

분류층 연소기내의 유동해석

양희천* · 박상규* · 정동화**

Flow Analysis in an Entrained Flow Combustor

H-C Yang* · S-K Park* · D-H Jung**

Key words : Entrained Flow Combustor(분류층 연소기), CFD(전산유체역학), RNG k- ϵ Model(RNG k- ϵ 모델), Velocity Ratio of Primary and Secondary Jet(1차 및 2차 분류의 속도비), Recirculation Zone(재순환 영역)

Abstract

This paper described a numerical investigation performed to understand better the effects of flow parameters in an 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 ratio 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 reversed.

1. 서 론

산업의 발달과 생활수준의 향상은 수송 및 저장 그리고 이용이 편리한 에너지원의 수요를 증대시키고 있다. 이러한 에너지원의 대부분은 화석연료의 에너지 변환과정을 통해 공급되고있다. 그러나 화석 연료중 수요가 가장 많은 석유자원의 고갈이 예상됨으로써 전세계적으로 대체 에너지의 개발

에 많은 노력을 기울이고 있으며, 이와 병행하여 화석연료의 소비를 줄이고 환경오염 물질의 배출을 최소화하기 위한 최적의 연소기술 개발에도 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 시점에서 석탄의 활용은 석유자원의 대체 및 보완 에너지원으로 고려될 수 있다. 그러나 기존의 미분탄 연소방식은 높은 장해 물질의 배출량이 많아서 갈수록 강화되어 가는 환경규제를 만족하기 어려운 문제점이 있

* 여수대학교 기계자동차공학부
** 순천제일대학 차탈기과

다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 선진 업체들은 다양한 석탄 연소 방식을 연구개발하고 있는데, 탄종의 다양성, 연소로의 대응량화 가능성 등을 감안할 때 분류층 방식이 가장 유망한 것으로 평가되고 있다. 분류층 연소기에 대한 기술 확보를 위해서는 현재 보유하고 있는 기술을 바탕으로 개선 방법을 모색하는 일과 병행하여, 연소기 내부에서의 유동 및 연소와 관련된 주요 변수들의 영향을 파악하고 관련현상에 대한 이해 및 모델링의 연구가 필요하다.

석탄 연소기내에서의 혼합특성과 잔류시간 등에 따른 성능과 유동현상은 많은 연구자들의 주요 관심사였다. 실험적인 연구와는 달리 수치적인 연구는 컴퓨터 성능 및 수치해석 방법의 발달과 함께 1980년대 초에 이르러 본격화되었다. 미분탄 연소는 기체와 고체상의 유동 및 반응을 함께 고려해야 하는 매우 복잡한 문제인데, 구체적인 난류혼합을 고려한 초기의 수치적 모델링은 Gibson과 Morgan¹⁾에 의해 시도되었다. Smoot와 Pratt²⁾는 석탄가스화 과정에 대한 실험결과를 바탕으로 수치 해석 코드 PCCG-2 (Pulverized Coal Combustion and Gasification-2 dimensional)를 개발하고, 이를 이용한 여러가지 연구결과를 발표하였다³⁾. PCCG-2는 PSIC (Particle-Source In Cell) 방식으로 기상과 입자유동을 해석하고, 난류 해석에는 k- ϵ 모델을 이용하였다. Smith 등⁴⁾은 PCCG-2를 이용하여 복사열전달, 초기 난류강도, 탈취발모델, 그리고 촉반응모델 등이 연소과정에 미치는 영향을 조사하는 연구를 수행하였다. Lockwood 등⁵⁾은 실험결과를 바탕으로 미분탄 연소과정에 대한 수치해석을 수행하였다. 그들은 1차/2차 유동의 속도비, 분사각, 입자의 조성비에 따른 연소특성을 해석하였으며, 여러가지 난류모델의 적용성에 대한 연구를 수행하였다. Peters와 Weber⁶⁾는 대응량 연소로에서의 미분탄 연소현상에 대한 수치해석 코드를 개발하고 수치적 연구결과를 발표하였다. Govind와 Shah⁷⁾은 분류층 가스화기에서 미분탄 연소에 대한 수치해석을 수행하였다. 그들은 기상과 입자에 대한 지배방정식을 유도하였다. Gosner와 Zinser⁸⁾은 3차원의 실용보일러에서 실험결과와의 비교를 위한 수치해석 코드

를 개발하였다. 그들은 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 박승호⁹⁾가 석탄 분류층 연소시스템의 최적설계 및 운전을 위한 기본적인 모델을 구축하기 위하여 유동층에서의 연료 투입 및 연소해석 프로그램을 개발하여 유동층내 농도분포에 대해 3차원 수치적 연구를 수행하였다. 김도현¹⁰⁾은 미분탄을 연소하는 연소로의 수학적 모델을 수립하고 운전조건 변화에 따른 수치모사를 수행하여 난류선외유동, 가스연소, 미분탄 입자의 거동 등이 연소로의 효율에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행하였다. 조한철¹¹⁾은 석탄 반응로에서 혼합과 체재시간 특성에 따른 연소 성능을 파악하기 위하여 실험적 연구와 수치적 연구를 병행하였다. 수치적 연구에서는 탈취발 모델과 휘발분에 대한 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 연구과제의 궁극적인 목적은 분류층 석탄연소 시스템의 연소기내에서 공기와 석탄입자의 상호작용 특성을 규명하여 석탄연소기의 최적 설계 조건 도출에 필요한 자료를 제공하는 것이다. 분류층 연소기에 대한 실험적 연구는 공간적, 시간적 제약으로 극히 제한적인 수밖에 없는 실정이다. 따라서 시뮬레이션을 통해 연소기의 최적설계에 필요한 기본 데이터를 축적하고, 주요 변수의 영향을 파악하는 것은 시간적, 경제적인 측면에서 대단히 중요하다. 위와 같은 목적의 연구과제의 일부인 논문에서는 단순화시킨 분류층 연소기 모형에서 1차/2차 분류의 속도비와 2차 분류의 위치 변화에 따른 연소기내의 유동특성을 수치계산 하였다. 한편 1차 분류에 미분탄 입자를 분사시켜 연소기내에서 공기와 입자의 상호작용 특성을 규명하고 실험결과와 비교하는 정량적인 연구는 앞으로 계속되는 연구에서 수행될 것이다.

2. 이론적 해석

본 연구에서는 뉴톤 유체의 정상 유동에 대해 일반 좌표계상에서 Cartesian 속도성분을 사용하여 시간 평균된 압축성 난류 유동의 지배 방정식을 이용하였다¹³⁾. 또한 난류항의 처리를 위해 RNG k-ε 모델¹⁴⁾을 사용하였는데, 세부적인 내용은 양희천 등¹⁵⁾의 연구결과에 설명되어 있다.

액상이나 고상의 입자를 포함한 기상 유동장에 대한 수치해석 방법에는 가스유동은 Eulerian 방법으로 해석하고 입자유동은 Lagrangian 방식으로 추적하면서 해석하는 PSIC(Particle-Source In Cell) 방법이 있다¹⁶⁾. 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 체계에 대해 체계적으로 이산화시키는 유한 체적법을 사용하여 대수 방정식을 얻는다. 대류항에 대해서는 선형 상류 차분법을 사용하였고 확산항에 대해 중심 차분법을 사용하여 차분화시켜 지배 방정식을 이산화하였다. 이산화된 방정식은 SIP(Strongly Implicit Procedure)¹⁷⁾ 방법으로 풀어 각각의 변수 값들을 구했다. 압력과 속도의 연결에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 계산 대상인 연소가 모형내에는 1, 2차 분류의 상호작용으로 상류부에 재순환 유동 동태가 복잡한 유동장이 형성된다. 따라서 전단층의 박리 및 재순환 유동 등을 정확하게 예측할 수 있는 수치해석방법과 난류모델의 적응성 등에 대한 검증이 필요하다. 그러나 본 연구의 계산 대상인 연소가 모형의 유동장에 대한 실험결과가 없다. 따라서 기하학적인 모양이 간단하면서도 박리 및 재부착 등 매우 복잡한 유동 양상을 포함하고 있어서 박리유동에 대한 기본유동으로서 국내외적으로

많은 연구가 수행되고 있으며, 또한 새로운 난류모델의 검증에 많이 이용되고 있는 후향계단(backward-facing step) 후위의 비압축성 유동에 대해 수치계산하여 실험결과¹⁸⁾와 비교함으로써 본 연구에서 이용한 수치해석 코드의 적응성과 정확성을 검증하였다. 한편 난류모델에 대한 검증은 양희천 등¹⁵⁾의 연구에서 수행된 바 있다. 그들의 연구에서와 같이 수치해석 코드의 예측성능 검증을 위한 후향계단 유동의 계산조건은 Kim 등¹⁸⁾의 실험조건과 동일하다. 여기서 H는 후향계단의 높이를 나타낸다.

Fig. 1은 예측된 속도장과 유선분포를 나타낸다. 재부착 길이는 약 6.7정도로 Kim 등¹⁸⁾의 실험값인 7.1에 비해 약 6% 낮게 예측되었다. 이는 양희천 등¹⁵⁾의 연구결과에서 RNG k-ε모델의 경우 약 6.5정도로 8% 내외의 오차를 나타낸 결과와 거의 유사한 결과임을 알 수 있다. 한편 표준 k-ε모델을 이용하는 경우에는 약 6.0정도로 실험결과와 약 15% 정도의 오차를 나타내었다.

Fig. 2와 3은 각각 계단 하류의 두 위치에서 주 유동방향 평균속도분포와 무차원화된 레이놀즈 응력분포를 Kim 등¹⁸⁾의 실험치와 비교한 것이다. 각각의 경우 모두 재부착된 부근의 재발달영역 초기를 제외하고 전체적인 양상이 정성적으로나 정량적으로 실험결과와 유사한 예측결과를 나타낸다. 따라서 k-ε모델 계열의 난류모델이 갖고 있는 구조적 한계를 고려할 때, 본 연구에 이용된 수치해석 방법 및 난류모델의 예측성능의 타당성은 충분한 것으로 판단된다.

분류층 연소기의 계산 유동장은 Fig. 4와 같이 높이 100mm, 길이 2500mm 사양의 연소가 모형이다. 1차 분류의 분사홀은 10mm의 크기로 연소기의 중심축에 위치하며, 5mm의 크기를 갖는 2차 분류의 분사 홀은 1차 분사 홀로부터 25mm와 40mm 떨어진 하단에 위치한다. 본 계산에서는 유동장만을 해석하였으므로 1, 2차 분류가 모두 공기이지만, 추후에 계속 진행되는 연구에서는 1차 분류는 공기와 미분탄 입자가 함께 공급되고, 직경 5mm의 2차 동축류를 통해 공기를 공급하여 미분탄 입자와 2차 분류의 상호작용을 고려하는 2상 유동해석을 수행하게 될 것이다. 격자계는 Fig. 5

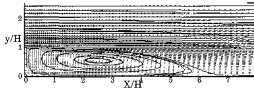


Fig. 1 Velocities and streamlines for the flow over a backwardfacing step

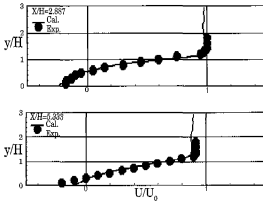


Fig. 2 Mean velocity profiles at selected locations

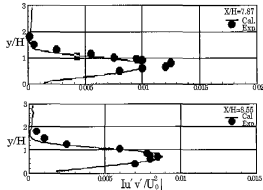


Fig. 3 Reynolds shear stress profiles at selected locations

에 나타낸바와 같이 49×300으로 구성하였는데, 최초로 경계점을 주고 대수적 보간법에 의해 내부 격자점들을 생성하였으며, 격자는 원하는 곳에 자유롭게 배치하여 격자 분포를 최적화시킬 수 있다. 래의 격자계 비의존성 검증용 위한 계산을 수행하여 49×300(14700 cells) 이상의 격자계에서는 유동특성의 변화가 거의 없음을 확인하였다. 계산변수인 1차/2차 분류의 속도비 VR는 2차 분

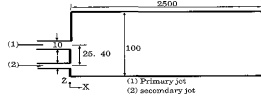


Fig. 4 Schematic calculation domain

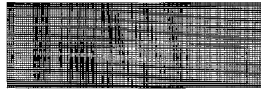


Fig. 5 Calculation grid

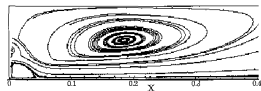
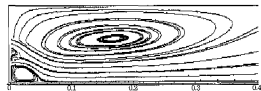
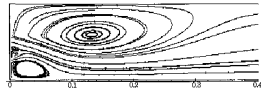


Fig. 5 Calculation grid

류의 속도를 변화시킨 경우에는 1차 분류의 속도를 15m/s로하여 1.0, 0.5 및 0.25로 설정하였으며, 1차 분류의 속도를 변화시킨 경우에는 2차 분류의 속도를 30m/s로하여 0.5, 1.0 및 2.0으로 설정하였다. 한편 1차 분류와 2차 분류의 높이차 HD는 25mm와 40mm이다.

Fig. 6은 1차 분류의 속도가 15m/s이고, 1차 분류의 중심으로부터 25mm 하단의 2차 분류의 속

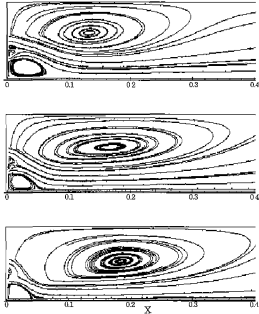


Fig. 6 Stream lines for VR=1.0, 0.5 and 0.25, HD=25mm

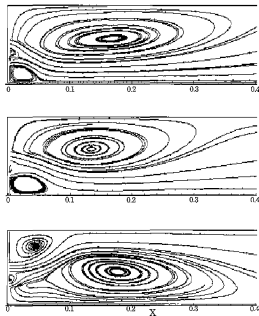


Fig. 7 Stream lines for VR=0.5, 1.0 and 2.0, HD=25mm

도를 증가시켜 VR=1.0, 0.5 및 0.25인 경우의 유선 분포를 나타낸다. 1차 분류만 있는 경우에는 분류

의 중심속 상하부에 2개의 재순환 유동이 대칭적으로 발달하지만, 본 결과에서는 1차 분류의 상부에 입구영역으로부터 약 $X=0.5m$ 하류영역까지 크게 영향을 미치는 재순환 유동이 발달하고, 2차 분류의 하단에는 보다 크기가 작은 재순환 유동이, 1, 2차 분류 사이의 입구영역에 크기가 매우 작은 말발굽 모양의 재순환 유동이 발달하는 것을 볼 수 있다. 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 점차 커지고 보다 하류까지 영향을 미친다. 이러한 유동분포는 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류가 2차 분류 내로 유입(entrainment)되는 강도가 커지기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 1차 분류에 미분탄 입자를 분사하면 미분탄 입자의 확산율이 증가할 것으로 판단된다. 한편 2차 분류 하단의 재순환 유동은 위와 반대의 영향에 의해 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 크기가 작아진다.

Fig. 7은 1차와 2차 분류의 높이차 HD가 25mm이고 2차 분류의 속도가 30m/s일 때, 1차 분류의 속도를 증가시켜 VR = 0.5, 1.0 및 2.0인 경우의 유선분포를 나타낸다. Fig. 6의 경우와 마찬가지로 1차 분류의 상부, 2차 분류의 하단과 1, 2차 분류 사이에 각각 재순환 유동이 발달한다. 그러나 Fig. 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.

Fig. 8은 1차 분류의 중심속을 통과하는 연소실 중심속에서의 축방향 속도분포를 나타낸다. 2차 분류의 속도가 증가하면 Fig. 6의 결과에서 설명한바와 같이 1차 분류가 2차 분류내로 유입되는 강도가 커지기 때문에 축방향 속도가 최소가 되는 위치가 분류 출구쪽으로 이동하며, 재순환 유동이 소멸된 후에는 유동이 완전 발달하여 거의 일정한 속도가 나타나는 것을 알 수 있다. VR이 1.0, 0.5 및 0.25이고 HD가 25mm인 경우 약 $X=0.25m$, HD가 40mm이면 약 $X=0.3m$ 를 기준으로 2차 분류의 속도증가에 따라 축방향 속도의 크기가 역전되는 것을 알 수 있다. 이는 2차 분류의 속도 증가에 따라 재순환 영역 이후의 완전발달유동의 축방향 속도가 커지기 때문이다. 높이차가 커지면 축방

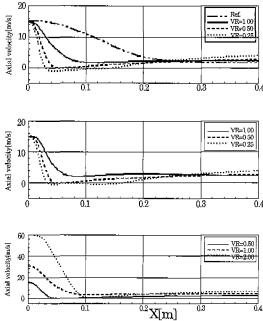


Fig. 8 Centerline axial velocity for HD=25, 40 and 25mm

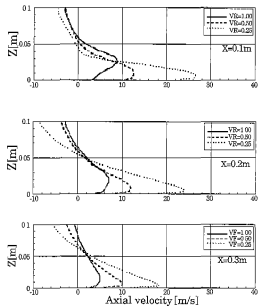


Fig. 9 Axial mean velocity at selected locations for HD=25mm

향 속도가 역전되는 위치가 더 하류로 밀리는 것은 2차 분류가 연소기 하단 벽쪽에 더 가깝게 분사되므로 2차 분류 하부의 재순환 영역은 작아지고 1

차 분류 상부의 재순환 영역은 상대적으로 더 커지기 때문이다.

Fig. 9는 1차 분류의 속도가 15m/s이고, HD가 25mm인 2차 분류의 속도를 증가시켜 VR=1.0, 0.5 및 0.25인 경우의 연소실내 위치변화에 따른 축방향 속도분포를 나타낸다. 2차 분류의 속도가 증가할수록 축방향의 최대속도가 커지고 최대속도가 나타나는 위치가 점차 연소실 하단 벽쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 하류로 갈수록 최대속도가 나타나는 위치가 연소실 하단 벽쪽으로 더 이동한다. 이는 Fig. 6에서 설명한 바와 같이 2차 분류의 속도가 증가할수록 코안단 현상과 같은 출입 효과가 나타나 1차 분류의 분사각이 중심축 하부로 기울어져 1차 분류 상부의 재순환 영역의 영향이 커지기 때문이다. 이러한 결과는 입자의 크기가 0~50 μ m인 미세 분말입자를 공기와 혼합 분사 실험한 Wei¹⁹⁾의 결과와도 일치하는 경향임을 알 수 있다.

Fig. 10은 1차 분류의 속도가 15m/s이고, HD가 40mm인 2차 분류의 속도를 증가시켜 VR=1.0, 0.5 및 0.25인 경우의 연소실내 위치변화에 따른 축방향 속도분포를 나타낸다. Fig. 10은 Fig. 9와 비교하여 2차 분류의 높이가 더욱 커진 경우로, 1차 분류 상부의 재순환 유동이 Fig. 9와 거의 유사한 특성을 나타내고 있다. 반면에 2차 분류 하단의 재순환 영역의 크기는 점차 작아져서 VR=0.25인 경우에는 거의 소멸된다. Fig. 10의 경우는 Fig. 9와 비교하여 2차 분류의 위치가 보다 하단 벽쪽에 가깝기 때문에 축방향 최대속도가 더욱 커지고, 최대속도가 나타나는 위치는 하단 벽쪽으로 더 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서 비분탄이 1차 분류를 통해 분사되면 Fig. 9의 경우보다 미분탄의 확산율이 증가될 것으로 생각된다. Fig. 11은 1차와 2차 분류의 높이차 HD가 25mm이고 2차 분류의 속도가 30m/s일 때 1차 분류의 속도를 변화시켜 VR=0.5, 1.0 및 2.0인 경우의 연소기내 위치변화에 따른 축방향 속도분포를 나타낸다. Fig. 7에서 설명한 바와 같이 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 1차분류의 속도가 증가함에 따라 점차 작아지고 상대적으로 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기는 점차 커진다. 특히 1차 분류의 속도가 2

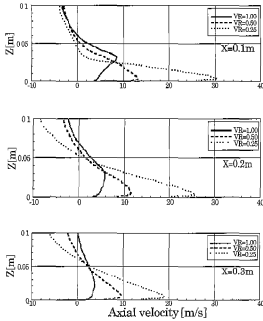


Fig. 10 Axial mean velocity at selected locations for HD=40mm

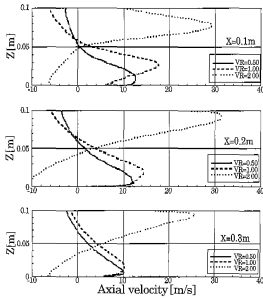


Fig. 11 Axial mean velocity at selected locations for HD=25mm

차 분류의 속도보다 큰 VR=2.0인 경우에는 2차 분류 하단의 재순환 유동이 입구영역으로부터 하류 영역까지 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 1차 분

류에 미분단 입자를 분사할 경우, 미분단 입자의 확산율은 2차 분류의 속도가 1차 분류보다 큰 경우보다 감소할 것으로 사료된다. 또한 1차 분류 상부의 재순환 유동은 입구 부근에 비교적 큰 정체 영역을 형성함으로써 확산을 저하에 중요한 영향 요소임을 알 수 있다. Fig. 11의 결과로부터 1차 분류의 속도를 변화시키는 경우에는 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기가 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기보다 작아지는 임계 속도비가 존재함을 추론할 수 있다. 이러한 추론을 바탕으로 추가적인 계산을 수행한 결과 VR=1.4가 임계 속도비임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서 후향계단 주위의 비압축성 유동에 대해 수치해석하고 실험결과와 비교하여 수치해석방법 및 난류모델의 타당성과 정확성을 검증하고, 단순화시킨 분류층 연속기 모형에서 1차/2차 분류의 속도비와 2차 분류의 위치 변화에 따른 연소기내의 유동특성을 정성적으로 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 후향계단 유동의 재부착 길이, 계단 하류에서의 주유동방향 평균속도분포 및 레이놀즈 응력 분포는 정성적으로나 정량적으로 실험결과와 유사한 예측결과를 나타내었다.
- (2) 1차 분류의 상부, 2차 분류의 하단에는 서로 반대로 회전하는 재순환 유동이, 1, 2차 분류 사이의 입구영역에는 발달된 모양의 재순환 유동이 발달하였다.
- (3) 2차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 점차 커지고 보다 하류까지 영향을 미친다.
- (4) 1차 분류의 속도가 증가함에 따라 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기는 점차 작아지고 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기는 점차 커진다.
- (5) 1차 분류의 속도를 변화시키는 경우, 1차 분류 상부의 재순환 유동의 크기가 2차 분류 하단의 재순환 유동의 크기보다 작아지는 임계 속도비 VR은 1.4이다.

참고 문헌

- (1) Gibson, M. M. and Morgan, B. B., "Mathematical Model of Combustion of Solid Particles in a Turbulent Stream with Recirculation," *J. Inst. of Fuel*, Vol. 30, pp. 517-553, 1970.
- (2) Smoot, L. D., and Pratt, D. T., *Pulverized Coal Combustion and Gasification*, Plenum Press, New York, 1979.
- (3) Smoot, L. D., "Modeling of Coal-Combustion Processes," *Prog. Energy Combustion Science*, Vol. 10, pp. 229-272, 1984.
- (4) Smith, J. D., Smith, P. J., and Hill, S. C., "Parametric Sensitivity Study of a CFD-Based Coal Combustion Model," *AIChE Journal*, Vol. 39, pp. 1668-1679, 1993.
- (5) Lockwood, F. C., Salooja, A. P., and Syred, S. A., "A Prediction Method for Coal-Fired Furnaces," *Combustion and Flames*, Vol. 38, pp. 1-15, 1980.
- (6) 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*, pp. 503-509, 1994.
- (7) Peters, A. A. F. and Weber, R., "Mathematical Modeling of a 2.4MW Swirling Pulverized Coal Flame," *Combustion Science and Technology*, Vol. 122, pp. 131-182, 1997.
- (8) Govind, R. and Shah, J., "Modeling and Simulation of an Entrained Flow Coal Gasifier," *AIChE Journal*, Vol. 30, pp. 79-91, 1984.
- (9) Gerner, K. and Zinser, W., "Prediction of Three-Dimensional Flows in Utility Boiler Furnaces and Comparison with Experiments," *Combustion Science and Technology*, Vol. 58, pp. 43-57, 1988.
- (10) 박승호, "식탄발전용 유동중보일러의 최적설계 및 운전용 위한 모델링 연구," 전력기술 기초연구 학술 발표 논문집, pp. 277-281, 1997.
- (11) 김도현, "석탄 표준화 보일러 (500MW급)의 운전 최적화를 위한 모델링에 관한 연구," 전력기술 기초연구 학술발표 논문집, pp. 408-411, 1997.
- (12) 조한창, "반응로내 미분탄과 산화제의 혼합과 연소 성능에 관한 연구," 한국과학기술원 박사학위논문, 1998.
- (13) Peric, M., "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts", Ph.D. Thesis, Univ. of London, 1985.
- (14) 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, pp. 1031-1046, 1993.
- (15) 양희천, 유홍선, 임봉한, "RNG k- ϵ 모델의 적용성에 대한 연구," 대한기계학회논문집(B), Vol. 21, No. 9, pp. 1149-1164, 1997.
- (16) Crowe, C. T., "The Particle-Source In Cell(PSI-CELL) Model for Gas Droplet Flows," *Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering*, pp. 325-332, 1977.
- (17) Stone, H. L., "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations", *SIAM J, Numerical Analysis*, Vol. 5, No. 3, pp. 530-559, 1968.
- (18) Kim, J., Kline, S. J. and Johnston J. P., "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer : Flow Over a Backward-Facing Step", *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 302-308, 1980.
- (19) Wei, Y. H., "Research on the Concentration Enrichment and Diffusion Process in Gas-Solid Two-Phase Separate Flow," M. S. Thesis, Tsinghua University, 1997.

저 자 소 개



양희천(楊熙千)

1960년 2월생, 1985년 중앙대학교 기계공학과 졸업, 1994년 중앙대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1997년~여수대학교 기계자동차공학부 초교수



박상규(朴相圭)

1960년 5월생, 1981년 조선대학교 정밀기계공학과 졸업, 1983년 인하대학교 대학원(공학석사), 1989년 인하대학교 대학원(공학박사), 1991년~현재 여수대학교 기계공학과 부교수.



정동화(鄭東和)

1968년생 9월 14일생, 1981년 조선대학교 공과대학 기계공학과 졸업, 1992년 한양대학교 기계공학과(공학석사), 1998년 경희대학교 기계공학과(공학박사), 1983~1992.8 현대자동차, 1992.9~현재 순천저일대학 차량기계학부 부교수