

하향류식 커피박 가스화 장치 개발

조은만*, 김봉환**.#, 김동건**, 정원훈***, 이상문****, 장영희*****

*리엔텍엔지니어링, **경상국립대학교 자동차공학과, ***경상국립대학교 일반대학원 자동차공학과, ****경기대학교 환경에너지공학과, *****경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과

Equipment Development for Downdraft Gasification of Coffee Leaves

En-man Cho*, Bong-hwan Kim**.#, Dong-gun Kim**, Won-hoon Jung***, Sang-moon Lee****, Young-hee Jang*****

*Reentec Engineering, **Department of Automotive Engineering, Gyeongsang National University,

***Department of Automotive Engineering, Graduate School of Gyeongsang National University,

****Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, *****Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University

(Received 17 September 2021; received in revised form 21 September 2021; accepted 01 October 2021)

ABSTRACT

The gasification of coffee leaves, which are a type of biomass waste, was conducted on a pilot of a downdraft fixed gasification system to investigate the gasification characteristics. The experiment was performed using a coffee leaf pellet size and a batch-type gasification system consisting of a gasifier, cooling cyclone, scrubber, and bag filter. It was found that the air-to-fuel ratio was 2.32 Nm³/kg·h and the reaction temperature was 700 °C-900 °C. However, the air flow rate changed to 0.45 Nm³/min, which was lower than the initial starting value depending on the temperature change during the gasification process. It was concluded that coffee leaves can be converted from biomass waste into useful synthetic gas as an alternative energy source.

Keywords : Coffee Leaf(커피박), Gasification System(가스화), Downdraft(하향류), Gasifier(가스화로), Synthetic Gas(합성가스)

1. 서 론

매년 국내 커피 수요의 증가로 인한 커피박(커피 찌꺼기)의 배출량은 연간 10만톤 이상을 초과하고 있으며, 2019년 기준 생두와 원두 수입량(16만 7,578톤) 중 수분을 감안할 때 14만 9,038톤이 커피박으로 추산되며, 이는 생활폐기물로 분류되어 일반 커피전문점조차 종량제봉투를 사용하여 매립, 소각 처리하고 있는 실정이다.

일부의 기관 또는 기업에서 자원 순환적 측면에서 이와 같이 쓸모없이 버려졌던 커피박의 새로운 쓰임을 찾고 있는바, 커피박 재자원화에 관한 방법으로 목재데크, 생분해 일회용품, 포장 완충재 및 커피박 도자컵 등으로 제품화하려는 노력이 있었다. 그러나 이러한 재활용 자재로써 커피박을 전환하여 재자원화하는 방법은 최근의 고급 커피 등의 수요 및 커피전문점 증가로 원두의 소비는 당분간 확대될 전망이므로 한계가 있을 수밖에 없으며, 높은 발열량과 중금속 등 불순물이 섞여 있지 않은 점을 소지한 커피박(커피 찌꺼기)을 유용 가능한 바이오매스로써 인식하여 스타벅스 등의 커

Corresponding Author : bhwkim@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-3645, Fax: +82-55-772-3649

피전문점들이 친환경 퇴비의 생산에도 활용하거나 방향제로써 제공하고 있으나 폐기 기간만 잠시 연장하는 효과만 있을 뿐 지속 가능하지 않다.

따라서 커피박의 높은 발열량을 활용하여 바이오에너지 원료로써 활용할 수 있을 것이며, 특히 환경친화적인 공법으로써 커피박을 가스화공정을 거쳐 합성가스(Synthetic gas)를 생산하도록 한다면 안정적인 친환경 바이오 에너지 연료로써 충분히 자원화될 가능성이 매우 높다^[4]. 즉 커피박은 1kg당 발열량은 5,648.7kcal로써 우드펠릿의 1.5배에 달할 정도로 매우 높은 점과 셀룰로오스, 리그닌 등 목질계 성분이 풍부하고 일산화탄소와 분진 발생량이 적어 친환경 바이오 연료로써의 가치가 충분하며 적정한 수거 체계와 안정적인 에너지 자원화 기술이 제공되어 바이오에너지 원료로 재활용된다면 연간 180억원의 처리비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 즉 커피박은 유기성 폐기물로 처리할 것이 아니라 유용한 바이오에너지 연료로써 자원화하기 위해, 본 논문에서는 커피박 원료를 펠릿으로 만들어 하향류식 가스화로와 가스화 파이롯(Pilot) 장치로써 개발된 가스화 시스템을 이용하여 가스화 시험을 거쳐 커피박의 가스화 특성을 연구한 내용 및 결과를 살펴보았다.

2. 가스화 파이롯 구성

2.1 시료

본 실험에 사용한 시료는 커피 공장에서 나오는 커피박을 이용하였으며, 그 물질에 대한 분석 결과를 아래 Table 1에 도시하였다. 커피박은 목질계 바이오매스의 일종이므로 도시한 바와 같이 휘발분(VS)이 높으며, 회분이 적어서 가스화 시스템에 적용할 고체연료로서는 이상적인 상태이다. Fig. 1에 보는 바와 같이 시료는 직경 8mm, 길이 30mm 정도의 펠릿형으로 제작하여 사용하였고, 이와 같이 본 시험에 사용한 커피박의 고위발열량은 측정 결과 4,370kcal/kg 정도이며, 이는 톱밥과 유사하며 알려진 커피 찌꺼기의 발열량에는 조금 못 미치는 값을 갖고 있으며, 물질 분석결과 황성분의 함유량은 거의 없는 것으로 나타났다^[5].

Table 1 Material analysis of coffee leaf

No	Description	Test Result	Unit	
1	Industrial Analysis	Water	6.63	wt.%
		Volatile Matter	71.33	
		Ash	6.11	
		Fixed Carbon	15.93	
2	Elemental Analysis	N	2.63	wt.%
		C	45.66	
		H	5.95	
		S	0.14	



Fig. 1 Coffee leaf pellet

2.2 실험장치

본 실험에서 주요 실험장치인 가스화로(Gasifier)는 하향류식(Downdraft) 고정상(Fixed) 가스화로를 사용하였으며, 이러한 하향류식 가스화로는 여타의 가스화 프로세스 즉, 유동상이나 분류상 등의 반응기보다 운전이 용이하며 생성가스가 Char에 의한 고정탄소 연소 등을 통과함으로써 타르의 생성이 현저히 적어진다는 장점이 있다^[6].

시료는 가스화로(330 ϕ mm \times 800Hmm) 내부에 설치된 그레이트(Grate) 상부를 통해 적절한 높이까지 배치식으로 사전에 투입하였다.

여기서 1회 투입량은 공연비(A/F)를 유지하기 위하여 다음 식 (1)으로 구해진다.

$$\text{연료 투입량} = (\text{시간당 공기주입량}) \div (\text{공연비})$$

$$F = \frac{Q_{air} \times 60}{A/F \text{ ratio}} \text{ kg}$$

$$= \frac{0.54 \text{ Nm}^3/\text{min} \times 60 \text{ min}}{2.34 \text{ Nm}^3/\text{kg}} = 13.84 < 14 \text{ kg} \quad (1)$$

본 실험에 사용한 하향류식 가스화로는 내, 외통부를 이중으로 갖도록 설계하여 가스화 공정에서 내통부에 발생한 가스는 내, 외통부 사이의 공간을 통과해 외부로 배출되는 구조로 개발되었다. 가스화로에서 발생한 가스는 다단의 냉각 및 정제 공정을 거쳐 가연성이 높은 합성가스가 될 수 있도록 전체 가스화 시스템을 위한 파이롯 장치의 설계를 개발하고 제작하였다^[7].

본 실험에 사용한 가스화 시스템은 Fig. 2와 같으며 Fig. 3에 상세한 장치구성을 P&ID로 나타내었다. 주요 장치구성을 살펴보면, 가스화의 주 반응기인 하향류식 가스화로와 가스냉각용 사이클론(Cyclone), 이물질 및 더스트 제거용 습식 세정탑(Scrubber), 제습장치 및 백필터(Bag filter) 그리고 흡기용 송풍기와 화염연소기 등으로 구성되어 있다. 또한 각 파트는 생성가스의 상태를 확인하고 시료를 채취할 수 있도록 온도센서, 압력센서 및 시료 채취구를 설치하였다^[8].

여기서 가스화로는 수직 원통형 셸(Shell) 구조로써 내통부 직경 330mm, 외통부 직경 400mm이며, 총 높이는 2,300mm로 제작되었다. 초기 점화를 위한 공기노즐 3개소와 반응기 상부 커버로부터 아래를 향하여 T1~T5까지 열전대 온도센서 부를 5개소 설치하였다. 그 각각은 가스화로 상부 커버로부터 거의 일정한 간격으로 T1은 상부의 노 내부, T2는 건조구간, T3는 열분해 구간, T4는 산화 구간, T5는 환원구간의 온도를 감지할 수 있도록 배치되었다. 가스화 반응에서의 온도는 T5의 환원구간에서 그 최종 온도를 감지할 수 있었다^[9]. 초기 점화 시에는 착화토치를 사용하고, T5의 온도가 150℃ 이상으로 자가점화가 되면, 토치를 사용하지 않고 자체 연소하도록 하여 가스화 반응을 확인할 수 있도록 가스화 장치의 시스템 계통을 Fig. 3과 같이 제작하였다.

2.3 실험조건



Fig. 2 Actual gasification pilot system

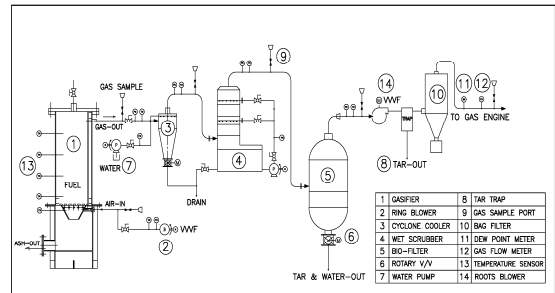


Fig. 3 P&ID of gasification pilot plant

본 실험에서는 커피박의 펠릿 시료를 적정한 공급 공기량 0.54Nm³/min에서 가스화 반응이 어떻게 일어나지를 관찰하기 위하여 배치(batch)식으로 균일한 연료량 14kg을 투입한 후 발생하는 가스화 반응 온도 변화의 추이와 공기유량 변화를 확인하였다. 여기서 적정한 공기량은 설정한 A/F비로써 결정하였으며, 반응온도의 최댓값은 900℃ 정도로써 가스화로의 셸부 재료인 STS 310S의 내열강 허용 온도 미만으로 실험하였으며, Table 2는 가스화 실험조건을 나타낸다.

연료 시료를 만들기 위한 커피박 펠릿 제조용 장치는 수직형 롤다이스 형식의 펠릿기를 사용하였으며, 이는 우드칩 펠릿용으로 본 실험에서 커피박 펠릿 장치로 사용하였다. 시료의 직경은 다이스에 균일하게 생산되나 시료의 길이는 30~40mm로 분포도를 가진다. 연료량은 펠릿으로 만든 다음 정밀 저울에서 중량을 확인하여 정량을 반응기에 투입하였다. 반응기에 주입되는 공기량은 송풍기 모터에 인버터제어(VVVF)를 설치하여 현장 제어반에서 조정하고 송풍기 토출 부에 설치

Table 2 Experimental conditions

Sample	Coffee leaf pellet (∅8×30)
Fuel Weight	14kg
Air Flow Rate	0.54Nm ³ /min
A/F Ratio	2.32Nm ³ /kg·hr
Temperature	(Max.) 900°C

한 전자식 유량계에서 확인하였다. 반응온도는 가스화로의 바디 셸에 설치된 5개의 열전대 온도감지기로써 반응기 상부로부터 가장 하부의 환원 공정구간까지 각 가스화 공정의 온도를 감지하여 현장 제어반에 지시된 값을 기준으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서 커피박 펠릿 시료에 대한 배치방식의 연료주입량 회당 14kg에 대한 합성가스 생성의 가스 조성비에 대한 결과를 Table 3에 나타내었다. 3회 실험으로 각각의 가스 조성비율 결과는 거의 일정함을 확인하였고 이러한 결과는 그 평균값을 나타낸 것이다. 가연성 가스성분인 CO 및 H₂ 조성비가 기존의 우드칩(Wood chip) 가스화 조성비보다 낮게 나타났고, 고위발열량 또한 낮게 나타났으며, 이는 배치식 시험으로 인한 영향으로 사료된다. 생성된 가연성가스의 발열량 계산은 다음 식 (2)와 같이 GC(Gas chromatography)로 측정된 각 가연성 가스의 부피 분율과 자체 고위발열량을 곱한 후 총 생성 가스의 고위발열량을 합산하였다. 그 결과, 생성 가스의 고위발열량은 1,279.54kcal/Nm³, 즉 5.35MJ/Nm³로 산출하였다.

$$(V_{CO} \times HHV_{CO}) + (V_{H_2} \times HHV_{H_2}) + (V_{CH_4} \times HHV_{CH_4}) \quad (2)$$

가스화로 내벽에서의 높이에 따른 온도 변화를 확인하여 Fig. 4에 나타내었으며, 온도변화가 고온영역으로(600~700°C) 갈수록 공기 토출 유량 값이 처음 셋업(Set-up)한 값(0.54Nm³/min)에서 점차 감소함을 확인하였다. 이러한 공기 주입 유량 값은 최소 0.45Nm³/min까지 하강하였고 T5 온도가 670°C 이하로 다운되면서 생성 가스가 배출되고, 공

Table 3 Composition ratio and HHV of syn-gas

Component	Volume Fraction	High Heating Value (kcal/Nm ³)
CO	0.089	3,020
H ₂	0.069	3,050
CH ₄	0.084	9,500
CO ₂	0.063	-
N ₂	0.592	-
O ₂	0.103	-
Caloric Value (HHV)	1,279.54kcal/Nm ³ (5.35MJ/Nm ³)	

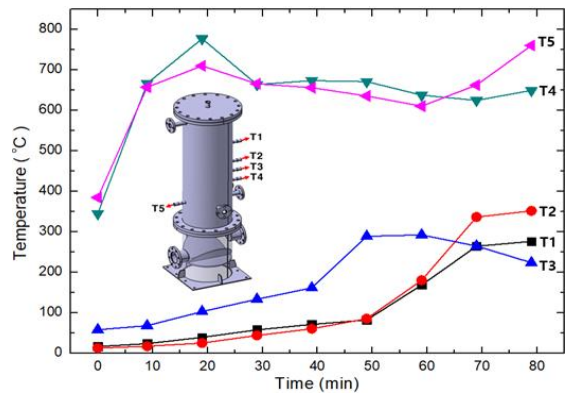


Fig. 4 Temperature graph of gasification reaction

기 유량은 다시 회복하여 0.51~0.53Nm³/min가 됨을 확인할 수 있었다.

시료의 반응기 내부 온도변화에 대한 추이는 자가 점화 후 200°C 이상에서 급격한 연소반응이 생김으로써 700°C까지 급격한 상승 그래프를 확인할 수 있었으며, 다시 900°C 미만에서 온도강하가 일어남을 확인할 수 있었는데, 그 원인은 배치식 이므로 추가적인 연료투입이 없어 지속적인 온도 상승 및 유지가 어려운 것으로 보인다.

가스화로 후단의 정제시스템 끝에 설치한 연소기 전단에 설치한 밸브에서 생성 가스를 샘플링 하였고, 생성된 합성가스를 연소기 후단에서 Fig. 5와 같이 확인할 수 있었으며, 별도의 가스 저장 장치가 없으므로 생성 가스를 최종 단에 설치한 화염연소기에서 100% 연소시켰다. 이러한 화염연소상태는 가스화 반응이 안정적인 구간에서 가연성분이 일정량 이상 발생할 경우는 화염 색깔이



Fig. 5 Combustion photo of synthetic gas



Fig. 6 Ash photo after gasification

토출구 끝에서 확인할 수 있었으며, 가스화 반응이 다운되는 구간에서는 화염색깔이 열어지며 맥동 음이 발생하는 것으로 확인되었고, 생성 가스 연소 화염은 가스화로의 온도가 450℃ 이하로 하강하면서 점차 약해지는 것을 확인하였다.

이는 가스 화로에서 배출되는 생성 가스 중에 가연성 가스의 성분비가 점점 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 가스화 시스템의 정지 및 냉각 후 가스화로 하부에 설치한 스크류 컨베이어(Screw conveyer)에 의해 Ash를 포집하여 중량을 체크한 결과 Ash 발생량은 최종 2.3kg인 것으로 확인되었으며, 그 형태는 Fig. 6에 나타낸 것과 같다.

4. 결 론

본 실험을 통하여 하향류식 고정상 가스화 시스템 파이롯으로 설계, 제작된 Fig. 3과 같은 가스화 장치를 이용하여 연료인 커피박을 펠릿으로 성형하여 배치식으로 일정한 양의 시료를 가스화로에

초기 주입하여 해당 시간 동안 가스 화로에서 가스화 반응으로 인한 내부 온도 변화와 주입공기량의 추이에 따른 변화를 확인하고 생성 가스를 시료로 채취하여 합성가스에 함유된 가연성 가스의 성분비 및 발열량을 확인하였다.

이로써 일반폐기물로 분류된 커피박 또는 커피 찌꺼기를 합성가스로써 생성시킬 수 있는 가능성을 확인할 수 있었으며 또한 미이용 바이오매스를 유용한 에너지자원으로 충분히 활용할 수 있음을 확인하였다. 향후 본 실험에 사용한 커피박 종류 외에 커피전문점의 커피 찌꺼기 등 다양한 발생 계통의 커피박 및 커피 찌꺼기 시료에 대한 가스화 시험과 더불어 향후 연속 연료투입방식으로 파이롯 장치를 개선하여 연구하면 목표로 하는 커피 찌꺼기의 자원 순환적인 측면의 재활용 및 에너지 자원화의 상용화가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

“본 연구는 환경산업기술원의 녹색혁신기업 연구개발사업(2020003160002)의 일환으로 수행되었음.”

REFERENCES

1. Han, S. Y., Choi, Y. S., Choi, S. K., Kim, S. J. and Jeong, Y. W., “A Study on the Kinetics of Pyrolysis Reaction of Coffee Ground Residue and Biocrude-oil Production by Fast Pyrolysis,” Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 33, No. 8, pp. 786-795, 2016.
2. Jeong, Y. O., Park, S. W., Lee, S. Y., Han, G. H., Yang, W. S. and Seop, Y. C., “Assessment of Gasification Applicability in a Downdraft Fixed Bed Reactor to Coffee Residues,” Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 35, No. 6, pp. 515-524, 2018.
3. Kibret, H. A., Kuo, Y. L., Ke, T. Y. and Tseng, Y. H., “Gasification of Spent Coffee Grounds in a Semi-fluidized Bed Reactor using Steam and CO₂ Gasification Medium,” Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 119, pp.

115-127, 2021.

4. Jang, H. S., Ocon, J. D., Lee, S. H. and Lee, J. Y., "Direct Power Generation from Waste Coffee Grounds in a Biomass Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 296, pp. 433-439, 2015.
5. Yong, S. W., Lee, W. J., Yang, H. S. and Hyun, J. H., "Energy Potential Evaluation of Food Waste and Ground Coffee," *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 34, No. 5, pp. 509-517, 2017.
6. Dogru, M., Midili, A. and Howarth, C. R., "Gasification of Sewage Sludge using a Throated Downdraft Gasifier and Uncertainty Analysis," *Fuel Processing Technology*, Vol. 75, pp. 55-829, 2002.
7. Olayanju, T. M. A., Dairo, O. U., Sobukola, O. and Dahunsi, S. O., "Development of Small-scale Downdraft Gasifiers for Biomass Gasification," *IOP Conf. Series: Earth and Environment Science* 455(012056), pp. 1-19, 2020.
8. Ingle, N. A. and Lakade, S. S., "Design and Development of Downdraft Gasifier to Generate Producer Gas," *Energy Procedia*, Vol. 90, pp. 423-431, 2016.
9. Gado, I. H., Sanogo, O., Daho, T., Issa, B. and Josue, P., "Design, Rrealization of a Fixed Bed Downdraft Gasifier and Conduction of Preliminary Gasification Tests with Balanites Aegyptiaca Hulls, Rice Husk and Charcoal," *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 117-125, 2019.