3MW$_{th}$급 순환유동층 바이오매스 가스화공정 개발

이정우* **・송재헌***・이동윤***・최영태**・양원 * **・이은도* **†

Development of 3MW$_{th}$ Circulating Fluidized Bed Biomass Gasifier

Jeungwoo Lee*,**, Jaehun Song*** , Dongyoon Lee*** , Youngtai Choi**,
Won Yang*,** , Uendo Lee*,**†

ABSTRACT

Circulating Fluidized Bed (CFB) is a technically and economically proven technology for boiler systems and large CFB coal boilers are making inroads into the domestic power boiler market. For biomass gasification, it is also considered as a very promising technology for commercial. Due to the lack of experiences of a large scale CFB gasifier, however, any large scale CFB gasifiers are hard to in Korea in spite of fast-growing demand of domestic market. In this study, a 3 MW$_{th}$ CFB gasifier was developed for biomass gasification. The CFB gasifier consists of interconnected fast and bubbling fluidized bed reactors including unique features for in-situ tar removal. Various numerical and experimental approaches will be presented such as basic modeling works, investigation of hydrodynamics with a cold model, computational particle fluid dynamics and experiments in the 3 MWth gasifier.

Key Words : Circulating fluidized bed (CFB), Biomass gasification, Cold flow model, Syngas production, Computational particle fluid dynamics (CPFD)

바이오매스의 가스화는 기술적 및 경제적으로 입증된 기술 중의 하나이다[1]. 또한, 유동층을 이용한 바이오매스 가스화기술은 유럽을 중심으로 활발하게 연구 및 상용화가 진행 중이며 현재까지 전 세계적 기술개발 수준을 고려할 때 실질적으로 상용화에 매우 가까운 가능성을 보여준다[2]. 하지만, 국내의 경우 발전 및 산업용으로 활용할 수 있는 상용급 수준의 유동층 바이오매스 가스화 기술을 보유하고 있지 않은 것이 현실이다. 그 주요 요인은 대용량 유동층 가스화기에 대한 설계, 제작 및 운전기술에 대한 know-how가 축적되어 있지 않은 점을 들 수 있으며 특히, 바이오매스 경우 석탄과 비교할 때 에너지밀도, 성상 및 수분 함량 등에 현격한 차이가 있기 때문에 석탄 유동층 연소기 또는 가스화기와는 설계 및 운전이 서로 상이하다는 점을 들 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 가스화로 발생된 생성가스의 발전 (power generation) 및 혼소 (co-firing)를 목적으로 목질계 바이오매스를 대상으로 한 대용량 순환 유동층 가스화기의 개발과 관련된 일련의 과정들을 소개하고자 한다. 본 연구를 통해 개발 중인 유동층 가스화기의 기본공정개념은 Fig. 1과 같으며, Fig. 2는 현재 제작 및 시운전 중인 유동층 가스화기의 전경을 나타낸다. 연소로와 가스화로가 분리된 이중 유동층 구조를 특징으로 하며, 연소기의 경우 순환유동층, 가스화기의 기포유동층 형태로 운전이 된다. 주 연료는 가스화기로 투입된다. 가스화기 내에서 가스화반응 이후 미 반응된 촤는 층물질과 함께 하부루프실을 통해 연소로로 이송되어 연소되며, 연소로에서 가열된 층물질은 다시 순환하여 상부루프실을 통해 가스화기로 공급되어 가스화 반응의 열원으로 사용된다. 특히, 생성가스 광범위한 적용을 위해서 유동화제를 공기 및 스팀을 동시에 사용할 수 있도록 하였으며, 가스화기로부터 발생된 생성가스와 타르 성분을 연소로에서 in-situ 방식으로 개질할 수 있도록 생성가스의 경로를 연소기의 freeboard 쪽으로 변경 가능하도록 한 것이 특징이다. 유동층

* UST 청정공정 및 시스템공학
** 한국생산기술연구원 에너지시스템연구그룹
*** ㈜신텍
† 연락저자, uendol@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8574 FAX : (041)-589-8323

가스화기의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

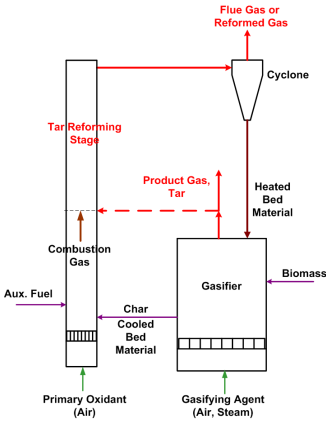

Fig. 1 Basic concept of 3MW$_{th}$ fluidized bed gasification process.

Fig. 2 Front view of 3MW$_{th}$ fluidized bed gasifier (1. Combustor, 2. Gasifier, 3. Lower loopseal, 4. Upper loopseal, 5. Cyclone, 6. Plenum and Auxiliary burner).

본 시스템은 층물질이 두 개의 반응기 간에 순환하는 시스템이기 때문에 예비설계 시 가장 주안점을 둔 점은 두 가지로 축약할 수 있다. 첫째는 combustor와 gasifier간의 층물질의 순환에 의한 열수지(heat balance) 이며, 둘째는 수력학적 특성들을 고려한 고체순환량 (solid circulation rate)의 예측이다.

따라서, 설계과정에서 보다 정확한 공정해석을 위한 바이오매스 가스화 예측모델을 본 연구를 통해 개발하였다. 고체연료 가스화 시스템의 정상상태 공정해석 및 예비설계 시 주로 사용되는 화학평형계산은 반응기의 형상이나 반응 시간에 대한 변수를 고려하지 않는 편의성 때문에 생성 가스조성의 빠른 예측에 주로 이용되어 왔다.

Table 1 Specification of 3MW$_{th}$ fluidized bed gasifier

Feedstock		Woody biomass
Capacity		3 MW$_{th}$
Dimension	Gasifier	1.0m(W)×1.5m(L)×2.5m(H)
	Combustor	ϕ0.4m×17.5m
Fluidization velocity	Gasifier	0.4-0.7 (4-7 Umf)
	Combustor	4-5 m/s
Bed material		Silica Sand, 380㎛

하지만, 바이오매스 가스화 공정에 화학평형계산을 적용할 경우 주요 합성가스 성분인 H_2및 CO의 수율이 과대평가되거나 CH_4 및 타르의 경우 그 수율이 과소평가되는 것이 일반적이며 이는 시스템효율 평가 및 예비설계에 있어 문제가 될 수 있는 부정확한 정보를 제공하게 된다. 따라서 본 연구에서의 예측모델은 Fig. 4와 같이 크게 탈휘발부, 휘발분 균질반응부 및 촤의 가스화반응부의 3부분으로 나누었다. 첫째 단계인 탈휘발모델은 다양한 종류의 바이오매스와 열분해 조건을 토대로 개발된 반경험적 열분해 가스 조성예측모델[3]을 사용하여 타르를 포함한 탈휘발가스의 조성을 예측하였으며, 다음단계인 휘발분의 균질반응부에서는 앞단계에서 발생한 탈휘발가스와 가스화제의 연소 또는 가스화 반응을 고려하였다. 마지막 단계인 균질반응부에서는 생성된 가스와 촤의 가스화반응을 예측하게 되는데 이때 반응기 내부에서의 가스체류시간을 가정한 후, 촤가스화 반응에 영향을 주는 주요 반응 속도식을 계산에 적용하였다. 예측모델은 우드칩과 스팀을 각각 연료 및 가스화제로 하는 기존 연구의 실험결과를 통해 검증하였다. 그 결과, 기존 실험 결과를 적절하게 예측하고 있음을 확인 하였으며, 더불어 반응온도 및 스팀/바이오매스 비율 등의 민감도 분석을 통해 예측모델이 실제적인 거동과 유사함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 모델의 정확성을 높이기 위해서는 대상 연료 및 가스화 공정의 특징에 따른 반응 조건의 설정이 매우 중요하며 예를 들어 휘발성분이 대부분을 차지하고 있는 바이오매스의 경우 탈휘발가스의 조성모델을 실제 실험 결과를 반영하여 수립하고, 가스화기의 형상에 따른 내부거동을 고려한 수력학 및 열전달 모델이 함께 반영될 경우 더욱 향상된 예측 결과를 도출할 수 있을 것으로 전망한다.

수력학적 안정성을 가장 잘 파악할 수 있는 척도는 전체시스템의 pressure loop가 적절하게 형성이 되는지 이며, 충분한 외부 고체순환량 (external solid circulation rate)으로 combustor

에서 가열된 층물질이 원활하게 gasifier로 공급되어 가스화의 열원으로 공급될 수 있는지가 관건이다.

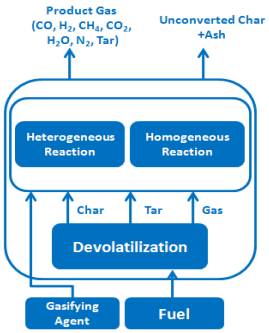

Fig. 3 Outline of reaction model for 3MW$_{th}$ fluidized bed gasifier.

3MW$_{th}$급 순환유동층 가스화기의 운전 안정성 확보하고 수력학적 문제점과 해결방안을 도출하기 위하여 실제장치를 상사법칙에 의해 축소된 냉간시험장치 및 상용 CPFD 소프트웨어 인 Barracuda^{TM}를 이용하여 운전변수인 유동화 기체유량, 고체량 (solid inventory) 등에 따른 가스화기 내에서의 고체-기체의 수력학적 거동을 살펴보았다. 특히, 냉간시험장치는 실제 열간 장치의 1/10 크기로 flexiglas로 축소·제작하였는데 사용된 층 물질 및 유동화제는 열간 장치의 운전 조건인 평균입자크기가 380㎛인 silica sand 및 700-900℃의 내부반응온도를 고려하고, 상사법칙 (Glicksman' scaling law)[4]을 적용하여 각각 bronze 입자 및 상온의 air로 결정하고 적용하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 실제장치의 1/10로 축소된 냉간유동장치를 나타내며, Fig. 5는 Barracuda^{TM}를 활용한 실규모 CPFD 해석의 결과이다.

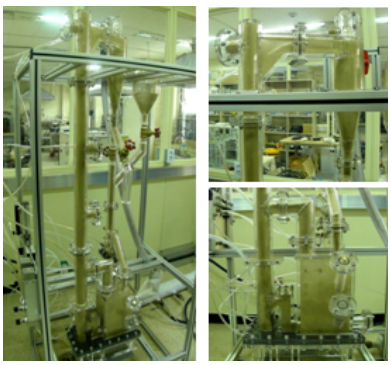

Fig. 4 Cold flow model for 3MW$_{th}$ fluidized bed gasifier.

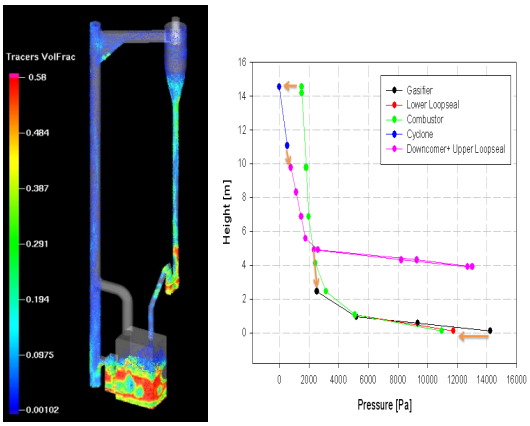

Fig. 5 CPFD analysis results for 3MW$_{th}$ fluidized bed gasifier.

후 기

본 연구는 지식경제부 산하 산업기술진흥원의 국제공동기술개발사업의 일환(과제번호: GT-2009-BI-IN-0036)으로 수행되었으며, 전체 연구 과정에서 많은 도움을 주신 Chalmers University of Technology의 Bo Leckner 교수님께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Moon, J. H., Lee, J. W., Lee, U. D., "Economic analysis of biomass power generation schemes under renewable energy initiative with Renewable Portfolio Standards (RPS) in Korea" Bioresour. Technol.,Vol.20, 2011, pp. 9550-9557.

[2] Hofbauer, H., Rauch, R., Bosch, K., Koch, R., Aichernig, C., "Biomass CHP plant Guessing - a success story",In: Bridgwater, A.V. (Ed.): Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, CPL Press, Newbury, UK, 2003, pp. 527-536.

[3] Thunman, H., Niklasson, F., Johnsson, F. and Leckner, B., "Composition of volatile gases and thermochemical properties of wood for modeling of fixed or fluidized beds", Energy Fuels, Vol. 15, 2001, pp.1488-1497.

[4] Glicksman, L. R., Hyre, M. R., Farrell, P. A.,"Dynamic similarity in fluidization", Int. J. Multiphase Flow, Vol.20, 1994, pp. 331-386.