

ORIGINAL ARTICLE

## 레조르시놀 폐수의 혐기성 소화 시 아세트산 함량이 레조르시놀 분해 및 메탄 생성에 미치는 영향 조사

김민재 · 강선민 · 이준엽\*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

### Effect of Acetate Concentration on Resorcinol Degradation and Methane Production in Anaerobic Digestion of Resorcinol Wastewater

Minjae Kim, Seonmin Kang, Joonyeob Lee\*

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

#### Abstract

Industrial resorcinol wastewater typically contains acetate at appreciable concentrations, potentially affecting its anaerobic digestion performance. Therefore, in this study, we conducted anaerobic batch tests to evaluate the effect of acetate concentration on resorcinol degradation and methane production during the anaerobic digestion of resorcinol wastewater. The anaerobic batch test using resorcinol as the sole substrate achieved 360.7 mL-CH<sub>4</sub>/g-chemical oxygen demand (COD) within 10 days, demonstrating the applicability of anaerobic digestion for treating resorcinol-containing wastewater. When acetate was introduced as a co-substrate, the methane production rate decreased from 101 mL-CH<sub>4</sub>/L/d to 64-83 mL-CH<sub>4</sub>/L/d, approximately 17.8-36.6% lower than that of the control. The resorcinol degradation rate also decreased from 133 mg-COD/L/d to 64-105 mg-COD/L/d, corresponding to a reduction of approximately 21.1-51.9% compared with the control. These results suggest that acetoclastic methanogenesis was the rate-limiting step, limiting the overall anaerobic digestion of resorcinol. This study provides insights into how the composition of resorcinol wastewater (i.e., resorcinol and acetate) affects anaerobic digestion performance and may help inform the optimization of anaerobic treatment strategies for industrial resorcinol wastewater.

**Key words** : Anaerobic digestion, Resorcinol wastewater, Acetate, Methane production, Resorcinol degradation

#### 1. 서 론

급격한 산업화와 에너지 수요 증가는 고농도 유기 오염물질이 함유된 산업폐수의 배출량을 지속적으로 증가시키고 있다. 이 중에서도 석탄을 기반으로 한 산업은 높은 에너지 의존도로 인해 막대한 양의

폐수를 발생시키는 주요 원인 중 하나로, 2021년 기준 전 세계 석탄 소비량은 160.1 EJ에 달하며 산업 규모 확대에 따라 그 양은 지속적으로 증가할 것으로 전망된다(Kong et al., 2024). 그 중에서도 석탄가스화 공정은 고효율 에너지 생산 기술로 주목받고 있으나, 이 과정에서 생성되는 석탄가스화 폐수는 고농도의 유기

Received 27 October, 2025; Revised 30 December, 2025;

Accepted 5 January, 2026

\*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.

오염물질과 방향족 화합물을 함유한 대표적인 난분해성 산업폐수로 알려져 있다(Ji et al., 2016). 이러한 특성으로 인해 해당 폐수의 재이용이나 생물학적 처리가 제한적이며, 자연계로 방류될 경우 수질 오염 및 수생 생태계에 부정적인 영향을 초래할 수 있다(Li et al., 2021).

레조르시놀은 석탄가스화 폐수 내 주요 오염물질로 보고되는 대표적인 페놀계 방향족 화합물로, 고무, 플라스틱, 제약, 염료, 접착제 등 다양한 산업 공정에서도 주 연료로 사용되는 물질이다(Yang et al., 2021). 석탄가스화 폐수에 포함되는 페놀계 방향족 화합물은 전체 화학적 산소요구량의 60-80%를 차지하며, 그 중 레조르시놀은 두 번째로 높은 농도로 검출되는 물질로 보고된다(Ji et al., 2016). 레조르시놀은 분자 내 두 개의 수산기(-OH)가 방향족 고리에 치환된 구조적 특성으로 인해 화학적 안정성이 높고, 생물학적으로 분해가 어려운 난분해성 물질로 분류된다(Saeed et al., 2023). 또한 독성을 지니고 있어 레조르시놀 함유 폐수가 자연계에 방류될 경우 생태계에 부정적인 영향을 초래할 수 있다(Subramanyam and Mishra, 2013). 따라서 이러한 레조르시놀 폐수를 효율적이고 안정적으로 처리할 수 있는 생물학적 공정의 개발이 필요하다.

한편 혐기성 소화는 혐기성 조건에서 다양한 미생물 군집의 상호작용을 통해 유기물을 처리하는 공정으로, 호기성 공정에 비해 에너지 소비가 적고 슬러지 발생량이 낮은 장점이 있다(Elsayed et al., 2024). 특히 고농도 유기성 폐수를 처리함과 동시에 바이오가스를 생산할 수 있는 에너지 회수형 공정으로, 탄소중립 실현을 위한 지속 가능한 처리기술로서 그 활용 가능성이 확대되고 있다(Huang, 2024). 레조르시놀은 고농도의 유기탄소를 함유하고 있어 에너지 회수 측면에서도 유용한 기질로 활용될 수 있다. 따라서 이러한 기질 특성을 고려할 때, 혐기성 소화는 레조르시놀 폐수에 적용 가능성이 높은 기술로 평가된다.

실제 산업폐수에서는 유기성 오염물질로 레조르시놀 뿐만 아니라 아세트산이 우점적으로 함께 포함되어 있는 것으로 보고되고 있다(Wang et al., 2010). 아세트산은 유기물 분해 과정에서 생성되는 최종 대사산물 중 하나로서, 메탄생성균에 의해 직접적으로 이용 가능한 기질이다(Pan et al., 2021). 구조적으로 안정적인 방향족 화합물인 레조르시놀과 단순 저분자 유기산

인 아세트산의 이러한 기질 특성 차이는 혐기성 소화 시 미생물 군집의 대사 경로 활성화도와 전자 및 에너지 흐름의 균형에 영향을 미칠 가능성이 있다. 특히 산업폐수의 조성 변동으로 인해 공존 유기산의 농도 분포가 달라질 경우, 레조르시놀의 분해 특성과 메탄생성에 영향을 끼칠 수 있음에도 관련 연구는 아직 제한적으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 레조르시놀 폐수의 혐기성 소화 가능성을 조사하고, 레조르시놀과 아세트산이 공존하는 조건에서 아세트산 농도 변화가 혐기성 소화 효율, 레조르시놀의 분해 및 메탄생성에 미치는 영향을 실험적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구는 단독 기질로서 레조르시놀의 혐기성 소화 적용 가능성을 평가하고, 공동 기질로서 아세트산의 투입 및 농도에 따라 레조르시놀의 혐기성 소화 반응에 미치는 영향을 실험적으로 검증하고자 대조군 및 실험군으로 구분된 두 종류의 회분식 실험을 진행하였다(Table 1). 첫 번째 회분식 실험은 대조군으로서 레조르시놀 단독 기질 조건(R)으로 수행하였으며, 레조르시놀 합성 폐수는 반응기 내 레조르시놀의 농도가 1.0 g Chemical oxygen demand (COD)/L (다시 말해, 0.53 g/L)가 되도록 조성하여 실험을 수행하였다. COD는 시료 내 산화 가능한 유기물을 산소당량으로 나타내는 지표로, 혐기성 소화 공정에서는 기질의 유기물 부하와 메탄잠재량을 정량적으로 일관되게 비교하기 위해 대표적으로 사용된다(Angelidaki and Sanders, 2004). 따라서 본 연구에서도 레조르시놀 및 아세트산의 투입 조건을 COD 기준으로 설정하여 비교 평가하였다. 두 번째 회분식 실험은 실험군으로서 레조르시놀과 아세트산의 공동 기질 조건에서의 혐기성 소화 반응을 평가하기 위해 수행하였으며, 1.0 g COD/L의 레조르시놀 합성 폐수에 아세트산을 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g COD/L (각각 0.47, 0.94, 1.41, 1.88 g/L)가 되도록 첨가하여 공동 기질 조건을 조성하여 실험을 수행하였다. 각 실험 조건은 **R+A0.5**, **R+A1.0**, **R+A1.5**, **R+A2.0**으로 명명하였다. 모든 실험 조건은 120 mL 용량의 유리병을 사용하여 유효체적 90 mL로 회분식 혐기성 소화 실험을 수행하였으며, 모든 실험은 3 반복으로 수행하였다.

**Table 1.** Experimental design of anaerobic batch tests treating resorcinol wastewater

Name	Substrate	
	Resorcinol (g COD/L)	Acetate (g COD/L)
R	1.0	0
R+A0.5	1.0	0.5
R+A1.0	1.0	1.0
R+A1.5	1.0	1.5
R+A2.0	1.0	2.0

All experiments were conducted under batch anaerobic digestion at 37°C in triplicate

레조르시놀 합성폐수에는 미생물의 성장을 위한 필수 영양소 및 미량 원소, 그리고 혐기성 소화 조건을 조성하기 위한 환원제 등을 첨가하였다(Kim et al., 2024). 회분식 혐기성 소화 실험에 사용한 식종원은 부산시 관내 실규모 하수슬러지 처리 혐기성 소화조에서 채취한 소화슬러지를 기반으로, 레조르시놀 혐기성 소화 미생물의 순응을 위해 회분식 혐기성 소화 조건에서 9회 연속 계대 배양을 수행한 후의 배양 슬러지를 사용하였다. 이때 각 회분식 반응 종료 후 기존 혼합 배양액의 75%를 제거하고, 신규 레조르시놀 합성폐수를 투입하는 방식으로 계대 배양을 진행하였다. 본 연구의 혐기성 소화 실험 반응기의 초기 Volatile suspended solids (VSS) 농도는 1 g/L로 설정하여, 이를 달성하도록 각 반응기에 적정량의 식종원을 투입하였다. 반응기 혼합액의 초기 pH는 메탄생성반응 최적 조건인 7.5로 조정하였다.

모든 반응기는 Butyl rubber septum과 Aluminum seal을 이용하여 밀봉한 후 질소와 이산화탄소의 혼합가스(N<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>, 80:20)를 사용하여 반응기 내부의 혐기성 조건을 조성하였다. 모든 반응기 실험은 대표적인 중온 혐기성 소화 조건인 37°C에서 수행하였다(Lee et al., 2018; Nie et al., 2021). 반응기간 동안 생산되는 바이오가스량은 10 mL 유리주사기로 매일 측정하였다. 바이오가스 내 메탄 함량은 가스크로마토그래피(8860, Agilent, USA) 기기와 열전도도 검출기에 HP-PLOT Q 컬럼(30 m × 0.53 mm × 40 μm)을 사용하여 분석하였다. 헬륨을 캐리어 가스로 사용하였으며, 인젝터, 오븐 및 검출기의 온도는 각각 70°C, 50°C, 250°C로 설정하여 분석하였다. 레조르시놀과 휘발성유기산의 농도는 가스크로마토그래피와 불꽃이온화 검출기에 HP-INNOWAX 컬럼(30 m × 0.32 mm

× 0.5 μm)을 사용하여 분석하였다. 헬륨을 캐리어 가스로 사용하였으며, 인젝터, 오븐 및 검출기의 온도는 각각 230°C, 60~260°C, 250°C로 설정하여 분석하였다. 시료의 pH, COD 및 VSS는 미국 표준시험방법을 참조하여 분석하였다(APHA-AWWA-WEF, 2005). 스피어만 상관관계 분석은 R 소프트웨어를 사용하여 분석하였다.

각 회분식 혐기성 소화 반응기의 최대메탄생산속도는 Modified Gompertz model을 사용하여 판별하였다(Zwietering et al., 1990).

$$M = P \times \exp\left(-\exp\left(\frac{MPR \times e}{P} \times (\lambda - t) + 1\right)\right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, *M*은 시간에 따른 누적 메탄생산량(mL CH<sub>4</sub>/g COD)을, *P*는 최대메탄수율(mL CH<sub>4</sub>/g COD), *MPR*은 최대메탄생산속도(mL CH<sub>4</sub>/L/d), *e*는 2.7183, *λ*는 지연시간(d), *t*는 회분식 혐기성 소화 반응 시간(d)을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 레조르시놀 폐수 처리 회분식 혐기성 소화 실험 결과

본 연구에서는 레조르시놀 함유 폐수에 대한 혐기성 소화 기술의 적용 가능성을 평가하기 위하여, 레조르시놀을 단독 기질로 한 회분식 혐기성 소화 실험을 수행하였다. 실험 결과, 대조군 조건에서 레조르시놀 폐수의 혐기성 소화는 약 10일 만에 최대 메탄

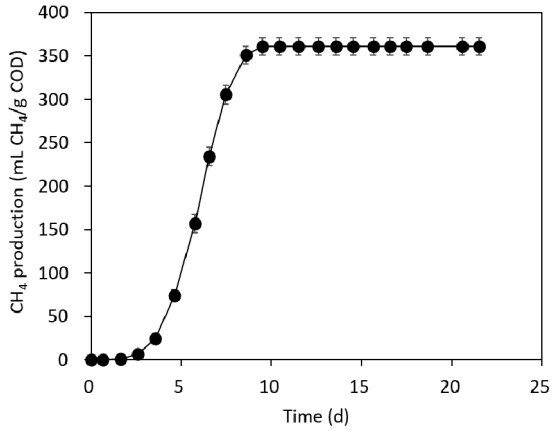


Fig. 1. Cumulative methane production in the control anaerobic batch test treating resorcinol wastewater. Data represent the mean values of triplicate experiments, and error bars indicate standard deviations ( $n = 3$ ).

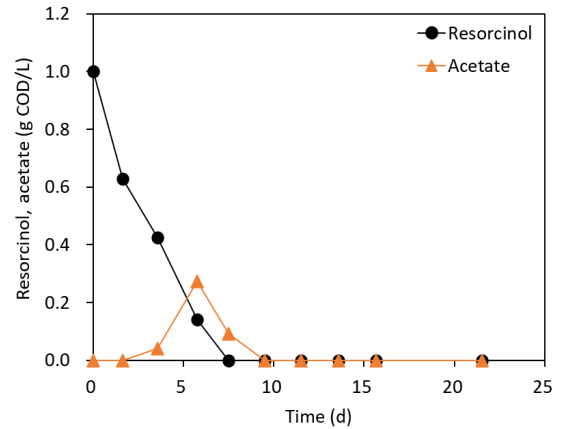


Fig. 2. Changes in resorcinol and acetate concentrations during the control anaerobic batch test treating resorcinol wastewater. Data were obtained from gas chromatography analysis of samples collected from a representative reactor.

수율에 도달하였으며 해당 값은 360.7 mL CH<sub>4</sub>/g COD로, 이론적 메탄 수율값(398 mL CH<sub>4</sub>/g COD, 37°C, 1 atm)의 약 91%에 해당하는 수준으로 나타났다(Fig. 1). 혐기성 소화 시 유기물의 약 5~10%가 혐기성 미생물로 전환됨을 감안하면, 레조르시놀의 대부분이 메탄으로 전환되었음을 의미한다(Gavala et al., 2003). 이는 레조르시놀 함유 폐수에 대해 혐기성 소화 공정이 효과적인 처리 기술로 적용될 수 있음을 시사한다.

레조르시놀의 혐기성 소화 시 생성되는 휘발성유기산을 측정하기 위해, 가스크로마토그래피-불꽃이온화 검출기를 활용하여 레조르시놀 및 휘발성유기산 분석을 수행하였다(Fig. 2). 레조르시놀 농도는 1.0 g COD/L에서 지연시간 없이 지속적으로 감소하여 약 8일 만에 완전히 제거되었다. 혐기성 소화 공정에서 레조르시놀의 분해능은 식종원 종류에 따라 크게 영향받는 것으로 보고되고 있다(Subramanyam and Mishra, 2013). 우분 처리 혐기성 소화조 유래 슬러지를 식종원으로 사용한 경우에는 레조르시놀의 분해가 관찰되지 않았던 반면, 석탄 탄화 공정 폐수 또는 폐물 폐수 처리 혐기성 소화조 유래 슬러지를 사용한 경우에는 레조르시놀을 포함한 다이하이드록시벤젠 계열 화합물이 혐기성 소화 조건에서 완전히 분해 가능한 것으로 보고된 바 있다(Leven and

Schnurer, 2005; Kuschik et al., 2010; Garcia Rea et al., 2022). 또한 본 연구에서 확인된 하수슬러지 처리 혐기성 소화조 유래 슬러지의 비 레조르시놀 분해 속도(71 mg/g VSS/d)는 기존 폐물 폐수 처리 혐기성 소화 슬러지를 이용한 문헌 보고값(27 mg/g VSS/d)보다 약 2.7배 높은 수준으로 나타났다. 이러한 결과를 고려할 때, 하수슬러지 처리 혐기성 소화조 유래 슬러지는 레조르시놀 분해를 위한 적절한 순응 과정을 거칠 경우 레조르시놀 혐기성 소화 공정의 우수한 식종원으로 충분히 활용 가능성을 시사한다.

아세트산 분석 결과, 레조르시놀의 분해 과정에서 최대 0.27 g COD/L의 아세트산이 일시적으로 축적되는 현상이 관측되었다. 이는 레조르시놀의 혐기성 분해 경로가 hydroxyhydroquinone, 2-maleylacetate, 3-oxoadipate 등의 중간생성물을 거쳐 아세트산으로 전환된다는 기존 보고(Pacheco-Sanchez et al., 2017)와 일치하는 결과이다. 이러한 아세트산의 축적 현상은 아세트산이 메탄생성반응이 레조르시놀의 혐기성 소화 과정에서 율속 단계(Rate-limiting step), 즉 다른 반응 단계들에 비해 상대적으로 반응 속도가 느려 전체 소화 반응의 진행 속도를 제한하는 단계로 작용했을 가능성을 시사한다.

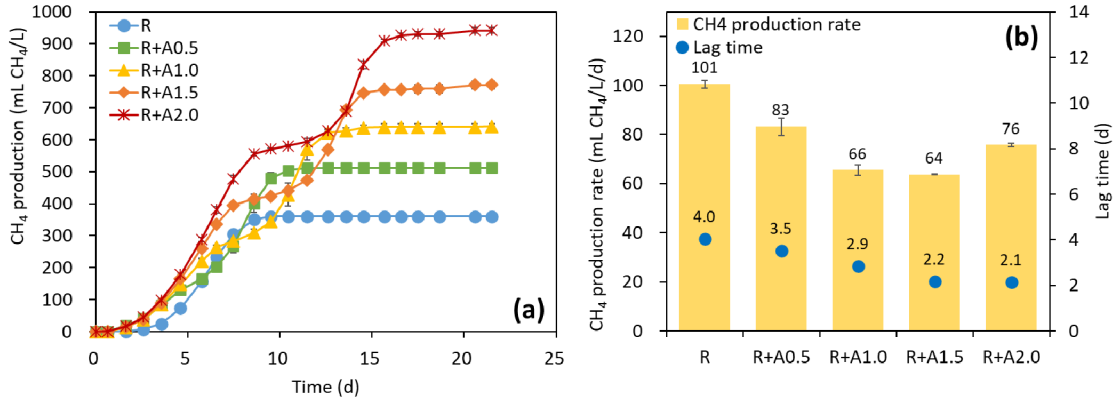


Fig. 3. (a) Cumulative methane production and (b) methane production rate and lag time during the anaerobic batch tests treating resorcinol wastewater with varying acetate concentrations. Data represent the mean values of triplicate experiments, and error bars indicate standard deviations (n = 3).

### 3.2. 레조르시놀과 아세트산의 공동 기질 조건에서의 회분식 혐기성 소화 실험 결과

본 연구에서는 레조르시놀과 아세트산의 공동 기질 조건에서 아세트산 농도 변화가 레조르시놀의 분해 및 메탄생성에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 회분식 혐기성 소화 실험을 수행하였다. 모든 반응기에서 21일 이내에 최대메탄수율에 도달하였으며, 이를 통해 레조르시놀 함유 폐수의 혐기성 소화 적용 가능성을 실험적으로 입증하였다(Fig. 3a). 레조르시놀 및 아세트산을 투입한 반응기에서는, 아세트산 농도 증가에 따라 지연시간이 레조르시놀의 단독 기질 조건 대비 12.5~47.5% 가량 단축되었다(Fig. 3b). 이는 아세트산이 메탄생성균의 직접 기질로 작용하여 미생물의 활성도를 유지하고 시스템의 초기 활성화를 촉진한 결과로 해석된다. 반면 최대 메탄생산속도의 경우 아세트산 증가에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 64~83 mL CH<sub>4</sub>/L/d로 레조르시놀 단독 기질 조건 대비 17.8~36.6% 가량 낮게 나타났다.

휘발성유기산 분석 결과, 대조군(R, 레조르시놀 단독 기질 조건)과 비교할 때 아세트산이 공동 기질로 투입된 조건에서는 레조르시놀의 분해가 지연되었으며, 아세트산 투입 농도가 증가할수록 이러한 분해 지연 현상이 더욱 심화되는 경향이 관측되었다(Fig. 4a). 특히 아세트산을 2 g COD/L 투입한 조건에서는 레조르시놀의 완전 분해까지 약 15일이 소요

되어, 단독 기질 조건 (8일) 대비 두 배 가까이 지연되었다. 반면, 아세트산은 모든 조건에서 최대 10일 이내에 완전히 소모되었으며(Fig. 4b), 아세트산이 완전히 제거된 시점 이후부터 레조르시놀 농도 감소율이 다시 증가하였다. 이러한 경향은 아세트산 농도가 높을수록 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 이는 초기 단계에서 아세트산이 우선적으로 분해된 후 레조르시놀 분해가 재개되는 기질 전환 특성을 보여준다. 또한 레조르시놀의 분해 과정에서 메탄생성 단계(특히 아세트산이용성 메탄생성단계)가 전체 시스템의 율속 단계로 작용할 가능성을 고려할 때(Fig. 2), 아세트산 농도 증가에 따라 해당 단계의 속도제한이 심화되어 레조르시놀의 최종 분해가 지연된 것으로 해석된다.

레조르시놀 분해 속도는 아세트산 투입량이 증가함에 따라 점진적으로 감소하여 64~105 mg COD/L/d (34~56 mg/L/d)로 나타났으며, 대조군(R) 대비 약 21.1~51.9% 낮은 값이 관측되었다(Fig. 4c). 스피어만 상관관계 분석 결과 아세트산 농도와 레조르시놀 분해 속도 간에는 유의한 음의 상관관계( $r_s = -1.00$ ,  $p < 0.05$ )를 나타내는 것으로 확인되었다. 한편 레조르시놀 분해 지연시간의 경우, 아세트산 농도 1.0 g COD/L 이상의 조건에서 아세트산 농도 증가에 따라 1.2~11.2일로 증가하였으며, 아세트산 농도와는 양의 상관관계( $r_s = 0.97$ ,  $p < 0.05$ )를 보였다.

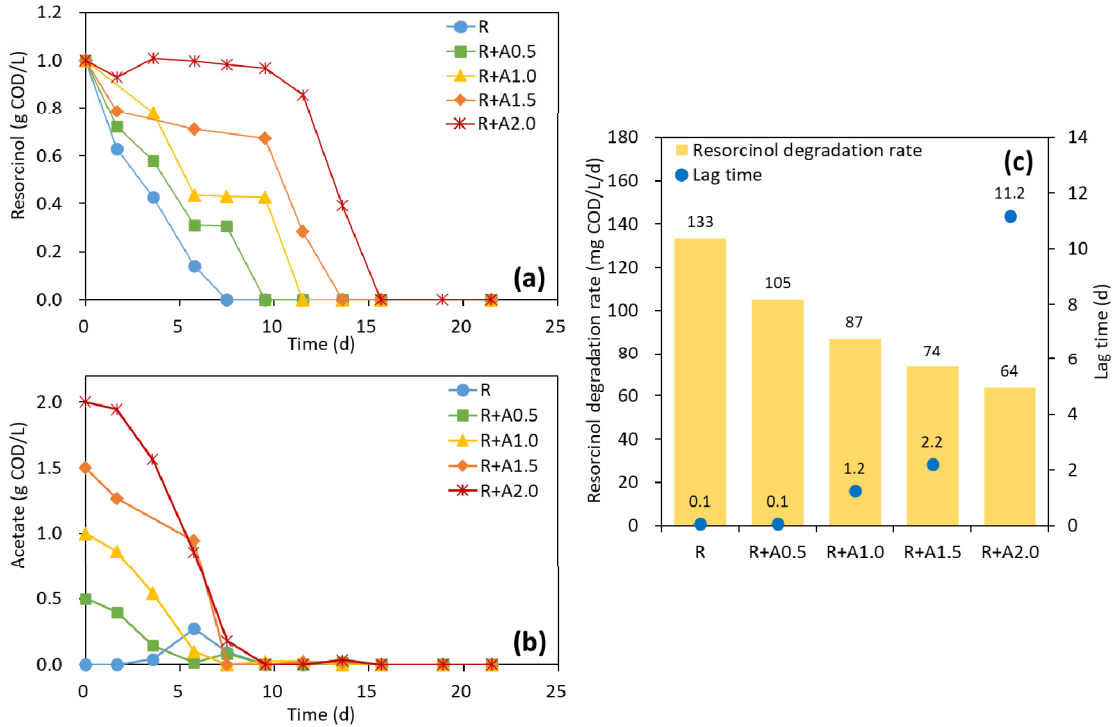


Fig. 4. Concentration profiles of (a) resorcinol and (b) acetate, and (c) resorcinol degradation rate and lag time during the anaerobic batch tests treating resorcinol wastewater with varying acetate concentrations. Data were obtained from gas chromatography analysis of samples collected from a representative reactor.

한편, 기존 문헌에서는 단순 유기산을 공동 기질로 투입할 경우 전자수용체 및 에너지원 공급이 원활해져 혐기성 소화 효율이 향상된다고 보고된 바 있다 (Garcia Rea et al., 2023; Kuroda et al., 2024). 그러나 본 연구에서는 레조르시놀과 아세트산이 공존할 때 오히려 레조르시놀의 분해가 지연되는 결과가 나타났다. 열역학적 관점에서 레조르시놀은 아세트산으로 전환되는 산화경로는 표준자유에너지 변화가 양의 값( $\Delta G^\circ = +66.5$  kJ/mol)을 갖는 비자발적인 반응에 해당한다(Garcia Rea et al., 2022). 이는 레조르시놀의 산화 과정이 열역학적으로 불리하여, 아세트산이 용성 메탄생성반응으로 축적된 아세트산의 소비가 적정수준 병행되어야만 반응이 진행될 수 있음을 의미한다(Schink, 1997). 따라서 본 실험에서 아세트산의 추가 투입은 레조르시놀 분해 반응의 열역학적 제한을 심화시켜 레조르시놀 혐기성 분해 반응을 지연시킨 것으로 추정할 수 있다. 이는

높은 농도의 아세트산이 축적될 경우, 열역학적 제한으로 상위 단계인 복합 유기물의 분해 및 유기산 생성 반응이 저해된다는 기존 문헌의 경향과도 부합한다 (McInerney et al., 2008; McInerney et al., 2009).

따라서 레조르시놀 함유 폐수를 대상으로 혐기성 소화 공정을 안정적으로 운영하기 위해서는, 사전 폐수 성분 분석 및 주기적인 모니터링을 통해 폐수 내 아세트산의 농도와 변동 특성을 평가하고 관리하는 것이 필요할 것으로 평가된다. 아울러, 레조르시놀 함유 폐수의 고율 혐기성 소화를 위해서는 연속 단계로 작용하는 아세트산 이용 메탄생성 경로를 향상시킬 수 있는 아세트산 대사능이 우수한 미생물 군집의 선택적 강화배양 또는 외부 접종을 통한 생물학적 증강이나 자철석 등의 전도성 물질을 활용한 전자전달 촉진 등과 같은 다양한 개선 전략의 도입이 필요할 것으로 평가된다. 다만 본 연구의 결과는 회분식 혐기성 소화 실험을 기반으로 도출된 결과이므로, 추후 실규모 혐기성 소화조를 위한 레조르시

늘 폐수의 고율 혐기성 소화 기술 개발을 위해서는 연속식 반응기 실험을 통한 장기적 영향 평가가 선행될 필요가 있다. 또한 차세대 염기서열 분석법 등 최신 분자생물학적 분석 방법을 활용하여, 연속식 반응기에서의 미생물 군집 구조 및 기능적 변화에 대한 분석을 수행함으로써, 아세트산 농도 증가에 따른 레조르시놀 분해 및 메탄생성 경로 변화와 관련된 미생물학적 기작을 보다 심층적으로 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 회분식 혐기성 소화 실험을 통해 레조르시놀 함유 폐수의 혐기성 소화 적용 가능성을 평가하고, 아세트산 농도 변화가 레조르시놀의 분해 및 메탄생성에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 레조르시놀을 단독 기질로 한 실험에서 메탄수율은 360.7 mL CH<sub>4</sub>/g COD (이론적 메탄수율의 약 91%)로 나타났으며, 투입된 레조르시놀의 대부분이 메탄으로 전환되어 레조르시놀 함유 폐수에 대한 혐기성 소화 기술의 적용 가능성을 실험적으로 입증하였다.

2) 아세트산을 공동 기질로 투입한 조건에서는 메탄생산속도가 64~83 mL CH<sub>4</sub>/L/d로 대조군 대비 약 17.8~36.6% 낮은 수준으로 확인되었으며, 레조르시놀 분해 속도 또한 64~105 mg COD/L/d로 대조군 대비 약 21.1~51.9% 낮은 것으로 확인되었다.

3) 상관관계 분석 결과, 아세트산 농도는 레조르시놀 분해속도와 유의한 음의 상관관계( $r_s = -1.00$ ,  $p < 0.05$ )를 띄는 것으로 나타났으며, 레조르시놀 분해 지연시간과는 양의 상관관계( $r_s = 0.97$ ,  $p < 0.05$ )가 나타났다. 이는 아세트산이용 메탄생성 단계가 전체 레조르시놀 혐기성 소화 반응의 율속 단계로 작용하였음을 시사한다.

본 연구는 레조르시놀 함유 폐수의 레조르시놀 및 아세트산 조성이 혐기성 소화 성능에 미치는 영향을 규명한 실험 자료를 제공하며, 이는 향후 레조르시놀 산업폐수의 효율적인 혐기성 처리 공정 개발 및 운전 최적화를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었습니다.

#### REFERENCES

- Angelidaki, I., Sanders, W., 2004, Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants, *Rev. Environ. Sci. Bio*, 3(2), 117-129.
- APHA-AWWA-WEF, 2005, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Elsayed, A., Laqa Kakar, F., Mustafa Abdelrahman, A., Ahmed, N., AlSayed, A., Sherif Zagloul, M., Muller, C., Bell, K. Y., Santoro, D., Norton, J., Marcus, A., Elbeshbishy, E., 2024, Enhancing anaerobic digestion Efficiency: A Comprehensive review on innovative intensification technologies, *Energ. Convers. Manage.*, 320, 118979.
- Garcia Rea, V. S., Egerland Bueno, B., Cerqueda-García, D., Muñoz Sierra, J. D., Spanjers, H., van Lier, J. B., 2022, Degradation of p-cresol, resorcinol, and phenol in anaerobic membrane bioreactors under saline conditions, *Chem. Eng. J.*, 430, 132672.
- García Rea, V. S., Muñoz Sierra, J. D., El-Kalliny, A. S., Cerqueda-García, D., Lindeboom, R. E. F., Spanjers, H., van Lier, J. B., 2023, Syntrophic acetate oxidation having a key role in thermophilic phenol conversion in anaerobic membrane bioreactor under saline conditions, *Chem. Eng. J.*, 455, 140305.
- Gavala, H. N., Angelidaki, I., Ahring, B. K., 2003, Kinetics and modeling of anaerobic digestion process, *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 81, 57-93.
- Huang, X., 2024, The promotion of anaerobic digestion technology upgrades in waste stream treatment plants for circular economy in the context of "Dual Carbon": Global status, development trend, and future challenges, *Water*, 16, 3718.
- Ji, Q., Tabassum, S., Hena, S., Silva, C. G., Yu, G., Zhang, Z., 2016, A Review on the coal gasification wastewater treatment technologies: Past, present and future outlook, *J. Clean. Prod.*, 126, 38-55.
- Kim, M., Jung, S., Kang, S., Rhie, M. N., Song, M., Shin, J., Shin, S. G., Lee, J., 2024, Magnetite particles accelerate methanogenic degradation of highly concentrated acetic acid in anaerobic digestion process, *Environ. Res.*, 255, 119132.

- Kong, W., Li, Y., Zhang, Y., Mei, Y., Tabassum, S., 2024, Biological treatment of refractory organic compounds in coal gasification wastewater: A Review, *J. Water Process Eng.*, 60, 105255.
- Kuroda, K., Maeda, R., Shinshima, F., Urasaki, K., Kubota, K., Nobu, M. K., Noguchi, T. Q. P., Satoh, H., Yamauchi, M., Narihiro, T., Yamada, M., 2024, Microbiological insights into anaerobic phenol degradation mechanisms and bulking phenomenon in a mesophilic upflow anaerobic sludge blanket reactor in long-term operation, *Water Res.*, 253, 121271.
- Kuschik, P., Stottmeister, U., Liu, Y. J., Wiessner, A., Kästner, M., Müller, R. A., 2010, Batch methanogenic fermentation experiments of wastewater from a brown coal low-temperature coke plant, *J. Environ. Sci. (China)*, 22(2), 192-197.
- Lee, J., Kim, E., Han, G., Tongco, J. V., Shin, S. G., Hwang, S., 2018, Microbial communities underpinning mesophilic anaerobic digesters treating food wastewater or sewage sludge: A Full-scale study, *Bioresour Technol.* 259, 388-397.
- Levé, L., Schnürer, A., 2005, Effects of temperature on biological degradation of phenols, benzoates and phthalates under methanogenic conditions, *Int. Biodeterior Biodegradation*, 55(2), 153-160.
- Li, Y., Liu, L., Wang, Q., Wu, J., Liu, T., Liu, H., Hong, Y., Huang, T., 2021, Enhanced anaerobic co-metabolism of coal gasification wastewater via the assistance of zero-valent iron, *J. Water Process Eng.*, 40, 101817.
- McInerney, M. J., Sieber, J. R., Gunsalus, R. P., 2009, Syntrophy in anaerobic global carbon cycles, *Curr. Opin. Biotechnol.*, 20(6), 623-632.
- McInerney, M. J., Struchtemeyer, C. G., Sieber, J., Mouttaki, H., Stams, A. J. M., Schink, B., Rohlin, L., Gunsalus, R. P., 2008, Physiology, ecology, phylogeny, and genomics of microorganisms capable of syntrophic metabolism, Incredible anaerobes: From physiology to genomics to fuels, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1125, 58-72.
- Nie, E., He, P., Zhang, H., Hao, L., Shao, L., Lü, F., 2021, How does temperature regulate anaerobic digestion?, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 150, 111453.
- Pacheco-Sánchez, D., Molina-Fuentes, Á., Marín, P., Medina-Bellver, J. I., González-López, Ó., Marqués, S., 2017, The *Azoarcus anaerobius* 1,3-Dihydroxybenzene (resorcinol) anaerobic degradation pathway is controlled by the coordinated activity of two enhancer-binding proteins, *Appl. Environ. Microbiol.*, 83(9), e03042-16.
- Pan, X., Zhao, L., Li, C., Angelidaki, I., Lv, N., Ning, J., Cai, G., Zhu, G., 2021, Deep insights into the network of acetate metabolism in anaerobic digestion: Focusing on syntrophic acetate oxidation and homoacetogenesis, *Water Res.*, 190, 116774.
- Saeed, S., Arshad, M. Y., Raza, A., Mahmood, F., Urbanowska, A., Ahmed, A. S., Niedzwiecki, L., 2023, Influence of thermal and chemical treatment on biosorbent from rice husk and Its application in removal of resorcinol from industrial wastewater, *Processes*, 11, 3344.
- Schink, B., 1997, Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 61(2), 262-280.
- Subramanyam, R., Mishra, I. M., 2013, Critical review of anaerobic biodegradation of benzenediols: Catechol, resorcinol, and hydroquinone, *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*, 17(3), 218-229.
- Wang, W., Han, H., Yuan, M., Li, H., 2010, Enhanced anaerobic biodegradability of real coal gasification wastewater with methanol addition, *J. Environ. Sci. (China)*, 22(12), 1868-1874.
- Yang, L. H., Cheng, H. Y., Zhu, T. T., Wang, H. C., Haider, M. R., Wang, A. J., 2021, Resorcinol as a highly efficient aromatic electron donor in bioelectrochemical system, *J. Hazard. Mater.*, 408, 124416.
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., Van't Riet, K., 1990, Modeling of the bacterial growth curve, *Appl. Environ. Microbiol.*, 56(6), 1875-1881.
- 
- Graduate student. Min-Jae Kim  
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University  
mj6232004@naver.com
  - Graduate student. Seon-Min Kang  
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University  
kangseonmin@naver.com
  - Professor. Joon-Yeob Lee  
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University  
Leejy@pknu.ac.kr