

파일럿 규모의 폐기물 다단열분해 가스화시스템의 운전특성

*이 정우¹⁾, **류 태우²⁾, 방 병열²⁾, 문 지홍²⁾, 이 재욱²⁾, 박 상신²⁾, 김 낙주³⁾

Operating Characteristics of Pilot Scale Multi-Staged Waste Pyrolysis & Gasification System

*Jeongwoo Lee, **TaeU Yu, Byeongryeol Bang, Jihong Moon, Jaek Lee, Sangshin Park, Nackjoo Kim

Abstract : A novel multi-staged waste pyrolysis & gasification system of pilot scale (~1 ton/day) is designed and constructed in Korea Institute of Industrial Technology. The pyrolysis & gasification system is composed of pyrolysis & gasification system, syngas reformer, syngas cleaning system, gas engine power generation system and co-combustion system. For each unit process, experimental approaches have been conducted to find optimal design and operating conditions. As a result, We can produce syngas with a calorific value of ~4000 kcal/Nm³ and cold gas efficiency of the system is more than 55 % in case of waste plastic and oxygen as a gasifying agent.

Key words : Pyrolysis(열분해), Gasification(가스화), Waste Plastic(폐플라스틱), Co-Combustion(혼소), Gas Engine Power Generation(가스엔진발전)

Nomenclature

RPF : Refused Plastic Fuel
DAF: Dry Ash Free
CGE : Cold Gas Efficiency
CCE : Carbon Conversion Efficiency
ER: Excess Oxygen Equivalent Ratio
HHV: Higher Heating Value

1. 서론

폐기물의 소각/열처리에 대한 비중이 늘어나면서 국내에서도 약 30여기의 대형 도시 쓰레기 소각로들이 건설/운영 중에 있으며, 이외에도 많은 중/소형 소각로 및 산업 폐기물 소각로들이 운영되고 있다. 소각 플랜트는 계절 및 지역에 따라 변동이 심한 연료를 처리하며, 다이옥신 등 다른 연소설비에는 없는 극독성의 공해물질들을 생성하기 때문에 유해물질 배출 허용 기준을 맞추기 위한 많은 연구 및 운전조건의 개선이 이루어져왔다. 그러나 많은 일반 대중들의 요구를 만족시키기 위해 최근 들어 소각 신기술에 대한 도입이 요구되어 왔으며, 이에 따른 해당 기술의 도입 또는 개발이 이루어져 실증 단계에 있다. 현재 국내에서는 많은 대기업 및 중소기업들이

소각로 또는 대표적인 신기술로 소개된 열분해 용융 소각로 등을 제작하고 있으나 대부분의 업체들은 기술도입 또는 단순모방을 통하여 제작 및 건설을 하고 있는 실정으로, 경제성을 확보할 수 있는 국산 기술의 개발이 어느 때 보다도 중요한 상황이다. 특히 기 개발되고 있는 연구들은 주로 폐기물의 저공해 처리에 초점이 맞추어져 있어, 2004년 기준으로 연간 240만 톤에 이르고 있는 가연성 폐기물의 에너지 자원화로의 인식 및 해당 연구가 시급히 필요한 실정이다.

본 연구의 기본 목표는 기존의 폐기물 소각로 대신 폐기물을 가스화하는 열분해-가스화 공정으로써 폐기물의 에너지를 신재생에너지로 전환, 생산하는데 주목적이 있다. 폐기물 열분해 가스화 관련 현 기술의 가장 큰 문제점은 생산되는 합성 가스의 발열량이 너무 낮아서 발전을 통한 에너지 생산에 적합

- 1) 과학기술연합대학원대학교 청정공정 및 시스템공학
E-mail : jwlee93@kitech.re.kr
Tel : (041)589-8537 Fax : (041)589-8323
- 2) 한국생산기술연구원 고온생산기술연구부
E-mail : ytu@kitech.re.kr
Tel : (041)589-8532 Fax : (041)589-8323
- 3) 서울산업대학교 정밀화학과
E-mail : nackjoo@snut.ac.kr
Tel : (02)970-6669 Fax : (02)975-1814

하지 않다는 것에 있다. 현재 보고되고 있는 폐기물 합성 가스의 발열량은 2000 kcal/Nm³ 전후로 나타나고 있으며, 이를 정상적인/안정적인 상용화 수준 (steady electricity output)의 발전 공정에 적용하기 위해서는 보조 연료를 사용하여야 한다. 따라서 합성가스의 발열량을 높이는 기술이 필요하다. 두 번째 문제점은 가스엔진 또는 가스터빈에 사용되는 합성 가스가 얼마나 깨끗한가에 대한 것으로, 합성 가스 내에 염 화합물 또는 황 화합물이 존재하면 합성가스가 가스엔진/터빈 및 보일러를 통과하면서 관련 설비를 부식 시키고 수명을 감소하게 한다. 통상 이러한 부식문제를 해결하기 위해 생산된 합성가스를 정제하여 사용한다. 그러나 염 및 황 화합물의 양은 미미하지만 전체 합성가스를 세정하여야하므로 매우 비경제적이다. 따라서 보다 경제적인 염 및 황 화합물을 제거 및 세정 공정을 개발하는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서 상기 문제점들을 해결하기 위해 기존 가스화 시스템과 차별시킨 부분은 사전 탈염, 탈황시스템을 갖추고 고발열량의 합성가스를 생산하기 위해 직접 또는 간접의 열분해 방식과 가스화 (부분산화형태)에 주안점을 두었다는 점이다. 따라서 열분해 가스화로의 전체 구성은 총 4 단계로 하며, 탈염공정 - 열분해(고발열량 가스생산) - 부분산화 (탄소(char)전환을 통한 가스화) - 연소 또는 용융 (탄소전환, 열공급) 형태로 다단으로 구성하도록 하였다.

2. 다단열분해 가스화 실험

2.1 다단열분해 가스화 시스템

Fig.1은 전체 실험 시스템의 흐름도이다. 그 구성은 크게 다단열분해가스화시스템(1T/D 이상), 합성가스세정시스템(최대 5NCMM), 합성가스발

전시스템 (최대출력 20kW(합성가스 기준))이며, 발생된 합성가스는 합성가스엔진발전기를 가동하지 않을 경우는 혼소보일러로 유입되게 하였다.

본 연구에서 열분해 합성가스 생산에 대한 기본적인 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 1차 열분해로에서 350 - 400 °C 상태로 열분해가 이루어지며 이 단계에서 염소, 황, 등의 오염물질이 열분해되어 배출한다. 즉, 이 단계에서 탈염소 탈황이 이루어진다.
- 2) 2차 열분해로에서는 1차 열분해로에서 가열된 폐기물이 2차 열분해로 단계로 투입되면서 600-800 °C까지 가열되면서 본격적으로 열분해 된다.
- 3) 3차 부분산화로에서는 이전 단계에서 급격하게 열분해되어 감량화된 폐기물이 하부에서 공급되는 산소에 의해 부분산화 되면서 대부분의 char가 저감된다. 이때 발생하는 고온의 가스는 2차 열분해에 필요한 열을 공급하면서 2차열분해 상부로 배출된다. 이때 온도는 900°C 이상이 유지된다. 남아있는 Ash는 다음 단계 Ash Tank로 들어간다.
- 4) 1차 열분해로 상부 배출구로는 열분해된 염소는 Cl₂, HCl 형태로, 황은 H₂S, COS 형태로 외부로 배출되고 세정되어 다시 2차 열분해가스와 합류된다.
- 5) 2차 열분해로 단계에서 생성되는 열분해가스는 부분산화 가스와 같이 상부 배출구로 배출되고, 개질기를 통과하면서 함유된 tar가 분해되고, 열교환기를 통과하면서 냉각 된 후, Spray Cooler, Bag Filter, Scrubber, ID Fan을 통과하여 Buffer Tank에 채류하게 된다. 채류된 합성가스는 합성가스엔진 발전시스템으로 유입되어 전력생산하거나, 혼소보일러로 유입되게 된다.

본 연구에 적용된 열분해 가스화로 방식은 운전

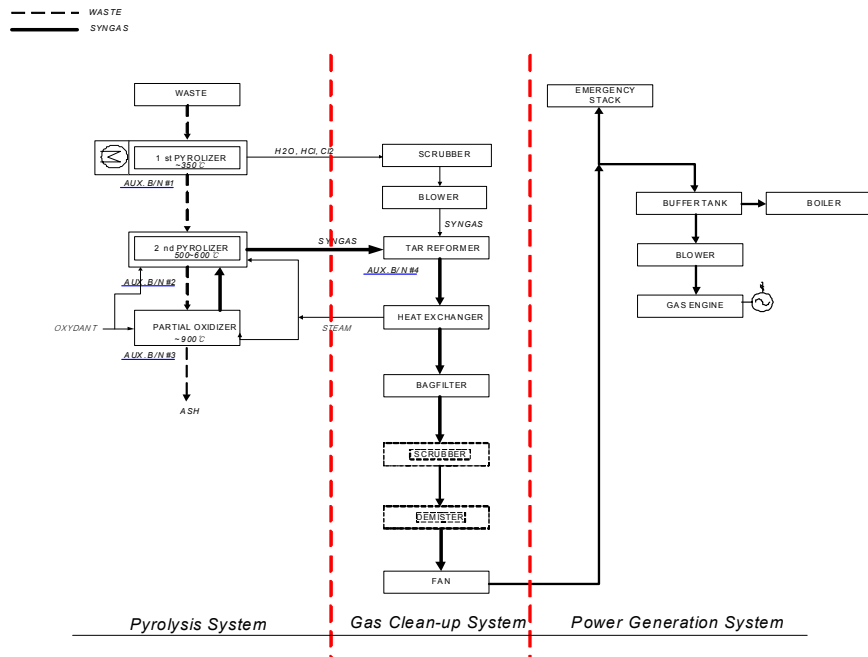


Fig. 1. Flow Diagram of Multi-Staged Pyrolysis & Gasification system.

및 유지보수의 편의성 측면과 대용량으로 Scale-up 할 경우, 용이성을 가지는 Stoker 방식으로 채택하였다. Stoker 방식은 국내 대용량 생활폐기물 소각 처리시설 대부분이 채택하고 있는 방식이지만, 열분해 및 가스화에 적용된 사례는 많지 않다⁽¹⁾⁽²⁾. 현재, 국내의 stoker 방식의 열분해용융로는 열분해 용융 가스를 2차 연소로에서 모두 소각하는 형태로 운영되거나 연구되고 있다⁽³⁾⁽⁴⁾.

2.2 실험대상 폐기물

열분해 가스화로의 특성을 파악하기 위해 성상이 거의 일정한 폐기물을 대상으로 하였으며, 그 종류는 폐 플라스틱, 폐목재, 폐타이어 등이다. 폐 플라스틱의 경우, RPF를 약 100mm 정도로 분쇄하여 사용하였다. 폐목재의 경우, 소나무, 전나무 등을 칩형태로 사용하였으며 본 연구에서는 주로 예열용으로 사용하였다. 폐타이어는 분쇄하여 도로 포장 등에 사용되는 약 10mm 상당의 타이어 분말을 구매하여 사용하였다. 전체 폐기물은 약 1~2일간 자연 건조시켜 준비하였다. 시험대상 폐기물의 공업분석, 원소 분석치를 Table 1에 나타내었다. 폐플라스틱의 경우, 휘발분의 함량이 높기 때문에 열분해에 유리한 할 것으로 판단되며, 폐타이어 및 폐목재의 경우, 고정탄소 함량이 높아 대체적으로 탄소전환에 오랜 시간과 많은 에너지가 소요될 것으로 판단된다.

Table 1. Proximate and Ultimate Analysis of Test Materials

구 분	폐플라스틱	폐목재	폐타이어	
공업분석 (wt. %)	수 분	0.5	6.4	0.6
	휘발분	71.9	75.9	67.3
	고정탄소	6.6	17.4	25.8
	회분	21.0	0.3	6.3
	합계	100	100	100
원소분석 (DAF. wt %)	C	65.2	50.8	86.2
	H	8.7	5.37	7.6
	O	19.2	43.6	2.8
	N	1.0	0	0.5
	S	0.5	0.23	2.9
	Cl	5.1	0	0
	합계	100	100	100
고위발열량 (kcal/kg)	5794	3575	8812	

3. 운전특성 및 고찰

3.1. 고발열량 합성가스 생성 실험

다단 열분해 가스화로 시스템 예열은 1차 열분해로, 2차 열분해로, 3차 부분산화로, 타르 개질기에 설치된 산소 버너를 작동하여 약 2-3시간정도 열분해로의 온도가 상승할 때까지 가열하였다. 이후, 열분해, 부분산화 목적에 따라 설치된 버너의 LNG 유

량 및 산소유량을 조절하였다. Table 2는 고발열량 합성가스 생산을 위한 실험조건이다. 안정적으로 다단열분해 가스화 시스템에서 고발열량 합성가스 생성 조건을 찾기 위해 총 3회의 실험이 이루어졌다. 폐기물은 RPF를 사용하였으며, 고발열량 합성가스를 생성시키기 위해서 설계치보다 많은 양의 폐기물을 투입하였다. 폐기물 투입 후 각 조건별로 보조열원 (LNG 와 산소)을 변화시키면서 측정 분석하였다. 로내압은 모든 조건에서 5 mmH₂O로 설정하였다. 폐기물 투입량은 80kg/hr로 동일하게 투입하였다.

Table 2. Test Condition for Syngas Production

구 분	단 위	Test #1	Test #2	Test #3
폐기물 종류	-	RPF	RPF	RPF
폐기물 투입량	kg/hr	80	80	80
	Ton/day	1.92	1.92	1.92
폐기물 발열량	kcal/kg	5794	5794	5794
폐기물 총 투입열량	kcal/hr	463,520	46,3520	463,520
폐기물 투입속도	kg/min	7kg/5min	7kg/5min	7kg/5min
로내압 설정치	mmH ₂ O	5	5	5
보조열원 투입열량	kcal/hr	107,100	100,800	138,600
보조열원 과잉 산소비	-	1.0	1.1	1.26

Fig. 2는 시험 전체 기간 동안의 온도변화를 나타내었다. 전체적으로 1차 열분해 약 450°C, 2차 열분해로 약 700°C, 부분산화로 약 900~950°C로 잘 유지가 되고 있는 것을 알 수 있다.

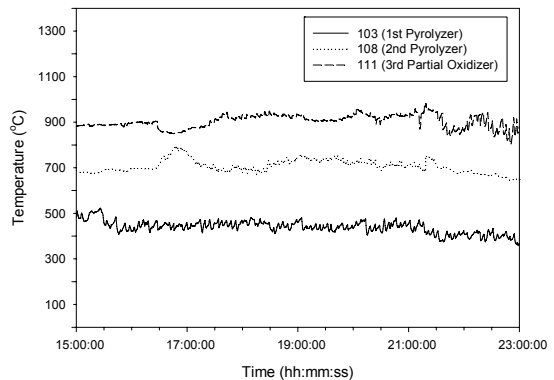


Fig. 2. The Temperature Profile of the Inside of the Mult-Stage Pyrolyzer.

Fig. 3은 전형적으로 다단열분해로에서 발생하는 합성가스의 조성을 나타낸 그래프이다. 약간의 fluctuation이 있는 것은 폐기물의 투입과 pusher에 의한 이송 후, 폐기물의 열분해에 의한 가스량의 증가가 원인이며, 상대적으로 급격하게 변하지는 않는 것으로 판단된다. Table 3은 고발열량 합성가스 생산 실험결과를 정리한 자료이다. Test #1에서는 낮

은 가열열량과 산화제 공급으로 인해 합성가스 조성, 냉가스 효율, 탄소전환율이 저조하게 나타나고 있다. Test #2과 Test #3에서 조성 측면에서 어느 정도 차이를 보이고 있는데, CO₂의 경우 타르개질로가 부분산화 형태로 운전되기 때문에 상당량 증가하였으며, H₂ 나 CO의 농도는 큰 차이가 없지만, 수율 측면에서 각각 약 35%정도 증가하였다. Test #2에서는 Test #3에 비해 제한된 산화제 공급을 통해서 CH₄의 농도가 높게 나타나고 있다. 고발열량의 합성가스를 얻기 위해서 H₂ 나 CO 농도를 높이는 것은 한계가 있기 때문에, CH₄ 농도와 수율 높아야 한다는 점을 알 수 있다. CH₄의 수율을 높이기 위해서는 2차 열분해로, 부분산화로의 온도를 각각 600°C, 800~900°C 정도로 적절하게 유지하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

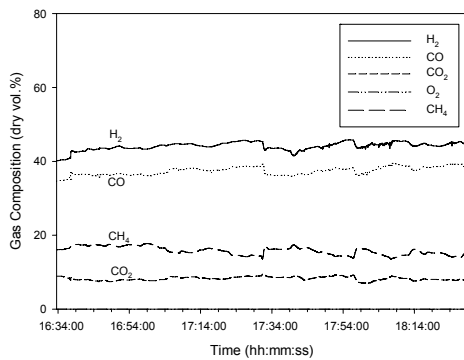


Fig. 3. Variation of Gas Composition (Test #2, RPF, 80 kg/hr)

Table 3. Summary of Test Result for Syngas Production

구 분		Test #1	Test #2	Test #3	
합성가스 조성 (dry vol.%)	H ₂	평균	30.1	44.4	41.1
		최고	33.2	43.4	39.8
	CO	평균	21.9	37.4	33.4
		최고	24.1	36.2	33.3
	CO ₂	평균	8.2	8.3	21.0
		최고	7.7	7.3	21.3
	O ₂	평균	0	0	0
		최고	0	0	0
	CH ₄	평균	10.0	15.8	4.8
		최고	11.5	16.5	5.9
합성가스 평균유량 (Nm ³ /hr)		95	80	110	
합성가스발열량 (kcal/Nm ³)	평균	2530.1	3988	2719.0	
	최고	2833.6	4005	2780.2	
냉가스 효율 (%)		42.1	55.8	46.9	
합성가스 발열량/ 투입폐기물 발열량 (%)		51.9	67.8	63.8	
탄소전환율 (%)		44.0	57.2	70.3	

하지만, 제한된 산화제 공급은 다량의 tar와 미반응 char의 발생으로 인해, 탄소 전환율 측면에서

매우 불리한 조건이기 때문에 운전 시 적정점을 찾는 것이 중요하다고 볼 수 있다. Test #2에서 가스 발열량이 높아 냉가스 효율은 상승하나, 투입되는 보조연료 열량과 산화제의 양이 상대적으로 낮기 때문에 열분해로 온도가 낮아 탄소전환율이 상대적으로 낮게 나타났다. 합성가스의 고발열량을 유지하기 위해서는 부분산화 단계에서 산소를 ash에 남아있는 char를 부분산화 할 정도로 최소한을 공급하여야 한다. 다량의 산소를 공급할 경우 char가 연소되면서 많은 양의 CO₂를 발생시켜 결국 합성가스의 발열량을 낮추게 된다.

3.2. 탄소전환율 향상 실험

Fig. 4에서 보는 바와 같이 감열감량은 과잉산소 소비에 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 폐기물의 양과도 관계됨을 알 수 있었다. Fig. 5에서 동일한 보조연료투입조건 (2150 이후)에서 합성가스 발열량은 투입 폐기물의 양에 따라 증가함을 알 수 있다. 하지만 탄소전환율은 감소하게 된다. 본 실험을 통해 합성가스의 발열량과 탄소전환율을 최적화 운전할 수 있는 적정점은 합성가스 발열량 2500~3000 kcal/Nm³, 부분산화를 통한 감열감량은 약 10% 내외, 탄소전환율은 약 70~75%로 확인할 수 있었다.

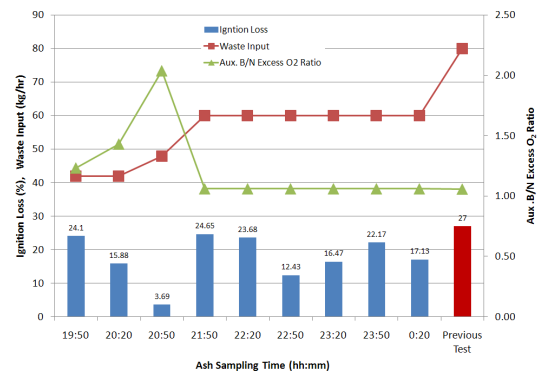


Fig. 4. Comparison of Ignition Loss and Aux. Burner ER

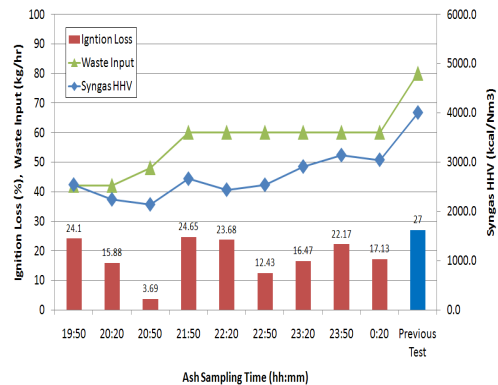


Fig.5 Comparison of Ignition Loss and Syngas HHV

4. 결 론

본 연구를 통하여 파일럿 규모의 Multi-Stoker 형태 열분해 가스화시스템을 개발 및 운전특성에 대해서 실험하였다. 보조열원으로 산소버너를 사용하였으며, 상압운전 그리고 타르개질기를 장착한 것을 특징으로 한다. 실험결과 아래와 같은 운전특성을 나타내었으며, 미비점 보완을 통한 최적화 및 가혹조건에서의 운전을 실시할 예정이며, 그 결과들을 바탕으로 향후 Scale-up하여 실증연구를 추진할 예정이다.

1) 산화제를 산소로 할 경우, 시스템에서 발생가능한 최대 합성발열량은 약 4000 kcal/Nm^3 이었으며, 냉가스효율 및 탄소전환율은 각각 55.8%, 57.2%로 미비하게 나타났다. 즉, 합성가스발열량 높이기 위해 산화제 공급을 제한 할 경우, 냉가스효율 및 탄소전환율 미비하게 나타났다.

2) 탄소전환율 향상 실험을 통해, 본 연구를 통해 합성가스의 발열량과 탄소전환율을 최적화 운전할 수 있는 적정점은 합성가스 발열량 $2500\sim 3000 \text{ kcal/Nm}^3$, 부분산화를 통한 감열감량은 약 10% 내외, 탄소전환율은 약 70~75%로 확인할 수 있었다.

3) 시스템에서의 탄소전환율을 향상시키고 냉가스효율 즉, 소요 보조에너지를 줄이기 위해서는 열분해가스화단계와 분리된 별도의 탄소전환용 연소로 장착과 연소로에서 배출되는 배가스를 적절한 열교환을 통해 열효율을 높일 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 신·재생에너지기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Whitty, K., Eddings, E. G. and Morrow, R. S., "Biomass Gasification in a Stoker Gasifier, *AICHE The 2008 Annual Meeting* (2008).
- [2] Yang, Y. B., Sharifi, V. N. and Swithenbank, J., "Converting moving-grate incineration from combustion to gasification-Numerical simulation of the burning characteristics," *Waste Management*, **27**, 645-655 (2007).
- [3] 김석준, 길상인, 윤진한, 최항석, 김우현, 박영수, 광연호, 정상순, 박세영, 허일상, 이협희, 동종인, 배성근, 서용철, "생활폐기물 열분해가스화 용융 파일럿 플랜트의 운전 실험," *한국폐기물학회 2007년도 춘계학술대회 논문집* (2007).
- [4] 홍영기, "열분해 가스화 및 플라즈마 용융기술-고온열분해가스화로와 직렬로 연결된 용융로에서 이송형 플라즈마 토치를 이용한 폐기물처리기술," *한국폐기물학회 2007년도 춘계학술대회 논문집* (2007).