

돈사 악취 저감을 위한 바이오필터 개발

이승주 · 장동일* · 임승수 · 장흥희^{1)*}

충남대학교 농업생명과학대학, ¹⁾경상대학교 농업생명과학연구원
(2005년 11월 28일 접수, 2005년 12월 21일 수리)

Development of Biofilter for Reducing Offensive Odor from Pig House

Seung-Joo Lee, Dong-Il Chang*, Song-Soo Lim, and Hong-Hee Chang^{1)*} (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: This study was conducted to develop the biofilter for reducing ammonia (NH₃) and hydrogen sulfide (H₂S) gas emission from a pig house. A biofilter was designed and constructed by a type of squeeze air into the column type of air flow upward. Its column size was $\Phi 260 \times 360$ mm. It was used pressure drop gauge, turbo blower, air temperature, velocity sensor and control program that was programed by LabWindows CVI 5.5. Mixing materials were consisted with composted pine tree bark and perlite with 7:3 ratio (volume). The biofilter media inoculated with ammonia (*Rhodococcus equi* A3) and hydrogen sulfide (*Alcaligenes* sp. S5-5.2) oxidizing microorganisms was installed in a commercial pig house to analyzed the effectiveness of biogas removal for 10 days. Removal rates of ammonia and hydrogen sulfide gases were 90.8% and 81.5%, respectively. This result suggests that the pine compost-perlite mixture biofilter is effective and economic for reducing ammonia and hydrogen sulfide gases.

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

서 론

현재 우리나라는 축산물 소비증가에 따른 가축사육 두수 증가¹⁾로 인하여 축산분뇨 및 악취 처리 문제가 심각하게 대두되고 있으며, 특히 악취발생 문제는 환경적 측면에서 최근 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 악취방지법²⁾과 대기환경법령집³⁾에서 축산시설도 악취배출시설로 분류되어 악취처리를 위한 환경기반 시설의 설치가 필수불가결하게 되었으며, 이에 따라 정책적 뒷받침과 농가현실에 맞는 악취제거시설의 기술개발을 위한 노력이 필요한 실정이다. 그러나 국내에서는 이에 적절히 대처할 수 있는 기술적·경제적 여건이 아직 마련되지 못한 실정이다.

악취처리기술 중의 하나인 바이오필터(biofilter)는 운영비가 적게 소요되고, 폐수가 발생되지 않으며, 처리효율이 높고, 기존의 악취처리방법과 달리 담체만을 교체해주기 때문에 폐기

물 발생량이 상대적으로 적은 장점들을 가지고 있다. 그러나 현재 바이오필터 충전재(充填材)는 다공성 세라믹과 같은 여러 종류가 개발되었지만 제작단가가 고가이며, 담체를 대량으로 사용할 경우에는 경제성이 매우 떨어지게 된다⁶⁾. 이로 인해 축산 시설에서는 처리장비의 고정비와 변동비가 경제적으로 많은 부담이 되어 실질적인 현장 적용이 어렵다고 판단되어진다. 반면에 일반적인 천연재료는 흡착성과 보습성이 좋아서 효율적이고, 제작단가가 저가이기 때문에 대량 사용 시에도 경제성이 높지만 점종미생물에 의한 자체분해와 무기화로 인하여 압밀이 진행되고 유속이 저하되는 단점이 있다^{6,7)}. 이러한 천연 충전재의 단점을 보완할 수 있는 혼합충전재를 선발하여 바이오필터를 운영한다면, 고정비와 변동비가 낮아져 경제성이 높아지게 된다.

악취집중으로 인한 피해를 최소화하고, 축산업의 국제경쟁력 강화를 위해 경제성이 우수한 담체를 이용한 한국형 바이오필터 시스템의 개발이 요구되는 시점에 이르렀다.

이에 본 연구는 천연재료를 이용한 한국형 바이오필터 시스템을 개발하고, 악취가스 제거 미생물균주를 집중된 혼합충전재를 바이오필터에 충전하여 악취가스 제거성능을 구명하기 위하여 수행하였다.

*연락처:

Tel: +82-42-821-6718 Fax: +82-42-823-6246
+82-55-751-5510 +82-55-751-6113

E-mail: dichang@cnu.ac.kr, hhchang@nongae.gsnu.ac.kr

재료 및 방법

혼합충전재

바이오필터 충전재는 흡착능력이 우수하고, 다공성을 가져야 하며, 미생물의 생육이 가능해야 하며, 산업화를 위하여 구입이 용이해야 하고, 가격이 저렴해야 한다. 따라서 충전재로는 일반수피에 비해 악취가스 제거율이 높을 것으로 판단되는 직경 10 mm 내외의 부숙수피와 비교적 높은 악취가스 제거 성능과 천연재료의 자체분해로 인한 압밀을 방지할 수 있는 펄라이트를 혼합한 혼합충전재를 사용하였다⁸⁾. Choi(2004)는 소나무수피와 펄라이트를 각각 3종류의 크기로 선별 후 혼합 비율 7:3(부피비)로 혼합하여 9개의 혼합충전재를 만들었다. 각각의 혼합충전재를 바이오필터에 충전 후 일정속도의 공기(0.03±0.01 m·sec⁻¹)를 칼럼에 통과시켰을 때 충전층의 압력강하를 측정하여 부숙수피(10.3 mm)와 펄라이트(2.4~5.0 mm)의 크기를 선정⁹⁾하였다. 부숙수피의 전처리 방법은 10.3 mm 내외의 기성제품을 구입하여 약 60일간 산물상태로 상온의 대기 중에 노출시켜 전처리를 하였고, 펄라이트의 경우 크기 5.0 mm이하의 기성제품을 구입 후 표준망체 3.75 MESH(체눈의 크기:5.00 mm)~8 MESH(체눈의 크기:2.36 mm)를 이용하여 선별, 약 60일간 대기 중 상온에 방치하여 전처리를 하였다. 충전재의 충전은 충전작업 시 발생할 수 있는 충

전재의 압밀과 형상변화를 최소화하기 위하여 칼럼을 분해한 후 깔대기를 이용하여 자유낙하시켜 충전하는 무진동 충전법을 이용하였다. Fig. 1은 부숙수피, 펄라이트, 혼합충전재에 대한 사진이며, 충전재들의 물성인 용적밀도(bulk density), 함수율(moisture contents), 공극률(porosity), 흡수능(water absorption capacity), 입자크기(pore size)는 Table 1과 같다. Han(2003)은 천연재료 중에 악취가스 제거성능이 우수한 소나무수피, 펄라이트를 부피비 3:7, 5:5, 7:3으로 혼합하였다. 3개의 혼합충전재를 바이오필터에 충전 후 악취가스를 칼럼에 공급하여 악취가스 제거성능실험을 해 본 결과 소나무수피:펄라이트=7:3(부피비)로 혼합한 충전재에서 악취가스 제거성능이 우수하게 나타났다⁸⁾. 따라서 본 연구에서 사용한 혼합충전재는 Fig. 1의 c에서처럼 부숙수피는 약 25 mm 정도 두께로, 펄라이트는 약 10 mm 정도 두께로 충전하였고, 직경 260 mm와 높이 360 mm로 충전하였다.

Table 1에서 보는 Han(2003)의 방법으로 다음과 같이 충전재의 물성을 측정하였다⁸⁾. 용적밀도의 경우, 비이커와 전자저울(digital scale)을 이용하여 측정하였으며, 함수율은 시료를 부작위로 추출하여 건조오븐(dry oven)법을 이용하여 습량기준(wet weight base)으로 나타내었다. 공극률은 매스실린더를 이용하여 3회 반복 측정하였으며, 흡수능은 담체의 기공에 완전히 물이 흡수되었을 때 시료의 무게에 대한 흡수량의

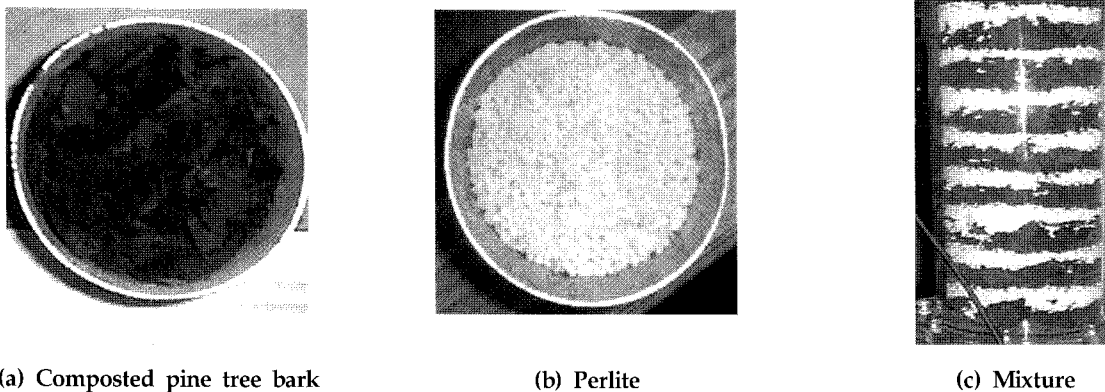


Fig. 1. Pictures of biofilter bed materials.

Table 1. Physical properties of the composted pine tree bark, perlite, and mixture used for preparing biofilter

Item	Composted pine tree bark	Perlite	Mixture*
Bulk density (g/cm ³)	0.36	0.25	0.32
Moisture contents (% , wet weight base)	61.6	16.3	57.2
Porosity (%)	57.3	66.5	63.5
Water absorption capacity (vol %)	13.8	11.2	28.6
Pore size (mm)	10.3	2.4~5.0	-

* Mixture was made with mixing composted pine tree bark(7) and perlite(3).

비율로 측정하였다. 또한 입자의 크기 측정은 표본샘플을 100 개씩 3회 무작위 추출하여 전체입자의 평균값으로 표시하였다.

미생물균주

Choi(2003)가 분리, 정제, 배양 및 선발한 암모니아 산화균 *Rhodococcus equi* A3와 황 산화균 *Alcaligenes* sp. S5-5.2 을 바이오필터 접종용 미생물균주로 선발하였다⁹⁾. 분리·선발한 악취산화균을 바이오필터에 접종하기 위해서 균체의 배양액을 효율적으로 생산해야 하므로, 각 균주의 배지 및 배양적 성질을 조사하여 이를 근거로 발효조에서의 액체배양법을 적용하였다⁹⁾. 이러한 방법으로 배양된 미생물균주를 혼합충전조에 접종하여 72시간 순치 후 바이오필터시스템을 운용하였다. 공급받은 미생물균주의 최적 악취제거 조건⁹⁾은 소요시간 10초 이상, 함수율 60~80%(wt·wt⁻¹) 그리고 온도 10~34℃ 이다. 따라서 이들 최적 악취제거 조건이 바이오필터에 의해 자동으로 제공되도록 하였다.

또한, 미생물균주의 균수측정은 혼합충전조에 정착된 미생물 균주를 희석평판의 방법으로 c.f.u.·g⁻¹(생균수)를 측정하였다⁹⁾.

Pilot-scale 바이오필터 제작

Pilot-scale 바이오필터의 구조도는 Fig. 2와 같다. Pilot-scale 바이오필터의 공기유동방식은 충전재의 함수율을 60~80% 범위로 유지하는데 유리한 양압식·상향류 방식으로 설계하였다^{4,6,10)}. 계측장치로는 풍온·풍속센서, 압력강하측정장치, 공기유량계 및 중량측정장치를 사용하였으며, 이들은 바이오필터 본체에 설치되었다. 또한 부수장비로는 송풍장치, 체크밸브, 살수장치 및 솔레노이드밸브 등이 사용되었다. 제어프로그램은 LabWindows/CVI 5.5를 이용하여 프로그래밍 하였다. 충전층의 악취가스 통과시간은 제어프로그램을 이용하여 송풍장치에 공급되는 전원의 주파수를 조절하여 입기량을 제어함으로써 10초 이상으로 유지하도록 하였다. 충전재의 함수율은 충전부의 하단부에 설치한 중량측정장치로 24시간마다 바이오필터

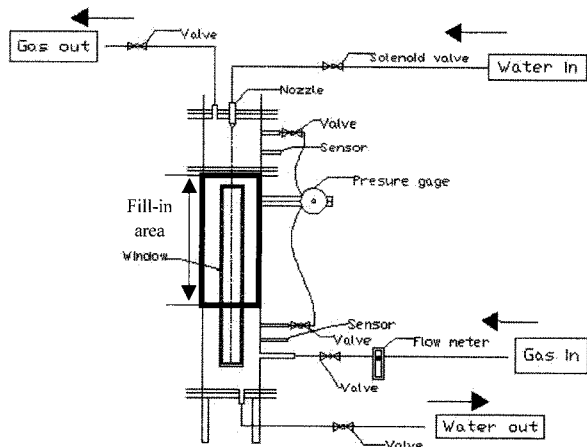


Fig. 2. Appearance of the pilot-scale biofilter.

본체의 무게 변화를 측정한 후, 제어프로그램을 이용하여 급수량을 신출하여 물을 자동으로 급수함으로써 함수율을 60~80%로 유지하도록 하였다. 바이오필터로 입기되는 공기의 온도는 여름과 가을에 실험한 관계로 실험돈사의 온도가 15~30℃ 범위에서 유지되었기 때문에 자동 제어하지 않았다. 바이오필터 본체는 충전재 때문에 발생하는 음압으로 인한 공기의 유출을 막기 위하여 고무 패킹을 사용하였는데, 무부하 상태에서 200 mmAq의 음압까지 견딜 수 있도록 제작되었다.

조사항목 및 조사방법

실제돈사에서 바이오필터 악취가스제거 성능실험은 혼합충전조에 미생물균주를 접종한 후 72시간동안 상온에서 순치 후, 10일 동안씩 3반복으로 돈분뇨저장조의 공기를 흡입하여 충전칼럼에 통과시켜 실시하였다.

충전층의 풍온, 풍속은 풍온풍속계(Model 6112, KANOMAX, Japan)의 Probe를 충전층 상·하부에 설치하여 24시간 간격으로 측정하였다. 충전층의 음압차는 충전층 상·하부에 차압계(Magnehelic Differential Pressure Gages Series 2000, Dwyer, USA)를 설치하여 24시간 간격으로 측정하였다. 악취가스의 포집은 입·배기부에서 500 ml 포집백을 이용하여 24시간마다 실시하였다. 암모니아 가스와 황화수소의 농도는 포집백의 가스를 gas tight 주입기로 시료를 채취하여 GC(GC 17A, SIMADZU, Japan)⁹⁾에 주입하여 측정하였다. 미생물 생균수는 24시간마다 충전층의 상·하부에서 일정량의 시료를 채취하여 분석⁹⁾하였다.

결과 및 고찰

Biofilter 환경관리

충전층 내에서의 입공기 체류시간은 충전층 상·하부의 풍압차를 200 mmAq 이하로 유지시키고 또한 충전층 내에서 풍속을 0.03±0.01 m·sec⁻¹로 유지시킴으로써 미생물의 악취가스제거 가능시간인 10.0±0.3초로 유지되었다. 충전재의 함

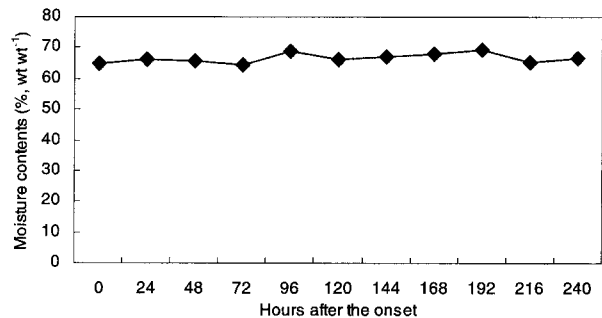


Fig. 3. Changes of moisture contents of column packing materials in the biofilter operated in the commercial pig house. (Note: The column material was the mixture of pine compost and perlite which inoculated by the selected bacterial strains.)

수율은 바이오필터의 중량 변화를 이용하여 측정된 결과 Fig. 3과 같이 65.0±5.1%(wt·wt⁻¹)로 유지되었다. 충전재의 온도는 15~30°C의 공기가 입기되었으나 송풍장치의 영향으로 인하여 27.2±3.1°C로 유지되었다. 또한 충전재의 높이를 측정된 결과, 부숙수피의 부숙으로 인한 충전재의 압밀은 거의 진행되지 않았다. 따라서 미생물균주의 최적 악취제거 조건⁹⁾이 실험기간동안 조성이 되었던 것으로 판단된다.

미생물활성 변화

미생물 생균수의 변화는 Fig. 4와 같았다. 혼합충전재에 미생물을 접종한 후 72시간동안 순치하였을 때의 미생물 생균수와 24시간 간격으로 측정하였을 때의 미생물 생균수가 9.23±0.32×10⁹ c.f.u.·g⁻¹으로 거의 같은 수준을 유지하였다. 그 이유는 충전층 내의 풍속 0.03±0.01 m/s, 함수율 65.0±5.1%, 풍온 27.2±3.1°C이었으므로 실험기간동안 미생물의 생육조건⁹⁾이 조성이 되었기 때문인 것으로 판단된다.

악취가스 제거성능 평가

바이오필터의 입기구와 배기구에서의 암모니아와 황화수소의 농도와 제거율은 Table 2와 같았다. 암모니아 가스의 유입농도는 평균 22.8± 5.2 mgL⁻¹이었고, 배출농도는 평균 2.1±0.3 mgL⁻¹이었다. 그리고 황화수소의 유입농도는 평균 2.7±1.2 mgL⁻¹이었고, 배출농도는 평균 0.5±0.2 mgL⁻¹이었

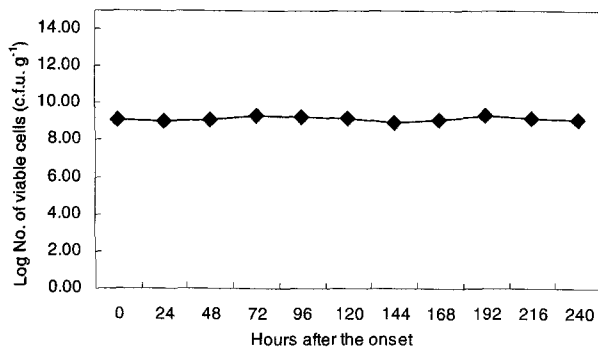


Fig. 4. Changes of bacterial population in column packing materials during the test.

Table 2. Concentrations and removal rates of NH₃ and H₂S gases in the inlet and outlet of the pilot-scale biofilter operated in a commercial pig house

Item		NH ₃	H ₂ S
Concentration (mgL ⁻¹)	Inlet	22.8 ± 5.2 ^{b)}	2.7 ± 1.2
	Outlet	2.1 ± 0.3	0.5 ± 0.2
Removal rate (%)		90.8	81.5

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

b) Mean ± SD

다. 악취방지법²⁾에서 단일가스의 허용기준은 암모니아의 경우 2.0 mgL⁻¹, 황화수소의 경우 0.06 mgL⁻¹이다. 그러나 실제로는 바이오필터에서 배출된 암모니아와 황화수소가 주변 공기에 의해 급격히 희석되기 때문에 양돈장 부지경계선에서의 농도를 고려해 볼 때 악취방지법에 저촉되지 않는 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 90.8%와 81.5%로 나타났다. 암모니아 제거율이 낙엽부숙토와 음식물 찌꺼기를 혼합하여 만든 퇴비에 *Nitrosomonas* sp.와 *Nitrobacter* sp.를 접종하여 충전한 바이오필터의 경우 80%¹¹⁾, 폴리우레탄에 황 산화세균(*Thiobacillus thiooxidans* AZ11 KCTC 8929P)를 접종하여 충전한 폴리우레탄 바이오필터의 경우 88~90%¹²⁾, 목탄으로 된 충전재에 MLVSS/kg wood-charcoal을 접종한 바이오필터의 경우 87%⁷⁾로 보고되어 있으며, 황화수소 제거율이 목탄으로 된 충전재에 MLVSS/kg wood-charcoal을 접종한 바이오필터의 경우 95%⁷⁾, 폴리우레탄에 황산화세균(*Thiobacillus thiooxidans* AZ11 KCTC 8929P)를 접종하여 충전한 폴리우레탄 바이오필터의 경우 83%¹²⁾로 보고되고 있다. 이상과 같이 암모니아 제거율의 경우 부숙수피와 펄라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재가 다른 충전재보다 높았으나 황화수소 제거율의 경우 다른 충전재의 비해 약간 낮았다. 그러나 부숙수피와 펄라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재의 가격⁹⁾이 목탄 충전재의 70% 정도, 다공성세라믹 충전재의 10% 정도인 점을 고려해 보면, 부숙수피와 펄라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재가 다른 충전재에 비하여 양돈가에서 현실적으로 이용할 수 있는 충전재인 것으로 판단된다.

요 약

국내에서 구입이 용이한 부숙수피와 펄라이트를 부피비 7:3으로 혼합하여 혼합충전재에 암모니아 산화균 *Rhodococcus equi* A3와 황 산화균 *Alcaligenes* sp. S5-5.2를 접종한 후, 개발한 양압식·상향류 방식의 바이오필터에 혼합충전재를 충전하여 돈사에서 발생하는 암모니아 및 황화수소에 대한 악취가스 제거성능을 실험을 실시하였다. 혼합충전재에 미생물을 접종한 후 72시간동안 순치하였을 때의 미생물 생균수와 24시간 간격으로 측정하였을 때의 미생물 생균수가 거의 같은 것으로 나타났다. 이는 개발한 바이오필터가 미생물의 생육조건을 유지하는데 성공했다고 판단된다. 또한 암모니아 가스의 유입농도는 평균 22.8± 5.2 mgL⁻¹이었고, 배출농도는 평균 2.1±0.3 mgL⁻¹, 제거율은 90.8%이었다. 그리고 황화수소의 유입농도는 평균 2.7±1.2 mgL⁻¹이었고, 배출농도는 0.5±0.2 mgL⁻¹, 제거율은 81.5%로 비교적 높았다. 이와 같이 부숙수피와 펄라이트를 혼합하여 만든 혼합충전재를 충

전한 바이오필터가 악취가스 제거율이 비교적 높고 가격이 저렴한 것을 고려해 볼 때, 기존의 다른 충전재를 이용한 바이오필터보다 개발한 바이오필터가 양돈가에서 이용하는데 유리한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Animal biotechnology division (2002) Statistics Data Base for Livestock Research. National Livestock Research Institute.
2. Foul Odor Prevention Act. Ministry of Environment Republic of Korea.
3. Clean Air Conservation 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. 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.
7. Park, S. J., and Seo, J. S. (2000) A Study on H₂S / NH₃ odor removal using wood - charcoal. *J. of Waste Recycling and Management Research* 17(3): 243-251.
8. Han, W. S. (2002) The odor reducing characteristics of biofilter bed material used for reducing odor from livestock facilities. Chungnam National University Graduate School.
9. Choi, W. Y. (2004) Biofiltration system for control of livestock odor. Ministry of Agriculture and Forestry.
10. 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.
11. 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.
12. 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.