

GOVP1200609924

최 중  
연구보고서

농촌지역 바이오매스자원의  
최적이용기술개발

Production and Effective Use of Fuel Gas from  
Agricultural Biomass

연구기관  
한 경 대 학 교

농 립 부

## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농촌지역 바이오매스자원의 최적이용기술개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005년 10월 15일

주관연구기관명 : 환경대학교  
총괄연구책임자 : 홍 성 구  
세부연구책임자 : 홍 성 구  
연 구 원 : 황 한 철  
연 구 원 : 심 재 훈  
연 구 원 : 김 상 호  
연 구 원 : 박 응 희  
연 구 원 : 조 현 신  
연 구 원 : 김 윤 정  
협동연구기관명 : 서울대학교  
협동연구책임자 : 권 순 국  
연 구 원 : 홍 지 향

# 요 약 문

## I. 제 목

### 농촌지역 바이오매스자원의 최적이용기술개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

농촌지역 바이오매스자원의 최적이용기술개발의 연구목적은 크게 기술적 측면, 경제·산업적 측면, 사회·문화적 측면의 3가지로 나눌 수 있다. 각 연구개발의 목적 및 필요성은 다음과 같다.

### 1. 기술적 측면

우리나라 농촌지역에서 발생하는 농산 바이오매스 자원의 적정한 활용방법은 부존 특성 및 전환 공정의 실용화 가능성을 평가하고, 실용화 가능성, 경제성, 바이오매스의 지속적 공급 등을 고려하여 결정하여야 한다. 대부분의 바이오매스 에너지활용기술은 단일 공법의 개발 및 효율성 평가에 국한되었다. 농촌지역의 바이오매스 자원의 부존특성을 시공간적 분석을 기초로 한 활용방안은 제시되지 않았다. 예를 들어 지금까지 상대적으로 연구와 개발이 상당히 진행된 메탄가스 이용은 혐기 반응조, 탈황시설 등 보조 시설이 요구되어 초기 투자비가 높아 사업의 추진이 불리한 편이다.

열화학적 처리는 바이오매스를 이용에 편리한 고가의 연료로 전환할 수 있다. 과거부터 부분적으로 적용되어 왔던 대표적인 열화학적 처리는 열분해, 목탄생산, 그리고 연료가스화 또는 기화(gasification)등이 있다. 건조된 바이오매스 1 kg은 3~3.6 kWh 정도의 열이나 1.4 kWh의 열과 함께 0.7~0.9kWh의 전기를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이미 상용화된 기화기기는 크기나 유형에 따라서 다양하다. 현재 인도, 태국, 인도네시아 등에서는 소규모 기화기기를 취사용 등으로 활용하고 있

다. 우리나라 농촌지역에서의 바이오매스를 대체에너지원으로 활용하기 위해서는 기존의 열화학적 처리공법을 검토하고 국내 바이오매스 자원의 특성에 적합한 공법을 선택하여 활용하는 것이 요구된다.

## 2. 경제·산업적 측면

농업부문에서의 에너지 소비가 지속적으로 증가하고 있는 상황에서 에너지 자원의 신규개발이나 저렴한 에너지의 확보는 필연적이다. 대체에너지 자원의 개발 및 활용 측면에서 농촌지역에 산재해 있는 바이오매스 자원의 에너지로서 활용은 농가의 농업생산비의 직접적 절감, 환경오염물질로서 유기성폐기물의 재활용, 그리고 난방유와 같은 화석연료 이용 절감에 의한 온실가스 감축의 효과를 얻을 수 있다. 물론 재생에너지 이용의 경우 일반적으로 기존의 화석연료를 이용하는 시설에 비해서 초기 시설투자비가 상대적으로 높아 투자에 불리한 점이 있으나 농촌지역에 산재해 있으나 이용이 되지 않고 있는 자원을 최대한 이용할 수 있고 장기적으로 경제성이 있다. 또한 본 연구를 통해서 재생에너지 자원 특히 바이오매스 자원의 이용과 관련된 산업이 창출되고 활성화될 수 있기 때문에 장기적으로 온실가스 감축 및 재생에너지 개발 및 활용과 관련된 산업의 육성을 기대할 수 있다.

## 3. 사회·문화적 측면

국제적으로 온실가스 감축과 관련된 논의가 활발하게 논의되고 있는 반면에 국내에서는 이에 대한 구체적이고 실질적인 논의 또는 계획이 세워져 있지 않은 상황이다. 본 연구에서 지향하고자 하는 바이오매스 자원의 활용은 장기적으로 지구환경보전에 대한 인식뿐만 아니라 에너지 자원의 절약 및 재생에너지의 개발에 대한 사회적인 인식을 새롭게 할 수 있다고 판단된다. 온실가스의 감축은 현재 국내의 산업구조를 고려할 때 막대한 비용이 소요되기 때문에 이에 대한 사회적인 인식이 필요하고 예산이 요구된다. 이를 위해서는 사회적인 동의가 요구되는바 다양한 재생에너지의 개발 및 활용의 기반 조건을 조성되어야 한다는 사회적인 필요성을 부각시키고 농업이 가지는 지구환경보전 차원에서의 의의와 역할을 새롭게 인식시킬 수 있는 계기가 될 수 있다고 판단된다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에서는 농촌지역에 산재해 있는 다양한 바이오매스 가운데 열량과 부존특성이 고려하여 유리한 자원을 선정하고, 열화학적인 방법을 통해 유용한 연료로 전환하여, 농업시설에서 활용할 수 있는 최적의 시스템을 구축하는 것을 목표로 한다. 연료전환 공정은 바이오매스의 수집, 전처리 과정, 그리고 전환 공정을 가리키며, 활용 시스템의 구축은 가스 터빈 등을 이용한 전력생산, 온수 공급 등의 최적 활용체계의 수립을 의미한다. 구체적인 연구의 세부 내용 및 범위는 다음과 같다.

#### 1. 농촌지역 바이오매스 자원의 종류 및 부존 특성 조사

농촌지역에서 가용한 바이오매스 자원을 파악하기 위해 바이오매스의 종류와 발생량에 대한 기본적인 조사를 수행한다. 조사결과는 가스화를 통해 연료가스를 얻는데 유리한 바이오매스의 종류를 파악하고, 이를 수집하기 위한 기초자료로서 활용된다. 이를 위해서 다음과 같은 조사 및 분석을 수행한다.

- 토지이용현황을 이용한 부존량 조사
- 발열량 및 부존량을 고려한 적정 바이오매스 선정
- 선정된 바이오매스자원의 부존특성 조사

#### 2. 바이오매스 수집계획 기법 및 전처리공정 확립

농촌지역 내 바이오매스 자원의 특성상 시공간적으로 분산되어 있기 때문에 이를 적정한 방법으로 수집하는 기술이 요구된다. 가스화장치를 이용한 에너지활용 과정에서 소요되는 비용에 큰 영향을 미칠 수 있는 과정이므로 이에 대한 최적의 수집계획이 마련되어야 한다. 또한 바이오매스 자원의 특성상 함수비, 단위체적당 중량, 성상 등이 다양하므로 종류별로 전처리 공정이 확립되어야 한다. 선정된 연구대상 지역에 대해 다음과 같은 과정을 통해 수집계획 기법 및 전처리공정을 확립한다.

- 수집계획 기법의 확립

- o 건조·파쇄 등 요구되는 전처리공정 검토
- o 가스화 적정공정과 효율적 설계를 위한 적정 전처리공정의 요구조건 정립

### 3. 가스화 장치의 개발 및 성능 평가

본 연구에서 개발하고자 하는 가스화장치(Gasifier)는 효율성을 높여 바이오매스의 에너지 이용을 극대화하고자 한다. 지금까지 개발, 상용화된 가스화장치는 과거 석탄 또는 목재의 가스화공정을 도입한 것으로서 바이오매스에 적용하기 곤란하다. 따라서 바이오매스 가스화의 효율을 제고할 수 있는 가스화장치가 개발되어야 한다. 이를 위해 다음과 같은 방법으로 개발 및 성능평가를 하고자 한다.

- o Gasifier의 개발 및 제작
- o Gasifier의 성능 평가 및 열량분석
- o 폐열의 효율적 이용방안 (전처리공정에의 활용 및 온수 공급 등)

### 4. 연료가스의 활용체계 수립

- o 연료가스의 정제기술 확립
- o 연료가스 활용체계 및 적정운영방안 정립

## IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

### 1. 연구개발 결과

#### 가. 바이오매스의 발생 및 이용현황

농촌지역 바이오매스의 발생량을 조사하기 위하여 단위면적 당 식재 수 와 부산물 양을 현장에서 직접 측정하여 얻은 단위면적 당 발생량 결과에 의하면 배, 포도, 사과, 복숭아, 고추, 깨가 각각  $0.128\sim 2.738\text{ kg/m}^2$ ,  $0.267\sim 5.104\text{ kg/m}^2$ ,  $0.051\sim 3.747\text{ kg/m}^2$ ,  $0.085\sim 0.957\text{ kg/m}^2$ ,  $0.186\sim 0.480\text{ kg/m}^2$ ,  $0.088\sim 1.040\text{ kg/m}^2$ 로 조사되었다. 조사당시 단지로 구성되어있던 포도가 가장 높은 단위면적당 발생량을 나타내는 것

으로 조사되었다.

벼짚의 경우 우리나라에서 생산되는 농업수산물 바이오매스 중 가장 많은 양을 차지하는 것으로서 대부분 축산농가에서 깔짚이나 사료로 활용되고 있었고, 왕겨의 경우 대부분 축사의 바닥 재료로서 활용되고 있었으며 일부는 사료 또는 공산품제조 공장에서 원료로 활용되고 있었다. 과수 부산물의 경우 포도의 일부 품종을 제외하고 전정이 대부분 2월 전후에 이루어져서 바이오매스발생이 시기적으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 전정된 가지는 많은 경우 썰감으로 이용하거나 농지 주변에 방치하고 있었으며, 일부 농가에서는 파쇄기를 이용하여 파쇄 후 농지에 살포하고 있었다. 대부분의 과수농가에서는 전정된 가지의 처분에 어려움을 호소하고 있었다. 따라서 에너지 생산을 위한 바이오매스로서 활용가능성이 높은 것으로 판단된다. 발작물은 고추, 깨, 옥수수, 콩 등이었으나 옥수수와 콩은 사료 등으로 활용하는 반면 고추와 깨는 많은 경우 농지에 그대로 방치하고 수확 후 대부분 소각처리하고 있었다.

고추의 부산물은 대부분 가지이며 농지에 방치하고 있는 상태로서, 깨는 묶어서 탈립한 후 한 곳에 모아둔 상태가 대부분이었다. 고추나 깨와 같이 열매만을 수확하고 가지의 활용성이 거의 없는 발작물은 현재 대부분 소각처분하고 있기 때문에 에너지생산용 농업부산물로서 가능성이 높다. 축분의 대부분은 퇴비 생산에 이용되고 있었다. 산지에서 생산되는 간·별목은 과수원의 부산물과 거의 유사한 특성을 가지므로 에너지원으로 활용할 수 있는 바이오매스로 판단된다. 그러나 간·별목의 수거 등의 문제가 있기에 본 연구에서는 활용대상 바이오매스에 포함하지 않았다. 산지의 목질계 바이오매스가 에너지원으로 적극적으로 활용되지 못한 이유는 양질의 목재의 경우 건축이나 각종 자재로 이용되고 있고, 운반이나 저장이 매우 어려운 점을 들 수 있다.

#### 나. 바이오매스 부존특성과 수집체계

과수부산물의 경우 전정 직후 함수비가 40~50%의 분포를 보였다. 반면에 고추나 유지작물은 가을철 수확 후 노지에 방치되기 때문에 동절기에 들어서 함수비는 20% 미만으로서 매우 낮게 나타났다. 특히 고추 가지와 같은 부산물은 모아서 소각하고 있기 때문에 농지에서 일정기간 자연 건조시킨 다음, 체계적인 수집, 수거체제를 갖추어 활용한다면 이용 가능성이 매우 높다. 과수원 및 발작물의 부산물 모두 농작업을 위해서는 농지로부터 제거되어야 하므로 농지 주변에 쌓아 두거나 모아서 소각되고 있는 상태이다.

열량계를 이용하여 측정된 건조된 바이오매스의 단위중량당 열량은 4,500 kcal/kg 내외의 범위로 나타났다. 문헌에 의한 저위발열량은 포플러가 4,620 kcal/kg, 기타 목재의 경우 대체로 4,500 kcal/kg의 범위에 있다(Honda, 1986). 단위면적당 발생량과 단위중량당 발열량을 이용하여 작목별 단위면적당 열에너지 량은 2,000~6,300 kcal/m<sup>2</sup>로 나타났으며 사과가 6,267.6 kcal/m<sup>2</sup>로 가장 높게 나타났다. 고추와 유지작물의 부산물이 목질계인 과수 가지에 비해 약간 낮은 열량을 가지고 있으나 비슷한 수준임을 알 수 있다. 원소분석결과 대부분 C가 45% 내외, N이 1% 이하, H가 6% 내외로 나타났다. 목재의 원소구성 비율이 C가 50% 내외, H가 6.5% 내외, N이 0.1%이하, O가 40% 수준이고 회분은 0.2~2.2%를 차지하는 것과 비교하면, 전정된 가지의 경우 N이 상대적으로 많고 H와 C가 다소 낮음을 알 수 있었다. 전정된 가지는 수피의 비율이 상대적으로 많아 회분과 N이 일반 목재에 비해 다소 높게 나타난 것으로 보인다.

단위면적당 에너지양은 사과 과수의 부산물 에너지 밀도가 가장 높은 6,268 kcal로 나타났고, 복숭아가 가장 낮은 2,098 kcal로 나타났다. 전지된 가지의 단위면적당 중량과 직접적인 관계를 갖는다. 발작물의 경우 약 1,500 kcal/m<sup>2</sup> 수준으로 나타났다. 안성, 경기지역을 포함하여 국내 총 재배면적을 기준으로 계산된 에너지양을 석유환산톤으로 계산한 결과, 각각 10,117 TOE, 242,068 TOE, 669,743 TOE로 나타났다.

과수의 발생은 대부분 휴면기인 동절기에 이루어지므로 과수농가의 전정된 가지는 이 시기에 집중된다. 현장조사에서는 전정시기가 10월말부터 3월까지 분포하는 것으로 나타났으며, 대부분 2월 전후에 집중되고 있었다. 여름철 전정은 필요한 경우 행하여지나 거의 없는 것으로 조사되었다. 포도의 경우도 12월 상순에서 2월 중하순까지 권장되어 이 시기에 집중적으로 이루어지고 있으나 현장조사 결과에서는 다소 이른 11월부터 전정이 이루어지는 경우가 다수 나타났다. 들깨는 개화 후 약 30일 정도 지난 후에 수확을 하는 것이 일반적이고, 대체로 개화는 9월 5일에서 20일경이므로 수확은 10월 하순에 이루어진다. 탈립 작업이 이 시기에 이루어진다고 보면 부산물의 활용은 11월경부터 가능하며, 어느 정도 건조될 수 있도록 시간적인 여유를 더하면 11월 하순부터 에너지원으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 고추는 재배양식에 따라서 수확기간이 다르나, 대체로 6월 이후부터 10월 상순까지로 조사되었다. 관행적으로 재배하는 고추의 재식밀도는 약 3,300주/10a 이나 밀식재배의 경우는 8,300주/10a 까지 높은 경우도 있다. 본 연구의 현장조사에서는 3,000~5,000주/10a 정도로 나타나 관행 재배 수준으로 나타났다.

과수 단지에서 전정 직후 수집과 운반관련 비용 조사를 한 결과 차량에 싣기 전까지 수집 및 수거에 소요되는 비용은 19.53~24.36 man-hr/10a로 나타났다. 차량 임대 또는 감가상각비를 제외한 하역 및 운반에 소요되는 비용은 운반 차량의 크기와 운반대상 바이오매스 량에 따라서 크게 달라질 수 있으나, 미양면 농지를 대상으로 집계 차(너클 크레인 장착 트럭)를 이용한 경우 하역비용은 1 man-hr 미만이었으나, 일반 트럭을 이용한 경우 10배가량 많은 9.28 man-hr가 소요되었다.

#### 다. 가스화를 위한 바이오매스 전처리

바이오매스 성상이 과수 전정 가지는 직경이 0.5~10cm 까지 다양하며, 과수의 재배 년 수에 따라서 그 차이가 크게 나타났다. 길이는 50cm에서 2m로 나타났고 깨나 고추와 같은 발작물 바이오매스는 60cm~120cm 정도로 품종에 따라서 다르나 비교적 일정한 수준이었다. 함수비는 과수의 경우 전정 직후 50% 내외로 매우 높으며, 발작물은 가을철 수확 후 야외에서 그대로 방치되어 15% 정도로 매우 낮기 때문에 별도의 건조과정을 필요 없을 것이다. 전정 가지의 경우 직경이나 길이를 볼 때 가스로서 그대로 이용할 수 없으므로 일정한 크기로 파쇄 하여 이용하여야 한다. 파쇄에 필요한 연료량을 파악하기 위하여 휘발유 1L에 대해 잔가지와 굵은 가지 파쇄량을 조사한 결과 17~18 kg으로 나타났다. 따라서 바이오매스 파쇄에 필요한 연료는 0.055~0.058L/kg, 또는 바이오매스 1 ton 당 55~58L 정도가 소요된다. 이 때 함수비는 약 15% 수준이다. 휘발유의 열량은 8,300 kcal/L이고, 바이오매스 열량이 함수비를 고려하여 4,000 kcal/kg 이라고 할 때, 68,000~72,000 kcal의 바이오매스를 얻는데, 파쇄에는 8,300 kcal의 에너지가 소요됨을 알 수 있다. 파쇄 되어진 바이오매스의 밀도는 최저 168~206 kg/m<sup>3</sup> 수준으로 나타났으며, 높이가 30cm 이상이 되면 밀도변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 석영유리관을 이용하여 간이 가스로를 제작 실험한 결과 가스로 아랫부분에서 점화하여 가스화를 시작하는 단계에서는 충분한 연료가스가 발생하고, 가스가 연소되는 것을 관찰할 수 있었으나, 10여분 경과 후에는 바이오매스가 윗부분에서 아래로 이동하지 않고 소위 bridging 현상이 나타나서 연소가 진행되지 않았다. 숯을 만드는 경우 원료 바이오매스 중량 대비 약 25% 내외의 숯이 만들어지고 나머지는 열로 방출되므로, 방출되는 열을 가스화 공정에서 활용하거나 기타 열 이용 방안을 정립하는 것이 필요하다. 목재류의 열량이 15MJ/kg 이고 숯은 25MJ/kg이므로, 회수율 약 25%를 감안하면 바이오매스 1kg 당 6.25 MJ의 숯을 얻게 되고, 따라서 8.75 MJ가 탄화과정에서 방출되는 열량이다. 탄

화 후 남은 숯을 가스화로 투입하여 가스화하는데 연료 흐름을 파악하기 위하여 입도 분석을 한 결과 25.4 mm 이상이 약 6.5%, 4.75mm 이하는 약 20% 정도를 차지하였다. 가스화 상단부에서 바이오매스 연료의 흐름 상태를 파악하기 위하여 합석 재질 역원추형 모형을 제작하고 숯의 공급 상태를 확인한 결과, 30mm 이상의 입자가 존재하는 상태에서는 흐름이 좋지 않아 막힘이 간헐적으로 발생하였으나, 30mm 이상의 입자를 제거한 후에는 연료 흐름에 문제가 없는 것으로 나타났다.

#### 라. 가스로의 제작 및 운전

가스화 장치의 기본 형태를 선택하기 위한 요인으로 가스화 장치의 제작비용과 생산된 연료가스의 정제비용, 운전 및 유지 보수비용, 가스화 장치의 견고성, 가스화 바이오매스의 전처리 과정(건조, 분쇄, 분리 등)의 필요성 등이 있다. 이와 같은 가스화 장치 선택 요인을 고려하면 유동상 가스화 장치는 다음과 같은 문제점으로 고정상 가스화 장치에 비하여 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 유동상 가스화 장치는 설계와 작동이 복잡하다. 가스화 장치에 공급되는 바이오매스는 작은 크기의 입자로 분쇄되어야 한다. 지나치게 작게 분쇄된 입자는 유동상 가스화 장치의 유동성을 저해한다. 유동상 가스화장치에서 생산된 연료가스는 높은 타르의 함량으로 추가 가스 정제시설을 필요로 한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 유동상 가스화 장치에 비하여 구조와 설계가 간단한 고정상 가스화 장치를 선택하였으며, 고정상 가스화 장치 중 타르의 함유량이 적고 수소와 일산화탄소가 다른 가스화 장치에 비해 많이 생성되고 목재류 원료를 가스화하기에 적합한 하향식(downdraft) 고정상 가스화장치를 바이오매스의 가스화 장치로 개발하기로 결정하였다. 가스로의 적정온도, 가스화와 연소로의 연결, 바이오매스의 가스화 내 체류시간, 연료가스의 생성, 가스화 내에서의 연료의 흐름, 가스화 용량에 따른 가스화 가동시간, 최적의 공기량 등을 조사하기 위하여 문헌을 기초로 하향식 가스화를 설계 제작하였다. 총 3기의 가스화를 제작하였으며 구동 후 단점들을 보완하여 제작하였다. 하향식 가스화 Version.1을 제작하여 구동해본 결과 연료의 흐름이 일정하지 않고 연소부에서의 연소가 차례대로 이루어지지 않는 문제가 있어 역원추형 흡퍼의 각도를 조정하고 다공판(mesh)부분을 원통형으로 수정하여 제작하였다. 하지만 하향식 가스화 Version.2에서 압력손실을 고려하지 않고 제작한 결과 연료의 흐름은 일정부분 수정되었으나 주입되는 송풍량이 압력손실에 의해 충분히 공급되지 못하는 현상이 발생되었다. 연소부의 역원추형 흡퍼를 없애고 원통형으로 제작하였으며 직경을 3배인 300mm로 하여 제작하였다. 또 열

손실을 줄이기 위하여 생성되는 연료가스의 배출구를 가스로 몸통부위를 지나 위쪽으로 유출되도록 제작하였다. Version.1 과 Version.2에서는 설계하지 못했던 가스로 내부온도 측정을 위해 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. 가스로를 구동해본 결과 600℃~700℃ 이상에서 생산되는 합성가스가 연소상태가 좋고 CO<sub>2</sub>의 함량이 적고 상대적으로 CO의 함량이 높을수록 연소상태가 좋다는 것을 알 수 있었고 하향식 가스화 장치의 구동하여 양질의 합성가스를 생산하기 위해서는 바이오매스 자원을 그냥 활용하는 것보다는 숯 등 탄소를 많이 함유한 원료로 전처리 후 활용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 하향식 가스화 장치의 구동 과정에서 목편과 같이 연소부의 층이 얇은 것보다는 숯과 같이 연소부 층이 깊은 것이 양질의 합성가스를 생산하는데 유리하다고 판단되며 목편보다는 숯이 더욱 고온에서 연소되어 양질의 합성가스를 생산하는 것을 알 수 있듯이 가스화 과정에서 생기는 열 손실을 줄인다면 연료가스로써의 효율 또한 높아질 것이다. 목편을 투입했을 때 온도가 충분히 상승하지 않아 환원이 제대로 이루어지지 않고 가연성 가스가 충분히 발생하지 않았고 가스화 장치 내부에 내화물 없이 제작한 관계로 열손실이 매우 커서 특히 목편의 경우 가스화 반응이 제대로 일어나지 않은 것으로 판단된다. 숯을 투입 연료로 할 때 단위중량당 열량이 높아 단시간 내에 급격한 온도 상승을 보였으며 CO 농도가 높고 연소상태가 양호한 것으로 나타났으며 투입 연료로서 목편 또는 목편/숯을 이용하는 경우 송풍량을 다소 낮추어 운전하는 경우 가스화는 정상적으로 이루어질 것으로 판단된다.

#### 마. 연료가스 이용방안

바이오매스를 이용한 에너지활용방안은 다음과 같이 다양한 방법으로 생각할 수 있다. 크게 고형상태로 이용하는 것과 가스화하여 이용하는 방안으로 나눌 수 있고, 단순히 열을 이용하는 것과 동력과 열을 동시에 이용하는 방식으로 세분화할 수 있다. 가스화 후 엔진구동을 통해 전력을 생산하는 방식은 터빈, 외연기관, 내연기관 등을 이용하는 시스템으로 세분화할 수 있다.

터빈발전기와 외연기관(스털링엔진)은 초기 투자비가 높아서 불리하고, 특히 소규모 바이오매스 활용설비에서는 전체 시설비중 차지하는 비율이 높기 때문에 경쟁력이 매우 부족하다. 열 이용만을 위한 방식으로는 고형 바이오매스를 그대로 연소하여 열을 이용하는 방식과 합성가스를 보일러에서 이용하는 방식이 있다. 가스화 공

정을 활용할 때에는 가스화 설비를 신규로 도입해야하는 반면 기존의 보일러를 활용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 소형 엔진/발전기를 가스정제 후 활용할 수 있는 가능성이 있으며, 바이오매스 연료가 충분치 못한 경우에는 도시가스나 LPG 등을 병용할 수 있는 장점이 있다.

기존의 보일러가 있다고 할 때, 열병합발전 형식으로 하되 동절기에는 열을 주로 이용하는 방식으로 운영하고, 하절기와 같이 열 이용률이 낮은 시기에는 발전을 주로 하는 방식으로 운영할 수 있다. 또한 흡수식 냉난방설비를 도입할 때, 동절기에 소요 열량이 부족하다면 기존의 석유류를 이용한 보일러나 난방설비를 이용한다면 유류비를 절감하는 효과를 기대할 수 있다. 바이오매스 자원이 충분히 공급되지 못한 지역이나 상황에서는 이러한 기대효과를 얻을 수 있다. 하절기에 필요한 시설 냉방은 흡수식 냉·난방기를 통해 가능하다. 냉난방 수요가 거의 없는 시기에는 생산되는 가스를 대부분 발전에 이용하여야 한다. 시기별 발전에 이용할 수 있는 가스양이 크게 변할 수 있으므로 발전기 1대로 운영하는 것 보다는 소형 엔진발전기 1대와 중대형 엔진발전기 1대를 함께 설치하여 시기별 운영이 적합할 것으로 판단된다.

내연기관을 연계한 가스화공정은 고체연료를 전력 또는 동력으로 변환할 수 있는 가장 효율적인 방법의 하나이다. 전력생산을 위한 소규모 가스화공정에서는 소형 내연기관에서 휘발유나 경유를 대신하여 바이오매스의 활용이 가능하다. 따라서 바이오매스를 이용한 가스화/발전체계는 석유가 생산되지 않는 국가에서 자급할 수 있는 에너지자원을 이용할 수 있다는 점에서 의미가 크다. 바이오매스는 지구온난화를 유발하는 온실가스 배출량과 관계가 없다. 바이오매스 가스화를 통한 발전시스템은 석유를 활용할 수 없는 곳이나 석유를 통한 발전단가가 높은 경우 적용이 가능하다.

## 2. 연구개발 결과의 활용

### 가. 기대효과

#### 1) 기술적 측면

- 바이오매스 열분해 공정 기초기술의 정립
- 바이오매스 열분해 장치 설계 및 제작관련 기술의 정립
- 한 지역 내에 산재해 있는 자원의 효율적 활용방안의 정립
- 농업생산에 있어서 열분해 가스 및 액화가스와 같은 기타 1차 에너지의 효율적

## 이용기술 정립

### 2) 경제·산업적 측면

- 보조에너지로서 연료가스의 공급
- 청정 대체에너지로서 연료가스의 냉난방 에너지원으로서 활용
- 보조에너지 활용을 통한 광열비 절감
- 계절별 냉난방 시설의 가동을 통한 농업생산성 향상
- 연료가스를 이용한 지역 냉난방 체제의 구축으로 관련 산업의 활성화
- 대체 청정에너지 개발보급으로 대체에너지 관련 산업의 활성화
- 농촌지역 내 대체에너지 활용 시설의 보급 및 관련 산업의 활성화
- 일정 지역 규모에 대한 바이오매스 가스화 이용 모형을 정형화하여 국내 보급은 물론 외국에 관련 기술의 수출기대
- 가스화 장치 및 시설 생산 및 보급관련 산업의 신규 창출

#### 나. 활용방안

열화학적 공정을 통한 바이오매스 자원의 에너지활용기술은 농업 및 농촌지역에서 직접적으로 활용될 수 있는 것으로서, 본 연구에서 개발되는 가스화 및 부속장치, 바이오매스 수집 및 연료가스 활용시스템은 즉시 현장에서 적용, 즉시 연료가스의 생산 및 활용으로 이어질 수 있다. 성과물의 활용을 위해 가스화 및 부속 장치의 보급 및 활용 모형을 정형화한다면 성과물의 보급이 쉽게 이루어질 수 있다.

특히 산업자원부에서 대체에너지 실용화를 위한 예산이 계속 집행되어 오고 있는 것을 감안한다면, 본 연구의 성과물을 농촌지역에 보급하는 것은 어렵지 않다고 판단된다. 이를 위해서는 본 연구의 후속조치 또는 추가 기술개발 방안으로서 농업시설단지, 축산단지, 산간지역 등의 특정 지역에 대한 적용에 대한 검토가 요구될 것이다.

도시지역에서도 적지 않은 바이오매스가 발생하므로 이에 대한 자원화 방안도 본 연구의 성과와 연계하여 검토할 수 있다. 국가차원에서 자원의 효율적 이용이라는 측면에서 열분해에 의한 바이오매스 자원화는 다양한 대체에너지 기술개발 및 활용으로 이어질 것이다.

본 연구 성과는 지역의 바이오매스 자원 분포 및 부존특성을 고려하여 보급되는

것이 바람직하므로 지역적 특성을 고려한 후, 수집체계를 바탕으로 적지를 선정, 가스화시설을 설치하는 형식으로 부락단위 혹은 농업시설단지 단위로 보급될 수 있다. 이를 위해서 가스화장치를 제작하는 업체를 선정, 부속 장치를 함께 생산, 보급할 수 있도록 함과 동시에 지방자치단체나 중앙정부로부터 대체에너지 활용에 따른 보조 및 지원을 통해 성과물에 대한 보급을 확산시킬 수 있을 것이다.

## SUMMARY

Biomass is considered to be a major potential fuel and renewable resource for the future. In fact, there is high potential to produce significant amount of energy from biomass around the world. In spite of the potential, there are a few efforts in biomass utilization in this nation. In this study, effective utilization of agricultural biomass was proposed for rural applications. The study consists of the following four topics :

- 1) Survey on the amount and characteristics of agricultural biomass production
- 2) Drying and chipping for gasification
- 3) Development of a downdraft gasifier
- 4) Effective use of producer gas for rural applications

### Survey on Agricultural Biomass Resources

The elemental biomass data collected from field surveys was obtained with respect to the amount and calorific values of agricultural residues. Rice straw and husks were not included in the evaluation due to their demand from alternative uses such as livestock feedings, bedding materials, and so forth. Dry basis high calorific values are about 4,500kcal/kg for all the agricultural residues investigated, similar to literature data. Energy densities or unit area energy value, from pepper and sesame were significant and comparable to those of woody biomass. Biomass production from non-paddy fields were about 0.3 kg/m<sup>2</sup>, and those from orchards was 2.09 kg/m<sup>2</sup> based on the first year survey. Overall, biomass production from orchards ranged from 0.2 - 5 kg/m<sup>2</sup>. Elemental analysis showed that carbon was about 45% and hydrogen was about 6%. Samples collected from the fields indicated that moisture contents were over 40% from orchards and less than 20% from non-paddy biomass. It suggested that wood

biomass from orchard should be dried before their use.

Unit energy amount was calculated for planning. The highest unit energy, which was defined as a unit biomass production( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) multiplied by higher calorific values ( $\text{kcal}/\text{kg}$ ), was over  $6,000\text{kcal}/\text{m}^2$ , and the lowest was about  $2,000\text{kcal}/\text{m}^2$ . It is related with the amount of biomass production since differences among the calorific values of woody biomass are not big. Total energy that can be supplied from orchards was over 660,000 TOE. Agricultural biomass was produced mostly during the Winter season, especially on January and February. When planning facilities using biomass, one should take into account the time period of biomass production. These elemental data for biomass resources will provide the background of planning and development of biomass energy program, which is getting more feasible along with advances in energy conversion technologies such as micro gas turbines.

The cost of collection and transportation was about 19.5 - 24.4 man-hr/10a, based on field investigations. The cost was expected to be lower when truck mounted with crane was used to loading and unloading.

#### Drying and Chipping for Gasification

The diameters of trimmed branches ranged from 0.5 to 10cm or more, depending on the year of growing. The lengths ranged from 50cm to 2m. Biomass from non-paddy fields such as sesame and peppers were 60 - 120 cm in length, depending on the type. Water contents of branches from orchard were mostly over 50%, needing drying for gasification.

Downdraft gasifiers need strict fuel condition of biomass fuel. Whatever the gasifier types are, therefore, biomass chipping is required for normal operation. A small wood chipper was used to estimate the amount of fuel consumption for chipping. Gasoline of about 55-58L was estimated to chipping 1 ton of biomass.

When a large chipper or crusher is used, the fuel cost would be decreased.

Physical characteristics of wood chips were analyzed by a series of experiments. The continuous flow of biomass fuel should be guaranteed for successful operation of gasifiers. In some gasifier, an agitating device was used to secure uninterrupted flow of fuel. The experiments showed that so-called bridging was occurred as the moisture contents were high.

Carbonization of biomass is one of the fuel processing to reduce moisture contents. When the biomass is burned to char, it is easy to make them small-sized chips by crushing. In this case, only about 40% of total energy of biomass can be used for gasification since more than half of the energy is lost during the incineration or carbonization process. Another good aspect of carbonization is that the calorific value of char is much higher than normal biomass, resulting in better gasification and producing better quality of producer gas. The economic comparison was not made between chipping/drying and carbonization with respect to the cost of fuel processing. It might be more feasible than carbonization when the size of gasification system is large.

#### Development of a Downdraft Gasifier

Two test gasifiers out of three were successful for preliminary studies for the configuration of gasifier/CHP systems. The other one with small neck was failed due to poor flow of biomass fuels, even though it showed a normal operation when biomass fuels with small enough was provided. The diameters of hearth zone were 100 and 300mm, respectively. Fuel consumptions were about 10kg/h and 1kg/h. Wood chips and char were fed into the gasifiers. Gas analysis results showed that CO and H<sub>2</sub> were about 25-35% and 5% or more when char was used, comparable to the values from other previous studies

Since the gasifier was built with stainless steel without insulation, the

temperature inside the reactor ranged from 600 to 700°C. The concentration of CO and hydrogen was measured using gas probes. The higher the temperature inside the reactor, the better gas quality in terms of the composition of combustible gases.

Gas quality was better when wood char was supplied rather than wood chips only. Flames were right blue color when char was fed, while yellow and red when wood chips or mixture of wood chips and charcoals were used. When wood chips or mixture of wood chips and charcoals were used, a significant amount of tar was included in the producer gas. It seemed that the combustion of tar resulted in yellowish red color.

### Effective Use of Producer Gas for Rural Applications

Biomass can be used in various applications including heating by direct combustion or gasification, and heat and power. Combined heat and power application requires gasification for fueling engines or turbines. Heat can be recovered from flue gas. In small system configurations, initial cost could be too high for turbine or steam power-generation systems. Therefore, internal combustion engines(IC) would be desirable in the small systems.

When producer gas is used in the IC, dust and tar should be removed before fueling the engines. Tar which includes acids results in engine corrosion. A number of studies gives various techniques to remove tar and dusts. Another aspect in IC applications is lower calorific values of the producer gas, about 5MJ/Nm<sup>3</sup> which is only a tenth of that of natural gas. Engine de-rating is inevitable. Although the air to fuel ratio is much lower than other gaseous fuels, the mixture of air and producer gas has less than 70% of calorific value of methane/air mixture.

As a report from World Bank indicated, heat gasifiers are more economic and

practical. When producer gas from a gasifier is used in boiler, the gasifier is referred to as heat gasifier. Meanwhile the gasifier is referred to as power gasifier when the producer gas is used to fuel internal combustion engines to produce shaft power for generating electricity. Through the analysis of gasifiers with respect to its applications, heat gasifier is more competitive than power gasifier in that power gasifier requires more costs in both capital and operation.

Particularly, combined heat and power systems shows a good overall efficiency only when demand of heat to power ratio is big enough to maximize the use of heat. It means that a CHP system is too costly when heat from engine flue gas is not recovered. Therefore, heat gasifier would be a much better choice when heating requirement is dominant. Heating greenhouse using a gasifier is one of the cases. Almost all greenhouses require heating and have boilers. Replacement or modification of burner makes it possible to use the existing boilers. As mentioned in the previous section, no replacement or modification of burner may be needed when natural gas is mixed with the syngas.

When the syngas is used in boiler for heating, extensive cleaning of gas is not necessary as in the power gasifier systems. It is another merit that enable to reduce the cost of operation. In fact, syngas should be cleaned to remove tar and particulates to fuel engines. Additionally, properly operating a biomass gasification system requires training and experience. A skilled operating personnel should check a number of temperature and pressure meters and use the information in making decisions on additional fuel and many parts.

Even though recent rapid increase of oil price makes biomass gasification more and more positive, higher initial investment cost is still a big obstacle. One of operational strategies that make the renewable energy system more feasible is dual fuelling. Dual fuelling with natural gas is the case. Particularly, since the syngas produced by a gasifier has low calorific values, mixing syngas with natural gas improves fuel characteristics. Fossum and Beyer(1998) showed the

mixture of syngas and natural gas has improvements with respect to heating values, flammability, Wobbe index, burning velocity, and so forth. In addition, mixing with natural gas does not require modification of burners in gas boilers. It suggests that gas engines can run without major modification of fuel systems when syngas is mixed with natural gas. Fossum and Beyer(1998) recommended the mixing ratio of syngas and natural gas be 75% and 25%. In the ratio, engine de-rating was only about 10%.

The government also provides incentives to those who have combined heat and power facilities with natural gas. When the system capacity is large, the area from which biomass is collected also increases, resulting in a dramatic increase in the cost of biomass fuel. Therefore, natural gas could be able to substitute syngas or the amount of biomass required to fuel gas engines.

In this study, three gasifier/CHP systems of 60kW<sub>e</sub>, 100kW<sub>e</sub>, 300kW<sub>e</sub> were proposed for rural villages. Since average monthly power consumption is about 200kWh per household in rural areas, power demand was assumed to be about 2kW per household. Therefore, the systems with the capacity of 60, 100, 300 kW<sub>e</sub> can supply 30, 50, 150 households, respectively. Heat from the plant can be used for heating in households or greenhouse facilities.

When the generation efficiency is assumed to be 25%, the energy required for unit power generation is 3,440 kcal/kWh (860kcal/kWh \* 1/0.25). If a daily power demand is assumed to be about 10 hours per day, the forest area required to supply the gasifier/CHP plants can be estimated based on the amount of biomass which is supplied from farmlands near the station. When additional biomass is supplied from forest land through thinning programs, gasifier/CHP systems would be more competitive.

# CONTENTS

<b>Chapter 1. Introduction</b> .....	29
Section 1. Backgrounds .....	30
Section 2. Objectives .....	34
Section 3. Scopes .....	35
Section 4. Methodology .....	39
Section 5. Procedure .....	42
<b>Chapter 2. Current Status of the Biomass gasification and             related technologies</b> .....	43
Section 1. Use of biomass resource .....	43
Section 2. Thermochemical conversion .....	46
Section 3. Commercial products and related technology .....	50
<b>Chapter 3. Results and Discussion</b> .....	52
Section 1. Survey on agricultural biomass .....	52
1. Biomass production .....	52
2. Biomass uses in rural areas .....	55
Section 2. Availability and collection of biomass .....	60
1. Characteristics of agricultural biomass .....	60
2. Collections of biomass .....	68
Section 3. Biomass treatment for gasification .....	76
1. Fuel requirements .....	76
2. Biomass treatment .....	82
3. Fuel treatment by gasifier types .....	90
Section 4. Design and development of gasifier .....	94
1. Design parameters .....	94
2. Manufacturing gasifier .....	105

3. Running and assessment of gasifier .....	116
4. Optimum operation of gasifier .....	126
Section 5. Planning utilization of producer gas .....	128
1. Composition of producer gas .....	128
2. Appliances using producer gas .....	131
3. Utilization of producer gas .....	134
<b>Chapter 4. Achievement and Contributions .....</b>	<b>167</b>
Section 1. Achievement and Contributions .....	167
Section 2. Evaluation points of the study .....	170
<b>Chapter 5. Perspectives on future applications of results .....</b>	<b>171</b>
Section 1. Perspectives on the applications .....	171
Section 2. Strategy for further applications .....	173
Section 3. Recommendation for future studies .....	174
<b>Chapter 6. Information collected during the study .....</b>	<b>175</b>
<b>Chapter 7. REFERENCES .....</b>	<b>177</b>

# 목 차

<b>제 1 장</b>	<b>연구개발과제의 개요</b> .....	29
제 1 절	연구개발의 필요성 .....	29
1.	연구개발의 필요성 .....	30
가.	기술적 측면 .....	30
나.	경제·산업적 측면 .....	31
다.	사회·문화적 측면 .....	32
2.	국내·외 관련기술의 현황과 문제점 .....	32
3.	앞으로 전망 .....	33
4.	기술도입의 타당성 .....	33
제 2 절	연구 목표 .....	34
제 3 절	연구 범위 .....	35
1.	연구개발 내용 및 범위 .....	35
가.	농촌지역 바이오매스 자원의 종류 및 부존 특성 조사 .....	35
나.	바이오매스 수집계획 기법 및 전처리공정 확립 .....	35
다.	가스화 장치의 개발 및 성능 평가 .....	35
라.	연료가스의 활용체계 수립 .....	35
2.	연차별 연구개발 내용 및 범위 .....	36
제 4 절	연구 방법 .....	39
1.	농촌지역 유효 바이오매스 자원의 종류 및 부존특성 조사 .....	39
가.	농촌지역 바이오매스 자원의 종류와 발생량 조사 분석 .....	39
나.	연구 대상지역의 바이오매스 부존특성 조사 .....	39
다.	바이오매스 종류별 에너지관련 특성조사 .....	39
2.	바이오매스 수집계획 기법 및 전처리공정 확립 .....	40

가. 적정 수집계획 기법의 정립 .....	40
나. 전처리공정의 확립 .....	40
3. 가스화 장치의 개발 및 성능 평가 .....	40
가. 기존 가스화 장치의 분석 .....	40
나. 고효율 가스화 장치의 설계인자 정립 .....	41
다. 가스화 장치의 설계 및 제작 .....	41
라. 가스화장치의 운전 및 성능평가 .....	41
마. 효율 제고를 위한 부속장치 활용방안 .....	41
4. 연료가스의 활용체계 수립 .....	41
가. 연료가스의 저장 및 정제 .....	41
나. 연료가스 활용방안 .....	41
제 5 절 연구개발 추진체계 .....	42
<b>제 2 장   국내외 기술개발 현황</b> .....	43
제 1 절 바이오매스 자원/에너지 이용 .....	43
제 2 절 열화학적 변환공정 .....	46
제 3 절 사용된 기술 및 제품 .....	50
<b>제 3 장   연구개발수행 내용 및 결과</b> .....	52
제 1 절 바이오매스의 발생 및 이용현황 .....	52
1. 바이오매스 발생량 .....	52
2. 농촌지역 바이오매스의 이용현황 .....	55
가. 볏짚 .....	55
나. 왕겨 .....	56
다. 과수 부산물 .....	57
라. 발작물 부산물 .....	58
마. 기타 바이오매스 .....	58

제2절 바이오매스 부존특성과 수집체계 .....	60
1. 농산 바이오매스 부존특성 .....	60
가. 바이오매스별 발생성장 및 함수비 평가 .....	60
나. 발열량 및 원소분석 .....	61
다. 단위면적당 에너지 및 부존량 .....	63
라. 바이오매스 에너지 시설규모의 산정 .....	65
마. 에너지 활용 .....	67
2. 부존특성을 고려한 수집체계 .....	68
가. 선정된 농업부산물 바이오매스의 발생 시기 및 특성 .....	68
1) 과수 .....	68
2) 유지작물 .....	69
3) 고추 .....	69
나. 수집, 운송을 위한 기초자료 .....	70
다. 수집계획 수립방안 정립 .....	72
1) 농업부산물 바이오매스 부존량 평가 .....	72
2) 수집 및 운반 체계의 정립 .....	72
제3절 가스화를 위한 바이오매스 전처리 .....	76
1. 가스화를 위한 연료조건 .....	76
가. 가스화를 위한 바이오매스 이용 조건 .....	76
나. 가스로의 종류와 바이오매스 원료 조건 및 특성 .....	77
1) 목질계 바이오매스 .....	78
2) 산림 폐기물 .....	78
3) 산업 분쇄 폐기물 .....	79
4) 도시 목재 폐기물 .....	79
5) 나무손질시 발생하는 폐기물 .....	80
6) 도시 고형 폐기물 .....	80
7) 자연 발생 폭풍우에 의한 목재 폐기물 .....	80
다. 바이오매스 성장 .....	82

2. 전처리공정 개요 .....	82
가. 가스료에 투입되는 연료의 전처리 공정과 관련된 바이오매스 특성 .....	82
1) 건조 .....	82
2) 회분 .....	82
3) 원소조성 .....	82
4) 밀도와 형상 .....	83
5) 입자의 크기 .....	83
나. 과수 바이오매스의 과쇄 .....	83
다. 과수 바이오매스의 탄화 .....	87
3. 가스료 유형별 전처리공정 .....	90
가. 상향식 공정베드시스템의 전처리공정 .....	91
나. 하향식 공정베드시스템의 전처리공정 .....	91
다. 가스료의 주변기기 .....	92
1) Initial Sizing Device .....	92
2) Drying System .....	92
3) Fuel-feeding system .....	93
제 4 절 가스료의 제작 및 운전 .....	94
1. 가스료 설계인자 .....	94
가. 가스화 장치(gasifier)의 종류 및 개발현황 .....	94
1) 고정상 가스화 장치 .....	95
2) 유동상 가스화장치 .....	102
나. 가스화 장치의 기본 설계인자 .....	103
다. 가스화 장치 공정 관련 설계인자 .....	104
1) 가열온도의 조절 .....	104
2) 가열비율의 조절 .....	104
3) 바이오매스의 가스화에서의 촉매 사용 .....	104
2. 가스료의 제작 .....	105
가. 가스화 장치의 설계방향 .....	105
나. 가스료의 설계 및 제작 .....	111

1) 하향식 가스로 Version.1 .....	111
2) 하향식 가스로 Version.2 .....	112
3) 하향식 가스로 Version.3 .....	114
3. 가스로의 운전 및 평가 .....	116
가. 가스로 운전조건 .....	116
나. 가스로의 구동 .....	117
1) 숯(입도 2~3cm 이하) 연료조건 .....	117
2) 숯(입도 2~3cm 이상) 연료조건 .....	118
3) 목편(입도 3cm) 연료조건 .....	120
4) 목편과 숯 연료조건 .....	121
다. 합성가스의 성분분석 .....	124
1) 숯(입도 2~3cm 이하) 연료조건 .....	124
2) 숯(입도 2~3cm 이상) 연료조건 .....	125
3) 목편(입도 3cm) 연료조건 .....	125
4) 목편과 숯 연료조건 .....	126
4. 걱정 운전조건 .....	126
제 5 절 합성연료가스 이용방안 .....	128
1. 합성연료가스 조성 및 발열량 .....	128
가. 화염온도 .....	129
나. 연소/폭발범위 .....	129
다. Wobbe 지수 .....	130
라. 층류연소속도 .....	130
2. 합성연료가스 활용 기관 및 설비 .....	131
가. 가스엔진 .....	131
나. 가스 터빈 .....	132
다. 보일러 .....	132
라. 천연가스의 혼합이용 .....	133
3. 합성연료가스 활용전략 .....	134
가. 가스의 정제 .....	134

1) 합성연료가스 중 타르 함량 .....	135
2) 타르의 측정 .....	135
3) 타르의 분해 .....	136
4) 물리적인 타르 제거방법 .....	137
5) 분진 및 입자성 물질 제거 .....	140
나. 합성연료가스 활용 방안 .....	142
1) 활용방안의 종류 및 검토 .....	142
2) 가스화설비의 경제성 및 신뢰성 .....	144
다. 소형열병합시스템 .....	145
1) 열병합발전시스템 개요 .....	145
2) 가스엔진과 열량계산 .....	151
3) 가스엔진에서의 열 회수 .....	152
라. 바이오매스를 이용한 농가난방의 경제성 검토 .....	156
1) 분석 도구 및 기초 자료 .....	157
2) 바이오매스 수집비용 .....	157
3) 지역 특성 및 설비관련 자료 .....	157
4) 제무관련 조건 .....	160
5) 평가결과 .....	161
마. 바이오매스 부존량 기준 합성가스활용 시스템 예 .....	165
1) 바이오매스 부존량 .....	165
2) 가스로 규모 .....	166
3) 합성연료가스 활용설비 .....	166
<b>제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....</b>	<b>167</b>
제 1 절 연구개발목표 달성도 및 관련분야 기여도 .....	167
제 2절 평가 착안점 .....	170
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....</b>	<b>171</b>
제 1 절 기대효과 .....	171
1. 기술적 측면 .....	171

2. 경제 · 산업적 측면 .....	172
제 2 절 활용방안 .....	173
제 3 절 추가연구의 필요성 .....	174
<b>제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....</b>	<b>175</b>
<b>제 7 장 참고문헌 .....</b>	<b>177</b>

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

### 제 1 절 연구개발의 필요성

2001년 10월 제7차 기후변화협약 당사국회의(COP7)에서 교토의정서의 구체적인 실행방안이 타결됨에 따라서 우리나라의 온실가스 감축문제는 피할 수 없는 환경과제로 닥치게 되었다. 현재 세계 9위의 온실가스 배출국가인 우리나라는 10년 내에 영국, 캐나다 등에 앞선 세계 7위의 온실가스 배출국이 될 것으로 예상되고 있다. 환경정책평가연구원의 연구결과에 따르면 2010년 기준 온실가스 발생을 10% 저감하기 위해서는 11조원 이상의 비용이 발생할 것으로 추정하고 있다. 그럼에도 불구하고 현재 정부에서는 국가차원에서 교토협약에 대비할 수 있는 마스터플랜을 정립하지 못한 상황이다. 물론 고효율 에너지기기의 보급 확대, 대체연료 자동차 개발의 가속화, 풍력 및 태양광 발전의 개발, 메탄가스의 연료화 기술 및 장치개발 등이 거론되고 있으나, 아직까지 구체적인 대책이 수립되지 못한 실정이다.

현재 농업용 에너지 소비량은 1995년 기준 국내 에너지 소비량의 2.14%를 차지하고 있다. 농림업 부문 에너지 소비량 중 석유류는 91%, 나머지가 전력으로서 9%를 차지하고 있으나 농가에서 이용되는 에너지를 포함시킨다면 이보다 많은 에너지가 농촌지역에서 소비되는 것으로 추정된다. 1992년부터는 비닐하우스 등의 농업시설을 위한 농업용 난방기가 집중적으로 보급되어 에너지 소비가 크게 증가하였으며, 앞으로도 농림업분야에서의 에너지 소비량은 지속적으로 증가할 것으로 보인다.

에너지소비량의 지속적인 증가 및 온실가스 감축에 대한 논의는 대체에너지 개발과 이용확대에 대한 필요성을 크게 부각시켰다. 국내 대체에너지 자원으로서 태양에너지, 풍력, 소수력, 바이오매스, 일반폐기물, 그리고 산업폐기물 등이 있다. 이 가운데 개발 가능 잠재량 대비 가채 잠재량이 가장 높은 것은 일반폐기물, 바이오매스, 그리고 소수력의 순으로 평가되고 있다. 일반폐기물의 경우 최근 다이옥신과 같은 오염물질의 유발로 인해 여러 가지 장애요인이 많이 남아 있다. 이와 달리 바이오매스의 경우 농산 부산물, 임산폐기물, 수초, 동물의 배설물 등으로서 재생가능 한 유기물질을 일컫는다. 바이오매스를 대체에너지로서 활용하는 기술에는 직접연소, 열화학 전환, 그리고 생화학적 전환 등이 있으며 최근에 이르러 온실가스의 감축 및 환

경오염의 방지, 그리고 대체에너지의 개발이라는 효과를 달성할 수 있기 때문에 실용화를 위한 노력이 경주되고 있다. 최근의 바이오매스 실용화 사례로서는 축산분뇨의 혐기성처리과정에서 얻어지는 메탄가스를 연소시켜 전기와 난방을 위한 에너지원으로 이용하는 기술 도입이나 바이오디젤의 실용화 등이 있다.

농촌지역에 산재해 있는 바이오매스를 에너지원으로서 활용하기 위해서는 이에 대한 부존특성의 조사 및 이를 바탕으로 에너지 전환기술이 도입되어야 한다. 국내 바이오매스 부존특성 및 가용특성에 따른 이용방안과 관련하여 에너지기술연구원에서 지난 90년대 초에 조사한 바 있으나 농산 바이오매스의 경우 농산 부산물을 이용한 에탄올 생산이나 직접연소를 주요 이용방향으로 설정하여 농촌지역의 특성을 적절히 감안하지 못하였다. 따라서 농촌지역의 청정 대체에너지 개발 및 보급 확대, 국가 차원의 온실가스 발생의 저감, 그리고 유기성폐기물의 적정한 최종처분이라는 복합적인 효과를 얻을 수 있는 바이오매스자원의 적절한 활용방안이 절실히 요구된다.

농산 바이오매스를 적절히 에너지로 전환하는 경우 농업시설에서의 냉난방용 에너지원으로, 더 나아가서는 농촌 마을단위의 에너지원으로 활용하여 농업생산력의 제고 및 국가차원의 대체에너지개발 및 온실가스 감축의 효과를 기대할 수 있을 것이다.

## 1. 연구개발의 필요성

### 가. 기술적 측면

바이오매스를 다른 형태의 에너지로 전환하는 기술에는 직접연소, 열화학적 전환, 그리고 생화학적 전환 등으로 분류할 수 있다. 직접연소는 주로 건조과정을 거친 조각을 통해서 열에너지를 얻는 방법이다. 열화학적 및 생화학적 변환에는 직접연소의 경우 바이오매스가 갖는 단위 중량 혹은 부피당 에너지량이 적기 때문에 연료로서의 취급이 불리하다. 열화학적 또는 생화학적 전환은 이러한 문제점을 극복할 수 있으나 여러 가지 기술적인 문제해결과 전환을 위한 전처리과정 및 처리시설이 요구된다.

열화학적 전환으로서는 열분해법 또는 가스화방법이 대표적이다. 열분해법/가스화는 과거 오랜 동안 석탄을 열분해하여 연료로서 취급이 용이한 석탄가스, 차콜 등을 생산하는 방법으로 이용되어왔다. 목재를 열화학적으로 전환하는 경우 목탄, 바이오오일, 타르, 그리고 가스 등을 생산할 수 있다. 이러한 생산물은 에너지 밀도가 높아

서 많은 관심을 받고 있으나, 다양한 적용기법 특히 소규모 이용에 대한 연구와 개발은 잘 이루어지지 않고 있다.

생화학적 처리방법은 바이오매스를 생화학적 또는 미생물의 작용을 이용하여 바이오가스, 에탄올 및 메탄올과 같은 기체 혹은 액체 연료를 생산하는 것이다. 특히 축산폐수와 같은 유기물의 혐기성 분해를 통해 메탄가스를 생산하거나 당, 전분 등을 이용하여 에탄올을 생산하는 것이 대표적인 생화학적 처리방법이다. 브라질과 같은 경우 에탄올을 교통 연료로서 널리 사용하고 있으며 비교적 에탄올을 생산하는 기술은 비교적 잘 확립되어 있다.

우리나라 농촌지역에서 발생하는 농산 바이오매스 자원의 적절한 활용방법은 부존 특성 및 전환 공정의 실용화 가능성을 평가하고, 실용화 가능성, 경제성, 바이오매스의 지속적 공급 등을 고려하여 결정하여야 한다. 대부분의 바이오매스 에너지활용기술은 단일 공법의 개발 및 효율성 평가에 국한되었다. 농촌지역의 바이오매스 자원의 부존특성을 시공간적 분석을 기초로 한 활용방안은 제시되지 않았다. 예를 들어 지금까지 상대적으로 연구와 개발이 상당히 진행된 메탄가스 이용은 혐기 반응조, 탈황시설 등 보조 시설이 요구되어 초기 투자비가 높아 사업의 추진이 불리한 편이다.

열화학적 처리는 바이오매스를 이용해 편리한 고가의 연료로 전환할 수 있다. 과거부터 부분적으로 적용되어 왔던 대표적인 열화학적 처리는 열분해, 목탄생산, 그리고 연료가스화 또는 기화(gasification)등이 있다. 건조된 바이오매스 1 kg은 3~3.6 kWh 정도의 열이나 1.4 kWh의 열과 함께 0.7~0.9kWh의 전기를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이미 상용화된 기화기기는 크기나 유형에 따라서 다양하다. 현재 인도, 태국, 인도네시아 등에서는 소규모 기화기기를 취사용 등으로 활용하고 있다. 우리나라 농촌지역에서의 바이오매스를 대체에너지원으로 활용하기 위해서는 기존의 열화학적 처리공법을 검토하고 국내 바이오매스 자원의 특성에 적합한 공법을 선택하여 활용하는 것이 요구된다.

#### 나. 경제·산업적 측면

농업부문에서의 에너지 소비가 지속적으로 증가하고 있는 상황에서 에너지 자원의 신규개발이나 저렴한 에너지의 확보는 필연적이다. 대체에너지 자원의 개발 및 활용 측면에서 농촌지역에 산재해 있는 바이오매스 자원의 에너지로서 활용은 농가의 농업생산비의 직접적 절감, 환경오염물질로서 유기성폐기물의 재활용, 그리고 난방유와

같은 화석연료 이용 절감에 의한 온실가스 감축의 효과를 얻을 수 있다. 물론 재생 에너지 이용의 경우 일반적으로 기존의 화석연료를 이용하는 시설에 비해서 초기 시설투자비가 상대적으로 높아 투자에 불리한 점이 있으나 농촌지역에 산재해 있으나 이용이 되지 않고 있는 자원을 최대한 이용할 수 있고 장기적으로 경제성이 있다. 또한 본 연구를 통해서 재생에너지 자원 특히 바이오매스 자원의 이용과 관련된 산업이 창출되고 활성화될 수 있기 때문에 장기적으로 온실가스 감축 및 재생에너지 개발 및 활용과 관련된 산업의 육성을 기대할 수 있다.

#### 다. 사회·문화적 측면

국제적으로 온실가스 감축과 관련된 논의가 활발하게 논의되고 있는 반면에 국내에서는 이에 대한 구체적이고 실질적인 논의 또는 계획이 세워져 있지 않은 상황이다. 본 연구에서 지향하고자 하는 바이오매스 자원의 활용은 장기적으로 지구환경 보전에 대한 인식뿐만 아니라 에너지 자원의 절약 및 재생에너지의 개발에 대한 사회적인 인식을 새롭게 할 수 있다고 판단된다. 온실가스의 감축은 현재 국내의 산업 구조를 고려할 때 막대한 비용이 소요되기 때문에 이에 대한 사회적인 인식이 필요하고 예산이 요구된다. 이를 위해서는 사회적인 동의가 요구되는바 다양한 재생에너지의 개발 및 활용의 기반 조건을 조성되어야 한다는 사회적인 필요성을 부각시키고 농업이 가지는 지구환경보전 차원에서의 의의와 역할을 새롭게 인식시킬 수 있는 계기가 될 수 있다고 판단된다.

## 2. 국내·외 관련기술의 현황과 문제점

바이오매스의 에너지 전환에 관련된 기본적인 기술은 비교적 상당 수준에 이르렀다고 판단된다. 특히 본 연구에서 검토, 실용화 연구를 위해 포함하고자 하는 열화학적 전환기술은 과거 석탄 및 목재를 이용하여 연료를 생산하는 기술과 직접적으로 연관된다. 그러나 국내에서 이루어져왔던 것들은 바이오매스의 직접소각과 관련된 연구나 소각로 건설 및 폐열의 활용 등으로서 농촌지역에 산재해 있는 바이오매스 자원의 연료화 기술 및 바이오매스 에너지 실용화와 관련된 연구는 거의 없는 실정이다. 왕겨 소각로의 개발 및 효율에 대한 연구, 최근에 도입이 추진되고 있는 바이오 디젤 등이 있으나 바이오매스 에너지의 활용에 대한 본질적인 연구나 접근이라고 볼 수는 없다.

특히 농촌지역의 바이오매스는 발생하는 시기나 장소 그리고 바이오매스 특성 자체가 다양하기 때문에 바이오매스를 적정하게 활용하기 위해서는 시스템 공학적 분석이 필요하다. 바이오매스 종류별로 갖는 열량, 시공간적 특성, 그리고 이를 토대로 설정되는 이용방안이 종합적으로 수립되어야 실질적인 대체에너지로서 활용이 가능하나 이에 대한 연구는 전혀 없는 상황이다.

### 3. 앞으로 전망

국제적으로 온실가스 감축에 대한 구체적인 방안이 논의되고 있는 상황에서 조만간 국내에서도 에너지의 효율적 이용 및 대체에너지 개발 등에 대한 국가차원의 계획이 수립될 것으로 판단된다. 따라서 가채 잠재량이 상대적으로 높은 바이오매스 자원의 실용화 사업은 더욱 용이하게 추진될 수 있다고 판단된다. 또한 열화학적 에너지 전환기술을 통해 폐기물을 이용하는 경우 일반 소각에 비해서 오염발생 가능성이 상대적으로 낮기 때문에 이에 대한 실용화는 더욱 촉진될 것으로 판단된다.

현재 열화학적 전환기술 뿐만 아니라 생물화학적 전환기술에 대해 국내외적으로 막대한 연구비가 투자되고 있는 상황에서, 앞으로 바이오매스의 에너지 활용기술 및 관련 산업은 치열한 경쟁을 맞게 될 것이다. 이와 관련된 기술의 발전은 본 연구에서 개발하고자 하는 내용과 경합관계라기 보다는 보완 기술로서 실용화의 경쟁력을 더욱 제고 하게 될 것이다.

현재 산업자원부를 주축으로 국가차원에서 에너지이용의 효율제고 및 신규에너지 개발에 대한 투자와 실용화에 대한 지원이 지속적으로 증가하고 있는 상황이므로 가채 잠재량이 높은 바이오매스의 에너지전환기술은 그 의의가 매우 크다. 외국의 경우 식량작물과 경합이 되지 않는 범위에서 바이오매스 이용을 위한 에너지작물 재배에 대한 연구, 투자 및 분석이 증가하고 있는 추세와, 최근 국내에서 날로 증가하고 있는 유휴농지의 효율적 이용방안 모색이라는 관점에서 switchgrass 등과 같은 에너지작물의 재배는 적극적인 의미에서 앞으로 본 연구의 바이오매스 자원의 최적이용과 그 맥을 같이하고 있다.

### 4. 기술도입의 타당성

본 연구에서 개발하고자 하는 내용은 바이오매스 자원의 최적 이용기술개발로서,

열분해, 가스 터빈, 발전, 온수 공급을 위한 열 교환 장치 등은 상당부분 상용화된 요소를 포함하고 있다. 따라서 이와 같은 요소에 대한 기술도입의 필요성은 없다. 본 연구에서는 기존의 다양한 요소기술을 국내 농촌지역의 바이오매스자원의 부존특성을 감안, 조합하여 시스템으로 구축, 적용하는 것이 핵심이 되고 부분적으로 신규 개발하고자 하는 기화시설 (Gasifier)의 경우에도 바이오매스의 특성에 맞게 설계되어야 하므로 기술도입의 가능성은 거의 없다.

## 제 2 절 연구 목표

본 연구에서는 농촌지역에 산재해 있는 다양한 바이오매스 가운데 열량과 부존특성이 고려하여 유리한 자원을 선정하고, 열화학적인 방법을 통해 유용한 연료로 전환하여, 농업시설에서 활용할 수 있는 최적의 시스템을 구축하는 것을 목표로 한다. 연료전환 공정은 바이오매스의 수집, 전처리 과정, 그리고 전환 공정을 가리키며, 활용 시스템의 구축은 가스 터빈 등을 이용한 전력생산, 온수 공급 등의 최적 활용체계의 수립을 의미한다. 상기 연구 목표를 달성하기 위해 다음과 같은 세부 내용을 포함하여 추진하였다.

구 분	연구 개발 목표
1차년도(2002)	농촌지역 바이오매스 자원 부존특성조사 및 수집계획기법 연구 가스화장치(Gasifier)의 설계인자의 도출
2차년도(2003)	주요 바이오매스 별 전처리 공정 정립 가스화장치의 설계 및 제작 연료가스 활용방안 연구
3차년도(2004)	가스화장치 및 부속장치의 성능평가 연료가스의 활용체계 수립 및 최적운영조건 정립

## 제 3 절 연구 범위

### 1. 연구개발 내용 및 범위

#### 가. 농촌지역 바이오매스 자원의 종류 및 부존 특성 조사

- 토지이용현황을 이용한 부존량 조사
- 발열량 및 부존량을 고려한 적정 바이오매스 선정
- 선정된 바이오매스자원의 부존특성 조사

#### 나. 바이오매스 수집계획 기법 및 전처리공정 확립

- 수집계획 기법의 확립
- 건조·파쇄 등 요구되는 전처리공정 검토
- 가스화 적정공정과 효율적 설계를 위한 적정 전처리공정의 요구조건 정립

#### 다. 가스화 장치의 개발 및 성능 평가

- Gasifier의 개발 및 제작
- Gasifier의 성능 평가 및 열량분석
- 폐열의 효율적 이용방안 (전처리공정에의 활용 및 온수 공급 등)

#### 라. 연료가스의 활용체계 수립

- 연료가스의 정제기술 확립
- 연료가스 활용체계 및 적정운영방안 정립

2. 연차별 연구개발 내용 및 범위

구 분	연구개발 내용 및 범위
1차년도 ( 2002 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농촌지역 바이오매스 자원 부존량 및 종류조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구대상 지역의 선정</li> <li>- 주요 바이오매스의 종류 조사</li> <li>- 가채 잠재량이 높은 바이오매스의 선정</li> <li>- 선정된 바이오매스 자원 종류별 부존량 조사</li> </ul> </li>   <li>○ 바이오매스 종류별 특성조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 발생량 조사</li> <li>- 시기별 발생특성조사</li> <li>- 발생 및 부존형태</li> </ul> </li>   <li>○ 시공간을 고려한 수집체계 연구               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 장비, 시간, 비용 등</li> <li>- 발생 시기를 고려한 수집체계</li> <li>- 지역 내 분포를 고려한 수집체계</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기존 가스화장치의 개발현황 조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가스화장치의 개발현황</li> <li>- 가스화장치의 이용현황 및 효율조사</li> </ul> </li>   <li>○ 가스화장치 기본 설계인자 도출               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가스화 장치의 기본 공정분석</li> <li>- 주요 공정관련 인자 분석</li> <li>- 고효율 가스화장치의 설계인자 도출</li> </ul> </li>   <li>○ 가스화장치의 설계방향 정립               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율 가스화장치 공정정립</li> </ul> </li> </ul>

구 분	연구개발 내용 및 범위
2차년도 ( 2003 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 바이오매스 특성에 따른 전처리공정 정립               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 바이오매스 별 전처리공정 정립</li> </ul> </li> <li>○ 전처리공정에 소요되는 동력, 열원계산               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전처리공정 비용</li> </ul> </li> <li>○ 가스화시설의 폐열 및 동력활용방안 정립               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전처리공정에 폐열 등의 활용방안</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가스화장치의 설계 및 제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시제품 제작</li> </ul> </li> <li>○ 가스화장치의 운전 및 보완제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시제품의 운전 및 문제점 파악</li> </ul> </li> <li>○ 가스화장치의 운전에 따른 발생 및 소요동력 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 운전에 요구되는 보조 동력 및 에너지</li> <li>- 운전에 따른 발생 동력 및 에너지</li> </ul> </li> <li>○ 바이오매스 별 효율분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시제품 운전결과를 통한 효율분석</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연료가스의 열량분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 바이오매스 별 열량분석</li> </ul> </li> <li>○ 연료가스의 저장 및 정제방안 검토               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 효율제고를 위한 저장방안</li> <li>- 압축기를 이용한 저장방안</li> <li>- 연료가스의 정제방안 정립</li> </ul> </li> <li>○ 가스터빈 활용 전력생산 가능성 평가</li> <li>○ 농업시설용 난방을 위한 활용방안 정립               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 난방 시스템 정립</li> </ul> </li> </ul>

구 분	연구개발 내용 및 범위
3차년도 ( 2004 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가스화장치의 운전 및 문제점 파악               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2차 오염 문제점 검토 및 해결방안</li> <li>- 안전성 검토</li> <li>- 연속운전에 따른 문제점 검토 및 해결방안</li> </ul> </li> <li>○ 가스화장치의 개선               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고효율 운전을 위한 최적조건 정립</li> </ul> </li> <li>○ 전처리공정 및 효율개선을 위한 부속장치제작               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 폐열의 효율적 이용</li> <li>- 전처리공정의 비용저감을 위한 공정 확립</li> </ul> </li> <li>○ 부속장치의 운전 및 적정운전조건 정립               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전 효율제고를 위한 적정운전조건</li> <li>- 시기별 바이오매스 수급을 고려한 운전조건</li> </ul> </li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연료가스의 저장 및 최적 활용 방안 정립               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가스화시설의 가동조건 확립</li> </ul> </li> <li>○ 소요 보조연료 요구량 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 필요시 소요 보조연료 요구량 계산</li> <li>- 보조연료 이용 시 적정 운전조건 정립</li> </ul> </li> <li>○ 농업시설을 위한 최적 이용방안               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 농업시설의 동계 난방을 위한 운전조건 정립</li> </ul> </li> </ul>

## 제 4 절 연구 방법

가스화기술 개발에 있어서 조기 실용화를 위하여 과수전지 목재 등의 성공 가능성이 높은 바이오매스를 중심으로 수행하였고, 에너지 공급대상은 농촌지역에서 에너지 소비가 높은 농업시설 등을 중심으로 제한된 범위로 국한하였으며, 생산되는 가스의 열량을 바탕으로 적용이 가능한 공급대상을 검토하였다.

### 1. 농촌지역 유효 바이오매스 자원의 종류 및 부존특성 조사

농촌지역에서 가용한 바이오매스 자원을 파악하기 위해 바이오매스의 종류와 발생량에 대한 기본적인 조사를 수행한다. 조사결과는 가스화를 통해 연료가스를 얻는데 유리한 바이오매스의 종류를 파악하고, 이를 수집하기 위한 기초자료로서 활용된다. 이를 위해서 다음과 같은 조사 및 분석을 수행한다.

#### 가. 농촌지역 바이오매스 자원의 종류와 발생량 조사 분석

- 농산 부산물
- 임산 부산물
- 축산 폐기물
- 기타 유기성 폐기물

#### 나. 연구 대상지역의 바이오매스 부존특성 조사

- 연구대상 지역의 선정
- 토지이용에 따른 부존량 조사

#### 다. 바이오매스 종류별 에너지관련 특성조사

- 발열량 조사
- 함수비
- 형태, 성장

## 2. 바이오매스 수집계획 기법 및 전처리공정 확립

농촌지역 내 바이오매스 자원의 특성상 시공간적으로 분산되어 있기 때문에 이를 적정한 방법으로 수집하는 기술이 요구된다. 가스화장치를 이용한 에너지활용 과정에서 소요되는 비용에 큰 영향을 미칠 수 있는 과정이므로 이에 대한 최적의 수집계획이 마련되어야 한다. 또한 바이오매스 자원의 특성상 함수비, 단위체적당 중량, 성상 등이 다양하므로 종류별로 전처리 공정이 확립되어야 한다. 선정된 연구대상 지역에 대해 다음과 같은 과정을 통해 수집계획 기법 및 전처리공정을 확립한다.

### 가. 적정 수집계획 기법의 정립

- 수거 장비 및 체계의 정립
- 중간 수집 장의 필요성

### 나. 전처리공정의 확립

- 바이오매스 종류별 요구되는 전처리공정 분석
- 전처리를 위한 장비 및 부속시설 정립

## 3. 가스화 장치의 개발 및 성능 평가

본 연구에서 개발하고자 하는 가스화장치(Gasifier)는 효율성을 높여 바이오매스의 에너지 이용을 극대화하고자 한다. 지금까지 개발, 상용화된 가스화장치는 과거 석탄 또는 목재의 가스화공정을 도입한 것으로서 바이오매스에 적용하기 곤란하다. 따라서 바이오매스 가스화의 효율을 제고할 수 있는 가스화장치가 개발되어야 한다. 이를 위해 다음과 같은 방법으로 개발 및 성능평가를 하고자 한다.

### 가. 기존 가스화 장치의 분석

- 가스화 대상물질의 특성
- 효율비교
- 연료가스의 열량
- 폐열 활용을 위한 부속장치
- 가스화장치의 비교분석

나. 고효율 가스화 장치의 설계인자 정립

- 가스화 로(爐)의 적정온도
- 탄화 고형물을 이용한 열분해 공정
- 가스화 로(爐)와 연소로(爐)의 연결공정
- 보조연료의 활용 필요성
- 바이오매스 로(爐)내 체류시간
- 생산된 연료가스의 배분

다. 가스화 장치의 설계 및 제작

- 실험실 규모 가스화장치의 설계 및 제작
- 시운전 및 성능평가를 통한 문제점 파악
- 가스화 장치의 개선 및 현장 규모 장치의 제작

라. 가스화장치의 운전 및 성능평가

- 현장 규모 가스화 장치의 연속 및 간헐적 운전
- 가스화 장치 및 부속시설의 통합 연속 운전
- 문제점 파악 및 시설의 개선

마. 효율 제고를 위한 부속장치 활용방안

- 연소로의 폐열 이용방안 정립 (전처리공정에 활용, 온수 등)
- 부산물 처리방안 정립
- 최적운전 조건 정립

4. 연료가스의 활용체계 수립

가. 연료가스의 저장 및 정제

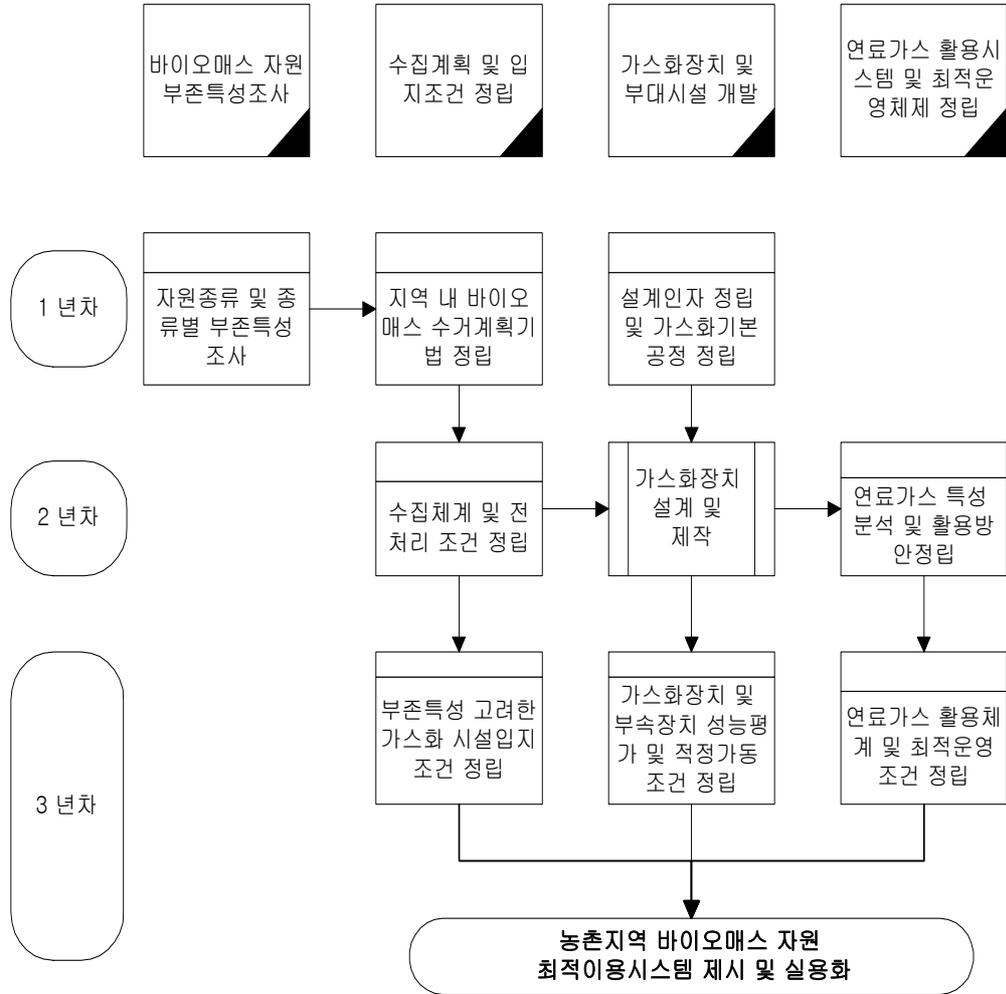
- 연료가스의 저장 조건 및 방법
- 연료가스 이용을 위한 정제기법 정립

나. 연료가스 활용방안

- 동계 농업시설용 열병합식 활용방안 정립

o 바이오매스 발생특성을 고려한 활용방안 정립

제 5 절 연구개발 추진체계



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 바이오매스 자원/에너지 이용

미래의 에너지 바이오매스는 일차에너지 공급의 큰 부분을 차지하고, 생물에너지 공급의 수요를 경감시킬 것이라 예측되며 총 생물에너지 공급원과 자원의 여러 용도 간의 경쟁에 중점을 두고, 이용 가능성이 평가되고 있다. 삼림은 생물에너지로서 상당한 잠재력을 갖고 있을 뿐만 아니라 가장 큰 바이오매스 에너지 소스라고 본다. 때문에 품종을 개량, 번식시키고 경작 기술을 개발하는 노력이 필요하다(윤종량, 2004).

대규모 바이오매스 가스화발전의 실증용 발전소들은 대부분 유동상형의 가스화복합발전방식을 채택하며, 고효율의 가스화발전방식을 실현하는 쪽으로 나아가고 있다. 내부 순환형 유동상 가스화로인 ICFG(Internally Circulatory Fluidized-bed Gasifier)는 가스화로 내부가 각 영역의 기능이 최대로 발휘되도록 나누어져 있고 열분해·가스화가 행해지는 가스화실과 열분해 잔사가 연소되는 연소실로 구성되어 있다. 생성가스 회수 방법 및 열분해 잔사처리, 열의 근원 등 3가지 장점에서 독특한 기술개념으로 종래의 유사기술과 차별화된 열분해·가스화 기술이다. ICFG 생성가스는 산업용의 연소로, 보일러 등의 연료로, 화석연료로 대체되며 가스터빈 및 가스엔진 등의 동력 회수장치에서 발전연료로 이용가능하다. 생성가스의 주된 성분인 수소, 일산화탄소를 이용한 메탄올 및 DME 등의 액체 연료 합성 및 수소제조에 이용도 고려되고 있다(김병태, 2004).

대규모 바이오매스 가스화발전의 실증용 발전소들은 대부분 유동상형의 가스화복합발전방식을 채택하며, 고효율의 가스화발전방식을 실현하는 쪽으로 나아가고 있다. 직접연소 발전은 열손실이 커서 발전효율이 낮고 기술적 단점이 있고 가스화 발전은 화로 속의 온도가 저온 이어서 타르가 생성되기 쉬우며, 분류상형 가스화로는 효율 높이기 위한 전처리과정이 필요하고 석탄/바이오매스 혼합발전은 분쇄기 출구온도의 증가, 분쇄기 동력증가, 분쇄기 진동증가, 미세분말탄관 막힘 등이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 기술적 문제점들을 고려하여 고효율을 실현할 수 있는 해외, 국내입지의 고효율 바이오매스 발전기술개발이 필요하다(김영철, 2004).

바이오매스 관련 에너지는 목질바이오매스의 직접연소, 목질바이오매스의 가스화, 목질바이오매스로부터 에탄올 생성, 바이오가스 제조, 바이오디젤 제조, 펠릿(pellet) 제조 등 열 이용·열병합·발전에 이용되고 있다. 바이오가스는 중소 규모이상에서는 가스엔진 열병합에, 대규모에서는 가스터빈에 의한 열병합·발전에 이용되고 바이오디젤은 경유대체 수송용 연료 외에 최근에는 디젤엔진과 마이크로 가스터빈에 의한 열병합·발전의 연료로 이용되며 펠릿(pellet)은 형상, 함수율이 일정한 연료로 자동화 운전기기에 이용되고, 스토브와 소규모의 온수보일러에 주로 이용된다. Pellet의 보급을 위해서는 수급 균형 확보, 품질 표준화(조약품의 배제), 석유계연료와 같은 수준의 안정성확보와 저비용 판매체제정비가 고려되어야 한다. 바이오매스 에너지 이용 시에는 열 이용을 우선적으로 하고, 발전의 경우 대규모발전(10MW이상)이 아니면 열병합에 의한 열 이용 시 채산성 검토한다. 또한 중소규모이하의 증기발전은 발전효율이 저하하므로 극력 피해야한다(손응권, 2003).

현재 우리나라의 가용 바이오매스 자원은 약 380만 톤으로 이를 모두 에너지로 전환했을 때 국내 총 에너지 소비량의 2% 공급이 가능하고, 세계적 대체연료로써 바이오매스는 세계 에너지 요구의 약 14%를 제공하고, 개발도상국의 에너지 중 35%를 차지하고 있다. 바이오매스의 연료가 되는 폐나무, 단년생 나무 작물, 농업 폐기물, 다년생 풀 작물, 동물 폐기물 등은 고체 화석 연료와 비교해 탄소가 훨씬 적고, 산소는 많으며 발열량은 낮다. 현재 바이오매스와 폐기물의 생물학적 전환, 바이오매스 밀도 높이기, 가정용 레인지와 가열기 응용, 가정과 산업 에너지 보존과 태양 광전지와 바이오매스 농업 충전, 차량 연료를 위한 열분해 석유로의 바이오매스 전환, 내연기관을 위한 메탄올과 에탄올로의 바이오매스 전환과 같은 바이오매스와 폐기물의 열 전환, 석탄과 혼소, 직접 연소나 가스화와 열분해로 바이오매스 기술이 발전하고 있다(곽도은, 2003).

덴마크에서는 국토의 60%가 농지로, 1973년 오일쇼크 이후 벧짚이 가진 에너지를 유효하게 이용해서 지역난방을 하기 위해 보일러 시스템을 개발하였다. 이 보일러 시스템을 사용하여 현 덴마크의 오텔센지 교외의 한 농장은 연간 4600만 톤의 밀짚을 생산하고 있으며, 800W의 보일러 2기와 온수저장탱크 2기를 설치하여 열수를 순환해서 지역 내의 난방과 밀집건조에 실용화하고 있다. 시스템을 운영하기 위한 공정과정으로는 1개의 보일러가 14%의 함수량까지 건조된 밀짚 600톤을 15개 묶음으로 나누어 8시간 연소한 후 7톤의 회를 밭에 살포하고, 1200~1600도까지 완전연소시킨다. 발생된 열은 16만 리터의 물을 95도까지 상승시켜 가열한 물은 지역난방이

나 벗짚건조용으로 순환되어 50~60도로 냉각되어 돌아온다. 이러한 공정과정을 거치는 보일러 시스템은 경제적으로 초기비용 및 유지보수비용이 염가하고, 수명은 20년 정도를 보인다. 하지만, 매일 아침 벗짚을 투입하는 오퍼레이터가 필요하다. 또 다른 양상으로써 바이오펠릿을 이용한 발전은 대형발전소를 소유한 에너지 생산 판매회사인 E2사의 바이오매스용 고품연료 제조 공장에서 덴마크 발전량의 약 10%를 공급하며 이루어지고 있다. 바이오매스 발전용 고품 원료 펠릿은 목재와 밀짚으로 만들어지며, 가구를 만들고 남은 폐 재료를 매입하여 펠릿을 제조한다. 밀짚 펠릿 제조공정은 함수량 15%의 밀짚을 짧게 절단하여 가루 형태로 압축하여 고품 상을 만들며, 수분함량 10%의 고품펠릿을 급속 냉각하여 보존한다. 밤나무나 소나무 폐기 재료를 수분함량 45%의 칩으로 만들면, 이를 분말상태로 만들고 200도의 수증기로 건조하여 15기압으로 압축하여 펠릿을 제조하며, 증기는 재이용한다. 이때 칩 50톤 중 30톤이 제조에 쓰이며, 20톤이 물로 배출된다. 완성품은 건조냉각보존하며, 한 시간에 17톤의 밀짚을 처리한다. 밀짚은 농가와 계약하여 운반업자가 운반하되, 모래, 진흙을 털어주며 다발로 묶어주는 조건으로 하고 500kg당 약 500엔에 구매하며, 완성 펠릿은 3000엔/톤에 판매되고 있는 실정이다(이치웅, 2004).

적의 80%가 산림인 이와테 현은 주요 목탄생산지로 열 이용을 중심으로 하고 있으며, 대부분 목탄이나 장작을 취급하여 목질 pellet에 대한 기대가 큰 곳으로, 일본 이와테 · 목질 바이오매스 연구회에서는 2000년 3월 일본무역진흥회의 신규분야 개척 전문가 파견 사업의 하나로 목질 바이오매스 관련 전문가를 스웨덴의 백쇼(Vaexjoe)에 파견하고, 행정기관과 민간기업과의 관계, 연소기기와 지역 열 공급 시스템, 기기의 인정제도, 목질 pellet의 제조시설, 산림조합의 역할 등 조사하게 하였으며, 지방 자치단체와 협력하여 현지에 경제성이 있는 목질 pellet 제조시설을 건설하고 있다.

또한, 사회정책으로서 원탁회의를 개최하고 환경형벤처사업을 육성하고 있으며, 환경친화성 주택정책에 목질바이오매스이용의 우대책을 실시하여 Chip보일러 및 이와테 현 pellet 스토브를 개발하고, 연소기기의 인정기관 설치하는 등 일반소비자에게 스토브를 이해, 보급시키고 있다. 그 예로써, 학교급식센터에 chip보일러와 보육원에 pellet보일러 설치할 것을 제안하고 있는데, 하이브리드(hybrid)시설을 도입하여 급식센터의 급식제조 시와 식기세척 시의 부족분이나 chip보일러의 back-up을 위해 필요한 등유보일러를 보조설치하게 하고 있다. (스웨덴에서는 필히 back-up보일러를 설치하고 있다)(손웅권, 2004).

바이오매스를 에너지자원으로 이용하는 바이오에너지에 대해 구미에서는 현재 FAO(Food and Agriculture Organization of United Nation), IEA의 바이오 에너지 부문(International Energy Agency, Bioenergy) 및 CEN(The European Committee of Standardization) 등 여러 기관이 연계하여 용어의 통일을 시도하여 그 결과 장래 ISO와 같은 국제 표준화단체에서 용어가 표준화될 것이다. FAO 시안에 의하면 바이오에너지는 대별해서 목질연료, 농업계 연료, 자치체계 부산물(Municipal Solid Waste, MSW)의 공통 그룹으로 나뉘며, 바이오매스의 에너지 변환 이용 방식은 직접연소, 열화학적 변환, 생물화학적 변환 및 기타 변환으로 분류된다. 그 이외에 식물유/식물 폐유는 메틸에테르 화하여 수송용 연료(바이오디젤, BDF)로 이용한다. 바이오매스 자원을 에너지로 이용하기 위한 변환기술로서는 직접 연소, 가스화, 바이오 가스 제조, BDF 제조 등이 있다(이치용, 2004).

## 제 2 절 열화학적 변환공정

현재 난개발에 의한 세계적인 삼림 면적의 감소에도 불구하고, 일본에서는 간벌 실시가 되지 않아 매년 9,000만<sup>m</sup>씩 삼림 체적이 증가하고 있어 토양의 보수능력의 저하 등 여러 가지 악영향이 생기고 있다. 따라서 이들을 유효하게 이용할 수 있는 방법을 연구 중이며, 그 하나로서 가스화에 의한 효율적인 에너지화의 연구를 하고 있다. 그 중 하나인 Chu Gai사의 간접가스화 방식은 보다 높은 열량의 가스를 얻기 위한 방법으로써, 무산소 하에서 원료 바이오매스의 열분해를 하게 된다. 실증시험설비에서는 시험관에 상당하는 부분을 가스화 반응 통으로 외열식 킬른을 사용하였으며, 열분해 후의 잔류물을 회수하여 이를 연소시킴으로써 주된 외부 열원으로 하고 있다. 850℃의 가스화에서는 고온으로 바이오매스의 탄소분과 수증기가 반응하는 수성 가스화 반응이 진행되기 때문에, 수소성분이 많은 가스를 얻게 된다. 한편 700℃에서는 수소성분이 줄고 메탄이 증가하기 때문에, 열량이 높은 가스를 얻게 된다(차원민, 2004).

일본 교토 부 야기초의 『야기 바이오에콜로지 센터』의 메탄 발효시설은 젓소와 돼지에서 나오는 분뇨로부터 혐기발효를 통한 소화가스를 이용하여 발전하고 폐열을 회수해 소화조의 가온과 관리시설에의 급탕과 난방에 사용하며 비육우의 분뇨는 탈수·고형화 하여 퇴비를 생산하고 농지에 환원하는 방식으로 젓소, 돼지의 분뇨를

수입 탱크에 투입하고 침사조에서 큰 물체를 제거하고 파쇄펌프로 분쇄하여 원수탱크로 보내져 교반한다. 소화탱크에서는 용해 액체온도 37℃에서 메탄발효의 중온소화 33일, 액체온도 55℃에서 25일간 고온소화를 실시하여 발생하는 바이오가스를 가스 홀더에 저류시키고 탈황 탑으로 보내 황화수소를 제거한 후, 가스엔진의 동력으로 발전기를 움직인다. 원수탱크로부터 소화액이 소화조로 넘쳐흐르면 응집제를 첨가하여 고형 분을 분리하고 분리된 액체성분은 배수처리시설로 보내져 유기물과 현탁물을 처리하고 오니는 다시 수입탱크나 발효탱크에 투입되며 고형성분은 퇴비화 시설로 옮겨져 발효를 거쳐 완숙한 퇴비로서 출하된다(이상근, 2004).

트래블링식 스토커 보일러 발전소는 재자원화, 에너지화로 목재산업의 발전과 자원의 순환적 이용을 시도하는 발전으로 생산한 연료는 연료탱크에 저장되고 고 수분 연료와 분리된 연료는 보일러로 보내져 연소되며 생산된 증기는 발전기에서 발전되고 터빈에서 나오는 증기와 전기는 공장에 공급된다. 고 수분 연료는 연료건조기에서 건조되고 보일러 연료로 공급된 고 연료건조기에서 열을 준 배가스는 백필터를 거치면서 정화되어 연돌을 통해서 배출된다. 역송 트래블링 화격자식 보일러는 2통수관 자연 순환 식으로 연소방식은 평형통풍, 연소실은 멤브레인 수냉벽으로 연소실 내의 복사열의 유효한 흡수를 도모한다. 과열기는 연소실 출구의 슬래그 스크린과 본체 전열 관과의 사이에 배치하고 연료는 체인식의 피더로서 공급량을 제어하면서 스프리터로 연소기상에 균일하게 살포된다. 열 회수 장치로 절탄기와 공기 예열기를 설치해 보일러효율 향상 도모하고 유인통풍기후에 고수분의 목재껍질을 예비 건조시킨 배가스 열교환식 건조기가 설치되어 있고, 보일러로부터 나오는 배가스 열은 유효하게 이용되고 백필터로 최종 집진 처리되어 연돌에서 배출된다. 터빈, 발전기 설비의 증기터빈은 추기 복수터빈으로 증기의 일부가 추기 증기로 추출, 수요 선에 공급됨과 동시에 일부는 소 내에서 소비되고 잔여증기는 전량발전에 기여, 급수탱크에서 순환 사용된다(손영목, 2004).

역송 화격자식 연소보일러인 일본의 목질 바이오매스 연소보일러는 추기복수터빈으로 목질연료는 시간당 약 9t를 소비하고 목질 연료 칩은 연료 공급 구에서 공급되며 화격자위에 균일하게 살포되어 연소공기를 공급한다. 연소실은 멤브레인 수냉벽 구조로 일부는 내화 캐스터블로 되어있고 연소실, 본체수관, 절탄기, 공기예열기에서 충분히 열 회수된 연소가스는 백필터에서 집진된 후 밖으로 배출되고 배출된 배가스 중의 가연물은 사이클론 집진기에 포집되어 연료와 함께 보일러에 재투입되는 시스템이다. 터빈·발전설비는 내부제어식 추기·복수터빈을 채택하여 터빈에 이송된 증

기의 일부는 합관공장의 프로세스증기로 이송되고 나머지 증기는 복수기로 보내어 전량 발전에 쓰이며 공장 측의 증기부하의 변동이 발생하는 경우에 증기유량을 제어함에 따라 안정된 발전량 확보가 가능하다. 열병합발전은 단일에너지원으로부터 열에너지와 전기에너지를 연속적으로 공급하는 시스템이므로 공장의 증기부하변동도에 맞도록 충분히 배려하여 설계할 필요가 있다(손응권, 2003).

바이오매스 에너지 변환공정에서 목질바이오매스의 직접연소는 연료의 성상, 연소량, 연소조건, 연소로의 구성 등의 인자들에 의해 연소효율 및 배출성분에 영향을 받으며 목질바이오매스의 가스화는 가스화장치에서 일산화탄소나 수소와 같은 위험성이 있는 가스를 생성시키므로 안전성 확보가 중요하고 생성가스에 함유되어있는 타르 제거과정이 설계되어 있지 않을 시 문제 발생하는 등 직접연소에 비해 설비가 복잡하고 제어가 어렵다. 목질바이오매스로부터의 에탄올 생산은 셀룰로오스와 목질소로 분해하여 당분으로 변환되고 당분을 효모나 유전자조작 미생물을 이용하여 발효 에탄올을 만들고, 증류나 분리 막을 활용하여 회수 및 농축하는 공정을 거친다. 바이오가스 제조는 축산폐기물의 메탄발효가 혐기성 조건하에서 고온발효 시에는 메탄농도는 50%, 중온발효 시에는 메탄농도 55~60%, 저온발효 시에는 메탄농도가 65% 정도의 바이오가스를 생성한다. 바이오디젤 제조는 인화점이 높아 저온시동이 어렵고, 발열량이 낮아 출력이 낮아지며, 점성이 높아 송유시스템의 개량이 필요하다. 목질펠릿은 최소발열량이 약 4,000kcal/kg, 함수율 8~13%, 무게 650kg/m<sup>3</sup>, 등유 1m<sup>3</sup>=펠릿 2.1t의 특성을 가지며 모양과 수분함유율이 일정해 자동운전기기에 적합하고 밀도 높아 수송에 적합하지만 습기에 약하고 성형에 에너지를 소비하며 연소 후 재가남기 때문에 처리가 필요하다(김영철, 2004).

바이오매스는 각 특성에 맞는 에너지 변환기술이 기대되고 있다. 탈수한 오니를 300℃ 정도로 가열 오니중의 유기성분을 증류상의 액체성분으로 변환시키는 직접유화 기술은 원료에 포함된 수분이 가열되어 고압의 증기가 발생하므로 압력용기가 필요하고 H<sub>2</sub>, CO가 필요 없어 원료의 건조공정이 불필요하며 원료의 탈수로 용적이 줄어 유리하고 오니의 에너지변환으로 기대되고 있다. 수송용 연료나 연료전지로서도 크게 유망 받고 있는 바이오매스를 가스화해서 합성가스를 만들어 메탄올이나 DME를 합성하는 기술은 메탄올을 탈수하면 DME가 되므로 둘은 거의 같다고 보고 그대로 디젤차에 쓰이며 유력한 수송용 연료로서 기대된다. 채종유나 야자유를 메틸 에스테르화해서 제조하는 에테르화반응 기술은 대형화한 경우 부생하는 글리세틴의 적절한 처리가 필요하다. 생물화학적 변환은 에탄올발효가 주된 프로세스로 리그노셀

루로오스를 황산으로 당화해서 형질 전환한 셀룰로오스 분해요소로 좋은 에탄올을 제조하고 메탄발효는 축산폐기물을 대상으로 메탄가스로 발전하는 것이 주류지만 압축하면 수송용 연료로 사용 가능하다(김춘영, 2003).

HarboPre플랜트는 목재 칩을 연료로 한 세계유일의 상용가스화 열병합플랜트로서 발전효율은 30%정도이며, 총합에너지이용효율은 85%이상으로, 하루 41.2톤의 목재 칩을 가스화반응로에 투입, 가스화하여 가스엔진을 돌려 약 1.4MW의 발전을 한다. 이렇게 해서 생산된 에너지를 이용하여 인근의 612가구에 난방용 온수를 공급하고, 다량의 타르 수는 Vahlund가 독자적으로 개발한 정화 프로세스로 처리하여 해결한다.

이러한 HarboPre플랜트의 설비는 가스화 반응로, 생성가스 정화시스템, 가스엔진, 중질타르 분리시스템, 타르함유배수처리시스템(TarWatC Sys.)으로 구성되어 있다. 우선적으로 가스화 반응로에 반입되는 목재 칩의 표준사이즈는 16~100mm로 3mm 이하의 미생물은 전투입량의 10%이하로 제한하여 함수율 35~50%(평균42%)을 유지하고 C 50.0%, H 6.2%, O 42.6% 및 회분 10%를 조성한다. 기동 및 정지가 용이하며, 턴다운 10%의 운전도 수분 내에 이루어지고, 반응로 내에서의 알칼리성 회에 의한 응착 방지를 위해 최고온도 1,100℃로 제한하고 있다. 가스화로의 크기는 외경 2.5m, 높이 8m로 열량기준 4.75MW를 처리하는데 함수율은 42%로 하루 41.2톤에 해당한다.

플랜트의 생성가스 정화시스템은 가스화 반응로에서 약 75℃에서 1m<sup>3</sup>N당 약 80g에 달하는 다양한 타류분과 산류를 포함한 생성가스를 냉각하여 입자상물질과 타르 및 수분을 응축, 분리, 습식전기집진기를 거쳐 잔류 에어로졸과 더스트를 제거한다. 정제 후 타르와 더스트는 25mg/m<sup>3</sup>N이하가 되며, 가스열량은 5.6MJ/m<sup>3</sup>N, 평균조성 H<sub>2</sub> 19.0vol%, CO 22.8vol%, CH<sub>4</sub> 5.3vol%, CO<sub>2</sub> 11.9vol%, N<sub>2</sub> 40.7vol%가 된다. 가스엔진에서 저칼로리가스의 최대발전량은 각 768kW이지만 2기에 대한 실제 운전실적은 1.38MW로 29%의 발전효율을 지닌다. 고온의 가스엔진배기는 가열용 열원으로 사용됨과 동시에 배수정화시스템에도 활용하고 있으며, 최종적으로 약 100℃로 냉각되어 연돌로 배출된다. 이 때 총 열 회수량은 약 2.75MW로 발전량을 포함할시 총 에너지이용효율은 87%를 보인다. 중질타르분리시스템은 2단의 열교환기와 전기집진기로부터 배출된 배수를 타르/수 비중분리기에서 열량 약 27MJ/kg의 중질타르와 열량 약 14MJ/kg의 경질타르로 분리 배수시킨다. 중질타르는 별도로 가열탱크에 저장하여 방부제용도로 사용하여 직접 발전효율을 향상시킨다. 타르함유배수처리시스

템(TarWatC Sys.)은 타르가 섞인 배수에 가스엔진의 고온배기를 통과시켜서 가연성의 경질타르와 기분타르가 포함된 조스팀으로 분리하고, 경질타르는 공기와 혼합하여 반응기로 보내어 연소시킨다. 이때, 조스팀을 불어넣어 잔존하는 타르를 완전히 연소시켜 정화한다. 이상, Harbortre 플랜트를 구성하고 있는 각 설비들을 운전하여 발생된 열은 kWh당 약 9엔, 전기는 kWh당 약 11.5엔에 판매되는데 열의 수요는 계절변동에 따라 큰 영향을 받기 때문에 수요가 적은 하절기에는 가동률을 낮추기도 한다(손웅권, 2004).

### 제 3 절 사용된 기술 및 제품

Sea Tech에서는 미활용 바이오매스의 양이 종래의 대규모 집중형 발전의 연장기술로는 성립하기 어려운 점이 있다고 보고 바이오매스 발전플랜트를 이동 가능한 설비로 하여 바이오매스의 발생지를 순회하여 처리와 에너지회수를 수행하는 새로운 구상을 제안하였는데 이 방법은 수송비가 저감되며, 가동률이 향상되었다. 이 구상은 댐 유목과 산간지역에서 발생하는 폐자재, 왕겨·벼짚, 벌채수목을 비롯한 여러 가지 미활용 바이오매스에 적용가능하다. 이동식을 전제로 하여 소규모 설비에서도 높은 발전효율이 유지되는 시스템을 선정하고 댐 부지에서는 에너지회수, 열효율이 높은 발전시스템이 요구된다. 1일 5톤의 댐 유목을 처리하여 발전단출력 140kW, 송진단출력 93kW의 설비로 송진단에서의 발전효율은 20%를 상회할 것으로 기대되며 종래의 증기터빈방식에 비해 극히 높은 발전효율의 달성이 예견된다. 경제성면에서는 종래의 발전소와 동일한 운전원 체제에는 무리가 있고 신뢰성 높은 감시·제어기술의 연구·개발이 중요시 되고 있으며 적극적인 소비전력소비량저감, 합리적인 가스 정화 시스템 구축의 검토가 필요하다. 이와 같이 경제성을 고려하여 이동식 발전설비와 소형의 바이오매스 회수차를 적절히 운용하고 경제효율을 높이기 위한 검토가 필요하다(이종찬, 2004).

중국의 바이오매스 가스화 공정은 1세대 상향식 고정층 가스화기, 2세대 하향식 고정층 가스화기, 3세대 순환 유동층 가스화기로 구성되고 가스화 기술은 바이오매스 폐기물가스화를 가열 기구에 연결하고 가정 취사용으로 쪼의 가스화, 바이오매스 가스화와 동력발전시스템 등으로 이용되며 경제성면에서 모든 요소와 바이오매스 가격을 고려해 바이오매스 가스화 시스템의 에너지 생산의 전반적인 비용을 계산해보

면 바이오매스에서의 전기 생산비용은 소규모 석탄 화력발전소와 비슷하나 디젤 엔진 발전소보다 훨씬 낮다(김재설, 2004).

바이오매스는 고효율 에너지 회수 기술로 나아가고 있는데 가스화 방식은 가스화제 성분 여부에 따라 생성가스 중의 질소농도와 합성가스의 발열량이 바뀌며 저온에서는 메탄화 반응으로 발열량이 증대된다. 가스터빈 발전은 가스화 복합발전이 시행되고 있으며 소규모에서도 효율이 별로 저하하지 않으며 발전 효율을 시산한 결과 처리능력 743톤/일의 경우에, 발전량 53.1MW, 가스화로의 열효율77%, 터빈의 발전효율은 42%, 시스템 전체 효율은 33%로 예상된다. 가스화 가스엔진 발전은 가스화에서 얻은 CO(18~20%)과 H<sub>2</sub>(18~20%)로 구성되는 합성가스를 생각하여 가스밀도를 높이고 세정한 후에 공기와 함께 디젤엔진에 도입하여 발전하는 5~100kW의 소규모 발전 시스템이다. 가스화 메탄올합성은 수증기개질 반응을 실시한 합성가스를 산화동, 산화아연계의 촉매반응으로 메탄올을 합성할 수 있다.

이와 같이 가스화 기술은 고도로 이용되고 진화하고 있는데 제 1세대 가스화 기술은 가스화, 용융, 소각으로 환경문제에 고도로 대응할 수 있는 폐기물 처리기술이고 제 2세대의 고온, 혼합가스의 chemical recycle(고발열량 폐기물용)에서 제 3세대의 저온, 분리의 가스 chemical recycle로 진화하고 있다. 이 기술은 폐기물 처리기술이라고 말하는 것보다 CO<sub>2</sub> 삭감에 대응하는 에너지 변환기술이다(이치웅, 2004).

목질바이오매스 생산시스템으로서 Finland의 서해안, Pietarsaari의 Alholmens Kraft발전소 등지에서는 CRL을 도입하고 있다. CRL(Composite Residue Logs)이라고 하는 1개가 400~600kg에 달하는 상태로 가공하는 연료화 시스템은 키가 큰 임지 잔재를 산간의 임지에서 칩(chip)화하지 않고 통나무와 같은 모양으로 가공하여, 산간임지에 방치, 수분을 증발시킨 후에 통나무 운반트레일러로 플랜트에 반입하여 수분을 증발시킨 후, 통나무 운반 트레일러로 플랜트에 반입하여 사용하는 연료화 시스템이다. 이는 통나무와 같이 취급이 가능하고, 밀도가 크며, 산간 임지에서의 칩화가 불필요하기 때문에 운송비용이 적게 소요된다. 현재 세계 최대의 바이오매스 열병합 시스템을 구축하여 목질 바이오매스 45%, 피트 45%, 중유와 석탄 10%의 연료를 사용하여 550MW 용량의 보일러로 연소해서 240MW의 발전과 100MW의 프로세스 증기를 생산하고, 60MW의 지역난방을 함과 동시에 전력은 주주인 6개 기업체에 송전, 프로세스 증기는 인접하는 제지회사에 공급하고 있다(차원민, 2003).

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 바이오매스의 발생 및 이용현황

#### 1. 바이오매스 발생량

예비조사 결과를 토대로 가스화가 가능한 농업부산물 바이오매스로서 과수원에서 전정된 가지와 고추, 깨 등과 같은 발작물 부산물을 선정하였다. 과수는 포도, 배, 사과, 복숭아를 중심으로 하였고, 발작물의 경우 부산물이 농지에 그대로 방치되거나 소각되는 고추와 유지작물을 대상으로 하였다. 농업부산물 바이오매스의 발생량의 조사는 과수원이나 밭 등의 현장을 직접 방문하여 단위 면적당 작물 또는 과수의 식재 수를 확인하고, 개체별로 발생량을 모아서 무게를 측정하였다. 자료의 대표성을 확보하기 위해서 각각의 품목별로 10개 내외의 다른 과수원 혹은 농지를 조사하였다. 열량분석과 함수비 측정을 위해 각각의 과수원이나 밭에서 여러 지점의 시료를 수집하였다.

조사 대상지역은 과수의 경우 경기도 안성시를 포함 충청북도 충주시를 포함하였으며, 발작물은 안성시를 중심으로 하였다. 발생 시기에 대한 조사는 11월 초부터 3월 말까지 현장 조사 및 설문을 통해서 수행하였다. 1,2차년도 모두 수행하였고 2차년도에는 1차 년도에 수행한 바이오매스 단위면적당 발생량에 대한 조사를 보완하여 보다 실질적인 바이오매스 부존량에 대한 조사를 수행하였고 가을철 전정이 이루어지는 포도 거봉 재배지역(재배단지)에 대한 조사를 보완하였다. 아래의 그림은 과수와 발작물의 전정 전·후의 전경, 전정 가지의 야적전경을 나타내고 있다.



[Photo 3-1] 고추밭 부산물 소각 직전 야적전경 (안성)



[Photo 3-2] 깨밭 부산물 탈곡 후 야적전경 (안성)



[Photo 3-3] 배농가 전정 가지 및 전지작업 전경 (충주)



[Photo 3-4] 복숭아 전정 전후 (충주, 화성)



[Photo 3-5] 사과농가의 전지모습 및 전정 후 전경 (충주)



[Photo 3-6] 포도농가의 전정된 가지 (안성)

1,2차 년도의 단위 면적 당 식재 수와 부산물 양을 현장에서 직접 측정하여 얻은 결과는 Table 3-1에 제시된 바와 같다. 유지작물이나 고추와 같이 열매를 수확하고 나머지는 농지에 부산물로 남게 되는 경우에는 농지에 남아 있는 가지 등이 전량 활용이 가능하다. 따라서 발작물의 부산물은 뿌리 부분을 제외하고 지표면 상부에 노출되어 있는 가지 전체를 부산물로 간주하였다. 반면에 과수는 전지된 가지를 모아서 과수 1 주당 발생량을 측정하고 과수 1 주당 거리를 측정하여 단위면적당 바이오매스 발생량을 산정하였다.

[Table 3-1] 부산물별 단위면적당 발생량

Biomass	No. of samples	Unit production (kg/m <sup>2</sup> )
Pear	19	0.128 ~ 2.738
Grape	13	0.267 ~ 5.104
Apple	12	0.051 ~ 3.747
Peach	6	0.085 ~ 0.957
Pepper	20	0.186 ~ 0.480
Sesame	10	0.088 ~ 1.040

과수 중에서는 재배단지로 구성되어있는 포도의 경우가 최고 5.104kg/m<sup>2</sup>로 가장 무겁게 나타났으며 복숭아가 가장 가볍게 나타났다. 발작물의 경우 적게는 0.088kg/m<sup>2</sup>에서 많게는 1.04kg/m<sup>2</sup>로 나타났다.

## 2. 농촌지역 바이오매스의 이용현황

### 가. 볏짚

우리나라에서 생산되는 농업부산물 바이오매스 중 가장 많은 양을 차지하는 것으로서 대부분 축산농가에서 깔짚이나 사료로 활용되고 있다. 볏짚 발생량은 약 650kg/10a 수준으로 1988년 기준 총 열량은 2,546×10<sup>10</sup> kcal이나 축산농가에서의 수요와 경합상태이다. 축산농가로부터 수요가 많은 시기에는 5ton트럭에 최고 약 60여만 원 정도에 거래가 되는 등 에너지생산을 위한 바이오매스로서 가능성이 비교적

낮다. 축산농가의 수가 매우 적거나 가격이 저렴한 중국산 조사료 수입비중이 높아지는 경우에는 제한적으로 활용이 가능하다.



[Photo 3-7] 수확 후 볏짚 수거 전 모습

#### 나. 왕겨

경기도 관내에 위치하고 있는 총 8개 미곡처리장을 대상으로 왕겨의 처리실태를 조사한 결과 농협자체에서 처리하는 곳은 단 1곳뿐이었고 대부분 수거업자에 의해서 처리되고 있었다. 미곡처리장에서 왕겨의 판매가격은 kg당 15원에서 30원 수준이었으며 팽연왕겨(분쇄한 왕겨)의 경우에는 50원까지도 판매되고 있었으며, 왕겨발생량은 적게는 처리 전 중량의 약 15%에서 많게는 약 20% 수준으로 나타났다.



[Photo 3-8] 미곡처리장에서의 왕겨 처리 모습

왕겨는 최종적으로 대부분 축사의 바닥 재료로서 활용되고 있었으며 일부는 사료 또는 공산품제조 공장에서 원료로 활용되고 있었다. 따라서 에너지 생산을 위한 바이오매스로서 활용가능성이 매우 희박하다. 왕겨의 발생은 특정시기에 집중되지 않고 대부분 연중 일정하게 이루어지고 있었다. 왕겨의 처리실태는 아래의 Table 3-2에 제시한 바와 같다.

[Table 3-2] 미곡처리장에서의 왕겨 처리 실태

RPC	발생 시기	품종	발생량	처리상태	가격/kg	사용실태
보개	연중일정	추청	17%	업자에 의해 수거	25원 ~30원	공산품(헬멧제조), 사료
양성	연중일정	추청	16.5%	업자에 의해 수거	25원	사료, 퇴비
일죽	연중일정	추청, 고시히까리	18%	업자에 의해 수거	15원	축사 깔재
안중	겨울多, 여름小	추청	20%	농협자체 처리	10원	발효퇴비로 이용
송탄	일정 하지 않다	추청	20%	업자에 의해 수거	10원 ~20원	축사 깔재
팽성	봄多, 여름小	추청, 고시히까리	15% ~18%	업자에 의해 수거	15원	축산농가
안성 곡산	연중일정	추청,일품,수라, 오대,화송,대안	17%	업자에 의해 수거	23원, 분쇄50원	축사 깔재, 강아지사료
협성 농산	연중일정	추청,수라,대안	18%	업자에 의해 수거	20원	축사 깔재

#### 다. 과수 부산물

과수원에서 생산되는 부산물 바이오매스는 비교적 재배면적이 넓은 포도, 사과, 배, 복숭아를 중심으로 조사하였다. 포도의 일부 품종을 제외하고 전정이 대부분 2월 전후에 이루어져서 바이오매스발생이 시기적으로 집중되는 것을 알 수 있었다. 전정된 가지는 많은 경우 빨감으로 이용하거나 농지 주변에 방치하고 있었으며, 일부 농가에서는 파쇄기를 이용하여 파쇄 후 농지에 살포하고 있었다. 대부분의 과수농가에서는 전정된 가지의 처분에 어려움을 호소하고 있었다. 따라서 에너지 생산을 위한 바이오매스로서 활용가능성이 높은 것으로 판단된다. 과수부산물의 발생시기 및 처리실태는 아래의 Table 3-3에 제시한 바와 같다.

[Table 3-3] 과수부산물의 발생 시기 및 처리실태

	품 종	발생 시기	판매의사	이 용 실 태
포도	버팔로, 델라웨어, 신로또, 캠벨, 청포도	2월초 전지	95%정도 - 판매의사 있음	파쇄 하여 땅에 뿌려 퇴비로 사용 하고 빨감으로 사용 하거나 그냥 태운다.
	거봉, 마스카토	가을전지		
	시스카드	11월 전지		
사과	부사, 아우리, 홍노, 친추	수확 후부터 3월전까지	5%정도 - 판매의사 없음	그냥 태우거나 빨감으로 사용 모아서 울타리로 사용
배	신고, 감천, 원황, 화산, 장십량	잎이 떨어지고 2월말까지	판매의사 없음	끓은가지는 추려내고 가는 가지는 파쇄 하여 퇴비로 사용 그냥 태우거나 빨감으로 사용
	미백, 월미, 얼미, 유명, 황도, 친중도	동사 때문에 2월~3월		

라. 발작물 부산물

예비조사에 포함된 발작물은 고추, 깨, 옥수수, 콩 등이었으나 옥수수와 콩은 사료 등으로 활용하는 반면 고추와 깨는 많은 경우 농지에 그대로 방치하고 수확 후 대부분 소각처리하고 있었다. 고추의 부산물은 대부분 가지이며 농지에 방치하고 있는 상태로서, 깨는 묶어서 탈립한 후 한 곳에 모아둔 상태가 대부분이었다. 고추나 깨와 같이 열매만을 수확하고 가지의 활용성이 거의 없는 발작물은 현재 대부분 소각처리하고 있기 때문에 에너지생산용 농업부산물로서 가능성이 높다.

마. 기타 바이오매스

농촌지역에서 생산되고 에너지생산을 위해서 활용 가능한 바이오매스로서는 축분과 산지에서 간·별목 등이 있다. 축분의 경우 함수비가 높아서 열화학적 방식의 에너지생산보다는 혐기성발효과정을 통해서 메탄생산을 하는 방식이 유리하다. 조사에 의하면 축분의 대부분은 퇴비 생산에 이용되고 있었다. 산지에서 생산되는 간·

벌목은 과수원의 부산물과 거의 유사한 특성을 가지므로 에너지원으로 활용할 수 있는 바이오매스로 판단된다. 그러나 간·벌목의 수거 등의 문제가 있기에 본 연구에서는 활용대상 바이오매스에 포함하지 않았다. 산지의 목질계 바이오매스가 에너지원으로 적극적으로 활용되지 못한 이유는 양질의 목재의 경우 건축이나 각종 자재로 이용되고 있고, 운반이나 저장이 매우 어려운 점을 들 수 있다. 안성시 산지에서 생산되는 간·벌목 현황은 아래의 Table 3-4에 제시한 바와 같다.

[Table 3-4] 안성시 산지에서 생산되는 간·벌목 현황

구 분		총계	임목지계	침엽수	활엽수	혼합림	무림목지·죽림
국유림	산림청소관	1,430	1,364	424	221	719	66
	타부처 소관	41	37	11	5	21	4
공유림	도유림	12	12	-	-	12	-
	군 유림	666	665	307	73	285	1
사유림	사업지	20,320	19,952	8,675	2,580	8,697	368
	제한지	3,098	3,071	1,717	361	993	27
계		25,567	25,101	11,134	3,240	10,727	466
비 고		<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ 참나무류 (6종) → 표고버섯골목, 일부는 숯</li> <li>나머지류 (니기다 소나무) → 톱밥</li> <li>잣나무는 거의 벌목하지 않는다.</li> <li>☞ 벌목 시 처리는 산주가 시청에 허가받으면 가능하다.</li> <li>벌목한 나무는 산주에 따라서 처리한다.</li> <li>벌목시기는 산주가 필요할 때 벌목한다.</li> <li>(겨울철에 가장 많이 한다.)</li> <li>☞ 국유림은 수원 국유림관리사무소에서 관리한다.</li> </ul>					

주) 안성시 산림통계

## 제2절 바이오매스 부존특성과 수집체계

### 1. 농산 바이오매스 부존특성

#### 가. 바이오매스별 발생성상 및 함수비 평가

과수별로 전정된 가지의 발생량에 차이가 있었으며 품종별로도 차이가 있었다. 특히 재배 년 수에 따라서 부산물의 단위면적당 발생량은 크게 차이가 있었다. 재배 년 수가 오래된 곳에서는 가지의 직경이 20cm 내외로 굵은 가지도 있었으나 이러한 것들은 농가에서 땀감용으로 적극 활용하고 있는 상태였다. 과수부산물의 경우 전정 직후 함수비가 40~50%의 분포를 보였다. 포도는 상대적으로 낮은 함수비를 보였다. 함수비가 가장 높게 나타난 배는 전지 당일에 채취한 시료가 많았기 때문이다.

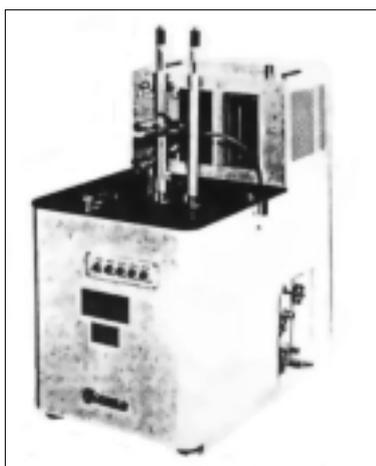
[Table 3-5] Moisture content of biomass samples

Biomass	No. of samples	Moisture content (%)
Pear	19	53.6
Grape	13	40.9
Apple	12	52.6
Peach	6	41.6
Pepper	20	15.0
Sesame	10	16.3

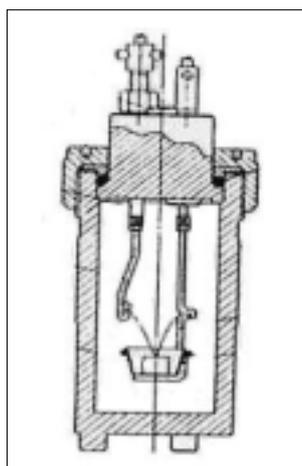
반면에 고추나 유지작물은 가을철 수확 후 노지에 방치되기 때문에 동절기에 들어서 함수비는 20% 미만으로서 매우 낮게 나타났다. 특히 고추 가지와 같은 부산물은 모아서 소각하고 있기 때문에 농지에서 일정기간 자연 건조시킨 다음, 체계적인 수집, 수거체제를 갖추어 활용한다면 이용 가능성이 매우 높다. 과수원 및 밭작물의 부산물 모두 농작업을 위해서는 농지로부터 제거되어야 하므로 농지 주변에 쌓아 두거나 모아서 소각되고 있는 상태이다.

## 나. 발열량 및 원소분석

현장조사 시기에 얻은 시료는 당일 2~3 cm 로 절단한 후, 105℃ 조건에서 24시간 건조하여 Bomb 열량계를 이용하여 측정하였다. 열량분석은 1 mm 내외의 미세분말로 만들어 바이오매스 종류별로 혼합시료를 만들어 2반복으로 하였다. 점화에 필요한 점화선과 분말로 만들어진 시료를 싸기 위해 이용된 내피지의 열량은 별도로 제하여 열량을 계산하였다. 열량분석을 위한 시료는 건조하지 않은 시료를 이용하였으며, 함수비를 별도로 열량분석과 함께 측정하였다.



(a) Main body with thermometers



(b) Bomb

[Figure 3-1] Bomb Calorimeter (Yoshida Inc., 1013-B)

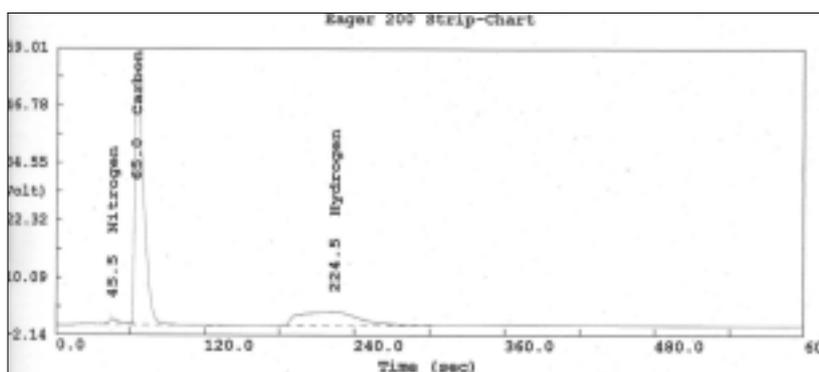
열량계를 이용하여 측정된 건조된 바이오매스의 단위중량당 열량은 표 2에 제시된 바와 같이 4,500 kcal/kg 내외의 범위로 나타났다. 문헌에 의한 저위발열량은 포플러가 4,620 kcal/kg, 기타 목재의 경우 대체로 4,500 kcal/kg의 범위에 있다(Honda, 1986). 단위면적당 발생량과 단위중량당 발열량을 이용하여 작목별 단위면적당 열에너지량은 2,000~6,300 kcal/m<sup>2</sup>로 나타났으며 사과가 6,267.6 kcal/m<sup>2</sup>로 가장 높게 나타났다. 고추와 유지작물의 부산물이 목질계인 과수 가지에 비해 약간 낮은 열량을 가지고 있으나 비슷한 수준임을 알 수 있다. 이들 발작물의 부산물은 함수비가 낮아 건조를 위한 전처리가 필요 없이 소각이나 열화학적 공정에 활용될 수 있다.

[Table 3-6] High heating values of biomass samples

Biomass	Dry basis high heating value (kcal/kg)	Wet basis high heating value (kcal/kg)	Unit energy production (kcal/m <sup>2</sup> )
Pear	4,532	2,702(35.1)	3,810.93
Grape	4,486	3,176(22.9)	4,742.90
Apple	4,599	2,933(32.8)	6,267.60
Peach	4,601	3,599(24.1)	2,097.68
Pepper	4,469	4,089(11.3)	1,414.72
Sesame	4,385	3,957(12.4)	1,955.84

( ) : moisture contents in % after 2 week indoor drying

일반적으로 회분 함량비가 1%이고 습량기준 함수비가 10% 정도인 목재의 경우 약 4,000 kcal/kg 내외, 농업부산물은 회분의 비율이 5~20% 수준으로서 함수비가 습량기준 10%수준에서 저위발열량은 3,000~3,500 kcal/kg의 범위에 있다. 이러한 바이오매스를 열분해 또는 탄화공정을 통해서 숯과 같은 고형 연료로 전환시키는 경우 발열량은 약 2배전도 높아져 목재에서 얻어진 숯이 7,500 kcal/kg, 농업부산물에서 얻어지는 숯은 약 6,000kcal/kg 정도의 저위발열량을 갖는다(Wereko-Brobby and Hagen, 1996). 축분은 회분함량이 대체로 20~25%이며 습량기준 함수비가 30% 수준일 때 2,400 kcal/kg이므로 축산분뇨의 처리와 연계하여 에너지를 회수하는 방안도 고려할 만하다.



[Figure 3-2] Result of elementary analysis for Pepper

원소 분석기를 이용하여 시료를 주요 원소 C, H, N, S에 대해서 분석하였다. 원소 분석기에서는 약 1800℃에서 연소된 후, 반응 관에서 환원되고 컬럼을 통과하면서 이동속도에 따라 원소별로 분리되어 검출. 원소 분석기는 CE Instrument 사의 EA1110을 이용하였고, 대부분 C가 45% 내외, N이 1% 이하, H가 6% 내외로 나타났다. 목재의 원소구성 비율이 C가 50% 내외, H가 6.5% 내외, N이 0.1%이하, O가 40% 수준이고 회분은 0.2~2.2%를 차지하는 것과 비교하면, 전정된 가지의 경우 N이 상대적으로 많고 H와 C가 다소 낮음을 알 수 있었다. 전정된 가지는 수피의 비율이 상대적으로 많아 회분과 N이 일반 목재에 비해 다소 높게 나타난 것으로 보인다. 일반적으로 회분함량이 1% 수준인 목질계 바이오매스에 비해 회분함량이 20% 정도인 부산물 바이오매스는 열량이 약 19% 정도 낮은 것으로 알려져 있다 (Werek-Brobby and Hagen, 1996).

[Table 3-7] Result of elementary analysis for biomass

Biomass	Nitrogen(%)	Carbon(%)	Hydrogen(%)
Pear	0.70	46.54	5.95
Grape	0.65	48.66	6.10
Apple	0.66	46.42	6.00
Peach	0.93	47.62	6.02
Pepper	1.16	42.29	5.65
Sesame	0.65	44.65	6.02

\* Sulfur is below the detection limit

#### 다. 단위면적당 에너지 및 부존량

단위면적당 발생량과 단위중량당 발열량을 이용하여 단위면적당 열량을 산정하였으며, 이를 이용하여 에너지 부존량을 산정하였다. 단위면적당 농업부산물의 발생량과 습량기준 발열량을 이용하여 단위면적당 에너지 밀도를 환산한 결과는 Table 3-8에 제시된 바와 같다. 여기에서 재배면적은 2001년도를 기준으로 하였다. 사과 과수의 부산물 에너지 밀도가 가장 높은 6,268 kcal로 나타났고, 복숭아가 가장 낮은 2,098 kcal로 나타났다. 전지된 가지의 단위면적당 중량과 직접적인 관계를 갖는다. Hong et al.(1989)에 의한 조사결과에서도 사과가 가장 높은 에너지 부존가치를 갖는

다고 하였고, 본 연구결과에서도 같은 수치를 나타내고 있다. 발작물의 경우 약 1,500 kcal/m<sup>2</sup> 수준으로 나타났다. 전국을 기준으로 바이오매스 에너지 부존량의 경우 과거 동력자원연구소(현 에너지기술연구원)에서 수행한 연구결과와 비슷하게 나타났다.

[Table 3-8] Biomass energy production for different biomass

biomass	Unit energy production* (kcal/m <sup>2</sup> )	Ansung		Kyonggi		National	
		Area	TOE	Area	TOE	Area	TOE
배	3,810.93	1,271.7	4,846.4	4,345	16,558	25,535	97,312
포도	4,742.90	830.0	3,936.6	3,485	16,529	26,803	127,124
사과	6,267.60	52.8	330.9	381	2,388	26,328	165,013
복숭아	2,097.68	51.9	108.9	1,038	2,177	14,412	30,232
고추	1,414.72	353.4	500.0	6,073	8,592	76,395	108,078
깨	1,955.84	201.4	393.9	8,134	15,909	72,595	141,984
Total		2,761.2	10,116.7	23,456	62,153	242,068	669,743

\* Dry basis high heating value

TOE : tons of oil equivalent (10<sup>7</sup> kcal)

안성, 경기지역을 포함하여 국내 총 재배면적을 기준으로 계산된 에너지양을 석유 환산톤으로 계산한 결과, 각각 10,117 TOE, 62,153 TOE, 669,743 TOE로 나타났다. 에너지 전환효율이나 가채량 등을 고려할 때 부존량의 일부만이 연료로 전환이 가능하겠지만, 해당 부산물이 집중적으로 발생하는 단지별 이용계획을 수립하여 적절한 규모를 결정하여 활용설비를 갖추어 이용한다면 활용성이 크다고 볼 수 있다.

과수농가에서 발생하는 부산물은 재배년수에 따라서 큰 차이가 나타났으므로 보다 정확한 에너지 밀도를 제시하기 위해서는 과수에 대해서는 재배년수나 관리 현황 등을 포함한 조사가 추가되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 현장조사에서 재배년수나 품종 등에 따라서 발생량이 크게 차이가 나는 것으로 파악되었기 때문에 발생량에 대한 정확한 자료를 구하기 위해서는 장기적으로 다양한 조건에 대한 조사가 이루어져야 할 것이다. 안성시의 경우 배와 포도재배 면적이 매우 넓고 단지로 형성되어 부산물 바이오매스의 에너지이용을 위한 여건이 대단히 우수하다. 재배단지가 형성된 지역에서는 바이오매스의 수거 및 운반에 드는 비용이 상대적으로 낮으므로

조건이 유리하다고 판단된다.

#### 라. 바이오매스 에너지 시설규모의 산정

안성시 일부 읍면단위에 대해서 지역단위 에너지 부존량을 산정하였다. 바이오매스를 이용하여 가스화장치 또는 가스화(Gasifier)를 이용하여 연료가스를 얻는 경우 약 72%(BIOMASS CONVERSION AND TECHNOLOGY, 1996)로 알려져 있고, 내연기관의 열효율이 약 25% 수준, 그리고 발전기의 효율이 90%라고 하면 바이오매스를 이용한 발전효율은 약 16.2%로 추정할 수 있다. 즉 1kWh 전력생산에 필요한 이론적인 열량은 860 kcal 이므로,

$$860 \text{ kcal/kWh} / 0.162 = 5,309 \text{ kcal/kWh}$$

또한 전력생산을 위한 시설의 가동률을 연간 60%로 가정한다면, 바이오매스 소비량을 (B, kcal)라고 할 때 발전시설의 규모(E, kW)와의 관계는

$$5,309 \text{ kcal/kWh} \times (E \text{ kW} \times 8760 \text{ hr/year} \times 0.6) = B \text{ kcal}$$

$$E = B / (2.8 \times 10^7 \text{ kcal}) \text{ 또는 } E = B / 2.8 \text{ TOE}$$

같은 방법으로 효율이 80% 이상인 열병합발전을 이용한다면 바이오매스를 이용한 발전효율은 약 51.84%로 추정할 수 있다.  $860 \text{ kcal/kWh} / 0.5184 = 1658.95 \text{ kcal/kWh}$ 이다.

$$E = B / (0.8 \times 10^7 \text{ kcal}) \text{ 또는 } E = B / 0.8 \text{ TOE}$$

안성시의 연간 바이오매스 부존량은 10,117 TOE 이므로 이 가운데 약 50%만이 가채량이라고 가정하더라도 바이오매스를 이용한 발전시설의 규모는 각각 1,800 kW 이상, 6,000 kW 이상이 가능하며, 유사한 방식으로 경기도는 각각 43 MW, 151MW, 전국적으로는 각각 119 MW, 418MW 이상으로 추정할 수 있다.

[Table 3-9] Biomass energy potential in Ansung

	Area (ha)							TOE	Power Generation Capacity** (kW)	
	Apple	Pear	Peach	Grape	Sesame	Perilla	Pepper*		Internal combustion engine	Cogeneration
Kongdo	1.3	196.6	6.9	21.1	12.4	10.5	4.7	914.6	229	800
Bogae	0.8	64.7	1.6	9.8	25.0	7.0	0.0	363.0	91	318
SeoUn	2.8	270.7	7.6	354.9	0.7	0.5	0.2	3842.3	961	3,362
Miyang	3.8	200.3	16.0	121.7	10.2	0.0	0.0	1735.2	434	1,518
Samjuk	4.1	23.7	2.3	4.9	1.5	0.3	0.2	135.9	34	119

\* incomplete data

\*\* assuming 70% of total biomass is available for power production

TOE : tons of oil equivalent ( $10^7$  kcal)

안성시 관내 과수농가가 밀집한 일부 면단위 지역에 대해 부존량의 70%가 가채량이라고 가정하고 설치가능한 발전시설의 규모를 산정하면 위의 표와 같다. 배와 포도재배면적이 넓은 서운면과 미양면은 각각 950, 400 kW와 3, 1.5 MW 이상의 발전시설의 도입이 가능하다고 추정할 수 있다. 과수단지과 같은 지역에서는 단위면적당 에너지 가채량이 높고 수송비 등과 같은 비용이 낮으므로 타당성은 더욱 좋아지며, 본 연구에서 포함하지 않은 기타 부산물 바이오매스를 추가하는 경우 도입여건이 더욱 개선될 여지가 있다.

안성시 서운면과 미양면의 연간 전력량을 조사한 결과 각각 약 3,200 MWh, 5,600 MWh 이다. 바이오매스 시설규모 산정에서 보았듯이 서운면과 미양면에 각각 950kW, 400kW 발전시설을 도입한다면 연간 약 8,322 MWh, 3,504 MWh 의 전력을 생산할 수 있다. 이것은 서운면과 미양면의 연간 전력사용량을 고려해볼 때 바이오매스의 수집과 수송 등이 용이한 곳에 발전설비를 도입하여 기존의 에너지와 함께 사용하면 에너지 수급 가능성과 함께 대체에너지로의 활용성도 높아질 것으로 판단된다. 나아가 발전시설을 열병합 발전소로 건설하면 활용성이 더욱 높아질 것으로 생각된다.

마. 에너지 활용

서운면 북산리와 신촌리 지역에 대해 과수단지와 유직 작물의 바이오매스 부존량을 조사했다. 서운면은 포도와 배 단지가 대부분이지만 조사대상 지역은 포도단지로 이루어졌다. 재배지 면적과 단위면적당 발생량을 이용하여 조사대상 지역의 부존량이 107.437 TOE로 조사되었다.

[Table 3-10] biomass energy in Buksanri & shinchunri

Biomass	발생량(kcal/m <sup>2</sup> )	재배지수	재배면적(ha)	TOE*
Grape	4742.90	65	21	99.6
Pear	3810.93	6	2	7.6
Pepper	1414.72	8	0.1	0.14
Sesame	1955.84	3	0.05	0.097
합계		82	23.15	107.437

\* TOE : ton of oil equivalent (  $10^7 kcal$  )

서운면 북산리와 신촌리 일부 마을의 겨울철 난방유 사용량을 조사하였다. 30가구를 조사하였는데 약간의 차이가 있었지만 월평균 2~3Drum을 사용하고 있었다. 1Drum당 200ℓ 이고 월평균 2 Drum사용한다고 하면 1Barrel이 158.97ℓ 이므로 한 가구 당 월평균 12.58Barrel 이 산출된다. 1TOE가 7.41Barrel이므로 한 가구 당 1.7 TOE가 조사되었고 마을전체(55가구)로는 93.5TOE가 조사되었다. 난방유를 사용하는 시기는 10월~2월까지 총 5달 동안 난방유를 사용한다고 가정하였다.

[Table 3-11] Residential use for heating in Buksanri & Shinchunri

북산리	신촌리	겨울철평균	한 가구당(Barrel)	한 가구당(TOE)	마을전체 (TOE)
49	6	10 Drum	12.58	1.7	93.5

조사대상 지역의 한 가구당 에너지 사용량을 대체할 수 있는 재배면적은 대상지역

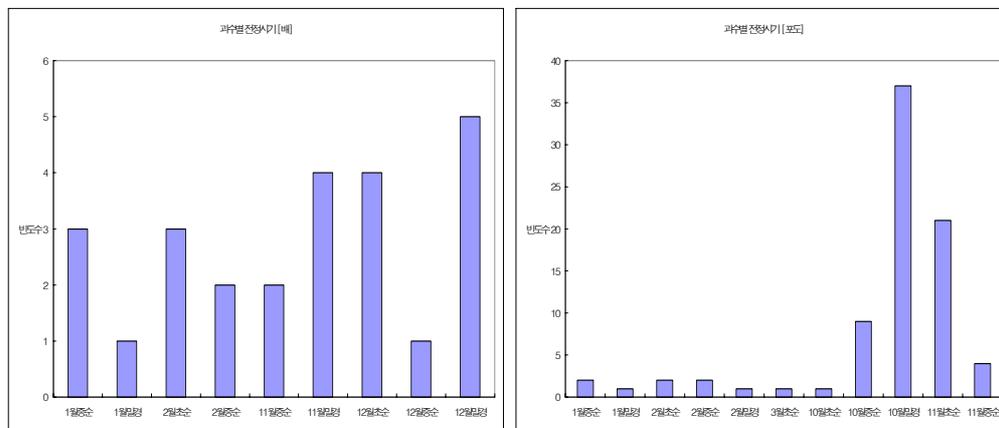
의 한 가구당 에너지 사용량이 1.7TOE 이므로 포도, 배, 고추, 깨의 재배면적은 0.36ha, 0.45ha, 1.20ha, 0.87ha로 계산된다.

## 2. 부존특성을 고려한 수집체계

### 가. 선정된 농업부산물 바이오매스의 발생 시기 및 특성

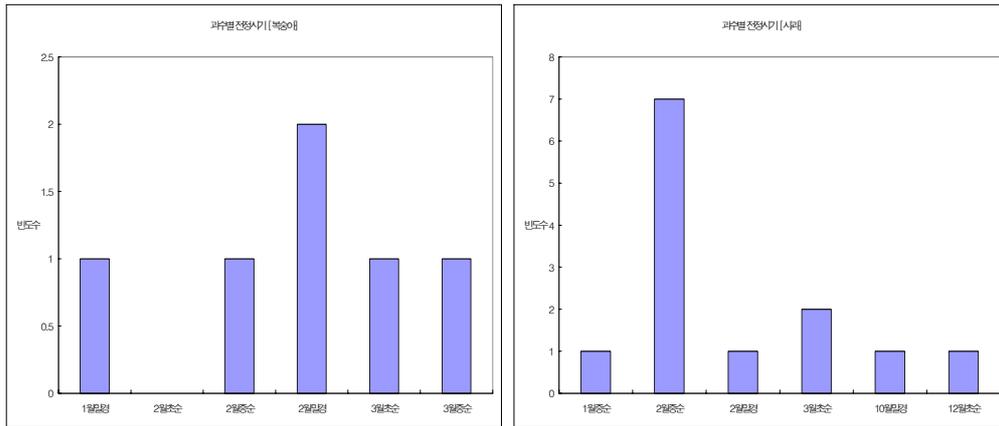
#### 1) 과수

과수의 발생은 대부분 휴면기인 동절기에 이루어지므로 과수농가의 선정된 가지는 이 시기에 집중된다. 현장조사에서는 선정시기가 10월말부터 3월까지 분포하는 것으로 나타났으며, 대부분 2월 전후에 집중되고 있었다. 여름철 전정은 필요한 경우 행하여지나 거의 없는 것으로 조사되었다. 포도의 경우도 12월 상순에서 2월 중하순까지 권장되어 이 시기에 집중적으로 이루어지고 있으나 현장조사 결과에서는 다소 이른 11월부터 전정이 이루어지는 경우가 다수 나타났다. 복숭아는 대체로 1월 이후에 전정을 시작하여 3월까지 행하여지고 있었다. 재배면적은 과수의 종류에 따라서 다소 차이가 있지만 최소 500여 평에서 최대 25,000평까지 다양하게 나타났다.



(a) 배

(b)포도



(c) 복숭아

(d) 사과

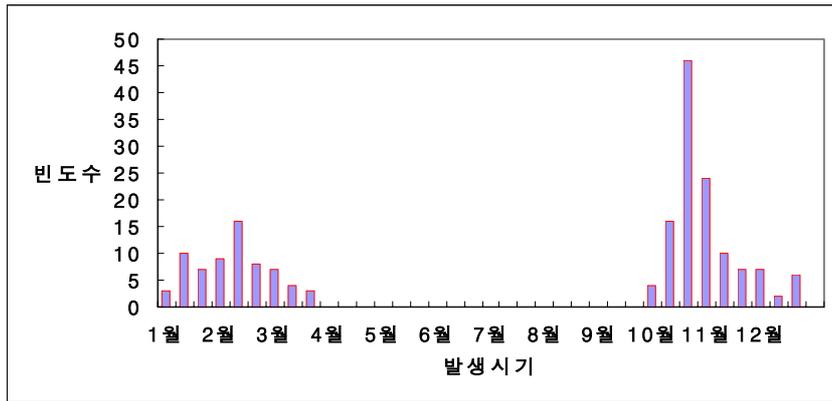
[Figure 3-3] 과수별 동절기 전정시기의 분포

## 2) 유지작물

들깨는 개화 후 약 30일 정도 지난 후에 수확을 하는 것이 일반적이고, 대체로 개화는 9월 5일에서 20일경이므로 수확은 10월 하순에 이루어진다. 탈립 작업이 이 시기에 이루어진다고 보면 부산물의 활용은 11월경부터 가능하며, 어느 정도 건조될 수 있도록 시간적인 여유를 더하면 11월 하순부터 에너지원으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 참깨는 단작인 경우 8월 하순에서 9월 상순에 이모작인 경우는 9월 상순에서 중순경에 수확이 이루어진다. 따라서 참깨는 건조시간까지 감안하더라도 10월 중순 이후에는 부산물활용이 가능하다. 재배면적은 대체로 비교적 작았으며 300평 내외로 조사되었다.

## 3) 고추

고추는 재배양식에 따라서 수확기간이 다르나, 대체로 6월 이후부터 10월 상순까지로 조사되었다. 관행적으로 재배하는 고추의 재식밀도는 약 3,300주/10a 이나 밀식 재배의 경우는 8,300주/10a 까지 높은 경우도 있다. 본 연구의 현장조사에서는 3,000~5,000주/10a 정도로 나타나 관행 재배 수준으로 나타났다. 재배면적은 유지작물과 유사하게 비교적 작은 규모가 많아 대체로 300여 평 규모이나 1,000평 이상의 면적으로 재배하는 곳도 있었다.



[Figure 3-4] Seasonal distribution of agro-biomass production

나. 수집, 운송을 위한 기초자료

과수 단지에서 전정 직후 수집과 운반관련 비용 조사를 위해 현장 조사를 실시하였고 전정 후 바닥에 산재해 있는 가지들을 모은 후 묶는 작업, 묶은 가지를 차량에 싣을 수 있는 곳까지 수거하는 작업, 그리고 운반을 위해 차량에 싣는 작업, 운송, 마지막으로 차량에서 하역작업 등으로 나누어 산정 하였다. 단위비용은 투입된 인력과 작업시간을 곱해서(man\*hr) 산정 하였다.

[Table 3-12] Unit cost for collection for biomass

	미양면(9802.084m <sup>2</sup> , 2965.13평)	서운면(7793.42m <sup>2</sup> , 2418.01평)
모음[모으기+묶기] (man · hr)	187.41	139.66
수거[과수원밖] (man · hr)	53.33	17.66
합계 (man · hr)	240.74	157.32
단위 면적당 (man · hr/평)	0.0812	0.0651
배의 단위면적당 발생량	0.128~2.738(1.433) kg/m <sup>2</sup>	
총 발생량 (ton)	1.26~26.84(14.05)	0.997~21.338(11.17)
단위 무게 당 (man · hr/ton)	191.06~8.97(17.13)	157.79~7.37(14.08)



[Photo 3-9] 3.5ton 트럭과 집게차를 이용하여 실는 모습

차량에 실기 전까지 수집 및 수거에 소요되는 비용은 19.53~24.36 man-hr/10a로 나타났다. 차량 임대 또는 감가상각비를 제외한 하역 및 운반에 소요되는 비용은 운반 차량의 크기와 운반대상 바이오매스 량에 따라서 크게 달라질 수 있으나, 미양면 농지를 대상으로 집게차(너클 크레인 장착 트럭)를 이용한 경우 하역비용은 1 man-hr 미만이었으나, 일반 트럭을 이용한 경우 10배가량 많은 9.28 man-hr가 소요되었다. 운반에 사용되는 비용은 농지와 바이오매스 이용시설의 거리에 따라서 결정된다.

[Table 3-13] Unit cost for loading for biomass

	미양면(집게차이용, 1명)	서운면(3.5ton 트럭이용, 4명)
실기 (man · hr)	0.5	5.68
운반 (man · hr)	1.12	4.68
하역 (man · hr)	0.43	3.60
합계 (man · hr)	2.05	13.96
기계 임대료 (기사비 포함, 원)	300,000	250,000
총비용	300,000	4명×50,000=200,000 + 250,000 = 450,000
단위면적당 비용(원/m <sup>2</sup> )	30.61	57.74

## 다. 수집계획 수립방안 정립

### 1) 농업부산물 바이오매스 부존량 평가

#### 가) 부존량의 분류

바이오매스를 활용하기 위해서는 일정 지역을 대상으로 발생량과 가채량 등에 대한 평가가 이루어져야 한다.

##### ○ 이론적 총 부존량

일정지역 내에서 연간 발생하는 바이오매스의 총량으로서 농업부산물 뿐만 아니라 임업부산물, 기타 바이오매스를 포함한 부존량을 총칭한다.

##### ○ 가용 부존량

일부 바이오매스는 다른 용도로 활용되고 있기 때문에 전량이 에너지원으로 사용될 수 없으므로, 이를 제외한 양을 말한다.

##### ○ 가채량

기술적 또는 현실적 여건에 따라서 가용 부존량의 전량을 에너지원으로 활용하기는 곤란하므로, 실질적으로 활용할 수 있는 양을 말한다.

#### 나) 부존량 및 가채량 평가 기준

에너지원으로 활용할 수 있는 바이오매스 가채량은 가스화장치와 같은 설비의 규모에 따라서 공급지역을 설정하거나, 바이오매스 부존량과 활용여건이 유리한 지역을 선정한 후 설비규모를 산정할 수 있다. 경제성을 우선한 평가는 지역의 바이오매스 부존량과 활용여건 등을 고려하여 설비규모를 산정하는 방식이 바람직하다.

### 2) 수집 및 운반 체계의 정립

#### 가) 수집 및 운반

바이오매스의 발생특성상 에너지활용 시설까지 효율적으로 수집하고 운반하는 것이 대단히 중요하다. 바이오매스 발생지로부터 에너지활용 시설까지 수집 및 운반은 현장수집과 집하장에서 시설까지 운반하는 과정으로 나눌 수 있으며, 집하장과 시설 중간에 지역의 발생량을 고려하여 적환장을 두는 것이 바람직하다.

$$C_t = \sum_{i=1}^N C_{TR} \Phi_i MV_i d_i$$

$C_t$  = 연간 바이오매스 운반비용 (원)

$C_{TR}$  = 바이오매스 단위중량당 거리 당 비용 (원/km · kg)

$\Phi$  = 연간 바이오매스 용적 ( $m^3$ /년)

$MV_i$  = 바이오매스 용적밀도  $kg/m^3$

$d_i$  = 집하장에서 시설까지의 거리 (km)

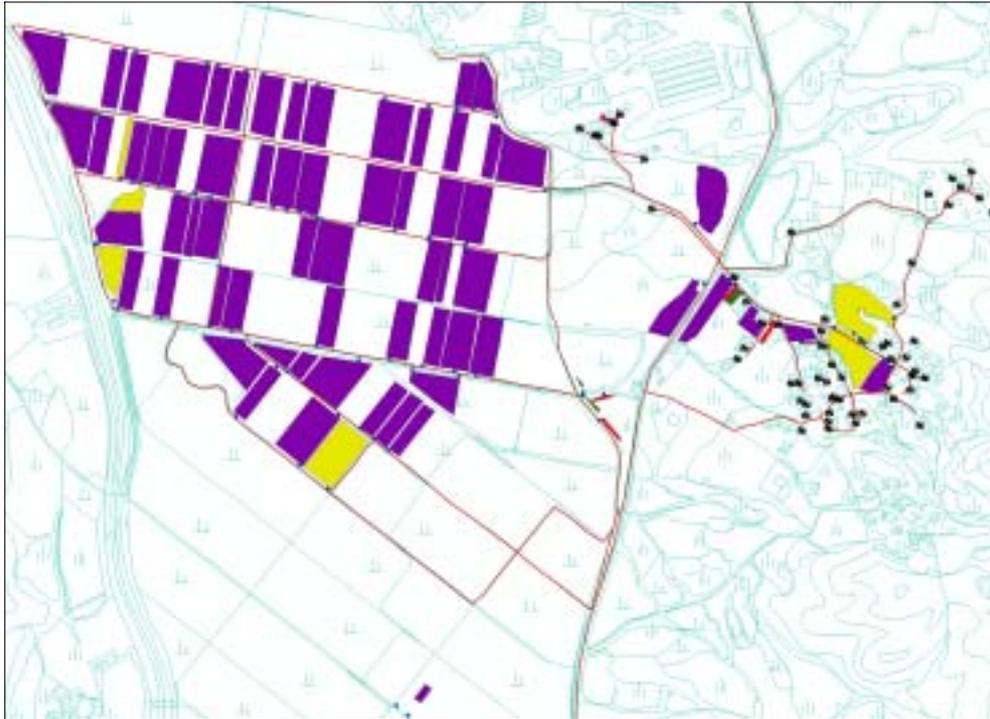
집하비용은 바이오매스의 종류와 농지특성 등에 영향을 받을 수 있고, 과수나 발작물의 부산물은 영농을 위해서는 농지에서 제거해야 하므로 별도의 비용이 들지 않을 수도 있다. 그러나 집하장이 해당 농지에 인접하지 않은 경우는 경운기 또는 트랙터 등을 이용하여 별도의 비용이 소요될 것으로 판단된다.

#### 나) 수집체계 구축방안

수집체계를 마련하기 위하여 GIS 및 현재 보급되고 있는 수치지도를 활용할 수 있다. 현재 대부분의 토지이용도로서는 발작물의 구분이나 과수밭에 대한 분류가 불가능하기 때문에 바이오매스 발생 농지에 대한 주제도를 신규로 작성하여 수집체계를 구축하여야 하고 바이오매스 부존특성이 우수한 지역을 선정하여 가채량을 산정하고, 도로망과 단위비용을 결정하여 최적의 수집체계를 구축하는 것이 가능하다.

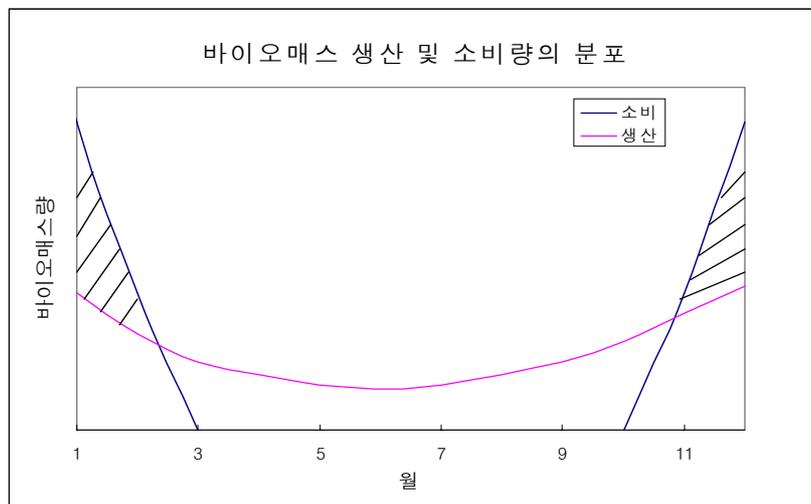
Figure 3-5는 경기도 안성시 서운면 일부 지역을 대상으로 배, 포도, 고추, 깨 재배지를 GPS 측량을 통해서 위·경도를 확인하여 얻은 자료로서, 분포와 면적, 그리고 출입구, 중·소도로 등을 측정하여 GIS 내에서 레이어로 구현한 결과이다. 이 같은 여러 속성 값을 지속적으로 GIS Database로 구축한다면 시설의 입지 위치와 규모 등을 산정할 때 활용가치가 높을 것이다.

현재 국립지리원에서 보급하고 있는 수치지도의 도로분류 중 일반국도, 지방도, 시도, 군도, 면·리간 도로, 부지안도로, 소로에 대하여 단위 운송비용을 적용하여 최적의 수집 체계도를 작성할 수 있을 것이다. 측량 자료는 바이오매스 활용을 위한 시설 위치선정과 수집·운송 계획에 필요한 기초자료로서 이용하면 활용가치가 높을 것으로 생각된다.



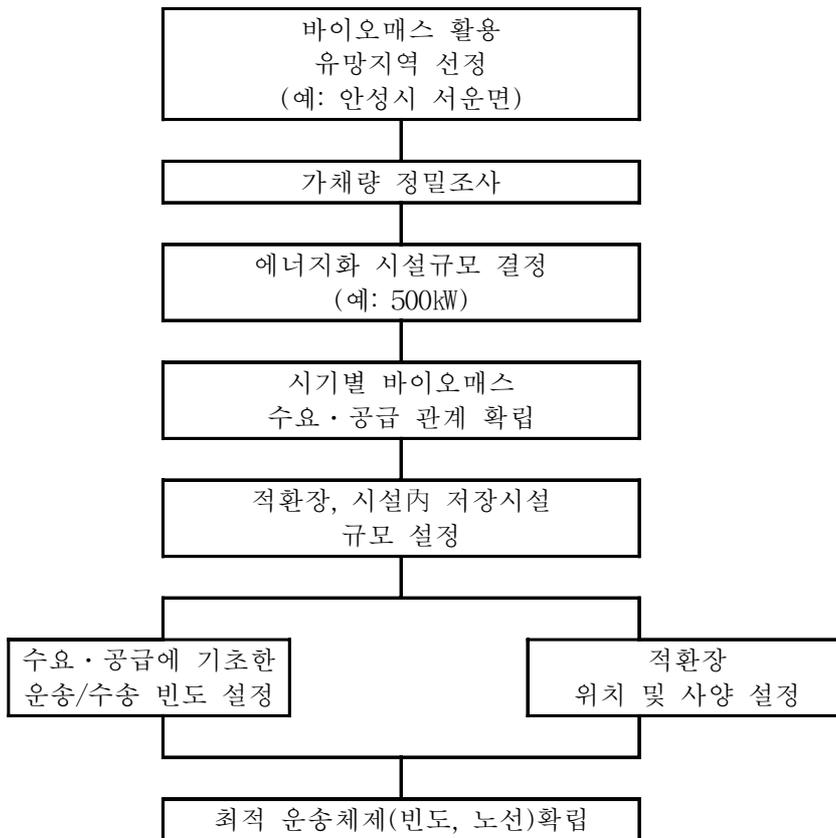
[Figure 3-5] Distribution of orchard and residence in SeoUn, Ansong-city

다) 시기별 집중특성을 고려한 수송계획



[Figure 3-6] 시기별 바이오매스 생산량 및 소비량의 개략적 분포

농업부산물 바이오매스는 동절기에 집중적으로 발생하므로 에너지화 시설의 일일 이용량에 따른 저장시설의 규모를 설정한 후 수송계획을 수립하여야 한다. 또한 해당지역에서 바이오매스 수송여건과 현장에서 저장 또는 적환지 저장용량 등을 고려하여 수송계획을 수립하여야 한다. 보다 구체적인 수집체계는 바이오매스별 용적밀도, 에너지화 시설에서 요구하는 전처리공정의 요구도 등을 정립한 후 정립할 수 있다. Figure 3-6에서와 같이 부존량에 대한 분포곡선을 작성하여 저장시설의 규모 등을 산정하는데 활용할 수 있다.



[Figure 3-7] 바이오매스 수집운반 체계 구축을 위한 Flowchart

## 제3절 가스화를 위한 바이오매스 전처리

### 1. 가스화를 위한 연료조건

#### 가. 가스화를 위한 바이오매스 이용 조건

고정상(fixed-bed) 가스화에서 바이오매스 입자의 크기는 가스화 반응에 직접적이고 민감하게 영향을 미치므로 입자 크기를 적정하게 조절하여 주입하여야 한다. 가스화를 위한 연료로서 입자 크기의 조건은 숯이나 일반적인 바이오매스에 관계없이 중요한 변수로 작용한다. 가스화의 기하학적 크기에 따라서 바이오매스 입자의 적정 크기가 다소 변할 수 있으나, 입자의 크기가 큰 경우 공극이 커서 가스가 환원 층에서 충분한 접촉시간을 갖지 못하므로 가스화 효율이 극도로 낮아지게 된다. 반면에 입자의 크기가 아주 작은 경우에는 마찰손실이 증가하여 가스의 흐름이 좋지 않게 된다.

과거 오스트레일리아에서 제시된 연구결과에 의하면, 소규모 가스화의 경우 숯을 가스화하는 경우 31.75mm 체에는 통과하고 9.5mm 체에 걸러지는 크기가 적당하다고 한다. 소규모 가스화에 있어서 숯을 이용하는 경우에 양질의 입자를 얻을 수 있고, 또한 지역 내 숯을 생산업체로부터 조달이 용이한 장점이 있고 가스화에 투입하기 위하여 숯을 파쇄하고 손으로 걸러내는 등 간단히 원료를 만들 수도 있다.

소규모 가스화공정에 있어서 목재와 같은 바이오매스를 원료로 이용하는 경우 원료의 전처리를 위한 소요 장비의 추가 구입 등의 문제로 쉽지 않다. 목재를 원료로 이용하는 가스화에 있어서는 20~100mm의 크기가 적당하며, 대형 가스화 시설에서는 직경 100mm, 길이 250mm의 원료도 가능하다. 그러나 가스화의 체원에 따라서 결정될 문제이다.

바이오매스의 효율적인 가스화 반응을 위해서는 공급되는 폐기물의 탄소 성분이 일정해야 한다. 가스화 반응 속도를 좌우하는 것은 가스화 과정에서 열분해에 의해 생성된 Char반응속도로서 Char의 반응속도로서 Char의 전환 반응은 가스화 반응의 율속 인자가 된다. 대부분의 폐기물은 전처리 과정을 거쳐서 원료성상을 균일하게 유지 하지 않고서는 직접 가스화하는데도 어려움이 따른다. 그러나 폐지, 플라스틱 폐기물, 삼림 폐기물, 농업 폐기물 등은 원료 성상의 균일화를 위한 전처리 과정을 거치지 않고도 직접가스화가 가능하다(박태준, 2004).

폐나무(톱밥 등), 다년생 나무 작물(잡종 포플러 나무), 농업 폐기물(짚겨 등), 다년생 작물(Switchgrass), 동물 폐기물과 다른 재료의 무리들도 바이오매스연료로 가능하다. 동물 폐기물(거름)은 특히 개발도상국에서 전기 발전을 위한 또 다른 바이오매스 자원이다. 선진국에서 조차도 에너지를 혼합하는데 크게 공헌할 수 있다.

바이오매스는 재활용을 위한 유기 석유 대체용 연료이다. 바이오매스는 연료의 고휘발성과 연료와 최종 숯 모두의 고반응 때문에 연소 공급 원료로서 중요한 이점을 제공하지만 고체 화석연료와 비교하면 탄소가 훨씬 적고, 산소가 많으며 발열량이 낮은 점을 주의해야한다. 또한 짚과 같은 것은 석탄보다 염소 함유가 많다. 염소와 알칼리를 많이 함유한 바이오매스 연료는 부식에 관한 관심을 증가시키며, 가장 큰 관심은 표면에서 염소에 의해 나타난 과일관의 고온 부식에 초점을 둔다. 분쇄된 바이오매스 연료의 타는 속도는 석탄보다 상당히 높으며, 석유 또는 가스 연료와 같은 방법으로 점화할 수 있고, 같은 고출력을 낸다. 동력 생산을 위한 연료로서의 이용은 재사용과 CO<sub>2</sub>-Neutral Fuel 이라는 장점이 있다.

바이오매스는 유기물, 무기물, 에너지 함유량과 물리적 특성 등 많은 면에서 석탄과 다르다. 연소형상(Burning Profile)에서 최고 온도는 일반적으로 시료의 반응성을 측정하여 재며, 보통 560~570K에서 나타난다. 바이오매스 시료의 구조 분석에서는 바이오매스 연료가 석탄 보다 다양한 조성을 가지고 있으나, 바이오매스는 실질상 석탄보다 산소는 많고 탄소는 적음을 알 수 있다. 질소, 염소와 재는 적으며, NO<sub>x</sub> 배출물, 부식과 재침전에 있어 직접적으로 관계가 있다. 석탄보다 상대적으로 적은 황을 가진다. ASTM(American Society for Testing and Materials)에 의해 결정되고, 선택된 바이오매스 시료의 무기물 특성을 살펴보면, 석탄은 바이오매스보다 알루미늄, 철 티타늄이 더 많으며, 바이오매스는 석탄 보다 실리카, 칼륨과 칼슘이 다 많다. 나무와 나무의 재료는 질소가 적고 재를 함유하는 반면 농업재료는 질소 함량이 높고 재를 포함한다.

#### 나. 가스로의 종류와 바이오매스 원료 조건 및 특성

가스로가 상향식인 경우 원료의 조건이 하향식에 비하여 다소 까다롭지 않으나 양질의 연료가스가 만들어지기 위해서는 최대 100mm 이하라야 한다. 원료 입자의 크기가 적당한 경우 숯과 같이 탄화된 원료에 비해 목재와 같은 바이오매스를 이용하여 얻어지는 가스가 H<sub>2</sub>를 더 많이 포함하고 있기 때문에 열량 면에서 유리하다.

[Table 3-14] 가스로 종류와 원료 조건 및 운전특성

Fuel requirement	Down-draft	Up-draft
wood moisture content (%, wet basis)	12 (max. 25)	43 (max. 60)
wood ash content (%, dry basis)	0.5 (max. 6)	1.4 (max 25)
wood size (mm)	15-50	5-100
Tar(g/Nm <sup>3</sup> )	0.015-0.5	30-150
Feedstock sensitivity	critical	critical
Scale	< 5M <sub>t</sub>	< 20M <sub>t</sub>
Outlet temperature(°C)	700	200-400

1) 목질계 바이오매스

목질계 바이오매스연료의 가장 중요한 특성으로는 수분 함량을 들 수 있으며, green basis 또는 dry basis로 표시되고 있다. 바이오매스 연료로 사용 가능한 목재의 최대 수분함량은 65~68%이며, 이 이상의 수분이 포함된 목재의 경우에는 수분 증발을 위해 많은 에너지가 요구되고, 연소를 위해서는 외부 에너지가 추가적으로 요구되기 때문에 연료 원으로 권장되지 않고 있다. 또한 바이오매스 내에 함유되어 있는 과량의 수분은 처리시스템을 부식시키는 등의 문제를 일으킬 수 있고, 연료 효율도 감소시킨다.

2) 산림 폐기물

목재가공, 산림 개척시 발생하는 목재, 잔가지, 큰 가지, 나무껍질, 나뭇잎 등 저급 물질로 구성되어 있으며, 40%~60정도의 수분을 함유하고 있다. 칩핑(chipping)은 벌목지에서 디스크 칩퍼에 의해 이루어지고, 산림폐기물의 수집을 용이하게 한다. 일반적으로 산림 폐기물 칩의 크기는 25mm × 25mm × 6mm 정도이고, 공기분산처리에 의해 트레일러로 옮겨진 후 수송되며, 공기분산처리 시 대부분의 나뭇잎과 먼지찌꺼기는 밀도 차이에 의해 칩으로부터 제거 된다. 칩은 크게 whole-tree chip, round-wood chip, clean chip으로 분류되고, 이 중 나무껍질이 포함되지 않은 clean chip은 연료용보다는 펄프 제조업체에게 펄프 원료로 공급되고 있다. 특히, whole-tree chip은

기계에 문제를 일으킬 수 있는 잔가지, 길고 가느다란 나무 조각 등을 함유하고 있어 연료용으로 사용하기 전에 스크린 과정을 거쳐야 한다.

### 3) 산업 분쇄 폐기물

목재 가공 시 생성되는 부산물로서, 펄프와 종이 생산 시 발생하는 1차 분쇄 폐기물과 가구나 목재기구물 제조 시 발생하는 2차 분쇄 폐기물로 분류되고 있다. 1차분쇄폐기물은 20%이상의 수분을 함유하고 있고, ash 함량은 종이 제조업자의 가공 방법에 따라 차이를 보이고 있다. 이는 일반적으로 큰 파일형태로 지면 위에서 저장되기 때문에 지열로 인한 분해 촉진으로 열 함량이 감소되고 ash 함량이 증가될 가능성을 내포하고 있으며, front-end-loader 사용 시에는 먼지와 돌이 섞일 가능성이 있으므로 조작 시 주의를 기울여야 한다. 특히, 바이오연료 처리시스템의 효율성을 증가시키기 위해 폐기물의 크기를 조절하여 균일성이 유지 될 수 있도록 해야 한다. 2차 분쇄 폐기물은 수분함량이 10% 이하로 매우 낮고, 가구 등의 목재생활용품 제작 시에 발생하는 부산물이기 때문에 페이트, 니스, 플라스틱 유래 적층물, 아교, 접착제 등의 화학물질을 함유하고 있어 특별한 처리공정이 요구된다. 2차 분쇄 폐기물은 1차 폐기물과는 달리 수분의 접촉을 피하기 위하여 실내에 보관되어야 하는 점이 단점이라 할 수 있다.

### 4) 도시 목재 폐기물

건축물 형성 및 파괴 시 생성되는 폐기물로서 목재 펠렛, 포장용 목재함, 가구나 기구캐비닛, 목재 손실 발생물, 토지정리 시 발생하는 목재, 기타 목재가 주성분인 도시 고형 폐기물들로 이루어져 있다. 도시 목재 폐기물은 발생원에 따라 수분함량에 상당한 차이를 보이고 있으며, 평균 수분함량은 12~15% 정도이다. 도시 목재 폐기물 중 일부 목재는 방부제, 살충제, 지연제 등의 다양한 화학성분들이 목재 내에 스며들어 있어 제거가 어려운 단점을 가지고 있다. C&D 목재 폐기물은 대부분 수작업에 의하여 회수되고 있으며, 이용성과 효율성을 높이기 위하여 헴머밀이나 호그 등으로 가공 처리되어 에너지 전환시스템으로 이송된다. 도시폐기물의 일종인 목재 펠렛(목재포장제도 포함)은 미국에서 20% 정도만이 회수되고 있고, 나머지는 버려지고 있는 실정이다. 대부분의 펠렛은 못 이외에는 비 목재 물질을 포함 하고 있지 않고 , 일부 펠렛은 일회용으로 서비스차원에 공급되기도 있기도 하다. 활엽수로부터 만들어지는 목재 펠렛과 목재포장제는 12~15%정도의 수분을 함유하고 있고, 에너

지 연료 원으로 좋은 재료가 되고 있으며, 수거 후에는 수요자의 요구에 맞게 헴머 밀 등으로 가공 처리되어 공급되고 있다.

#### 5) 나무손질시 발생하는 폐기물

수분함량이 35~60%로 비교적 높고, drum chipper에 의해 분쇄되어지며, 상당량의 나뭇잎과 잔가지를 함유하고 있고, 3~4% 정도의 ash를 함유하고 있다. 이는 균일성이 비교적 높다는 점과 비 목재 물질이 포함되어 있지 않은 점에서 장점이라 할 수 있다. 도시개발을 위한 토지정리 시 발생하는 목재 폐기물은 산림폐기물을 수집할 때 사용되는 방법으로 처리될 수 있다. 대부분 비교적 깨끗한 목재를 함유하고 있어 연료 원으로 사용이 적합하나, 그루터기는 연료 원으로 사용하기에는 부적합한 것으로 알려져 있다.

#### 6) 도시 고품 폐기물

위에서 언급된 모든 폐기물뿐만 아니라 기타 목재 폐기물을 포함하고 있고, 계절에 따라 발생하는 폐기물의 종류가 다양하며, 비 목재 물질들을 다량 함유하고 있어 수집 및 회수에 많은 어려움을 초래 한다. 도시 고품 폐기물은 대부분 매립지로 보내져 처리되고 있으나, 목재로 구성된 폐기물들은 대부분 회수되어 공기건조과정과 분쇄과정을 거친 후 연료 원으로 사용된다. 특히, 자원재생공장에서 수집되는 도시 고품 폐기물에서는 상대적으로 깨끗한 목재 원료 원을 수작업으로 확보할 수 있다.

#### 7) 자연 발생 폭풍우에 의한 목재 폐기물

목재 폐기물은 drum chipper에 의해 현장에서 가공 처리된 후 연료 원으로 사용된다. 이폐기물 chip은 비교적 깨끗한 상태이지만, 수분함량이 높다는 단점을 가진다. 이외에 목재폐기물을 수집 장에 모아서 한꺼번에 grinder 등으로 처리 할 수 있는데, 이 방법은 먼지, 흙 및 기타 비 목재 물질들이 함유될 가능성이 높다.

[Table 3-15] Major attractions and drawbacks of the three main biomass energy forms

Source	Assets	Drawbacks
<b>Woody biomass sources</b>		
<b>Logs</b>	Burn slowly Give good heat Good for small-scale industry Good for charcoal burning	Require much labour to fell and cut into headloads, and tools may not be available to women Need further splitting or use of smaller wood to kindle
<b>Branches</b>	Easy to handle Preferred domestic fuel	
<b>Twigs</b>	Useful when a quick, fierce heat is needed	Tend to burn away very quickly
<b>Leaves, Roots Bark Bushes Minor plants (e.g. water hyacinth) Weeds</b>	Basic fuels for many poorer people	Inferior performance
<b>Crop residues</b>		
<b>Fronds and Husks (e.g. coconut) Stalks</b>	Good quality fuel Often of high quality; sorghum stalks preferred to wood	Bulky and difficult to transport
<b>Straw</b>	Staplefuel, a most convenient fuel	Coarse straw very bulky to move distances
<b>Hull (e.g. groundnut, fruit and wastes) Oilseed wastes Residue from commercial processing of crops (e.g. sugarcane) Peat</b>	Good quality fuel, available at homestead Valuable for use as firelighters Boiler fuel or electric generation Good heat Used for electricity generation (Eire)	Burns quickly Very light and bulky to transport distances
<b>Secondary sources</b>		
<b>Charcoal</b>	Easy to transport and store Greater heat than wood Smokeless Allows big wood to be used <i>in situ</i>	Quality varies greatly Poorer grades very dirty to use and dusty Fumes can be dangerous

#### 다. 바이오매스 성장

과수 전정 가지는 직경이 0.5~10cm 까지 다양하며, 과수의 재배 년 수에 따라서 그 차이가 크게 나타났다. 길이는 50cm에서 2m로 나타났고 깨나 고추와 같은 발작물 바이오매스는 60cm~120cm 정도로 품종에 따라서 다르나 비교적 일정한 수준이었다. 함수비는 과수의 경우 전정 직후 50% 내외로 매우 높으며, 발작물은 가을철 수확 후 야외에서 그대로 방치되어 15% 정도로 매우 낮기 때문에 별도의 건조과정을 필요 없을 것이다.

### 2. 전처리공정 개요

#### 가. 가스료에 투입되는 연료의 전처리 공정과 관련된 바이오매스 특성

##### 1) 건조

생산되는 연료가스의 열량 등을 높이기 위해서는 충분히 건조하는 것이 바람직하며 충분히 건조된 바이오매스를 이용하는 경우 가스 중의 tar 함량 또한 낮아진다. 하지만 자연건조는 시간이 많이 소요되며, 가열 등에 의한 건조는 비용문제가 있다. 따라서 많은 경우 가스료의 열 또는 연료가스 중의 열을 이용하여 건조하는 것이 필요하다.

##### 2) 회분

회분/재는 바이오매스가 완전 연소된 후 남는 무기물 또는 금속성분으로 구성되고 대부분의 목재의 경우 회분함량은 0.1%이며, 농업부산물은 15%까지 이른다. 가스료의 설계방법에 따라서 연소 후 남는 회분의 양이 변할 수 있다. 회분은 아주 높은 온도에서 용융되며 회분의 성분에 따라서 용융 정도가 다르고 용융된 회분은 가스료 내부에 침적되어 문제를 야기할 수 있다. 대체로 회분의 용융은 1,250℃ 이상에서 일어난다.

##### 3) 원소조성

바이오매스 중 원소조성은 발열량에 직접 영향을 미친다. 바이오매스 중 질소와 황은 연소 후 질소산화물 및 황산화물 등의 대기오염물질을 배출할 수 있으나, 농업 부산물 바이오매스의 경우 큰 문제가 되지 않는다.

#### 4) 밀도와 형상

단위체적당 중량으로서 밀도는 바이오매스의 종류에 따라서 크게 달라지고 발열량과 함께, 밀도는 연료의 에너지 밀도(또는 단위 체적 당 열량)에 영향을 미친다. 밀도가 낮은 바이오매스는 취급, 운송, 저장에 드는 비용을 증대시키고, 특히 밀도가 낮은 경우 가스로 내부에서 바이오매스 연료 흐름을 좋지 않게 하여 가스로 운전이 정상적으로 이루어지지 않는 결과 (bridging)를 초래할 수도 있다. 바이오매스 연료 조건은 하향식 가스로의 경우 함수비 15~20% 이하에서 밀도가 500 kg/m<sup>3</sup> 이상, 상향식 가스로의 경우 함수비 50% 이하에서 밀도가 400 kg/m<sup>3</sup> 이상이 바람직한 것으로 알려져 있다. 입자가 아주 작은 경우 펠렛으로 만들어 사용하는 것도 고려할 수 있다.

#### 5) 입자의 크기

바이오매스 연료의 크기는 가스로의 종류에 따라서 조정되어야 다. 대체로 소규모 고정상 가스로 시스템에서는 톱 등으로 자르는 방법이 바람직하고, 대규모 시스템에서는 목편을 제조하여 크기를 조정하는 것이 바람직하다. 가스로에 요구되는 입자의 크기로 구성되도록 스크린 등을 이용하는 것도 필요하다. 가스화에 적합한 바이오매스 원료로서 그 조건을 맞추기 위해서는 함수비와 바이오매스 입자 크기를 조정하여야 하는데, 이를 위하여 탄화공정을 도입할 수도 있다. 탄화공정의 유무에 따라서 다음과 같이 2가지로 나누어 생각할 수 있다.

가) 파쇄 후 직접 이용 (탄화공정을 도입하지 않는 경우)

○ 파쇄 ⇒ 스크린(일정 크기 연료만 선별) ⇒ 건조 ⇒ (저장) ⇒ 가스로 투입

나) 탄화공정 도입

○ 탄화 ⇒ 파쇄 ⇒ 스크린 (일정크기 선별) ⇒ (저장) ⇒ 가스로 투입

나. 과수 바이오매스의 파쇄

전정 가지의 경우 직경이나 길이를 볼 때 가스로에서 그대로 이용할 수 없으므로 일정한 크기로 파쇄 하여 이용하여야 하므로, 본 연구에서는 가지 파쇄를 위하여 MTD 사의 Model 465 (8마력)를 이용하였다. (Photo 3-10)



[Photo 3-10] 파쇄기를 이용 과수 가지의 파쇄 작업

파쇄 후의 바이오매스 입자의 크기는 가지의 굵기에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. (Photo 3-11)



(굵은 가지 : 20~40 mm)



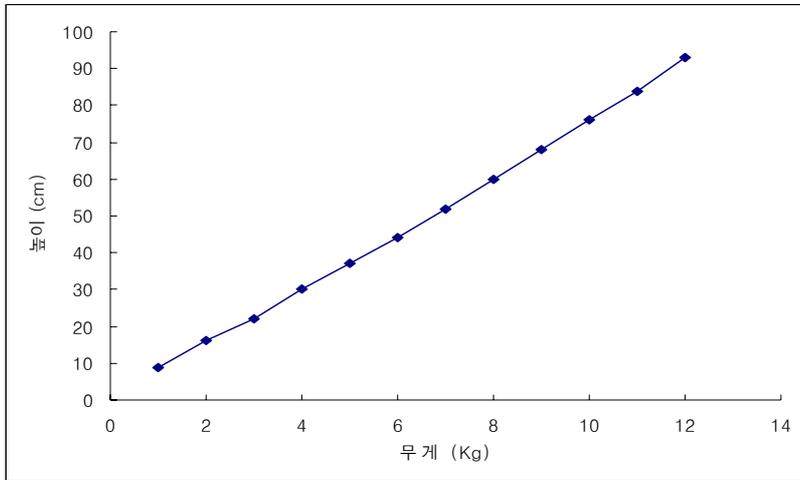
(잔가지 10mm 미만)

[Photo 3-11] 파쇄 된 입자의 모습

파쇄에 필요한 연료량을 파악하기 위하여 휘발유 1L에 대해 잔가지와 굵은 가지 파쇄 량을 조사한 결과 17~18 kg으로 나타났다. 따라서 바이오매스 파쇄에 필요한 연료는 0.055~0.058L/kg, 또는 바이오매스 1 ton 당 55~58L 정도가 소요됨. 이 때 함수비는 약 15% 수준이다. 휘발유의 열량은 8,300 kcal/L이고, 바이오매스 열량이 함수비를 고려하여 4,000 kcal/kg 이라고 할 때, 68,000~72,000 kcal의 바이오매스를 얻는데, 파쇄에는 8,300 kcal의 에너지가 소요됨을 알 수 있다.

파쇄 된 바이오매스의 밀도는 높이에 따라서 다소 달라지나, 함수비 15% 수준에서 실험 결과를 살펴보면 높이가 낮을수록 밀도가 작고 높이가 증가할수록 자중에

의한 압축에 의해서 밀도가 다소 증가하는 것으로 나타났다. (Photo 3-12)



[Figure 3-8] 직경 29cm의 원통에서 바이오매스 중량과 높이와의 관계

과쇄 된 바이오매스의 밀도는 최저 168~206 kg/m<sup>3</sup> 수준으로 나타났으며, 높이가 30cm 이상이 되면 밀도변화가 거의 없는 것으로 나타났으며, 물론 함수비가 증가하면 밀도 차는 더 커질 것으로 추정된다.



[Photo 3-12] 높이에 따른 밀도변화 측정

과쇄 입자의 입도 분석결과 표 6에 나타난 바와 같이 본 연구에서 이용된 과쇄기에 의해 얻어진 바이오매스 연료는 하향식 가스화로에 이용하기에 입경이 매우 작은 것으로 나타났다. 굵은가지를 과쇄 한 것이 잔가지를 과쇄 한 것에 비해서 다소 굵기는 하나, 입경이 9.52mm 이하인 입자가 각각 91%, 72.2%를 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서 이용된 과쇄기를 이용하는 경우 연료 흐름에 지장을 주는 bridging 현상이 불가피한 것으로 나타났으며 특히, 가지 표면에 있는 수피는 과쇄과정에서 절단되지 않고 대부분 길게 섬유상으로 남아 있어서 과쇄 된 입자의 밀도는 더욱 낮게 하는 문제를 유발한다.

[Table 3-16] 가지 종류별 입경 분포

눈 크기(mm)	비 율 (%)	
	잔가지	굵은 가지
25.4	2.1	0.2
19.1	0.1	0.2
9.52	6.9	27.4
4.75	39.8	40.4
<4.75	51.2	31.8

바이오매스 연료 공급 상태를 확인하기 위하여 과쇄 된 바이오매스를 선별과정 없이 그대로 석영 유리관으로 제작한 가스로 모형에서 하향식으로 가스화 실험한 결과 바이오매스의 흐름이 큰 문제로 대두되었다. 이에 가스로내의 가스화 과정을 눈으로 확인할 수 있는 석영유리관으로 간이 하향식 가스로를 만들어 가스화가 진행되는 과정에서 과쇄 된 바이오매스의 흐름을 확인하였다. 송풍은 위쪽에서 송풍기를 통해서 공급하였고 점화는 일반 가스토치를 이용하여 아랫부분의 다공판을 통해 직접 점화하였다.

그림과 같이 가스로 아랫부분에서 점화하여 가스화를 시작하는 단계에서는 충분한 연료가스가 발생하고, 가스가 연소되는 것을 관찰할 수 있었으나, 10여분 경과 후에는 바이오매스가 윗부분에서 아래로 이동하지 않고 소위 bridging 현상이 나타나서

연소가 진행되지 않았다.

따라서 바이오매스 연료의 흐름이 연속적으로 일어날 수 있도록 연료조건과 장치를 적절하게 설계하는 것이 대단히 중요한 문제로 부각되었고 bridging 현상을 방지하기 위하여 원료를 탄화하여 투입하는 방안을 생각하였다.



(a) 연소 초기



(b) 연료가스 발생 및 가스의 연소

[Photo 3-13] 석영 유리관으로 제작한 소형 가스로서 연소 및 가스화 과정

#### 다. 과수 바이오매스의 탄화

부산물 바이오매스를 탄화시켜 숯으로 만든 결과 입자의 크기가 약간의 파쇄만을 통해서도 가스로서 이용할 수 있는 수준으로 되고, 또한 바이오매스 중에 포함되어 있는 수분이 연소과정에서 증발되므로, 함수비가 충분히 낮아지는 효과를 얻을 수 있다. 탄화는 일반 드럼통을 이용하여 제조하였다. 숯을 만드는 경우 원료 바이오매스 중량 대비 약 25% 내외의 숯이 만들어지고 나머지는 열로 방출되므로, 방출되는 열을 가스화 공정에서 활용하거나 기타 열 이용 방안을 정립하는 것이 필요하다.

목재류의 열량이 15MJ/kg 이고 숯은 25MJ/kg이므로, 회수율 약 25%를 감안하면 바이오매스 1kg 당 6.25 MJ의 숯을 얻게 되고, 따라서 8.75 MJ가 탄화과정에서 방출되는 열량이다. 또한 숯을 만드는 탄화과정에서는 다량의 불완전 연소 가스가 방

출되므로 이를 응축하여 소위 목초 액으로 회수할 수 있으므로 탄화과정의 부산물을 최대한 이용하기 위한 방안을 검토하여야 한다. 연기 중 액상 분은 회수토록하고, 나머지 기체는 가스로에 재 투입하여 가스화하는 방안이 이상적인 것으로 판단된다.



(a) 탄화 작업

(b) 만들어진 숯

[Photo 3-14] 탄화 작업 및 탄화 후 남은 바이오매스(숯)의 모습

탄화 후 남은 숯을 가스로에 투입하여 가스화하는데 연료 흐름을 파악하기 위하여 입도 분석을 한 결과 25.4 mm 이상이 약 6.5%, 4.75mm 이하는 약 20% 정도를 차지하였다. 19.2 mm이상이 약 25%정도를 차지하는 것으로 보아 가스로에 이용하기 적당할 것으로 판단된다.

[Table 3-17] 탄화 후 얻어진 숯의 입도 분석결과

입도(mm)	계	25.4	19.2	9.5	4.75	< 4.75
무게(kg)	17.60	1.15	3.15	6.95	2.80	3.55
백분율(%)	100	6.53	17.90	39.49	15.91	20.17



[Photo 3-15] 탄화 후 얻어진 숯의 입도 분석

바이오매스 연료 투입을 위한 장치로서 원형 철판 통을 제작하고 바닥의 흠을 통해 중앙 축을 회전시켜 연료 공급 상태를 확인한 결과, 파쇄 하여 입도가 작은 경우에 비해 소요 동력 및 연료 공급 상태가 양호한 결과를 보였다. (Photo 3-17)



(a) 원형 통에서 연료공급



(b) 역원추형 홉퍼에서 흐름상태

[Photo 3-16] 원형통과 역원추형 홉퍼에서 연료 공급·흐름 상태의 확인

가스로 상단부에서 바이오매스 연료의 흐름 상태를 파악하기 위하여 함석재질 역원추형 모형을 제작하고 숯의 공급 상태를 확인한 결과, 30mm 이상의 입자가 존재하는 상태에서는 흐름이 좋지 않아 막힘이 간헐적으로 발생하였으나, 30mm 이상의 입자를 제거한 후에는 연료 흐름에 문제가 없는 것으로 나타났다.

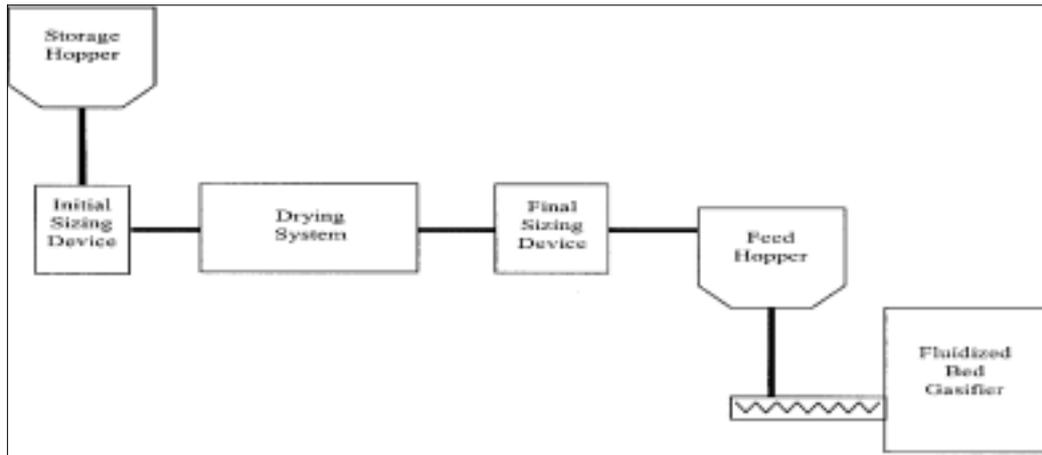
### 3. 가스로 유형별 전처리공정

바이오매스의 입자크기에 따라 가스화반응에 큰 영향을 미친다. 또한 가스로의 규모와 가스로의 유형에 따라 대상 입자의 영향도 달라진다. 입자가 크면 공극이 커지고 생성가스가 공극을 통해 쉽게 빠져나가 환원반응이 적정하게 일어나지 않고 결국 전환효율이 낮아지게 된다. 반대로 입자가 너무 작으면 공기흐름에 마찰저항이 너무 커서 흐름이 나빠진다. 대신 가스로의 규모가 크면 입자의 크기는 다소 커도 되며, 소규모에서는 원료의 균질성이 확보되어야 한다. 또한 Datta(1981)의 결과에 따르면 바이오매스의 크기가 0.15mm이하일 때에 소요되는 에너지는 그 바이오매스가 가지고 있는 총 에너지 25%이상을 차지하고, 크기가 0.07~0.08mm이하일 경우에는 오히려 바이오매스 총에너지의 100%가 넘는 에너지가 요구된다고 하였다.

바이오매스의 종류나 구성에 따라 다소 차이는 있겠지만 지금까지 발표된 전처리 공정에 관한 연구결과들이 주로 0.25mm이상 크기의 바이오매스를 처리의 대상으로 다룬 것도 이와 같은 이유이다. 그러므로 바이오매스원료의 전처리공정은 원활한 가스화를 위해서는 매우 중요하다. 바이오매스의 전처리공정은 가스로의 유형에 관계없이 보편적으로 Dry, Sizing, Fuel-feeding system 세 가지 공정으로 이루어진다. 그 중에서 Dry, Sizing 원료의 함수비와 입자의 크기를 조절하는 공정이므로 가스로의 특성에 따라 달라진다. 반면 대규모의 가스화공정일 경우에는 전처리공정의 자동화는 필수적이다.

[Table 3-18] 가스로의 유형별 원료 조건

Gasifier Type	Updraft	Downdraft	Open Core	Cross draft
Fuel	Wood	Wood	Rice Husks	Charcoal
Size, mm	20-100	5-100	1-3	40-80
Moisture, %	<25	<60	<12	<7
Ash, %	<6	<25	Approx. 20	<6



[Figure 3-9] Illustrative feeding system incorporating drying and sizing equipment

#### 가. 상향식 공정베드시스템의 전처리공정

바이오매스의 기체화시스템(Gasifier)의 전처리공정은 가스로의 유형에 관계없이 비슷한 공정을 가진다. 다만 Sizing공정, Drying공정부분에서 입자의 크기와 수분함량을 조절에 차이점을 보인다. 또한 수분함량을 조절하는 과정에서 입자의 크기가 변화는 가능성과 원료의 균질성을 확보하기 위하여 Sizing공정을 두 번 거친다.

- 1) Initial Sizing Device에서 Hammermil를 이용하여 입자의 크기를 20~100mm로 파쇄를 한다.
- 2) Drying System에서 수분함량을 25%이하로 낮춘다.
- 3) Hammermil를 이용하여 다시 한 번 입자의 크기를 조절한다.
- 4) Food Hooper에 원료를 저장 한다.
- 5) Screw Feeder를 이용하여 가스रो에 원료를 공급한다.

#### 나, 하향식 공정베드시스템의 전처리공정

상향식 공정베드시스템의 전처리공정과 비슷하나 Initial Sizing Device에서 입자의 크기를 5~100mm파쇄를 하는 것과 Drying System에서의 수분함량을 60%로 이하로 조정하여 가스रो에 공급을 한다.

- 1) Initial Sizing Device에서 Hammermil를 이용하여 입자의 크기를 5~100mm로

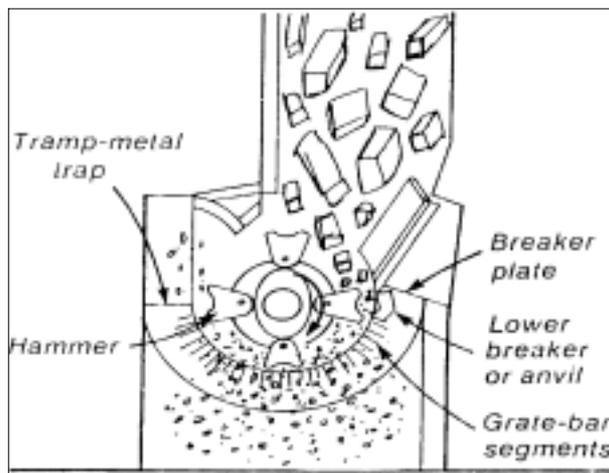
파쇄를 한다.

- 2) Drying System에서 수분함량을 60%이하로 낮춘다.
- 3) Hammermill를 이용하여 다시 한 번 입자의 크기를 조절한다.
- 4) Food Hooper에 원료를 저장한다.
- 5) Screw Feeder를 이용하여 가스로에 원료를 공급한다.

#### 다. 가스로의 주변기기

##### 1) Initial Sizing Device

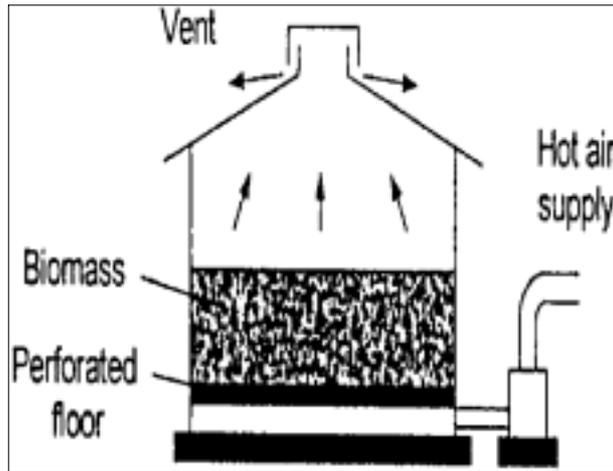
Hammermill은 분쇄용 블레이드로 구성되어 있는 로터리형식의 파쇄기이다. Hammermill 안으로 원료가 떨어지면 블레이드가 회전을 하면서 원료의 파쇄가 진행되며, Breaker plate를 이용하여 원료의 입자 크기를 조절한다.



[Figure 3-10] Hammermill

##### 2) Drying System

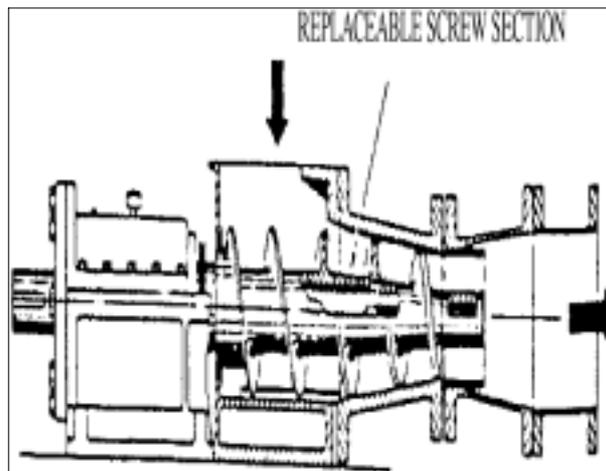
Perforated floor bin dryer는 바이오매스원료를 건조하는 공정 중 가장 간단하고 다루기 쉬운 공정이다. 바이오매스원료뿐만 아니라 농작물 건조에도 많이 사용된다. 우선 perforated floor 위에 젖은 바이오매스원료를 깊이 0.4~0.6m 정도로 채운다. 그 다음 100℃ 정도의 가열된 공기를 perforated floor 밑으로 주입을 해주면 가열된 공기가 원료를 통과하여 vent로 방출됨으로서 원료를 건조시켜준다.



[Figure 3-11] Perforated floor bin dryer

### 3) Fuel-feeding system

Screw Feeder는 바이오매스원료를 가스로에 최종적으로 공급해주는 스크루방식의 공정이다. 원료가 화살표 방향으로 유입이 되면 스크류가 돌면서 가스로가 있는 오른쪽으로 원료를 밀어준다. 이때 원료가 공급이 될 때 가스가 새어나오지 않도록 막아주는 역할도 병행한다.



[Figure 3-12] Screw Feeder

## 제 4 절 가스로의 제작 및 운전

### 1. 가스로 설계인자

#### 가. 가스화 장치(gasifier)의 종류 및 개발현황

탄소를 포함하고 있는 유기물질로부터 가연성 가스를 생산하는 기술은 오랜 역사를 가지고 있다. 소위 건류 혹은 열분해는 산소가 없는 환경에서 가열하여 열분해를 통해 휘발성 가스와 고형탄화물 혹은 숯을 얻는 공정으로서 영국 런던의 가스회사에 의해서 1812년에 상업적으로 운전된 바 있다.

최초의 상업용 가스화설비는 1839년에 최초로 설치된 바 있으며, 공기를 주입하여 소위 합성가스를 생산하는 공정을 이용한다. 1920년대까지 가스화설비는 다양한 연료를 이용하여 운전되었으며 산업용 전력과 열을 공급하였으나 점차 석유를 이용하게 됨에 따라 사라져갔다.

1920년부터 1940년의 기간 동안에는 석유의 불안정한 공급으로 인해 보다 정교한 하향식 가스화장치가 개발되어 자동차를 움직이기도 하였다. 2차 대전 동안에 수만대의 소위 목탄차가 유럽을 중심으로 운행되었으나 전후에 저렴한 석유가 공급됨에 따라 다시 사라지게 되었다.

1970년대 오일과동으로 인해 가스화에 대한 새로운 관심이 일어나게 되었다. 가스화는 특히 개발도상국에서 자급할 수 있는 자원으로 에너지를 생산할 수 있고 소규모 전기와 열 공급시스템으로 인식되었다. 1980년대 초에 주로 유럽의 10여개 제작사에서 소규모 목재 및 숯으로 가동되는 발전소를 공급하였다. 대략 250kW의 전력 생산 규모이다. 개발도상국 가운데 필리핀, 인도네시아, 인도, 브라질 등은 자체 개발한 기술로 가스를 적용하기 시작하였다. 수십 혹은 수백기의 바이오매스 가스화시스템이 많은 개도국에서 설치되었다.

1980년대에 서구에서는 석탄 가스화시스템에 관심을 가지게 되었다. 주로 열 공급을 위한 것으로 석유와 천연가스를 대체하기 위한 것이었다. 기술개발은 주로 석탄을 유동상 가스를 이용하여 합성가스를 제조하는 것이었다. 10~100MW(열) 규모로서 바이오매스 가스화와 연계되어 적용되기도 하였다. 현재 가스로의 개발은 가스 터빈을 이용한 열병합시스템에서 전력과 열의 생산에 집중되어 있다.

바이오매스 가스화는 이론적으로 단순하며, 다양한 종류의 가스로가 개발되었다.

고형 연료로부터 가스 연료를 생산한다는 것은 취급성이 양호하고 과잉공기량이 적고 적은 오염물질의 배출 등으로 인해 특히 내연기관 등에서 활용할 수 있다는 것이 매력적인 부분이라 할 수 있다. 그러나 바이오매스 연료는 매우 다양하며, 다양한 반응물 및 반응과정이 수반된다. 반응속도는 상대적으로 빠르다. 이러한 특성이 바이오매스 가스화가 매우 복잡한 성질을 가지게 되는 이유이며 가스로를 적정하게 운전하기 어려운 이유이다.

2차 대전 동안에 소규모 가스화가 얼핏 보기에 그 적용이 성공적으로 이루어졌다고 볼 수 있기 때문에 적지 않은 기업이나 기술자에게 이미 안정적인 이 기술을 다시 적용토록 유혹하고 있다. 그러나 2차 대전 동안에는 연료조건이 상대적으로 꽤 까다로웠다. 연료의 흐름과 관련된 문제는 자동차의 이동에 따른 진동으로 해결되었다. 그러나 그 당시에는 가동시간이 매우 짧았고 액체연료가 없었기 때문에 여러 가지 어려운 문제는 감수하는 여건이었다. 석유가 다시 공급됨에 따라서 아주 빨리 사라진 것을 보면 알 수 있다. 그 당시 전력생산에는 아주 튼튼하고 저속으로 가동하는 엔진이 이용되었다. 최근에는 대량생산되어 아주 값싼, 그러나 오염물질에 매우 민감한 고속에서 구동하는 엔진이 대부분이다.

가스화와 1MW 이하의 전력생산설비가 성공적으로 이루어진 사례도 있다. 2~3MW(열) 이상의 대규모 시스템에서는 정교한 장비가 구축되어 경제적이다. 유동상 가스로는 특히 경쟁력이 있다. 특히 침탄 발전설비와 연계되어 구동되는 경우 그렇다. 이러한 시스템은 조만간 상용화 될 것으로 전망된다. 본 연구에서는 고정상 가스로를 중심으로 살펴보고, 설계와 제작 및 운전특성을 살펴보았다. 먼저 고정상 가스로의 종류와 특성은 다음과 같다.

#### 1) 고정상 가스화 장치

고정상 가스화 장치는 전형적인 가스화 장치로 1000℃의 온도에서 반응하며 공기의 진행 방향에 따라서 상향식(updraft)과 하향식(downdraft) 및 향류식(cross-flow)으로 분류된다.

##### 가) 상향식(Updraft) 가스화장치

상향식 가스화장치는 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 철판에 퇴적되며 연소되어 온도가 1000℃의 고온에 이르며 목탄이 연료가스(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 혼입되어 배출된다. 이와 같이 고온의 가스화 된 연료가스가 열분해 및 건조에 사용되어 낮은 온도로 배출되므로 상향식 가스화장치의 열효율은 전체적으로 높으나, 연료가스의 타르의 함유량이 높고 작은 입자가 혼입될 수 있으므로 별도의 타르 및 분진 제거장치가 필요하다. 가스화반응구간에서의 반응온도의 조절은 가스화장치에 공급되는 공기에 스팀을 공급하거나 가습하여 조절한다.

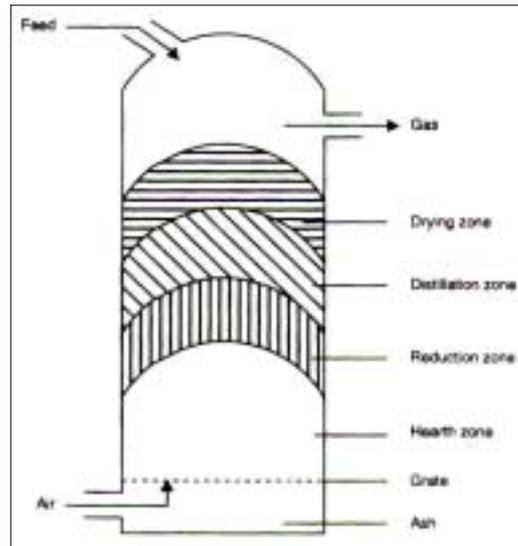
가장 간단한 가스로는 고정상 상향식 가스로이다. 바이오매스는 상부에서 투입되며 회분이 제거되고 바이오매스가 분해되면서 아래쪽으로 이동하게 된다. 바닥 쪽에서 공기가 유입되며 생성된 가스는 상부에서 배출된다. 바이오매스는 가스의 흐름과 반대방향이고 건조, 건류, 환원, 마지막으로 작열층으로 순서대로 이동하게 된다. 건조 층에서는 바이오매스가 건조되며 건류 혹은 열분해 층에서는 휘발성 기체와 고형의 차르/숯으로 분해된다. 열분해와 건조에 필요한 열은 주로 상부로 올라오는 합성가스와 일부 작열층의 복사열에 의해서 공급된다.

환원 층에서는 숯, 이산화탄소, 수증기와 관련된 여러 가지 반응이 일어나게 된다. 여기에서는 탄소가 반응하여 합성가스의 주요 성분인 일산화탄소와 수소가 생성된다. 작열부에서는 나머지 숯/차르가 연소되면서 열을 공급하고, 환원 층에서 일어나는 반응을 위하여 이산화탄소와 수증기를 공급한다.

상향식 가스로의 주요 장점은 그 구조가 매우 단순하다는 것과, 높은 차콜 분해, 내부 열교환 등으로 배출되는 합성가스의 온도가 낮고 효율이 높다는 것이다. 내부 열 교환으로 연료는 상층에서 건조된다. 따라서 수분을 많이 60% 까지 포함하고 있는 연료도 적용이 가능하다. 더욱이 상향식 가스로에서는 입자가 작은 연료와 크기가 불균등한 연료도 이용할 수 있다는 장점이 있다.

주요 단점으로는 합성가스 중에 다량의 타르와 열분해 부산물이 포함되어 있다는 것이다. 열분해 가스는 환원 층을 통과하지 않기 때문에 그대로 합성가스와 함께 배출된다. 합성가스가 바로 연소되는 경우 이것은 문제가 되지 않는다. 그러나 가스를

엔진에 적용하는 경우 가스의 정제가 큰 문제가 될 수 있다.



[Figure 3-13] Updraft or Countercurrent Fixed-Bed Gasifier

#### 나) 하향식(Downdraft) 가스화장치

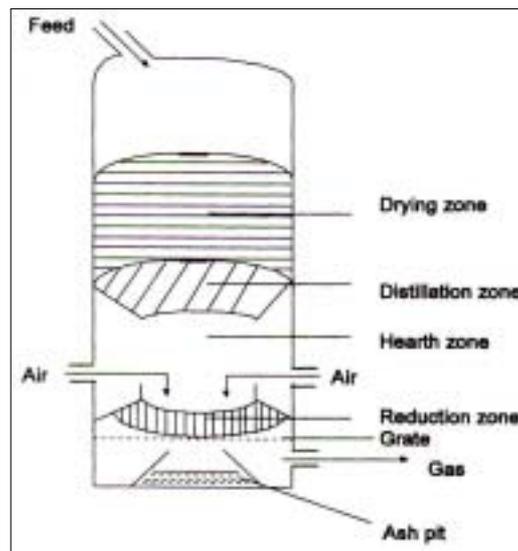
하향식 가스화장치에서 공기와 바이오매스는 같은 방향으로 공급되며 바이오매스가 상층으로 공급되며 상층으로부터 건조, 열분해, 발열, 가스화 반응구간 순서로 차례로 구성된다. 하향식 가스화에서는 바이오매스가 상부에서 투입되고, 공기 또한 상부 또는 측면에서 주입된다. 생성된 가스는 아래쪽으로 배출되어 바이오매스의 흐름 방향과 같다. 내부 반응 층은 상향식과 유사하나 순서는 약간 다르다. 바이오매스는 투입 후 건조 층에서 건조되며, 그 아래에 있는 건류 층에서 열 분해된다. 건조 층과 열분해 층은 주로 작열층의 복사열에 의해서 그리고 일부 대류에 의해서 소요 열이 공급된다. 작열층에서는 숯 성분의 일부가 연소된다. 열분해 가스는 또한 작열층을 통과하면서 연소 혹은 분해된다. 열분해가스가 연소되는 정도는 가스로의 설계, 바이오매스 연료, 가스화 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 실제로는 타르가 전혀 없는 가스는 좀처럼 얻기 어

럽다. 주된 이유는 모든 가스가 가장 뜨거운 환원 영역을 통과하지 못하기 때문이다. 작열층에서의 체류시간 또한 매우 짧다. 일부 가스로서는 타르가 대부분 분해될 수 있도록 설계하는 경우도 있는데, 이 경우 80-500kW의 전력을 생산하는데 적용이 가능하다.

하향식 가스로의 주요 단점은

- 합성가스가 환원층을 통과하기 때문에 합성가스 내에 회분과 먼지가 다량 포함되어 있다. 이곳에서 작은 입자들이 혼입된다.
- 투입 연료의 조건이 매우 까다롭다. 바이오매스 연료는 균등하게 4-10cm 정도 되어 작열부 목 부분에서 걸리지 않도록 해야 한다. 이런 조건에서 가스는 아래로 쉽게 흐를 수 있고 복사열이 상부로 충분히 전달될 수 있다. 이 때문에 하향식 가스로서는 펠렛으로 연료를 가공하는 경우가 있다.
- 바이오매스의 함수비는 습량기준 25% 이하라야 한다.
- 합성가스의 배출온도가 매우 높기 때문에 가스화 효율이 떨어지는 결과를 초래할 수 있다.



[Figure 3-14] Downdraft or Countercurrent Fixed-Bed Gasifier

열분해 반응구간에서 발생한 타르는 고온의 발열반응구간을 통과하면서 일부 분해

되므로 상향식 가스화장치에 비하여 가스화 된 연료가스의 타르의 오염정도가 낮으나 연료가스가 900~1000℃의 고온으로 발열반응구간에서 가스화구간을 거쳐 바로 배출되므로 상향식 가스화장치에 비하여 열손실이 많아 열효율이 떨어지는 단점이 있다. 이 가스화장치 역시 분진으로 오염되어 정제할 필요가 있다.

#### 다) 향류식(Cross-Draft) 가스화장치

향류식 가스화장치는 바이오매스가 상층으로 공급되며 상층으로부터 건조, 열분해 반응구간 순서로 차례로 구성되며, 가스화장치 측면으로 공기가 공급되고, 같은 높이로 발열, 가스화 반응구간 순서로 차례로 구성되며 가스화 된 연료가스는 공기가 공급되는 반대편으로 배출된다. 배출되는 연료가스의 온도는 800~900℃로 가스화구간을 거쳐 바로 배출되므로 열손실이 많아 열효율이 떨어지며 타르 함량이 높은 단점이 있다. 이 가스화장치 역시 분진으로 오염되어 정제할 필요가 있다. 직교식 가스로는 숯을 가스화하기에 적합하게 만들어졌다. 차콜/숯의 가스화는 작열부에서 1500도 또는 그 이상의 매우 높은 온도로 상승하므로 재료의 선정에 주의하여야 한다. 직교식 가스로의 장점은 소규모로도 가동한다. 개도국에서는 10kW 이하의 전력생산에 이용되었다. 사이클론과 여과상 등의 비교적 간단한 가스 정제방법이 동원된다. 주요 단점으로는 타르가 분해되지 않기 때문에 질이 아주 좋은 차콜을 이용하여야 한다.

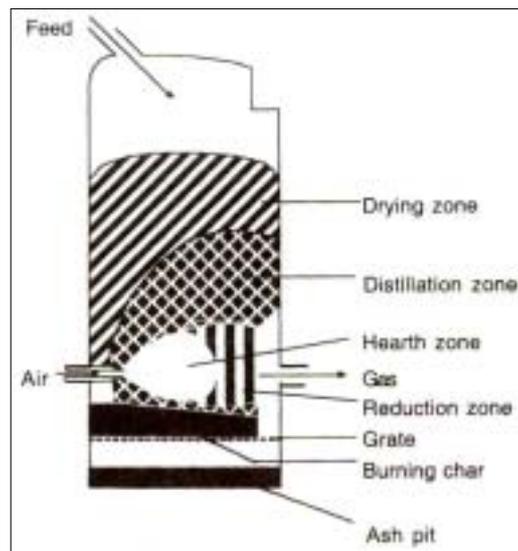
그 외에 개방식 가스로는 왕겨와 같이 주로 밀도가 낮은 미세한 연료를 가스화하는데 적합하다. 밀도가 낮기 때문에 좁은 목을 가지지 않는다. 연료의 브릿징 현상을 막기 위해서 목을 없애고 직선형의 형태를 갖는다. 회전형 바닥 grate를 이용하거나 하여 연료를 교란하고 회분을 제거한다. 특히 왕겨 가스로는 회분이 많기 때문에, 약 55% 정도, 바닥부분은 물로 채우는 경우가 있다. 물은 회분을 이송 매체로 기능을 한다. 현재 극히 소수의 상향식 가스로만이 가동 중이다. 대부분 남미지역에서 가동 중이다. 그러나 1940년대와 50년대에는 상당히 많은 수의 상향식 가스로가 농업부산물과 목질계 바이오매스를 이용하여 유럽지역에서 가동되었다. 유럽의 마지막 상향식 가스로는 독일에서 환경오염문제로 문을 닫게 되었다. 현재 대부분의 가스로는 따라서 하향식이다.

대부분의 하향식 가스로는 V형의 목을 가지고 있다. 이는 1920년대에 소개된 것으로서 열분해 가스가 온도가 높은 작열부에 집중되어 흘러 타르를 분해토록 하기 위해

서이다. 공기는 이 부분에 직접 공급된다. 주로 파이프나 벽면에 있는 노즐을 통해서 공기가 공급된다. 가스로 목의 직경은 2가지 기준에 의하여 적정하게 결정되어야 한다. 하나는 열분해가스가 충분히 분해, 환원되어 배출되지 않도록 하는 것과 두 번째는 바이오매스 흐름 속도와 목 부분에서 가스의 흐름이 최적화될 수 있도록 하는 것이다. 가스의 유속이 너무 빠르게 되면 회분이 함께 배출되므로 이를 고려하여야 한다.

최근의 설계는 반응조가 이중벽으로 만들어지는 경우가 있다. 합성가스는 벽간 공간을 통해서 배출되어 가스가 가지는 열이 바이오매스 연료의 열분해 층과 건조 층에서 충분히 전달될 수 있도록 한다. 소형 직경의 가스로에서는 이러한 열 교환이 아주 효과적으로 이루어진다. 또한 일부 설계에서는 열분해 가스가 상부의 뚜껑에 응축되어 따로 수집하여 별도의 관이나 탱크에 저장하는 경우도 있다.

Delacotte 가스로에서는 열분해가스가 상부에서 모아지고 별도의 반응조에서 부분 연소되거나 분해되도록 한다. 여기에서 얻어지는 배기가스는 작열부에 공급되며 차콜을 부분 연소시키거나 가스화하는데 이용된다. 상대적으로 타르가 거의 없는 합성 가스가 얻어진다.



[Figure 3-15] Cross-Draft fixed-Bed Gasifier

라) 고정상 가스화장치의 성능 및 문제점

일반적으로 고정상 가스화장치는 구조가 간단한 장점이 있으나 높은 타르함량과 낮은 열량의 연료가스를 생산하는 단점이 있다. 연료가스의 성분은 40~50% N<sub>2</sub>, 15~20% H<sub>2</sub>, 10~15% CO, 10~15% CO<sub>2</sub>, 그리고 3~5%의 CH<sub>4</sub>로 구성되며 연료가스의 열량은 4~6 MJ/Nm<sup>3</sup>의 낮은 열량값(CV, calorific value)을 보인다. 가스화매체로 공기를 사용하면 대기 중 높은 N<sub>2</sub> 함유율로 연료가스의 부피를 두 배로 증가시키기 때문에 연료가스 정제시설의 크기를 증가시키는 요인이 된다. 높은 열량값의 연료가스를 생산하기 위해서는 바이오매스의 함수율이 15~20% 이하로 건조되어야 한다. 따라서 가스화장치의 효율을 높이기 위하여, 온도로 배출되는 연료가스의 열에너지를 가스화장치에 공급되는 바이오매스의 건조에 활용되기도 한다.

연료가스의 질을 향상시키기 위하여 2단, 2개의 가스화 반응로의 장치가 개발되었으며 이 장치에서는 제 1단에서 600℃로 열을 가하여 열분해 시키고 생성된 가스에 스팀을 반응시켜 타르를 제거한다. 열분해로 생성된 가스는 다시 제 1단에서 생성된 목탄과 반응하여 최종 연료가스를 배출시킨다. Warren et al.(1995)에 의하면 이와 같이 생산한 연료가스는 정제 후 가스엔진을 가동시키는데 충분한 것으로 확인되었다.

[Table 3-19] Characteristics of Different Types of Gasifiers

<i>Characteristic</i>	<i>Downdraft</i>	<i>Updraft</i>
Fuel(wood)		
Moisture content(%wet basis)	12(max. 25)	43 (max. 60)
Ash content(%dry basis)	0.5(max. 6)	1.4 (max. 25)
Size(mm)	20-100	5-100
Gas exit temp(°C)	700	200-400
Tar(g/Nm <sup>3</sup> )	0.015-0.500	30-150
Sensitivity to load fluctuations	sensitive	not sensitive
Turndown ratio	3-4	5-10
h <sub>HG</sub> full load(%) <sup>a</sup>	85-90	90-95
h <sub>CG</sub> full load(%) <sup>b</sup>	65-75	40-60
Producer gas LHV(kJ/Nm <sup>3</sup> )	4.5-5.0	5.0-6.0

a. h<sub>HG</sub> Hot gas efficiency.

b. h<sub>CG</sub> Cold gas efficiency.

## 2) 유동상 가스화장치

유동상 가스화장치는 주로 석탄의 가스화에 널리 사용되어왔으며, 고정상 가스화 장치에 비하여 작은 크기의 균일한 바이오매스 입자와 발열부의 고온 가스가 균일하게 접촉하게 되므로 가스화 반응구간에서 균일한 온도분포를 얻을 수 있어 가스화 효율이 높은 장점이 있다. 현재 주로 사용되는 유동상 가스화 장치로 순환식 유동상(circulating fluidized bed) 가스화 장치와 bubbling bed 두 종류가 있으며, 이 두 가지를 조합한 새로운 고속 내부순환형(fast internally circulating) 가스화 장치가 개발 중에 있다.

### 가) 순환식 유동상 가스화장치

순환식 유동상 가스화장치는 제지산업계에서 나무껍질이나 기타 산림 잔유물을 높은 처리용량으로 가스화 하는데 사용되고 있다. 이 가스화 장치에서 바이오매스는 가스화 반응로와 원심분리장치(cyclone separator)사이를 순환하면서 가스화하며, 원심분리기에서는 재를 분리 제거하고 나머지 목탄과 바이오매스를 가스화 반응로로 되돌려 보낸다. 이 가스화 장치는 고압에서 작동할 수 있으므로 연료가스를 가스터빈에서 사용할 수 있도록 압축상태로 생산할 수 있는 장점이 있다.

### 나) Bubbling bed 유동상 가스화장치

Bubbling bed 유동상 가스화장치는 바닥에 공기가 공급되는 다공 철판이 설치된 가스화 반응 용기와 다공 철판 위로 작은 크기의 입자로 덮여있는 유동상으로 구성 되어있으며 이 유동상 위로 바이오매스가 유입된다. 이 유동상의 온도는 공기와 바이오매스의 혼합비를 조절하여 700~900℃ 유지되며 바이오매스는 이 유동상에서 열분해 되어 목탄과 가스 생성물로 변환된다. 이때 생성되는 타르는 고온의 유동상과 접촉하여 분쇄되므로 생성되는 연료가스는 1~3 g/Nm<sup>3</sup> 이하의 낮은 타르를 함유하는 장점이 있다.

### 다) 유동상 가스화 장치의 성능 및 문제점

유동상 가스화 장치의 운영상 가장 큰 어려움은 작은 입자로 덮여있는 유동상에 바이오매스의 재가 쌓이는 문제와 1년 생 식물의 풀에서 발생하는 알칼리성 성분의 함량이다. 재료인한 문제를 해결하는 방법으로 유동상의 온도를 낮추는 방법이 있으나 이는 재와 함께 배출되는 목탄이 손실되는 문제를 발생시킨다. 이 가스화 장치

에 포함되는 불순물로 입자와 타르, 질소화합물, 황화합물, 그리고 알칼리 화합물이 있다. 이와 같은 불순물을 제거하기 위한 방법으로 저온 및 고온 정제방법이 있으나 고온 정제방법은 기술적으로 어려움이 많고, 저온 정제방법은 기술적으로 간단하나 타르로 오염된 오수를 발생시키므로 오수처리 문제가 있는 것으로 알려져 있다.

#### 나. 가스화 장치의 기본 설계인자

바이오매스의 가스연료로의 변환은 열분해와 가스화로 생성된다. 열분해는 일반 대기 중에서의 유기물질의 열분해를 의미하며, 바이오매스의 열분해 생성물은 목탄, 응축성 액체 및 가스이다. 바이오매스는 세 가지 주요성분(cellulose, hemicellulose, lignin) 및 소량의 다른 성분들(추출물과 무기화합물)의 혼합체이며, 열분해(pyrolysis)는 일련의 복합적이고 동시적이며 연속적인 반응으로 진행된다. 반응조건은 세 가지 주요 반응생성물, 즉 목탄(charcoal), 타르(tar), 가스(gas)의 생성비율 및 조성에 큰 영향을 미친다. 반응생성물의 수율에 영향을 미치는 반응조건으로 가열비율(heating rate), 반응생성물의 잔류시간, 가열 최고 온도 및 압력이 있다. 가스화 장치에서 바이오매스의 열분해 반응은 다음과 같은 3단계 과정을 거친다.

1단계 : 휘발성 물질과 목탄이 생성되는 열분해

2단계 : 휘발성 물질의 열분해

3단계 : 목탄의 열분해 반응

바이오매스의 열분해로 휘발성 물질과 목탄이 생성되며, 휘발성 물질은  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  및  $C_3H_6$ 의 혼합물로 구성되어있으나 그 양은 10~20%정도에 지나지 않는다. 따라서 바이오매스의 가스화는 70%이상의 열용량을 가지고 있는 목탄의 가스화에 의하여 수율이 결정된다.

가열비율, 잔류시간, 반응온도에 대한 영향은 다음과 같이 목탄, 타르 및 가스의 생성비율 특성으로 설명할 수 있다(Diebold, 1980).  $500^\circ C$ 의 가열온도에서 가스의 생성량은  $10^6 W/m^2$  이상의 순간가열과 0.01초의 잔류시간에서 11%,  $10^5 W/m^2$  이상의 고속가열과 1초의 잔류시간에서 16%,  $10^4 W/m^2$  이상의 중속가열비율과 100초의 잔류시간에서 24%, 및  $10^3 W/m^2$  이하의 저속가열비율의 조건에서 10%로 중속가열비율 이상에서는 잔류시간이 증가할수록 가스의 생성량이 증가하는 것으로 나타났다.  $1000^\circ C$ 의 가열온도에서는 가스의 생성량은  $10^6 W/m^2$  이상의 순간가열비율과 0.01초

의 잔류시간에서 85%,  $10^5\text{W/m}^2$  이상의 고속가열비율과 1초의 잔류시간에서 71%,  $10^4\text{W/m}^2$  이상의 중속가열과 100초의 잔류시간에서 51%, 및  $10^3\text{W/m}^2$  이하의 저속가열의 조건에서 25%로 가열비율이 증가할수록 가스의 생성량이 증가하는 것으로 나타났다.  $1000^\circ\text{C}$ 의 가열온도에서는 응축성 물질(tar)과 목탄이 분해되어 가스의 함량이 증가한다.  $1000^\circ\text{C}$ 의 가열온도와 순간가열비율에서 가스 생성량이 85%, 타르가 15%인 반면 목탄은 거의 발생하지 않았다.  $1000^\circ\text{C}$ 의 반응온도에서 가열비율이 증가할수록 가스의 발생량이 증가하는 것으로 나타났다.

#### 다. 가스화 장치 공정 관련 설계인자

가스화 장치의 주요 공정은 크게 건조, 열분해, 발열, 가스화, 타르 및 분진 정제 공정으로 구성된다. 열분해 및 가스화 공정에 관련된 인자는 가열비율(heating rate)과 반응온도로 대표된다. 앞 절에서 조사된 바와 같이 높은 연료가스 생성률과 낮은 타르 발생량을 얻기 위하여 열분해와 발열 및 가스화 공정에서  $1000^\circ\text{C}$ 의 가열온도에서,  $10^6\text{W/m}^2$  이상의 순간가열비율과 0.01초의 잔류시간으로 가스화 장치를 제어할 수 있도록 열분해, 발열 및 가스화 공정을 설계하고자 하며, 이를 위하여 가열비율과 온도 및 가스화 장치에 공급되는 공기의 압력을 제어하는 장치를 설계하고자 한다.

##### 1) 가열온도의 조절

가열온도는 가스화장치에서 발생된 고온의 연료가스의 폐열을 회수하여 스팀발생장치에서 재활용하며 가스화 장치에 공급되는 공기에 스팀의 양을 조절하여 제어하고자 한다. 또한 가스화 장치의 외벽으로의 열손실을 최소화 할 수 있는 단열 구조물을 설계한다.

##### 2) 가열비율의 조절

$10^6\text{W/m}^2$  이상의 순간가열비율을 얻기 위하여 바이오매스의 발열부에서의 열전달 모델을 개발하여 시뮬레이션을 통하여 순간가열비율을 얻을 수 있는 조건을 구명하고, 바이오매스 물질의 크기 및 형태를 고려한 가열비율 제어장치를 설계한다.

##### 3) 바이오매스의 가스화에서의 촉매의 사용

$650^\circ\text{C}$ 에서 바이오매스의 가스화 공정에 촉매( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot$

2H<sub>2</sub>O)를 사용한 연구 결과에 의하면 촉매를 사용하지 않은 경우보다 가스 발생량이 약 두 배 증가하였으며, 제2의 촉매(Ni, Si-Al)를 사용한 결과 CH<sub>4</sub> 가스의 생성량이 1차 촉매만 사용한 경우보다 두 배 이상 증가하는 연구결과를 토대로 1000℃에서 촉매를 사용하여 가스발생량을 증대시킬 수 있는 가스화반응로를 설계하고자 한다.

## 2. 가스로의 제작

### 가. 가스화 장치의 설계방향

가스화장치의 설계방향을 결정하기 위하여 앞서 조사된 각종 가스화 장치의 장단점을 다음과 같이 Table 3-20에 비교 정리하였다. 가스화 장치의 기본 형태를 선택하기 위한 요인으로 가스화 장치의 제작비용과 생산된 연료가스의 정제비용, 운전 및 유지 보수비용, 가스화 장치의 견고성, 가스화 바이오매스의 전처리 과정(건조, 분쇄, 분리 등)의 필요성 등이 있다. 이와 같은 가스화 장치 선택 요인을 고려하면 유동상 가스화 장치는 다음과 같은 문제점으로 고정상 가스화 장치에 비하여 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

- 1) 유동상 가스화 장치는 설계와 작동이 복잡하다.
- 2) 가스화 장치에 공급되는 바이오매스는 작은 크기의 입자로 분쇄되어야 한다.
- 3) 지나치게 작게 분쇄된 입자는 유동상 가스화 장치의 유동성을 저해한다.
- 4) 유동상 가스화장치에서 생산된 연료가스는 높은 타르의 함량으로 추가 가스정제시설을 필요로 한다.

위에 언급된 바에 의해서 본 연구에서는 유동상 가스화 장치에 비하여 구조와 설계가 간단한 고정상 가스화 장치를 선택하였으며, 고정상 가스화 장치 중 타르의 함유량이 적고 수소와 일산화탄소가 다른 가스로 장치에 비해 많이 생성되고 목재류 원료를 가스화하기에 적합한 하향식(downdraft) 고정상 가스화장치를 바이오매스의 가스화 장치로 개발하기로 결정하였다.

가스로를 설계하는데 있어서 가스로 반응부 체적의 결정은 투입원료의 발열량과 열부하량과의 관계를 통해서 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\text{반응부 체적 } V = [\text{처리량} * \text{단위중량당 열량} * (1-\text{냉가스효율})] / \text{열부하량}$$

투입 바이오매스에 대한 단위중량당 열량은 미 반응부분을 고려하여 이론적인 발열량보다 적은 값을 취하는 것이 일반적이다. 바이오매스 열량을 3,200 kcal/kg 이라고 할 때 미 반응 율을 10%로 가정하고 단위중량당 열량은  $3,200 - 320 = 2,880$  kcal/kg. 열부하량은 기존의 가스화 반응기에 대한 조사를 통해서 자료를 얻을 수 있다. 폐기물 가스로에 있어서 연료의 발열량과 열부하량과의 관계를 통해서 열부하량은  $100,000$  kcal/m<sup>3</sup>\*h 수준이다. 따라서 이러한 조건에서의 반응부 체적은 10kg/hr의 합성속도 조건에서

$$10 \text{ kg/hr} * 2,880 \text{ kcal/kg} * (1-0.7) / 100,000 \text{ kcal/m}^3 * \text{hr} = 0.086 \text{ m}^3$$

으로 계산된다.

기체-고체 반응계에서 일어나는 전체 반응속도는 고체 표면에서 일어나는 화학반응뿐만 아니라 입자를 통한 물질 전달에서 영향을 받는 특성을 갖기 때문에 다음과 같은 5가지 단계의 반응으로 나누어 생각할 수 있다.

- a. 고체 입자 주위에 있는 기체막을 통한 반응물의 확산
- b. 다공질인 고체 입자 내부로의 반응물의 확산
- c. 고체 표면과의 화학반응
- d. 기체상 생성물이 반응표면으로부터의 탈착
- e. 다공성인 고체 입자의 입자주위의 기체 경막을 통한 생성기체의 확산

가스화의 경우 a, b, c 단계가 주로 반응속도를 결정하는 것으로 알려져 있다. 바이오매스 가스화에 있어서 회분은 가스흐름에 의하여 이탈되어 층이 회분 층이 형성되지 않으므로, a와 c의 두 단계 즉 기체막을 통한 반응물의 확산과 바이오매스와 가스화의 표면반응이 반응속도를 결정한다고 볼 수 있다. 이를 확인하기 위해서는

TGA(Thermo Gravimetric Analysis) 실험을 통하여 확인할 수 있다. 이 실험은 바이오매스를 투입하고 일정량의 질소를 주입하면서 약 700~1000℃ 정도까지 가온하고 무게를 측정한다. 그 이후에 공기를 일정유량 조건으로 주입하면서 무게감량을 측정한다. 바이오매스는 반응기 안에서 4단계 즉, 건조, 열분해, 가스화, 연소의 반응 영역이 있는데 열분해 영역은 그 속도가 매우 낮기 때문에 열분해반응속도가 전체 반응속도를 결정하게 된다. 연소영역에서 연소반응은 매우 빠르게 진행되나 산화제 즉 공기가 고체 표면에 접근하는 속도에 따라 반응속도가 결정된다. 즉 연소영역에서는 고체입자 주위에 있는 기체막을 통한 반응물의 확산단계가 전체 반응속도를 결정하게 된다.

기체-액체의 반응 가운데 반응물의 확산이 지배적인경우와 고체표면과의 화학반응이 지배적인 경우 반응기 반경(R)과 체류시간(T)과의 관계는

$$T \propto R^2 \quad \text{반응물의 확산이 지배적인 경우}$$

$$T \propto R \quad \text{고체표면과의 화학반응이 지배적인 경우}$$

또한 전환율과 체류시간과의 관계는 다음과 같다

$$\frac{t}{T} = 1 - \left(\frac{R}{R_o}\right)^2 = 1 - (1 - X)^{2/3} \quad \text{반응물의 확산이 지배적인 경우}$$

$$\frac{t}{T} = 1 - \left(\frac{R}{R_o}\right) = 1 - (1 - X)^{1/3} \quad \text{고체표면과의 화학반응이 지배적인 경우}$$

여기에서  $R_o$ 는 equivalent radius로서 초기 투입 고형연료의 반경을 나타낸다. 따라서 고형연료의 반응기로의 주입은 체류시간과 전환율에 의해서 결정된다. 투입주기를  $t$ 로 가정하면  $n$ 번째 전에 투입된 고형연료의 직경은 다음과 같다.

$$L_n = 2R_o \left(1 - \frac{nt}{T}\right)^{1/2} \quad \text{반응물의 확산이 지배적인 경우}$$

$$L_n = 2R_o \left(1 - \frac{nt}{T}\right) \quad \text{고체표면과의 화학반응이 지배적인 경우}$$

여기에서  $n < T/t$  이다.

그러므로 지배반응 단계별 소요 반응기의 길이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{FD} = 2R_o \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i^* t}{T}\right)^{1/2} \quad \text{반응물의 확산이 지배적인 경우}$$

$$L_{FD} = 2R_o \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i^* t}{T}\right) \quad \text{고체표면과의 화학반응이 지배적인 경우}$$

각각의 지배반응 단계를 고려하여 전체 가스화 반응기의 길이는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$L_{tot} = \frac{L_{FD} \times W_{FD} + L_{CR} \times W_{CR}}{W_{FD} + W_{CR}}$$

여기에서  $L_{TOT}$  = 반응기의 총길이 (m)

$L_{FD}$  = 확산이 지배적인 경우에 해당하는 반응기의 길이(m)

$L_{CR}$  = 표면과의 화학반응이 지배적인 경우에 해당되는 반응기 길이(m)

$W_{FD}$   $W_{CR}$  각각의 경우에 해당하는 가중치로서 합은 1이다.

이와 같은 과정을 통해서 반응기의 체적과 길이를 계산하여, 반응기를 제작하는 것이 가능하다.

Jayah et al. (2003)은 80kW<sub>th</sub> 규모의 하향식 가스로를 제작하여 가스화장치의 설계 인자에 대하여 고찰하고, 가스화장치의 설계에 있어서 중요한 변수들에 대해 제시한 바 있다. 이들은 반응기를 이중벽으로 하고, 12개의 6mm 직경 노즐을 통해서 공기를 연소부에 공급하는 방식으로 설계하였다. 노즐은 가스로 목 부분의 100mm 위쪽에 설치하였으며, 100mm 직경의 목부는 내화물로서 알루미늄나 캐스터블을 이용하고 내화벽돌로 둘러싸. 단열재는 별도로 설치하지 않았으나 단열에 의해 가스화

효율은 크게 개선됨을 실험결과 제시하고 있다. 목부에서 시작되는 가스화 환원 반응부는 220mm 길이로 수평기준 61°로 확대하는 방식으로 제작하였다. 환원반응부의 바닥은 화상 즉 받침대를 설치하였다. 화상은 50mm 직경의 galvanized steel 파이프 로 제작하였다.

목편의 크기는 숯의 가스화 변환율에 영향을 미치는 중요한 매개변수 중의 하나로서 결국 변환 효율에 직접 관계가 있다. 목편의 크기는 가스로의 직경에 의해 결정된다. 7.5cm 직경의 가스로서 0.6cm의 목편을, 60cm 직경의 가스로서 4.7cm의 목편을 이용한 사례가 있다.

Jayah 등이 분석한 결과에 의하면 앞에서 언급한 가스로의 조건에서 목편의 크기를 1, 3, 5cm로 하였을 때 가스화 효율은 가장 적은 1cm 조건에서 가장 높았으며 5cm 조건에서 가장 낮았다. 목편의 직경이 큰 경우 반응부의 길이가 더 늘어나야 한다. 반응부의 직경이 적은 경우 충분히 적은 크기의 목편이 공급되어야 함을 알 수 있다. 그러나 직경이 작은 목편은 일반적으로 가공비용이 더 소요된다는 것을 고려해야 한다.

바이오매스 연료의 함수비 또한 합성가스 조성에 영향을 미치는 주요 변수 중의 하나이다. 연료 중의 수분은 증발되는데 열이 필요할 뿐만 아니라 가스로 내부 온도까지 상승하는데 열이 소요되므로 가스화 효율에 크게 영향을 미친다. 따라서 함수비는 가능한 한 낮추는 것이 필요하다. 67% 이상의 함수비를 가지는 경우 합성가스는 점화자체가 곤란한 수준이다. 가연성 가스를 생산하기 위해서는 함수비가 33% 이하로 낮아야 한다. 함수비가 0% 인 경우에 비해 30% 인 경우 가스화 효율은 약 10% 정도 낮아진다.

공급 공기의 온도 또한 영향을 미치는 요인으로서, 공급되는 공기의 온도가 높을수록 가스화 효율은 개선된다. 다른 요인들에 비해서 가스화 효율에 미치는 영향은 상대적으로 작다.

가스화 반응에서 가장 중요한 요인은 열 손실률이다. 일반적으로 상용 가스화장치에서는 열손실이 최고 약 10% 정도 수준이면 적당하다. 열손실이 크면 반응로의 온도가 낮아지고 결국 가스화 반응과 효율은 떨어지게 된다. 소규모 가스로서는 전체 공정 또는 열수지에서 차지하는 비율이 높기 때문에 매우 치명적인 요인이 될 수 있다.

[Table 3–20] Properties of gasification reactor types

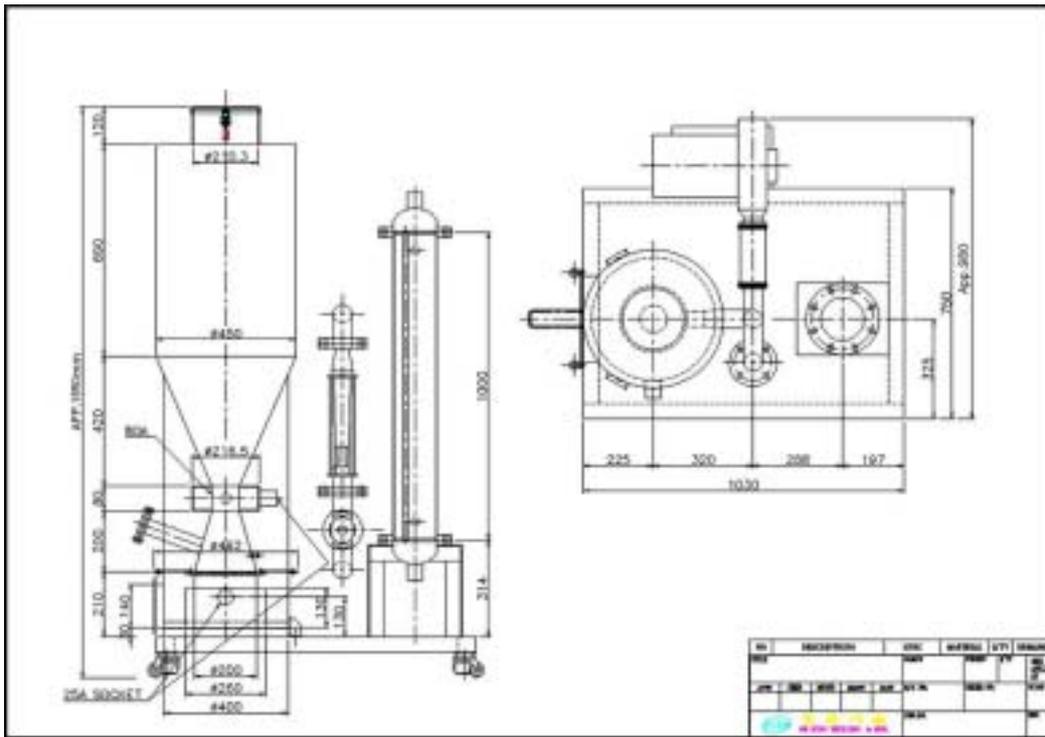
Advantages	Disadvantages
<p><b><i>Fixed/moving bed, updraft</i></b>                      Simple, inexpensive process                      Exit gas temperature about 250 C                      Operates satisfactorily under pressure                      High carbon conversion efficiency                      Low dust levels in gas                      High thermal efficiency</p>	<p><b><i>Fixed/moving bed, updraft</i></b>                      Large tar production                      Potential channeling                      Potential bridging                      Small feed size                      Potential clinkering</p>
<p><b><i>Fixed/moving bed, downdraft</i></b>                      Simple process                      Only traces of tar in product gas</p>	<p><b><i>Fixed/moving bed, downdraft</i></b>                      Minimum feed size                      Limited ash content allowable in feed                      Limits to scale up capacity                      Potential for bridging and clinkering</p>
<p><b><i>Fluidised bed</i></b>                      Flexible feed rate and composition                      High ash fuels acceptable                      Able to pressurize                      High CH<sub>4</sub> in product gas                      High volumetric capacity                      Easy temperature control</p>	<p><b><i>Fluidised bed</i></b>                      Operating temperature limited by ash clinkering                      High product gas temperature                      High tar and fines content in gas                      Possibility of high C content in fly ash</p>
<p><b><i>Circulating fluidised bed</i></b>                      Flexible process                      Up to 850 C operating temperature                      Double fluidised bed                      Oxygen not required                      High CH<sub>4</sub> due to low bed Temperature                      Temperature limit in the oxidiser</p>	<p><b><i>Circulating fluidised bed</i></b>                      Corrosion and attrition problems                      Poor operational control using biomass                      More tar due to lower bed temperature                      Difficult to operate under pressure</p>
<p><b><i>Entrained bed</i></b>                      Very low in tar and CO<sub>2</sub>                      Flexible to feedstock                      Exit gas temperature</p>	<p><b><i>Entrained bed</i></b>                      Low in CH<sub>4</sub>                      Extreme feedstock size reduction required                      Complex operational control                      Carbon loss with ash                      Ash slagging</p>

(Rampling, 1993)

나. 가스로의 설계 및 제작

1) 하향식 가스로 Version.1

가스로의 적정온도, 가스로와 연소로의 연결, 바이오매스의 가스로 내 체류시간, 연료가스의 생성, 가스로 내에서의 연료의 흐름, 가스로 용량에 따른 가스로 가동시간, 최적의 공기량 등을 조사하기 위하여 문헌을 기초로 하향식 가스로 Version.1을 설계하였다. 하향식 가스로 Version.1의 설계도면은 아래의 Figure 3-16에 나타내었다.



[Figure 3-16] Drawing of Down-draft Gasifier Version.1

원료 투입구는 직경이 210.3mm이고 가스로 상부에 원료가 체류할 수 있는 공간을 직경 450mm, 높이 690mm의 크기로 배치하였고 그 아래에는 원료의 흐름을 원활하게 하기 위하여 역원추형 흡퍼의 모양으로 제작하였으며 사방으로 직경 25mm의 공기주입구를 설치하였다. 하부는 높이 200mm의 원추형 흡퍼 형식으로 제작하였으며 끝에는 탈착이 가능하도록 다공판(mesh)을 직경 200mm로 설치하였다. 가장 아랫부

분에는 점화와 가스로 구동이 끝나고 재 등의 청소를 위하여 개폐가 가능하게 하였고 송풍을 위하여 송풍기와 공기 유량계를 설치하고 유량조절이 가능하도록 밸브를 설치하였다. 생성가스 유출부에는 냉각장치를 설치하였다. Photo 3-17 은 하향식 가스로 Version.1의 제작된 모습이다.

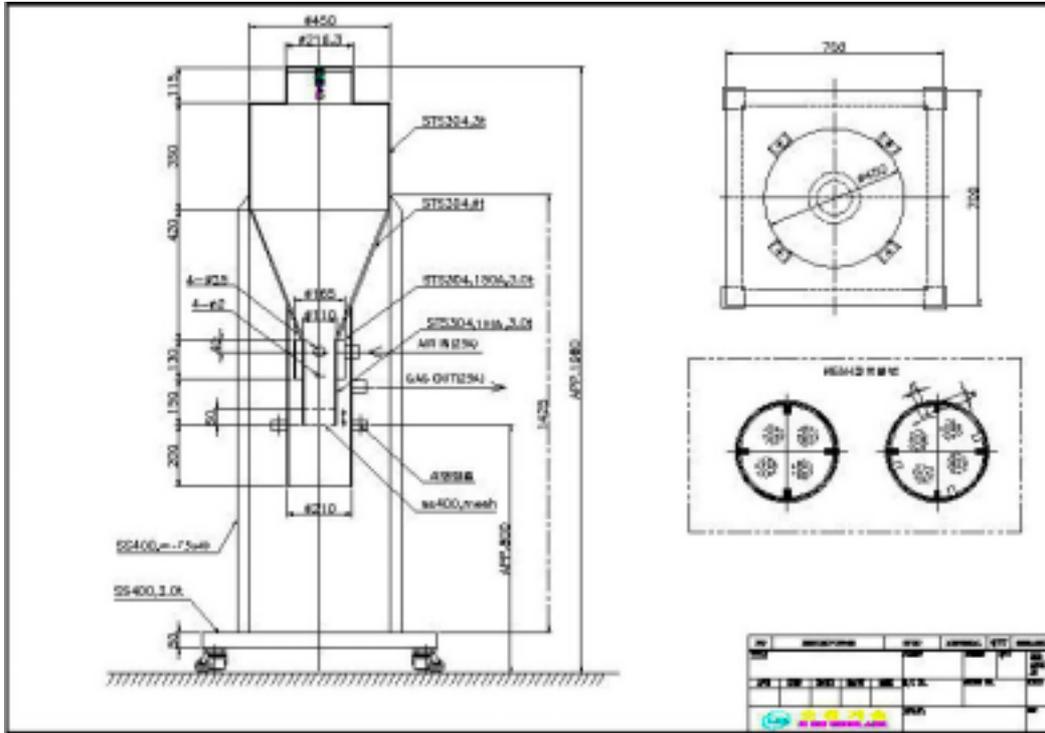


[Photo 3-17] Picture of Down-draft Gasifier Version.1

## 2) 하향식 가스로 Version.2

하향식 가스로 Version.1을 제작하여 구동한 결과 연료의 흐름이 원활하지 않아 구동 중간에 연소가 멈추는 현상이 반복되어 역원추형 흡퍼의 각도를 좀 더 세웠고 아랫부분에 점화와 가스로 구동이 끝나고 재 등의 청소를 위하여 만들었던 개폐구가

너무 아래쪽으로 있어 작업에 불편함이 있어 개폐구를 위쪽으로 올려서 설계하였다. 또 연소부위를 흡퍼형식으로 했던 것과는 달리 원통형으로 설계하였고 좀 더 원활한 송풍과 충분한 송풍량을 공급하기 위하여 직경 2mm의 공기구멍을 기존에 있던 공기구멍 아래쪽으로 배치하였다.



[Figure 3-17] Drawing of Down-draft Gasifier Version.2

원료 투입구는 직경이 210.3mm이고 가스로 상부에 원료가 체류할 수 있는 공간을 직경 450mm, 높이 350mm의 크기로 배치하였다. 환원부의 직경은 100mm로 제작하였다. 탈착이 가능하도록 다공판(mesh)을 직경 400mm로 설치하였고 환원층의 높이를 조절할 수 있도록 다공판의 설치위치를 50mm 간으로 조절이 가능하게 제작하였다. Version.1과는 달리 송풍은 Compressor (4HP)를 이용하였고 공기 유량계를 설치하고 유량조절이 가능하도록 밸브를 설치하였다. Version.2에서는 생성가스 유출부에는 냉각장치를 설치하지 않았다. Photo 3-18 은 하향식 가스로 Version.2의 제작된 모습이다.

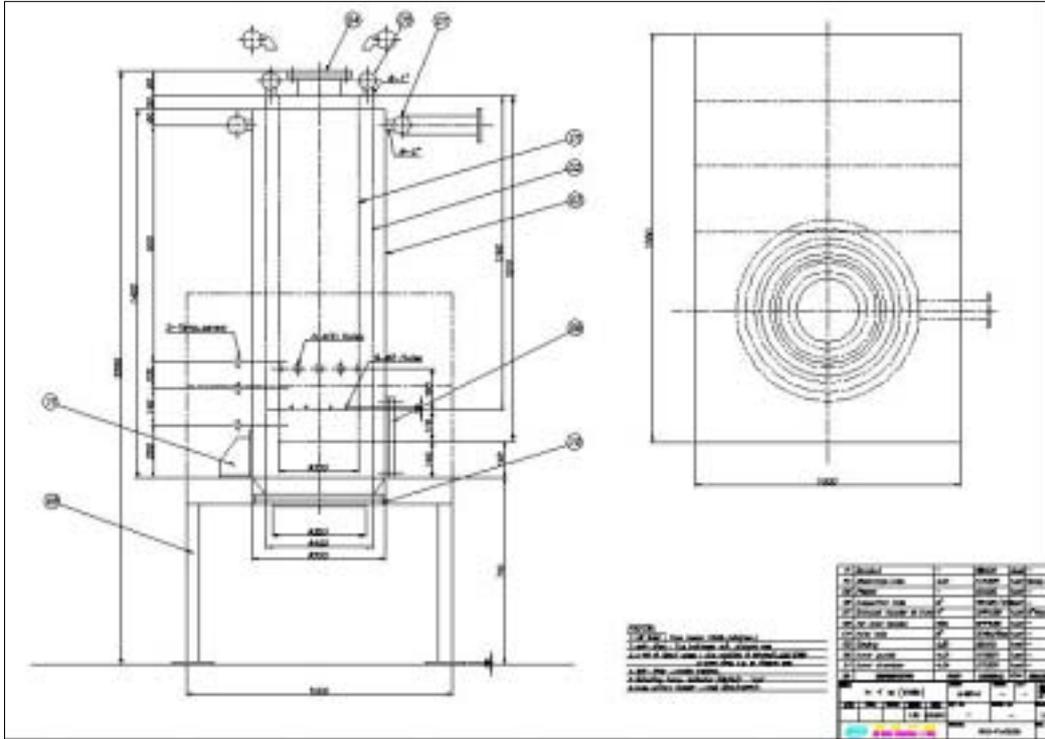


[Photo 3-18] Picture of Down-draft Gasifier Version.2

### 3) 하향식 가스로 Version.3

하향식 가스로 Version.2를 제작하여 구동한 결과 압력손실이 많이 일어나는 것으로 나타났다. 이에 압력손실을 줄이기 위하여 연소부위의 직경을 100mm에서 300mm로 3배를 늘려서 설계하였다. 또한 충분한 공기주입을 위하여 공기주입구를 일정한 간격으로 8개를 배치하였고 직경 또한 30mm로 키웠다. 아랫부분에 점화와 가스로 구동이 끝나고 재 등의 청소를 위하여 만들었던 개폐구가 여전히 사용의 불편함이 있어 재 등의 청소를 위해 개폐구를 설치하고 점화를 위해서 연소부 옆으로 개폐구를 하나 더 설치하였다. 기존의 가스로와는 달리 홉퍼의 형태를 하지 않고 원

통형으로 설계하였다.



[Figure 3-18] Drawing of Down-draft Gasifier Version.3

직경 300mm, 400mm, 500mm의 원통으로 가스료 몸통을 제작하였으며 외부 원통을 공기주입구에 맞추어 설치하여 송풍구를 통한 공기주입이 고르게 주입되도록 하였다. 또 500mm원통을 설치하여 생성되는 연료가스를 위쪽의 유출구를 통해서 유출되도록 제작하여 열손실을 줄이도록 제작하였다. 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 배치하였다. Version.1 과 Version.2에서와 같이 탈착이 가능하도록 다공판(mesh)을 직경 300mm로 설치하였다. 송풍량을 조절하기 위하여 Air Flowmeter(max. 1200m<sup>3</sup>/hr)를 설치하였다. 공기주입은 1.5kW 고압 송풍기(DTB-403, 3Φ, 60Hz, 230/380V, 2P)를 사용하였고 유량 조절을 위해서 밸브를 설치하였다. Photo 3-19 은 하향식 가스로 Version.3의 제작된 모습이다.



[Photo 3-19] Picture of Down-draft Gasifier Version.3

### 3. 가스로의 운전 및 평가

#### 가. 가스로 운전조건

배 전지목을 탄화시켜 숯으로 제조한 것, 목편(원료목은 참나무, 아카시아, 밤나무 등), 숯과 목편을 섞어서 원료로 사용하는 등으로 연료조건을 달리하면서 가스화장치를 가동하였다. 송풍량을 조절하면서 가동하였고, 가동 시작시점부터 가동이 끝나는 시점까지 일정한 시간단위로 연소부, 연소부 위, 아래 각각 온도를 측정하였다. 점화는 일반 가스토치를 이용하여 직접 점화하였고 생산되는 합성가스는 유출부에 연통을 연결하여 생산되는 즉시 연소하였다. 합성가스 조성분석 시에는 잠시 연소를 중

단하였다. 유출되는 합성가스가 연소되지 않는 경우에는 가스토치를 이용하여 강제로 연소시켰다. 가스로 구동 시 원료조건은 다음과 같았다.

[Table 3-21] 가스로구동에 투입되는 원료조건

원료	입도	중량	함수비
숯1	2~3cm 이하	13.925	6.98
숯2	2~3cm 이상	10.64	7.52
목편	3cm	17.2	14.75
숯+목편 (부피비로 1:1)	5~7mm	25.35	32.16

나. 가스로의 구동

1) 숯(입도 2~3cm 이하) 연료조건

Table 3-22는 숯(입도 2~3cm 이하)을 이용한 하향식 가스로 구동 결과이다.

[Table 3-22] Temperature and flammability changes(charcoal size < 2~3cm)

Time (min)	Air Flow rate (L/min)	Temp.(°C)			Flammability	Reference
		1	2	3		
0	500	41	42	120	O	불꽃 열은 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 적색의 불꽃을 일으키며 연소가 시작되었고 유량조건이 1000LPM이고 30분 정도 지났을 때 최고온도 686°C를 나타냈으며 불꽃이 푸른/적색

을 띄는 것이 연소상태가 좋다는 것을 알 수 있다. 하지만 얼마 지나지 않아 연기가 급속히 증가하면서 불이 꺼졌다. 총 가동시간은 39분 정도이며 이중 연소부에서 변환공정이 일어나 연료가스가 생산된 시간은 약 39분 정도이다. 구동이 모두 끝나고 나서 가스로를 해치해본 결과 약간의 재만 남아있고 모두 연소된 것을 알 수 있었다. 이로서 직경 300mm의 가스로에서 입도가 2~3cm이하인 숯의 양은 21.42 *kg/hr* 임을 알 수 있다.



[Photo 3-20] Small charcoal

2) 숯(입도 2~3cm 이상) 연료조건

Table 3-23은 숯(입도 2~3cm 이상)을 이용한 하향식 가스로 구동 결과이다.

[Table 3-23] Temperature and flammability changes(charcoal size > 2~3cm)

Time (min)	Air Flow rate (L/min)	Temp.(°C)			Flammability	Reference
		1	2	3		
0	500	365	410	389	O	불꽃 열은 적색
4	500	451	402	386	O	불꽃 적색
10	1000	617	562	449	OO	유량변동이 심하고 연기 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°C, 하단 : 225°C
33	1000	696	664	521	O	불꽃 열은 적색
37	500	736	703	531	O	연기 심하게 발생, 불이 약함
51	250	623	639	505	X	연기 심하게 발생, 강제점화 종료

( ) Outside temperature(°C)

작은 입도의 숯과 마찬가지로 가동초기부터 유출부에서 연소가 시작되었고 유량조건을 1000LPM에서 250LPM으로 낮춘 시점인 26분 정도에서 최고온도 726°C를 나타냈다.



[Photo 3-21] Large charcoal

하지만 약 10분정도에 유량계의 눈금이 심하게 흔들리면서 유량변동이 심하였다. 그 후 유량을 500LPM으로 높인 시점부터 유량변동이 안정화되면서 연소상태가 좋아졌다. 총 가동시간은 51분 정도이며 이중 연소부에서 변환공정이 일어나 연료가스가 생산된 시간은 약 40분 정도이다. 구동이 모두 끝나고 나서 가스로를 해치해본 결과 약간의 재만 남아있고 모두 연소된 것을 알 수 있었다. 이로서 직경 300mm의 가스로에서 입도가 2~3cm이상인 숯의 양은 15.96 kg/hr임을 알 수 있다.

### 3) 목편(입도 3cm) 연료조건

Table 3-24는 목편을 이용한 하향식 가스로 구동 결과이다.

[Table 3-24] Temperature and flammability changes(Woodchip)

Time (min)	Air Flow rate (L/min)	Temp.(°C)			Flammability	Reference
		1	2	3		
1	500	84	81	72	X	점화부에서 점화되어 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 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 그을음만 발생하는 것을 볼 수 있었다. 유량조건 417LPM일 때부터 불꽃이 일어나기 시작하고 유량조건을 584LPM으로 유지하면서 35분경에 최고온도 563°C를 나타냈다. 하지만 숯에 비해서 약 200°C가량 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 특히 불꽃

이 일어나더라도 연기가 항상 같이 나오는 것을 알 수 있다. 총 가동시간은 35분 정도이며 이중 연소부에서 변환공정이 일어나 연료가스가 생산된 시간은 약 25분 정도이다. 구동이 끝나고 나서 가스로를 해체해본 결과 약간의 재만 남아있고 모두 연소된 것을 알 수 있었다. 이로서 직경 300mm의 가스로에서 입도가 3cm인 목편의 양은 41.28 kg/hr임을 알 수 있다.



[Photo 3-22] wood chip

#### 4) 목편과 숯 연료조건

Table 3-25는 입도 5~7mm의 목편과 숯을 부피비로 1:1로 섞어서 만든 연료를 이용한 하향식 가스로 구동 결과이다.

[Table 3-25] Temperature and flammability changes(Charcoal+Woodchip)

Time (min)	Air Flow rate (L/min)	Temp.(°C)			Flammability	Reference
		1	2	3		
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, 종료

입도 5~7mm의 목편과 숯을 부피비로 1:1로 섞어서 만든 연료의 경우 약 17분 정도까지는 연소가 전혀 이루어지지 않고 연기와 그으름만 발생하는 것을 볼 수 있었다. 유량조건 834LPM이고 약 20분 정도 지나서부터 불꽃이 일어나기 시작하고 유량조건을 834LPM정도로 유지하면서 43분경에 최고온도 605°C를 나타냈다. 가동 후 20분 후부터는 불꽃의 화력이 일정하게 계속 유지되었다. 총 가동시간은 48분 정도이며 이중 연소부에서 변환공정이 일어나 연료가스가 생산된 시간은 약 23분 정도이다. 구동이 끝나고 나서 가스로를 해치해본 결과 약간의 재만 남아있고 모두 연소된 것을 알 수 있었다. 이로서 직경 300mm의 가스로에서 입도 5~7mm의 목편과 숯을 부피비로 1:1로 섞어서 만든 연료의 양은 66.13 kg/hr임을 알 수 있다.

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 함

유되어있음을 알 수 있었다.



[Photo 3-23] 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.

다. 합성가스의 성분분석



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-100 S형 진공식 기체채취기를 사용하였고 검지관은 수소(30, 0~2%), 이산화탄소(2H, 0~20%), 일산화탄소(1HH, 1~

[Photo 3-24] GV-100S 40%)를 사용하였다.

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

1) 숯(입도 2~3cm 이하) 연료조건

앞에서도 언급한 바와 같이 문헌(biomass conversion & technology, pp.73)에는 숯으로부터 합성가스를 생산하면 CO<sub>2</sub>는 약 3%, CO는 약 28.7%의 조성을 갖는다고 명시되어있다. 가스화장치가 안정화된 시점에 CO 30%, CO<sub>2</sub> 1.1%로 측정되었다. 문헌에 명시되어 있는 수치와 비슷한 수준임을 알 수 있었다. 이것으로 보아 숯을 이용할 경우 양질의 합성가스를 얻을 수 있을 것이다.

[Table 3-26] CO and CO<sub>2</sub> Concentration(charcoal < 2~3cm)

Time(min)	CO(%)	CO <sub>2</sub> (%)
10	10	3.8
15	24.5	1.6
30	30	1.1

또한 3%까지밖에 측정되지 않는 수소(H<sub>2</sub>) 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 나타내고 있어 열량이 높은 연료가스를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 숯(입도 2~3cm 이상) 연료조건

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

[Table 3-27] CO and CO<sub>2</sub> Concentration (charcoal > 2~3cm)

Time(min)	CO(%)	CO <sub>2</sub> (%)
4	19	5.2
15	22.5	2.4
30	27.5	2.5

작은 입도의 숯 보다 문헌과는 비슷하지만 상대적으로 CO가 낮게 측정되었고, CO<sub>2</sub>는 높게 측정되었다. 이것으로 보아 숯은 연소부가 깊어 환원 반응이 충분히 일어나는 것으로 판단된다.

3) 목편(입도 3cm) 연료조건

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<sub>2</sub>는 많은 것을 알 수 있었다.

[Table 3-28] CO and CO<sub>2</sub> Concentration (Woodchip)

Time(min)	CO(%)	CO <sub>2</sub> (%)
10	8.4	7.8
15	14.5	8.2
30	21.0	9.6

구동초기에는 CO<sub>2</sub>의 함량이 아주 많음을 알 수 있고 최고온도는 목편과 비슷한 수준이지만 연소상태가 아주 좋음을 보여준다. 이는 유량조건이 충분하기 때문이라고 판단된다.

#### 4) 목편과 숯 연료조건

가스화장치가 안정화된 시점에 CO 28.0%, CO<sub>2</sub> 6.8%로 측정되었다. 문헌에 명시되어 있는 수치와 거의 일치하는 수준임을 알 수 있지만 CO<sub>2</sub>의 함량이 2배정도 되는 것을 알 수 있었다.

[Table 3-29] CO and CO<sub>2</sub> Concentration (Woodchip + charcoal)

Time(min)	CO(%)	CO <sub>2</sub> (%)
20	12.0	16.0
30	30.0	7.5
43	28.0	6.8

CO는 숯과 비스한 수준이지만 CO<sub>2</sub>의 함량이 많은 것을 확인할 수 있다. 하지만 함수비가 높고 목편을 사용하였기 때문에 수소의 함량은 조금 더 높을 것으로 생각된다.

#### 4. 적정 운전조건

가스화장치에서 얻어지는 연료가스를 정제와 냉각 후, 즉시 이용한다는 전제하에서 운전할 때에는 연료가스 생산량과 가스를 이용하는 설비의 가스 소비량과 일치하는 것이 바람직하다. 전력생산을 위해 가스를 이용하는 경우 전력소비와 가스화장치 및 엔진은 동시에 구동되어야 한다. 그러나 중단 없는 엔진구동 혹은 발전을 위해서는 적정 규모의 가스 저장조를 설치하는 것이 필요하다.

공기를 공급하는 송풍기는 일반적으로 정속으로 구동되기 때문에 전력부하가 낮아져 엔진이 저속으로 구동할 때에는 송풍량을 줄일 필요가 있다. 현재 개발된 가스화장치에는 송풍량을 조절하기 위한 밸브를 설치하였기 때문에 동력 소모량은 변하지 않는다. 이를 위해서는 전력공급을 조절하여 송풍량을 조절할 수 있도록 부속장치를 설계하는 것이 필요하다.

연료가스의 정제를 위해서 설치되는 집진장치는 2개 이상을 설치하는 것이 권장된다. 가스 중의 먼지나 입자성 물질이 포함되어 있으므로 일정시간 운전 후에는 압력

손실이 크게 증가하므로 가스로 운전 중에도 청소 혹은 필터 교환 등을 위해 교대로 운전할 수 있어야 한다.

바이오매스의 발생량은 시기별로 집중되기 때문에 연간 활용계획을 고려하여 시설을 설계하고 운영하는 것이 필요하다.

폐기물을 산소와 수증기를 이용하여 상향식 가스로를 운전하는 조건과 관련하여 김재호 등(2003)에 의하면 산소량의 증가에 따라서 연료층 내부 온도는 상승하며, 산소화 연료의 비가 0.4일 때까지 상부 및 하부 온도가 급격하게 증가한다고 하였다. 산소량과 폐기물의 비가 0.35~0.45 범위에서 CO 발생량이 최대가 되는 것으로 나타났다. 산소 공급량을 지속적으로 높여 산소비가 0.45이상으로 증가하는 경우 CO<sub>2</sub> 발생량이 증가하고 H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> 발생량이 감소하는 것으로 나타났다.

따라서 산화제로서 산소 또는 공기를 이용할 때 과다하게 산소나 공기가 공급되는 경우 가스화 반응이 일어나기 보다는 완전연소 반응이 진행된다는 것을 알 수 있다. 또한 연료와 산화제가 균일한 접촉이 일어나도록 하는 것이 중요하다. 이는 산화제(공기)가 한 곳에서 집중적으로 공급되지 않아야 하며, 연료의 입도가 적정하여 통기성이 확보되어야 한다는 것을 의미한다. 특히 하향식 가스화장치에서는 연료 입자의 크기가 균일하여야 하고, 가스화장치 반응기의 직경에 비례한 적정한 크기의 연료가 공급되어야 한다는 것은 많은 연구에서 제시하고 있는 사실이다.

반응부 즉 환원층의 높이가 증가함에 따라서 가연성 가스의 농도가 증가하게 되는데 이는 가스 및 char의 체류시간이 증가한 결과로 볼 수 있다. 이를 반영하여 가스로의 반응부를 설계하여야 한다.

Mathieu와 Dubuisson(2002)의 모형을 이용한 가스화장치 운전과 관련된 요인 가운데, 공기의 온도, 산소 공급 속도, 공기 중 산소비율, 수증기 공급량과 압력 등에 대해 평가한 바 있다. 이 가운데 공급되는 공기의 온도는 최저 300°C가 되어야 하나 그 이상은 큰 의미가 없는 것으로 나타났다. 산소공급량은 완전 연소에 필요한 양론적 값의 25%에서 가스화 효율이 최대로 나타났다. 가스화와 관련된 이론적인 연구들에 의하면 산소공급량은 양론적 공기요구량의 19-43%의 범위에 있는 것으로 알려져 있다. Zaiant et al.(2002)에 의하면 산소공급량은 양론적 공기 요구량의 19-43%로 제시한 바 있다. 공기 중의 산소농도가 증가함에 따라서 가스화 효율이 증가하는 것으로 나타났으나 30% 이상에서는 효율이 증가하였으나 증가율은 30% 이하에의 조건에 비해서 낮아졌다. 수증기의 공급은 가스화 효율을 저하시키는 것으로 나타났다.

Tiangco et al.(1996)은 왕겨를 고정상 하향식 가스로에서 적정 가스화 특성과 가

스로 반응부의 단면적당 가스화속도가 관계가 있음을 고찰한 바 있다. 이들은 왕겨를 가스화할 때 생성되는 가스 유량과 반응속도와의 관계를 바이오매스 반응 또는 소비속도가 100~400 kg/m<sup>2</sup>-h 범위에서 다음과 같이 제시하였다.

$$\text{가스속도(m/h)} = 2.7878 * \text{바이오매스 반응속도(kg/m}^2\text{-h)} - 156.64$$

## 제 5 절 합성연료가스 이용방안

### 1. 합성연료가스 조성 및 발열량

바이오매스를 가스화하여 얻어지는 합성가스의 주성분은 앞에서 언급된 바와 같이 공기를 산화제로 이용하는 경우 질소가 가장 많이 포함되어 있고, 가연성 가스로서는 일산화탄소와 수소가 그 뒤를 잇는다. CO는 20~30% 수준이며 수소는 5~20%의 범위를 갖는다. 목탄을 연료로 하여 얻어지는 합성가스는 CO가 최대 35%수준이며 수소는 5% 내외의 범위를 갖는다. 연료의 종류와 가스화장치의 운전조건 등에 따라서 가연성 가스 조성이 다양하게 나타날 수 있다. 메탄이나 탄화수소의 양은 아주 적다. 일반적으로 가스 연료의 발열량은 고위발열량과 저위발열량으로 나타내어진다. 여러 가지 종류의 가연성 기체로 혼합되어 있는 가스혼합물의 저위발열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LHV = \sum_i y_i LHV_i$$

$y_i$  = 가연성 기체 i의 조성비

$LHV_i$  = 가연성 기체 i의 저위발열량

LHV = 혼합가스의 저위발열량

가연성 기체 CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>의 저위발열량은 각각

$$\text{CO} : 12.6 \text{ MJ/Nm}^3$$

H<sub>2</sub> : 10.7 MJ/Nm<sup>3</sup>  
 CH<sub>4</sub> : 35.8 MJ/Nm<sup>3</sup>

연료가스의 조성을 이용하여 계산된 저위발열량은 4-6MJ/Nm<sup>3</sup> 이다. 합성가스의 열량외에 연료로서 특성은 Wobbe지수, 화염전파속도, 연소범위, 화염온도 등 여러 가지가 있다.

가. 화염온도

화염온도는 연소 속도 뿐만 아니라 주어진 공간 내에서 얻을 수 있는 열의 양과 관계가 있기 때문에 가스의 중요한 성질의 하나이다. 연료가스 중 가연성분들에 대한 양론적 조건 하에서 단열화염온도는 2220~2320 K의 범위에 있다. 연료가스 중에 포함되어 있는 질소는 연소과정에서 열을 흡수하고 단열화염온도를 낮추는 역할을 한다. 질소의 비율이 50~60% 정도라고 하면 연료가스의 단열화염온도는 1700K 정도의 범위에 있다.

나. 연소/폭발범위

특정 연료의 폭발범위는 점화 후에 화염이 자발적으로 전파될 수 있는 공기와 연료의 혼합기체 중 연료가 차지하는 최대 최소 부피비로서 정의된다. 이 최대 최소 부피비는 폭발 상한 하한으로도 일컬어진다. 연료가스 중 가연가스의 폭발범위는 다음과 같다.

[Table 3-30] 연료가스 중 가연가스의 폭발범위

가스 종류	폭발 하한 (공기 중 연료의 부피%)	폭발 상한 (공기 중 연료의 부피 %)
CO	12.5	74.2
H <sub>2</sub>	4.0	74.2
CH <sub>4</sub>	5.0	15.0

혼합기체의 폭발범위는 실험적으로 결정되거나, 르샤틀리에 법칙과 같은 경험식에 의해서 추정된다. 연료가스 중의 성분 조성을 고려하면 공기 중 폭발범위는 20~

60% 정도이다.

다. Wobbe 지수

Wobbe지수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Wobbe지수} = \frac{LHV}{\sqrt{\rho_r}} \quad \because \rho_r = \text{공기 대비 상대밀도 (무차원)}$$

Wobbe 지수는 연료용 가스의 상호 대체 가능성을 평가하는데 주로 이용된다. 즉 동일한 열량 공급 속도와 버너, 관로, 밸브 등에서 가스의 이동상태 등과 관련되어 대체 이용할 수 있는가를 나타내는 평가지표이다. 연료가스의 밀도는 공기와 거의 유사하기 때문에 Wobbe 지수는 연료가스의 저위발열량과 동일한 4~6 MJ/Nm<sup>3</sup> 이다.

라. 층류연소속도

연소속도는 연료와 공기의 혼합기의 특성을 나타내는 중요한 지표이다. 층류연소속도는 화염 파가 정체되어 있는 가스를 거쳐 전파되는 속도를 말한다. 또는 반대로 미 연소된 상태로 가스가 화염 면에 수직인 방향으로 화염 파를 통해 이동하는 속도라고 정의할 수 있다. 층류단일 가연성 기체에 대한 혼합기의 연소속도는 양론적 조건 하에서 다음과 같다.

H <sub>2</sub>	170 cm/s
CO	28.5 cm/s (공연비 1.1)
CH <sub>4</sub>	38.3 cm/s

물론 가연성 가스별 층류연소속도 값이 문헌마다 큰 차이를 보인다. 다른 특성과 마찬가지로 연료가스의 층류연소속도 또한 가스 조성에 의해 결정된다. 수소가 상대적으로 아주 큰 값을 가지므로 수소의 비율이 층류연소속도에 가장 큰 영향을 미친다. 그러나 질소 성분비가 높기 때문에 이 또한 아주 낮아진다.

## 2. 합성연료가스 활용 기관 및 설비

### 가. 가스엔진

합성가스는 Otto 엔진과 디젤엔진 모두에서 활용이 가능하다. 엔진에서 이용할 수 있는 수준의 합성가스는 기술적 경제적인 이유로 반드시 충분한 열량을 가져야 하며, 타르와 분진이 충분히 제거되어 엔진 마모나 보수작업이 최소화될 수 있도록 하여야 한다. 타르는 공기-가스의 혼합기 및 가스 공급관 등에 응축될 수 있고 엔진의 흡기밸브에 축적될 수 있다. 흡기밸브에 타르가 축적되는 경우 엔진을 정지한 후 재가동할 때 문제가 된다. 축적된 타르는 냉각되는 동안에 경화되어 밸브의 개폐를 곤란하게 만든다. 또한 가스 중에 포함되어 있는 산은 부식을 초래하고 엔진오일의 성질을 좋지 않게 만든다.

점화플러그 방식의 Otto 엔진은 가스 상태로 연료를 투입하게 되는데 공기와의 혼합이 양호하게 이루어져야 한다. T형의 공기와 가스 혼합밸브를 이용하여 예 혼합하여 엔진에 공급하는 경우가 많다. 공연비가 다양한 엔진부하 조건에서 일정하게 유지되어야 한다. 오토엔진의 최대출력은 가스의 열량, 점화시간, 엔진 특성에 의해 결정된다. 출력은 휘발유나 천연가스를 이용하는 경우에 비해서 대체로 떨어진다. 디젤 엔진은 압축비 높기 때문에 합성가스를 이용하는 디젤엔진은 연료주입구를 점화플러그로 교체하여 개조한다. 개조 후 합성가스 이용 디젤엔진은 정격출력의 약 45% 정도에 지나지 않는다.

점화플러그로 대체하지 않은 디젤엔진은 일반적으로 경유와 혼합하여만 구동할 수 있다. 그러므로 이때에는 경유 단독으로 엔진을 구동할 때에 비해서 약 10~25% 정도의 경유를 소모하게 된다. 엔진의 최대출력은 가스의 열량, 병용되는 디젤 공급량, 엔진특성 등에 따라 다르다. 경유와 혼합하여 구동되는 디젤엔진의 효율은 디젤 단독으로 구동되는 정격출력에 비해서 약 25% 정도 낮다.

엔진노킹은 실린더 내에서 가스의 연소가 스파크 행정 이후에 계속되는 경우 발생한다. 노킹은 엔진에 무리를 주기 때문에 이를 방지하여야 한다. 화염전파속도가 낮거나 점화시간이 적절하지 않을 때 노킹이 주로 일어난다. 합성가스에는 상대적으로 빠른 화염전파 속도를 가지는 수소가 포함되어 있기 때문에 일산화탄소의 낮은 화염전파속도를 상쇄할 수 있다. 점화시간이 적절하게 조절된다면 노킹은 큰 문제가 되지 않는다.

## 나. 가스 터빈

가스터빈은 다양한 적용범위를 가진다. 항공기 엔진, 산업용 압축기와 펌프, 발전기 등 다양하게 활용되고 있다. 가스터빈에서 연료는 연소부에서 10~25bar의 압축공기와 반응하며, 고온 고압의 연소가스는 터빈에서 팽창하며 압축기와 발전을 위한 축 동력을 발생시킨다.

연소부에서 연소된 고온의 가스는 증기터빈의 유입 증기보다 더 높은 온도로 터빈에 유입된다. 따라서 높은 열역학적 효율을 얻을 수 있다. 그러나 터빈에서 배출되는 온도 또한 450~700℃로 높기 때문에 이 열을 제대로 활용하지 않는 경우 터빈시스템에 문제를 초래할 수 있다. 대형 터빈의 경우 효율이 40% 수준, 중소형 터빈은 20~35% 수준이다. 터빈에서 배출되는 연소가스의 열을 회수하여 연소용 공기를 압축하는데 이용하면 효율을 더 높일 수 있다. 현재 전 세계적으로 저 열량 기반 가스 터빈이 제작되고 있으나 대체로 대용량으로 효율은 30% 내외 수준이다.

## 다. 보일러

합성가스를 이용하여 열을 생산하는 것은 2단계 연소과정과 유사하다. 차이는 가스로서 합성가스가 생산되고, 버너에서 연소된다는 것이다. 가스로서 생산된 고온의 합성가스는 파이프를 통해 보일러 혹은 버너로 공급된다. 타르의 응축을 방지하기 위해서는 파이프를 단열하여 온도 저하를 방지하여야 한다. 또한 가스의 이송거리는 너무 길지 않도록 하여야 한다. 바이오매스를 직접 연소하여 열을 이용하는 것에 비해 가스화 후 열 생산하는 공정의 장점은 다음과 같다.

- 과잉공기율이 전체적으로 낮기 때문에 상대적으로 높은 효율을 기대할 수 있다.
- 질소산화물의 배출이 낮다
- 열교환 설비의 오염으로 인한 문제가 적다.

반면에 단점으로는 가스로서와 가스 이송과정에서의 열손실이 있다. 그러나 이는 단열을 적절히 함으로써 최소화할 수 있다.

배기가스에 의한 대기오염과 관련하여 가스의 정제를 해야 하는 경우 배기가스를 정제하는 것에 비해서 합성가스를 정제하는 것이 더 유리하다. 배기가스양에 비해서 합성가스양은 약 50%에 지나지 않기 때문이다. 따라서 배기가스 처리의 비용이 훨씬 절감된다.

버너의 성능은 가스의 성질에 따라 결정된다. 천연가스를 대체하여 합성가스를 이용하는 것은 공연비의 조절을 의미한다. 동일한 열량을 얻기 위해서는 보다 많은 양의 합성가스를 공급함으로써 해결할 수 있다. 화염의 안정성은 화염전파속도와 연소범위와 관계있다. 이론적인 자료를 토대로 결정하는 것도 가능하나 실제로 얻어지는 합성가스를 적용하고자 하는 버너에서 연소하면서 확인하는 것이 바람직하다. 화염의 크기와 온도분포는 화격자의 효율에 영향을 미치는 것으로서 합성가스의 조성 및 가스 중의 분진량과 관계가 있다. 합성가스의 단열화염온도는 약 1600℃이다. 이는 천연가스 1900℃보다 낮은 값이다. 따라서 유리를 녹이는 작업 등에는 적합지 않다. 그러나 대부분의 경우에는 이정도의 차이에 큰 효율 저하로 이어지지 않는다.

#### 라. 천연가스의 혼합이용

현재 다양한 세제혜택에서 알 수 있듯이 천연가스의 이용을 촉진시키기 위한 노력이 진행 중이다. 이러한 상황을 감안할 때 바이오매스를 이용해 얻어지는 가스와 천연가스를 혼합하여 이용하는 것은 단기적으로 볼 때 최상의 에너지 이용방안이라고 할 수 있다. 앞으로 천연가스를 이용한 전력생산량은 지속적으로 증가할 것으로 전망되고 있다.

바이오매스 연료가스와 천연가스를 혼합하여 이용하는 방안은 가스터빈, 보일러, 버너, 엔진 등에 혼소시켜 적용하는 것이다. 연료가스와 혼합할 때, 천연가스의 주성분인 메탄의 비율이 증가할수록 저위발열량과 Wobbe 지수는 비례해서 증가한다. 천연가스를 이용하는 엔진에서 연료가스를 이용하는 경우 상당한 출력저하가 발생한다. 공기와의 혼합기 조건에서는 연료가스가 요구하는 양론적 산소량이 상대적으로 적기 때문에 약 30% 정도의 출력저하가 발생한다.

연료가스에 메탄을 혼합하면 열량과 Wobbe 지수가 상승하는데, 특히 연료가스 75%, 메탄 25% 조건에서 가장 좋은 개선효과가 있다. 메탄의 비율을 더 높이면 개선효과는 있으나 상대적으로 미미하다. 이 혼합비 조건에서 엔진의 출력저하는 10% 수준에 지나지 않는다.

메탄과 연료가스의 단열화염온도는 450~500K 정도 차이가 났으나, 연료가스 75% 메탄 25% 혼합조건에서 화염온도 차이는 150K 정도로 줄어들었다. 열전달 특성 또한 메탄 혼합을 통해 개선됨을 확인할 수 있었다. 연료가스의 최대 층류연소속도는 메탄에 비해 50% 정도이다. 반면에 75~25% 혼합 가스의 층류연소속도는 메탄에 비해 30% 정도로 개선된다.

기존의 보일러나 열 이용 장비에서 연료가스는 무리 없이 활용할 수 있다. 그러나 메탄을 혼합하여 이용하는 경우 가스의 질을 안정적으로 보장할 수 있으며, 버너 등 장비의 안정적인 작동을 보장할 수 있다. 바이오매스 연료가스를 가스 터빈에서 이용할 때 가장 큰 문제점은 타르와 알칼리 등에 의한 것이다. 그러나 보일러와 같은 장비에서는 이런 문제가 크지 않다. 메탄과의 혼합을 통해서 보일러의 버너 등을 개조할 필요성은 없어지게 된다.

가스엔진은 현재 상업용 제품으로 시판되고 있으며 매립지 가스나 코크스에서 얻어지는 중간 정도의 발열량을 갖는 가스에서 구동이 가능하다. 연료가스와 같이 낮은 발열량을 갖는 기체연료로 구동되는 엔진은 미국의 GE사에 의해서 시판되고 있다. 매립지 가스의 경우 저위발열량이 17~20 MJ/Nm<sup>3</sup> 수준이다. 이 정도의 발열량은 연료가스 60%, 메탄 40% 정도에서 얻을 수 있는 열량이다.

### 3. 합성연료가스 활용전략

#### 가. 가스의 정제

타르는 생성조건과 성분을 고려하여 1차, 2차 그리고 3차 타르로 구분한다. 일부 가스로는 1차와 3차 타르가 동시에 생성하기도 하여 가스로의 설계 및 운전의 중요성을 암시하고 있다. 따라서 타르의 제어를 위해서는 적절한 설계와 안정적인 운전이 필요하다. 따라서 타르 성분은 가스로의 설계 및 운전에 대한 평가요소로서도 활용이 가능하다.

지금까지의 타르에 대한 연구는 가스 내 가동 온도와 관계가 있다고 밝히고 있으나 보다 구체적인 연구가 필요하다. 타르 내 성분은 GC/MS 나 기타 분석 장치를 이용하여 확인될 수 있다 그러나 이러한 방법은 비용이 많이 들기 때문에 특정 성분을 지표 성분으로 선별하여 타르에 대한 성분 평가를 하는 방법도 활용되고 있다.

생성되는 타르성분의 주요 특성은 주요 물리적인 성질이나 정제 혹은 타르 분해 장치의 운전조작과 관계가 있다. 예를 타르 중의 유기산은 다른 물질에 비해서 분해가 잘 되지 않기 때문에 처리 후에도 일부 잔류하게 된다.

타르의 단계별 분해 혹은 반응 및 변환과정은 반드시 파악되어야 한다. 이를 토대로 가스로의 제작과 가스정제 공정이 설계되어야 한다. 산소와 스팀이 관여하는 경우 타르의 질적 양적 영향에 대해서도 충분히 이해되어야 한다. 또한 질소를 상대적으로 많이 포함하고 있는 초분류 바이오매스를 가스화할 때에는 질소화합물에 대한

분석이 추가적으로 이루어져야 한다.

마지막으로 분진이나 미세 탄소분말(검댕)의 생성 또한 정량적으로 파악되어야 한다. 이들 성분은 고온 가스정제공정에서 매우 중요하기 때문이다.

#### 1) 합성연료가스 중 타르 함량

가스로에서 생성되는 타르 함량은 동일한 종류의 가스로에서 상당히 큰 차이를 보인다. 이는 시료채취 방법 등에 따라서 영향을 받기도 한다. 일반적으로 가스로에서 얻어지는 합성가스 중 타르함량은 상향식이 100g/Nm<sup>3</sup>로 가장 많고, 하향식이 1g/Nm<sup>3</sup>로 가장 적으며, 유동상 가스로가 10g/Nm<sup>3</sup>로 중간 범위에 있다. 타르의 구성 성분을 살펴보면 상향식에서는 1차 타르, 하향식에서는 3차 타르, 유동상식에서는 1차와 3차 타르가 혼합되어 생성된다.

타르의 생성량은 이미 알려진 바와 같이 온도와 체류시간의 함수이다. 유동상 가스로에서는 이 뿐만 아니라 연료의 투입지점, 내부 순환상태 등이 영향을 미치며 고온에서는 가스의 흐름이 부분적으로 집중되는 상태가 크게 영향을 미친다. 연료의 입도분포, 산화제의 조건, 가스로의 구조(형상), 그리고 타르의 시료채취 방법 등에 따라 타르 생성량이 달라진다.

합성가스의 용도에 따라서 타르 함량 조사는 달라진다. 내연기관을 구동하는 경우 100℃ 이상에서 응축하는 유기물만을 조사하고 비교적 가벼운 탄화수소, 벤젠, 톨루엔 등은 포함하지 않을 수 있다. 반면에 고체산화물 연료전지를 구동하는 경우에 있어서는 올레핀과 방향족 유기화합물까지도 포함할 수 있다. IEA 가스화 위원회 (Gasification Task Meeting)에서는 타르를 “벤젠의 끓는점보다 높은 온도의 끓는점을 갖는 모든 유기화합물”로서 정의하고 있다.

#### 2) 타르의 측정

타르함량을 측정하는데 있어서 채취를 위한 용제와 조건, 용제의 분리방법이 서로 다른 것이 타르에 대한 혼동과 결과에 대한 해석을 어렵게 만드는 주요인이다. 현재 합성가스 중 적용 엔진이나 대상에 대해 장기적인 운전을 통해서 타르에 대한 허용 범위를 제시한 문헌이나 연구는 거의 없는 실정이다. 그러나 석탄 가스화에 있어서 타르에 대한 연구가 상당히 진행되었고 이들 중 타르는 바이오매스의 하향식 가스 타르와 유사하므로 연구결과에 대한 적용이 용이하다고 생각된다.

일반적으로 타르는 습식 세정방법에 의해서 제거된다. 그러나 세정에 쓰인 폐수는

처리과정을 통해서 최종 처분되어야 하며, 고형물에 의해서 타르가 제거된 경우 마찬가지로 타르가 흡착된 고형폐기물 또한 환경오염을 유발치 않도록 처리하여야 한다.

화학적 혹은 촉매를 이용하여 고온에서 타르를 제거하는 방법이 이상적인 것으로 받아들여지고 있으나 물리적인 습식, 혹은 고형물에 의한 타르제거방안이 보다 널리 적용되고 있다. 즉, 내연기관 등은 높은 온도에 있는 상태에서 합성가스를 이용하지 않는다. 즉, 온도를 충분히 낮춘 후에 적용하므로 고온상태에서 촉매를 이용하여 타르를 제거하는 방법은 곤란한 것이다. 또한 고온 촉매반응을 거친다 하더라도 합성가스 중에는 알칼리나 유기산 등이 포함되어 있으므로 결국 가스 정제가 필요하다.

따라서 앞으로 바이오매스 가스화에 있어서는 타르의 효율적인 제거방안이 확립되어야 한다. 타르의 효율적인 제거방안을 확립하기 위해서는

- 고효율 습식 타르제거장치의 설계
- 미세입자 제거장치의 설계와 효율 측정
- 소수성 타르의 제거(skimming)
- 제거된 소수성 타르의 가스로 내 재이용
- 회분 및 미 반응 바이오매스의 타르 흡착제로 이용방안 및 연료투입
- 친수성 타르를 포함한 세정수의 최적 습식 산화공법 확립

### 3) 타르의 분해

1000℃이상의 고온에서 타르를 적당한 체류시간 조건하에서 촉매 없이 타르를 분해하는 것이 가능하다. 그러나 이러한 분해는 미세한 탄소입자(검댕)이 생성되어 추가의 처리가 필요하게 된다. 벤젠이 가벼운 방향족 가운데 가장 반응성이 낮다.

수증기를 추가하여 반응을 시키는 경우 난분해성 타르가 덜 생성되는 것으로 보고되고 있다. 페놀 생성량이 증가하며 촉매를 이용하여 분해가 쉽게 되는 타르가 생성된다. 수증기에 산소나 공기를 추가하면 난분해성 타르의 비율이 높아지나 총량은 감소한다. 산소를 공급하는 위치에 따라서 선택적으로 타르를 산화할 수 있다.

지금까지 여러 가지 종류의 촉매가 적용된 바 있다. Dolomite와 같은 비금속계 촉매와 니켈과 같은 금속계 촉매가 주로 활용되었다. 현장 적용결과 그다지 긍정적인 결과는 얻지 못하였다.

[Table 3-31] 바이오매스 타르의 주요 성분

열분해(450-500℃) Conventional flash	열분해(600-650℃) High-temp. flash	Conventional steam Gasification (700-800℃)	High-temp. steam Gasification (900-1000℃)
Acids	Benzens	Naphthalenes	Naphthalenes
Aldehydes	Phenols	Acenaphthylenes	Acenaphthylenes
Ketones	Catechols	Fluorenes	Phenanthrenes
Furans	Naphthalenes	Phenanthrenes	Fluoranthene
Alcohols	Biphenyls	Phenols	Pyrene
Complex- Oxygenates	Phenanthrenes	Naphthofurans	Acephenanthrylene
Phenols	Benzofurans	Benzanthracenes	Benzanthracenes
Guaiacols	Benzaldehydes		Benzopyrenes
Syringols			226 MW PAHs
Complex Phenols			276 MW PAHs

#### 4) 물리적인 타르 제거방법

합성가스는 엔진이나 터빈에서 연료로 이용되기 전에 냉각시키고 타르, 알칼리성 금속, 분진 등을 제거하여야 한다. 타르는 밸브나 배관 등에 응축되어 밸브 등의 작동에 문제를 일으키기도 하며, 알칼리성 금속, 분진, 타르 등은 엔진 내벽이나 피스톤 등의 부식이나 마모를 유발한다. 단순히 난방 등의 열 이용을 목적으로 가스가 이용되는 경우에는 가스정제 문제가 중요하지는 않다. 가스는 높은 온도에서 그대로 적용이 가능하며 타르나 알칼리 금속은 고온에서 응축되지 않기 때문이다.

타르를 제거하기 위한 전형적인 방법은 가스의 냉각이다. 냉각을 통해서 타르는 응축되어 쉽게 제거될 수 있기 때문이다. 응축장치는 넓은 관을 이용하여 만들 수 있고 외기와 접촉시켜 냉각할 수 있다. 이렇게 응축되면 타르 응축액은 파이프의 벽면에 모여서 바닥으로 흘러 수집할 수 있게 된다. 응축액이 다량으로 발생하며 대량의 가스를 정제하는 데에는 적합하지 않을 수 있다.

물을 살포하여 가스를 냉각하고 벤츄리스크리머를 이용하여 타르를 제거할 수 있다. 여기에서는 물방울에 타르가 응축되어 제거된다. 세정수에 의한 타르의 제거효율은 스프레이 노즐의 압력을 조정하여 조절할 수 있다. 압력을 조정하여 물방울의 크기를 조절할 수 있기 때문이다. 습식 여과상 또한 타르 응축장치에서 냉각표면을 넓게 하기 위하여 적용되기도 한다. 여과상 재료는 링이나 여러 가지 형태로 만들어지며 다양한 재료를 이용할 수 있다.

냉각수를 이용한 타르의 제거방법에서는 먼지, 염산, 황산화물 등이 응축기의 온도

에 따라 정도의 차이가 있기는 하지만 어느 정도 제거가 된다. 알칼리성 금속 또한 냉각수를 이용하여 제거할 수 있다. 냉각수를 이용한 타르제거 방법의 장점은 타르에 오염된 물을 처리해야 한다는 것이다. 타르를 포함한 물은 환경에 독성을 나타내기 때문에 반드시 처리한 후 방류할 수 있다.

가스로 내에서 혹은 촉매를 이용하여 타르를 분해를 할 수 있다. 이 때 온도는 600~100℃ 정도 되어야 한다. 타르 분해 방식은 분자량이 큰 타르가 비교적 분자량이 적은 가벼운 타르로 변환되며 엔진 구동과정에서 응축되지 않는다. 그러나 이러한 방식은 아직도 연구개발 되어야 할 과제 중의 하나이다.

합성가스 중의 분진을 제거하는 방식은 일반적인 연소가스 중 분진을 제거하는 사이클론, 백필터, 전기집진기 등이 그대로 활용할 수 있다. 합성가스의 분진을 제거하기 전의 공정에 따라서는 타르가 백필터 등에 집적되어 막힐 수 있으므로 정기적으로 점검하고 교환할 필요가 있다. 세라믹 필터가 이용될 수도 있다. 세라믹필터는 고온에서 견딜 수 있고 화학적으로 안정하다. 세라믹 필터의 단점은 온도 변화에 따라 민감하다는 것이다.

모래나 톱밥, 왕겨 등의 입자성 여과물질을 채운 여과상도 분진을 제거하는데 이용할 수 있다. 직물계통 여과기에 비해서 효율이 높지는 않으나 상대적으로 가격이 저렴하고 타르의 축적에 민감하지 않은 장점이 있다. 더욱이 바이오매스 연료를 투입 전에 여과 재료로 이용하는 경우 별도의 최종 처분과정이 필요 없다.

가장 보편적인 합성가스의 정제과정은 타르응축기, 여과상, 필요한 경우 직물계 필터, 그리고 사이클론의 순서로 구성하는 것이다.

페놀과 크레졸과 같은 산 계통 화합물은 내연기관에 적용하는 경우 부식을 유발할 수 있다. 페놀과 크레졸이 타르 분석과정에서 포함되어 있는가는 명확하지 않다. 벤젠이나 톨루엔과 같은 비교적 가벼운 타르는 휘발유에도 포함되어 있으므로 문제가 되지 않는다. 과거에 이용되던 엔진에 비해서 최근에 개발된 엔진, 그리고 저속엔진에 비해서 고속엔진이 가스 중에 포함되어 있는 불순물에 더 민감하게 반응할 것이다.

#### 가) 냉각탑과 벤추리스크러버

냉각탑 또는 세정탑은 첫 번째 습식제거장치인 사이클론 공정을 거친 후에 이용된다. 대부분의 상대적으로 무거운 타르가 제거된다. 그러나 타르 입자와 가스/액체 혼합 입자는 가스와 함께 거동하므로 효율이 다소 떨어진다.

#### 나) demister

디미스터는 가스와 함께 이동하면서 타르 연무입자가 결합되도록 한다. 사이클론과 유사한 구조를 가진다. 냉각탑과 마찬가지로 습식 세정장치와 함께 이용된다.

#### 다) 무기성 입자여과상

입자여과상은 냉가스나 고온의 가스를 여과하여 타르를 제거한다. 여과 재료는 주로 실리카나 알루미늄계 모래를 이용한다. 고온에서 여과를 하는 경우 500℃ 정도에서 가동이 되며 따라서 입자성 물질이 제거되고 타르는 가스 상태로 남아 있게 된다. 고정 여과상으로 가동될 때 표면 여과작용이 지배적이나 유동상 형태로 가동되면 충격에 의한 내부여과 작용이 지배적이다. 석탄가스화 공정에서 개발되어 적용되어오고 있다.

저온에서 여과를 하게 되면 입자성 물질과 응축된 타르가 제거될 수 있다. 일반적으로 저온 여과는 모래나 톱밥과 같은 유기성 물질을 이용할 수 있다. 이와 관련된 문헌자료는 극히 적다.

나무(목편)를 이용하는 경우 입자의 제거효율은 80~95% 수준, 반면에 타르의 제거효율은 60~95% 수준으로 보고된 바 있다. 폐놀은 약 95% 정도 제거되는 것으로 나타났다. 여과 층 내부에서 일어나는 타르의 점착성에 의해서 효과가 증진된다고 보고 있다. 톱밥을 이용하여 약 200시간 가동한 바 있으며 타르를 포함한 톱밥의 경우 독성을 나타내므로 안전한 처분을 기해야 한다.

#### 라) 습식 전기집진기

전기집진기는 기체 중의 미세한 고체입자나 액체 입자를 제거하는데 널리 이용된다. 액상 입자를 제거하는데 효과가 있지만, 가스 중의 타르 입자를 제거하는데 전기집진기는 그다지 효율적이지 못하다고 보고 있다. 즉 가스 중 타르입자를 제거할 때에는 전기집진기를 고온에서 가동하면 곤란하다. 전기집진기는 대상 입자의 하전 특성에 영향을 받기 때문에 이에 맞추어서 설계 및 가동하여야 한다.

바이오매스 합성가스 중 타르를 제거하기 위해서는 습식 전기집진기만이 이용될 수 있다. 건식 집진기에서는 타르의 침적으로 인해서 집진 혹은 타르 제거 능력이 쉽게 저하되기 때문이다. 전기집진기를 이용한 합성가스 정제연구 결과, 분진의 제거율은 99% 정도였으나 타르는 60% 이하로 훨씬 더 적게 나타났으며, 작동 문제가 발생하기도 하였다.

폐수처리습식방법에서는 유기 및 무기 오염물질이 포함되어 있는 폐수가 발생하게 된다. 오염물질의 농도는 대체로 위험한 수준이므로 반드시 환경오염방지 차원에서

처리되어야 한다. 주요 오염물질은 유기물, 무기산, 암모니아, 금속류 등이다. 세정수를 재이용하는 시스템에서는 오염물질의 농도가 훨씬 높다. 대체로 타르를 제거하는데 이용된 폐수는 습식산화, 활성탄에 의한 흡착제거, 가스화공정에서 얻어지는 고품 부산물에 의한 흡착제거, 생물학적 처리 등에 의해 처리할 수 있다.

가스로에서 배출되는 합성가스의 온도는 400~800℃의 범위에 있다. 건식타르제거 방법에서는 고온 여과와 타르의 크래킹 또는 개질공정이 곧 이어지는 경우 온도는 가능한 한 높아야 한다. 중온조건에서 건식 타르제거방법은 아직까지 제시되지 못하고 있다.

#### 5) 분진 및 입자성 물질 제거

가스 중에 포함되어 있는 입자성 물질은 다양한 집진장치를 이용하여 제거할 수 있다. 입자성 물질의 주요 특성으로는 크기, 크기 분포, 모양, 밀도, 부착성, 부식성, 반응성, 독성 등이 있다. 반면 가스의 주요특성은 압력, 온도, 점도, 습도, 화학적 조성 및 가연성 등을 포함한다. 공정조건으로는 가스의 유속, 분진의 부하량, 제거효율 및 압력손실 등을 포함한다. 가스로부터 입자성 물질을 분리하는 대부분의 장치는 분진과 가스분자의 물리적인 크기 차이를 이용하여 개발된 것이다. 부유분진의 중요한 특성 중의 하나는 분진의 크기분포이다. 크기분포에 적합한 집진장치를 선정하여야 한다.

집진장치의 종류는 중력식 침전장치, 원심력집진기, 여과 집진기, 전기집진기, 세정 집진기 등이 있다. 중력식 침전장치는 가스속도가 충분히 느려, 입자의 중력에 의해 입자를 침강시키는 큰 구조물이다. 원심력집진기는 원통구조물 내에서 전체가스를 나선모양으로 흐르게 하여 입자를 제거한다. 원심력에 의하여 입자는 원통의 바깥방향으로 움직여 벽에 충돌하게 되고 벽면을 따라 집진기 바닥으로 떨어지게 되며 그곳에서 제거된다. 정화된 가스는 집진기의 상단부로 배출된다.

여과 집진기는 진공청소기와 같은 원리로 작동한다. 가스에 포함된 입자는 직물 여지에 걸러지게 된다. 공기가 직물여지를 통과하면서 먼지는 직물에 쌓이고 가스는 정화된다. 쌓인 입자성 물질은 주기적으로 흔들거나 가스를 역류시킴으로써 직물에서 분리한다. 전기집진기는 가스 흐름으로부터 입자를 분리하는데 전기력을 이용한다. 높은 전압이 전극하이에 형성되고 형성된 자기장을 통과하는 입자는 전하를 얻게 된다. 하전 된 입자는 반대편 대전판으로 끌려가 포집된다. 정화된 가스는 장치를 통해 배출된다. 집진판은 먼지 층을 털어내기 위해 주기적으로 판에 충격을 줌으로

써 청소된다. 먼지는 장치의 바닥에 있는 분진 퇴적함에 떨어진다.

세정집진기는 충돌과 차단 원리로 물을 뿌려 먼지입자를 제거하는 장치이다. 가스와 비교하여 더 크고 무거운 물방울은 중력에 의해 쉽게 가스와 분리된다. 분진입자는 세정액으로부터 독립적으로 분리된다. 세정액은 재이용되거나 배출하기 전에 여러 방법으로 처리되어야 한다.

기계적 집진기는 다른 집진기에 비해 비용이 덜 들지만 경우에 따라 사용목적에 따라서 다르다. 기계적 집진기는 미세입자보다는 거대입자 처리에 유리하며, 주로 먼지부하가 높을 때 또는 최종 제어장치를 보호하기 위한 전처리 장치로 사용된다. 여과 집진기는 고효율장치이나 비용이 많이 든다. 보토 건조하고 저온상태에서 사용되지만 각종 입자성 물질에 적용할 수 있다. 전기집진기는 적은 압력손실 때문에 상당히 큰 유량을 처리할 수 있는 고효율 장치이다. 그러나 비용이 많이 들고 공정조작 조건에 따라 유동적이지 못하다. 세정 집진기는 고효율을 얻을 수 있고 약간의 가스상 오염물질도 분진과 함께 제거할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 세정집진기는 높은 압력손실 때문에 운영비용이 많이 들고 습식 침전물을 처리해야 하는 문제점이 있다.

[Table 3-32] 집진기 종류별 장·단점

종 류	장 점	단 점	가 격
원심력 집진기	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 적은 비용</li> <li>○ 고온에서 운전가능</li> <li>○ 적은 유지보수비용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 낮은 효율(미세입자)</li> <li>○ 운전비용이 고가</li> </ul>	\$1.00/cfm @<1000cfm)
전기 집진기	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 제거효율이 높음</li> <li>○ 낮은 압력손실</li> <li>○ 운영비용이 대체로 적음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 설치비용 고가</li> <li>○ 넓은 설치면적</li> <li>○ 비저항에 영향</li> </ul>	집진면적에 비례
여과 집진기	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 미세입자 효율 높음</li> <li>○ 다양한 입자 제거</li> <li>○ 다양한 용량</li> <li>○ 비교적 적은 압력강하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 넓은 설치 공간</li> <li>○ 부식성 물질에 영향</li> <li>○ 화염과 폭발의 위험성</li> <li>○ 습윤 환경에서 사용불가</li> </ul>	여과포 면적에 비례
세정식 집진기	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가연성 가스 처리가능</li> <li>○ 오염가스흡수 가능</li> <li>○ 고온가스 냉각</li> <li>○ 집진효율 가변적</li> <li>○ 부식성가스 중화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 부식 잠재성이 큼</li> <li>○ 유출수 수질오염</li> <li>○ 분진회수 불가능</li> <li>○ 폐기물 슬러지 처리</li> </ul>	세정수 이송 및 처리비용이 높음

초기의 가스로 이용 장치 또는 설비에서는 가스의 정제를 위하여 목편을 채운 용

기를 이용하기도 하였다(LaFontaine and Zimmerman, 1989). 여과장치에 채운 목편은 가스로 투입되는 연료와 동일한 것을 이용하였다. 단순히 목편을 통과하면서 가스가 정제될 수 있도록 한 단순한 여과 용기가 적용될 수 있음을 시사한다.

Gallagher(2002)는 유동상 방식의 가스로를 이용한 소형 열병합시스템을 구축하면서 가스 중의 입자성 물질을 제거하기 위해서 사이클론 즉, 원심력 집진장치와 여과식 집진장치를 이용한 바 있다. 가스로의 특성상 입자성 물질이 다량 배출되나, 집진장치에 의해 대부분의 입자성 물질이 제거됨을 확인한 바 있다. 유럽에서는 대규모 가스화 시스템에서 엔진구동을 위해서 전기집진장치를 이용한 경우도 있다.

#### 나. 합성연료가스 활용 방안

##### 1) 활용방안의 종류 및 검토

바이오매스를 이용한 에너지 활용방안은 다음과 같이 다양한 방법으로 생각할 수 있다. 크게 고형상태로 이용하는 것과 가스화하여 이용하는 방안으로 나눌 수 있고, 단순히 열을 이용하는 것과 동력과 열을 동시에 이용하는 방식으로 세분화할 수 있다.

- a. 연료 - 파쇄 - 목재보일러 - 온수/난방
- b. 연료 - 파쇄 - 목재보일러 - 증기 - 터빈발전 - 증기 - 온수/난방  
|--- 전력
- c. 연료 - 파쇄 - 가스화 - 보일러 - 온수/난방
- d. 연료 - 파쇄 - 가스화 - 보일러 - 증기 - 터빈발전 - 증기이용 온수/난방  
|--- 전력
- e. 연료 - 파쇄 - 가스화 - 엔진 - 배열회수 - 온수/난방  
|--- 전력
- f. 연료 - 파쇄 - 가스화 - 터빈발전 - 배가스 이용 온수/난방  
|--- 전력
- g. 연료 - 파쇄 - 가스화 - 외연기관(스털링엔진) - 배열회수 - 온수/난방  
|--- 전력

터빈발전기와 스텔링엔진은 초기 투자비가 높아서 불리하고, 특히 소규모 바이오매스 활용설비에서는 전체 시설비중 차지하는 비율이 높기 때문에 경쟁력이 매우 부

족하다. 따라서 b, d, f, g는 소규모 설비에서는 고려하기 곤란한 방안으로 판단된다. 이 가운데 a와 c는 단순히 열 이용만을 위한 것이고, e 방식이 소규모 바이오매스 활용방안으로서 전력생산과 열을 동시에 생산할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 물론 열 이용을 주목적으로 하면 a와 c 방식이 적당하다. a의 경우 바이오매스에 적합한 별도의 전용 보일러를 신규로 구입하여 이용하여야 한다. 그러나 c는 가스화 설비를 신규로 도입해야하는 반면 기존의 보일러를 활용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 소형 엔진/발전기를 가스정제 후 활용할 수 있는 가능성이 있으며, 바이오매스 연료가 충분치 못한 경우에는 도시가스나 LPG 등을 병용할 수 있는 장점이 있다. c와 e의 방식을 병행하여 활용하는 것도 또 하나의 합성연료가스의 이용방안으로 볼 수 있다.

기존의 보일러가 있다고 할 때, e의 형식을 도입한다면 동절기에는 열을 주로 이용하는 방식으로 운영하고, 하절기와 같이 열 이용률이 낮은 시기에는 발전을 주로 하는 방식으로 운영할 수 있다. e의 형식에서 흡수식 냉난방설비를 도입할 때, 동절기에 소요 열량이 부족하다면 기존의 석유류를 이용한 보일러나 난방설비를 이용한다면 유류비를 절감하는 효과를 기대할 수 있다. 바이오매스 자원이 충분히 공급되지 못한 지역이나 상황에서는 이러한 기대효과를 얻을 수 있다. 하절기에 필요한 시설 냉방은 흡수식 냉·난방기를 통해 가능하다. 냉난방 수요가 거의 없는 시기에는 생산되는 가스를 대부분 발전에 이용하여야 한다. 시기별 발전에 이용할 수 있는 가스량이 크게 변할 수 있으므로 발전기 1대로 운영하는 것 보다는 소형 엔진발전기 1대와 중대형 엔진발전기 1대를 함께 설치하여 시기별 운영이 적합할 것으로 판단된다.

내연기관을 연계한 가스화공정은 고체연료를 전력 또는 동력으로 변환할 수 있는 가장 효율적인 방법의 하나이다. 전력생산을 위한 소규모 가스화공정에서는 소형 내연기관에서 휘발유나 경유를 대신하여 바이오매스의 활용이 가능하다. 따라서 바이오매스를 이용한 가스화/발전체계는 석유가 생산되지 않는 국가에서 자급할 수 있는 에너지자원을 이용할 수 있다는 점에서 의미가 크다. 바이오매스는 지구온난화를 유발하는 온실가스 배출량과 관계가 없다. 바이오매스 가스화를 통한 발전시스템은 석유를 활용할 수 없는 곳이나 석유를 통한 발전단가가 높은 경우 적용이 가능하다.

소형 가스화-발전시스템 시장 현황을 살펴보면 최근 재생에너지에 대한 관심과 고유가, 특히 온실가스 감축 및 배출권 거래 등의 환경변화로 급격한 성장세를 보이고 있다. 유럽과 미국의 유수한 제조업체에서 소규모 바이오매스 가스화시스템을 판매

하고 있지만 극히 제한된 수의 설비만이 전 세계적으로 지난 1990-1995년 사이에 설치되었다. 인도와 중국의 경우 사정이 다르다. 이들 두 국가에서는 목재와 벚짚을 이용한 가스화 설비를 지속적으로 생산하고 있는 상태이다.

현재 전 세계적으로 극소수의 소규모 상업용 가스화발전 설비가 가동 중이다. 대부분은 중국에 집중되어 있는 벚짚을 이용하는 가스화설비로서 약 100기가 가동되고 있다. 숲을 이용하는 가스화설비의 수는 현재 지속적으로 감소하고 있으며 주로 남미 특히 브라질에 집중되어 있다. 몇몇의 목재를 이용한 가스화발전시스템 또한 남미지역에서 상업용으로 가동 중이다. 목재를 이용한 가스화발전설비 중 가장 큰 것은 1MW 발전 규모로서 파라과이에 있다.

단기적으로 소규모 바이오매스 가스화발전설비 생산 설비가 상업용으로 개도국에서 당장 보급이 힘든 이유로서는

- 화석연료 대비 가격경쟁력을 가지지 못하며
- 장비의 품질이 낮아 신뢰성이 떨어져 유지관리가 어렵다
- 또한 관련 설비를 전담할 수 있는 전문 인력을 확보하기 어렵다

## 2) 가스화설비의 경제성 및 신뢰성

바이오매스 가스화설비의 경제성은 바이오매스 가격대비 경유 가격에 의해 거의 결정된다고 볼 수 있다. 1995년 현재 유가 US\$18/barrel, 경유가는 US\$190/ton에서 최고 US\$250/ton인 조건에서 소규모 가스화발전설비는 경제적이지 못하다. 경유가가 이에 비해서 약 2배가량 되는 경우 경제적 타당성을 갖게 된다. 100kW<sub>e</sub> 이상의 비교적 큰 규모의 설비가 충분히 낮은 설비비로 설치되고, 바이오매스 가격이 톤당 \$20 이하, 설비의 부하율이 최대이며 연간 가동시간이 4000시간 이상 되는 경우 경쟁력을 가지게 된다. 특히 부하율이 높은 상태에서 지속적으로 가동되는 경우 유리하며, 전력공급 조건이 불리한 농산업 분야에서 유리한 것으로 볼 수 있다.

세계은행에서 조사한 결과에 의하면 기존의 가스화설비는 충분한 신뢰성을 가지지 못하는 경우가 많은 것으로 나타났다. 재질의 부식 등의 문제로 인하여 제작사가 제시한 평균 내구연한 전에 가동이 중지된 사례가 많았다. 상당수의 경우 설계 후 충분한 내구성 시험이나 가동시험 등이 이루어지지 않아 현장 적용과정 중에 각종 문제가 발생한 것으로 나타났다.

열 이용을 위한 가스로에 비해서 전력생산을 위한 가스로의 경우 엔진이 요구하는

가스 질에 대한 관리가 중요하기 때문에 관련 기술 인력의 확보와 지속적인 유지보수가 중요하다. 관련 기술 인력에 의한 유지보수가 이루어지지 않는 경우 설비의 가동중단으로 이어지는 경우가 많다.

[Table 3-33] 가스화설비의 경제성 및 신뢰성 평가

평가 항목	발전연계 가스화 (500kW <sub>e</sub> 이하)	열 이용 가스화 (5MW <sub>th</sub> 이하)
바이오매스 연료	숯, 목재, 볏짚, 코코넛 쉼	목재, 숯, 볏짚, 코코넛 쉼, 기타
연료 소비량	목재 : 1.3-1.4 kg/kW <sub>e</sub> 숯 : 0.7-0.9 kg/kW <sub>e</sub>	목재 : 0.4 kg/kW <sub>e</sub> 숯 : 0.15-0.17 kg/kW <sub>e</sub>
설비 투자	석유계 설비 대비 2-4배	석유계 설비 대비 1.5 - 2배
지역 조건		
연료비	경유가 \$300/ton 이하	전처리된 바이오매스가격 <\$60/t
가동시간	연간 1000시간 이상	-
부하율	50% 이상	-
신뢰성	가동기간의 10-20% 동안 수리	5% 이하의 수리요구
노동력	관련분야의 전문 인력 요구	별도 전문 인력 필요 없음
기타 요구도	초기 투자에 대한 지원 필요	-

다. 소형열병합시스템 (손학식, 2005)

1) 열병합발전시스템 개요

열병합발전시스템(Combined Heat & Power generation system : CHP)은 하나의 에너지원으로부터 전력과 열을 동시에 발생시키는 종합에너지 시스템(TES : Total Energy System)으로 발전 시 부수적으로 발생하는 배열을 회수하여 이용하므로 에너지의 종합 이용효율을 높이는 것이 가능하기 때문에 산업체, 건축물 등의 전력 및 열원으로서 주목받고 있다. 즉, 열병합발전(CHP)시스템은 산업체, 건물 등에 필요한 전기·열에너지를 보일러 가동 및 외부 전력회사의 수전에 의존하지 않고 자체 발전 시설을 이용하여 일차적으로 전력을 생산 하 후 배출되는 열을 회수하여 이용하므로 기존 방식보다 30~40%의 에너지 절약효과를 거둘 수 있는 고효율 에너지 이용기술이다. 열병합발전(CHP)시스템의 발전효율은 발전기 형식, 용량 등에 따라 차이는 있으나 25~40% 범위 내에 있다. 그리고 발전시의 배열은 발전량보다 1.5~2배 정도 발생이 되며 이것을 유효에너지로 회수할 경우 총효율은 75~85%까지 향상이 된다.

열병합발전(CHP)시스템의 효율은 열과 전기 수요처의 열/전기 수요량에 따라 시스템의 효율이 크게 달라지는데 이는 시스템 경제성평가의 요체가 된다. 따라서 기술 도입에 따른 시스템 선정 시 매우 중요하며, 플랜트시스템의 열에너지수요와 전기에너지수요의 비를 열전비라 말하며 이는 열병합발전(CHP)시스템의 선정 시 매우 중요한 요소가 된다.

$$\text{열/전비} = \frac{\text{공정사용증기량}(T/H)}{\text{공정사용전력}(MW)}$$

열병합발전(CHP)시스템을 건축물에 도입함으로써 일반적으로 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- 전기와 열에너지를 낭비함 없이 동시에 사용함으로써 종합에너지이용효율이 향상되고 에너지절약이 된다.
- 에너지절약에 의해 에너지 비용의 저감을 도모할 수 있다.
- 전력의 피크 컷에 의해 계약전력용량의 저감과 특 고압 수전설비를 설치하지 않을 가능성이 있고 더불어 운전비용절약이 가능하다.
- 에너지원의 분산을 도모하여 비상시 전력과 열의 안정적 확보가 가능하다.
- 일정 규모이상의 건축물에 의무화 되어있는 비상발전기를 열병합발전(CHP)시스템의 발전기와 병용할 수 있으며 공간의 유효이용과 건설비의 저감을 도모할 수 있다.
- 지구온난화의 용인인 탄산가스의 저감에 유효한 시스템이다.

[Table 3-34] 열병합발전(CHP)시스템 설치·후 에너지사용량 및 효율, CO<sub>2</sub>배출량 및 저감율

구분	필요열량	에너지		CO <sub>2</sub>		
		사용량(Nm <sup>3</sup> )	효율(%)	발생량(g-C)	비율(%)	
기존시스템 (BLR+발전)	보일러	1,432	0.167	90	131.9	54
	발전전력	1	0.237	38	111.7	46
	계	2,292	0.404	60	243.6	100
열병합발전 (CHP)시스템	발생열량	1,432	0.273	55	182.6	75(기존대비 25%감소)
	발전량	1		33		
	계	2,292	0.273	88	182.6	75

(손학식, 2005)

열병합발전(CHP)시스템은 배열 회수 열매체로서 일반적으로 온수와 증기가 이용된다. 이용 열매체에 따라 열병합발전(CHP)시스템을 분류하면 다음과 같은 3가지 형태로 분류된다.

- (1) 온수이용시스템 (2) 증기이용시스템 (3) 온수·증기겸용시스템

온수이용시스템에 이용되는 열기관은 주로 가스엔진, 디젤엔진이며 가스터빈은 이용되지 않는다. 배열 이용 열매체로서의 온수는 엔진 재킷 냉각수로서 엔진 본체의 배열을 회수하고 나아가 배가스 보일러에 의해 엔진 배기가스로부터의 배열을 회수한다. 배열을 회수한 온수는 온수 헤더로 보내어져 각 기기에서 열원으로 이용되고 온수흡수냉동기에서는 냉수를 발생하여 냉방으로 이용한다. 열교환기에서는 온수를 발생하여 난방으로 이용하며 저장조에서는 물을 가열하여 급탕으로 이용하고 냉방용 냉수가 부족한 경우에는 보조직화식 흡수냉동기에서 냉수를 발생시킨다. 온수가 부족한 경우에는 보조온수보일러에서 온수를 발생시킨다. 또한 배열 회수원 온수 이용 부하가 감소하여 냉각수가 고온이 된 경우에는 방열기에서 대기로 방열시킨다.

열병합발전(CHP)시스템은 협의의 의미로는 가스엔진, 디젤엔진 등의 열기관으로부터 발생하는 동력과 열을 동시에 이용하는 시스템이다. 이 동력을 모두 발전으로 이용하는 것이 협의의 열병합발전(CHP)시스템으로, 이 경우 그 발전출력과 회수열량의 비를 열전비 라고 한다.

$$\text{년간평균수요열전비} = \frac{\text{년간연료소비량에의한열이용량}(kcal)}{\text{년간총전력소비량}(kWh) \times 860(kcal/kWh)}$$

출력측의 열전비가 일정하기 때문에 수요측에 있어서 이열전비에 맞는 전력수요와 열수요가 필요하게 된다. 만약 이 정합을 이루지 못하게 되면 시스템의 에너지이용 효율은 저하된다. 이 정합을 얻기 위해서 열병합발전(CHP)시스템의 의존율, 수요측 기기의 선택, 축열조 이용등의 계획이 필요하게 된다. 그러나 이 계획에 앞서서 열병합발전(CHP)시스템의 동입에 적합한 대상을 선정하는 것이 중요하다. 전주열종(電主熱從) 운전의 경우 이용 불가능인 회수 배열은 과잉배열로서 폐기되기 때문에 열병합발전(CHP)시스템의 에너지효율이 좋은 상태로 운전되기 위해서는 충분한 열수요 부하가 필요하게 된다. 따라서 수요열전비가 높은 용도의 대상이 열병합발전(CHP)시스템 도입에 적합한 대상이다.

열병합발전(CHP)시스템으로부터의 배열은 배가스 및 재킷 냉각수가 그 배열회수원이 된다. 배열회수원으로부터의 열은 각종 배열회수기기에 의해 회수 열매체가 되어 각종의 목적으로 이용된다. 배가스로부터는 회수 열매체로서 고압증기, 고온수를 얻을 수 있으며 재킷 냉각수로부터는 회수열매체로서 저압증기, 고온수, 저온수를 얻을 수 있다. 냉방에는 온수흡수냉동기, 증기이중효용흡수냉동기, 배가스흡수냉동기 등이 이용된다. 이중효용식 등을 이용하여 고효율로 흡수냉동기를 운전하기 위해서는 140℃ 이상의 온도가 필요하게 된다. 냉방에 의한 열 수요는 계절 변동이 크다. 난방에는 열교환기, 축열조, 가습기 등이 이용되어 비교적 저온의 회수 열매체에서도 고효율로 이용할 수 있다. 급탕에서는 수돗물의 예열에 저온의 회수 열매체를 높은 효율로 이용할 수 있으며 일반적으로 급탕에 의한 열 수요는 계절에 의한 변동이 작기 때문에 연간을 통하여 안정된 열수요가 된다. 또한 저탕조에 의해 배열과 열수요의 과부족이 조정된다. 일반적으로는 다음의 두 가지 특성을 갖는 열수요가 열병합발전(CHP)시스템의 고효율운전에 유리하다.

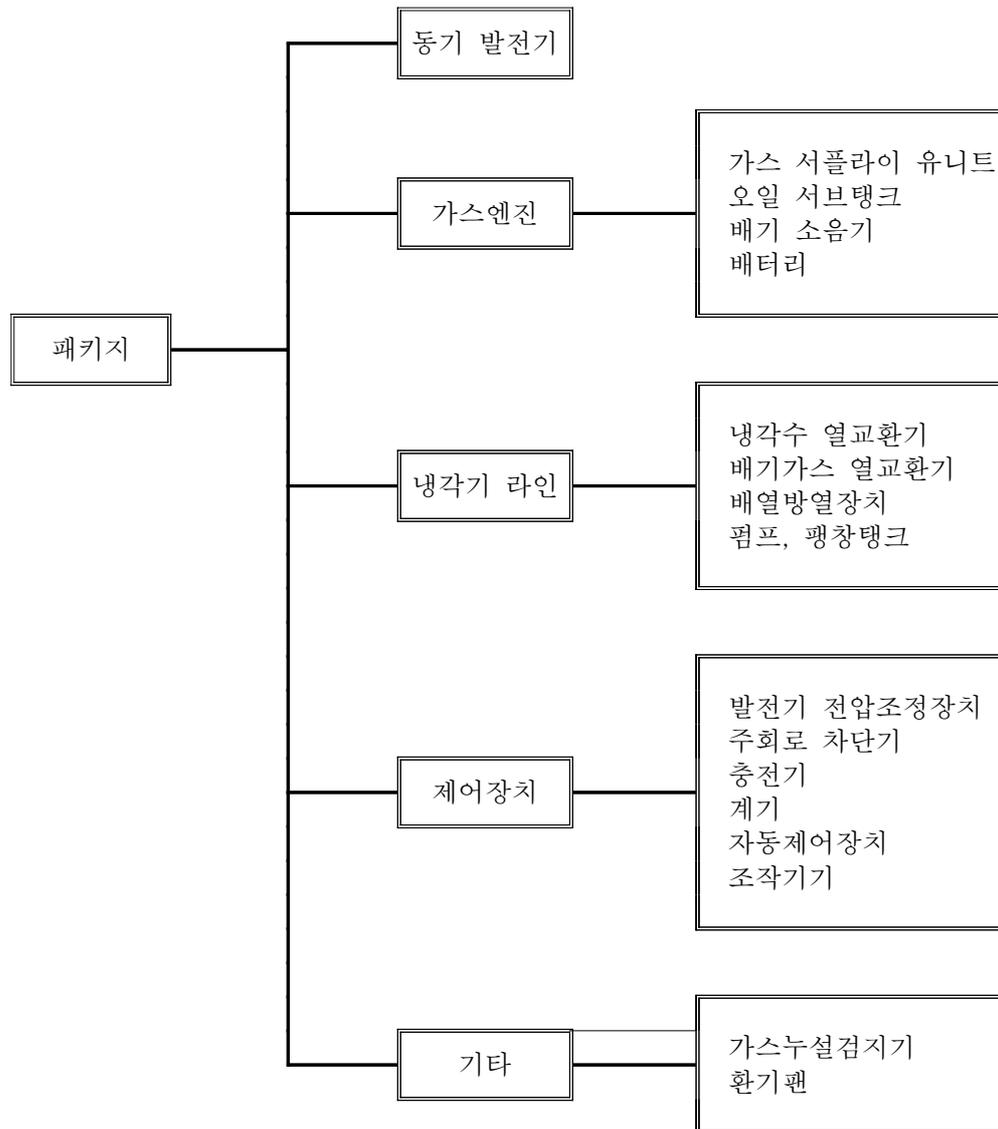
- a. 계절 변동이 작고 시간적으로도 안정된 열수요
- b. 전력의 부하 변동 패턴을 추종하는 열수요

또한 채택 순서는 일반적으로 다음 순서에 의한다.

- a. 이용 온도 레벨이 높은 것, COP가 높은 것
- b. 부하 변동이 작은 것

열병합발전(CHP)시스템에서는 부하와 열·전력의 발생과의 매칭이 극히 중요하여 부하 특성, 운전 방법에 대해서 검토할 필요가 있다. 당연한 것이지만 예를 들면 전력부하가 있어도 열부하가 없는 곳에는 열병합발전(CHP)시스템의 설치의 무의미하다. 부하특성상 열병합발전(CHP)시스템 선정에는 열전비가 중요하다. 여기에서는 열전비로서 열량(Mcal)을 분자에, 전력량(kWh)을 분모로하여 비율을 취한다. 수요 측면의 열전비와 공급 측면의 열병합발전(CHP)시스템 열전비가 있다. 수요 측면에서는 긴 기간을 고려한 연간열전비로부터, 짧은 시간별 열전비까지 여러 열전비가 있다. 패키지형 가스엔진 열병합발전(CHP)시스템의 열전비는 1.5~1.7 정도이기 때문에 이것을 넘는 큰 열전비 1.5~3.0을 갖는 호텔, 병원 등은 패키지형 가스엔진 열병합발전

전(CHP)시스템에 있어서는 바람직한 대상 중의 하나이다. 일반적으로 열병합발전(CHP)시스템 최적 범위는 전력 최대부하의 1/5~2/3로, 특히 전력 최대부하의 40% 부분이 최적의 크기가 되는 경우가 많다. 큰 열전비를 갖는 호텔, 병원 등은 전력 최대부하의 40% 보다도 큰 발전 능력의 일체형 가스엔진 열병합발전(CHP)시스템을 선정하는데 첫 번째 목표를 둔다.



[Figure 3-19] 60kW 열병합발전(CHP)시스템 캡슐 구성 (손학식, 2005)

농촌지역에서 열병합발전시스템을 도입하는 경우 마찬가지로 전력과 열수요에 대한 조사가 충분히 이루어져야 한다. 마을단위를 대상으로 하는 경우와 비닐하우스와 같은 시설농업을 대상으로 하는 경우는 전력과 열수요 특성이 매우 다르기 때문이다. 이에 대한 부분은 실증연구를 수행하면서 충분히 고려하여 더 연구되어야 할 부분으로 생각된다.

[Table 3-35] 열병합발전(CHP)시스템 원동기의 종류와 특징

	명칭	특징
내 연 기 관	디젤엔진(DE)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 소~대 출력(25~20,000kW)</li> <li>2. 고효율 35~45%</li> <li>3. 경유, 중유 사용 가능</li> <li>4. 배가스 <math>NO_x</math> 처리가 어려움</li> </ol>
	전기착화식 가스엔진(SI)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 중 출력이하(~2,000kW)</li> <li>2. 고효율 30~35%</li> <li>3. 가스연료이기 때문에 배가스가 깨끗</li> </ol>
	Dual Fuel 엔진(DE)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 중~대 출력(500~5,000kW)</li> <li>2. 고효율 38~43%</li> <li>3. 가스연료 외에 액체연료 10% 필요</li> </ol>
	가스터빈(GT)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 중~대 출력(500~25,000kW)</li> <li>2. 소 출력에서는 효율이 낮음</li> <li>3. 가스연료, 중유, A중유 사용 가능</li> <li>4. 대 출력에서는 콤팩트사이클로 고효율 도모</li> </ol>

[Table 3-36] 기종에 의한 열병합발전(CHP)시스템 특성치 비교표

		디젤엔진(DE)	가스엔진(GE)		가스터빈(GT)
			SI	DF	
발전효율(%) (저발열량기준)		35~45%	30~35%	38~43%	20~35% (콤바인 38~46%)
연료		·경유 ·중유	·가스	·가스, 경유 ·A중유	·등유, 경유 ·가스, A중유
열병합 특성치	열전비 (열출력/발열량)	약1.0	약1.5	약1.0	2~3
	종합효율	80~90	80~90	80~90	80~90
	발전 1,000kW 당 증기발생량	약0.7t/h	약8.0t/h (2t/h)*1	약 0.6t/h	약 3t/h
$NO_x$ 배출량(ppm)*4		1,500	2,000(150)*2	800	150(40)*3

주) \*1 비등냉각방식을 채택한 경우

\*2  $NO_x$  컨버터(3원촉매탈삭)를 사용한 경우

\*3 물 또는 증기분사를 사용한 경우

\*4 비산소농도는 디젤(13%), 가스엔진(10%), 가스터빈(15%)로 환산

## 2) 가스엔진과 열량계산

가스엔진에도 무과급(無過給)엔진과 과급(過給)엔진이 있으며 출력, 효율 등 특성이 다르다. 과급엔진에서는 무과급엔진에 비해 열효율에서 3~4%(열비율에서는 10~13%에 상당), 출력에서 약 50%의 증가를 얻을 수 있다. 발전단에서 측정한 열효율이 정격출력 100kW 이상 범위의 평균치는 31%(가스소비율=0.275  $Nm^3/kWh$ )로 거의 일정하다. 또한 공기과잉율 1.8~2.0의 초회박연소기관은 33%로 되어 있다( $NO_x$ 는 200ppm 전후).

일반적으로 무과급기관의 냉각수계는 1계통으로, 냉각수는 실린더 자켓 → 실린더 헤드 → 배기 매니홀드의 순으로 흐른다. 출입구의 온도차가 정격출력시에 수 도(°C)가 되도록 유량이 설정되어, 출구온도는 80~95°C의 범위로 설정되어 있다. 써모스타트는 저부하시에 엔진이 과냉각되지 않도록 축구로부터 나온 물의 일부를 입구로 되돌리는 장치이다. 이 작용에 의해 부하가 변화하여도 출구온도는 일정하게 유지된다(엔진 밖으로 흐르는 수량은 열량에 비례한다).

가스엔진의 배기온도(배기 열교환기 입구)는 공기과잉율에 따라 다르며, 3원촉매

부착시 650℃, 없는 경우에는 550℃ 정도이다. 한편 열교환기 출구온도는 150~160℃ 까지 채용(100℃로 하는 경우도 있다)할 수 있기 때문에 배기열의 70% 정도(연료 연소 열량의 17~18%)가 회수 가능하다. 열교환기 구조 형식은 SUS 316 또는 304재의 파이프를 이용한 연관식이 많으며, 관류식과 수관식도 있다.

### 3) 가스엔진에서의 열회수 (손학식, 2005)

엔진 배열의 대부분은 배가스와 엔진냉각수로 배출된다. 냉각수 회로에는 소형엔진, 대형과급엔진의 2종류가 있다. 그러나 급기·윤활유 냉각수온도는 그다지 높지 않다(40~50℃). 그 때문에 풀의 가온 등의 특수한 용도 이외에는 사용처가 없어 자켓 냉각수가 전적으로 이용되고 있다. 엔진냉각수를 수요처로 직접 공급하는 것은 다음과 같은 이유로 바람직하지 않다.

- (1) 엔진냉각수에는 일반적으로 청관제가 투여되어 있기 때문에 보건설 그대로 급탕으로 사용하는 것은 허용되지 않는다.
- (2) 엔진냉각수의 순환량은 일정하게 유지하는 것이 원칙이기 때문에 급탕과 같이 변화가 심한 것에는 바람직하지 않다.

그 때문에 온수 열교환기를 이용하는 것이 일반적이다. 다만 흡수 냉동기에서는 공급 온도가 높을수록 고성능을 얻을 수 있기 때문에 온수 열교환기를 이용하지 않는다.

가스엔진의 경우 그을음 부착 문제가 없기 때문에 자유로운 전열 구조의 선택이 가능하기 때문에 전열효과가 높은 핀 구조의 것이 개발되어 널리 사용되고 있다. 또한 열교환기의 출구가스온도도 온수용인 것에서는 130℃까지 하강시켜 회수열의 증대를 도모하고 있는 경우가 많다. 다만 천연가스계의 도시가스를 연료로 하는 경우, 배가스 중에 포함되는 수증기의 양이 많기 때문에 드레인 배출관은 두꺼운 것이 필요하게 된다.

엔진 배열을 모두 온수의 형태로 회수하는 경우에는 엔진냉각수를 배가스열교환기에 직렬로 통하도록 하고, 배가스로부터 배열을 회수하고 온수열교환기에서 온수에 회수열을 부가하여 이것을 수요처로 공급하는 경우가 가장 많다. 그러나 배가스열교환기의 온수 회로와 엔진냉각수의 순환회로를 개별로 하여 각각 온도 레벨이 다른 형태로 배열 회수를 하는 경우도 적지 않다.

배가스 열교환기에서는 온수 또는 증기의 형태로 회수되는데 온수의 형태로 회수되는 경우가 많다. 회수된 배열의 이용처로서는 온열로서 사용하는 이외에 흡수냉동기의 구동열원이 있으며, 냉수가 제조된다. 회수된 열의 온도 레벨, 형태에 따라 몇가지의 흡수냉동기가 사용되고 있다. 이 중 많이 사용되고 있는 것은 다음과 같은 3종류이다.

- 온수 단효용(單效用)흡수냉동기  
온수열교환기에서 회수된 85~90℃의 온수를 구동열원으로 하는 것
- 증기 단효용(單效用)흡수냉동기  
비등냉각 가스엔진에서 회수된 저압증기를 구동열원으로 하는 것
- 증기 이중효용 흡수냉동기  
가스터빈 뒤에 위치하는 배가스 보일러에서 회수된 고압증기를 구동열원으로 하는 것

[Table 3-37] 열병합발전(CHP)시스템에 사용되는 흡수식 냉동기 (냉각능력 90Mcal/h 이상)

원동기	매열 또는 회수열 종류	냉동기기종 성적계수		사용열매
		배가스 이중효용	이중효용 단효용 복합형	
가스터빈 가스엔진	배가스	0.95~1.15	0.75~0.85	배가스 400℃ 이상
엔진	온수	0.6~0.72		온수 85~90℃ 이상

$$\text{성적계수}(COP) = \frac{\text{냉각능력}(kcal/h)}{\text{구동열량}(kcal/h)}$$

가스업계에서 가스의 발열량은 고위발열량(kcal/Nm<sup>3</sup>)을 주로 사용하지만 내연기관 업계에서는 일반적으로 저위발열량 기준으로 효율을 표시한다. 고위발열량을 알고 있다면 저위발열량은 다음 식에 따라 구할 수 있다.

$$H_u = H_o - 480(H_2 + 1/2 \sum m C_n h m + w)$$

$H_u$  : 저위발열량( kcal/Nm<sup>3</sup>)

$H_o$  : 고위발열량(  $kcal/Nm^3$  )

$h_2$  :  $H_2$ 의 용적(  $Nm^3 / Nm^3$  )

$m$  : 연료분자중의 수소원자수

$n$  : 연료분자중의 탄소원자수

$C_nhm$  :  $C_nhm$ 가스의 용적(  $Nm^3 / Nm^3$  )

$w$  : 수분의 용적(  $Nm^3 / Nm^3$  )

o 엔진의 열효율(축출력 기준)

$$\eta_{th(s)} = \frac{(632.4) \cdot P_s}{H_u \cdot V_g} \times 100(\%)$$

o 발전기세트 효율(발전단 효율)

$$\eta_{th(e)} = \frac{(860.0) \cdot P_e}{H_u \cdot V_g} \times 100(\%)$$

o 유니트 효율(송전단 효율)

$$\eta_{th(u)} = \frac{(860.0) \cdot P_u}{H_u \cdot V_g} \times 100(\%)$$

o 총합 열효율

$$\eta_{th(total)} = \frac{(860.0) \cdot P_u + H_r}{H_u \cdot V_g} \times 100(\%)$$

$P_s$  : 엔진의 축출력(PS)

$P_e$  : 발전기출력(kW)

$P_u$  : 송전단출력(발전기출력-보기전력(kW))

$V_g$  : 가스소비량( $Nm^3/h$ )

$H_r$  : 엔진배열의 유효이용분(kcal/h)

o 이론공기량

1Nm<sup>3</sup>의 연료를 완전 연소하는데 필요한 공기량을 말하며 연소특성, 엔진성능을 검

토하는데 필요한 수치이다.

$$L_{ov} = \frac{1}{0.21} \left\{ \frac{h_2 + CO}{2} + \sum \left( n + \frac{m}{4} C_n h_m - O_2 \right) \right\} (\text{Nm}^3/\text{Nm}^3)$$

$L_{ov}$  : 이론 공기량(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)

$CO$  : CO 용적(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)

$h_2$  : H<sub>2</sub> 용적(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)

$O_2$  : O<sub>2</sub> 용적(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)

$C_n h_m$  : C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> 용적(Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>)

$n$  : 연료분자 중의 탄소 원자수

$m$  : 연료분자 중의 수소 원자수

임의의 혼합비  $\lambda$ 일 때의 흡입공기량은 다음 식에 따라 구할 수 있다.

$$V_{air} = \lambda \cdot L_{ov}$$

$V_{air}$  : 흡입공기량(Nm<sup>3</sup>/h)

o 배기가스량

일반적으로 연소에 의해 체적 변화를 일으키며 다음 식에 따라 구할 수 있다.

$$V_{egw} = V_g \left\{ 1 + \lambda \cdot L_{ov} - \frac{1}{2} (CO + h_2) + \left( \frac{m}{4} - 1 \right) C_n h_m \right\} (\text{Nm}^3/\text{h})$$

$$V_{egd} = V_g \left\{ 1 + \lambda \cdot L_{ov} - \frac{1}{2} (CO + h_2) + \left( \frac{m}{4} - 1 \right) C_n h_m \right\} (\text{Nm}^3/\text{h})$$

$V_{egw}$  : 습량기준 배기가스량(Nm<sup>3</sup>/h)

$V_{egd}$  : 건량기준 배기가스량(Nm<sup>3</sup>/h)

o 배기가스열량

$$H_{eg} = V_{egw} \cdot C_{po} (t_{eg} - t_r) (\text{kcal/h})$$

$H_{eg}$  : 배기가스열량(실온기준) (kcal/h)

$t_{eg}$  : 배기가스온도(°C)

$t_r$  : 실온(°C)

$C_{po}$  : 배기가스 등압비열(kcal/Nm<sup>3</sup>°C)

o 배기가스 열교환기에서 회수되는 열량

$$H_{eeg} = V_{egw} \cdot C_{pm}(t_{eg} - t_{exo})(\text{kcal/h})$$

$H_{eeg}$  : 회수열량(kcal/h)

$t_{exo}$  : 열교환기 출구가스온도(°C)

$C_{pm}$  :  $(t_{eg} - t_{exo})/2$ 의 온도  $C_{po}$

흡수냉동기는 열용량이 크기 때문에 기동 특성이 양호하다고는 말할 수 없다. 또한 기동시에는 전동기에 큰 전류가 흐르게 되는데, 증기흡수냉동기의 경우, 다량의 증기량(정격시의 약 3배)이 흐른다. 이 기동증기량을 억제하면 기동시간이 길게 된다. 온수흡수냉동기는 흡수냉동기를 구동하는 열원의 온도가 낮기 때문에 전열면적이 단효용 증기흡수냉동기에 비해 크게 되어 있다. 따라서 열용량이 커서 기동시간은 길어지게 된다. 엔진을 기동하여 일정 온도에 도달하면 온수를 공급하고 흡수냉동기를 시동하게 된다. 이때 흡수냉동기에 주어지는 열량은 엔진 출력으로 정해지며, 그 이상의 열량 공급은 불가능하다

라. 바이오매스를 이용한 농가난방의 경제성 검토

바이오매스 자원의 활용을 제고하기 위해서는 세부적인 이용 방안과 관련기술의 개발 등이 요구되며, 세부 이용계획별로 타당성과 경제성을 검토하는 것이 필요하다. 바이오매스를 가장 쉽게 이용할 수 있는 방안은 소각을 통해 연소열을 이용하는 것이다. 본 연구에서는 농촌지역에서 얻을 수 있는 바이오매스를 농가에서 난방 목적으로 이용하는 경우 경제성을 검토하고, 경제성에 직접적으로 영향을 미치는 요인을 평가하였다.

### 1) 분석 도구 및 기초 자료

경제성 분석은 캐나다의 RETScreen<sup>®</sup> 센터(RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre)에서 제공하는 도구(BIOH2000)를 이용하였다. BIOH2000은 바이오매스 자원을 이용한 열공급시설의 경제성을 평가하는 소프트웨어로서, 관련 장비에 대한 정보뿐만 아니라 세계 각국의 주요 도시에 대한 개략적인 기상정보를 내장하고 있다(RETScreen, 2004). BIOH2000이 제공하는 기상정보는 국내 지역단위 기상정보를 충분히 갖고 있지 않기 때문에 기상청에서 제공하는 자료를 활용하였다. BIOH2000에서는 바이오매스 보일러를 가정하여 경제성을 평가한다.

본 연구에서 필요한 기초자료로서 기온자료는 이천시의 평년값을 이용하였으며, 바이오매스와 관련된 자료는 경기도 안성시를 대상으로 얻은 자료를 이용하였다. 바이오매스 자원의 연소열을 이용한 농가 난방 계획 수립에 있어서는 연료로서 바이오매스 부존량과 수집 비용, 그리고 석유류의 현재 가격을 입력 자료로 준비하였다.

### 2) 바이오매스 수집 비용

바이오매스 수집과 관련된 현장조사는 2개의 배 재배농원을 대상으로 수행하였다. 재배면적은 각각 9,800 m<sup>2</sup>, 2,420m<sup>2</sup>로서, 전정 후 지면에 산재된 나뭇가지를 모으고, 묶은 후 농원 입구까지 수집하는 작업에 소요되는 시간과 작업인력을 이용하여 수집 비용을 산정하였다. 또한 바이오매스 발생지에서 이용시설까지의 운송과 관련된 비용을 산정하였다. 운송비용은 너클크레인이 장착된 트럭을 이용한 경우로서 바이오매스 ton당 가격은 \$40.0(48,000원, \$1=1,200원)으로 산정되었다. 경유 가격은 비닐하우스에 대해서는 \$0.355(426원)/ℓ, 농가의 경우 \$0.79(948원)/ℓ로 하였다.

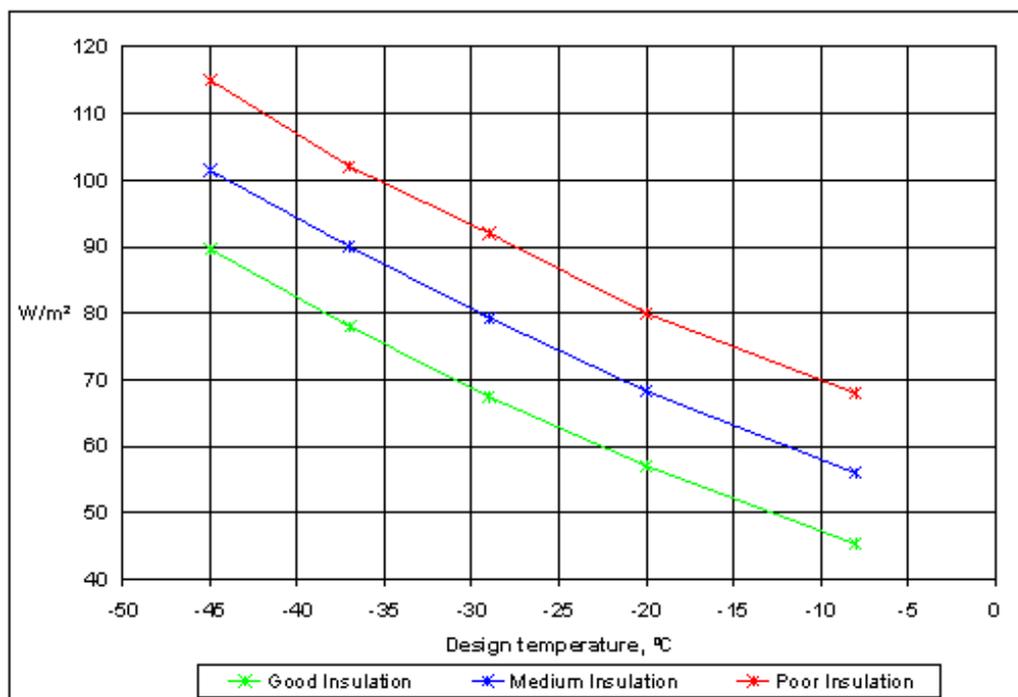
### 3) 지역 특성 및 설비관련 자료

난방과 관련되어 BIOH2000에서 요구하는 지역 특성 자료에는 동절기 평균 기온(heating design temperature), 월간 섭씨 18℃이하 기간(monthly heating degree days below 18℃), 총 소요열량 대비 온수공급에 필요한 열량 비율(domestic hot water heating base demand) 등이 있으며, 난방 이용시설의 배치와 관련된 자료가 필요하다. 본 연구에서는 경기도 안성시 서운면 지역에 대해 조사된 자료를 기초로 하여 50개의 농가를 분석 대상으로 하였다. 바이오매스 보일러 시설에서 농가 주변까지의 온수용 간선 파이프는 각각 200m로 하였고, 간선에서 개인 농가까지는 개인이 부담하는 것으로 가정하였다. 지역특성을 나타내는 주요 입력 자료는 다음 Table

3-38과 같이 결정하였다. 농가의 단위면적당 난방 요구량(heating load)은 평균기온과 단열조건에 직접적으로 영향을 받으며 그 범위는 BIOH2000의 사용자 안내서에서 제공되는 그래프(Figure 3-20)와 같이 42~118W/m<sup>2</sup>이다(RETScreen, 2004). 연간 소요열량은 월별 자료를 이용하여 산정하였다(Table 3-39).

[Table 3-38] Input parameters for BIOH2000

Parameters	Input Values	Range
Heating design temperature(°C)	-4.1	-40.0~15.0
Annual heating degree days below 18°C (°C-days)	3,007 (Table 2)	
Domestic hot water heating base demand (%)	22	0~25
Heating load for building (W/m <sup>2</sup> )	52	42~118
Biomass fuel moisture content(%)	30	
Calorific value (MJ/t)	11,670	



[Figure 3-20] Building heating load chart (RETScreen, 2004)

[Table 3-39] Monthly heating degree-days

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mean Temperature (°C)	-3.9	-1.2	4.6	11.6	16.9	21.5	24.5	24.8	19.4	12.6	5.2	-1.3
Degree-days	679	538	415	192	34	0	0	0	0	167	384	598

바이오매스 열 이용 설비 단가는 일반적인 에너지관련 설비와 마찬가지로 용량에 따라서 결정되며, 규모가 클수록 작아진다. 본 연구에서는 BIOH2000에서 제공되는 기본적인 자료를 이용하였다. 소규모 바이오매스 설비에 대한 kW당 가격은 Table 3-40과 같다.

[Table 3-40] Typical range of costs for small scale biomass systems

Power capacity (kW)	Total cost (\$)	Cost per capacity (\$/kW)	Fuel bin size (m <sup>3</sup> )
75	18,500	247	2.5
100	23,000	230	3.0
150	31,700	211	3.0
180	34,600	192	4.0
250	37,400	150	4.0

(RETScreen, 2004)

초기 시설비용에는 열 배관 시설비용, 바이오매스 및 경유 보일러실 건축비용, 장비 운반 및 설치비용 등을 포함하였다. 연간 유지관리비용에는 보험료, 부품비용, 일반관리비, 바이오매스 연료비, 침투 부하대응 연료(경유)비, 그리고 시설가동에 필요한 전기요금 등이 포함된다. 초기 및 연간 유지관리비용 자료 산출을 위한 단가는 Table 3-41과 같다. 난방을 위한 열 배관 설치비용은 BIOH2000에 내장된 함수를 이용하는 것으로 선택하였다. 바이오매스 보일러의 수명은 10년으로 가정하여, 매 10년마다 설비를 교체하는 것으로 가정하였다.

[Table 3-41] Initial and annual costs for input data

Cost type		Unit cost
Initial costs	Biomass equipment	\$150~247/kW
	Biomass equipment installation	\$41~50/kW
	Distribution pipe	internal formula
	Building construction	\$170~350/m <sup>2</sup>
	Peak load boiler	\$75~100/kW
	Transportation	depends on distance and equipment weight
Annual costs	Tax and insurance	10% of costs for operation and maintenance
	Spare parts	\$200~600/burner
	Biomass	\$40/ton
	Diesel oil	\$0.355/ℓ
	Electricity for equipment operation	\$0.15/kWh

#### 4) 재무관련 조건

시설의 경제성에 영향을 미치는 재무관련 지표로서는 에너지 가격상승률, 물가상승률, 감가상각률, 시설의 내구연수 등으로서, 본 연구에서는 각각 3%, 2%, 10%, 25년으로 가정하였다. 현재 국내에서는 도입되지 않고 있는 온실가스 감축 보조금과 대체에너지 시설 설치 보조금 또는 세제혜택 등은 없는 것으로 하였다. 경제성은 가장 널리 이용되는 지표로서 자본회수기간, 내부수익률(Internal Rate of Return, IRR), 순현재가치(Net Present Value, NPV)를 중심으로 평가, 분석하였다. 자본회수기간은 초기 투자비용을 회수하는데 소요되는 기간을 말하며, 순현재가치는 사업에 대한 수익의 순현재가치와 비용의 순현재가치의 차이를 나타내며 사업의 경제성을 가늠하는 척도 가운데 대안선택에 있어서 정확한 기준을 제시한다. 내부수익률은 시설의 내구연한에 걸쳐 발생하는 수익률을 나타내는 것으로서 수익과 비용의 현재가치의 차이, 즉 순현재가치를 0으로 만드는 할인율로 볼 수 있다. 본 연구에서는 바이오매스를 이용한 난방 설비와 바이오매스 연료비, 그리고 기타 유지관리비가 비용으로 간주되었고, 수익은 석유계 연료 대비 바이오매스 연료를 이용하여 얻어지는 수익 또는 saving으로 하여 재무관련 분석을 수행하였다.

5) 평가결과

50개 농가와 앞에서 기술된 기상 및 열 공급 조건에 따라 필요한 소요 열 공급 총 부하량은 260kW로 산정되었다. 바이오매스 보일러 250kW와 첨두부하에 대응하기 위한 경유 보일러 용량은 15kW로 시설을 갖추는 것으로 난방계획을 수립하였다. 바이오매스 이용 설비의 고장 등으로 난방이 불가능할 때 이용하는 비상용 경유 보일러는 200kW 규모로 가정하였다. 첨두부하 대응 보일러와 비상용 보일러의 설비 단가는 BIOH2000의 지침에 따라서 각각 \$100/kW, \$95/kW로 산정하였다.

주어진 입력 자료에 의하여 산정된 초기 시설투자 비용은 총 \$268,629이며, 이 가운데 보일러와 같은 운송비 포함 바이오매스 설비 및 설치비는 \$78,500(29.2%), 비상용 및 첨두부하 대응 보일러와 각종 설비를 위한 시설비용은 \$161,890(60.3%), 기타 비용은 \$28,239(10.5%)로 산정되었다. 시설비용 가운데 온수배관용 파이프 시설비는 \$72,660으로서 초기투자 비용 가운데 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 연간 비용은 보험, 부품비용, 인건비 등을 고려한 유지비용 \$4,795, 첨두부하에 소요되는 경유 및 바이오매스 연료비용이 \$18,673로 추정되었다(Table 3-42).

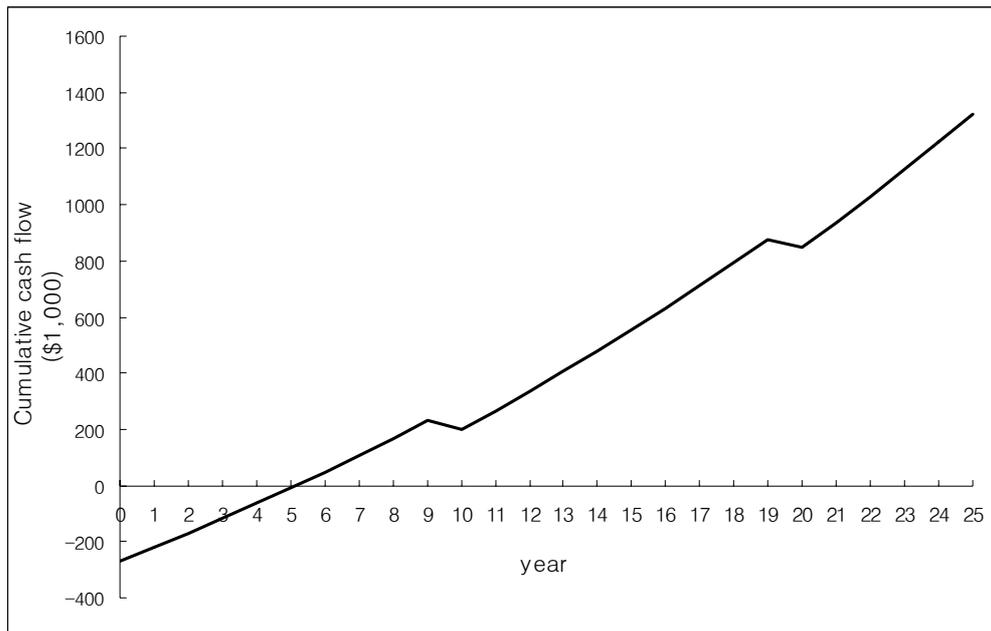
[Table 3-42] Summary for initial and annual costs for biomass heating system

Type of costs		Amount(\$)
Initial costs	Biomass equipments	40,000
	Biomass equipment installation	37,500
	Transportation	1,000
	Peak load heating system	1,500
	Backup heating system	16,000
	Distribution line pipe	72,660
	Facilities and installation	71,730
	Miscellaneous	28,239
	<b>Sub-total</b>	<b>268,629</b>
Annual costs	Operation and maintenance	4,795
	Fuel and electricity	18,673
Periodic costs	Biomass equipment replacement (every 10 years)	77,500

RETScreen® BIOH2000에 의해 얻어진 경제성 평가 결과는 Table 6에 요약된 바와 같이 순현재가치(Net Present Value, NPV)는 \$245,698, 내부수익률 19.7%, 손익분기점은 5.1년으로 나타났다. 자본의 기회비용을 일반적으로 이자율과 동일하다고 보므로, 내부수익률이 이자율보다 높은 경우 경제성이 있다고 본다. 따라서 현재의 이자율을 고려할 때, 내부수익률 19.7%는 충분히 높다고 볼 수 있으므로 경제성이 있는 것으로 판단된다. 특히 일반적인 대체에너지 설비의 경제성과 비교할 때 상대적으로 경제성이 높다고 볼 수 있다. Figure 3-21은 누가 자본 흐름도를 보여주고 있으며, 5.1년에 이르러 수익이 발생하고 있음을 보이고 있다.

[Table 3-43] Results of financial analysis for the biomass heating

Initial investment	\$268,629
NPV(Net Present Value)	\$245,698
IRR(Internal Rate of Return)	19.7%
Year to positive cash flow	5.1 years
Simple payback	5.6 years



[Figure 3-21] Cumulative cash flow for the biomass heating project

현재, 대체에너지의 보급 확대를 위해서 정부는 특히 태양광이나 풍력 등에 의해 생산된 전기를 상대적으로 높은 가격으로 구매해 주고 있다. 바이오매스 이용 시설에 대한 세제 혜택이나 보조금 등의 제도적 지원책이 마련된다면 상기의 경제성은 더욱 개선될 수 있다.

BIOH2000은 바이오매스를 이용하여 기대할 수 있는 온실가스 감축효과를 추가로 산정, 제시한다. BIOH2000에서 제공하는 관련 계수를 살펴보면, 경유(Diesel #2)에 대한 CO<sub>2</sub> 배출계수는 74.1 kg/KJ, CH<sub>4</sub> 0.002 kg/KJ, N<sub>2</sub>O 0.002kg/KJ로서 총괄 온실가스 배출계수는 0.449 tCO<sub>2</sub>/Mhr이다. 연료 효율 등을 감안하여 본 연구에서 설정한 바이오매스 열공급체계에 대한 연료별 온실가스 배출계수(emission factor)는 바이오매스 0.011T<sub>CO2</sub>/MWh, 경유 0.317T<sub>CO2</sub>/MWh, 전기 0.491T<sub>CO2</sub>/MWh이다. 이와 같은 조건에서 BIOH2000 적용 결과, 연간 연료 소비량을 기준으로, 경유 대비 온실가스 감축량은 244.1 ton으로 추정되었다. 이러한 감축량에 대한 보조금 제도가 마련되거나 배출권 거래에 의한 수익이 발생하는 경우 바이오매스 설비의 경제성은 더욱 개선될 것이다.

바이오매스를 이용한 설비의 경제성에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 연료이용 규모 즉, 바이오매스 난방 설비의 규모라고 볼 수 있다. 바이오매스 연료가격은 현장조사 결과를 이용하여 얻은 \$40/ton 으로서 단위 열량 당 가격은 경유 대비 약 1/7 수준이다. 설비의 규모가 커질수록 바이오매스 소요량이 증가하므로 경유 대비 연료비 절감에 따른 수익이 증가하기 때문에 설비 규모가 증가할수록 경제성은 좋아지게 된다. 반면에 소요 바이오매스 연료량이 증가하게 되면, 운송거리가 증가하여 단위 열량 당 가격이 상승하게 될 것이다. 따라서, 바이오매스 설비 규모는 바이오매스 연료의 상대적인 가격에 의해 결정될 것으로 판단된다.

나머지 모든 조건을 동일하게 설정하고 난방 요구량만을 50가구 5,000m<sup>2</sup>에서 100가구 10,000m<sup>2</sup>로 증가시키게 되면 바이오매스 설비 규모와 연료 소비량 또한 2배 정도 증가하게 된다. 비상용 난방 등의 설비 용량이 증가하여 이에 따른 비용이 추가로 발생함에도 불구하고, 수익발생 시점은 4.0년 후, IRR 26.7% 등으로 경제성이 개선된다. 또한 난방 면적이 200가구 1,000m<sup>2</sup>로 증가하게 되면 IRR이 30.2%로 더욱 개선된다. 이러한 규모의 경제성은 Table 3-44에 나타난 바와 같이 요약할 수 있다. 즉, 바이오매스 설비와 관련된 비용은 그 규모에 비례하여 증가함에도 불구하고, 연간 바이오매스 이용량 또한 증가하여 전체적으로는 경제성이 개선된다는 것이다.

[Table 3-44] Effects of heating demand on economic feasibility

Number of household		50	100	200
Biomass boiler size	Main (kW)	250	500	1,000
	Peak loading (kW)	15	25	50
Backup boiler	Diesel (kW)	200	500	1,000
Biomass fuel	(ton)	419	839	1,678
Year-to-positive cash flow	(years)	5.1	4.0	3.4
IRR	(%)	19.7	26.7	30.2
NPV	(\$)	245,698	759,424	1,509,683
GHG reduction	(tonCO <sub>2</sub> )	244.1	493.1	991.0

50가구로 구성되는 기본 계획에서 초기 시설투자비 가운데 난방용 간선 배관을 위한 시설비가 \$72,660으로 약 27%를 차지하고 있다. 따라서 난방용 간선배관은 사업의 경제성에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 이를 정량적으로 파악하기 위하여 나머지 조건을 동일하게 두고 배관 길이만을 200m에서 400, 600, 800m로 증가시켜 이와 관련된 초기비용을 변화시켜 경제성 분석결과를 비교해 보았다(Table 3-45).

초기 비용 중 바이오매스 설비와 관련이 없는 난방 배관 등의 부속설비 비용이 차지하는 비중이 높아질수록 경제성은 더욱 낮아짐을 알 수 있다. 총 초기 투자비 가운데 배관관련 설비가 차지하는 비율이 60%에 이르는 경우 경제성이 거의 없게 됨을 알 수 있다. 이는 앞으로 바이오매스 자원을 에너지 자원으로서 활용하는 계획을 세우는데 있어서 고려하여야 할 중요한 요소라고 생각된다. 난방배관 설비와 같이 바이오매스 이용 규모와 관계없는 설비의 비용은 총 초기 투자비용에서 최소화하는 것이 바람직하다.

[Table 3-45] Effects of initial cost for distribution pipe on economic feasibility

Length of pipe (m)	200	400	600	800
Total initial cost (\$)	268,629	348,555	428,481	508,407
Distribution pipe cost over total initial cost (%)	27.0	41.7	50.8	57.2
Year-to-positive cash flow (years)	5.1	6.5	7.9	10.6
IRR(%)	19.7	15.2	12.3	10.1
NPV(\$)	245,698	165,772	85,846	5,920

바이오매스 이용계획에서 수익은 경유 또는 석유류 대비 바이오매스 가격차에 의하여 발생된다. 즉, 이들의 상대적인 가격차에 의해서 수익성은 크게 영향을 받게 되는 것이다. 따라서 바이오매스를 에너지로서 이용하기 위한 계획에 있어서 고려하여야 할 요인이 바이오매스 수집 및 운송비용이다. 바이오매스의 수집 및 운송을 기계화 등을 통해서 보다 효율적으로 할 수 있다고 가정하여, 바이오매스 구입가격을 \$40/ton에서 \$30/ton, \$20/ton, \$10/ton으로 낮추게 되면 IRR은 19.7%에서 각각 21.5, 23.3, 25%로 각각 개선된다.

바이오매스 이용계획에 있어서 추가적으로 경제성을 개선할 수 있는 방안에는 1) 기존 난방설비를 침두부하 대응 설비 및 비상용 설비로 활용하여 초기 비용을 낮추는 것과, 2) 난방용 배관에 대해 수익자의 일부 부담 혹은 정부 지원, 3) 온실가스 배출량 저감에 대한 정부의 보상 등을 포함할 수 있다. 1)의 경우 기존 설비의 활용 가능성 등 대상 지역의 여건을 조사하여 도입할 수 있으나, 2)와 3)의 경우 대체에너지 이용 및 온실가스 감축에 대한 정부의 예산지원 등이 전제되어야 할 것이다.

#### 마. 바이오매스 부존량 기준 합성가스활용 시스템 예

본 연구에서 조사된 농업부산물 바이오매스 부존량을 고려하여 가스화, 합성가스 활용시스템에 대한 예를 살펴보았다. 합성가스 활용시스템은 전력 위주 시스템과 열 이용 위주의 시스템 2가지로 나누어 살펴보기로 한다. 관련 설비는 현재 시장에서 보급되고 있는 것을 중심으로 하였다.

##### 1) 바이오매스 부존량

과수원에서 발생하는 전지목은 품목에 따라서 다르지만 현장 조사결과에 의하면 최소 0.05 kg/m<sup>2</sup>, 최대 5.1kg/m<sup>2</sup> 로 나타났다. 재배면적은 과수원 면적 1ha, 발면적 0.1ha로 가정하였다. 발생량의 경우 함수비가 다르기 때문에 본 연구 결과의 하나인 단위면적당 바이오매스 공급 열량을 이용하여, 과수의 경우 3,000kcal/m<sup>2</sup>, 발작물의 경우 1,500kcal/m<sup>2</sup>로 가정하였다. 따라서 이러한 면적 조건하에서 농업부산물에 의한 총 공급열량은,

$$10,000 \text{ m}^2 * 3,000 \text{ kcal/m}^2 + 1,000 \text{ m}^2 * 1,500 \text{ kcal/m}^2 = 3.15 * 10^7 \text{ kcal} \\ = 1.317 * 10^8 \text{ kJ}$$

로 계산된다.

## 2) 가스로 규모

바이오매스 발생이 가을 이후와 동절기에 집중되므로 가스로의 가동은 5개월, 150일 동안 이루어지며 하루 10시간씩 가동된다고 할 때, 가스로의 규모는 약  $24\text{kW}_{\text{th}}$ 로 계산할 수 있다. 일반적으로 바이오매스 가스화장치의 냉가스효율은 70% 수준이므로, 생산되는 가스생산 능력은  $16.8\text{kW}$ 로 산정할 수 있으나 추가의 열손실을 고려하여  $15\text{kW}$  정도로 가정한다.

## 3) 합성연료가스 활용설비

합성가스의 이용은 효율을 높이기 위해서는 에너지 수요특성을 고려하여 설비를 갖추는 것이 중요하다. 발전기 엔진의 효율은 25%로 가정하고 가스 전량을 활용한다고 할 때  $3.75\text{kW}_e$  출력이 가능하다. 그리고 열회수를 위하여 70% 효율의 열교환기를 이용한다면, 가스로에서 배출되는 가스로부터 약  $5\text{kW}_{\text{th}}$ , 엔진 배가스 열량  $11.25\text{kW}_{\text{th}}$  중  $11.4\text{kW}_{\text{th}}$ 이 회수된다. 바이오매스 열량기준 전력생산 효율은 15.6%, 열이용 효율은 47.5%로 계산된다. 전체 효율은 63.1%로 일반적인 열병합발전시스템에 비해서 낮게 산정되었다. 개별 과수농가의 소요 전력과 급탕 및 난방에는 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 열병합발전시스템은 용량이 적을수록 경제성이 낮다. 또한 이러한 예시 시스템에서 바이오매스의 전처리에 소요되는 에너지와 비용을 고려하지 않았다. 이러한 부분은 유사한 시스템에 대해 현장 적용 및 실증연구를 통해서 보다 명확하게 구명될 수 있을 것이라고 판단된다. 특히 앞에서 언급된 바와 같이 합성연료가스를 엔진에서 이용하기 위해서는 정제가 필수적이므로 소요 투자비용은 더욱 늘어날 것으로 판단된다.

그러나 해당지역에서 가용한 바이오매스 자원을 파악하고 충분한 경우 적합한 시설규모를 산정하여 적용한다면 단위 비용은 낮아질 것으로 판단된다. 또한 가스로의 단열 등을 통해서 가스생산 효율을 높이고, 열이용 효율을 높인다면 경제성은 더욱 개선될 여지가 충분하다.

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야 기여도

### 제 1 절 연구개발목표 달성도 및 관련분야 기여도

[Table 4-1] Accomplishment and major contribution

구분	연구개발 목표달성도		관련분야 기여도
	연구개발목표	달성도 (%)	
1차년도 (2002.10.15 ~ 2003.10.14)	<p><b>농촌지역 바이오매스 자원 부존특성조사 및 수집계획 기법 연구</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 농촌지역 바이오매스 자원 부존량 및 종류조사</li> <li>○ 바이오매스 종류별 특성조사</li> <li>○ 시공간을 고려한 수집체계 연구</li> </ul> <p><b>가스화장치(Gasifier)의 설계인자의 도출</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기존 가스화장치의 개발 현황 조사</li> <li>○ 가스화장치 기본 설계인자 도출</li> <li>○ 가스화장치의 설계방향 정립</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 부존량에 대한 재조사 및 가채량에 대한 평가를 함으로써, 가용 농업부산물 바이오매스에 대한 활용방향을 제시하였음</li> <li>○ 지리정보시스템을 이용하여 부산물 바이오매스 공간적 분포를 평가하고, 이를 토대로 수집계획에 대한 기초자료를 제시하였으며, 발생시기에 대한 자료를 제시하여 추후 관련 연구를 위한 자료로 활용이 가능</li> <li>○ 주로 외국에서 이루어진 연구와 상용화된 가스화 장치에 대해 조사하고, 이를 토대로 가스화장치 설계를 위한 문제점 및 설계 방향을 제시</li> <li>○ 가스화 장치 설계는 투입 바이오매스 원료조건을 충분히 반영하여야 하며, 반응부의 제원산정 방법을 정립</li> <li>○ 고정상 하향식 가스로에 대한 설계 인자와 방향을 정립</li> </ul>

구분	연구개발 목표달성도		관련분야 기여도
	연구개발목표	달성도 (%)	
2차년도 (2003.10.15 ~ 2004.10.14)	<b>주요 바이오매스 별 전처리 공정 정립</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 바이오매스 특성에 따른 전처리공정 정립</li> <li>○ 전처리공정에 소요되는 동력, 열원계산</li> <li>○ 가스화시설의 폐열 및 동력활용방안 정립</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 고정상 하향식 가스화로에 투입되는 바이오매스 연료는 비교적 균일한 크기를 가져야 하며, 반응부의 제원에 적합하게 파쇄되어야 함</li> <li>○ 전처리공정으로서 탄화를 하는 경우열손실이 커서 회수율이 40%수준</li> <li>○ 합성가스의 열을 이용하여 주입공기의 가열 및 투입 바이오매스 연료를 건조하는데 활용하고, 주변의 열공급에 활용하는 체계를 제시</li> </ul>
	<b>가스화장치의 설계 및 제작</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가스화장치의 설계 및 제작</li> <li>○ 가스화장치의 운전 및 보완제작</li> <li>○ 가스화장치의 운전에 따른 발생 및 소요동력 분석</li> <li>○ 바이오매스 별 효율분석</li> </ul> <b>연료가스 활용방안 연구</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연료가스의 열량분석</li> <li>○ 연료가스의 저장 및 정제방안 검토</li> <li>○ 가스터어빈 활용 전력생산 가능성 평가</li> <li>○ 농업시설용 난방을 위한 활용방안 정립</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 바이오매스 연료조건 등을 고려하여 하향식 가스로를 제작</li> <li>○ 제작된 가스로를 시운전하면서 발생하는 각종 문제점을 파악하고, 가스로 설계시 반영되어야 할 부분을 파악</li> <li>○ 연료가스의 열량은 약 5 MJ/Nm<sup>3</sup> 수준으로서, 기존의 연구결과와 비슷한 수준</li> <li>○ 가스의 저장은 주성분을 고려할 때 비용이 많이 들므로 가스화 직후 활용하는 것이 바람직하며, 천연가스와 혼합하여 활용하는 것도 하나의 방안임</li> <li>○ 합성연료가스 중에는 타르와 분진이 포함되어 있으므로 이를 제거하기 위해서는 냉각에 의한 타르 응축 및 집진장치를 통해서 분진을 제거하는 것이 바람직함</li> </ul>

구분	연구개발 목표달성도		관련분야 기여도
	연구개발목표	달성도 (%)	
3차년도 (2004.10.15 ~ 2005.10.14)	<b>가스화장치 및 부속장치의 성능평가</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가스화장치의 운전 및 문제점 파악</li> <li>○ 가스화장치의 개선</li> <li>○ 전처리공정 및 효율개선을 위한 부속장치제작</li> <li>○ 부속장치의 운전 및 적정운전조건 정립</li> </ul> <b>연료가스의 활용체계 수립 및 최적운영조건 정립</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연료가스의 저장 및 최적활용 방안 정립</li> <li>○ 소요 보조연료 요구량 분석</li> <li>○ 농업시설을 위한 최적 이용방안</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 가스화장치 설계에 있어서 단열재를 이용하지 않아 열손실이 커서 가스화효율이 낮으므로, 충분한 단열에 의해 열손실을 최소화하는 것이 바람직 함</li> <li>○ 전처리공정으로서 바이오매스의 건조와 파쇄 혹은 탄화 공정에서는 합성가스를 생각하는 공정과 연계하여 전체 효율을 제고할 수 있음</li> <li>○ 연료가스의 저장은 배제하는 것이 바람직하고, 천연가스와 혼용하는 것도 효과적인 활용을 유도할 수 있음</li> <li>○ 합성연료가스의 열량은 아주 낮은 5MJ/Nm<sup>3</sup>으로서 단독 혹은 천연가스를 25% 혼합하여 이용하는 방안이 있음</li> </ul>
종합	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구계획대 진행 여부</li> <li>○ 결과도출의 타당성</li> <li>○ 연구목적 달성 여부</li> <li>○ 사회 기여도</li> </ul>	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구계획대비 본 연구는 성공리에 완료되었음</li> <li>○ 부존량에 대한 조사, 가스로의 설계 및 제작, 합성연료가스의 활용방안 등 그 결과는 대체로 만족할 수 있음</li> <li>○ 본 연구의 최종목표는 달성하였다고 판단됨</li> <li>○ 바이오매스 자원을 이용한 에너지 공급방안을 제시함으로써 재생에너지 활용도의 제고, 이로 인한 온실가스의 배출량 저감, 그리고 에너지 자급을 위한 설비의 제공 등의 기여를 했다고 판단됨</li> </ul>

## 제 2 절 평가 착안점

[Table 4-2] Indicator of evaluation

구 분	평가 착안점 및 척도		평가
	착 안 사 항	척 도(점수)	
1차년도 (2002)	o 바이오매스 유효자원 부존특성조사	25	25
	o 부존특성 및 시기별 발생량을 고려한 수집체계 정립	25	25
	o 가스화장치 주요 설계인자 도출	25	25
	o 설계방향 정립	25	25
2차년도 (2003)	o 주요 바이오매스에 대한 전처리공정 정립	35	35
	o 가스화장치 설계 및 제작	35	35
	o 연료가스 활용을 위한 정제기술 및 이용방안	30	30
3차년도 (2004)	o 가스화장치 및 부속시설의 성능평가	30	30
	o 연료가스의 활용방안 정립	40	40
	o 농업시설용 이용방안 정립	30	30
총 합	o 바이오매스 자원이용을 위한 부존특성조사 및 수집체계정립	35	35
	o 가스화장치 및 부속시설의 제작, 성능평가 및 최적인전조건 정립	35	35
	o 연료가스의 최적 활용방안 정립	30	30

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 기대효과

#### 1. 기술적 측면

바이오매스 자원의 에너지 변환 기술은 직접소각, 열화학적 변환, 그리고 생화학적 변환 등이 있다. 가장 저위의 바이오매스 자원이용방법으로서 직접 소각방식은 전래로부터 이용되어 왔던 방식이다. 최근에는 온실가스 감축 및 대체에너지 개발이라는 목표하에 열화학적 방식과 생화학적 방식이 집중적으로 연구, 실용화가 진행되어 오고 있는 실정이다. 생화학적 방식으로 바이오매스 자원을 에탄올과 같은 연료로 변환하는 방식은 잘 정립되어 있다. 그러나 목질계 바이오매스의 생화학적 변환 방식은 현재 각국에서 집중적으로 연구되고 있으나 아직 실용화까지는 적지 않은 시간이 요구된다.

바이오매스를 열화학적 변환과정을 통해서 이용하는 방식 또한 과거 석탄 및 목재 등을 대상으로 비교적 기술적인 측면에서 잘 정립된 상황이다. 그러나 비 목질계 바이오매스의 경우 그 특성상 과거의 열분해 기술을 도입하는 경우 효율이 낮아 바이오매스의 특성을 고려하지 않으면 안된다. 본 연구에서는 농촌지역에 산재해 있는 다양한 바이오매스에 대한 기초조사를 바탕으로 적절한 열분해 공정을 확립, 효과적인 대체에너지 개발 및 환경오염방지 효과를 얻을 수 있다.

또한 바이오매스의 열화학적 변화기술을 바탕으로 얻어지는 연료가스 활용기술의 개발은 가스엔진, 가스히트펌프 관련 기술개발을 유도, 이들의 보급이 촉진될 것으로 판단된다. 본 연구의 수행으로 다음과 같은 기술적 측면에서의 효과를 기대할 수 있다.

- 바이오매스 열분해 공정 기초기술의 정립
- 바이오매스 열분해 장치 설계 및 제작관련 기술의 정립

- 한 지역 내에 산재해 있는 자원의 효율적 활용방안의 정립
- 농업생산에 있어서 열분해 가스 및 액화가스와 같은 기타 1차 에너지의 효율적 이용기술 정립

## 2. 경제 · 산업적 측면

본 연구의 결과를 농촌지역에 보급한다면 청정 대체에너지의 개발 및 온실가스의 감축, 환경오염 물질로서 각종 유기물의 처리, 농업생산을 위한 보조에너지의 공급 등의 효과를 기대할 수 있다. 가스화 시설 및 활용방안이 적절히 활용, 보급된다면 농촌지역의 보조에너지 공급으로 농업생산성의 향상을 기대할 수 있다. 특히 겨울철 농업시설에 필요한 난방용 에너지로 활용되는 경우 그 경제적인 효과는 대단히 크다고 볼 수 있다. 가스엔진을 이용한 여름철 냉방시스템 또는 히트펌프를 가동하는 경우 보다 안정적이며 경제적인 농업생산을 꾀하여 농업생산성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

간접적으로는 바이오매스 자원의 활용과 관련된 산업의 활성화를 기대할 수 있으며 농촌지역의 냉난방 관련 기기의 수요확대를 촉진시킬 수 있다. 연료가스를 이용하여 가스엔진을 가동하는 경우 열병합식으로 운전되기 때문에 에너지 효율이 크게 높아진다. 따라서 에너지효율 제고를 통한 국가 차원의 자원의 효율적 이용이 수반될 것이다. 또한 장기적으로 열분해뿐만 아니라 다양한 바이오매스 자원의 변환기술이 발전 보급되는 경우 이들을 결합시켜 복합적인 바이오매스 자원의 이용 시스템으로 발전시켜 나아갈 수 있다.

가채 잠재량이 상대적으로 높은 바이오매스 자원의 이 같은 활용 방안은 대체에너지 개발 및 보급의 차원에서 우월성을 지속적으로 유지할 수 있다고 판단된다. 더 나아가 대체에너지에 대한 인식이 제고되어 태양에너지, 소수력, 지역 등의 농촌지역에서 활용 가능성이 대체에너지 부문의 활성화를 기대할 수 있으며, 궁극적으로 관련 산업체의 활성화 또한 기대할 수 있다. 본 연구개발로 인해 기대할 수 있는 경제, 산업적 효과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 보조에너지로서 연료가스의 공급

- 청정 대체에너지로서 연료가스의 냉난방 에너지원으로서 활용
- 보조에너지 활용을 통한 광열비 절감
- 계절별 냉난방 시설의 가동을 통한 농업생산성 향상
- 연료가스를 이용한 지역 냉난방 체제의 구축으로 관련 산업의 활성화
- 대체 청정에너지 개발보급으로 대체에너지 관련 산업의 활성화
- 농촌지역 내 대체에너지 활용 시설의 보급 및 관련 산업의 활성화
- 일정 지역 규모에 대한 바이오매스 가스화 이용 모형을 정형화하여 국내 보급은 물론 외국에 관련 기술의 수출기대
- 가스화 장치 및 시설 생산 및 보급관련 산업의 신규 창출

## 제 2 절 활용방안

열화학적 공정을 통한 바이오매스 자원의 에너지 활용기술은 농업 및 농촌지역에서 직접적으로 활용될 수 있는 것으로서, 본 연구에서 개발되는 가스화 및 부속장치, 바이오매스 수집 및 연료가스 활용시스템은 즉시 현장에서 적용, 즉시 연료가스의 생산 및 활용으로 이어질 수 있다. 성과물의 활용을 위해 가스화 및 부속 장치의 보급 및 활용 모형을 정형화한다면 성과물의 보급이 쉽게 이루어질 수 있다.

특히 산업자원부에서 대체에너지 실용화를 위한 예산이 계속 집행되어 오고 있는 것을 감안한다면, 본 연구의 성과물을 농촌지역에 보급하는 것은 어렵지 않다고 판단된다. 이를 위해서는 본 연구의 후속조치 또는 추가 기술개발 방안으로서 농업시설단지, 축산단지, 산간지역 등의 특정 지역에 대한 적용에 대한 검토가 요구될 것이다.

도시지역에서도 적지 않은 바이오매스가 발생하므로 이에 대한 자원화 방안도 본 연구의 성과와 연계하여 검토할 수 있다. 국가차원에서 자원의 효율적 이용이라는 측면에서 열분해에 의한 바이오매스 자원화는 다양한 대체에너지 기술개발 및 활용으로 이어질 것이다.

본 연구 성과는 지역의 바이오매스 자원 분포 및 부존특성을 고려하여 보급되는 것이 바람직하므로 지역적 특성을 고려한 후, 수집체계를 바탕으로 적지를 선정, 가스화시설을 설치하는 형식으로 부락단위 혹은 농업시설단지 단위로 보급될 수 있다.

이를 위해서 가스화장치를 제작하는 업체를 선정, 부속 장치를 함께 생산, 보급할 수 있도록 함과 동시에 지방자치단체나 중앙정부로부터 대체에너지 활용에 따른 보조 및 지원을 통해 성과물에 대한 보급을 확산시킬 수 있을 것이다.

### 제 3 절 추가연구의 필요성

농촌지역에서 발생하는 바이오매스 자원의 발생량을 조사하고, 이를 활용할 수 있는 가스화장치를 개발하였다. 또한 가스화장치에서 생산되는 합성연료가스를 이용할 수 있는 방안에 대해서 몇 가지 제시를 하였다. 이를 실용화하기 위해서는 실증연구를 통해서 보급기반을 확보하는 것이 필요하다. 또한 본 연구 결과의 성공적인 도입을 위해서는 농촌지역과 인접해 있는 산지로부터의 공급될 수 있는 간벌목을 이용하는 것도 고려해야 한다. 바이오매스 공급 가능량과 열 및 전력수요 규모를 고려한 바이오매스 가스화/열병합발전 시스템으로 보급할 수 있는 실증차원의 연구가 도입되어야 할 것이다.

본 연구에서 개발된 가스화장치의 경우 바이오매스의 자동투입설비와 점화장치가 포함되어 있지 못하다. 그리고 합성연료가스를 이용한 엔진/발전기 등에 대해서는 아직까지 미진한 부분이 남아 있다. 시스템의 경제성을 극대화하기 위해서는 천연가스의 혼용도 고려해야 할 것이다. 또한 가스화 반응기에 있어서 효율을 제고할 수 있는 방안이 제시되었고, 관련 기술이 축적되었으므로 이를 토대로 보다 효과적이고 경제적인 시스템으로 발전시킬 수 있다.

기술적인 측면 이외에 정책적인 연구 또한 병행되어야 할 것이다. 예를 들어 농업 부산물 바이오매스를 이용하여 열 또는 전력을 생산하여 이용하는 농가 또는 마을에 대해서 재생에너지 보급과 관련된 지원이 충분히 이루어질 수 있도록 하여야 할 것이다. 폐기 또는 방치되는 농업부산물 바이오매스 자원을 활용하여 에너지를 공급한다는 것은 석유수입 대체효과뿐만 아니라 온실가스 배출량 저감이라는 효과를 달성할 수 있으므로 다양한 지원을 위한 정책적인 연구가 이어져야 할 것이다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

Sea Tech에서는 미활용 바이오매스의 양이 종래의 대규모 집중형 발전의 연장기술로는 성립하기 어려운 점이 있다고 보고 바이오매스 발전플랜트를 이동 가능한 설비로 하여 바이오매스의 발생지를 순회하여 처리와 에너지회수를 수행하는 새로운 구상을 제안하였는데 이 방법은 수송비가 저감되며, 가동률이 향상되었다. 이 구상은 댐 유목과 산간지역에서 발생하는 폐자재, 왕겨·벗짚, 벌채수목을 비롯한 여러 가지 미활용 바이오매스에 적용가능하다. 1일 5톤의 댐 유목을 처리하여 발전단출력 140 kW, 송전단출력 93kW의 설비로 송전단에서의 발전효율은 20%를 상회할 것으로 기대되며 종래의 증기터빈방식에 비해 극히 높은 발전효율의 달성이 예견된다.

중국의 바이오매스 가스화 공정은 1세대 상향식 고정층 가스화기, 2세대 하향식 고정층 가스화기, 3세대 순환 유동층 가스화기로 구성되고 가스화 기술은 바이오매스 폐기물가스화를 가열 기구에 연결하고 가정 취사용으로 짚의 가스화, 바이오매스 가스화와 동력발전시스템 등으로 이용되며 경제성면에서 모든 요소와 바이오매스 가격을 고려해 바이오매스 가스화 시스템의 에너지 생산의 전반적인 비용을 계산해보면 바이오매스에서의 전기 생산비용은 소규모 석탄 화력발전소와 비슷하나 디젤 엔진 발전소보다 훨씬 낮다.

목질바이오매스 생산시스템으로서 Finland의 서해안, Pietarsaari의 Alholmens Kraft발전소 등지에서는 CRL을 도입하고 있다. CRL(Composite Residue Logs)이라고 하는 1개가 400~600kg에 달하는 상태로 가공하는 연료화 시스템은 키가 큰 임지 잔재를 산간의 임지에서 칩(chip)화하지 않고 통나무와 같은 모양으로 가공하여, 산간임지에 방치, 수분을 증발시킨 후에 통나무 운반트레일러로 플랜트에 반입하여 수분을 증발시킨 후, 통나무 운반 트레일러로 플랜트에 반입하여 사용하는 연료화 시스템이다. 이는 통나무와 같이 취급이 가능하고, 밀도가 크며, 산간 임지에서의 칩화가 불필요하기 때문에 운송비용이 적게 소요된다. 현재 세계 최대의 바이오매스 열병합 시스템을 구축하여 목질 바이오매스 45%, 피트 45%, 중유와 석탄 10%의 연료를 사용하여 550MW 용량의 보일러로 연소해서 240MW의 발전과 100MW의 프로세스 증기를 생산하고, 60MW의 지역난방을 함과 동시에 전력은 주주인 6개 기업체에 송전, 프로세스 증기는 인접하는 제지회사에 공급하고 있다.

바이오매스는 고효율 에너지 회수 기술로 나아가고 있는데 가스화 방식은 가스화

제 성분 여부에 따라 생성가스 중의 질소농도와 합성가스의 발열량이 바뀌며 저온에서는 메탄화 반응으로 발열량이 증대된다. 가스터빈 발전은 가스화 복합발전이 시행되고 있으며 소규모에서도 효율이 별로 저하하지 않으며 발전 효율을 시산한 결과 처리능력 743톤/일의 경우에, 발전량 53.1MW, 가스화로의 열효율77%, 터빈의 발전 효율은 42%, 시스템 전체 효율은 33%로 예상된다. 가스화 가스엔진 발전은 가스화에서 얻은  $CO$ (18~20%)와  $H_2$ (18~20%)로 구성되는 합성가스를 냉각하여 가스밀도를 높이고 세정한 후에 공기와 함께 디젤엔진에 도입하여 발전하는 5~100kW의 소규모 발전 시스템이다. 가스화 메탄올합성은 수증기개질 반응을 실시한 합성가스를 산화동, 산화아연계의 촉매반응으로 메탄올을 합성할 수 있다. 이와 같이 가스화 기술은 고도로 이용되고 진화하고 있는데 제 1세대 가스화 기술은 가스화, 용융, 소각으로 환경문제에 고도로 대응할 수 있는 폐기물 처리기술이고 제 2세대의 고온, 혼합가스의 chemical recycle(고발열량 폐기물용)에서 제 3세대의 저온, 분리의 가스 chemical recycle로 진화하고 있다. 이 기술은 폐기물 처리기술이라고 말하는 것보다  $CO_2$  삭감에 대응하는 에너지 변환기술이다.

## 제 7 장 참고문헌

1. 권순국, 1986, 보일러 및 증기터빈, 동명사, 291p.
2. 김문기, 남상운, 서원명, 윤용철, 이석건, 이현우, 2002, 생물환경조절공학, 도서출판청솔, 377p.
3. 김영복, 2002, 에너지절약형 농업기계화, (<http://aginfo.snu.ac.kr/ipforum,siemsta98-3/sub1.htm>)
4. 김병태, 2004, 바이오매스 가스화 발전기술의 개발, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
5. 김영철, 2004, 바이오매스 발전기술의 개발동향, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
6. 김영철, 2004, 바이오매스의 에너지 변환기술과 이용기술, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
7. 김춘영, 2003, 바이오매스 에너지의 종류와 특성에 맞는 이용, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
8. 광도은, 2003, 바이오매스와 폐기물 : 개선된 대체 연료, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
9. 김지동, 2004, 바이오매스의 열분해 가스에 의한 소규모 발전, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
10. 김재철, 2004, 중국의 바이오매스 가스화 기술 발전과 상업화, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
11. 김미선, 2001, 바이오매스 현황과 전망, 한국에너지기술연구원 바이오매스 연구팀.
12. 김상돈, 이종민, 2002, 가스화기술 현황 및 전망, 한국과학기술원 생명공학과.
13. 김재호 외, 2003, 폐기물 가스화의 열역학적 냉가스 효율 분석, 한국폐기물학회지 제 20 권 제 2 호.
14. KIER, 2001, 대체에너지 이용보급 현황, [http://www.kier.re.kr/common/renew/renew\\_25.html](http://www.kier.re.kr/common/renew/renew_25.html) (2004.9).
15. 남시복, 홍일선, 송영복, 신태현, 윤성도, 2000, 발변전공학, 광문각, 423p.
16. 농촌진흥청, 2002, 가축분뇨처리를 위한 Biogas 이용기술 개발, 농촌진흥청, 223p.
17. 박영미, 박희서, 서순복, 오세운, 전정환, 1998, 지역개발과 환경보전, 365p.

18. 박순철, 2000, 바이오매스 에너지 활용기술 개발 기획연구, 과학기술부, pp.36-45
19. 박진서, 2002, 바이오매스 원료의 가공비용 분석, 한국과학기술정보원, pp.1-2
20. 신기술 편집부, 1994, 건조장치의 이론과 실제, 188p.
21. 손영목, 2004, 바이오매스 에너지화 플랜트, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
22. 손응권, 2003, 바이오매스의 활용과 에너지 절약 - 바이오매스 관련 에너지 변환 및 이용, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
23. 손응권, 2003, 일본의 목질 바이오매스 연소 보일러 발전설비 사례, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
24. 손학식, 2005, 실용소규모 열병합발전시스템, (株)圖書出版 枝多利
25. 심재훈, 홍성구, 2004, 농업부산물 바이오매스 자원의 부존특성 및 활용방안, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
26. 심재훈, 홍성구, 2005, 하향식 가스화 장치를 이용한 바이오매스로부터의 합성가스 생산, 한국농공학회 학술발표회 논문집.
27. 연구개발정보센터, 2000, 해외과학기술동향 - 미국 FERCO, 바이오매스 에너지 상용화 규모 생산성공, (<http://kiss2000.co.kr/environment/endb/down/25ho/weather-2.htm>).
28. 오규형, 김홍, 황갑성, 인세진, 1997, 연소학, 해문당, 287p.
29. 윤정인, 양영명, 설원실, 김재돌(역), 2000, 에너지 시스템, 태훈출판사, 265p.
30. UNEP 한국위원회, 2002, 바이오에너지, ([http://unep.or.kr/energy/korea/bioenergy/biomass\\_technology.html](http://unep.or.kr/energy/korea/bioenergy/biomass_technology.html))
31. 이규성, 김영식, 1998, 폐기물처리기술, 형설출판사, 630p.
32. 이일호(역), 1998, 건조장치, 대광서림, 429p.
33. 임상훈, 김광렬, 정순오, 최성부, 1998, 환경과 에너지, 동화기술, 243p.
34. 임성진(역), 1999, 미래의 에너지 - 환경친화적 녹색 에너지시스템을 찾아서, 생각의 나무, 397p.
35. 이병근, 이선행, 1989, 목질폐재와 가정용쓰레기의 열화학적 분해에 의한 고수율 메탄가스(대체연료)의 합성, 목재공학 17(2):13-19
36. 윤종량, 2003, 미래의 에너지 바이오매스, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
37. 이상근, 2004, 바이오매스발전의 증설 후 가동, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
38. 이치용, 2004, 바이오매스에서 고효율 에너지 회수 기술, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).

39. 이종찬, 2004, 이동식 소형 바이오매스 가스화 발전, KiSTi(첨단기술정보 분석보고서).
40. 중앙축산회(일본), 1974, 가축분뇨처리사례집, 일본 농림성 축산국, 330p.
41. 조용균(역), 2001, 유기성 폐기물 퇴비화, 대학서림(출), 231p.
42. (주)한국에스리 교육센터, 2001, Introduction to ArcGIS Desktop, 2,3,9장
43. 한국동력자원연구소, 1989-1991, 바이오매스 자원조사 및 에너지 평가분석 I,II, III
44. 한국전력공사, 1999, 복합발전 - 열병합발전 이론과 실무, 신기술, 275p.
45. 홍성구, 2000, 농업부산물의 발열량 조사, 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp.563-568.
46. 황병호 외, 1999, 목질바이오매스, 선진문화사, pp.48-59.
47. Antonio C. Caputo, Mario Palumbo, Pacifico M. Pelagagge, Federica Scacchia, 2005, Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables, Biomass and Bioenergy 28 pp.35-51.
48. Bridgewater, A. V., 1995, The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation, Fuel 74(5) pp. 631-653.
49. DiPado, J., 2002, Outlook for biomass ethanol production and demand (<http://www.eia.doe.gov/analysispaper/biomass.html>).
50. Haith, D. A., 1982, Environmental Systems Optimitzation, John Wiley & Sons LTD., 306p.
51. H. Morita, F. Yoshiba, N. Woudstra, K. Hemmes, H. Spliethoff, 2004, Feasibility study of wood biomass gasificatiom/molten carbonate fuel cell power system-comparative characterization of fuel cell and gas turbine systems, Journal of PowerSources 138 pp.31-40.
52. J. G. Brammer, A. V. Bridgewater, 2002, The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP system, Biomass and Bioenergy 22 pp.271-281
53. Jung, S. J., B. S. Seo, H. K. Jang, J. B. Park, 2002. Strategy for energy saving and renewable energy use in greenhouse for horticulture. (<http://www.jares.go.kr>) in Korean
54. Ko, M. K., W. Y. Lee, K. W. Lee, H. S. Chun, 2001, Gasification of food

- waste with Steam in fluidized bed, *Korean Journal of Chemical Engineering* 18(6):961-964
55. KaKali Mukhopadhyay, 2004, An assessment of a Biomass Gasification based Power Plant in the Sunderbans, *Biomass and Bioenergy* 27 pp.253-264
  56. Keith R. Cummer, Robert C. Brown 2002 Ancillary equipment for biomass gasification *Biomass and Bioenergy* 23 pp.113-128
  57. McLaughlin, S. B. and M. E. Walsh, 1998, Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy, *Biomass and Bioenergy* 14(4): 317-324.
  58. McLaughlin, S. B., J. Bouton, D. Bransby, B. Conger, W. Ocumpaugh, D. Parrish, C. Taliaferro, K. Bogel, and S. Wullschleger, 1999, Developing switchgrass as bioenergy crop, in J. Janick (ed.), *Perspectives on new crops and new uses*, ASHS Press, Alexandria, VA, U.S.A
  59. McLaughlin, S. B. and M. E. Walsh, 1998, Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy, *Biomass and Bioenergy* 14(4): 31-324.
  60. M. S. Rao, S. P. Singh, M. S. Sodha, A. K. Dubey, M. Shyam, 2004, Stoichiometric, mass, energy and exergy balance analysis of countercurrent fixed-bed gasification of post-consumer residues, *Biomass and Bioenergy* 27 pp.155-171
  61. Mathieu, P. and R. Dubuisson. 2002. Performance analysis of a biomass gasifier. *Energy Conversion and Management* 43:1291-1299.
  62. Ossenbruggen, P. J., 1984, *System Analysis for Civil Engineers*, John Wiley & Sons LTD., 571p.
  63. Paisley, M. A., M. C. Farris, J. W. Black, J. M. Irving, R. P. Overend, Preliminary operating results from the Battelle/Ferco gasification demonstration plant in Burlington, Vermont, U.S.A., (<http://www.future-energy.com>)
  64. Peter McKendry, 2002, Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Biomass and Bioenergy* 83 pp.37-46.
  65. Paolo De Filippis, Carlo Borgianni, Martino Paolucci, Fausto Pochetti, 2004,

- Gasification process of Cubam bagasse in a two-stage reactor, *Biomass and Bioenergy* 27 pp.247-252.
66. Paolo De Filippis, Carlo Borgianni, Martino Paolucci, Fausto Pochetti, 2004, Prediction of syngas quality for two-stage gasification of selected waste feedstocks, *Waste Management* 24 pp.633-639.
  67. Ragnar Warmecke, 2000, Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier, *Biomass and Bioenergy* 18 pp.489-497
  68. RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre, 2004. Biomass Heating Project Model, (<http://www.etscreen.net>)
  69. Sohn, J. H. 2003. Comparison of heating methods for greenhouse, Conference on Agricultural Science and Technology (<http://www.rda.go.kr>)
  70. Spellman, F. R., 1997, *Incinerating Biosolids*, Technomic Pub. Co., 184p.
  71. Tchobanoglous, G., H. Theisin, and S.A. Vigil, 1993, *Integrated Solid Waste Management*, 978p.
  72. Tiangco, V. M., B. M. Jenkins, and J. R. Goss. 1996. Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers. *Biomass and Bioenergy*. 11(1):51-62.
  73. Voivontas, V., D Assimacopoulos, and E. G. Koukios, 2001, Assessment of biomass potential for power production : a GIS based method, *Biomass and Bioenergy* 20:101-112.
  74. Veronika Dornburg, Andre P.C.Faaaj, 2001, Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies, *Biomass and Bioenergy* 21 pp.91-108
  75. Walsh, M. E., 1998, U.S. Bioenergy crop economic analyses: Status and Needs, *Biomass and Bioenergy*, 14(4):341-350.
  76. Wereko-Brobby, C. Y. and E. B. Hagen, 1996, *Biomass Conversion and Technology*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England.
  77. Warren, T. J. B., R. Poulter, R. I. Parfitt, 1995, Converting biomass to electricity on a farm-sized scale using downdraft gasification and a spark-ignition engines, *Bioresource Technology* 52:95-98.

78. Y. Ando, K. Yoshikawa, M. Beck, H. Endo, 2005, Research and development of a low-BTU gas-driven engine for waste gasification and power generation, *Energy* 30 pp.2206-2218.
79. Zainal, Z. A., A. Rifau, G. A. Quadir, K. N. Seetharamu. 2002. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 23:283-289.
80. 本多淳裕, 1986, *Bioenergy - 生物界資源, 廢棄物の 有效利用*, 省energy center, 171p.