

## 하향식 바이오매스 가스화장치의 개발 및 평가

### Development and Assessment of a Downdraft Gasifier for Biomass Gasification

홍성구\*<sup>†</sup> · 심재훈\*\*

Seong Gu Hong\*<sup>†</sup> · Jae-Hoon Shim\*\*

#### Abstract

A downdraft gasifier was manufactured for biomass gasification. The gasifier was designed based on the principles of gasification presented in previous studies. The pipes of 25mm diameter were used for both supplying air and discharging producer gas. Wood charcoals were mostly used for fuels. The concentration of CO ranged from 25 to 35%, comparable to the values presented in other studies. The temperature outside wall of the gasifier was measured up to 400°C, indicating a great heat loss. When glass wool was cover over the wall, some parts of wire mesh located in the bottom of the reactor were molten down. There were several modifications that should be made in order to improve its efficiency and obtain more stable continuous gasification, including insulation, reduction in pressure loss, durable bottom meshes, the optimum length of reaction part, and safety.

*Keywords : Downdraft gasifier, Biomass gasification, Synthetic gas, charcoal*

#### 1. 서 론

1990년대 말까지 국제유가는 평균 16달러에 지나지 않았으나, 1998년 이후부터 20달러 이상으로 인상되고 이후 지속적인 상승세를 나타내었다. 그러나 2004년 3월 기준으로 30달러 수준에서 최근 2008년에는 100달러를 돌파하였다. 석유자원이 전혀 없는 우리나라로서는 화석연료에 대한 의존도를 낮추

기 위해서는 에너지 효율을 높임과 동시에 재생에너지 보급을 위하여 노력을 경주하여야 한다. 특히 온실가스 감축에 대한 국제적인 관심과 노력이 집중되고 있는 상황에서 재생에너지에 대한 관심은 전례 없이 높아지고 있는 실정이다.

재생에너지원 가운데 바이오매스는 상대적으로 활용 잠재력이 매우 높은 것으로 평가되고 있다. 바이오매스는 동식물로부터 유래된 유기성 자원을 총칭하는 것으로서 목질계 바이오매스가 대표적이다. 바이오매스를 이용하는 방법으로는 발효 등의 생물학적인 방법과 연소, 열분해, 또는 가스화 등의 열화학적인 방법이 있다. 목질계 바이오매스는 주로 열화학적인 방법에 의해서 활용될 수 있다. 이 가운데 연소방법은 가장 단순하고 간단한 것으로서 연소열을 이용하는 것이다. 열분해와 가스화는 연료를 생산

\* 한경대학교 지역자원시스템공학과

\*\* (주) 넷바이오스

<sup>†</sup> Corresponding author. Tel.: +2-31-670-5134

Fax: +82-31-674-4119

E-mail address: bb9@hknu.ac.kr

2008년 4월 30일 투고

2008년 7월 15일 심사완료

2008년 7월 21일 게재확정

한 후 이 연료를 이용하는 방법으로 볼 수 있다. 열분해(pyrolysis)는 산소가 없는 조건에서 가열하여 액상, 기상, 고상의 연료를 동시에 얻을 수 있으나 기상의 가연성 가스와 고상의 찰콜(charcoal)은 열분해에 요구되는 열을 공급하는데 이용되어 주로 액상의 열분해유를 생산하여 이용하게 된다. 반면에 가스화(gasification)는 제한적인 양의 산화제로서 공기나 산소를 공급하여 자체 산화과정을 유도하되 불완전 연소가 이루어져 CO와 H<sub>2</sub>로 구성되는 가연성 가스를 생산할 수 있다.

가스화 기술은 2차 세계대전 전후로 다량으로 보급되었던 목탄차를 기억하면 알 수 있듯이 비교적 오래전부터 적용되었던 것이다. 이용하기 쉽고 저렴한 석유의 보급으로 곧바로 사라져갔으나 최근에는 온실가스 감축 등의 논의와 함께 급속도로 기술개발과 상용화가 추진되고 있는 청정에너지 기술이다. 특히 고유가 상황에서는 바이오매스의 수집 및 운반비용을 고려하더라도 석유와 경쟁력을 갖출 수 있는 가능성이 매우 높다.

바이오매스 자원의 가스화를 통한 에너지공급은 유럽, 미국, 중국, 인도 등에서 다양한 형태로 이루어지고 있다. 유럽에서는 MW 규모의 지역난방이 상용화된 실정이며, 미국의 경우 천연가스와 혼합하여 발전소에서 이용되고 있다. 중국과 인도 또한 바이오매스 가스화를 통해 마을단위 취사용 연료를 공급하거나 소규모 발전시설을 가동하고 있는 실정이다. 반면에 우리나라에서는 바이오매스 가스화와 관련된 연구는 지난 1980년대 간헐적으로 이루어진 바 있으나 체계적으로 추진되지 못하였고, 최근에 이르러 관심을 갖고 연구가 시작되고 있다.

특히 바이오매스 자원은 부존특성을 고려할 때 농촌지역에서 보급이 유리하다. 산지에서 경제성 문제로 방치되고 있는 간벌목과 숲가꾸기 부산물, 그리고 농경지에서 발생하는 농업부산물은 농촌지역의 대표적인 바이오매스이다. 수집 및 운반 비용을 고려할 때, 근거리에서 활용하는 것이 바람직하므로 농촌 마을 또는 시설농업을 위한 에너지공급 방안으로 적합하다고 판단된다.

한편 가스화를 통해서 얻어지는 가연성 가스는 비

교적 열량이 낮은 저급연료이고 가스 중에 분진, 타르, 유기산 등이 포함되어 내연기관에 적용하기 위해서는 이들을 제거해야 하는 문제가 있다. 뿐만 아니라 가연성 합성가스의 열량이 낮기 때문에 엔진을 구동할 때에는 출력저하가 필연적이다. 또한 바이오매스 공급량이 충분치 않은 시기에는 설비의 연간 가동률이 낮아지므로 경제성이 떨어질 가능성이 있다.

그러나 천연가스를 이용할 수 있는 여건, 즉 도시가스 공급이 가능한 지역 내에서 기존의 가스설비를 활용할 수 있는 여건에서는 가연성 합성가스를 혼합하여 활용이 가능하다. 바이오매스 공급량이 충분하지 않은 시기나 지역에서는 합성가스가 부족한 경우 천연가스 단독으로 설비의 운전이 가능하기 때문에 경제성을 충분히 높일 수 있는 장점이 있다.

바이오매스를 이용하여 생산되는 합성가스는 더 나아가 액상 연료 생산을 위한 원료로 활용이 가능하다. 즉, 저열량 합성가스의 연료로서 문제점을 극복하기 위하여 메탄올이나 DME(Dimethyl Ether) 등을 합성할 수 있다. 최근에는 가스화공정을 개선하여 수소의 비율이 높은 합성가스를 생산하기 위한 시도가 이루어지고 있으며, 연료전지에 적용하는 연구도 추진되고 있는 실정이다.

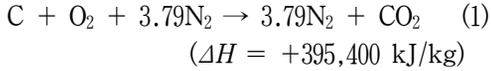
이와 같이 가스화공정은 활용되지 않고 있는 바이오매스 자원을 유용한 에너지로 변환할 수 있는 방법으로서, 생산된 합성가스의 활용과 관련된 후속 연구개발의 가능성이 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 가스화공정에 대한 기존의 연구결과와 기본 원리를 바탕으로 바이오매스 가스화를 위한 가스화장치를 개발하여, 구동실험을 통해 문제점을 도출하고 추후 설계 시 반영되어야 할 개선사항을 도출하고자 하였다.

## II. 가스화공정 및 장치 개요

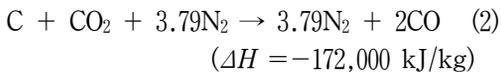
### 1. 가스화 원리 및 공정

가스화 반응은 가스화 장치 내에서 온도, 산화제 공급유량, 연료 입자크기 등에 따라 영향을 받는 일련의 복합 반응과정으로 볼 수 있다. 일반적으로 주요 반응별로 나누어서 가스화 반응을 이해 할 수 있

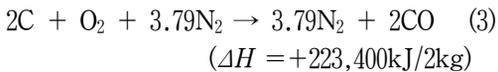
다. 먼저 탄소의 일반적인 연소반응은 다음 반응식과 같은 발열반응으로 나타낼 수 있다(Wereko-Brobby and Hagen, 1998).



탄소가 화염조건에서 온도 900℃ 이상에서의 일산화탄소가 생성되는 반응은 흡열반응으로서 다음과 같다.

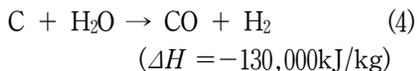


이상적으로 CO가 생성된다고 할 때, 식 (1)과 (2)를 결합하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.



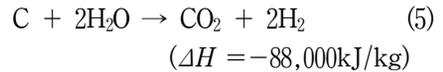
따라서 이상적인 조건에서 탄소가 100% CO로 전환된다고 가정할 때, 생성되는 합성가스는 공기 중에는 질소를 포함하므로 34.5%의 CO와 65.5%의 N<sub>2</sub>로 구성된다. 따라서 열량은 4359 kJ/m<sup>3</sup> @STP(표준 온도 및 압력조건)가 된다. 탄소 2kg에 대해서 열수지를 계산하면, 총 발열량 790,800 kJ, 가스로서 발산(낭비)되는 열 223,400 kJ, 그리고 가스에 내재되어 있는 열 567,400 kJ이 되어 이론적인 효율은 약 72%가 된다.

가스화 반응에서 바이오매스 연료 중의 수분이 반응에 참여하게 되면 약 900℃ 이상의 온도에서 수소 생성반응이 일어난다.

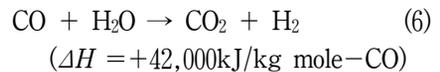


가스화 반응에 인위적으로 수증기를 공급하여 수소 생성반응을 유발하는 경우 습식가스화 공정이라고 한다. 수소 생성반응 또한 흡열반응이므로 가스로 내부

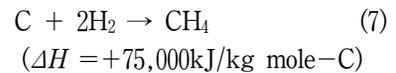
의 온도를 낮출 수 있고 고로재(슬래그)의 생성을 억제하는 효과를 기대할 수 있다. 물론 가스화 반응로 내의 온도가 아주 높은 조건에 한한다. 습식공정에서 연료의 발열량이 충분치 않아 온도가 500~600℃로 낮아지게 되면 CO<sub>2</sub>가 생성되는 반응이 일어나게 된다.



과다한 수증기가 유입되면 다음과 같은 발열반응으로 전환된다.



약 500℃ 조건에서는 수소와 탄소가 결합하여 메탄이 생성되는 반응이 일어나게 된다.



가스화 반응을 위한 산화제는 공기 또는 산소가 이용된다. 공기를 이용하는 경우 합성가스 중에 질소가 55%내외로 존재하므로 열량이 낮은 반면, 산소를 이용하게 되면 반응부의 온도가 너무 높아지므로 수증기를 함께 공급하여 온도를 낮추고 동시에 수소 농도를 높여 열량을 개선할 수 있다.

## 2. 가스화장치의 종류

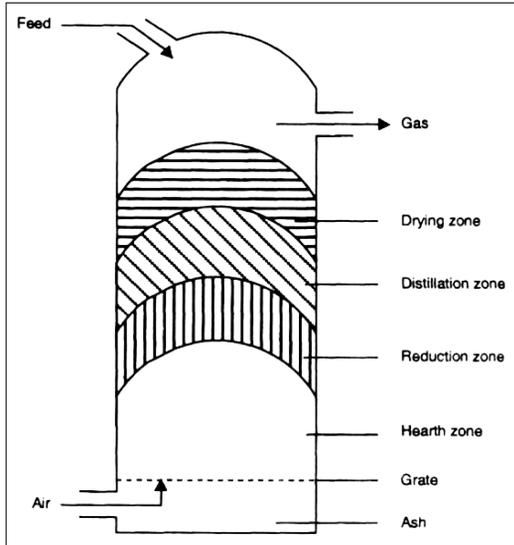
가스화 장치는 고정상(Fixed-bed)과 유동상(Fluidized-bed)으로 크게 나눌 수 있으며, 고정상은 산화제 또는 합성가스 흐름의 방향에 따라서 상향식(updraft), 하향식(downdraft), 직교식(crossdraft) 등으로 나눌 수 있다.

상향식 가스화장치(Fig. 1(a))는 바이오매스가 상층으로 공급되며 상층으로부터 건조(drying zone), 열분해(pyrolysis, distillation zone), 가스화(gasification,

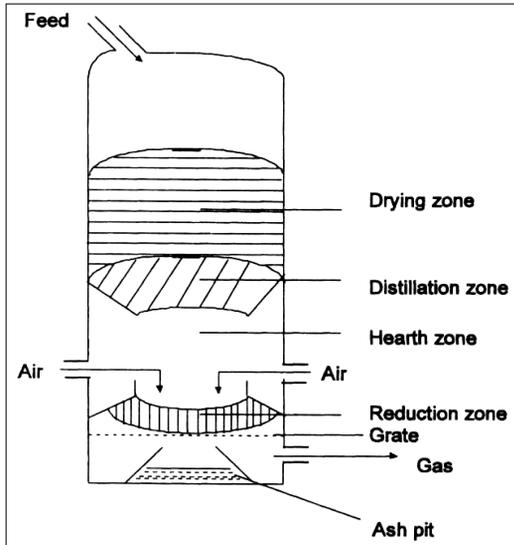
reduction zone), 발열(hearth zone) 반응구간 순서로 차례로 구성된다. 발열부 또는 연소구간(hearth zone)의 밑에 있는 다공 철판을 통하여 연소 재가 배출된다. 공기는 가스화장치의 하부에 설치된 다공 철판을 통하여 공급된다. 목탄(charcoal)은 다공 철

판에 퇴적되며 연소되어 고온에 이르며 목탄이 합성 가스(product gas)로 가스화 된다. 이 고온의 가스가 상층부로 이동하며 바이오매스를 열분해 시키고, 상층으로 공급된 바이오매스를 건조시킨다. 고온의 연료가스는 상층부로 이동하면서 200~300℃로 냉각된다. 열분해 구간에서는 다량의 타르(tar)가 발생하여 바이오매스에 일부 잔류되고 나머지는 연료가스에 혼합되어 배출된다. 이와 같이 고온의 가스화된 연료가스가 열분해 및 건조에 사용되어 낮은 온도로 배출되므로 상향식 가스화장치의 열효율은 전체적으로 높으나, 연료가스의 타르의 함유량이 높고 작은 입자가 혼합될 수 있으므로 별도의 타르 및 분진 제거장치가 필요하다.

하향식 가스화장치(Fig. 1(b))에서 공기와 바이오매스는 같은 방향으로 공급되며 바이오매스가 상층으로 공급되며 상층으로부터 건조, 열분해, 발열, 가스화 반응구간 순서로 차례로 구성된다. 하향식 가스화에서는 바이오매스가 상부에서 투입되고, 공기 또한 상부 또는 측면에서 주입된다. 생성된 가스는 아래쪽으로 배출되어 바이오매스의 흐름방향과 같다. 내부 반응 층은 상향식과 유사하나 순서는 약간 다르다. 바이오매스는 투입 후 건조층에서 건조되며, 그 아래에 있는 건류층에서 열분해된다. 건조층과 열분해층은 주로 작열층의 복사열에 의해서 그리고 일부 대류에 의해서 소요 열이 공급된다. 작열층에서는 숯성분의 일부가 연소된다. 열분해 가스는 또한 작열층을 통과하면서 연소 혹은 분해된다. 열분해가스가 연소되는 정도는 가스로의 설계, 바이오매스 연료, 가스로 운전기술 등에 영향을 받는다. 산화층으로 볼 수 있는 작열층에서 생성된 이산화탄소와 수증기 그리고 일부 숯은 그 아래의 환원층에서 일산화탄소와 수소로 환원된다. 하향식 가스로의 주요 장점은 매우 적은 양의 타르를 포함하는 가스의 생산이다. 따라서 엔진구동에 적합하다. 그런 실재로는 타르가 전혀 없는 가스는 좀처럼 얻기 어렵다. 주된 이유는 모든 가스가 가장 뜨거운 환원 영역을 통과하지 못하기 때문이다. 작열층에서의 체류시간 또한 매우 짧다. 하향식 가스화장치는 연료 조건이 상대적으로 까다롭다. 상향식의 경우 입도의 범위가 비교적 넓으나 하



(a) Up-draft



(b) Down-draft

Fig. 1 Schematics of fixed-bed gasifiers(Quaak et al., 1999)

향식의 경우 2~10cm 정도가 권장되고 있다. 연료의 함수비는 40% 이하가 적당하다.

### III. 가스화장치의 설계 및 제작

가스화장치를 설계하는데 있어서 연소 및 환원반응이 일어나는 반응부 체적의 결정은 투입원료의 발열량과 열부하량과의 관계를 통해서 산정하여야 한다. 열부하량은 소각로나 가스화장치의 반응부 1m<sup>3</sup> 당 1시간에 발생하는 평균 열량을 말한다. 가스화장치 반응부의 체적은 다음의 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$V = \frac{[M \times Q \times (1 - \eta)]}{K} \quad (8)$$

여기에서  $V$ 는 반응부 체적(m<sup>3</sup>),  $M$ 은 처리량,  $Q$ 는 단위중량당 열량,  $\eta$ 는 냉가스 효율,  $K$ 는 열부하량이다. 냉가스 효율은 투입연료의 열량 대비 상온에서 합성가스가 가지는 열량의 비율을 말한다. 폐기물 가스화 장치에서 열부하량은 100,000kcal/m<sup>3</sup>-hr로 제시된 바 있다(Kim et al. 2003). 반응부의 길이는 지배 반응특성에 따라서 결정하는데, 가스화 반응의 경우 반응물의 확산이 지배적인 경우와 고체표면과의 화학반응이 지배적인 경우를 가중 평균하여 산정한다. 이와 같은 설계 기준을 토대로 하여, 연소 및 환원반응이 일어나는 반응부의 직경은 내경 100mm, 길이는 공기 주입부에서 바닥까지 240mm로 하였다. 연료 공급량은 시간당 2kg 이하로 하였다.

반응부 바닥은 합성가스가 원활하게 배출될 수 있는 철망으로 제작하였고, 탈착이 가능토록 하였다. 합성가스는 반응부 외부로 거쳐 배출될 수 있도록 하였다. 반응부를 포함한 가스화 장치의 재질은 스텐레스 스틸로 제작하였다. 공기의 주입은 90° 간격으로 4개의 25mm 직경의 구멍을 통해서 이루어지며 합성가스는 한 개의 출구를 통해서 배출된다. 가스화 반응에 있어서 열손실은 반응부 내부 온도에 직접 영향을 미치므로 충분한 단열이 요구되나 본 연구에서는 단열재를 실험 중에 보완토록 하였다. 가스화 장치의 본체 아랫부분은 점화 및 실험 종료 후 내부

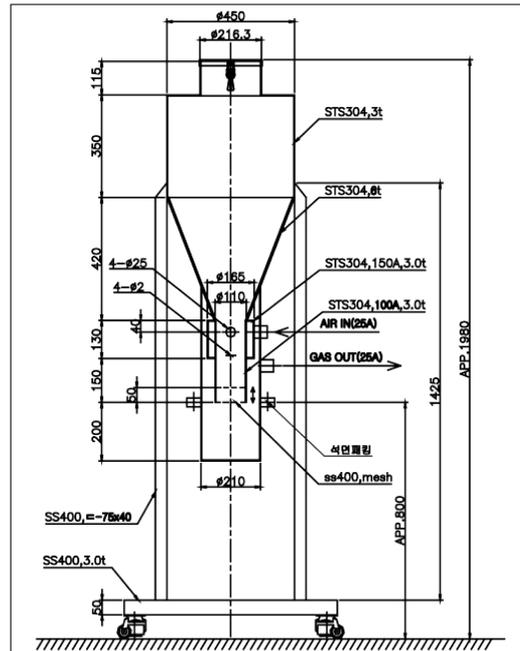


Fig. 2 Design drawing of the gasifier

확인 등을 위하여 착탈식으로 제작하였다. Fig. 2는 완성된 가스화장치 설계도면을 보여주고 있다.

### IV. 가스화장치의 구동실험

#### 1. 실험조건

제작된 가스화장치를 이용하여 바이오매스 가스화 실험을 수행하였다. 가스화에 이용된 연료는 배나무 전지목을 탄화하여 얻은 숯을 이용하였다. 제작된 가스화 장치 반응부의 직경을 고려할 때 3cm 내외의 입도를 가지는 연료가 적당하므로, 탄화 후 해당 크기의 입도로 파쇄하였다. 약 6~10 kg의 연료를 투입한 후, 바닥에서 부탄가스용 토치를 이용하여 점화하였다. 점화 후 즉시 송풍기를 가동한 후 합성가스 누설이 없도록 재반이를 부착하였다.

송풍기와 가스화장치 사이에는 유량을 측정할 수 있는 rotameter(Max. 300 l/min)를 부착하여 송기량을 측정하였다. 송기량을 변화시키며 운전을 지속하였다. 합성가스의 조성은 검지관을 이용하여 일정 시간 간격으로 분석하였다. 합성가스 중에는 CO가

고농도로 포함되어 있으므로 안전을 고려하여 부탄 가스 토치를 이용하여 지속적으로 강제 연소하였다. 가스화장치 내부 반응부의 온도는 별도로 측정하지 못하고 적외선 온도계를 이용하여 외부의 온도만을 측정하였다.

## 2 결과 및 분석

### 가. 구동시험 결과

점화 후 합성가스의 연소가 지속되는 시간은 기준으로 바이오매스 가스화 속도는 평균 약 2 kg/hr로 나타났다. 일시적으로 송기량을 줄이거나 높이는 작업이 간헐적으로 이루어졌으나 가스화 지속시간이 대체로 3~5시간으로 볼 때 그 영향은 크지 않다고 보고 산정한 결과이다. 숯의 발열량이 약 30MJ/kg 이므로 가스화장치의 능력은 약 17kW<sub>th</sub>로 계산된다. 목편과 같은 바이오매스에 비해서 숯의 단위중량당 발열량은 동일한 함수비 조건에서 거의 2배이므로 가스화 반응이 신속하게 이루어진 것으로 보인다.

검지관을 이용하여 CO의 농도를 측정한 결과 25~35%의 범위로 나타났다. 송풍량이나 온도의 영향이 있음을 확인하였다. 숯을 가스화하여 얻어지는 합성가스에는 CO가 28.7% H<sub>2</sub>가 4% 내외, 질소가 60% 내외로 나타난다(Wereko-Brobby and Hagen, 1996). H<sub>2</sub>의 경우 검지관의 측정한계를 벗어나서 정확한 농도를 확인할 수 없었으나 검출한계인 2%이상으로 측정되었다. H<sub>2</sub>는 숯에 포함된 수분이 환원반응으로 분해되어 생성된 것으로 판단된다. 합성가스를 냉각기를 통과시킨 후 가스관 내부를 확인하였으나 타르의 응축 등은 확인할 수 없었다. 단지 가스에 포함된 분진이 부분적으로 내벽에 집적되었다. 합성가스의 발열량은 측정치 않았으나 숯을 이용한 합성가스의 조성과 거의 동일하므로 발열량 5MJ/Nm<sup>3</sup>과 비슷한 것으로 계산된다. 이는 메탄이 주성분인 천연가스에 비해서 약 1/9~1/10 수준이다.

반응부가 위치한 곳의 외벽 온도는 약 300~400℃로 측정되었다. 열전도율을 고려할 때 내부의 온도는 600℃ 이상으로 추정할 수 있다. 정상적인 가스화가 진행되어 합성가스가 생산되기 위해서는 600℃ 이상

의 온도가 유지되어야 하기 때문이다. 가스화장치 외벽에 단열용 유리섬유를 싼 상태에서 구동한 경우에는 온도가 더욱 상승하였다. 특히 실험 종료 후에 아랫부분의 철망 일부가 고온으로 녹아 사라졌으며 전체적으로 슬래그가 집적된 것을 확인할 수 있었다. 슬래그는 회분이 용융되어 온도가 낮아짐에 따라서 고화된 무기물이다.

가스화장치 상부에 위치하는 연료투입부는 실리콘 튜브를 이용하여 밀봉하여 가스의 누설이 발생하지 않는 경우 온도가 상온보다 약간 높은 40℃ 내외였으나 가스가 누설되면 온도가 매우 높아지게 된다. 최대 송기량은 150 l/min 정도로서 송기압을 높여도 송기량은 증가하지 않았다. 송기압을 높였을 때 상부 연료 투입부에서 가스가 누설되었다.

점화 직후 송풍기를 가동함과 동시에 가스 유출부에 부탄가스 토치를 설치하여 합성가스를 강제 연소토록 하였는데, 초기에는 가스 연소가 이루어지지 않고 3~4분 이후부터 지속적인 연소가 이루어졌다. 일단 점화가 된 후에는 토치를 제거하여도 지속적인 가스의 연소를 확인할 수 있었다. 낮 시간에는 화염이 육안으로 확인하기 어려울 정도로 푸른 빛을 내었다. Fig 3은 어두운 조건에서 합성가스가 연소되는 모습을 보여주고 있다.

가스화 속도를 높여 가스 생산량을 높이는 데에는 한계가 있다. 송기량을 크게 높이면 가스화 반응에서 연소반응으로 변하여 CO<sub>2</sub> 농도가 지배적인



Fig. 3 Flame of producer gas from charcoal gasification

가스가 생성되기 때문이다. Tiangco et al.(1996)은 반응부 직경이 다른 하향식 가스로서 왕겨 가스화 실험 결과를 근거로 최적 반응속도와 송기량과의 관계를 식 (9)와 같이 제시한 바 있다.

$$v = 2.7878 \times \phi - 156.64 \quad (9)$$

$\phi$ 는 단위 면적당 단위 시간당 처리하는 바이오매스 연료량( $\text{kg/m}^2\text{-hr}$ )이고  $v$ 는 반응부를 통과하는 공기의 평균 유속( $\text{m/hr}$ )으로서 송기량을 반응부 단면적으로 나누어 계산된다.  $2\text{kg/hr}$ 의 속도로 가스화가 진행되는 실험조건에서 최적의 반응속도는 약  $72 \ell/\text{min}$ 으로 계산된다. 실제로 합성가스의 연소상태가 양호한 송기량은  $100 \ell/\text{min}$  이하의 조건이었으며 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 약간의 차이는 식 (9)가 왕겨를 대상으로 얻어진 것이고 본 연구의 실험에서는 숯을 대상으로 하였기 때문이다. 단위 중량당 열량이 약 2배 정도 되므로 송기량이  $100 \ell/\text{min}$  정도 되더라도 가스화 반응은 적정하게 일어났다. 송기량을 조절하면서 합성가스가 안정적으로 연소되는 송기량은 최대  $150 \ell/\text{min}$  최소  $50 \ell/\text{min}$  정도의 범위를 보였다. 소위 turn-down ratio로서 정상적으로 합성가스가 생산되는 조건에서의 가스화 속도의 범위는 3:1 정도라고 할 수 있다. 이 값은 하향식 가스화장치의 일반적인 turn-down ratio 범위 3~4:1과 일치한다(Beenackers and Swaay, 1986; FAO, 1986).

한편 송기량이 증가하는 경우 반응부 내의 유속 또한 증가하게 되는데 이 때 공기 또는 가스의 흐름이 집중되는 것을 고려해야 한다. 국부적으로 흐름이 집중되면 환원반응이 충분히 일어나지 않게 되므로 합성가스의 질이 저하된다. 따라서 적정 송기량으로 가스화장치를 운전하는 것은 대단히 중요하다. 특히 상향식 가스화장치와 관련된 예비 실험에서는 가스의 집중 현상이 현저하게 발생하여 가스화 반응이 거의 일어나지 않은 것을 관찰한 바 있다.

함수비가 충분히 낮고 적절한 입도를 가지는 숯을 가스화할 때, 연료의 흐름에는 큰 문제가 없었다. 그러나 함수비가 40% 이상되고 입자 크기가 다소 작

은 목편을 투입하였을 때 흐름이 원활하지 못하여 소위 bridging 현상이 발생하였다. Bridging이 발생하면 중간에 공간이 생겨 충분한 열이 전달되지 못하고 결국 가스화가 중단된다. 가스화 반응에 있어서 함수비는 특히 하향식 가스화에 있어서 중요한 연료 구비조건이다. 충분한 반응온도를 유지할 수 있을 뿐만 아니라 연료의 흐름에도 영향을 줄 수 있으므로 함수비를 가능한 한 낮추는 것이 바람직하다.

#### 나. 개선방안

가스화 장치 본체 외벽에서의 온도는  $300\sim 400^\circ\text{C}$ 로서 열손실량은 매우 높은 것으로 나타났다. 물론 반응부로부터 배출된 합성가스에 의한 열전달이 외벽 온도 상승의 한 원인이 될 수 있지만 반응부로부터의 복사열 등은 궁극적으로 반응부의 온도를 하강시키게 된다. 앞서서도 언급한 바와 같이 안정적인 가스화 반응은 충분한 온도가 유지되어야 하므로 이러한 열손실을 최소화하는 것이 바람직하다. 즉, 반응부를 내화물로 제작하고 일정 두께의 단열재로 열전달을 줄이는 것이 요구된다. 약  $1200^\circ\text{C}$  이상의 내화물과 단열재를 적용하여 개선하는 것이 필요하다고 판단된다. 고온 단열재는 일반적으로 고가이므로 반응부에만 적용하고, 상부 연료 저장부는 스텐레스 스틸 등으로 제작하는 것이 바람직하다.

공기 주입과 합성가스의 배출은 직경 25mm의 파이프를 통해서 이루어지도록 설계되었으므로, 마찰손실이 적지 않은 것으로 판단된다. 실험 중에 송풍 압력을 크게 높이더라도 송기량은 최대 송기량은 증가하지 않았다. 따라서 마찰손실을 줄이기 위해서는 관경을 크게하고, 공기 주입구와 합성가스 배출구의 수를 늘려 기체 흐름의 총 단면적을 늘리는 것이 필요하다고 판단된다. 가스화 장치의 용량을 늘리기 위해서는 반응부의 단면적 뿐만 아니라 송기량이 크게 증가하므로 관경에 의한 마찰손실을 충분히 고려하여 설계하여야 할 것이다.

반응부의 체적 및 길이는 안정적인 환원반응을 유도하기 위하여 산화과정에서 생성된  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 가 고온의 화염부(hearth zone)와 충분히 접촉할 수 있도록 결정되어야 한다. 특히 발열량이나 함수비 등

연료의 특성에 따라서 그 길이는 매우 중요하다. 만일 연료조건이 크게 달라지는 경우에는 공기 주입구의 위치를 상하로 조절하여 반응부의 길이를 조정하는 것도 하나의 방안이라 할 수 있다. 반응부의 길이에 대한 중요성은 Di Balsi(2000)에 의해 언급된 바 있다.

반응부의 바닥에는 연료를 받쳐주는 착탈식 철망(wire mesh)은 보완이 필요한 것으로 나타났다. 특히 가스화장치의 외벽을 단열해 주었을 때, 부분적으로 용해되어 교체가 필요하였다. 고온에 견딜 수 있는 재질의 받침대로 제작하는 것이 필요하다. 또한 회분이 용융되어 구동실험이 끝난 후 생각하면서 철망에 집적된 것을 관찰할 수 있었다. 고온에 견딜 수 있는 재질로 받침대를 만들고 장시간 운전을 하게 되면 용융된 회분의 축적이 문제가 될 수 있을 것이다. 특히 가스화 반응 속도가 낮아지거나 중단하여 온도가 낮아질 때에는 고화되어 합성가스의 흐름에 지장을 초래할 가능성이 있다.

합성가스의 주성분 가운데 하나인 CO는 유독성이 강한 가연성 기체로서 낮은 농도에서도 매우 치명적이다. CO는 헤모글로빈과 산소에 비해 약 300배 강하게 결합하기 때문이다. 따라서 가스화장치의 운전 에 있어서는 CO 중독에 각별히 주의하여야 한다. 그 외에 합성가스와 관련된 안전문제는 발암물질로 알려진 PAH(다환방향족탄화수소)가 포함될 수 있다. 이러한 안전문제를 고려한다면 산화제인 공기를 압축식으로 공급하기 보다는 합성가스 배출부에서 진공 흡수식으로 운전하여 가스의 누설을 최소화하는 것도 하나의 방안이라 볼 수 있다.

## V. 요약 및 결론

가스화 원리를 기존의 연구결과를 기초로 하여 바이오매스 가스화 장치를 제작하여, 숯을 이용하여 합성가스 생산을 위한 구동실험을 수행하였다. 가스화 장치의 구동으로 얻어진 합성가스의 조성은 기존의 연구결과와 대등한 수준으로 나타났다. 가스화 효율 및 장치의 안정성을 높이기 위해서는 부분적인 개선이 필요함을 확인할 수 있었다. 연구결과를 요약하면

다음과 같다.

1. 반응부 직경 100mm의 하향식 가스화 장치를 설계하고 제작하여 숯을 이용하여 송기량 100 l/min 내외의 조건에서 CO 25~35%의 농도를 갖는 합성가스를 생산할 수 있었다. CO 기준으로 볼 때 합성가스의 조성은 기존 연구결과와 대등한 수준이었으며 합성가스의 조성에 따른 발열량을 고려할 때 기존 연구결과와 대등한 수준인 것으로 판단된다.
2. 안정적이고 지속적인 가스화 반응을 기대하기 위해서는 연료의 흐름 특성이 매우 중요한 것으로 나타났다. 함수비가 높거나 입도 등이 불량하여 연료 흐름이 중단되는 경우 가스화가 중단되거나 환원반응이 일어나지 않아 가스의 연소상태가 불량하였다.
3. 가스화장치 제작에 있어서 개선되어야 할 요소에는 1) 반응부의 적정온도를 유지하고 열손실을 최소화할 수 있는 단열, 2) 공기 및 합성가스 흐름 저항의 최소화, 3) 환원부를 통과하면서 반응이 충분히 일어날 수 있도록 반응부 길이 또는 공기 주입구의 위치 조정, 4) 고온에 견딜 수 있는 재질의 바닥부 철망 받침대의 적용, 5) 안전을 위한 가스누설 최소화 등이 있다.

## References

1. Beenackers, A. A. C. M. & W. Van Swaay, 1986, Introduction to the Biomass to Synthesis Gas Pilot Plant Programm of the C.E.C. and a First Evaluation of its Results. In Advanced Gasification : Methanol Production from Wood - Results of the EEC Pilot Programme. Series E ed. Vol.8 (Eds: Beenackers, A. A. C. M. & W. Van Swaay) D. Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holland, pp.2-27.
2. Di Balsi, C., 2000, Dynamic behavior of stratified downdraft gasifiers, Chemical Engineering Science. 55, pp.2931-2944.
3. FAO, 1986, Wood Gas as Engine Fuel, FAO.

4. Kim, J. H., K. H. Kang, & H. G. Lim, 2003, Process development of manufacturing synthetic gas and recycling raw material from combustible wastes by gasification. KIER, Korea.
5. Quaak, P., H. Knoef, & H. Stassen, 1999, Energy from Biomass : A Review of Combustion and Gasification Technologies. World Bank Technical Paper No. 422. The World Bank, Washington, D. C.
6. Tiangco, V. M., B. M. Jenkins, & J. R. Goss, 1996, Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers. Biomass and Bioenergy 11(1), pp.51-62.
7. Wereko-Brobby, C. Y. & E. B. Hagen, 1998, Biomass Conversion and Technology, John Wiley and Sons.