

부숙수피-펄라이트 혼합충전재의 돈사악취 제거 효과

이승주 · 장동일* · 장흥희¹⁾*

충남대학교 농업생명과학대학, ¹⁾경상대학교 농업생명과학연구원
(2006년 3월 23일 접수, 2006년 6월 20일 수리)

Effect of Biofilter Made of Composted Pine Tree Bark and Perite on Reducing Odor from Pig House

Seung-Joo Lee, Dong-Il Chang*, and Hong-Hee Chang¹⁾* (College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea, ¹⁾Institute of Agriculture and Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

ABSTRACT: To remove effectively order components (NH₃ and H₂S) from pig house, biofilter was made of composted pine tree bark and perite and odor removal efficiency was evaluated in the lab and pilot scales. The columns were designed with Ø120 mm x 450 mm (H) and Ø850 mm x 900 mm (H) in the size in the lab and pilot scale testes, respectively. Single material of composted pine tree bark and perite and the mixture of two materials with 7:3 ratios (vol/vol) were packed in the column, and, herein, air flow was controlled upward direction from column bottom. To enhance the efficiency of biofilter, ammonia (*Rhodococcus equi* A3) and hydrogen sulfide oxidizing bacteria (*Alcaligenes* sp. S5-5.2) were inoculated in packing materials before the test. Removal effects of ammonia and hydrogen sulfide gases were higher in the mixture[88.7~98.2%, 89.5~97.9%] than that in single packing material (composted pine tree bark[89.4~98.7%, 78.7~85.6%] and perite[65.3~73.2%, 88.7~98.2%]) by the lab scale biofilter. In the modeled pig house, about 96 and 91% of ammonia and hydrogen sulfide gases were removed by the pilot scale of biofilter, respectively. Conclusively, composted pine tree bark and perite could be a good candidate of biofilter packing materials to remove the odor components.

Key Words: biofilter, deodorization, bed material, microorganism, livestock house

서론

현재 우리나라의 양돈업은 돼지고기의 소비증가에 따라 기업화, 대형화 및 지역집중현상¹⁾이 발생되고 있다. 이로 인해 축사로부터 대량으로 배출되는 고농도 악취가 인근 지역 주민의 생활에 피해를 야기하여 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 또한 축산시설은 “대기환경보전법 제66조 제1항 별표 19”²⁾와 “악취방지법 제2조 제3항 별표 2”³⁾에서 악취배출시설로 분류되어 악취처리를 위한 환경기반시설의 설치가 필수 불가결하게 되었다. 따라서 농가에서 용이하게 사용할 수 있고 경제성이 우수한 악취제거시설이 필요한 실정이지만 적합

한 기술적·경제적 여건이 아직 마련되지 못한 실정이다.

악취처리기술 중의 하나인 바이오필터(biofilter)^{4,6)}는 여러 가지 악취를 동시에 제거할 수 있을 뿐 아니라, 운전 비용이 적게 소요되고, 유지 관리가 유리한 장점들을 가지고 있다. 또한 생물탈취법의 일종인 토양탈취법과는 달리 충전재만을 교체해 주기 때문에 폐기물 발생량이 상대적으로 적은 장점들을 가지고 있다. 그러나 현재 바이오필터 충전재(充填材)는 다공성 세라믹, Glass 및 알루미나 같은 여러 종류가 개발되었지만 충전재 제작단가가 고가이어서 충전재를 대량으로 사용시에는 경제성이 현저히 떨어지게 되어 실질적인 현장적용이 어렵다고 판단된다^{4,7,8)}. 반면에 일반적인 천연재료는 제작단가가 저가이기 때문에 대량 사용시에도 경제성이 높고, 천연재료 자체의 제거율과 보습성이 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나 운영기간 중 미생물 작용에 의해 자체분해와 무기화로 인하여 압밀이 진행되면 유속이 저하되는 단점이 있다⁷⁾. 제거율이 우수하고, 압밀을 방지해 줄 수 있는 천연충전재를 선별, 악취제거

*연락처:

Tel: +82-42-821-6718 Fax: +82-42-823-6246
E-mail: dichang@cnu.ac.kr
Tel: +82-55-751-5510 Fax: +82-55-751-6113
E-mail: hhchang@gnu.ac.kr

효율의 극대화를 위한 혼합충전재를 개발한다면, 바이오필터의 고정비와 변동비가 낮아져 경제성이 높아지게 될 것이다.

따라서 본 연구는 천연충전재를 혼합하여 만든 혼합충전재의 악취제거 성능이 천연충전재인 부속수피와 펄라이트의 악취제거 성능보다 우수함을 lab-scale의 바이오필터를 이용하여 구명한 후 혼합충전재의 현실적 이용 가능성을 pilot-scale의 바이오필터를 이용하여 평가하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험 1 : 충전재별 악취제거 성능 평가

Lab-scale 바이오필터

부속수피, 펄라이트 및 혼합충전재의 악취가스 제거 성능을 평가하기 위하여 이용한 lab-scale 바이오필터는 Fig. 1과 같이 제조되었다¹⁰⁾. 본 lab-scale 바이오필터의 공기유동방식은 바이오필터 운용에 유리한 양압식·상향류식^{4,7,11,12)}으로 설계하였다. 계측장치로는 풍속센서, 압력계 및 공기유량계를 사

용하였으며, 이들은 바이오필터 본체에 설치하여 충전부의 풍속, 압력강하 및 풍량을 측정하였다. 또한 공기공급 및 혼합을 위해 송풍용 공기압축기, 유수분리기 및 혼합 튜브 등을 사용하였다. 악취는 암모니아(Deokyang, 9.99%, N₂ balance)와 황화수소(Deokyang, 1.00%, N₂ balance)를 사용하였다. 악취가스탱크로부터 공급되는 고농도의 악취와 공기압축기로부터 공급되는 공기를 1차 혼합한 후에 유수분리기에서 물과 기름이 분리되고, 혼합튜브에서 2차 혼합된 후 plenum chamber와 다공관을 통해 충전부에 공급되도록 하였다. 공기압축기와 공기유량계를 이용하여 입기량을 제어함으로써 악취가스의 충전부 통과시간을 10초 이상⁹⁾으로 유지하도록 하였다. 바이오필터로 입기되는 공기의 온도는 실내에서 실험한 관계로 18~25℃ 범위에서 유지되었기 때문에 자동 제어하지 않았다.

충전재

바이오필터 충전재는 자체 흡착능력이 우수해야 하며, 미생물 생육이 원활하도록 다공성을 가져야 한다⁹⁾. 또한 국내에서 구입이 용이해야 하며, 가격이 저렴해야 한다. 따라서 실험용 충전재로는 악취가스 제거율이 높은 부속수피, 비교적 높은 황화수소 제거 성능을 가지고 있을 뿐만 아니라 자체분해로 인한 압밀을 방지할 수 있는 펄라이트, 그리고 이들 부속수피와 펄라이트를 일정비율(부피비 7:3)로 혼합한 혼합충전재를 사용하였다⁹⁾. 부속수피는 10.3 mm 내외의 기성제품을 구입하여 표준망체 7/16" MESH(체눈의 크기: 11.2 mm)~3/8" MESH(체눈의 크기: 9.5 mm)를 이용하여 선별한 후 60일간 상온의 대기 중에 노출시켜 산물상태로 자연건조를 실시하였다⁹⁾. 또한 펄라이트의 경우 크기 5.0 mm 이하의 기성제품을 구입 후 표준망체 3.75 MESH(체눈의 크기: 5.00 mm)~8 MESH(체눈의 크기: 2.36 mm)를 이용하여 선별한 후 부속수피와 같은 조건으로 자연건조를 실시하

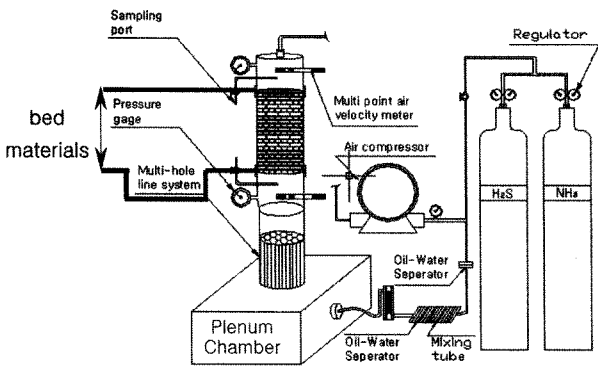


Fig. 1. Overall appearance of biofilter system used in the lab test.

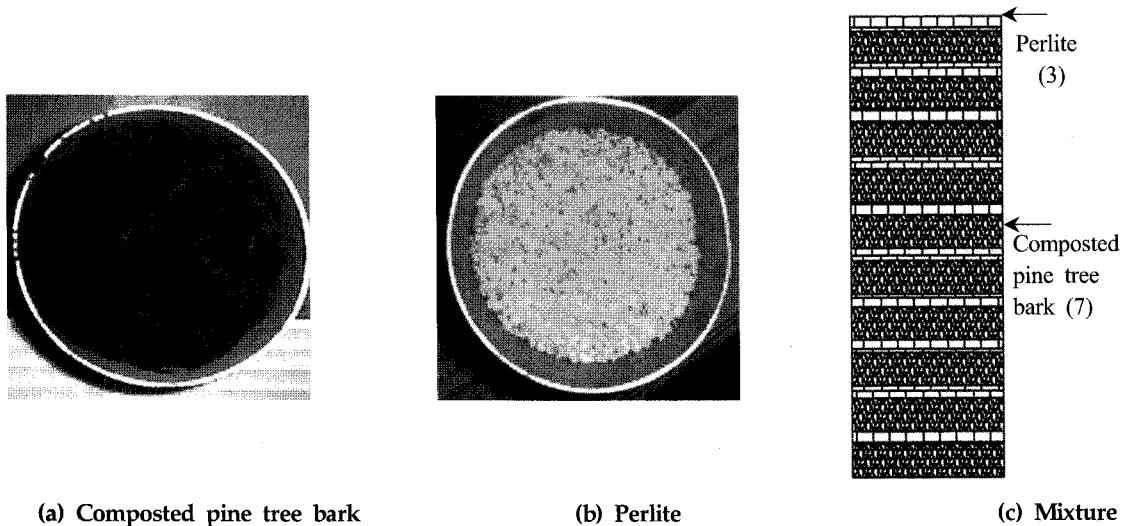


Fig. 2. Packing materials used for making biofilter. (Mixture was made of mixing perlite and composted pine tree bark with the ratio of 7:3(vol/ vol)

Table 1. Physical properties of the composted pine tree bark, perlite, and mixture selected as a packing material

Item	Composted pine tree bark	Perlite	Mixture*
Moisture contents (% wet weight base)	61.6	16.3	57.2
Bulk density (g cm ⁻³)	0.36	0.25	0.32
Porosity (%)	57.3	66.5	63.5
Water absorption capacity (vol %)	13.8	11.2	28.6
Pore size (mm)	9.5~11.3	2.4~5.0	-

* Mixture was made of mixing composted pine tree bark and perlite with the ratio of 7:3 on weight basis.

였다⁹⁾. 충전재의 충전은 충전작업 시 발생할 수 있는 충전재의 압밀로 다공이 감소하는 현상을 최소화하기 위하여 자유낙하시켜 충전하는 무진동충전법으로 하였다. Fig. 2는 부숙수피, 펄라이트 및 혼합충전재에 대한 사진이며, 각 충전재의 물성은 Table 1과 같았다. 혼합충전재는 Han(2003)¹⁰⁾의 연구결과에 근거하여 부숙수피와 펄라이트의 부피비 7:3으로 10개 층으로 나누어 충전하였으며, 한 층의 부숙수피는 약 32 mm로, 펄라이트는 약 13 mm로 조절하였다. 단일충전재 및 혼합충전재의 전체 충전 크기는 직경 120 mm와 높이 450 mm이었다.

Table 1에 나타난 충전재의 물성은 다음과 같이 측정하였다¹⁰⁾. ①용적밀도(pb)는 건조질량을 부피로 나누어 계산하였고, ②함수율(%)은 건조오븐(dry oven)법을 이용, 습량기준으로 계산하여 구하였다. ③공극률은 같은 부피의 물과 시료를 혼합하여 총부피에서 혼합시료의 부피를 뺀 값을 총부피로 나누어 계산하였고, ④흡수능은 담체의 기공에 완전히 물이 흡수되었을 때 시료의 무게에 대한 물 흡수량의 비율로 측정하였다. ⑤입자의 크기는 전체입자의 범위로 표시하였다.

미생물균주

Choi(2004)에 의해 분리, 정제, 배양 및 선발된 암모니아 산화균 *Rhodococcus equi* A3와 황 산화균 *Alcaligenes* sp. S5-5.2이 악취가스 제거용 미생물균주로 선발되어 액체배양법으로 배양되었다⁹⁾. 이와 같이 배양된 미생물균주를 각 충전재에 접종한 후 72시간동안 순치하여 바이오필터시스템을 운용하였다. 본 실험에 이용된 미생물균주의 최적 악취제거 조건은 악취가스 제거 소요시간 10초 이상, 충전재의 함수율 60~80%(wt·wt⁻¹) 및 공급되는 악취가스의 풍온 10~34°C^{9,11)}인데, 이들 최적 악취제거 조건⁹⁾ 중 악취제거 소요 시간만이 바이오필터에 의해 자동으로 조절되었고, 풍온의 경우 실험실의 온도가 18~25°C로 유지되었기 때문에 자동으로 조절하지 않았다.

조사항목 및 조사방법

Lab-scale 바이오필터를 이용한 각 충전재의 악취제거 성능 평가는 각 충전재에 미생물균주를 접종한 후에 36시간동안 4시간 간격으로 계측하며 성능평가를 3회 반복하였다.

충전층의 풍속은 다점풍속계(Model S6242, KANOMAX,

Japan)의 probe를 충전층의 상·하층부에 설치하여 측정하였다. 충전층의 음압차는 충전층 상·하부에 압력계를 설치하여 측정 후 계산(하부압력-상부압력)하여 산출하였다. 악취가스를 유입·배출관에서 500 mL씩 포집백을 이용하여 4시간마다 포집하였다. 암모니아 가스와 황화수소의 농도는 포집백의 가스를 gas tight 주입기로 시료를 채취하여 GC에 주입하여 측정하였다⁹⁾. 또한 충전층의 상·하층부에서 4시간마다 일정량의 시료를 채취하여 건조오븐법으로 함수율을 측정하였다.

시험 2 : Pilot-scale 바이오필터를 이용한 혼합충전재의 악취제거 성능 평가

Pilot-scale 바이오필터

혼합충전재의 악취가스 제거 성능 평가에 이용된 바이오필터는 Fig. 3과 같다. Pilot-scale 바이오필터의 공기유동방식은 바이오필터 운용에 유리한 양압식상향류식으로 설계하였다^{4,7,11,12)}. 계측장치로는 풍온 풍속센서, 차압계(manometer), 공기유량계를 바이오필터 본체에 설치하였다. 또한 부수장비로는 송풍용 ID fan, 급수설비, 급수탱크, 살수설비, 배수설비 및 컨트롤박스 등이 사용되었다. 충전층의 악취가스 통과 시간은 컨트롤박스에서 송풍장치에 공급되는 전원의 주파수를 40 Hz로 조절하여 입기량을 제어함으로써 악취가스의 충전층 통과시간을 10초 이상으로 유지하도록 하였다. 충전재

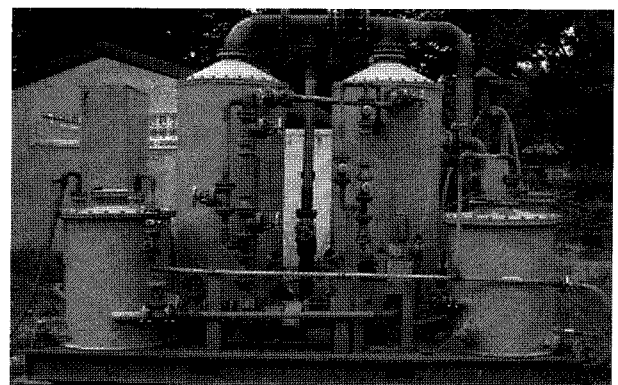


Fig. 3. Appearance of pilot-scale biofilter used in the pilot test.

의 함수율은 물 공급량을 6시간 당 7.5 L로 산출하여 급수탱크의 물을 급수설비에 의해 물을 일정시간마다 자동으로 급수함으로써 함수율을 60~80%로 유지하도록 하였다. 바이오필터로 입기되는 공기의 온도는 여름에 실험한 관계로 실험돈사의 온도가 20~30°C 범위에서 유지되었기 때문에 자동 제어하지 않았다.

조사항목 및 조사방법

Pilot-scale 바이오필터를 이용한 혼합충전재의 악취제거 성능 평가는 혼합충전재에 미생물균주를 접종하여 72시간 동안 상온에서 순치한 후 60시간 동안 12시간 간격으로 계측하며 실시하였고, 이러한 평가는 각각 3회 반복하였다. 혼합충전재는 부속수피와 펄라이트의 부피비 7:3으로 충전하였다. 즉 부속수피는 약 6.3 cm 정도 두께로 그리고 펄라이트는 약 2.7 cm 두께 정도로 충전하였다. 혼합충전재의 직경과 높이는 각각 85 cm와 90 cm이었다. 바이오필터에 공급되는 악취는 모형돈사에 있는 돈분뇨에 lab-scale 바이오필터 성능실험시에 사용한 고농도 악취를 배출시켜 공기와 희석하여 사용하였다. 충전층의 풍운, 음압차, 악취 농도 측정은 lab-scale 바이오필터에서와 같은 방법으로 12시간 간격으로 조사하였다. 미생물 생균수 측정은 12시간 간격으로 60시간 동안 충전층의 상·중·하부에서 일정량의 시료를 채취하여 혼합충전재에 정착된 미생물균주를 희석평판의 방법으로 c.f.u.·g⁻¹(생균수)를 측정하였다⁹⁾.

결과 및 고찰

시험 1 : 충전재별 악취제거 성능

Lab-scale 바이오필터에 공급된 암모니아의 농도는 180~200 mg L⁻¹이었고, 황화수소 농도는 16~20 mg L⁻¹이었다. 부속수피, 펄라이트 및 혼합충전재의 암모니아와 황화수소 제거율은 Fig. 4와 같았다. 부속수피의 암모니아 제거율은

0~20시간에서 89.4~98.7%이었고, 황화수소 제거율은 0~20시간에서 78.7~85.6%이었다. 펄라이트의 암모니아 제거율은 0~16시간에서는 65.3~73.2%, 황화수소 제거율은 0~16시간에서는 81.1~93.4%이었다. 혼합충전재의 악취 제거율은 암모니아의 경우 0~28시간에서 88.7~98.2%이었고, 황화수소의 경우 0~20시간에서 89.5~97.9%이었다. 단일충전재 및 혼합충전재는 일정시간 이후(부속수피: 20시간 이후, 펄라이트: 16시간 이후, 혼합충전재: 28시간 이후)에 급격히 악취 제거 성능이 저하되는 특성을 보였는데, 이는 악취제거 미생물균주의 생육조건 중의 하나인 함수율이 60% 이하로 저하된 시간 이후에 나타났다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 혼합충전재가 단일충전재에 비해 암모니아와 황화수소에 대한 악취제거 성능이 높은 것으로 판단된다.

시험 2 : Pilot-scale 바이오필터에서 혼합충전재의 악취 제거 성능

충전층 내에서의 입공기 체류시간은 충전층 상·하부의 풍압차를 200 mmAq 이하로 유지시키고 또한 충전층 내에서 풍속을 0.85±0.10 m·sec⁻¹로 유지시킴으로써 충전층에 악취 가스 통과시간을 10.0±0.8초로 유지되었다. 충전재의 함수율은 바이오필터의 중량 변화를 이용하여 측정된 결과 Fig. 5와 같이 65.0±3.3% (wt·wt⁻¹)로 유지되었다. 충전재의 온도는 20~30°C의 공기가 입기되었으나 송풍장치의 영향으로 인하여 26.1±3.8°C로 유지되었다. 또한 충전재의 높이를 측정된 결과, 실험기간 동안 충전재의 부속으로 인한 충전재의 압밀은 거의 발생되지 않았다. 이는 펄라이트가 천연재료의 부속으로 인한 압밀을 방지해 준 결과로 볼 수 있다. 따라서 미생물균주의 최적 악취제거 조건이 실험기간동안 조성되어 있던 것으로 판단된다.

미생물 생균수의 변화는 Fig. 6과 같았다. 혼합충전재에 미생물을 접종한 후 72시간 동안 순치하였을 때의 미생물 생균수와 12시간 간격으로 측정하였을 때의 미생물 생균수가 평균

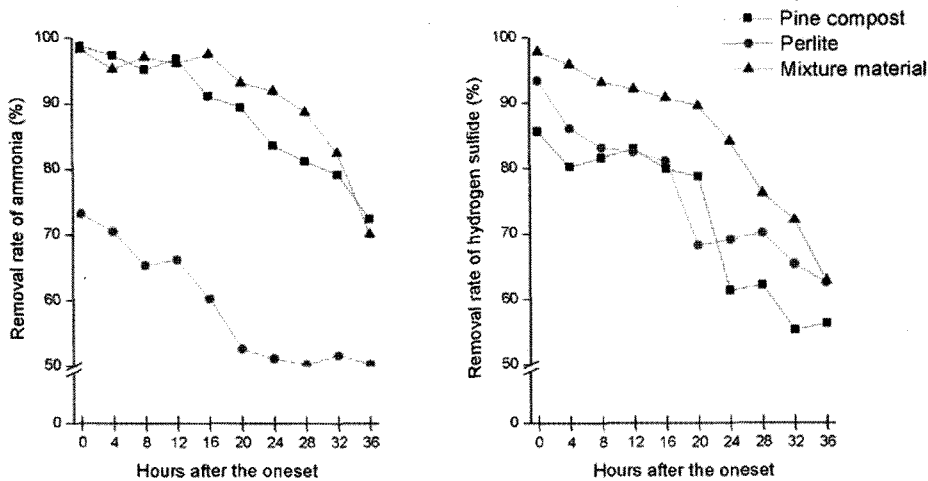


Fig. 4. Changes of odor components of bed materials in lab test.

9.67±0.41×10⁹ c.f.u.·g⁻¹으로 거의 같게 유지되었다. 그 이유는 충전층 내의 풍속 0.85±0.10 m·sec⁻¹, 함수율 65.0±3.3%, 풍온 26.1±3.8℃이었으므로 실험기간동안에 바이오필터가 미생물의 생육조건을 유지해 주었기 때문인 것으로 판단된다.

바이오필터의 입기구와 배기구에서의 암모니아와 황화수소의 농도와 제거율은 Table 2와 같았다. 암모니아의 유입농도

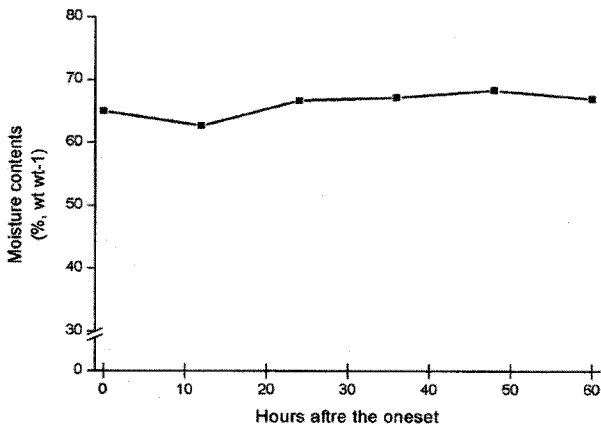


Fig. 5. Changes of moisture contents of column packing materials in the pilot-scale biofilter installed in the modeled pig house. (Note: The column packing material was the mixture of composted pine tree bark and perlite which inoculated by the selected bacterial strains.)

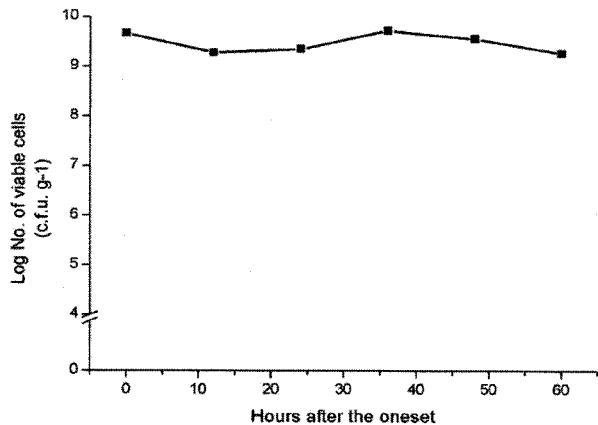


Fig. 6. Changes of bacterial population in column packing materials during biofilter operation.

는 평균 180.0±20.0 mg L⁻¹이었고, 배출농도는 평균 7.0±0.8 mg L⁻¹이었다. 그리고 황화수소의 유입농도는 평균 11.0±5.0 mg L⁻¹이었고, 배출농도는 평균 1.0±0.4 mg L⁻¹이었다. 약취방지법에서 단일가스의 허용기준은 암모니아의 경우 2.0 mg L⁻¹, 황화수소의 경우 0.06 mg L⁻¹이다³⁾. 그러나 실제로는 바이오필터에서 배출된 암모니아와 황화수소가 주변 공기에 의해 급격히 희석되기 때문에 약취방지법 축산시설 부지경계선 약취허용농도³⁾와 비교해 볼 때 약취방지법에 저촉되지 않을 것으로 판단된다.

본 연구에서 부숙수피와 펄라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재에 암모니아 산화균 *Rhodococcus equi* A3와 황 산화균 *Alcaligenes* sp. S5-5.2를 접종한 바이오필터의 암모니아와 황화수소의 제거율은 Table 2와 같이 각각 96.1%와 91.1%로 나타났다. 암모니아 제거율이 세라믹 미생물 담체에 미생물 균주를 접종하여 충전한 바이오필터의 경우 95%¹³⁾, 폴리우레탄에 황산화세균(*Thiobacillus thiooxidans* AZ11 KCTC 8929P)를 접종하여 충전한 폴리우레탄 바이오필터의 경우 88~90%¹⁴⁾, 목탄으로 된 충전재에 MLVSS/kg wood-charcoal을 접종한 바이오필터의 경우 87%⁸⁾로 보고되었으며, 황화수소 제거율이 목탄으로 된 충전재에 MLVSS/kg wood-charcoal을 접종한 바이오필터의 경우 95%⁸⁾, 폴리우레탄에 황산화세균(*Thiobacillus thiooxidans* AZ11 KCTC 8929P)를 접종하여 충전한 폴리우레탄 바이오필터의 경우 83%¹⁴⁾, 활성탄을 충전담체로 하고 *Bacillus* sp.를 탈취균주로 한 바이오필터의 경우 40~90%¹⁵⁾로 보고되었다. 이상과 같이 암모니아·황화수소 제거율은 다른 충전재에 비해 높았다. 또한 부숙수피와 펄라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재의 가격이 목탄 충전재의 70% 정도, 다공성세라믹 충전재의 10% 정도인 수준으로 낮아 축산농가에서 현실적으로 이용할 수 있는 충전재인 것으로 사료된다.

요 약

국내에서 구입이 용이한 단일충전재(부숙수피, 펄라이트)와 혼합충전재(부숙수피와 펄라이트의 부피비 7:3)에 암모니아 산화균 *Rhodococcus equi* A3와 황 산화균 *Alcaligenes* sp. S5-5.2를 접종한 후, 양압식상향류식의 lab-scale 바이오필터에 각각의 충전재를 충전하여 암모니아 및 황화수소에

Table 2. Comparison of concentrations and removal rates of NH₃ and H₂S gases in the inlet and outlet of the pilot-scale biofilter operated in the modeled pig house

Item		NH ₃	H ₂ S
Concentration (mgL ⁻¹)	Inlet	180.0 ± 20.0 ^{b)}	11.0 ± 5.0
	Outlet	2.1 ± 0.3	1.0 ± 0.4
Removal rate (%)		96.1	91.1

Note: a) The column material was the mixture of composted pine tree bark and perlite which inoculated by the selected bacterial strains.

b) Mean ± SD

대한 악취가스 제거 성능을 평가 한 결과, 혼합충전재가 단일 충전재에 비하여 악취제거 성능이 우수한 것으로 분석되었다. 또한 암모니아의 경우 $180.0 \pm 20.0 \text{ mg L}^{-1}$ 농도로 유입되는 상황에서 $7.0 \pm 0.8 \text{ mg L}^{-1}$ 로 배출되어 제거율이 96.1%이었으며, 그리고 황화수소의 경우 $11.0 \pm 5.0 \text{ mg L}^{-1}$ 농도로 유입되는 상황에서 $1.0 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ 로 배출되어 제거율이 91.1%이었다. 또한 이때의 미생물 생균수는 실험기간 동안 집중 초기 미생물 생균수와 거의 같게 유지되었다. 따라서 부속수피와 펠라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재의 악취제거 성능이 우수하고 가격이 저렴한 것을 고려해 볼 때, 혼합충전재가 기존의 다른 충전재보다 대규모 축산농가에서 현실적으로 이용하는데 유리할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Animal biotechnology division (2002) Statistics Data Base for Livestock Research. National Livestock Research Institute.
2. Clean Air Conservation Act. Ministry of Environment Republic of Korea.
3. Foul Odor Prevention Act. Ministry of Environment Republic of Korea.
4. Classen, J. J., Young, J. S., Bottcher, R. W. and Westerman, P. W. (2001) Design and analysis of a pilot scale biofiltration system for odorous air. *Transactions of the ASAE* vol 43(1), 111-118.
5. Miao, J. Y., Zheng, L. Y., and Guo, X. F. (2005) Restaurant emissions removal by a biofilter with immobilized bacteria. *Journal of Zhejiang University Science* 2005 6B(5), 433-437.
6. Garlinski, E. M., and Mann, D. D. (2002) Design and evaluation of a horizontal airflow biofilter on a swine facility. *The ASAE Paper* No. 034051.
7. Koong, N. W., Park, J. S., and Lee, N. S. (2000) Principle and application of biofiltration. *J. of Organic Resource Recycling Association* 8(1), 60-67.
8. Park, S. J., and Seo, J. S. (2000) A Study on H_2S / NH_3 odor removal using wood - charcoal. *J. of Waste Recycling and Management Research* 17(3), 243-251.
9. Choi, W. Y. (2004) Biofiltration system for control of livestock odor. Ministry of Agriculture and Forestry.
10. Han, W. S. (2002) The odor reducing characteristics of biofilter bed material used for reducing odor from livestock facilities. Chungnam National University Graduate School.
11. Jeong, G. T., Lee, G. W., Byun, K. Y., Lee, K. M., Sunwoo, C. H., Lee, W. T., Park, C. Y., Lim, D. H., Cha, J. M., Jang, Y. S., and Park, D. H. (2005) Study of Operation Condition of Biofilter using Fibril-form Matrix for Odor Gas Removal. *Korean Journal of Biotechnology and Bioengineering* 20(5), 341-344.
12. Son, H. K. (2004) The Treatment of Volatile Organic Compounds Using a Pilot-Scale Biofilter. *Korean Journal of Environmental Health* 30(2), 245-252.
13. Choi, S. S., and Choi, C. S. (2000) Biofiltration of ammonia in food waste composting. *J. Korea Society of Environmental Administration* 6(1), 77-83.
14. Lee, Y. O., Cho, C. K., Ryu, H. W., and Cho, K. S. (2002) Removal of Malodorous Gases from Swine Manure by a Polyurethane Biofilter Inoculated with Heterotrophic and Autotrophic Bacteria. *J. of Korea Society for Microbiology and Biotechnology* Vol. 30(1), 91-97.
15. Bin, J. I., Lee, B. Y., Kim, J. K., and Lee, M. G. (2003) Effects of Adsorption, Wet Scrubbing, and Flow Pattern on Activated Carbon-Packed Biofilter for H_2S Removal. *Korean Journal of Chemical Engineering* 41(2), 271-276.