

# 유동상 반응로 조건에서 목재와 RDF 부분 산화의 영향

김태현\* · 최상민†

## Effect of Partial Oxidation of Wood and RDF in a Fluidized Bed

Taehyun Kim, Sangmin Choi

### ABSTRACT

Gasification characteristics in the fluidized bed reactor are essential for the design of a gasification furnace to optimize the operation condition. Moisture content of the solid fuel is one of the important factors to influence directly the gasification characteristics. So it is necessary to investigate the effect of moisture content of solid fuel in partial oxidation condition.

Gasification characteristics are investigated with results from thermogravimetric analyzer and lab-scale fluidized bed reactor for wood and RDF samples along with changing moisture contents. Additionally lab-scale fluidized bed reactor was run continuously and gas concentrations at the exit were measured. It is observed that the rate of reaction in partial oxidation condition is between the results from the combustion environment and from the inert condition. Moisture content in a particle slows down the heating rate of a particle. So, reaction is delayed by the moisture content. However, RDF samples those are easy to break-up don't show the effect of moisture content. The result of continuous operation condition shows that proper moisture content promotes gasification because steam from the particles helps gasification of the solid fuel. A simulation to predict the syn-gas composition was conducted by the Aspen Plus process simulator. The cold gas efficiency of the experiment was compared with results from the simulation.

**Key Words** : Wood, RDF, Moisture content, TGA, Pyrolysis, Gasification, Fluidized bed

### 기 호 설 명

n	mole number [mol]	$m_{fuel}$	mass of fuel [g]
N	total mole number [mol]	R	rate of reaction [kg/s]
$f_{conv}$	fraction of carbon conversion	A	preexponential factor [m/s]
dc/dt	rate of carbon conversion	$A_p$	particle surface area [m <sup>2</sup> ]
$C_{Rec}$	carbon recovery	$P_{O_2}$	oxygen partial pressure [Pa]
$f_c$	carbon mass fraction from elemental analysis	$\eta$	cold gas efficiency [%]

### 1. 서 론

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, smchoi@kaist.ac.kr

유동상 가스화로의 설계를 위해서는 우선 대상 연료에 대한 적절한 모델을 이용하여 특성을 예

측함으로써 각 설계변수의 최적범위를 미리 결정하는 것이 바람직하다. 또한 일반적인 로의 설계시 성능에 영향을 미치는 여러 가지 변수들을 고려하여 적절한 설계가 가능하도록 하여야 한다 [1]. 기본적으로 설계는 연료특성 파악, 열 및 물질 정산, 형상 및 Type 결정, 세부 조건 결정의 순서대로 진행한다[2].

일반적으로 운전조건 및 연료 특성에 따라서 전체 설계 및 운전에 영향을 미치는 인자들은 반응성(반응 상수, 단계별 반응속도, 휘발분/생성물량), 온도상승률(덩어리 크기, 혼합 파쇄 특성, 덩어리 열전달 특성), 체류시간, 산소농도, 공기주입량(공기비), 공기 예열 온도, 연료내 수분함량, 유동화율, 유동사 조건, 가스의 혼합 특성, 미연분량, 출구 가스 온도, 로의 크기 및 형상 등이 있다[3]. Ogada 등[4]은 실험실 규모 및 semi pilot 규모의 유동상로에서의 실험을 통해 연소로 내에서의 하수 슬러지의 연소 과정을 나타내면서 슬러지 내 수분이 연소속도에 큰 영향을 끼치며, 건조, 탈휘발 및 고정탄소 연소의 각 단계들이 중첩되어 일어난다고 기술하였다. Choi 등[5]은 유동상로에서 온도, 입자 크기, 수분함량에 따라 탄소전환의 개념을 이용한 해석을 통해 탈휘발 및 최 연소에 영향을 파악하였다. 가스화/열분해의 경우에서 Xiao 등[6]은 온도, 등가비, 유동화 속도의 변화에 따른 합성가스 발열량, 가스화 효율에 관해 연구를 수행하였다.

하지만 설계 적용의 최적범위를 결정하기 위해서 연료 내의 수분이 가스화 속도와 연료 특성에 미치는 영향에 관해 보다 자세한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 부분 산화조건에서 수분함량이 입자의 가스화 과정에 미치는 영향을 조사하였다. 대상 연료로는 RDF와 나무를 사용하여 실험실 규모의 실험로에서 열적반응에 대해서 알아본다. 또한 ASPEN PLUS를 사용하여 반응기 전체를 평형상태로 가정하여 계산하고 이를 실험결과와 비교하여 부분산화의 영향에 대해 논의한다.

## 2. 실험 및 계산 방법

### 2.1 대상 연료의 공업 및 원소 분석

나무와 RDF의 수분을 제외한 건기준으로 분석 결과를 표시하였다. 실험에 사용한 나무와 RDF의 원소 분석 및 공업 분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 실험장치

Table 1 나무와 RDF의 원소분석 및 공업분석

		나무	RDF
공업분석	휘발분	87.1	77.4
	고정탄소	12.9	11.4
	회분	>.01	11.2
원소분석	C	47.7	51.8
	H	6.5	8.2
	O	45.7	28.1
	N	>.01	0.7
발열량	S	>.01	>.01
	kJ/kg	17580	23400

### 2.2.1 열중량 분석기

Fig. 1에 수 g 단위의 고체 연료 열분해/가스화를 위해 제작된 열중량 분석기의 개략도를 나타내었다. 사용된 열분해 열중량 분석기는 크게 화로, 온도 조절 장치, 질량 유량 조절장치로 되어 있고 측정부분에는 가스 분석기, 저울, K-type 열전대가 있다. 그리고 측정부분에는 저울과 실험데이터 수집 장치가 있다. furnace의 중앙에는 연료를 올려놓는 알루미늄 재질의 시료용기가 위치한다. 직경 100mm, 높이 270mm이고 온도 조절기를 이용하여 가열 시간, 승온 조건 및 최고 온도를 조절 할 수 있다. 분석기 상단에는 저울로 Ohaus E12140을 사용하여 온도에 따른 질량변화를 측정하도록 되어 있다. 또한 연소실 중앙에 T/C를 설치하고 아래 부분에 가스주입구가 있고 이를 MFC와 연결하여 질소 가스를 이용하여 저산소 분위기를 형성하도록 제작되었다. 또한 상단에 포트로 가스분석기와 연결하여 열중량 분석과 더불어 가스 샘플링 또한 가능하게 되어 있다.

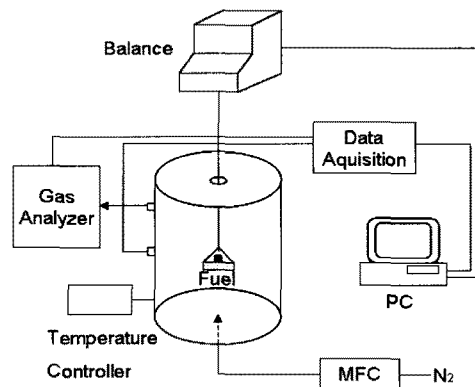


Fig. 1 수 g 단위의 열중량 분석 장치

### 2.2.2 실험실 규모 유동층 반응기

단입자 유동층 가스화 실험은 실험실 규모의 시험로에서 수행하였으며 개념도는 Fig. 2에 나타내었다. 직경 100mm, 베드 높이 200mm, 프리보드 높이 900mm의 크기의 반응기로써, 유동화 공기는 MFC를 이용하여 조절한다. 사용된 유동사는 평균 입경이 550 $\mu$ m, 밀도 2300kg/m<sup>3</sup>, 기공율 0.35의 모래를 사용하였다. 최소 유동화 속도는 상온(15 $^{\circ}$ C)일 때 0.15m/s이다. 이때 저산소 분위기를 형성하기 위해 산소 농도를 낮추기 위한 질소를 섞어서 투입한다. 또한 베드 온도를 유지하기 위해 반응기 외벽의 가열선과, 베드에 공급되는 유동화 공기의 온도를 높이기 위한 예열기가 설치되어 있다. 베드의 온도는 K type 열전대로 측정하였다. 배출가스 중 CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 측정에는 CIC Photonics FT-IR spectrometer를 사용하였고 H<sub>2</sub> 측정에는 Teledyne 2230 모델을 사용하였다. 분석기의 측정 결과는 자료 획득 장치와 컴퓨터를 이용하여 5초 간격으로 기록하였다.

### 2.3 실험방법

나무 입자와 RDF에 대해서 수분함량을 변화시켜 가면서 열중량 분석을 수행하였다. 분위기 가스는 질소가스를 사용하여 순수 열분해 특성을 볼 수 있도록 했으며, 샘플은 각 변의 길이가 2cm인 정육면체 모양의 나무 입자와 지름이 2cm이고 높이가 2cm인 원통형 모양의 RDF를 사용하였다. 수분함량이 0%인 대상 시료는 먼저

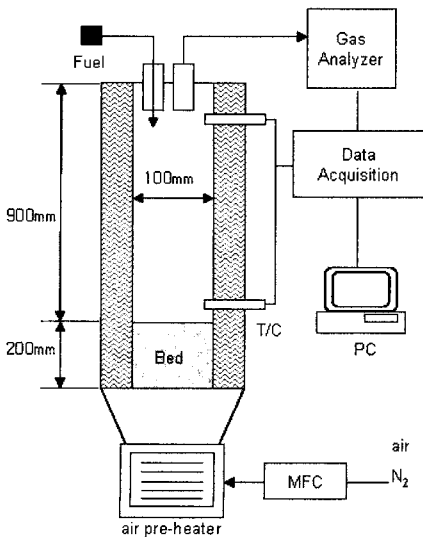


Fig. 2 실험실 규모 유동상식 반응기

Table 2 열중량 분석 실험 조건

항목	Condition
온도 범위	실온~800 $^{\circ}$ C
승온 조건	25 $^{\circ}$ C/min
수분변화(나무)	0% ~ 38%
수분변화(RDF)	0% ~ 30%
분위기 가스	N <sub>2</sub>
가스 주입량	4L/min
Sample 무게	나무:4g, RDF : 9g

Table 3 유동상 반응기 실험 조건

항목	Condition
베드 온도	750 $^{\circ}$ C
수분변화(나무)	0% ~ 50%
수분변화(RDF)	0% ~ 30%
수분변화(연속운전)	0% ~ 40%
유동화 가스	N <sub>2</sub> : 30L/min + air: 22L/min
유동화율	2.08(=0.312/0.15)
등가비	0.6
투입량(연속운전)	500g/hr

107 $^{\circ}$ C에서 5시간 건조 후 사용하였고, 수분은 107 $^{\circ}$ C에서 1시간 가열하였을 때 감소된 양을 측정하여 결정하였다. 열중량 분석의 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

유동층에서 단입자 실험과 연속운전 실험을 수행하였다. 실험방법은 직경 약 2 cm 크기의 고체 연료 입자를 유동층 반응기에 투입하고 시간에 따라 배가스를 측정하였다. 나무 입자와 RDF에 대해서 수분함량을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 최소유동화속도는 0.15m/s 이고 유동화율을 2이상으로 설정하였다. 유동화 공기량은 52L/min으로 등가비를 0.6으로 맞추어 질소와 공기를 혼합하여 사용하였다. 실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

### 2.4 계산 방법

열중량 분석 결과에서 탈휘발 과정에 대한 아레니우스 형태의 탈휘발 모델을 적용하면 휘발분의 반응계수를 결정하여 서로 비교할 수 있다. 고체 연료의 연소 반응은 k를 아레니우스 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

비등은 열중량 방법을 이용할 경우에는 x축

을  $1000/(RT)$ 로 하고  $y$ 축을  $\ln[(-dW/dT)/W]$ 로 하는 일차 함수형태로 나타낼 수 있다. 이 직선의 기울기로부터 활성화 에너지(Activation Energy)를 구할 수 있고,  $y$ 절편으로부터 빈도인자(Frequency factor)를 구할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{dW/dT}{W}\right) = \ln\left(\frac{A}{\beta}\right) - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

원소 분석을 통해 얻어진 탄소의 양을 기준으로 연료의 무게를 결정하여 연료로 연료를 투입하고 배기가스 성분 중에서  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_xH_y$ 의 농도를 측정하여 가스화 현상을 해석하는 방법이다. 연료중의 대부분의 가연성분은 대부분 탄소 및 탄화수소이다.

원소분석을 통해 얻은 각 고체연료의 탄소량을 기준으로 연료의 무게를 결정하고 배가스 성분 중에서  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ 를 분석하여 가스화 상황을 설명한다. 연료의 탄소 성분이 모두  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ 로 전환되어서 배기 가스로 빠져나간다고 가정하고 합성 가스의 조성을 측정하여 배출 탄소량을 계산하면 탄소의 연소량과 탄소의 전환 속도를 계산하여 가스화 상황을 설명할 수 있다. 합성가스에서 측정된 합성 가스의 농도( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ )와 합성 가스 유량( $Q$ )을 이용하면 다음과 같은 식들을 정의하여 가스화 상황을 설명할 수 있다[5].

탄소 연소량의 계산식을 시간으로 미분하고 총 탄소량으로 나누는 식(2)와 같이 탄소의 전환 속도(rate of carbon conversion,  $dc/dt$ , 1/sec)를 정의할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{n}{N}\right) = \frac{Q}{N}(C_{CO} + C_{CO_2} + C_{C,H}) \quad (3)$$

탄소전환량(fraction of carbon conversion,  $f_{conv}$ , %)은 백분율로 표시되며 시간별 탄소의 양에 전환된 탄소량을 나눈 값에 탄소회수율을 곱하여 식(4)로 정의하였다.

$$f_{conv} = \frac{n}{N} \times C_{Rec} \times 100 \quad (4)$$

또한 입자의 온도는 주위 베드의 온도와 같고 산소의 분압과 표면적을 일정하다고 가정하면, 아래의 연소 반응속도의 값은 가정에 따라 상수가 된다. 실험값으로부터 최소제곱법을 사용하여 전체를 포괄하는 반응속도를 얻어낸다.

$$R = k_0 \exp(-E/RT_p) A_p P_{O_2} \quad (5)$$

그리고 연속운전 시에 가스화를 위해 선정된 폐기물 원료 및 운전조건 등에 대한 가스화의 효율을 계산하기 위한 척도로서 냉가스효율(Cold gas efficiency)이 사용될 수 있다. 냉가스효율을 계산하기 위해 폐기물이 갖고 있는 반응열을 가스화를 통한 생성가스의 열량, 미반응된 폐기물의 열량, 반응기를 통한 열손실 그리고 생성가스의 현열의 합으로 정의한다. 따라서 가스화의 효율을 계산하기 위한 냉가스효율은 다음과 같이 정의하여 사용한다[7].

$$\text{냉가스 효율}(n) = \frac{\text{가스화를 통한 생성가스의 열량}}{\text{폐기물이 갖고 있는 반응열}}$$

## 2.5 ASPEN PLUS simulation

유동층 가스화기의 성능예측에 대해 크게 열역학적 모델과 kinetic 모델 두 가지 접근이 이루어져 왔다. Bacon et al.[8], Double et al.[9], Mansaray et al.[10]와 Li et al.[11]은 Gibbs free energy가 최소화되는 방식을 이용한 열역학적 모델을 이용하여 유동층 반응기에서 평형을 계산하였다. Corella et al.[12]는 가스화기에 대해 1차원 정상상태에서 kinetic equation을 유동층의 수력학적 모델과 에너지, 질량 보존식과 함께 계산하는 모델을 제안하였다. 복잡한 kinetic 모델은 수많은 화학식을 포함한 열 및 물질정산을 풀어야 하기 때문에 합성가스 조성 계산은 어렵고 시간을 많이 소비하는 일이다. 이러한 면에서 ASPEN PLUS는 열역학적 데이터베이스와 수학적 알고리즘을 제공하고 있어 기존 다른 방법과 비교하여 볼 때 시간절약과 복잡성을 제거할 수 있는 장점이 있다.

본 시뮬레이션은 실험을 점검하고 빠르게 결과를 확인 할 수 있도록 ASPEN PLUS에서 제공하는 reactor model을 이용하여 정상상태에서 시뮬레이션을 수행하였다. 사용한 flow diagram은 연료의 분해를 수행하는 ASPEN PLUS yield reactor인 RYIELD와 주어진 조건에서 평형상태로 가정하여 계산을 수행하는 ASPEN PLUS Gibbs reactor인 RGIBBS로 구성되어 있다. RYIELD는 공업분석 및 원소분석 자료를 토대로 연료를 탄소, 수소, 산소 등의 구성 물질로 변환하고, RGIBBS는 깁스 평형을 만족하는 가스화기 내의 평형계산을 위해 사용하였다. Aspen plus simulation flow diagram은 Fig. 3에 나타내었다.

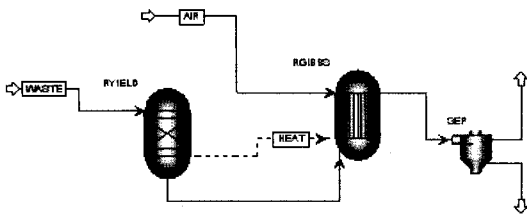


Fig. 3 ASPEN PLUS simulation flow diagram

### 3. 실험 결과

#### 3.1 부분산화측면

Fig. 4는 나무를 연료로 충분한 산소를 주입한 경우, 무산소 상태를 유지하다가 탈휘발이 끝나는 지점에서 산소를 주입한 경우(Choi.J 등[13])와 본 연구에서 수행한 부분적인 산화환경에서의 실험결과를 탄소 전환량으로 나타내어 비교해보았다. 200초 부근에서 탈휘발과정에서 표면 연소 과정으로 전이하며 각 각의 경우에 대해 유사한 결과를 얻었다. 반응 완료시간은 충분한 산소 조건이 400초로 가장 짧았고 그 뒤로 부분산화조건 무산소 조건이 순서로 반응의 완료되는 시점이 지연되었다. 또한 탄소전환량 추이를 살펴보면 부분산화 분위기의 탄소전환량 그래프가 충분한 산소 조건과 무산소조건의 탄소전환량 그래프 사이에 있는 것으로 측정되었다. 이는 원활한 산소 공급으로 탈휘발 과정에서 화연소가 촉진되었기 때문에 일어난 결과이다. 산소 농도 변화는 화연소 속도를 변화시키는 결과를 초래하였으며 값이 커질 때 화연소 과정에서 산소 공급을 원활히 하기 때문에 화연소 속도가 증가한다.

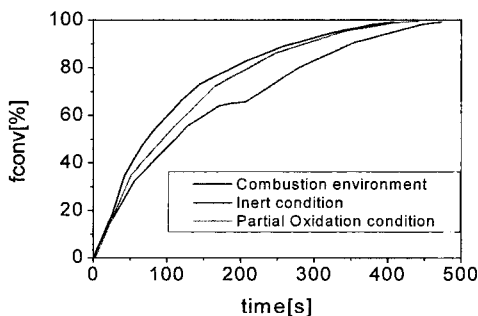


Fig. 4 산화분위기에 따른 탄소전환량

### 3.2 입자 특성

#### 3.2.1 수분함량의 영향

Fig. 5 에는 무산소 분위기에서 나무의 수분함량별로 온도 상승에 따른 질량 변화를 보여주는 TG 선도로 나타내었다. 수분함량이 0%인 경우에 약 70%의 중량 감소가 300°C에서 430°C 구간에서 일어난다. 하지만 수분이 증가할 경우에 100°C부근부터 수분의 증발이 일어나게 되어 초기의 중량감소를 보인다. 탈휘발이 끝나고 표면 연소로 전이 되는 온도 즉, 400°C 이후의 그래프에서 중량변화가 급격히 일어나는 온도가 수분함량이 0%일 때는 430°C이었던 것이 수분함량이 24%일 경우에 약 460°C, 수분함량이 38%인 경우에는 약 530°C 인 것을 확인 할 수 있었다. 최대 약 100°C의 차이를 볼 수 있다. 이는 수분함량의 영향으로 더 빠르게 중량감소가 일어나는 것을 의미한다. 하지만 열분해가 최고조로 이루어지는 순간에서의 피크는 점점 높은 온도 영역에서 이뤄지고 있다. 또한 탈휘발이 종료되는 시점이 수분함량이 증가함에 따라 점점 더 높은 온도 영역에서 나타나고 있다. 나무 입자 내의 온도 상승률 둔화로 인해 탈휘발이 종료되는 시점과 온도 영역이 수분함량의 증가에 따라 반응이 지연되면서 더 높은 온도영역에서 이루어짐을 확인 할 수 있다.

Fig. 6은 목재 연료의 수분함량을 0%에서 50%로 변화시켜가면서 탄소 전환량으로 나타내었다. Fig. 7은 탄소 전환율의 1차 미분 형태로 나타난 탄소전환속도를 나타내었다. 수분의 함량은 입자의 가열에 큰 영향을 주므로 전체적으로 입자의 반응성에 미치는 영향이 크다. 수분이 증가하면서 입자의 온도증가율이 입자의 수분잠열에 의해서 느려지게 되며 그것으로 인해서 탈휘발되는 속도가 느려지게 된다. 합성가스의 발생

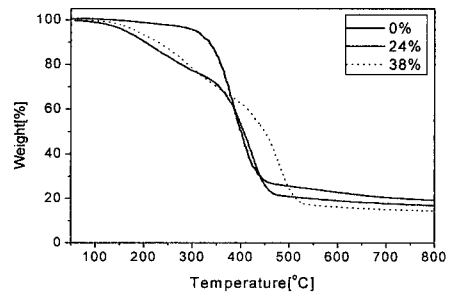


Fig. 5 TG 선도 - 나무 : 수분함량:0~38%

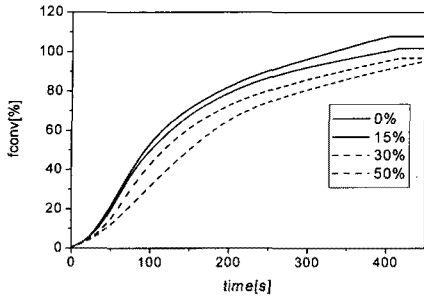


Fig. 6 탄소전환량:  
wood, water 0~50%,750℃,flow rate:0.3m/s

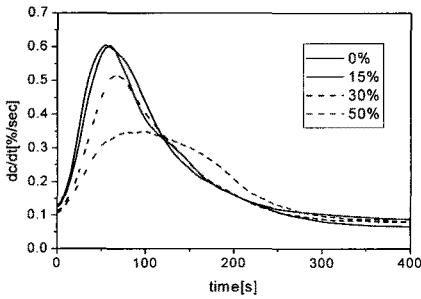


Fig. 7 탄소 전환속도:  
wood, water 0~50%,750℃,flow rate:0.3m/s

량은 수분 함량이 높은 입자에서 다른 측정 가스보다 일산화탄소의 발생량이 더욱 감소함을 볼 수 있다. 건조된 나무 입자의 경우 CO의 농도가 다시 0이 되는 시간이 240초로 가장 짧으며 수분 함량이 50% 인 경우에 335초로 약 90초 정도 지연된다. 수분이 증가할 경우에 입자 내의 온도 상승률이 둔화되어 가스화가 완료 되는 시간이 점점 늦어지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 앞서 수행한 나무 열분해 열중량 분석과 유사한 결과를 얻었다. 탄소 전환속도로 나타내었을 때에 이는 확연히 드러나게 되는데 수분함량이 증가할수록 탄소전환율의 기울기가 둔화되는 것을 볼 수 있다. 나무의 경우 수분량이 증가하면서 입자의 온도 증가율이 감소하고 그 결과 온도에 지배를 받는 탈휘발 속도가 줄어들기 때문이다.

Fig.6 의 탄소전환량의 실험결과를 바탕으로 전체를 포괄할 반응속도를 앞선 가정에 의해 최소 제곱법을 이용하여 하나의 상수로 나타내었다. 사용한 실험값은 탄소전환량을 이용하여 투입된 입자가 반응이 완료되는 시간까지를 기준으로 하고 구한 값이다. 그 결과는 Table 4에 나타내었다. 탄소전환량이 %로 나타내지기 때문에 반응속도는 %/s로 나타내었다. 투입된 입자가

Table 4 수분함량에 따른 반응속도 및 완료시간

수분함량[%]	반응속도[%/s]	완료시간[sec]
0	0.25829	387
15	0.23934	418
30	0.23167	431
50	0.22709	440

Table 5 실험장치의 합성가스 조성 및 합성가스 열량

수분 함량	CO <sub>2</sub> [vol%]	CO [vol%]	H <sub>2</sub> [vol%]	CH <sub>4</sub> [vol%]	합성가스열량 kJ/Nm <sup>3</sup>
0%	4.48	11.93	6.6	4.18	2220
20%	4.46	12.23	7.5	4.45	2355
40%	3.89	9.27	5.2	3.09	1733

100% 반응했을 때의 완료시간을 보면 수분이 50%인 경우에는 수분잠열로 인해 초기의 반응속도가 느려지고 전체 반응시간이 완전 건조일 경우와 비교하여 약 14% 지연되는 것을 볼 수 있다. 이러한 수분함량 특성은 휘발분의 발생속도를 늦추게 된다.

실험실 규모의 유동층 가스화기의 연속운전을 통해 입자의 수분함량에 따른 합성가스 농도의 평균값과 그 때 생성된 합성가스의 열량을 Table 5에 나타내었다. 그리고 Fig. 8은 ASPEN PLUS simulation통해 얻은 수분이 0%에서 40%까지 변화를 주었을 때 얻은 합성가스 조성 결과이다. 실험의 경우 0%, 20%, 40%의 경우에만 실험을 수행하였다. 수소의 경우 시뮬레이션 결과와 실험결과 모두 15%~20% 사이에서 최댓값을 가지며 수분이 증가할 경우 수율이 떨어짐을 볼 수 있었다. 하지만 시뮬레이션의 결과에서 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도가 수분함량이 20%를 넘는 경우 급격하게 변화되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 실험을 통해 얻은 수분함량이 0%, 20%, 40% 일 때 냉가스 효율과 시뮬레이션을 통해 얻은 냉가스 효율을 나타내었다. 실험의 냉가스 효율은 순서대로 40%, 52%, 45% 의결과를 나타내게 되는데 완전 건조 상태일 때 보다 20% 일 경우가 더욱 높은 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션의 결과에서 보면 수분함량이 15% 일 때 최댓값을 가진다. 실험의 경우 수분함량의 케이스가 부족하여 보다 정확한 최적 수분량을 알아내기 어려웠다. ASPEN PLUS를 이용한 단순한 열역학 모델의 결과에서 목재가 수분을 흡수 또는 증발하는 경우 가스화 조건을 유지하기 위한 수분

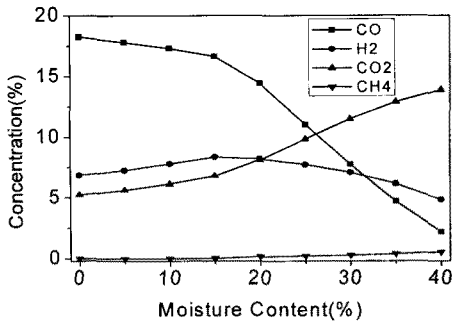


Fig.8 시뮬레이션의 합성가스 조성 결과

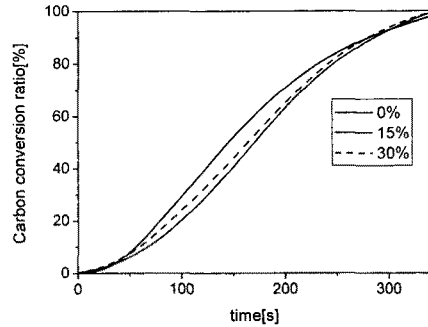


Figure 10. 탄소 전환율: RDF,water0~30%,750℃,flow rate:0.3m/s

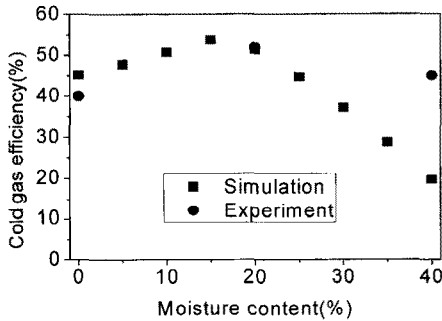


Fig. 9 수분함량에 따른 냉가스효율

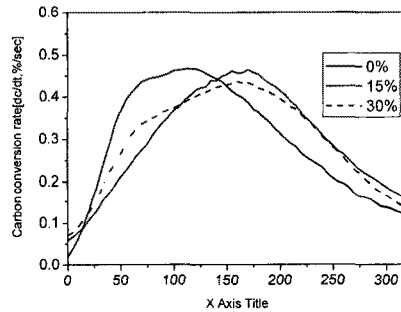


Figure 11. 탄소 전환 속도: RDF,water0~30%,750℃,flow rate:0.3m/s

함량은 15% 내외가 적절하다고 할 수 있겠다. 이는 Kim.J 등[7]이 열역학적 모델을 이용하여 냉가스 효율 분석결과와 유사하다. 이는 입자내의 수분이 건조가 되면서 일종의 가스화제로 작용하여 가스화를 더욱 촉진시키게 된다. 하지만 너무 많은 수분함량은 베드의 온도나 가스화로 운전의 불안정성을 야기 시켜 오히려 냉가스 효율이 떨어지게 되는 것을 볼 수 있다.

### 3.2.1 덩어리 영향

앞에서 수분함량의 영향을 알아보았다. 이러한 수분함량이 영향을 비교적 뚜렷하게 볼 수 있었던 것은 사용된 시료의 크기가 분말형태가 아닌 덩어리로의 확장이 이루어졌기 때문이다. 입자의 내부와 외부의 온도차로 인해 입자의 내부까지의 열전달에 영향을 미쳤기 때문이며 또한 균일하지 못한 온도상승으로 위와 같은 결과를 보였다. 나무의 경우에는 입자의 모양이 유지되는 반면 RDF의 경우에는 결합력이 약한 입자의 특성으

로 인해 수분함량의 영향을 덜 받는 것으로 실험 결과 확인할 수 있었다. 비산된 입자로 인해 탄소 전환량으로 나타내기 어려워 Fig. 10과 Fig. 11에 탄소 전환율과 탄소 전환 속도로 나타내었다. RDF는 나무 입자와 달리 수분에 따른 확연한 차이를 보이기 어려웠다. 일정한 수분 이상에서는 입자 형태를 갖출 수 있는 한계를 넘어서면서 쉽게 부서져 입자의 크기가 감소하면서 수분의 영향보다 입자의 크기의 영향을 더 받았기 때문이다.

## 4. 활용

### 4.1 설계적용

본 연구에서 수행했던 결과를 투입량 50t/d의 실제 유동상식 가스화로로 확장하기 위해 열 및 물질정산을 수행하고 이를 통해 기존 소각 시설의 설계 기준 하에서 간략하게 가스화로의 크기 결정 방안을 마련해보았다. 연속운전을 통해 연

**Table 6 유동상식 가스화로 열 정산 결과**

입 열			출 열		
발열량	5253	kW	잔류 연료의 현열	2880	kW
현열	11.0	kW	열전달	0	kW
투입공기현열	384	kW	합성가스 현열	2768	kW
입열의 총량	5648	kW	출열의 총량	5648	kW

**Table 7 소각로 설계 기준을 적용한 가스화로 크기 결정 범위**

	단 위	소각로 설계기준	가스화로 크기 결정 범위
연소실 노상연소율	kg/m <sup>2</sup> hr	<450	<b>A &lt; 4.63</b>
연소실 노상 열부하	Mcal/m <sup>2</sup> hr	<1100	<b>A &lt; 4.11</b>
연소실 체적 열부하	Mcal/m <sup>3</sup> hr	<240	<b>V &lt; 20.23</b>
유동상 체적 열부하	kW/m <sup>3</sup>	≈620	<b>V ≈ 9.11</b>

어진 결과로 부터 얻은 가스화로의 합성가스 조성, 냉가스 효율, 합성가스 현열 값 등의 실험 데이터를 이용하여 건조된 나무를 대상으로 가스화로에 대해서 열 및 물질 정산을 수행하였다. 그 결과표를 Table 6에 나타내었다.

유동층 소각로 연소실 설계 기준 하[2]에서 수행한 열 및 물질 정산 결과를 적용하여 Table 7에 나타내었다. 유동상의 체적만을 고려한 유동상의 체적 열부하는 기존의 소각로와의 유사한 값을 가지는 공통설계인자로 적용하였다 [14]. 계산 결과에서 보면 가스화로의 전체 체적은 20.23m<sup>3</sup> 이하 유동상의 체적은 약 9.11m<sup>3</sup>에서 결정해야 할 것이다. 또한 유동층 면적은 노상 열부하를 기준으로 4.11m<sup>2</sup> 이하로 결정해야 할 것이다.

**4.2 연료 특성 평가**

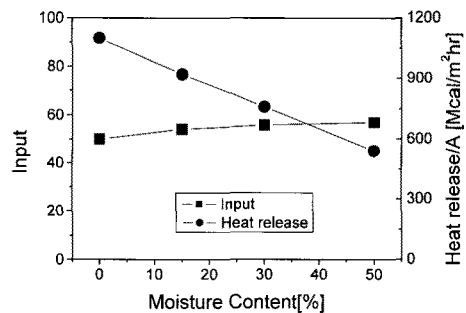
Fig. 12은 앞선 실험결과를 바탕으로 수분함량에 따른 투입량과 노상 열부하를 나타내었다. 반응속도는 Table 4의 결과를 이용하였다. 가장 반응속도가 빠른 완전 건조 상태일 경우를 투입량 기준을 50으로 두고 비교해보았다. 수분이 증가

할수록 반응시간은 느려지게 되므로 동일한 시간에 로내에 처리되어지는 연료의 양이 적어지게 된다. 따라서 수분함량이 높아질수록 연료의 반응속도나 연료의 발열량에 따라 투입량을 조절할 수 있다. 수분이 없는 상태와 비교해볼 때 수분이 50%인 경우는 투입량을 14%증가 시켜야 동일한 양을 처리할 수 있다.

수분함량이 증가하는 경우에 노상 열부하의 값이 작아지게 된다. 앞선 계산에서 수분함량이 0%일 때 구한 적정 유동층 면적인 4.11m<sup>2</sup>을 사용하여 수분함량에 따른 동일한 면적일 경우의 노상 열부하를 비교해 보았다. 수분이 50%인 경우에 건조 상태와 비교해서 노상 열부하가 49%에 그쳤다. 설계 기준에 맞추기 위해서는 유동층 면적은 8.37m<sup>2</sup>이 되어야 한다.

또한 단입자 특성과 입자의 강도측면을 고려한다면 수분함량의 높은 재료에서는 건조 과정의 비중이 높아지므로 열분해가 비교적 저온에서 시작된다. 이는 탈휘발 속도 영향을 미치며 이를 설계에 반영할 필요가 있다. 수분함량의 영향은 베드온도 저하, 수분증발 유속 증가, 베드 체류시간의 감소로 이어지며 이는 베드 온도 유지가 어려워지게 된다. 따라서 너무 많은 수분이 포함된 연료의 경우에는 전처리를 통해 수분을 건조하거나 보조연료를 사용함으로써 최적의 설계를 해야 할 것이다. 하지만 적정한 수분함량은 수성가스화 반응을 유발하여 더 좋은 품질의 가스를 만들게 되므로 너무 건조한 연료의 경우 스팀을 추가해야 한다.

입자의 강도가 약해지는 연료의 경우 미세 입자의 비산을 유발하여 베드 체류시간 감소, 가스화 후단의 연소실에 부담률이 높아지게 된다. 이때 급격하게 연소실의 투입되는 양이 변화하게 되므로 불완전 연소를 유발하게 되고 이를 위해 2차 공기 공연비를 높여야 할 것이다.



**Figure 12. 수분함량에 따른 투입량과 노상 열부하**



### 4.3 한계 및 유용성

계산 모델을 적용함에 있어서 연료의 내부의 온도 변화를 계산하지 않은 상태로 입자의 내부의 온도는 외부온도와 같다고 가정하고 반응속도를 구하여 사용하였다. 따라서 전체 메커니즘의 탈휘발, 가스화, 연소 과정에 대한 변화를 무시하고 수분함량에 따른 겉보기 반응속도를 사용하였기 때문에 그 정확성이 떨어질 수 있다. 또한 시뮬레이션을 수행하는 과정에서 단순 평형상태만을 고려하고 유동층의 수력학적 특성을 고려하지 않고 ASPEN PLUS만을 사용하여 해석하였기 때문에 성능 예측에 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해 부분적인 kinetic 데이터와 유동에 관한 추가적인 정보를 포함하여 보다 정확한 데이터를 얻어야 할 것이다. 특히 온도, 입자 크기 등의 많은 영향을 미칠 여러 인자들을 고정하고 오직 수분함량의 영향만 고려하였기 때문에 사용범위의 제한이 있다.

이와 같은 한계에도 불구하고 제한적인 범위 안에서는 설계에 적용이 가능하며 이는 범위 안에서 바람직한 설계 범위를 설정하는데 기초 자료를 제공할 수 있다. 또한 기초설계에서 단순히 연료의 원소분석 및 공업 분석 만으로는 알 수 없는 여러 상황이 존재함을 알아내었으며 이를 연료의 특성을 설계에 적용할 필요가 있다. 특히 가스화의 경우 여러 복잡한 반응이 존재 하므로 연료 특성을 실험실 규모로에서 실험이 필요하다.

## 5. 결론

입자 특성에 관해서는 수분함량의 영향으로 입자의 온도 증가율이 둔화되어 반응속도가 감소함을 확인하였다. 덩어리 입자의 영향으로 나무의 경우는 내외부의 온도차로 인해 입자 내부의 열 전달의 영향으로 반응 속도에 영향을 주었다. 또한 공정해석프로그램인 Aspen Plus를 이용하여 유동층 가스화기를 Well-mixed reactor로 가정하여 시뮬레이션을 수행하고 이를 실험실 규모의 유동층 반응기를 이용한 실험결과와 비교해 보았다. 수분 함량을 변화시켜가면서 합성가스 조성 과 냉가스 효율에 미치는 영향을 알아보았다. 입자내의 수분이 건조 되면서 일종의 가스화제로 작용하여 가스화를 더욱 촉진시키게 됨을 확인하였다. 입자 내부의 수분이 합성가스 조성 과 냉가스 효율에 미치는 영향에 대한 다른 유사한 사례를 찾을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사

업 및 연소기술 연구센터(CERC), Brain Korea21의 지원으로 수행되었습니다. 도움을 주신 에너지관리공단, 두산중공업, CERC, BK21사업단에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 전해수 외, “폐기물 유동층 소각”, 동화기술, 1993.
- [2] 한국과학기술원 열공학 연구실, “저공해 폐기물 소각”, 2000.
- [3] 양원, 최진환, 최상민, “하수 슬러지의 연료특성 파악을 위한 기초분석”, 대한환경공학회지, vol.23, no.1, pp.51-59, 2001
- [4] T. Ogada and J. Werther, “Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed”, Fuel, vol.75, no.5, pp.617-626, 1996.
- [5] 최진환, 박영호, 최상민, “고체 폐기물 연료의 유동상 연소-연소특성 및 운전인자 변화”, 한국폐기물학회지, vol.18, no.3, pp.1-9, 2001.
- [6] Ni, M.-j., Xiao, G., Chi, Y., Yan, J.-h., Miao, Q., Zhu, W.-l., “Study on pyrolysis and gasification of wood in MSW”, Journal of environmental sciences (China), v.18 no.2, pp.407-415, 2006.
- [7] 김재호, 최영찬, 이재구, 한춘, 김용구, 나재익 “폐기물 가스화의 열역학적 냉가스 효율 분석”, 한국폐기물학회지, 20권, 2호, pp.193-203, 2003
- [8] Bacon, D. W., J. Downie, J. C. Hsu, and J. Peters. “Modeling of fluidized bed wood gasifiers.” In R. P. Overend, T. A. Milne, and K. L. Mudge, eds., Fundamentals of thermochemical biomass conversion, pp. 717-732, New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1985.
- [9] Double, J. M., E. L. Smith, and A. V. Bridgwater. “Computer modeling of fluidized bed gasification.” In G. L. Ferrero, K. Maniatis, A. Buekens, and A. V. Bridgwater, eds., Pyrolysis and gasification, pp. 651-655. London: Elsevier Applied Science, 1989.
- [10] Mansaray, K. G., Al-Taweel, A. M., Ghaly, A. E., Hamdullahpur, F., Ugursal, V. I., “Mathematical Modeling of a Fluidized Bed Rice Husk Gasifier: Part I-Model Development”, Energy sources, vol.22 no.1, pp.83-98, 2000.
- [11] Li, X.T., Grace, J.R., Lim, C.J., Watkinson, A.P., Chen, H.P., Kim, J.R., “Biomass gasification in a circulating fluidized bed”, Biomass & bioenergy, vol.26, no.2, pp.171-193, 2004.

[12] Jose Corella, Alvaro Sanz, "Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state", Fuel Processing Technology, vol. 86, no.9, pp.1021-1053, 2005.

[13] 최진환, 이상득, 최상민, "유동층 연소로에서 고체 폐기물 연료의 열분해 및 연소 특성", 화학공학, 제40권, 제4호, 통권 213호, pp.523-528, 2002.

[14] 이민도, "가스화 용융로의 설계 인자 분석", 한국과학기술원 석사학위논문, 2006.