

## 상용모사기를 이용한 로토석탄의 분할유동층 가스화기 가스화 특성 모사

박영철 · 문종호 · 이승용 · 이동호 · 진경태<sup>†</sup>

한국에너지기술연구원 온실가스연구단  
305-343 대전광역시 유성구 가정로 152  
(2011년 11월 17일 접수, 2011년 12월 20일 채택)

### The Computer-Aided Simulation Study on the Gasification Characteristics of the Roto Coal in the Partitioned Fluidized-Bed Gasifier

Young Cheol Park, Jong-Ho Moon, Seung-Yong Lee, Dong-Ho Lee and Gyoung Tae Jin<sup>†</sup>

Greenhouse Gas Research Department, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea  
(Received 17 November 2011; accepted 20 December 2011)

#### 요 약

본 연구에서는 상용모사기를 이용하여 분할유동층 가스화기에서 로토석탄의 가스화 특성 모사를 수행하였다. 분할유동층 가스화기는 가스화영역에서 일어나는 연소반응과 가스화반응(발열반응과 흡열반응)을 각각 다른 영역에서 일어날 수 있도록 반응기 내부를 분할한 가스화기이다. 분할유동층 가스화기의 주요 개념은 가스화에 요구되는 열을 연소영역에서 생성된 열을 이용하여 공급하는 것으로 가스화기 내부에서의 부분 연소를 억제하고, 격벽을 통한 열전달과 열매체의 이동을 통해 공급하는 것이다. 분할유동층 가스화기 모델은 열분해, 화 가스화, 타르/오일 가스화, 화 연소반응으로 4개의 영역을 가지도록 구현하였다. 열분해의 경우, 대상 석탄을 반응온도, 반응가스, 석탄주입량을 변화시켜 실험을 수행하여 실험데이터로부터 correlation 모델을 작성하였다. 가스화는 Gibbs free energy를 최소화하는 모델을 이용하고 화 연소영역은 combustion 모델을 이용하였다. 분할유동층 가스화기 모사결과를 비교하기 위해 우선 단일영역 가스화기 모사를 수행하였다. 단일영역 가스화기의 경우 석탄열분해 반응기와 석탄가스화 반응기 두 개로 구성되어 반응모델은 분할유동층 가스화기와 일치한다. 분할유동층 가스화기 모사 결과, 냉가스효율은 84.4%로 단일영역 가스화기와 유사한 결과를 얻었으며 합성가스의 조성은  $H_2$ 와  $CH_4$ 이 다소 증가하고  $CO$ 와  $CO_2$ 가 다소 감소한 것을 확인하였다. 모델 검증에 위해 10건의 단일영역 가스화 실험에 대하여 모사를 수행하였다. 모사를 통해 얻어진 합성가스의 조성은  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ 의 경우 실험결과와 모사결과가 거의 일치하는 반면  $H_2$ 의 경우 모사결과가 실험결과와 비교하여 다소 높은 값을 갖는 것을 확인하였으나 경향은 실험결과와 유사함을 확인하였다. 탄소전환율의 경우, 모델결과가 실험결과와 비교하여 높은 전환율을 보이는 것을 알 수 있으며 이는 모사에 사용된 가스화 모델이 평형반응기로 반응기에서의 체류시간과 접촉시간이 실제 실험과 차이가 있기 때문으로 파악된다.

**Abstract** – In this study, we used a commercial simulator to investigate the gasification characteristics of Roto coal in the partitioned fluidized-bed gasifier, which consists of 4 parts such as coal pyrolysis, char gasification, tar/oil gasification and char combustion. The heating medium was exchanged between the combustion part and the gasification part in order to supply the energy needed for pyrolysis and gasification. The correlation model from experimental data in relation to the reaction temperatures, the reaction gases and the coal feed rates was derived for the coal pyrolysis. The equilibrium model was used for the gasification and the combustion model for the char combustion. In order to compare the reaction behavior of the partitioned fluidized-bed gasifier, the single-bed gasifier was also simulated. The cold gas efficiency of both partitioned fluidized-bed gasifier and single-bed gasifier was almost the same. The  $H_2$  and  $CH_4$  contents of the syngas in the partitioned fluidized-bed gasifier slightly increased and the  $CO$  and  $CO_2$  contents slightly decreased, compared with the single-bed gasifier. In order to verify the model, ten cases of the single-bed gasification experiment have been simulated. The contents of  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  in the syngas from the simulation corresponded with the experimental data while those of  $H_2$  was slightly higher than experimental data, but the tendency of  $H_2$  content in the syngas was similar to the experiments. In the coal conversion, the simulation results were higher than the experiments since equilibrium model was used for the gasification so that the residence time and contact time in the model is different from the experiments.

**Key words:** Partitioned Fluidized-bed, Gasification, Roto Coal, Simulation

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: gtjin@kier.re.kr

\*이 논문은 서울과학기술대학교 손재익 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

## 1. 서 론

가스화는 탄소질 물질을 합성 가스로 전환하는 공정을 말한다. 일반적으로 가스화는 건조, 열분해, 연소 및 환원의 네 가지 과정으로 나누어질 수 있으며 전체적으로 가스화 반응이 흡열반응이기 때문에 가스화 영역에서의 부분 연소는 필수적이다. Jin 등[1,2]은 건조, 연소, 가스화 및 연소의 네 개의 영역으로 나누어 진 분할유동층 가스화기(partitioned fluidized-bed gasifier)를 제안하였다. 분할유동층 가스화기의 주요 개념은 가스화에 요구되는 열을 연소영역에서 생성된 열을 이용하여 공급하는 것으로 가스화기 내부에서의 부분 연소를 막고, 격벽을 통한 열전달과 열매체의 이동을 통해 공급하는 것이다.

분할유동층 가스화기는 Fig. 1과 같이 크게 가스화영역과 연소영역으로 구성된다. 가스화영역은 크게 석탄 열분해 영역, 화 가스화 영역, 타르/오일 가스화 영역으로 분류할 수 있다. 각 부 영역은 주입하는 반응가스의 유량 및 성분을 제어하여 반응 영역의 제어가 가능하고, 이로부터 조업조건과 반응 영역에서의 생성물의 가스 조성이 예측가능하다. 또한, 연소영역에서의 연소열 제어를 통해 두 영역 간 열 및 물질 전달의 제어가 가능하다.

연소영역에 공기를 사용하는 경우에도 가스화 영역에서 공기 중의  $N_2$ 에 의해 희석되지 않은 고발열량의 합성가스의 생산이 가능하다. 이를 위해서는 분할영역 간 가스의 혼합은 최소화시키고 열매체인 고체입자의 혼합은 최대화를 시키는 것이 중요하다. Jin 등[3]은 세 개로 분할된 반응기에서 가스혼합 특성과 고체입자 혼합특성을 보고하였다. 가스의 혼합은 각 분할영역으로 주입되는 가스의 유속을 조절하여 최소화가 가능하고 고체입자의 혼합은 각 분할영역에 가스를 주입함과 동시에 연속흐름 교반탱크 반응기(continuously

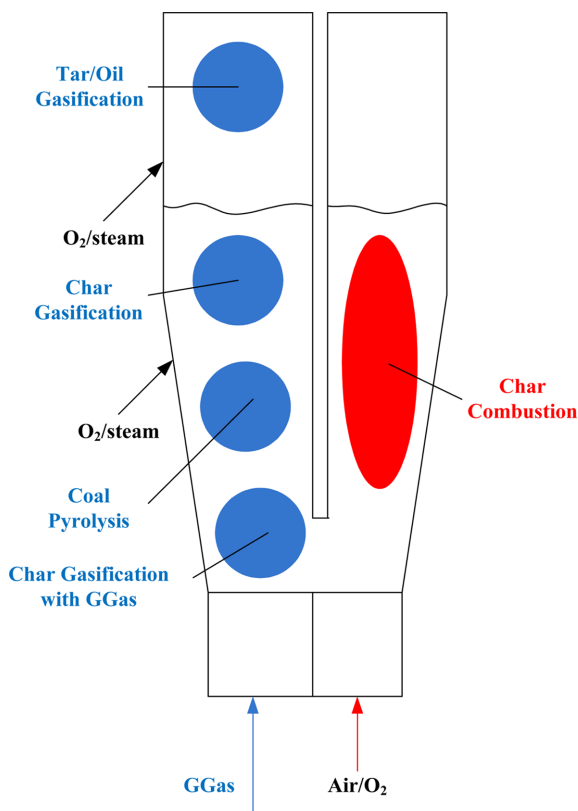


Fig. 1. The concept of the proposed partitioned fluidized-bed gasifier (GGas: Gasified-gas).

Table 1. The proximate and ultimate analysis of the Roto coal

Proximate Analysis		Ultimate Analysis	
Moisture	2.16	C	68.54
Fixed Carbon	51.4	H	4.6
Volatile Matter	39.97	N	1.46
Ash	6.47	O	18.66
		S	0.27
HHV (kcal/kg)		6150	

stirred tank reactor) 형태를 보였다.

본 연구에서는 상용모사기를 이용하여 분할유동층 가스화기에서의 로토석탄의 가스화 특성을 예측하였고, 분할유동층 가스화기에서의 성능을 파악하기 위해 단일반응기 가스화 실험 및 모사를 수행하여 실험결과와 모사결과를 비교 분석하였다.

## 2. 실 험

### 2-1. 원료물질

본 연구에서의 대상 석탄은 로토석탄으로 선정하였다. 로토석탄의 공업분석 및 원소분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

### 2-2. 단일영역 가스화 실험

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 석탄가스화 실험은 분할 유동층에서 실험을 수행하였다. 운전압력 6 atm, 설계 압력 10 atm으로 설치하였으며, 단일용재(castable)를 이용하여 열방출을 최소화하였다. 가압조건에서 석탄 및 모래 투입을 위해 lock-hopper 및 screw feeder를 설치하였다. 석탄 투입량은 회전수를 조절할 수 있도록 하였다. 생성된 기체는 riser를 통과하며, 일부는 생성물(product)로 유량을 측정된 뒤 버너를 이용하여 연소 배출하도록 하였으며, 나머지 일부는 재순환(recycling)시켜 반응기로 순환시켰다. Feeder, burner, metal filter, input flow rate, 각종 밸브 등은 PLC를 이용한 remote control이 가능하게 하였으며, 모니터링해야 할 온도, 압력, 차압, 농도 등은 실시간 data acquisition이 되도록 하였다. 투입 flow rate는 8대의 MFC (Bronkhorst사, 미국)와 recycling compressor를 이용하여 조절하였으며, 배출 flow rate는 가스화기 후단과 연소기 후단에 각각 orifice flow meter를 설치하여 측정하였다. 압력은 MFC를 이용한 도입 유량 및 후단의 control valve를 이용하여 조절하였다. 석탄 및 모래 hopper와 반응기간의 압력차를 최소화하기 위해, 반응기로 배관을 설치하여 압력평등화(pressure equalization)를 시켰다. 가스화기 및 연소기를 통해서 나오는 기체조성은 IR(ABB 사, 스위스)을 이용하여 실시간 분석하였다.

본 연구에서 단일영역 가스화 운전은 분할 유동층 가스화기를 이용하여 수행하였다. 연소화기의 배출부를 막아 연소기의 solid height는 파티션 아래로 유지되며, 가스화기의 solid height는 상대적으로 높아짐으로써, 일반 유동층 가스화기와 동일한 거동을 하게 된다. 특히, 도입되는 모든 기체는 가스화기를 통해서만 배출되게 된다.

## 3. 모 사

### 3-1. 모델 구현

본 연구에서는 상용모사기인 아스펜 플러스를 이용하여 분할유동층 가스화기 모델을 구현하였다. 상용모사기를 이용하여 가스화기를

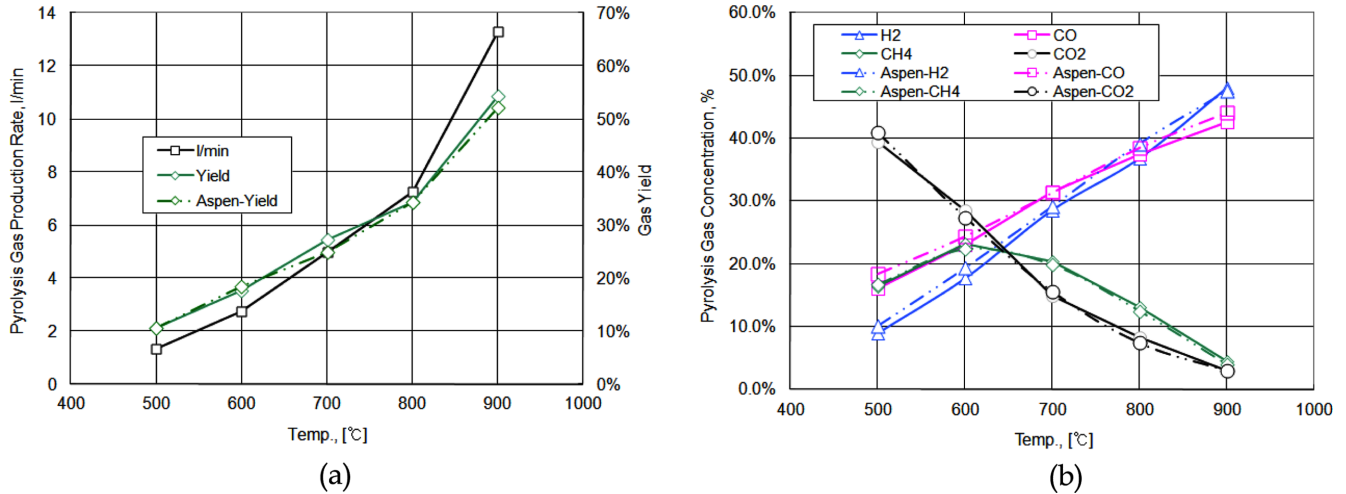


Fig. 2. The pyrolysis results of correlation model and experiments of the Roto coal. (a) Pyrolysis gas yield in relation to the pyrolysis temperatures. (b) Pyrolysis gas concentration in relation to the pyrolysis temperatures.

모델링하기 위해서는 우선 열역학모델 선정, 반응모델 선정 및 모사를 위한 가정 등이 필요하다. 열역학 모델로는 Peng Robinson 모델을 사용하고 석탄 및 회재의 엔탈피모델로는 HCOALGEN, 석탄 및 회재의 밀도모델은 DCOAIGT, 석탄의 고위발열량은 분석값을 이용하였다. 반응모델로는 석탄열분해반응은 Yield Reactor, 석탄열분해반응은 실험결과 값을 이용한 상관모델(correlation model), 석탄가스화반응은 Equilibrium Reactor, 촉 연소반응은 Combustion Reactor를 사용하였다.

석탄열분해반응의 경우, 상용모사기에 적절한 모델이 없기 때문에 로토석탄을 이용하여 수행된 열분해 실험결과를 이용하여 상관모델을 석탄열분해반응에 사용하였다. 반응기의 온도를 500, 600, 700, 800, 900 °C로 변경하고 열분해가스를 재순환하여 실험이 수행되었으며 열분해 가스량과 열분해가스의 조성 결과를 바탕으로 상관모델

을 작성하여 모델링하였다. Fig. 2는 로토석탄의 열분해 실험결과와 모델에 의한 결과를 나타냈으며 모델이 실험값을 잘 구현하는 것을 확인할 수 있다.

설정된 열역학모델 및 반응모델을 기초로 분할유동층 가스화기를 구성하면 Fig. 3과 같다. 최초 석탄이 투입되는 영역은 석탄열분해 영역이며 이 영역에서 생성된 가스 성분은 상부의 타르/오일 가스화 영역으로 주입되고 고형물질은 아래 촉 가스화영역으로 이송된다. 열분해와 가스화영역에 필요한 열량만큼 촉 연소영역에서 발생되며, 최종 생성된 합성가스는 촉 가스화영역으로 재순환되는 양을 제외하고는 후단 설비로 배출된다. 가스화영역에 필요한 스팀과 산소는 각 영역의 반응온도를 유지하는데 필요한 양이 공급되도록 모델을 구성하였다.

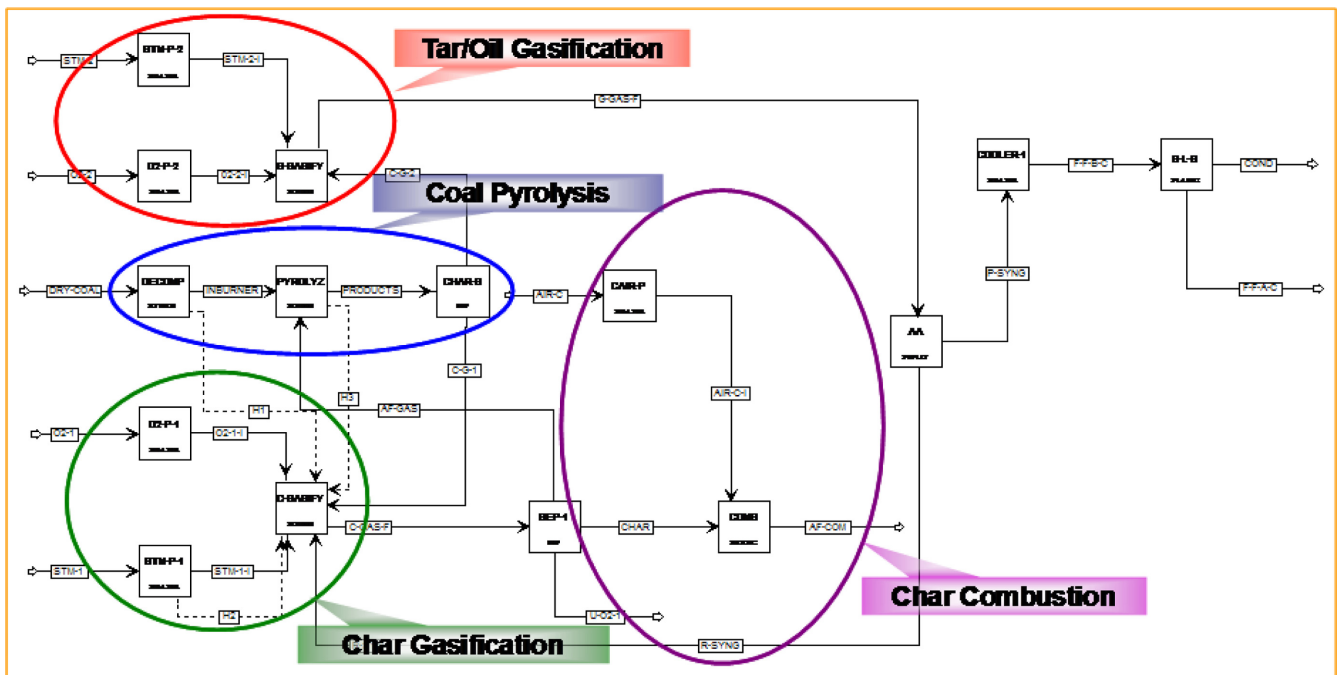
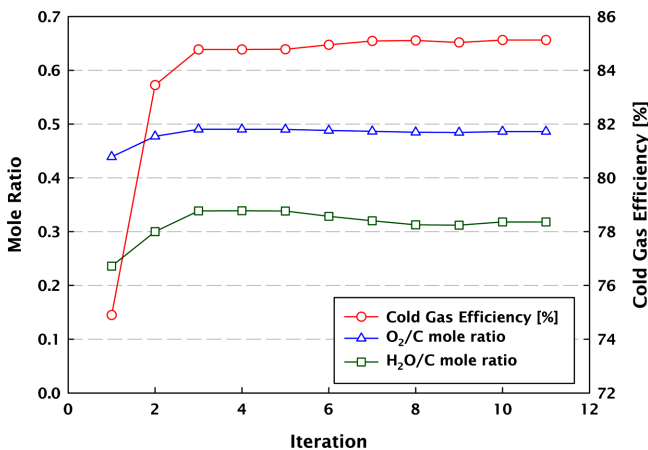


Fig. 3. Simulation flowsheet of the partitioned fluidized-bed gasifier.

**Table 2. Operating conditions and reactor size of the partitioned fluidized gasifier**

Conditions	Values
Pressure (atm)	1~6
Temperature (°C)	800~900
O <sub>2</sub> /C Ratio (-)	0.6~0.8
Reactor size	
- Gasifier	18 cm (w) × 9 cm (d)
- Combustor	6 cm (w) × 9 cm (d)
- Height	150 cm (h)
Coal particle size	< 1.0 mm
Bed material	river sands

**Fig. 4. The optimization results of the single-bed gasification.**

### 3-2. 모사 결과

#### 3-2-1. 단일영역 가스화기 모사

분할유동층 가스화기 모사결과와 비교하기 위해 우선 단일영역 가스화기 모사를 수행하였다. 단일영역 가스화기의 경우 석탄분해 반응기와 석탄가스화 반응기 두 개로 구성되며 반응모델은 분할유동층 가스화기와 일치한다. 석탄은 동일하게 로토석탄을 사용하였으며 냉가스효율을 최대화할 수 있는 조업조건을 구하여 모사를 수행하였으며 석탄공급량은 1 ton/day, 반응온도와 압력은 각각 950 °C, 30 atm으로 모사하였다. 냉가스효율을 최대화하기 위한 조업변수로는 O<sub>2</sub>/C 몰 비와 H<sub>2</sub>O/C 몰 비로 설정하였으며 상용모사기에 내장된 최적화 툴을 이용하여 최적화를 수행하였다. Fig. 4에 최적화 결과를 나타내었으며 O<sub>2</sub>/C 몰 비 0.48, H<sub>2</sub>O/C 몰 비 0.32에서 냉가스효율 85.2%로 최대값을 나타내었다. 최적운전 상태에서 생성된 합성가스 유량 및 조성을 살펴보면 Table 3과 같다. 합성가스 유량은 86 Nm<sup>3</sup>/h 정도이며 H<sub>2</sub>와 CO의 농도는 각각 28, 46 vol.% 정도임을 확인하였다.

#### 3-2-2. 분할유동층 가스화기 모사

구성된 분할유동층 가스화모델을 모사하기 위한 전제조건은 다음과 같다. 석탄공급량은 1 ton/day로 설정하고 타르와 오일은 생성량 예측이 어려워 고려하지 않았으며 열분해 생성되는 최는 100% 탄소로 가정하고 화 연소영역에는 순수한 O<sub>2</sub>만 공급되는 것으로 모사하였다. 석탄열분해, 화 가스화, 화 연소영역의 반응온도와 압력은 모두 950 °C, 30 atm으로 모사하였다. 모사결과 주 조업변수인 O<sub>2</sub>/C 몰 비

**Table 3. The simulation results of the single-bed gasification**

Item	Unit	Values	
Temperature	°C	950	
Pressure	atm	30	
		wet-basis	dry-basis
Volume Flow	Nm <sup>3</sup> /h	86.25	78.00
Composition	Vol.%		
H <sub>2</sub> O		9.60%	—
N <sub>2</sub>		0.60%	0.60%
H <sub>2</sub>		28.40%	31.40%
CO		47.60%	52.70%
CO <sub>2</sub>		11.00%	12.20%
CH <sub>4</sub>		2.70%	3.00%
H <sub>2</sub> S		0.10%	0.10%

**Table 4. The simulation results of the partitioned fluidized-bed gasification**

Item	Unit	Values	
Temperature	°C	950	
Pressure	atm	30	
		wet-basis	dry-basis
Volume Flow	Nm <sup>3</sup> /h	77.92	70.36
Composition	Vol.%		
H <sub>2</sub> O		9.70%	—
N <sub>2</sub>		0.60%	0.66%
H <sub>2</sub>		36.80%	40.75%
CO		40.50%	44.85%
CO <sub>2</sub>		7.40%	8.20%
CH <sub>4</sub>		4.90%	5.43%
H <sub>2</sub> S		0.10%	0.11%

는 0.38, H<sub>2</sub>O/C 몰 비는 0.43으로 일반 가스화기와 비교하여 O<sub>2</sub>는 조금 들어가는 반면, H<sub>2</sub>O가 많이 들어가는 것으로 나왔다. 이 경우 냉가스효율은 84.4%로 일반 가스화기와 유사한 결과를 얻었으며 합성가스의 조성은 Table 4와 같이 H<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>이 다소 증가하고 CO와 CO<sub>2</sub>가 다소 감소한 것을 확인하였다. 이는 H<sub>2</sub>O 주입량이 증가하였기 때문이며 분할유동층 가스화기의 특징인 CO<sub>2</sub> 저감 부분이 가능하다는 것을 확인하였다. 일반 가스화기와 분할유동층 가스화기 모사를 통한 합성가스의 조성을 바탕으로 발열량을 계산하면 일반 가스화기는 2,530 kcal/Nm<sup>3</sup>이고 분할유동층 가스화기는 2,780 kcal/Nm<sup>3</sup>으로 분할유동층 가스화기에서 생성된 합성가스가 조금 더 높은 발열량을 갖는 것을 확인할 수 있다.

**Table 5. The experimental lists of the single-bed gasification**

Experimental lists	Coal feeding rate (kg/h)	Reactor temperature (°C)	Reactor pressure (atm)
No. 1	7.4	791	1.8
No. 2	12.0	788	1.8
No. 3	10.0	908	2.0
No. 4	10.0	907	3.0
No. 5	15.0	931	3.0
No. 6	10.0	912	2.0
No. 7	15.0	903	2.0
No. 8	15.0	913	2.0
No. 9	15.0	922	3.0
No. 10	15.0	895	5.0

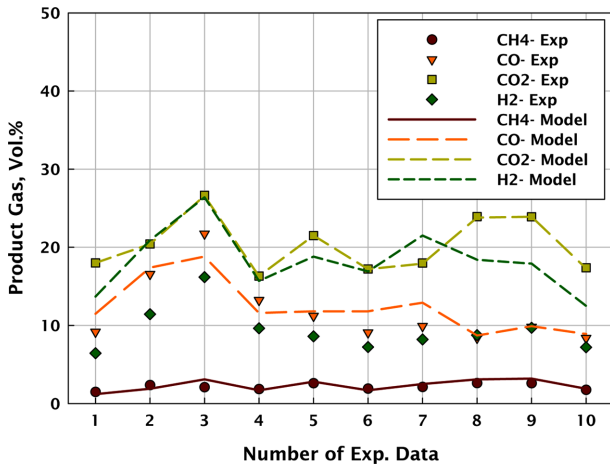


Fig. 5. The syngas composition of the single-bed gasification by experiments and simulation.

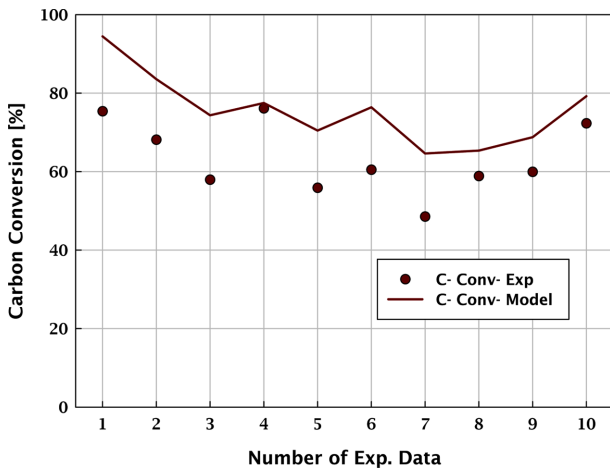


Fig. 6. The coal conversion of the single-bed gasification by experiments and simulation.

### 3-2-3. 단일영역 가스화 실험을 통한 모델 검증

모델 검증을 위해 단일영역 가스화 실험을 수행되었다. 단일영역 가스화의 경우 10건의 데이터 세트를 구성하였으며 실험변수는 다음 Table 5와 같다. 실험결과를 바탕으로 10건의 데이터 세트에 대하여 모사를 수행하였다. 모사를 통해 얻어진 합성가스의 조성은 Fig. 5와 같다. CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>의 경우 실험결과와 모사결과가 거의 일치하는 반면 H<sub>2</sub>의 경우 모사결과가 실험값과 비교하여 다소 높은 값을 갖는 것을 확인하였으나 경향은 실험값과 유사함을 확인하였다. Fig. 6에 석탄에 포함된 탄소전환율을 나타내었다. 모델 결과가 실험값과 비교하여 높은 전환율을 보이는 것을 알 수 있다.

이는 모사에 사용된 가스화 모델이 평형반응기로 반응기에서의 체류시간과 접촉시간이 실제 실험과 차이가 있기 때문으로 파악된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 상용모사기를 이용하여 분할유동층 가스화기의 모사를 수행하였다. 냉가스효율은 O<sub>2</sub>/C 몰 비 0.482, H<sub>2</sub>O/C 몰 비 0.436 조건에서 85% 수준을 보였다. 단일가스화기 모사결과와 비교하여 H<sub>2</sub>O/C 몰 비가 다소 높았으며 이로 인해 합성가스 중 H<sub>2</sub> 농도는 증가하고 CO 농도는 감소함을 확인하였다. 또한 가스화에 필요한 열량이 연소영역으로부터 공급되면서 합성가스 중 CO<sub>2</sub> 농도 역시 감소함을 확인하였다. 모사를 통한 합성가스의 조성을 바탕으로 발열량을 계산하면 일반 가스화기는 2,532 kcal/Nm<sup>3</sup>이고 분할유동층 가스화기는 2,780 kcal/Nm<sup>3</sup>으로 분할유동층 가스화기에서 생성된 합성가스가 조금 더 높은 발열량을 갖는 것을 확인할 수 있다. 모델 검증을 위해 10건의 실험데이터를 모사하였으며, 합성가스 중 CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 농도는 실험결과와 일치하고 H<sub>2</sub> 농도는 다소 높게 모사되었다. 탄소 전환율 역시 모사 결과가 실험과 비교하여 높게 모사되었으며 이는 모사에 사용된 가스화 모델이 평형반응기로 반응기에서의 체류시간과 접촉시간이 실제 실험과 차이가 있기 때문으로 파악된다.

## 감 사

본 연구는 산업기술연구회 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Jin, G. T., "Multi-Pyrolysis Reactor and Char Combustor Integrally Formed Pyrolysis-Combustor System", Korean Patent, No 0911030(2009).
2. Jin, G. T., Lee, S., Park, Y. C., Jo, S., Moon, J. and Ryu, H., "A Study of the Gasification Characteristics in a Partitioned Fluidized Bed", Proceedings of the 20th International Offshore and Ploar Engineering Conference, Beijing, China, **1**, 67-70(2010).
3. Jin, G. T., Lee, S., Seo, Y., Kang, S. and Ryu, H., "Gas and Solid Mixing in a Three Partitioned Fluidized Bed", Proceedings of the 13th International Conference on Fluidization, Gyeong-ju, Korea, **1**, 49-56(2010).
4. Jin, G. T., Jo, S., Lee, S. and Shun, D., "Characteristics of Pyrolysis of Roto Coal with Fluidizing Gases", Proceedings of the 7th China-Korea Workshop on Clean Energy Technology, Taiyuan, China, **1**, 21-22(2007).