

ORIGINAL ARTICLE

열-알칼리성 전처리에 따른 폴리하이드록시부티레이트의 혐기성 소화 개선 효과 조사

Le Thi Nhu Trang · 이준엽*

부경대학교 지구환경시스템과학부(환경공학전공)

Improving Anaerobic Digestion of Polyhydroxybutyrate by Thermal-Alkaline Pretreatment

Le Thi Nhu Trang, Joonyeob Lee*

Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Abstract

In this study, the effect of different reaction times for thermal-alkaline pretreatment on the solubilization and biogasification of polyhydroxybutyrate (PHB) were evaluated. Thermal-alkaline pretreatment tests were performed at 73 ° C and pH 13 at 0–120 h reaction times. The mesophilic anaerobic batch tests were performed with untreated and pretreated PHB samples. The increase in the pretreatment reaction time results in a 52.8–98.8% increase of the abiotic solubilization efficiency of the PHB samples. The reaction time required to achieve solubilization efficiencies of 50%, 90%, and 95% were 10.5, 52.0, and 89.6 h, respectively. The biogasification of the untreated PHB samples achieved a specific methane production rate of 3.6 mL CH₄/g VSS/d and require 101.3 d for complete biogasification. The thermal-alkaline pretreatment significantly improved specific methane production rate (10.2–16.0 time increase), lag time (shortened by 76–81%), and time for complete biogasification (shortened by 21–83%) for the biogasification of the PHB samples when compared to those of the untreated PHB samples. The improvement was higher as the reaction time of the thermal-alkaline pretreatment increased. The findings of this study could be used as a valuable reference for the optimization of the biogasification process in the treatment of PHB wastes.

Key words : Polyhydroxybutyrate, Thermal-alkaline pretreatment, Hydrolysis, Anaerobic digestion, Methane production

1. 서론

플라스틱은 다양한 산업분야에 활용되고 있는 고분자화합물로 전 세계 연간 플라스틱 생산량은 1950년부터 지속적으로 증가하여 2020년 기준 3억 6,700만톤으로 추정되고 있다(PlasticsEurope, 2021). 플라

스틱 생산량의 39.5%는 포장재 등 다양한 일회용 물품에 활용되며 이는 다량의 플라스틱 쓰레기 발생으로 귀결되고 있으며, 기존 비생분해성 플라스틱 쓰레기는 단순 매립을 통해서 분해가 용이하지 않아 처리에 어려움이 있는 실정이다(Horton et al., 2017). 이에 생분해성 플라스틱은 일회용 물품, 소비재 및

Received 6 May, 2022; Revised 23 May, 2022;

Accepted 25 May, 2022

*Corresponding author: Joonyeob Lee, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Phone: +82-51-629-6525

E-mail: Leejy@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

©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.

다양한 산업 분야에 걸쳐 기존 플라스틱의 잠재적인 대안으로 각광받고 있다.

폴리하이드록시부티레이트(polyhydroxybutyrate, PHB)는 생분해성 고분자화합물로 기존의 비생분해성 플라스틱의 대체재로 포장 및 소비재, 화학, 섬유를 비롯한 다양한 응용분야에서 전 세계적으로 널리 사용되고 있다(European Bioplastics, 2019; Sirohi et al., 2020). 미국 및 일본의 경우 연간 272,000 톤, 50,000 톤의 PHB가 상업적 목적으로 합성되고 있다. COVID-19 팬데믹으로 비대면 소비 및 생활, 의료용 물품 소비가 급증함에 따라 생분해성 플라스틱 쓰레기의 발생량 또한 급증하여 이를 효과적으로 처리하기 위한 기술 연구가 필요한 상황이다.

혐기성 소화는 유기성 폐기물 처리와 에너지원으로 활용가능한 바이오가스 생산을 동시에 달성할 수 있는 생물학적 처리 공정으로 생분해성 플라스틱 처리의 주요 대안 중 하나로 고려된다. 혐기성 소화는 가수분해, 산생성, 초산생성 및 메탄생성의 총 4가지의 순차적 반응단계를 통해 유기성 고분자 물질을 가스상 물질인 메탄과 이산화탄소로 전환 가능한 생물학적 복합 반응이다. 이 중 고분자를 포함한 복잡한 물질이 용존 가능한 형태인 단순한 단량체로 분해되는 반응인 가수분해는 생분해성 플라스틱의 혐기성 소화를 위한 속도 제한 단계로, 생분해성 플라스틱의 고율 바이오가스화를 위해서는 가수분해 전처리 방법에 대한 관련 기초 연구가 필요하다(Mu et al., 2021). 고온 또는 혐기성 조건에서의 전처리를 통해 중합체인 PHB를 혐기성 소화 분해가 용이한 크로톤산, 3-하이드록시부티르산 등의 단량체로 변환이 가능한 것으로 보고되고 있으나, 고온, 알칼리 복합 전처리를 통한 PHB 가용화 및 바이오가스화에 대한 연구는 제한적으로 보고되고 있다(Yu et al., 2005). 이에 본 연구에서는 열-알칼리성 복합 전처리의 반응시간에 따른 PHB의 가용화율 및 바이오가스화에 대한 개선 효과를 실험적으로 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료 및 장치

본 연구의 PHB는 지름 5 mm의 PHB 그레놀(Goodfellow)을 구입하여 사용하였다. 열-알칼리 복합 전처리 실험을 위해 각 1.5 mL e-tube(Axygen)에 0.1 g의 PHB 그레놀과 목표 pH 조건을 맞추어 준 탈이온수, 3N NaOH 혼합 용액을 넣어주었다. Heating block이 장착된 dry bath

incubator (Labtron)를 사용하여 반응시간을 변수로 하여 수행하였다. 회분식 혐기성 소화 실험을 위한 미생물 접종원은 실험용 슬러지 혐기성 소화조 시료를 채취하여 사용하였다. 미량원소 및 비타민 등을 보충해주기 위해 문헌에 따라 혐기성 배지를 제조하여 회분식 혐기성 소화 실험에 사용하였다(Le and Lee, 2021). 혐기성 배지 제조에 사용된 탈이온수는 Direct-Q 정제수시스템(Millipore)에서 채수하여 사용하였다. 혐기성 반응기는 80 mL 혐기성 배양 유리병(Lklab)을 사용하였다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 열-알칼리성 복합 전처리의 반응시간에 따른 PHB의 가수분해율을 평가하고, 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 통해 전처리에 따른 시료의 혐기성 소화 시 메탄생성에 대한 개선 효과를 조사하고자 하였다. 열-알칼리성 복합 전처리 실험의 경우, 기존 문헌에서 생분해성 플라스틱 중 하나인 polylactic acid (PLA)의 가용화에 효과적인 것으로 보고된 조건과 유사한 73°C와 pH 13 조건을 적용하였다(Cazaudehore et al., 2022). 열적, 알칼리성 복합 전처리의 반응시간은 0 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 96 h, 120 h로 설정하여 적용하였다(Table 1). 각기 전처리된 시료를 대상으로 한 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 수행하였다. 유리 반응기(유효체적: 80 mL)에 각기 전처리된 시료, 혐기성 배지와 접종원을 투입해주었다. 최종적으로 투입 기질과 접종원의 농도가 1.6 g chemical oxygen demand (COD)/L와 3 g volatile suspended solids (VSS)/L가 되도록 적정량의 기질 및 접종원을 투입해주었다. 반응기 내 혼합액의 pH는 3N HCl, 3N NaOH를 투입해주어 pH 7로 조절해주었다. 반응기에 질소, 이산화탄소 혼합가스(N₂:CO₂, 8:2)를 주입해주어 잔류 산소를 제거해주었다. 모든 회분식 반응기 실험은 인큐베이터에서 37°C 조건으로 수행되었다.

Table 1. Experimental design

Name	Reaction time (hour)	Thermal-alkaline pretreatment
Control	-	-
T12	12	Incubated at pH 13 and 73°C
T24	24	
T36	36	
T48	48	
T96	96	
T120	120	

회분식 반응기의 바이오가스 생산량은 10 mL 유리 주사기를 사용하여 정기적으로 측정하였다. 채취된 바이오가스의 메탄, 이산화탄소, 질소 조성은 가스크로마토그래피(Agilent)를 사용하여 측정하였다. 대상 시료의 pH, Total Suspended Solids (TSS) 및 volatile suspended solids (VSS)는 Standard Methods의 분석법을 참고하여 분석하였다(APHA-AWWA-WEF, 2005).

전처리에 의한 PHB의 가용화율은 전처리 전, 후의 시료 내 TSS량 변화를 고려하여 아래 수식을 통해 계산하였다.

$$\text{Solubilization} = \left(1 - \frac{TSS_2}{TSS_1}\right) \times 100\% \quad (1)$$

여기서, TSS_1 은 전처리 전 PHB 시료의 TSS량, TSS_2 은 전처리 후 PHB 시료의 TSS량을 의미한다.

전처리 반응 시간과 가용화율 간의 관계는 3모수 로지스틱 모델을 활용하여 평가하였다.

$$\text{Solubilization} = \frac{Max}{1 + \left(\frac{t}{t_{50}}\right)^h} \quad (2)$$

여기서, t 는 전처리 반응시간, t_{50} 는 가용화율 50%일 때 필요한 전처리 반응시간, h 는 중간점에서의 기울기를 의미한다.

회분식 반응기 실험의 메탄생산속도와 지연시간은 시간에 따른 누적 메탄생산량 결과를 modified Gompertz model에 대입하여 추정하였다(Zwietering et al., 1990).

$$M_{CH_4}(t) = P_{CH_4} \times \exp\left(-\exp\left(\frac{SMPR \times e}{P_{CH_4}} \times (\lambda - t) + 1\right)\right) \quad (3)$$

여기서, $M_{CH_4}(t)$ 는 시간에 따른 메탄생산량, P_{CH_4} 는 최종 메탄 수율, SMPR은 비메탄생산속도, λ 는 지연시간(lag time), t 는 회분식 배양시간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열-알칼리성 전처리의 반응 시간에 따른 PHB의 가용화 효율 평가

본 연구에서는 열-알칼리성 복합 전처리(73°C, pH 13)의 반응시간에 따른 PHB의 가용화 효율을 실험을 통해 평가하였다(Fig. 1). 전처리를 가하지 않

은 대조군 PHB 시료와 비교 시, 모든 실험군 PHB 시료는 유의미한 수준(52.8~98.8%)의 가용화 반응이 관측되었다.

3모수 로지스틱 모델을 활용한 회귀분석을 통해 대상 열-알칼리성 복합 전처리의 반응시간과 PHB 가용화율 간의 관계를 수식화하였으며, 이는 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다($r^2 = 0.9944$; Fig. 1b).

$$\text{Solubilization} = \frac{100}{1 + \left(\frac{t}{10.5034}\right)^{-1.3737}} \quad (4)$$

반응시간이 증가함에 따라 가용화율의 증가 수준은 점차 완만해지는 것으로 나타났다. 식 (4)를 통해, 가용화율 50%, 90%, 95%를 달성하는데 필요한 반응시간(t_{50} , t_{90} , t_{95})은 각각 10.5 h, 52.0 h, 89.6 h인 것으로 계산되었다. 최근 연구결과에 따르면, 대표적인 생분해성 플라스틱 중 하나인 PLA의 경우 열-알칼리성 복합 전처리(70°C, pH 13)를 48시간 반응시켜주었을 때, 56%의 가용화율을 달성한 것으로 보고되었다(Cazaudehore et al., 2022). 이는 PHB의 경우 PLA보다 열-알칼리성 전처리법으로 더 효과적으로 가용화될 수 있음을 의미한다.

3.2. 열-알칼리성 전처리의 반응 시간에 따른 PHB의 바이오가스화 영향 평가

본 연구에서는 열-알칼리성 복합 전처리의 반응시간에 따른 PHB의 바이오가스화에 대한 영향을 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 통해 평가하였다(Fig. 2). 메탄수율은 평균적으로 370.6 ± 8.1 mL CH_4 /g COD인 것으로 확인되었다. 본 실험 결과를 통해 열-알칼리성 복합 전처리 및 이의 반응시간이 PHB의 혐기성 소화 반응에 따른 메탄수율에는 유의미한 차이를 유발하지 않는 것을 확인하였다. 또한 실험적 메탄수율값이 이론적 메탄수율값의 약 93% 수준인 것으로 나타나, 일반적인 혐기성 소화 미생물의 수율이 5~10% 수준임을 감안할 때, 투입된 대부분의 PHB가 성공적으로 혐기성 소화되어 바이오가스로 전환된 것으로 평가된다(Gavala et al., 2003). 본 연구에서 대조군 PHB시료의 비메탄생산속도는 3.6 mL CH_4 /g VSS/d로 문헌상의 전처리를 가해주지 않은 PLA 시료의 비메탄생산속도인 1.5 mL CH_4 /g VS/d보다 유의미하게 빠른 것으로 나타난 결과를 볼 때, PHB의 혐기성 소화가 PLA보다 상대적으로 더 용이한 것으로 평가된다(Cazaudehore et al., 2022).

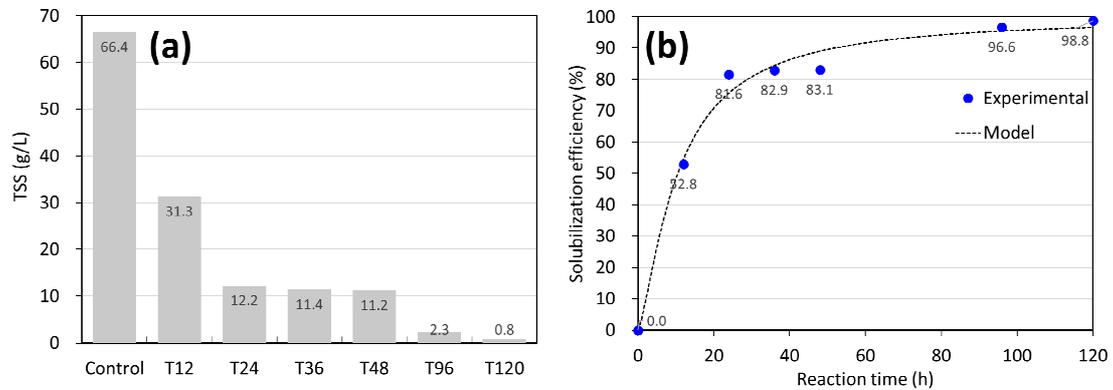


Fig. 1. (a) Total suspended solids (TSS) concentrations and (b) solubilization efficiency of PHB samples by different reaction time of the thermal-alkaline pretreatment.

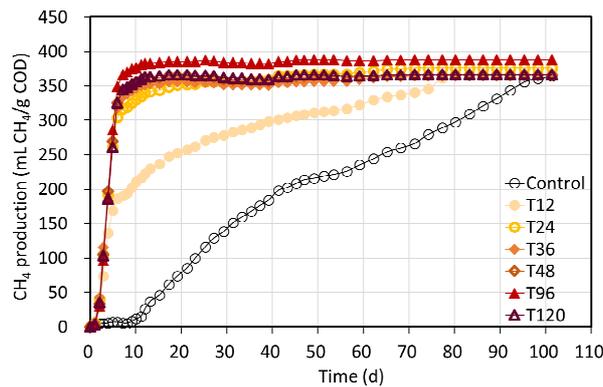


Fig. 2. Methane production of anaerobic batch tests fed with the PHB and pretreated PHB samples.

한편, 본 연구의 PHB 바이오가스화 중 메탄생성 지연시간, 비메탄생산속도, 총 회분식 바이오가스화 반응시간에 대해서는 열-알칼리성 복합 전처리를 가해줬을 시, 유의미한 개선 효과가 관측되었다(Fig. 3). 전처리를 가하지 않은 대조군 PHB 시료의 바이오가스화의 경우 유의미한 수준의 메탄이 생성될 때까지 8.7일의 지연시간이 소요되었으나, 전처리를 가해준 실험군의 경우 12~120 h의 전처리 반응시간 조건(T12~T120)에서 반응시간과 관계없이 메탄생성 지연시간이 대조군 대비 76~81% 가량 단축되는 것으로 관측되었다(Fig. 3a). 이는 다시 말해, 열-알칼리성 복합 전처리를 통해 PHB가 가용화되며 바이오가스화

반응에 용이한 유기물질로 분해되었음을 의미한다. 비메탄생산속도의 경우, 대조군 대비 T12조건에서는 10.2배, T24~T120조건에서는 13.6~16.0배 가량 개선되는 것으로 관측되었다(Fig. 3b). 이를 통해, 대상 열-알칼리성 복합 전처리로 PHB시료의 최대 비메탄생산속도를 달성하기 위해서는 24시간 이상의 전처리 반응시간이 필요한 것으로 확인되었다. 본 연구의 T24~T120조건의 비메탄생산속도는 48.7~57.1 mL CH₄/g VSS/d로 본 연구와 동일 소화조의 시료를 접종원으로 실험한 아세트산이용성 비메탄생산속도 문헌 결과(49.0 mL CH₄/g VSS/d)와 유사한 수준인 것으로 미루어 볼 때, 24시간 이상의 열-알칼리성

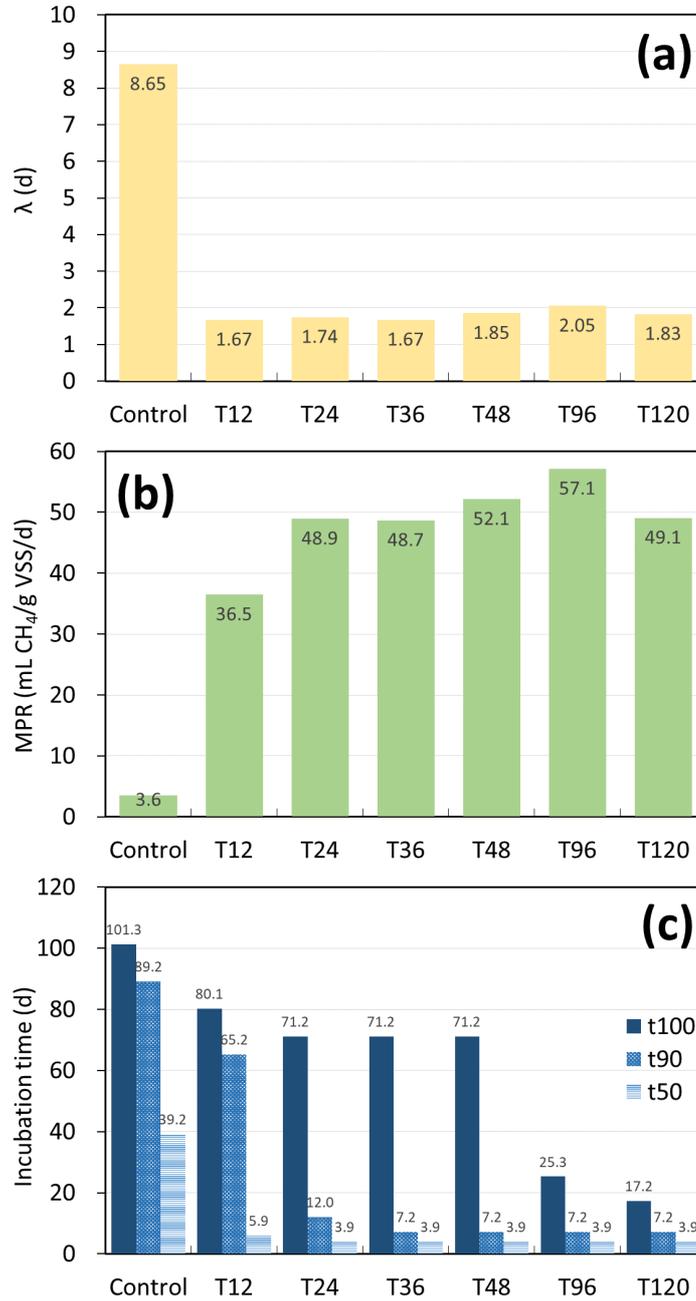


Fig. 3. (a) lag time (λ), (b) specific methane production rate (MPR), (c) batch incubation time required to reach 100%, 90%, and 50% of total CH₄ production (t100, t90, t50, respectively) in the anaerobic batch tests fed with the PHB and pretreated PHB samples.

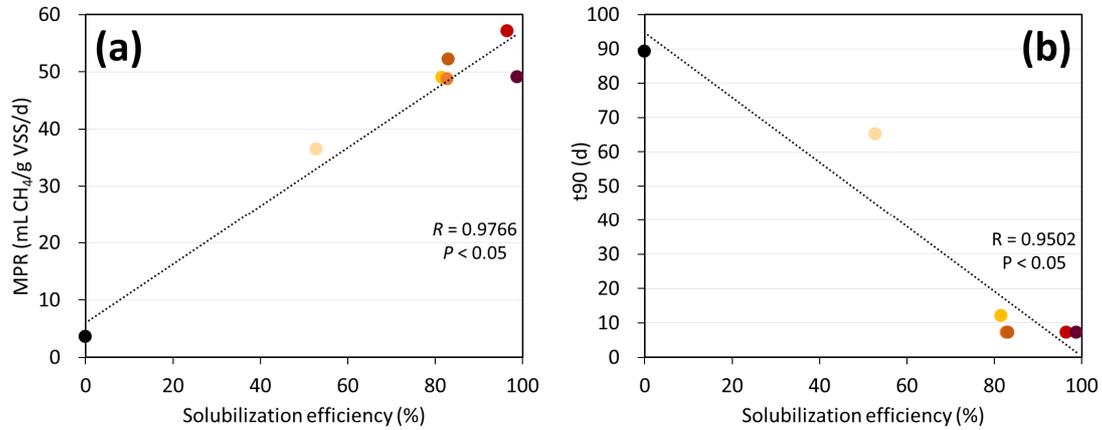


Fig. 4. Pearson correlations of solubilization efficiency with (a) MPR and (b) t₉₀.

전처리를 가해준 시료의 바이오가스화의 경우 가수분해 반응이 더 이상 율속단계로 작용하지 않는 것으로 평가된다 (Lee et al., 2021). 본 연구의 전처리와 유사 조건의 열-알칼리성 복합 전처리(70°C, pH 13, 48 h)를 가해준 PLA 시료의 바이오가스화의 비메탄 생산속도 문헌값(49.5 mL CH₄/g VS/d) 또한 유사한 수준인 것은 PHB와 PLA 모두 열-알칼리성 복합 전처리를 통해 가용화 단계가 효과적으로 개선 가능함을 의미하며, 바이오가스화를 통한 처리가 용이해짐을 의미한다(Cazaudehore et al., 2022).

PHB시료의 총 회분식 바이오가스화 반응의 100%, 90%, 50%가 달성되는데 필요한 시간(t₁₀₀, t₉₀, t₅₀)은 대조군의 경우 각각 101.3일, 89.2일, 39.2일이 소요되는 것으로 확인되었으며, T12조건부터 T120조건까지 전처리 반응시간이 증가함에 따라 회분식 바이오가스화에 필요한 반응시간이 단축되는 것으로 나타났다(Fig. 3c). T24조건에서는 t₁₀₀, t₉₀, t₅₀이 71.2일, 12.0일, 3.9일로 대조군 대비 30%, 87%, 90%가 단축되는 것으로 확인되었다. 기존 문헌에서 55°C, pH 12 조건의 열-알칼리성 복합 전처리를 24시간 가해준 PHB시료의 경우 바이오가스화 시 t₉₀에 약 40일이 소요된 것으로 보고된 결과와 비교해볼 때, 본 연구의 상대적 높은 온도와 pH 조건(73°C, pH 13)의 전처리가 PHB의 바이오가스화 반응시간을 획기적으로(~70%) 단축시키는데 기여한 것으로 평가된다(Benn and Zitomer, 2018). 본 연구의 최장 전처리 반응시간으로 처리된 PHB시료의 바이오가스화 조건인 T120조건에서 회분식 바이오 가스

화에 필요한 반응시간(t₁₀₀, t₉₀, t₅₀)이 가장 단축되는 것으로 관측되었다(각각 17.2일, 7.2일, 3.9일로 대조군 대비 83%, 92%, 90% 단축).

열-알칼리성 복합 전처리에 의한 가용화율과 회분식 바이오가스화 반응기 실험의 비메탄생산속도 및 회분식 바이오가스화 반응시간 간의 상관관계를 도출하고자 피어슨 상관관계 분석을 수행하였다(Fig. 4). 그 결과, 비메탄생산속도 및 t₉₀ 모두 가용화율과 유의미한 상관관계를 띄는 것으로 판별되었다($p < 0.05$).

전처리에 의한 가용화율과 비메탄생산속도의 양의 상관관계 결과, 그리고 가용화 PHB시료의 바이오가스화 실험에서 비메탄생산속도가 전처리를 가하지 않은 대조군 대비 13.6~16.0배 가량 개선되는 결과 및 관련 문헌들을 종합해볼 때, PHB시료의 가용화, 가수분해 반응이 PHB의 바이오가스화 반응의 율속단계를 확인할 수 있었으며, 이는 열-알칼리성 복합 전처리(73°C, pH 13)를 통한 PHB 가용화를 통해 획기적으로 개선 가능함을 확인하였다. 또한 전처리 반응시간 증가에 따라 가용화율이 증가하며, 이는 PHB의 바이오가스화의 메탄생산속도 증가 및 반응시간 단축으로 귀결됨을 확인하였다. PHB의 가용화를 더 짧은 전처리 반응시간 내에 효과적으로 달성하기 위해서는 다음과 같은 두 가지의 개선 방안이 고려될 수 있다. 첫 번째로, 물리적 전처리를 통해 PHB시료의 평균 입자 크기를 줄여준다면 가용화 반응을 위한 표면적 증가로 열-알칼리성 복합 전처리에 의한 가용화 반응이 개선될 것으로 예상된다(Garcia-Depraect et al., 2022). 두 번째로, 열-알칼리성 복합 전처리에서 반응 온도를

더 증가시켜 준다면 PHB의 알칼리성 분해반응이 가속화되어 더 짧은 반응시간 내에 높은 가용화 효과를 달성할 수 있을 것으로 예상된다(Li et al., 2017). 이와 같은 개선 방안들은 추후 추가적인 실험을 통해 검증이 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 73°C, pH 13 조건의 열적, 혐기성 복합 전처리의 반응시간에 따른 PHB의 가용화를 및 바이오가스화에 대한 효과를 실험적으로 조사하여, PHB의 바이오가스화 개선을 위한 해당 전처리법의 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

1) 열-알칼리성 복합 전처리를 통해 PHB가 52.8~98.8% 가용화율이 달성되었으며, 이는 반응시간이 증가함에 따라 증가하는 것으로 관측되었다. 3모수 로지스틱 모델을 활용하여 열-알칼리성 복합 전처리의 반응시간과 PHB 가용화율 간의 관계를 성공적으로 수식화하였다. 가용화율 50%, 90%, 95%를 달성하는데 필요한 전처리 반응시간(t_{50} , t_{90} , t_{95})은 각각 10.5h, 52.0h, 89.6h인 것으로 평가되었다.

2) 열-알칼리성 복합 전처리를 통해 PHB의 바이오가스화 반응이 개선됨을 실험적으로 확인하였다. 대조군 대비 메탄생성 지연시간은 76~81% 가량 단축되고, 비메탄생산속도는 10.2~16.0배 가량 개선되는 것으로 관측되었다. 총 회분식 바이오가스화 반응시간은 83% 가량 단축되었다. 다음과 같은 개선 효과는 열-알칼리성 전처리의 반응시간이 증가할수록 함께 증가되는 추세가 관측되었다. 결론적으로, 전처리 반응시간 증가에 따라 가용화율이 증가하며, 이는 PHB의 바이오가스화의 메탄생산속도 증가 및 반응시간 단축으로 귀결되는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 일회용 물품, 소비재 및 다양한 분야의 생활폐기물로 발생되는 대표적인 생분해성 플라스틱인 PHB의 바이오가스화 개선을 위한 열-알칼리성 복합 전처리의 효능을 실험적으로 검증하였다. 본 연구의 결과는 PHB폐기물의 바이오가스화 공정 개발을 위한 기초자료로 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2021R1C1C1009122). 또한 본 연구는 환경부의 폐자원에너지화 전문인력양성사업으로 지원되

었습니다(YL-WE-21-002).

REFERENCES

- APHA-AWWA-WEF, 2005, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Benn, N., Zitomer, D., 2018, Pretreatment and anaerobic co-digestion of selected PHB and PLA bioplastics, *Front. Environ. Sci.*, 5.
- Cazaudehore, G., Guyoneaud, R., Vasmara, C., Greuet, P., Gastaldi, E., Marchetti, R., Leonardi, F., Turon, R., Monlau, F., 2022, Impact of mechanical and thermo-chemical pretreatments to enhance anaerobic digestion of poly (lactic acid), *Chemosphere*, 297, 133986.
- European Bioplastics, 2021, Bioplastics market data: global production capacities of bioplastics 2021, Berlin, Germany.
- Garcia-Depraect, O., Lebrero, R., Rodriguez-Vega, S., Bordel, S., Santos-Beneit, F., Martinez-Mendoza, L. J., Aragao Borner, R., Borner, T., Munoz, R., 2022, Biodegradation of bioplastics under aerobic and anaerobic aqueous conditions: Kinetics, carbon fate and particle size effect, *Bioresour. Technol.*, 344, 126265.
- Gavala, H. N., Angelidaki, I., Ahring, B. K., 2003, Kinetics and modeling of anaerobic digestion process, *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 81, 57-93.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., Svendsen, C., 2017, Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities, *Sci. Total Environ.*, 586, 127-141.
- Le, T. N. T., Lee, J., 2021, Effect of ammonia load on microbial communities in mesophilic anaerobic digestion of propionic acid. *J. Environ. Sci. Int.*, 30, 1093-1100.
- Lee, J., Kim, E., Hwang, S., 2021, Effects of inhibitions by sodium ion and ammonia and different inocula on acetate-utilizing methanogenesis: methanogenic activity and succession of methanogens, *Bioresour Technol*, 334, 125202.
- Li, Q., Wang, A., Ding, W., Zhang, Y., 2017, Influencing factors for alkaline degradation of cellulose, *BioResources*, 12, 1263-1272.
- Mu, L., Zhang, L., Ma, J., Zhu, K., Chen, C., Li, A., 2021, Enhanced biomethanization of waste polylactic acid plastic by mild hydrothermal pretreatment:

- Taguchi orthogonal optimization and kinetics modeling, *Waste Manage.*, 126, 585–596.
- PlasticsEurope, 2021, *Plastics—the facts 2021: an analysis of european plastics production, demand and waste data*, Brussels, Belgium.
- Sirohi, R., Prakash Pandey, J., Kumar Gaur, V., Gnansounou, E., Sindhu, R., 2020, Critical overview of biomass feedstocks as sustainable substrates for the production of polyhydroxybutyrate (PHB), *Bioresour. Technol.*, 311, 123536.
- Yu, J., Plackett, D., Chen, L. X. L., 2005, Kinetics and mechanism of the monomeric products from abiotic hydrolysis of poly[(R)-3-hydroxybutyrate] under acidic and alkaline conditions, *Polym. Degrad. Stab.*, 89, 289–299.
-
- Graduate student. Le Thi Nhu Trang
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University
trangle05051996@gmail.com
 - Professor. Joon-Yeob Lee
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University
Leejy@pknu.ac.kr