



표고버섯 폐배지의 반탄화 및 세척 공정을 통한 바이오매스 연료 품질 향상 연구

송규섭¹⁾ · 김진성²⁾ · 박주형³⁾ · 노영훈²⁾ · 최영찬⁴⁾ · 이영주^{4)*}

Study on Improving Biomass Fuel Quality via Torrefaction and Washing of Used-Shiitake Mushroom-media

Gyuseob Song¹⁾ · Jinseung Kim²⁾ · Juhyoung Park³⁾ · Younghoon Noh²⁾ · Youngchan Choi⁴⁾ · Youngjoo Lee^{4)*}

Received 25 May 2025 Revised 11 July 2025 Accepted 28 July 2025 Published online 10 September 2025

ABSTRACT We investigated efficient utilization of shiitake mushroom medium as a sustainable biomass fuel to address rural heating needs and enhance waste management in Korea. To render shiitake mushroom media suitable for use as a fuel, its calorific value and stability during combustion must be increased. A torrefaction study aimed at meeting these requirements increased calorific value from 3,310 kcal/kg of raw material to a maximum of 4,880 kcal/kg in the processing temperature range 150 to 300°C. A washing process using citric acid, which is an acid catalyst, was used to remove potassium and chlorine, which are the main causes of fouling and high-temperature corrosion inside boilers during combustion. Washing with citric acid at 80°C for 10 min removed potassium and chlorine with respective efficiencies of 72.31% and 83.57%. The above results confirm that proper torrefaction and acid-washing can improve the fuel quality of shiitake mushroom media. Further research is planned to study and optimize the integration of torrefaction and acid-washing processes.

Key words Shiitake mushroom(표고버섯), Used-mushroom-media(버섯 폐배지), Biomass fuel(바이오매스 연료), Torrefaction(반탄화), Chlorine removal(염소 제거), Potassium removal(칼륨 제거)

Nomenclature

wt% : weight percent

- 1) Engineer, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research
- 2) Research Student, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research
- 3) Senior Researcher, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research
- 4) Principal Researcher, Clean Air Research laboratory, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding author: lyj3380@kier.re.kr

Tel: +82-42-860-3233

Fax: 0504-414-9755

min : minute

rpm : revolutions per minute

O/C : oxygen to carbon molar ration

H/C : hydrogen to carbon molar ration

ppm : parts per million; 1ppm=1/10⁶

Subscript

raw : raw sample

Cl : chlorine

K : potassium

- C : carbon
- H : hydrogen
- O : oxygen

1. 서론

인간활동에 의한 온실가스로 기후변화가 발생하고 있으며, 이러한 온실가스 배출로 인한 폭우·폭설 등 극심한 기상현상이 발생하고 있다.^[1] 뿐만 아니라 우리나라가 속한 동아시아에서는 2,000년대 이후 한파 빈도가 증가하였으며 기후 변동성이 가속화 되었다.^[2] 한파 빈도 증가로 인해 겨울철 난방의 중요성은 높아지고 있다.

기후변화로 인한 겨울철 난방 수요 증가는 국내 도시 지역과 농촌 지역의 지역적 격차를 부각시키고 있다. 농촌 지역은 도시 지역 대비 도시 가스 사용 비율이 낮을 뿐만 아니라(도시 72.5%, 농촌 41.7%), 별도로 연탄보일러, 화목보일러를 약 10만 가구가 사용하고 있다.^[3] 농촌 지역에서는 난방을 위한 목재 펠릿 수요로 인해 농촌지역 주택용으로 보급된 목재펠릿 연소기는 약 3만대이다.^[4] 하지만 우리나라는 24년 기준 목재 펠릿을 약 280만톤을 수입하고, 약 62만 톤을 국내 생산하여 자급률이 18.1%에 불과하다.^[5] 이러한 배경 하에 우리나라 정부는 농촌 지역에 난방용 연료를 지원하는 정책을 시행하고 있으며, 농촌 지역에서 발생하는 바이오매스를 활용하여 연료용 목재 펠릿을 대체하는 다양한 연구가 진행되고 있다.^[6]

국내 농촌 지역의 버섯 생산량은 2023년 기준 154,625 톤으로 매년 비슷한 양이 생산된다.^[7] 버섯 생산량의 약 5배가 버섯 폐배지로 발생되며,^[8] 이는 버섯 농가에서는 매년 약 75만 톤의 버섯 폐배지가 발생하는 것으로 산출된다(Fig. 1). 이러한 버섯 폐배지는 재사용 시 영양분 손실로 인해 버섯 상품성이 저하되므로 폐배지를 재사용하지 않으며, 버섯 농가에서는 발생하는 폐배지를 폐기물 처리 비용을 지불하여 폐기하거나 방치하고 있는 실정이다. 방치로 인해 버섯 농가 및 인근 가구에서는 해충, 악취로 인한 피해가 우려된다(Fig. 2).

본 연구에서는 표고버섯 스마트팜에서 발생하는 표고버섯 폐배지를 연료로 활용하기 위한 방안을 연구하였다. 표

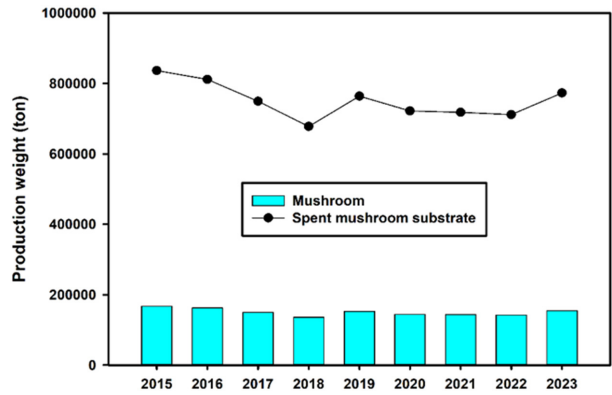


Fig. 1. Domestic mushroom production & generation of spent mushroom substrate



Fig. 2. Used-shiitake mushroom-media

고버섯 배지는 참나무 톱밥(바이오매스)이 주원료이고 영양소 공급을 위해 칼슘, 패화석 등을 첨가하여 제조된다.^[9] 재배 후에도 주원료와 첨가물의 특성은 그대로 유지되며, 해당 폐배지를 난방용 보일러 연료로 활용하기 위한 연구를 진행하였다.

보일러 연료로 사용하기 위해서는 발열량과 회분 함량이 연소 효율에 큰 영향을 미친다.^[10] 게다가, 바이오매스 내 염소(Cl)와 칼륨(K) 성분은 보일러 내 고온부식과 파울링(fouling) 현상을 유발하여 열전달 효율 저하 및 운전 안전성에 영향을 미친다.^[11] 따라서 바이오매스 연료를 난방용 보일러 연료로 사용 시 발열량을 증가시키고 염소와 칼륨 성분을 감소시킨다면 난방 효율과 운전 안전성이 증가된다. 따라서 본 연구에서는 바이오매스인 표고버섯 폐배지 시료의 발열량 증가와 염소 및 칼륨 성분 감소에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 표고버섯 폐배지의 발열량 증가 실험과 염소(Cl) 및 칼륨(K) 성분 제거 실험을 수행하였다. 실험 전 표고버섯 폐배지 원시료를 분쇄한 후 불순물 제거 및 입자 크기를 균일화하기 위해 체로 걸러(600 μm ~3.35 mm) 실험을 수행하였다. 함수율을 일정하게 하기 위해 105°C 오븐에서 건조시킨 후 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 표고버섯 폐배지 원시료의 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 논문에서의 발열량은 모두 저위발열량을 말하며, 이는 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 시행규칙 별표7의 고형연료제품의 품질기준에서 발열량은 저위발열량으로 환산한 기준을 적용하기 때문이다.

Table 1. Raw material analysis result

Analysis Category	Analysis Result	Unit
Heating Value	3,310	kcal/kg
Cl	2,100	mg/kg
K	7,772	mg/kg

2.1 반탄화 연구

바이오매스 반탄화(Torrefaction)는 200~300°C의 온도 범위, 불활성 또는 산소가 부족한 환경에서 바이오매스를 서서히 가열하는 공정이며, 이 과정에서 수분 및 휘발분이 제거되고 발열량이 증가한다.^[12] 표고버섯 폐배지의 발열량 증가 실험을 위해 150, 200, 250, 300°C 각각의 온도로 반탄화를 진행하였으며, 해당 조건의 샘플명을 Table 2에 나타내었다.

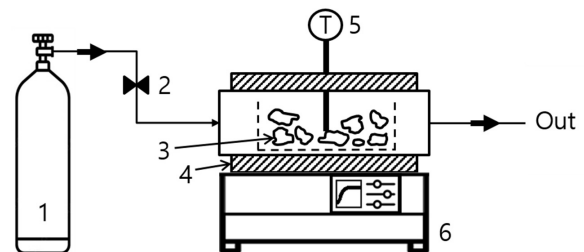
반탄화에 사용된 장비의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 시료가 든 반응기 내부를 불활성 가스인 질소가스로 퍼징(purging)하여 산소를 제거하였고, 반응기 외부 전기히터

Table 2. Sample name for calorific value experiment

Sample Name	Target Temperature (°C)	Heating Time (min)	Holding Time (min)
SW-T-150	150	30	60
SW-T-200	200	40	60
SW-T-250	250	50	60
SW-T-300	300	60	60



Fig. 3. Torrefier



(1) Nitrogen gas, (2) Valve, (3) Raw sample, (4) Electric Heater, (5) Thermocouple, (6) Controller

Fig. 4. Schematic of torrefier

로 내부의 온도를 조절하였다. 승온 시간은 5°C/분으로 설정하였으며 목표 온도 도달 후 1시간 동안 유지하였다. 유지시간 종료 후 자연 냉각한 뒤 샘플을 회수하였다.

2.2 염소 및 칼륨 제거 연구

바이오매스 내 염소와 칼륨 성분을 제거하기 위한 다양한 선행 연구가 존재한다. 바이오매스의 알칼리 성분 중 약



Fig. 5. Cl and K removal reactor

90%가 수용성 형태이기 때문에 물 세척으로 염소와 칼륨이 제거된다.^[13] 따라서 바이오매스를 주원료로 하는 표고버섯 폐배지의 염소 및 칼륨 제거를 위한 세척 실험을 수행하였다. 아울러 교반 조건, 온도 변화, 촉매 사용에 따른 영향을 평가하기 위한 실험도 진행하였다. 이러한 실험에 사용된 반응기의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다.

증류수로 세척하여 표고버섯 폐배지 내 염소 및 칼륨 성분 제거 실험을 수행하기 위해, 반응기 내에 증류수와 시료를 넣고 30, 60분 동안 침지하여 실험을 진행하였다. 온도는 상온에서 실험하였으며, 해당 샘플명을 Table 3에 나타내었다.

또한 세척 시 혼합의 영향을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 세척 실험과 동일하게 시료를 물에 침지한 후, 10, 20, 30, 40, 50, 60분 동안 상온에서 교반하였다. 각 실험 조건에 대한 샘플명은 Table 4에 나타내었다.

다음으로 세척 시 온도의 영향을 평가하기 위한 실험을

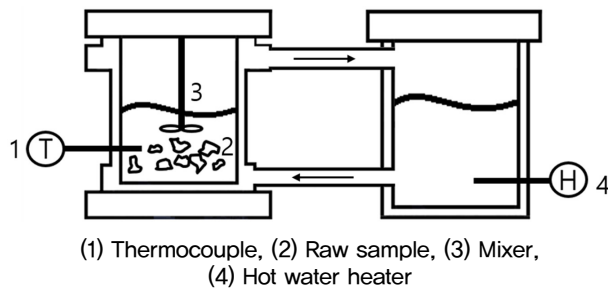


Fig. 6. Schematic of Cl and K removal reactor

Table 3. Sample name for soaking experiment

Sample Name	Soaking Time (min)	Water Temperature (°C)
SW-W-30	30	Room temperature
SW-W-60	60	Room temperature

Table 4. Sample name for agitation experiment

Sample Name	Residence Time (min)	Water Temperature (°C)	Stirring Speed (rpm)
SW-S-10	10	Room temperature	1,000
SW-S-20	20	Room temperature	1,000
SW-S-30	30	Room temperature	1,000
SW-S-40	40	Room temperature	1,000
SW-S-50	50	Room temperature	1,000
SW-S-60	60	Room temperature	1,000

Table 5. Sample name for washing temperature experiment

Sample Name	Washing Temperature (°C)	Holding Time (min)
SW-H-40	40	60
SW-H-60	60	60
SW-H-80	80	60
SW-H-100	100	60

Table 6. Sample names based on reaction time variation in 10 wt% citric acid solution at 80°C

Sample Name	Residence time (min)	Acid Solution Temperature (°C)
SW-A-10	10	80
SW-A-20	20	80
SW-A-30	30	80
SW-A-40	40	80
SW-A-50	50	80

수행하였다. 시료를 각각 40, 60, 80, 100°C의 온도에서 60분간 침지하여 세척하였다. 각 실험조건에 대한 샘플명은 Table 5에 나타내었다.

바이오매스 내 알칼리 금속을 감소시키기 위해 산 세척 (Acid Leaching)을 적용하면 제거 효율이 증가한다.^[14] 본 연구 시료인 표고버섯 폐배지 시료에도 적용 가능한지 평가하기 위해, 구연산(Citric acid) 10wt% 용액에서 80°C로 온도를 유지한 상태에서 시료를 10, 20, 30, 40, 50분 동안 침지하여 실험을 수행하였다. 각 실험조건에 대한 샘플명은 Table 6에 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 반탄화 연구 결과

표고버섯 폐배지는 각각의 처리온도에서 반탄화를 진행한 뒤 실험 전·후의 무게를 비교하여 수율을 계산하였다. 해당 시료들의 발열량 분석도 함께 진행하였으며, 수율과 발열량 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

수율의 경우, 150°C와 200°C에서 반탄화한 시료는 모두 90% 이상 높은 수율을 보였다. 그러나 250°C에서 처리한 시료의 수율은 79.06%로 감소하였고, 300°C에서는 56.35%까지 낮아졌다. 헤미셀룰로오스는 200~300°C에서 분해된

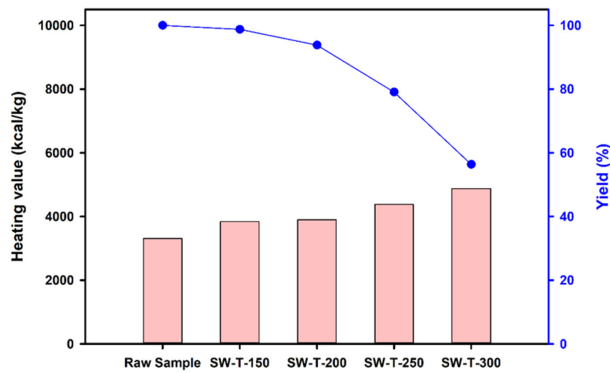


Fig. 7. Yield and heating value results of torrefaction experiment

다.^[15] 따라서 바이오매스에 포함된 헤미셀룰로오스가 반탄화 온도가 상승하며 휘발분으로 분해됨에 따라 수율이 감소하는 경향을 나타냈다.

발열량 분석 결과, 원시료의 발열량은 3,310 kcal/kg 이었다. 150°C와 200°C에서 반탄화한 시료의 발열량은 각각 3,840 kcal/kg, 3,900 kcal/kg으로 약 18% 증가하였다. 특히, 250°C에서 반탄화한 시료의 발열량은 4,380 kcal/kg으로, 원시료 대비 1,000 kcal/kg 이상 발열량이 증가하였다. 300°C에서 반탄화한 시료는 4,880 kcal/kg의 발열량을 보여, 원시료 대비 약 47% 증가하였으며, 모든 샘플 중 가장 높은 값을 나타냈다.

표고버섯 폐배지 반탄화 시료에 대해 탄소(C), 수소(H), 산소(O) 함량을 분석하였다. H/C 및 O/C 몰 비율이 낮은 경우, 상대적으로 높은 탄소 함량으로 인해 활성 라디칼(H, O, OH)의 생성이 감소하여 연소 속도가 저하되고, 이에 따

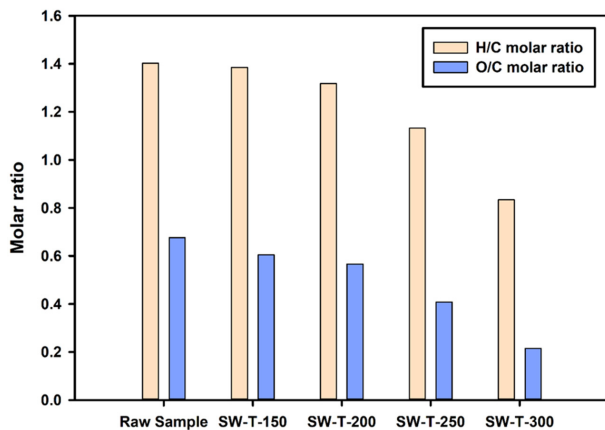


Fig. 8. H/C, O/C molar ratio

라 연소 효율이 감소하는 경향을 보인다.^[16] 본 연구에서 분석한 표고버섯 폐배지 반탄화 시료의 H/C 및 O/C 몰 비율을 Fig. 8에 나타내었다. H/C 몰 비율은 경우 원시료에서 1.403으로 계산되었으며, 반탄화 온도 증가에 따라 150°C 시료(1.385), 200°C 시료(1.318), 250°C 시료(1.132), 300°C 시료(0.834)로 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. O/C 몰 비율 역시 원시료(0.676) 대비 150°C(0.604), 200°C(0.566), 250°C(0.408), 300°C(0.215) 시료에서 반탄화 온도 상승과 함께 지속적으로 감소하였다. 이는 반탄화 공정 중 열분해에 따른 탈수소화(H/C 비 감소) 및 탈산소화(O/C 비 감소) 반응이 동반됨을 시사한다.

원시료와 반탄화 된 샘플의 H/C 및 O/C 몰 비율 간의 관계를 나타내는 van Krevelen 다이어그램을 Fig. 9에 나타냈다. 열처리 온도가 증가함에 따라 H/C 및 O/C 비율이 모두 감소하는 하향 추세를 나타내며, 이는 표고버섯 폐배지 샘플의 점진적인 탄화 및 탈수 반응을 의미한다. 회귀선 ($y=0.5818+1.281x$, $R^2=0.9811$)은 H/C 비율과 O/C 비율 사이의 강한 선형 상관관계를 나타내며 높은 R^2 값(0.9811)은 모델의 적합도가 매우 높음을 시사한다. 이는 열처리에 따른 유기물 구조 변화가 일관되게 발생하고 있음을 뒷받침한다. 원료 샘플은 가장 높은 H/C 및 O/C 비율을 보이며, 이 열처리 온도가 증가함에 따라 두 비율은 감소한다. 특히 SW-T-300 샘플은 상당히 낮은 값을 보여 방향족성 증가 및 산소 함량 감소를 나타낸다. 이러한 경향은 탈수, 탈카복실화 및 방향족화와 같은 열분해 반응에 따른 화학

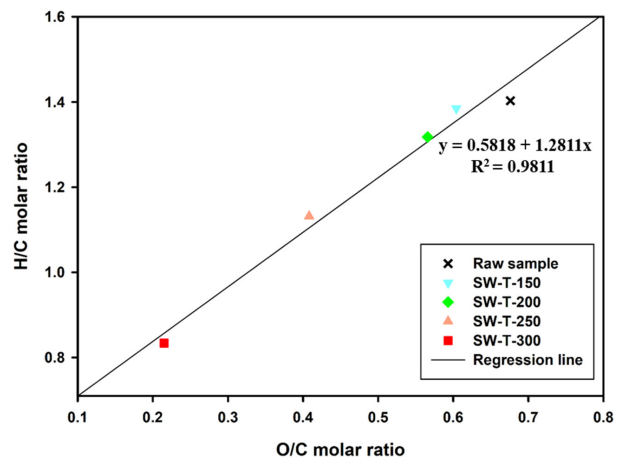


Fig. 9. H/C, O/C molar ratio

적 변화와 일치한다. 이 분석은 열처리를 통해 바이오매스 유래 물질의 화학 조성을 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주며, 에너지 응용, 흡착제, 탄소 소재 합성과 같은 다양한 분야에 활용이 가능함을 제시한다.

3.2 염소 및 칼륨 제거 연구 결과

표고버섯 폐배지를 30분, 60분의 시간 동안 물에 침지한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 모든 처리 시료에서 원시료 대비 염소와 칼륨의 성분이 감소하였다. 30분간 침지한 시료의 염소 및 칼륨 함량은 각각 686 mg/kg, 3,704 mg/kg으로 감소하였으며, 60분간 침지 시료에서는 염소 340 mg/kg, 칼륨 2,143 mg/kg으로 가장 큰 감소를 보였다.

Fig. 11에는 교반 시간을 달리하여 실시한 실험 결과가 정리되어 있다. 교반 시간을 10, 20, 30분으로 증가시켰을 때, 염소 성분은 각각 850 mg/kg, 668 mg/kg, 554 mg/kg

로, 칼륨 성분은 각각 3,573 mg/kg, 3,303 mg/kg, 2,862 mg/kg로 나타나, 두 성분 모두 교반 시간이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 그러나 40, 50분 교반 시에는 염소 성분이 각각 470 mg/kg, 516 mg/kg, 칼륨 성분이 2,186 mg/kg, 2,512 mg/kg로 소폭 증가하는 양상을 나타냈다. 마지막으로, 60분 교반 결과에서는 염소 성분이 908 mg/kg로 증가한 반면, 칼륨 성분은 2,355 mg/kg로 감소하는 결과를 보였다. 이러한 결과를 통해 교반 시간에 따른 염소 및 칼륨 제거는 일정 시간 이상의 교반은 제거 효과가 미비하다는 것을 보여준다.

세척 온도에 따른 실험 결과를 Fig. 12에 나타냈다. 40°C에서 세척한 경우, 염소 성분은 509 mg/kg, 칼륨 성분은 1,777 mg/kg로 모두 감소하였다. 60°C에서 세척한 결과, 칼륨 성분은 1,734 mg/kg로 소폭 감소한 반면, 염소 성분은 599 mg/kg로 소폭 증가하는 경향을 보였다. 80°C에서 세척한 경우, 염소 및 칼륨 성분은 각각 364 mg/kg, 1,411 mg/kg로 다시 감소하였다. 마지막으로 100°C에서 세척한 결과 염소 성분은 336 mg/kg로 감소하였으나 칼륨 성분은 1,494 mg/kg로 소폭 증가하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 80°C 이상 온도에서는 알칼리 성분이 바이오매스 내에서 물에 용해되기 어려운 화합물로 변하거나, 유기물과의 결합력이 증가하여 제거 효율이 감소한다^[13]는 선행 연구와 유사한 결과이다.

산성 용액(구연산 10 wt%)과 80°C의 온도에서 시료를 서로 다른 체류시간(10, 20, 30, 40, 50분) 동안 세척한 결과를 Fig. 13에 정리하였다. 10분간 세척한 경우, 염소와 칼

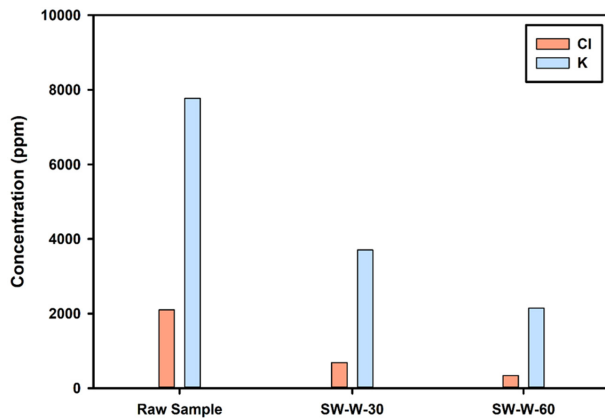


Fig. 10. Results of soaking experiment

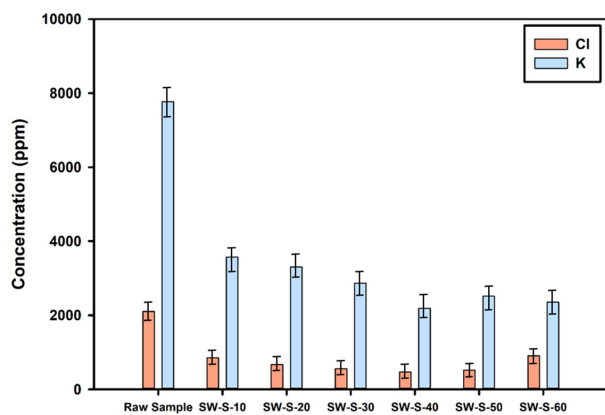


Fig. 11. Results of agitation experiment

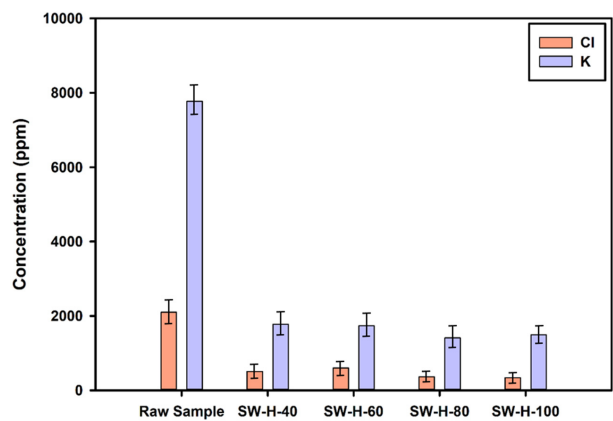


Fig. 12. Results of washing temperature experiment

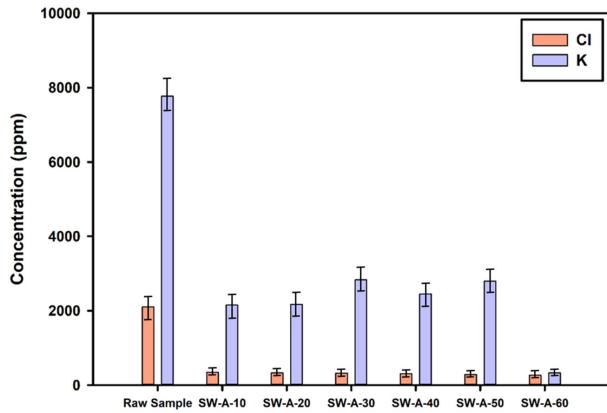


Fig. 13. Experimental results of reaction time variation in 10 wt% citric acid solution at 80°C

를 성분은 각각 345 mg/kg, 2,152 mg/kg로 감소하였다. 염소 함량은 세척 시간이 증가함에 따라 20분(329 mg/kg), 30분(326 mg/kg), 40분(305 mg/kg), 50분(286 mg/kg)으로 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 반면, 칼륨 성분은 20분(2,176 mg/kg), 30분(2,829 mg/kg), 40분(2,449 mg/kg), 50분(2,796 mg/kg)으로 10분과 유사한 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 산성 촉매를 이용한 80°C 온도에서는 10분 이상의 체류시간은 제거 효과가 미비하다는 것을 알 수 있다.

바이오매스에서 침출 과정을 통해 제거된 염소 및 칼륨은 바이오매스에서 빠져나가면 다시 바이오매스에 재결합되지 않는다.^[17] 이에따라 교반시간, 세척 온도, 체류시간을 증가시켜도 염소와 칼륨의 함량이 재차 증가하지 않으며, 추가적인 처리 효과 역시 제한적임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 표고버섯 폐배지의 반탄화 및 염소·칼륨 제거 실험을 통해 표고버섯 폐배지의 에너지 자원화 가능성을 평가하였다. 반탄화 실험 결과, 온도 상승에 따라 시료의 수율은 감소하였으나 발열량은 증가하여, 300°C 처리 시 원시료 대비 약 47% 향상된 4,880 kcal/kg의 값을 나타냈다. 또한, H/C 및 O/C 몰 비율이 온도 증가에 따라 점진적으로 감소하였으며, van Krevelen 다이어그램 분석을 통해 열처리 온도가 높아질수록 시료의 방향족성이 증가하고

산소 함량이 감소하는 등 구조적 변화가 일관되게 진행됨을 확인하였다. 이러한 변화는 표고버섯 폐배지의 연소 특성 개선과 고효율 바이오연료로의 전환 가능성을 시사한다.

염소·칼륨 제거 실험에서는 침지 시간, 교반 시간, 세척 온도, 산성 용액 처리 조건별로 제거 효율을 비교하였다. 침지 시간의 경우 60분에서 염소는 340 mg/kg, 칼륨은 2,143 mg/kg로 감소하였다. 교반에서는 30분 교반 시 염소와 칼륨 성분이 효과적으로 제거되었으나, 40분 이상에서는 효율이 정체되는 현상이 관찰되었다. 세척 온도 실험의 경우 80°C에서 가장 높은 제거 효율을 보였으나, 100°C 이상에서는 칼륨 성분의 재흡착 또는 결합 강화로 인해 제거율이 감소하였다. 산성 용액(구연산 10 wt%, 80°C)을 활용한 세척에서는 10분 조건에서 효과적인 염소 및 칼륨 제거가 이루어졌으며, 장시간 처리 시 효율이 미비한 경향을 보였다. 염소 함유량의 경우 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 시행규칙 별표7의 고형연료제품의 품질기준에서 0.5 wt% 이하를 충족해야 한다. 해당 기준은 본 연구 조건과 실험 결과로 충족하였으며 보일러 연료로 사용 시 고온부식에 대한 안전성을 확보할 수 있다고 판단된다.

종합적으로 표고버섯 폐배지는 적정 반탄화 온도(250~300°C)와 최적 조건(80°C 이하, 30분 이내 물 세척 또는 10분 이내 산성 용액 처리)을 적용할 경우, 고발열량 연료로의 전환과 함께 연소 시 문제를 일으키는 염소·칼륨 성분의 효과적 제거가 가능함을 확인하였다. 이러한 결과는 표고버섯 폐배지의 에너지 자원화와 더불어, 농업 부산물의 고부가가치 활용 및 친환경 에너지 생산에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

버섯 재배는 균 감염에 민감한 특성으로 인해 주로 인구 밀도가 낮은 농촌 지역에서 이루어진다. 통계청 인구총조사에 따르면, 농촌 지역 가구는 난방 연료 구입 비중이 상대적으로 높아 에너지 비용 부담이 큰 것으로 나타난다. 이러한 점을 고려할 때, 표고버섯 폐배지를 활용한 바이오매스 연료는 농촌의 에너지 취약계층을 위한 보일러 연료로서 효과적으로 보급될 수 있을 것으로 전망된다. 이는 농촌 지역의 에너지 비용 절감과 자원 순환, 그리고 에너지 복지 향상에 기여할 수 있는 대안으로 평가된다.

향후에는 반탄화와 염소·칼륨 제거를 연동하는 추가적인 연구를 검토하고 있다.

감사의 글

본 논문은 중소벤처기업부의 Net-zero 기술혁신개발사업(RS-2022-00165586)과 한국에너지기술연구원 기본사업(C5-2435)의 지원으로 수행하였습니다.

References

- [1] Sillmann, J., Stjern, C.W., Myhre, G., *et al.*, 2019, “Extreme wet and dry conditions affected differently by greenhouse gases and aerosols”, *npj Clim. Atmos. Sci.*, **2**, 24, <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0079-3>.
- [2] Sung, M.-K., An, S.-I., Shin, J., Park, J.-H. Yang, Y.-M., Kim, H.-J., and Chang, M., 2023, “Ocean fronts as decadal thermostats modulating continental warming hiatus”, *Nat. Commun.*, **14**, 7777.
- [3] Statistics Korea, 2020, “Households by heating facilities and province: General households – 2020 Population and Housing Census”, Accessed 8 May 2025, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1PH2006&conn_path=I3.
- [4] Korea Forest Service, 2024, “Status of wood pellet stove dissemination”, Accessed 8 May 2025, https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000811&mn=AR01_04_04_02.
- [5] Korea Forest Service, 2024, “Wood pellet production and sales”, Accessed 9 May 2025, https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?cmsId=FC_000811&mn=AR01_04_04_02.
- [6] IEA Bioenergy, 2024, “Implementation of Bioenergy in the Republic of Korea – 2024 Update”, Accessed 9 May 2025, https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/12/CountryReport2024_Korea_final.pdf.
- [7] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2024, “Major statistics of agriculture, food and rural affairs”, Accessed 9 May 2025, <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/789/572567/artclView.do>.
- [8] Soo-Jung Cho, and Yeon-Hwang Moon, “Feed using spent mushroom substrate and method for preparing the same”, KR Patent Application No. 10-2012-0131193, Publication No. 10-2014-0064173, filed November 19, 2012, published May 28, 2014.
- [9] Lee, Y.-M., Je, H.-S., Moon, S.-H., Choi, S.-B., Jeong, T.-U., Lee, S.-Y., Cha, J.-D., Lee, M.-R., Hong, and J.-A., “Rapid cultivation method for shiitake mushroom substrate”, KR Patent KR101182998B1, September 7, 2012.
- [8] Cho, S.-J., and Moon, Y.-H., “Feed using spent mushroom substrate and method for preparing the same”, KR Patent Publication No. 10-2014-0064173, published May 28, 2014.
- [9] “Rapid cultivation method for shiitake mushroom substrate”, KR Patent No. 101182998B1, September 7, 2012.
- [10] Park, J.Y., 2020, “Utilization and Quality Standard of Fast Pyrolysis Bio-Oil”, *J. Hydrogen New Energy*, **31**(2), 223-233.
- [11] Abioye, K.J., Harun, N.Y., and Saeed, A.A.H., 2023. “A Brief Review of Solving Biomass Ash Deposition with Aluminum-silicate Based Additives and Future Perspective of Kaolin”, *Chem. Eng. Trans.*, **98**, 27-32.
- [12] Tumuluru, J.S., Ghiasi, B., Soelberg, N.R., and Sokhansanj, S., 2021, “Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts”, *Front. Energy Res.*, **9**, 728140.
- [13] Peiris, M.A., and Gunarathne D.S., 2021, “Parametric and kinetic study of washing pretreatment for K and Cl removal from rice husk”, *Heliyon*, **7**(11), e08398.
- [14] Davidsson, K.O., Korsgren, J.G., Pettersson, J.B.C. and Jaglid, U., 2002, “The effects of fuel washing techniques on alkali release from biomass”, *Fuel* **81**(2), 137-142.
- [15] Chen, W.-H., Wang, C.-W., Ong, H. C., Show, P. L., and Hsieh, T.-H., 2019, “Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin”, *Fuel*, **258**, 116168.
- [16] Chen, J., Chen, G., Zhang, A., Deng, H., Wen, X., Wang, F., Sheng, W., and Zheng, H., 2021, “Numerical Simulation of the Effect of CH₄/CO Concentration on Combustion Characteristics of Low Calorific Value Syngas”, *ACS Omega*, **6**(8), 5754-5765.
- [17] Kopsch, M., Lebendig, F., Yazhenskikh, E., Amado-Fierro, Á., Centeno, T., and Müller, M., 2024, “Effect of HTC and Water-Leaching of Low-Grade Biomasses on the Release Behavior of Inorganic Constituents in a Calcium Looping Gasification Process at 650 °C”, *Energy Fuels*, **38**(17), 16504-16519.