

촉매 개질기를 이용한 우드칩 가스화 합성가스 내 타르 및 수트 제거

윤상준*, 손영일*, 김용구*, 이재구*[†]

*한국에너지기술연구원 청정화석연료연구센터

Removal of Tar and Soot in The Syngas Produced from Gasification of Wood Chip by Using Catalytic Reformer

SANGJUN YOON*, YOUNGIL SON*, YONGKU KIM*, JAEGOO LEE*[†]

*Clean Fossil Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research,
71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

ABSTRACT

The catalytic steam reforming of woody biomass tar and soot to convert a synthetic gas containing hydrogen was investigated by using a bench-scale biomass gasification system. One commercial nickel-based catalyst, Katalco 46-6Q, and two different kinds of natural minerals, dolomite and olivine, were tested as a reforming catalyst at various reforming temperatures. The reaction characteristics of woody biomass tar were also investigated by TGA at a variety of heating rates. With all three catalysts conversion efficiency of tar and soot increased at increasing temperature. The reforming of tar and soot in the synthetic gas induce the increase of combustible gases such as H₂, CO and CH₄ in the product gas. The nickel-based catalyst showed a higher tar and soot conversion efficiency than mineral catalysts under the same temperature conditions.

KEY WORDS : Biomass(바이오매스), Tar(타르), Catalytic steam reforming(촉매수증기개질), Gasification(가스화), Syngas(합성가스)

1. 서 론

바이오매스계 폐기물에는 지구상의 이산화탄소가 태양에너지에 의해 탄소화합물의 형태로 저장되어 있는 것으로써, 에너지로 이용하기 위해서는 화석연료에 비하여 에너지 밀도가 적고, 특히 공업적

으로 이용하기 위해서는 이용하기 쉬운 형태로 변환시켜야만 한다. 예를 들면 화석연료와 같이 액화, 가스화, 전기에너지 등으로 변환되어져야 기존의 에너지 장비를 사용할 수 있게 된다. 이러한 관점에서 다양한 연구가 행해지고 있는 것이며, 현재까지는 주로 직접 연소방식으로 이용되어 왔다.

직접연소에 의한 바이오매스나 폐기물 발전소는 유럽 및 일본에서 그 사례가 많이 있지만, 본 방법

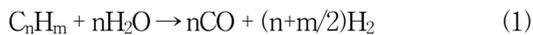
[†]Corresponding author : jaegoo@kier.re.kr

[접수일 : 2009.7.22 수정일 : 2009.10.9 게재확정일 : 2009.12.15]

의 단점은 효율적으로 에너지를 추출해내기 위해서는 스팀터빈 규모가 커져야만 하며, 열이용만을 목적으로 한다는 점이다. 따라서 발전효율이 높은 합성가스엔진, 마이크로터빈 등의 방식에 의한 발전이 수집, 이동이 어려운 바이오매스의 소규모 적용 측면에서는 적합하며 이러한 방식을 제공해줄 수 있는 것이 바로 가스화 방식이다^{1,2)}. 이러한 요인들에 의해 최근 바이오매스 가스화 이용에 관한 기술 개발이 국내외에서 활발하게 추진되고 있다³⁻⁵⁾.

여러가지 바이오매스계 물질에서의 장점에도 불구하고 손쉽게 상용화가 이루어지고 있지 못하는 이유는 바이오매스계 물질로부터 가스화에 의해 생성된 합성가스 중에는 분해가 어려운 리그닌 성분으로 30% 내외의 타르 또는 수트 발생으로 인하여 장기적으로 운전할 때에는 합성가스 정제를 위한 세척 또는 집진부담이 증가하게 된다. 또한 타르나 수트가 합성가스과 동반하여 발전 블록으로 공급되는 경우에는 기기 훼손의 원인으로 작용하게 되기 때문이다⁶⁾.

가스화 공정에서 제조된 합성가스 품질을 향상시키고, 탄소전환율을 증가시키기 위해서는 분해가 어려운 타르나 수트 성분을 물리적으로 제거하는 것보다는 열화학적 변환에 의해 합성가스로 전환시켜주는 것이 좋다고 할 수 있다. 합성가스 정제를 위하여 기본적으로 습식정제 또는 집진방법에 의해 합성가스를 깨끗하게 공급해줄 수도 있지만, 중소형 규모의 바이오매스계 폐기물의 에너지화 이용에서는 폐수처리 및 기타 후처리방식이 필요 없는 고온 수증기 개질 또는 촉매 수증기 개질법이 바람직하다고 할 수 있다⁷⁾. 합성가스 중 포함된 타르나 수트는 다음의 식 (1)과 같은 흡열 개질반응에 의해 제거된다.



본 연구에서는 목질계 바이오매스의 가스화시 발생하는 합성가스 내 타르 및 수트와 같은 반응성이 낮은 탄화수소계 미반응 물질을 고온 수증기 개질 반응에 비해 상대적으로 낮은 온도조건으로 운전되

는 촉매수증기개질에 의해 합성가스로 전환시키는 연구를 bench 규모 바이오매스 가스화 시스템을 이용하여 수행하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 목질계 바이오매스로서 우드칩 및 이의 가스화시 생성된 타르, 수트의 분석치를 Table 1에 나타내었다. 시료 중의 휘발분, 회분, 고정탄소의 함량은 TGA-701(LECO Co., USA)를 이용하여 분석하였고, 탄소, 수소, 질소, 산소원소는 CHN-2000 elemental analyzer(LECO Co., USA), 황 원소는 SC-432DR sulfur analyzer(LECO Co., USA), 그리고 발열량값은 Parr 1261 calorimeter (PARR Co., USA)를 이용하여 분석하였다. 타르 개질 촉매로는 Johnson Matthey사에서 상용으로 판매하고 있는 나프타 스팀 개질용 촉매(katalco 46-6Q) 및 천연 광물인 백운석과 감람석을 이용하였다.

우드칩은 가스화시 바로 적용되는 건조하지 않은 상태로 분석되어 수분 함량이 21% 정도로 높게 나왔으며, 이러한 높은 수분함량으로 인하여 일반적으로 건조시 5,000kcal/kg 이상 나오는 발열량값보다 낮은 4,100kcal/kg 정도의 값을 보였다. 타르의 경우 가스화 이후 합성가스 내 잔류 스팀과의 혼합으로 인해 채취시의 혼합된 상태를 건조시킨 후 분석하여 수분 함량이 매우 낮게 나타났으며, 대략

Table 1 Properties of wood chip, tar and soot

	Wood chip	Tar	Soot
Proximate analysis (%)			
Moisture	21.67	0.01	3.61
Volatile matter	60.14	87.86	38.44
Ash	3.86	0.03	21.48
Fixed carbon	14.34	12.10	36.47
Ultimate analysis (%)			
C	46.53	54.38	56.67
H	5.75	6.04	3.60
N	0.25	0.03	0.27
O	43.51	39.51	17.97
S	0.11	0.01	0.01
Higher heating value (kcal/kg)	4,130	4,960	5,200

5000kcal/kg의 높은 발열량을 보였다. 타르의 경우 우드칩의 가스화시 회분이 제거됨으로 인하여 회분 함량이 매우 적고, 휘발분이 높은 특성을 보였다.

목질계 바이오매스의 가스화 부산물인 타르의 연소 및 열분해 특성을 파악하기 위하여 열중량분석기(TGA, SETARAM TG/DTA 92-18) 이용하였다. 초기 TGA basket 내 시료의 무게는 평균 19~20mg을 충전하였으며, 이러한 범위에서 시료무게에 대한 변수는 TGA 결과에 영향을 주지 않았다. 사용된 저울과 온도측정의 정밀도는 0.01mg과 0.01℃까지 측정이 가능하다. TGA 실험온도는 타르의 열분해 및 수증기 개질 실험에 적용되는 온도범위인 900℃에서 수행되었으며, 승온속도 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 5, 15, 30, 50℃/min의 조건으로 변화시키며 비교하였다. 연소실험의 경우 승온과 함께 공기를 주입하였고, 열분해 실험의 경우 설정된 반응온도까지는 질소를 주입하여 수분 및 휘발분을 제거하였으며, 반응온도에 도달한 후에는 2시간동안 공기를 주입하며 연소를 유도, 측정하였다. 질소, 공기의 유량은 모든 실험조건에서 동일하게 100ml/min으로 고정하였다. 또한 시료의 무게변화는 전자식 저울과 컴퓨터를 이용하여 2.6초의 일정한 시간 간격으로 측정하면서 데이터를 저장하였다.

일반적으로 바이오매스의 가스화시 적용되는 상향류식 고정층 가스화기에서는 타르발생량이 상대적으로 많다⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 타르발생량을 비교적 적게 배출하는 하향류식 가스화 시스템을 이용하였다. 가스화기 하부에서의 온도는 대략 800~1,000℃ 수준을 유지하였으며, 가스화기 하부에서 배출되는 합성가스는 촉매 개질반응기로 주입된다. 개질반응기에서는 합성가스가 축열식 캐스타블 층을 통과하게 하고 금속 파이프 유로를 따라 반응기 내부에서 하향류로 흐르도록 하였다. 합성가스는 하향류 금속파이프 외부의 환형 유로를 통과하여 상승하도록 하여 열교환이 이루어지도록 하였다. 만약 합성가스가 상승 유로를 통과하는 과정에서 온도가 떨어지게 되면 필요한 온도만큼은 전기히터를 사용하여 보조적으로 상승도록 하였다. 여기에서의 히터는 다공성 유로를 지닌 세라믹 히터를 사용하

여 개질용 촉매온도가 일정한 온도로 유지되도록 하였다. 개질반응에 필요한 스팀은 Table 1에서 보는바와 같이 우드칩 내 다량의 수분이 함유되어 있으므로, 추가적으로 공급하지 않았다. 개질반응기에서 배출되는 합성가스는 이후 스크러버와 집진과정을 거친 다음 가스엔진으로 공급되도록 연계되어 있다. 고정층 하향류식 바이오매스 가스화 장치와 연계하여 적용된 촉매 개질 반응기가 설치된 장치의 구성도는 Fig. 1과 같다. 본 연구에서 수행된 가스화 운전조건은 Table 2에 보였다.

가스 분석은 촉매 개질 반응 전후의 합성가스의 변화를 파악하기 위하여 개질반응기 전단의 가스화기 출구, 개질반응기 출구 두 곳의 샘플링포트로부터 집진 및 냉각 후 실시간 가스분석기(IR analyzer, hartmann and braun, advance optima)를 이용하여 분석하였다. 타르 측정은 가스화기 출구 및 개질반응기 출구의 샘플링포트로부터 타르를 포집하였다. 합성가스 내 타르의 정량분석은 Neef 등⁹⁾이 제안한 바이오매스 합성가스 내 타르 및 수트의 측정법에

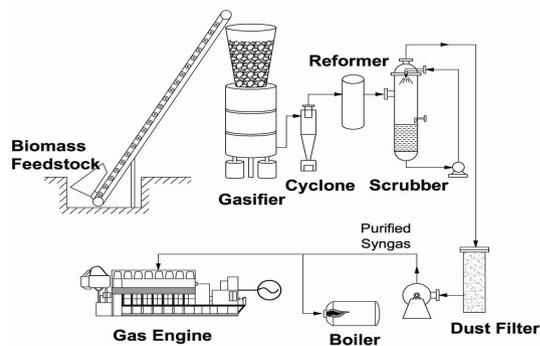


Fig. 1 Schematic diagram of bench-scale biomass gasification system.

Table 2 Gasifier operating conditions

Variables	Operating condition
Wood chip feed rate	40~55 kg/h
Excess air ratio	0.2~0.85
Gasifier temperature (middle)	700~850℃
Gasifier temperature (bottom)	800~1,000℃
Syngas flow rate	50~130 Nm ³ /h

준하여 실험 하였다⁹⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 TGA 실험결과

바이오매스 타르의 발화온도와 연소특성을 파악하기 위하여 일정량의 시료를 15°C/min의 승온속도로 900°C까지 공기를 주입하여 연소시킨 온도에 따른 무게감량비 변화 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 우드칩의 가스화를 통하여 생성된 타르의 경우 200°C 이하의 온도영역에서는 수분 증발 따른 건조현상으로 인하여 소량의 무게가 감소하였다. 수분이 건조된 후, 200~550°C 사이에 탈휘발이 시작되면서 급

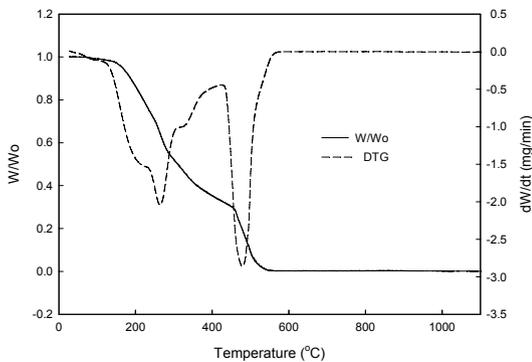


Fig. 2 Combustion characteristics of biomass tar.

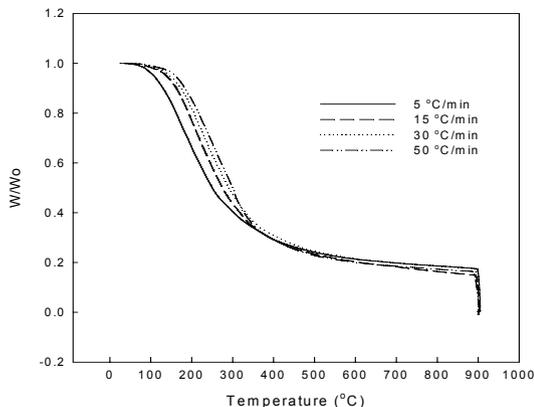


Fig. 3 Effect of heating rate on pyrolysis of biomass tar.

격히 무게가 감소하는 것을 알 수 있다. 결과에서 보면 크게 200~300°C, 300~450°C, 450~550°C의 세 영역으로 나뉘는데, 이는 바이오매스 내 대표적인 구성 성분인 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스, 리그닌의 연소가 순차적으로 일어남을 볼 수 있다¹⁰⁾.

바이오매스 열분해는 외부에서 가해진 열에 의하여 진행되므로, 승온속도 및 열전달 속도에 따라서 최종 생성물의 분포나 공정효율이 크게 영향을 받는다. 급속 가열의 경우, 완속 가열보다 열분해 가스의 생성량은 증가하며, 유기성 액체와 수분 그리고 촉매의 생성량은 감소한다^{11,12)}. Fig. 3에는 TGA에서 승온속도에 따른 바이오매스 타르의 무게 변화를 나타내었다. 결과에서 보면, 승온속도가 증가할수록 열분해가 시작되는 온도가 커짐을 알 수 있다. 또한 최종적으로 탈휘발되는 양도 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 빠른 승온속도로 인하여 탈휘발된 물질들이 다시 좌로 돌아가기 전에 기체 성분 상태로 반응기 밖으로 배출되어 최종 성분이 감소하기 때문이다. 따라서 바이오매스 타르의 열분해에 있어서 승온속도가 매우 중요한 변수이며, 최종 생성물의 양에도 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

3.2 가스화기와 연계한 개질 실험결과

Bench-scale 우드칩 가스화 시스템에서 개질기

Table 3 Variation of tar concentration in the syngas before and after reformer

Catalyst	Reformer temperature (°C)	Before reformer (g/Nm ³)	After reformer (g/Nm ³)
Katalco 46-6Q	350	9.358	8.838
	400	9.289	8.028
	450	9.853	8.233
	600	9.926	4.813
Olivine	460	10.147	8.795
	530	10.371	8.223
	600	9.593	6.413
Dolomite	400	9.494	7.885
	500	10.399	8.325
	700	9.910	5.115

촉매층 온도변화에 따른 촉매별 개질 전후의 합성가스 내 타르의 농도 변화를 Table 3에 보였다. 세 종류의 촉매 모두 촉매층의 온도가 증가함에 따라 개질기에서 배출되는 합성가스 내 타르의 농도가 감소함을 알 수 있었다. Katalco 46-6Q의 경우 개질 전 9.9g/Nm³ 정도의 타르 농도가 촉매층 온도가 600℃일 때 개질반응기 출구에서는 4.8g/Nm³ 정도로 감소하였다. 감람석의 경우 개질 전 10.1g/Nm³ 타르 농도가 개질 온도 600℃일 때 6.4g/Nm³으로 감소하였으며, 백운석을 이용한 경우 개질 전 9.9g/Nm³ 타르 농도가 개질 온도 700℃일 때 5.1g/Nm³으로 감소함을 확인하였다. 이의 결과를 토대로 개질 온도에 따른 촉매별 타르 제거효율 Fig. 4에 나타내었다. 개질 온도가 400℃ 이하의 낮은 온도조건에서는 백운석이 가장 높은 제거효율을 보인 반면 500℃ 이상의 개질조건에서는 니켈계열 촉매인 Katalco 46-6Q가 가장 높은 개질효율을 보였다. 세 종류의 촉매 모두 개질온도가 증가함에 따라 타르의 전환율은 증가하였으며, 전반적으로 개질온도가 600℃ 이상으로 운전되어야 합성가스 내 타르의 제거가 효과적임을 확인할 수 있었다.

Table 4에는 개질기 전후의 합성가스 내 촉매별 개질 온도에 따른 수트의 변화량을 나타내었다. 앞서 타르의 경우와 같이 개질 온도가 증가함에 따라 합성가스 내 수트의 농도는 감소하였다. 본 연구에서 적용된 하향류식 가스화기를 이용한 우드칩 가스화시

생성되는 합성가스 내 수트의 농도는 가스화 운전조건에 따라 영향을 받게 되나, 일반적으로 1.3g/Nm³ 정도였다. 600℃의 개질온도 조건에서 Katalco 46-6Q를 이용한 경우 개질반응기 출구에서는 0.4g/Nm³로, 감람석의 경우 0.5g/Nm³으로 합성가스 내 수트 농도가 감소하였으며, 700℃의 온도조건에서 백운석의 경우는 0.6g/Nm³ 정도로 수트가 저감됨을 보였다.

본 결과를 통하여 Fig. 5에는 촉매별 개질 온도에 따른 수트 제거효율을 보였다. 적용된 실험조건에서 Katalco 46-6Q 촉매가 가장 높은 수트 제거효율

Table 4 Variation of soot concentration in the syngas before and after reformer

Catalyst	Reformer temperature (°C)	Before reformer (g/Nm ³)	After reformer (g/Nm ³)
Katalco 46-6Q	350	1.295	0.724
	400	1.273	0.682
	450	1.256	0.598
	600	1.024	0.386
Olivine	460	1.299	0.826
	530	1.319	0.730
	600	1.263	0.527
Dolomite	400	1.384	1.021
	500	1.399	0.983
	700	1.351	0.659

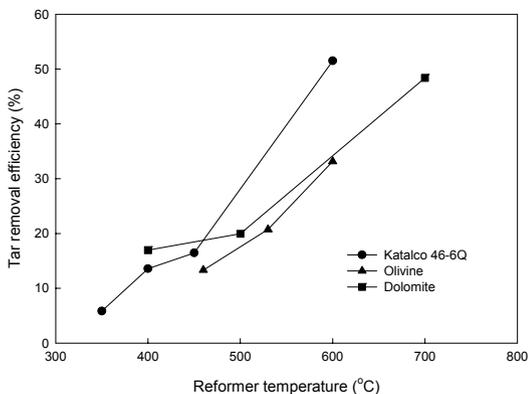


Fig. 4 Effect of reformer temperature on tar removal efficiency.

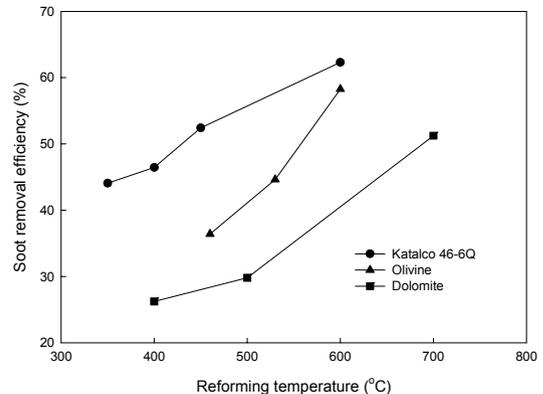


Fig. 5 Effect of reformer temperature on soot removal efficiency.

Table 5 Variation of gas composition in the product gas before and after reformer at reformer temperature of 600°C

Catalyst	Gases	Before reformer (vol.%)	After reformer (vol.%)
Katalco 46-6Q	H ₂	15.5	16.9
	CO	17.5	20.8
	CO ₂	20.7	21.4
	CH ₄	4.4	4.6
Olivine	H ₂	15.5	16.4
	CO	18.2	19.9
	CO ₂	20.4	21.1
	CH ₄	3.9	4.1
Dolomite	H ₂	15.9	16.3
	CO	18.7	20.7
	CO ₂	20.4	21.2
	CH ₄	4.5	4.6

을 보였으며, 백운석의 경우 가장 낮은 제거율을 나타내었다. 또한 본 연구에서 적용된 온도조건에서 일반적으로 개질 반응기를 이용한 수트의 제거율이 타르 제거율보다 높았다.

Table 5에는 600°C의 개질 온도 조건에서 촉매별 개질기 전후의 합성가스 조성 변화를 나타내었다. 본 연구에서 적용된 하향류식 바이오매스 가스화 시스템은 가스화제로 공기를 이용하고 있기 때문에 생성가스는 Table 5에서 보인 가스 이외에 대부분 질소로 구성되어 있다. 본 장치를 이용한 우드칩의 가스화시 생성되는 합성가스 조성은 대략 수소 15%, 일산화탄소 18%, 이산화탄소 20%, 그리고 4% 정도의 메탄으로 구성되어 있으며, 이외 43% 정도의 질소로 이루어져 있다. 본 연구에서 적용된 세 종류의 촉매 모두 개질 후 대부분의 가연성 합성가스 조성이 증가함을 보였다.

이의 결과를 바탕으로 촉매별 개질 후 생성가스의 증가율을 Fig. 6에 나타내었다. 전반적으로 세 종류의 촉매 모두 개질반응으로 인한 합성가스 내 가연성 가스의 조성이 증가함을 보였으며, 일산화탄소의 증가율이 가장 높았고, 다음으로 수소, 메탄의 순으로 나타났다. 앞서 타르 및 수트의 제거율

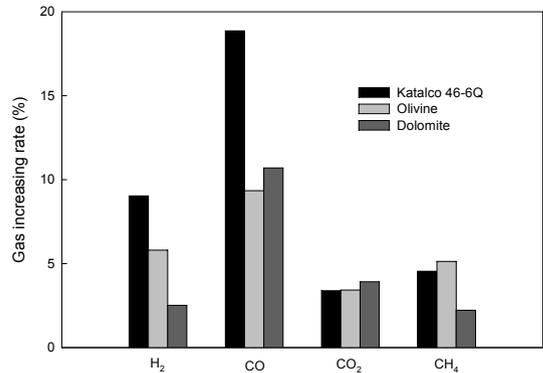


Fig. 6 Gas increase rate in the product gas after reformer at reformer temperature of 600°C.

결과에서 볼 수 있듯이 니켈계열 Katalco 46-6Q 촉매를 이용한 경우 가장 높은 가연성 합성가스의 증가율을 확인할 수 있었다. Katalco 46-6Q 촉매를 이용한 경우 타르 및 수트의 개질로 인하여 개질기 후단의 생성가스 내 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 메탄 함량이 각각 9.0%, 18.8%, 3.4%, 4.5% 정도 증가하였다.

4. 결 론

목질계 바이오매스인 우드칩의 가스화시 생성되는 타르의 열중량분석기를 이용한 반응특성 측정 및 타르 및 수트를 합성가스로 전환하기 위하여 세 종류의 촉매를 이용한 개질반응 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 우드칩의 가스화시 생성되는 타르와 수트의 경우 5000kcal/kg 정도의 높은 발열량 값을 보여 단순 제거가 아닌 개질 연료로서의 이용가치를 보였다.
- 2) 하향류식 고정층 가스화기를 이용한 우드칩의 가스화시 합성가스 내 타르 및 수트 농도는 각각 10.0g/Nm³, 1.3g/Nm³ 정도였으며, 촉매 개질반응기를 이용하여 4.8g/Nm³, 0.4g/Nm³ 정도로 감소시킬 수 있었다.
- 3) 촉매 개질온도가 증가함에 따라 타르 및 수트의 제

거울은 증가하였으며, 전반적으로 니켈계열 Katalco 46-6Q 촉매가 감람석, 백운석에 비해 높은 제거율을 보였다. 특히 세 종류의 촉매 모두 효과적 개질 성능을 발휘하기 위해서는 600°C 이상의 온도조건이 유지되어야 함을 알 수 있었다.

- 4) 타르 및 수트의 촉매 개질 반응으로 인하여 합성가스 내 수소, 일산화탄소 및 메탄과 같은 가연성 가스 함량이 증가하였으며, 본 연구에서 적용된 세 종류의 촉매 모두 일산화탄소의 증가율이 가장 높았다. 이상의 결과를 통하여 촉매 개질반응에 적용 가능한 몇 가지 촉매의 성능을 비교함으로써 적절한 촉매선정 및 조건의 기준을 마련하였으며, 개질 후 타르 및 수트가 제거된 합성가스의 가스엔진으로 적용 가능성을 높였다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대핵심기술개발사업과 농진청 친환경바이오에너지연구사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) C. Higman and M. Van der Burgt, "Gasification" 2nd ed., Elsevier Science, New York, 2008.
- 2) V. Kirubakaran, V. Sivaramakrishnan, R. Nalini, T. Sekar, M. Premalatha, and P. Subaramanian, "A review of gasification of biomass", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, 2009, pp. 179-186.
- 3) Y. Cao, Y. Wang, J. T. Riley, and W. P. Pan, "A Novel Biomass Air Gasification Process for Producing Tar-free Higher Heating Value Fuel Gas", Fuel Processing Technology, Vol. 87, 2006, pp. 343-353.
- 4) S. P. Babu and T. P. Whaley, "IEA Biomass Thermal Gasification Project", Biomass and Bioenergy, Vol. 2, 1992, pp. 299-306.
- 5) H.-Sun, B.-H. Song, Y.-W. Jang, S.-D. Kim, H. Li, and J. Chang, "The Characteristics of Steam Gasification of Biomass and Waste Filter Carbon", Korean J. Chemical Engineering, Vol. 24, 2007, pp. 341-346.
- 6) L. Devi, K. J. Ptasinski, and Frans J. J. G. Janssen, "A Review of The Primary Measures for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes", Biomass and Bioenergy, Vol. 24, 2003, pp. 125-140.
- 7) C. Li, D. Hirabauashi, and K. Suzuki, "Development of New Nickel Based Catalyst for Biomass Tar Steam Reforming Producing H₂-rich Syngas", Fuel Processing Technology, Vol. 90, 2009, pp. 790-796.
- 8) S. C. Bhattacharya, A. H. Md. Mizanur Rahman Siddique, and H.-L. Pham, "A Study on Wood Gasification for Low-tar Gas Production", Energy, Vol. 24, 1999, pp. 285-296.
- 9) J. P. A. Neeft, H. A. M. Knoef, U. Zielke, K. Sjöstrom, P. Hasler, P. A. Simell, M. A. Dorrington, and C. Greil, "Tar Protocol. Development of a Standard Method for The Measurement of Organic Contaminants (Tar) in Biomass Producer Gases", Proc. 1st World Conference and Exhibition, Spain, 5-9 June 2000.
- 10) A. Demirbas, "Mechanism of Liquefaction and Pyrolysis Reactions of Biomass", Energy Conversion and Management, Vol. 41, 2000, pp. 633-646.
- 11) Y. Choi, J. Chattopadhyay, C. Kim, L. Kim, J. Son, and d. Pak, "Production of H₂ Gas in Pyrolysis of Paper Biomass using Ni-based Catalysts", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 6, 2008, pp. 514-519.
- 12) A. V. Bridgwater, D. Meier, and D. Radlein, "An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass", Organic Geochemistry, Vol. 30, 1999, pp. 1479-1493.