

인도네시아 저등급 석탄의 스팀 가스화 반응성 비교 평가

김수현¹ · Paul Victor^{1,2} · 유지호^{1†} · 이시훈¹ · 임영준¹ · 임정환¹ · 김상도¹ · 전동혁¹ · 최호경¹
¹한국에너지기술연구원 청정연료연구실, ²충남대학교 에너지과학기술대학원

Comparative Evaluation of Steam Gasification Reactivity of Indonesian Low Rank Coals

SOOHYUN KIM¹, PAUL VICTOR^{1,2}, JIHO YOO^{1†}, SIHYUN LEE¹, YOUNGJOON RHIM¹,
JEONGHWAN LIM¹, SANGDO KIM¹, DONGHYUK CHUN¹, HOKYUNG CHOI¹

¹Clean Fuel Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea
²Graduate School of Energy Science & Technology, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu Daejeon, 34134, Korea

Abstract >> Steam gasification of low rank coals is possible at relatively low temperature and low pressure, and thus shows higher efficiency compared to high rank coals. In this study, the gasification reactivity of four different Indonesian low rank coals (Samhwa, Eco, Roto, Kideco-L) was evaluated in $T = 700 - 800^{\circ}\text{C}$. The low rank coals containing 53.8 ± 3.4 wt% volatile matter in proximate analysis and 71.6 ± 1.2 wt% carbon in ultimate analysis showed comparable gasification reactivity. In addition, K_2CO_3 catalyst rapidly accelerated the reaction rate at 700°C , and all of the coals were converted over 90% within 1 hour. The XRD analysis showed no significant difference in carbonization between the coals, and the FT-IR spectrum showed similar functional groups except for differences due to moisture and minerals. TGA results in pyrolysis (N_2) and CO_2 gasification atmosphere showed very similar behavior up to 800°C regardless of the coal species, which is consistent with the steam gasification results. This confirms that the indirect evaluation of the reactivity can be made by the above instrumental analyses.

Key words : Coal(석탄), Low rank coal(저등급 석탄), Gasification(가스화), Char(착), Steam gasification(스팀 가스화)

1. 서 론

현재 세계 전력의 약 41%는 석탄을 이용한 화력 발전에 의해 생산되고 있으며 또한 석탄은 철강과 시멘트 제조 연료로서 산업 발전에 중요한 역할을 담당하고 있다¹⁾. 하지만 석탄 사용은 온실가스(Green House Gas, GHG)와 대기오염물질을 배출하여 환경

및 인체에 악영향을 준다^{2,3)}. 특히 전 세계 이산화황 배출의 약 60%가 석탄 연소에 기인한다⁴⁾. 2015년 파리 기후협정에서는 1850년대 대비 지구 온도 상승을 2020년 이후 2°C 이하로 유지하고 장기적으로 1.5°C 이하로 제한하는 목표를 달성하기 위해 온실가스 배출을 자제하기로 합의하였다⁵⁾. 따라서 석탄 발전의 효율을 높여 온실가스 등 유해가스를 줄이기 위한 연구가 진행 중이며, 그 중 석탄 가스화 연구가 큰 관심을 받고 있다^{6,7)}.

석탄 가스화는 석탄을 고온/고압에서 증기와 반응

[†] Corresponding author : jyoo@kier.re.kr

Received : 2016.11.25 in revised form : 2016.12.16 Accepted : 2016.12.30

Copyright © 2016 KHNES

시켜 합성가스를 생산하며, 주로 전력 및 수소 생산에 이용된다⁸⁾. 석탄 가스화는 기존 직접 연소 대비 크게 향상된 발전 효율을 보이고 SO_x와 NO_x 발생이 없으며, 또한 수소와 메탄올 등 다양한 탄화수소 제조를 위한 중간체인 합성가스를 생산하므로 산업적으로 중요한 의미를 갖는다⁹⁾. 특히 석탄 가스화를 통한 수소 생산은 세계 수소 생산의 약 20%를 차지한다^{10,11)}. 국내의 경우 태안에 석탄 가스화 복합 발전(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)을 설치하여 전력생산에 성공하였다¹²⁾. 하지만 일반적 가스화 반응은 1,200°C와 30 bar 이상의 극한 조건에서 이루어지므로 초기 설비 투자 비용이 크며 운전 중 연소에 의한 효율 감소가 나타난다.

최근 저렴하고 매장량이 풍부한 저등급 석탄 이용 확대를 위해 건조·고품위화, 혼소, 가스화 등 관련 연구가 활발히 진행 중이다¹³⁾. 저등급 석탄은 산소 기능기와 휘발분을 다량 함유하고 있어 높은 반응성을 보이므로 상대적으로 낮은 온도, 압력에서 가스화 반응이 가능하다^{14,15)}. 특히 인도네시아에서 생산되는 저등급 석탄은 회분 함량이 적고 발열량도 비교적 높아 (~4,000 kcal/Kg) 가스화 원료로서 적합하다¹⁶⁾. 본 연구는 네 종의 인도네시아 저등급 석탄에 대한 가스화 반응성을 비교·평가 및 분석함으로써 이들의 가스화 반응성을 파악하고자 하였다. 즉 저등급 석탄의 700~800 °C에서 가스화 거동을 고정층 반응기를 이용하여 비교하였다.

촉매 도입에 의해 가스화 반응 kinetics는 더욱 빨라지며 이때 높은 에너지 전환 효율을 얻을 수 있다^{9,13)}. Fan 등은 K₂CO₃를 촉매로 인도네시아 산 석탄 스팀 가스화를 진행하여 800°C에서 H₂, CO 가스 수율 향상을 관찰하였고 Sharma 등은 K₂CO₃에 의한 석탄 tar cracking 활성을 확인하였다^{9,17)}.

본 연구에서는 촉매 활성이 높고 고체 상에서도 이동성을 갖는 K₂CO₃를 저등급 석탄 가스화 촉매로 도입하여 석탄 종류 및 무촉매 반응 대비 반응속도 변화를 관찰하였다^{18,19)}.

2. 실 험

2.1 석탄 시료

Samhwa (SM), Eco (Eco), Roto (Roto), Kideco-L (Kid) 등 네 종의 인도네시아에서 채굴된 저등급 석탄을 시료로 선정하였다. 이들의 공업분석, 원소분석 및 발열량 결과를 아래 Table 1에 나타냈다²⁰⁾.

TGA-701 (LECO CO., USA)을 이용하여 ASTM D3172에 따라 수분, 휘발분, 고정탄소, 회분 함량을 결정하였다. Truspec elemental analyzer (LECO CO., USA)를 이용하여 ASTM D3176에 따라 탄소, 수소, 질소의 함량을, SC-432DR sulfur analyzer (LECO CO., USA)를 이용하여 KSE3708에 따라 황 함량을 결정하였다. 발열량은 Parr 6400 Calorimeter (PARR CO., USA)를 이용하여 측정하였다.

2.2 석탄 가스화 반응

실험용 석탄은 75 μm 이하의 입자 크기로 분쇄하여 사용하였다. 가스화 실험은 고정층 반응기에서 진행하였으며 그 공정도를 Fig. 1에 나타냈다^{21,22)}.

수직 석영 반응기(vertical quartz reactor)의 중간에 frit을 만들어 생성 가스만이 통과하도록 제작하였다. frit 위에 quartz wool을 놓고 0.1 g 시료를 올렸다. 시

Table 1 Proximate/ultimate analysis and calorific values of Indonesian low rank coals

Sample	Proximate analysis (wt%, *dry)				Ultimate analysis (wt%, daf)					CV (kcal/kg)
	M	VM*	FC*	Ash*	C	H	N	O	S	
Samhwa (SM)	11.4	57.2	40.3	2.5	72.8	5.4	1.0	20.8	0.0	4,554
Eco (Eco)	11.1	53.3	37.1	9.6	72.2	5.1	0.9	21.5	0.3	4,465
Roto (Roto)	9.3	53.0	33.7	13.3	71.2	5.6	0.7	22.4	0.1	5,540
Kideco-L (Kid)	24.3	51.8	41.8	6.4	70.3	5.1	1.2	23.2	0.2	4,660

(M: moisture, VM: volatile matter, FC: fixed carbon, *: dry basis, daf: dry & ash-free, CV:calorific value)

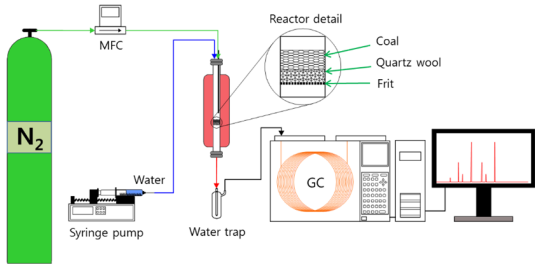


Fig. 1 Schematic view of a fixed bed gasification reactor.

료 위에 열전대(thermocouple)을 넣어 반응기 온도를 제어하였다. Syringe pump에서 0.36 ml/hr (30% vol %) 속도로 물을 주입하였으며 스팀 관의 물의 온도가 150 °C로 유지되도록 가열테이프(heating tape)을 여러 겹 감아 가열된 튜브에서 기화하여 스팀을 반응기로 공급하였다. N₂를 운반 기체로 사용하여 100 cc/min (GHSV = 15,000 h⁻¹) 유량으로 공급하였다. 석탄 반응 후 frit 하단으로 가스 생성물만이 통과하며, 이때 하단의 cold water trap (2°C)은 수증기와 타르를 제거하여 후단의 GC로의 유입을 방지하였다. 반응 생성가스를 기체 크로마토그래피(GC, agilent 6890)로 정성, 정량 분석하였으며 검출기는 열전도도 검출기(thermal conductivity detector, TCD)를 이용하여 Front column (Porapak N)에서 생성 가스 중 H₂와 CH₄를 정량 분석하고 back column (Porapak Q, Molsieve)에서는 CO와 CO₂를 분석하였다. GC는 12 분 간격으로 연속 측정하였다.

촉매 영향을 알아보기 위해 75 μm 이하 크기의 K₂CO₃ (Showa Chemicals Inc.)를 석탄 무게 대비 10 wt%로 하여 막자사발을 이용하여 석탄과 균일하게 혼합 후 촉매 가스화 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인도네시아 저등급 석탄의 스팀 가스화 반응

네 종의 인도네시아 저등급 석탄을 대상으로 700, 750, 800°C에서 스팀 가스화 반응을 실시하였다(Fig. 2).

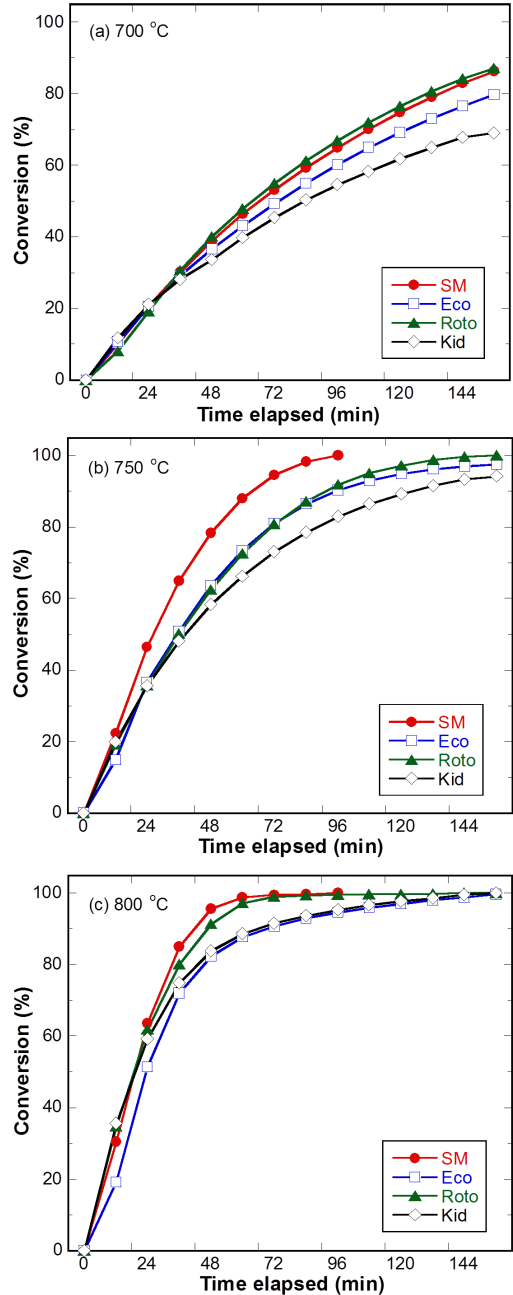


Fig. 2 Steam gasification of Samhwa (SM), Eco, Roto, and Kideco-L (Kid) low rank coals at (a) 700°C, (b) 750°C, (c) 800°C.

석탄 가스화 반응에 의해 H₂, CH₄, CO, CO₂ 등이 생성되었으며, 반응의 정량적 표현은 아래 식 (1)의 시간에 따른 전환율로 나타냈다²¹⁾.

Table 2 Ash composition in SM, Eco, Roto and Kid coal

Coal (wt%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Ash in coal	Ratio of catalytic ash*	Catalytic ash in coal**
SM	1.3	0.8	53.6	35.5	1.9	-	0.6	0.3	2.5	0.97	2.4
Eco	27.2	15.7	24.9	14.6	3.0	-	3.4	2.0	9.6	0.50	4.8
Roto	37.0	14.9	13.9	23.8	1.6	1.6	0.5	1.8	13.3	0.43	5.7
Kid	45.7	20.7	16.1	9.7	3.5	-	1.3	2.0	6.4	0.31	2.0

(*Ratio of catalytic ash (Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O) over total ash, **An amount of catalytic ash in coal, Catalytic ash: Catalytically active inorganic materials for coal gasification ex. Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O)

$$\text{전환율 (\%)} = \frac{\text{일정시간동안 생성된 가스의 총합}}{\text{반응완결시 생성된 가스의 총합}} \times 100 \quad (1)$$

700°C 반응 시, SM ~ Roto > Eco > Kid 순의 반응성을 나타냈다. 즉 156분 경과 후 SM과 Roto는 ~87%, Eco는 ~80%, Kid는 ~70% 생성가스로 전환되었다(Fig. 2(a)). 온도 증가에 따라 반응 속도는 큰 폭으로 증가되었다. 750°C에서 90% 이상의 전환율은 SM은 72분 후에, Eco와 Roto는 96분 후에, Kid는 132분 후에 나타났다(Fig. 2(b)). 추가적인 온도 증가에 따라 800°C에서는 SM과 Roto는 48분 이내에 Eco와 Kid는 72분 이내에 90% 이상 가스화 되었다(Fig. 2(c)). 본 실험에서 사용된 휘발분이 50 wt% 이상이며 산소 함량이 20 wt% 이상인 저등급 석탄에서 반응성 차이는 크지 않았다. 고등급 석탄인 역청탄 등과 비교 시 SM, Eco, Roto, Kid 등은 전반적으로 매우 높은 반응속도를 나타냈다²²⁾. 석탄의 가스화 반응성은 산소 함량에 비례하여 증가하고 탄소 함량 증가에 따라 감소한다^{20,22,23)}. 이에 따라 반응성이 큰 산소 기능기들을 많이 포함하는 저등급 석탄에서 상대적으로 빠른 전환이 이루어졌다.

각각의 석탄은 서로 다른 회분 조성 및 함량을 가지고 있다(Table 1). 본 연구에서 각 석탄들의 회분 조성을 분석하였다(Table 2).

전체 석탄 중 SM은 2.5 wt%, Eco는 9.6 wt%, Roto는 13.3 wt%, Kid는 6.4 wt%의 회분을 포함하며 이중 가스화 반응에서 촉매 활성을 보일 수 있는 Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O 등의 성분은 탄종에 따라 다

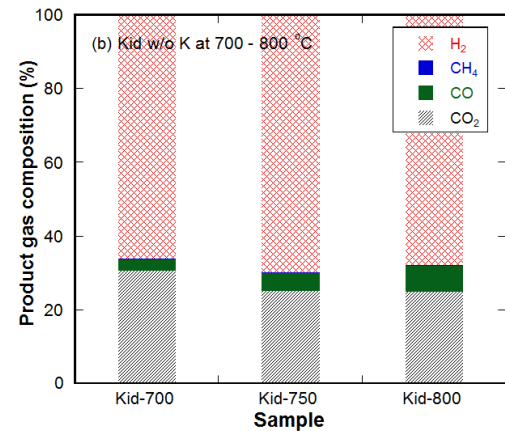
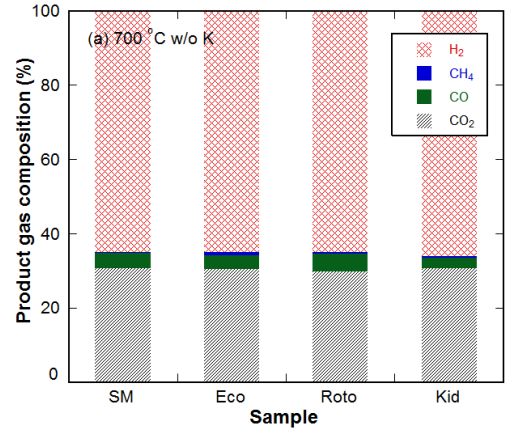


Fig. 3 Product gas composition. (a) SM, Eco, Roto and Kid at 700°C and (b) Kid at 700, 750, and 800°C (w/o: without K₂CO₃)

른 함량을 보였다¹⁷⁾. Eco, Roto, Kid에서는 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로 촉매 활성을 보이는 회분의 양은 50% 이하였다. 반면 SM은 대부분의 회분이 촉매 활성을 보이는 성분(97%)으로 구성되었다. Kid의 적은 활성 회분 양(2 wt%)은 낮은 반응 속도의 이유 중의 하나이며, 또한 Roto의 빠른 전환은 5.7 wt%의 높은 활성 회분 양에 영향을 받았을 것으로 추측된다.

위에 보여준 네 종의 석탄 가스화 반응에 의해 생성된 H₂, CH₄, CO, CO₂의 조성을 Fig. 3에 나타냈다. 700°C에서 가스화 된 저등급 석탄들은 종류에 무관하게 매우 유사한 생성 가스 조성을 나타냈다 (Fig. 3(a)). 즉 ~65%의 H₂, 1% 이하의 CH₄, ~4%의 CO,

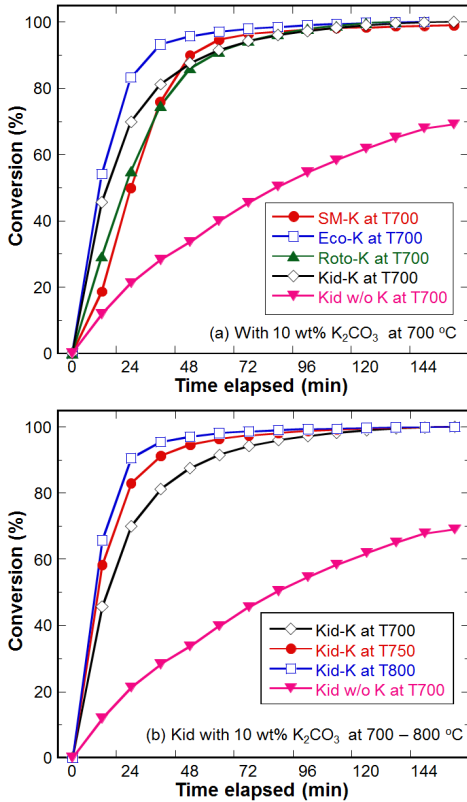


Fig. 4 Effect of K₂CO₃ (K) on steam gasification of low rank coals. (a) SM, Eco, Roto, and Kid at 700°C and (b) Kid at 700, 750, and 800°C (K: K₂CO₃, w/o: without, and T700, T750, T800: reaction temperature)

~30%의 CO₂를 생산했다. 선행 연구 결과는 석탄의 등급에 의존하는 생성물 조성을 보여주었으며, 유사한 조성을 보인 본 연구의 저등급 석탄 가스화 결과는 기존의 내용과 일치하였다²²⁾. 온도에 따른 생성 가스의 조성 변화를 Kid에 대하여 Fig. 3(b)에 정리하였다. 700°C에서 800°C로의 온도 증가에 따라 CO 조성은 3%에서 7%로 증가하며 동시에 CO₂의 조성은 31%에서 25%로 감소하였다. 이는 온도 증가에 따라 열역학적으로 water-gas shift (WGS) 반응의 역반응이 유리해지는 경향과 일치한다²²⁾.

3.2 인도네시아 저등급 석탄의 촉매 스팀 가스화 반응

촉매에 의한 활성화 영향 평가를 위해 네 종의 석

탄에 10wt% K₂CO₃를 막자사발을 이용한 고체 혼합법에 의해 각각 섞은 후 가스화 반응을 진행하였다 (Fig. 4).

Fig. 4(a)에 보이듯이 모든 저등급 석탄이 K₂CO₃ 도입에 의해 전환율이 크게 증가하였다. 비교를 위해 Kid의 700°C 무촉매 반응을 함께 나타냈다. 네 종의 석탄 모두 90% 이상의 전환율은 60분 이내에 달성되었다. Eco가 가장 빠르게 반응하였고 나머지 SM, Roto, Kid는 매우 유사한 속도로 전환되었다. 반면 Kid의 무촉매 가스화는 156분 후에도 ~70%의 전환율을 보여 촉매 반응과 큰 차이를 보였다. 이를 통해 탄종과 무관하게 촉매에 의한 활성화가 가능함을, 특히 반응성이 큰 대부분의 저등급 석탄 가스화는 촉매 도입 시 slagging을 피할 수 있는 낮은 온도에서 가스화 될 수 있음을 확인하였다¹¹⁾. K₂CO₃가 도입된 Kid 가스화 반응을 750°C와 800°C에서 진행하여 700°C 촉매 반응과 비교하였다(Fig. 4(b)). 예상대로 반응속도는 더욱 증가하여 750°C에서는 36분 이내에 90% 전환이 이루어졌고 800°C에서는 더욱 빨라져 24분 이내에 90% 이상 전환되었다. 이렇게 증가된 kinetics에 기인한 저등급 석탄의 촉매 가스화 반응은 저온 유동층 반응기에 적용 가능하리라 생각된다. 촉매 도입 시 Kid의 온도 증가에 따른 전환율 증가폭은 무촉매 반응 대비 작으며, 기 보고된 결과에서 무회분탄 역시 유사한 경향성을 나타냈다²¹⁾. SM, Eco, Roto 등의 촉매 가스화 반응도 Kid의 경우처럼 완만한 온도 의존성이 예상된다.

10 wt% K₂CO₃가 도입된 촉매 가스화 반응에서 얻어지는 생성 가스의 조성을 Fig. 5에 나타냈다.

촉매 유무에 따른 700°C에서의 생성 가스 조성을 비교한 결과 Kid를 제외한 모든 석탄에서 K₂CO₃ 도입에 의해 증가된 CO 조성을 나타냈다(Fig. 5(a)). 특히 SM에서는 4%에서 12%로 비교적 크게 증가하였다. 하지만 저등급 석탄 간의 생성물 조성의 차이는 고등급 석탄과의 비교 시 상대적으로 적으며, 고등급

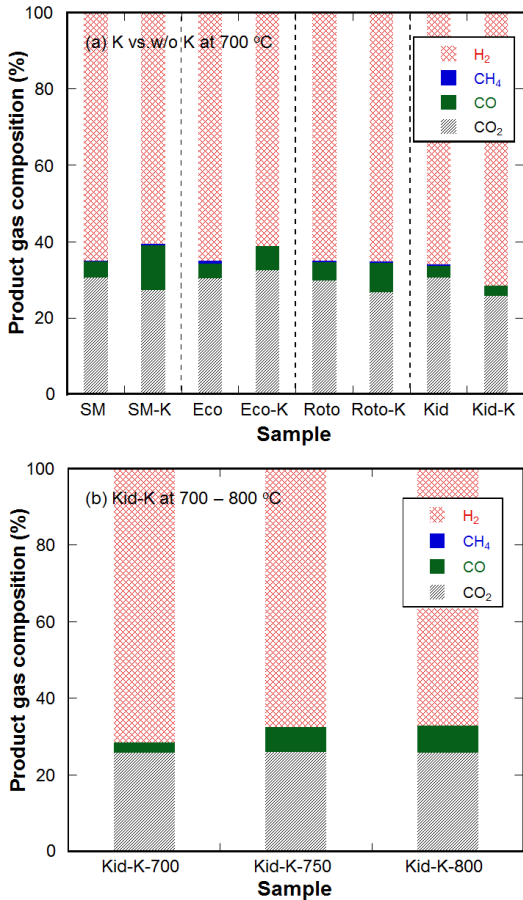


Fig. 5 Production gas composition. (a) Comparison of Low rank coals: Effect of K_2CO_3 at 700°C and (b) Kid with 10 wt% K_2CO_3 at 700-800°C (K: 10 wt% K_2CO_3 , and 700, 750, 800: reaction temperature)

석탄은 동일 조건에서 매우 적은 양의 CO가 생성됨이 보고되었다²²⁾. Kid의 촉매 가스화에 따른 H₂의 조성은 온도에 따라 67~71% 범위를 보이고, CH₄은 검출되지 않았으며, ~26%의 CO₂가 생성되었다. 무촉매 가스화 반응에서와 마찬가지로 Kid의 촉매 반응 온도를 700°C에서 800°C로 올린 경우 CO의 조성이 소량 증가하는 경향이 관찰되었다 (~3% → ~7%, Fig. 5(b)). 역시 WGS 반응의 열역학적 온도 의존성과 일치하는 결과이다.

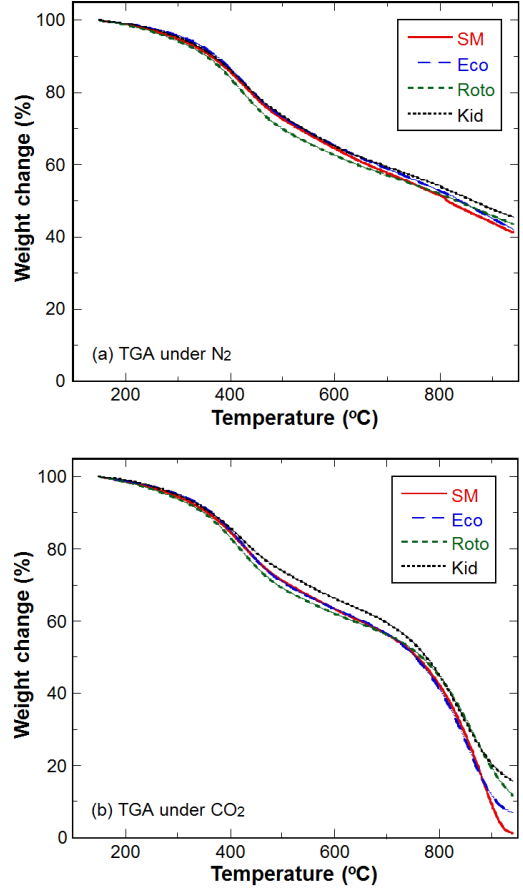


Fig. 6 TGA analysis of SM, Eco, Roto and Kid. (a) Under N_2 and (b) under CO_2

3.3 TGA, XRD, FT-IR 분석

SM, Eco, Roto, Kid 원탄의 열분해(N_2) 및 CO_2 가스화 반응성을 TGA를 이용하여 비교하였다(Fig. 6). 석탄 10 mg을 alumina 도가니에 넣은 후 10°C/min 속도로 900°C 까지 승온하며 무게 변화를 측정하였다. 이때 N_2 또는 CO_2 가스를 100 cc/min 유량으로 흘려주었다. 150 °C 이하에서 관찰된 무게 감량은 수분의 증발에 기인한다고 가정하고, 150°C를 시작점으로 분석하였다. Fig. 6(a)에 보이듯이 열분해 조건 (N_2 분위기)에서 무게 감량은 상대적으로 반응성이

큰 휘발분의 손실에 기인하며, 네 종의 석탄에서 유사한 무게 감량 거동이 관찰되었다. 즉 150~400°C 구간에서 서서히 감량 속도가 증가하다 400~600°C에서 비교적 급격한 손실을 보이고 600°C 이상에서 다시 완만한 기울기의 지속적인 손실이 나타났다. 무게 감량의 절대값은 석탄에 따른 차이가 크지 않으며 950°C에서 55~60%의 값을 보였다. 이러한 결과는 Fig. 2의 고정층 가스화 반응 결과와 일치한다²⁴⁾.

일반적으로 CO₂ 가스화 반응성은 스팀 가스화 반응성과 비례하여 나타난다²⁰⁾. 이에 본 실험에서는 CO₂ 분위기에서 TGA 실험을 통하여 석탄들의 반응성을 비교하고, 이를 통해 스팀 조건에서의 반응성과 연계하여 평가하였다. 위의 Fig. 6(b)에 보이듯이 CO₂ 분위기에서 ~700°C까지의 무게 변화는 열분해 조건과 거의 유사하다. 즉 대부분의 무게 감량은 열분해에 기인하고 CO₂ 가스화에 의한 영향은 거의 없다. 하지만 700°C 이상에서는 본격적으로 가스화가 진행되며 이에 따라 급격한 무게 감소가 관찰된다. 본 연구에서 스팀 가스화 반응이 실시된 700~800°C 범위에서는 유의할 만한 반응성의 차이가 나타나지 않았으나 850°C 이상에서는 SM > Eco > Roto > Kid 순으로 높은 반응성을 보였다. 이렇게 유사한 온도 증가에 따른 무게 감량 경향은 스팀 가스화 반응성 결과와 일치하였다(Fig. 2).

네 종의 석탄 시료에 대하여 XRD와 FT-IR 분석을 실시하여 Fig. 7에 나타냈다.

석탄은 수많은 화합물의 혼합체이므로 XRD 결과 전반적으로 넓은 면적의 peak가 관찰되며, 이때 2θ = 26과 43 부근의 graphite peak를 통해 탄화도를 판단할 수 있다²⁵⁾. 하지만 위의 Fig. 7(a)에 보이듯이 네 종의 석탄은 연령이 낮은 저등급 석탄이고 동일한 나라(인도네시아)에서 생산된 지역적 유사성으로 인해 유의할 만한 peak pattern의 차이는 관찰되지 않았다. 다만 회분 중 silica에 의한 peak 만이 2θ = 26 위치에 Eco, Roto, Kid에서 관찰되었다. Fig. 7(b)

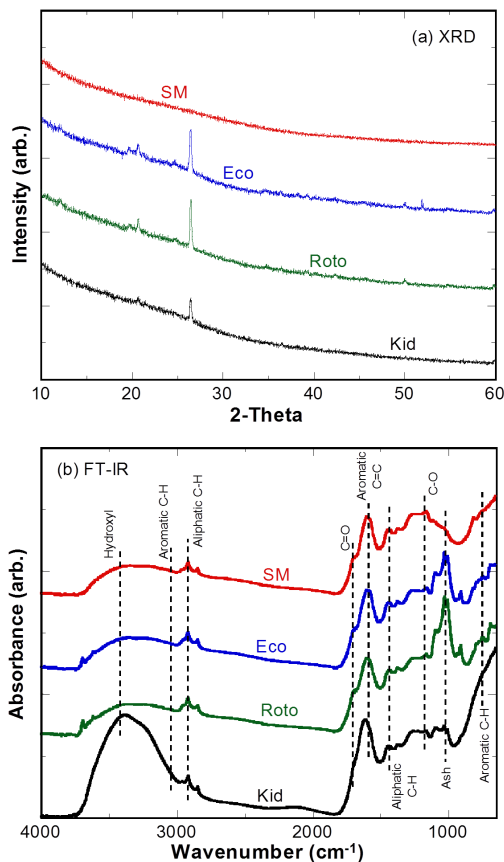


Fig. 7 Structural analysis of SM, Eco, Roto, and Kid. (a) XRD pattern and (b) FT-IR spectra

의 FT-IR 스펙트럼에서는 석탄에 포함된 물에 의해 hydroxyl peak가 3,400 cm⁻¹ 부근에서 관찰되었다²⁶⁾. Kid에서는 높은 수분 함량에 기인한 상대적으로 크고 넓은 peak가 나타났다. 회분에 의한 peak는 1,000 cm⁻¹ 부근에서 나타나며, 석탄 간에 서로 다른 회분 조성에 기인하여 모양의 차이를 보였다. 하지만 산소 기능기, 방향족 탄화수소, 지방족 탄화수소 및 기타 석탄의 화학적 성분을 나타내는 peak에서는 네 종의 석탄 간에 큰 차이가 없었다. 이러한 결과는 결국 유사한 가스화 반응 속도를 나타낸 Fig. 2의 결과와 일치한다.

4. 결 론

유사한 휘발분/고정탄소 및 탄소/산소 함량을 갖는 인도네시아 저등급 석탄 네 종에 대한 스팀 가스화 반응성을 고정층 반응기에서 평가하였다. 네 종의 석탄은 촉매 존재 유무에 무관하게 상호 유사한 반응성 및 생성물(H_2 , CO , CO_2) 조성을 나타냈다. 네 종 석탄에 대한 공업분석, 원소분석, TGA, XRD, FT-IR 등에서 유의할 만한 차이를 나타나지 않았으며, 이는 가스화 반응 결과와 일치하였다. 각각의 석탄에 10 wt% K_2CO_3 를 도입하여 가스화 반응의 촉매에 대한 영향을 확인한 결과 낮은 온도 ($700^\circ C$)에서 무촉매 반응과 비교 시 향상된 반응속도를 보였다. 특히 촉매가 도입되어 반응 kinetics가 향상된 경우 저등급 석탄의 스팀 가스화에서 회분의 slagging을 피할 수 있는 $800^\circ C$ 이하 저온 반응이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20131010101810).

References

1. <http://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity>
2. A. Bridges, F.A. Felder, K. Mckelvey, and I. Niyogi, "Uncertainty in energy planning: Estimating the health impacts of air pollution from fossil fuel electricity generation," *Energy Res. Social Sci.*, Vol. 6, 2015, pp. 74-77.
3. B. Atilgan, and A. Azapagic, "Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Turkey," *J. Clean Prod.*, Vol. 106, 2015, pp. 555-564.
4. International Energy Agency (IEA), *Energy and Air Pollution 2016-World Energy Outlook Special Report*, IEA, France, 2016.
5. United Nations (UN), *Framework Convention on Climate Change, Adoption of the Paris Agreement, Conference of the Parties*, UN, Paris, 2015.
6. J. Ma, J. P. Eason, A. W. Dowling, L. T. Biegler, and D. C. Miller, "Development of a first-principles hybrid boiler model for oxy-combustion power generation system," *Int. J. Greenhouse Gas Control*, Vol. 46, 2016, pp. 136-157.
7. A. Collot, "Matching gasification technologies to coal properties," *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 65, 2006, pp. 191-212.
8. A. C. Rady, S. Giddey, A. Kulkarni, S. P. S. Badwal and S. Bhattacharya, "Catalytic gasification of carbon in a direct carbon fuel cell," *Fuel*, Vol. 180, 2016, pp. 270-277.
9. S. Fan, X. Yuan, L. Zhao, L. X. T. Kang, and H. Kim, "Experimental and kinetic study of catalytic steam gasification of low rank coal with an environmentally friendly, inexpensive composite K_2CO_3 -eggshell derived CaO catalyst," *Fuel*, Vol. 165, 2016, pp. 397-404.
10. G. J. Stiegel, and M. Remezan, "Hydrogen from coal gasification: An economical pathway to a sustainable energy future," *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 65, 2006, pp. 173-190.
11. J. Wang, M. Jiang, Y. Yao, Y. Zhang, and J. Cao, "Steam gasification of coal char catalyzed by K_2CO_3 for enhanced production of hydrogen without formation of methane," *Fuel*, Vol. 88, 2009, pp. 1572-1579.
12. Energy times, <http://www.energytimes.kr/news/articleView.html?idxno=36853>
13. H. Haykiri-Acma, S. Yaman, and S. Kucukbayrak, "Co-combustion of low rank coal/waste biomass blends using dry air or oxygen," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 50, 2013, pp. 251-259.
14. J. Yu, A. Tahmasebi, Y. Han, F. Yin, and X. Li, "A review on water in low rank coals: The

- existence, interaction with coal structure and effects on coal utilization,” *Fuel Process. Technol.*, Vol. 106, 2013, pp. 9-20.
15. E. Mostafavi, N. Mahinpey, M. Rahman, M.H. Sedghkarder, and R. Gupta, “High-purity hydrogen production from ash-free coal by catalytic steam gasification integrated with dry-sorption CO₂ capture,” *Fuel*, Vol. 178, 2016, pp. 272-282.
 16. D. F. Umar, H. Usui, and B. Daulay, “Change of combustion characteristics of Indonesian low rank coal due to upgraded brown coal process,” *Fuel Process. Technol.*, Vol. 87, 2006, pp. 1007-1011.
 17. A. Sharma, A. Matsumura, and T. Takanohashi, “Effect of CO₂ addition on gas composition of synthesis gas from catalytic gasification of low rank coals,” *Fuel*, Vol. 152, 2015, pp. 13-18.
 18. X. Wu, J. Tang, and J. Wang, “A new active site/intermediate kinetic model for K₂CO₃-catalyzed steam gasification of ash-free coal char,” *Fuel*, Vol. 165, 2016, pp. 59-67.
 19. J. Kopyscinski, J. Lam, C. A. Mims, and J. M. Hill, “K₂CO₃ catalyzed steam gasification of ash-free coal. Studying the effect of temperature on carbon conversion and gas production rate using a drop-down reactor,” *Fuel*, Vol. 128, 2014, pp. 210-219.
 20. S. Kim, J. Yoo, D. Chun, S. Lee, and Y. Rhee, “Characterization of CO₂ Gasification of 17 coals with regard to coal rank,” *Clean Technol.*, Vol. 19, 2016, pp. 333-341.
 21. Y. Kong, J. Lim, Y. Rhim, D. Chun, S. Lee, J. Yoo, and Y. Rhee, “Comparative studies on K₂CO₃-based Catalytic Gasification of Samhwa Raw Coal and Its Ash-free Coal,” *Clean Technol.*, Vol. 20, 2014, pp. 218-225.
 22. Y. Kong, J. Kim, D. Chun, S. Lee, Y. Rhim, J. Lim, H. Choi, S. Kim, and J. Yoo, “Comparative studies on steam gasification of ash-free coals and their original raw coals,” *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 39, 2014, pp. 9212-9220.
 23. T. Takarada, Y. Tamai, and A. Tomita, “Reactivities of 34 coals under steam gasification,” *Fuel*, Vol. 64, 1985, pp. 1438-1442.
 24. W. Cho, S. Kim, H. Choi, Y. Rhim, J. Lim, S. Lee, and J. Yoo, “Characterization of chars made of solvent extracted coals,” *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 29, No. 2, 2011, pp. 190-195.
 25. X. Li, Z. Zhua, R. De Marcob, J. Bradleya, and A. Dicksa, “Evaluation of raw coals as fuels for direct carbon fuel cells,” *J. Power Sources*, Vol. 195, 2010, pp. 4051-4058.
 26. S. Supaluknari, F. Larkins, P. Redlich, and W. Jackson, “Determination of aromaticities and other structural features of Australian coals using solid state ¹³C-NMR and FTIR spectroscopies,” *Fuel Process. Technol.*, Vol. 23, 1989, pp. 47-61.