

## 석탄 및 폐기물로부터 합성가스 제조를 위한 가스화용융 Pilot Plant 운전특성

정석우<sup>1)</sup>, 윤용승<sup>2)</sup>, 유영돈<sup>3)</sup>

### Operation Characteristics of Gasification/Melting Pilot Plants for Synthesis Gas Production using Coal and Waste

Seokwoo Chung, Yongseung Yun, Youngdon Yoo

Key words : Gasification(가스화), Melting(용융), Slag(슬랙), Synthesis Gas(합성가스), 가스화기(Gasifier), Coal(석탄), 폐기물(Waste), 가스엔진(Gas Engine)

Abstract : Gasification has been regarded as a very important technology to decrease environmental pollution and to obtain higher efficiency. The gasification process converts carbon containing feedstock into a synthesis gas, composed primarily of CO and H<sub>2</sub>. And the synthesis gas can be used as a source for power generation or chemical material production. Through more than nine years, IAE developed and upgraded several gasification/melting pilot plant system, and obtained a good quality synthesis gas. This paper illustrates the gasification characteristics and operation results of two 3 ton/day synthesis gas production facilities. One is entrained-bed slagging type coal gasifier system which is normally operated in the temperature range of 1,400~1,450°C, 8~10 bar pressure. And the other is fixed-bed type gasification/melting furnace system using MSW and industrial wastes as a feedstock.

#### 1. 서론

가스화용융 기술은 석탄, petroleum coke, 폐기물 등의 시료로부터 유용한 대체에너지원인 합성가스를 생산하는 고청정, 고효율 기술로서, 생산되는 합성가스는 천연가스를 대체하여 발전에 사용되거나 화학원료 또는 액체연료를 생산하기 위한 원료 물질로 사용이 가능하다. 가스화기 내부에서 공급되는 시료와 산소의 가스화 반응에 의해 생산되는 합성가스는 CO와 H<sub>2</sub>가 주 성분이며, 가스화기 내부의 고온 조건으로 인해 공급되는 시료 중 무기물 성분은 용융되면서 골재 또는 노반재 등으로 재활용이 가능한 슬랙 형태로 배출된다. 그리고, 가스화용융 기술의 장점으로는 가스화기 내부가 환원성 분위기이므로 주요 공해 물질인 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>의 발생을 최소화할 수 있다는 점이다. 이는 가스화반응이 산소가 불충분한 불완전연소이므로 화학반응 자체에서 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>가 발생하지 않고, 대신 시료내의 S와 N 성분이 H<sub>2</sub>S와 NH<sub>3</sub> 형태로 대부분 발생되므로 후단 공정에서

의 처리가 용이하기 때문이다.<sup>[1]</sup>

가스화용융의 대표적인 공정인 가스화복합발전(IGCC) 시스템은 석탄, 중잔유 등과 같은 고체 및 액체 시료를 고온/고압의 조건에서 가스화반응을 통하여 CO와 H<sub>2</sub>가 주성분인 합성가스를 제조한 다음 가스정제 공정을 거쳐 가스터빈에서 1차발전, 증기터빈에서 2차발전을 하는 방식으로 말하며, 주요 설비로는 가스화기계통, 가스정제계통, 발전계통 및 산소분리계통 등으로 구분된다. 석탄가스화복합발전의 경우에는 매장량이 풍부하며 세계적으로 골고루 분포되어 있는 석탄을 환경친화적이면서도 42~50% 정도의 고효율로

- 
- 1) 고등기술연구원 Plant Engineering센터  
E-mail : swchung@iae.re.kr  
Tel : (031)219-1946 Fax : (031)219-2306
  - 2) 고등기술연구원 Plant Engineering센터  
E-mail : ysyun@iae.re.kr  
Tel : (031)330-7486 Fax : (031)330-7113
  - 3) 고등기술연구원 Plant Engineering센터  
E-mail : ydnyoo@iae.re.kr  
Tel : (031)219-2686 Fax : (031)216-9125

활용이 가능하도록 하는 신뢰성 있는 차세대 발전기술로서, 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 이미 국가적인 차원에서 연구개발과 실증 플랜의 건설/운전이 진행중에 있다.<sup>[2]</sup>

가연성 폐기물을 대상으로 하는 가스화용융 기술은 기존 연소에 의해 폐기물을 처리하는 소각방식의 기술적인 문제점을 극복하고, 매립시 발생하는 지하수, 토양 등의 오염문제를 해결할 수 있는 대안으로 대두되어 1980년대 중반부터 독일과 일본을 중심으로 활발한 개발 및 상업화가 진행되고 있다.<sup>[3]</sup> 그리고, 이러한 폐기물 가스화용융 기술은 소각 처리시 발생하는 다이옥신 문제와 소각재의 중금속 용출에 의한 환경오염 문제를 동시에 해결할 수 있는 기술로서, 최근 국내의 지자체들도 큰 관심을 가지고 있어 국내 시장이 형성되기 시작하는 단계에 있다.

고등기술연구원에서도 1995년부터 아주대학교 내에 3톤/일급 건식 분류층 석탄 가스화기 pilot 플랜트를 건설하여 합성가스 제조 신뢰성 향상 운전기술 및 발전시스템 연계 기술 개발을 진행하고 있으며, 2002년부터 생활폐기물 및 산업폐기물을 가스화용융 시키기 위한 3톤/일 규모의 고정층 가스화용융로를 건설하여 시험을 진행하고 있는데, 본 연구는 양질의 합성가스를 제조하기 위하여 진행한 두 설비의 운전특성을 비교한 것이다.

## 2. 실험장치

### 2.1 석탄 가스화기 pilot 플랜트

고등기술연구원의 3톤/일급 석탄 가스화기 시스템은 대상탄을 74 $\mu$ m 크기로 분쇄하고 건조하는 석탄 분쇄/건조장치, 분쇄된 미분탄을 기류수송 방식에 의해 고압으로 석탄 가스화기에 공급하는 고압 미분탄공급장치, 미분탄과 산소의 가스화 반응에 의해 합성가스(CO, H<sub>2</sub>)를 제조하고 불연분은 용융시켜 슬랙으로 배출하는 분류층 석탄 가스화기, 가스화기에서 생성되는 고온의 합성가스를 정제설비의 처리온도까지 낮추는 합성가스 냉각장치, 합성가스에 포함된 분진과 H<sub>2</sub>S 성분을 제거하기 위한 고온집진장치, 고온탈황장치 및 스크러버 등으로 구성되는데, Fig.1은 이러한 3톤/일급 석탄 가스화기 시스템의 개략적인 공정 구성도를 나타낸 것이다.

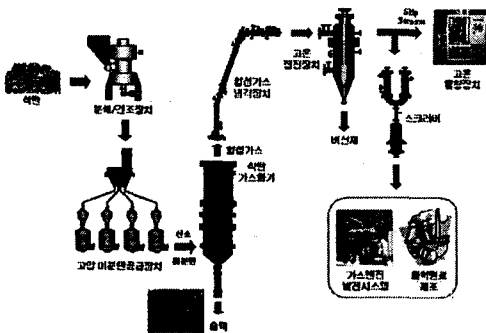


Fig. 1 Schematic diagram of 3 ton/day scale coal gasification system

그리고, 가스화 반응에 의해 생성되는 합성가스는 전기생산 실증 연구를 위한 100kW급 이하 가스엔진 발전시스템이나 DME 등과 같은 화학원료 제조를 위한 후단 공정에 공급이 가능하도록 구성하였다.

### 2.1 폐기물 가스화용융 pilot 플랜트

폐기물을 가스화용융 시키기 위한 공정의 기본 개념은 폐기물 열분해 과정을 통해 균일한 조건의 시료가 가스화용융로에 공급될 수 있도록 하고, 가스화용융로에서 가연성 탄소성분을 가스화시키면서 무기물 성분을 용융시키는 것이다. 따라서, 3톤/일급 폐기물 가스화용융 시스템은 Fig. 2에 나타난 바와같이 유입에 의해 공급되는 폐기물을 압축하기 위한 압축공정, 압축된 폐기물을 이송과정에서 휘발분을 제거하여 탄화시키기 위한 탈가스화공정, 공급되는 폐기물을 산소와의 가스화반응에 의해 합성가스를 제조하고 불연분을 용융시키기 위한 가스화용융공정, 생성된 고온의 합성가스를 급속냉각 시킴으로써 다이옥신의 재합성을 방지하고 분진을 제거하기 위한 급속냉각 및 세정공정, 냉각수와의 접촉에 의해 고형화된 슬랙을 배출하기 위한 슬랙배출공정 등으로 구성하였다.

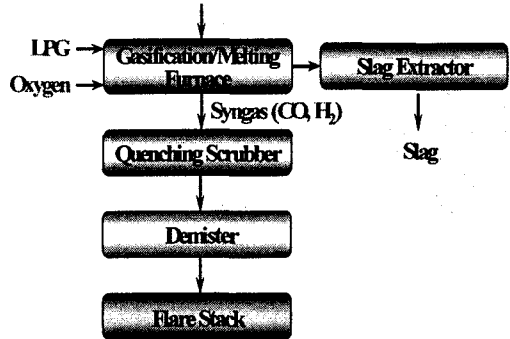


Fig. 2 Process flow diagram of 3 ton/day scale waste gasification/melting system

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 대상시료 분석

석탄 가스화기 시스템을 이용한 실험에서는 인도네시아 아역청탄인 Kideco탄을 대상으로 하였으며, 폐기물 가스화용융로 실험에서는 국내 D사에서 발생한 산업폐기물을 대상으로 실험을 진행하였는데, Table 1은 각 시스템 별로 실험에서 사용한 대상시료의 분석결과를 나타낸 것이다. 대상시료의 분석결과에 의하면 두 시료 모두 수분함량은 비슷하지만 석탄의 경우에는 회분 함량이 5.23% 정도인 반면에 산업폐기물의 경우에는 64.43%로 시료중에 회분이 매우 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그리고, 휘발분과 고정탄소의 함량도 석탄이 수분에 비하여 훨씬 많이 포함되어 있으며 이에따라 발열량도 대상 석탄이 산업폐기물에 비해 3배 이상 높은 것으로 분석되었

다. 따라서, 석탄 가스화기 시스템의 경우에는 미분탄과 산소의 공급만으로도 가스화용에 필요한 온도를 유지할 수 있지만, 폐기물 가스화용의 경우에는 시료의 낮은 발열량을 고려하여 반응기 내부온도 유지를 위하여 LPG를 보조연료로 공급하게 된다.

Table 1 Analysis data of feed coal and waste

Sample		Kideco Coal	Industrial Waste
Proximate Analysis <sup>1)</sup> [wt. %]	MW	5.68	5.60
	VM	41.34	27.45
	Ash	5.23	64.43
	FC	47.75	2.52
Ultimate Analysis <sup>2)</sup> [wt. %]	C	68.64	16.51
	H	5.06	2.36
	N	1.06	0.36
	S	0.12	0.06
	O	19.59	12.45
	Ash	5.54	68.26
Calorific Value [kcal/kg]		6,275	1,990

1)as-received basis 2)moisture-free basis

### 3.2 운전조건

3톤/일급 석탄 가스화기는 분류층 슬래깅 방식으로서 공급되는 미분탄에 포함된 회분의 용융온도가 1250~1300℃임을 고려하여 가스화기 내부온도 1400~1450℃, 운전압력 8기압을 정상운전조건으로 설정하였다. 그리고, 대상시료인 미분탄은 40 kg/h 조건으로 공급하였고 가스화반응을 위해 산화제로 공급되는 산소는 미분탄과 무게비로 0.85~0.9 범위에서 공급하였다. 그리고, 미분탄을 석탄 가스화기에 기류수송하기 위하여 4기의 고압 미분탄공급장치에 질소 가스를 공급하였다.

Table 2 Operating condition of coal gasifier and waste gasification/melting furnace

Reactor	Coal Gasifier	Waste Gasification/Melting Furnace
Feedstock	Kideco Coal	Industrial Solid Waste
Operating Temperature	1400~1450 °C	1350~1550 °C
Operating Pressure	8 kg/cm <sup>2</sup>	0.01 kg/cm <sup>2</sup>
Feedstock Feed Rate	40 kg/h	120 kg/h
Oxygen Feed Rate	24~26 Nm <sup>3</sup> /h	65~75 Nm <sup>3</sup> /h
O <sub>2</sub> /Feedstock Weight Ratio	0.85~0.9	0.77~0.89
Nitrogen Feed Rate	35~40 Nm <sup>3</sup> /h	none

폐기물 가스화용로의 경우에는 고점층 방식으로서 거의 상압에서 운전이 이루어지는데, 120 kg/h 조건으로 공급되는 폐기물의 가스화용을 위하여 가스화용로에 설치된 버너들을 통하여 보조연료인 LPG를 12Nm<sup>3</sup>/h, 산소를 65~75 Nm<sup>3</sup>/h 조건으로 공급하였으며, 가스화용로 출구 합성가스의 온도는 1200℃ 이상을 유지하는 조건에서 실험을 진행하였다. 그리고, 가스화용로에서 배출되는 고온의 합성가스는 다이옥신 등과 같은 유해물질의 재합성을 방지하기 위하여 후단의 급속냉각 스크러버를 통과하면서 70℃ 이하로 급속히 냉각되도록 하였다. Table 2는 이와같은 석탄 가스화기 및 폐기물 가스화용로의 운전조건을 나타낸 것이다.

### 3.3 운전결과

석탄 가스화기 가압 완료후 미분탄과 산소가 공급되기 시작하면서 정상운전이 진행되었는데, 정상운전중 가스화기의 운전온도와 압력은 Fig. 3에 나타낸 바와같이 1400~1450℃, 8기압 정도를 유지하였으며, 생성되는 합성가스 유량은 40 kg/h의 미분탄 공급조건에서 100~120 Nm<sup>3</sup>/h를 유지하였다.

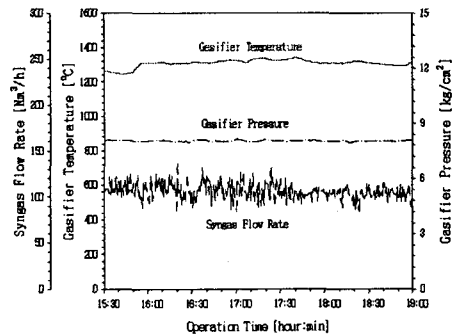
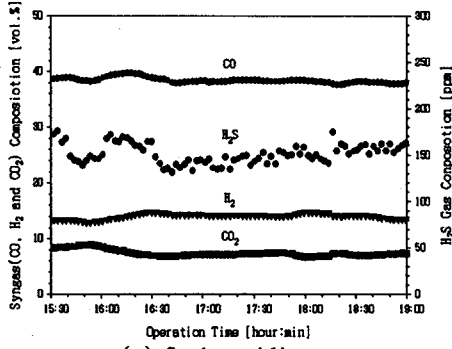
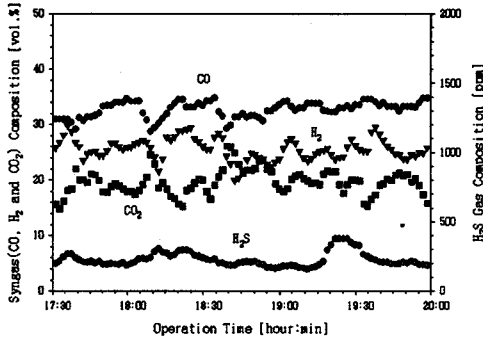


Fig. 3 Operation profiles of 3 ton/day coal gasification system using Kideco coal

그리고, Fig. 4는 석탄 가스화기와 폐기물 가스화용로에서 생성된 합성가스의 조성을 나타낸 것으로, (a)에 나타낸 석탄 가스화기의 경우에는 부피비로 CO 38~40%, H<sub>2</sub> 13~15%, CO<sub>2</sub> 6~9% 범위에서 일정하게 유지되었으며 미량가스인 H<sub>2</sub>S 가스는 30~170 ppm 범위를 유지하면서 운전이 진행되었다. 석탄 가스화기 생성 합성가스를 제외한 나머지 조성은 미분탄을 가스화기로 기류수송하기 위하여 공급되는 이송용 질소 가스이다. 또한, Kideco탄을 이용한 실험에서 가스화 탄소 전환율은 평균 95~98%를 달성하였으며, 투입된 에너지로부터 재사용이 가능한 합성가스로 회수되는 에너지 비율인 냉가스효율도 70~75% 정도의 우수한 결과를 달성하였다. (b)에 나타낸 폐기물 가스화용로의 경우에는 CO 30~35%, H<sub>2</sub> 20~30%, CO<sub>2</sub> 15~25% 범위의 합성가스가 제조되었으며, H<sub>2</sub>S 가스는 200~300 ppm 정도가 발생하였다. 그리고, 두 시스템 모두 환원성 분위기의 가스화 반응이 진행되므로 생성된 합성가스 중에 산소는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.



(a) Coal gasifier



(b) Waste gasification/melting furnace

Fig. 4 Syngas composition profiles during normal operation of coal gasifier and waste gasification/melting furnace

Table 3은 석탄 가스화기와 폐기물 가스화용융로에서 생성된 고품화 슬래크 내부의 중금속 함량 및 용출시험 결과를 나타낸 것으로, 이 결과에 의하면 두 시스템 모두 가스화용융 과정에서 슬래크 내부에는 중금속이 농축되지만 고온의 열적반응을 거치면서 화학적으로 안정화되므로 용출수에서는 중금속이 거의 검출되지 않았으며 국내 환경기준치 이하로 분석됨으로써 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3 Leaching test results for slag from Kideco coal and Industrial solid waste

분석 항목	Kideco Coal		Industrial Solid Waste		국내환경 기준 용출수 [mg/L]
	Slag [mg/kg]	용출수 [mg/L]	Slag [mg/kg]	용출수 [mg/L]	
Pb	12.05	0.015	20	N.D	3.0
Cd	6.88	N.D	N.D	N.D	0.3
Cu	58.2	0.027	1500	N.D	3.0
Cr	35315	0.017	2200	N.D	1.5
As	46.83	0.001	20	N.D	1.5
Hg	5.52	N.D	N.D	N.D	0.005

주)용출수의 Cr은 Cr<sup>6+</sup> 임

#### 4. 결론

인도네시아 아역청탄인 Kideco탄을 사용한 8기압 압력조건에서의 가스화 실험을 통하여 양질의 합성가스 제조를 위한 운전기술 개발을 진행하였는데, 시험 결과 미분탄이 일정하게 공급될 경우 CO 38~40%, H<sub>2</sub> 13~15%, CO<sub>2</sub> 6~9% 조성의 합성가스를 100~120 Nm<sup>3</sup>/h 범위에서 안정적으로 제조할 수 있었다. 그리고, 다양한 성상을 갖는 국내의 산업폐기물을 가스화용융 하는데 있어서 자체 건설한 열분해 가스화용융 공정을 적용하여 안정적으로 고온을 유지하면서 CO 30~35%, H<sub>2</sub> 20~30%, CO<sub>2</sub> 15~25% 정도의 양질의 합성가스 조성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

이러한 합성가스는 발열량이 낮기는 하지만 청정에너지원으로서 가스터빈이나 가스엔진을 이용한 발전시스템에서 연료로 사용이 가능하며, DME 등을 제조하기 위한 원료물질로도 사용이 가능하므로 향후 제조된 합성가스를 활용하기 위한 연구기반이 확보되었다 할 수 있다. 또한, 발생된 슬래크의 용출수에 대한 중금속 농도를 측정된 결과를 통해 환경 무해성 및 재활용 가능성을 확인하였다.

#### References

- [1] 윤용승, 고정층 및 분류층 반응을 이용한 가스화용융 공정기술, 2003년도 Fall 화학공정 특별 심포지엄, pp.97-106, 2003
- [2] 산업자원부, 가스화 복합시스템 연계 실증 및 모사기술 개발, 보고서 2000-N-CO2-P-01, Vol.1, 2002
- [3] Y.Yun, S.W.Chung, Y.D.Yoo, Syngas quality in gasification of high moisture municipal solid wastes, American Chemical Society, 48(2), 823, 2003

#### 감사

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단 신재생에너지센터에서 지원하는 “석탄가스화 합성가스 제조공정 및 발전시스템 기술 개발” 과제에 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.