

선회분류층형 석탄가스화기내의 비반응 난류 선회유동장 해석

이진욱 · 나혜령 · 윤용승
고등기술연구원 전력에너지연구실

Numerical Analysis of Turbulent Swirling Cold-Flow in a Cyclonic Coal Gasifier

Jin Wook Lee, Hye Ryung Na and Yongseung Yun
Electric Power Systems Laboratory, Institute for Advanced Engineering

요 약

선회분류층형 석탄가스화기내의 비반응 난류선회 유동장을 수치해석 기법을 이용하여 해석하였다. 우선 2차원해석과 3차원 해석과의 비교를 통하여 2차원화 가정의 주요변수인 등가틈새(equivalent slit)의 개념이 적절하며, 동시에 2차원 해석결과의 타당성을 입증하였다. 선회분류층형 가스화기내에서 가장 중요한 무차원수인 선회수의 변화에 따른 유동장의 특성변화를 주로 고찰하였다. 또한 유동장의 이론적인 선회수 및 등가틈새너비를 입력으로 이용한 전산해석을 수행하여, 미분탄반응이 존재할 경우의 유동장의 특성을 예측하여 보았다. 버너출구단면적의 크기 및 위치를 적절히 조절함으로써, 가스화기 내부에 미분탄반응에 적절한 유동장을 형성시킬 수 있음을 발견하였다.

Abstract— Turbulent swirling cold-flow in a cyclonic gasifier has been analyzed by numerical analysis. Comparison of two dimensional and three dimensional analyses has shown that concept of equivalent slit is appropriate for the two dimensionalization of three dimensional phenomena. Flow characteristics have been scrutinized by varying swirl number which is a crucial parameter in determining the flow pattern of the cyclonic gasifier. Reactive flow field has been estimated by using theoretical swirl number and equivalent slit width for reactive flow. Results show that proper flow field for the reactive coal gasification can be formed by controlling the exit area and azimuthal location of coal burners.

1. 서 론

최근 들어 석탄가스화 복합발전 시스템에 대한 중요성의 인식으로 인하여 국내외적으로 연구개발, 특히 고효율의 가스화기 개발에 많은 노력이 기울여지고 있다. 상업화 규모 가스화기의 독자적인 설계를 위해서는 가스화기 내부에서의 복잡한 물리/화학적 현상을 충분히 이해하고 이를 설계에 반영하는 노력이 필수적이라 할 수 있다. 석탄가스화기는 공정의 특성에 따라 다양한 형상을 지닐 수 있겠으나, 전식석탄공급방식을 채택하고 있는 유럽의 Shell, 독일의 PRENFLO, 일본의 Hitachi 및 국내의 고등기술연구원 등에서는 원통형 반응기의 측면에 다수의 버너가 존재하는 가스화기를 채택하고

있다. 선회분류층형 반응기는 석탄가스화기 뿐만 아니라 연소기 및 폐기물소각장치 등 산업계에 널리 이용되고 있는 장치로 측면에서 산화제 및 연료가 공급되는 특성상 필연적으로 강한 선회수가 수반되며 결과적으로 내부에는 다양하고 복잡한 유동장이 형성될 수 있다. 이러한 산업계의 넓은 응용성 및 반응기 내부에 존재하는 다양한 유동장의 특성에 대한 학문적 관심으로 인하여 많은 연구가 이루어지고 있다¹⁻⁴⁾. 특히 실험실 규모의 가스화 장치 또는 파일롯플랜트 운전에 의하여 가스화기의 크기확장(scale-up)을 가능하게 하는 설계기술을 확보하기 위하여 많은 노력이 국내외적으로 기울여지고 있다. 그러나 석탄가스화기가 대부분 고온 고압에서 운전되는 특성상 설계에 필요한 모든 자료의 측정에는 한

계가 있다. 각종 전산해석 및 비반응장 모형에서의 실험은 실험설비에서 확보하기 힘든 기초자료들을 제공할 수 있다는 장점이 있으므로 이에 대한 기초연구가 필수적이라 할 수 있다.

전산해석 및 비반응 유동장 실험을 통하여 반응유동장에 대한 대략적인 정보를 얻고, 이를 설계에 반영하려고 한다면 주요 무차원수의 상사(similarity)를 만족하여야 하는데, 선회가 존재하는 유동장에서 가장 중요한 무차원수는 레이놀즈수(Reynolds number; Re)와 선회수(swirl number; $S_{N,i}$)이다. 그러나 레이놀즈수가 충분히 큰 난류선회유동장에서 유동장의 특성은 레이놀즈수의 변화에 대해서는 민감하지 않는 반면에 선회수의 변화에 대해서는 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그림 1(a) 및 그림 1(b)는 전형적인 원통형 용기내에서 동일한 레이놀즈수를 갖고 각각 선회가 없는 경우와 선회가 존재하는 경우의 유동장의 특성을 보여주고 있다. 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이, 선회유동에 의하여 발생하는 기체의 원심력에 의하여 입구에서 분사된 기체는 급히 외벽쪽으로 향하게 되고 결과적으로 그림 1(a)에서 관찰되던 구석재순환영역의 크기가 대폭적으로 줄어들었음을 보여주고 있다. 또한 반응기의 중앙에 낮은 압력영역이 형성되어 역류영역이 형성되고 결과적으로 중앙재순환영역(center recirculation zone)이 형성됨을 관찰할 수 있다. 그림 1(c)는 그림 1(b)에 비해 레이놀즈수는 다르지만 선회수가 같은 경우의 유동장을 나타내고 있다. 이 유동장의 모습에서 구석재순환영역 및 중앙재순환영역의 형상, 속도벡터의 모습 등의 전반적인 특성이 그림 1(b)와 매우 유사함을 관찰할 수 있다. 즉, 난류선회유동이 존재하는 반응기내에서는 레이놀즈수의 변화에 대해서는 유동장의 변화가 거의 관찰되지 않는 반면에, 선회수의 변화에 대해서는 유동장의 특성이 매우 달라짐을 알 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 예비해석 결과를 바탕으로 하여, 측벽에 다수의 버너가 존재하는 선회분류층형 석탄가스화기내의 등온유동장에 대한 해석을 실시하였다. 가스화기 내부의 유동장의 특성을 결정하는 선회수에 관련된 주요 변수인 버너의 원주상 위치각 및 버너의 크기(2차원화 모델링시 등가틈새너비로 표현)를 변화시켜가면서, 선회수의 변화에 따른 유동장의 특성을 고찰하였다. 우선 2차원 유동장 해석결과와 3차원 해석결과와의 비교를 통하여 2차원화의 가정에 적절한 개념을 도출하고, 2차원 가정의 타당성을 입증하였다. 이후에는 문제를 단순화시킨 2차원 유동장 해석을 통하여 선회수의 크기에 따라 가스화기 내부의 유동장의 특성을 분류하였다. 또한 반응유동장의 이론적인 선회수 및 등가틈새너비를 입력으로 이용한 전산해석을 수행하여 미분탄반응이 존재할 경우의 유동장의 특성을 예측하여 보았다.

2. 이론적 고찰 및 모사방법

그림 2(a)는 본 연구에 적용된 선회분류층형 가스화기의 개략도를 나타내고 있다. 가스화기는 원통형 형상을 지니며, 가스화기의 측벽에 설치된 4개의 버너를 통하여 산화제가 유입된다. 그림 2(b) 및 그림 2(c)는 본 연구에 적용된 원통형 용기를 수치해석을 위하여 다수의 제어체적(control volume)으로 분할한 모습으로서, 중첩비가 무척 큰 석탄가스화기의 관찰의 편의성을 도모하기 위하여 반경방향으로 각각 3배씩 확대하여 도시한 그림이다. 3차원 해석의 경우는, 4개의 버너에 의하여 90°씩 제반 현상이 반복적으로 진행되므로(cyclic condition) 그림 2(b)와 같이 전체의 1/4만을 해석대상으로 잡는다. 그림 2(c)는 2차원 해석시 적용되는 한 단면을 나타내고 있다. 2차원 해석의 경우 매우 작은 등가틈

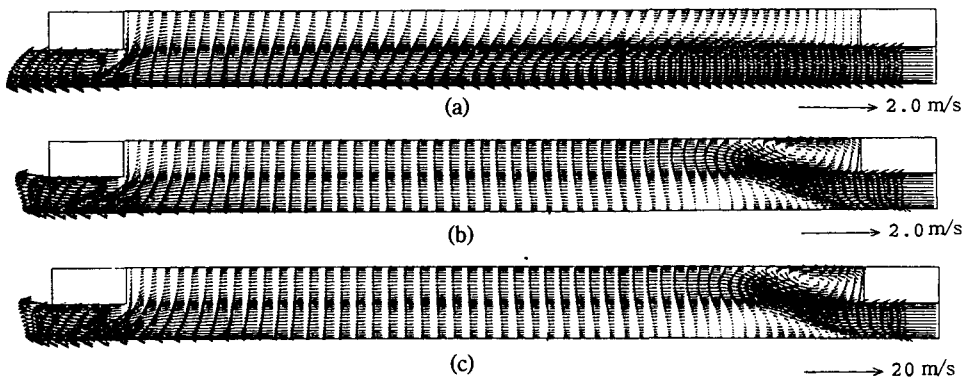


Fig. 1. Vector plots in a conventional top-feeding reactor. Conditions are: (a) $Re=5.e+04$, $S_{N,i}=0.0$, (b) $Re=5.e+04$, $S_{N,i}=0.5$ and (c) $Re=5.e+05$, $S_{N,i}=0.5$.

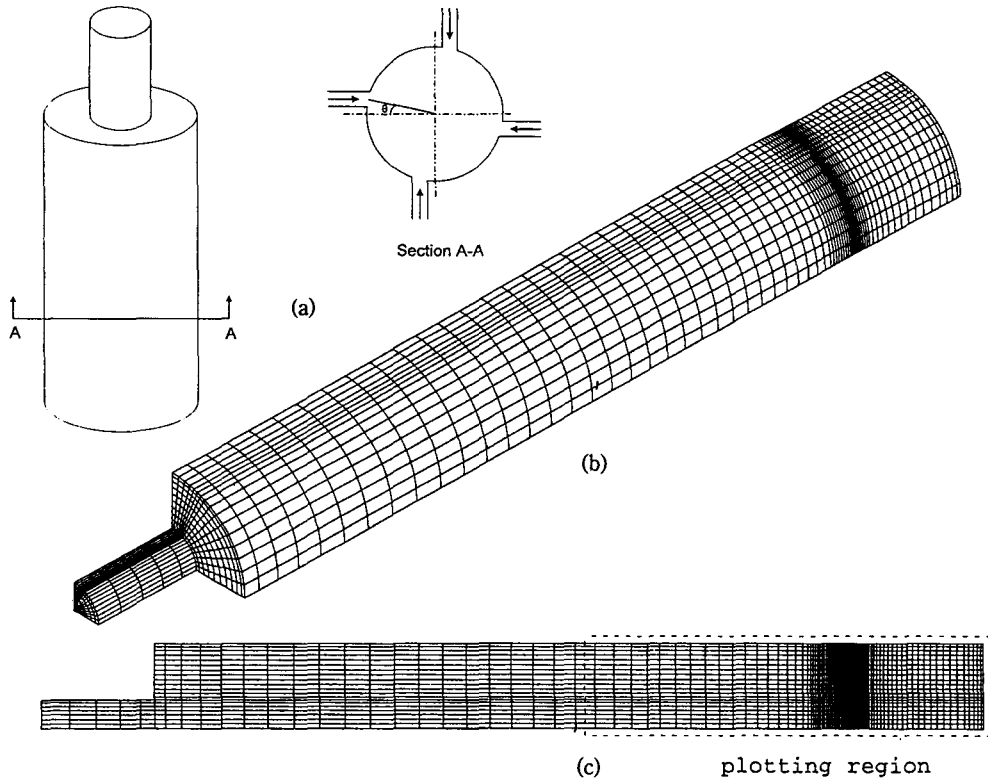


Fig. 2. (a) Schematic diagram of a coal gasifier. Grid net used (b) for three dimensional and (c) for two dimensional analyses.

새(equivalent slit)에서 산화제가 유입되는 유동장의 특성상, 제어체적 크기의 급격한 변화를 막기 위하여 입구 주변에 극도로 밀집시킨 격자계를 생성하여 해석에 이용하였다.

이와 같은 원통형 용기내부의 유동장 및 난류특성을 지배하는 방정식을 3차원 원통형 좌표계에서 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho r u_\theta \phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S_\phi \end{aligned}$$

위 식에서 ϕ 는 해석하고자 하는 종속변수로서 각 방향의 속도성분(u_r, u_r, u_θ), 난류운동에너지(k) 및 난류운동에너지의 소멸율(ϵ)을 나타낸다. ρ 는 기체의 밀도, Γ_ϕ 는 각 종속변수에 대한 등가확산계수를 나타내며, (z, r, θ)는 축방향, 반경방향 및 자오선방향을 각각 나타낸다. 2차원 해석시는 축대칭인 경우로서 자오선 방향의 모든 미분치가 사라지는, 즉 $\partial/\partial\theta=0$ 인 경우이다.

난류유동의 예측을 위하여 일반적으로 수렴성이 좋고

해석결과와 정확성이 비교적 뛰어난 표준 k- ϵ 모델이 많이 이용되고 있다⁵⁾. 그러나 표준 k- ϵ 모델은 등방성 가정을 기초로 하였기 때문에 유선의 곡률이 심한 경우, 특히 선회가 존재하는 경우에는 유동의 근본적인 비등방성 특성으로 인하여 해석결과와 신뢰도가 부족한 것으로 알려져 있다. 이러한 해의 정확성에 대한 문제점의 해결을 고려한 모델로서 레이놀즈응력 전달모델(Reynolds Stress Transport Model)을 들 수 있다. 그러나 이 모델도 계산시간이 상당히 증가하며 또한 해의 수렴성에 많은(특히 강선회유동의 경우에는 심각한) 문제점을 지니고 있다. 이러한 점들을 고려한 대안으로서 표준 k- ϵ 모델을 보완하여 재순환 및 선회유동에 적용하기 위한 많은 모델들이 제시되고 있다^{6,7)}. 특히 선회 유동의 경우에는 리차드슨수(Richardson number) 보정법이 여러가지 제시되었다. 본 연구에서는 상업용 열유체해석 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 해석을 수행하였으며, PHOENICS에서 제공되는 표준 k- ϵ 모델에 난류운동에너지소멸율 방정식 중 소멸항의 리차드슨수 보정법을 부프로그램으로 첨가하고 선회속도 방정식에서의 난류프란틀수를 축 및 반경 방향의 값과 달리하여 비등방

성을 부여하는 방법을 적용하였다.^{1,8,9)} 즉,

$$C_{e2}^* = C_{e2}(1 - C_3 R_1), \quad R_1 = \frac{k^2}{\epsilon^2} \frac{V_\theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta)$$

$$\mu_{axial, radial} = \mu_{eff}, \quad \mu_{swirl} = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{swirl}}$$

여기서 C_3 및 σ_{swirl} 은 각 유동장에 대하여 최적화되어야 하는 경험상수로서, 본 연구에서는 0.01과 2.5를 이용하였으며, 선회 유동장에서의 수렴성 문제를 해결하기 위해 약선회 유동의 해석 결과를 초기 조건으로 하여 선회 강도를 증가시키는 방법을 택하였다. 계산의 수렴 조건은 모든 변수의 상대 변화가 10^{-4} 미만인 경우로 설정하였다.

선회가 수반되고 레이놀즈수가 충분히 큰 유동장에서의 유동특성은 위에서 언급한 바와 같이 선회수의 크기에 의하여 주로 좌우되며, 난류요동항 및 압력항을 무시하면 선회수는 다음과 같이 정의된다. 즉, 선회수는 축방향 선형운동량(pu_z)의 축방향 유입(flux)에 대한 각운동량(pru_θ)의 축방향 유입비를 나타내는 변수이다.

$$S_N = \frac{\int_0^R (pu_z u_\theta r^2) dr}{R \int_0^R (\rho u_\theta^2 r) dr}$$

본 연구에서와 같이 축벽에서 기체가 유입하는 경우에, 축방향으로 균일속도 및 유입된 기체의 각운동량 보존 가정을 적용하면 선회수는 다음과 같이 정의된다. 즉,

$$(S_N)_{cold-flow} \cong \frac{\pi R^2}{\sum A_i} \sin \theta$$

여기서 $\sum A_i$, θ 및 R 은 버너출구 단면적의 합, 버너위치 각도 및 가스화기의 반경을 각각 나타낸다. 한가지 흥미로운 사실은 선회수가 순전히 기하학적 형상의 함수라는 점으로서, 사이클론 분리기(cyclone separator)에서의 선회수의 정의¹⁰⁾와 유사한 개념의 수식이다. 가스연료가 연소되는 경우에는 온도의 증가에 의하여 기체가 팽창되는 점이 고려되어야 하며, 이때 실질적인 가스연소시 선회수는 다음과 같다¹¹⁾.

$$(S_N)_{gas-comb} \cong (S_N)_{cold-flow} \frac{T_{inlet}}{T_{outlet}}$$

석탄가스화의 경우에는 미분탄의 반응에 의하여 기체의 질량이 증가하며, 복잡한 화학반응의 결과로 인하여 분자량이 유입기체(산화제)에 비하여 상당히 달라지는 영향을 고려해 주어야 하는데 이러한 개념을 포함하면 선회수는 다음과 같이 정의된다.

$$(S_N)_{coal-gasif-ideal} \cong (S_N)_{cold-flow} \frac{T_{inlet}}{T_{outlet}} \frac{\dot{m}_{ox}}{\dot{m}_{ox} + \dot{m}_{cg}} \frac{M_{pg}}{M_{ox}}$$

여기서 \dot{m}_{ox} 와 \dot{m}_{cg} 는 산화제의 유량 및 석탄에서 발생하는 기체의 유량을, M_{pg} 와 M_{ox} 는 생성가스 및 산화제의 분자량을 각각 나타낸다. 따라서 비반응유동장, 온도증가만을 고려한 상태의 유동장 및 온도증가/질량증가/분자량변화를 모두 고려한 유동장의 선회수는 서로 상당한 차이가 있으며, 결과로서 유동장에 상당한 차이가 있을 것으로 예측할 수 있다.

선회분류층형 반응기의 축벽에는 하나 또는 다수의 입구(버너)가 존재한다. 이러한 3차원적인 실제현상을 2차원화에 의하여 해석하기 위해서는 필연적으로 축벽에 원주방향으로 가는 틈새(slit)가 존재하는 것으로 가정할 수 밖에 없다. 이 경우에 선회수, 질량유속 및 입구에서의 속도성분의 비에 대한 상사(similarity)를 만족시켜주기 위하여 입구(틈새)의 크기 및 유입속도를 다음과 같은 간단한 질량보존 관계식을 이용하여 결정하였다.

$$n\pi r^2 V_{feeding} = 2\pi R L_{slit} V_{r,in} \\ V_{r,in} = V_{feeding} \cos \theta, \quad V_{\theta,in} = V_{feeding} \sin \theta,$$

여기서 n , r 및 $V_{feeding}$ 은 기체유입구(버너)의 수, 반경 및 유입속도이며, R 은 가스화기의 반경, L_{slit} 은 2차원화 가정시 이용되는 등가 틈새너비, θ 는 분사각도를 각각 나타낸다. 이러한 가정을 도입하였을 때의 선회수는 다음과 같이 유도된다.

$$S_N = \frac{R}{2L_{slit}} \tan \theta = \frac{R}{2L_{slit}} \left(\frac{V_\theta}{V_r} \right)_{in}$$

따라서 등가 틈새너비 및 분사각도를 적절히 조절함으로써, 비반응장 유동장과 온도팽창만을 고려한 유동장 및 가스화반응을 고려한 유동장 등에 대한 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 주로 R/L_{slit} 및 V_θ/V_r 등을 변화시켜 가면서 선회수 S_N 의 변화에 따른 유동장의 변화를 고찰하였다. 최종적으로는 주어진 가스화기에 대하여 $(S_N)_{cold-flow}$, $(S_N)_{gas-comb}$ 및 $(S_N)_{coal-gasif-ideal}$ 에 대한 해석을 수행하여 각각의 경우에 대한 가스화기내의 유동장의 특성을 유추할 수 있는 자료로 활용되도록 연구를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 축벽에 4개의 버너를 장착한 가스화기내에서의 비반응유동장에 대한 3차원해석 결과로서 버너가 위치한 단면에서의 축방향 및 반경방향 속도성분 백

터를 나타내고 있다. 그림 3(b)는 같은 가스화기를 등가 틸새의 개념에 의하여 2차원화한 해석결과를 보여주고 있다. 두 유동장의 형상은 정확히 일치하지는 않지만 다음의 주요한 점에서 정성적 및 정량적 유사성을 보여주고 있다. 즉, 중앙 재순환영역이 끝나는 축방향 위치 및 반경방향으로의 확장위치가 거의 비슷하며, 선회가 너무 강하여 생길 결과로서 역류영역이 버너위치를 지나 바다까지 치우치고 있다는 점이다. 그러나 버너 주위의 유동장의 형상은 약간의 차이를 보여주고 있다. 이는 버너주위가 버너의 형상을 틸새로 가정한 2차원화 모델링의 영향을 가장 많이 받는 부분이기 때문이다. 이와 같이 입구 근처를 제외한 대부분의 영역에서 3차원 해석 및 2차원화 해석결과 유사성으로부터 등가 틸새의 가정에 의한 2차원화 모델링이 타당성을 지님을 알 수 있다. 이후의 부분에서는 2차원 해석에 의하여 각종 변수를 변경시켜 가면서 가스화기내의 유동장의 특성을 관찰해 본 결과를 보고하고자 한다.

그림 4는 2차원 유동장에 대한 해석결과로서, 이 경우 $R/L_{\text{in}}=15$ 로 고정하고 V_0/V_r 를 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과이다. 격자가 극도로 밀집된 입구 주변에서 관찰의 편의를 도모하기 위하여 가스화기의 하단부

로부터 전체가스화기의 약 1/2 높이까지만 속도벡터를 도시하였다. 그림 4(a)는 선회가 존재하지 않는 경우에 대한 해석결과이다. 유입된 기체의 대부분이 중심축 방향으로 진행한 후 가스화기의 출구가 위치한 상단부로 진행하며, 일부는 하단부로 진행하게 되는 비교적 단순한 유동장을 형성하게 된다. 결과적으로 입구의 상하 영역에 급팽창에 의한 재순환 영역이 형성됨을 보여주고 있다. 그림 4(b)는 선회가 비교적 약한 경우에 대한 해석결과로서 선회의 효과가 미약하게 나타나는 모습을 보여주고 있다. 중심축 방향으로 진행하던 기체는 선회에 의한 원심력으로 인하여 점차적으로 측벽방향으로 치우치는 경향을 나타내고 있다. 결과로서 입구의 상하에 위치한 재순환 영역의 크기가 줄어들고, 하부로 향한 기체중 일부는 중심축을 따라 다시 상부로 진행하게 된다. 그림 4(c)는 선회가 비교적 강한 경우의 해석결과로서 입구 상하의 재순환영역은 더욱 줄어들게 되고, 중심축 부근에는 적절한 크기로 발달된 재순환 영역이 형성된다. 이러한 중심축 부근의 재순환영역은 반응유동장의 경우에는 화염안정화에 도움이 되는 영역이므로, 그림 4(a) 및 4(b)의 경우에 비하여 연료의 반응에 바람직한 유동장이 형성됨을 관찰할 수 있다. 그림 4(d)는 선

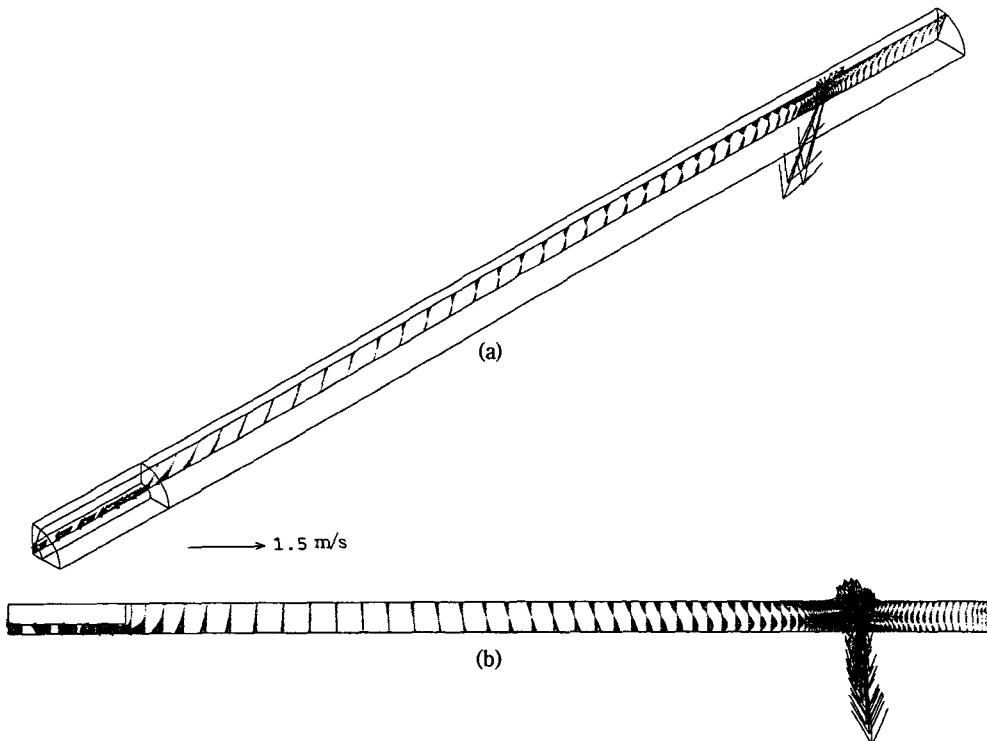


Fig. 3. Vector plots (a) of three dimensional and (b) of two dimensional analyses in a cyclonic gasifier. Conditions are: $S_N=31.5$, $Re=1.0e+04$ and $R/L_{\text{in}}=150$.

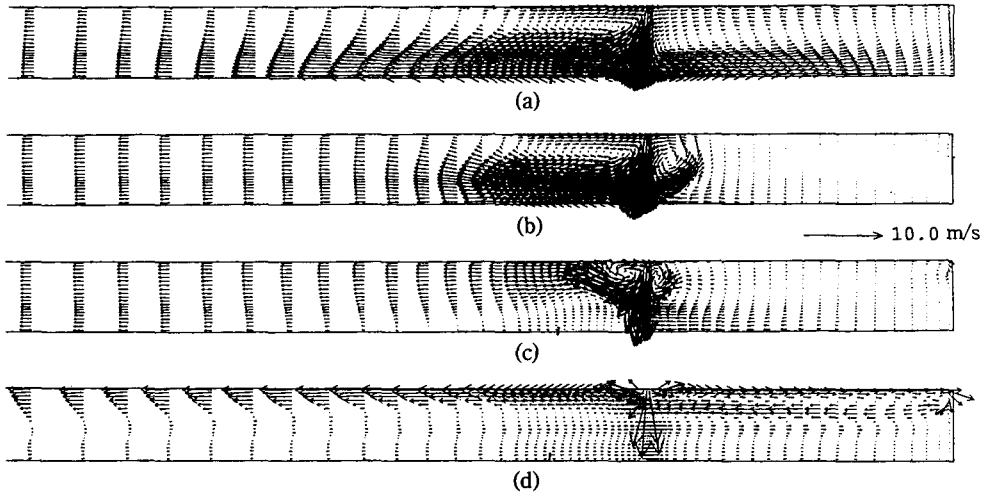


Fig. 4. Vector plots in cyclonic gasifiers. Conditions are $R/L_{in}=15$, $Re=3.3e+05$ and (a) $S_N=0.0$, (b) $S_N=0.75$, (c) $S_N=3.75$, and (d) $S_N=30.0$.

회가 아주 강한 경우의 유동장을 나타내고 있다. 선회의 효과가 너무 강하여, 대부분의 유동이 중심축 쪽으로 진행하지 못하고 측벽 근처에서 상향 또는 하향 유동을 일으키는 결과를 가져오고, 중심축 부근에서는 상부에서부터 입구영역 이하까지 침투하는 유동장이 형성됨을 보여주고 있다. 석탄가스화기의 경우에는, 이러한 유동장하에서는 미분탄의 반응이 벽면근처에 집중되고 미분탄입자가 반응을 완료하지 못한 상태에서 벽면을 따라 흐르는 슬래크에 합쳐져버리는 현상이 발생할 수 있으므로 바람직하지 않을 것으로 판단된다. 가스화기의 이상적인 운전을 위해서는 버너의 크기 및 위치를 적절히 설정하여 그림 4(c)와 같이 중앙에 재순환영역이 존재하는 유동장을 형성시켜주는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 5는 비교적 작은 버너를 장착한 가스화기를 모델링하기 위하여 $R/L_{in}=150.0$ 으로 고정하고 V_r/V_r 을 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과이다. 그림 5(a)는 선회가 없는 경우로서 그림 4(a)의 경우와 거의 유사한 경향을 보여주고 있다. 그림 5(b)는 선회수가 그림 4(b)와 동일한 경우의 해석결과이다. 이 경우 그림 4(b)와 선회수는 동일하지만 유동장은 오히려 선회가 없는 경우와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 입구에서 반경방향의 속도에 비하여 선회속도가 너무 작아서($V_r/V_r=0.01$) 기체가 중심축까지 충분히 진행하면서 선회의 영향이 확산(diffusion) 및 소멸(dissipation)에 의하여 사라져버린 결과로 판단된다. 그림 5(c) 및 그림 5(d)는 선회수가 각각 그림 4(c) 및 그림 4(d)의 경우와 동일한 경우의 결과이다. 그림 5(c)의 경우는 그림 4(c)의 경우와 중앙재순환영역의 형성 등 어느정도의 유사성을 지님을

관찰할 수 있다. 그림 5(d)의 경우는 그림 4(d)의 경우와 유동장의 형상이 많이 다르나, 중앙의 역류가 가스화기 하단부까지 도달한다는 점은 동일하다. 즉, 그림 4와 그림 5의 경우는 선회수는 동일하지만 기하학적인 형상에 있어서 버너의 반경 및 원주상 설치위치는 다른(즉, 기하학적인 상사(similarity)가 이루어지지 않은) 경우로서, 기하학적 형상의 변화로 인하여 동일 선회수에서도 유동의 특성은 어느 정도의 차이를 보이고 있다. 그러나 선회수의 증가에 따라 유동장 특성의 변화, 특히 재순환영역 특성의 변화가 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 동일 가스화기에서 비반응 유동장 및 반응유동장의 형상을 비교해 보기 위한 해석을 수행하였다. 그림 6(a)는 선회수가 31.5인 가스화기내의 비반응 유동장을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 가스화기내에서 반응이 일어나지 않는 경우에는 선회가 너무 강한 유동장이 형성됨을 볼 수 있다. 이와 같이 선회가 너무 강한 유동장하에서는 미분탄이 대부분 벽면으로 치우치는 경향을 보일 것으로 추측된다. 그러나 반응이 발생하면 온도의 상승에 따른 기체의 팽창으로 인하여 선회강도가 약화하게 된다. 그림 6(b)는 온도상승에 의한 기체의 팽창에 따른 물성치의 변화 및 버너의 등가 틱새 너비를 고려하여 계산한 결과이다. 즉, 그림 6(b)는 가스화기내의 기체가 측벽방향으로 팽창함으로써 선회강도가 떨어지는 효과를 고려한 계산결과이다. 그림 6(a)에 비하여 선회강도가 훨씬 약화됨에 따라 역류영역은 버너위치 이하까지는 침투하지 못하는 점이 명확하게 관찰되며 중앙재순환영역의 측벽방향 및 반경방향으로의 확장도 많이 줄어들었음을 알 수 있다. 그림 6(c)는 미분

탄반응의 결과로 기체상 질량이 증가하고 분자량이 감소하는 효과를 고려하여 수행한 계산의 결과이다. 질량 증가 및 분자량의 감소로 축방향의 운동량이 증가하므로 선회의 효과는 더욱 감소할 것이다. 이런 점을 고려

하여 계산한 결과에서 전반적으로 선회의 영향이 많이 줄어든 경향을 관찰할 수 있으나, 이 경우에도 강선회유동의 특성인 중앙재순환영역이 형성되고 있음을 볼 수 있다. 미분탄반응이 존재하는 경우, 버너 주변에서 탈휘

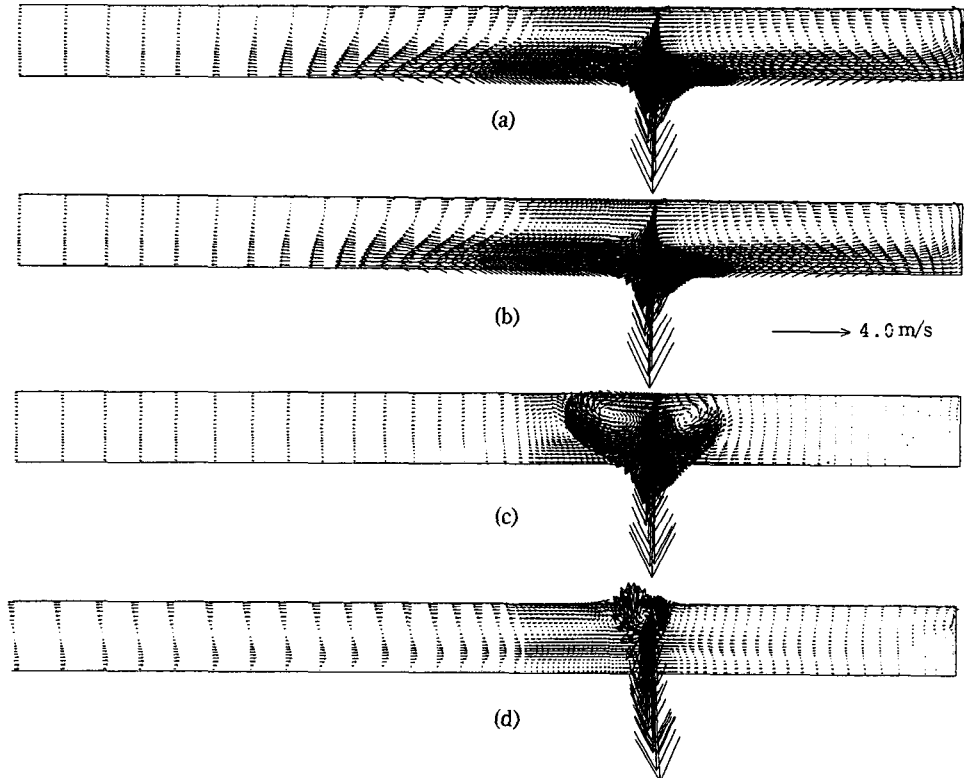


Fig. 5. Vector plots in cyclonic gasifiers. Conditions are $R/L_{slit}=150$, $Re=3.3e+04$ and (a) $S_N=0.0$, (b) $S_N=0.75$, (c) $S_N=3.75$ and (d) $S_N=30.0$.

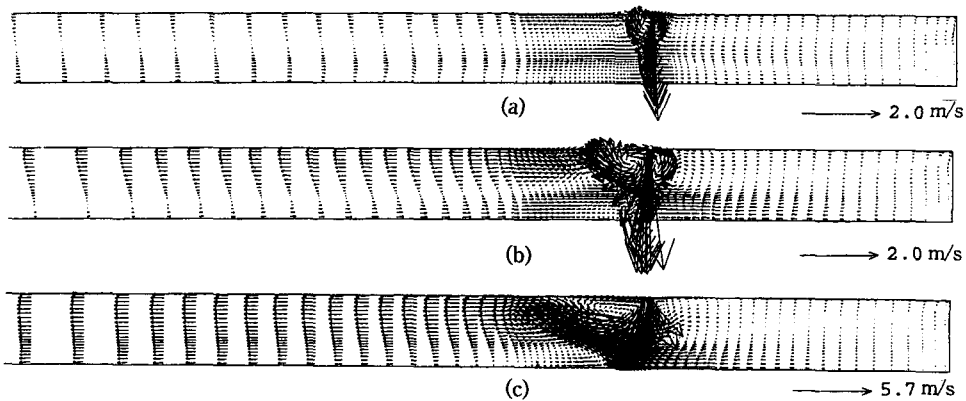


Fig. 6. Vector plots in cyclonic gasifiers. Conditions are $R/L_{slit}=150$ and (a) $S_N=31.5$, $Re=1.0e+04$, (b) $S_N=7.88$, $Re=1.0e+04$ and (c) $S_N=2.76$, $Re=2.1e+04$.

발분화 및 연소반응을 완료된 후, 미분탄가스화반응은 가스화기의 후단부에 이르기 까지 서서히 진행된다는 점을 고려할 때, 가스화 반응시의 유동장은 그림 6(b) 보다는 선회가 약하고 그림 6(c) 보다는 선회가 강한 유동장이 형성될 것으로 판단된다.

일반적으로 벽면이 저온으로 유지되는 반응기(연소기 또는 가스화기)의 경우에는 중앙재순환영역을 크게 유지하여 화염의 안정화를 유지하여야 한다. 내화재의 온도를 고온으로 유지하는 가스화기의 경우에는 내화재 자체가 화염안정화 역할을 하므로 중앙재순환영역을 크게 유지할 필요는 없다고 보지만, 중앙재순환영역은 화염안정화에 보다 좋은 효과를 가져올 것이다. 그러나 중앙재순환영역을 형성시키기 위하여 선회를 너무 강하게 하면 대부분의 미분탄이 벽면에 치우치게 된다. 이로 인하여 탄소전환율의 감소(홀러내리는 슬랙속으로 미반응 탄소(char)가 묻혀버릴 가능성) 및 내화재의 손상을 일으킬 수 있음에 유의하여야 한다. 따라서 이와 같은 해석결과를 종합하여 볼 때, 입구(버너)의 크기 및 위치를 적절히 조절함으로써 반응유동장에 적절한 유동장을 형성시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

선회를 수반하는 석탄가스화기내의 비반응유동장을 수치해석 방법에 의하여 예측하였다. 3차원 물리적 현상을 등가틈새(equivalent slit) 가정에 의하여 2차원으로 해석함에 있어서 해석결과가 타당성을 지님을 관찰할 수 있었다. 선회의 강도에 따라 유동장의 특성이 다양하게 분류될 수 있음을 발견하였으며, 또한 버너의 크기 및 위치를 적절히 조절함으로써 석탄가스화기내에 적절한 반응유동장을 형성시킬 수 있음을 관찰할 수 있었다. 온도팽창만을 고려한 상태 및 온도팽창/질량증가/분자량변화를 모두 고려한 상태에 대하여 무차원수와 기하학적 상사를 고려한 등온유동장 계산을 통하여 반응유동장의 특성을 개략적으로 예측하였다.

감사의 글

본 논문은 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터

에서 지원하고 전력연구원에서 주관하는 "석탄가스화 복합발전 기반기술 개발" 과제의 지원을 받아 수행된 것으로서, 이에 센터 및 전력연구원 관계자들에게 감사드립니다. 또한 선회유동의 기본개념과 적절한 모델선정에 관하여 조언을 해주신 한국과학기술원 기계공학과 정명균 교수께도 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

1. A.K. Gupta, D.G. Lilley & N. Syred: "Swirl Flows", Abacus Press (1984).
2. 이진욱, 윤용승: "석탄가스화기내의 기체-고체 이상 유동장에 대한 수치해석 연구", 한국에너지공학회지, 4(3), 331-337 (1995).
3. P.A. Gillis & P.J. Smith: "An Evaluation of Three-Dimensional Computational Combustion and Fluid-Dynamics for Industrial Furnace Geometries", Twenty-third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 981-991 (1990).
4. F. Boysan, R. Weber, J. Swithenbank & C.J. Lawn: "Modeling Coal-Fired Cyclone Combustors", Combustion and Flame, 63, 73-86 (1986).
5. Launder, B.E. & D.B. Spalding: "Numerical Models of Turbulence", Academic Press, New York (1972).
6. Nishizima, S. & Yoshizawa, A.: "Turbulent Channel and Couette Flows Using an Anisotropic k-model", AIAA J., 25, 414-420 (1987).
7. Hanjalic, K. & Launde, B.E.: "Sensitizing the Dissipation Equation to Irrotational Strains", J. Fluid Engineering, 102, 34-40 (1980).
8. F. Boysan & J. Swithenban: Report HIC 360, Dept. of Chemical Engineering and Fuel Technology, Sheffield University, Sep. (1980).
9. D.G. Sloan, P.J. Smith & L.D. Douglas: "Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems", Prog. Energy Combust. Sci., 12, 163-250 (1986).