

악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 바이오필터 처리: 2. 개선된 바이오필터설계에 의한 악취 및 VOC 제거거동

이은주 · 임광희[†]

대구대학교 화학공학과, 산업 및 환경폐가스연구소
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15
(2013년 1월 14일 접수, 2013년 1월 21일 채택)

Biofilter Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC: 2. Transient Behavior of Biofilter with Improved Design to Eliminate Malodor and VOC

Eun Ju Lee and Kwang-Hee Lim[†]

Department of Chemical Engineering, Daegu University, Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment, 15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyungsan, Gyeongbuk 712-714, Korea
(Received 14 January 2012; accepted 21 January 2013)

요 약

본 연구에서는 악취 및 휘발성 유기화합물(VOC)를 함유하는 폐가스 처리에 있어서 개선된 바이오필터시스템의 악취 및 VOC의 제거거동 및 제거효율 등을 관찰하고, 전통적 바이오필터의 경우의 악취 및 VOC의 제거거동 및 제거효율 등과 비교하였다. 개선된 바이오필터시스템 운전 1~7단계에서 바이오필터 유효높이 차이에도 불구하고 미생물 population 분포 차이로 인하여, 정해진 시간에 각 단에서 에탄올 농도 순서가 바뀌었다. 반면에 운전 8단계에서 폐가스의 개선된 바이오필터시스템으로의 공급방향들이 바뀌었을 때에 에탄올 농도가 높은 순서는 운전 1~7단계와 다르게 바이오필터의 유효높이가 낮은 순서와 일치하였다. 황화수소 경우도 마찬가지였으나 에탄올 경우와 비교하였을 때에 농도순서가 바뀐 단의 황화수소 농도의 차이는 매우 적었다. 바이오필터 운전 8단계에서 개선된 바이오필터시스템의 에탄올 제거효율은 약 96%로서 전통적 바이오필터반응기의 에탄올 제거효율인 94%보다 약 2% 증가하였다. 개선된 바이오필터시스템 처리가스의 황화수소 농도의 거동은 전통적 바이오필터반응기와 비슷하였으나 황화수소 처리농도가 더 낮았다. 운전 8단계의 개선된 바이오필터시스템의 황화수소제거효율은 전통적 바이오필터반응기의 황화수소 제거효율보다 약 2% 가량 높았다. 따라서 개선된 바이오필터시스템의 제거효율은 에탄올과 황화수소 경우에 전통적 바이오필터반응기보다 각각 2% 제고되었음이 관찰되었다.

Abstract – In this study, both transient behaviors of a biofilter system with improved design and a conventional biofilter were observed to perform the treatment of waste air containing malodor and volatile organic compound (VOC). Their behaviors of removal efficiency and treated concentration of malodor and VOC were compared each other. During 1st~7th stages of improved biofilter system operation it was observed that the order of treated ethanol concentration at each sampling port was switched due to the difference of microbe-population-distribution in spite of the difference of biofilter effective height. However, at 8th stage of its operation, the order of treated ethanol concentration at each sampling port was consistent to the order of biofilter effective height at each sampling port. The same was applied to the case of hydrogen sulfide, even though the difference of switched treated-hydrogen sulfide-concentrations was less than that of switched treated-ethanol-concentrations. The ethanol-removal efficiency of the biofilter system with improved design was ca. 96%, which was greater by 2% than that of the conventional biofilter. The transient behavior of treated hydrogen sulfide concentration of both biofilters were similar to each other. However, the concentration of hydrogen sulfide treated by the biofilter system with improved design was observed lower than that by the conventional biofilter. The hydrogen sulfide-removal efficiency of the biofilter system with improved design was higher by ca. 2% than that of the conventional biofilter. Therefore, the hydrogen sulfide-removal efficiency of the biofilter system with improved design was observed to be enhanced by the same as its ethanol-removal efficiency.

Key words: Biofilter System with Improved Design, Conventional Biofilter, Removal Efficiency, Malodor, VOC

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: khlim@daegu.ac.kr

1. 서론

바이오매스 축적은 바이오필터 운전에서 장기간 운전에서 안정적인 바이오필터 성능을 이루기 위하여 조절되어야 할 가장 중요한 공정이다. 지나친 바이오매스의 축적은 궁극적으로 바이오필터 내부의 바이오매스의 일부분을 외부로 강제세척하거나 미생물담체를 교체해야하는 심각한 수준으로 압력강하를 높인다. 게다가 바이오매스 잉여분은 압력강하를 높여서 바이오필터 운전비를 증가시킬 뿐만 아니라, 비표면적과 공극률을 감소시켜서 바이오필터의 제거효율을 낮춘다. 또한 고르지 않은 바이오매스 성장에 따른 channeling도 발생할 수 있다[1]. 이와 같이 지나친 바이오매스의 축적에 의한 압력강하 등이 바이오필터 운전성능에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 연구가 이루어지고 있다. Dorado *et al.*[2]은 미생물 접종단계부터 바이오필터 폐색단계까지 높은 VOC 부하 조건에서 바이오필터를 운전하여서 바이오필터 내부의 바이오매스 축적에 의한 압력강하 등의 바이오필터 처리효율에 미치는 영향을 조사하였는데 축적된 바이오매스를 제거하기 위해서는 물을 살수하는 것이 가장 효과적이라고 보고하였다. Ryu *et al.* [3]은 바이오필터의 고부하 운전에서 바이오매스 농도와 압력강하의 바이오필터 성능에 미치는 관계를 정량적으로 보고하였다. Znad *et al.* [4]은 compost 담체를 충전한 바이오필터를 폐가스의 바이오필터로의 공급방향을 상향 및 하향으로 전환하는 방식으로 운전하여서 높은 VOC 부하를 가진 폐가스를 처리하여서 바이오필터 성능향상을 보였음을 보고하였다. Hasan과 Sorial [5]은 바이오필터의 장기간 운전동안 성능유지를 위한 중요한 인자인 바이오필터 베드 내부에 과도한 미생물누적을 조절하기 위하여 backwashing, starvation 및 stagnation을 제안하고 backwashing이 바이오필터의 장기간 운전에서 stagnation보다 비효과적이고 starvation의 경우에 바이오필터의 성능이 가장 낮았다고 보고하였다. 한편 바이오필터설계에서 미생물담체의 선정은 매우 중요하다. 유기담체는 저가이고 무기영양소를 배출하기에 적합하고 미생물들을 위한 최적수준의 함유율을 가지고 있는 반면에 무기담체는 큰 접촉면적과 내구성을 제공한다[6]. 기상의 오염물질 제거를 위하여 바이오필터 운전을 하는 동안에 유기담체보다 낮은 압력강하, 낮은 산성화, 낮은 수축률뿐만 아니라[7] 더 신속한 시운전과 더욱 안정적인 질산화성능을[8]을 가지는 복합재료인 미생물담체가 보고되고 있다.

본 연구에서는 part 1[9]에서 제안한 입상활성탄, compost 및 페타이어담체를 구성된 미생물담체로 충전한 바이오필터를 압력강하를 낮추기 위하여 상하로 나누고 처리할 악취 및 VOC를 함유한 폐가스 유량을 반으로 나누어서 위 바이오필터는 bottom-up으로, 아래 바이오필터는 top-down으로 공급하고 주기적으로 각각 top-down 및 bottom-up으로 폐가스 공급 방향을 바꾸는 개선된 바이오필터설계를 이용한 바이오필터시스템의 악취 및 VOC의 제거거동 및 제거효율 등을 관찰하고, 처리할 악취 및 VOC를 함유한 폐가스 공급방향이 일정한 전통적 바이오필터의 경우의 악취 및 VOC의 제거거동 및 제거효율 등과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 실험장치 및 구성

전통적인 4단의 바이오필터($\phi=5$ cm; 유효높이 80 cm)와 비교했

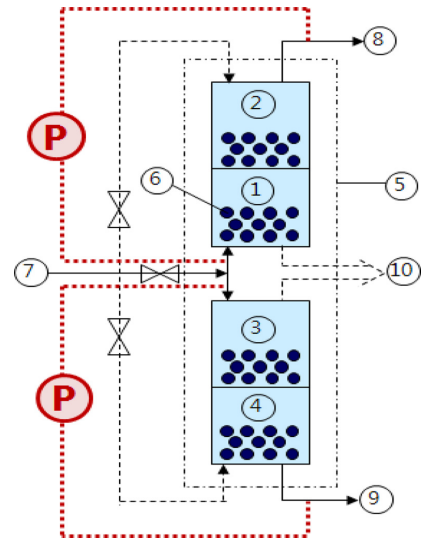


Fig. 1. Biofilter system with improved design (R reactor)[9].

1. R_{up1} (lower column of upper biofilter)
 2. R_{up2} (upper column of upper biofilter)
 3. R_{dn3} (upper column of lower biofilter)
 4. R_{dn4} (lower column of lower biofilter)
 5. Biofilter system with improved design
 6. Microbes-carrying-media
 7. Waste air fed to a biofilter
 8. Treated waste air fed bottom-up
 9. Treated waste air fed top-down
 10. Treated waste air after feeding direction being reversed
- * (P) denotes a pressure gauge.

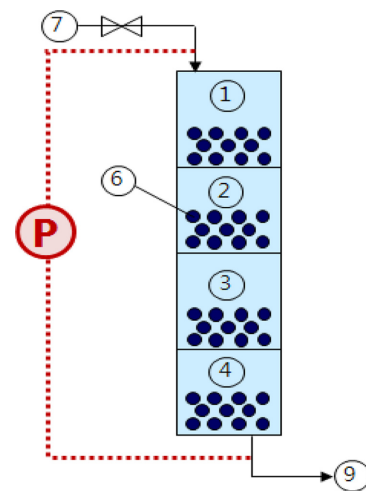


Fig. 2. Conventional biofilter (L reactor)[9].

1. L_1 (1st column of a biofilter)
 2. L_2 (2nd column of a biofilter)
 3. L_3 (3rd column of a biofilter)
 4. L_4 (4th column of a biofilter)
 6. Microbes-carrying-media
 7. Waste air fed to a biofilter
 9. Treated waste air fed top-down
- * (P) denotes a pressure gauge

을 때에 압력강하가 적고 제거효율이 유지되기 위하여 Figs. 1과 2와 같은 2단의 바이오필터 2개로 구성된 개선된 바이오필터시스템 ($\phi=5$ cm; 유효높이 40 cm \times 2)과 전통적 바이오필터를 각각 구축하였으며 참고문헌[9]의 구성과 같다. 바이오필터 각 단의 길이는 25 cm이고 각 단의 충전된 미생물담체의 높이는 20 cm이다. 한편 폐가스 공급장치의 구성은 Fig. 3과 같으며 참고문헌[9]의 구성과 같다.

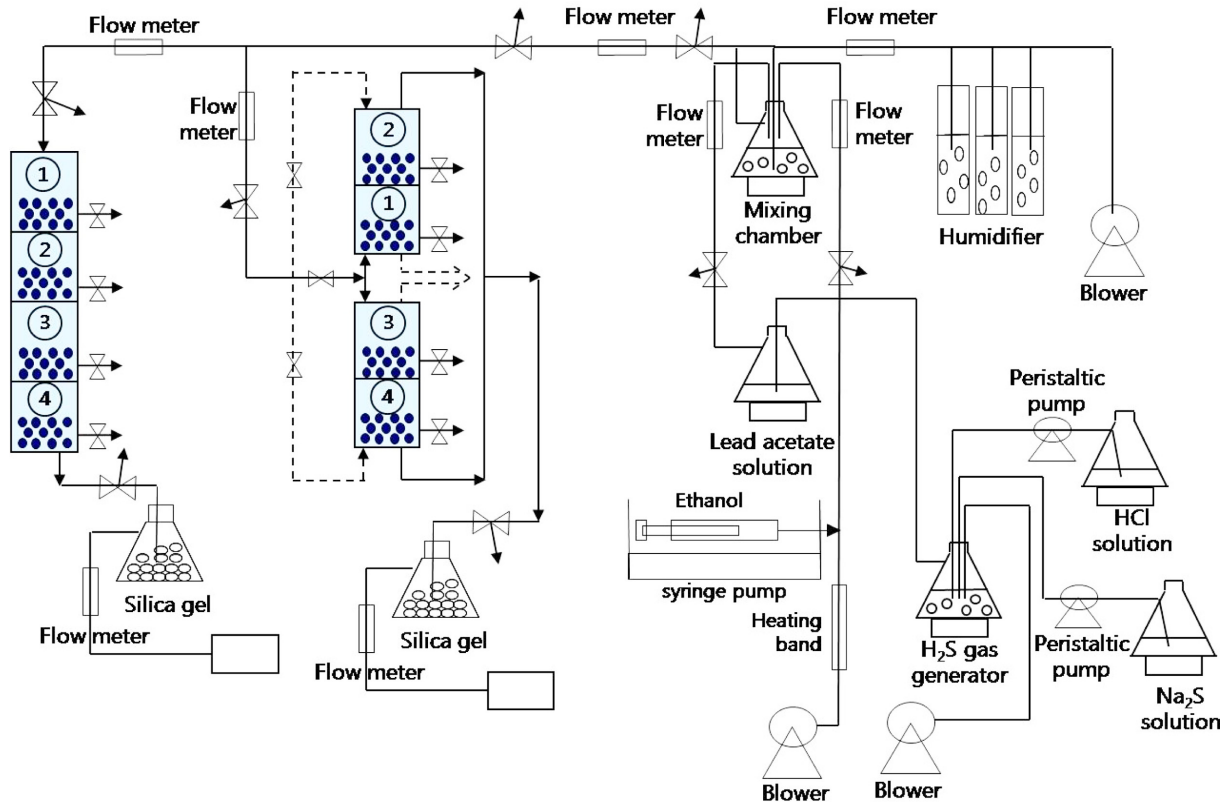


Fig. 3. Schematic diagram of a biofilter system with improved design (R reactor) and a conventional biofilter (L reactor) treating waste-air containing malodor and VOC[9].

Table 1. Characteristics of the media packed in the biofilter[9]

	GAC	Compost	Waste tire crumb
Apparent density (g/cc)	0.41	0.37	0.27
Wet porosity	0.553	0.702	^a 0.74/0.6
Equivalent diameter (mm)	2.5	0.6	5
Interfacial area per unit volume (m ² /m ³)	1292.6	2980	^b 1500

^aWet porosity values of 0.74 and 0.6 correspond to those of total porosity and exterior porosity, respectively.

^bData of Sam-Kwang company.

2-2. 미생물 및 미생물담체

미생물담체는 활성탄, compost 및 페타이어담체를 1 대 1 동부피로 혼합하여 사용하였고, 미생물담체에 접종할 미생물은 황화수소 분해균

주 *Enterobacter* sp. 1153 및 *Burkholderia cepacia* G4의 consortium으로서 미생물 배양 및 접종방법은 참고문헌[9]와 같다. 한편 충전된 미생물담체의 특성은 Table 1과 같다.

2-3. 전통적 바이오필터와 개선된 바이오필터시스템의 운전

Figs. 1과 2와 같은 개선된 바이오필터시스템(이하 R반응기)과 같은 유효부피의 전통적 바이오필터(이하 L반응기)를 각각 Table 2와 같은 실험조건으로 30 °C에서 운전하여 에탄올과 황화수소를 함유한 폐가스를 처리하는 성능평가를 수행하였다. 바이오필터 각각의 바닥으로부터 8 cm 위치에 sampling port를 설치하여 전통적인 4단의 바이오필터 및 개선된 바이오필터시스템의 각 단에서의 황화수소 및 에탄올 처리농도를 100일 동안 분석 관찰하였다. 바이오필터 운전 1~7단계에서 Fig. 1 및 Fig. 3과 같이 R반응기

Table 2. Operating condition of conventional biofilter and biofilter system with improved design[9]

Stage	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Q (L/min)	0.5	1	1	2	2	2	2	2
C _{go} (H ₂ S)	30	30	60	60	100	250	500	500
C _{go} (Ethanol)	800	800	1300	1300	2000	2000	2000	2000
Duration (day)	20	10	20	10	10	10	10	10

1. The direction of waste air-supply to a biofilter system with improved design has been reversed at the 8th stage of each biofilter with improved design (R-reactor) run (The directions of bottom-up and top-down were reversed to those of top-down and bottom-up, respectively).

2. Buffer solution-injection schedule: each of 10 mL was injected to each biofilter with improved design (R-reactor) per day during I-VI runs while 20 mL was injected to a conventional biofilter (L-reactor) per day during I-VI runs; each of 15 mL was injected to each biofilter with improved design (R-reactor) per day during VII-VIII runs while 30 mL was injected to a conventional biofilter (L-reactor) per day during VII-VIII runs (In this study there was no observed effluent of buffer solution out of the bottom of biofilter systems.)

3. Both C_{go} and Q denote feed concentration (ppmv) and air flow rate, respectively.

중에서 상부의 2단으로 구성된 상부 바이오필터(R_{up})는 처리할 폐가스를 bottom-up으로 공급받고, 하부의 2단으로 구성된 하부 바이오필터(R_{dn})는 top-down으로 공급받았다. 따라서 운전 1~7단계에서 R_{up} 및 R_{dn} 의 처리될 폐가스가 외부로부터 직접 공급되는 단들인 각각 R_{up1} 과 R_{dn3} 의 유효높이는 각각 8 및 12 cm이었다. 한편 R_{up} 의 상단인 R_{up2} 및 R_{dn} 의 하단인 R_{dn4} 의 유효높이는 각각 28 및 32 cm이었다. 따라서 R_{up1} , R_{dn3} , R_{up2} 와 R_{dn4} 는 R반응기의 상부 또는 하부 바이오필터의 총 유효높이 40 cm에 대하여 각각 0.2, 0.3, 0.7 및 0.8의 무차원 유효높이를 보였다. 그러나 운전 8단계에서 폐가스의 바이오필터시스템으로의 공급방향들이 바뀌었을 때에, R_{up} 및 R_{dn} 의 처리될 폐가스가 외부로부터 직접 공급되는 단들인 각각 R_{up2} 와 R_{dn4} 의 유효높이는 각각 12 및 8 cm이었다. 또한 R_{up} 의 하단인 R_{up1} 및 R_{dn} 의 상단인 R_{dn3} 의 유효높이는 각각 32 및 28 cm이었다. 따라서 R_{dn4} , R_{up2} , R_{dn3} 와 R_{up1} 는 R반응기의 상부 또는 하부 바이오필터의 총 유효높이 40 cm에 대하여 각각 0.2, 0.3, 0.7 및 0.8의 무차원 유효높이를 보였다. 한편 L반응기는 Fig. 2 및 3과 같이 처리할 폐가스를 top-down으로 공급받으므로, 1단, 2단, 3단 및 4단 각각의 sampling port에서의 L반응기 유효높이는 각각 12, 32, 52 및 72 cm이었다. 따라서 L반응기 총 유효높이 80 cm에 대하여 각각 0.15, 0.4, 0.65 및 0.9의 무차원 유효높이를 가졌다.

2-4. 바이오필터 시스템의 제거효율

악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 바이오필터 처리효율을 평가하기 위하여, 바이오필터의 에탄올과 황화수소 제거효율(removal efficiency)을 식 (1)에 준하여 계산하였다.

$$\text{Removal efficiency (\%)} = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

where C_i and C_o denote the concentrations of ethanol or hydrogen sulfide of fed waste air and treated waste air, respectively.

한편 바이오필터의 에탄올 및 황화수소의 제거성능(elimination capacity) 및 부하(inlet load)를 각각 식 (2)과 (3)에 준하여 계산하였다.

$$\text{Elimination capacity (g/m}^3\text{/hr)} = \frac{C_i - C_o}{\tau} \quad (2)$$

$$\text{Inlet load (g/m}^3\text{/hr)} = \frac{C_i}{\tau} \quad (3)$$

where 1) C_i and C_o denote the concentrations (g/m³/hr) of ethanol or hydrogen sulfide of fed waste air and treated waste air, respectively; 2) τ denotes empty bed contact time (hr) of biofilter, obtained by dividing the effective volume of biofilter by feed flow rate.

3. 결과 및 토론

3-1. 미생물담체에 고정된 미생물 및 미생물담체 함수율과 pH

전통적 바이오필터의 각 미생물담체(입상활성탄, compost 및 페타이어담체) 함수율의 4개의 단계에 대한 평균값은 각각 45, 62 및 54%이었다. 또한 개선된 바이오필터시스템의 미생물담체(활성탄+compost+페타이어담체)의 pH값은 top-down 방식으로 폐가스가

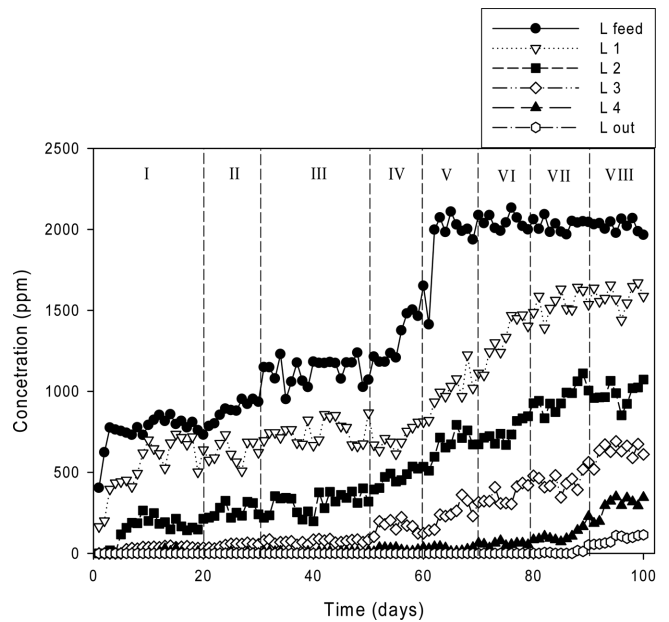


Fig. 4. Biofilter behavior of ethanol removal [L reactor].

공급될 때에 바이오필터 위단과 아랫단이 각각 4.62 및 6.25로 단수가 증가할수록 증가하였다.

3-2. 바이오필터 시스템(L 및 R 반응기)의 운전특성

3-2-1. 에탄올 제거거동

3-2-1-1. L반응기

Fig. 4에서와 같이 L반응기 운전 7단계까지는 출구 처리가스의 에탄올농도가 “영”에 가까울 정도로 매우 낮았으나 8단계에 도달해서는 출구 처리가스의 에탄올농도가 약 114 ppm이었다. L반응기의 운전조건이 7단계와 8단계가 동일함에도 불구하고 출구 처리가스의 에탄올농도에서 큰 차이가 있었음이 관찰되었다. 에탄올에 관한 운전조건은 이미 운전 5단계부터 공급 폐가스의 에탄올 농도 2,000 ppm으로 일정하였다. 따라서 이 현상은 에탄올 흡착의 포화에 기인하지 않으며, 바이오필터운전이 에탄올에 대한 적정운전조건인 중성 pH에서 수행되었으나 황화수소의 공급부하가 증가함에 따른 바이오필터 충전담체의 산성화에 기인한다고 사료된다. 에탄올 제거효율은 Fig. 5와 같이 L반응기 운전 초기부터 7단계까지는 에탄올 제거효율이 100%를 유지하였으나 8단계에 도달하여 출구 처리가스의 에탄올농도가 약 114 ppm으로 증가한 결과로서 에탄올 제거효율이 약 94%에 근접하게 감소하였다. 한편 L반응기로 투입되는 에탄올 부하(inlet load)와 에탄올 제거용량(elimination capacity)의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 에탄올관련 바이오필터 운전조건은 5~8단계 동안 동일하며 에탄올이 100% 제거되는 5~7단계의 에탄올제거용량이 94%가 제거되는 8단계의 에탄올제거용량보다 다소 크다. 그러므로 Fig. 6에서와 같이 5~7단계의 에탄올 제거용량 값들은 에탄올부하 값과 동일함을 나타내는 대각선 위에 77 g/m³/hr로 나타났고, 8단계의 에탄올 제거용량 값들은 에탄올부하 값보다 작은 값을 나타내어서 대각선 아래에 67.2 g/m³/hr이었다. 한편 미생물담체로서 입상활성탄과 compost를 충전하고 운전조건이 L반응기와 유사한 전통적 바이오필터를 운전하여 황화수소를 제외한 에탄올만을 함유한 공기를 처리하였을 때에 최대에탄올 제거용량은 약 90~95 g/m³/hr가 보고되었다[10].

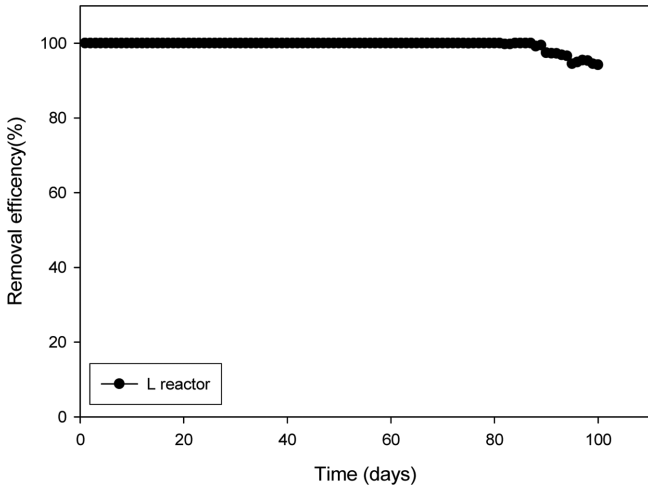


Fig. 5. Time-dependent behavior of removal efficiency of ethanol of L reactor.

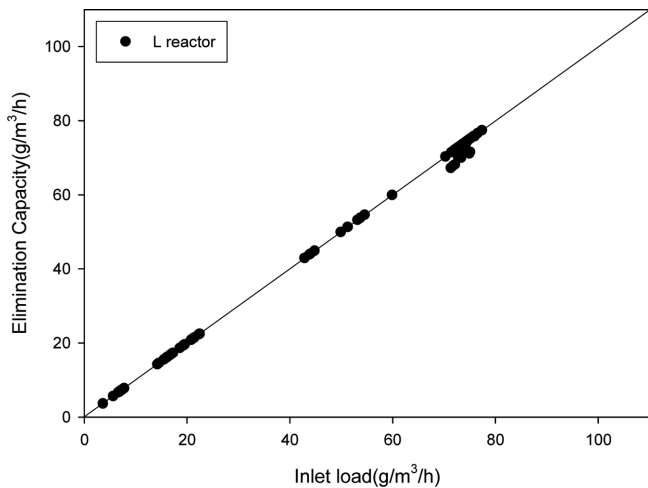


Fig. 6. Elimination capacity versus inlet load of ethanol of L reactor.

3-2-1-2. R반응기

L반응기와 마찬가지로 Fig. 7에서와 같이 R반응기 운전 7단계까지는 출구 처리가스의 에탄올농도가 “영”에 가까울 정도로 매우 낮았으나 8단계에 도달해서는 출구 처리가스의 에탄올농도가 약 81 ppm이었다. R반응기의 운전조건이 L반응기와 마찬가지로 7단계와 8단계가 동일함에도 불구하고 운전 7단계와 8단계의 출구 처리가스의 에탄올농도에서 차이가 있었으나 그 차이가 약 114 ppm인 L반응기보다 적음이 관찰되었다. R반응기에서 그 차이가 L반응기보다 적은 현상은 본 연구의 part 1 [9]에서 관찰된 바와 같이 L반응기의 운전에서 운전 중반부에 압력강하가 발달한 피크가 있었고 또한 운전 7단계와 8단계에서 운전 전반부보다 약 3배 증가한 L반응기 압력강하 값이 운전 7단계와 8단계의 R반응기 압력강하 값보다 약 5 배 정도 큰 영향 때문이라고 사료된다.

운전 1~7단계에서 R_{up1} , R_{dn3} , R_{up2} 와 R_{dn4} 는 R반응기의 상부 또는 하부 바이오필터의 총 유효높이 40 cm에 대하여 각각 0.2, 0.3, 0.7 및 0.8의 무차원 유효높이를 보였음에도 불구하고, 정해진 시간에 각단에서 에탄올농도가 높은 순서는 $R_{dn3} > R_{up1} > R_{dn4} > R_{up2}$ 로서(R_{up1} 과 R_{dn3}) 및 (R_{up2} 와 R_{dn4}) 각각의 순서가 바뀌었다. 부연하면 상부

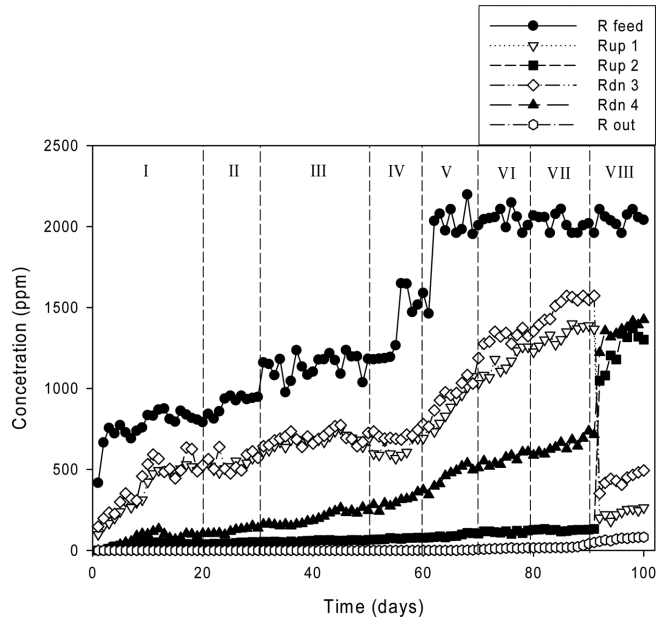


Fig. 7. Biofilter behavior of ethanol removal [R reactor].

바이오필터 단과 하부 바이오필터 단이 도치되었다. 이런 현상은 첫째 (R_{up1} 과 R_{dn3}) 및 (R_{up2} 와 R_{dn4}) 각각의 바이오필터 무차원 유효높이 차이가 각각 0.1로서 비교적 작은 값이며, 둘째 본 연구의 part 1 [9]에서 언급이 된 것과 같이 미생물 population 분포에서 colony forming unit 수가 낮은 순서는 $R_{dn3} < R_{dn4} < R_{up2} < R_{up1}$ 로서 상부 바이오필터의 CFU 수가 하부 바이오필터의 CFU 수보다 훨씬 컸으며, 상부 및 하부의 2단 바이오필터를 각각에서 상위 단보다 하위 단의 CFU 수가 컸다. 그러므로 바이오필터 운전 1~7단계에서 R_{up1} 및 R_{up2} 에서는 R_{dn3} 및 R_{dn4} 보다 각각 미생물에 의한 에탄올 제거율이 높을 것이고, 이러한 각 단에서의 에탄올 제거율 차이가 비교적 작은 값인 바이오필터 무차원 유효높이 차이를 극복한 것에 기인한다. 한편 운전 8단계에서 폐가스의 바이오필터시스템으로의 공급방향들이 바뀌었을 때에 R_{dn4} , R_{up2} , R_{dn3} 와 R_{up1} 는 R반응기의 상부 또는 하부 바이오필터의 총 유효높이 40 cm에 대하여 각각 0.2, 0.3, 0.7 및 0.8의 무차원 유효높이를 보였다. 이 경우에는 (R_{up1} 과 R_{dn3}) 및 (R_{up2} 와 R_{dn4}) 각각의 바이오필터의 무차원 유효높이 크기순서가 미생물 CFU 수의 순서와 일치하므로, 정해진 시간에 각단에서 에탄올농도가 높은 순서는 $R_{dn4} > R_{up2} > R_{dn3} > R_{up1}$ 로서 운전 1~7단계와 다르게 바이오필터의 무차원 유효높이가 낮은 순서와 일치하였다.

R반응기 에탄올 제거효율이 R반응기 운전 초기부터 7단계까지는 에탄올 제거효율이 100%를 유지하였으나 운전 8단계에 도달하여 처리가스의 에탄올농도가 약 81 ppm으로 증가하여서 Fig. 8과 같이 에탄올 제거효율이 96%로 감소하였다. 한편 R반응기로 투입되는 에탄올 부하(inlet load)와 에탄올 제거용량(elimination capacity)의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 7단계 운전까지의 에탄올제거용량의 최대값은 $76.5 \text{ g/m}^3/\text{h}$ 이고 운전 8단계에서는 에탄올제거용량 값이 감소하여 $71 \text{ g/m}^3/\text{h}$ 이었다.

3-2-2. 황화수소 제거거동

3-2-2-1. L반응기

L반응기 운전 4단계까지는 Fig. 10에서와 같이 처리가스의 황화

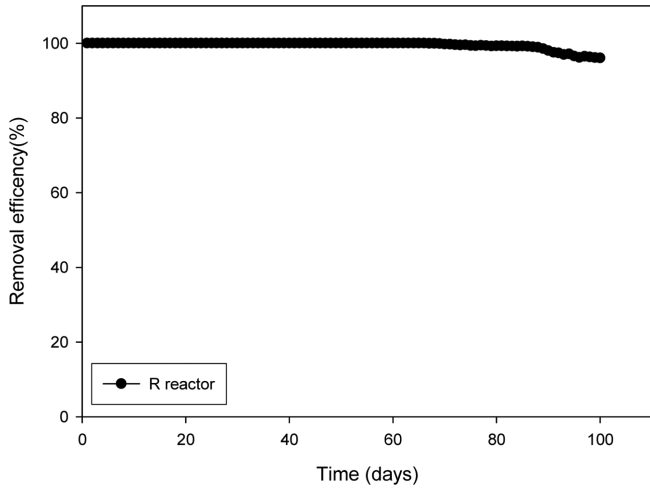


Fig. 8. Time-dependent behavior of removal efficiency of ethanol of R reactor.

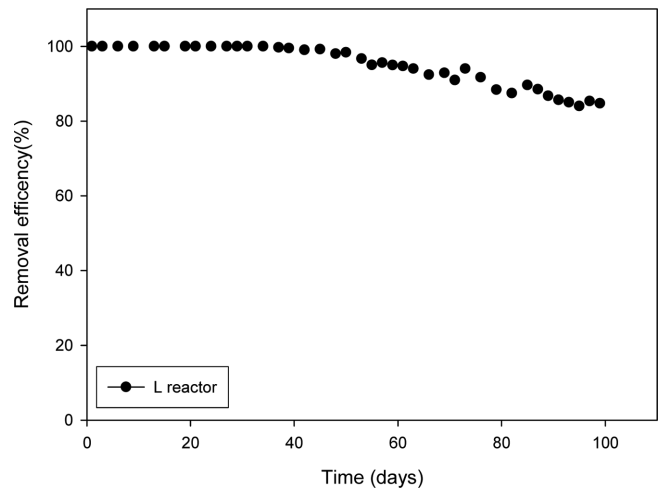


Fig. 11. Time-dependent behavior of removal efficiency of H₂S of L reactor.

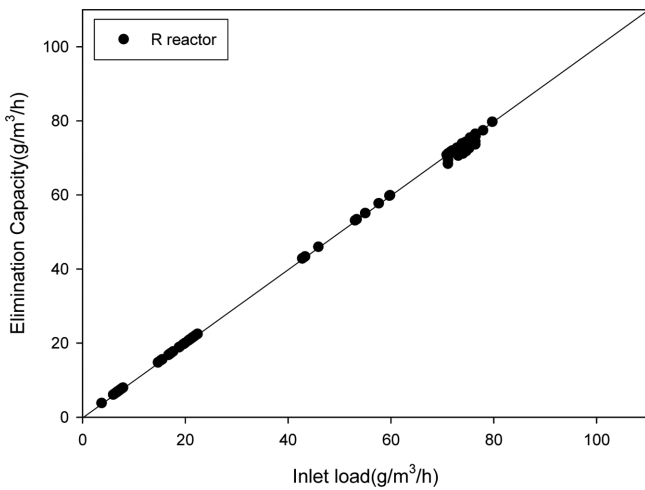


Fig. 9. Elimination capacity versus inlet load of ethanol of R reactor.

수소농도가 “영”에 가까울 정도로 매우 낮았으나 점차적으로 증가하여 8단계에 도달해서는 처리가스의 황화수소농도가 약 80 ppm이었다. L반응기의 운전조건이 7단계와 8단계가 동일함에도 불구하고 처리가스 농도에서 큰 차이가 있었던 에탄올의 경우와 다르게, 황화수소 경우에는 운전 6단계에서 7단계로 전환 시에 황화수소 부하가 2배로 증가하였다. 이에 따라서 운전 7단계에서 바이오필터 충전담체가 황화수소에 의하여 포화되어 가면서 충전담체가 점차 산성화되고 처리가스의 황화수소 농도증가를 보였다. 한편 운전 8단계에서는 흡착이 포화되어 바이오필터의 제거만으로 정상상태에서 황화수소가 처리되었다. 이와 같이 운전 7단계에서 점차 산성화된 충전담체로 인하여, 전항에서 제시된 운전 8단계에서 에탄올의 처리효율이 운전 7단계보다 더욱 떨어진 것으로 사료된다. L반응기 운전 8단계에 도달하여 처리가스의 황화수소농도가 약 80 ppm으로 증가하였다. 황화수소 제거효율이 L반응기 운전 초기부터 4단계까지는 황화수소 제거효율이 100%를 유지하였으나 점차 감소하여 8단계에 도달하여서 황화수소 제거효율이 Fig. 11과 같이 84%로 감소하였다. 한편 L반응기로 투입되는 황화수소 부하(inlet load)와 황화수소 제거용량(elimination capacity)의 관계를 Fig. 12에 나타내

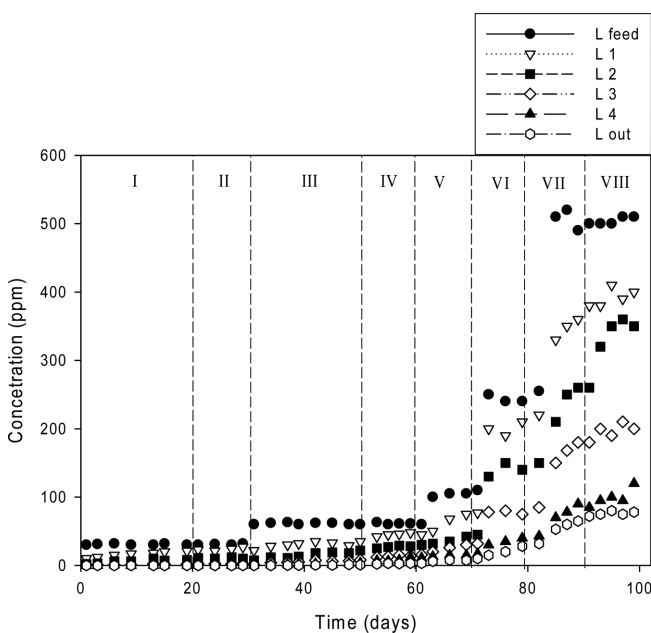


Fig. 10. Biofilter behavior of H₂S removal [L reactor].

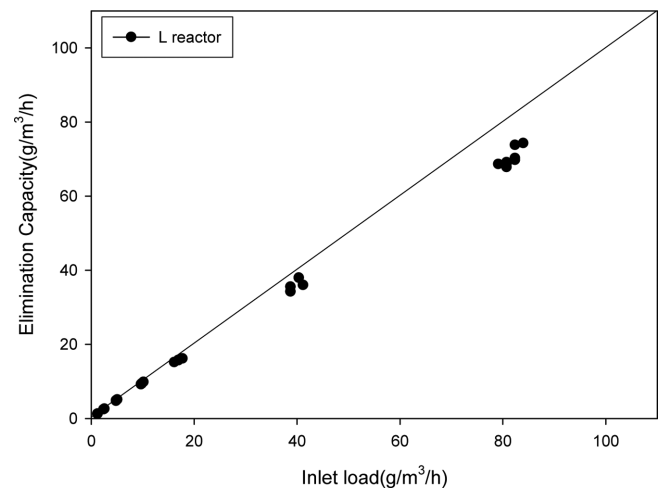


Fig. 12. Elimination capacity versus inlet load of H₂S of L reactor.

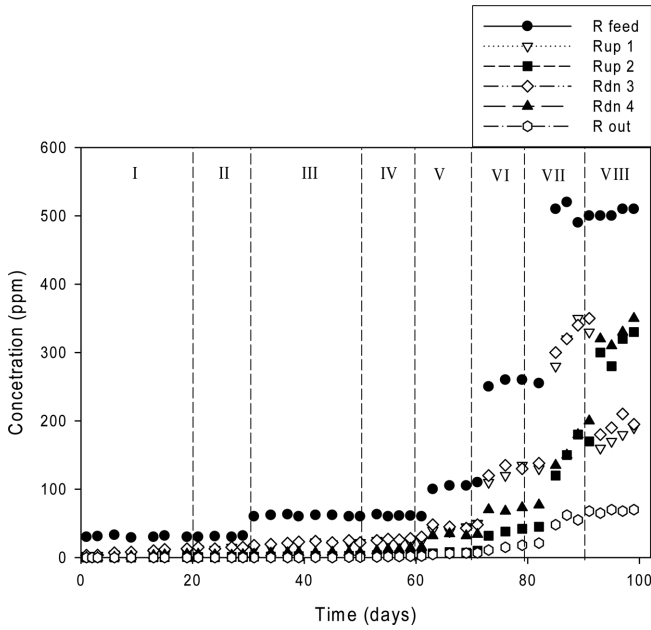


Fig. 13. Biofilter behavior of H₂S removal [R reactor].

었다. 황화수소와 관련한 바이오필터 운전조건은 5~6단계 동안 황화수소 부하가 증가하면서 7~8단계에서는 황화수소 부하가 최대이다. 8단계의 황화수소제거용량은 Fig. 12에서와 같이 대각선 아래에 69.8 g/m³/h로 나타났다.

3-2-2-2. R반응기

R반응기 운전 5단계까지는 Fig. 13에서와 같이 처리가스의 황화수소농도가 “영”에 가까울 정도로 매우 낮았으나 7단계에서 급격히 증가하여 plateau 값에 도달하여 8단계에 도달해서도 그 값을 유지하는데, 처리가스의 황화수소농도가 70 ppm이었다. 처리가스의 황화수소 농도의 거동은 L반응기와 비슷하였으나 L반응기보다 황화수소 처리농도가 더 낮았다. 이 현상은 에탄올과 마찬가지로 본 연구의 part 1 [9]에서 관찰된 바와 같이 L반응기의 운전에서 운전 전 반부보다 증반부에 압력강하가 발달한 피크가 있었고 또한 압력강하가 운전 전 반부보다 후반부에 약 3배 증가하였으나, R반응기는 압력강하 값이 상대적으로 더 적은 효과에 기인한다고 사료된다.

황화수소 경우에도 에탄올 경우와 마찬가지로 바이오필터 운전 1~7단계에서 R_{up1}, R_{dn3}, R_{up2}와 R_{dn4}는 R반응기의 상부 또는 하부 바이오필터의 총 유효높이 40 cm에 대하여 각각 0.2, 0.3, 0.7 및 0.8의 무차원 유효높이를 보였음에도 불구하고 미생물 CFU 수 차이로 인하여, 정해진 시간에 각단에서 황화수소농도가 높은 순서는 R_{dn3} > R_{up1} > R_{dn4} > R_{up2}로서 (R_{up1}과 R_{dn3}) 및 (R_{up2}와 R_{dn4}) 각각의 순서가 바뀌었다. 그러나 에탄올 경우와 비교하였을 때에 바뀐 황화수소 농도의 차이는 매우 적었다. 한편 운전 8단계에서 폐가스의 바이오필터시스템으로의 공급방향들이 바뀌었을 때에는 에탄올 경우와 마찬가지로 상부 및 하부 바이오필터 각 단의 무차원 유효높이 크기순서가 미생물 CFU 수의 순서와 일치하므로, 정해진 시간에 각 단에서 황화수소농도가 높은 순서는 R_{dn4} > R_{up2} > R_{dn3} > R_{up1}로서 운전 1~7단계와 다르게 바이오필터의 무차원 유효높이가 낮은 순서와 일치하였다.

R반응기 운전 8단계에 도달하여 처리가스의 황화수소농도가 70 ppm으로 증가한 결과로서 황화수소 제거효율이 Fig. 14와 같이 R

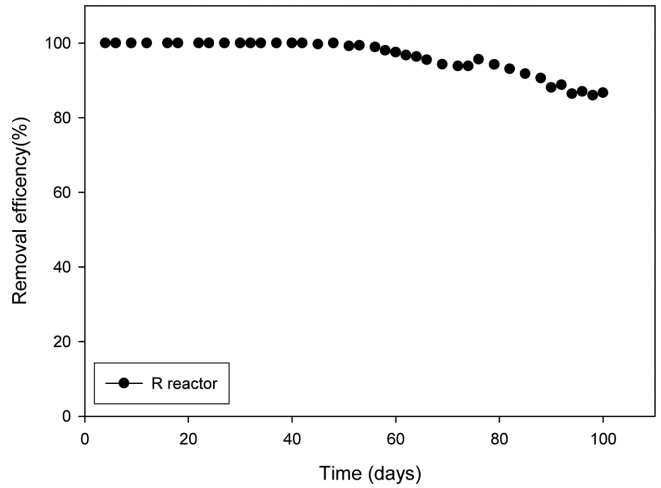


Fig. 14. Time-dependent behavior of removal efficiency of H₂S of R reactor.

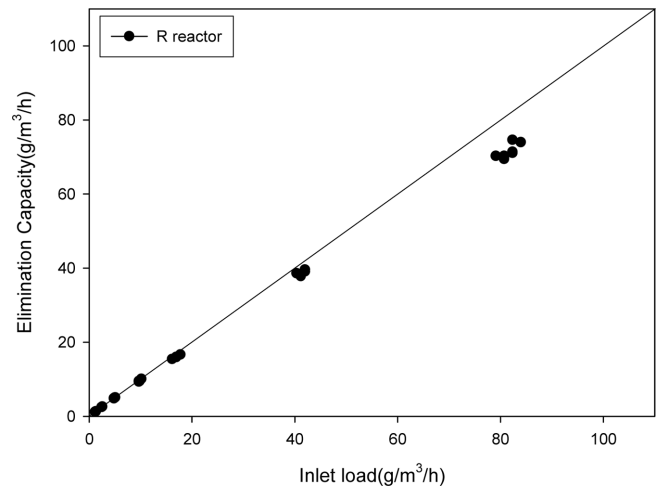


Fig. 15. Elimination capacity versus inlet load of H₂S of R reactor.

반응기 운전 초기부터 5단계까지는 황화수소 제거효율이 100%를 유지하였으나 8단계에 도달하여서 황화수소 제거효율이 86%로 감소하였다. 한편 R반응기로 투입되는 황화수소 부하(inlet load)와 황화수소 제거용량(elimination capacity)의 관계를 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15와 같이 8단계의 R반응기의 황화수소제거용량은 대각선 아래에 71 g/m³/h로 나타났으며, L반응기의 황화수소 제거용량보다 약 2% 높음이 관찰되었다.

4. 결 론

전통적 바이오필터반응기의 운전조건이 7단계와 8단계가 동일함에도 불구하고 전통적 바이오필터반응기 처리가스의 에탄올농도에서 큰 차이가 있었음이 관찰되었다. 이 현상은 에탄올 흡착의 포화에 기인하지 않으며, 바이오필터운전이 에탄올에 대한 적정운전조건인 중성 pH에서 수행되었으나 황화수소의 공급부하가 증가함에 따른 바이오필터 충전담체의 산성화에 기인한다고 해석된다. 개선된 바이오필터시스템은 전통적 바이오필터반응기와 마찬가지로 운전조건이 7단계와 8단계가 동일함에도 불구하고 운전 7단계와 8단

계의 처리가스의 에탄올농도에서 차이가 있었으나 그 차이가 전통적 바이오필터보다 적었다. 개선된 바이오필터시스템 운전 1~7단계에서 바이오필터 유효높이가 낮은 순서는 $R_{up1} < R_{dn3} < R_{up2} < R_{dn4}$ 임에도 불구하고 각 단의 미생물 population 분포 차이로 인하여 정해진 시간에 각단에서 에탄올농도가 높은 순서가 $R_{dn3} > R_{up1} > R_{dn4} > R_{up2}$ 로 됨으로서 (R_{up1} 과 R_{dn3}) 및 (R_{up2} 와 R_{dn4}) 각각의 순서가 바뀌었다. 한편 운전 8단계에서 폐가스의 바이오필터시스템으로의 공급방향들이 바뀌었을 때에는 상부 및 하부 바이오필터 각 단의 무차원 유효높이가 크기순서가 미생물 population 분포 순서와 일치하므로, 정해진 시간에 각단에서 에탄올농도가 높은 순서는 $R_{dn4} > R_{up2} > R_{dn3} > R_{up1}$ 로서 운전 1~7단계와 다르게 바이오필터의 유효높이가 낮은 순서와 일치하였다. 전통적 바이오필터반응기 운전 초기부터 7단계까지는 에탄올 제거효율이 100%를 유지하였으나 8단계에 도달하여 에탄올 제거효율이 약 94%에 근접하게 감소하였다. 전통적 바이오필터반응기 운전 8단계에서 에탄올 제거용량은 에탄올 부하의 약 94%로서 개선된 바이오필터시스템의 에탄올 제거용량이 전통적 바이오필터반응기보다 2% 증가하였음이 관찰되었다.

한편 황화수소의 경우는 운전 7단계에서 바이오필터 충전담체가 황화수소에 의하여 포화되어 가면서 충전담체가 점차 산성화되고 처리가스의 황화수소 농도증가를 보였고 운전 8단계에서는 흡착이 포화되어 정상상태에서 바이오필터의 제거만으로 황화수소가 처리되었다. 황화수소 경우에도 에탄올 경우와 마찬가지로 바이오필터 운전 1~7단계에서 바이오필터 유효높이가 차이에 불구하고 미생물 population 분포 차이로 인하여, 정해진 시간에 각단에서 황화수소 농도 순서가 바뀌었다. 그러나 에탄올 경우와 비교하였을 때에 바뀐 황화수소 농도의 차이는 매우 적었다. 한편 운전 8단계에서 폐가스의 바이오필터시스템으로의 공급방향들이 바뀌었을 때에는 에탄올 경우와 마찬가지로 황화수소농도가 높은 순서는 $R_{dn4} > R_{up2} > R_{dn3} > R_{up1}$ 로서 운전 1~7단계와 다르게 바이오필터의 유효높이가 낮은 순서와 일치하였다. 전통적 바이오필터반응기는 운전 8단계에 도달하여 황화수소 제거효율이 약 84%로 감소하였다. 개선된 바이오필터시스템은 운전 8단계에 도달하여서 황화수소 제거효율이 약 86%로 감소하여서 전통적 바이오필터반응기의 황화수소 제거효율보다 약 2% 가량 높았다. 따라서 개선된 바이오필터시스템의 제거효율은 에탄올과 황화수소 제거에 있어서 전통적 바이오필터반응기보다 각각 2% 제고되었음이 관찰되었다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Kennes, C. and Veiga, M. C., "Bioreactors for Waste Gas Treatment," Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands(2001).
2. Dorado, A. D., Baeza, J. A., Lafuente, J., Gabriel, D. and Gamisans, X., "Biomass Accumulation in Biofilter Treating Toluene at High Loads-Part 1: Experimental Performance from Inoculation to Clogging," *Chem. Eng. J.*, in print(2012).
3. Ryu, H. W., Cho, K. S. and Chung, D. J., "Relationships Between Biomass, Pressure Drop and Performance in a Polyurethane Biofilter," *Bioresour. Technol.*, **101**, 1745-1751(2010).
4. Znad, H. T., Katoh, K. and Kawase Y., "High Loading Toluene Treatment in a Compost Based Biofilter Using Up-flow and Down-flow Swing Operation," *J. Hazard. Mater.*, **141**, 745-752 (2007).
5. Hassan, A. A. and Sorial, G., "Biological Treatment of Benzene in a Controlled Trickle Bed Air Biofilter," *Chemosphere*, **75**, 1315-1321(2009).
6. Dorado, A. D., Lafuente, F. J., Gabriel, D. and Gamisans, X., "The Role of Water in the Performance of Biofilters: Parameterization of Pressure Drop and Sorption Capacities for Common Packing Materials," *J. Hazard. Mater.*, **180**, 693-702(2010).
7. Hernandez, J., Prado, O. J., Almarcha, M., Lafuente, J. and Gabriel, D., "Development and Application of a Hybrid Inert/organic Packing Material for the Biofiltration of Composting Off-gases Mimics," *J. Hazard. Mater.*, **178**, 665-672(2010).
8. Dan, W., Me, Q., Yazhi, Z. and Chen, S., "Removal of p-xylene from An Air Stream in a Hybrid Filter," *J. Hazard. Mater.*, **136**, 288-295(2006).
9. Lee, E. J. and Lim, K.-H., "Biofilter Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC: 1. Pressure Drop and Microbe-population Distribution of Biofilter with Improved Design," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, in print (2013).
10. Lim, K.-H. and Park, S. W., "The Treatment of Waste-air Containing Mixed Solvent Using a Biofilter: 1. Transient Behavior of Biofilter to Treat Waste-air Containing Ethanol," *Korean J. Chem. Eng.*, **21**(6), 1161-1167(2004).