

축사 악취저감을 위한 바이오필터 충전재의 악취제거 특성

한원석 · 장동일 · 방승훈 · 이승주

충남대학교 농업기계공학과

Characteristics of Bed Media for Reducing Odor from Livestock Facilities

Han, W. S., Chang, D. I., Bhang, S. H. and Lee, S. J.

Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Korea

Summary

This study designed and constructed an experimental column for adhesion efficiency test and conducted experiment to investigate the offensive odor adhesion efficiency of filter bed materials. The offensive odor adhesion experiment was conducted using mixture of high physical adhesion efficiency material, and the fixity of deodorization microorganism of selected filter bed material was tested using ammonia exclude microorganism A4-2 and sulfur oxidation microorganism S5-5.2 those were cultured at the Agricultural Chemical Department of Chungnam National University, and deodorization efficiency of selected filter bed material mixture was tested. Following are summary of these tests results.

1. Amount of elimination of the offensive odor gas of ammonia and hydrogen sulfide per unit volume was 0.054 and 0.016 l/cm^3 in rice hull, 0.01 and 0.004 l/cm^3 in rice straw, 0.158 and 0.01 l/cm^3 in coconut, 0.014 and 0.02 l/cm^3 perlite, 0.004 and 0.003 l/cm^3 in high road ball, and 0.112 and 0.015 l/cm^3 in chaff of pine, respectively.
2. Amount of elimination of offensive odor gas of ammonia and hydrogen sulfide per unit volume was 0.045 and 0.014 l/cm^3 in mixture 1, 0.079 and 0.016 l/cm^3 in mixture 2, 0.123 and 0.017 l/cm^3 in mixture 3, 0.031 and 0.015 l/cm^3 in mixture 4, 0.055 and 0.016 l/cm^3 in mixture 5, and 0.111 and 0.020 l/cm^3 in mixture 6, respectively.
3. The offensive odor elimination microorganism inoculated to mixture of chaff of pine(70%) and perlite(30%) showed the elimination efficiency of 99.06% and 96.61% against the ammonia and hydrogen sulfide, respectively, during 24 hours period.

(Key words : Odor, Biofilter system, Bed materials, Deodorization.)

서 론

현재 우리나라는 축산물 소비증가에 따른 가축사육 두수 증가와 이에 따른 축산 분뇨 및 악취처리 문제가 심각하게 대두되고 있으며, 특히 악취발생 문제는 환경적 측면에서 최근 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 박상진(2002)과 Martnec 등(2001)이 제기한 악취처리 기술 가운데 하나인 바이오필터(Biofilter)는 운

영비가 적게 소요되고 폐수가 발생하지 않으며, 처리효율이 높은 장점들을 가지고 있다. 또한 기존의 악취처리방법과 달리 담체만을 교체해주기 때문에 폐기물 발생량이 상대적으로 적은 장점이 있다. 현재 바이오필터 충전재는 여러 종류가 개발되었지만 제작단가가 고가이기 때문에 경제적 측면에서 불합리하며, 처리장비의 고정비와 변동비가 경제적으로 많은 부담이 되어 실질적인 현장적용이 어렵다고 판단되어진다.

Corresponding author ; Cphang, D. I., Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Korea, Tel : (042)821-5002, E-mail : dichang@cnu.ac.kr

따라서 악취 집중으로 인한 피해를 최소화하고, 축산업의 국제경쟁력 강화를 위해 경제성이 우수한 충전재를 이용한 한국형 바이오필터 시스템의 개발이 요구되는 시점에 이르렀다.

본 연구는 악취흡착 성능이 우수하면서 경제적으로 우수한 충전재를 선정하고, 혼합재료의 악취제거 특성을 구명하기 위하여 이루어졌으며, 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 악취흡착 특성 구명을 위한 실험실용 바이오필터 시스템을 설계, 제작 및 작동특성 구명.
2. 제작되어진 실험실용 바이오필터 시스템을 이용하여 단일충전재와 혼합충전재의 물리적인 악취흡착 능력 구명.
3. 천연충전재의 악취제거 미생물 균주의 정착특성을 구명.
4. 악취제거 미생물 균주를 접종한 혼합충전재의 악취제거 성능을 평가.

재료 및 방법

1. 실험설계

먼저 문헌연구를 통하여 실험실용 바이오필터 시스템의 기초적인 형상과 치수를 설계하였다. 다음으로는 바이오필터에 사용될 충전 재료로서 국내조달이 용이하며, 경제성이 우수한 재료인 수피, 펄라이트, 코코넛, 왕겨, 벚짚, 하이로드볼을 선택하였다. 왕겨의 경우 도정작업 후에 적재된 시료를 채취하였고, 벚짚의 경우 노지에 적재된 시료를 채취하였으며, 펄라이트, 수피, 하이로드볼, 코코넛의 경우 충남대학교 농화학과에서 제공받았으며, 각 재료들은 3개월간 상온에서 방치하여 전처리를 실시하였다.

실험실용 바이오필터 시스템을 이용하여 1) 단일충전재의 악취흡착 능력실험을 수행하였으며, 그 결과에서 악취흡착 능력이 다른 재료에 비하여 우수한 단일충전재를 선발, 일정비율로 혼합하여 2) 혼합충전재의 악취흡착 능력실험을 수행하였다.

또한, 3) 혼합충전재의 악취흡착 능력실험을 통해 선발된 혼합충전재에 악취제거 미생물균주를 접종하여 악취제거 성능실험을 수행하였다.

1)번과 2)번 실험의 경우 검지관(Detection Tube)을 이용하여 1분 간격으로 악취가스의 농도, 압력을 측정하였고, 3)번 실험의 경우 30분 간격으로 악취가스의 농도, 압력을 측정하였다. 또한 각 실험은 동일조건하의 3회 반복실험을 실시하였다.

2. 공시재료

가. 단일충전재료

본 연구에서 사용된 단일충전재는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 국내에서 구입이 용이하고 현재까지 개발되어 사용되는 충전 재료에 비하여 경제성이 유리한 (a) 왕겨(Rice hull), (b) 벚짚(Rice straw), (c) 펄라이트(perlite), (d) 소나무수피(Chaff of pine), (e) 코코넛(coconut), (f) 하이로드볼(High road ball)을 충전 재료들로 선정하였으며, 선정된 바이오필터 충전 재료들의 산물 밀도(Bulk density) 등 물리적 특성은 Table 1에서 보는 바와 같다. Table 1에서 보는 각 재료의 특성 측정방법으로는 산물밀도는 비이커와 전자저울을 이용하여 측정하였으며, 함수율은 시료를 무작위로 추출하여 3개의 샘플을 건조 오븐법을 이용하여 건량기준으로 나타내었다. 공극률은 매스실린더를 이용하여 3회 반복하여 측정하였으며, 압축강도는 UTM을 이용하여 측정하였다. 입자의 크기는 표본샘플 100개씩 3회를 무작위로 추출하여 전체입자의 평균값으로 표시하였다. 흡수율은 수분의 최대 흡수 시 수분의 중량과 시료의 건조중량의 무게비에 담체의 겉보기 밀도를 곱하여 부피비 흡수율로 표시하였다. 이 재료들의 충전작업 시 발생할 수 있는 충전재의 압밀과 형상변화를 최소화하기 위하여 갈대기를 이용하여 자유 낙하시켜 충전하는 무진동 충전법을 이용하였다.

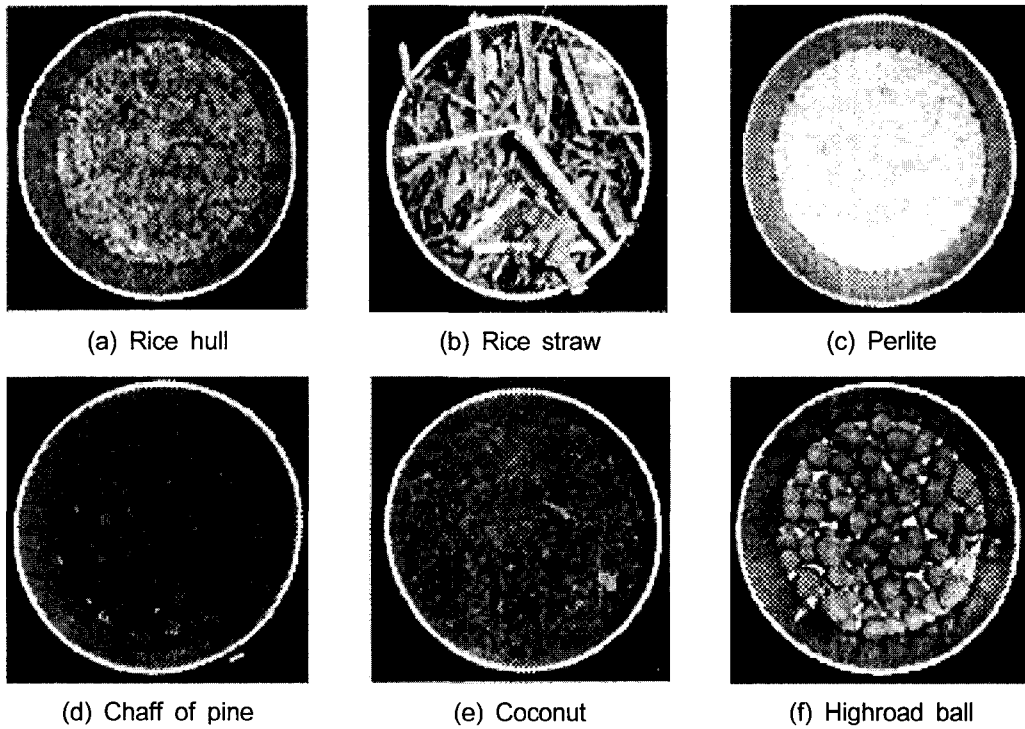


Fig. 1. View of biofilter bed materials used in this study.

Table 1. Characteristics of filling-up single materials

	(a) Rice-hull	(b) Straw	(c) Perlite	(d) Chaff of Pine	(e) Coconut	(f) Highroad ball
Bulk density (g/cm ³)	0.12	0.05	0.25	0.23	0.16	1.04
Moisture content (%db)	1.28	2.26	0.23	22.30	4.97	0.86
Porosity (%)	79.80	84.00	66.50	62.00	67.50	62.00
Compressive strength (kg/cm ²)	8.57	17.32	32.10	31.25	15.90	34.24
Average pore size (mm)	long :5.50 short:2.10	long :25.00 short: 2.50	2.20	3.80	0.04	7.40
Water adsorption (vol/%)	17.57	15.83	11.20	10.72	93.86	19.47

나. 혼합충전재료

수행된 악취흡착 특성을 바탕으로 다른 재료에 비하여 암모니아와 황화수소에 대한 흡착능력이 상대적으로 높은 코코넛, 소나무수피와 펄라이트로 선정하였다. 혼합비율의 결정은 전량

수입에 의존하고 있는 코코넛과 이와 다르게 국내에서 쉽게 구입할 수 있는 소나무수피를 기준으로 하여, 혼합충전재 1은 코코넛과 펄라이트의 혼합비율을 3 : 7로 결정하였고, 혼합충전재 2는 코코넛과 펄라이트의 혼합비율을 5 : 5로 결정하였고, 혼합충전재 3은 코코넛과 펄

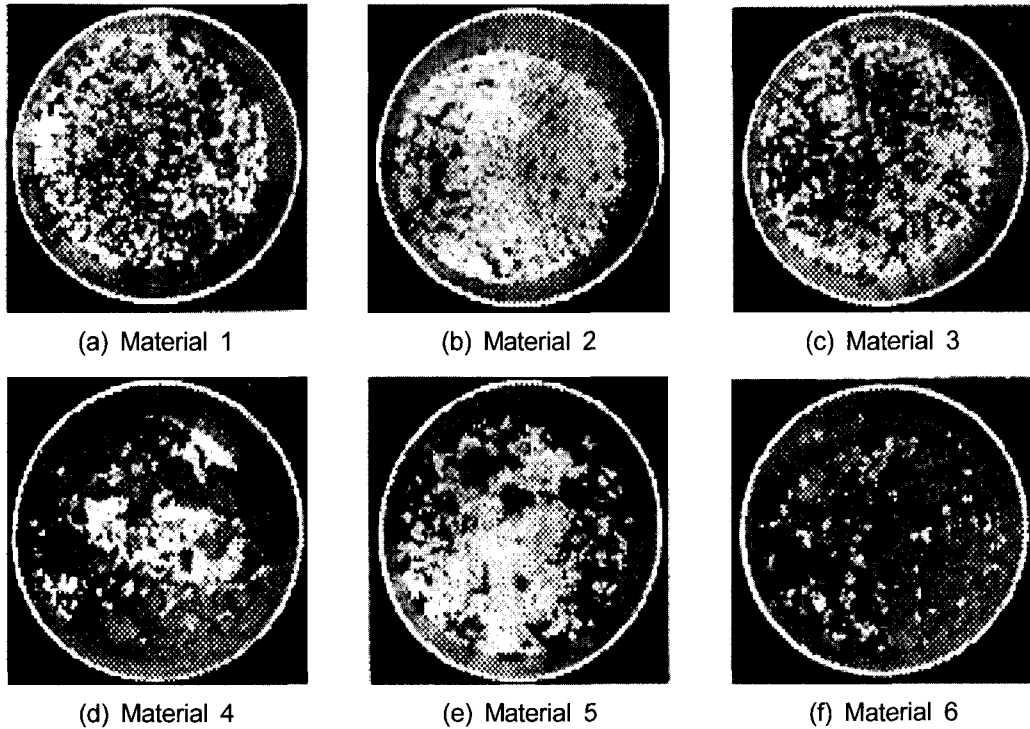


Fig. 2. View of mixture materials.

Table 2. Characteristics of filling-up mixture materials

	Material 1(a)	Material 2(b)	Material 3(c)	Material 4(d)	Material 5(e)	Material 6(f)
Bulk density (g/cm ³)	0.25	0.21	0.18	0.24	0.22	0.19
Moisture content (%db)	1.23	2.52	3.19	5.52	9.83	14.21
Porosity (%)	67.40	64.40	63.40	70.00	68.90	65.70
Water adsorption (vol/%)	32.90	57.60	61.60	45.90	43.90	33.90

라이트의 혼합비율을 7:3으로 결정하였고, 혼합충전재 4는 소나무수피와 펄라이트의 혼합비율을 3:7로 결정하였고, 혼합충전재 5는 소나무수피와 펄라이트의 혼합비율을 5:5로 결정하였고, 혼합충전재 6은 소나무수피와 펄라이트의 혼합비율을 7:3으로 결정하였다. 충전 재료의 충전법은 단일충전 재료의 충전법과 동일하다. 결정된 혼합비율에 따른 재료는 Fig. 2에서 보는 바와 같으며, 혼합재료의 기초적인 물성은 Table 2와 같다.

3. 실험실용 바이오필터 시스템 구성

바이오필터 시스템 충전재의 악취흡착 능력 실험을 위한 실험실용 바이오필터 시스템의 구성도는 Fig. 3과 같다. 본 악취흡착 실험용 실험실용 바이오필터 시스템은 운전 시 내압에 대한 안전율을 고려하여 4 kgf/cm³에서 견딜 수 있도록 두께 8mm 아크릴로 설계하였으며, 접합부는 고온용해용접을 이용하여 접합되었다. 기밀실험은 제작되어진 칼럼과 Plenum Chamber

에 물을 담고 48시간동안 관찰하여 누수의 여부로 판단하였으며, 압력시험은 공기압축기로부터 공급되는 공기의 압력을 2 kgf/cm^3 로 고정하고 충전 칼럼 상부와 하부에 설치된 니플형 압력게이지로 압력실험을 하였다. 그 결과 기밀여부와 내압성능에는 문제점이 없는 것으로 판단되었다. 제작되어진 충전칼럼으로 단일재료 6종과 혼합재료 6종에 대하여 악취흡착 실험을 수행하였으며, 혼합재료로 사용된 단일재료에 대하여 악취제거 미생물의 정착성 실험을 수행하였다. 실험실용 바이오필터의 설계의 기준은 충전칼럼 길이의 경우 악취제거 미생물균주의 악취제거 효용시간이 8 ~ 10초 가량으로 판명되어 일정유속으로 악취가스와 혼합된 공기를 공급하였을 경우 통과시간을 고려하여 설계하였다. 또한 충전용량의 경우 미생물의 생육조건중의 하나인 함수율이 60 ~ 80%인 것을 고려, 충전재와 미생물균주간의 양을 계산하여 결정하였다. 충전칼럼의 겉보기 부피는 $5,089 \text{ cm}^3$, 단면적은 113.04 cm^2 로 설계하였다. Fig. 4는 실험실용 바이오필터 시스템의 제원을 나타낸 그림이다.

악취흡착 능력이 우수한 혼합충전 재료에 암모니아 저감균 A4-2와 유황산화균 S5-5.2를 접

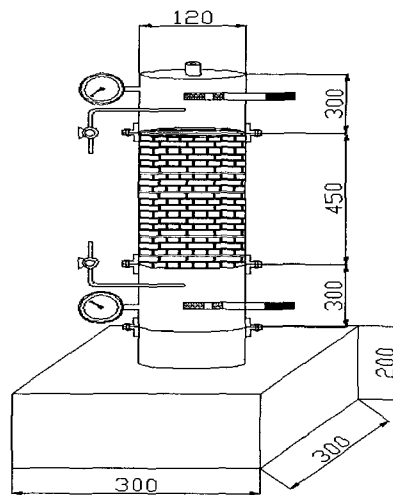


Fig. 4. Appearance of lab scale biofilter system for experiment(mm).

종하여 28°C 의 항온에서 순치한 후 충전 재료에 접종시켜 악취제거 실험을 수행하였다. 미생물균주의 초기생균수는 암모니아 산화균과 황화수소 산화균이 각각 ml 당 2.2×10^8 , 2.6×10^9 이었다. 암모니아 가스는 NH_3 9.99%(Base Gas : N_2)를, 황화수소 가스는 H_2S 1%(Base Gas : N_2)를 공기압축기에서 나온 공기와 혼합하여 충전칼럼으로 유공관을 통해 오염공기를 공급하는데, Classen 등(2000)과 Martnez 등(2001)의 하향류보다는 이민규 등(2002)의 상향류가 더 좋은 방식으로 사료되어 상향류로 공급하였고 칼럼의 상하부의 샘플포트에서 검지관을 이용하여 각 실험별로 일정시간마다 악취가스의 농도를 측정하였고, 풍속의 경우 2점 이상의 풍속을 동시에 측정할 수 있는 다점풍속계를 이용하여 계측하였고, 압력의 경우도 각 실험별로 일정시간마다 칼럼의 상하부에 설치한 니플형 압력게이지(최대압력 2 kgf/cm^3 까지 계측 가능)를 이용하여 계측하였다. 하부에서 측정된 암모니아 가스의 농도는 단일충전재의 경우 180 ppm, 혼합충전재의 경우 200 ppm, 황화수소 가스의 농도는 두 충전재 모두 20 ppm으로 측정되었다. Table 3, 4, 5는 각 측정장치의 제원이다.

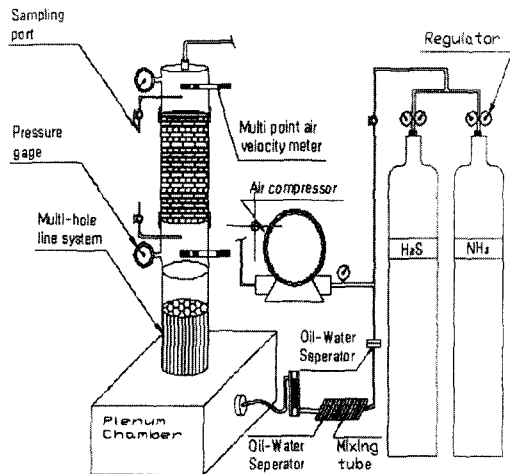


Fig. 3. Overall appearance of 실험실용 biofilter system.

Table 3. Specifications of the pressure gauge

Item	Model	Specifications	
Pressure gauge	WPG-가216594	Company	WOOJIN Co.
		Min. range	0 kgf/cm ³
		Max. range	2 kgf/cm ³
		Error rate	±0.01 kgf/cm ³

Table 4. Specifications of the multi-point air velocity meter

Item	Model	Specifications	
Muti-point air velocity meter	S6242	Company	KANOMAX
		Mix. range	99.0 m/s
		Ch. No.	8 Pores
		Items	RH%, Temperature(°C)

Table 5. Specifications of GASTEC pump set and detection tubes

Items	Model	Specifications	
GASTEC pump set	GV-100S	Company : GASTEC JAPAN (Capacity : 50~100 mL)	
NH ₃ detection tubes	No. 3L	Company : GASTEC JAPAN (Max range : 200 ppm st 100 mL)	
H ₂ S detection tubes	No. 4LK	Company : GASTEC JAPAN (Max range : 20 ppm st 100 mL)	

계측된 악취가스의 농도는 충전 재료별 단위 체적당 악취가스 흡착량으로 다음과 같은 식으로 나타내었다(Pa가. S. J., 1999).

$$OA(l/cm^3) = \sum_{0 \rightarrow t} \frac{[\frac{Inlet\ ppm - Outlet\ ppm}{Inlet\ ppm}] \times A_F}{V_m}$$

여기서,

OA = Odor gas absorption (l/cm³)

t = Time (min), integer

A_F = Air flow (l/min)

V_m = Volume of media (cm³)

결과 및 고찰

1. 실험실용 바이오필터 시스템의 작동특성

칼럼내부에 일정한 유속을 유지시키는데 약 2분 30초가 소요되었으며, 공기압축기의 탱크 압력은 5 kgf/cm² 으로 일정한 압력으로 유지가 가능하였다. 이 때의 유량은 15 l/min 이었다.

본 실험을 진행하는 동안 공급되는 악취가스의 농도, 유량, 압력은 일정하게 유지되었으며, 내부압력과 기밀도 또한 성공적으로 유지되었다.

2. 단일재료의 악취흡착능력실험 결과

왕겨, 벚짚, 코코넛, 펄라이트, 하이로드볼, 소나무수피의 악취흡착능력실험의 결과는 Table 6에서 보는 바와 같다. 암모니아의 경우 코코넛, 소나무수피, 왕겨에서 흡착능력이 각각 0.158 l/cm^3 , 0.112 l/cm^3 , 0.054 l/cm^3 로 나타났으며, 황화수소는 펄라이트와 왕겨에서 흡착능력이 각각 0.02 l/cm^3 , 0.016 l/cm^3 로 다른 재료에 비하여 우수한 것으로 나타났다.

3. 혼합재료의 악취흡착능력실험 결과

혼합충전 재료의 악취흡착능력실험의 결과는

Table 7에서 보는 바와 같다. 혼합충전재의 암모니아 가스에 대한 흡착능력은 코코넛 70%와 펄라이트 30%의 혼합재료 3번과 소나무수피 70%와 펄라이트 30%의 6번에서 다른 혼합재료에 비하여 우수한 것으로 나타났으며, 흡착량은 0.123 l/cm^3 , 0.111 l/cm^3 로 나타났다. 실험결과 풍속과 압력강하는 코코넛과 소나무수피의 비율이 높아지는 혼합재료의 경우 압력손실이 높은 것으로 나타났으며, 혼합충전재를 충전칼럼에 충전할 때의 충전방법과 압밀정도에 따라 공극률의 변화가 심하게 일어나기 때문에 풍속과 압력손실에 민감하게 반응하는 것으로 사료된다.

Table 6. Results of experiment for biofilter single materials

	Ammonia (NH ₃ : 180ppm)		Hydrogen sulfide (H ₂ S : 20ppm)		Pressure drop (kgf/cm ³)	Air velocity (m/s)	Relative humidity (%)
	Quantity of reduction (l/cm ³)	Reduction time (min)	Quantity of reduction (l/cm ³)	Reduction time (min)			
Rice hulls	0.054	22	0.016	10	0.05	0.033	53.1
Straw	0.010	6	0.004	4	0.02	0.067	41.6
Coconut	0.158	61	0.010	8	0.07	0.029	53.5
Perlite	0.014	7	0.02	13	0.07	0.035	44.3
Highroad ball	0.004	3	0.003	2	0.01	0.076	45.3
Chaff of pine	0.112	45	0.015	9	0.07	0.031	53.6

Table 7. Results of experiment for biofilter mixture materials

	Ammonia (NH ₃ : 200ppm)		Hydrogen sulfide (H ₂ S : 20ppm)		Pressure drop (kgf/cm ³)	Air velocity (m/s)	Relative humidity (%)
	Quantity of reduction (l/cm ²)	Reduction time (min)	Quantity of reduction (l/cm ²)	Reduction time (min)			
Material 1	0.045	19	0.014	10	0.042	0.040	53.0
Material 2	0.079	32	0.016	10	0.045	0.033	53.2
Material 3	0.123	49	0.017	8	0.068	0.029	53.5
Material 4	0.031	15	0.015	11	0.043	0.034	53.0
Material 5	0.055	24	0.016	11	0.046	0.033	53.2
Material 6	0.111	42	0.020	9	0.063	0.026	53.5

4. 악취제거 미생물균주 정착특성

본 연구에서 혼합재료에 사용된 재료들에 대한 악취제거 미생물균주의 정착특성을 구명하였

다. 혼합재료로 사용될 코코넛, 소나무수피, 펠라이트의 3종의 충전재에서는 악취제거 미생물균주가 정착여부를 Fig. 5, 6, 7에서 화살표가 지시한 바와 같이 전자현미경을 통해 관찰할 수 있었다.

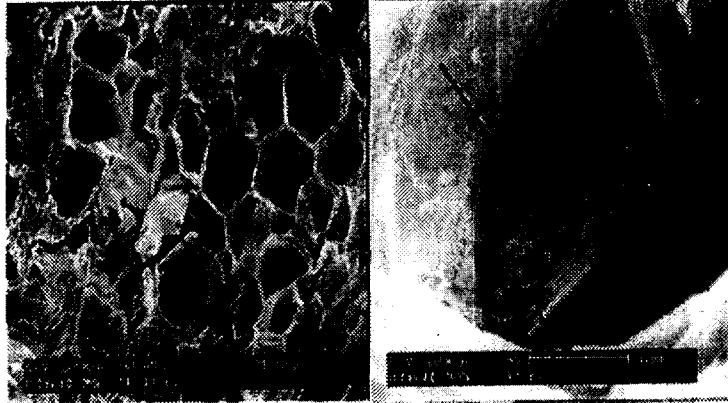


Fig. 5. Microorganism settled on the surface of coconut.

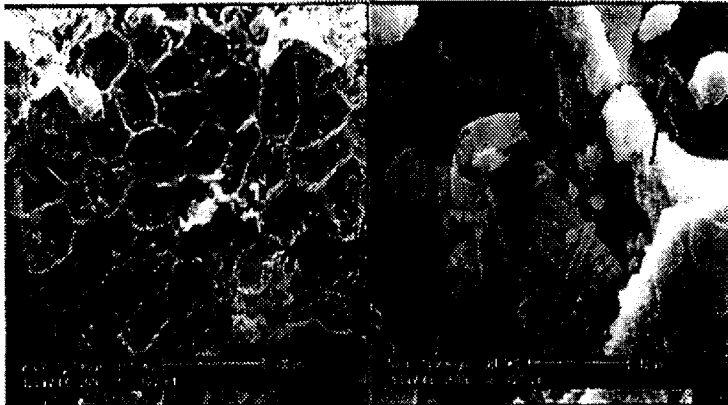


Fig. 6. Microorganism settled on the surface of chaff of pine.

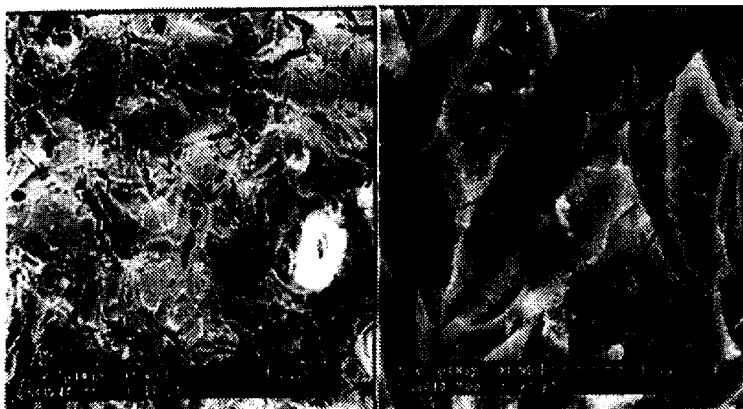


Fig. 7. Microorganism settled on the surface of the perlite.

5. 악취제거 미생물균주를 접종한 충전재의 악취제거 특성

본 실험에서는 혼합재료의 물리적인 악취흡착 능력은 코코넛과 펠라이트, 소나무수피와 펠라이트의 혼합비율이 각각 7:3인 혼합재료 3번과 6번에서 가장 우수한 것으로 나타났으며, 전량수입에 의존하고 있는 코코넛보다는 국내조달이 용이한 소나무수피를 이용하는 것이 바람직하다고 판단되었으며, 선정된 혼합재료를 이용하여 악취 제거실험을 24시간동안 수행하였다. 그 결과 악취 제거실험을 진행하는 24시간동안 악취 제거효율은 Fig. 8과 같이 암모니아의 경우 99.06%를 보였으며, 황화수소의 경우 96.61%로 제거효율이 높은 것으로 나타났다.

24시간동안 6시간 간격으로 충전재 샘플을 채취, 미생물 생균수를 분석하였고, 초기 미생물 생균수보다 증가하는 추세를 보였다. 24시간으로 정한 이유는 혼합충전재에 악취제거 미생물균주를 접종하여 실험할 목적이 악취제거 성능을 측정하기 위하여 정한 시간이고, 차후 실험을 통해 장기간 측정할 예정이다. 황화수소 가스의 제거율의 경우 15시간 이후에 제거율이 일시적으로 약간 감소하였지만 배출농도를 2ppm 이하로 유지하였다.

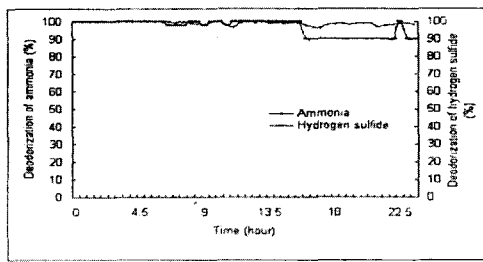


Fig. 8. Efficiency of deodorization of inoculation microorganism in mixture material.

적 요

본 연구에서는 충전 재료의 악취흡착 능력을 구명하기 위하여 흡착능력 실험용 칼럼을 설계

하고 제작하였으며, 제작되어진 칼럼으로 단일 충전재와 혼합충전재에 대하여 악취흡착 능력 실험을 수행하였다. 그리고 선발된 충전재의 악취제거 미생물균주의 정착성을 구명하기 위한 정착실험을 수행하였으며, 선발된 혼합충전재에 악취제거 미생물균주를 접종하여 악취제거 성능실험을 수행하였다. 그 연구 결과는 다음과 같다.

1. 악취흡착, 제거실험용 실험실용 Biofilter system을 설계, 제작하였으며 충전 칼럼은 설계시의 설정과 같이 내부압력과 기밀성은 문제점이 없는 것으로 나타났다.

2. 단일충전재는 암모니아 180 ppm과 황화수소 20 ppm의 악취가스에 대하여 단위체적당 악취가스 제거량은 각각 왕겨는 0.054 l/cm³, 0.016 l/cm³, 벚짚은 0.01 l/cm³, 0.04 l/cm³, 코코넛은 0.158 l/cm³, 0.010 l/cm³, 펠라이트는 0.014 l/cm³, 0.020 l/cm³, 하이로드볼은 0.004 l/cm³, 0.003 l/cm³, 소나무수피는 0.112 l/cm³, 0.015 l/cm³로 나타났으며, 혼합충전재는 암모니아 200 ppm과 황화수소 20 ppm의 악취가스에 대하여 단위체적당 악취가스 제거량은 각각 혼합재료 1은 0.045 l/cm³, 0.014 l/cm³, 혼합재료 2는 0.079 l/cm³, 0.016 l/cm³, 혼합재료 3은 0.123 l/cm³, 0.017 l/cm³, 혼합재료 4는 0.031 l/cm³, 0.015 l/cm³, 혼합재료 5는 0.055 l/cm³, 0.016 l/cm³, 혼합재료 6은 0.111 l/cm³, 0.020 l/cm³로 나타났다.

3. 단일충전재의 악취흡착 능력은 실험결과 암모니아는 코코넛, 소나무수피, 왕겨에서 흡착능력이 우수하게 나타났으며, 황화수소는 펠라이트, 왕겨, 소나무수피에서 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며, 혼합충전재는 암모니아의 경우 코코넛과 펠라이트의 비율이 7:3인 혼합재료 3번과 소나무수피와 펠라이트의 비율이 7:3인 혼합재료 6번에서 다른 혼합재료에 비하여 우수한 것으로 나타났다.

4. 코코넛과 소나무수피의 경우 암모니아가스에 대한 흡착능력은 거의 비슷한 것으로 사

료되며, 코코넛의 경우 전량을 수입에 의존하고 있다는 점에서 국내 조달이 용이하며, 구입비용도 적게 소요되는 소나무수피를 사용하는 것이 경제적이라고 사료된다.

5. 마지막으로 악취제거 미생물균주를 접종한 소나무수피 50%와 펄라이트 30%의 혼합재료를 24시간동안 장기간 운전실험을 수행한 결과 암모니아 99.06%, 황화수소 96.61%의 제거 효율을 보였다.

인 용 문 헌

1. 박상진. 2000. 목탄을 이용한 황화수소와 암모니아 2성분 혼합악취 제거에 관한 연구. 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문집 (II), pp. 43-44.
2. 이민규, 변정인, 이병현. 2002. 활성탄 충전 바이오필터의 상향류 및 하향류 운전방식에 따른 성능비교. 2002 춘계학술대회 논문집. 한국냄새환경학회.
3. ASAE. 2000. ASAE STANDARD 2000. ASAE.
4. Classen J. J., Young, 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 43(1):111-118.
5. Martec. M., Hartung, E., Jungbluth, T., Schneider. F. and Wisser, P. H. 2001. Reduction of gas, odor and dust emission from swine operations with biofilter. The ASAE paper No. 014075.
6. Park. S. J. 1999. Development of biological deodorization technology for sulfur-containing malodorous mixed gases to reduce odor pollution. 환경부연구보고서.