

축산 시설의 암모니아 가스 제거용 바이오 필터 시스템 개발

Development of Biofilter System for Ammonia Removal in Livestock Facility

조성인 김명락 김유용 여운영
정회원 정회원 정회원 정회원
S. I. Cho M. L. Kim Y. Y. Kim W. Y. Yeo

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop a pilot scale bio-filter system removing ammonia gas with microorganisms. The system consisted of chaff(filter medium), a blower, a temperature sensor, a moisture sensor, a solenoid valve, and a heating system. Temperature and moisture contents were controlled via a PC to provide the microorganisms with proper environment. The microorganisms used in this study were *Bacillus. coagulans* NLRI T-6 and *Pseudomonas. putida* NLRI S-21 of bacilli. Performance tests were performed to evaluate gas removal rate during 20 days. The result was shown that the removal rate was high in early days and gradually dropped below 90% without injecting the microbes. However, it was shown that when injecting the microbes, the removal rate was almost 100% and pH value was maintained at between 7 and 9 during the whole twenty-day period.

Keywords : Biofilter, Microorganisms, Microbe, Ammonia, Chaff.

1. 서 론

국내 1인당 육류 소비량이 90년에서 99년까지 연 평균 6.6%씩 증가하고 있으며, 이러한 육류 소비량 증가에 따라 가축 사육두수 또한 증가하고 있다. 따라서, 사육두수 증가에 따라 축산 분뇨 처리 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히, 축산 분뇨 처리 문제 중 악취 문제는 공기중에서 확산되면서 인근 사람에게 피로움을 주므로 가장 큰 문제가 되고 있다. 일반적으로 악취성분은 주변 신선한 공기에 순차적으로 희석되므로, 피해 범위를 확대시키지 않으나, 주변 지형이나, 건축물의 배치, 풍향, 풍속 및 기압 등의 기상 조건에 따라 피해 정도가 달라진다. 이러한 악취 피해로 인하여 일선 환경 민원 중 축산 악취관련 민원이 약 20%를 차지하고 있으며, 91년 492건, 92년 514건, 93년 747건으로 증가하는 경향에 있다(시민환경클럽, 1995).

소규모 축산 농가에서 발생하는 가축 분뇨는 대부분 퇴비화하여 농토에 환원함으로 재이용되고 있으나 전업 농가에서 발생하는 가축 분뇨의 처리와 악취는 커다란 문제가 되고 있다. 악취는 사람뿐만 아니라 가축이나 인근 동식물에게도 심각한 영향을 끼친다. 돼지나 닭의 경우 대표적인 악취가스인 암모니아의 농도가 증가할 경우, 성장이 둔화되거나 육질이 떨어지며, 심하면 가축의 활동이 정지되거나 호흡기 질환 등의 질병에 걸릴 우려도 있다.

따라서, 가축 분뇨의 퇴비화 과정에서 악취를 제거하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 윤과 이(1992)에 의하면, 시판 제품인 악취억제 미생물제제는 우분, 돈분, 계분에서 생성되는 암모니아 및 유화 수소의 생성억제에 현저한 효과를 보이지 못했다고 보고하였으며, 이상규(1994)는 암모니아, 휘발성 지방산 등의 물질을 제어하는 *Nitrosomonas spp.*, *Rhodopseudomonas spp.*, *Thiobacillus spp.* 등의 미생물 이용성에

This study was supported by International Cooperative Research Program for Korean Science and Engineering foundation(KOSEF). The article was submitted for publication in August 2003; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2003. The corresponding authors is S.I.Cho, Professor, School of Bioresources and Material Engineering Seoul National University, Seoul 151-742, Korea : voice +82-2-880-4606; e-mail : <sicho@snu.ac.kr>. The authors are : M.L.Kim, Y.Y.Kim and W.Y.Yeo, Seoul National University.

대해 보고하였다. Phillips 등(1995)은 바이오필터를 축사에 설치하고 피트, 나무껍질 등의 다양한 탈취재료의 물리적 특성에 대하여 조사하였다. 川尻鐵也 등(1995)은 축산 분뇨 오수와 악취를 동시에 처리하는 시스템에 관한 연구에서 부속 과정에서 발생하는 악취가스를 폭기조에 투입한 결과, 초기에는 악취가 발생하였으나 2주 후에는 악취가스를 투입하지 않은 시험구와 비슷한 수준으로 감소하였다고 하였다. 그러나 국내에서 이런 바이오필터 기술을 축산 시설에 응용한 사례는 드물며 국내의 축산 환경에 적합한 저렴한 농가보급형 바이오 필터 기술 개발이 시급한 실정이다.

본 연구는 환경 친화적인 악취 제거 미생물을 이용하여 축사내 암모니아를 제거하기 위한 pilot 규모의 바이오 필터 시스템을 개발하고자 수행되었으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 바이오 필터 시스템을 구성하고,
- 2) 바이오 필터 시스템의 작동상태를 감시하고 미생물 성장에 필요한 적정 환경을 제공하는 환경 제어장치를 개발하며,
- 3) 개발된 시스템을 암모니아 가스에 대하여 성능을 평가한다.

2. 이론적 배경

가. 바이오 필터 기술

악취가 발생하는 곳을 토양으로 복개하면, 냄새를 거의 느끼지 못하여 과거에는 토양에 의한 탈취효과로 알려져 왔으나, 이러한 탈취효과는 토양에 의한 흡착 및 이온 교환작용 외에 토양 중에 서식하고 있는 미생물에 의해 악취 분해물질이 분해되는 것으로 밝혀졌다. 악취를 발생하는 성분을 신진대사에 이용하여 악취를 제거하거나 무해한 물질로 전환시키는 미생물을 이용하여 악취를 제거하는 것이 바이오 필터 기술이다.

나. 축사내 악취성분

국내 축사의 분뇨에서 발생하는 악취물질의 화학적 성분의 농도 및 세기는 계절, 시간, 온도 및 습도와 같은 축사의 환경, 그리고 사용하는 퇴비나 가축사료의 종류, 성분 및 양 등에 따라 변화되며, 악취의 분석 방법과 이론에 따라 악취 물질을 달리 구분한다. 외국의 경우 축사내에서 발생하는 악취 가스의

종류를 100여 가지로 분류한 보고(O'Neill과 Phillips, 1992a, 1992b)도 있으나 일반적으로 축사내의 악취라면 암모니아, 황화수소, 메틸메르캅탄, 아민류 등이 있다.

다. 바이오필터 설계 요인

바이오필터를 설계하는데 필요한 인자는 시스템의 형태와 크기, 미생물의 활성을 제공하는 여재의 종류, 미생물, 온도 함수율 등이 있다.

(1) 형태 및 크기

바이오필터의 형태와 크기를 결정하는데 있어 미치는 인자들간의 상호 관계는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 바이오 필터의 크기는 유입 유량과 가스 농도로 결정되는 가스 부하에 영향을 받는다. 유입 유량이 많아질수록 수분 손실에 의한 건조와 열량 손실의 발생이 커지며 악취 가스의 부하량과 체류 시간은 가스의 적절한 처리를 위해 필요한 매체의 양, 즉 여재량을 구하는데 필요하다.

(2) 여재(Media)

여재는 미생물의 최적 활성을 제공하는 것으로 넓은 표면적과 낮은 압력 손실, 압축에 최대도로 견디는 견고한 구조 등이 요구된다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 pH 7~8, 공극률 70% 이상, 크기가 직경 4 mm 이상을 유지하는 여재가 적절하다.

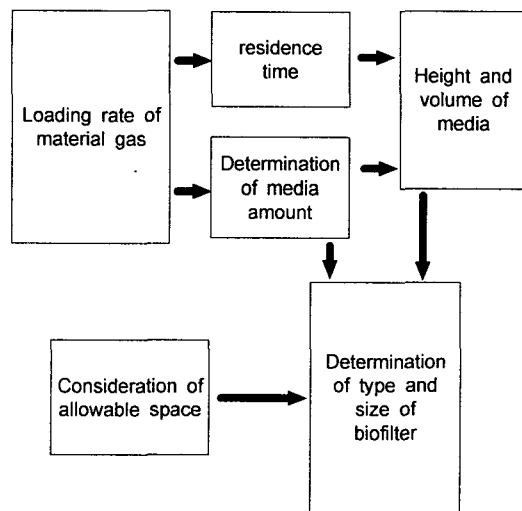


Fig. 1 Conditions affecting types and scales of biofilters.

(3) 미생물

악취 가스를 제거할 수 있는 미생물로 세균이나 곰팡이류 등이 알려져 있다. 필터 반응 층에서 오염 물질을 생물학적으로 분해하는데 호기성 미생물이 중요한 역할을 하며, 바이오 필터에서는 폐가스 속의 CO₂와 같은 탄소원을 이용하여 새로운 세포를 만드는 독립 영양세균과 성장 및 세포배양을 위해 악취 가스 속의 오염물질을 탄소원으로 이용하는 종속 영양세균이 이용된다.

(4) 온도

온도는 미생물의 활성과 처리 효율에 영향을 주기 때문에 필터내의 온도를 10~35℃ 정도로 유지하는 것이 바람직하다. 너무 높은 온도는 미생물의 신진 대사 활동을 급격히 떨어뜨리고, 너무 낮은 온도는 세포의 신진대사 활동을 느리게 하며 처리효율을 떨어뜨리게 된다.

(5) 함수율

바이오 필터는 사용되는 충전 여재에 따라 미생물 활성을 위한 최적 수분 함량이 다르다. 일반적으로 미생물의 활성을 최대화할 수 있는 수분 함량은 수분 보유 능력의 60~80%가 적당하다. 수분 첨가는 여러 가지 방법이 있지만 일반적으로 직접 살수를 한다. 그러나 직접 살수는 여재의 수분 함량의 불균형을 초래하여 필터 체적을 감소시키고, 덩어리를 형성할 수 있는 단점이 있어 수분 방울 크기를 1 mm 이하로 미립 살포하고 최대 살수량을 20~30 l/hr 이하로 해야한다. 수분 보유능력의 측정은 여재를 하루 정도 물에 충분히 담가 두어 포화시킨 후 철망을 이용하여 중력에 의해 떨어지는 수분을 제거한 후 중량과 건조한 후의 중량을 이용하여 식(1)과 같이 나타낸다.

$$PS(\%) = \frac{SW - DW}{SW} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, PS : 보유능력
 SW : 포화된 중량
 DW : 건조된 중량

(6) 공극률

충전 여재의 공극률은 필터 공정에 사용되는 재질의 구조적인 안전, 표면적의 변화, 그리고 흐름의 저항력 등에 함수율과 함께 큰 영향을 미친다. 비이커를 이용, 10회 반복하여 측정된 왕겨의 공극률은 평균 71%로 Deshusses, M.A가 제시한 60~80%를 만족

하는 조건이다.

3. 재료 및 방법

가. Pilot 규모의 바이오필터 시스템 구성

축사내의 악취 제거를 위해 Fig. 2와 같은 실험실 규모의 바이오필터 장치를 설계하였다.

PVC 원통형 아크릴로 제작된 바이오필터는 높이 100 cm, 내경 20 cm로 설계하였고 내부에 여재로서 왕겨(chaff)를 30 cm 높이로 충전하였다. 가스 유입구에는 직경 5 cm의 파이프를 부착하여 송풍기와 연결하였다. 송풍기는 측면의 개폐구를 통해 풍량 조절이 가능하며, 유량계와 연결되어 있어 유량을 측정하도록 하였다. 사용된 악취 제거 미생물은 농촌진흥청 산하 축산기술연구소에서 악취 제어용으로 동정 보관중인 균주로써 Bacillus. coagulans NLRI T-6과 Pseudo-nonas. putida NLRI S-21을 분양받아 사용하였다. 이들 균주는 NH₃⁺을 기질로 이용하며 자연계에서 가장 흔한 미생물이다.

균주를 왕겨에 접종하기 위해 30 g/l 농도의 10 ml TSB(Tryptic soybroth) 액상에서 하루동안 배양시킨 후, 같은 농도 TSB 용액 90 ml에서 이틀, 100 ml의 균주를 900 ml TSB 용액에 접종하여 이틀간 배양하여 포화시켜서 사용하였다. 균주와 왕겨를 V-MIX로 24시간 동안 혼합하여 균주의 서식에 최적 조건인 온도 25℃, 10%의 수분 함량을 만들기 위해 며칠간 우점화 시킨 후 충전 여재로 사용하였다.

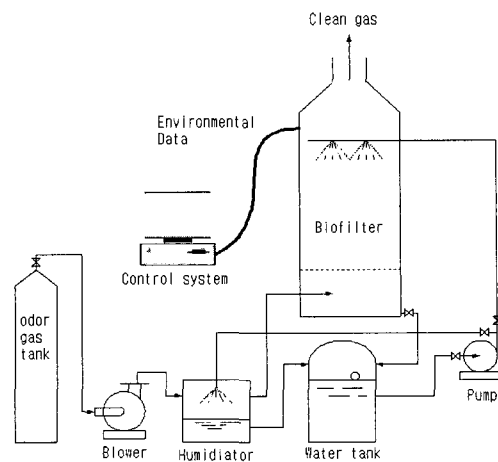


Fig. 2 Schematic diagram of biofilter system for odor removal.

왕겨를 사용하기 위한 기초 연구로 왕겨의 수분 보유능력에 대하여 실험한 결과 왕겨의 수분 보유능력은 약 67% 정도로 나타나 미생물의 활성화에 적절하여 여재로서 사용 가능한 것으로 판명되었다.

나. 환경 제어장치의 구성

(1) 온도 및 함수율 제어

바이오 필터 시스템의 환경제어는 미생물의 활성화에 가장 중요한 영향을 미치는 온도와 함수율을 대상으로 하였고, pH는 모니터링 하였다. 필터 내부 온도 측정에 사용된 온도 센서는 SENTECH-PT-100 모델로 20cm 길이의 막대봉 끝에서 15cm 위치에 2개의 센서를 부착하여 사용하였다. 수분센서는 토양의 수분을 측정하는 GMK- 770G 모델을 사용하였으며 이들의 구체적인 사양은 Table 1과 같다.

제어 시스템은 2개의 온도 센서와 1개의 수분 센서로 구성된 환경 계측장치, 입력된 온도와 함수율에 따라 적절한 제어 신호를 출력하는 NI PCI-6023E가 탑재된 컴퓨터, 출력된 신호를 이용하여 솔레노이드 밸브와 면상 발열체를 On/Off 제어하기 위한 신호 변환기로 구성되었다. 함수율 제어를 위한 살수장치는 솔레노이드 밸브를 사용하였다. Fig. 3에 도식도를 나타내었다.

Table 1 Specs of the temperature sensor and the moisture sensor

Sensor	Temperature sensor	Moisture sensor
Model	SENTECH-PT-100	GMK-770G
Object to measure	all	soil
Range	- 20~80℃	10~100%
Output	0~10V	0~1V
Accuracy	±0.5℃	±3%

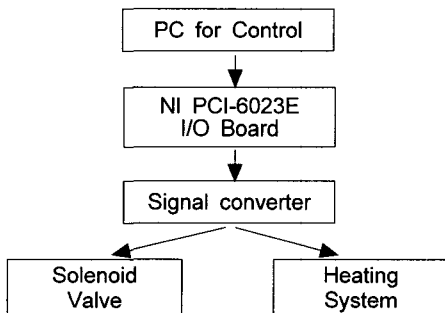


Fig. 3 Environment control systems.

(2) 암모니아 제거율의 측정

악취의 측정방법은 관능 측정법과 기기분석이나 검지관 등에 의한 정량적 악취 분석법인 화학 성분 측정법이 있다. 필터링 전·후와 가슴 전·후의 암모니아 가스농도의 측정을 위해 검지관(Gasteck Co., Japan)과 TG-2400KA(CEA Instruments Inc., USA)을 동시에 사용하여 암모니아 가스 농도를 측정하였다. Table 2는 사용된 가스 센서에 대한 사항이다.

가스 유입구와 가스 배출구에 각각 센서를 설치하였으며, 두 센서가 반응하는 시간 차이로부터 가스의 체류시간을 알 수 있으며, 두 센서의 출력 값의 차이로부터 초기 제거율을 획득할 수 있었다.

Fig. 4는 바이오 필터 제어회로도 이며, Fig. 5는 실제 구성한 전체 제어 시스템의 모습이다.

Table 2 Specification of gas detectors

Model	Gasteck(3M)	TG-2400KA
Range(ppm)	50~500	0~150
Resolution(ppm)	2	1
Response time(sec)	< 60	< 20
Operating temperature(℃)	0~40	- 10~40

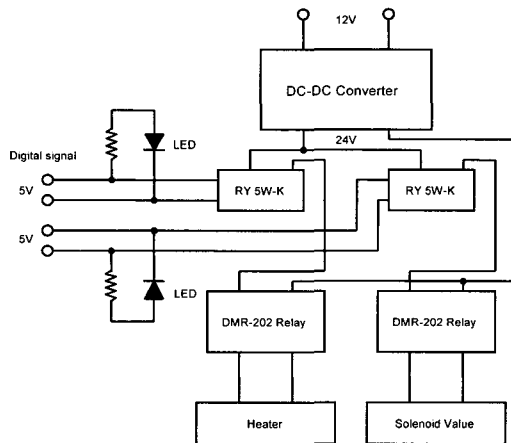


Fig. 4 Control circuit for the biofilter system.



Fig. 5 Photograph of control system.

(3) 제어 프로그램

바이오 필터의 환경제어를 위한 프로그램은 Fig. 6 과 같이 Labview 5.01로 작성되었으며, 데이터 획득률, 입력채널 등을 조절할 수 있고 스트링 형태로 10 초마다 현재의 환경정보를 하드웨어에 저장할 수 있게 하였다.

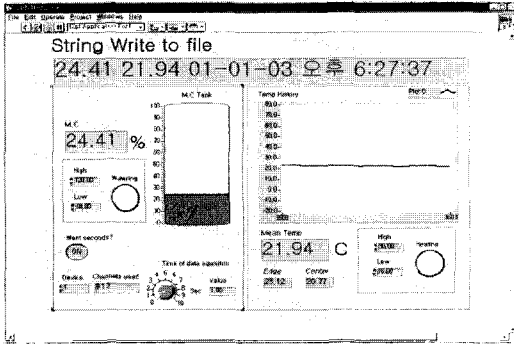


Fig. 6 Program for the environment control.

다. 시작기의 성능 평가

개발된 바이오 필터 시스템을 20일 동안 운전하면서, 미생물을 투입하였을 경우와 투입하지 않았을 경우, 시간에 따라 pH 변화량, 악취 제거율을 측정하고 성능을 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 함수율

바이오 필터 운전중에 발생할 수 있는 문제의 70% 이상이 수분 함량과 관련된 것이라고 보고된다 (Auria et. Aycaguer, 1998). 수분 함량이 과도하게 높을 경우, 부분적인 혐기성을 초래하거나 압력 강하를 유발하며, 미생물의 영양염류 등이 씻겨 내려갈 우려가 있다. 반대로 수분 함량이 낮을 경우, 가스상태의 오염물질의 흡착 및 용해율이 낮아지게 된다. 20°C의 일정 온도와 8 l/min의 일정 유량에서 시운전 기간 동안 필터내의 수분 함량에 따른 체류시간과 압력 손실의 변화 정도를 측정한 결과는 Fig. 7와 8에 나타낸 바와 같다. 함수율이 증가할수록 충전 여재의 공극률이 감소하므로 체류시간은 5초 범위 이내에서 감소하였으며, 압력 강하는 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 체류시간과 압력 손실을 일정하게 유지하기 위해서는 함수율을 일정하게 유지해야 한다.

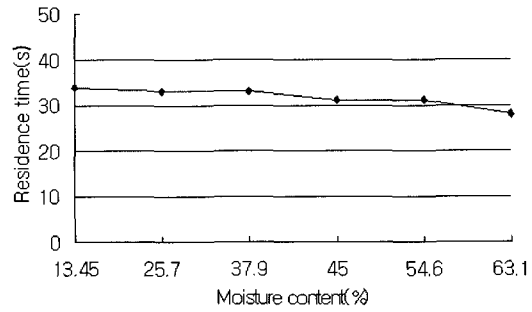


Fig. 7 Residual time with respect to variation of moisture contents.

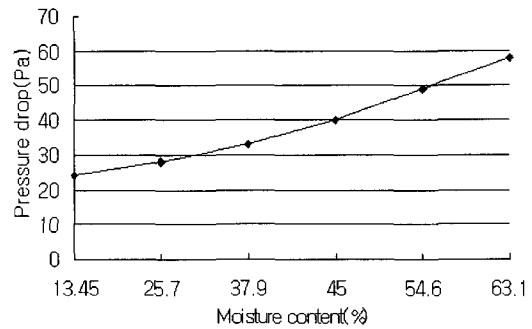


Fig. 8 Pressure drop with respect to variation of moisture contents.

나. 온도

국내 축사 악취의 평균 조건을 설정하기 위해 45% 함수율, 8 l/min의 유량으로 고정시켰으며, 온도를 10 ~ 35°C까지 5°C 간격으로 변화시켰을 때 가스의 필터 내 체류시간을 측정한 결과는 Fig. 9에 나타낸 바와 같다. Fig. 10는 온도 증가에 따른 필터 전후의 압력 손실을 측정한 결과이다. 그림에서 보는

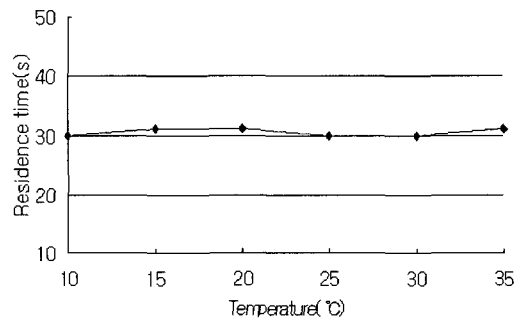


Fig. 9 Residual time with respect to variation of temperature.

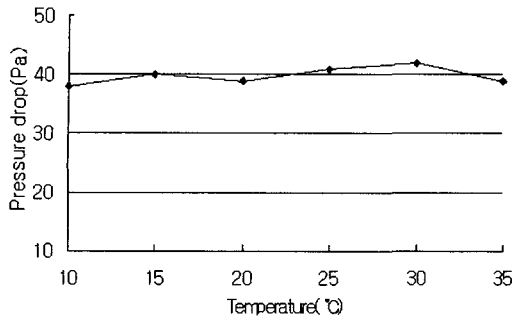


Fig. 10 Pressure drop with respect to variation of temperature.

바와 같이, 10~35°C 사이의 온도는 체류시간과 압력 강하에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 그러나 미생물 활성과 함수율 제어를 위한 중요한 변수이므로 설계시 주요한 고려 대상이 된다.

다. 송풍량

송풍량은 악취 제거율과 밀접한 관련을 지닌 변수로서 송풍량이 커지면 처리량이 증가하나 필터내의 체류시간이 짧아져 오히려 효율이 낮아진다. 반면에, 송풍량이 적어지면 체류시간이 증가하여 처리 효율은 높아지나 처리량은 줄어들게 된다. 따라서, 적정 송풍량을 결정하는 것은 중요하다. 그림 11과 12는 송풍량에 따른 초기 암모니아 제거율과 압력 강하를 나타낸다. 유량에 따른 초기 제거율은 송풍량이 증가할수록 점차 낮아짐을 알 수 있다. 따라서, 초기 제거율이 급감하는 시기와 표준 체류시간의 변화가 일어나는 시점의 용량을 사용된 필터의 처리 용량 (0.267 l/min/h)으로 결정하였다. 여기서 h는 바이오 필터의 충전물의 높이(cm)를 나타낸다. 압력 강하는 송풍량의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가함을 보였다.

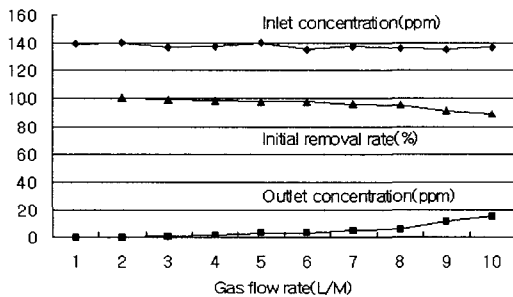


Fig. 11 Initial removal rate with respect to variation of gas flow rate.

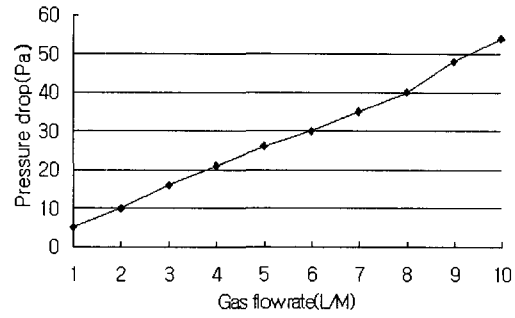


Fig. 12 Pressure drop with respect to variation of gas flow rate.

라. 여재층에 따른 공기저항

여재 내부의 온도와 함수율을 각각 20°C와 45%로 유지하고, 바이오 필터의 높이는 1m로 고정시킨채 바닥면의 면적을 변화시키면서 바이오 필터를 통과한 후의 압력손실을 측정하였다. Fig. 13는 바닥면의 반지름을 10cm씩 증가시키면서 반지름이 2m가 될 때까지 압력손실을 측정된 결과를 나타낸다. 실험결과 공기저항식의 추세선은 식 (2)로 표현된다.

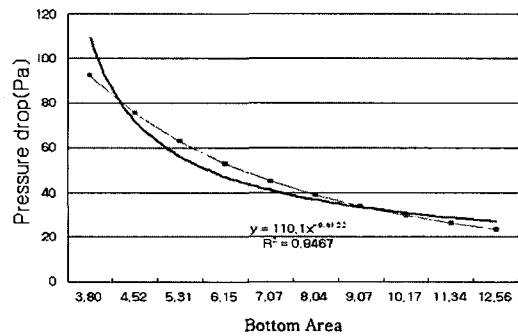


Fig. 13 Pressure drop with respect to variation of bottom area.

$$y = 110.1x^{-0.6122} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, x = 바닥면의 면적(m²)
y = 필터 통과후의 압력손실(Pa)

마. 시간에 따른 pH 변화

pH의 변화량을 측정된 결과는 Fig. 14에 나타낸 바와 같다. 시운전 기간 동안의 pH 변화는 미생물을 투입한 경우가 약간 낮은 결과를 보였는데, 이는 접

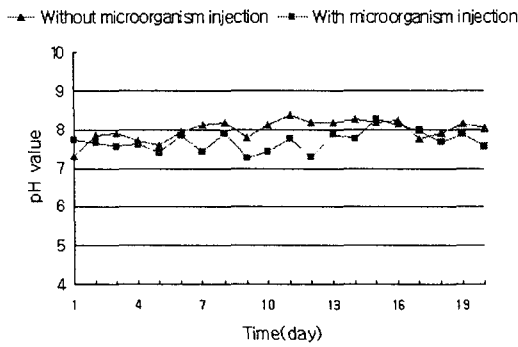


Fig. 14 pH value for the operation period.

중한 미생물이 활성화되면서 암모니아를 더욱 많이 산화시켜 생긴 결과로 판단된다.

바. 미생물 첨가 유무에 따른 암모니아 제거율 비교

20일 동안 바이오 필터 시스템을 시운전하면서 미생물을 투입하였을 경우와 투입하지 않은 경우의 시간에 따른 암모니아 제거율은 입·출구 농도를 측정하여 계산하였으며, 그 결과는 Fig. 15와 16에 나타낸 바와 같다. 미생물 접종을 하지 않은 경우 초기

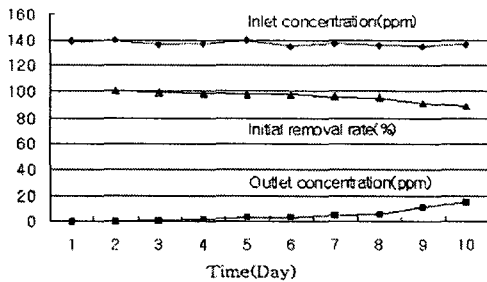


Fig. 15 Removal rate without microorganism.

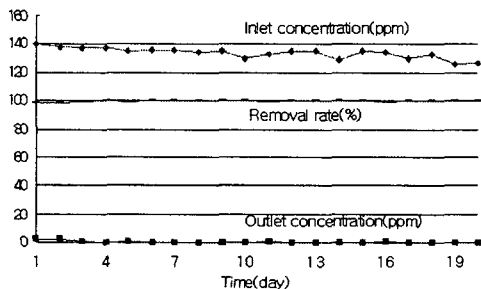


Fig. 16 Removal rate with microorganism.

흡착에 의한 영향으로 제거율이 높다가 시간에 따라 차츰 낮아져 90% 이하로 떨어지는 경향을 보였고 (Fig. 15), 미생물을 접종한 경우 시운전 기간 동안 거의 100%에 가까운 제거 성능을 보였다(Fig. 16). 따라서 미생물을 접종하는 것이 균일하고 안정된 암모니아 제거율을 얻을 수 있을 것으로 판단 되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 농가 부산물과 미생물을 이용한 악취 제거용 바이오 필터 기술과 우리나라 축산 농가에 적합한 보급형 바이오 필터 시스템을 개발하기 위해 수행되었다.

본 연구에서 구성한 바이오 필터 시스템은 암모니아 가스를 대상으로 여러 조건에서 성능을 구명하였으며, 필터 설계시 중요 인자인 송풍량, 온도, 함수율, 압력강하, 체류시간들간의 관계를 구명하였다. 필터 내부의 온도 변화는 악취가스의 체류시간과 압력 손실에 거의 영향을 주지 않았다. 함수율의 경우, 함수율이 증가할수록 체류시간은 감소하는 반면 압력 손실은 증가하는 결과를 나타냈는데, 이는 필터 내부의 공극률 변화로 생긴 결과라 판단된다. 송풍량은 바이오 필터 효율에 절대적으로 영향을 미치는 인자로서 송풍량이 증가할수록 체류시간은 감소하며 초기 제거율도 떨어진다. 미생물의 투입 여부에 따른 제거율은 미생물 접종을 하지 않은 경우 초기 흡착에 의한 영향으로 제거율이 높다가 시간이 지남에 따라 차츰 낮아져 90% 이하로 떨어지는 경향을 보였고, 균주를 접종한 경우에 있어서는 시운전 기간 동안 거의 100% 가까운 제거 성능을 보였다.

본 연구는 실험실에서 암모니아 가스만을 대상으로 수행되었다. 따라서 실제 축사에서 발생하는 다양한 성분의 악취와 농도에 대한 성능 검증과 개선에 대한 연구가 보다 장기간에 걸쳐 이루어져야 할 것이다. 또한 소요되는 에너지와 운전비용의 절감 등의 유지관리, 바이오 필터와 타 방식과의 조합, 그리고 다양한 전처리 방식의 개발 등 여러 측면에서 바이오 필터 성능 개선에 대한 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 시민 환경클럽. 1995. 21C를 위한 한국환경보고서. 신광문화사. 238-239.
2. 윤세영, 이상규. 1992. 가축 분뇨 발효시 악취가스

- 생성억제제 사용 효과에 관한 연구. 한토비지:25 (1):62-6.
3. 이상규, 서장선. 1994. 농업용 미생물 개발 이용연구-가축분뇨 악취제거 미생물 개385-389.
 4. 川尻鐵也, 白石誠, 上林峯治, 白石太郎. 1995. 家畜ふん尿汚水, 悪臭の同時處理 システムの確立(1). 岡山總畜七年報. 6:51-54.
 5. Auria, R. and C. Aycaguer. 1998. Influence of water content on degradation rates for ethanol in biofiltration. *J. Air & Waste Manag. Associ.*, 48:65-70.
 6. O'neil, D. H. and V. R. Phillips. 1992a. A review of the control of odour nuisance from livestock buildings: Part 2, The costs of odour abatement system as predicted from ventilation requirements. *J. Agric. Engng Res.* 53:23-50.
 7. O'neil, D. H. and V. R. Phillips. 1992b. A review of the control of odour nuisance from livestock buildings: Part 3, Properties of the odorous substances which have been identified in livestock wastes or in the air around them. *J. agric. Engng. Res.* 53:23-50.
 8. Phillips, V. R., I. M. Scotford, R. P. White and R. L. Hartshorn. 1995. Minimum-cost biofilters for reducing odours and other aerial emission from livestock buildings : Part 1 basic airflow aspects. *J. Agric. Engng. Res.* 62:203-214.