

## 미이용 바이오매스의 이산화탄소 활성화를 통한 바이오카본 생산: 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 특성

김종수<sup>1</sup>, 최석천<sup>1</sup>, 이은도<sup>1,2</sup>, 박은석<sup>3</sup>, 정수화<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부  
31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89  
<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교, 청정공정 및 시스템공학과  
34113 대전광역시 유성구 가정로 217  
<sup>3</sup>(주)루프트케어  
12812 경기도 광주시 곤지암읍 광여로4번길 52, 2층

(2021년 11월 9일 접수; 2021년 11월 26일 수정본 접수; 2021년 11월 26일 채택)

## Production of Bio-Carbon from Unused Biomass through CO<sub>2</sub> Activation: Removal Characteristics of Formaldehyde and Acetaldehyde

JongSu Kim<sup>1</sup>, SeukCheun Choi<sup>1</sup>, Uendo Lee<sup>1,2</sup>, EunSeuk Park<sup>3</sup>, and Soohwa Jeong<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology  
89, Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si Chungcheongnam-do 31056, Republic of Korea  
<sup>2</sup>Green Process and System Engineering, University of Science and Technology  
217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea  
<sup>3</sup>LuftKARE, Inc.  
2<sup>nd</sup> Floor, 52, Gwangyeo-ro4beon-gil, Gonjiam-eup, Gwangju-si, Gyeonggi-do 12812, Republic of Korea  
(Received for review November 9, 2021; Revision received 11월 26, 2021; Accepted 11월 26, 2021)

### 요 약

본 연구에서는 미이용 바이오매스인 3급 목재펠릿 및 커피박을 이용하여 바이오카본을 생산하고 이를 통하여 저분자 극성 휘발성 유기화합물인 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 성능 실험을 수행하였다. 바이오카본 생산 실험은 이산화탄소를 활성화제로 사용하여 고정층 반응기에서 수행하였다. 활성화 실험 시 반응온도 900 °C 및 이산화탄소 1 L min<sup>-1</sup>으로 반응 조건을 고정하여 진행하였다. 활성화 실험 결과 1급 목재펠릿으로부터 생산한 바이오카본의 BET 비표면적이 약 788 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>으로 가장 높음을 알 수 있었고 커피박으로부터 생산한 바이오카본이 약 544 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>으로 가장 낮게 나타났다. 본 실험을 통해 생산된 바이오카본은 대부분 마이크로 기공을 가진 것으로 나타났다. 바이오매스 원료 내 회분의 함량이 낮을수록 바이오카본의 비표면적이 높아지는 것으로 나타났다. 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 실험 결과 1급 및 3급 목재펠릿으로부터 생산한 바이오카본에 비해 커피박으로부터 생산한 바이오카본이 더욱 우수한 흡착 성능을 보여주었다. 추가적으로 상용 침착 활성탄과 커피박으로부터 생산한 바이오카본의 비교 실험을 진행하였다. 포름알데하이드 제거 성능은 상용 침착 활성탄이 우수한 반면 아세트알데하이드 제거에는 커피박으로부터 생산한 바이오카본이 우수한 것으로 나타났다.

주제어 : 미이용 바이오매스, 바이오카본, 이산화탄소 활성화, 포름알데하이드, 아세트알데하이드

**Abstract :** In this study, bio-carbons were produced by activation process from unused biomass (Grade 3 wood pellet and spent coffee grounds) to determine the removal performance of formaldehyde and acetaldehyde. The activation experiments were conducted in a fixed bed reactor using CO<sub>2</sub> as an activation agent. The temperature of the activation reactor and input of CO<sub>2</sub> were 900 °C and 1 L min<sup>-1</sup> for all the experiments. The maximum BET surface area of about 788 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> was obtained for bio-carbon produced from Grade 1 wood pellet, whereas about 544 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> was achieved with bio-carbon produced from spent

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: pysoo80@kitech.re.kr; Tel: +82-41-589-8666; Fax: +82-41-589-8323

doi: 10.7464/ksct.2021.27.4.325 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

coffee grounds. In all the experiments, the bio-carbons produced were mainly found to have micro-porous nature. A lower ash amount in raw material was favored for the high surface area of bio-carbons. In the removal test of formaldehyde and acetaldehyde, the bio-carbon produced from spent coffee grounds showed excellent adsorption performance compared with woody biomass (Grade 1 wood pellet and Grade 3 wood pellet). In addition, the comparative experiment of commercial impregnated activated carbon and bio-carbon produced from spent coffee grounds was conducted. In terms of formaldehyde removal performance, the commercial impregnated bio-carbon was excellent, while bio-carbon produced from spent coffee grounds was excellent in acetaldehyde removal.

**Keywords :** Unused biomass, Bio-carbon, CO<sub>2</sub> activation, Formaldehyde, Acetaldehyde

## 1. 서 론

휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 산업전반에서 많이 사용하고 있는 용매에서부터 화학 및 제약공장이나 반도체 설비에서 배출되는 유기가스에 이르기까지 매우 다양하다. 이러한 VOCs 중 방향족 또는 할로젠족 탄화수소의 경우 물질 자체로 직접적으로 인체에 유해하고 지방족 탄화수소류의 경우 광화학 반응을 통해 스모그 발생의 원인이 된다[1,2]. VOCs를 처리하기 위한 기술로 연소(촉매 연소 포함) 및 흡착으로 제거하는 방법이 주로 사용된다. 연소의 경우 고가의 장치 및 유지보수 비용으로 소규모 공정에서는 활성탄을 이용하는 흡착 공정이 대부분 사용된다.

일반적으로 활성탄은 높은 기공률을 가진 탄소성 물질로서 수질 정화, 대기오염물질 제거 그리고 촉매 지지층 등 다양하게 사용되고 있다. 이러한 활성탄의 전구체로는 다양한 바이오매스 및 석탄계 원료가 될 수 있다. 활성탄을 만드는 방법으로는 물리적 활성화 및 화학적 활성화로 나눌 수 있다. 물리적 활성화 방법은 공기, 이산화탄소 그리고 수증기와 같은 산화제로 활성화하는 방법이며, 반면 화학적 활성화 방법은 ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 그리고 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>과 같은 화학약품을 통해 활성화하는 방법으로 물리적 활성화 방법에 비해 비교적 저온에서 활성화가 이루어진다.

다양한 VOCs 중 포름알데하이드 및 아세트알데하이드는 특정 대기유해물질로서 새집증후군, 빌딩증후군 그리고 화학물질과민증 등의 주요 원인 물질로 알려져 있다[3,4]. 이들의 처리 기술로 활성탄을 통한 흡착 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 알데하이드류와 같은 극성 물질들은 일반 활성탄으로는 우수한 흡착성능을 기대하기 어렵다. 많은 연구자들이 이러한 물질들의 처리를 위해 활성탄에 산화 촉매를 담지하여 사용하는 방법 또는 질산과 같은 물질로 화학적 처리를 하는 방법 등이 연구되고 있다.

Shin et al. [5] 등은 나노 크기의 은 입자를 입상활성탄에 침착하여 기체상 포름알데하이드의 흡착특성을 관찰하였다. 은 입자를 침착한 결과 비표면적이 10% 감소하였으나 우수한 포름알데하이드 제거 성능이 관찰되었으며 이는 나노 은 입자의 산화효과로 인해 기인한 것이라 보고하였다.

Ryu et al. [6] 등은 우레아와 질산을 활성탄소섬유에 담지하여 포름알데하이드의 제거 성능을 관찰하였다. 우레아만 활성탄소섬유에 담지하였을 때에 비해 우레아와 질산을 함께 담지

한 활성탄소섬유가 포름알데하이드 제거 성능이 더욱 우수한 결과를 나타낸다고 보고하였다. 이것은 질산이 포름알데하이드를 산화시켜 포름산(formic acid)으로 변환되는 반응을 촉진시켜 이러한 결과를 나타낸다고 보고하였다.

Baur et al. [7] 등은 질산 처리된 활성탄소섬유에 염기성 금속 산화물을 담지하여 아세트알데하이드의 흡착 특성을 관찰하였고 최대 20 wt.% 흡착 효율을 나타내었다고 보고하였다. 또한 아세트알데하이드의 주된 흡착 형태는 산소를 포함하는 탄소 그룹의 표면과의 물리적 흡착 및 담지된 MgO (magnesium oxide) 표면과의 화학적 흡착이라고 보고하였다.

본 연구에서는 미이용 바이오매스인 3급 목재펠릿 및 커피박을 이용하여 이산화탄소 활성화를 통해 바이오카본을 생산하고 이를 통하여 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 성능 실험을 수행하였다. 바이오카본 생산은 고정층 반응기를 이용하여 이산화탄소 활성화 실험을 통해 진행하였다. 바이오카본의 특성은 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 분석을 통해 관찰하였으며 바이오카본을 이용한 VOCs 제거 성능 실험에서 실시간 VOCs의 농도 변화 관찰 시에는 FTIR (Fourier-transform infrared spectrophotometer)을 사용하였다. 추가적으로 본 실험을 통해 생산된 바이오카본과 상용 침착 활성탄과의 성능 비교 실험도 수행하였다.

## 2. 실험 및 분석 방법

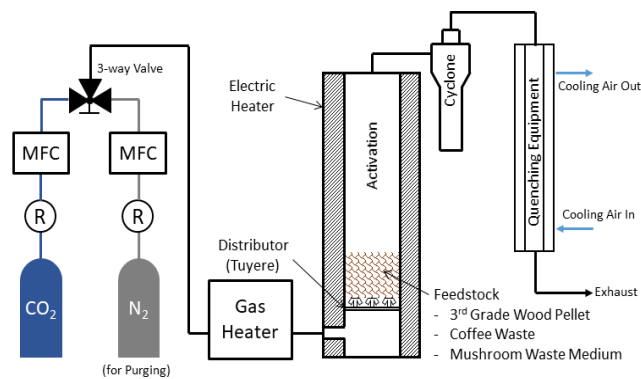
### 2.1. 원료 특성

실험에 사용된 미이용 바이오매스는 3급 목재펠릿과 커피박 원료를 선정하여 이산화탄소 활성화를 통하여 바이오카본을 생산하였다. 1급 목재펠릿은 미이용 바이오매스와 VOCs 제거 비교 성능 실험을 위해 사용하였다. 1급과 3급 목재펠릿의 가장 큰 차이점은 회분의 함량 차이이며 1급 목재펠릿은 0.7 wt.% 이하의 회분 함량을 요구한다. 실험 시 1급 및 3급 목재펠릿은 활성화 실험 전 톱밥의 형태로 파쇄하여 사용하였다. 커피박의 경우는 분말 형태로 수령하여 전처리 없이 사용하였다. Table 1에 각 원료의 특성을 나타내었다. 공업분석은 ASTM D7582-15에 따라 분석을 실시하였다. 공업분석 결과 1급 및 3급 목재펠릿은 성상이 대부분 유사하였으며 목재펠릿 규격에 따라 1급에 비해 3급 목재펠릿이 다소 회분 함량이 높음을 알 수 있었다. 커피박의 경우 회분의 함량이 4.6 wt.%로 목질계 바이오매스 원료에 비해 높은 수치를 나타

**Table 1.** Feedstock analysis (unit: wt.%)

Proximate analysis <sup>a</sup>	Grade 1 wood pellet	Grade 3 wood pellet	Spent coffee grounds
Moisture	7.4	6.1	2.4
Volatile matter	76.0	79.5	75.7
Fixed carbon <sup>b</sup>	16.3	18.6	17.3
Ash	0.3	1.8	4.6
Elemental analysis <sup>c</sup>			
Carbon	51.7	49.6	52.7
Hydrogen	6.2	6.3	6.2
Nitrogen	-	0.3	2.7
Sulfur	-	-	0.3
Oxygen <sup>b</sup>	42.1	43.8	38.1

<sup>a</sup>as received basis, <sup>b</sup>by difference, <sup>c</sup>ash free basis

**Figure 1.** Schematic diagram of activation system.

내었다. 회분의 함량이 높을 시 바이오카본의 기공들이 미세한 회분 성분들로 인하여 막힐 수 있다. 따라서 커피박으로부터 생산된 바이오카본의 경우 목질계 바이오매스로부터 생산되는 바이오카본들과 비교하여 비표면적의 감소가 예상되었다. 원소분석 결과 탄소 및 수소의 함량은 모든 바이오매스가 유사하게 나타난 반면 커피박의 경우 질소의 함량이 2.7 wt.%로 높게 나타났다. 이는 커피박 내 단백질의 존재에 기인한 것이다[8].

## 2.2. 실험 장치 및 방법

활성화 장치는 크게 산화제 투입부, 예열기 그리고 활성화 반응기로 나눌 수 있다. 활성화 장치의 개략도는 Figure 1에 나타내었다. 산화제 투입부는 이산화탄소와 반응이 끝난 후 투입되는 질소가 각각 MFC (mass flow controller)를 이용하여 정량적으로 유량을 공급할 수 있게 하였다. 반응기 내 온도가 투입되는 산화제의 온도에 대한 영향을 최소화 하기 위하여 예열기는 매 실험 시 800 °C로 유지하였다. 활성화 반응기 내부에는 tuyere 방식의 노즐이 적용되어 있는 분산판이 하부에 위치하여 반응기 내 원료가 하부로 떨어지는 것을 방지함과 동시에 산화제와 원료의 원활한 접촉을 유도하였다. 활성화 반응기 후

단에는 미세한 크기의 고체상 입자를 포집하기 위하여 사이클론을 적용하였고 추가적으로 생성되는 미량의 오일 및 수분을 포집하기 위하여 냉각기를 두었다. 매 실험 시 미이용 바이오매스 원료는 50 g을 사용하였으며 실험 전 반응기 상부에서 투입하였다. 매 실험 시 활성화 반응 온도는 900 °C 그리고 이산화탄소 투입 유량은 1 L min<sup>-1</sup>으로 고정하여 실험들을 수행하였다. 실험은 반응기 승온 시작부터 이산화탄소를 투입하였으며 목표 온도 도달 후 1 h 유지한 후 실험을 종료하였다. 생산된 바이오카본의 표면 특성은 BET 분석기(BEL, Belsorp-mini II)를 사용하여 비표면적, 기공 크기 분포 그리고 질소 흡착 및 탈착 곡선 등의 정보를 얻었다.

바이오카본을 이용한 VOCs의 흡착 제거 실험을 수행한 실험 장치는 크게 가스 주입부, 고정층 반응기 그리고 반응가스 분석 부분으로 구성하였다. 고정층 반응기는 0.05<sub>±0.01</sub> g (입자 크기: 40 ~ 60 mesh)의 바이오카본을 내경이 6.5 mm 및 높이가 400 mm인 반응관 내부에 충전 시킨 후, 공간 속도를 380,000 h로 설정하여 실험을 진행하였다. 반응관은 충전된 바이오카본을 고정하기 위하여 양단에 유리솜을 채워 수평으로 설치하였다. 휘발성이 강한 VOCs 특성을 고려하여 반응기의 온도는 30 °C를 유지시켰으며 이를 위하여 건조로 내부에 위치 시킨 형태의 반응 챔버를 특수 제작하였다.

반응기에 공급되는 가스는 공기, 산소, 질소 그리고 포름알데하이드 및 아세트알데하이드와 같은 VOCs를 각 실린더로부터 MFC를 사용하여 정량적으로 유량이 조절되어 투입될 수 있게 하였다. 반응기에 공급되는 VOCs는 질소와 혼합하여 농도를 조절하여 사용하였다. 유입되는 포름알데하이드 및 아세트알데하이드의 농도 범위는 각각 9 ~ 11 그리고 23 ~ 29 ppm으로 하여 흡착 실험을 진행하였다. Figure 2에 본 연구에서 사용된 성능평가 장치의 전체적인 개략도를 나타내었다. 바이오카본을 이용한 VOCs 제거 반응 실험 조건은 Table 2에 나타내었으며 FTIR (Midac, 1400-F)을 이용하여 바이오카본을 통과한 VOCs 농도를 실시간으로 측정하였다.

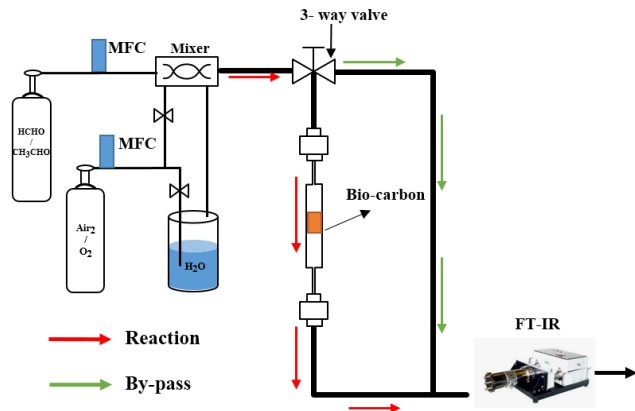


Figure 2. Schematic diagram of performance evaluation system for bio-carbons.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 바이오카본의 표면 특성

Table 2에 1급 목재펠릿 및 미이용 바이오매스를 이용하여 이산화탄소 활성화화를 통해 생산된 바이오카본의 비표면적 그리고 마이크로(micro) 기공 및 메조(meso) 기공 특성을 나타내었다. 일반적으로 이산화탄소 활성화화 메커니즘은 Bourdouard 반응에 의거해 기공이 발달한다[9,10]. 비표면적은 1급 목재펠릿으로 만든 바이오카본이 약 788 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>으로 상용급 활성화탄과 유사한 비표면적을 나타내었다. 3급 목재펠릿 및 커피박으로부터 생산된 바이오카본의 경우 각각 696 및 544 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>으로 다소 낮게 나타났다. 이는 1급 목재펠릿의 경우 원료 내 회분 함량이 가장 적은 것에 기인한 것으로 판단된다. 마이크로 및 메조 기공의 부피는 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본들은 유사하게 나타났으나 커피박 유래 바이오카본의 경우는 낮은 부피를 나타내었다.

Figure 3에 바이오카본들의 기공 크기 분포를 나타내었다. 미이용 바이오매스로부터 생산한 바이오카본의 기공 분포는 1급 목재펠릿 유래 바이오카본과 유사하게 나타났다. Figure 3에 나타나 있듯이 바이오카본 내 기공 분포는 대부분 1 nm 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) 분류에 따르면 2 nm 미만은 마이크로 기공, 2에서 50 nm 범위는 메조 기공 그리고 50 nm보다 큰 기공은 매크로 기공이라고 한다[11]. 본 실험에서 생산된 바이오카본은 대부분 마이크로 기공을 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 이산화탄소로 활성화 시 마이크로 기공

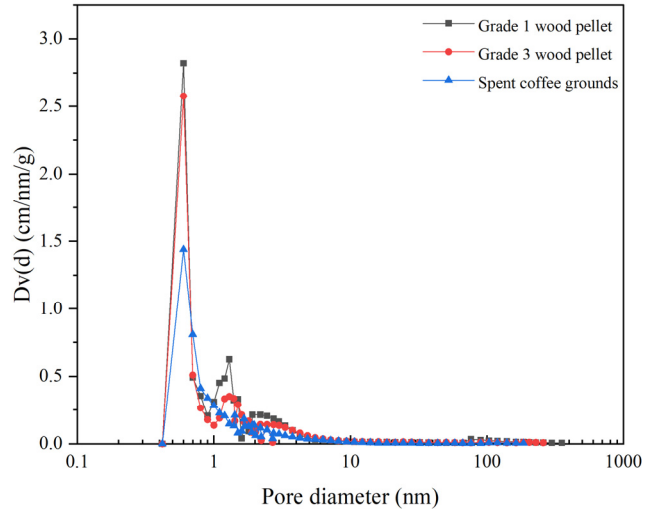


Figure 3. Pore size distributions of bio-carbons.

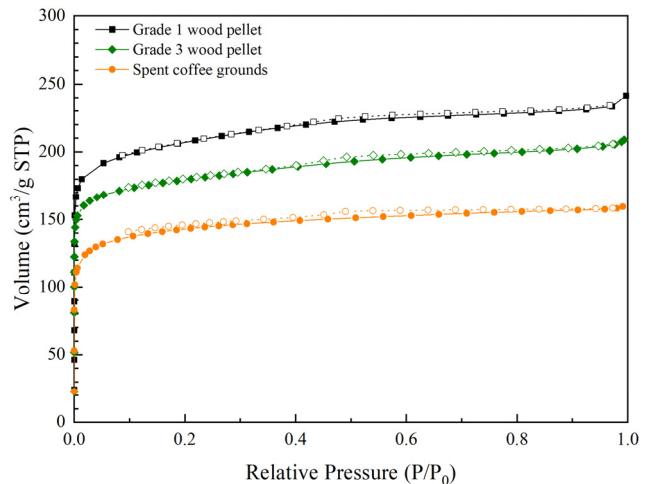


Figure 4. N<sub>2</sub> adsorption and desorption isotherms of the bio-carbons.

이 발달하는 것으로 나타나 문헌[12,13]들의 결과와 일치함을 알 수 있었다.

Figure 4에 바이오카본의 질소 흡착 및 탈착 등은 곡선을 나타내었다. Figure 4에서 초기 기울기가 급격히 높아지는 구간은 바이오카본의 기공에 질소가 흡착되면서 발생하는 것이며 기울기가 완만해지는 구간은 바이오카본의 표면에 흡착이 더 이상 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 본 실험에서 생산된 바이오카본의 등은 곡선의 경우 Type I 등은 곡선으로 불리우며 이는 마이크로 기공을 많이 가진 흡착 물질을

Table 2. Reaction conditions of VOCs removal test

Item	Formaldehyde	Acetaldehyde
Amount of bio-carbon	0.04 g (40 ~ 60 mesh)	0.05 g (40 ~ 60 mesh)
Temperature (°C)	30	
Inlet gas concentration (ppm, N <sub>2</sub> balance)	10 ± 1	26 ± 3
Space Velocity (GHSV, cm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> · g)	380,000	
Total Flow (mL min <sup>-1</sup> )	255	320

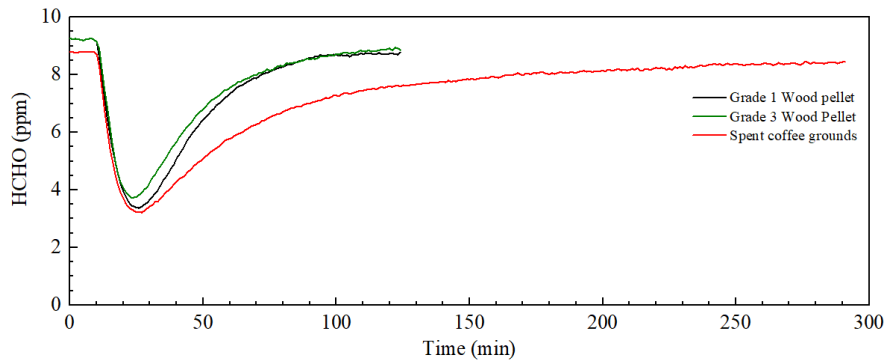


Figure 5. Breakthrough curves of formaldehyde for bio-carbons.

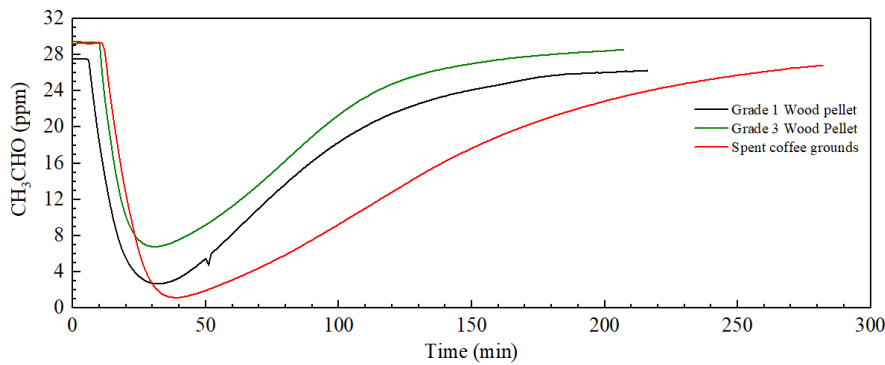


Figure 6. Breakthrough curves of acetaldehyde for bio-carbons.

의미한다[14].

### 3.2. 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 실험

Figure 5에 생산된 바이오카본을 이용한 포름알데하이드 흡착 파과 곡선을 나타내었다. 초기 모든 바이오카본에서 흡착되는 양은 약 60~64%로 큰 차이 없이 유사한 흡착량을 나타내었다. 반응 25분 이후로 모든 바이오카본에서 파과가 시작되는 것을 관찰할 수 있었다. 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본들은 흡착 및 파과 경향이 유사하게 나타났으며 약 125분경에 파과가 끝나는 것으로 관찰되었다. 반면 커피박 유래 바이오카본의 경우 Figure 5에 보이듯이 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본과 비교하여 상당히 느리게 파과되는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 커피박 유래 바이오카본의 포름알데하이드 흡착 성능이 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본보다 우수하다는 것을 나타내었다.

Figure 6에 생산된 바이오카본을 이용한 아세트알데하이드 흡착 파과 곡선을 나타내었다. 흡착 성능은 커피박 유래 바이오카본(96.1%) > 1급 목재펠릿 유래 바이오카본(90.3%) > 3급 목재펠릿 유래 바이오카본(77%) 순으로 나타났다. Figure 6에 나타나 있듯이 포름알데하이드 파과 곡선 경향과 동일하게 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본의 파과는 커피박 유래 바이오카본에 비해 빨리 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 이러한 결과로 포름알데하이드 및 아세트알데하이드와 같은 저분자 극성 휘발성 유기화합물들은 높은 비표면적만으로는 흡착이 잘 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 포름알데하이드 및 아세트알데하이드와 같은 극성 화합물을 효과적으로 흡착하기 위하여 활성탄에 질산이나 또는 질소를 포함한 화학물질 처리를 통해 활성탄 표면에 아민(amine)과 같은 질소를 포함한 기능기(functional group)를 존재하게 만든다. 이러한 기능기들이 포름알데하이드나 아세트알데하이드와 같은 저분자 극성 화합물과 결합되면서 화학적 흡착이 일어나는 것이다[15]. 커피박 유래 바이오카본의 경우 질소 함량이 약 4 wt.%로 추가적인 질소를 포함한 화학물질 전처리 없이도 표면에 질소가 분포할 것이 예상되어 FTIR로 분석을 실시하였

오카본(96.1%) > 1급 목재펠릿 유래 바이오카본(90.3%) > 3급 목재펠릿 유래 바이오카본(77%) 순으로 나타났다. Figure 6에 나타나 있듯이 포름알데하이드 파과 곡선 경향과 동일하게 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본의 파과는 커피박 유래 바이오카본에 비해 빨리 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 이러한 결과로 포름알데하이드 및 아세트알데하이드와 같은 저분자 극성 휘발성 유기화합물들은 높은 비표면적만으로는 흡착이 잘 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 포름알데하이드 및 아세트알데하이드와 같은 극성 화합물을 효과적으로 흡착하기 위하여 활성탄에 질산이나 또는 질소를 포함한 화학물질 처리를 통해 활성탄 표면에 아민(amine)과 같은 질소를 포함한 기능기(functional group)를 존재하게 만든다. 이러한 기능기들이 포름알데하이드나 아세트알데하이드와 같은 저분자 극성 화합물과 결합되면서 화학적 흡착이 일어나는 것이다[15]. 커피박 유래 바이오카본의 경우 질소 함량이 약 4 wt.%로 추가적인 질소를 포함한 화학물질 전처리 없이도 표면에 질소가 분포할 것이 예상되어 FTIR로 분석을 실시하였

Table 3. Textural properties of bio-carbons

Feedstocks	$S_{BET}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$V_{micro}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{meso}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{total}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )
Grade 1 wood pellet	787.8	0.2976	0.0996	0.3972
Grade 3 wood pellet	695.9	0.3183	0.1021	0.4204
Spent coffee grounds	544.3	0.2537	0.0783	0.3320

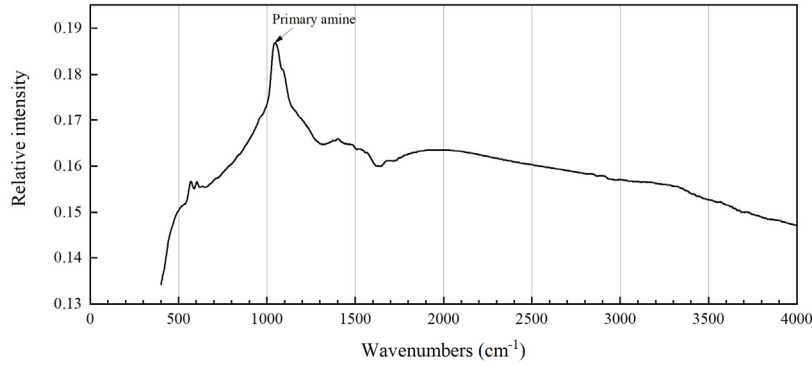


Figure 7. FTIR spectra of bio-carbon obtained from spent coffee grounds.

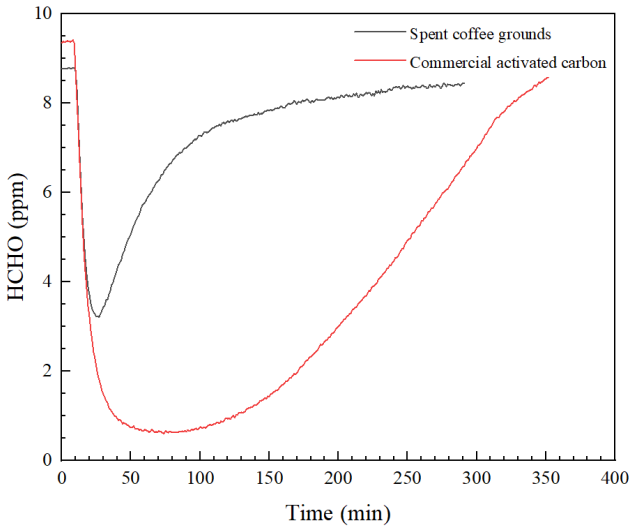


Figure 8. Breakthrough curves of formaldehyde for bio-carbons.

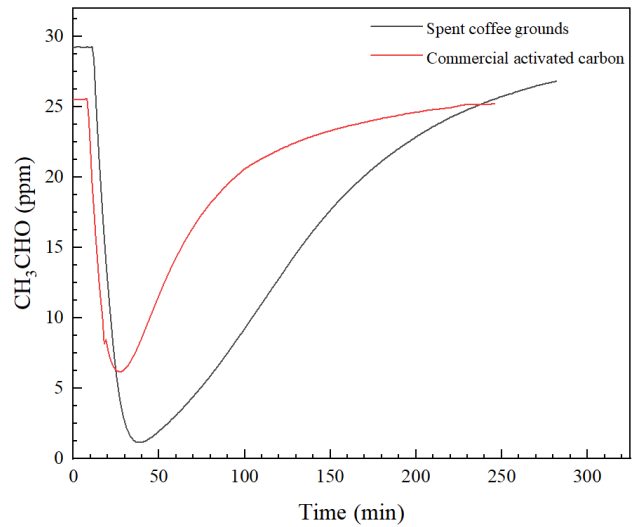


Figure 9. Breakthrough curves of acetaldehyde for bio-carbons.

다. Figure 7에 FTIR 분석 결과를 나타내었다. 1020~1070  $\text{cm}^{-1}$ 의 범위에서 피크가 관찰되었으며 이는 C-N stretch로 아민(amine) 기능이 존재함을 나타내었다[16]. 이러한 결과로 커피박 유래 바이오카본이 목질계 바이오매스 유래 바이오카본들에 비해 비표면적이 다소 낮더라도 기능기들의 존재로 인해 포름알데하이드 및 아세트알데하이드의 흡착 능력을 높여주는 역할을 한다고 판단된다.

### 3.3. 커피박 유래 바이오카본과 첨착 활성탄 비교

본 실험에 사용된 상용 첨착 활성탄은 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 처리용으로 (주)마디로부터 구매하였다. 첨착 활성탄의 VOCs 제거 성능 실험 조건은 이전 바이오카본들과 동일하게 하여 진행하였다. Figure 8과 9에 각각 상용 첨착 활성탄과 커피박 유래 바이오카본의 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 파과 곡선을 나타내었다. 포름알데하이드의 경우 상용 첨착 활성탄의 흡착률은 약 93 wt.%로 커피박 유래 바이오카본(약 63 wt.%)에 비해 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 반면 아세트알데하이드는 Figure 9에서 볼 수 있듯이 커피박 유래 바이오카본이 상용 첨착 활성탄보다 우수한 성능을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 커피박으로부터

생산한 바이오카본이 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거용 물질로의 사용 가능성이 충분히 있다고 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 1급 목재펠릿, 미이용 바이오매스인 3급 목재펠릿 및 커피박을 이용하여 이산화탄소 활성화를 통해 바이오카본을 생산하고 이를 통하여 저분자 극성 휘발성 유기화합물인 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 성능 실험을 수행하였다. 또한 상용 첨착 활성탄과 커피박으로부터 생산된 바이오카본의 VOCs 제거 성능 비교 실험도 수행하였다. 이러한 실험들을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 본 실험에서 1급 목재펠릿, 3급 목재펠릿 그리고 커피박의 이산화탄소 활성화를 통해 생산된 바이오카본의 비표면적은 1급 목재펠릿 유래 바이오카본이 약  $788 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 으로 가장 높게 나타났으며 회재 함량에 비례하여 비표면적이 낮아지는 경향이 관찰되었다.

2) 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 실험 결과 1급 및 3급 목재펠릿 유래 바이오카본보다 상대적으로 낮은 비표면적을 갖는 커피박 유래 바이오카본이 더욱 우수한 성능을

나타내었다. 이는 바이오카본 내 질소를 포함한 기능기가 포름알데하이드와 아세트알데하이드와 같은 저분자 극성 휘발성 유기화합물과의 흡착 반응에 기인한 것이라 판단된다.

3) 상용 침착 활성탄과 커피박 유래 바이오카본의 포름알데하이드 및 아세트알데하이드 제거 실험 결과 포름알데하이드는 상용 침착 활성탄이 우수한 반면 아세트알데하이드는 커피박 유래 바이오카본이 우수한 결과를 나타내었다. 이는 커피박 유래 바이오카본이 상용 침착 활성탄을 대체할 수 있는 가능성을 보여주었다고 판단된다.

## 감사

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “휘발성유기화합물(VOCs) 처리를 위한 CO<sub>2</sub> 활성 바이오카본 생산 및 최적화 기술개발(1/1) (kitech EI-21-0007)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

## References

- Noh, S. Y., Kim, K. H., Choi, J. H., Han, S. D., Kill, I. S., Kim, D. H., and Rhee, Y. W., “Adsorption Characteristics of VOCs in Activated Carbon Beds,” *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **24**(4), 455-469 (2008).
- Vellingiri, K., Kumar, P., and Kim, K. H., “Coordination Polymers: Challenges and Future Scenarios for Capture and Degradation of Volatile Organic Compounds,” *Nano Res.*, **9**(11), 3181-3208 (2016).
- Rengga, W. D. P., Sudibandriyo, M., and Nasikin, M., “Adsorption of Low-Concentration Formaldehyde from Air by Silver and Copper Nano-Particles Attached on Bamboo-Based Activated Carbon,” *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, **4**(5), 332-336 (2013).
- Ham, K. J., Park, M. S., and Choi, K. Y., “Investigation of Liquid Phase Formaldehyde Removal Efficiency by Enzymatic Formaldehyde Dehydrogenase and Catalytic Chemisorption Reactions,” *Appl. Chem. Eng.*, **28**(1), 50-56 (2017).
- Shin, S. K., Kang, J. H., and Song, J. H., “Removals of Formaldehyde by Silver Nano Particles Attached on the Surface of Activated Carbon,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(10), 936-941 (2010).
- Ryu, D. Y., Shimohara, T., Nakabayashi, K., Miyawaki, J., Park, J. I., and Yoon, S. H., “Urea/nitric Acid Co-impregnated Pitch-based Activated Carbon Fiber for the Effective Removal of Formaldehyde,” *J. Ind. Eng. Chem.*, **80**, 98-105 (2019).
- Baur, G. B., Yuranov, I., and Kiwi-Minsker, L., “Activated Carbon Fibers Modified by Metal Oxide as Effective Structured Adsorbents for Acetaldehyde,” *Catal. Today*, **249**, 252-258 (2015).
- Setter, C., Silva, F. T. M., Assis, M. R., Ataíde, C. H., Trugilho, P. F., and Oliveira, T. J. P., “Slow Pyrolysis of Coffee Husk Briquettes: Characterization of the Solid and Liquid Fractions,” *Fuel*, **261**, 116420 (2020).
- Rodríguez-Reinoso, F., Molina-Sabio, M., and González, M. T., “The Use of steam and CO<sub>2</sub> as Activating Agents in the Preparation of Activated Carbons,” *Carbon*, **33**(1), 15-23 (1995).
- Zhang, T., Walawender, W. P., Fan, L. T., Fan, M., Daugaard, D., and Brown, R. C., “Preparation of Activated Carbon from Forest and Agricultural Residues Through CO<sub>2</sub> Activation,” *Chem. Eng. J.*, **105**(1-2), 53-59 (2004).
- Namane, A., Mekarzia, A., Benrachedi, K., Belhaneche-Bensemra, N., and Hellal, A., “Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with ZnCl<sub>2</sub> and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,” *J. Hazard. Mater.*, **119**(1-3), 189-194 (2005).
- Jung, S. H., Oh, S. J., Choi, G. G., and Kim, J. S., “Production and Characterization of Microporous Activated Carbons and Metallurgical Bio-coke from Waste Shell Biomass,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **109**, 123-131 (2014).
- Jung, S. H., and Kim, J. S., “Production of Biochars by Intermediate Pyrolysis and Activated Carbons from Oak by three Activation Methods Using CO<sub>2</sub>,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **107**, 116-122 (2014).
- Daud, W. M. A. W., and Ali, W. S. W., “Comparison on Pore Development of Activated Carbon Produced from Palm Shell and Coconut Shell,” *Bioresour. Technol.*, **93**(1), 63-69 (2004).
- Liu, Y., Jia, H., Li, C., Sun, Z., Pan, Y., and Zheng, S., “Efficient Removal of Gaseous Formaldehyde by Amine-modified Diatomite: a Combined Experimental and Density Functional Theory Study,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **26**(24), 25130-25141 (2019).
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., and Ragadhita, R., “How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material,” *Indones. J. Sci. Technol.*, **4**(1), 97-118 (2019).