

# 탈휘발 과정과 촉가스화 과정에서 목질계 바이오매스의 타르발생 특성

문지홍\* · 이은도\* · 류창국\*\* · 이영만\*\*\*\* · 배우근\*\*\*

## Characteristics of Tar Generation during the interval of Gasification of Woodchip

Jihong Moon, Uendo Lee, Changkook Ryu, Younman Lee and Wookeun Bae

### ABSTRACT

Biomass gasification is a promising technology in terms of clean energy and flexible options for end use such as heat, steam, electricity, gaseous or liquid fuels. In a gasification process, reduction of tar is very important because it can cause any mechanical problems and small tar implies high energy efficiency. However, generation and conversion mechanisms of tar have not been fully understood due to its complex nature. In this study, characteristics of tar generated from different gasification stages were investigated. Korean pine woodchip was used as feedstock and tar was sampled in a separate way during devolatilization and char gasification stage, investigated. As a result, more various kinds of hydro carbon compounds were identified in the devolatilization stage than char gasification stage because primary tar compounds are released mostly from pyrolysis of cellulose and hemicellulose. When the reaction temperature increased up to 900°C, tar composition becomes simplified into about 10 aromatic compounds mostly with 1-4 rings without substitution up to phenanthrene. The sampled tar in the char gasification stage mostly contains 5-7 simple aromatic compounds.

**Key Words** : Tar, Biomass, Woodchip, Pyrolysis, Gasification

### 1. 서론

전 세계적인 에너지 수요의 증가에 따른 가격 변동 및 에너지 수급 불균형 문제와 지구온난화를 필두로 하는 환경문제의 대두에 따라 세계 각국에서 에너지원의 다변화와 동시에 청정 연료이용에 대한 중요성이 높아지고 있다. 이러한 배경에서 바이오매스가 청정 에너지원의 하나로 주목받고 있다. 바이오매스는 CO<sub>2</sub> 문제에서 자유로울 뿐 아니라 목질계 바이오매스를 사용할 경우 부존량이 풍부한 동시에 고품질 바이오매스를 에너지원으로 사용할 때 발생하는 윤리적인 문제에서도 자유로워 많은 국가에서 대체 에너지의 주요 포트폴리오의 하나로 간주되고 있다. 목질계 바이오매스는 일반적으로 우드칩(Woodchip) 형태로 가공되어 사용되며 회분의 함량이 낮고 황 등 기타 환경오염물질의 양이 타연료에 비해

낮아 별다른 환경설비 없이 청정한 에너지원으로 사용될 수 있어 그 활용도를 높이기 위한 다양한 시도가 있어왔다. 석탄 및 석유와 같은 기존 화석연료에 비해 에너지밀도가 낮은 목질계 바이오매스를 현재 에너지 기기에 효과적으로 이용하기 위해서는 열분해 가스화를 통한 합성가스 생산이 필수적이다. 바이오매스 열분해 가스화를 통해 합성가스를 생산할 경우 수소와 일산화탄소가 주를 이루는 중·저발열량 합성가스 생산이 가능하며 이때 만들어진 합성가스는 발전용 엔진 또는 보일러를 통해 전기를 생산하거나 생성가스를 합성하여 여러 가지 화학물질 또는 고부가가치를 가지는 액체 연료 생산에 사용할 수 있다[1,2]. 이처럼 목질계 바이오매스를 열분해 가스화 하여 합성가스를 생산할 경우 그 이용방법이 다양하고 활용범위가 넓은 장점이 있지만 일반적으로 목질계 바이오매스의 열분해 가스화 과정에서 다량의 타르(Tar)가 발생하게 되고 이러한 타르는 에너지변환시설 자체 및 후단설비 등에 다양한 형태의 물리적 문제를 야기하며 또한 타르 자체가 고분자 탄화수소 물질로 이루어져 있으므로 타

\* 한국생산기술연구원

\*\* 성균관대학교 기계공학부

\*\*\*한양대학교 건설환경공학과

† 연락처자, youngman\_i@yahoo.co.kr

르의 발생량이 많을수록 실제 합성가스로 변환되는 에너지양이 줄어들어 열분해 가스화 공정 자체에서 많은 에너지 손실을 야기할 수 있으므로 목질계 바이오매스의 열분해 가스화시 발생하는 타르의 처리는 매우 중요하다[3].

그동안 바이오매스의 열분해 가스화 과정에서 발생하는 타르에 대한 이해를 넓히기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며 이러한 과정은 Li 등의 논문에 잘 정리되어 있다[4]. 한편 Morf 등은 연속 타르 발생 장치를 구성하고 이때 발생하는 타르를 2차 반응기를 이용하여 효과적으로 처리하기 위한 실험적 연구를 진행하였으며[5], Myrén 등은 촉매를 이용하여 타르를 분해하는 연구 결과를 보고하였다[6]. 2008년 Pfeifer는 이중유동층 형태의 10 MWth급 바이오매스 가스화 데모 플랜트 급의 설비에서 타르를 제거하기 위한 연구 결과도 발표한 바 있다[7].

일반적으로 타르는 탄화수소 결합으로 이루어진 바이오매스의 열분해 가스화 과정에서 열에 의해 결합이 끊어지며 발생하는 다양한 형태의 고분자 탄화수소 물질로 반응 온도 및 시간, 주변 반응물질의 변화에 따라 각각 다른 분자량과 결합을 가지는 타르가 발생된다. 탄화수소의 결합 형태에 따라 수많은 타르의 생성이 가능하지만 편의상 이를 몇 가지 중(Class)으로 구분하고 반응조건에 따른 타르 중의 특성 변화에 대한 연구가 다수 진행된 바 있다[4,8].

본 연구에서는 우드칩 연료와 같이 별도의 전처리 과정을 거치지 않은 목질계 바이오매스의 열분해와 스팀가스화시 발생하는 타르의 특성을 알아보기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 일반적인 목질계 바이오매스의 경우 고체 연료의 열분해 가스화 반응은 초기 휘발분이 나오면서 생성가스 유량이 크게 증가하는 탈휘발(Devolatilization) 영역과 주로 탄

소로 이루어진 고상 물질이 주변 가스와 반응하여 기상 생성물을 만드는 촉 가스화(Char gasification) 영역으로 나눌 수 있다. 두 영역은 각각 반응물의 초기 조건, 반응 시간, 반응 메커니즘 등이 상이하기 때문에 각각의 구간에서 발생하는 타르의 특성이 서로 다를 것으로 예상되지만 그동안의 연구에서 이 두 영역을 구분하여 살펴본 연구는 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 목질계 바이오매스에서 발생하는 타르를 보다 상세히 구분하기 위하여 탈휘발 영역과 촉 가스화 영역에서 발생하는 타르를 분리하여 포집하고 각각의 타르에 대한 분석을 수행하였으며 각 영역에서 발생하는 타르의 특성에 대해 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

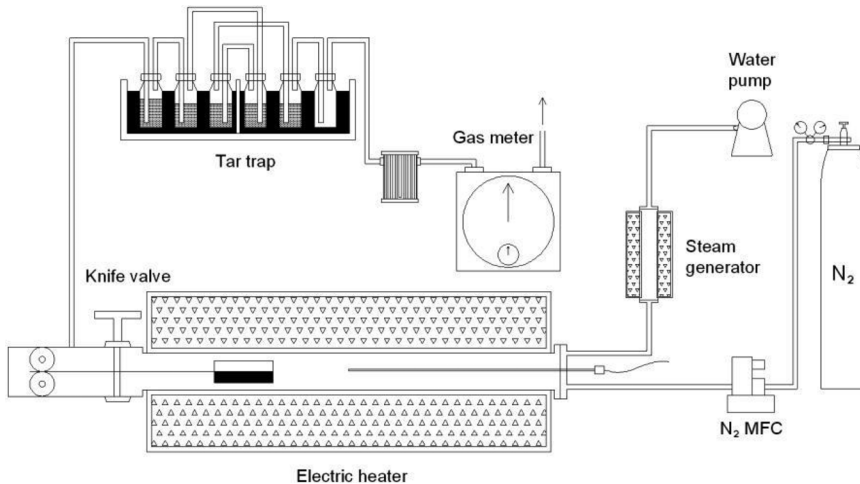
본 연구에서는 국내산 바이오매스 시료를 이용하여 실험을 진행하였다. Table 1과 2에 대상 바이오매스의 기초 분석 결과를 나타냈다.

**Table 1.** Proximate analysis of biomass

	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash
wt%	6.4%	75.9%	17.4%	0.3%
RSD(%)	0.4	0.4	1.7	16.9

**Table 2.** Ultimate analysis of biomass

	C	H	O	N	S(mg/kg)
wt%	50.8%	5.37%	43.6%	0.0%	61.8
Heating value (LHV)	19.7 MJ/kg				



**Fig. 1.** Schematic of isothermal biomass steam gasification system.

실험에 사용된 연료는 소나무와 참나무의 혼합종으로 평균입도가 5 mm인 우드칩 형태이다. 시료의 크기는 실제 pilot 규모의 가스화기에 적용되는 평균 크기를 대상으로 하였다. 공업분석 결과 휘발분 함량은 75.9%로 가장 높게 나타났으며 고정탄소 17.4%, 수분 6.4%, 회분 0.3% 순으로 나타났다. 함수율이 6.4%로 건조 상태가 우수한 바이오매스를 시료로 이용하였으며 이때 발열량은 19.7 MJ/kg으로 함수율이 10~20% 사이인 바이오매스의 평균적인 발열량 보다 높은 발열량을 보였다.

Fig. 1은 등온 가스화 반응이 일어나는 tube furnace 장치의 모식도이다. 상기 반응기는 반응에 필요한 열을 전기히터로 공급하며 스팀 발생기를 이용해 스팀 가스화 반응이 가능하도록 제작 되었다. Tube furnace의 길이는 1,050 mm, 직경은 68 mm이며 튜브형 반응기 외부에 부착된 메인 히터는 최대 1,000℃까지 승온이 가능한 SiC 히터를 이용하였다.

또한 등온 가스화 반응을 위해 knife valve를 사용하여 반응기 내부온도를 설정온도까지 가열하는 동안 시료를 반응기 밖에 대기시켰다가 등온 조건에 다다르면 연료를 투입할 수 있도록 제작되었다[9]. 실험 시작 전에는 반응로에 MFC를 통해 1 L/min의 질소가스를 흘려 무산소 상태를 유지한 후 가스화가 시작되면 질소공급을 중지하였다. 스팀의 공급은 정량공급 펌프를 이용하였으며 자체 제작된 스팀 발생기를 거쳐 tube furnace로 공급된다. 가스화를 통해 생성된 가스는 타르 포집기를 거쳐 타르를 포집한 후 가스미터(Gas meter, Sinagawa)로 들어간다. 일반적으로 연료의 연소 및 가스화 시 생성되는 가스 및 고상 생성물의 측정에는 각각의 특성에 맞는 적절한 측정기술이 존재하지만 액상 생성물인 타르에 대해서는 가스화기의 방식과 운전 조건에 따라 그 발생성분과 발생량이 명확하게 규명되어 있지 않은 관계로 현재까지는 적절한 표준측정방법(standard

method)이 구비되어 있지 않은 실정이며, 타르의 단계를 정하기 위한 샘플링과 분석을 다양한 방법으로 사용하고 있다[10,11].

Fig. 2는 반응시간동안 가스화 반응을 통해 발생하는 합성가스의 발생량을 가스 미터를 통해 측정된 결과를 도시한 그림이다[12]. 가스화제의 공급 없이 열만 가하여 열분해(Pyrolysis) 반응 조건을 만들어 주면 왼쪽 그림에서 보는바와 같이 초기 탈휘발에 의해 약 2분간 급격한 가스발생이 일어나는 탈휘발 구간이 나타나며 이후 급격히 반응이 줄어들어 더 이상 합성가스가 생성되지 않음을 알 수 있다. 한편 오른쪽 그림은 가스화제로 스팀을 사용한 경우로 스팀과 바이오매스의 비를 2:1로 하여 공급하였을 때 결과이다. Steam to biomass ratio(S/B)는 우드칩 20 g에 대해 가스화 총 반응시간에 대해 공급된 총 수증기 질량을 기준으로 계산하였다. S/B=0인 경우는 질소만 공급하는 열분해 조건이며 S/B=1,2,3의 가스화 조건에서 증기발생기에 공급되는 물의 유량은 1 mL/min, 2 mL/min, 3 mL/min에 해당한다. 시간에 따른 합성가스 생산 특성을 살펴보면 초기 탈휘발 특성은 열분해 경우와 비슷한 양상을 띠지만 탈휘발 구간 이후에서는 char-steam 가스화 반응이 대략 10분 이상 진행되면서 추가적인 합성가스가 생성되고 있음을 확인 할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 이 두 구간을 분리하여 각각 반응 과정에 발생하는 타르를 분리하여 포집하고 이때 타르의 성분을 측정하였다.

타르 포집기의 구성은 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는바와 같이 2개의 Bath안에 각각 3개의 impinger bottle이 들어 있는 형태이다. Heated bath 온도는 40℃, cold bath 온도는 -20℃이다[13]. 첫 번째 impinger bottle은 생성가스로부터 수분과 타르를 isopropanol 안에 흡수시켜 응축시키는 역할을 한다. 수분 포집 후에 배출된 가스는 isopropanol이 담긴 4개의 im-

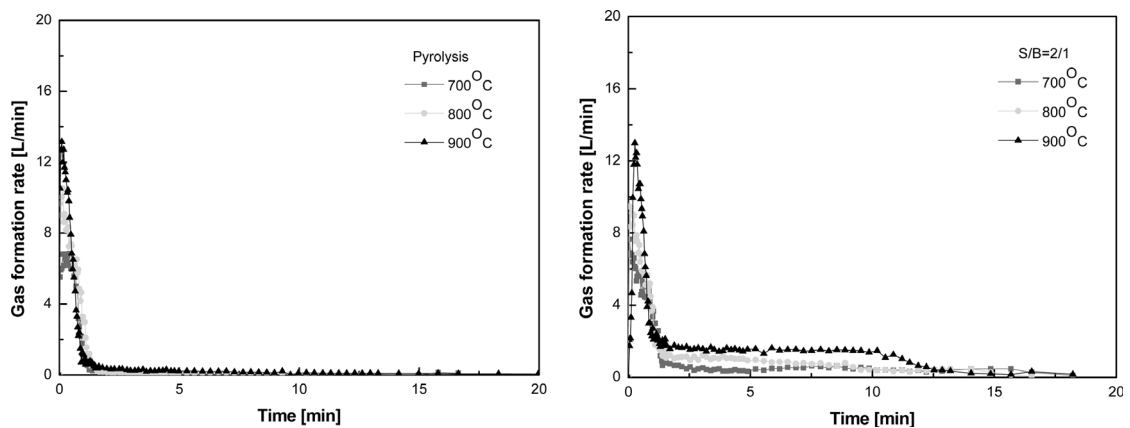


Fig. 2. Gas formation rate of pyrolysis and steam gasification as a function of temperature.

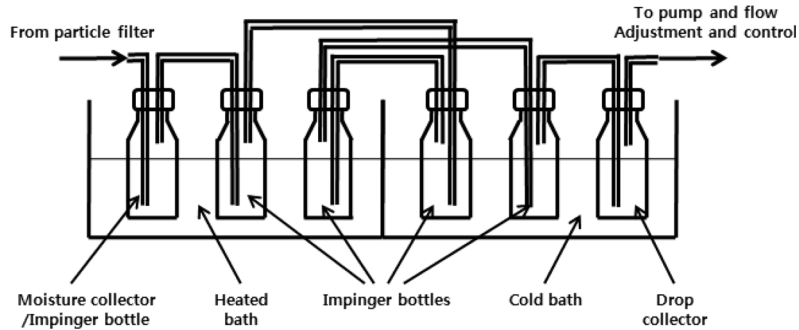


Fig. 3. Tar and moisture collection system.

Table 3. List of tar compounds that are considered for different tar classes[4,5]

Class	Class name	Representative compounds
1	GC-undetectable	Determined by subtracting the GC-detectable tar fraction from the total gravimetric tar
2	Heterocyclic aromatics	Pyridine, phenol, cresols, quinoline, isoquinoline, dibenzophenol
3	Light aromatic (1 ring)	Toluene, ethylbenzene, xylenes, styrene
4	Light PAH compounds (2-3 rings)	Indene, Naphthalene, methylnaphthalene, biphenyl, acenaphthalene, fluorene, phenanthrene, anthracene
5	Heavy PAH compounds (4-7 rings)	Fluoranthene, Pyrene, chrysene, perylene, coronene

impinger bottle를 통과한 후 비어 있는 마지막 impinger bottle를 통과한다. 6개의 impinger bottle에 포집된 타르와 수분을 잘 혼합하여 샘플병에 옮긴 후, GC/MS 분석을 수행하였다[14].

한편 바이오매스의 열분해 가스화를 통해 생성된 타르는 다양한 탄화수소의 결합으로 이루어져 있으므로 매우 다양한 조성을 가지게 된다. 따라서 이를 분석하기 위해서는 일정한 특징을 가지는 그룹별로 구분하여 살펴보는 것이 일반적이다. 1998년 Brussels에서 열린 EU/IEA/US-DOE tar measurement protocol 회의에서 benzene보다 분자량이 큰 모든 유기 오염물질들을 Table 3과 같이 class별로 분류해 놓았다[4,5]. 따라서 본 연구에서는 아래 Table 3에 의거하여 가스화과정에서 생성되는 타르를 각각 분류하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 탈휘발 과정에서 발생한 타르 조성

Table 4는 질소만 공급된 열분해 조건(S/B=0)과 S/B ratio가 3인 가스화 조건의 실험 중 탈휘발 구간(F)에서 포집된 타르에서 검출된 성분들을 나타낸 것이다. S/B ratio가 1과 2인 경우의 조성은 표에 나타낸 S/B ratio가 3인 경우와 거의 유사하였다. 검

출된 타르의 조성은 약 30여개이며 700°C에서의 조성이 가장 다양하다. 500°C 이하에서 대부분 종료되는 탈휘발 과정에서 생성되는 1차 타르(primary tar)의 조성이 100여개 이상인 것과 비교할 때, 이 실험에서 얻어진 타르 조성은 크게 단순화된 것이다. 이는 반응기 온도가 700°C 이상으로 높기 때문에 발생된 타르가 증기 상태에서 열적 분해(thermal cracking) 과정을 거쳤기 때문이다. 1차 타르의 주성분은 Acetic acid나 Guaiacol, Phenol, Furan, Xylene 등인데 Table 4의 700°C 탈휘발 구간 자료와 비교할 때 Acetic acid, phenol계열, Xylene, Furfural 등이 남아있는 것을 알 수 있다. 또한 열적 분해 과정을 거치면서 H<sub>2</sub>와 CO 등을 생성하고 알칼리 치환기가 포함된 방향족 타르 성분들이 남게 되는데 Benene, Indene, Naphthalene 계열 등으로 판단된다.

반응기 온도가 800°C와 900°C로 상승한 경우의 타르 조성은 700°C와 비교할 때 타르의 열적 분해가 진행되면서 더욱 단순화된 것을 알 수 있다. 특히 치환기가 없거나 단순화된 1~2개의 고리를 가진 방향족(Phenol, Toluene, Benzene, Styrene, Naphthalene 등)은 그대로 나타나며, 특히 900°C에서는 고리 수가 증가한 Acenaphylene, Fluorene, Phenanthrene 등이 형성된다. 따라서 고온으로 갈수록 타르의 분해과정에 의해 농도는 감소하더라도, 반응성이 떨

**Table 4.** Tar compounds identified in the first stage for devolatilization (Unit: area%, L: light hydrocarbons)

Class	Compounds	700℃		800℃		900℃	
		S/B=0	S/B=3	S/B=0	S/B=3	S/B=0	S/B=3
L	Formamide (CH3NO)			2.17	6.06		
	Acetic acid (C5H10O2)	4.46	8.22	6.23			
2	Furfural (C5H4O2)		2.00				
	Phenol (C6H6O)	6.93	2.70	6.89	16.39	4.08	5.94
	Phenol, 2-methyl (o-Cresol, C7H8O)	2.78	0.98	1.14	2.92		
	Phenol, 3-methyl (m-Cresol, C7H8O)	4.64	1.75				
3	Benzene (C6H6)	7.45	12.28	17.12	17.40	36.50	27.08
	Benzene, methyl (Toluene, C7H8)	44.16	65.90	38.78	14.81	19.35	21.07
	Isopropyl butyrate (C7H14O2)						
	Benzene, 1,3-dimethyl (m-Xylene, C8H10)	3.23	1.12				
	Benzene, 1,2-dimethyl (o-Xylene, C8H10)				0.72		
	Styrene (C8H8)	6.67	1.75	8.24	11.99	6.94	8.28
	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (C9H12)	0.68					
	2,3-Benzofuran (C8H6O)			2.20	2.82	1.53	1.68
	Bicyclo[2.2.1]hept-5-en-2-aldehyde (C8H10O)	2.76	0.86				
	Bicyclo[3.2.0]hept-2-ene, 2-methyl (C8H12)	2.21					
4	3-Phenylpropenal (C9H8O)	1.03	0.30				
	Indene (C9H8)	3.66	0.86	6.32	8.25	8.96	9.91
	Ketone, methyl 5-norbornen-2-yl (C9H12O)	1.99	0.56				
	Trans-methoxy-6methylene-3-oxabicyclo[3.3.0]octan-2-one (C9H12O3)	0.86					
	Cyclopropene, 1-methyl-2cyclopropen-1-yl- (C10H10)			0.72			
	Indene, 1-methyl (C10H10)	2.26					
	Naphthalene (C10H8)	3.26	0.72	7.33	13.21	17.07	16.56
	Naphthalene,1-methyl (C11H10)	0.98		1.45	2.61	1.56	2.27
	Phenyl benzene (C12H10)					0.00	0.00
	Acenaphylene (C12H10)			1.42	2.83	2.48	4.14
	Dibenzofuran (C12H8O)						
	Fluorene (C13H10)						1.12
	Phenanthrene (C14H10)					1.55	1.95

어저 분해가 매우 어려운 방향족들이 타르의 주성분이 됨을 확인할 수 있다. 특히 Class 3과 4의 성분들은 가스화 후단에서 낮은 농도에서도 응축하여 축매나 가스 터빈, 가스 엔진 등에 운전상의 문제를 유발할 수 있다.

Table 4에서 공급 가스에 스팀을 함께 주입한 경우의 조성은 열분해 조성과의 큰 차이를 보이지 않았다. H<sub>2</sub>O는 타르 리포밍 반응을 통해 분해시켜 H<sub>2</sub>와 CO를 생성하는 것으로 알려져 있으나, 이 실험에서는 소량(20 g)의 샘플을 사용하였기 때문에 스팀이 타르 농도를 감소시키는 효과에 대한 정량적 평

가가 불가능하였다.

### 3.2. 촉 가스화 과정에서 발생한 타르 조성

Table 5는 같은 실험에 대해 촉 가스화 구간에서 검출된 타르의 조성을 정리한 것이다. 촉 가스화 구간에서는 탈휘발 구간에서 분해되지 않고 남은 일부 리그닌 성분이 서서히 분해되는 과정과 촉의 가스화 반응이 동시에 일어난다. 스팀에 의한 촉의 가스화 반응은  $C(s)+H_2O \rightarrow CO+H_2$ 로서 일반적으로 촉 가스화 구간에서 H<sub>2</sub>와 CO의 농도가 높게 나타나게 된다. 또한 water-gas shift reaction ( $CO+H_2O \leftrightarrow CO_2+H_2$ )

**Table 5.** Tar compounds identified in the second stage for char gasification (Unit: area%, L: light hydrocarbons)

Class	Compounds	700 °C		800 °C		900 °C	
		S/B=0	S/B=3	S/B=0	S/B=3	S/B=0	S/B=3
L	Formamide (CH3NO)				12.48		
	Acetic acid (C5H10O2)						
2	Furfural (C5H4O2)						
	Phenol (C6H6O)	3.92	38.26	26.50	30.69	10.88	
	Phenol, 2-methyl (o-Cresol, C7H8O)						
	Phenol, 3-methyl (m-Cresol, C7H8O)	1.40	25.39				
3	Benzene (C6H6)	33.24		26.04		21.44	
	Benzene, methyl (Toluene, C7H8)	54.91					
	Isopropyl butyrate (C7H14O2)						
	Benzene, 1,3-dimethyl (m-Xylene, C8H10)						
	Benzene, 1,2-dimethyl (o-Xylene, C8H10)						
	Styrene (C8H8)	2.26					
	Benzene, 1,3,5-trimethyl- (C9H12)						
	2,3-Benzofuran (C8H6O)						
	Bicyclo[2.2.1]hept-5-en-2-aldehyde (C8H10O)						
	Bicyclo[3.2.0]hept-2ene, 2-methyl (C8H12)						
4	3-Phenylpropenal (C9H8O)						
	Indene (C9H8)	2.04	10.32	17.59	10.31	14.72	10.85
	Ketone, methyl 5-norbornen-2-yl (C9H12O)						
	Trans-methoxy-6methylene-3-oxabicyclo[3.3.0]octan-2-one (C9H12O3)						
	Cyclopropene, 1-methyl-2cyclopropen-1-yl- (C10H10)						
	Indene, 1-methyl (C10H10)						
	Naphthalene (C10H8)	2.22	18.52	29.88	33.64	46.69	50.81
	Naphthalene,1-methyl (C11H10)		7.51		7.33		7.06
	Phenyl benzene (C12H10)						0.00
	Acenaphylene (C12H10)				5.54		19.11
4	Dibenzofuran (C12H8O)						
	Fluorene (C13H10)						4.84
	Phenanthrene (C14H10)					6.28	7.32

에 의해 CO<sub>2</sub>도 함께 나타난다. 이 때 나타난 타르의 조성은 총 12개로서 Table 4의 탈휘발 구간의 조성에 비해 크게 단순화되었음을 알 수 있다. 또한 Phenol, Benzene, Indene, Naphthalene, Acenaphthalene, Phenanthrene 등 치환기가 없는 방향족으로 구성되어 있다. 이는 리그닌의 탈휘발 과정에서 생성된 Methoxyphenol 등[15]이 고온에서 분해되는 과정에서 생성된 것과 함께, 탈휘발 구간에서 생성되어 반응기 내에 잔류한 성분이 오래 체류하면서 방향족 계열을 생성하는 것으로 판단된다. 그러나 리그닌은 바이오매스 내 무게 비중이 작고 최악의 생성 비율이

높아 타르 생성에 대한 기여도가 낮을 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

바이오매스 중 대표적 고체연료인 우드칩은 신재생 에너지의 하나로 많은 장점을 지닌 연료이지만 실제 연소 및 가스화 등 열적 에너지 변환 시 발생하는 타르가 다양한 형태의 물리적 문제점을 발생시키며 고분자 탄화수소인 타르는 적절한 열분해를 통해 가스 연료를 만들 수 있으므로 가스화시 발생되

는 타르의 처리는 매우 중요하다. 본 연구에서는 가스화 온도와 스팀 공급비에 따른 타르의 조성을 탈휘발 가스들이 발생하는 탈휘발 구간과 좌 가스화 구간으로 나누어 분석하였다. 이로부터 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

우드칩의 가스화 과정에서 온도와 S/B ratio 변화에 따라 매우 다양한 타르 성분들이 생성되었다. 타르는 700°C에서는 30여개의 조성으로 구성되었으나, 고온으로 갈수록 고리의 수가 많고 치환기가 적거나 없는 10여개의 방향족 화합물들로 구성되었다. 스팀의 공급비를 증가시 타르의 조성은 열분해 조건과 유사하게 타나났다. 스팀은 타르 저감에 기여할 것으로 예상되나 소량의 샘플을 사용하는 본 실험상의 한계로 인해 정량적인 판단이 불가능하였다. 좌 가스화 구간에서는 탈휘발 구간에 비해 타르 조성이 크게 단순화되었으며 특히 치환기가 없는 5~7개의 방향족 화합물 위주로 구성되어 있음을 확인하였다. 추후 타르 성분들의 정량적인 분석과 실험 조건의 세밀화를 통해 타르의 생성 및 전환과정을 자세히 규명하는 것이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 신재생에너지 기술개발사업과 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호 : 2010-0006265) 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 김영두, 정효재, 최인수, 김세원, 방병열, 이은도, “기포 유동층을 이용한 바이오매스 가스화 시스템 연구”, 한국연소학회 추계 심포지움 2009
- [2] 정효재, 이정우, 이재욱, 문지홍, 최인수, 박상신, 황정호, 류태우, 이은도, “폐기물 열분해 합성 가스를 이용한 발전용 엔진구동에 대한 실험적 연구”, 한국연소학회지 (In press) 2010
- [3] Y.H. Qin, J. Feng, W.Y. Li: Formation of tar and its characterization during air-steam gasification of sawdust in a fluidized bed reactor. *Energy, Fuel*, 2009
- [4] C. Li, K. Suzuki: Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification - An overview, *Renewable and Sustaina-*

- ble *Energy Reviews. Sci.*, Vol. 13, 2009, pp. 594-604
- [5] P. Morf, P. Hasler, T. Nussbaumer, “Mechanisms and kinetics of homogeneous secondary reactions of tar from continuous pyrolysis of wood chips”, *Fuel*, 81, 2002, pp. 843-853
- [6] C. Myrén, C. HÖrmell, E. BjÖrbom, K. Sjöström, “Catalytic tar decomposition of biomass pyrolysis gas with a combination of dolomite and silica”, *Biomass and Bioenergy*, 23, 2002, pp. 217-227
- [7] C. Pfeifer, H. Hofbauer, “Development of catalytic tar decomposition downstream from a dual fluidized bed biomass steam gasifier”, *Powder Technology*, 180, 2008, pp. 9-16
- [8] Maniatis K: Tar Protocols. IEA Bioenergy Gasification Task. *Biomass Bioenergy*, Vol. 18, No. 1, 2000, pp. 1-4
- [9] 박영철, et al., “등온법에 의한 석탄 좌 연소반응 및 좌-수증기 반응특성”, *화학공학*, Vol. 29, No. 3, 1991, pp. 323
- [10] J.P.A. Neeft et al., “GUIDELINE FOR SAMPLING AND ANALYSIS OF “TARS” AND PARTICLES IN BIOMASS PRODUCER GASES”, ECN-RX-00-026, pp. 29-40
- [11] 문지홍, 성연경, 이정우, 방병열, 이은도, “탈휘발 과정과 좌 가스화 과정에서 우드칩 연료의 타르발생 특성의 변화”, 한국열환경공학회 춘계 심포지움 2010
- [12] 성연경, et al., Tube furnace를 이용한 바이오매스의 스팀 가스화 연구, 한국연소학회 추계 학술발표회 논문집, 2009, pp. 255-258
- [13] J.P.A. Neeft: Rationale for setup of impinger train - as used in the Technical Specification of Sampling and Analysis of Tar and Particles in the Product Gases of Biomass Gasification. Senter-Novem, CEN BT/TF 143, 2005
- [14] J. Good et al.: Sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases - Technical Report, CEN BT/TF 143, 2005
- [15] T.A. Milne, R.J. Evans, N. Abazoglou, Biomass gasifier ‘tars’: their nature, formation and conversion, NREL/TP-570-25357, National Renewable Energy Laboratory, USA, 1998.