

Pilot 규모 석탄 가스화기에서의 탄종별 가스화성능 특성

박세익[†], 이중원*, 서혜경*

*한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소

Effects of Different Coal Type on Gasification Characteristics

SEIK PARK[†], JOONWON LEE*, HEAKYUNG SEO*

*Power Generation Lab., KEPCO Research Institute, 65 Munji-Ro,
Yuseong-Gu, Daejeon, 305-760, Korea

ABSTRACT

The IGCC (Integrated gasification combined cycle) is known for one of the highest efficiency and the lowest emitting coal fueled power generating technologies. As the core technology of this system is the gasifier to make the efficiency and the continuous operation time increase, the research about different coal's gasification has been conducted. Our research group had set-up the coal gasifier for the pilot test to study the effect of different coals-Shenhua and Adaro coal- on gasification characteristics. Gasification conditions like temperature and pressure were controlled at a fixed condition and coal feed rate was also controlled 30 kg/h to retain the constant experimental condition. Through this study we found effects of coal composition and O₂/coal ratio on the cold gas efficiency, carbon conversion rate. The compounds of coal like carbon and ash make the performance of gasifier change. And carbon conversion rate was decreased with reduced O₂/coal ratio⁷⁾. The optimal O₂/coal ratio is 0.8 for the highest cold gas efficiency approximately. At those operating conditions, the higher coal has the C/H ratio, the lower syn-gas has the H₂/CO ratio.

KEY WORDS : Gasifier(가스화기), Carbon conversion(탄소 전환율), IGCC(Integrated gasification combined cycle) : 석탄가스화복합발전)

1. 서 론

석탄 가스화 복합발전 시스템(integrated gasification combined cycle, IGCC)은 기존의 화력발전대비 효율적인 측면에서 5~10% 효과적이며, 배기 배출물의 환경적인 특성에 있어서도 유리한 기술로 각광

을 받고 있다. 이런 IGCC 시스템은 미분탄을 산화제와 일정량의 수증기와 반응시켜 일산화탄소(CO), 수소(H₂)와 같은 가연성 가스를 생산하는 석탄 가스화 공정, 생성된 가스 내에 함유된 불순물을 정제하는 공정이 포함된다. 그리고 정제된 가연성 가스를 이용하여 연소 후 발전시키는 가스터빈 공정, 상기 공정에서 발생하는 폐열을 이용하여 발전하는 증기터빈 공정으로 이루어져 해당 단위 공정들에 대한

[†] Corresponding author : seik@kepri.re.kr

[접수일 : 2010.8.18 수정일 : 2010.9.17 게재확정일 : 2010.10.20]

효율 향상방안과 이들 공정의 주/부산물의 최적 조합으로 효율을 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.

이러한 연구 중에서 다양한 형태의 가스화기(pilot 규모의 가스화기 포함)에서 상이한 탄종의 석탄 가스화 연구가 진행되었으며^{1~3)}, 석탄뿐만 아니라 폐기물과 바이오매스에 대한 가스화 성능 시험도 진행된 바 있다^{4,5)}. 대다수의 가스화기 실험 관련 연구는 세가지의 방향으로 나뉜다. 첫째, 특정 가스화기에서 선정된 시험용 탄의 가스화 성능을 평가 하기위해 가스화기에서 생산된 합성가스의 조성과 유량을 측정하여, 냉가스 효율, 탄소전환율, 사용탄 대비 발열량을 비교하여 열효율 등을 계산하여 새로운 형태의 디자인을 갖는 가스화기의 성능을 예측하는 연구이다^{1~3,9)}. 두 번째 연구 유형은 가스화기 최적화 측면에서 운전 조건을 실제 가스화 성능이 우수한 조건으로 맞추기 위해 N₂/fuel, O₂/fuel, H₂O/fuel 비를 달리하며 가스화기 내부의 온도 및 압력조건 별로 가스화 성능을 예측하는 연구이다^{3~6)}. 마지막으로 실험용 가스화기의 운전 재현성을 최대한 확보하여 특성이 상이한 미분탄을 이용하여 가스화 조건 변화에 따른 탄종 별 가스화 특성을 비교하는 연구이다^{2,3,5)}. 이 연구들의 대다수는 동일한 시험조건의 반복 및 재현이 힘들어 연속운전이 가능한 몇 개의 운전 조건에 대해 시험을 진행 한 후 특정 구간 별로 각 탄 종의 가스화 성능을 상호 비교하였다. 그리고 상기 두 분야의 연구에 비해 시험 재현성의 어려움 때문에 탄종 별 가스화 특성 비교 시험 연구가 미진한 상황이다.

본 연구에서는 신화탄과 아다로탄을 시험탄으로 선정하여 가스화 시험을 수행하고, 두 탄 종의 가스화 특성을 비교하였다.

2. 시험 장치

2.1 가스화설비

1 톤/일급 건식가스화기인 본 시험설비는 10기압, 1500℃까지 가스화운전이 가능하도록 설계되었다. 석탄 처리용량은 1톤/일급 수준으로 가스화반응에 사용되는 건조탄을 질소분위기에서 보관하는 리시

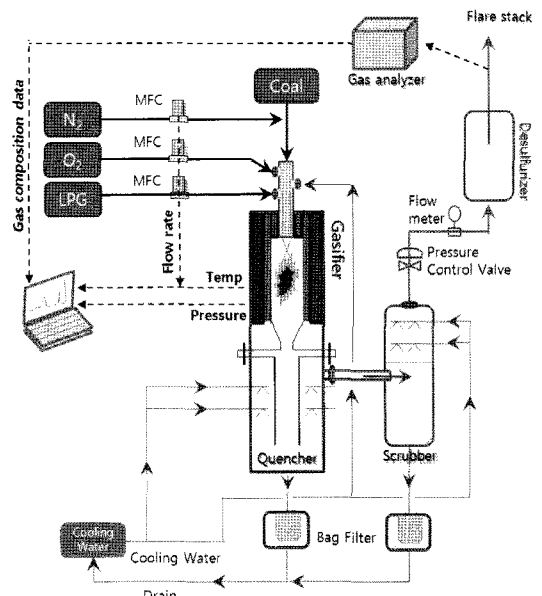


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility⁹⁾.

버호퍼(receiver hopper), 공압 수송 방식에 의해 미분탄을 이송하여 가압용기인 록호퍼(lock hopper)에 저장하고 스크류 피더(screw feeder)를 이용해 가스화기로 석탄을 공급하는 공급계통, 미분탄과 산소의 가스화반응을 담당하는 가스화기 이후 생성된 합성가스를 처리하는 정제계통으로 이루어져 있다. 이외에 미분탄을 가스화기의 석탄 버너(coal burner)까지 공급하기 위한 이송용 가스로 질소 공급계통과 가스화기에 산화제를 공급하기 위한 산소 공급계통, 그리고 가스화기 내부 압력을 유지하기위한

Table 1 Specification of coal gasifier

Title	Specification
Gas flow	Down flow
Feed	Pulverized coal
Reactor type	Entrained-bed type
Carrier gas	Nitrogen
Diameter of gasifier	200 mm
Length of gasifier	2310 mm
Inner refractory thickness	100 mm
Outer refractory thickness	290 mm

Table 2 Analysis of feed coal

		Shenhua coal	Adaro coal
Proximate analysis (wt%)	Moisture [%]	6.09	2.89
	Volatile [%]	33.33	43.33
	Ash [%]	5.46	5.57
	Carbon [%]	55.12	48.21
Ultimate analysis (wt%)	Carbon	78.6	72.93
	Hydrogen	4.96	5.21
	Nitrogen	1.03	1.57
	Oxygen	15.09	19.90
	Sulfur	0.32	0.28
Higher heating value (kcal/kg)		6880	6578.8
Size of coal		less than 200 mesh	

압력조절 계통으로 본 시스템은 운영된다. 시험설비의 개략도는 Fig. 1에서와 같으며 Table 1에는 가스화 설비의 규격을 포함하였다.

2.2 시 료

본 시험에 사용된 탄인 중국 신화탄과 인도네시아 아다로 탄의 공업분석 값과 원소분석 값은 Table 2와 같다.

사용된 중국 신화탄의 경우는 우리나라 대표적 발전용 수입탄 중으로, 휘발성분 기준 표준 탄종이다. 인도네시아 아다로탄은 아역청탄으로 건식가스화에 적합한 탄종임¹⁾이 알려져 있어 비교 탄으로 선정하였다. 뿐만 아니라 일반 화력발전소 용 미분탄의 경우는 회용점(ash melting point)이 1600°C 부근인데 반해, 시험에 사용된 미분탄은 가스화공정 중 회처리해 유리하게 회용점 1300°C 이하인 탄으로 선정하였다. 그리고 시험에 이용하기위해 대상탄은 200 mesh이하로 미분하여 이용하였다.

2.3 분석 장치

본 실험에서 미분탄과 산소가 가스화반응을 통하여 합성가스를 생산하는데 합성가스의 발생특성을 파악하기위해서는 생산된 합성가스의 조성을 파악하는 것이 중요하다. 이를 위해 mass spectrometer

(VG Prima δB)를 사용하여 생산된 합성가스의 조성을 분석하였다. 해당 장비 mass spectrometer는 6cm의 radius magnetic-sector mass spectrometer에 기반한 산업용 공정 분석기이다. 다양한 자기장은 안정된 전자석 hall prove에 의해 제공되며, 이는 laminated core가 탑재되어 신속하게 수개의 가스를 분석할 수 있다.

샘플 가스는 전자의 충격에 의해 이온화된다. 만일 이 이온들이 자장 내에 들어올 경우, 그 힘이 이온들에 작용하여 원형궤도로 회전하도록 한다. 궤도의 지름은 이온의 속도와 질량, 자장의 세기와 입자의 대전에 의해 결정된다.

고정된 이온 검출기가 전자석의 출구에 위치하고 있을 때 검출기에 도착하는 이온의 질량은 자장을 변화하여 선택할 수 있다. 시스템은 특정한 이온에 대한 검출기의 신호가 이와 대응하는 샘플가스 성분의 농도에 비례하도록 설정되어 있으며, 이 원리를 이용해 합성가스를 분석한다.

2.4 실험 방법

가스화기 시험은 3단계로 나뉘어 진행되는데 예열, 정상운전 및 변수별 실험으로 구성된다.

첫째 예열단계에서는 가스화기 하우징과 내부 내화재를 LPG burner를 이용하여 가열하되 300°C까지는 30°C/h 수준으로 서서히 가열하다가 그 이후에는 900°C까지 꾸준히 온도를 상승시킨다. 예열은 석탄 버너(coal burner)를 통해 공급되는 미분탄이 자발화가 가능하여 가스화반응이 일어날 수 있는 온도까지 진행된다. 상압조건에서 가열시키는 것이지만 안전을 위하여 LPG 버너의 불꽃은 제어실에서 지속적으로 모니터링 된다.

둘째, 정상운전은 예열이 완료된 후 가스화기를 운전 압력까지 가압하고, 미분탄과 산화제로 산소를 공급한다. 이때 가스화기 내부 압력보다 석탄 공급계통의 압력이 높아야 역화에 대비할 수 있으므로 다수의 차압계를 이용하여 호퍼와 가스화기, 버너와 호퍼, 가스화기와 버너 사이의 차압을 실시간 모니터링 해야 한다. 정상운전을 위해 가스화기 내부 압력과 온도를 모니터링 하면서 온도가 1400°C

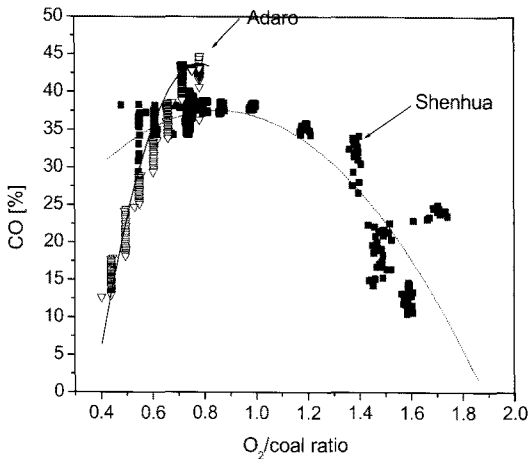


Fig. 2 The CO production ratio depending on O₂/coal ratio.

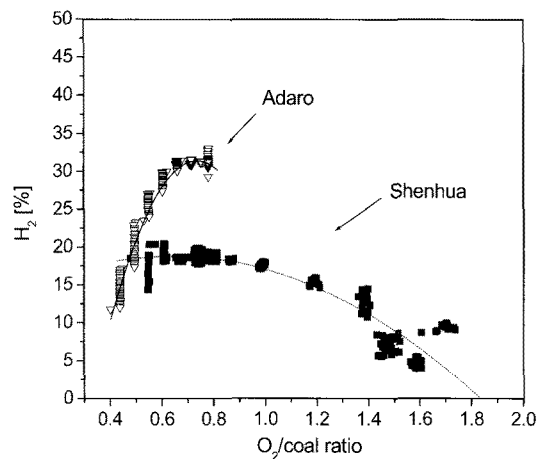


Fig. 3 The H₂ production ratio depending on O₂/coal ratio.

를 넘으면 산소의 공급량을 서서히 줄이며 가스화 조건을 형성시킨다. 이때 중요한 것은 가스화기 출구 단에 있는 가스화기 내부 압력 제어밸브의 개폐 조절과 석탄 공급량에 따른 산소 공급량을 적절히 조합하여 운전함으로써 정상상태의 가스화 운전조건에 도달할 수 있다. 이러한 조건이 30분 이상 지속될 경우 실험 변수를 달리 적용하여 변수 변화에 따른 가스화기 특성변화가 후단의 합성가스 조성 변화와 탄소전환율(carbon conversion rate) 및 냉가스 효율(cold gas efficiency)에 미치는 영향을 평가하는 본시험이 진행된다.

$$\begin{aligned} \text{Cold gas efficiency (\%)} &= \frac{\text{Heating value of product gas (MW)}}{\text{Heating value of fuel (MW)}} \times 100 \\ &= \frac{\text{Heating value of (CO, H}_2, \text{CH}_4)}{\text{Heating value of fuel (MW)}} \times 100 \end{aligned}$$

* Lower heating value 기준

$$\begin{aligned} \text{Carbon conversion (\%)} &= \left[1 - \frac{\text{Carbon in Gasification Residue [kmol/h]}}{\text{Carbon in Fuel [kmol/h]}} \right] \\ &\times 100 \end{aligned}$$

가스조성은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 습식 집진

기 후단 가스배관에서 분기하여 수분 및 분진을 제거한 후 mass spectroscopy(VG Prima 8B)를 이용하여 분석하였다. 습식 냉각기와 습식 집진기의 냉각수는 냉각탑에서 공급되고 가스에 의해 더워진 물은 냉각탑으로 다시 보내져 자연냉각 된다. 되돌아갈 때 분진을 제거하기 위해 백필터(bag filter)를 거치고 보내진다.

3. 시험 결과

시험용 탄에 대해 다양한 운전조건에서 가스화

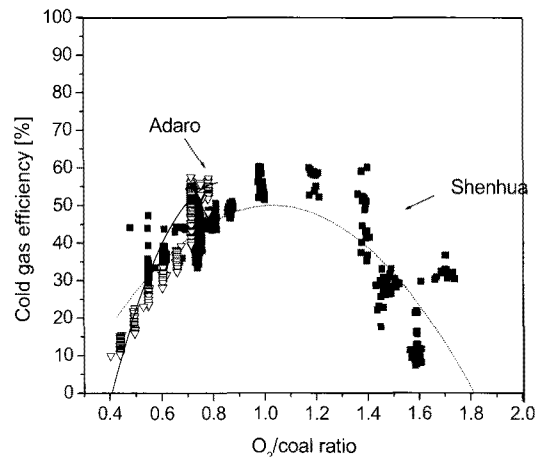


Fig. 4 The cold gas efficiency trend depending on O₂/coal ratio.

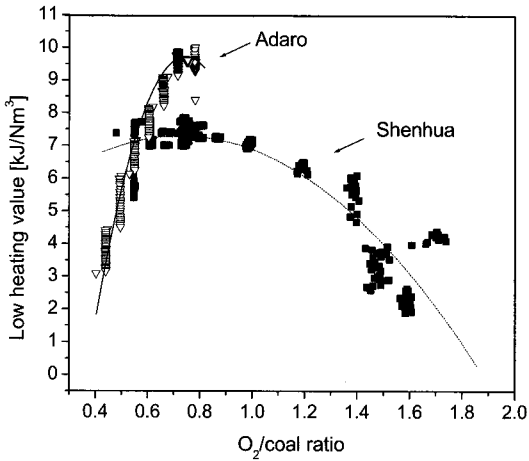


Fig. 5 The LHV trend depending on O₂/coal ratio.

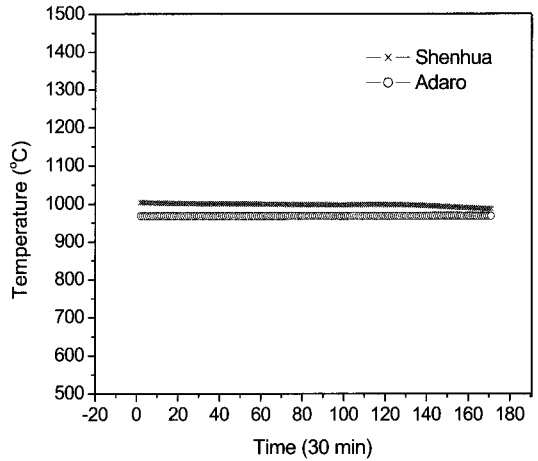


Fig. 7 Operating condition for gasification : temperature.

시험을 수행하였다. 일반적으로 석탄가스화 시험 설비처럼 시스템이 복잡할 경우 시험의 재현성은 물론이고 반복성이 좋지 않다. 하지만 다양한 운전 조건에서 탄종 별로 O₂/coal 비에 따른 가스화 성능을 비교하여본 결과 특정 구간에서 효율이 좋음을 확인하였다. Fig. 3~7에서 보는 바와 같이 가스화기 효율(냉가스 효율 기준)이 좋은 O₂/coal 비는 0.6~0.9인 구간이며, 이 구간을 운전비교 구간으로 정하여 해당 구간에서의 운전 특성을 비교하였다. 이러한 시험결과는 Higman등이 제시한 연구결과와

일치한다⁷⁾. 가스화 시험을 수행함에 있어 O₂/coal 비를 0.7~0.8로 제한하되, 석탄가스화 시험 운전 시 공급되는 석탄의 양이 동일한 구간을 선별하여 입력(input)조건을 동일하게 하였다. 그리고 선별된 운전 구간 중에서도 Fig. 7에서 보는 바와 같이 가스화 조건 중 주요 인자인 온도조건을 1000(±50)°C로 일정하게 유지하였다. 마지막으로 Higman 등에 의해 압력의 경우에 있어서는 그 변화가 크더라도 합성 가스 조성 및 효율 측면에서는 민감도가 작다는 연구 결과를 보고한 바 있다⁷⁾. 하지만 실험의 정

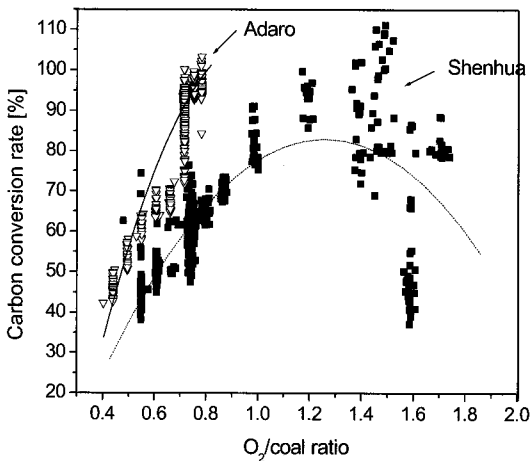


Fig. 6 The carbon conversion rate depending on O₂/coal ratio.

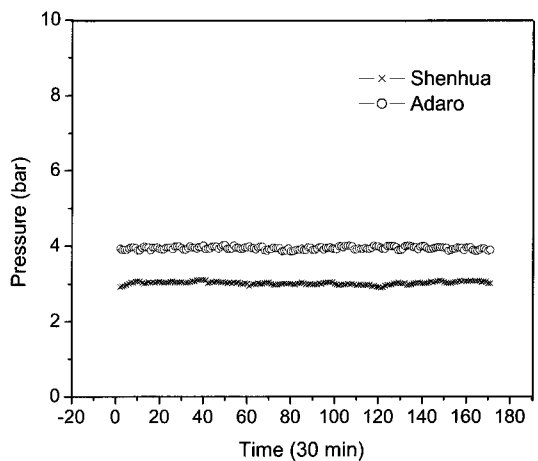


Fig. 8 Operating condition for gasification : pressure.

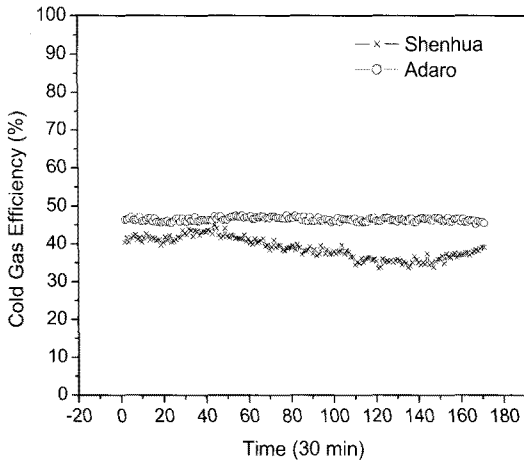


Fig. 9 Effects of different coal type on cold gas efficiency.

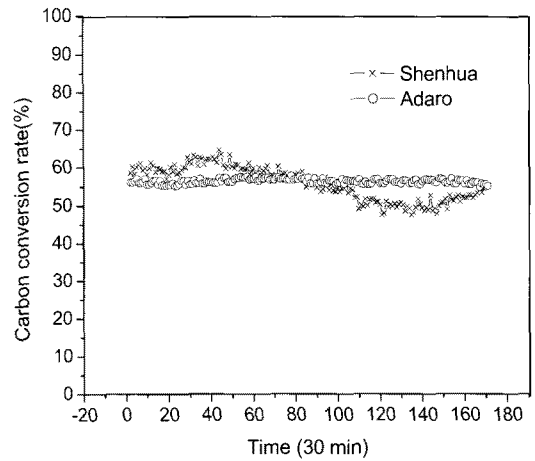


Fig. 11 Effects of different coal type on carbon conversion rate.

확도 제고를 위해 압력조건 또한 Fig. 8과 같이 $3.5(\pm 0.5)$ bar 조건에서 유지하여 입력조건과 가스화 조건을 일정하게 유지하였다.

3.1 시험탄의 유기물 함량이 합성가스 조성 및 효율에 미치는 영향

신화탄과 아다로탄의 가스화반응을 통해 생산된 합성가스를 분석하여 얻은 냉가스효율, 탄소전환율 및 저위발열량(LHV : lower heating value)에 대한

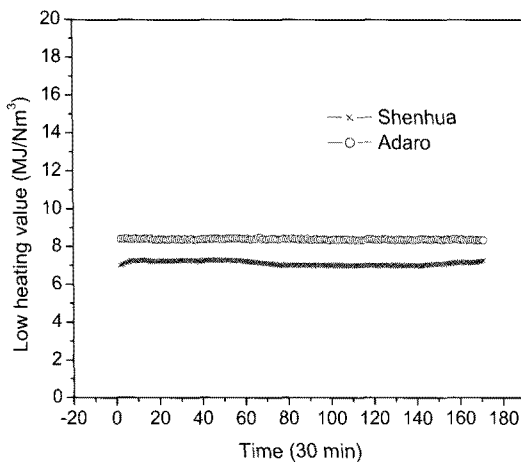


Fig. 10 Effects of different coal type on lower heating value.

그래프는 Fig. 9~11에 나타내었다.

Fig. 10에서와 같이 냉가스 효율(cold gas efficiency)은 아다로탄의 경우 신화탄에 비해 높은 결과를 보였다. 이와 같은 관점에서 Fig. 10에 제시된 저위발열량(LHV)의 경우도 아다로탄을 이용하여 생산된 합성가스의 경우가 20%이상 높았다. 이 결과는 생성된 합성가스의 조성이 아다로탄의 경우 CO와 H₂의 조성 비율이 67%에 이르나 신화탄의 경우 56% 수준으로 낮은데 기인한다. 단, 생성되는 CO₂의 발생비율을 두 탄종이 10%로 유사한 경향을 보였다. 이는 동일한 온도 및 석탄 공급 조건을 맞추어 실험을 하는데 석탄 내의 함 산소량에 따른 냉가스 효율이 차이가 나기 때문이다. Fig. 4에서와 같이 신화탄의 경우는 다소 높은 O₂/coal 비인 1부근에서 최대의 효율을 보이는 반면 아다로 탄의 경우는 0.8 부근에서 최대의 효율을 보이는 것을 확인할 수 있는데 실험 조건인 0.75 부근에서는 아다로탄의 냉가스 효율이 더 높은 것이다. 그리고 아다로 탄의 경우 연료 내 산소 함량이 신화탄에 비해 상대적으로 많아 가스화기 내부 온도를 동일하게 하기 위해 발열 반응인 연소 반응에 필요한 산소의 공급량이 신화탄에 비해 적음을 확인할 수 있다. 이로 인해 공급되는 산화제의 양을 조절한 결과 아다로 탄의 O₂/coal의 비율이 신화탄에 비해 적다. 이러한 결과

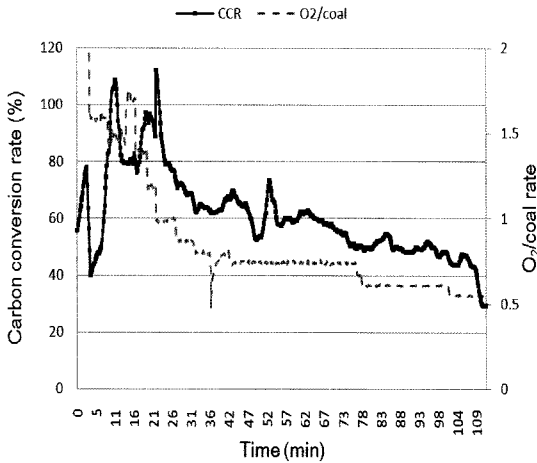


Fig. 12 The relation between O₂/coal ratio and carbon conversion rate (shenhua coal).

를 근거로 향후 가스화기에 도입되는 석탄의 최적의 가스화 조건 도출 과정에서 필요한 산소요구량 선정에 탄종별 산소함량 데이터가 도움이 될 것으로 판단된다.

그리고 합성가스 단위 부피당 저위 발열량을 계산한 결과 Fig. 10처럼 20%가량 차이를 보인다. 하지만 냉가스 효율이 10%차이를 보이는 것은 시험탄이 갖고 있는 발열량이 5%정도 차이가 나서 이것을 이용하여 정규화하면 10%정도의 열효율 차이로 줄어들게 된다. 탄소전환율(carbon conversion)의 경우 55% 내외로 Fig. 11에서와 같이 유사한 결과를 보였다. 일반적으로 탄소 전환율(carbon conversion)은 O₂/coal의 비율이 1 이상일 경우 100%에 근접하고 그렇지 못할 경우 비율에 따라 탄소 전환율이 감소한다⁷⁾.

본 연구에서도 Fig. 12에서 보는 바와 같이 신화탄의 경우 O₂/coal 비율이 1 이상에서 탄소전환율이 100% 수준을 보이다가, 산화제 공급량을 줄이며, 석탄 공급량을 늘여 O₂/coal의 비율을 60% 수준까지 낮아질 경우 탄소 전환율이 50% 수준으로 낮아지는 것을 확인하였다. 신화탄을 통해 탄소 전환율이 O₂/coal의 특정 구간에서 최대값을 보이는 것을 확인하고, 아다로 탄의 경우는 실험구간을 O₂/coal 1이하로 정하여 실험을 진행하였다. 즉, 실험에 사용된 파일럿 규모의 가스화기 운전한계 및 탄종 별

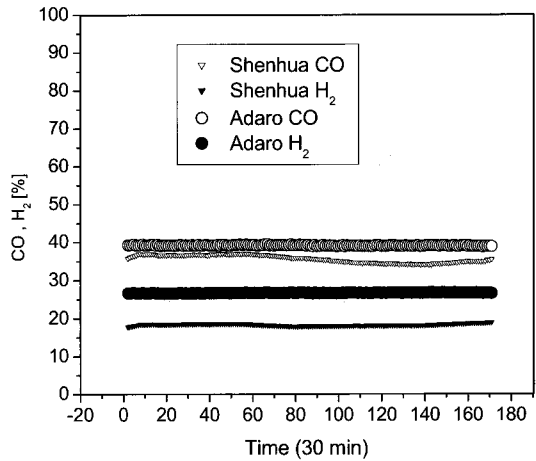


Fig. 13 Effects of coal type on CO and H₂ concentration in the syngas.

시험조건을 동일하게 맞추기 위해 선택한 운전구간이 O₂/coal의 비율 80% 이하구간이며, 그 구간에서 탄소 전환율은 60% 정도로 낮은 수준을 보였다.

3.2 탄종의 C/H ratio가 합성가스 조성에 미치는 영향(H₂/CO와의 상관관계)

생산된 합성가스의 조성 중 H₂/CO의 비율은 일반적으로 건식가스화기의 경우 0.5로 알려져 있다⁸⁾. 그에 반해 Fig. 13에서와 같이 신화탄은 0.55, 아다로탄의 경우는 0.67로 신화탄 대비 20% 이상 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 아다로탄의 원소 분석 결과 중 탄소 대비 수소의 비율이 신화탄에 비해 높은 것에 기인하는데 Higman 등은 실험 탄종의 C/H 비율(ratio)이 크면 동일한 가스화 조건에서 H₂/CO는 작음을 보고한 바 있다⁷⁾. 도입되는 탄종의 carbon 함량에 따라 생성되는 합성가스의 조성이 영향을 받으므로 도입되는 탄종의 조성비를 탄소(carbon) 및 수소(hydrogen)에 맞추어 가스화를 진행하기 위한 지표로써 활용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

전력연구원에서 setup한 파일럿 규모의 석탄 가스화기 시험설비에 우리나라 대표적 발전용 수입탄

종으로, 휘발성분 기준 표준 탄종이며, 건식가스화에 적합한 중국 신화탄과 아다로탄을 사용하여, 두 탄의 조성차이가 가스화 성능에 미치는 영향을 평가하고 향후 연구계획을 정리 한 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험에 이용된 탄인 아다로탄과 신화탄의 경우 O₂/coal 비를 달리하여 운전한 결과 0.6~0.9 부근에서 최고의 효율을 보인다.
- 2) 최고의 효율을 보이는 O₂/coal비 조건에서 온도와 압력조건을 맞추어 가스화 할 경우 탄종 내의 C/H의 비율이 높은 탄일수록 합성가스의 H₂/CO의 비율이 높다.
- 3) 여러 탄종에 대한 가스화 성능 시험을 통해 본 파일럿 가스화시험설비의 효용성을 검증하였다. 이후 coal burner 형상 변경이 가스화 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행할 예정이다.
- 4) 석탄 버너의 cold test 이후 가스화 성능에 영향을 주는 주요 인자를 도출하고, 이를 근거로 가스화기 형상에 따른 최적의 석탄 버너 선정을 위한 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- 1) 윤용승, 이계봉, 정석우, “건식 석탄가스화기에서 생성된 미량가스와 비산재의 특성”, 화학공학회 논문집, Vol. 14, No. 4, 2003, pp. 511-518.
- 2) See Hoon Lee, Sang Jun Yoon, Ho Won Ra, Young Il Son, Jai Chang Hong, Jae Goo Lee, “Gasification characteristics of coke and mixture with coal in an entrained-flow gasifier”, Journal of energy, Vol. 35, 2010, pp. 3239-3244.
- 3) Yongseung Yun, Young Don Yoo, Seok Woo Chung, “Selection of IGCC candidate coals by pilot-scale gasifier operation”, Journal of fuel processing technology, Vol. 88, 2007, pp. 107-116.
- 4) Juan J. Hernández a, Guadalupe Aranda- Almansa a, Antonio Bula b “Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time”, Journal of fuel processing technology, Vol. 92, 2010, pp. 681-692.
- 5) 정석우, 이도연, 정우현, 박준성, 전동환, “오일샌드 bitumen 가스화기 시스템의 중질 잔사유 적용 가스화 운전특성”, Applied Chemistry, Vol. 13, No. 1, April, 2009, pp. 153-156.
- 6) Nenad Crnomarkovic, Branislav Repic, Rastko Mladenovic, Olivera Neskovic, Miomir Veljkovic, “Experimental investigation of role of steam in entrained flow coal gasification”, Journal of fuel, Vol. 86, 2007, pp. 194-202.
- 7) Christopher Higman, Maarten van der Burgt, “Gasification”, second edition, 2008, pp. 12-90.
- 8) Xiaolei Guo, Zhenghua Dai, Xin Gong, Xueli Chen, Haifeng Liu, Fuchen Wang, Zunhong Yu, “Performance of an entrained-flow gasification technology of pulverized coal in pilot scale plant”, Journal of fuel processing technology Vol. 88, 2007, pp. 451-459.
- 9) 서혜경, 정재화, 주지선, “건식 석탄 공급형 1Ton/Day급 가스화시스템 설계조건 및 시운전결과”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 20, No. 4, 2009, pp. 352-359.