

생물학적 방법에 의한 하수 중계펌프장의 악취제거

류희욱*

송실대학교 환경·화학공학과

Removal of Malodorous Gases Emitted from a Wastewater Pumping Stations by Biological Methods.
Ryu, Hee Wook*, Department of Chemical and Environmental Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea – To select a promising technologies for removal of odorous gases emitted from a wastewater pump station, four methods such as activated carbon (A/C) adsorption, chemical absorption (acid and alkali scrubber), and two biofilters (polyurethane (PU) and worm cast) were investigated. The average odor removal efficiencies in the PU biofilter and A/C column was over 98%, but in a worm cast biofilter and chemical absorption were below 60-80%. The removal efficiency of PU biofilter was very stable (about 98-99%) in the range of retention times of 4-36s, and a maximum elimination capacity was 1.6×10^7 OU·m⁻³·h⁻¹. Deodorization costs for an activated carbon adsorption and a biofiltration method were investigated. With increasing odor intensity, the operating cost of the A/C column increased linearly, but the operating cost of the biofiltration increased slightly. The capital cost in a biofilter is about two times higher than that in an A/C column, but the operating cost is very lower than that of in A/C column. In conclusion, the biofiltration was evaluated one of the most promising technologies to control odor in a wastewater pump station.

Key words: Malodorous gases, wastewater pumping station, biofiltration, worm cast

황화수소, 암모니아, 메르캅탄, 저급지방산 등과 같은 악취 유발물질은 다양한 산업분야에서 배출되어 주변 환경에 많은 영향을 미치고 있다. 특히 이러한 물질은 분뇨처리장, 하·폐수처리장, 하수중계펌프장, 매립지, 퇴비화 시설 등 환경기초시설에서도 다량 배출된다[3, 10-12]. 이러한 환경기초시설에서 발생하는 악취유발물질은 크게 무기물질과 유기물질로 분류할 수 있다. 황화수소와 암모니아는 무기물질로 분류할 수 있으며, 유기물질은 주로 미생물 대사에 의하여 생성되는 유기산, 알데히드류, 케톤류와 아민류 그리고 황 함유 유기물질 등으로 나눌 수 있다. 인간의 후각감지능은 이러한 악취물질에 대하여 매우 민감하여 아주 낮은 농도에서도 감지할 수 있기 때문에 미량의 배출량으로 많은 민원이 야기되어 처리장 부지 선정단계에서부터 저항을 받는 경우가 자주 발생되고 있다. 또한, 환경기초시설은 쾌적한 환경에 대한 인간의 욕구를 충족시키기 위해 반드시 필요한 시설이나 이러한 시설에서 발생하는 악취는 생활 환경을 해치는 2차 오염의 원인이 된다. 따라서 환경기초시설에서 배출되는 악취 제어 대책이 필요하며, 국내 실정에 맞는 탈취기술의 개발이 시급하다.

악취유발물질의 제어방법으로는 공정을 개선함으로써 악취물질의 발생량을 저감시키는 방법과 세정, 활성탄 흡착등

과 같은 물리적인 방법, 산화법, 약액흡수법, 이온교환수지법 등과 같은 화학적인 방법, 그리고 미생물을 이용한 생물학적 방법이 있다[1, 3-7, 9, 12]. 물리화학적 탈취기술은 탈취효율이 비교적 우수하고 설비가 단순하여 설치비가 저렴하나, 유지관리비가 많이 소요되고 2차 오염물 발생 등의 단점이 있다. 이에 비해 생물학적 탈취기술은 경제적이고 환경친화적인 방법으로 악취물질을 처리할 수 있는 기술이나 초기 설비가 많이 소요되는 문제점이 있다.

본 연구는 하수 중계 펌프장 주변 환경 개선을 위해 펌프장에서 배출되는 악취를 효율적으로 제어할 수 있는 기술을 평가하였다. 다양한 탈취기술 중 활성탄 흡착법, 약액세정법, 지렁이 분변토를 이용한 탈취법[2, 7, 13], 그리고 바이오필터에 의한 생물학적 탈취법[3, 6, 8] 등 4가지 탈취법을 선정하여 탈취 공정별 성능평가 및 경제성 분석 연구를 통하여 효율적인 탈취방식을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

인공하수악취 발생장치

하수 중계펌프장에서 발생하는 악취가스를 모사하기 위하여 stainless steel(0.3 m ID×0.5 m H)로 제작한 악취발생장치를 사용하였다. 중계 펌프장에서 건져내 호퍼에 보관중인 협잡물 30 kg을 악취발생장치에 충전시키고, 송풍기(2 m³·min⁻¹)를 사용하여 발생장치 하부에 공기를 주입하여 협잡물 층을 통과시켜 중계펌프장과 유사한 악취를 인위적으로

*Corresponding author
Tel. 82-2-820-0611, Fax: 82-2-821-4190
E-mail: hwryu@ssu.ac.kr

발생시켰다. 혐잡물의 건조를 방지하기 위하여 2-3일에 1회씩 일정한 양의 하수를 살포하여 지속적으로 악취가 발생하도록 하였다. 악취 발생장치에서 발생된 악취가스를 각각의 탈취장치에 주입하여 탈취성능을 조사하였다.

탈취장치 및 성능 평가

하수 중계 펌프장의 저류저와 호퍼에서 발생하는 악취를 효과적으로 제거할 수 있는 탈취기술을 선정하기 위하여 bench scale의 활성탄 흡착탑(A/C column), 약액 세정탑, 지렁이 분변토, polyurethane(PU) 바이오필터에서 탈취효율을 조사하였다. 활성탄 흡착탑은 지름 4.5 cm, 높이 30 cm인 pyrex 컬럼(부피 0.48 L)을 사용하였으며, 활성탄 30 g을 충전시켰다. 사용된 활성탄은 이때 충전부피는 0.38L이다. 약액세정법은 산세정탑과 알칼리 세정탑을 사용하였다. 세정탑은 지름 8 cm, 높이 54 cm인 아크릴 수지로 제작하였고, 각 세정탑은 packing material로 다공성 고분자 수지를 18 cc씩 충전하였다. 산 세정액으로는 0.1 N H₂SO₄ 용액 1 L를 사용하였으며, 알칼리 용액으로는 0.1 N NaOH를 사용하였다. 지렁이 분변토를 이용한 biofilter 탈취장치는 지름 7.5 cm, 높이 30 cm인 유리컬럼으로 부피가 1.3 L이다. 지렁이 분변토 300 g을 유리컬럼에 채웠으며 충전 부피는 0.66 L이다. 지렁이 분변토는 직경 1 cm 내외, 길이 1-1.5 cm의 막대형으로 고품화시켜 제작한 것을 사용하였다. PU 바이오필터 장치는 아크릴수지(0.4×0.4×2.2 m)로 제작하였으며, 탈취균주의 고정화 담체로는 폴리우레탄 담체를 사용하였다. 담체의 충전부피와 충전량은 각각 144 L와 1.2 kg으로 모두 4단(한 단의 충전 높이가 22.5 cm)으로 나누어졌다. 지렁이 분변토 바이오필터와 PU biofilter의 집중원으로는 하수 처리장의 농축 오니 현탁액을 담체에 흡수시켜 탈취미생물을 고정화시킨 후, 이 담체를 biofilter column에 충전하여 사용하였다. Biofilter에 충전된 담체가 건조되는 것을 방지하고, 미생물에 무기염을 공급하기 위하여 무기염이 첨가된 수도물 4 L를 펌프를 이용하여 biofilter 상부에 설치한 스프레이로 1일 3-4회 분사해주었다. 살수액의 조성은 KH₂PO₄, 1.5 g/L; Na₂HPO₄ · 12H₂O, 9 g/L; (NH₄)₂SO₄, 3 g/L; CaCl₂ · 2H₂O, 0.01 g/L; MgSO₄, 0.15 g/L이며, 2일에 한번씩 교환해 주었다.

활성탄 흡착탑의 악취공기 처리 성능은 공간속도 11,250 h⁻¹(체류시간 0.32초)의 조건에서 과과점에 도달할 때까지 수행하였다. 약액 세정탑은 공간속도 70 h⁻¹(체류시간 50초)의 조건에서 산세정탑과 알칼리 세정탑을 각각 탈취 성능을 평가하였으며, 산세정탑과 알칼리 세정탑을 직렬로 연결한 경우에도 탈취 성능을 과과점에 도달할 때까지 수행하였다. 분변토 바이오필터는 공간속도 1270 h⁻¹(체류시간 13초)에서 평가하였다. PU바이오필터는 공간속도 300 h⁻¹(체류시간 12초)에서 장기간 조업하면서 탈취성능을 평가하였으며, 체류시간 변화(4, 6, 10, 36초)에 따른 탈취 효율과 바이오필

터의 높이 변화에 따른 탈취성능을 평가하였다.

분석방법

입·출구에서 가스 시료를 시료 채취 용기에 채취하여 무취공기로 희석배수를 단계적으로 증가시키면서 희석하여 냄새를 느낄 수 없을 정도까지 희석하여 냄새 감지 한계 희석배수를 구하였다. 냄새 감지 한계 희석배수는 공정실험방법에 의해 측정하였다. 악취의 농도는 이런 악취감지 희석배수로 대표하였으며 농도로 표시하기 위해 단위로서는 odor unit(OU · m³)을 사용하였다.

황화수소 농도는 flamephotometric detector가 장착된 gas chromatography(HP 5890, HP, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석용 컬럼으로 HP-1(0.32mm I.D.×30 m L, 0.25 μm)을 사용하였다. 암모니아 농도를 측정하기 위해 0.01 N H₂SO₄ 용액을 100 ml 넣은 흡수병에 가스를 10분간 흡수시켰다. 이 흡수액 중의 NH₄⁺ 농도는 IC Pak-TM Cation M/D(3.9 mm φ×150 mm L, Waters, USA) 컬럼을 이용하여 이온 크로마토그래피(Waters 510, Waters, USA)로 분석하였다.

결과 및 고찰

중계펌프장에서 발생하는 주요 악취성분

N 하수중계펌프장에서 발생하는 악취가스의 주요 성분은 암모니아, 황화수소, 알데히드류 및 VOCs 들로 구성되어 있다. 중계 펌프장 악취물질은 암모니아 1-10 ppm, 황화수소 0.2-2.0 ppm, 알데히드류 0.1 ppm 이하이며 그 외에 다양한 종류의 VOC 물질들이 혼합되어 있는 복합악취 가스이다. 주요 VOC 악취 물질로는 methane, hexane, cyclopentane, benzene, styrene, xylene, trimethylbenzene, benzaldehyde, limonene, 등의 다양한 VOC 성분들로 구성되어 있다(data not shown). 하수 중계펌프장의 현장 악취강도는 600-1,000 OU · m³ 이다.

활성탄 흡착탑에 의한 탈취

활성탄 흡착탑에 인공악취가스를 공간속도 11,250 h⁻¹(체류시간 0.32초)의 조건에서 악취유발물질 제거 특성을 Fig. 1에 도시하였다. 유입악취가스의 악취농도는 3000-6000 OU · m⁻³로 유입되었다. 초기에는 악취물질이 활성탄의 표면에 완전히 흡착되어 관능법에 의한 악취강도는 1도 이하로 나타났다. 19일까지는 98-99%의 높은 탈취율을 제공하였고, 22일 경과 후에는 약 90%의 탈취율을 제공하였다. 그 이후에는 급격하게 탈취율이 저하되었으며 30일 이후에는 악취유발물질의 흡착력이 50% 이하로 급격히 감소하였다(Fig. 1). 활성탄 흡착탑의 단위 부피당 누적 탈취성능은 누적유입량이 2.7×10⁸ OU · m⁻³ reactor volume까지는 98%를 제공하였고, 3.5×10⁸ OU · m⁻³ reactor volume까지는 90%의 탈취

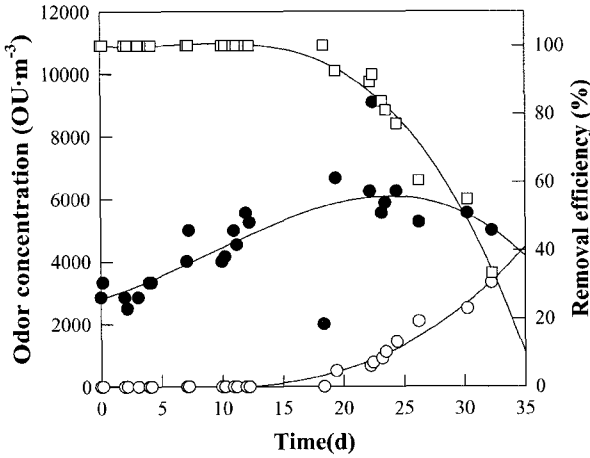


Fig. 1. Deodorization by an activated carbon column. Symbols: ●: inlet odor concentration, (○): outlet odor concentration, and □: removal efficiency.

율을 제공하였다(Fig. 2). 탈취율이 90%에 도달하는 22일을 활성탄의 과과점으로 볼 때 활성탄 단위 부피당 탈취 용량은 $3.5 \times 10^9 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$ 이었다.

약액세정 탈취

화학적 처리법 중의 하나로 중화 반응에 의한 악취유발물질 제거특성에 조사하였다. 산세정탑과 알칼리 세정탑을 직렬로 연결하여 악취가스($4000\text{-}6000 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$)를 70 h^{-1} (체류시간 = 50초)로 유입시켜 탈취특성을 조사하였다(Fig. 3). 초기 악취제거효율은 80-84%로 일정하게 유지하였으나 약 15일 이후에는 산성액에 의해서 악취물질을 중화시킬 수 있는 한계점에 가까워지면서 제거효율이 60%로 감소하였고 20일 이후에는 중화되는 포화점에 도달하면서 30%로 급격히 저하 되었다. 이와 같이 약액 세정탑을 사용한 경우 탈

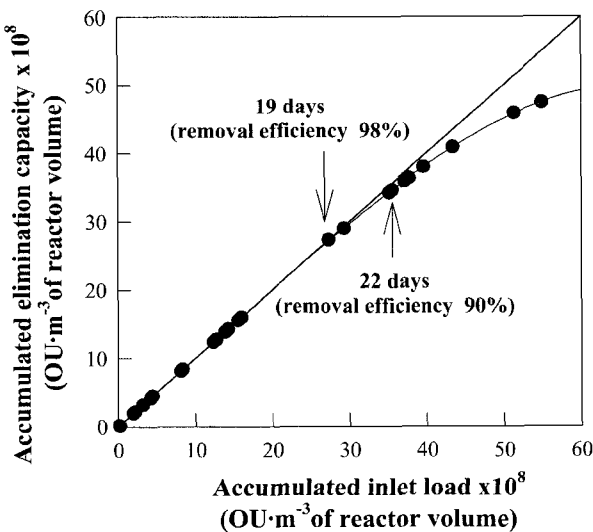


Fig. 2. Elimination capacity per unit volume of an activated carbon.

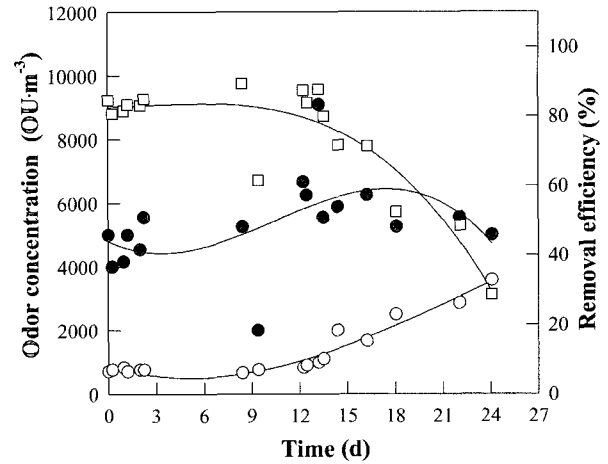


Fig. 3. Deodorization by wet scrubber. Acid solution 0.1N H₂SO₄ and alkali solution 0.1N NaOH. Symbols: ●: inlet odor concentration, (○): outlet odor concentration, and □: removal efficiency.

취율이 80%를 초과하지 못하는 이유는 하수 중계 펌프장 발생악취에는 중화반응에 의해 제거될 수 없는 VOC 화합물이 함유되어 있기 때문이다. 따라서, 약액 세정법은 중계펌프장의 탈취기술로 적합하지 않음을 확인하였다.

지렁이 분변토 바이오필터를 이용한 탈취

지렁이 분변토를 탈취용으로 사용할 경우 탈취미생물의 생장에 필요한 수분을 공급하기 위해 탈취탑에 물을 분무시키기 때문에 장기간 조업(약 2개월 이상)과정에서 분변토 층의 압밀현상이 심하게 진행된다. 그로 인해 압력손실이 급격하게 증가하는 문제가 있어 탈취탑에 사용이 불가능하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 입자상(rod type)으로 고정화시킨 지렁이 분변토 담체를 충전한 탈취탑의 탈취성능을 평가하였다. 악취가스를 탈취탑에 270 h^{-1} (체류시간=13초)의 일정한 공간 속도로 유입시키면서 얻은 악취제거효율을 Fig. 4에 도시하였다. 조업초기에는 악취농도는 $4,000\text{-}5,000 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$ 로 유입되었을 때 탈취율이 20% 전후로 거의 제거가 되지 못하였지만, 약 3일 경과 후에 제거율이 60%로 증가하여 15일에는 80%의 탈취율을 보였으나 15일 경과 후에는 탈취율이 감소하기 시작하여 제거율이 30%까지 감소되었다(Fig. 4). 본 연구에서 사용된 성형된 지렁이 분변토의 경우 일정한 강도를 유지하고 있기 때문에 수분공급과정에서 발생될 수 있는 압밀 현상을 어느 정도 극복할 수 있었다. 그러나, 성형 지렁이 분변토를 사용할 경우 최고 탈취율이 80%에 불과한데, 이러한 현상은 성형지렁이 분변토가 미생물이 부착하여 성장할 수 있는 기공이 상대적으로 적어 담체 표면에만 고정화가 가능하기 때문에 탈취 효율이 낮은 것으로 사료된다.

PU 바이오필터에 의한 탈취

악취농도가 $3000\text{-}6000 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$ 인 악취가스를 PU 바이

오필터에 공간속도 300 h^{-1} (체류시간 12초)으로 통과할 때 바이오필터의 탈취성능을 평가하였다(Fig. 5). 바이오필터에

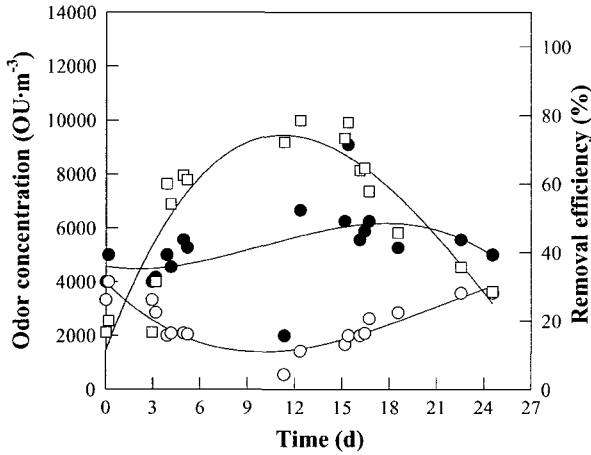


Fig. 4. Deodorization by a warm cast biofilter. Symbols: ●: inlet odor concentration, (○): outlet odor concentration, and □: removal efficiency.

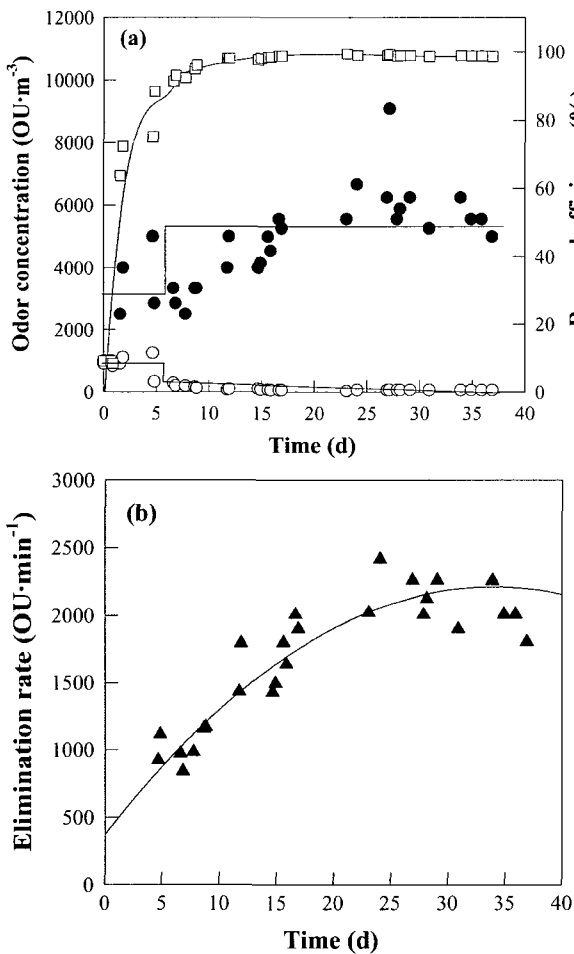


Fig. 5. Deodorization by a PU biofilter (a) and elimination rate (b). Symbols: ●: inlet odor concentration, (○): outlet odor concentration, □: removal efficiency, and ▲: elimination rate.

탈취세균을 접종한 후 필터시스템의 가동초기에는 약 10%의 낮은 탈취율을 보였으나, 가동 1일 경과 후부터 탈취성능이 급격하게 상승하였고, 약 5일 가동 후에 90% 이상의 탈취효율을 보였다. 탈취균들이 고정화 담체에 안정적으로 고정화되기 시작한 약 10일 경과 후에 바이오필터의 탈취효율은 약 98-99%로 높은 탈취율을 제공하였다. 유입 악취농도는 조업초기에는 $3,000-5,000 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$, 15일 경과 후부터는 악취강도가 $5,000-60,00 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 일정하게 유지되었다. 이러한 고농도 악취가스를 바이오필터를 처리할 경우 출구의 악취강도는 $100 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$ 이하로 유지되었으며, 관능법에 의한 바이오필터 출구에서의 악취강도는 약 1도 이하로 낮게 유지되는 우수한 탈취성을 보였다. 약 35일간의 조업기간 동안에 탈취성능이 저하되는 현상없이 안정적인 탈취성을 제공하였고, 탈취속도가 $2,000-2,400 \text{ OU} \cdot \text{min}^{-1}$ 으로 일정하게 유지되었다. PU 바이오필터는 미생물이 짧은 시간에 적응을 하며, 제거효율이 98%이상으로 높고, 장기간 운전시에도 안정적이었다.

악취가스의 유속(체류시간) 변화에 따른 PU biofilter의 성능을 조사하였다(Fig. 6). 악취가스의 유입농도가 $10,000-25,000 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3}$ 의 범위에서 안정화된 PU 바이오필터의 탈취 성능은 악취가스의 체류시간이 4-36초에서 체류시간과 무관하게 약 98-99%로 매우 우수하였다. 한편, PU 바이오필터의 최대 탈취능은 $1.6 \times 10^7 \text{ OU} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 으로 평가되었다. 바이오필터의 유입구로부터 높이 변화에 따른 탈취 효율을 조사한 결과 대부분의 탈취는 유입구로부터 첫 번째 단

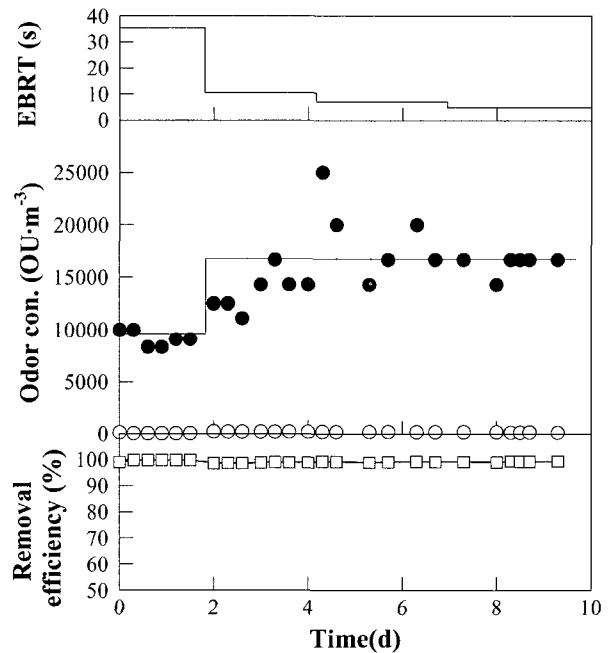


Fig. 6. Deodorization with various retention times of odor gases in a PU biofilter. Symbols: ●: inlet odor concentration, (○): outlet odor concentration, and □: removal efficiency. EBRT: Empty Bed Retention Time.

(25 cm)에서 97-99%가 제거되었으며, 나머지 3단에서는 2% 미만이 추가 탈취 되었다(Fig. 7b). 담체에 고정화된 biomass의 양은 유입구의 첫번째 단과 2번째 단 하부에서 5.5-6.0 g-cells/g-PU으로 탈취 미생물의 증식이 활발하게 진행되었으며, 3단과 4단 하부에서의 고정화된 biomass의 양은 2.4-3.0 g-cells/g-PU으로 입구의 약 1/2 수준이었다(Fig. 7a).

탈취효율과 경제성을 기준으로 한 탈취기술 평가

상기 연구결과들로부터 악취물질과 VOC 물질이 혼합되어 있는 하수 중계펌프장의 복합악취를 효과적으로 제거할 수 기술은 바이오필터법(생물여과법)과 활성탄 흡착법임을 확인할 수 있었다. 두 방법 모두 정화 가스의 악취강도는 1도 이하를 유지할 수 있는 우수한 성능을 제공한다. 탈취기술의 선정에 있어서 경제성과 탈취 효율의 안정성 등을 고려하여야 한다. 일반적으로 활성탄을 이용한 흡착은 수분이 없는 건조가스의 처리에 적합하며, 습도가 높은 악취가

스의 처리시 흡착능이 급격하게 저하되어 탈취율이 급감할 뿐만 아니라 활성탄의 교체 비용이 현저하게 증가되는 문제점이 있다. 이러한 이유 때문에 시공중인 하수 및 폐수 처리장, 기존 활성탄 탈취탑이 설치된 시설들을 설계변경이나 시설 변경을 추진하는 경우가 많다. 활성탄 흡착탑의 선정이 악취가스의 성상, 습도, 교체 비용 등을 고려하여야 한다.

중계펌프장의 악취를 제어할 수 있는 탈취기술을 선정하기 위하여 탈취효율이 우수한 활성탄 흡착법과 바이오필터법에 대한 경제성을 비교분석하였다. 하수 중계펌프장의 크기와 악취 강도 등을 고려한 탈취설비의 설계기준을 Table 1에 정리하였다. Table 1의 설계기준을 바탕으로 악취농도 변화에 따른 활성탄 흡착탑과 바이오필터의 운전비와 설비비를 포함한 총괄 비용을 연도별로 비교 분석하였다. 탈취 시설의 평균 수명은 10년을 기준으로 하였다. 악취강도 변화에 따른 년차별 누적 총 탈취비용(시설비 + 운전비)을 활성탄과 바이오필터법에 대해 비교분석 하였다(Fig. 8). 바이

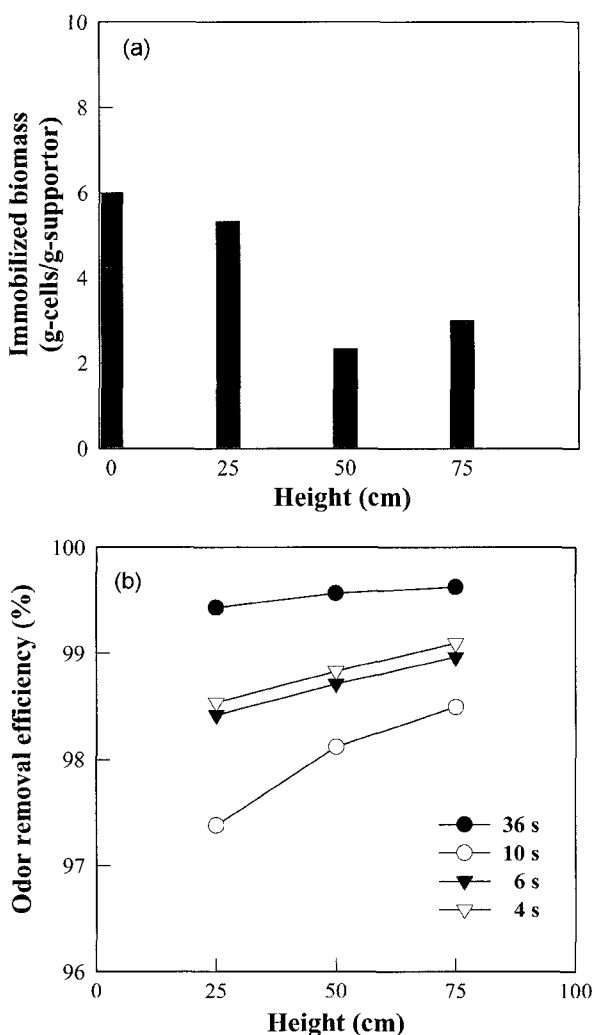


Fig. 7. Immobilized biomass on PU (a) and odor removal efficiency (b).

Table 1. Design criteria for removal of odorous gas emitted from a pumping station.

Design parameters	A/C column	PU Biofilter
Gas flow rate (m ³ ·min ⁻¹)	1,000	1,000
Odor intensity (OU·m ⁻³)	200~2,000	200~2,000
EBRT (s)	2.5	8
Removal efficiency (%)	95 >	95 >
Packing volume (m ³)	42	133
Maximum elimination capacity at breakthrough point	3.2×10 ⁹	-
Maximum odor removal rate (OU·m ⁻³ ·h ⁻¹)	-	~3.2×10 ⁹

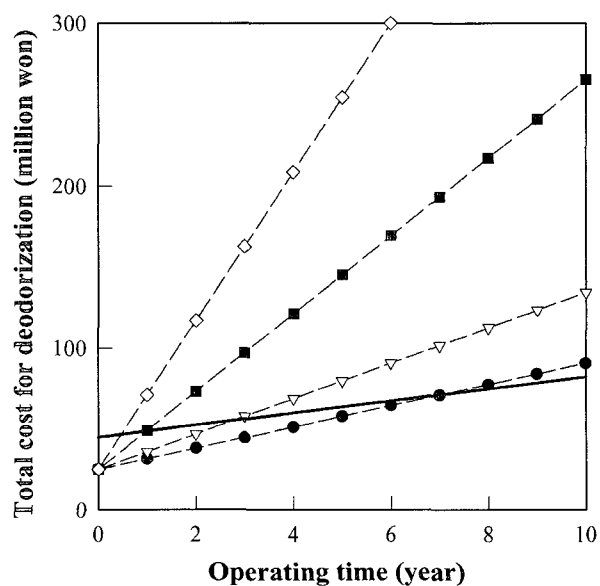


Fig. 8. Comparison of total cost for deodorization between A/C column and a biofilter. Odor unit (OU/m³): ●: 200, ▽: 400, ■: 1,000, ◇: 2,000 for A/C column; solid line: 1,000 for Biofilter.

오피터법의 경우 초기 시설비가 활성탄의 약 2배가량 소요되었으나, 악취강도에 관계없이 운전비가 매우 저렴한 것으로 평가되었다. 반면에 활성탄 흡착법의 초기 시설비는 저렴하였지만, 운전비(활성탄 교체비용)가 매우 많이 소요되었다. 특히, 악취 강도가 증가할수록 운전비가 급격하게 증가하였다. 활성탄 흡착법은 악취 강도가 증가할수록 운전비가 선형적으로 증가하는 것으로 평가되었다.

바이오오피터법이 활성탄 흡착법 보다 처리비용이 저감되는 시점은 악취 강도가 각각 200, 400, 600, 800, 1000, 2000 OU/m³일 때 7, 3.5, 2.2, 1.8, 1.2, 0.6년이 소요되는 것으로 평가되었다. 즉, 악취강도가 강할수록 바이오오피터가 보다 경제적인 탈취방법임을 의미한다. 예를 들어 악취강도 1000 OU·m⁻³인 경우 탈취설비로 바이오오피터를 설치할 경우 초기 시설비가 상대적으로 많이 소요되지만 약 1.2년 경과 후 활성탄 흡착법보다 경제적인 것으로 평가된다. 이상의 연구 결과들을 종합해 볼 때 하수 중계펌프장의 탈취설비는 악취 특성과 경제성 검토 결과 저비용 고효율의 바이오오피터법이 가장 효과적인 기술로 사료된다.

요 약

하수 중계펌프장에서 발생하는 악취를 효율적으로 저감할 수 있는 기술로 4가지 기술(활성탄 흡착법, 약액세정법, 지렁이 분변토를 이용한 탈취법, 바이오오피터법)의 탈취 효율과 경제성을 조사하였다. PU 바이오오피터와 활성탄 흡착법의 평균탈취 효율은 98% 이상이었으나, 지렁이 분변토 바이오오피터와 약액세정법은 60-80%의 탈취율을 보였다. PU 바이오오피터 탈취 성능은 악취가스의 체류시간이 4-36초에서 체류 시간과 무관하게 약 98-99%로 매우 안정적이었고, 최대 탈취능은 1.6×10^7 OU·m⁻³·h⁻¹으로 평가되었다. PU 바이오오피터와 활성탄 흡착법의 탈취비용을 조사하였다. 악취 강도가 증가함에 따라 활성탄 흡착법의 운전비는 선형적으로 증가하였지만 바이오오피터법은 약간 증가하였다. 바이오오피터의 초기 시설비의 비용이 활성탄 흡착법의 2배 이상이었지만 운전비가 활성탄 보다 아주 저렴한 것으로 평가되었다. 결론적으로 탈취효율과 경제성이 우수한 생물여과법이 가장 유망한 기술로 평가되었다.

감사의 글

이 연구는 2004년도 숭실대학교 교내연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 실험에 도움을 주신 김소정님께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Barth, C. L., F. L. Elliott, and S. W. Melvin. 1984. Using odor control technology to support animal agriculture, *Trans. ASAE* **27**: 859-864.
2. Cho, K. S. 2002. Effect of temperature on ammonia removal in a ceramic biofilter inoculated with a earthworm cast. *Kor. J. Environ. Imp. Asses.* **9**: 39-46.
3. Cho, K. S., M. Hirai, and M. Shoda. 1992. Enhanced removal efficiency of malodorous gases in a pilot-scale peat biofilter inoculated with *Thiobacillus thioparus* DW44. *J. Ferment. Bioeng.* **73**: 46-50.
4. Deviny, J. S., M. A. Deshusses, and T. S. Webster. 1999. Biofiltration for air pollution control, Lewis Publishers, New York.
5. Durme, G. P. V., B. F. McNamara, and C. M. McGinley. 1992. Bench-scale removal of odor and volatile organic compounds at a composting facility. *Water Environ. Res.* **64**: 19-27.
6. Kwon, H. H., E. Y. Lee, K. S. Cho, and H. W. Ryu. 2003. Benzene biodegradation using the polyurethane biofilter immobilized with *Stenotrophomonas maltophilia* T3-c. *J. Microbiol. Biotechnol.* **13**: 70-76.
7. Lee, E. Y., K. S. Cho, H. D. Han, and H. W. Ryu. 2002. Hydrogen sulfide effects on ammonia removal by a biofilter seeded with earthworm casts. *J. Environ. Qual.* **31**: 1782-1788.
8. Lee, Y. O., C. K. Cho, H. W. Ryu, and K. S. Cho. 2002. Removal of malodorous gases from swine manure by a polyurethane biofilter inoculated with heterotrophic and autotrophic bacteria. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **30**: 91-97.
9. Mannebeck, H. 1986. Covering Manure Storing Tanks to Control Odor. In *Odor Prevention and Control of Organic Sludge and Livestock Farming*; Neilsen, V.C., Voorburg, J. H., and Hermite, P. L., Eds., Elsevier Applied Science Publishers, London, pp. 188-192.
10. Park S.J., H.J. Oh, and O. Seishi 1992. The characteristic of odor emitted from sewage and nightsoil treatment plants in Korea. *J. Odor Res. Eng.* **24**: 52-55.
11. Park, S. J. 2003. A study on odor concentration of malodorous gases emitted from sewage treatment plants using air dilution sensory test. *Kor. J. Odor Res. Eng.* **2**: 32-37.
12. Park, S. J., K. S. Cho, M. Hirai, and M. Shoda. 1993. Removability of malodorous gases from a night soil treatment plant by a pilot-scale peat biofilter inoculated with *Thiobacillus thioparus* DW44. *J. Ferment. Bioeng.* **76**: 55-59.
13. Ryu, H. W., H. D. Han, and K. S. Cho. 2002. Characteristics of ammonia removal in biofilters inoculated with earthworm cast. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* **30**: 73-78.

(Received May 30, 2004/Accepted Sep. 6, 2004)