

강인한 바이오필터설계를 위한 바이오필터모델: 1. 바이오필터 담체의 흡착거동

이은주* · 서교성** · 전위숙* · 임광희*†

*대구대학교 화학공학과
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15
**대구중소기업청
704-833 대구시 달서구 성서4차 첨단로 122-11
(2011년 12월 15일 접수, 2012년 1월 10일 채택)

Biofilter Model for Robust Biofilter Design: 1. Adsorption Behavior of the Media of Biofilter

Eun Ju Lee*, Kyo Seong Seo**, Wui-Sook Jeon* and Kwang-Hee Lim*†

*Department of Chemical Engineering, Daegu University, 15 Naerri-ri, Jillyang-eup, Gyungsan-si, Gyeongbuk 712-714, Korea

**Small and Medium Business Administration, Daegu 704-833, Korea

(Received 15 December 2011; accepted 10 January 2012)

요 약

바이오필터담체가 충전된 흡착칼럼 운전 시의 흡착 및 탈착거동에 대하여 조사하였다. 에탄올을 휘발성유기화합물(VOC)로서 함유하는 폐가스를 처리하기 위한 연속동적흡착 실험을 바이오필터공정과 같은 90% 이상의 상대습도에서 수행하였다. 에탄올 1,000 ppmv(or 2,050 mg ethanol/m³)를 포함하는 폐가스 2 L/min을 흡착칼럼에 공급하였을 때 흡착칼럼 출구에서의 과과점과 흡착평형에 이르는 시간은 1단 시료구에서 보다 각각 10배와 3배 만큼 지연되었다. 한편 에탄올 2,000 ppmv(or 4,100 mg ethanol/m³)를 포함하는 폐가스의 경우에는 각각 9배와 3배 지연되었다. 이와 같이 흡착칼럼 출구에서 지연기간의 비는 공급농도와 무관하게 서로 거의 일치하였음이 관찰되었다. 또한 1단 시료구와 출구에서 비교한 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착시간 지연비도 약 1.5배로서 거의 일치하였다. 한편 미생물활성과 멸균공정의 흡착평형에 대한 영향에 대하여 조사하였다. 멸균된 입상 활성탄으로 충전된 vial의 기상 에탄올 농도는 멸균되지 않은 입상 활성탄으로 충전된 경우와 거의 일치하였다. 그러나 퇴비(compost)나 입상 활성탄/퇴비 혼합물의 경우에는 멸균 안한 경우가 멸균한 경우보다 기상에서의 에탄올 농도가 현저하게 높았다.

Abstract – The adsorption and desorption behavior of biofilter-medium was investigated on the performance of an adsorption column. Continuous flow-isothermal adsorption experiments were performed to treat waste air containing such a VOC as ethanol under the same condition of > 90% relative humidity as the condition of the feed to a biofilter process. In case of feeding waste air containing ethanol of 1,000 ppmv (or 2,050 mg ethanol/m³) to the adsorption system at the rate of 2 L/min, the onsets of its breakthrough and reaching the state of dynamic equilibrium at the exit had been delayed 10 and 3 times, respectively, later than those at the 1st stage sampling port. Moreover, in case of 2,000 ppmv (or 4,100 mg ethanol / m³), they had been delayed 9 and 3 times, respectively. Thus, regardless of feeding concentration, the ratios of delaying period were observed to be quite consistent each other at the exit of the adsorption column. With regard to the period of desorption, the ratios of delaying period were consistent each other to be 1.5 for both cases. In addition, the effect of microbial activity and sterilization-process was studied on adsorption equilibrium. The ethanol concentration in the vapor phase of vials packed with sterilized granular activated carbon (GAC) was quite consistent to that with unsterilized GAC. However, the ethanol concentrations in the vapor phase of vials packed with unsterilized compost and the unsterilized mixture of GAC and compost were higher than those with sterilized compost and the sterilized mixture of GAC and compost, respectively.

Key words: Dynamic Adsorption, Adsorption Behavior, Biofilter-Medium, GAC, Compost

1. 서 론

바이오필터는 알려진 바와 같이 악취 제거와[1-7] 폐가스에서의 휘발성 유기물 특히 용매 제거에[8-23] 다른 공정에 비해 뛰어나다.

생물막 여과 공정 중에서 바이오필터는 오염물을 분해할 수 있는 미생물들이 고정화되어 있는 다공성의 충전물들을 습도가 있는 오염된 공기가 통과하는 반응기이다. 오염된 공기내의 휘발성 유기물들은 미생물들에 의해 산화되어 물과 이산화탄소로 생분해될 수 있도록 바이오필터 내부에 충전된 담체 표면 또는 내부로 흡수된다. 오염된 공기 또는 폐가스가 인공 또는 천연 고정담체에 부착되어 있

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

는 미생물 막을 통과하면서 최적조건 하에서 오염물질은 완전히 생분해된다. 낮은 농도의 생분해성 휘발성 유기물을 포함하고 있는 다량의 공기를 처리하는 데 있어서 미생물 산화법을 이용한 바이오필터 기술은 경제성에 있어 더욱 큰 이점이 있어, 탄소(carbon) 흡착이나 소각 같은 VOC 제거 기술보다 더욱 경제적인 공정이다[8,9,24]. 흡착능력이 뛰어난 입상 활성탄담체는 바이오필터의 오염물 제거효율을 향상시킨다고 보고되어 왔다[25]. 또한 활성탄을 담체로 충전한 바이오필터는 전통적인 활성탄을 사용한 흡착공정과 비교 시 여러 가지 장점이 있는데 그 중에 하나는 포화활성탄의 생물학적 재생으로 인하여 지속적인 최대 흡착 능력을 유지할 수 있다는 것이며, 또한 물질전달 구역이 고정되며 비교적 짧아진다. 따라서 별도의 활성탄 재생공정이 불필요하며 흡착층의 길이가 짧아진다. 이러한 특징들은 초기투자비와 운전비의 절감을 가능하게 하여 준다[25]. 한편 흡착력이 있는 물질과 퇴비의 혼합물은, 특히 동적 부하 변동을 갖는 바이오필터 시스템의 경우에 전통적인 바이오필터의 대안이 될 수 있다[23]. 그러므로 바이오필터 성능에 대한 바이오필터 담체의 흡착효과에 대한 연구가 요구된다.

바이오필터의 성공적 운영을 위해서는 담체충전 층의 습도가 매우 중요한 요소이기 때문에 도입되는 폐가스에 대한 사전 가습을 통하여 습도가 계속적으로 공급되어야 한다. 바이오필터의 적정운전을 위하여 도입되는 폐가스의 상대습도는 99% 이상까지도 상승된다[26]. 그러나 바이오필터 운전에서 흡착환경은, 매우 낮은 상대습도에서 수행되는 전통적 흡착공정과 매우 상이하다. 매우 높은 포화상대습도에서 피흡착물의 동적흡착 데이터는 아직까지 매우 부족하다. 활성탄이 일반적으로 흡수성의 특성을 가짐에도 불구하고 매우 높은 상대습도에서 수증기는 흡착된다. 이와 같이 수증기는 활성탄에 흡착되기 위하여 유기화합물과 경쟁한다. Kaplan 등[27]은 동적흡착공정의 파라미터를 예측하는 Wheelers-Jonas 모델을 사용하여 dimethyl methyl phosphate(DMMP)의 활성탄 흡착에 대한 높은 상대습도의 영향에 대하여 조사하였다. Linder 등[28]은 Doublin-Astakhov 흡착 isotherm의 견지에서 유기물과 물의 이성 흡착평형에 대하여 연구하였다. Biron과 Evans[29]는 활성탄에 대한 수용성(에탄올 제외)과 비수용성 증기의 활성탄에 대한 흡착에 대하여 연구하였다. 수용성 또는 비수용성에 상관없이 활성탄 표면에 높은 친화성을 갖는 입자들은 물의 존재에 적게 영향을 받았다. 그럼에도 불구하고 퇴비, 활성탄 또는 그 혼합물들과 같은 유기 또는 무기 지지체들은 바이오필터 담체로 활용이 되어왔다. 따라서 바이오필터 설계에서의 담체에 대한 고유의 동적흡착모델이 필요해진다.

이 연구의 첫 번째 논문에서는 바이오필터공정의 유입 폐가스의 조건과 같은 90% 이상의 상대습도를 유지하는 조건에서 각각 멸균된 활성탄과 퇴비를 담체로 사용하여 연속 등온흡착실험 및 탈착실험을 수행하였다. 또한 같은 습도조건 하에서 별도의 정적 흡착평형실험을 수행하여 미생물 활성과 멸균과정의 효과에 대하여 조사하였다. 이러한 첫 번째 논문의 실험 및 연구는 향후에 구축될 동적 흡착을 포함하는 강인한 바이오필터모델의 파라미터 값을 평가하기 위하여 수행된다.

2. 실험

2-1. 연속 동적흡착칼럼 흡착 및 탈착실험

비정상상태의 흡착칼럼실험을 위하여 아크릴을 소재로 한 2개의

관(지름: 5 cm, 길이 25 cm) 직렬로 연결한 흡착칼럼을 하향류 방식으로 운전하기 위하여 흡착칼럼을 제작하였다. 제작된 흡착칼럼을 이용하여 두 가지의 흡착 및 탈착 실험을 각각 수행하였는데, 첫 번째 실험에서는 에탄올 농도가 1,000 ppmv인 폐가스를 2 L/min의 유량으로 160 시간 동안 흡착칼럼에 공급하여 흡착거동을 관찰하고 흡착평형에 이르게 한 뒤에, 에탄올의 공급을 막아서 에탄올이 함유되지 않은 공기가 동 유량으로 흡착칼럼에 계속 공급되는 흡착칼럼의 탈착거동을 관찰하였다. 두 번째 실험에서는 에탄올 농도가 2,000 ppmv인 폐가스를 2 L/min의 유량으로 100 시간 동안 흡착칼럼에 공급하여 흡착거동을 관찰하고 흡착평형에 이르게 한 뒤에, 에탄올 농도가 1,000 ppmv의 경우와 마찬가지로 에탄올의 공급을 막아서 에탄올이 함유되지 않은 공기가 동 유량으로 흡착칼럼에 계속 공급되는 흡착칼럼의 탈착 거동을 관찰하였다. 흡착칼럼 시스템에 폐가스 입구와 처리가스가 나가는 출구를 포함한 4개의 샘플링 포트를 설치하여 각 포트의 흡착칼럼 높이에서 폐가스의 농도 분석을 하였다. 흡착칼럼에 담체를 상부관 및 하부관에 22 cm의 높이로 각각 채워 넣어서 흡착칼럼의 총 유효높이는 44 cm로 하였다. 네 개의 샘플링 포트 중에서 각각의 포트 위치는 폐가스 입구, 흡착칼럼의 상부관 및 하부관에 채워진 각각의 담체 높이에서 위로부터 14 cm(1단 및 2단)에 위치하고 4번째 포트는 흡착칼럼에서 처리되어 나가는 배출구에 설정하였다. 따라서 총 유효높이에 대한 유효높이비율은 폐가스 입구, 1단, 2단 및 출구의 경우에 각각 0.0, 0.3, 0.8 및 1.0이었다. 흡착칼럼에는 평균지름(D_p)이 3 mm인 입상 활성탄과 0.6 mm인 퇴비의 각각을 같은 부피로 혼합하여 사용하였다. Blower(Young Nam Yasunnaga, 토출압력; 0.12 kg_f/cm², 최대유량; 43 L/min)에서 공급되는 공기는 항온수조(제일과학, J-PW B2)에 의하여 약 40~50 °C로 유지되는 가습칼럼 3개를 통과하여 바이오필터 실험과 같은 상대습도가 95~99%를 유지하며, 이 공급공기가 가열 밴드에 의하여 약 140 °C 정도로 가열된 관을 통과할 때에 에탄올을 syringe pump(KD Scientific, Model: KDS200)로 이 관에 주입하여 에탄올이 함유된 폐가스를 제조하여 도입 폐가스로서 하향류 방식으로 흡착칼럼 위에서 주입하였다. 압축혼합공기를 이송하는 관은 tygon관으로 사용하였고 에탄올이 syringe pump로 주입되는

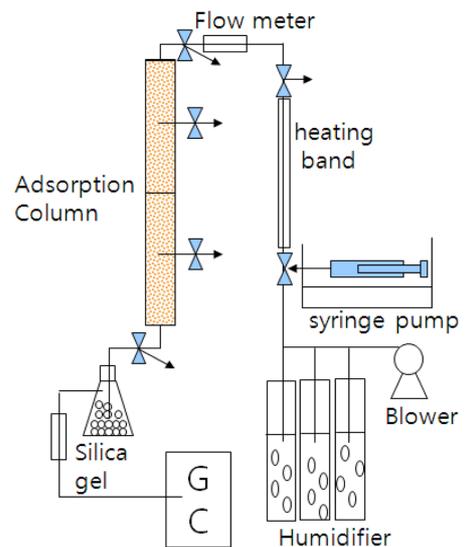


Fig. 1. Schematic diagram of dynamic-continuous flow-adsorption process.

Table 1. Characteristics of the media packed in the adsorption column and used for adsorption isotherm experiments

	GAC	Compost	GAC/ compost
Density (g/cc)	0.41	0.37	0.39
Moisture content (%) under wet condition	45	62	54
Wet porosity	0.553	0.702	0.602
Equivalent diameter (mm)	2.5	0.6	-
Interfacial area per unit volume (m ² /m ³)	1292.6	2980	2136.3

이후부터는 viton관을 사용하여 인공 폐가스를 흡착칼럼 내부로 공급하였다. 흡착칼럼은 가열밴드로 감아서 바이오필터 운전온도와 같은 온도(35~40 °C) 유지를 하였고 흡착칼럼을 포함한 각 장치의 fitting은 swagelok fitting으로 사용하였다. 흡착칼럼에 대한 공정도를 Fig. 1에 나타내었다.

2-2. 미생물 활성과 멸균과정의 효과에 대한 흡착평형실험

흡착평형실험에 사용된 흡착제의 특성은 Table 1과 같다. 입상 활성탄 1 L를 100 °C의 dry-oven에서 멸균 건조하고 동부피의 퇴비를 autoclave에서 121 °C의 조건으로 15분간 멸균한 후에 500 mL의 입상 활성탄과 500 mL의 퇴비를 1 대 1로 균일하게 혼합하였다. 또한 대조군으로서 멸균하지 않은 입상 활성탄, 퇴비 및 활성탄과 퇴비의 혼합물을 제조하였다. 용량 40 mL의 갈색 vial 30개에, 멸균한 입상 활성탄(1조), 퇴비(2조) 및 균질하게 혼합된 입상 활성탄과 퇴비 혼합물(3조)과, 멸균하지 않은 입상 활성탄(4조), 퇴비(5조) 및 균질하게 혼합된 입상 활성탄과 퇴비 혼합물(6조) 각각 20 mL을 각각 5개씩의 vial에 충전하고, 바이오필터와 비슷한 습도 조건을 위하여 5 mL의 증류수를 각각의 vial에 스프레이 첨가하였다. 증류수를 각각의 vial에 첨가한 1 시간 후에 1-6조의 각각 5개 vial에 에탄올을 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 mL 스프레이 첨가하였다. 그 후에 30 °C의 incubator에서 10일간 보관하여 vial 속에 충전된 담체에 대한 에탄올의 흡착이 평형에 도달하게 하였다.

2-3. VOC 분석방법

에탄올 농도는 4개의 샘플링 포트에서 다음과 같은 방법으로 분석되었다. Flame ionization detector(FID)와 Supelco에서 구입한 SUPELCO WAXTM-10 fused silica capillary column(30 m×0.53 mm×2.0 μm)을 장착한 가스크로마토그래피(Shimazu, GC-17A AFw Ver.3)를 RIGAS에서 구입한 에탄올 표준가스(99.8 ppmv)로 calibration을 수행하였다. 각각의 sampling port에서 250 μL gas-tight-syringe로(Hamilton, USA) 에탄올가스 100 μL를 뽑아내어서 가스크로마토그래피의 injector에 주사하여 에탄올 peak가 용출될 때까지의 retention time에서 에탄올의 농도를 측정하였다. Carrier gas는 질소(99.999%)를 사용하였고 적용한 유량은 4 mL/min이었다. Injector, oven(column) 및 detector의 운전온도는 각각 200, 90, 250 °C 이었다. 한편 에탄올의 생물학적 분해에 의하여 생성되는 이산화탄소 농도는 가스분석기(Siemens, Ultramat23)로 측정하였다.

3. 결 과

3-1. 연속 동적흡착칼럼 흡착 및 탈착거동

첫 번째 연속 동적흡착칼럼실험에서, 에탄올 농도가 1,000 ppmv

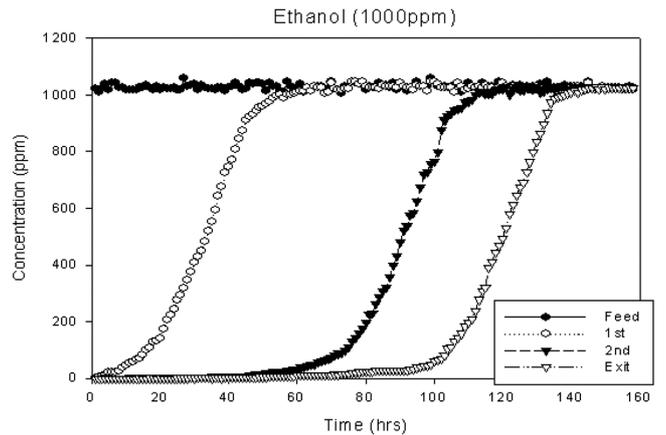


Fig. 2. Time evolutions of ethanol concentrations at each sampling port of adsorption column fed with waste air (2 L/min) containing ethanol of 1000 ppmv (or 2050 mg ethanol/m³): a. 1st (ζ=0.3); b. 2nd (ζ=0.8); c. Exit (ζ=1.0) [ζ: dimensionless height coordinates of adsorption column].

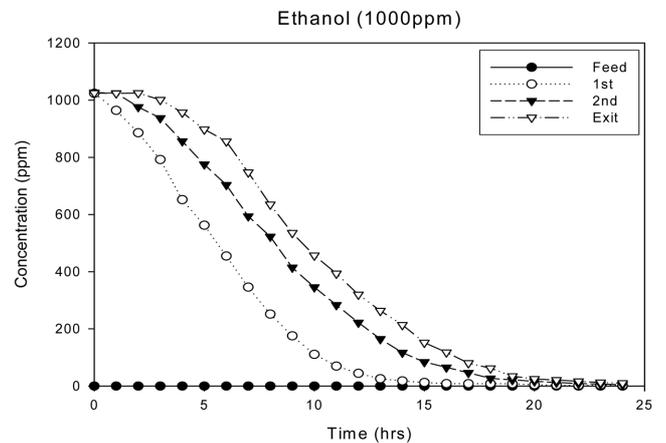


Fig. 3. Time evolutions of ethanol concentrations at each sampling port of desorption column fed with waste air (2 L/min) containing ethanol of 1000 ppmv (or 2050 mg ethanol/m³): a. 1st (ζ=0.3); b. 2nd (ζ=0.8); c. Exit (ζ=1.0) [ζ: dimensionless height coordinates of adsorption column].

(2050 mg ethanol/m³)인 폐가스를 2 L/min의 유량으로 160 시간 동안 흡착칼럼에 공급하여 흡착거동을 관찰하고 흡착평형에 이르게 한 뒤에, 에탄올의 공급을 막아서 에탄올이 함유되지 않은 공기가 동 유량으로 흡착칼럼에 공급되는 흡착칼럼의 탈착 거동을 관찰하였다. 에탄올 농도가 1,000 ppmv(2,050 mg ethanol/m³)이고 유량이 2 L/min의 경우에 흡착칼럼의 흡착 및 탈착거동은 각각 Figs. 2와 3과 같다. Fig. 2에서와 같이 유입폐가스의 에탄올농도의 5% 파파가 1단(h/H=0.3), 2단(h/H=0.8)과 출구(h/H=1.0) 샘플링 포트에서 흡착칼럼 운전 후 각각 10, 60 및 100 시간에 발생하였고, 흡착평형은 흡착칼럼 운전 후 각각 2, 4 및 6일에 각각 도달하였다. 따라서 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 파파시간이 약 10배 지연되었고, 흡착평형 도달시간도 약 3배 지연되었다. 한편 공급폐가스에 포함된 에탄올의 농도가 0 ppmv일 때에 흡착이 포화된 흡착칼럼의 탈착거동은 Fig. 3과 같이 1단, 2단 및 출구 샘플링 포트의 순서로 탈착이 진행되었다. 1단, 2단 및 출구 샘플링 포트에서 공급폐가스의 에탄올농도의 10%인 100 ppmv를 나타낼 때까지 각각 11,

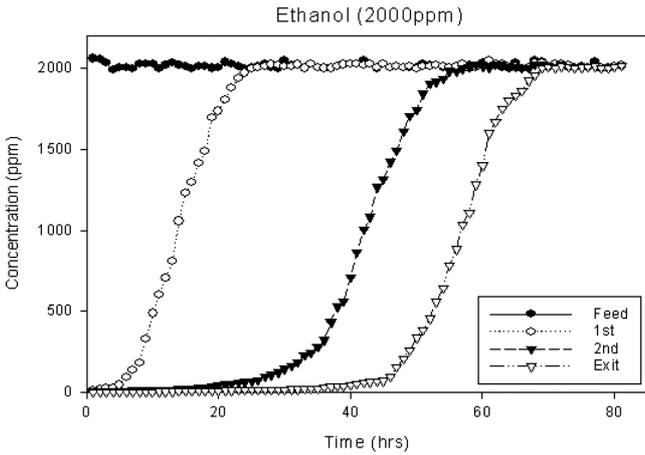


Fig. 4. Time evolutions of ethanol concentrations at each sampling port of adsorption column fed with waste air (2 L/min) containing ethanol of 2000 ppmv (or 4100 mg ethanol/m³): a. 1st ($\zeta=0.3$); b. 2nd ($\zeta=0.8$); c. Exit ($\zeta=1.0$) [ζ : dimensionless height coordinates of adsorption column].

15 및 17 시간이 소요되었다. 따라서 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착 시간이 약 1.5배 지연되었다.

두 번째 연속 동적흡착칼럼실험에서, 에탄올 농도가 2,000 ppmv (4,100 mg ethanol/m³)인 폐가스를 2 L/min의 유량으로 100 시간 동안 흡착칼럼에 공급하여 흡착거동을 관찰하고 흡착평형에 이르게 한 뒤에, 에탄올의 공급을 막아서 에탄올이 함유되지 않은 공기가 동 유량으로 흡착칼럼에 공급되는 흡착칼럼의 탈착 거동을 관찰하였다. 에탄올 농도가 2,000 ppmv(4,100 mg ethanol/m³)이고 유량이 2 L/min의 경우에 흡착칼럼의 흡착 및 탈착거동은 각각 Fig. 4와 5와 같다. Fig. 4에서와 같이 유입폐가스의 에탄올농도의 5% 초과가 1단(h/H=0.3), 2단(h/H=0.8)과 출구(h/H=1.0) 샘플링 포트에서 흡착칼럼 운전 후 각각 5, 28 및 45 시간에 발생하였고, 흡착평형은 흡착칼럼 운전 후 각각 1, 2 및 3 일에 각각 도달하였다. 따라서 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 초과시간이 9배 지연되었고, 흡착평형 도달시간은 3배 지연되었다. 한편 공급폐가스에 포함

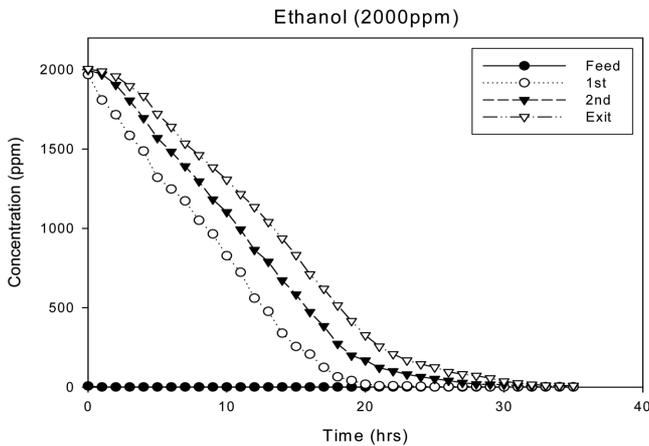


Fig. 5. Time evolutions of ethanol concentrations at each sampling port of desorption column fed with waste air (2 L/min) containing ethanol of 2000 ppmv (or 4100 mg ethanol/m³): a. 1st ($\zeta=0.3$); b. 2nd ($\zeta=0.8$); c. Exit ($\zeta=1.0$) [ζ : dimensionless height coordinates of adsorption column].

된 에탄올의 농도가 0 ppmv일 때에 흡착이 포화된 흡착칼럼의 탈착거동은 Fig. 5와 같이 1단, 2단 및 출구 샘플링 포트의 순서로 탈착이 진행되었다. 1단, 2단 및 출구 샘플링 포트에서 공급폐가스의 에탄올농도의 10%인 200 ppmv를 나타낼 때 까지 각각 16, 20 및 23 시간이 소요되었다. 따라서 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착시간이 첫 번째 연속 동적흡착칼럼실험 결과와 같이 약 1.5배 지연되었다.

따라서 상대적으로 유입폐가스의 에탄올 농도가 클수록 흡착에서의 초과시간, 흡착평형 도달시간은 더욱 빨라졌으나 탈착시간은 더욱 지연되었음이 관찰되었다. 한편 Fig. 2와 4를 서로 비교하였을 때에, 공급폐가스의 에탄올농도와 무관하게 1단과 출구의 샘플링 포트에서 비교한 유입폐가스의 에탄올농도의 5% 초과시간 및 흡착평형 도달시간의 지연배수는 각각 약 9~10배와 3배로서 거의 일치하였다. 또한 1단과 출구의 샘플링 포트에서 비교한 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착시간 지연배수도 Fig. 3과 5와 같이 약 1.5배로서 거의 일치하였다.

3-2. 흡착평형에 대한 미생물 활성과 멸균과정 효과

미생물에 의한 에탄올 제거에 따른 이산화탄소의 발생량은 Fig. 6과 같이 관찰되었다. 첨가된 에탄올 량이 0.5~1.5 mL까지는 멸균되지 않은 담체, 특히 퇴비에서 미생물에 의한 에탄올 분해량이 멸균된 퇴비보다 10~100배 이상 큼이 관찰되었다. 그러나 에탄올 첨가량이 1.5 mL 이상에서는 차이가 2배 정도로 적어졌다. 이것은 에탄올 첨가량이 1.5 mL 이상에서는 기상에서의 에탄올 농도가 15,000 ppm 이상이므로 멸균되지 않은 퇴비에 존재하는 미생물에 독성을 크게 나타내는 것에 기인한다고 해석될 수 있다. 따라서 기상의 에탄올 농도에 대한 멸균되지 않은 충전된 담체에 고정된 미생물의 영향은 에탄올 첨가량 1.5 mL 이하에서만 미침이 관찰되었다.

한편 기상에서의 에탄올농도는, Fig. 7과 같이 첨가한 에탄올 양에 따라서 각각의 멸균된 충전물인 GAC(1조), 퇴비(2조), GAC/퇴비 혼합물(3조), 멸균되지 않은 GAC(4조), 퇴비(5조) 및 GAC/퇴비 혼합물(6조)의 각 조마다 각각 거의 선형으로 증가하였다. 멸균한 GAC(1조)와 멸균하지 않은 GAC(4조)의 기상에서의 에탄올 농도

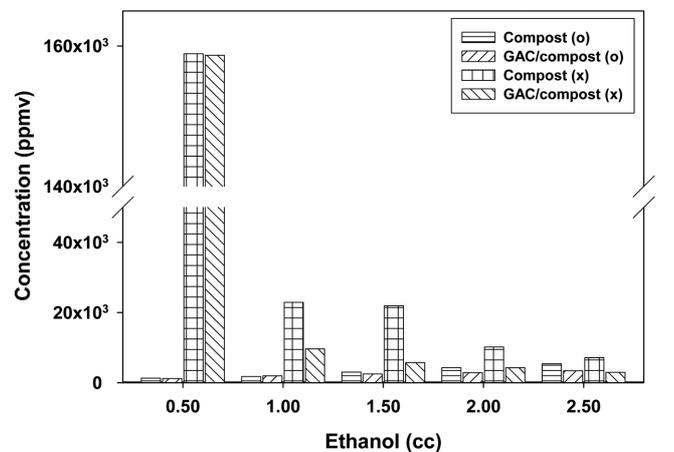


Fig. 6. Carbon dioxide concentration in the vapor phase of vials packed with sterilized compost, sterilized GAC/compost mixture, unsterilized compost and unsterilized GAC/compost mixture according to the amount of ethanol added to each vial (o, sterilized; x, unsterilized).

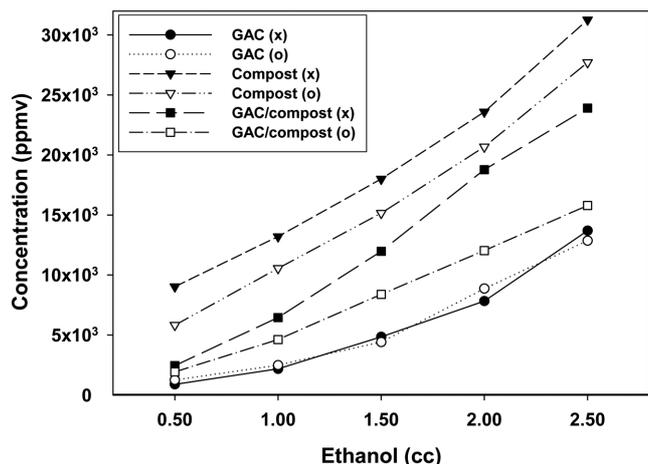


Fig. 7. Ethanol concentration in the vapor phase of vials packed with sterilized GAC, sterilized compost, sterilized GAC/compost mixture, unsterilized GAC, unsterilized compost and unsterilized GAC/compost mixture according to the amount of ethanol added to each vial (o, sterilized; x, unsterilized).

는 거의 일치하였다. 이것은 GAC는 미생물에 대한 영양물질 및 기타 유기물을 담지하고 있지 않아서 초기에 접촉되어 있는 미생물이 거의 없는 상태이기 때문에 멸균하지 않은 GAC의 경우라도 미생물에 의한 에탄올 제거가 아주 적었음을 알 수 있다. 퇴비나 GAC/퇴비 혼합물의 경우에는 멸균 안한 경우가 멸균한 경우보다 기상에서의 에탄올 농도가 현저하게 높았다. 이것은 멸균 안한 상태의 미생물에 의한 에탄올 제거로 인한 기상에서의 에탄올 농도감소량보다, 멸균시키기 위하여 autoclave에서 121 °C의 높은 온도로 처리하였을 때 퇴비의 pore 구조가 변형되어 흡착능력이 더욱 개선되어져서 기상의 에탄올 농도가 감소되는 양이 더욱 큰 것 때문이라고 해석되어진다.

4. 결 론

바이오필터 담체의 동적흡착거동을 바이오필터 처리공정과 같은 90% 이상의 상대습도조건에서 관찰하였다. 에탄올 농도가 1000 ppmv(2050 mg ethanol/m³)인 폐가스를 처리하는 첫 번째 연속 동적흡착칼럼실험에서 유입폐가스의 에탄올농도의 5% 초과가 1단(h/H=0.3), 2단(h/H=0.8)과 출구(h/H=1.0) 샘플링 포트에서 흡착칼럼 운전 후 각각 10, 60 및 100 시간에 발생하였고, 흡착평형은 흡착칼럼 운전 후 각각 2, 4 및 6일에 각각 도달하였다. 따라서 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 초과시간이 약 10배 지연되었고, 흡착평형 도달시간도 약 3배 지연되었다. 한편 공급폐가스에 포함된 에탄올의 농도가 0 ppmv일 때에 흡착이 포화된 흡착칼럼의 탈착거동은 1단, 2단 및 출구 샘플링 포트에서 공급폐가스의 에탄올농도의 10%인 100 ppmv를 나타낼 때까지 각각 11, 15 및 17 시간이 소요되어서, 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착시간이 약 1.5배 지연되었다. 에탄올 농도가 2,000 ppmv(4,100 mg ethanol/m³)인 폐가스를 처리하는 두 번째 연속 동적흡착칼럼실험에서 유입폐가스의 에탄올농도의 5% 초과가 1단(h/H=0.3), 2단(h/H=0.8)과 출구(h/H=1.0) 샘플링 포트에서 흡착칼럼 운전 후 각각 5, 28 및 45 시간

에 발생하였고, 흡착평형은 흡착칼럼 운전 후 각각 1, 2 및 3 일에 각각 도달하였다. 따라서 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 초과시간이 약 9배 지연되었고, 흡착평형 도달시간도 약 3배 지연되었다. 한편 공급폐가스에 포함된 에탄올의 농도가 0 ppmv일 때에 흡착이 포화된 흡착칼럼의 탈착거동은 1단, 2단 및 출구 샘플링 포트에서 공급폐가스의 에탄올농도의 10%인 200 ppmv를 나타낼 때까지 각각 16, 20 및 23 시간이 소요되어서, 1단 샘플링 포트보다 출구의 샘플링 포트에서 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착시간이 약 1.5배 지연되었다. 공급폐가스의 에탄올농도와 무관하게 1단과 출구의 샘플링 포트에서 비교한 유입폐가스의 에탄올농도의 5% 초과시간 및 흡착평형 도달시간의 지연배수는 각각 약 9~10배와 3배로서 거의 일치하였다. 또한 1단과 출구의 샘플링 포트에서 비교한 유입폐가스의 에탄올농도의 10%를 보이는 탈착시간 지연배수도 약 1.5배로서 거의 일치하였다.

흡착평형에 대한 미생물 활성 효과와 멸균과정 효과를 관찰하였다. 미생물에 의한 에탄올 제거에 따른 이산화탄소의 발생량에서, 기상의 에탄올 농도에 대한 멸균되지 않은 충전된 담체에 고정된 미생물의 영향은 에탄올 첨가량 1.5 mL 이하에서만 미침이 관찰되었다. 한편 기상에서의 에탄올농도는, 첨가한 에탄올 양에 따라서 각각의 멸균된 GAC, 멸균된 퇴비, 멸균된 GAC/퇴비 혼합물, 멸균되지 않은 GAC, 멸균되지 않은 퇴비 및 멸균되지 않은 GAC/퇴비 혼합물마다 거의 선형으로 증가하였다. 멸균한 GAC와 멸균하지 않은 GAC의 기상에서의 에탄올 농도는 거의 일치하였다. 퇴비나 GAC/퇴비 혼합물의 경우에는 멸균 안한 경우가 멸균한 경우보다 기상에서의 에탄올 농도가 현저하게 높았다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- Eckhart A., in *Proceedings of Biological Treatment of Industrial Waste Gases*, Dechema, Heidelberg, Germany, Mar. p 24-26(1987).
- Hirai, M., Ohtake, M. and Shoda, M., "Removal Kinetics of Hydrogen Sulfide, Methanethiol and Dimethyl Sulfide by Peat Bio-Filters," *J. Ferment. Bioeng.*, **70**, 334-339(1990).
- Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., Oh, Y. S. and Bartha, R., "Bio-filtration of Methanol Vapor," *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, 512-524 (1993).
- Tang, B., Hwang, S. J. and Hwang, S., "Dynamics of Toluene. Degradation in Biofilters," *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, **12**(3), 207-219(1995).
- Lee, E. Y., Cho, K. S. and Ryu, H. W., "Simultaneous Removal of H₂S and NH₃ in Biofilter Inoculated with Acidithiobacillus Thiooxidans TAS," *J. Biosci. Bioeng.*, **99**, 611-615(2005).
- Galera, M. M., Cho, E., Tuuguu, E., Park, S. J., Lee, C. and Chung, W. J., "Effects of Pollutant Concentration Ratio on the Simultaneous Removal of NH₃, H₂S and Toluene Gases Using Rock Wool-compost Biofilter," *J. Hazard. Mater.*, **152**, 624-631 (2008).
- Filho, J. L. R. P., Sader, L. T., Damianovic, M. H. R. Z., Foresti,

- E. and Silva, E. L., "Performance Evaluation of Packing Materials in the Removal of Hydrogen Sulphide in Gas-phase Biofilters: Polyurethane Foam, Sugarcane Bagasse, and Coconut Fibre," *Chem. Eng. J.*, **158**, 441-452(2010).
8. Ottengraf, S. P. P., Exhaust gas purification, In: H. J. Rehm and G. Reed (eds), *Biotechnology*, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, **8**, 426-452(1986).
 9. Ottengraf, S. P. P., Meesters, J. J. P., Van Den Oever, A. H. C. and Rozema, H. R., "Biological Elimination of Volatile Xenobiotic Compounds Using Biofilters," *Bioprocess Eng.*, **1**(1), 61-69 (1986).
 10. Buchner, R., "Auswirkungen Verschiedener Betriebszustände in der Biologischen Abluftreinigung am Beispiel von Biofiltern," Ph. D. Thesis, T.U. Wien, Austria(1989).
 11. Leson, G. and Winer, A. M., "Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **41**, 1045-1054(1991).
 12. Deshusses, M. A. and Hamer, G., "The Removal of Volatile Ketone Mixtures from air In Biofilter," *Bioprocess Eng.*, **9**, 141-146 (1993).
 13. Deshusses, M. A. and Dunn, I. J., "Modelling Experiments on the Kinetics of Mixed-solvent Removal from Waste Gas in a Biofilter," in *Proceedings of the 6th European Congress on Biotechnology*, L. Alberghina, L. Frontali and P. Sensi, Eds., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, 1191-1198(1994).
 14. Deshusses, M. A., Hamer, G. and Dunn, I. J., "Behaviour of Biofilters for Waste Air Biotreatment. 1. Dynamic Model Development," *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 1048-1058(1995).
 15. Deshusses, M. A., Hamer, G. and Dunn, I. J., "Transient State Behaviour of Biofilter Removing Mixtures of Vapors of MEK and MIBK from Air," *Biotechnol. Bioeng.*, **49**(5), 587-598(1996).
 16. Deshusses, M. A., "Transient Behaviour of Biofilters: Start-up, Carbon Balances and Interactions Between Pollutants," *J. Environ. Eng.*, **123**(6), 563-568(1997).
 17. Hodge, D. S. and Devinny, J. S., "Biofilter Treatment on Ethanol Vapors," Devinny, *Environmental Process*, **13**(3), 167-173(1994).
 18. Hodge, D. S. and Devinny, J. S., "Modeling Removal of Air Contaminants by Biofiltration," *J. Environ. Eng.*, **121**(1), 21-32 (1995).
 19. Tang, B., Hwang, S. J. and Hwang, S., "Dynamics of Toluene Degradation in Biofilters," *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, **12**, 207-219(1995).
 20. Zarook, S. and Baltzis, B. C., "Biofiltration of Toluene Vapor Under Steady State and Transient Conditions: Theory and Experimental Results," *Chem. Eng. Sci.*, **49**(24A), 4347-4360 (1994).
 21. Zarook, S. M., Shaikh, A. A. and Ansar, Z., "Development, Experimental Validation and Dynamic Analysis of A General Transient Biofilter Model," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(5), 759-773(1997).
 22. Delhomemie, M. C., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R. and Heitz, M., *Chem. Eng. J.*, **94**, 211(2003).
 23. Oh, D. I., Song, J., Hwang, S. J. and Kim, J. Y., "Effect of Adsorptive Properties of Biofilter Packing Materials on the Toluene Removal," *J. Hazard. Mater.*, **170**, 144-150 (2009).
 24. Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T. and Biswas, P., "Evaluation of Trickle Bed Biofilter Media for Toluene Removal," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **45**, 801-810(1995).
 25. Liu, P. K. T., Gregg, R. L. and Sabol, H. K., "Engineered Biofilter for Removing Organic Contaminants in Air," *Air Waste*, **44**, 209-303(1994).
 26. Wani, A. H., Branion, R. M. R. and Lau, A. K., "Biofiltration: A Promising and Cost Effective Control Technology for Odors, VOCs and Air Toxics," *J. Environ. Sci. Health*, **A32**, 2027-2055 (1997).
 27. Kaplan, D., Nir, I. and Shmueli, L., "Effects of High Relative Humidity on the Dynamic Adsorption of Dimethyl Methylphosphonate (DMMP) on Activated Carbon," *Carbon*, **44**, 3247-3254 (2006).
 28. Linders, M. J. G., van den Broeke, L. J. P., Kapteijin, F. and Moulijn, "Binary Adsorption Equilibrium of Organics and Water on Activated Carbon," *AIChE J.*, **47**, 1885-1892(2001).
 29. Biron, E. and Evans, M. J. B., "Dynamic Adsorption of Water-soluble and Insoluble Vapours on Activated Carbon," *Carbon*, **36**, 1191-1197(1998).