

## 브라운 가스 高温 水蒸氣를 이용한 바이오매스 및 PE 가스화<sup>†</sup>

\*魯仙娥·尹珍漢·金宇顯·吉祥仁·閔太燮

韓國機械研究院

## Biomass and PE Gasification with High Temperature Steam of Brown Gas<sup>†</sup>

\*Seon Ah Roh, Jin Han Yun, Woo Hyun Kim, Sang In Keel and Tai Jin Min

Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-343, Korea

### 요 약

초고온의 수증기를 발생하는 brown gas 화염을 이용하여 톱밥, 하수슬러지 및 PE의 가스화를 수행하였다. Steam/carbon ratio를 1~5로 변화시키면서 생성가스 농도, 가스화 속도, 타르 생성량 및 합성가스의 발열량에 대한 steam/carbon ratio의 영향을 고찰하였으며 반응기내 온도 분포를 살펴보았다. 생산된 합성 가스는 steam/carbon ratio의 변화에 따라 최고 70 vol%의 가연성 가스를 함유한 가스를 생산하였으며 가연성 가스 중 수소의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 가연성 가스의 발열량 및 타르의 생성량은 steam/carbon ratio가 증가할수록 감소하였다.

주제어 : 가스화, 바이오매스, PE, 합성 가스, 초고온 steam

### Abstract

Sawdust and sewage sludge and PE gasification by high temperature steam of Brown gas have been performed in this study. Steam/carbon ratio has been changed from 1 to 5 and the effect of steam/carbon ratio on the produced gas concentrations, gasification rate and tar generation has been determined. Also, the temperature distribution in the gasification reactor has been studied. Highest combustible content in the produced gas is around 70vol% and H<sub>2</sub> shows highest content among the combustible compounds. However, the heating value of the produced gas and tar content have been reduced with increasing steam/carbon ratio.

Key words : Gasification, biomass, PE, syngas, high temperature steam

### 1. 서 론

기후변화 협약 발효에 따라 온실가스 배출량 감소를 위한 친환경·기술주도형 에너지인 신재생에너지의 개발·보급 확대를 위한 국가 차원의 체제 정비가 이루어지고 있어 폐기물을 활용한 새로운 에너지원 개발 연구가 활기를 띠고 있다. 특히 우리나라는 전체 에너지 가운데 석유 의존도가 미국·독일·프랑스 등의 선진국보다 높아 고유가 시대를 맞아 에너지 안보를 위한 다양한 에너지원 확보의 필요성이 대두되고 있다. 대체 에너지원으로서 폐기물과 같은 폐자원을 이용한 재생

에너지 생산 연구가 활발히 진행되고 있는데 이는 폐기물의 발생량이 계속적으로 증가하고 있어 그 처리가 문제가 되고 있고 효과적으로 자원적인 재활용과 재생 에너지를 생산할 수 있다면 온실 가스의 저감에 기여할 수 있기 때문이다. 그 중에서도 재생 가능한 에너지원으로 '바이오매스(Biomass)' 자원이 최근 에너지 및 환경 문제를 동시에 해결할 현실적인 대체 에너지원으로 급부상하고 있으며 바이오매스 이외에 에너지원으로 발열량이 높은 플라스틱 폐기물을 이용한 기술 개발 연구가 수행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 본 연구에서는 steam을 이용하여 초고온 분위기에서 바이오매스 및 플라스틱인 PE를 가스화하고 그 특성을 고찰하였다. 물을 전기 분해하여 수소와 산소의 예혼합화염(Premixed Flame)을 발생시키는

<sup>†</sup> 2008년 7월 8일 접수, 2009년 2월 5일 수리

\* E-mail: sos@kimm.re.kr

브라운가스(Brown-Gas) 장치를 이용하여 톱밥과 하수슬러지, 폴리에틸렌(PE)의 가스화를 수행하였다. 브라운 가스 장치의 경우 수소와 산소가 당량비 조건으로 공급되어 3000°C 화염을 형성하며 초고온의 수증기가 생성되게 된다. 이 화염에 직접 접촉을 통한 가스화를 수행하여 불필요한 잔류산화제의 발생을 억제하고 발생가스를 극대화 하였다. Steam/carbon 비를 1.5로 변화시키면서 이에 따른 가스화 기체의 특성 및 발생 가스량, 부가적으로 생성되는 tar의 생성량을 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

Fig. 1은 폐기물 가스화로의 구성을 나타내고 있으며 시료 공급을 위한 screw feeder와 수증기 및 가스화 에너지 공급을 위한 브라운 가스 시스템, 발생가스의 전처리와 분석을 위한 냉각 장치와 micro GC로 구성되어 있다. 브라운 가스의 경우 물의 분해로 생성된 H<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>가 다시 연소되면서 화염을 형성하고 H<sub>2</sub>O의 수증기의 형태로 반응기에 공급되게 된다.

반응기에서는 가연성 가스의 연소를 방지하기 위하여 외부의 공기가 새어 들어가지 않도록 실링을 철저히 하였다. 가스화 실험시 반응기 내부의 온도는 400°C 전후로 그리 높지 않지만 수소화염이 닿는 부분은 3000°C 이상의 초고온이므로 시료가 쌓이게 되면 닿는 면적이 작아져 시료가 용융이 될 수 있으므로 가스화 잔재물 이송 pusher를 설치하여 내부에 시료가 쌓이는 것을 방지하였다.

폐기물의 가스화에 있어서 대상폐기물의 발생가스 농

도를 분석하기 위하여 폐기물의 기본이 되는 목재류인 톱밥(sawdust), 하수슬러지, 고분자화합물로는 폴리에틸렌(PE)을 실험대상물로 선정하였다. 각 샘플들의 삼성분 및 원소 분석은 폐기물 및 석탄에 일반적으로 적용되는 방법으로 분석하였으며 그 결과를 Table 1~Table 3에 나타내었다.<sup>3)</sup> 시료투입은 감속비 60 대 1의 screw feeder를 사용하여 인버터 컨트롤로 투입량 실험을 통하여 정량투입을 하였으며, 각 시료들의 steam/carbon (S/C) 비에 따른 투입량을 Table 4에 나타내었다. 시료는 연속투입을 하였고 시료투입기 상부에 공기의 유입을 차단하기 위하여 Ar을 500 ml/min 주입하였다. 또한 수소산소 예혼합가스의 연소시 발생할 수 있는 역화의 위험으로 인하여 수증기 생성량은 일정하게 유지하고 공급되는 폐기물의 양을 조절하여 steam/carbon 비를 조절하였다.

폐기물 가스화 실험은 다음의 사항을 측정 분석하였다.

- 수소/산소 예혼합 화염온도
- 가스화로 내부 온도
- 가스화 열
- Tar Sampling
- 가스화 발생가스 분석

Tar를 포집하기 위하여 thimble filter를 설치하여 정상운전조건에서 1.18 L/min의 유량으로 한시간 포집하여 분석하였다. 반응기에서 나오는 가스는 다량의 수증기가 포함되어 있으므로 thimble filter에 수분이 응결되는 것을 방지하기 위하여 외부에 heating tape를 이용하여 열을 공급하였다.<sup>4)</sup>

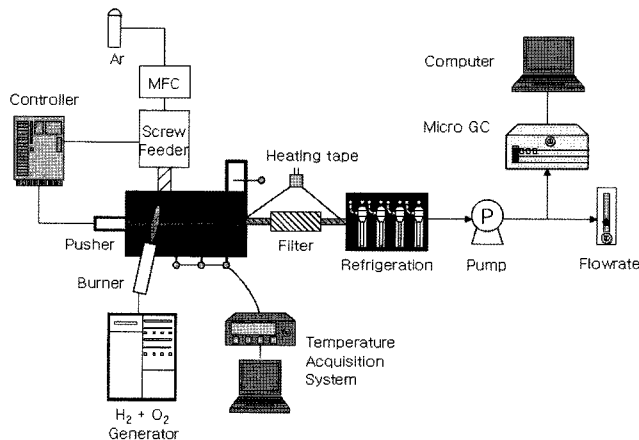


Fig. 1. Experimental apparatus.

**Table 1.** Analysis of sawdust

Sawdust			
삼성분 [wt %]		원소분석 [wt %] Moisture free basis	
가연분	95.84	탄소 (C)	46.95
회분	0.78	수소 (H)	6.355
수분	3.38	산소 (O)	37.46
계	100	질소 (N)	5.07
겉보기 밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	0.27	황 (S)	0.00
발열량 [cal/g] : 4,484			

**Table 2.** Analysis of sewage sludge

Sewage Sludge			
삼성분 [wt %]		원소분석 [wt %] Moisture free basis	
가연분	70.21	탄소 (C)	37.84
회분	27.20	수소 (H)	6.315
수분	2.60	산소 (O)	20.55
계	100	질소 (N)	5.07
겉보기 밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	0.47	황 (S)	0.433
발열량 [cal/g] : 4,081			

**Table 3.** Analysis of PE

PE			
삼성분 [wt %]		원소분석 [wt %] Moisture free basis	
가연분	99.43	탄소 (C)	85.29
회분	0.44	수소 (H)	13.99
수분	0.12	산소 (O)	0.10
계	100	질소 (N)	0.05
겉보기 밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	0.51	황 (S)	0.00
발열량 [cal/g] : 10,900			

**Table 4.** Feeding amount based on steam/carbon rate (g/min)

S/C contents	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
Sawdust	31.68	15.84	11.88	7.92	5.28	3.96	3.17
Sewage Sludge	39.22	19.61	14.7	9.80	6.54	4.90	3.92
PE	17.45	8.72	6.54	4.36	2.91	2.18	1.74

가스화 발생가스를 분석하기 위하여 마이크로 GC를 설치하여 4분 간격으로 가스의 조성을 실시간으로 분석하였다. 발생가스에 포함된 수분을 제거하기 위하여 실리카겔과 활성탄을 통과하도록 하였으며 제습용 유리병을 영하 20°C의 냉동고에 넣어 제습하여 micro GC로 실시간 공급하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 실험에 사용된 수소/산소 예혼합화염의 온도를 R-type thermocouple로 측정된 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 거리 70 mm 이내는 초고온으로 인하여 thermocouple로는 측정이 불가능하였다. 시료와 화염이 만나는 지점은 80-120 mm이며, 반응온도는 1000-1800°C 정도이다.

Fig. 3에는 톱밥의 가스화시 가스화 반응기 내부의 온도 분포를 나타낸 것이다. T/C 1의 위치는 시료유입 지점에서 50 mm 떨어진 반응기 내부의 온도이고 T/C 2는 250 mm, T/C 3은 350 mm 떨어진 지점의 온도이다. 그리고, T/C 4는 외부로 배출되는 지점이다. T/C 1의 온도가 시간이 지남에 따라서 계단식으로 올라가는 모양을 보여주고 있는데, 이는 시료가 pusher에 의해 밀려 열분해된 촉가 T/C에 가까이 근접했기 때문인 것으로 생각된다. 반응기 내부의 온도는 전반적으로 200~500°C로 유지가 되며 T/C 2, T/C 3로 갈수록 화염에서 멀어지고 열분해가 진행되면서 흡열반응 일어나므로 점차 온도가 떨어지는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 4는 톱밥의 가스화 생성 가스 중 수소, 일산화탄소, 메탄 등과 같은 가연가스 발생량을 나타내고 있다. Steam/carbon ratio가 1일 때 수소 33.6 vol%, 일산화탄소 23 vol%, 메탄 2.5 vol%로 전체 가연성 가스의 농도는 60 vol% 정도로 높은 값을 나타내었다.<sup>5)</sup> 실험조건에서 수증기의 양은 일정하고 탄소성분이 변화되어 S/C 비를 조절하게 되므로 S/C 비가 증가할수록 투입된 톱밥의 양이 감소하여 가연성 가스의 농도가 약간

감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 5와 6는 하수슬러지와 PE의 가연가스 발생량을

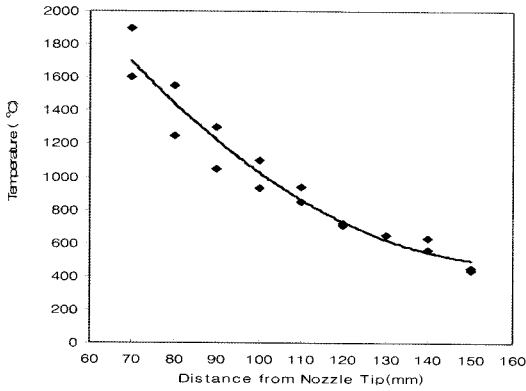


Fig. 2. Flame temperature.

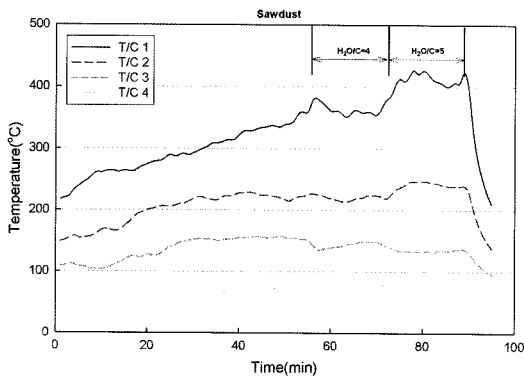


Fig. 3. Temperature distribution in the reactor(S/C:4, 5).

나타내고 있으며 하수 슬러지와 PE의 경우 전체 가연성 가스의 발생량이 톱밥보다 높고 PE의 경우 H<sub>2</sub>의 발생 농도가 톱밥과 하수 슬러지에 비해서 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 톱밥과 마찬가지로 S/C가 증가할수록 가연성 가스의 발생량이 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Tar의 포집은 thimble filter로 포집하여 건조기에 100°C로 1시간 이상 건조하여 수분을 증발시켜 무게를 측정하였다. Fig. 7은 투입된 폐기물이 가스화될 때 생성되는 가스의 tar 농도이다. S/C비가 증가할수록 가스화 반응이 촉진되고 tar의 분해가 촉진되어 tar의 농도는 낮아지는 경향을 나타내게 된다.<sup>4)</sup>

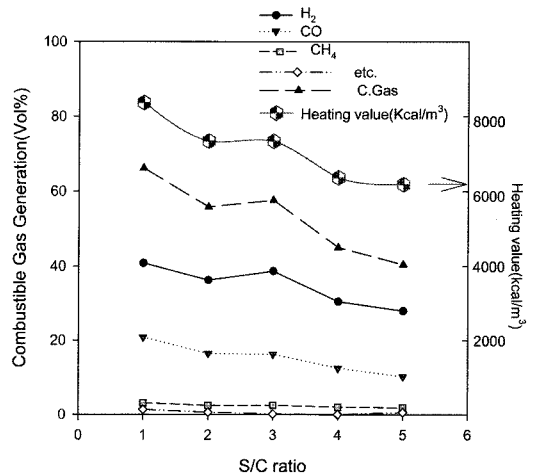


Fig. 5. Effect of S/C on gas concentration(sewage sludge).

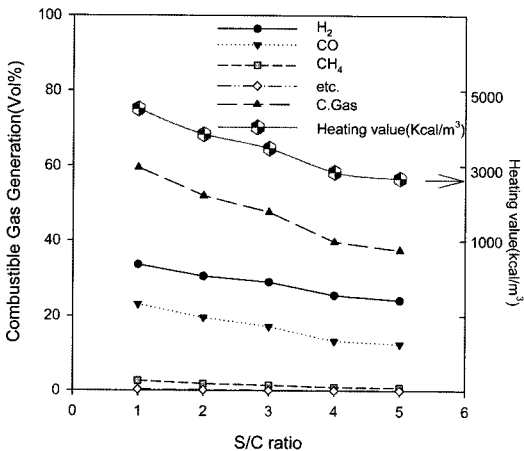


Fig. 4. Effect of S/C ratio on gas concentration (sawdust).

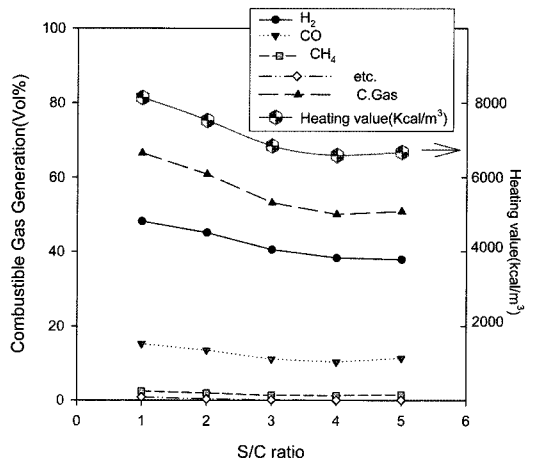


Fig. 6. Effect of S/C on gas concentration(PE).

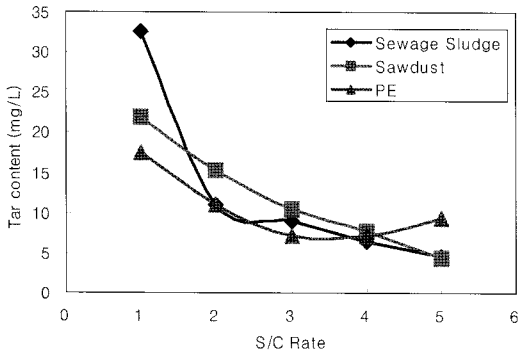


Fig. 7. Effect of S/C on tar content.

4. 결 론

초고온의 수증기를 발생하는 brown gas 화염을 이용하여 톱밥, 하수슬러지 및 PE의 가스화를 수행하였다. Brown gas 화염을 이용하여 높은 가연성 가스 농도, 낮은 tar 함량, 높은 수소 함량을 나타내는 가연성 가스를 생성할 수 있었다. 전체 가연성 가스의 생산량은 농도 70 vol%내외의 높은 값을 나타내었으며 특히 H<sub>2</sub>의 농도가 가장 높게 나타났으며 다음으로 CO의 생산량이 높게 나타났다. Tar의 생산량은 S/C ratio가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

1. S. A. Roh, S. R. Son, S. D. Kim, W. J. Lee, and Y. K. Lee, 2005 : *Steam Gasification Characteristics of Pine-nut Shell in a Thermobalance and a Fluidized Bed Reactor*, Key Eng. Mater. 278 pp.637-643.
2. S. A. Roh, S. R. Son, and S. D. Kim, 2006 : *Steam Gasification and Combustion Kinetics of Ginkgo Nut Shell in a Thermobalance Reactor*, Stud. Surf. Sci. Catal., 159, pp. 569-572.
3. 김상돈, 1986 : 석탄에너지 변환 기술, pp12-20, 민음사, 서울, 한국.
4. 윤진환, 김우현, 길상인, 민태진, 노선아, 2007 : *고온 수증기를 이용한 석탄 가스화*, 한국자원리사이클링학회지:자원리사이클링, 16, pp. 28-33.
5. S. L. Francis 2003 : *Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production by Gasification of Biomass*, DOE report DE-FC36-01GO11089.



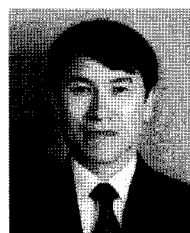
魯 仙 娥

- 1998 한국과학기술원 화학공학(학사)
- 2000 한국과학기술원 생명화학공학(석사)
- 2005 한국과학기술원 생명화학공학(박사)
- 현재 한국기계연구원 선임연구원



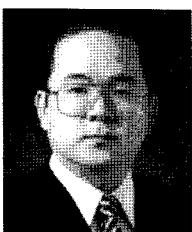
尹 珍 漢

- 1992 충남대학교 조선공학과(학사)
- 1996 충남대학교 기계공학과(석사)
- 2009 충남대학교 기계공학과(박사)
- 현재 한국기계연구원 환경에너지기계 연구본부 선임연구원



金 宇 顯

- 1978 동아대 환경공학과(학사)
- 2002 부경대 환경공학과(박사)
- 현재 한국기계연구원 환경에너지기계 연구본부 책임연구원



吉 祥 仁

- 1984 한양대학교 기계공학(학사)
- 1986 한국과학기술원 기계공학(석사)
- 1991 한국과학기술원 기계공학(박사)
- 현재 한국기계연구원 책임연구원



閔 太 煥

- 2005 동경공업대학 환경이공학 박사
- 2005 한국기계연구원 선임연구원