

## 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합연료의 가스화

오건웅<sup>1</sup> · 장진영<sup>1</sup> · 라호원<sup>2</sup> · 서명원<sup>2</sup> · 문태영<sup>2</sup> · 이재구<sup>3</sup> · 윤상준<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교 신에너지 및 시스템 기술, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원 청정연료연구실, <sup>3</sup>한국에너지기술연구원 FEP융합연구단

## Gasification of Coal and Torrefied Biomass Mixture

GUNUNG OH<sup>1</sup>, JIN YOUNG JANG<sup>1</sup>, HO WON RA<sup>2</sup>, MYUNG WON SEO<sup>2</sup>, TAE YOUNG MUN<sup>2</sup>,  
JAE-GOO LEE<sup>3</sup>, SANG JUN YOON<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Advanced Energy Technology, Korea University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

<sup>2</sup>Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

<sup>3</sup>Future Energy Plant Convergence Research Center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

†Corresponding author :  
yoonsj@kier.re.kr

Received 23 March, 2017

Revised 13 April, 2017

Accepted 30 April, 2017

**Abstract >>** Air-blown Gasification of coal and torrefied biomass mixture is conducted on fixed-bed gasifier. The various ratio (9:1, 8:2, 7:3) of coal and torrefied biomass mixture are used. The contents of H<sub>2</sub>, CO in the syngas were increased with gasification temperature. Carbon conversion tend to increase with temperature and equivalence ratio (ER). However, cold gas efficiency showed maximum point in ER range of 0.26-0.36. The torrefied biomass showed highest cold gas efficiency of 67.5% at 934 °C, ER 0.36. Gasification of 8:2 mixture showed the highest carbon conversion and cold gas efficiency and synergy effect.

**Key words :** Gasification(가스화), Coal(석탄), Torrefied biomass(반탄화 바이오매스), Synergy effect(시너지 효과)

### 1. 서론

기후변화에 대처하기 위한 신재생에너지 연구는 세계적으로 지속되고 있다<sup>1)</sup>. 신재생에너지 중 하나인 수소는 여러 분야에 적용이 가능하며, 수소를 생산하는 기술로 가스화 기술이 있다. 가스화는 석탄, 바이오매스 등으로부터 열화학적 전환을 통해 주로 H<sub>2</sub>와 CO로 이루어진 합성가스를 생산하는 기술이다<sup>2,3)</sup>. 생산된 합성가스는 가스터빈에 적용할 수 있으며, 화학 원료 생산에도 사용할 수 있다. 가스화기는 크게 고

정층, 유동층, 분류층의 3가지 방식으로 구분할 수 있다<sup>4)</sup>. 이 중 고정층 가스화기는 구조가 간단하고 연료의 제약이 적어 널리 사용되고 있다.

고정층 가스화기의 원료로 석탄, 바이오매스<sup>5)</sup>, 폐기물<sup>6)</sup> 등의 다양한 원료가 사용되고 있다. 석탄은 널리 사용되고 있는 화석연료로, 지역편중이 적고 보관 및 운송이 용이하다<sup>7,8)</sup>. 그러나 석탄은 열화학적 전환 과정에서 온실가스인 CO<sub>2</sub>가 발생하여 기후변화에 악영향을 미친다. 따라서 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 방안도 함께 연구되고 있다.

바이오매스는 성장과정에서 CO<sub>2</sub>를 소비하므로 CO<sub>2</sub> 중립적인 연료로 주목받고 있다<sup>9)</sup>. 독립적인 사용뿐만 아니라 석탄과 혼합사용도 연구되고 있으며<sup>10)</sup>, 혼합사용을 통해 기존 석탄 사용 장치에서 석탄을 일정비율 대체하는 것이 시도되고 있다. 그러나 바이오매스는 섬유질로 인해 분쇄에 많은 에너지가 소비된다<sup>11)</sup>. 또한 가스화시 탄화수소로 이루어진 타르가 발생하여 정제설비에 부담을 가중시킨다. 이러한 바이오매스의 단점을 보완하기 위해 반탄화 바이오매스에 대한 연구가 진행되고 있다. 반탄화 바이오매스는 230~300℃의 온도에서 반탄화를 수행하여 제조하며, 바이오매스 원시료 대비 높은 발열량을 보인다<sup>12)</sup>. 또한 높은 에너지 밀도, 타르저감, 좋은 분쇄성 등의 장점을 보이며, 석탄 사용장치에 적용시 효율저하가 없는 것이 보고되었다<sup>13)</sup>.

석탄과 반탄화 바이오매스는 다른 물성 및 회재 성분을 가지므로 혼합에 따라 가스화 특성의 변화가 예측된다. 또한 반탄화 바이오매스의 사용은 CO<sub>2</sub> 저감의 효과가 있으므로 두 연료의 혼합은 장점이 된다. 따라서 본 연구에서는 석탄과 반탄화 바이오매스를 혼합 후 가스화를 수행하였다. 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합비율에 따라 가스화 결과를 관찰하고 최적 혼합비율과 혼합연료의 활용 가능성을 판단하였다.

## 2. 실험

### 2.1 석탄 및 반탄화 바이오매스

실험에 사용된 석탄과 반탄화 바이오매스(torrefied biomass, TB)의 공업(TGA-701, LECO), 원소(Trouspec CHN, LECO) 및 발열량(Parr 6300, Parr instrument

company) 분석값을 Table 1에 나타내었다. 전나무를 질소분위기의 300℃ 전기오븐에서 30분간 반탄화하여 반탄화 바이오매스를 제조하였다. 석탄과 반탄화 바이오매스는 250 μm 이하의 사이즈로 분쇄하고 실험 전 105℃ 전기오븐에서 2시간 동안 건조 후 사용하였다. 혼합연료로서 석탄과 반탄화 바이오매스는 9:1, 8:2, 7:3의 질량비로 혼합하였다. 석탄과 반탄화 바이오매스의 회재는 유도결합플라즈마 방출분광기(OPTIMA 8300DV, PERKINELMER)를 통해 조성을 분석하였다.

### 2.2 고정층 가스화 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험실 규모의 고정층 가스화 장치를 보였다. 스크류 피더를 이용하여 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합물을 1 g/min 속도로 주

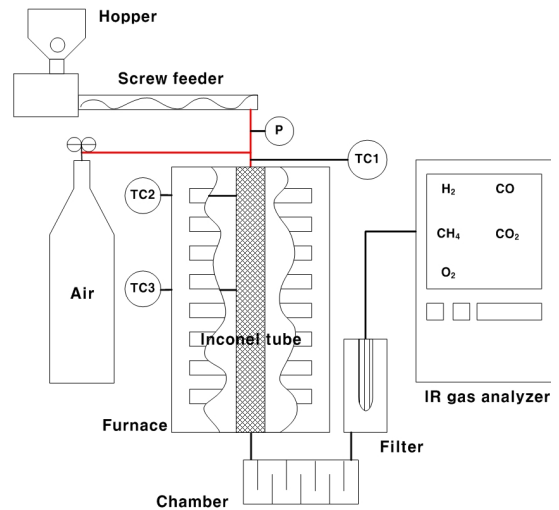


Fig. 1. Lab-scale fixed bed gasification system

Table 1. Properties of coal, biomass and torrefied biomass

Fuel	Proximate analysis (wt.%, as received basis)				Ultimate analysis (wt.%, dry basis)					HHV (kcal/kg, dry basis)
	Moisture	Volatile matter	Ash	Fixed carbon	C	H	O	N	S	
Coal	22.42	30.62	9.18	37.78	67.45	4.45	17.16	1.51	0.25	5,990
Biomass	11.40	75.75	0.20	12.65	51.95	6.70	40.98	0.16	0.01	4,289
Torrefied biomass	1.50	79.69	0.33	18.49	55.86	5.94	37.87	-	-	4,816

입하였다. 가스화제인 공기는 질량유량제어기(mass flow controller, MFC)를 이용하여 공기비(equivalence ratio, ER) 0.26~0.57 범위에 맞추어 공급하였다. 1인치 직경의 인코넬(Inconel) 반응기를 사용하였고, 전기로를 이용하여 실험 온도 범위 800~950℃에 맞춰 가열하였다. 압력 및 온도 관찰을 위해 압력계와 K-type 열전쌍을 반응기 내부와 반응물 주입관에 설치하였다. 본문에 표기된 가스화 반응온도는 TC3을 통해 가스화 반응층의 온도를 측정하여 사용하였다. 연료와 가스화제는 반응기 상부에서 만나 함께 반응기로 주입되며 반응기 중앙의 그물망(mesh) 위에 쌓이게 된다. 생성된 합성가스는 반응기 하부의 챔버와 필터를 거치며 회재 및 미연분이 제거되고 적외선 가스 분석기(VARIO PLUS, MRU)를 이용하여 조성을 분석하였다. 각 실험 조건에 따라 가스화 반응이 안정된 후 적외선 가스 분석기로 10회 측정된 값의 평균을 사용하였다. 공기비(ER), 탄소전환율( $X_c$ ) 및

냉가스효율(cold gas efficiency, CGE)은 다음 식으로 계산하였다<sup>14,15</sup>.

$$ER = (\text{주입되는 } O_2 \text{ 양}) / (\text{완전연소에 필요한 } O_2 \text{ 양}) \quad (1)$$

$$X_c = (\text{합성가스 중 탄소량}) / (\text{연료 중 탄소량}) \times 100 \quad (2)$$

$$CGE = \frac{\sum(H_2, CO, CH_4 \text{ 발열량}) \times \text{합성가스 중 } H_2, CO, CH_4 \text{ 질량}}{(\text{연료의 발열량})} \times 100 \quad (3)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 석탄 및 반탄화 바이오매스 가스화

석탄과 반탄화 바이오매스 원시료의 가스화를 수

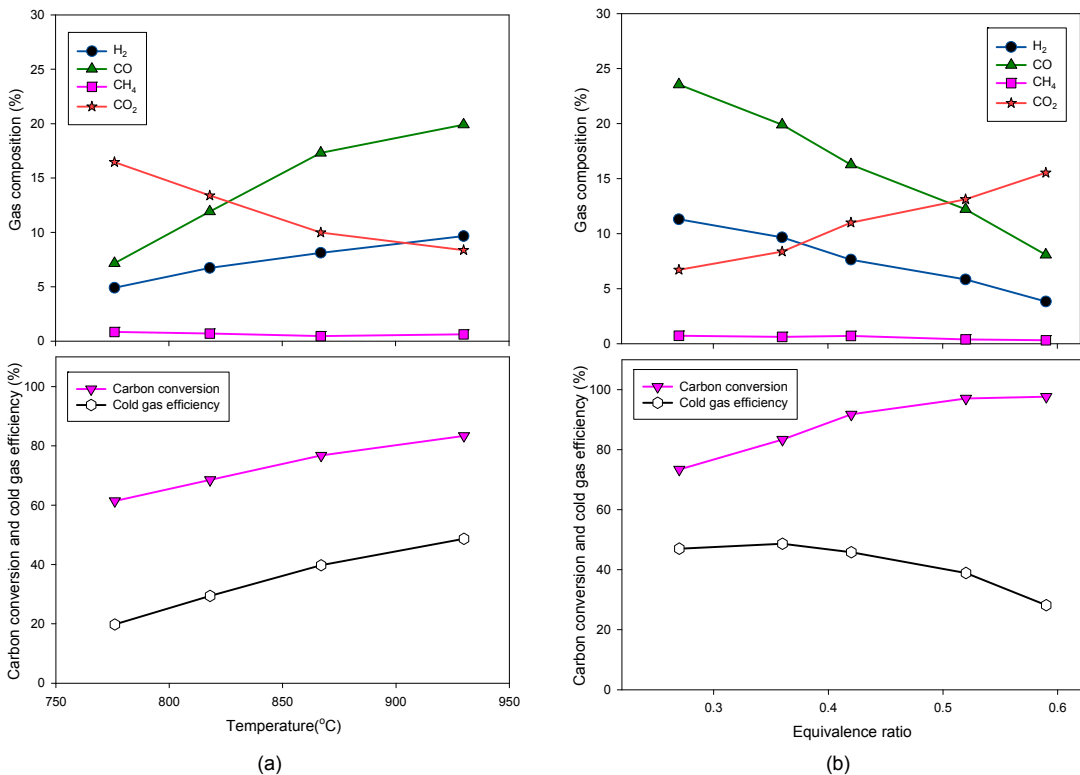


Fig. 2. Variation of syngas composition, carbon conversion and cold gas efficiency for coal gasification with (a) temperature (ER 0.36) and (b) equivalence ratio (930 °C)

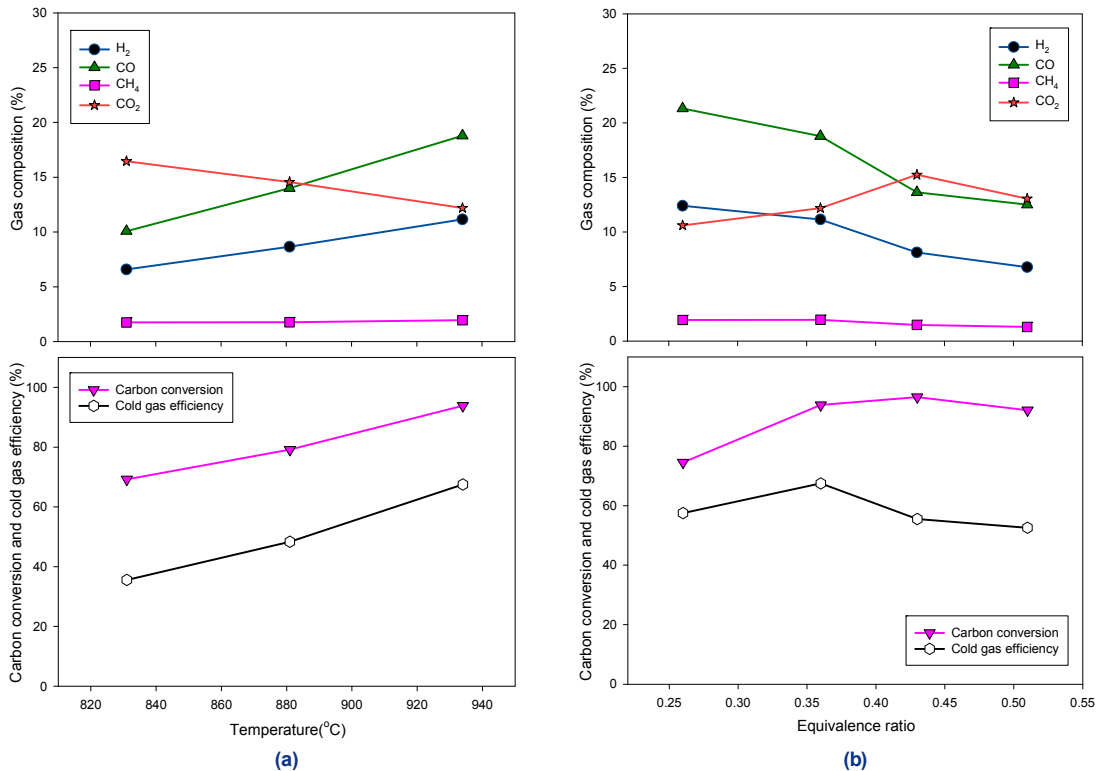
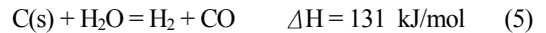
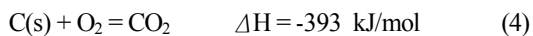
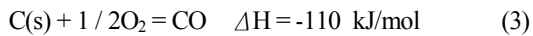


Fig. 3. Variation of syngas composition, carbon conversion and cold gas efficiency for torrefied biomass gasification with (a) temperature (ER 0.36) and (b) equivalence ratio (934 °C)

행하여 각 시료에 대한 가스화 특성을 확인하였다. 온도변화시 ER은 0.36을 유지하였고, ER 변화시 온도는 930°C를 유지하였다. Fig. 2는 석탄의 온도(ER 0.36)와 ER 변화(930°C)에 따른 가스화 결과이다. Fig. 2(a)에서 가스화 온도가 증가함에 따라 생성가스내 H<sub>2</sub>와 CO가 증가하는 경향을 보이며, 930°C에서 각각 9.7, 20%를 나타냈다. 이에 반해, CO<sub>2</sub>는 지속적으로 감소하였으며 CH<sub>4</sub>은 1% 미만의 작은 생성량을 보였다. 합성가스 조성의 영향을 받는 탄소전환율과 냉가스효율은 온도 증가와 함께 지속 증가하여 930°C에서 83.4, 48.7%가 관찰되었다. 가스화시 진행되는 반응은 다음과 같다<sup>5,6)</sup>.



가스화 온도가 증가함에 따라 식 (5), (7)과 같은 흡열반응이 선호되며, 발열반응인 식 (6)은 역반응이 진행된다. 특히 850°C 이상에서는 식 (7)의 Boudouard 반응이 선호되어<sup>16)</sup> 생성된 합성가스내 CO가 증가하고 CO<sub>2</sub>가 감소하게 된다. 따라서 Fig. 2a의 합성가스내 조성변화는 온도변화에 따라 가스화 반응평형이 변화하여 나타난 결과이다. Fig. 2b는 ER에 따른 가스화 결과를 나타내었다. ER이 증가함에 따라 합성가스 내 H<sub>2</sub>와 CO의 조성이 감소하였다. CO<sub>2</sub>는 증가하는 경향을 보이며 ER 0.59에서 15.5%의 조

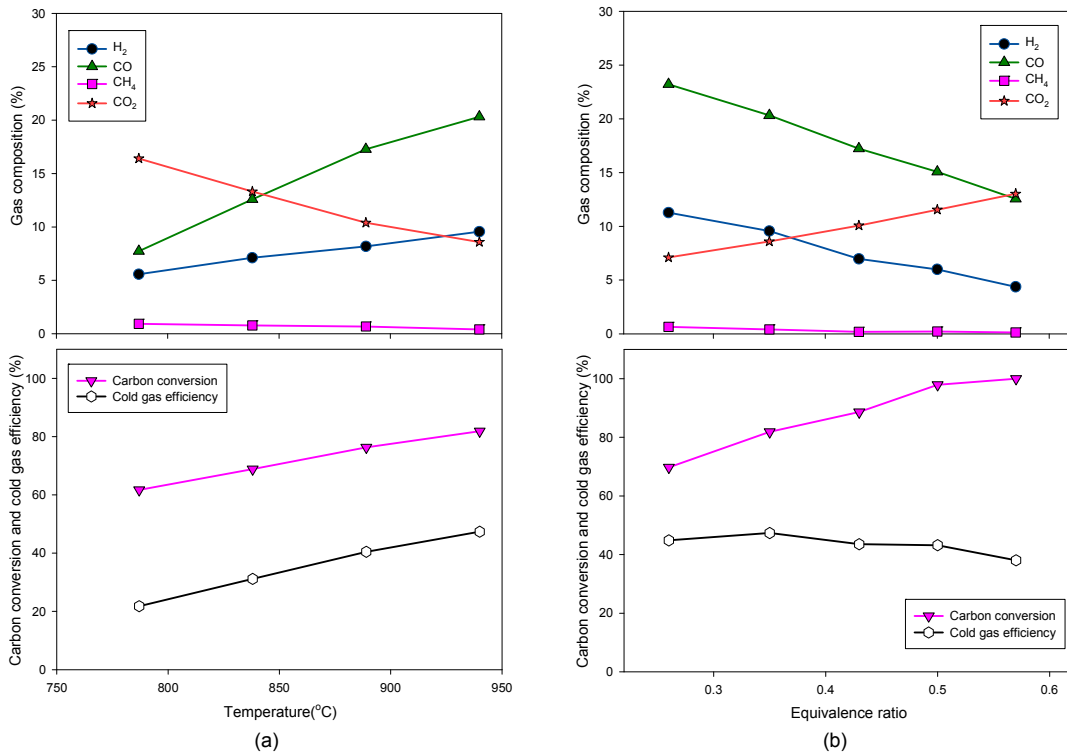


Fig. 4. Variation of syngas composition, carbon conversion and cold gas efficiency for 9:1 mixture (coal : torrefied biomass) gasification with (a) temperature (ER 0.36) and (b) equivalence ratio (940 °C)

성이 나타났다. 이와 관련하여 탄소전환율은 ER와 함께 증가하여 ER 0.59에서 97.6%를 보였다. 그러나 냉가스효율은 ER 0.36에서 48.7%의 최대값을 보인 후 감소하였다. ER이 증가함에 따라 O<sub>2</sub>가 증가하므로 식 (3), (4)와 같은 연소반응이 선호되며, 점차 연소조건에 가까워지게 된다<sup>5)</sup>. 따라서 ER이 증가함에 따라 합성가스내 CO<sub>2</sub>의 조성이 증가하고 H<sub>2</sub>, CO의 조성은 감소하게 된다. ER변화에 따라 생성되는 합성가스의 유량 변화로 냉가스효율은 ER 0.36에서 최대값을 보였으나, 합성가스내 가연성분(H<sub>2</sub>, CO)의 감소로 ER 증가에 따라 감소하였다.

Fig. 3은 반탄화 바이오매스의 가스화 결과를 보였다. Fig. 2 석탄 가스화 결과와 유사한 합성가스 조성, 탄소전환율, 냉가스효율의 변화 경향을 보였다. Fig. 3a의 온도증가에 따라 탄소전환율과 냉가스효율은 증가하여 934 °C에서 각각 93.4%와 67.5%를 보였다. Fig. 3b의 ER 변화에 따라 탄소전환율은 증가하

는 경향을 보였으며, ER 0.51에서 92.1%를 나타냈다. 냉가스효율 또한 석탄 가스화와 유사한 경향을 보였으나 ER 0.36에서 Fig. 2b의 결과보다 높은 67.5%를 나타내었다. 휘발분과 같은 연료 조성은 가스화시 반응성에 영향을 주므로<sup>17)</sup>, 연료 조성의 차이로 인해 반탄화 바이오매스가 석탄보다 높은 냉가스효율을 보인 것으로 판단된다.

### 3.2 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합연료의 가스화

석탄과 반탄화 바이오매스를 9:1, 8:2, 7:3의 질량비로 혼합하여 가스화를 수행하였다. Fig. 4a는 9:1 혼합연료의 온도에 따른 가스화 결과이다. 앞선 석탄과 반탄화 바이오매스의 온도에 따른 가스화 결과와 유사한 경향을 보였다. 탄소전환율과 냉가스효율은 940 °C에서 각각 81.9%와 47.4%를 보였으며, 석탄 가스화 결과와 유사한 결과값을 나타냈다. Fig. 4b의

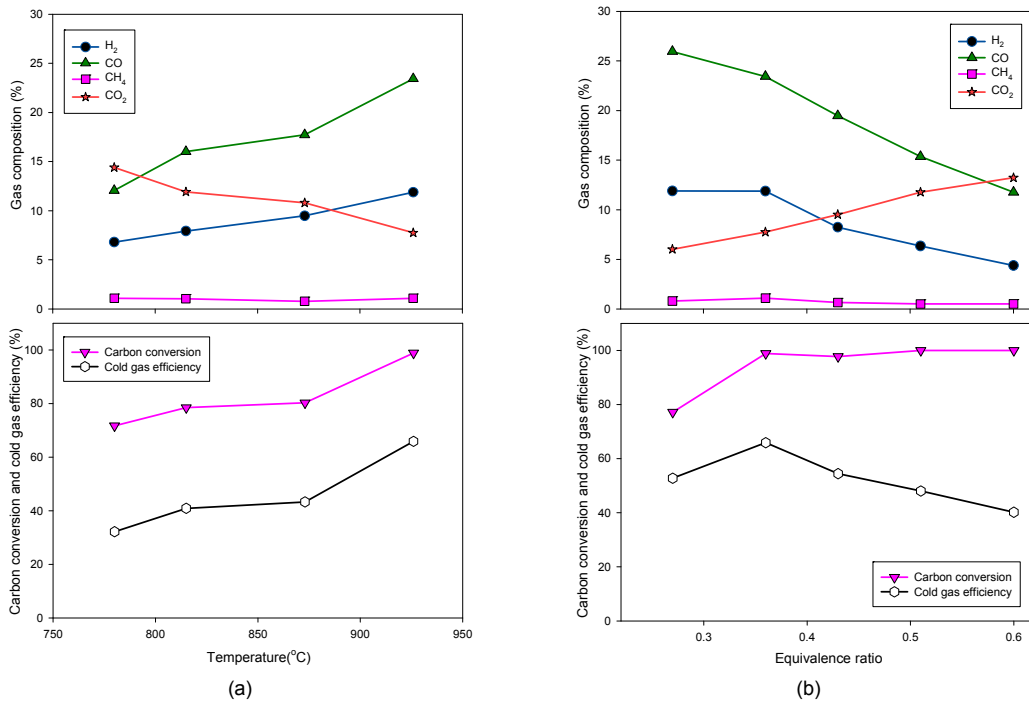


Fig. 5. Variation of syngas composition, carbon conversion and cold gas efficiency for 8:2 mixture (coal : torrefied biomass) gasification with (a) temperature (ER 0.36) and (b) equivalence ratio (926 °C)

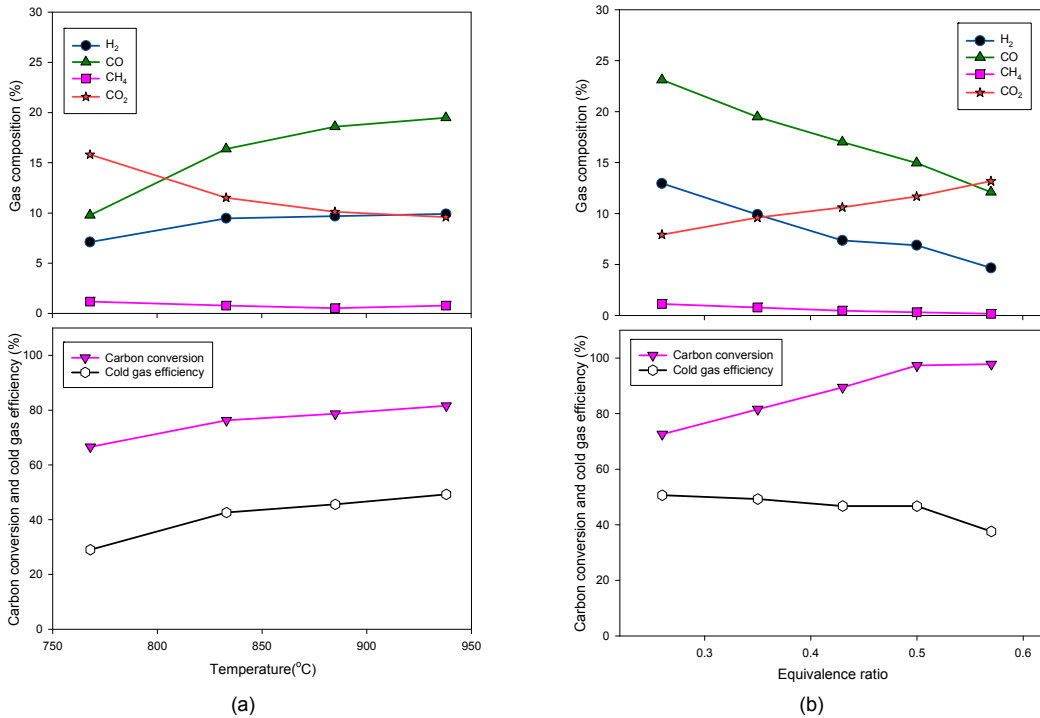


Fig. 6. Variation of syngas composition, carbon conversion and cold gas efficiency for 7:3 mixture (coal : torrefied biomass) gasification with various (a) temperature (ER 0.35) and (b) equivalence ratio (939 °C)

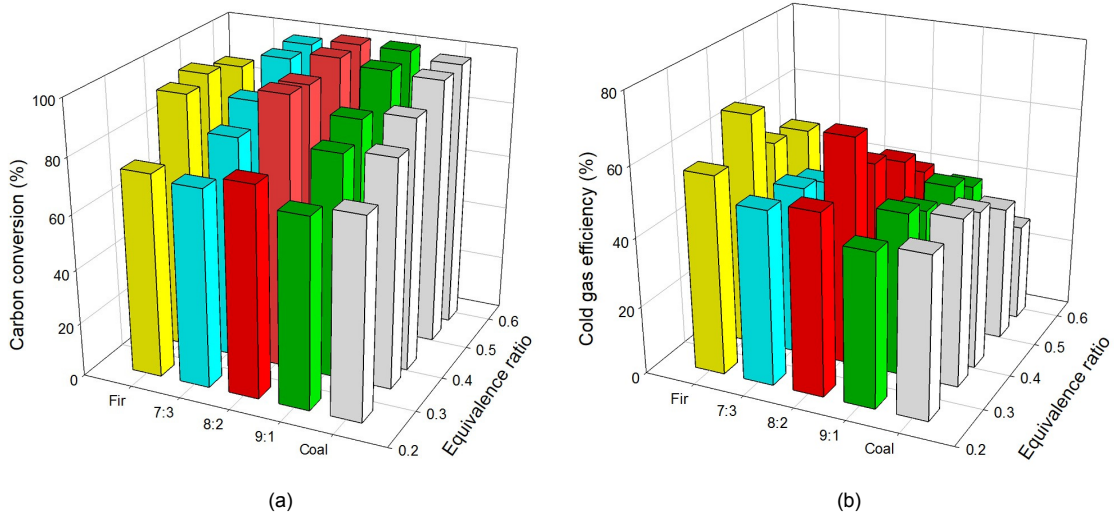


Fig. 7. Comparison of (a) carbon conversion and (b) cold gas efficiency with equivalence ratio (930~940 °C)

ER 변화에 따른 가스화 결과에서도 앞선 Figs. 2와 3의 결과와 유사한 경향을 보였으며, ER 0.57에서 탄소전환율 100%에 도달하였다.

석탄과 반탄화 바이오매스 8:2, 7:3 혼합연료의 가스화 결과(Figs. 5, 6)에서도 유사한 경향을 확인할 수 있다. Figs. 5a와 6a의 가스화 온도가 증가함에 따라 생성된 합성가스내  $H_2$ , CO의 조성이 증가하였고,  $CO_2$ 는 감소하였다. 합성가스내 조성변화와 합성가스의 유량변화로 인해 탄소전환율과 냉가스 효율은 온도증가와 함께 증가하는 경향을 보였다. Figs. 5b와 6b의 ER 변화에 따른 가스화 결과를 보면, ER 증가에 따라 탄소전환율은 증가하였으며, 8:2 혼합연료는 ER 0.51에서 100%에 도달하였다. 냉가스효율은 각각 ER 0.36과 0.26에서 65.9%와 50.6%의 최대값을 보였다.

혼합비율에 대한 효과를 확인하기 위해 석탄과 반탄화 바이오매스 및 혼합연료 가스화의 탄소전환율과 냉가스효율을 ER 변화에 따라 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7a의 탄소전환율은 8:2 혼합연료가 ER 전 구간에서 가장 높은 탄소전환율을 보였으며, ER 0.42 이하에서 반탄화 바이오매스가 두 번째로 높은 탄소전환율을 나타냈다. 석탄, 9:1, 7:3 혼합연료는 유사한 탄소전환율이 확인되었다. Fig. 7b의 냉

가스효율은 ER 전 구간에서 반탄화 바이오매스가 가장 높은 냉가스효율을 보였으며, 8:2 혼합연료가 두 번째로 높은 냉가스효율을 보였다. 석탄, 9:1, 7:3 혼합연료는 동일한 ER 조건에서 유사한 냉가스효율을 보였다. 8:2 혼합연료는 석탄 및 반탄화 바이오매스보다 높은 탄소전환율을 보였으며, 혼합비율에 따른 예상치보다 높은 냉가스효율을 나타냈다. 이는 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합에 따른 시너지 효과로 판단되며, 특정 비율에서 효과를 얻을 수 있는 것으로 확인된다.

큰 규모의 가스화 설비에서 반응온도는 ER, 연료 특성 등에 따라 변화한다. ER이 증가함에 따라 연소 조건에 가까워지므로 반응온도는 증가하는 경향을 보이게 된다. 따라서 가스화 반응은 온도와 ER 등에 의해 복합적인 영향을 받게 된다. 실험실 규모에서 온도와 ER의 독립적인 변수 실험은 각 변수 변화에 따른 연료의 가스화에 대한 영향을 확인할 수 있으며, 가스화 장치의 규모 확장시(scale-up) 연료의 가스화 운전 조건을 예측하기 위한 토대가 된다. 앞선 Figs. 4~6의 결과를 종합해 볼 때, ER 0.36에서와 가스화 온도 증가시 높은 가스화 효율이 나타나므로, 혼합연료의 가스화 운전은 ER 0.36~0.42에서 운전하는 것이 적절할 것으로 판단된다.



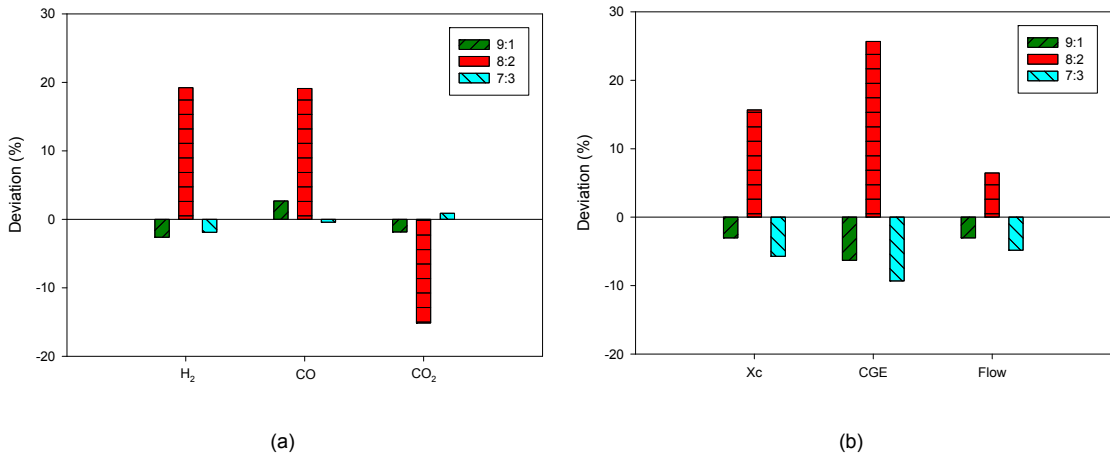


Fig. 8. Deviation of (a) syngas composition, (b) carbon conversion, cold gas efficiency and syngas flow for gasification of coal and torrefied biomass mixture

### 3.3 혼합연료의 시너지 효과

Figs. 2~7에서 확인되듯이, 8:2 혼합연료의 가스화는 모든 가스화 조건에서 시너지 효과가 확인된다. Fig. 8은 혼합연료가 가장 높은 냉가스효율을 보이는 ER 0.36, 930~940℃의 온도조건에서 석탄과 반탄화 바이오매스의 가스화 결과를 기반으로 혼합비율에 따라 예측하여 실제 혼합연료의 가스화 결과와 비교한 그래프이다. 예상 값과 실제 값의 차이(deviation, %)는 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{Deviation (\%)} = \frac{\text{real data}}{\text{data of coal} \times \text{ratio of coal} + \text{data of TB} \times \text{ratio of TB}} \times 100 \quad (4)$$

Fig. 8a의 9:1과 7:3 혼합연료에서 생성된 합성가스 내 조성은 예측 값과 작은 차이를 나타내었다. 그러나 8:2 혼합연료는 H<sub>2</sub>와 CO는 더 많은 조성을 보이며 19%의 차이를 나타냈다. 또한 CO<sub>2</sub>는 예측 값보다 15% 작은 생성량의 차이를 보였다. Fig. 8b의

탄소전환율, 냉가스효율, 합성가스 유량의 결과에서도, 9:1과 7:3 혼합연료는 실제 값과 예측 값이 10% 미만의 작은 차이를 보였다. 이에 반해, 8:2 혼합연료는 예측값과 큰 차이를 보였으며, 냉가스효율은 25.7%의 차이를 보였다.

석탄과 반탄화 바이오매스의 회재에 포함된 알칼리 및 알칼리 토금속은 가스화시 촉매 역할로 작용한다<sup>18-20</sup>. 특히 Na, Ca, K와 같은 원소는 가스화 조건에 따라 촉매 효과 및 원소 조성에 따른 시너지 효과가 발생한다<sup>17,21</sup>. 따라서 Table 2와 같이 회재의 조성이 다른 두 연료는 연료의 혼합 비율에 따라 가스화 시 발생하는 촉매 효과가 달라질 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 반탄화 바이오매스의 회재는 0.33%로 석탄에 비해 매우 작은 양이며, 연료의 회재량 차이로 인해 반탄화 바이오매스 혼합비율이 증가할수록 오히려 전체 알칼리 및 알칼리 토금속의 양이 감소하게 된다. 따라서 촉매 효과만으로 본 연구에서 확인된 8:2 혼합연료 가스화의 시너지 효과를 설명하기에 부족하다.

Table 2. The composition of ash in coal and torrefied biomass (%)

Fuel	Al	Si	Fe	Ni	Ca	K	Na	Mn	Mg	O (balance)
Coal	1.80	22.32	9.73	0.01	4.69	0.61	0.03	0.08	1.23	59.03
Torrefied biomass	0.55	11.37	0.85	0.02	29.38	4.43	0.12	0.06	1.48	51.56



혼합연료의 가스화시, 반탄화 바이오매스의 탈휘 발화는 주변에 영향을 주게 되므로 혼합연료의 좌(char) 표면적은 혼합비율에 따라 예측되는 표면적과 차이를 보인다<sup>22)</sup>. 이러한 표면적의 차이는 가스화 반응성을 변화시킨다<sup>16)</sup>. Tilghman과 Mitchell<sup>22)</sup>의 연구에 따르면, 석탄과 바이오매스의 혼합비율에 따라 기공 구조가 달라지며, 이로 인해 특정 혼합비율에서 가장 높은 좌 가스화 효율이 나타났다. 또한 반탄화 바이오매스의 반응속도는 투입된 원료의 부피에 비례하므로<sup>22)</sup>, 반탄화 바이오매스의 혼합비율이 증가할수록 가스화 반응성이 증가하게 된다. 따라서 8:2 혼합연료의 시너지 효과는 혼합비율에 따른 회재, 좌의 표면적 등의 복합적인 효과로 인한 결과로 판단된다.

#### 4. 결론

석탄과 반탄화 바이오매스를 비율에 따라 혼합하여 가스화를 수행하였다. 석탄 및 반탄화 바이오매스 가스화시 온도가 증가함에 따라 탄소전환율과 냉가스효율이 증가하는 경향을 보였다. ER 증가에 따라 탄소전환율은 증가하였으며, 냉가스효율은 특정 ER에서 최대값을 보였다. 9:1과 7:3 혼합연료는 예측값과 유사한 탄소전환율 및 냉가스효율을 보였다. 그러나 8:2 혼합연료는 가장 높은 탄소전환율과 냉가스효율을 보이며, 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합으로 인한 시너지 효과가 확인되었다. 석탄과 반탄화 바이오매스 혼합연료의 에너지화 활용은 CO<sub>2</sub> 발생 저감뿐만 아니라, 시너지 효과를 통한 가스화 효율 향상 효과를 기대할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었다(20143030050060).

## References

1. D. H. Heo, J. H. Hwang, R. Lee, and J. M. Sohn, "The Study on of ydrogen production performance by model biomass-supercritical water gasification with various catalysts", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 1, 2015, pp. 8-14.
2. J. Tanner, K. B. Kabir, M. Muller, and S. Bhattacharya, "Low temperature entrained flow pyrolysis and gasification of a Victorian brown coal", *Fuel*, Vol. 154, 2015, pp. 107-113.
3. S. J. Yoon, Y. I. Son, Y. G. Kim, and J. G. Lee, "Removal of tar and soot in the syngas produced from gasification of wood chip by using catalytic reformer", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 20, No. 6, 2009, pp. 519-525.
4. K. Qin, W. Lin, S. Fæster, P. A. Jensen, H. Wu, and A. D. Jensen, "Characterization of residual particulates from biomass entrained flow gasification", *Energy and Fuels*, Vol. 27, 2013, pp. 262-270.
5. F. Guo, Y. Dong, L. Dong, and C. Guo, "Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, 2014, pp. 5625-5633.
6. J. I. Na, S. J. Park, Y. K. Kim, J. G. Lee, and J. H. Kim, "Characteristics of oxygen-blown gasification for combustible waste in a fixed-bed gasifier", *Applied Energy*, Vol. 75, 2003, pp. 275-285.
7. S. Xu, Y. Ren, B. Wang, Y. Xu, L. Chen, X. Wang, and T. Xiao, "Development of a novel 2-stage entrained flow coal dry powder gasifier", *Applied Energy*, Vol. 113, 2014, pp. 318-323.
8. M. S. Alam, A. T. Wijayanta, K. Nakaso, and J. Fukai, "Study on coal gasification with soot formation in two-stage entrained-flow gasifier", *International Journal of Energy and Environment Engineering*, Vol. 6, 2015, pp. 255-265.
9. J. Billaud, S. Valin, M. Peyrot, and S. Salvador, "Influence of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> addition on biomass gasification in entrained flow reactor conditions: Experiments and modeling", *Fuel*, Vol. 166, 2016, pp. 166-178.
10. T. Chmielniak and M. Sciazko, "Co-gasification of biomass and coal for methanol synthesis", *Applied Energy*, Vol. 74, 2013, pp. 393-403.
11. X. Ku, J. Lin, and F. Yuan, "Influence of torrefaction on biomass gasification performance in a high-temperature entrained-flow reactor", *Energy and Fuels*, Vol. 30, 2016, pp. 4053-4064.
12. K. Woytiuk, W. Campbell, R. Gerspacher, R.W. Evitts, and A. Phoenix, "The effect of torrefaction on syngas quality

- metrics from fluidized bed gasification of SRC willow”, *Renewable Energy*, Vol. 101, 2017, pp. 409-416.
13. J. Li, A. Brzdekiewicz, W. Yang, and W. Blasiak, “Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching”, *Applied Energy*, Vol. 99, 2012, pp. 344-354.
  14. N. Kobayashi, M. Tanaka, G. Piao, J. Kobayashi, S. Hatano, Y. Itaya, and S. Mori, “High temperature air-blown woody biomass gasification model for the estimation of an entrained down-flow gasifier”, *Waste Management*, Vol. 29, 2009, pp. 245-251.
  15. S. J. Yoon, Y. C. Choi, Y. I. Son, S. H. Lee, and J. G. Lee, “Gasification of biodiesel by-product with air or oxygen to make syngas”, *Bioresource Technology*, Vol. 101, 2010, pp. 1227-1232.
  16. N. Cerone, F. Zimbardi, A. Villone, N. Strjugas, and E. G. Kiyicki, “Gasification of wood and torrefied wood with air, oxygen, and steam in a fixed-bed pilot plant”, *Energy and Fuels*, Vol. 30, 2016, pp. 4034-4043.
  17. J. Tanner and S. Bhattacharya, “Kinetics of CO<sub>2</sub> and steam gasification of Victorian brown coal chars”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 285, 2016, pp. 331-340.
  18. Y. Bai, S. Zhu, K. Luo, M. Gao, L. Yan, and Fan Li, “Coal char gasification in H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>: Release of alkali and alkaline earth metallic species and their effects on reactivity”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 112, 2017, pp. 156-163.
  19. Y. Bai, Y. Wang, S. Zhu, L. Yan, F. Li, and K. Xie, “Synergistic effect between CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on reactivity during coal chars gasification”, *Fuel*, Vol. 126, 2014, pp. 1-7.
  20. X. Li and C. Li, “Volatilisation and catalytic effects of alkali and alkaline earth metallic species during the pyrolysis and gasification of Victorian brown coal. Part VIII. Catalysis and changes in char structure during gasification in steam”, *Fuel*, Vol. 85, 2006, pp. 1518-1525.
  21. P. L. Walker, S. Matsumoto, T. Hanzawa, T. Muira, and I. M. K. Ismail, “Catalysis of gasification of coal-derived cokes and chars”, *Fuel*, Vol. 62, 1983, pp. 140-149.
  22. M.B. Tilghman and R.E. Mitchell, “Impact of co-firing coal and biomass on mixed char reactivity under gasification conditions”, *Energy and Fuels*, Vol. 30, 2016, pp. 1708-1719.