

효모 *Candida tropicalis* 고정화 담체를 이용한 Airlift 미생물반응기의 톨루엔 제거 및 미생물 성장 Toluene Removal and Microbial Growth of *Candida tropicalis* Immobilized with Polymer Media in Airlift Bioreactors

남궁형규¹ · 송지현¹ · 정미영² · 황선진^{2*}

Hyeong-Kyu Namgung¹ · JiHyeon Song¹ · Mi-Young Jung² · Sun-Jin Hwang^{2*}

1 세종대학교 토목환경공학과, 2 경희대학교 환경응용화학대학 환경공학전공

(2008년 12월 29일 접수 ; 2009년 1월 19일 수정; 2009년 1월 22일 채택)

Abstract

This study was conducted to improve biological degradation efficiency of toluene as a model volatile organic compound (VOC) using yeast *Candida tropicalis* and to suggest an effective method for bioreactor operation. The yeast strain was immobilized with polyethylene glycol (PEG), alginate, and powdered activated carbon (PAC). The yeast-immobilized polymer media were used as fluidized materials in an airlift bioreactor. Polymer media without PAC were also made and operated in another airlift bioreactor. The two bioreactors showed toluene removal efficiencies ranging 80–96% at loading rates of 10–35 g/m³-hr, and the bioreactor containing the polymer media with PAC achieved higher removal efficiency. Protein contents in the liquid phase showed that the bioreactor using the yeast-immobilized polymer media with PAC had a higher rate of microbial growth initially than that without PAC. In addition, the microbial growth rate inside of the polymer media with PAC was five times higher than that without PAC. Consequently, the polymer media containing the yeast strain and PAC could enhance removal efficiencies for VOCs, and the immobilization method improve microbial activity and stability for a long-term operation of biological systems.

Key words : immobilized polymer media, PAC, *Candida tropicalis*, VOCs, Airlift column bioreactor

주제어 : 고분자 담체, 분말활성탄, *Candida tropicalis*, 휘발성유기화합물, Airlift 생물반응기

1. 서론

최근 산업폐수 처리공정에서 배출되는 휘발성유기화합물 (Volatile Organic Compounds, VOCs)을 규제하기 위한 다양한 법과 규정이 강화되면서, 산업폐수 처리시설에서 배출되는 VOCs 처리가 큰 문제로 대두되고 있다. 대표적인 VOC인 톨루엔은 유해오염물질로 분류되어 있으며, 톨루엔의 농도를 규제수준 이하로 저감하기 위한 다양한 처리기술

이 적용되고 있다.

산업폐수 처리장에서 배출되는 VOCs를 제거하기 위한 처리방법 중에서 미생물을 이용한 바이오필터 방법이 다양한 오염원에 널리 사용되고 있다. (김조천, 2006; Deviny 등, 1999; Kennes 등, 2001; Kinney 등, 1999) 바이오필터를 이용한 VOCs 처리기술은 운전이 상대적으로 용이하며 처리비용이 낮고 2차 오염이 적다는 장점을 가지고 있다. 하지만 바이오필터 기술은 운전이 장기간 지속되는 경우, 담

* Corresponding author Tel:+82-31-201-2497, Fax:+82-31-203-4589, E-mail: sjhwang@khu.ac.kr(Hwang, S.J.)

체 표면에 비활성 미생물막 누적에 의한 공극 막힘현상이 일어나, 압력손실의 증가와 전체 운전성능의 감소를 가져오는 한계를 가지고 있다.(하태욱과 최상준, 2000; Kinney 등, 1999) 또한 바이오필터 기술은 보편적으로 *Pseudomonas* 와 같은 박테리아를 적용하고 있지만, (조영철 등, 2007; Shim 등, 1999; Jung 등, 2004) 일반적으로 박테리아를 이용한 처리기술은 온도나 pH, 또는 오염물질 유입농도의 갑작스런 변화에 적응이 힘들고, 장기 운전시에는 제거효율 감소 등의 문제점들이 발생하여 물리적인 처리방법보다 안정적인 운전이 어렵다.

박테리아 적용 기술의 단점을 보완하기 위하여 낮은 pH에서도 안정적인 운전이 가능하며, 갑작스런 환경변화(온도, 오염물질농도 등)에 적응력이 좋은 효모류(yeast)를 적용할 수 있다. 본 연구에서는 VOCs 분해능력이 있는 *Candida tropicalis*를 적용하여 톨루엔 제거에 적용하였다. *C. tropicalis*는 대표적인 알코올 발효균으로, 단백질의 제조와 증속속 제거, 페놀과 액상의 m-cresol의 생물학적 분해 등에도 이용되고 있으며, 문헌에 따르면 낮은 pH와 급격한 기질농도의 변화에도 잘 적응하는 것으로 알려져 있다.(김성빈 등, 1996; Groenestijn 등, 2001; Yan 등, 2005, 2006)

또한 담체를 충전한 형태인 생물막 바이오필터의 단점을 보완하기 위하여 부유성장(suspended-growth) 미생물을 이용한 처리기술이 주목받고 있다.(Oh 등, 2006) 부유성장 미생물을 이용한 반응기는 압력 손실이나 공극 막힘 현상에 대한 염려가 없으며, 미생물반응기의 다양한 운전조건(pH, 영양염류 농도, 미생물농도 등)을 빠르고 안정적으로 조절할 수 있다는 장점이 있다. (Kinney 등, 1999; Neal 등, 2000) 하지만 액상 부유성장 미생물 반응기의 경우 미생물 배양액에 오염물질이 기체상으로 통과하기 때문에 가액간 물질전달이 전체 반응속도를 좌우할 수 있으므로 물질전달 속도를 증가시키기 위해 구조적으로 가액 전달에 유리한 airlift column 형태의 반응기를 사용하였고 (류희욱 등, 1996; Xiaoping 등, 2000; Cheng-Shing 등, 2004; Stefanie 등, 2008), 미생물 배양액에 yeast를 포괄 고정시킨 담체를 첨가하여 미생물반응기를 유동상 형태로 운전하였다. (Kim 등, 2008)

본 연구는 부유미생물을 적용한 airlift column 미생물반응기에 yeast인 *C. tropicalis*를 포괄 고정화 담체를 적용하여, 미생물반응기의 휘발성유기화합물 처리효율 및 운전조건을 검토하였다. 또한 가액 전달이 중요한 부유 미생물반응기에서 고분자담체에 분말활성탄(PAC)의 첨가 여부가 처리효율 및 미생물의 활성도에 주는 영향을 비교 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에서는 yeast 배양액과 고분자 담체를 적용한 Airlift column 생물반응기를 운전하였으며, Fig.1에 실험 장치의 모식도를 나타내었다. 반응기는 직사각 기둥 모형으로 되어있으며, 반응조의 전체 부피는 3L가 되도록 제작하였고 유효 부피는 2L로 운전하였다. 반응기의 운전은 연속적으로 이루어질 수 있도록 하였으며, 공기는 펌프로부터의 HEPA 필터를 통과한 후 syringe pump (Model 200, KD Scientific, USA)에 의해 주입되는 톨루엔에 의해 일정한 농도로 오염되도록 하였다. 오염된 공기는 반응기의 바닥에 있는 산기판을 통하여 유입되고 공기방울 형태로 효모 배양액을 통과해 유동상 미생물 반응기 상부로 배출된다.

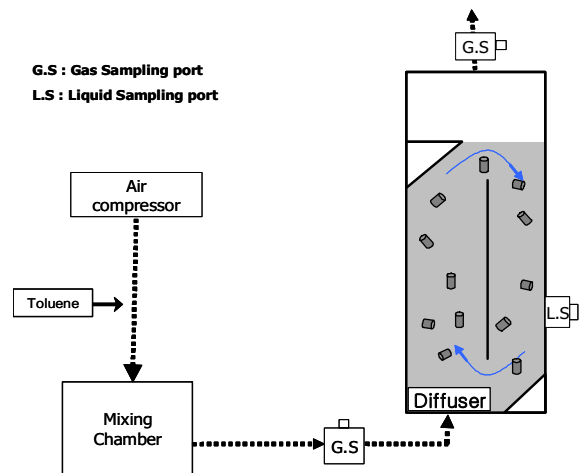


Fig. 1. Schematic of the airlift bioreactor used in this study

2.2 실험 재료

2.2.1 적용 균주 배양

본 연구에서 적용한 yeast인 *Candida tropicalis*는 한국 미생물보존센터로부터 구입하여 배양하였다. 효모 균주는 YM agar 표면에서 성장시킨 후, 250 mL 크기의 유리병에 들어있는 50 mL의 멸균 배양액에 접종하고 톨루엔을 기상으로 공급하여 배양하였다. 사용한 배양액은 yeast의 성장에 필요한 각종 영양염류와 pH 완충용액이 포함되어 있다. 영양염류는 Main Nutrient(mg/L) : Na_2HPO_4 1420, KH_2PO_4 1360, KNO_3 3030, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 500, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.5, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 3.3, and trace metals(mg/L) : $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.25, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.18, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.02, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.04, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.04, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.02, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.02, H_3BO_4 0.02로 구성되었다.

2.2.2 고분자 담체

고분자 담체의 제조과정 및 첨가물질을 Fig.2에 표시하였다. 고분자 담체는 기본적으로 인공 고분자물질인 PEG (Polyethylene Glycol)와 천연 고분자물질인 Sodium Alginate를 총 중량대비 각각 18%, 1%의 비율로 첨가해 주었다. 고분자 담체 제작시에는 반응기에 유입되는 톨루엔의 물질전달량을 증가시키기 위하여 분말활성탄을 첨가하였다. 첨가된 활성탄은 고분자 화합물들과 잘 섞이고, 담체 제작을 쉽게 하기 위해서 분말로 된 활성탄(PAC, Calgon, USA)을 사용하였으며, 총 중량대비 1%를 첨가하였다. 이와 같이 제작한 고분자 담체는 PACY(PEG+Alginate+PAC+Yeast)라 명명하였다. 활성탄의 첨가여부가 미생물의 성장 및 활성, 물질전달에 기여하는 정도를 확인하기 위하여, 활성탄을 첨가하지 않은 담체인 PAY(PEG+Alginate+Yeast)를 제작하여 airlift 미생물반응기를 운전하였다.

2.3 Airlift bioreactor 운전

Airlift 생물반응기는 공기 체류시간(EBRT, empty bed residence time)을 1분으로 하고, 활성탄이 첨가되지 않은 담체(PAY)가 충전된 반응기와 활성탄이 첨가된 담체(PACY)로 충전된 반응기를 모든 조건이 동일하게 동시에

운전하였다. 고분자 담체의 충전률은 각 20%(400g)로 고정하여 운전하였고, 그에 따른 제거효율 및 미생물의 활성도 차이를 확인하였다. 유입되는 톨루엔의 농도와 부하량은 세 단계로 하였으며, Table 1에 나타내었다.

2.4 분석 방법

기체 시료는 미생물반응기 유입부와 유출부 2곳에 설치된 sampling port를 통해 gas-tight syringe로 0.5mL씩 채취하였으며, 채취한 즉시 불꽃이온검출기(FID)가 장착된 GC (HP 6890, USA)에 주입하여 톨루엔 농도를 측정하였다. 톨루엔의 GC standard는 0-500ppm 범위를 vapor pressure 방법을 이용하여 산정하였으며, GC의 운전조건은 다음과 같다. Carrier gas : Helium, Column : HP-5 capillary column(30 m × 0.32 mm), Flow rate : 35 mL/min, Injection temperature : 150°C, Detector temperature : 250°C

미생물반응기에서 미생물 분해 작용으로 발생하는 CO₂ 농도 증가량은 적외선을 이용한 CO₂ analyzer (LI-820, LI-COR, USA)를 이용하여 측정하였다. 액상 미생물 농도는 Bradford 시약 (Bio-Rad, USA)을 사용한 단백질 농도로 측정 분석하였다. 단백질 농도 측정에 앞서 시료 0.8 mL를 Sonic VibraCell (VCX130, Sonic and Materials Inc.

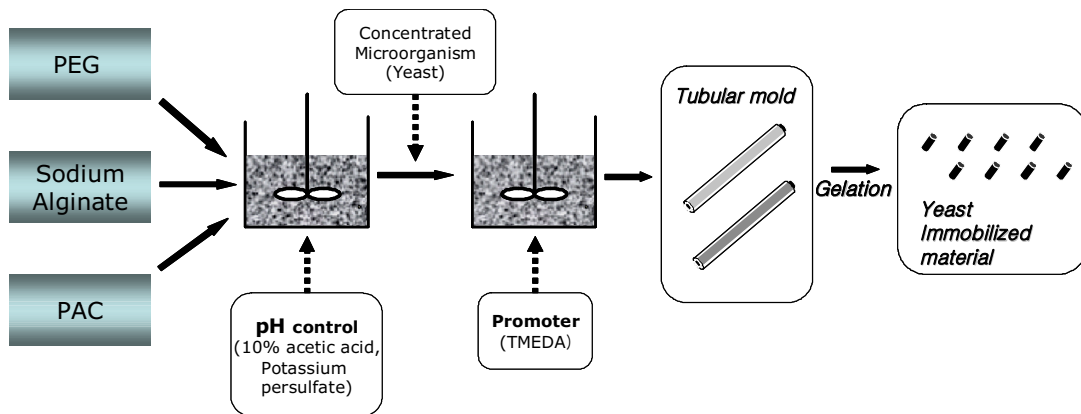


Fig. 2. Protocol of yeast Immobilized in polymer packing materials

Table 1. Experimental conditions of airlift bioreactor operation.

Steps	Description	Toluene	
		concentration (ppm)	loading (g/m ³ -hr)
1.	Low toluene loading	45±5	11
2.	Medium toluene loading	90±5	20
3.	High toluene loading	150±10	34

USA)을 이용하여 30W에서 6분간 초음파 분해를 통해 단백질을 추출하였으며, 16배 희석한 시료 0.8 mL와 시약 0.2 mL를 혼합한 후 5분간 발색시켜 595 nm 파장에서 흡광광도계(Simadzu, Japan)를 사용하여 농도를 분석하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 Airlift bioreactor 운전

Airlift column bioreactor는 20일 동안 3단계로 톨루엔 농도에 변화를 주며 운전하였고, 이 기간 동안의 유입농도와 유출농도, 제거효율의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 초기 운전 조건에서 분말활성탄을 첨가한 담체(PACY) 반응기가 95%이상의 처리효율을 보이며, 분말활성탄을 첨가하지 않은 담체(PAY) 반응기의 90% 정도에 비해서 더 좋은 효율을 보인다. 하지만 두 번째 단계 농도에서 PACY 담체 반응기의 처리효율이 85% 수준까지 하락 후 다시 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 농도부하가 높아짐에 따른 일시적인 하락으로 볼 수 있다. 운전기간이 증가함에 따라 두 반응기 모두 90% 이상의 일정한 처리효율을 보이는 것을 확인할 수 있다.

두 반응기의 각 단계별 부하량에 따른 처리량과 처리효율을 Table 2에 나타내었으며, 그 결과 PACY 담체 반응기가 PAY 담체 반응기에 비하여 각 단계별 처리효율 면에서 7.0%, 0.8%, 0.4%씩 우세한 것을 확인할 수 있다. 이것은 초기의 미생물 성장 속도의 차이에 의한 것으로 판단되며, 미생물의 농도가 포화단계에 다다름에 따라 처리효율이 비슷해지는 것으로 볼 수 있다.

분말활성탄 첨가량이 많지 않았기 때문에 흡착에 의한 톨루엔 제거능은 그리 크지 않았다. Airlift 생물반응기에 첨가된 총 분말활성탄의 양과 최대흡착능을 고려하여 계산해 보면, Step1의 유입 톨루엔농도 조건에서 1일 이내에 파과(breakthrough)가 일어난다. 즉, Airlift bioreactor 운전 초기부터 톨루엔 제거 반응은 주로 생물학적 분해에 의존하며, 활성탄 흡착에 의한 톨루엔 제거량은 미미하였다. 결과적으로 고분자 담체에서 분말활성탄의 효과는 초기 미생물의 성장 증진과 관련이 있는 것으로 판단된다.

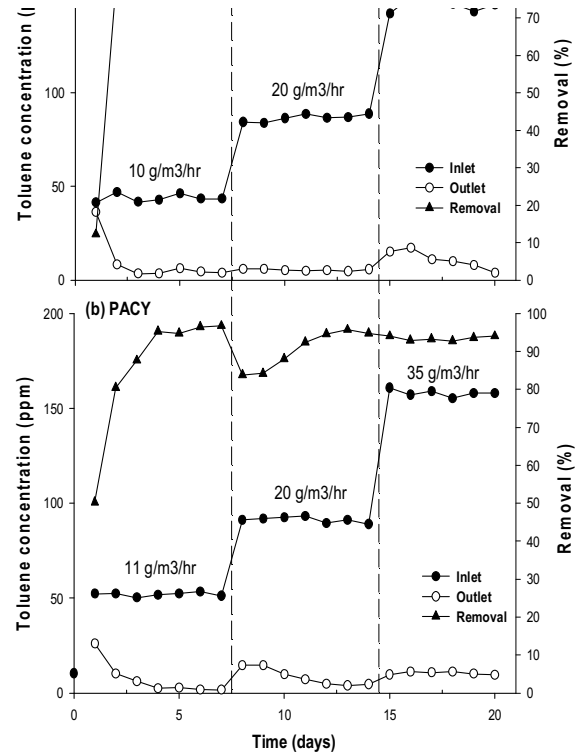


Fig. 3. Removal of Toluene in Airlift Column Bioreactor

3.2 생물반응기 내에서 *C. tropicalis*의 활성도 변화

두 airlift 생물반응기의 pH 변화 및 CO₂ 발생량의 차이를 Fig. 4에 나타내었다. CO₂ 발생량은 유입되는 톨루엔 농도가 증가함에 따라서 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, CO₂가 발생함에 따라서 pH가 점차 하락하는 추세를 보여주고 있다. 두 반응기 모두에서 pH가 4.5 수준까지 하락하였음에도 불구하고, 전체적인 톨루엔 처리효율이 90% 이상으로 일정하게 유지되었으며, 이를 통해 yeast를 사용한 생물반응기에서의 pH 하락이 처리효율에 거의 영향을 끼치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 pH가 4 이하로 너무 낮아지면 미생물의 성장 및 활동에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되어, 교체되는 영양염류의 양을 200mL→300mL로 증가시켜 pH를 조절하였다.

Table 2. Toluene loading and removal rates in airlift bioreactors operated under different operational conditions

Steps	PAY			PACY		
	Specific loading (g/m ³ -hr)	Removal rate (g/m ³ -hr)	Removal efficiency (%)	Specific loading (g/m ³ -hr)	Removal rate (g/m ³ -hr)	Removal efficiency (%)
1.	10.13	8.93	88.8	11.57	11.20	95.8
2.	20.07	18.94	93.8	20.60	19.71	94.6
3.	33.34	31.06	93.1	35.7	35.54	93.5

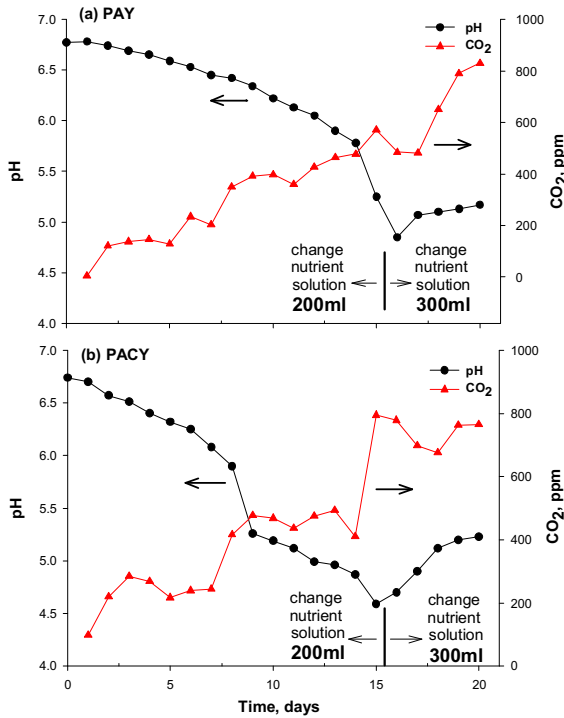


Fig. 4. Changes in pH & CO₂ production during airlift bioreactor operation

액상 및 담체에 미생물의 성장여부를 알기 위하여 반응기내 액상의 단백질 농도와 담체 내부의 단백질량을 측정하였으며, Fig. 5에 나타내었다. Airlift 생물반응기 운전을 시작한 초기에는 두 반응기내 액상 및 담체의 단백질량에 큰 차이가 없었으나, 운전 시작과 동시에 PACY 담체 반응기의 단백질량이 PAY 담체 반응기의 단백질량보다 빠르게 증가함을 볼 수 있다. 이것은 PACY 담체가 반응기내 기-액 전달을 원활히 해주어, 액상의 미생물 성장에 긍정적인 영향을 끼친 것으로 판단된다. 하지만 반응기내 액상에서 자랄 수 있는 미생물량에는 한계가 있으므로, 시간이 지남에 따라서 두 반응기의 액상 단백질량의 차이가 줄어들어 가는 것을 알 수 있다. 또한 반응기내의 PACY 담체와 PAY 담체의 단백질량을 측정한 결과를 보면, PACY 담체의 단백질량은 PAY 담체의 단백질량보다 5배 정도 많은 1000 µg-protein/g-media수준을 나타내는 것을 확인 할 수 있는데, 이것 역시 PACY 담체에 첨가된 분말활성탄의 흡착능력이 미생물의 성장에 영향을 준 것으로 판단된다.

미생물량이 지속적으로 증가하였음에도 불구하고 PAY 및 PACY 담체를 이용한 airlift 생물반응기에서는 전체 운전기간 동안 압력손실 변화가 거의 없었다. 일반 담체 충전형 바이오필터(packed bed biofilter)에서는 장기간 운전시,

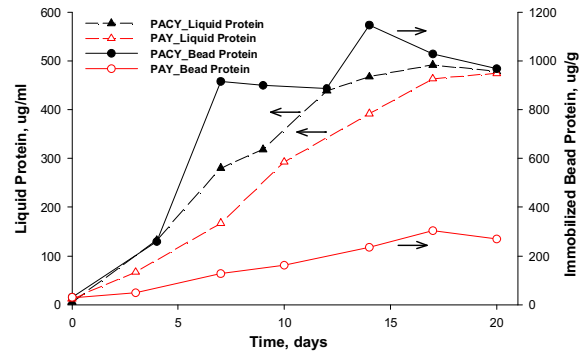


Fig. 5. Protein contents of the liquid phase and in the immobilized media during the airlift bioreactor operation

담체에 미생물이 과다 성장할 경우 막힘 현상, 압력손실이 고질적인 문제점으로 지적되었으나(남궁원 등, 2000), 본 연구의 유동상 균주를 이용한 반응기는 과다 성장한 균주의 교체만으로 이러한 문제를 원천적으로 상쇄할 것으로 기대된다.

4. 결론

이 실험에서는 yeast의 한 종류인 *Candida tropicalis*를 이용한 airlift column 생물반응기에서 담체의 종류에 따른 톨루엔의 제거효율과 미생물의 성장에 대한 영향을 확인하였으며, 그 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- 휘발성유기화합물의 가액간 물질전달률을 높여주기 위해서 airlift column 생물반응기와 고분자 담체를 적용하였으며, 담체의 종류에 따른 톨루엔의 제거효율 및 미생물의 성장에 미치는 영향을 알아보기 위하여 PAC(powder activated carbon)를 담체에 첨가하여 비교 실험을 수행하였다. 실험결과, 처리효율 면에서 PAC가 첨가된 담체를 적용한 반응기가 그렇지 않은 반응기에 비해 더 높은 톨루엔 분해율을 나타내었다.
- PAC가 첨가된 담체를 적용한 반응기의 액상 단백질량이 첨가되지 않은 담체를 적용한 반응기에 비해서 초기에 더 빨리 증가하는 것으로 보아, PAC가 미생물의 초기 성장에 긍정적인 영향을 끼치는 것을 확인하였다.
- PAC가 첨가된 담체의 단백질량이 PAC가 첨가되지 않은 담체에 비하여 5배 정도의 차이를 보임으로써, PAC가 담체의 미생물 성장을 원활히 해준다는 것을 확인하였다. 그에따라 장기적인 운전에서 오염물질의 충격부하 및 간헐적 주입에 따른 환경변화에 효율적이며 안정적인 운전이 가능할 것으로 사료된다.

결과적으로 PAC를 첨가하고 *Candida tropicalis* 포괄고정 담체를 이용한 airlift column yeast 생물반응기는 액상 및 담체의 미생물 성장에 긍정적인 영향을 줌으로써 안정적이고 장기적인 반응기 운전을 가능하게 하여, 기존의 생물여과를 이용한 오염물질 처리의 효과적인 대처 방안이 될 것으로 기대된다.

5. 사 사

본 연구는 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.

6. 참고문헌

1. 김성빈, 김치경, 김희석, 이창호, 신기선, 권기석, 윤병대, 오희목 (1996) 폐놀분해 효모 *Candida tropicalis* PW-51의 분리 및 분해특성, *산업미생물학회지*, 제24권, 제6호, pp.743-748.
2. 김조천 (2006) 국내의 휘발성유기화합물(VOC) 현황 및 관리 기술, *한국대기환경학회지*, 제22권, 제6호, pp.743-757.
3. 남궁완, 박용진, 박준석 (2000) GAC 및 톨루엔 바이오피터를 이용한 고농도 톨루엔가스의 처리, *한국폐기물학회지*, 제17권, 제8호, pp.969-967.
4. 류희욱, 장용근, 김상돈(1994) Airlift 생물 반응기, *한국생물공학회지*, 제9권, 제4호, pp.347-364.
5. 조영철, 장현섭, 황선진(2007) 미생물반응기에서 분리한 *Pseudomonas* 속 세균의 BTXS Compounds 분해 특성, *대한환경공학회지*, 제29권, 제6호, pp.678-683.
6. 하태욱, 최상준(2000) 악취 및 VOCs 제어를 위한 Biofilter 기술, *대한환경공학회지*, 제14권, pp.14-23.
7. Lo, C.S and Hwang, S.J (2004) Dynamic behavior of an internal-loop airlift bioreactor for degradation of waste gas containing toluene, *Chemical Engineering Science*, Vol 59, pp.4517-4530.
8. Devinny, J.S., Deshusses, M.A. and Webster T.S. (1999) *Biofiltration for air pollution control*, CRC Lewis Publishers, New York
9. Van Groenestijn, J.W., Van Heiningen, W.N.M. and Kraakman, N.J.R. (2001) Biofilters based on the action of fungi, *Water Sci. Technol.*, Vol 44(9), pp.227-232.
10. Jung, I.G. and Park, C.H. (2004) Characteristics of *Rhodococcus pyridinovorans* PYJ-1 for the biodegradation of benzene, toluene, m-xylene (BTX), and their mixtures, *J. Biosci. Bioeng.*, Vol 97(6), pp.429-431.
11. Kennes, C. and Veiga, M.C. (2001) Bioreactors for waste gas treatment, Kluwer Academic Publishers, Norwell
12. Kim, T.Y., Jin, H.J., Park, S.S., Kim S.J. and Cho. S.Y. (2008) Adsorption equilibrium of copper and phenol by powdered activated carbon, alginate bead and alginate-activated carbon bead, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol 14, pp.714-719.
13. Kinney, K.A., Loehr, R.C. and Corsi, R.L. (1999) Vapor-phase bioreactors: avoiding problems through better design and operation, *Environ. Prog.*, Vol 18, pp.222-230.
14. Neal, A.B. and Loehr, R.C. (2000) Use of biofilters and suspended-growth reactors to treat VOCs, *Waste Manage.*, Vol 20, pp.59-68.
15. Oh, K.J., Cho, K.C., Choung, Y.H., Park, S.K., Cho, S.K. and Kim, D.G. (2006) Removal of hydrogen sulfide, benzene and toluene by a fluidized bed bioreactor, *Korean J. Chem. Eng.*, Vol 23(1), pp.148-152.
16. Shim, H. and Yang, S.T. (1999) Biodegradation of benzene, toluene, ethylbenzene, and o-xylene by a coculture of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* immobilized in a fibrous-bed bioreactor, *J. Biotechnol.*, Vol 67(2-3), pp.99-112.
17. Stefanie, D., Aude, G., Cecile, L. and Aissa, O.D. (2008) Solid-liquid mass transfers in an Airlift Reactor incorporating alginate beads for the application as bioartificial liver, *Chemical Engineering and Process.*, Vol 47(12), pp.2370-2378.
18. Xiaoping, L., Jian, D., Yanru, W., and Jun, S. (2000) Comparison of the hydrodynamics and mass transfer characteristics of a modified square airlift reactor with common airlift reactors, *Chemical Engineering Science*, Vol 55, pp.2257-2263.
19. Yan, J., Jianping, W., Hongmei, L., Suliang, Y. and Zongding, H. (2005) The biodegradation of phenol at high initial concentration by the yeast *Candida tropicalis*, *Biochem. Eng. J.*, Vol 24(3), pp.243-247.
20. Yan, J., Jianping, W., Jing, B., Daoquan, W. and Zongding, H. (2006) Phenol biodegradation by the yeast *Candida tropicalis* in the presence of m-cresol, *Biochem. Eng. J.*, Vol 29(3), pp.227-234.