

분류층 석탄 가스화기 반응 유동장 변수 전산해석 연구

송우영,¹ 김혜숙,¹ 신미수,¹ 장동순,^{*1} 이재구²

¹충남대학교 환경공학과

²한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

PARAMETRIC NUMERICAL STUDY OF THE REACTING FLOW FIELD OF A COAL SLURRY ENTRAINED GASIFIER

W.Y. Song,¹ H.S. Kim,¹ M.S. Shin,¹ D.S. Jang^{*1} and Jae-Goo Lee²

¹Dept. of Environmental Engineering, Chungnam National Univ.

²Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research

Considering the importance of the detailed resolution of the reacting flow field inside a gasifier, the objective of this study lies on to investigate the effect of important variables to influence on the reacting flow and thereby to clarify the physical feature occurring inside the gasifier using a comprehensive gasifier computer program. Thus, in this study the gasification process of a 1.0 ton/day gasifier are numerically modeled using the Fluent code. And parametric investigation has been made in terms of swirl intensity and aspect ratio of the gasifier. Doing this, special attention is given on the detailed change of the reacting flow field inside a gasifier especially with the change of this kind of design and operation parameters. Based on this study, a number of useful conclusions can be drawn in the view of flow pattern inside gasifier together with the consequence of the gasification process caused by the change of the flow pattern. Especially, swirl effect gives rise to a feature of a central delayed recirculation zone, which is different from the typical strong central recirculation appeared near the inlet nozzle. The delayed feature of central recirculation appearance could be explained by the increased axial momentum due to the substantial amount of the presence of the coal slurry occupying over the entire gasifier in gasification process. Further, the changes of flow pattern are explained in detail with the gasifier aspect ratio. In general, the results obtained are physically acceptable in parametric study.

Key Words : 분류층 석탄가스화(Coal slurry entrained gasifier), 전산유체역학 모델(CFD model), 가스화기 전장비(Gasifier aspect ratio), 선회효과(Swirl effect)

1. 서 론

석탄 가스화 공정은 가스화로의 베드 형태에 따라 고정층(fixed bed), 유동층(fluidized bed) 및 분류층(entrained bed)으로 구분된다. 본 연구에서 최종 목표로 고려하고 있는 가압 분류층 가스화기는 가스화 온도와 압력이(1200~1700℃, 20kg/cm² 이상)이 높아 탄소전환율이 높고, 타르와 오일이 생성되지 않으며 석탄의 종류에 따른 적합성이 우수한 방식으로 알려져

있다. 분류층 가스화 공정에는 석탄의 공급방식(건식과 습식)과 가스화로의 운전조건(가압 및 상압), 산화제(공기 및 산소)의 종류에 따라 각각 독특한 기술 및 발전 방식을 가지고 있다. 가스화 공정은 석탄뿐만 아니라 기타 중질 잔사유, 석유 코크스, 바이오 매스, 폐기물 등 탄소를 함유하는 모든 물질에서 비교적 열량이 높고 청정한 합성 연료인 H₂와 CO의 가스를 생산하는 공정이다[1].

현재 국내외적으로 석탄가스화 복합발전(IGCC)을 활용한 발전소들이 실증단계에 있으며 이를 통한 발전효율 향상, 건설비 및 발전단가를 줄이는데 중점을 두고 단위공정 기술개발과 전체 시스템의 최적화를 위한 연구개발을 지속하고 있다. 특히 여러 개의 단위공정으로 구성된 석탄가스화 복합발전 기술 중 석탄가스화 공정은 전체 IGCC 플랜트 구성에 중

Received: July 30, 2014, Revised: September 17, 2014,

Accepted: September 17, 2014.

* Corresponding author, E-mail: p_dsjang@cnu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.3.044>

© KSCFE 2014

요한 영향을 미치므로 가스화 기술의 장애요인이나 문제점을 사전에 제거하는데도 노력을 기울이고 있다[2]. 그러나 다상 난류반응이 연계된 석탄가스화 과정에 내재된 발열과 흡열의 복합적인 기전은 IGCC 플랜트 공정에서 산화제(산소/공기), 석탄의 종류(분말/슬러리), 내화제의 형태, 가열방식 등 설계와 운전 조건에 따라 공정상의 현격한 차이를 나타내는 결과로 나타나고 있다. 이는 부분 연소반응의 열로 합성가스를 생성하는 일련의 반응이 열복사가 관여하는 고-액기 삼상의 난류 반응장에 대한 물리적인 이해에 기초하여야 하기 때문이다. 특히 고온/고압에서 운전되는 가스화기는 내부의 반응에 대한 구체적인 분해 능력이 이론적인 차원에서나 실용적인 응용의 관점에서 모두 제한적이기 때문에 최적 조건의 가스화기 설계를 위해서는 수치해석적인 연구가 선행되거나 실험과 병행하여 상호보완적인 검증의 역할을 수행해야 한다고 판단된다.

습식 분류층 가스화기에서 고려하여야 할 주요 설계 및 운전변수를 요약하면 아래와 같다. 첫째로 (1)반응로 형상(형상, 크기, 전장파 직경비 등)을 고려하여야 하며 그 다음으로는 (2)주입노즐형태(노즐면적, 노즐수, 선회기, 유도판 등) (3)선회수(선회각, 선회속도 등) (4)1차/2차류의 운동량비, 속도비 (5)슬러리 농도 (6)가스화기 온도 및 압력, (7)수증기/석탄비, 공기/석탄비 그리고 마지막으로 (8)벽면열손실 및 복사열전달 등을 고려하여야 한다. 국외 유수한 기업의 실용화급의 가스화기의 경우에서도 건식과 습식, 산화제의 산소나 공기 그리고 내화제의 경우 수냉 멤브레인과 내화벽돌과 같이 설계상에 있어서 현격한 차이를 나타내고 있다. 실제 발표된 연구 문헌에서도 이와 같은 벽면 열손실이 석탄전환율의 계산에서 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다[3].

본 연구는 분류층 슬러리 석탄가스화 전산해석에 관한 일련의 연구로서 첫 번째 연구에서는 제반변수에 대한 가스화 생성물의 생성기전과 효율에 대한 결과를 제시하였다[4]. 그리고 두 번째 연구에서는 석탄입자의 직경분포에 따른 영향이 입자의 궤적과 반응 유동장에 미치는 일차적인 영향을 고려하였으며 그 결과로 나타나는 반응장에 대한 검토를 하였다[5]. 본 연구에서는 석탄 입자 분포에 대한 연구에 이어서 가스화기의 형상변화 및 산화제 주입 시 선회효과 등 주요 설계 변수에 대한 수치 해석적 연구를 수행하고 그에 따른 내부 열유동 변화를 살펴보았다.

2. 수치 해석적 연구 방법

석탄의 가스화 반응은 열복사가 관여하는 비균일 이질상(가스-가스상, 가스-고체상 반응)이므로 반응공정에 대한 수치 해석적인 정확한 기술에는 현상학적인 모델규명과 모델 코드

화에 대한 노력이 따른다. 본 연구에서는 비교적 검증이 된 모델을 사용하여 전체 프로그램을 완성하였으며 상용코드인 Fluent를 사용하여 가스화 반응 특성을 해석하였다. 보다 복잡한 현상학적인 모델에 대한 변수연구와 그에 따른 검증은 추후 지속적으로 수행해야 할 연구주제라고 할 수 있다. 본 논문에서 사용한 현상학적인 모델과 수치해석적인 방법은 이미 발표한 일련의 논문에서 부분적으로 기술하였으므로 본 논문에서는 논문 형식의 완성의 차원에서 본 변수 연구에 관계가 깊은 내용을 간단하게 설명하였다.

석탄 슬러리 가스화 난류반응에 대한 기상지배방정식은 오일러리안 방법을 사용하였고 미분탄 거동에 따른 휘발화 및 가스화 과정은 라그랑지안 방법을 선택하였다. 석탄 입자는 입도에 따라 일정한 개수의 그룹으로 나누어 시간에 따른 위치, 속도, 휘발화 그리고 화학반응 등에 대한 거동을 추적하였다. 특히 입자 거동에 나타나는 입자의 속도와 저항계수간에 비선형 난류모델은 석탄입자 궤적의 중요성에 비추어 신뢰성이 높은 현상학적인 접근이 요구된다. 우선 기상 상태에 대한 질량, 운동량, 에너지, 난류 및 화학종 농도 등에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\vec{u}\phi)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial r} \\ = \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial r}) + S_\phi + S_{\phi,P} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 단위질량당 물리량으로 표현되는 일반종속변수로 속도성분(u,v,w), 압력(p), 엔탈피(h), 화학종의 질량분율 및 난류 에너지와 이의 소멸에너지(k,ε)이다. ρ , Γ_ϕ , S_ϕ 는 밀도, 일반종속변수에 대한 확산계수와 생성항이다. 그리고 $S_{\phi,P}$ 는 기체상태가 아닌 고체입자나 액체에 의하여 일정한 검사체적(PSIC, Particle Source In Cell)에서 발생하는 질량, 운동량이나 엔탈피 그리고 화학종에 대한 생성 및 소멸항을 각각 나타낸다[6-7].

2.1 석탄의 휘발화 및 차(char) 연소

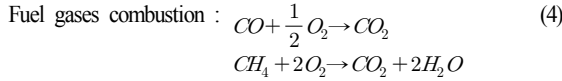
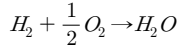
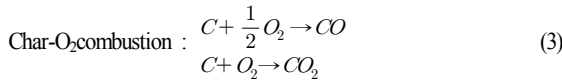
시간에 따른 석탄의 비휘발율을 상수로 가정한 constant rate 모델을 사용하였다. 일정 비율은 가정된 시간동안 석탄입자의 무게 손실로 계산되며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V^*}{T_{devol}} \quad (2)$$

여기서 V^* 는 휘발성 물질의 함유량(kg)이고 T_{devol} 은 사용자가 정의한 휘발화 시간이다.

가스화기의 연소반응은 차(char) 연소와 휘발화 된 연료가

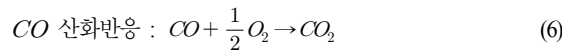
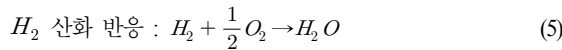
스의 연소를 포함한다. 본 수치해석연구에서 모델에 포함된 연소반응은 다음과 같다.



차 연소에 필요한 시간은 석탄 연소과정에서 중요한 부분이며 이의 모델링은 여러 인자로 인해 복잡하다. 예를 들어 석탄 차의 구조, 차와 다양한 반응물(O_2 , H_2O , CO_2 , H_2 등)과의 복잡한 반응기작, 차 분열(fragmentation), 차의 정확한 성분 등이 불확실하다. 이와 같은 불확실성 때문에 차연소 과정의 모델링은 특별한 석탄과 실험조건에 대한 실험적인 속도 값에 주로 의존한다. 현재까지 제안되고 있는 차 연소에 대한 경험적 모델 중에 본 연구에서는 first-order combined rate model을 사용하였다[8].

2.2 가스상 반응 모델

가스화기에서는 고체연료의 휘발화에 따른 일련의 연소반응이 일어나게 된다. 연료의 가스 반응은 아래와 같다.



가스상 연소반응은 화학반응 시간이 매우 빠르기 때문에 연료와 산화제가 혼합되면서 연소가 이루어지므로 전체반응 속도는 난류의 혼합속도에 의해 영향을 받는다는 Magnussen과 Hjertager(1976)의 개념을 이용하여 휘발성 가스상 연료의 연소에서 고려한 화학종들의 반응속도는 다음과 같이 계산하였다[9].

$$\overline{w_{fu}} = \text{minimum of } \left[\frac{\overline{\rho} A m_{fu} \varepsilon}{k}, \frac{\overline{\rho} A m_{ox} \varepsilon}{i k}, \frac{\overline{\rho} A m_{pr} \varepsilon}{1+i k} \right] \quad (7)$$

여기서 i 는 연료의 단위질량당 산화제의 질량분율, m_{fu} 와 m_{ox} 는 연료와 산화제의 질량분율, m_{pr} 은 생성물의 질량분율, 그리고 A 는 Magnussen에 의해 제안된 수치, 4를 가지며 약간씩 계수 값이 조정될 수 있다.

2.3 가스화 반응

가스화기의 주 목적은 석탄의 가스화 반응이다. 일반적인

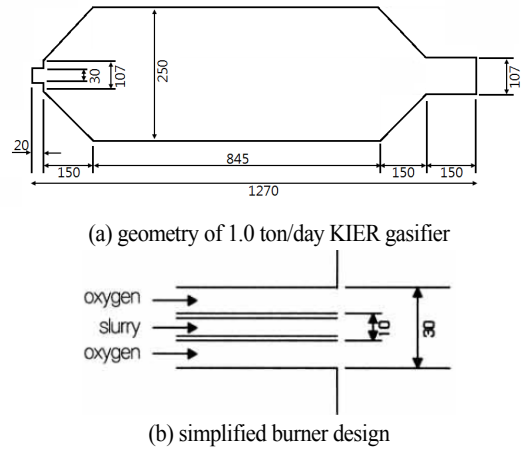
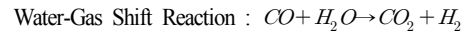
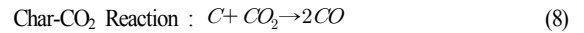
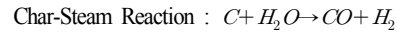


Fig. 1. Schematic diagram of entrained flow coal gasifier

연소공정과 다른 점은 공급되는 산소의 양이 충분하지 않아 로내에 환원조건을 만든다는 것이다. 차스팀 가스화 반응은 흡열반응으로 열 공급이 필요하기 때문에 부분적인 차 연소가 가스화에 필요한 열을 제공하게 된다.



본 연구에서 고려한 연소반응과 가스화 반응을 Table 1에 나타내었다.

3. 연구결과 및 토론

본 연구에서는 1.0 ton/day KIER(한국에너지 기술연구원) 기준모델로 삼았으며 Fig. 1은 KIER(한국에너지 기술연구원)

Table 1 Combustion and gasification reactions considered in this study

| Reaction ID | Chemical Reaction | Reaction Type |
|-------------|---|-------------------------------------|
| 1 | $mv_vol + 1.706O_2 \rightarrow CO_2 + 1.543H_2O$ | Volumetric volatile combustion |
| 2 | $C(s) + 0.5O_2 \rightarrow CO$ | Particle surface partial oxidation |
| 3 | $C(s) + CO_2 \rightarrow 2CO$ | Particle surface boundary reaction |
| 4 | $C(s) + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ | Particle surface water-gas reaction |
| 5 | $H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$ | Volumetric combustion |
| 6 | $CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$ | Volumetric combustion |

에 설치된 1.0 ton/day 습식분류식 가스화 장치에 대한 전체적인 도면을 나타낸 것으로 미분탄은 물과 혼합하여 슬러리 형태로 버너의 중심을 통해 주입된다. 산화제는 산소를 사용하였으며 가스화 과정 동안 연료 주입구 주변의 8개 홀을 통하여 빠른 속도를 공급된다[1],[4]. 본 연구에서 고려한 가스화기의 운전조건 및 연료 특성은 Table 2에 제시하였다. KIER 1.0 ton/day 가스화기 출구에서는 압력에 의한 경계조건을 사용하였으며 입구는 Table 3와 같은 조건을 설정하여 계산하였다. 산화제와 연료의 주입온도는 400 K으로 가정하였으며 반복 계산시 발산을 방지하고 수치해석상의 안정성 확보를 위해서 공급한 석탄의 입자는 1 μ m 이하로 매우 작다고 가정하여 이것을 표준조건으로 계산을 수행하였다.

3.1 표준 조건에 따른 수치해석 결과

Fig. 2의 계산 결과는 평균 석탄입경 70 μ m, 최대입경 134 μ m, 최소입경 5 μ m을 갖는 Rosin Rammler 분포를 가정하였다. 본 논문에서는 구체적으로 언급하지는 않았지만 KIER에서 행해진 입도 분포와 가장 일치시킨 경우로 출구 합성가스 조성 역시 실험에 의하여 측정된 값과 유사한 결과 이다[4]. Fig. 2의 결과는 본 일련의 연구에서 모델로 삼고 있는 한국에너지기술연구원(KIER) 장치에 대한 표준조건에 대한 결과의 일부를 나타낸다[5]. 특히 Fig. 2(b)는 석탄입자의 궤적 및 체류시간을 나타낸 것으로 Rosin-Rammler 분포를 가정하였을 때 평균입경보다 큰 입자의 일부는 본 가스화기의 제원과 운전조건인 상태에서 기 내부에서 휘발화에 이은 가스화 반응이 완전하게 일어나지 못함을 지적한 바 있다. 즉 평균 미분 석탄이나 가스화기에서 보통 나타나는 60~70 μ m 의 평균 입도 보

Table 2 Physical Data for 1.0 ton/day KIER gasifier

| Entrained Flow, Oxygen-Blown, Coal-Slurry Gasifier | |
|--|--|
| Coal-Water Slurry | - Slurry feed rate = 65kg/h - Coal feed rate = 40kg/h - Water feed rate = 25kg/h |
| Oxidant | 24.5Nm ³ /hr as O ₂ |
| Injection angle | 15° |
| Pulverized coal size | maximum = 2.0E-3m(200 μ m) |
| | minimum = 5.0E-6m(5 μ m) |
| | average = 7.0E-4m(70 μ m) |
| Chemical properties of Datong coal(wt%) | C 74,H4.48,N 0.44, O 10.68,S 0.59 |
| | Moisture 9.36,VM 26.43, Ash 9.44,FC 54.77 |
| | Heating value 6,910 kcal/kg |

Table 3 Inlet boundary conditions for the 1.0 ton/day gasifier

| | Velocity(m/s) | Temperature(K) |
|------------|---------------|----------------|
| Fuel Inlet | 2.381 | 400 |
| Air Inlet | 273.25 | 400 |

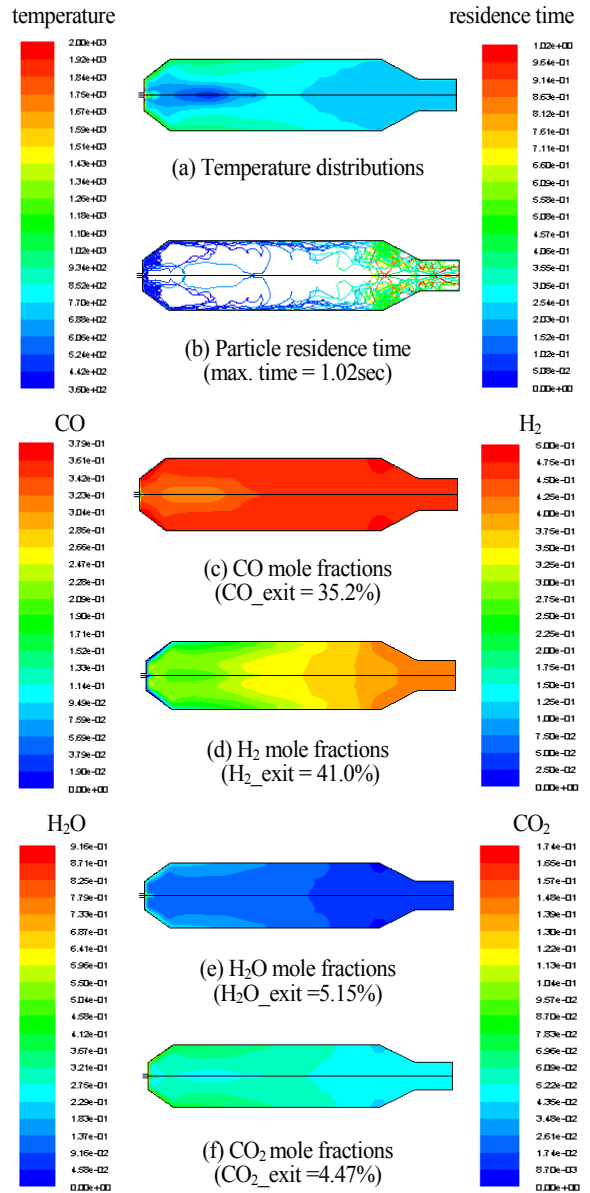


Fig. 2 Gasification characteristics for the condition of 70 μ m mean diameter with Rosin-Rammler distribution for a 1 ton/day KIER gasifier[5]

다 큰 석탄 입자의 존재는 가스화기의 반응시간을 실질적으로 증가시킬 수 있음을 Fig. 2의 결과에 기초하여 적시한 바 있다[5]. 이러한 석탄입자의 궤적상의 특징은 같이 나타낸 온도분포나 기타 다른 합성가스의 농도분포의 특성을 일관성 있게 설명하여 주고 있다. 즉 가스화기 내부 온도는 일차적으로 증가하는 추세를 보이다가 큰 석탄 입자의 영향에 의한

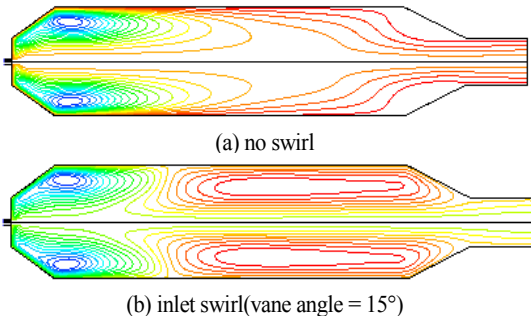


Fig. 3 Streamline for the burner considering swirling effect

가스화 반응이 진행되면서 출구쪽에서 다시 온도가 낮아지고 있는 것을 볼 수 있다.

3.2 산화제 선회효과

KIER의 버너형태는 가스화기 중앙에 연료 주입구가 있으며 그 둘레에 연료 주입면을 향해 15°의 각을 갖는 8개의 작은 노즐을 통해 산화제가 공급된다. 현재 고려한 가스화기는 축대칭 2차원을 가정한 것으로 버너는 연료와 산화제가 같은 방향으로 공급되는 이류체 버너의 형태를 가진다. 이류체 버너에서 산화제가 공급되는 곳에 15°의 선회를 주어 계산하였다. Fig. 3에 선회의 유무에 따른 유동장 패턴을 비교하여 나타내었다. Fig. 3에서 선회를 주지 않은 유동장은 Fig. 2에 제시한 표준조건에 해당하는 유동장이며 선회를 준 유동장은 표준조건과 비교를 위한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 산화제에 선회를 준 경우 가스화기 전단에 위치한 재순환영역이 상하부 벽 쪽으로 치우쳐서 형성되고 이에 따른 중심부에 낮아진 압력효과는 가스화기 중심부에 커다란 재순환영역을 형성하고 있다. 이러한 유동장의 재순환 영역의 형성은 강선회 연소소에서 나타나는 중심부 재순환 영역[10]과는 다르게 보다 하류 영역으로 치진 재순환영역을 나타내고 있는데 이것은 아마도 중심부에 석탄입자와 슬러리에 의한 증가된 운동량에 기인한 것으로 판단된다. 특히 가스화기의 경우에는 미분석탄의 연소와는 다르게 석탄입자의 반응이 연소반응과는 다르게 천천히 일어나는 특성이 이러한 유동장 형성이 영향을 나타낸 것으로 판단된다. 앞의 선회가 없는 유동장과 비교할 때 산화제 노즐에 선회를 준 경우 가스화기 중심부에 형성된 재순환 영역으로 인해 석탄입자의 일부가 같이 순환할 것으로 판단되며 이는 결과에 제시한 바와 같이 체류시간의 증가로 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 4는 선회에 따른 가스화 특성을 나타낸 것으로 가스화기 내부 온도는 Fig. 4(a)에서 처럼 전반부 상하 벽 쪽으로 높은 온도를 보이고 있으며 출구로 갈수록 서서히 감소되는

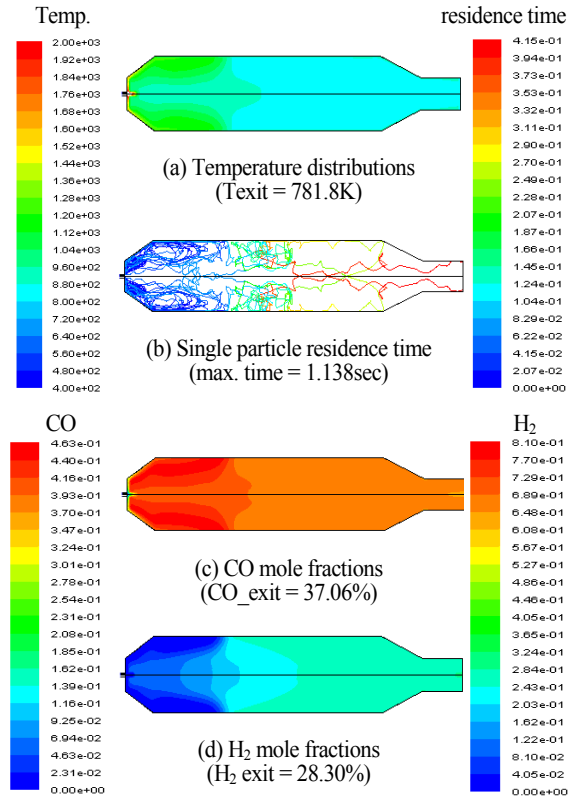


Fig. 4 Gasification characteristics for the burner considering swirling effect

경향을 나타내고 있다. 출구 평균온도는 선회를 주지 않은 경우에 비해 70~80K 정도 높은 782K으로 계산되었다. Fig. 4(b)에는 석탄 입자의 체류시간이 0.11sec 정도 증가된 결과를 보이고 있는데 이는 표준조건에는 나타나지 않았던 가스화기 내부에 존재하는 중심부 재순환 영역의 결과로 판단된다. 이러한 재순환 영역의 결과로 입자의 체류도 선회가 없는 경우 벽면으로 치우쳤던 입자의 분포가 가스화기 중심부로 이동하고 있음을 가지적으로 나타내고 있다. 선회강도의 변수에 따른 보다 조직적인 변수 연구의 필요성은 다양한 설계 및 운전조건 변화가 주어질 경우 선회강도에 따른 다양한 결과를 나타낼 것으로 사료되기에 선회의 존재가 내부 재순환에 영향을 미친다는 사실 외에 구체적이고도 조직적인 변수연구는 현재의 시점에서 크게 필요하다고 판단되지 않아 수행하지 않았다. 합성가스 생산량은 CO가 37.06%, H₂가 28.30%로 오히려 감소된 결과를 보였다. 이는 버너 전단부에서 연료와 산화제의 혼합효과로 인한 연소가 강화되고, 내부 재순환 영역의 형성으로 인하여 벽면으로의 열손실이 감소되어 온도가 증가되

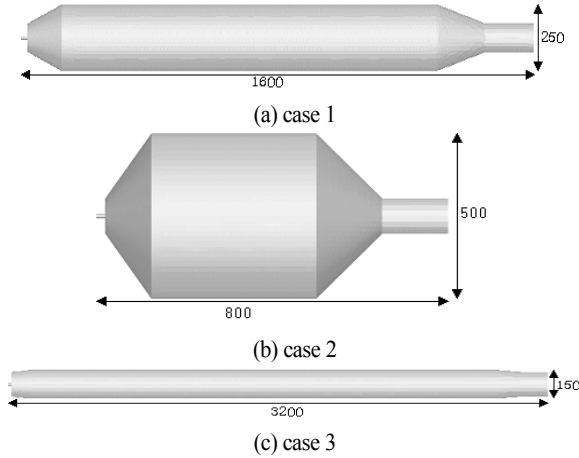


Fig. 5 Schematics of gasifiers considered in this study

고, 체류시간 증가에 의하여 flue gas의 연소가 증가되어 결과적으로 온도는 증가되고 CO와 H₂의 농도는 감소된 것으로 판단된다. 즉 Table 1의 반응 (5)가 주도적인 역할을 하였고, 체류시간 증가로 반응 (6) 역시 증가하였기 때문이다.

3.3 가스화기 형상 변화

KIER 1.0 ton/day 가스화기와 동일한 운전조건 및 경계조건을 가지고 표준조건외의 제원을 Table 4에 제시한 바와 같이 3종류로 변경하여 가스화기의 내부 반응 특성을 평가하였다. Fig. 5는 Table 4에서 고려한 각 가스화기를 형상화해서 나타내었다. 구체적으로 case1은 직경은 고정시키고 전장을 10% 정도 길게 한 경우이며 case2는 전장을 줄이고 단면적으로 크게 하였다. 마지막으로 세 번째인 case3는 단면적을 줄인 대신에 전장을 2배 이상 길게 하였다. 본 연구에서 가스화기의 중형비와 같은 제원을 극단적으로 변경시켜 해석을 하는 이유는 복잡한 현상학적인 모델과 열유동이 변화가 심한 가스화기의 반응장에서 작은 변화로는 나타나지 않을 가능성이 있는 변화를 보다 확실하게 관찰하는데 목적이 있다.

Fig. 6는 case 1에 해당하는 경우로서 KIER 1.0 ton/day 가스화기의 전장을 약간 길게 한 경우이다. Fig. 6(a)에 제시한 표준 조건에서의 유선도를 보면 가스화기 전단 상하부에만 존재하던 코너 형태의 재순환영역(Fig. 3(a))이 전장이 길어짐에 따라 중심재순환 영역과 같은 형상으로 커다랗게 나타났

Table 4. The configuration of gasifier considered in this study

| | Length(mm) | Height(mm) |
|--------|------------|------------|
| case 1 | 250 | 1600 |
| case 2 | 500 | 800 |
| case 3 | 150 | 3200 |

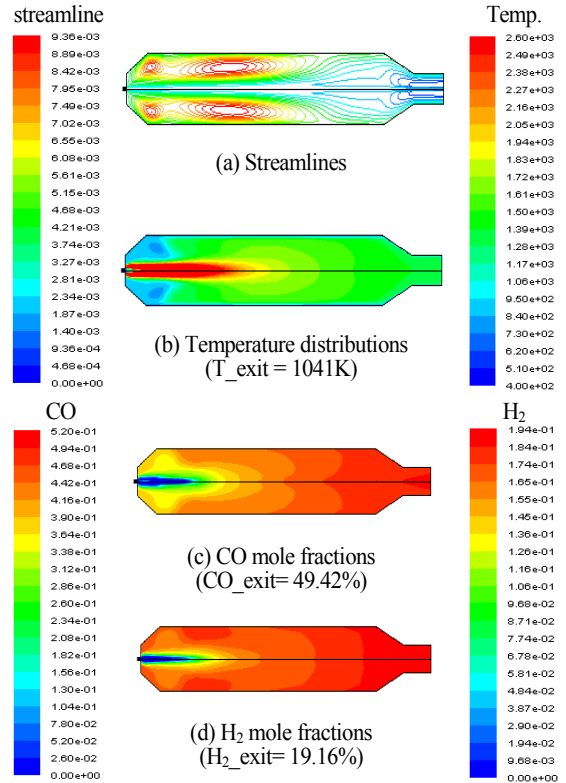


Fig. 6 Gasification results of the case 1

다. 전장이 길어짐에 따라 중앙에 코너 재순환의 확대된 형태이거나 또는 선회 존재할 경우 나타나는 중앙 재순환같이 재순환 영역이 존재하는 이유는 가스화기 전장이 길어짐에 따라 발생하는 압력강하와 벽면전단력의 복합적인 작용에 기인하는 것으로 판단되었다. 또한 버너 중심부에서 고온의 화염이 형성되고 있으며 출구로 갈수록 점차적으로 감소되는 경향을 보여주고 있다. 합성가스 조성은 CO가 49.4%, H₂가 19.2%로 계산되었다. 고온의 화염이 버너 중심부에서 형성되고 가스화기내 온도가 높아진 경우 CO 농도는 대체적으로 높아지고 반대로 H₂ 농도는 감소되는 일관성 있는 수치해석 결과를 보였다. 이는 Table 2의 반응 (2)가 주도적인 역할을 하면서 가스화기내 온도를 상승시킨 것으로 판단된다.

Fig. 7은 큰 직경에 비해 지나치게 짧은 case2의 경우로서 가스화기에 대한 반응특성을 나타낸 것이다. 버너에서 고속으로 주입된 산화제는 갑자기 증가된 단면적으로 인해 많은 운동량을 상실하게 되어 산화제와 석탄 슬러리간에 효과적인 혼합이 발생하지 못하였다. 거기다가 전장이 매우 짧은 반응기에서 산화와 가스화 반응이 효과적으로 진행되지 않는 결과로 나타났다. Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)는 H₂O와 O₂ 농도를 나타

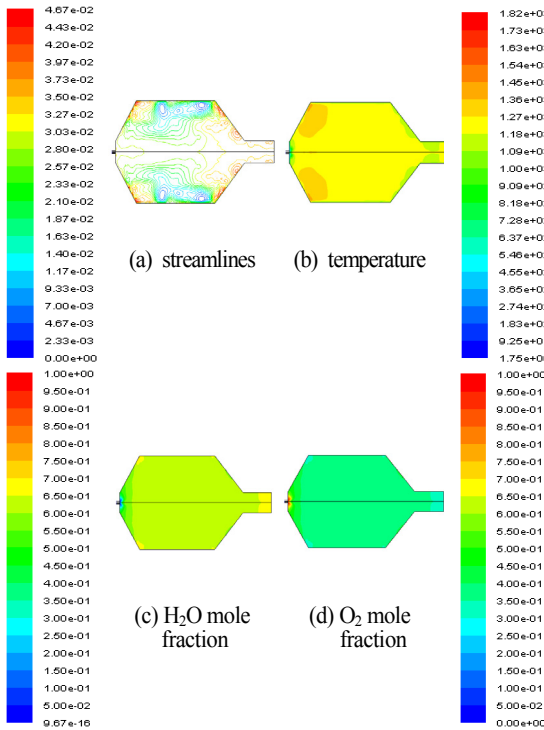


Fig. 7 Gasification results of the case 2

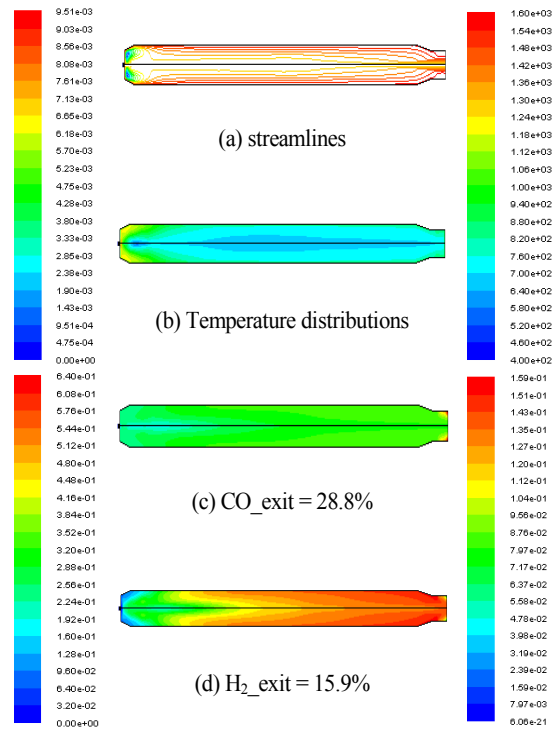


Fig. 8 Gasification results of the case 3

낸 것으로 불안정한 난류혼합의 따른 불안정한 반응특성을 보였다. 출구에서 O₂ 농도가 높게 나타난 것이 이러한 유동특성으로 인하여 연소반응 역시 제대로 진행되지 않은 것을 시사하고 있다.

Fig. 8의 결과는 case3의 경우로서 직경에 비해 전장이 긴 가스화기에 대한 결과를 나타낸 것이다. Fig 8(a)의 유선도에서 알 수 있듯이 버너입구 상하에 작은 재순환 영역을 형성하고 전반적으로 균일한 “plug flow” 형태의 유동특성을 나타내고 있다. 온도장은 버너 근처 상하부에서 고온의 온도를 보이다가 출구로 갈수록 온도가 점차적으로 감소되는 경향을 보이고 있다. 가스화기 전장이 길어진 ‘plug type’의 유동장은 난류혼합 강도를 크게 약화시켰으며 그 결과 연소반응과 그에 따른 가스화반응을 전반적으로 약화시킨 결과를 나타내었다. 결국 가스화 반응의 진행이 느려져서 앞의 표준조건에 비하여 출구에서의 가스화 생성물은 CO 농도는 28.8%, 그리고 H₂ 농도는 15.9%로 낮게 계산되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 KIER 1.0 ton/day 가스화기를 대상으로 주

요 설계 및 운전 변수인 산화제 유동의 선회유무와 가스화기의 형상 변화를 변수로 하여 전산해석을 수행하였다.

산화제에 선회를 준 경우 가스화기 전단에 위치한 재순환 영역이 상하부 벽 쪽으로 치우쳐서 형성되고 이에 따른 중심부에 낮아진 압력효과는 가스화기 중심부에 커다란 재순환영역을 형성하고 있다. 이것은 중심부에 석탄입자와 슬러리에 의한 증가된 운동량에 기인한 것으로 판단되며 특히 가스화기의 경우에는 석탄입자의 반응이 연소반응과는 다르게 가스화기 전 영역에서 천천히 일어나는 특성이 이러한 유동장 형성이 영향을 나타낸 것으로 판단된다. 또한 가스화기 전장을 길게 한 경우에도 압력 강하와 벽면전단력 효과에 의하여 선회 유동시 나타나는 유동과 유사한 재순환 유동 특성을 나타내었다. 이러한 유동장의 변화는 석탄 입자의 궤적과 그에 따른 산화 및 가스화 반응에 의미 있는 영향을 주는 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 한국 연구재단의 일반연구자(기본연구) 지원사업 (NRF-2013R1A1A2005127)과 환경부의 폐기물 에너지화 자

원화 전문 인력 양성 사업에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] 2008, Jang, D.S., Kim, H.S., Shin, M.S. and Song, W.Y., "Development of comprehensive computer program for the optimum design of entrained flow gasifier using Non-conventional oil(II)," *Korea institute of energy research*, final report.
- [2] 1999, Park, T.J., Kim, J.H., Son, S.G., Lee, J.G., Hong, J.C., Kim, Y.G. and Choi, Y.C., "Experimental study on the characteristics of coal gasification by 1 T/D BSU coal-slurry entrained gasifier," *Energy Engg. Journal*, vol.8, No.4, pp.552-559.
- [3] 2008, Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D., "Plasma gasification of sewage sludge(Process development and energy optimization)," *Energy conversion and management*, vol.49 pp.2264-2271.
- [4] 2010, Kim, H.S., Choi, S.H., Hwang, M.J., Jang, D.S., Yun, Y.S., Choi, Y.C. and Lee, J.G., "Numerical and experimental study on the coal reaction in an entrained flow gasifier," *Korean Society of Environmental Engineering*, vol.32, No.2, pp.165-174.
- [5] 2014, Song, W.Y., Kim, H.S., Shin, M.S., Jang, D.S. and Lee, J.G., "Numerical calculation of a coal slurry entrained gasifier with coal particle size distribution," *Korean Society of Environmental Engineering*, submitted for publication.
- [6] 1956, Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow," McGraw-Hill company.
- [7] 1994, Smith, L.K., Smoot, L.D., Fletcher, T.H. and Pugmire, R.J., "The structure and reaction processes of coal," *Plenum Press*, NewYork.
- [8] 1967, Migdal, D. and Agosta, V.D., "A source flow model for continuum gas-phase flow," *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics*, vol.34, pp860-865.
- [9] 1976, Magnussen, B.F. and Hjertager, H., "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion," *16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p.719.
- [10] 1980, Syed, S.A. and Sturgess, G.J., "Validation studies of turbulence and combustion models for aircraft gas turbine combustors, Momentum and heat transfer processes in recirculating flows," *Annual Meeting of the ASME*, Chicago.