

석탄가스화기의 형상에 따른 유동특성 비교연구

주 지선¹⁾, 정 우현²⁾, 윤 용승³⁾

A Study on Fluid Characteristics According to Shape of Coal Gasifier

Jisun Ju, Woohyun Jung, YongSeung Yun

Key words : IGCC(석탄가스화복합발전), Gasifier(가스화기), Syngas(합성가스), CFD(전산유체역학)

Abstract : 본 연구는 국내 고유의 가스화기 모델 개발의 목적으로 진행되었으며 다종의 가스화기 형상을 제안하고 전산해석을 이용한 비교검토를 통하여 국내 고유의 가스화기 개념설계에 활용하고자 하였다. 우선 downflow형 가스화기 3종과 upflow형 가스화기 3종에 대한 형상을 제시하고 cold flow 해석을 통한 가스화기내 유동특성과 체류시간등을 비교하였다. 또한 고유모델로의 개발에 적합한 형상을 고려하여 upflow형 2종 및 downflow형 1종 등 총 3종을 선택하여 가스화 반응을 포함시킨 hot flow 해석을 진행하고 온도분포, CO 및 H₂의 가스농도분포를 비교하였다. 검토 결과 기존에 연구되어왔던 석탄가스기 형태인 upflow형 가스화기 하부에 산소공급노즐을 설치하는 경우 기존에 확보된 기술을 적용함을 물론 슬랙화효율을 높이는 데도 잇점이 있을 것으로 판단되었다.

1. 서론

석탄가스화복합발전기술은 석탄을 수소와 일산화탄소를 주성분으로 한 합성가스로 전환한 뒤 합성가스 중에 포함된 분진과 황산화물 등 유해물질을 제거하고 천연가스와 유사한 수준으로 정제하여 복합발전을 하는 기술이다. 이러한 석탄가스화복합발전기술은 기존의 석탄화력발전에 비해 높은 발전효율을 가지며, 직접 연소 발전에 비해서는 황산화물 90% 이상, 질소산화물 75% 이상을 저감할 수 있고 특히 이산화탄소의 경우에는 25%까지 저감할 수 있는 환경친화적 기술로 알려져 있기 때문에 세계 각국에서 기술 개발에 힘쓰고 있다.

이러한 석탄가스화복합시스템에서 가스화기는 고온고압에서 합성가스의 생성이 일어나는 부분으로 가스화 반응 효율을 높이기 위해서는 효율적으로 가스화기를 설계하는 것이 필수적이다.

현재 외국에서 상용화된 기본적인 가스화기의 형태에는 고정층(BGL, Lurigi), 유동층(HTW), 그리고 분류층(Prenflo, Shell, Taxaco, Destec) 가스화기가 있다. 이러한 가스화기 중에서 외국에서 최근 많이 연구 개발되고 가스화기는 분류층 형태의 가스화기로서 기본적인 형태를 크게 Downflow형과 Upflow형 가스화기로 구분할 수 있다¹⁾. Downflow형으로는 Texaco가스화기와 미국 DOE에서 많은 연구가 이루어진 기본적인 1단형 가스화기 형태를 들 수 있다. Upflow형으로는 미국 DOE의 기본적인 2단의 up-flow형 가스화기, Shell 가스화기 형태인 1단 Up-flow형, 미국의 FutureGen 프로젝트로 많이 연구되고 있는

Destec 가스화기 그리고 일본 Sunshine project로 개발되고 있는 2단 upflow형가스화기가 대표적인 형태라 할 수 있다.

본 연구는 국외에서 개발중인 가스화기와 경쟁할 수 있는 국내 고유의 가스화기 모델 개발의 목적으로 진행되었으며 다종의 가스화기 형상을 제안하고 전산해석을 이용한 비교검토를 통하여 국내 고유의 가스화기 개념설계에 활용하고자 하였다.

2. 해석방법

2.1 수학적 모델

가스화기 내부에서 발생하는 현상과 그에 따라 해석에 고려한 수학적모델을 [표 1]에 나타내었다. 분무된 입자의 궤적 계산을 위해서는 Lagrangian particle tracking 방법을 사용하였다. 입자의 휘발화는 기상과 입자간의 열전달을 계산한 후, 입자가 승온되어 휘발화온도 이상이 되면 가스상으로 변화되는 것으로 가정하였다. 기상에서의 가스화 반응속도는 Arrhenius 속도식

-
- 1) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : jsju@iae.re.kr
Tel : (031)219-2679 Fax : (31)216-9125
 - 2) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : whjung@iae.re.kr
Tel : (031)219-2687 Fax : (031)216-9125
 - 3) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : ysyun@iae.re.kr
Tel : (031)219-2677 Fax : (031)216-9125

으로 계산하였다. 또한 가스상에의 반응시 난류에 의한 혼합효과는 Eddy break-up model로 계산하였고, 기상의 유동은 표준 K-ε 난류모델을 사용하였다.

표 1 가스화기 해석방법

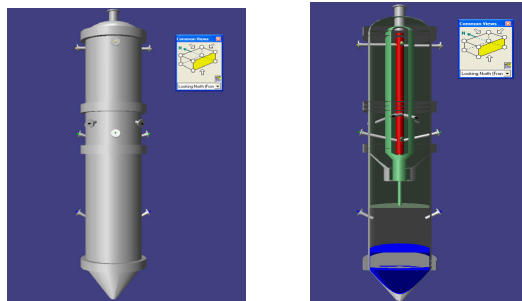
Physical phenomena	Model
Gas phase fluid mechanics	·K- ε turbulent model
Gas phase chemical reaction	·Eddy break-up model ·Arrhenius equation
Particle phase dispersion	·Lagrangian particle tracking
Devolatilization	·Single rate devolatilization model
Heat transfer	·Convection ·Radiation ·Particle heat transfer

2.2 해석을 위한 형상

국내 고유 가스화기에 대한 형상을 도출하기 위하여 여러 가지 다양한 가스화기 형태에 대한 유동특성을 전산유체역학을 이용한 모델링 방법을 이용하여 진행하였다.

[그림 1]에 3차원으로 가스화기 외형과 유체 흐름이 형성되는 가스화기 내부형태를 나타내었다. 해석을 위한 가스화기의 형상은 가스화기 외벽과 내화재부분을 제외한 내부 공간만을 고려하였다.

[그림 2]에 고유가스화기 형상 도출을 위해 검토된 Up-flow형 가스화기 3종과 Down-flow형 가스화기 3종에 대한 형상을 나타내었다. 그림에서 Case1~Case3은 석탄이 상부에서 투입되어 합성가스가 하부로 발생하는 down-flow형 가스화기이며, Case4~Case6은 하부에서 석탄이 투입되어 상부로 가스가 합성가스가 발생하는 Down-flow형 가스화기이다. 가스화기의 크기는 가스화기 직경이 D일때 가스화기 길이 L의 값이 5D가 되는 것을 사용하였다. 해석을 위한 격자는 주로 6면 체격자를 사용하였고, 해석프로그램은 상용 CFD code인 FLUENT6.3을 사용하였다.



(a) 가스화기 외형 (b) 가스화기 내부

그림 1 가스화기에 대한 외형 및 내부형상

3. 결론 및 고찰

3.1 Cold flow 해석결과

[그림 2]에 나타난 각각의 형상에 대해 Cold flow 해석을 진행하여 가스화기내 유동흐름특성과 체류시간등을 비교하였다. 해석결과중에서 Down-flow형 가스화기의 기본적인 형태인 Case1과 Upflow형 가스화기의 기본 형태인 Case4의 흐름특성을 [그림 3] 및 [그림 4]에 나타내었다.

Case1은 석탄투입노즐이 가스화기 상부 중앙에 1개 설치되어 있고, 그 하부에 가스화기 접선방향으로 스틱과 산소를 공급하는 노즐이 4개 설치되어 있는 형태이다. [그림 3]에 나타난 가스화기 상부의 속도분포를 보면 가스화기축 중심에서는 석탄이 분무되는 버너 선단에서부터 가스화기 출구쪽으로 빠른 흐름이 형성되는 반면, 가스화기 벽면쪽에서는 가스화기 출구에서 상부로 역류하는 흐름을 보여주고 있다.

Case4은 Up-flow형의 가스화기형태로서 석탄은 산소 및 질소와 같이 가스화기 하부에 위치한 4개의 노즐을 통하여 가스화기 축에 접선방향으로 투입되고 가스화기 상부로 합성가스가 발생하는 형태이다. [그림 4]에 나타난 가스화기 하부의 속도분포를 보면 투입된 유체는 투입위치에서 가스화기 벽을 따라 선회하다 벽쪽으로 상향하는 흐름을 형성하고 가스화기 축 중심부에서는 선회하며 하향하는 흐름 특성을 보이고 있다.

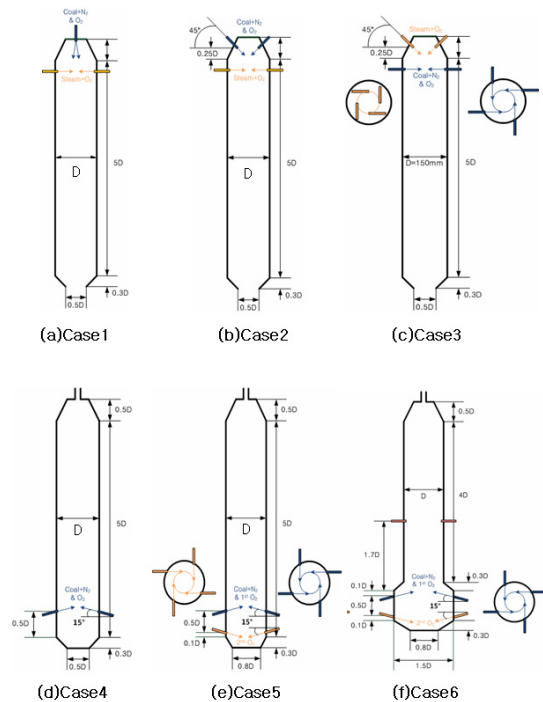


그림 2 해석을 위한 가스화 형상

이러한 특성으로 볼때 Down-flow형 가스화기의 경우에는 석탄과 산화제의 혼합을 좋게 하기 위한 버너의 설계가 중요한 설계인자가 될 수 있으며, Up-flow형 가스화기의 경우에는 설치된 노

즐의 개수 및 위치, 투입각도등을 조절하여 가스화기 내부에 입자가 오랫동안 체류하며 가스화반응이 잘 일어날 수 있도록 흐름특성을 조절하는 것이 중요한 설계인자로 판단된다.

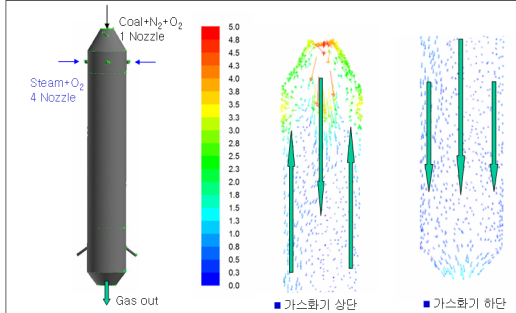


그림 3 Down-flow형(Case1) 흐름특성

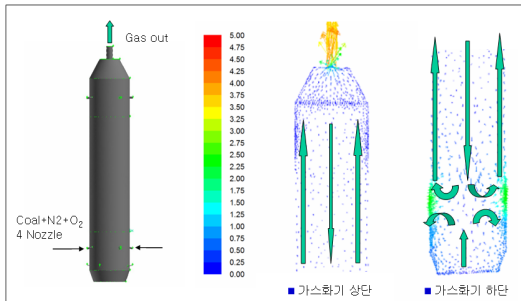


그림 4 Up-flow형(Case4) 흐름특성

Down-flow형 가스화기인 Case1의 변형된 형태로 [그림 2]의 (b)와 (c)에 나타낸 Case2 및 Case3에 대하여 해석을 실시하고 그 결과를 [그림 5]의 (b) (c) 및 [표 2]의 체류시간으로 나타내었다. Case2는 석탄투입노즐의 배치만을 통하여 선회류를 형성할 수 있도록 가스화기 상부

표 2 각 가스화기 형상의 비교 및 체류시간

구분	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
가스흐름 방향	downflow	downflow	downflow	upflow	upflow	downflow
석탄주입노즐개수	1	2	4	4	4	4
산소/스팀주입노즐개수	4	4	4	0	4	4
체류시간(sec)	3.0	3.0	2.5	6.0	6.5	7.5

에 석탄투입 노즐을 2개 설치하고 그 하부에 가스화기 접선방향으로 스팀과 산소를 공급하는 노즐을 4개 설치하는 형태이다. Case3는 Case2와 반대로 가스화기 상부에 스팀 및 산소 노즐을 4개 설치하고 그 하부에 석탄을 공급하는 형태이다.

[그림 5]에 나타낸 Case2 및 case3의 stream line을 보면 Case1과 유사하게 석탄유입구에서 가스화기 하부까지 선회하는 흐름이 형성되고 계산된 입자의 체류시간은 약 3초로 유사하게 나타났다.

상향류형 가스화기인 Case4의 변형된 형태로

[그림 2]의 (e)와 (f)에 나타낸 Case5 및 Case6에 대하여 해석을 실시하고 그 결과를 [그림 4]의 (e) (f) 및 [표 2]의 체류시간으로 나타내었다. Case5는 Case4와 같은 방법으로 석탄공급노즐을 4개 설치하고, 그 하부에 산소공급노즐을 하방 15° 각도로 4개 설치하는 형태이다.

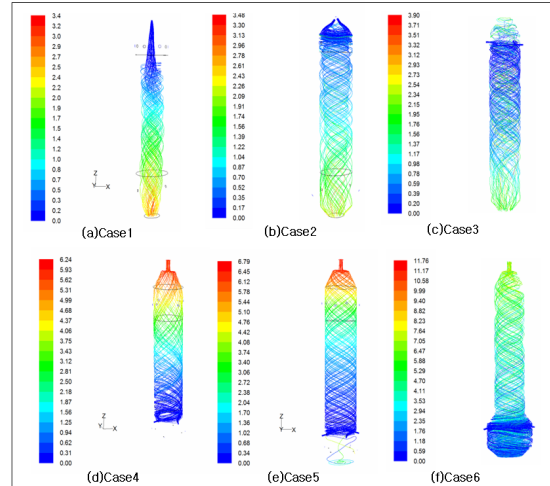


그림 5 가스화기 형상에 대한 Stream line

Case6은 Case4의 형태와 2단 Upflow형 가스화기 형태를 혼합하여 제시된 형태로서 석탄투입노즐과 산소투입노즐은 동일한 방식으로 설치되나 하부 연소영역의 직경을 상부보다 1.5배 확대한 형태이다.

Case5의 경우 Case4와 유사한 흐름특성을 나타내었고 입자의 체류시간은 6.5초로 Case4보다 큰 것으로 예측되었다. Case6의 경우 석탄입자의 궤적을 보면 석탄유입구에서 가스화기 하부까지 석탄의 선회하는 흐름이 잘 형성되고 입자의 체류시간은 7.5초로 크게 나타났다.

3.2 Hot flow 해석결과

Down-flow 형 가스화기 형태인 Case4와 Up-flow 형 가스화기 형태인 Case5, Case6의 총 3가지 형상의 가스화기를 선택하여 가스화 반응을 포함시킨 hot flow 해석을 진행하고 각각의 형상에 따른 가스화기내부 stream line, 온도분포 및 CO, H₂의 가스농도 분포를 [그림 5]~[그림 7]에 나타내었다.

[그림 5]의 (b)에 나타낸 Case4의 온도분포를 보면 가스화기 상부에 2500℃의 온도에서 가스화기 출구에 1076℃의 온도분포가 예측되었으며, CO 및 H₂ 농도는 각각 43.37%와 37.93%로 예측되

었다. Case4의 경우에는 특별한 기능의 버너설계에 의하지 않고도 가스화기 내부에 선회하는 흐름을 형성하여 가스화반응효율을 높게 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가스화기를 슬래깅으로 운전하는 경우 가스화기 출구의 온도를 높게 유지해 주는 것이 필요한데 이러한 경우에는 단점이 있는 것으로 판단되었다.

[그림 6]의 (b)에 나타낸 Case5의 온도분포를 보면 가스하부에 2500℃-2700℃의 고온영역이 균일하게 형성되고 있고, 가스화기 출구측으로 갈수록 균일한 온도영역이 형성되어 출구부분에는 1221℃로 온도가 예측되었다. CO 및 H₂ 농도는 각각 44.54%와 41.35%로 예측되었다.

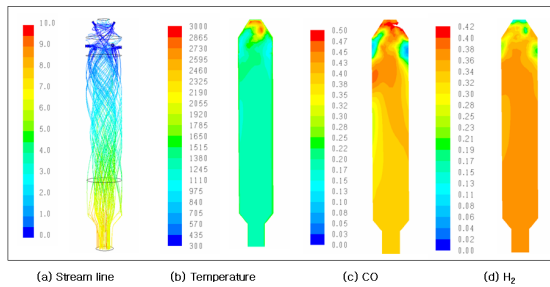


그림 5 Hot flow 계산 결과(Case2)

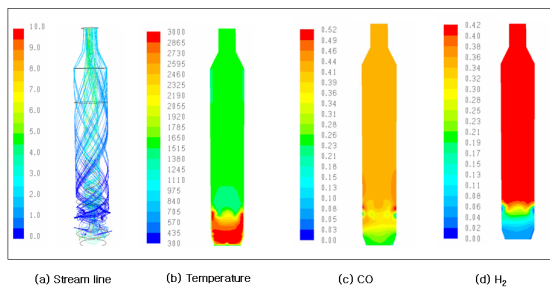


그림 6 Hot flow 계산 결과(Case5)

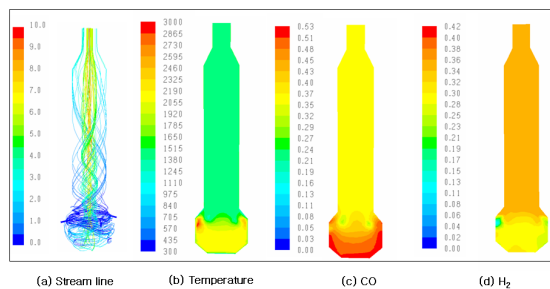


그림 7 Hot flow 계산 결과(Case6)

Case5는 석탄공급노즐 하부에 산소공급용 노즐을 설치하여 슬래킷 부분의 온도를 높여 슬래킷화율을 높여주자는 목적으로 고안된 형태인데 온도분포가 가스화기 하부에서 높고 균일한 형태로 나타나 개선의 효과가 잘 나타날 것으로 판단되었다. [그림 7]의 (b)에 나타낸 Case6의 온도분포를 보면 가스화기 하부는 2200-2300℃의 온도에서 가스화기 출구에 1190℃의 온도분포가 예측되었다. Case6의 경우에는 하부 가스화기 직경

을 확대하여 가스화기 출구온도를 900℃ 이하로 조절해보고자 하는 목적으로 고안되었다. Case6의 경우 Case5의 출구온도보다는 낮아지는 것으로 나타났으나 그 값은 30℃ 정도로 큰 차이를 보이지는 않았다. CO 및 H₂ 농도는 각각 41.98%와 36.69%로 예측되었다.

2단 Up-flow형의 가스화기의 경우에는 하부에 연소영역이 형성되고 슬래킷이 배출되는 영역이 있으므로 온도를 높고 균일하게 유지해 주는 것이 필요하다. 따라서 연소영역에서의 가스화기 직경은 쉽게 균일하고 높은 온도를 유지할 수 있도록 상부보다 작게 해주는 것이 슬래킷관점에서는 보다 유리할 수 있으므로 하부에 직경 확대는 보다 다양한 측면에서 검토가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

국내 고유의 가스화기 모델 개발의 목적으로 다종의 가스화기 형상을 제안하고 전산유체역학을 이용한 비교 검토 결과 다음과 같은 결론을 얻으 수 있었다.

- 1) 본 연구에서 검토 대상으로한 3종의 Up-flow형 가스화기 형태는 동일체적일 경우 Downflow형 가스화기보다 큰 체류시간을 나타내어 가스화반응에 보다 유리할 것으로 판단되었다.
- 2) 통상적으로 가스화기 상부에 1개의 버너가 설치되는 Down-flow형 가스화기를 변형하여 여러개의 노즐의 배치를 통해 선회류를 형성하는 형태를 검토한 결과 선회류의 형성이나 체류시간은 유사한 특성을 가질 것으로 예측되었으나 가스화기를 슬래깅으로 운전하기 위해서는 보다 많은 검토가 필요한 것으로 나타났다.
- 3) 기존에 연구한 가스화기 형태와 같이 석탄공급노즐을 상방 15°로 4개 설치하고, 그 하부에 산소공급노즐을 하방 15° 각도로 4개 설치하는 경우 슬래킷이 설치된 가스화기 하부의 온도를 보다 높고 균일하게 유지시켜 줄 수 있는 개선된 형태로 판단되었다.

후 기

본 연구논문은 산업자원부 에너지관리공단에서 지원한 “한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트를 위한 가스화공정 Test Bed 구축 및 단위공정 국산화개발”의 세부위탁과제인 “3톤/일급 가스화시스템 구축 운전 및 국내 고유 가스화기 모델 개발”의 연구비지원으로 작성되었습니다. 지원에 감사드립니다.

References

- [1] 주지선, 이승중, 윤용승, 2007, “1단상향류형과 2단상향류형 석탄가스화기 유동특성 고찰”, 2007년 한국에너지기후변화학회 춘계 학술논문발표집.