# 하향식 가스화 장치를 이용한 바이오매스로부터의 합성가스 생산

Fuel Gas Production from a Down-draft Gasifier using Bionass

심재훈*·홍성구(한경대)
Shim, Jae Hoon*·Hong, Seong Gu

**Abstract**

Syngas or fuel gas production through biomass gasification is a century old technology. Biomass gasification is getting more and more interest recently as one of competitive renewable energy technologies. It does not contribute to increasing greenhouse gases(GHG). A down-draft gasifier was designed and tested for syngas quality using different fuel sets in this study. The gasifier was of about 100kW capacity. Tests were conducted at air flow rates ranging from 10 to 60m$^3$/hr. Fuels tested included wood chips and wood char. The results showd that gas quality in terms of flammability was reasonably good when the temperatures were over 600℃ inside the gasifier. Although 800℃ or higher is recommended, gas quality was reasonably good. If insulation was provided outside the gasifier, the temperature would increase. When wood chips were used, the temperature was below 600℃ and gas quality was not good. It seemed that calorific values of fuel and height of reduction zone in the gasifier are very important. The results of the tests would provide important information for designing more improved gasifier and its operation.

## Ⅰ. 서 론

최근 우리나라는 기후변화협약(교토의정서)에 의거 2차 공약기간 중(2013～2017) 온실가스감축 의무부담이 가시화될 전망이고 '03년 말 현재 온실가스 배출량 세계 10위로 감축의무 부담 시 산업・경제활동에 치명적으로 작용할 것으로 전망된다. 또한 국제유가가 배럴당 100 달러에 육박하는 고유가 행진 속에 에너지원 대부분을 해외에 의존하고 있는 우리로서는 에너지 안보에도 적색불이 켜졌다. 이런 점에서 대체에너지 개발은 시급하다.

대체에너지는 온실가스발생이 거의 없어 청정개발체제(CDM), 배출권거래제 등의 온실가스 감축규제에 효과적으로 대응 할 수 있으며, 에너지의 해외 의존도를 낮추고 에너지 수급불안전에 대비하여 에너지 안보를 확보 할 수 있고, 환경오염물질의 배출이 없어 환경개선효과 기대가 크다.

대체에너지는 화석연료보다 2～3배 발전 단가가 높으나 간접효과는 지대하다.(에너지관리공단, 2005) OECD 국가들도 대체에너지의 비중이 '99년 3.9%(193백만TOE)에서 2010년 4.9%(271백만TOE)로 증가 전망이고 기후변화협약, 화석에너지 고갈에 대비하여 대체에너지 개발 보급목표를 정해 중점투자하고 있으며, 대체에너지 공급비중은 우리나라보다 높은 수준에 있다.(IEA, 2003)

[Table 1] 대체에너지 공급 비중, 수력 포함(2001년)

| 구분 | *한국 | 덴마크 | 미국 | 독일 | 일본 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2001 | 2.1 | 11.1 | 4.5 | 3.1 | 3.1 |
| 2010 목표 | 4.3 | 13.5 | 5.4 | 3.5 | 6.1 |

* 2003 IEA 자료(Renewable Information), 한국은 2003년 기준

우리나라는 대체에너지자원의 개발로 안정적인 에너지원 확보 및 환경 친화적인 선진형 에너지 구조의 전환이라는 목표를 세우고 2006년 1차 에너지소량의 3.0% (7,001천TOE 공급) 2011년까지 1차 에너지소비량의 5.0%(13,335천TOE 공급)로 2011년까지 OECD 평균치인 5%달성으로 대체에

2005년 한국농공학회 학술발표회 논문집(2005년 10월 28일)

너지 선진국진입에 노력하고 있다.(에너지개발보급센터, 2005) 대체에너지에는 태양에너지, 풍력에너지, 바이오에너지, 수소에너지, 해양에너지로 나눌 수 있다.

바이오매스자원에는 농업부산물과 축산분뇨, 하수슬러지 등이 있다. 대체에너지 또는 재생에너지 자원가운데 개발 가능 잠재량 대비 가채 잠재량이 가장 높은 것은 일반폐기물, 바이오매스, 그리고 소수력순으로 평가되고 있다.(Hong, 2002)

바이오매스로부터 합성가스를 생산해 내는 방법에는 여러 가지가 있다. 이중 가스화공정은 고형의 바이오매스를 제한적으로 연소시켜 합성가스를 생산하며 합성가스의 흐름방향에 따라 상향식, 하향식, 수평식으로 구분할 수 있다.

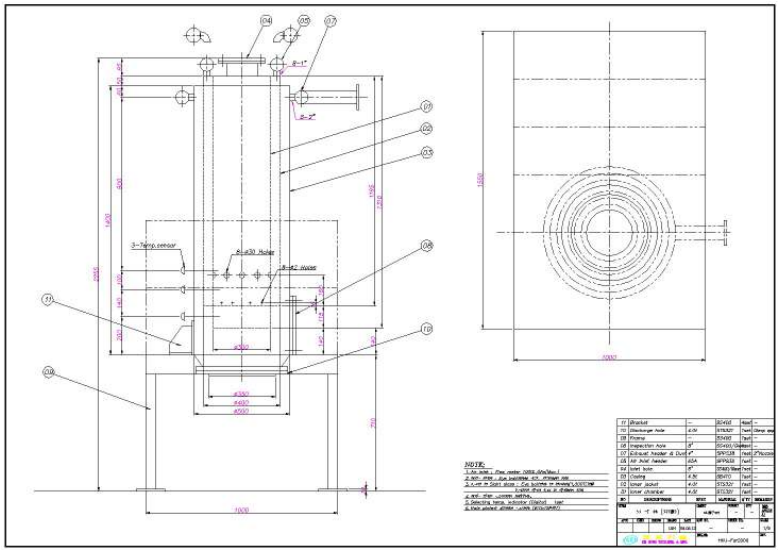
합성가스의 조성, 바이오매스가스화, 발열량, 소비량, 엔진구동가능성 등의 측면에서 볼때 하향식가스화장치가 유리하다. 본 연구에서는 하향식가스화장치를 이용하여 연료조건에 따라 생산된 합성 연료가스의 조성과 연소성에 대해 평가하였다.

## Ⅱ. 재료 및 방법

### 1. 바이오매스

농업부산물 바이오매스의 한 종류인 배 전지목과 산에서 벌목한 것을 파쇄한 목편을 사용하였다. 배 전지목의 경우 숯으로 변환하는 전처리과정을 거쳤다. 숯은 입도를 2~3cm보다 이하와 이상으로 나누었으며 목편의 경우 5~7mm와 3cm 두 종류를 사용하였다. 목편의 원료목은 참나무, 아카시아, 밤나무 등이다.

### 2. 가스화장치



[Figure 1] Drawing of down-draft gasifier

약 180여 년전부터 활용하기 시작한 가스화 장치는 가스화공정에 의한 가연성 기체를 생산하는 기술이다. 고형의 바이오매스를 산소가 충분하지 않은 조건에서 연소시켜 생산한다. 가스화장치는 연료가스의 흐름방향에 따라서 상향식, 하향식, 수평식으로 분류한다. 하향식 가스로는 반응과정에서 생성되는 타르를 연료가스로 전환시킬 수 있고 연소부 위에 증류부, 건조부가 위치하고 환원부는 아래에 위치한다. 목재나 기타 바이오매스의 가스화에 유리하며 연료가스를 엔진에 활용할 경우 적합하다. 반면에 연료의 입자가 상향식에 비해 균등하고 작아야 한다. 수평식에 비해서 낮은

온도에서 가동되며 숯이나 석탄을 가스화할 때 보다 많은 수소가 얻어지는 장점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 하향식가스화 장치를 선택하였고 내경은 300mm로 하고 충분한 공기주입을 위하여 연소부 바로위에 8개의 공기 주입구를 설치하였고 각 층의 온도의 변화를 측정하기 위해서 연소부(mesh에서 200mm)와 연소부 위(mesh에서 300mm), 아래(mesh에서 60mm)로 온도계(Selecting temp. indicator(digital) set)를 설치하였다. 공기 주입은 1.5kw 고압 송풍기(DTB-403, 3ψ, 60Hz, 230/380V, 2P)를 사용하였다.

### 3. 가스조성분석

[Figure 2] GV-100S

가스조성분석은 합성가스가 생산되는 진행과정 전반에 걸쳐 특성을 파악하기 위하여 하향식 가스화 장치가동 시작 시점부터 끝나는 시점까지 일정한 시간간격으로 가스화 장치의 유량과 내부온도에 따라서 달리하여 측정하였다.

성분분석기기로는 검지관식 기체측정기인 가스텍 GV-100S형 진공식 기체채취기를 사용하였고 검지관은 수소(30, 0～2%), 이산화탄소(2H, 0～20%), 일산화탄소(1HH, 1～40%)를 사용하였다.

측정은 하향식 가스화 장치 가동 시에 합성가스가 유출되는 부분에서 샘플을 채취하여 측정하고, 직접 유출부에서 측정하기도 하였다.

### 4. 연료조건

합성가스를 생산하고 특성을 파악하기 위하여 하향식 가스화장치를 이용하였으며 실험은 배 전지목을 이용하여 만들어진 숯을 2～3cm이상과 이하로 나누어서 각각 가동하였고 섞어서도 가동하였다. 또 3cm의 목편을 이용하여 가동하였고, 최종적으로 숯과 목편을 1:1의 비율로 섞어서 가동하였다. 점화는 일반 가스토치를 이용하여 직접 점화하였고 생산되는 합성가스는 유출부에 연통을 연결하여 생산되는 즉시 연소하였다. 합성가스 조성분석 시에는 잠시 연소를 중단하였다. 유출되는 합성가스가 연소되지 않는 경우에는 가스토치를 이용하여 강제로 연소시켰다.

## Ⅲ. 결과 및 고찰

### 1. 숯(입도 2～3cm 이하) 연료조건

- 원　료 : 숯(입도 2～3cm 이하) 13.925kg
- 함수비 : 6.98%

[Table 2] Temperature and flammability changes(charcoal size < 2～3cm)

| Time (min) | Air Flow rate (L/min) | Temp.(℃) | | | Flammability | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 0 | 500 | 41 | 42 | 120 | O | 불꽃 옅은 적색 |
| 10 | 1000 | 112 | 282 | 396 | OO | 불꽃 적색 |
| 15 | 1000 | 372 | 565 | 462 | OO | 불꽃 진한 적색 |
| 30 | 1000 | 603 | 686 | 606 | OOO | 불꽃이 푸른색, 조금씩 연기 발생 |
| 37 | 834 | 589 | 656 | 599 | O | 불은 붙어있으나 연기 급속히 증가 |
| 39 | 250이하 | 569 | 625 | 585 | X | 불이 꺼짐, 구동 종료 |

가동초기부터 유출부에서 연소가 시작되었고 유량조건이 1000LPM이고 30분 정도 지났을 때 최고온도 686℃를 나타냈으며 불꽃이 푸른/적색을 띄는 것이 연소상태가 좋다는 것을 알 수 있다.

[Table 3] $CO$ and $CO_2$ Concentration (charcoal < 2~3cm)

| Time(min) | $CO$(%) | $CO_2$(%) |
|---|---|---|
| 10 | 10 | 3.8 |
| 15 | 24.5 | 1.6 |
| 30 | 30 | 1.1 |

문헌(bionass conversion & technology, pp.73)에는 숯으로부터 합성가스를 생산하면 $CO_2$는 약 3%, CO는 약 28.7%의 조성을 갖는다고 명시되어있다. 가스화장치가 안정화된 시점에 CO 30%, $CO_2$ 1.1%로 측정된 것으로 보아 숯을 이용할 경우 양질의 합성가스를 얻을 수 있을 것이다.

또한 3%까지밖에 측정되지 않는 수소($H_2$) 검지관으로 측정하여 표에는 표기하지 않았지만 검출한계를 월등히 넘는 것으로 나타나 수소의 함량 또한 10%전후로 나타나는 것으로 생각된다. 이 또한 문헌에 의하면 3.8%의 수소조성을 나타내고있어 열량이 높은 연료가스를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

**2. 숯(입도 2~3cm 이상) 연료조건**

- 원 료 : 숯(입도 2~3cm 이상) 10.64kg
- 함수비 : 7.52%

[Table 4] Temperature and flammability changes(charcoal size > 2~3cm)

| Time (min) | Air Flow rate (L/min) | Temp.(℃) 1 | 2 | 3 | Flammability | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 500 | 365 | 410 | 389 | O | 불꽃 옅은 적색 |
| 4 | 500 | 451 | 402 | 386 | O | 불꽃 적색 |
| 10 | 1000 | 617 | 562 | 449 | OO | 유량변동이 심하고 연기 조금 섞임 |
| 15 | 1000 | 680 | 640 | 500 | OO | 불꽃 진한 적색 |
| 20 | 1000 | 693 | 681 | 533 | OO | 연기 증가 |
| 26 | 250 | 726 | 706 | 548 | O | 연기 감소 |
| 27 | 500 | 713 *(320) | 700 *(332) | 543 *(300) | O | 연기 증가, 유량변동 안정화 *가스로 상단 : 150℃, 하단 : 225℃ |
| 33 | 1000 | 696 | 664 | 521 | O | 불꽃 옅은 적색 |
| 37 | 500 | 736 | 703 | 531 | O | 연기 심하게 발생, 불이 약함 |
| 51 | 250 | 623 | 639 | 505 | X | 연기 심하게 발생, 강제점화 후 종료 |

* Outside temperature(℃)

작은 입도의 숯과 마찬가지로 가동초기부터 유출부에서 연소가 시작되었고 유량조건을 1000LPM에서 250LPM으로 낮춘 시점인 26분 정도에서 최고온도 726℃를 나타냈으며 그 후 유량을 500LPM으로 높인 시점부터 유량변동이 안정화되면서 연소상태가 좋아졌다.

[Table 5] $CO$ and $CO_2$ Concentration (charcoal > 2~3cm)

| Time(min) | $CO$(%) | $CO_2$(%) |
|---|---|---|
| 4 | 19 | 5.2 |
| 15 | 22.5 | 2.4 |
| 30 | 27.5 | 2.5 |

입도가 작은 숯보다 최고온도는 높았지만 연소상태는 좋지 않은 것은 함수비가 조금 높고 가스로가 다 식지 않은 상태에서 가동을 하여서 인 것 같다.

작은 입도의 숯 보다 문헌과는 비슷하지만 상대적으로 CO가 낮게 측정되었고, $CO_2$는 높게 측정되었다. 이것으로 보아 숯은 연소부가 깊어 환원 반응이 충분히 일어나는 것으로 판단된다.

**3. 목편 연료조건**

- 원 료 : 목편(입도 3cm) 17.2kg

- 함수비 : 14.75%

[Table 6] Temperature and flammability changes(Woodchip)

| Time (min) | Air Flow rate (L/min) | Temp.(℃) 1 | 2 | 3 | Flammability | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 500 | 84 | 81 | 72 | X | 점화부에서 불이 붙어 불기둥 형성 |
| 3 | 1000 | 91 | 88 | 114 | X | |
| 8 | 1000 | 120 | 133 | 404 | X | 연기 검은색, 그을음 발생 |
| 10 | 417 | 138 | 162 | 518 | O | 불이 미약함 |
| 12 | 667 | 160 | 203 | 540 | O | 연기 심하게 발생, 강제점화, 안정화 |
| 16 | 667 | 191 | 327 | 526 | O | |
| 22 | 417 | 335 | 491 | 498 | O | 연기 심하게 발생, 연기와 함께 연소 |
| 25 | 584 | 406 | 515 | 477 | O | |
| 30 | 584 | 423 | 522 | 471 | O | |
| 33 | 584 | 486 | 537 | 479 | O | 연기 발생 중단, 불꽃이 생김 |
| 35 | 584 | 495 | 563 | 544 | X | 연기 하얀색, 구동 종료 |

목편의 경우 숯과는 달리 가동 초기에는 유출부에서 연소가 전혀 이루어지지 않고 연기와 그으름만 발생하는 것을 볼 수 있었다. 최고온도도 537℃로 숯에 비해서 약 200℃가량 떨어지는 것을 볼 수 있었다.

[Table 7] $CO$ and $CO_2$ Concentration (woodchip)

| Time(min) | $CO$(%) | $CO_2$(%) |
|---|---|---|
| 10 | 8.4 | 7.8 |
| 15 | 14.5 | 8.2 |
| 30 | 21.0 | 9.6 |

온도 측정위치로 보아 숯에 비해 연소부가 짧아 환원반응이 충분히 일어나지 못하는 것을 알 수 있었다. 목편을 원료로 구동하여 얻어진 합성가스의 경우는 숯을 원료로 구동하여 얻어진 합성가스에 비해 상대적으로 CO가 적고 $CO_2$는 많은 것을 알 수 있었다.

**4. 목편과 숯 연료조건**

- 원 료 : 목편(입도 5~7mm) + 숯 [부피비율로 1:1] 25.35kg
- 함수비 : 32.16%

[Table 8] Temperature and flammability changes(Charcoal+Woodchip)

| Time (min) | Flow (L/min) | Temp.(℃) 1 | 2 | 3 | Ignition | Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1000 | 48 | 45 | 39 | X | |
| 3 | 1500 | 48 | 45 | 46 | X | 연기발생 |
| 6 | 1000 | 58 | 55 | 118 | X | " |
| 8 | 1500 | 76 | 78 | 212 | X | " |
| 11 | 500 | 133 | 158 | 500 | X | " |
| 12 | 1000 | 158 | 195 | 567 | X | " |
| 17 | 1000 | 242 | 313 | 664 | X | " |
| 20 | 834 | 281 | 402 | 647 | O | 연기발생, 불꽃 적색 |
| 24 | 834 | 357 | 504 | 554 | O | 연기발생, 불꽃 짙은 적색 |
| 30 | 834 | 451 | 540 | 495 | OOO | 연기 미량 발생, 화력 좋아짐 |
| 35 | 834 | 541 | 600 | 458 | OOO | 연기 극히 미량 발생, 화력 좋아짐 |
| 43 | 834 | 560 | 605 | 460 | OO | 연기 미량 발생, 화력 좋음 |
| 48 | 250 | 553 | 576 | 475 | X | 연기 발생, 강제점화 실시, 구동 종료 |

구동초기에는 $CO_2$의 함량이 아주 많음을 알 수 있고 최고온도는 목편과 비슷한 수준이지만 연소상태가 아주 좋음을 보여준다. 이는 유량조건이 충분하기 때문이라고 판단된다.

[Table 9] $CO$ and $CO_2$ Concentration (woodchip + charcoal)

| Time(min) | $CO$(%) | $CO_2$(%) |
|---|---|---|
| 20 | 12.0 | 16.0 |
| 30 | 30.0 | 7.5 |
| 43 | 28.0 | 6.8 |

CO는 숯과 비스한 수준이지만 CO2의 함량이 많은 것을 확인할 수 있다. 하지만 함수비가 높고 목편을 사용하였기 때문에 수소의 함량은 조금 더 높을 것으로 생각된다.

구동조건을 같게 하기 위해서 모두 같은 양에 부피를 투입하였다. 목편(입도 3cm)의 경우 숯과는 달리 흰색/청색의 기체가 발생하고 함수비/단위중량당 열량이 수분에 의해 낮아 환원 반응이 충분히 일어나지 않는 것 같았다. 그리고 타르가 다량 함유되어있음을 알 수 있었다.

[Figure 3] small charcoal

[Figure 4] wood chip

[Figure 5] wood chip+charcoal

생산되는 합성가스의 연소에서도 목편보다는 숯이, 숯 보다는 목편과 숯을 섞었을 때 화력이 좋아짐을 알 수 있었다. 숯과는 달리 목편의 경우는 미량이라 하더라도 계속해서 연기가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 이것으로 보아 목편보다는 숯이 양질의 합성가스를 생산할 수 있었으며 목편과 숯을 섞어서 구동한 결과가 가장 양질의 합성가스를 생산할 수 있음을 알 수 있다.

## Ⅳ. 결 론

본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 600℃~700℃이상에서 생산되는 합성가스가 연소상태가 좋고 $CO_2$의 함량이 적고 상대적으로 CO의 함량이 낮을수록 연소상태가 좋다는 것을 알 수 있다.
2. 하향식 가스화 장치의 구동하여 양질의 합성가스를 생산하기 위해서는 바이오매스 자원을 그냥 활용하는 것보다는 숯 등 탄소를 많이 함유한 원료로 전처리 후 활용하는 것이 바람직할 것이다.
3. 하향식 가스화 장치의 구동 과정에서 목편과 같이 연소부의 층이 짧은 것보다는 숯과 같이 연소부층이 깊은 것이 양질의 합성가스를 생산하는데 유리하다.
4. 목편보다는 숯이 더욱 고온에서 연소되어 양질의 합성가스를 생산하는 것을 알 수 있듯이 가스화 과정에서 생기는 열 손실을 줄인다면 연료가스로써의 효율 또한 높아질 것이다.

## 참고문헌


1. 김상돈, 이종민, 2002, 가스화기술 현황 및 전망, 한국과학기술원 생명공학과
2. 대체에너지개발보급센터, 2005, 대체에너지원별 기술자료, 에너지관리공단
3. 김재호 외, 2003, 폐기물 가스화의 열역학적 냉가스 효율 분석, 한국폐기물학회지 제 20 권 제 2 호
4. Charles Y. Wereko-Brobby, 1996, biomass conversion & technology, john wiley & sons