

200 t/d급 MHI 석탄 가스화기의 석탄 및 공기 배분에 따른 가스화 특성 평가

도윤영* · 예인수* · 김봉근** · 류창국*†

Influence of coal and air flow rate distribution on gasification characteristics in 200 t/d scale MHI coal gasifier

Yunyoung Doh* · Insoo Ye* · Bongkeun Kim** · Changkook Ryu*†

ABSTRACT

Commercial coal gasifiers typically use entrained flow type reactors, but have unique features in terms of reactor shape, gasifying agent, coal feeding type, ash/slag discharge, and reaction stages. The MHI gasifier is characterized as air-blow dry-feed entrained reactor, which incorporates a short combustion stage at the bottom and a tall gasification stage above. This study investigates the flow and reaction characteristics inside a MHI gasifier by using computational fluid dynamics (CFD) in order to understand its design and operation features. For its pilot-scale system at 200 ton/day capacity, the distribution of coal and air supply between the two reaction stages was varied. It was found that the syngas composition and carbon conversion rate were not significantly influenced by the changes in the distribution of coal and air supply. However, the temperature, velocity and flow pattern changed sensitively to the changes in the distribution of coal and air supply. The results suggest that one key factor to determine the operational ranges of coal and air supply would be the temperature and flow pattern along the narrower wall between the two reaction stages.

Key Words : MHI gasifier, Coal gasification, Computational fluid dynamics (CFD)

석탄가스화기술은 고체연료인 석탄을 부분산화시켜 CO, H₂와 같은 합성가스연료를 생산하는 기술이다. 가스화를 위한 가스화기에는 크게 고정층, 유동층, 분류층의 세 가지 방식이 있는데, 이 중 분류층 가스화기는 100 μm 이하로 미분된 석탄을 사용한다. 가스화제로는 증기, 산소, 공기 등이 사용된다. 다른 방식에 비해 체류시간이 짧기 때문에 충분한 가스화를 위해서는 고온이 필요하다[1].

MHI 가스화기는 일본의 미쓰비시 중공업(Mitsubishi Heavy Industry)에서 개발한 분류층 방식의 상용 가스화기로서 공기 주입, 건식 석탄 공급, 상향유동 방식을 사용한다. 공기는 석탄과 함께 투입되며, 합성가스는 가스화기 상부의 사이클론으로 나가고 일부 회분은 용융 슬

래그 형태로 하부로 배출된다. 일반적으로 공기 주입 가스화기는 산소 주입 가스화기에 비해 저온에서 운전되기 때문에 탄소전환율이 낮다. 이를 해결하기 위해 2개 이상의 단을 두고 미연탄소(char)를 재공급하여 가스화효율을 높이는 방법을 사용한다.

MHI 가스화기에 대한 대표적 연구로는 Chen의 pilot scale(200 t/d) 해석으로서 혼합비 해석 모델의 영향에 대한 평가[2]와 가스화기 형상에 대한 영향 평가[3] 등이 있다. Kumar의 경우는 난류 모델의 영향에 대한 평가[4]를 진행하였다.

본 연구에서는 석탄 및 공기의 유량을 각 단으로 분배하는 비율이 변화함에 따른 가스화기 내의 열전달 및 연소 특성, 석탄의 가스화효율 등의 영향 분석을 수행하였다.

Fig. 1은 pilot scale MHI 가스화기(200 t/d) 형상을 나타낸 것이다[2]. 원통형의 가스화기에 버너가 3단으로 배치되어 있으며, 각 단의 버너는 4개씩 집선방향으로 설치되어 선회류를 형성한다. 1단 버너인 combustor burner에서는 석탄과 공기가 공연비 10(기준조건)으로 투입되어 석탄

* 성균관대학교 기계공학부

** 두산중공업 에너지전환시스템연구팀

† 연락처, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)299-4841

연소반응을 통해 가스화반응에 필요한 고온 분위기와 화학종들을 형성한다. 2단 버너는 char burner로서 미연 탄소(char)가 재투입된다. 3단 버너인 reductor burner에서는 석탄과 공기가 공연비 1(기준조건)의 연료 과잉 상태로 투입되어 가스화 된다. 벽면은 내화재 및 수냉식으로 구성되어있다. 해석을 위해 Fig. 1의 형상 중 4분원(quarter)에 대해 약 20만개의 육면체 셀로 격자를 구성하였다.

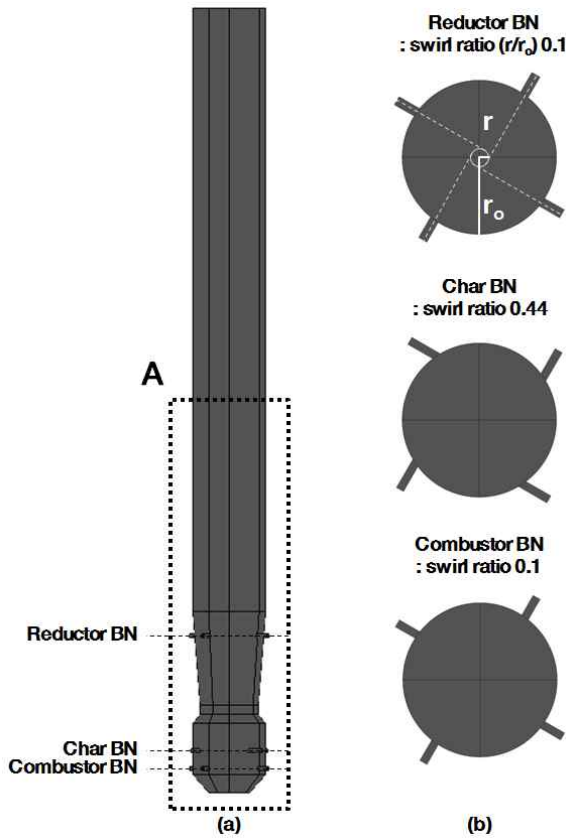


Fig. 1 Schematic diagram of 200 t/d pilot scale MHI gasifier. (a) Side view. (b) Top view of each burner.

Table 1은 사용된 석탄 탄종의 특성을 나타낸 것이며, 입자 크기 분포는 Table 2와 같다.

전산해석에 사용한 코드는 ANSYS Fluent (ver.14.5)이다. 유동 및 연소의 해석은 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존식과 함께 생성항으로서 난류, 복사, 가스반응 등을 고려하였다[5]. 총 9000개의 개별 미분단 및 char 입자의 거동은 Lagrangian method를 이용하여 연소반응, 열전달 등을 계산하였다. 난류 모델은 선회류에서 보다 높은 신뢰성을 보이는 SST k- ω model을 사용하였으며, 이 모델의 적합성은 Kumar의 선행연구[4]에서도 확인할 수 있다. 복사 모델은

구분종좌법(Discrete Ordinate, DO)을 사용하였다.

Table 1 Composition of Taiheiyu Bituminous coal

Parameters		Values
Proximate Analysis [mill-dry, wt%]	Moisture	5.3
	Volatile matter	46.7
	Fixed carbon	35.8
	Ash	12.1
Ultimate Analysis [daf, wt%]	C	77.6
	H	6.5
	O	13.9
	N	1.13
	S	0.22
HHV [kJ/kg]		27400

Table 2 Particle size distribution

particle size [μm]	4	10	20	40	100	150
ratio [%]	20	20	20	20	10	10

석탄 및 char의 조성과 탈휘발 모델은 PCCoalLab의 Flashchain[6]을 이용하여 계산한 후 User Defined Function (UDF)을 통해 적용하였다.

Table 3는 해석조건을 정리한 것으로서, 기준 조건인 Case 1에서 석탄의 유량을 변화(Case 2-(a),(b))하거나, 공기 유량을 변화(Case 3-(a),(b))시켰다. 두 번째 버너는 char burner로서, char 유량 1.112 kg/s, 공기 유량 4.708 kg/s으로 모든 해석조건에서 동일하다.

Table 3 Total flow rates of coal and air at burners in the simulation cases

[kg/s]	Combustor burner		Reductor burner		
	Coal	Air	Coal	Air	
Case 1	0.472	4.708	1.832	1.832	
Case 2	(a)	0.708	4.708	1.594	1.832
	(b)	0.104	4.708	2.198	1.832
Case 3	(a)	0.472	5.655	1.832	0.880
	(b)	0.472	3.785	1.832	2.750

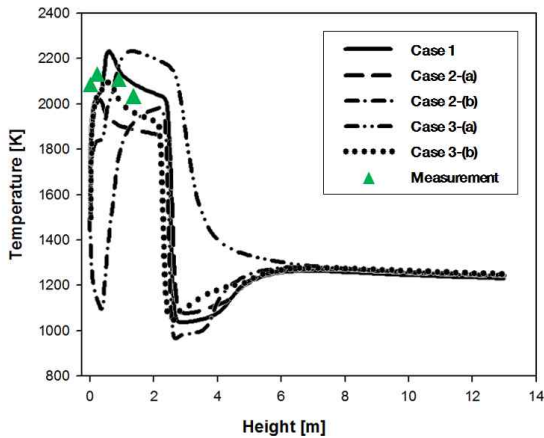


Fig. 2 Profiles of gas temperature along the centerline.

Fig. 2는 해석결과 각 Case별 중심선의 온도 분포와 실제 측정값[2]을 나타내는 그래프이다. 온도분포의 전체적인 경향은 하단부의 combustor burner에서 고온부가 발생하고, reductor burner에서 저온의 석탄과 공기가 공급됨에 따라 온도가 급락하는 모습을 보였다. 그 후에는 반응에 따라 온도가 소폭 상승하고, reductor wall의 수냉벽에 의해 온도가 서서히 하강하는 경향을 보인다.

기준조건으로 해석한 Case 1의 경우 측정값에 근접한 결과를 보였다. 하부에 석탄이 과다공급된 Case 2-(a)의 경우는 combustor burner 부근의 온도가 낮은 모습을 보이는데, 이는 공기가 부족한 상태로 흡열반응인 가스화반응이 더 활발히 일어나기 때문이다. Case 2-(b)는 combustor burner에 석탄량이 부족하여 연소반응이 많이 일어나지 않아 하부의 온도가 상대적으로 저온으로 나타난다. Case 3-(a)의 경우는 고온부 영역이 크게 확대되면서 위쪽으로 상승하는데, 이는 combustor burner의 공기 유량이 많아 유속이 빠르고, reductor burner에서는 유량이 적어 선회가 부족하기 때문이다. Case 3-(b)는 하단부에서 산소의 부족으로 온도가 충분히 상승하지 못하는 결과를 보였다.

Fig. 3은 가스화기 중앙단면에서의 온도분포를 나타낸 것으로, Fig. 2의 그래프와 동일한 경향을 확인할 수 있다. 전체형상 중 하부 절반(Fig. 1의 A)만을 나타냈으며, 상부는 서서히 냉각되는 구간으로서 온도 변화가 크지 않다. 특기할 사항은 Case 2-(b)의 하부 벽면 쪽의 고온과 Case 3-(a)의 중앙 고온부로서, 고온부가 가스화기 내벽에 닿아있거나 지나치게 집중되어 있으면 기기의 손상을 유발할 수 있으므로 바람직하지 않다.

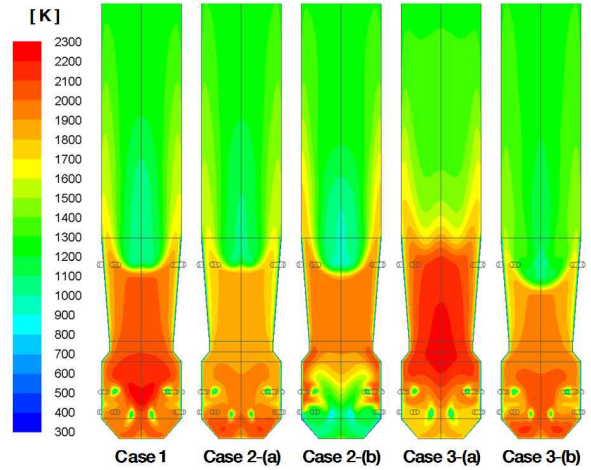


Fig. 3 Contours of gas temperature.

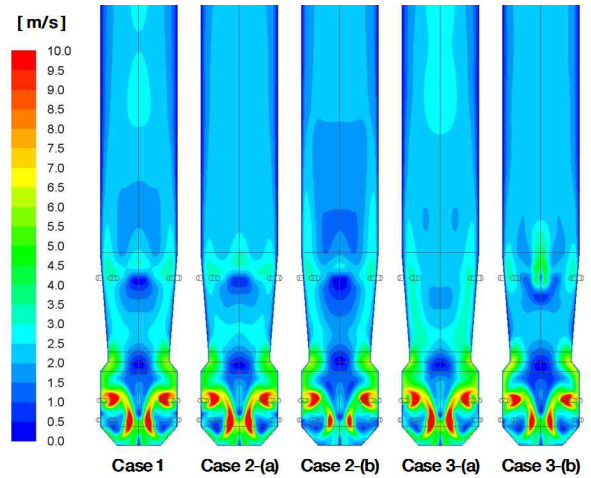


Fig. 4 Contours of gas velocity.

Fig. 4 역시 하부 구간(A)의 가스화기 단면에서 속도 분포를 나타낸 것이다. 버너로 투입되는 부분에서 고속이 나타난다. Reductor burner 하단부에 모든 Case에서 공통적으로 생성되는 저속영역은 combustor zone으로부터 상승하는 입자들과 reductor burner에서 분사된 입자들이 충돌하면서 만들어진다. Case 3-(a)의 경우 combustor에서 강한 선회류가 형성되면서 원심력에 의해 reductor 벽면으로 고속영역이 형성된다. 이는 벽면 슬래그층으로의 좌 부착이나 벽면의 마모가 과도할 수 있어 적절하지 않다고 판단된다.

Table 4는 출구가스 조성 및 탄소전환율을 비교한 것이다. 온도분포와 속도분포의 확인한 차이에도 불구하고, 출구가스 조성은 Case에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 또한 그 결과는 측정값[2]과 큰 차이가 없었다. 특히 Case 2-(b)와 같이 combustor에서 석탄 유량 조건을 크게 변

화시켜도 합성가스 조성 및 탄소전환율이 크게 변화하지 않았다. Case 2-(a)와 Case 3-(b)에서 CO₂ 대비 CO의 농도가 다소 높으므로 연소 단계의 온도가 상대적으로 고르게 분포하면 합성가스 생산량을 높이는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

Table 4 Syngas composition at the reactor exit

mol.%	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	CCR
Case 1	21.6	9.8	6.6	1.0	95.8
Case 2	(a) 22.6	9.9	6.0	1.0	95.7
	(b) 21.4	9.9	6.9	0.8	96.4
Case 3	(a) 21.1	9.9	7.1	0.7	96.6
	(b) 22.7	9.8	5.9	1.1	95.8
Measured	23.3	10.1	4.7	-	

※ CCR : Carbon Conversion Rate [%]

본 연구에서는 MHI 석탄 가스화기에서 석탄 및 공기의 배분에 따른 가스화 특성 및 성능을 전산유동해석을 이용하여 분석하였다. 합성가스 조성 및 탄소전환율은 석탄 및 공기 배분에 따라 민감하게 변하지 않지만, 온도 및 속도 분포는 combustor에서 크게 변하였다. 특히 선회류의 발생에 따라 combustor 상부의 목 부분에서 벽면 근처 온도 및 속도 분포는 슬래그 거동이나 좌의 부착 등 가스화기 운전성능에 큰 영향을 줄 소지가 있어 중요한 특성 인자로 판단된다. 이와 같은 결과는 새로운 가스화기 개발에 참고할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)과 두산중공업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(2011951010 001A)

참고 문헌

- [1] Higman C, van der Burgt M, "Gasification", 2e, New York, Elsevier, 2008.
- [2] Chen C, Horio M, Kojima T, "Numerical simulation of entrained flow coal gasifiers. Part I: modeling of coal gasification in an entrained flow gasifier", Chemical Engineering Science, Vol. 55, 2000, pp. 3861–3874.
- [3] Chen C, Horio M, Kojima T, "Use of numerical modeling in the design and scale-up of entrained flow coal gasifiers", Fuel, Vol. 80, 2001, pp. 1513–1523.
- [4] Kumar M, Ghoniem AF, "Multiphysics simulations of entrained flow gasification Part II: Constructing and validating the overall model". Energy Fuel, Vol. 26, 2012, pp. 464–479.
- [5] ANSYS FLUENT 12.1 User Guide, Canonsburg, PA, United States, 2009.
- [6] S. Niksa, PC Coal Lab version 4.1: user guide and tutorial. CA: Niksa Energy Associates LLC, Belmont, 1997.