and Turbulence Simulations, Proceedings of the Int. Conference on Near-Wall Turbulent Flows, Tempe, Arizona, U. S. A., 15-17 March, 1031-1046(1993).
10. 양희천, 유홍선, 임종한, RNG k-ε 모델의 적용성에 대한 연구, 대한기계학회논문집(B), 21(9), 1149-1164(1997).
11. Crowe, C. T., The Particle-Source In Cell(PSI-CELL) Model for Gas Droplet Flows, Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, 325-332(1977).
12. Stone, H. L., Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations, SIAM J, Numerical Analysis, 5(3), 530-559(1968).

TEL) 061-640-6222
E-mail : hcyang@yosu.ac.kr
해당분야 : 열 • 유체공학