

Down-draft type 파일럿 가스화로에서의 톱밥 가스화 특성

*민 태진¹⁾, 길 상인¹⁾, 윤 진한¹⁾, 김 우현¹⁾, 노 선아¹⁾

Sawdust gasification characterization in down-draft type pilot gasifier

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

Key words : gasificaton(가스화), sawdust(톱밥), down-draft gasifier(하향류 가스화로)

Abstract : The gasification of biomass, sawdust, was carried out in order to investigate gasification characteristics. The experiment was performed using a down-draft fixed bed gasifier to surpass tar components generation in the gasification process. In the experiments, we investigated synthetic gas composition by varying reaction temperature, steam/carbon ratio, and excess ratio (ER), respectively. Higher reaction temperature, 700°C to 900°C, could obtain higher H₂ yield. However, we could not obtain any meaning data by varying S/C ratio. Using O₂-LNG burner in the top of the gasifier may surpass water-gas shift reaction by increasing CO₂ concentration from the LNG-O₂ combustion reaction.

1. 서 론

높아가는 화석연료 가격으로 인해 에너지원의 다양화에 대한 연구가 필요한 시점이며 각국에서 막대한 기초연구 및 실용화 연구가 다양한 에너지원을 대상으로 이루어지고 있다. 같은 화석연료이면서도 자원의 편중성이 비교적 덜한 석탄을 시초로 현재까지는 폐기물이라고 간주되어 매립 또는 소각 등의 형태로 버려진 미사용 고체 시료를 에너지원화 하는 연구도 다양하게 시도되고 있다. 에너지 문제뿐 아니라 에너지의 대량소비로 인한 환경문제도 심각성이 크게 대두되고 있으며 대표적인 예가 이산화탄소를 비롯한 온실 효과 가스 문제이다. 환경적인 측면으로는 에너지 소비로 인한 환경파괴 뿐 아니라 그에 기인하는 대량소비 활동으로 인한 폐기물 처리 문제 또한 큰 이슈가 되고 있다.

최근 폐기물에 대한 관심이 소각, 매립 등 단순처리에서 환경·에너지 문제에 대한 관점으로 옮겨가고 있다. 청정 환경 확보에 주안점을 갖고 진행되는 온실 폐기물 처리의 개념이 이제는 에너지원으로 인식이 전환되고 있으며 청정환경의 확보와 안정적 폐기물 처리기반은 공정상 당연히 얻어지는 부가적 이익으로 바뀌어가고 있다. 적절한 처리방법의 부재로 인하여 그동안 매립 또는 방치되어 오던 난분해성 폐기물을 안정적으로 처리기술을 확보함으로써 폐기

물의 에너지화에 대한 부정적 인식으로 개선하고 난분해성 폐기물이 포함된 대규모 폐기에너지를 청정 자원화 할 수 있는 기반기술의 확립 및 고부가 수소 가스화로 변환하여 향후 다양한 에너지원으로 활용할 수 있는 핵심기술의 확보가 중요하다.

바이오에너지는 자원이 풍부하고 환경 친화적인 생산이 가능하며 온실가스의 양을 저감시킬 수 있다는 특성이 있으나, 자원이 산재되어 있어 수집/수송이 불편하여 경제적인 어려움이 있고 이용기술의 다양성에 따라 활용기술 개발이 어렵다는 점 및 과다 이용시 오히려 환경파괴를 유발할 수 있다.

본 논문에서는 바이오매스 가스화 실험의 일환으로 톱밥을 시료로 이용하여 하향류식 고정상 반응기에서의 톱밥의 가스화 특성을 살펴보았다.

2. 실 험

2.1 시료

실험에 사용한 시료는 재제소에서 나오는 톱밥을 이용하였으며 분석결과를 아래 Table 1에 도시하였다. 목질계 바이오매스의 특징으로는 휘

1) 민태진, 한국기계연구원
E-mail : tmin@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7938 Fax : (042)868-7281

발분이 높으며 회분이 적어서 가스화 반응물로서의 고체시료로서는 이상적인 상태이다.

톱밥의 발열량은 4,000 kcal/kg 정도로 무연탄에 조금 못미치는 발열량을 갖고 있으며 황의 함유율도 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 1 Proximate and ultimate analysis of sawdust

| Sawdust | | | |
|---|------|---|-------|
| Proximate analysis [wt %, dry basis] | | Ultimate analysis [wt %, dry ash free basis] | |
| 휘발분 | 78.3 | 탄소(C) | 47.9 |
| 고정탄소 | 21.1 | 수소(H) | 5.7 |
| 회분 | 0.6 | 산소(O) | 46.4 |
| | | 질소(N) | < 0.1 |
| 계 | 100 | 황(S) | < 0.1 |
| 발열량 : 4,050 kcal/kg, or 17.0 MJ/kg | | | |

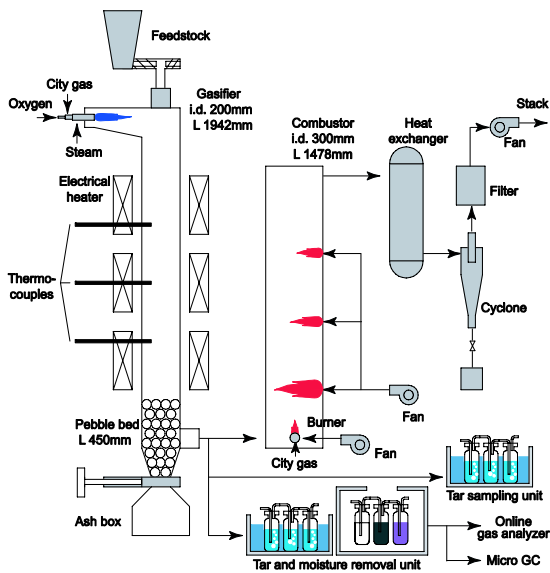


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up

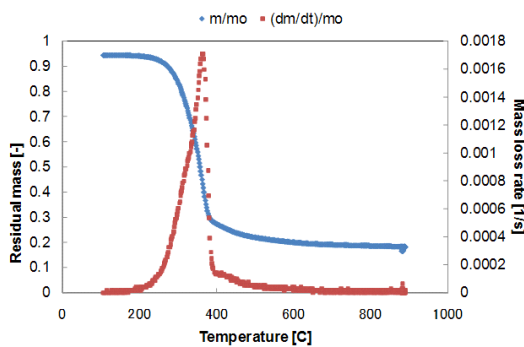


Fig. 2 TG result of sawdust

2.2 실험장치

실험에는 하향류식 고정상 반응기를 사용하였는 다. 고정상 반응기는 가스화 프로세스에서 유동상이나 분류상 등 여타 반응기에 비해 운전이 비교적 용이하다는 장점이 있고, 하향류식은 가스가 아래부분의 고정탄소 연소층을 통과함으로 타르분의 생성이 상향류식에 비해 낮아질 것으로 기대했기 때문이다.

시료 투입장치는 스크류 방식의 feeder 를 사용하여 인버터 컨트롤러로 투입량 실험을 통하여 정량투입 되도록 하였다. Fig. 1에 장치 구성도를 나타내었다.

시료는 투입장치를 통하여 가스화로 반응기 상부에서 자유낙하하면서 반응하며 상단 측면에 산소-스팀 버너를 사용하여 곧바로 시료가 열분해 및 스팀개질 될 수 있도록 하였다. 따라서 반응기 내부의 가스화제는 산소버너에서 도시가스의 연소배가스와 스팀으로 가스화가 이루어지며 이를 통해 공기 투입을 통한 질소의 현열분 만큼의 열량을 빼앗기지 않게 되어 반응온도를 높일 수 있도록 하였다.

반응기는 길이 약 1,942 mm, 내경 200 mm의 크기로 반응부 높이에 따라 세 개의 열전대를 설치하여 반응기 내부온도를 즉시 파악할 수 있게 하였으며, 반응기 외부를 전열히터로 감싸 열전대의 온도 데이터를 곧바로 피드백하여 반응 온도를 일정하게 유지시킬 수 있도록 하였다. 반응기 하단부에는 세라믹 볼을 충전시켜 반응 후 남은 고정탄소분 및 회분이 후단으로 비산하는 것을 방지하도록 하였고 합성가스만 통과될 수 있도록 하였다. 가스화 반응기 후단에는 연소로를 설치하여 합성가스를 완전연소 시켜 연돌로 배출될 수 있도록 하였다.

합성가스의 측정은 가스화 반응기와 연소로 사이에서 수행하였다. 이번 실험의 목적은 가스상 물질의 파악 및 실험 조건에 따른 가스 조성 변화 거동에 주안점을 두었는데 Micro-GC (GC-TCD, 3000A, Agilent사)를 사용하여 생성가스를 2-3분 간격으로 on-line 측정하였다. 샘플링관은 리본 히터로 가열하여 관 내벽에 타르분이 달라붙지 않도록 하였고 샘플링관 후단에 타르 포집부를 2단으로 설치하여 처음 1단에서는 타르를 포집하는 임핀저 내부에 물을 충전시키고 임핀저를 수납한 수조를 10°C로 일정하게 유지시켰다. 두 번째 단에서는 가스가 곧바로 냉각될 수 있도록 임핀저가 들어있는 -20°C 냉동고로 유도시킨 후 임핀저 내부에 활성탄 및 실리카 겔을 설치하여 가스 세정을 한 후에 가스 측정을 수행하였다.

2.3 실험조건

실험조건에서 온도를 설정하기에 앞서 TG를 사용하여 톱밥에 대한 열중량 변화 실험을 수행하였다. 실험에는 carrier gas로서 N₂를 사용하였고 50 K/min의 승온속도로 900°C까지 가열한 후 30분 동안 유지시켜 결과를 얻었다. 그 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 결과를 보면 톱밥은 200°C 전후로 반응이 시작되어 급격히 반응이 진행한 후 400°C 에 이미 휘발분의 대부분이 반응

함을 알 수 있다.

이번 실험에는 타르분의 생성을 되도록 억제하고 가스수율을 높이기 위하여 가스화 온도를 700, 800, 900℃로 설정하였다. 또한 톱밥이 함유한 탄소 물분율에 따라 스팀 공급량을 제어하여 Steam/Carbon 비를 1, 2, 3으로 맞추어 실험하였다. 또한 산소 버너 측에서 투입하는 산소의 양을 도시가스의 공기과잉률에 맞춘 상태 (ER, Excess ratio), ER=0인 조건과 0.2, 0.3에서 실험을 수행하여 각각의 조건에서 가스 조성 거동을 파악하였다.

S/C 비와 ER의 정의는 다음과 같다.

$$S/C = \frac{\text{Steam feed rate}}{\text{Total carbon feed rate in woodchip}}$$

$$ER = \frac{\text{Oxygen feed rate for complete combustion}}{\text{Total fuel feed rate}}$$

톱밥의 공급량은 분당 20 g 을 투입하였는데 톱밥은 겉보기 밀도가 낮아 투입량이 낮아졌을 뿐 가스화로의 처리용량에 맞춘 실험조건은 아님을 밝혀둔다. 실험조건을 Table 2 에 도시하였다.

Table 2 Experimental conditions

| Sample | Sawdust | | |
|-------------|-------------|------|------|
| Feedrate | 20 g/min | | |
| Temperature | 700℃ | 800℃ | 900℃ |
| S/C ratio | 1, 2, 3 | | |
| ER | 0, 0.2, 0.3 | | |

3. 결과 및 고찰

Fig. 3부터 Fig. 5는 각 실험조건에 따른 H₂, CO, CH₄의 농도를 나타낸 결과 그래프이다. 수 차례의 실험으로 각 실험조건마다 가스조성 변화 경향이 일정함을 확인하였다. 온도와 S/C, ER중 두 실험조건을 고정시키고 하나만을 변화시켰을 때의 결과는, 온도가 높아질수록 H₂는 급격히 증가하며 CO와 CH₄는 감소하는 경향을 보였다. S/C 변화에 따른 가스 조성은 약간의 차이는 있었으나 온도변화에 따른 변화에 비하면 작았으며 ER이 증가할수록 세성분의 농도도 감소함을 확인하였다.

가스의 발열량은 최소 1,350 kcal/Nm³에서 최대 1,930 kcal/Nm³ 를 나타냈다. 가스화 반응의 경우 생성된 합성가스의 단위체적당 발열량도 중요하나 가스의 총 생성량도 매우 중요한 인자가 된다. 보통 가스화 온도가 높을 경우, 타르의 발생량이 감소하면서 가스의 생성량도 증가하는 경향을 나타내는데 이번 실험에서는 아르곤을 carrier gas 로 주입하여 아르곤의 농도를 측정함으로써 전체 가스 생성량을 파악하였다. 아르곤의 측정은 이번 실험에 사용한 Micro-GC의 column에서는 측정이 불가능하여 가스 포집 백에 가스를 분석되려 하였으나 결과적으로 이 방법은 때때로 변동하는 가스

생성량을 즉시에 파악하지 못하고 일정시간동안 포집한 가스의 특성에 따라 변동이 있어 전체 가스 생성량의 파악과 여기서 도출되는 탄소전환율 (= 생성가스 안에 포함된 carbon 성분 / 시료안에 포함된 carbon 성분), 냉가스 효율 (= 생성가스의 발열량 / 투입시료의 발열량) 등의 결과를 적절히 얻어내지 못하였다. 하지만 대략적인 계산으로 가스 생성량은 700℃의 경우 약 25 L/min에서 900℃의 경우 35 L/min 정도 생성된다는 결론에 이르렀다. 따라서 분당 회수할 수 있는 총열량은 고온일수록 높아지며 이에 따라 냉가스 효율도 높아진다고 사료된다. 이에 따른 계산으로는 톱밥의 가스화 실험 결과, 탄소전환율은 약 90% 전후가 되며 냉가스 효율은 65% 안팎이 될 것으로 추측된다.

발열량 자체로만 보면 S/C=3, 800℃일 때가 가장 발열량이 높게 나왔으나 타르의 발생량도 많아질 것으로 사료되어 톱밥을 이용한 실험조건에서는 900℃, S/C=3, ER=0 일 경우가 최적조건이라고 판단된다.

3.1 온도에 따른 영향

H₂의 경우, 온도가 높아질수록 농도가 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있었으며, 온도 900℃, S/C=3일 때 수소농도가 약 23.4%로 가장 높았다.

CO는 고온일수록 농도가 감소하는데 이는 반응 온도가 높아짐에 따라 수증기와 반응으로 수소 생성이 높아지기 때문으로 사료된다.

CH₄ 농도는 온도가 900℃일 때 낮은 수치를 나타내었는데, 다만 800℃일 때는 증가하는 경향을 보였다. 이는 이 온도영역에서 열분해반응이 가장 활발히 일어나고 있다고 생각할 수 있으며 탄화수소계 가스 뿐 아니라 타르의 발생도 비교적 활발할 것으로 생각할 수 있다. 온도가 800℃ 이상이 되면 타르 및 CH₄도 개질반응을 일으켜 이로 인해 더 많은 수소가 생성되고 있다고 사료된다.

3.2 S/C에 따른 영향

H₂는 S/C의 증가에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 다만 900℃, ER=0 일 때 H₂의 농도가 약간 감소하는 경향을 보였다. 이론적으로는 톱밥과 스팀의 반응과 water-gas shift reaction으로 간주한 반응⁽¹⁾으로는 S/C=1.95 근방에서 가장 H₂의 생성이 많다는 결과가 나오지만 실험에서는 상이한 결과가 나왔다. 이는 shift reaction에서 CO와 스팀의 반응물로 CO₂와 H₂가 생성되어야 하나 이번 실험에서는 가스화제가 산소버너에서 나오는 배가스인 스팀과 CO₂에 의해 반응이 오히려 억제된 것으로 사료된다.

실제로 Fig. 4에서 900℃, ER=0일 때의 CO의 농도 변화를 보면 S/C=1과 2일 때의 농도 변화는 거의 없고 S/C=3 일 때 농도가 감소하는 데, Fig. 3의 H₂농도 증가 경향과 일치함을 볼 수 있다.

3.3 ER에 따른 영향

동일한 S/C와 온도 조건에서는 ER의 증가에 따라 각 가스 조성 농도가 감소하였다. 이는 반응시 O₂ 농도의 증가에 따라 연소반응에 의한 가연성 가스 성분의 감소로 볼 수 있는데, 향후 개질 반

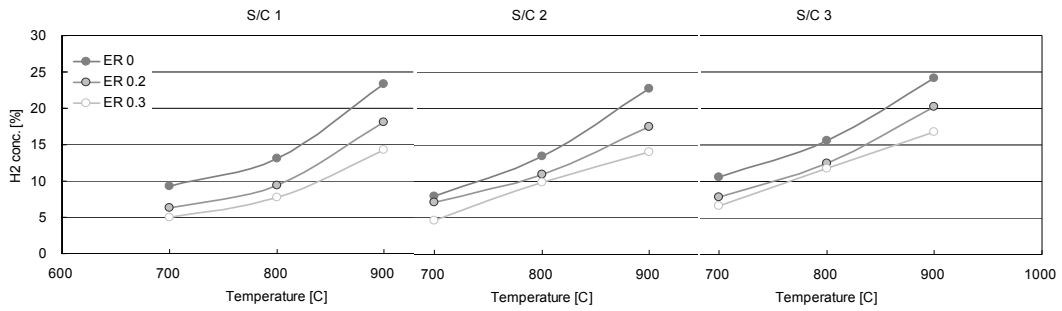


Fig. 5 H₂ concentration at each experimental condition

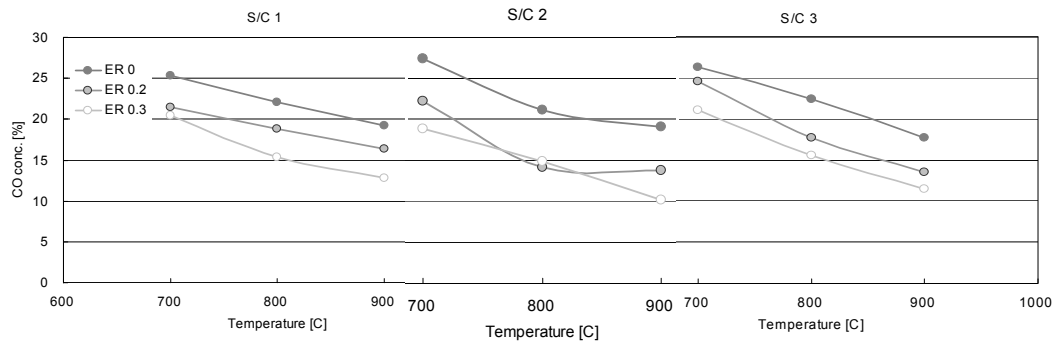


Fig. 6 CO concentration at each experimental condition

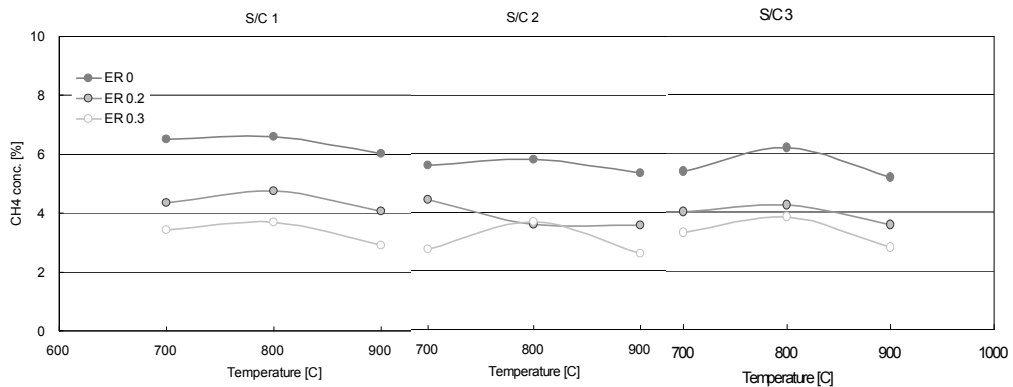


Fig. 7 CH₄ concentration at each experimental condition

응 등을 고려하면 가스 조성에서 가연성 가스의 농도가 낮아질 것으로 예상된다.

4. 결론

타르분의 개질을 통한 합성가스 이용을 고려하면 합성가스의 발열량은 필연적으로 낮아질 수밖에 없으며, 타르분의 개질이 아닌 물리적인 제거 등을 이용한 이용법이 합성가스의 발열량을 고려할 때는 좋은 방안이 될 것이다. 또한 타르분의 개질 및 제거 등을 고려치 않은 가스의 이용방법도 고려되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 한국기계연구원 고유사업인 기본사업 (자원순환형 청정에너지 시스템 개발, NK134B)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] K Kumabe et. al., 2007, "Co-gasification of woody biomass and coal with air and steam" Fuel 86, 684-689