



표고버섯 농가 부산물 폐배지 기반 바이오차의 이산화탄소 흡착 연구

송규섭^{1),2)} · 김진성³⁾ · 박주형⁴⁾ · 노영훈³⁾ · 최영찬⁵⁾ · 이영주^{6)*} · 이규복^{7)*}

Carbon Dioxide Adsorption Study of Biochar Produced from Shiitake Mushroom Farm by-product Waste Medium

Gyuseob Song^{1),2)} · Jinseung Kim³⁾ · Juhyoung Park⁴⁾ · Younghoon Noh³⁾ ·
Youngchan Choi⁵⁾ · Youngjoo Lee^{6)*} · Kyubock Lee^{7)*}

Received 9 December 2023 Revised 23 January 2024 Accepted 8 February 2024 Published online 29 February 2024

ABSTRACT The present study investigated waste medium from a domestic shiitake mushroom farm, which was pyrolyzed to produce biochar. The yield rate of the biochar was compared after exposure to various pyrolysis temperature conditions, and the characteristics of the produced biochar were analyzed. The present study focused on the carbon dioxide (CO₂) adsorption capacity of the resulting biochar. The CO₂ adsorption capacity exhibited a correlation with the pyrolysis temperature of the biochar, with increasing temperatures resulting in higher CO₂ adsorption capacities. Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis showed that the CO₂ adsorption capacity was related to the surface area and pore volume of the biochar. Calcium is added to the process of producing mushroom medium. Experiments were performed to investigate the CO₂ adsorption capacity of the biochar from the waste medium with the addition of calcium. In addition, CO₂ adsorption experiments were conducted after the pyrolysis of kenaf biochar with the addition of calcium. The results of these experiments show that calcium affected the CO₂ adsorption capacity.

Key words Shiitake mushroom(표고버섯), Waste-medium(폐배지), Biochar(바이오차), Carbon dioxide adsorption(이산화탄소 흡착), Pyrolysis(열분해), Calcium(칼슘), Kenaf(케나프)

1) Student, Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University

2) Engineer, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research

3) Research student, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research

4) Post-doc Researcher, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research

5) Principal Researcher, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research

6) Senior Researcher, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research

7) Professor, Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University

*Co-corresponding authors: lyj3380@kier.re.kr (YJL)

Tel: +82-42-860-3233

kyubock.lee@cnu.ac.kr (KBL)

Tel: +82-42-821-8610

Fax: +82-42-821-8839

Nomenclature

cc : cubic centimeter [cm³]
 °C : celsius degree
 g : gram
 hr : hour
 L : liter
 min : minute
 mm : millimeter
 MPa : mega pascal
 ppm : parts per million

Subscript

IPA : isopropyl alcohol
 MFC : mass flow controller
 SW : shiitake waste-medium
 IPCC : intergovernmental panel on climate change
 CaO : calcium oxide
 CO₂ : carbon dioxide
 CCUS : carbon capture, utilization and storage
 GWP : global warming potential
 GHG : greenhouse gas
 NDC : nationally determined contributions

1. 서론

심각한 기후위기에 직면하였음에도 불구하고 전 세계적으로 온실가스(GHG, Greenhouse gas)의 주범으로 꼽히는 화석연료를 전체 에너지 소비량의 80% 이상 사용하고 있다. 반면 태양광과 풍력 등의 신재생에너지 사용량은 전체 에너지 소비량의 7.5%에 불과하다.^[1] 기후변화로 인한 지구의 온도는 지속적으로 상승하고 있으며, 2023년 7월은 역대 가장 뜨거운 달로 기록되었다. UN 사무총장(구테레스)은 지구 온난화(Global Warming) 시대가 끝나고 지구 열대화(Global Boiling) 시대가 도래했다고 표현하며, 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 어느 때보다 시급하다고 경고했다.^[2]

이러한 기후 변화에 대응하기 위해 전 세계는 국제 협력 차원의 대응을 진행해왔다. 최근 들어 2015년 제21차 당사국총회(COP21, 파리)에서 2020년부터 모든 국가가 참여하는 신기후체제의 근간이 될 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였다.^[3] 파리협정 달성을 위해 각 국가는 기후변화 대응과 온실가스 감축 목표를 작성한 NDC(Nationally Determined Contributions, 국가 결정 기여)를 제출하였다.

우리나라는 '18년 배출량(727.6백만 톤) 대비 40%(291백만 톤)를 감축하는 2030국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안을 2021년에 확정지어 탄소중립을 통한 기후변화에 적극적으로 대응 할 계획이다.^[4] 이를 위해 대한민국 정부는 한국형 탄소중립·녹색성장 비전과 추진전략을 발표하였다.^[5] 또한 한국형 탄소 중립 10대 핵심기술을 선정하였다.^[6] 선정된 기술 목록에는 태양광, 풍력, 수소공급, 무탄소 신전원, CCUS(Carbon Capture Utilization Storage) 등의 분야가 있다. 이 분야들 중 CCUS는 탄소를 포집, 저장, 활용하는 기술이며 글로벌 탄소 중립 달성을 위해 필요하다.^[7] 이산화탄소 흡착은 탄소흡착(Carbon Capture) 기술의 하나로, 온실가스인 이산화탄소를 흡착하여 탄소중립을 실현하는 기술이다. 이산화탄소 흡착 기술에는 흡착법, 흡수법, 막분리법 등의 기술이 연구되고 있다.

이산화탄소 흡착 기술의 하나인 바이오차(Biochar)는 바이오매스를 350°C 이상의 무산소 분위기(연소를 방지하기 위해)에서 열분해 한 것이다.^[8] 열분해 과정을 통해 바이오매스가 성장하는 과정에서 흡수한 이산화탄소를 외부로 배출시키지 않고 탄소의 형태로 고착화 시키는 기술이다. 바이오차는 IPCC에서 2019년 5월 바이오차 항목을 신설하는 등 국내·외 탄소 저장의 수단으로 인정되는 기술이며 다양한 연구가 진행되어왔다. 다양한 초본계·목본계 기반 바이오매스를 열분해하여 바이오차로 전환한 후 이산화탄소를 흡착하는 선행 연구가 있다.^[9] 해당 연구에서는 바이오매스를 600°C에서 3시간 동안 열분해하여 바이오차를 제조 후 이산화탄소 흡착에 관한 연구를 하였다. 또한 바이오매스의 열분해 온도에 따른 이산화탄소 흡착 능력을 비교한 선행 연구에서는 열분해 온도 조건을 500, 600, 700, 800°C로 하여 각 시료를 비교한 연구이며, 대체로 온도 상승에 따라 기공이 증가하였지만 800°C에서 기공이 감소하는 결

과를 얻었다.^[10]

국내 버섯 생산량은 2021년 기준 약 14만 톤으로 매년 비슷한 양이 생산 된다.^[11] 버섯 생산량의 약 5배가 폐배지로 발생되며^[12], 2021년 기준 약 70만 톤의 폐기물이 발생한다. 본 연구에서는 매년 많은 양이 발생되고 있는 버섯 폐배지를 활용하여 바이오차로 전환 후 이산화탄소를 흡착하는 연구를 수행하였다. 열분해 온도 조건은 350°C부터 700°C까지 50°C 간격으로 나누어 실험하였고, 목표 온도에서 1시간 동안 유지하였다. 이산화탄소 흡착 실험은 1500 ppm 농도의 이산화탄소 가스를 제조된 바이오차가 담긴 반응기에 투입하고, 배출되는 이산화탄소 농도를 측정하였다. 연구 결과 이산화탄소 흡착 능력은 폐배지 열분해 온도에 따라 증가하였다. 열분해 650°C 조건에서 생산된 폐배지 바이오차는 이산화탄소를 6.8406 mg/g 흡착하였다.

본 연구에서 사용되는 시료인 표고버섯 배지는 참나무 톱밥이 주원료이고 미강, 소맥피, 포도당, 칼슘, 패화석을 혼합하여 제조된다(Fig. 1 참조).^[13] 선행 연구(바이오매스 이용)와는 달리 폐배지에는 칼슘 및 패화석이 첨가되어 있다. 버섯배지의 구성물인 칼슘의 이산화탄소 흡착 영향을 알아보기 위해 산화칼슘(CaO)의 첨가 유무 비교 실험도 진행하였다. 본 연구 결과를 토대로 국내 폐기물 발생 및 탄소 배출 저감에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대하고 있다.



Fig. 1. Generation of mushroom waste media

2. 실험 방법

2.1 표고버섯 폐배지 바이오차 실험 방법

아래 Fig. 2는 바이오매스 열분해 실험 장비 사진이다. 해당 장비의 개략도는 Fig. 3으로 나타내었다.

시료는 국내 표고버섯 농가에서 발생하는 폐배지로 선정하였다. 이를 오븐에 105°C, 24시간 건조하였다. 건조된 시료를 반응기(Reactor) 내부에 넣고 질소가스(N₂, 99.99%)를 반응기에 퍼징(Purging)함으로써 반응기 내부 산소 농도를 낮추어 연소를 방지하였다. 질소 가스를 반응기 내부로 투입은 MFC기기(BROOKS instrument 5800E)를 사용하였다. 투입량은 100 cc/min으로 반응이 끝날 때까지 일정하게 투입하였다. 이를 통해 열분해 과정에서 발생하는 가스와 타르를 배출시킨다. 반응기 온도는 5°C/min으

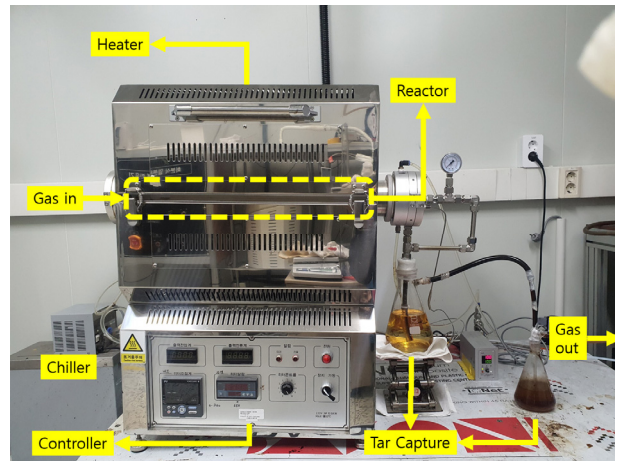


Fig. 2. Picture of biomass pyrolysis equipment

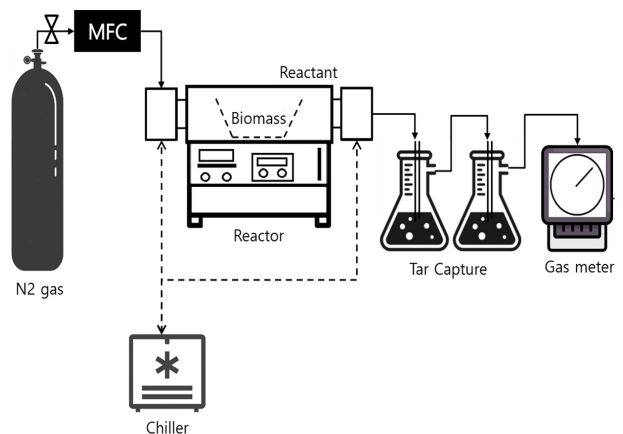


Fig. 3. Schematic diagram of biomass pyrolysis equipment

Table 1. Sample code of SW

| Sample Code | Treatment Temp (°C) | Heating time (min) | Residence time (min) |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| SW-Raw | - | - | - |
| SW-350 | 350 | 70 | 60 |
| SW-400 | 400 | 80 | 60 |
| SW-450 | 450 | 90 | 60 |
| SW-500 | 500 | 100 | 60 |
| SW-550 | 550 | 110 | 60 |
| SW-600 | 600 | 120 | 60 |
| SW-650 | 650 | 130 | 60 |
| SW-700 | 700 | 140 | 60 |

로 승온 시키고 목표 온도에 도달한 이후 1시간 동안 유지 시킨다. 실험 온도는 350°C부터 700°C까지 50°C 간격으로 실험하였고, 실험한 온도를 토대로 Sample Code를 Table 1과 같이 명명하였다. 폐배지 원시료의 경우 SW-Raw로 명명하였다.

2.2 이산화탄소 흡착 실험 방법

Fig. 4는 제조된 표고버섯 폐배지 기반 바이오차 이산화탄소 흡착 실험 장치 사진이다. 해당 장비의 개략도는 Fig. 5로 나타내었다.

폐배지 바이오차 이산화탄소 흡착 실험은 반응기(Reactor) 내부에 제조된 바이오차 시료를 동일한 무게로 넣고 진행하였다. 초기 반응기의 내부의 온도는 상온이고 압력은 대

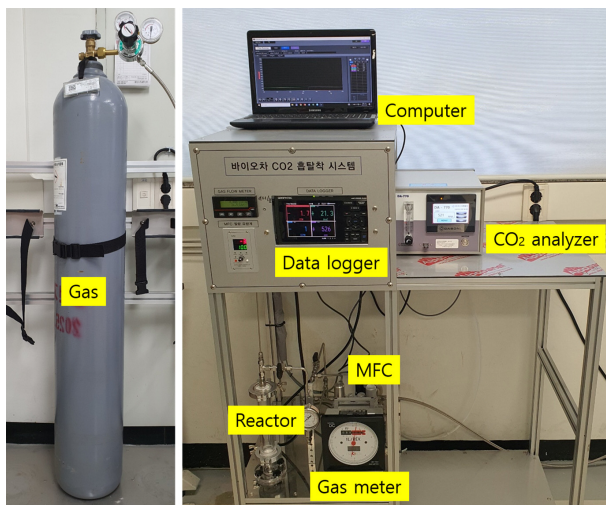


Fig. 4. Picture of carbon dioxide adsorption equipment

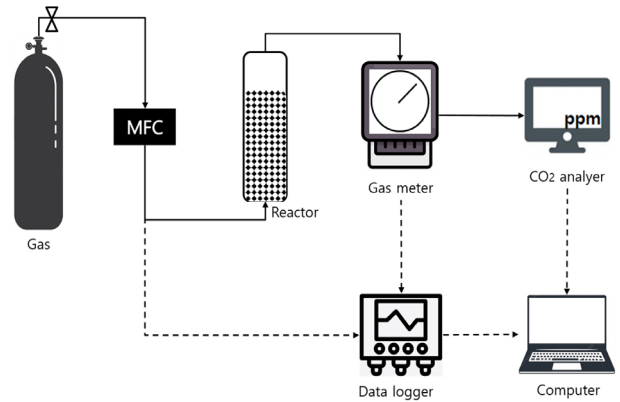


Fig. 5. Schematic diagram of carbon dioxide adsorption equipment

기압이다. 가스는 질소 기반의 이산화탄소 1500 ppm 농도의 가스를 사용하였다. 버섯 재배실 내부의 이산화탄소 농도가 1500 ppm 이상 올라가면 버섯의 성장이 원활하지 못하게 된다. 20%의 여유를 주어 버섯 재배실 이산화탄소 농도가 1200 ppm 이상으로 올라갈 경우 제조된 바이오차를 재배실에 투입하여 이산화탄소 농도를 줄이는 용도로 사용하는 것을 가정하여 1200 ppm 농도를 기준으로 흡착 실험을 진행하였다. 실험 전 이산화탄소 가스를 bypass 경로로 보내 CO₂ analyzer에서 측정값이 1500 ppm이 나오는 것을 확인한다. 이후 bypass 경로를 잠그고 시료가 든 반응기로 이산화탄소 가스를 100 cc/min의 유량으로 MFC기기 (BROOKS instrument 5800E)를 사용하여 투입시켰다. 배출되는 이산화탄소의 측정 농도값은 Data logger를 사용하여 기록하였으며 Computer에 연결하여 기록을 저장하였다.

2.3 케나프 산화칼슘 첨가 실험 방법

버섯 배지 생산에는 산화칼슘이 사용되며, 폐배지에도 산화칼슘이 존재한다. 산화칼슘에 의한 바이오매스의 기공 활성화와 이산화탄소 흡착 능력 영향에 대한 조사를 위해 원료에 산화칼슘이 없는 바이오매스(케나프)를 활용하여 연구를 수행하였다. 증류수에 산화칼슘을 표고버섯 폐배지 원시료에 포함된 산화칼슘의 비율과 동일하게 넣고 교반시켰다. Fig. 6은 초본계바이오매스인 케나프(kenaf)시료와 산화칼슘을 교반하는 사진이다. 이후 케나프 원시료를 넣어 2시간동안 교반시켰다. 이후 오븐에서 열에 의한 반응이 일어나지 않도록 저온으로(50°C) 건조시켜 시료를 준비하



Fig. 6. Picture of kenaf+CaO sample stirring

였다. 열분해 및 이산화탄소 흡착 실험의 경우 상기 서술한 표고버섯 폐배지의 열분해, 이산화탄소 흡착 실험 방법과 동일하게 실험하였다. 열분해의 경우 이산화탄소 흡착 능력이 가장 높았던 650°C로 열분해하였다. 첨가한 산화칼슘의 양은 버섯 폐배지에 포함된 산화칼슘의 양과 동일한 비율(6.54%wt)만큼 첨가하였다.

2.4 표고버섯 폐배지 산화칼슘 첨가 실험 방법

케나프 연구에 이어 표고버섯 폐배지 원시료에 추가적인 산화칼슘 첨가 영향을 조사하였다. 폐배지에 산화칼슘 용액을 첨가하고 교반시켰다. 첨가한 산화칼슘의 양은 버섯 폐배지 시료의 2%wt(Dry Basis)이다. 이후 표고버섯 폐배지 원시료를 넣어 2시간 동안 교반시켰다. 이후 오븐에서 열에 의한 반응이 일어나지 않도록 저온으로(50°C) 건조시켜 시료를 준비하였다. 해당 실험의 열분해 및 이산화탄소 흡착 실험 또한 상기 서술한 표고버섯 폐배지의 열분해(650°C) 및 이산화탄소 흡착 실험 방법과 동일하게 실험하였다.

3. 실험 결과

3.1 표고버섯 폐배지 바이오차 실험 결과

열분해 전 투입한 원시료의 무게와 열분해 후 생성된 바이오차의 무게를 측정하였다.

바이오차 수율(%)

$$= \frac{\text{열분해 후 생성된 바이오차의 무게}}{\text{열분해 전 원시료 무게}} \times 100 \quad (1)$$

위의 식을 통해 바이오차 수율(Biochar Yield)을 구하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Yield of biochar

| Sample Code | Biochar Yield (%) |
|-------------|-------------------|
| SW-350 | 48.16 |
| SW-400 | 41.84 |
| SW-450 | 41.02 |
| SW-500 | 40.29 |
| SW-550 | 39.61 |
| SW-600 | 36.92 |
| SW-650 | 34.85 |
| SW-700 | 33.18 |

온도가 상승함에 따라 바이오차 수율은 감소하였다. 350°C로 처리한 시료의 수율은 원시료 대비 48.16%였고, 400°C로 처리한 시료의 수율은 41.84%로 감소율이 컸지만, 이후 550°C까지는 감소율이 작았다. 그리고 550°C이후 구간에서는 감소율이 증가하는 경향을 보였다.

3.2 이산화탄소 흡착 실험 결과

버섯 폐배지 원시료(SW-Raw)를 제외한 모든 바이오차 시료는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 1500 ppm에서 시작한 이

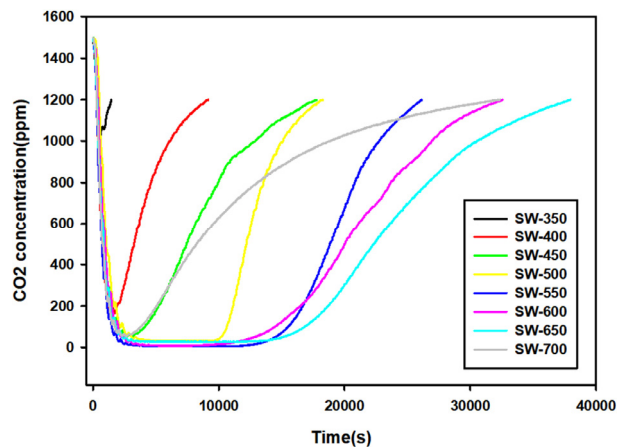


Fig. 7. Carbon dioxide adsorption experiment graph of waste media sample (ppm)

산화탄소 농도가 낮아진 뒤 일정 수준 하락하였다가 다시 복귀하는 경향을 나타내었다.

SW-350 시료의 경우 다른 시료들에 비해 낮은 이산화탄소 흡착 능력을 나타내었다. SW-400 시료부터 이산화탄소 흡착 능력이 뚜렷이 나타났으며, 이후 SW-650 시료 까지 이산화탄소 흡착 능력이 점차 증가하였다. SW-700 시료는 흡착 능력이 다시 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 700°C 이상의 고온에서 온도 상승으로 인해 기공이 구조적으로 정렬되고 합쳐져 표면적이 감소한다는 선행연구 결과와 유사하다.^[10]

해당 실험에서 CO₂ analyzer에서 측정되는 data를 바탕으로 이산화탄소 흡착량과 흡착률을 계산하였다. 먼저 이산화탄소 흡착률을 식 (2)로 정의한다.

$$\frac{(\text{인입 이산화탄소 무게} - \text{배출 이산화탄소 무게})}{(\text{인입 이산화탄소 무게} \times 100)} \quad (2)$$

위 식에서 인입 이산화탄소 무게는 식 (3), 배출 이산화탄소 무게는 식 (4)로 정의한다.

$$\frac{(\text{Molecular Weight of CO}_2) \times (\text{inlet CO}_2 \text{ ppm})}{(n) \times (R) \times (T)} \quad (3)$$

$$\frac{(\text{Molecular Weight of CO}_2) \times (\text{output CO}_2 \text{ ppm})}{(n) \times (R) \times (T)} \quad (4)$$

위 식에서 Molecular Weight of CO₂는 이산화탄소의 몰 질량으로 44.01(g/mol)이고, inlet CO₂ ppm은 인입 이산화탄소 ppm값이고, output CO₂ ppm은 배출 이산화탄소 ppm값이다. n은 (CO₂ 분자 몰 수*10⁶)/(전체 기체 분자 몰 수)이다. R은 이상기체상수(0.08206, Latm/Kmol)다. T는 켈빈온도(273+측정온도 섭씨, K)다.

식 (3), (4)를 통합해 총 흡착 시간 동안의 인입 이산화탄소 무게와 흡착 후 배출된 이산화탄소 무게를 계산하였다. 또한 위 식들을 통해 원시료 및 바이오차 샘플의 이산화탄소 흡착량을 계산하고 Fig. 8에 나타내었다.

시료의 무게 대비 흡착하는 이산화탄소 무게(mg/g)의 경우 대체로 열분해 온도가 증가함에 따라 흡착되는 이산화탄소의 무게도 증가하였다. 열분해 온도가 350°C에서 400°C,

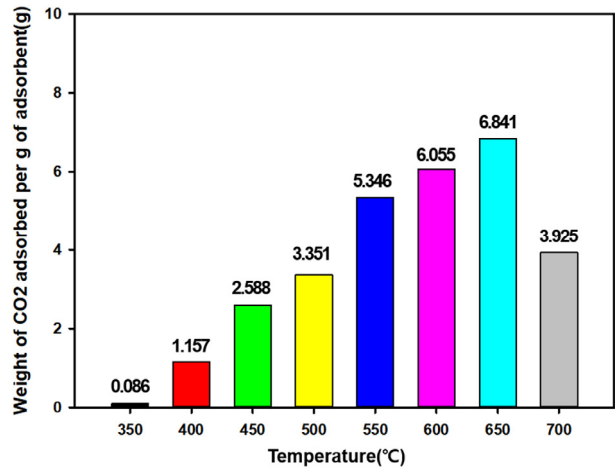


Fig. 8. Carbon dioxide adsorption amount graph of SW sample (mg/g)

500°C에서 550°C로 증가할 때 증가율이 상대적으로 증가하였다. 반면 열분해 온도가 650°C에서 700°C로 증가하였을 경우 흡착되는 이산화탄소 무게는 낮아졌다. 이는 650°C 이상의 온도에서 열분해하면 이산화탄소를 흡착하는 기공이 감소하는 것으로 판단된다.

3.3 BET 분석 결과

SW-Raw 시료의 경우 이산화탄소 흡착 실험에서 유의미한 변화가 없었으며 BET 분석 결과 또한 표면적(BET surface area)은 1.7062 m²/g, 전체 기공 부피(total pore volume)는 0.0150 cm³/g으로 다른 시료들과 비교하여 가장 낮다. SW-350 시료부터 표면적, 전체 기공 부피 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 앞선 이산화탄소 흡착 실험에서

Table 3. BET Analysis

| Sample Code | BET surface area (m ² /g) | total pore volume (cm ³ /g) | Average pore diameter (nm) |
|-------------|--------------------------------------|--|----------------------------|
| SW-Raw | 1,7062 | 0,0150 | 17,551 |
| SW-350 | 4,5483 | 0,0226 | 9,9417 |
| SW-400 | 6,0656 | 0,0257 | 8,4600 |
| SW-450 | 7,9219 | 0,0312 | 7,8845 |
| SW-500 | 12,177 | 0,0401 | 6,5932 |
| SW-550 | 17,321 | 0,0419 | 4,8352 |
| SW-600 | 29,710 | 0,0468 | 3,1489 |
| SW-650 | 41,630 | 0,0552 | 2,6543 |
| SW-700 | 41,423 | 0,0525 | 2,5365 |

도 SW-350 시료부터 열분해 처리 온도 상승에 따른 이산화탄소 흡착 능력이 증가하였다. 또한 이산화탄소 흡착 능력이 가장 좋았던 SW-650 시료의 경우 표면적은 41,630 m²/g, 전체 기공 부피는 0.0552 cm³/g으로 가장 높다. SW-700 시료의 경우 이산화탄소 흡착 능력이 줄었으며 BET 분석결과 표면적은 41,423 m²/g, 전체 기공 부피 또한 0.0525 cm³/g으로 SW-650 시료에 비해 감소하는 경향을 보였다. 이처럼 폐배지 기반 바이오차 시료의 경우 BET 분석 결과, 표면적과 전체 기공 부피는 이산화탄소 흡착 능력 실험 결과와 경향성이 유사하다. 이는 바이오차의 기공 부피는 이산화탄소 흡착 능력과 유의미한 관계가 있다^[14]는 선행연구와 유사하다.

이산화탄소 흡착 능력은 표면 구조, 0.8 nm 미만의 미세기공, 염기성 표면 작용기 등 다양한 요인이 작용한다.^[15] 열분해 온도가 700°C 증가할 때 기공이 구조적으로 정렬되고 합쳐져 바이오차 표면적이 감소한다.^[16] 따라서 700°C 열분해 시료의 경우 기공 부피와 표면적 요인뿐만 아니라 높은 열분해 온도를 거치며 변경된 기공 구조와 표면에 의해 이산화탄소 흡착 능력이 낮았다.

3.4 케나프 산화칼슘 첨가 실험 결과

버섯배지를 제조할 때 폐화석 등이 첨가된다. 여기서 폐화석의 주성분은 산화칼슘(CaO)으로 염기성 물질이다. NaOH, KOH와 같은 염기성 물질을 첨가하여 열분해를 하면 탄소의 기공을 활성화 시킨다.^[17] 폐배지 바이오차의 우수한 이산화탄소 흡착 능력은 단순히 열분해에 의한 효과가 아니라 기 첨가된 산화칼슘의 영향이라는 가설을 세웠다. 이를 알아보기 위해 산화칼슘이 첨가되어있지 않은 다른 바이오매스(케나프)를 이용해 실험하였다. 케나프 원시료(K-Raw), 케나프 650°C 열분해 시료(K-650), 케나프 원시료와 산화칼슘 혼합 시료(K-C), 케나프 원시료와 산화칼슘 혼합 후 650°C 열분해 시료(K-C-650)를 실험하였고, 샘플 명을 Table 4와 같이 명명하였다.

이산화탄소 흡착 실험 결과를 Table 5에 나타내었다. 케나프 원시료(K-Raw) 및 케나프 원시료와 산화칼슘을 단순 혼합한 샘플(K-C)의 경우 유의미한 이산화탄소 흡착 능력이 없었다. 케나프를 열분해만 한 시료(K-650)의 경우 이산화탄소 흡착 능력을 보였으나 버섯 폐배지를 같은 온도

Table 4. Sample code of kenaf+CaO

| Sample Code | Treatment Temp (°C) | Heating time (min) | Residence time (min) |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| K-Raw | - | - | - |
| K-C | - | - | - |
| K-650 | 650 | 130 | 60 |
| K-C-650 | 650 | 130 | 60 |

Table 5. CO₂ adsorption capacities of kenaf+CaO sample

| Sample Code | Adsorption capacities (mg/g) |
|-------------|------------------------------|
| K-Raw | 0.0660 |
| K-C | 0.0843 |
| K-650 | 2.9471 |
| K-C-650 | 8.0469 |

조건으로 열분해 한 시료(SW-650)보다는 낮은 흡착 능력을 보였다. 케나프 원시료에 산화칼슘을 첨가하고 열분해를 한 시료(K-C-650)의 경우 케나프 열분해만 한 시료(K-650)와 비교하여 이산화탄소 흡착 능력이 더 높았다. 이 연구를 통해 강염기 물질을 사용하지 않더라도 산화칼슘이 바이오매스의 기공을 활성화하고 이산화탄소 흡착 능력을 높이는 것을 알 수 있었다.

3.5 표고버섯 폐배지 산화칼슘 첨가 실험 결과

바이오매스에 산화칼슘 첨가 후 열분해를 하면 이산화탄소 흡착 능력이 증가하는 것을 상기 서술한 실험에서 확인하였다. 버섯 폐배지에 추가적으로 산화칼슘을 첨가하여 산화칼슘 농도에 따른 이산화탄소 흡착 능력을 비교하였다. 버섯 폐배지 원시료(SW-Raw)와 산화칼슘을 혼합한 시료(SW-C), 버섯 폐배지 650°C 열분해한 시료(SW-650), 버섯 폐배지 원시료와 산화칼슘 혼합 후 650°C 열분해 시료(SW-C-650)를 실험하였고, 샘플 명을 Table 6과 같이 명명하였다.

이산화탄소 흡착 실험 결과를 Table 7에 나타내었다. 버섯 폐배지 원시료(SW-Raw)와 버섯 폐배지에 산화칼슘을 단순 혼합한 시료(SW-C)의 경우 유의미한 이산화탄소 흡착 능력이 없었다. 버섯 폐배지에 산화칼슘을 첨가하고 열분해를 한 시료(SW-C-650)는 버섯 폐배지를 열분해만 한 시료(SW-650)와 비교하여 더 높은 이산화탄소 흡착 능력

Table 6. Sample code of SW+CaO

| Sample Code | Treatment Temp (°C) | Heating time (min) | Residence time (min) |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| SW-Raw | - | - | - |
| SW-C | - | - | - |
| SW-650 | 650 | 130 | 60 |
| SW-C-650 | 650 | 130 | 60 |

Table 7. CO₂ adsorption capacities of SW+CaO sample

| Sample Code | Adsorption capacities (mg/g) |
|-------------|------------------------------|
| SW-Raw | 0.0125 |
| SW-C | 0.0491 |
| SW-650 | 6.8406 |
| SW-C-650 | 13.3483 |

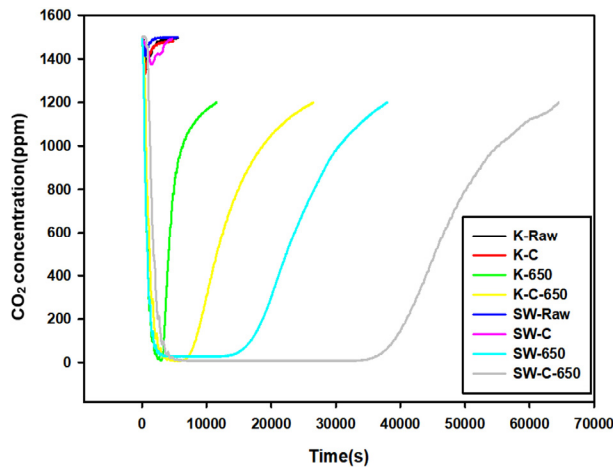


Fig. 9. Carbon dioxide adsorption experiment graph of CaO added sample (ppm)

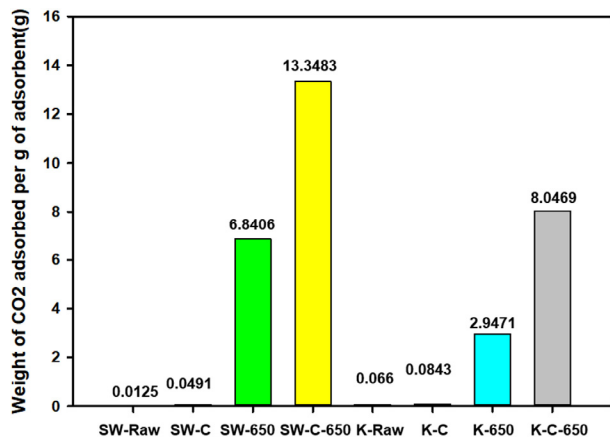


Fig. 10. Carbon dioxide adsorption amount graph of CaO added sample (mg/g)

을 보였다. 따라서 산화칼슘을 단순 혼합하기만 해서는 이산화탄소 흡착 능력에 차이가 미비하지만 열분해를 할 경우, 산화칼슘이 바이오매스의 기공 형성을 촉진시키고 형성된 기공으로 인해 이산화탄소 흡착 능력이 향상된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 표고버섯 농가에서 발생하는 폐기물인 표고버섯 폐배지를 열분해하여 바이오차로 전환하고 이의 이산화탄소 흡착 능력을 연구하였다. 이를 통해 폐기물(버섯 폐배지) 발생을 줄이는 동시에 이산화탄소를 흡착하여 온실가스를 줄여 지구 열대화(Global Boiling) 방지에 일조하고자 한다. 폐배지 열처리 온도별 바이오차 수율(Biochar Yield), 이산화탄소 흡착 능력을 비교하고 확인하였다. 바이오차 수율의 경우 열분해 온도가 상승할수록 수율은 낮아졌다. 이산화탄소 흡착량은 원시료(SW-Raw)에서는 이산화탄소가 흡착되지 않았다. SW-350부터 흡착하였으나 다른 시료들에 비해 흡착량이 낮았다. SW-450에서 SW-550까지 흡착량이 상승하였다. 이후 SW-550에서 SW-650까지 흡착량은 비교적 높았다. 이후 SW-700에서의 흡착량은 줄었다.

표고버섯 폐배지 시료 내 첨가된 산화칼슘이 이산화탄소 흡착에 미치는 영향을 알아보기 위해 산화칼슘 첨가 실험을 진행하였다. 목질계 바이오매스 기반인 표고버섯 폐배지에 산화칼슘을 첨가하는 것뿐만 아니라 초본계 바이오매스인 케나프에도 산화칼슘 첨가 실험을 진행하였다. 실험 결과 산화칼슘을 단순 혼합하는 경우 이산화탄소 흡착 능력에 영향이 미비하였다. 산화칼슘 첨가 후 열분해를 한 시료의 경우 폐배지 시료와 케나프 시료 둘 다 이산화탄소 흡착 능력이 증가하였다. 이를 통해 이산화탄소 흡착 능력은 산화칼슘 첨가 후 열분해를 통한 기공의 활성화에 영향을 받는 것을 확인하였다.

버섯배지를 만드는 과정에서 필연적으로 첨가되는 산화칼슘으로 이산화탄소 흡착 능력이 다른 폐기물이나 바이오매스에 비해 뛰어나다는 것을 알 수 있었으며, 이는 국내에서 매년 약 70만 톤 발생 되는 폐기물인 버섯 폐배지를 이산화탄소 흡착원으로 활용할 가능성이 있다는 것을 시사한다.

감사의 글

본 논문은 중소벤처기업부의 Net-zero 기술혁신개발사업(RS-2022-00165586)의 지원으로 수행하였습니다.

References

- [1] Energy Institute, 2023, “Statistical review of world energy”, EI, <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- [2] UN News, “Hottest July ever signals ‘era of global boiling has arrived’ says UN chief”, 2023.07.27.
- [3] United Nations, 2015, “Adoption of the Paris agreement”, Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://digitallibrary.un.org/record/831039#record-files-collapse-header>.
- [4] Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Korea, Ministry of Environment of the Republic of Korea, 2021, “The Republic of Korea’s enhanced update of its first nationally determined contribution”, <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?jsessionid=kuBX9EAZQVf8JJrVkEWBsTwA.mehome1?pagerOffset=1270&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10525&orgCd=&boardId=1497320&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=>.
- [5] Korea government, 2022, “Announced its vision and strategy for zero-carbon and green growth”, Secretariat of the Council of Ministers 2050 Carbon-Free and Green Growth Committee, General Directorate of Planning and Strategy, <https://me.go.kr/home/web/board/read.do?jsessionid=Usk1SitbV5ms4vdEoyq0G8G0.mehome2?pagerOffset=210&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=titleOrContent&searchValue=%EA%B8%B0%ED%9B%84&menuId=10525&orgCd=&boardId=1556310&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>.
- [6] Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea, 2023, “Confirmed 100 core technologies for Korean carbon neutrality and presented a blueprint for full-scale carbon neutral technology development”, <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=238&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3183074>.
- [7] International Energy Agency (IEA), 2021, “Net zero by 2050 a roadmap for the global energy sector”, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019, “Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: Basis for future methodological development”, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf.
- [9] Cao, L., Zang, X., Xu, Y., Xiang, W., Wand, R., Ding, F., Hong, P., and Gao, B., 2022, “Straw and wood based biochar for CO₂ capture: Adsorption performance and governing mechanisms”, *Sep. Purif. Technol.*, **287**, 120592.
- [10] Chatterjee, R., Sajjadi, B., Chen, W.Y., Mattern, D.L., Hammer, N., Raman, V., and Dorris, A., 2020, “Effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties and acoustic-based amination of biochar for efficient CO₂ adsorption”, *Front. Energy Res.*, **8**.
- [11] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2022, “Agriculture and food key statistics”, <https://www.atfis.or.kr/home/board/FB0028.do?act=read&subSkinYn=N&bpoId=4603&bcaId=0&pageIndex=1>.
- [12] Industry Academic Cooperation Foundation of Gyeongnam National University of Science and Technology, 2014, “Feed using mushroom waste medium and method of producing the same”, KR Patent No. 1020140064173, May 30, 2014.
- [13] Jangheung-gun Agricultural Technology Center, 2012, “Method for fast-growing of shiitake”, KR Patent No. 101182998, September 7, 2012.
- [14] Dissanayake, P.D., You, S., Igalavithana, A.D., Xia, Y., Bhatnagar, A., Gupta, S., Kua, H.W., Kim, S., Kwon, J.H., and Tsang, D.C.W., *et al.*, 2020, “Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical

- review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **119**, 109582.
- [15] Singh, G., Lee, J., Karakoti, A., Bahadur, R., Yi, J., Zhao, D., AlBahily, K., and Vinu, A., 2020, “Emerging trends in porous materials for CO₂ capture and conversion”, *Chem. Soc. Rev.*, **49**(13), 4360-4404.
- [16] Kumar, U., Maroufi, S., Rajarao, R., Mayyas, M., Mansuri, I., Joshi, R.K., and Sahajawalla, V., 2017, “Cleaner production of iron by using waste macadamia biomass as a carbon resource”, *J. Clean. Prod.*, **158**, 218-224.
- [17] Lee, D.W., Jin, M.H., Park, J.H., Lee, Y.J., and Choi, Y.C., 2018, “Flexible synthetic strategies for lignin-derived hierarchically porous carbon materials”, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **6**(8), 10454-10462.