



풍건 목편을 이용한 합성가스 생산에 대한 실험적 고찰

Experimental Evaluation of Synthesis Gas Production from Air Dried Woodchip

홍성구*[†] · 왕 용**

Hong, Seong Gu · Wang, Long

ABSTRACT

Biomass gasification provides synthesis gas or syngas that can be used for internal combustion engines as fuel or chemical synthesis as feedstock. Among different types of gasifiers, downdraft gasifier can produce relatively clean syngas with lower tar contents. In this study, a downdraft gasifier was fabricated with 150 mm of hearth diameter to gasify woodchip that is commercially available in this country. After drying woodchip to about 20 %, gasification experiments were conducted measuring temperature, pressure, air and gas flow rates. The volumetric concentrations of CO, H₂, CO₂, CH₄ were 10.7~14.5, 16.5~21.4, 12.5~16.6, and 2.3~2.9, respectively. They were overall within the ranges of the results that the previous studies showed. However, CO concentration was relatively lower and H₂ was slightly higher than those from other studies. It seemed that water gas shift reaction was occurred due to the moisture in the fuel woodchip. Additional drying process coupled with syngas cooling would be required to improve the overall efficiency and syngas quality.

Keywords: Gasification, Biomass, Woodchip, Synthesis Gas, Downdraft Gasifier

1. 서 론

불안정한 국제 유가와 지구온난화 방지를 위한 온실가스 감축의 필요성으로 인해 친환경 녹색에너지에 대한 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 특히 신재생에너지 분야는 미래 녹색산업의 기축으로서 전 세계적으로 꾸준한 발전이 예상되고 있다. 이 가운데 바이오매스는 열과 전기를 생산하는데 이용할 수 있을 뿐만 아니라 자동차 연료와 각종 소재 원료로 활용할 수 있는 유일한 석유 대체재이다. 바이오매스가 갖는 화학적 에너지로부터 전기나 열에너지를 생산할 수 있으며, 바이오에탄올이나 바이오디젤 등의 자동차용 연료의 생산이 가능하다.

바이오매스는 식물로부터 유래된 모든 유기물질을 총칭한다. 바이오매스는 녹색식물로부터 얻어지며 햇빛을 에너지원으로 식물의 광합성에 의해 만들어지는 물질이다. 따라서 육상과 수중 식물을 모두 포함하며 이들의 폐기물도 포함한다. 주로 유기물이라 할 수 있으며, 햇빛의 에너지는 유기물의 화학적 결합으로

저장된다. 이들은 소화나 분해 또는 연소과정에 의해서 화학적 결합이 깨어지며 이 과정에서 에너지가 방출된다. 역사적으로 바이오매스는 주요한 에너지원으로 이용되어 왔으며, 2002년 현재 전 세계 에너지 소비량의 14 % 이상을 차지한다 (McKendry, 2002a). 바이오매스에 대한 관심이 최근에 들어 증가한 주된 이유는 크게 3가지로 볼 수 있다. 첫째는 에너지 변환기술과 에너지 작물 생산기술이 개발되어 저비용 고효율의 에너지 생산이 가능하게 되었고, 둘째 일부 국가에서는 농업 부문의 생산 능력이 수요를 초과하여 에너지 작물 생산 용도에 활용이 가능하게 되었으며, 농업 및 농촌이 당면한 여러가지 문제를 해결할 수 있는 방안의 하나로서 인식하게 되었고, 마지막으로 온실가스 배출량의 증가로 인한 기후변화 문제 해결 방안의 하나로서 인식하게 되었기 때문이다 (McKendry, 2002b).

바이오매스로부터 에너지를 얻는 변환공정은 생물화학적 공정과 열화학적 공정으로 분류된다. 생물화학적 공정에는 에탄올 생산을 위한 당 발효나 메탄 생산이 가능한 혐기성 소화공정이 대표적이다. 반면에 주로 함수비가 낮은 바이오매스를 대상으로 적용이 가능한 열화학적 공정에는 연소, 열분해, 가스화 공정 등이 있다 (Hong, 2006; Hong, 2008). 이 가운데 가스화공정에서는 일산화탄소 (CO)와 수소 (H₂)가 주 가연성분인 합성가스가 얻어지며, 내연기관이나 보일러, 가스 터빈 등과 연계하여 도입이 가능한 특징이 있다. 바이오매스 가스화 장치는 상향식과 하

* 한경대학교 지역자원시스템공학과
 ** 한경대학교 생물정보통신전문대학원
 † Corresponding author Tel.: +82-31-670-5134
 Fax: +82-31-674-4119
 E-mail: bb9@hknu.ac.kr

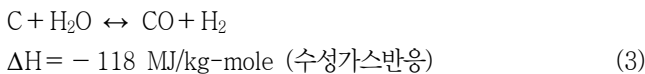
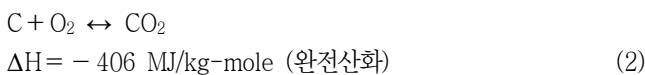
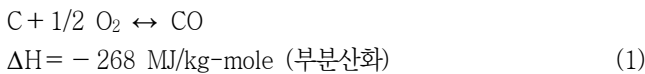
2011년 8월 3일 투고
 2011년 10월 5일 심사완료
 2011년 10월 10일 게재확정

향식, 그리고 유동상식으로 구분할 수 있다. 이 가운데 하향식 가스화장치는 상대적으로 타르와 분진이 적게 포함된 청정 합성 가스를 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있어 최근에는 최신 에너지 설비와 연계한 도입이 시도되고 있다. 그러나 하향식 가스화장치는 연료의 흐름을 유지하기 위하여 바이오매스 연료입자가 일정 크기로 균질하여야 하며, 함수비가 충분히 낮아야 유리하다.

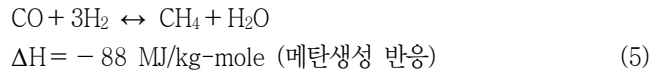
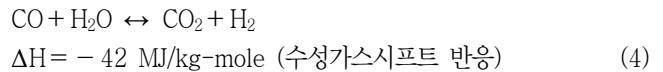
가스화 연료로서 이용되는 바이오매스에는 목편 (woodchip) 과 펠릿 (wood pellet)이 대표적이며 여러 가지 농업부산물을 이용할 수 있다. 펠릿은 목재 등을 미세하게 파쇄하고 함수비가 낮은 조건에서 만들어지므로 상대적으로 제조 비용이 높다. 반면에 목편은 대형 파쇄기를 이용하여 비교적 저렴하게 생산할 수 있는 장점이 있다. 그러나 목편을 구입하는 경우 함수비가 적게는 30 %, 높은 경우 50 % 수준으로 높으며, 장기간 보관 할 때에는 곰팡이의 번식 등으로 취급이 불리하다. 목편을 효과적으로 가스화하여 기체연료를 생산하기 위해서는 함수비를 20% 미만으로 유지해야 하며 이를 위해 건조 장치를 이용하기도 한다. 그러나 추가의 비용과 에너지가 투입되므로 이에 대한 면밀한 평가가 요구된다. 본 연구에서는 대기 중에서 건조된 목편을 하향식 가스화장치에 투입하여 합성가스를 생산하고 이에 대한 활용 가능성을 평가하였다. 생성된 가스의 조성 및 발열량 등을 종합적으로 분석하여 목질계 바이오매스의 가스화에 있어서 목편 건조의 필요성을 확인하고 합성가스의 효율적인 생산 방안을 제시하고자 하였다.

II. 바이오매스 가스화

가스화 반응에서 일어나는 주요 핵심 반응은 다음의 부분산화, 완전산화, 수성가스 반응 등으로 구성된다 (McKendry, 2002c).



식 (2)에서 보는 바와 같이 완전산화 즉, 연소 반응에서 가장 많은 열이 방출된다. CO가 생성되는 부분산화 반응에서는 완전산화 반응에서의 약 65 % 정도의 열이 방출된다. 가스화 반응에서는 완전산화 반응에서와는 달리 CO와 H₂, 그리고 수증기가 추가의 반응에 관여하게 된다.



이들 가역반응은 온도, 압력, 반응물의 농도 등의 조건에 따라 반응 방향이 달라진다. 이들 반응에 의해서 가스 중 CO, H₂, CH₄, 수증기 등의 조성이 변하게 된다. 공기를 공급하여 가스화 반응이 일어날 때 발열량은 4-6 MJ/Nm³, 수증기와 산소를 공급하면 다소 높은 12-18 MJ/Nm³ 정도의 열량을 갖는다. 공기를 산화제로 이용하여 얻어지는 합성가스의 열량이 낮은 이유는 공기 중의 질소가 포함되어 가스 중 가연성 성분의 농도를 낮추기 때문이다. 합성가스 중의 질소는 50 % 내외로 존재한다. 산소를 공급하는 가스화 반응에서는 10-15 MJ/Nm³의 열량을 가진다. 산소를 공급할 때 과도하게 높은 반응온도를 가지므로 수증기를 함께 공급하는데, 이 때에는 가스의 발열량은 13-20 MJ/Nm³까지 상승한다. 가스화 반응의 전체 효율은 최고 70 % 이상을 가진다 (Wereco-Brobby and Hagen, 1998).

III. 재료 및 방법

1. 가스화장치

본 연구에서 이용된 가스화장치는 하향식으로서, 내통 직경 300 mm, 산화부의 목 (hearth)의 직경은 150 mm로 제작하였

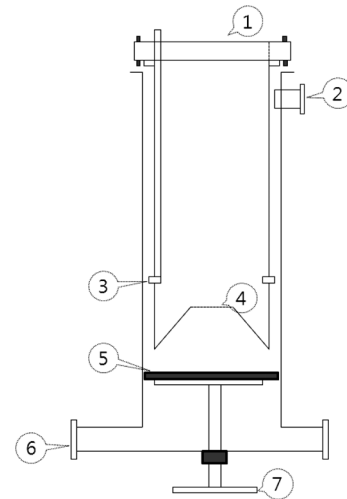


Fig. 1 Schematic of downdraft gasifier fabricated for the experiment (1. Biomass inlet; 2. Gas outlet; 3. Air inlet; 4. Hearth; 5. Grate; 6. Ash outlet; 7. Grate agitator)

다. 이러한 제원을 가질 때 목편의 소비량은 최대 시간당 67 kg, 합성가스는 18-140 Nm³/h를 생산할 수 있다 (Reed, A. Das, 1988). 본 연구에서 제작되어 실험에 이용된 가스화 장치는 Fig. 1과 같다. 가스화를 위한 산화제는 공기를 이용하였으며, 공기 주입구는 hearth로부터 120 mm 정도 높게 위치시켰다.

2. 가스분석

가스화 반응으로 생성되는 합성가스에 대한 성분 분석은 Fig. 1의 ②에서 배출되는 합성가스를 싸이클론과 가스 냉각을 위한 컨벡터, 그리고 필터를 거친 후 Tedlar[®] bag으로 포집하여 기체크로마토그래피 (Agilent 7890A)로 분석하였다. micropacked 컬럼 (ShinCarbon ST 19808-800901, 2 m×1 mm, 미국 Restek 사)과 열전도도 검출기 (TCD)를 이용하여 H₂, CO, CO₂, CH₄ 등에 대해 분석하였다. 시료 주입량은 0.1 mL, 주입온도는 150 °C, 압력은 20 psi, 오븐의 온도는 50 °C에서 시작하여 분당 20 °C로 200 °C까지 상승시킨 후 1분간 지속시켰다. TCD의 온도는 250 °C로 유지하였다.

3. 계측

가스화 장치의 운전 및 풍건 목편 조건에 따른 온도, 송기량, 가스생성량, 무게 변화를 계측하였다. 온도는 가스화 장치 내부 hearth, 싸이클론 전·후단, 가스 냉각용 컨벡터 후단에서 측정하였다. 공급되는 공기량과 생성되는 합성가스 유량은 한국유량 계공업의 차압식면적유량계 (DPE-S-S)를 이용하였다. 공기량에 대해서는 온도와 압력에 대한 보정을, 합성가스 유량은 가스 조성에 따른 밀도, 온도, 압력에 대해 각각 보정하여 분석하였다. 가스화장치 내 목편의 가스화 속도는 무게 변화를 계측하여 산정하였다. 온도센서, 유량계, 압력센서 등은 National Instrument사의 LabView 2009을 기반으로 CompactDAQ에 NI9213, NI 9219에 연결하였다.

4. 풍건 목편

가스화 실험에 이용된 목편은 강원도 홍천에 위치한 (주)신우 임산에서 구입하였다. 구입된 목편의 함수비는 40-50 % 수준으로서, 실내외에서 2-3일간 자연 건조하였다. 건조시 대기 중의 상대습도는 70-85 % 수준이었다. 가스화 실험 시점에 별도로 함수비 측정을 위한 시료를 채취하였으며, 함수비는 건조오븐에서 80 °C로 24시간 건조하여 측정하였다.

5. 실험

가스화 장치는 점화 후 blower를 가동하면서 목편을 가스화

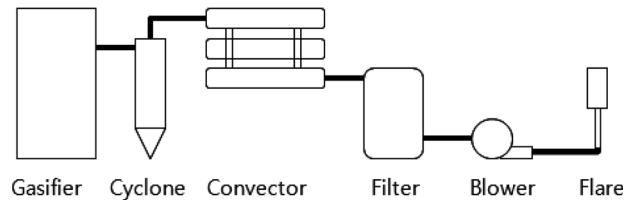


Fig. 2 Flow diagram for gasification experiment

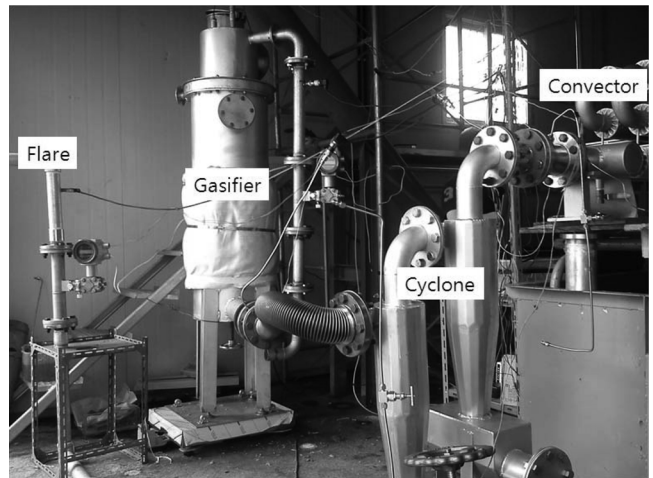


Photo 1 Experimental setup for woodchip gasification

장치 내통 상부까지 채웠고, 회분식으로 운전하였다. 전압을 조정하여 가스화장치에 공급되는 공기량을 조절하였다. 가스화장치의 최초 무게에 이르면 다시 목편을 채워 실험을 계속하였다. 목편이 하부로 서서히 안정적으로 이동하여야 하나 밀도가 낮아 연속적으로 이동하지 못하고 중간에 공간이 생기는 경우가 발생하였다. 이러한 현상을 bridging이라고 부르는데, 이 때에는 가스화 반응이 제대로 일어나지 못하여 합성가스의 연소가 불량하다. 이 때에는 가스화장치 본체에 약한 충격이나 진동을 가해 목편이 아래로 움직이도록 하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 가스화 반응속도

실험에 이용된 풍건 목편의 함수비는 20-24 %로 측정되었다. 하향식 가스화장치에 적합한 바이오매스의 함수비는 20 % 이하가 적당한 것으로 알려져 있다 (McKendry, 2002b). 함수비가 높으면 수분이 증발하는데 반응열이 소모되기 때문에 질 좋은 합성가스를 생산하는데 불리하기 때문이다. 가스가 점화되어 연소되는 시점부터의 온도와 목편의 중량 변화를 Fig. 3과 4에 나타내었다. 공기량이 상대적으로 많은 조건 (Fig. 3)에서는 산화부에서의 온도가 다소 높았다. 공기가 주입되어 목편 바

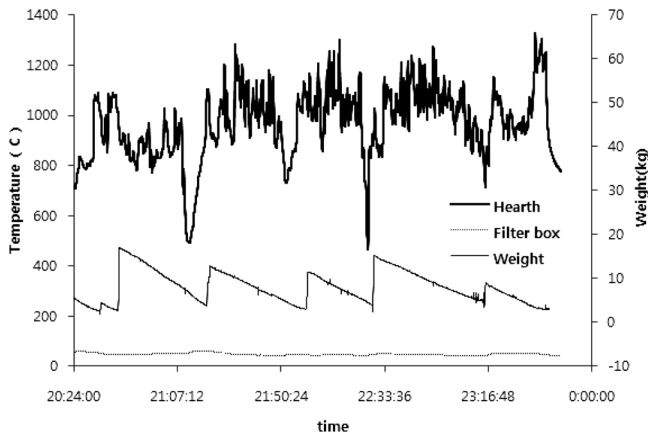


Fig. 3 Gasification rate illustrated by temperature and weight changes (ER=0.28)

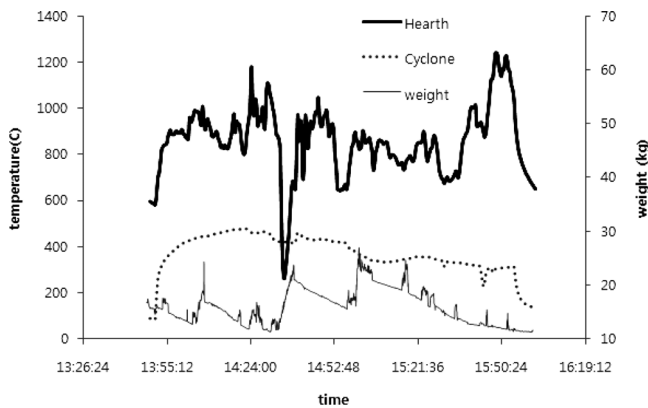


Fig. 4 Gasification rate illustrated by temperature and weight changes (ER=0.25)

이오매스의 연소 반응이 일어나는 산화부에서의 온도는 800 °C 내외를 유지하였다. 목편의 공급이 부족하였던 시기에 부분적으로 600 °C 이하의 온도를 나타내기도 하였으나, 최고 1,000 °C 이상의 온도를 나타내기도 하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 온도가 800 °C 이상의 조건에서 바람직한 가스화 반응이 일어나게 된다.

가스화 반응에 따른 목편 소비량은 시간당 15.1~18.75 kg 으로 나타났다. 이 때 공급된 공기 유량은 22~25 Nm³/h, 생성된 합성가스 유량은 36~40.2 Nm³/h였다. 함수비가 20 % 수준일 때 농업부산물의 저위발열량은 3,200 kcal/kg 정도이다 (Hong, 2004). 바이오매스에 대한 일반적인 분자식 CH_{1.4}O_{0.6}을 취하여 완전연소에 필요한 이론공기량은 쉽게 계산이 가능하다 (Prins et al., 2007). 가스화에 대한 공기당량비 (Equivalence Ratio, ER)는 다음과 같이 정의된다.

$$ER = R_{ac} / R_{st} \quad (1)$$

Table 1 Comparison of experimental results and typical values for wood biomass gasification

Parameters	Experimental results	Typical values or recommendation*
Moisture contents (%)	20~24	12~20
Air consumption required for gasification (Nm ³ -air/kg-wood)	1.06~1.32	1.5
Gas production (Nm ³ /kg-wood)	2.02~2.52	2.5
Gas composition		
CO	10.7~14.5	17~22
H ₂	16.5~21.4	16~20
CO ₂	12.5~16.6	10~15
CH ₄	2.3~2.9	1~2
Lower gas heating values (MJ/Nm ³)	3.9~5.2	4.6~5.8

* (Rajvanshi, 1986)

여기에서 R_{ac}는 실제 공급된 공기량, R_{st}는 완전연소에 요구되는 화학양론적 공기량이다. 안정된 가스화는 0.4보다 작은 ER값으로 운전되어야 한다 (Martinez et al., 2011). 실험에서 측정된 값을 이용하여 계산된 ER값은 0.25~0.28 수준으로서, 문헌에서 제시하는 범위 내에 있음을 알 수 있다 (Sun et al., 2009).

2. 가스 조성

합성가스 중 가연성 가스의 조성은 CO 10.7~14.5 %, H₂ 16.5~21.4 %, CH₄ 2.3~2.9 % 수준으로 나타났다. 반면에 CO₂는 12.5~16.5 %, 나머지 50 % 내외는 질소로 나타났다. 이들 가스의 저위발열량을 기준으로 합성가스의 저위 발열량을 산정하면 약 3.9~5.2 MJ/Nm³가 얻어진다. 일반적으로 공기를 산화제로 하여 바이오매스로부터 얻어지는 합성가스의 열량은 4~6 MJ/Nm³이므로 약간은 낮은 편에 속한다 (McKendry, 2002c). 바이오매스의 저위발열량과 합성가스의 저위발열량을 기준으로, 시간당 바이오매스 공급량에 따른 열량 대비 합성가스 생산량에 따른 열량의 비율은 62~65 % 수준으로 계산된다. 즉 본 연구에서 제작된 가스화장치의 냉가스 효율은 기존의 연구 결과와 유사한 60~70 %의 범위에 든다.

합성가스 성분별 조성을 기존의 연구와 비교해 볼 때 CO는 다소 낮고 CH₄가 다소 높음을 알 수 있다. 적절한 조건의 바이오매스 연료를 공급하고 안정적인 운전조건에서는 일반적으로 바이오매스 합성가스 중 CO는 20 % 이상을 가지며, CH₄는 2 % 이하를 가진다 (Wang et al., 2008). 하향식 가스화장치를 운전 하는데 있어서 함수비와 회분함량 등의 연료 조건은 매우 중요하다. 본 연구에서 이용한 풍건 목편의 경우 함수비가 20 %를 상회하며, 목편의 크기 또한 두께는 4-5 mm, 길이는 40-60 mm 정도로서 하향식 가스화장치에 적용하기에 최적의 조건은 아니라고 판단된다. 특히 함수비가 20 % 이상인 조건이므로 앞



Photo 2 Collection of condensed water vapor and tar from filter box

의 식 (4)와 (5)의 반응이 관여한다고 볼 수 있다. 수성가스 시프트 반응에 따라서 CO₂가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단되며, 메탄 생성반응으로 인해 CH₄의 농도가 약간 높게 나타난 것으로 판단된다.

가스화 장치를 가동한 후, 가스 냉각용 컨벡터 내부와 필터박스에는 가스의 냉각으로 인해 가스 중에 있던 타르와 다량의 수분이 응축되어 하부에 고여 있는 것을 확인할 수 있었다. Photo 2는 필터의 하부에서 유출되는 응축수와 타르를 보여주고 있다. 필터박스를 거쳐 나온 합성가스의 온도는 60 °C 이하로서, 필터박스 내부에서 많은 양의 수분이 응축되었다.

3. 목편 가스화 방안

하향식 가스화장치의 장점은 생산되는 합성가스 중 타르의 함량이 매우 낮아 후속공정에 적용하기 매우 유리하다는 것이다. 반면 하향식 가스화장치를 안정적으로 운전하기 위해서는 입도 등 까다로운 연료조건을 만족시켜야 한다. 상업적으로 공급되는 목편을 함수비가 20 % 수준으로 자연 건조하였을 때 가스화 반응은 안정적으로 지속되는 것을 확인하였다. 그러나 합성가스의 성분조성, 발열량, 가스 정제설비 내 과도한 응축수 축적 등을 고려하면 추가의 건조가 요구됨을 알 수 있다. 특히 고온의 수증기가 환원층을 통과하면서 메탄화 반응을 유도하여 CO₂와 CH₄의 농도가 다소 높게 나타남을 알 수 있었다. 바이오매스 중 수분이 많을수록 증발에 필요한 열이 보다 많이 요구되어 반응온도를 떨어뜨리는 결과를 초래한다. 풍건으로 함수비를 20 % 수준으로 낮추어 반응온도는 크게 낮아지지는 않았으나, 반응조에 투입하기 전 바이오매스 연료의 함수비를 보다 낮추면 보다 양질의 합성가스를 얻고 효율을 높일 수 있으리라 판단된다.

V. 결 론

바이오매스 합성가스는 가연성 연료에 완전연소에 필요한 양보다 적은 제한된 양의 산화제를 공급하면서 고온에서 반응을 유지하면서 얻게 된다. 합성가스는 발전을 위한 내연기관의 연료로서 또는 화학 촉매공정의 원료로서 이용이 가능하다. 본 연구에서는 가스 중에 타르나 분진의 함량이 낮은 청정 합성가스 생산이 가능한 하향식 가스화장치를 제작하여, 풍건 목편에 대한 일련의 실험 과정을 통해 가스화 반응속도와 합성가스 생산 효율에 대해 평가하였다. 가스화 장치 내 산화부에서의 온도는 800 °C 이상으로 최고 1,000 °C 이상을 가져 반응은 적정하였다. 생산된 합성가스의 연소 상태를 볼 때 비교적 양호한 수준으로 판단되었다. 합성가스의 이용을 위해 사이클론, 컨벡터, 가스필터 등의 후단 가스 정제 설비를 연결하여 가스화 시스템을 구성하였으며, 온도, 유량, 압력, 무게 등을 측정하여 가스화 반응 속도를 분석하였다. 일련의 실험 결과 기존의 연구 및 문헌 결과와 크게 다르지 않았으나, 본 연구에서 이용된 함수비 20 % 수준의 풍건 목편을 가스화하면 H₂와 CO₂가 각각 16.5~21.4 %, 12.5~16.6 % 수준으로서 약간 높았다. 목편의 함수비가 다소 높아 수성가스 시프트 반응으로 인한 결과로 판단된다. 실험 종료 후 필터 박스와 가스 냉각용 컨벡터 내부에 고인 상당량의 응축수 또한 풍건 목편을 더 건조할 필요가 있음을 시사한다. 가스화 장치에서 배출되는 합성가스의 온도는 500°C 이상이므로, 가스의 냉각과정과 바이오매스 연료의 건조공정을 연계하여 바이오매스 가스화 공정을 보다 효율적으로 구축할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Hong, 2004. Evaluation of Agricultural Biomass Resources for Renewable Energy : Biomass from orchards and non-paddy fields. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(3): 85-92 (in Korean)
2. Hong, S., 2006. Effects of Biomass Fuel Conditions on Biomass Ossification. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 48(3): 49-59 (in Korean)
3. Hong, S., 2008. Strategic Planning for Bioenergy Considering Biomass Availability in Rural Area. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(4): 51-58 (in Korean)
4. Martínez, J. D., E. E. Silva Lora, R. V. Andrade, and R. L. Jaén, 2011. Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor.

- Biomass and Bioenergy* In Press, Corrected Proof:
5. McKendry, P., 2002a. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology* 83(1): 37-46.
 6. McKendry, P., 2002b. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology* 83(1): 47-54.
 7. McKendry, P., 2002c. Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology* 83(1): 55-63.
 8. Prins, M. J., K. J. Ptasinski, and F. J. Janssen, 2007. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency. *Energy* 32(7): 1248-1259.
 9. Rajvanshi, A. K., 1986. Biomass Gasification in *Alternative Energy in Agriculture* (Vol. II): CRC Press.
 10. Reed, T. B. and A. Das, 1988. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. SERI/SP-271-3022.
 11. Sun, S., Y. Zhao, F. Ling, and F. Su, 2009. Experimental research on air staged cyclone gasification of rice husk. *Fuel Processing Technology* 90(4): 465-471.
 12. Wang, L., C. L. Weller, D. D. Jones, and M. A. Hanna, 2008. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. *Biomass and Bioenergy* 32(7): 573-581.
 13. Wereko-Brobby, C. Y. and E. B. Hagen, 1998. *Biomass Conversion and Technology*.