



## 현장실험을 통한 축산시설로부터 배출되는 축산악취의 확산 평가 Evaluation of Odor Dispersion from Livestock Building through Field Experiment

여옥현<sup>a</sup> · 이인복<sup>b,†</sup> · 하태환<sup>c</sup> · 데카노 크리스티나<sup>d</sup> · 김락우<sup>e</sup> · 이상연<sup>f</sup> ·  
김준규<sup>g</sup> · 최영배<sup>h</sup> · 박유미<sup>i</sup>

Yeo, Uk-Hyeon · Lee, In-Bok · Ha, Tae-Hwan · Decano, Cristina · Kim, Rack-Woo · Lee, Sang-Yeon ·  
Kim, Jun-Gyu · Choi, Young-Bae · Park, You-Me

### ABSTRACT

Livestock odor is comprised of mixed type of odorous compounds. Among these, ammonia (NH<sub>3</sub>) and hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) are the two known major odor causing substances. Because high odor concentration reduces productivity of livestock and causes damage to the surrounding communities, quantitative analysis is needed to manage the odor inside and outside the livestock facilities. It is also necessary to evaluate odor dispersion according to the distance between the receptors taking into account the influence of odor source and weather condition. Therefore, in this study, we tried to evaluate the internal environment and odor dispersion from experimental pig house considering weather conditions. An experimental farm was specifically selected to eliminate the interference of odors generated by adjacent farms. NH<sub>3</sub> and complex odor were quantitatively analyzed using a gas detector and air dilution sensory method. The concentration of NH<sub>3</sub> and complex odor in pig house showed a distinct concentration difference according to the cleaning and ventilation conditions. NH<sub>3</sub> concentration and complex odor was lower than emission standard in the pig house and at the site boundary. The average NH<sub>3</sub> concentration (P1~P3) and the NH<sub>3</sub> concentration at the site boundary (S1) were strongly correlated with R=0.77. While the correlation for complex odor inside and at the site boundary had R=0.52. The correlation coefficient between NH<sub>3</sub> and the complex odor was 0.80.

**Keywords:** Ammonia; dispersion; livestock building; livestock odor

### 1. 서 론

축산악취는 두 가지 이상의 악취물질이 복합적으로 존재하며 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로서 축산냄새, 복합악취 등으로 일컫는다. 사육시설 및 분뇨, 퇴·액비화 과정에서 악취가 주로 발생하며, 주된 발생원은 분뇨로 구분된다. 축산업의 발전과 함께 가축 사육두수가 증

가하여 필연적으로 가축분뇨의 발생량이 증가하였다. 이로 인하여 2017년 전체 악취관련 민원 중에서 축산악취 관련 민원은 26.7%으로 축산악취로 인한 지역주민의 민원이 급증하고 있는 실정이다 (ME, 2019). 2016년 기준 177,393 m<sup>3</sup> · day<sup>-1</sup>의 가축분뇨가 국내에서 발생하였으며, 이 중에서 약 53.0%인 94,922 m<sup>3</sup> · day<sup>-1</sup>의 분뇨가 양돈 산업에서 발생하였다 (ME, 2017). 돈사시설에서 배출되는 축산악취는 암모니아(NH<sub>3</sub>), 황화수소(H<sub>2</sub>S), 메탄(CH<sub>4</sub>), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 휘발성유기물(VOCs) 등이 있으며, NH<sub>3</sub> 및 H<sub>2</sub>S이 주요 악취발생 물질이다 (Kim et al., 2012).

2005년 악취방지법의 시행으로 악취공정시험법에서는 악취의 배출허용기준을 측정하는 방법으로 공기희석관능법과 기기분석법을 제시하고 있다. 공기희석관능법은 현장에서 채취한 시료를 무취공기시료로 단계적으로 희석시켜 악취를 느낄 수 없을 때까지의 희석배수로부터 악취의 정도를 정량적으로 판단하는 방법이다. 그러나, 패널들을 통해 관능시험을 수행하여 악취에 대한 강도 및 희석배수를 측정하기 때문에 악취를 평가하는 패널의 전문성이 요구되는 주관적인 측정방법이다. 기기분석법은 검지관 및 악취감지센서 등을 이용하여 현장에서 발

<sup>a, d, e, f, g, h</sup> PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>b</sup> Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

<sup>c</sup> PhD researcher, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>i</sup> MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4586, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: [iblee@snu.ac.kr](mailto:iblee@snu.ac.kr)

Received: August 12, 2019

Revised: September 19, 2019

Accepted: September 19, 2019

생하는 악취의 정도를 측정하는 방법을 포함하며, 공기희석관능법과 비교하여 객관적인 데이터를 얻을 수 있는 방법이다. 현장에서의 실질적인 악취 측정은 악취모델링, 사전허가제도에 대한 현장 검증 등의 목적으로 필요하다 (ME, 2017). 이외에도 높은 악취 농도는 가축으로 하여금 질병을 유발하고 가축의 생산성을 감소시키고 주변 지역사회로의 악취로 인한 피해를 야기 (Kim et al., 2012) 하기 때문에 돈사 내·외부에서 발생하는 축산악취 관리를 위한 정량적인 분석이 필요하다.

현재까지 대부분의 연구는 축산악취를 저감하기 위한 첨가제 (화학적, 생물학적 방법) 또는 저감시설 (바이오필터, 액비순환시스템 등)의 효율 평가가 주로 수행되었다 (Choi et al., 2015; Ha and Kim, 2019; Hartung et al., 2001; Lim et al., 2012; McCrory and Hobbs, 2001; Melse and Hol, 2017; Sung et al., 2017; Yoo et al., 2010; Zhao et al., 2011). Yoo et al. (2010)은 미생물 생균제를 이용하여 분뇨에서 발생하는 악취의 저감효과를 연구하였으며, Jung et al. (2019)은 분뇨에서 발생하는 악취의 저감효율을 개선시키기 위해 액비순환시스템에 토양 미생물을 적용하여 그 효과를 기존 액비순환시스템과 비교한 바 있다. 그러나 이들 연구에서는 돈사 내 복합악취 농도를 측정하여 효율을 계산하였을 뿐 축산냄새의 외부로의 확산에 대한 평가는 고려하지 않거나 단순히 돈사 내부 및 부지경계선에서의 배출허용기준과 비교·평가만 이루어졌다 (Ha and Kim, 2015; Kim et al., 2013). 그러나 돈사 외부로의 체감악취를 관리하기 위해서는 악취 배출원과 주변 수용체간의 이격거리 및 기상조건 등에 따른 영향을 고려할 필요가 있다. 특히, 풍속, 풍향, 온도 등의 기상조건은 악취 확산에 영향을 크

게 미치기 때문에 이에 대한 고려가 요구된다. Hong et al. (2008)은 기상조건을 고려한 축산악취의 확산을 모의하고자 전체유체역학 모델을 개발 및 검증하였다. 현장실험을 통하여 농장의 부지경계선 및 거리에 따른 복합악취를 평가하였지만 축산시설 내부에서 발생하는 악취의 평가가 이루어지지 못하여 시설 내부 악취와 외부로 확산되는 악취의 관계를 파악함에 한계가 있었다. 또한, Kim et al. (2013)은 48개 농장의 부지경계선에서 6단계 악취세기법을 이용한 복합악취와 검지관을 이용한 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하였지만 악취확산의 주발생원인 축산시설 내부에서의 복합악취 및 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하지 못하였고 부지경계선 이후의 이격거리별 악취 농도 및 기상조건을 고려하지 못한 한계가 존재하였다.

따라서 본 연구에서는 돈사 내부 환경과 기상조건을 고려한 실험돈사 주변으로의 악취 확산에 대한 평가 및 NH<sub>3</sub>와 복합악취에 대한 상관관계를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 NH<sub>3</sub>는 복합가스측정기를 이용하여 측정하였고, 복합악취는 현장에서 악취공기 시료를 포집하여 관능시험법 절차를 따라 정량적 평가되었다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상지역 및 시설

대상지역을 선정함에 있어서 주변농가로부터 발생할 수 있는 축산냄새의 간섭을 배제하는 것이 매우 중요하며 풍하측 방향으로 현장실험이 용이한 곳을 선정하고자하였다. 이러한 기

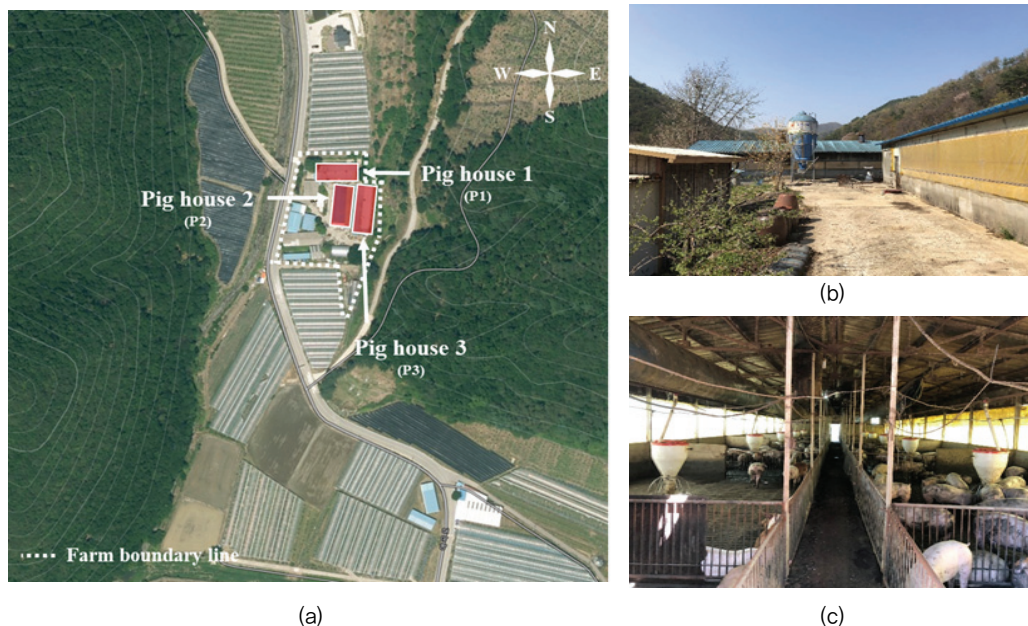


Fig. 1 Satellite photograph of experimental pig house (a), and external and internal rearing environments (b, c)

준에 부합하는 시설로서 충청북도 보은군 소재의 양돈장을 선정하였으며 양돈장을 기준으로 동서 방향에는 산이 위치하고 남북 방향에는 대추 재배를 위한 비가림 시설이 위치하고 있다 (Fig. 1). 대상 양돈장은 총 3개의 돈사로 구성되어 있으며, 약 850두의 자돈을 입사시켜 출하시키는 All-in/All-out 사육방식을 채택하고 있다. 모든 돈사에는 강제환기와 자연환기방식이 혼용된 방식을 적용하고 있으며, 윈치커튼, 지붕 배기팬으로 구성 되어있다. 돈사1 (P1)의 경우에는 폭 10.0 m, 길이 28.0 m, 측고 2.4 m, 둥고 3.8 m의 규격을 갖고 0.8 m × 27.0 m 규격의 윈치커튼이 지표면 높이로부터 1.0 m에 남북 방향의 측벽에 설치되었다. 또한 지붕 배기팬의 경우에는 돈사 길이방향으로 2대가 설치되었다. 돈사2 (P2)은 폭 13.2 m, 길이 25.0 m, 측고 2.8 m (우), 2.3 m (좌), 둥고 4.5 m 그리고 돈사3 (P3)은 폭 10.0 m, 길이 33.0 m, 측고 3.2 m, 둥고 4.3 m의 규격을 갖는다. P2와 P3의 경우에는 돈사간의 사이의 폭이 매우 좁고 P2에는 0.8 m × 24.0 m, P3에는 0.8 m × 32.0 m의 윈치커튼이 P1과 동일하게 지표면으로부터 1.0 m 높이에 설치되었다. 또한 지붕 배기팬의 경우에는 P3은 길이방향으로 P1과 같이 등간격으로 3대 설치되어 있지만 P2의 경우에는 상대적으로 폭이 넓은 점을 고려하여 길이방향으로 2열로 총 4대가 설치되었다. 모든 배기팬은 설정 온도 25°C를 기준으로 환기량이 비례 제어되도록 제어 알고리즘이 설계되었다. 돈사 내 청소는 복도 청소의 경우 주 1-2회, 돈방의 경우에는 출하 직후 1회 실시하였다. 피트 아래에 축적되는 분뇨 슬러리의 경우에는 비정기적으로 제거되고 있으며, 주 1-2회 자체 고액분리를 통하여 분뇨를 처리하였다.

## 2. 대상 축산냄새

축산시설에서 발생하는 냄새는 NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S 등의 다양한 물질로 구성되어 있다. 개별 오염물질은 낮은 농도로 분포하지만 전체 혼합물은 강한 악취를 유발하게 된다. 복합악취는 배출 허용기준을 판단할 때 측정하는 것을 원칙으로 하기 때문에

대상시설 및 주변에서 발생하는 복합악취를 측정하고자 하였다. Jang et al. (2010)의 연구결과에 따르면 NH<sub>3</sub>는 다양한 악취물질 가운데 가장 높은 농도로 존재함을 언급한 바 있기 때문에 본 연구에서는 축산악취에 대한 확산을 평가하기 위한 대상 물질로써 복합악취와 NH<sub>3</sub>를 대상으로 선정하였다. 악취방지법을 기준으로 축산시설은 복합악취와 NH<sub>3</sub>의 배출 허용기준 산정에 있어서 기타지역으로 구분되며 배출구와 부지경계선에서 각각 다른 배출허용기준을 갖는다. 현행 실시되고 있는 복합악취의 배출허용기준은 배출구와 부지경계선에서 각각 500 OU와 15 OU 이하이며, 지정 악취물질로서 NH<sub>3</sub>의 경우에는 1.0 ppm이하로 유지해야 한다.

## 3. 외부기상 및 축산냄새 측정 장비

현장 실험을 수행하는 동안에 돈사 주변 지역에 형성되는 기상조건을 측정하기 위해 간이기상대 (WatchDog Weather Station 2000 series, Spectrum Technologies, Inc., U.S.A.)를 직접 설치하여 기상자료 (풍속, 풍향, 일사량, 외기온, 상대습도, 강수량 등)를 수집하였다 (Fig. 2a). 대기안정도는 기온의 연직 분포를 측정함으로써 산정하였으며, 이를 위하여 소형 온·습도센서 (UX100-03, Onset computer corp., U.S.A.)를 이용하여 높이별 온·습도 데이터를 수집하였다 (Fig. 2b). 실험돈사 및 주변 이격거리별 NH<sub>3</sub> 농도 측정의 경우에는 복합가스측정기 (MultiRAE IR, RAE System, Inc., U.S.A.)를 사용하였다 (Fig. 2c). 복합가스측정기는 전기화학적 원리를 이용한 센서가 장착되어 NH<sub>3</sub>에 대한 측정 및 실시간 데이터 저장이 가능하다. 복합악취는 관능시험방법을 통하여 평가하였으며 휴대용 공기 포집장치 내부의 시료 포집백을 설치한 뒤, 일정한 유량으로 외부 공기를 포집하였다 (Fig. 2d). 과도하게 공기가 포집되어 포집백이 파손되는 것을 방지하기 위하여 압력센서가 설치되어 있으며 일정 압력이 형성되면 펌프의 작동이 중지되도록 설계되었다. 또한, 장비에 타이머가 설치되어 있어 시간

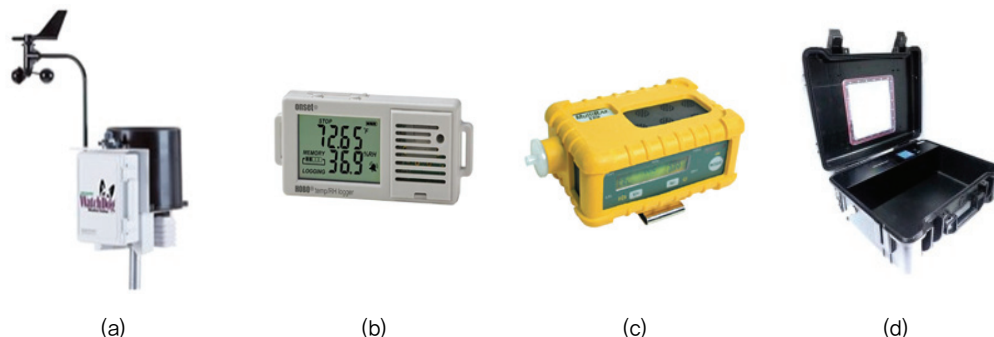


Fig. 2 Equipment for measuring wind environment and livestock odor (a) weather station, (b) temperature and humidity sensor, (c) multi-gas measurement device, (d) odor collector





Fig. 3 Equipment for sensory evaluation (a) generator of clean air, (b) 5-way distributor

을 설정하면 원하는 시점에 공기를 포집할 수 있으며 장비의 포집시간을 동일하게 설정하면 다수의 측정 지점에서 동시에 시료를 포집할 수 있다. 시료를 희석시키기 위한 냄새가 포함되지 않은 무취공기는 자체 제작한 무취공기생성기 (Fig. 3a)를 이용하여 관능평가를 진행하였다. 해당 무취공기 생성기는 실리카겔을 이용하여 공기 중 수분을 먼저 제거하고 활성탄을 이용하여 공기 중 냄새 성분을 제거하였다. 무취공기를 이용하여 희석된 악취 시료는 패널에게 균일하게 공급하기 위하여 5방 분배기 (Fig. 3b)를 이용하였다.

#### 4. 실험 방법

##### 가. 대기안정도 산정

대기 안정도는 대기중 공기의 수직운동과 밀접한 관련이 있으며, 오염물질의 대기중 확산에 큰 영향을 미친다. 대기안정도를 평가하기 위한 방법에는 풍속, 일사강도, 운량 정보를 이용하여 산정하는 방법 (Pasquill, 1961), 대기의 온도 경사를 이용한 방법, 일사량과 순복사량을 이용하는 방법 (Lee and Kim, 1990) 등의 경험적 모델이 있다. Hong et al. (2008)은 축산악취의 경우에는 발생원과 영향범위가 산업악취와 비교하여 발생원의 영향 범위가 넓지 않기 때문에 적정높이까지의 대기안정도 분포와 확산성을 고려하는 것이 타당할 것이라고 언급하였고, 기온의 연직 분포를 직접 측정하는 방법을 적용하였다. 본 연구에서 또한 기온의 연직 분포를 현장실험에서 직접 측정하기 위하여 풍선에 헬륨가스로 채운 뒤 대기중으로 상승하게 하였다. 이 때, 풍선은 대상시설 주변으로 최대한 장애물이 없는 지면에 고정하였으며 줄에는 일정 높이 간격으로 소형 온·습도센서를 이용하여 5.0 m 간격으로 40.0 m 까지 높이별 온습도 데이터를 1초 간격으로 측정하였다. 측정된 기온의 연직 분포는 Table 1의 대기의 온도 경사로부터 대기안정도를 평가하였다 (Golder, 1972; Seinfeld, 1986).

Table 1 Atmospheric temperature gradient and potential temperature gradient according to atmospheric stability grade (Seinfeld, 1986)

Atmospheric stability grade		Atmospheric temperature gradient
John H. Seinfeld	Pasquill grade by Golder	dT/dz (°C/100m)
1	A	< -1.9
2	B	- 1.9~- 1.7
3	C	- 1.7~- 1.5
4(day), 5(night)	D (neutral)	- 1.5~- 0.5
6	E	- 0.5~ 1.5
7	F	> 1.5

##### 나. 암모니아 측정 및 복합악취 관능평가

2018년 5월11일부터 2018년 9월 6일까지 총 5차례에 걸쳐 NH<sub>3</sub> 및 복합악취를 측정하였다. 돈사의 내부, 외부 부지경계선 및 풍하측 거리별로 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하고자 하였으며, 이를 위하여 복합가스측정기를 이용하였다. 삼각대를 이용하여 지면에서부터 1.5 m 높이에 복합가스측정기를 고정하였으며 Fig. 4(a)와 같이 농장의 부지경계선으로부터 20.0~25.0 m 간격으로 측정하였다. 그러나 현장에서 측정된 이격거리별 NH<sub>3</sub> 농도 분포 결과로부터 NH<sub>3</sub>의 대기중 확산 특성에 따라 농도가 빠르게 감소하는 점을 고려하여 2018년 8월 8일 실험부터 복합악취를 동시에 측정하고자 하였고 측정 위치를 Fig. 4(b)와 같이 조정하여 현장실험을 수행하였다.

실험 돈사 내 풍하측 중앙 지점 및 외부에서의 복합악취를 측정하기 위하여 휴대용 공기 포집장치를 이용하였다. 휴대용 공기 포집장치는 장치 내부에 공기 포집백을 설치한 뒤, 포집백과 포집장치 사이 공간의 공기를 배출함으로써 음압을 형성하여 장치 내부에 공기를 간접적으로 포집하는 방식이며, 10 L · min<sup>-1</sup>의 유량으로 외부 공기를 포집한다. 현장에서 포집된 복합악취는 포집 후 24시간 이내에 실내 평가를 실시하여 최대한 현장의 원시료가 유지되도록 하였으며, 부득이한 경우에도 48시간 내에 실내 평가를 실시하여 악취 정도를 평

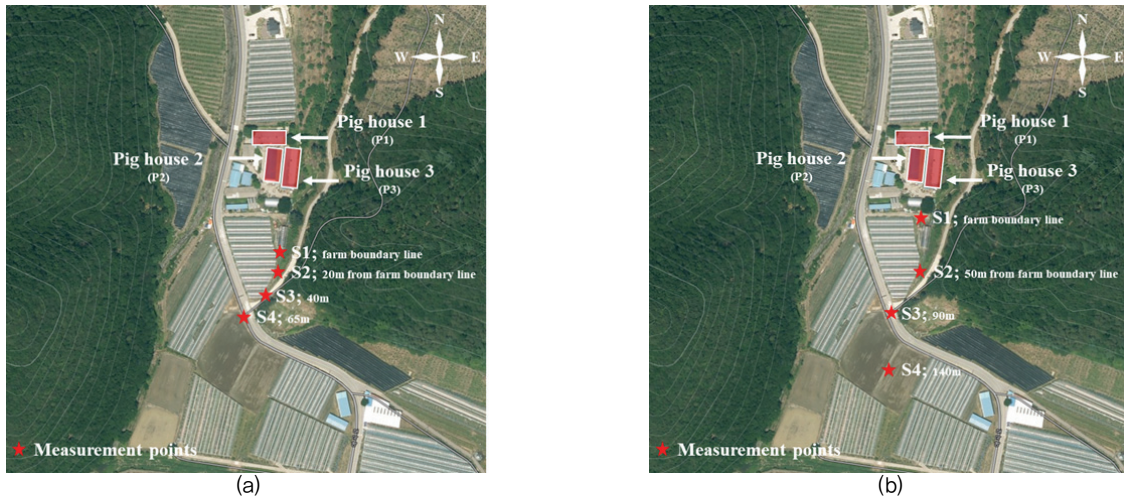


Fig. 4 Sampling location of NH<sub>3</sub> around experimental pig house (a) sampling location of NH<sub>3</sub> (May, 11, 2018), (b) sampling location of NH<sub>3</sub> and complex odor (after Aug, 8, 2018)

Table 2 NH<sub>3</sub> concentration (ppm) inside and outside the pig house

Time	Atmospheric stability	Wind speed (m · s <sup>-1</sup> )	External air temperature (°C)	P1	P2	P3	S1*	S2**	S3***	S4****
May. 11th 14:21~14:41 (1st)	Stable (F)	2.4	23.9	20.7	9.7	6.0	1.1	0.1	0.0	0.0
Aug. 8th 06:24~06:53 (1st)	Stable (F)	< 0.5	26.3	3.1	–	1.3	0.4	0.0	0.0	0.4
Aug. 8th 13:50~14:13 (2nd)	Stable (F)	< 0.5	33.5	5.7	–	3.5	0.5	0.0	0.0	0.0
Sep. 6th 06:00~06:40 (1st)	Stable (F)	< 0.5	15.7	5.4	1.6	0.9	0.0	0.0	0.1	0.0
Sep. 6th 11:58~12:10 (2nd)	Stable (F)	< 0.5	26.2	8.7	5.1	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0

\* farm boundary line  
 \*\* 20.0m from farm boundary line  
 \*\*\* 40.0m from farm boundary line  
 \*\*\*\* 65.0m from farm boundary line

가하였다. 시험 방법은 악취공정시험방법 (ES 09301)의 공기 희석관능법을 준수하였다. 이때, 각 희석배수 (10, 30, 100, 300배)에 따른 악취시료를 5명의 패널에게 공급하기 위하여 Fig. 3(b)와 같이 제작된 5방 분배기를 이용하였다. 이 때, 희석된 악취시료를 제조하여 평가하고 다음 단계의 평가 이전에는 99% 질소 가스를 이용하여 유리주사기, 5방 분배기 등의 모든 장비를 세척하고, 실험실 내를 환기시켜 청정상태를 유지하도록 하였다. 또한 1회 실험 후 패널들은 충분한 휴식을 취한 후 다음 평가를 수행하였다. 각 패널로부터 측정된 관능 실험 데이터로부터 최대와 최소값을 제외한 나머지 값들을 기하평균하여 복합악취 농도를 산정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 대기 중 암모니아 확산 평가

실험기간동안 측정된 돈사별, 이격거리별 NH<sub>3</sub> 농도 측정 결과는 Table 2와 같다. 돈사1 (P1), 돈사2 (P2), 돈사3 (P3)에서는 각각 평균 8.7 ppm, 5.5 ppm, 3.3 ppm의 NH<sub>3</sub> 농도를 나타냈다. P1은 P2, P3과 비교하여 상대적으로 청소 및 환기 상태가 좋지 못하였기 때문에 평균 NH<sub>3</sub> 농도가 높게 나타났다. P2는 P3과 비교하여 평균 78.6% 높은 NH<sub>3</sub> 농도를 나타냈다. 이는 실험돈사의 주풍방향 (북풍계열)을 고려하였을 때 P2의 입기창을 P3이 가로막고 있는 형태로 입지되어 있기 때문으로 판단된다. 실험돈사의 부지경계 및 이격거리별 NH<sub>3</sub> 농도 분포의 경우에는 부지경계에서 평균적으로 0.4 ppm을 나타내

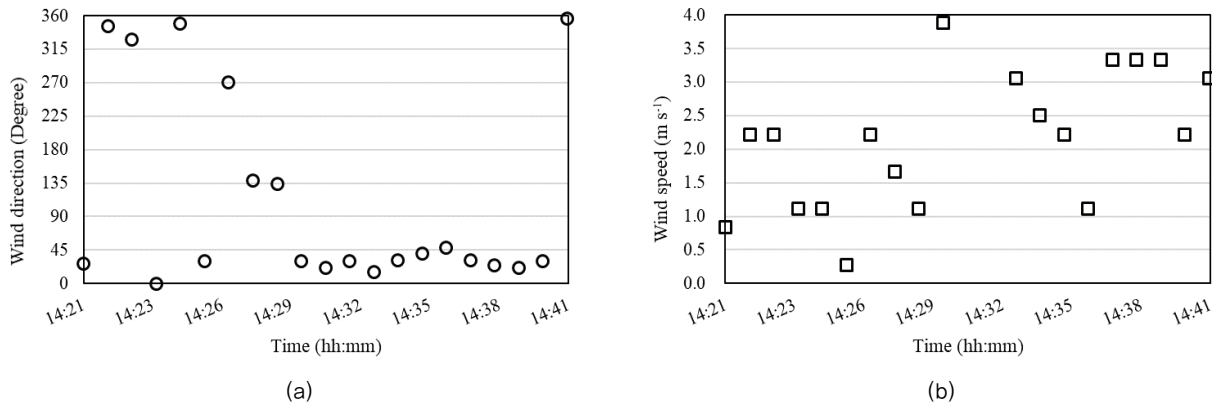


Fig. 5 Wind direction (a) and wind speed (b) between 14:21 and 14:41 around pig house (May, 11, 2018)

고 있으나 악취 배출허용기준 (1.0 ppm)과 비교하여 60% 적은 값을 보였다. 또한 부지경계 이후 이격거리별 NH<sub>3</sub> 농도는 0.0 ppm을 나타냈다.

2018년 5월 11일 현장실험을 수행하는 동안 북풍계열의 풍환경이 조성되는 기간 (14시 21분~14시 41분)에서의 각 돈사 내·외부에서 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하였다. 이 때, 돈사 외부 기온과 풍속은 각각 평균 23.9°C, 2.4 m·s<sup>-1</sup>을 나타냈으며 0~45°, 315~360°의 북풍계열의 풍향을 나타냈다 (Fig. 5). 양돈장의 북측에 위치하고 있는 P1에서 측정된 NH<sub>3</sub> 농도는 평균 20.7 ppm으로 P2와 P3 내부에서 측정된 NH<sub>3</sub> 농도보다 높은 수치를 보였다 (P2 : 평균 9.1 ppm, P3 : 평균 6.0 ppm). 이 때, P1에서 NH<sub>3</sub> 농도가 높게 측정된 것은 P1의 북쪽 윈치커튼은 완전 닫힌 상태이고 남쪽 윈치커튼으로 환기를 실기하였기 때문에 돈사 내부에 NH<sub>3</sub>가 집적된 결과로 판단된다.

돈사 외부 이격거리별 NH<sub>3</sub> 농도 분포의 경우에는 돈사의 부지경계선에 위치한 S1 지점에서 5월 11일 실험에서 가장 높은 값인 1.1 ppm이 측정되었다. 남쪽으로 20.0 m 떨어진 S2 지점에서 0.1 ppm이 측정되었지만 그 이상의 이격거리 S3, S4 지점에서는 대기 중 NH<sub>3</sub> 농도가 0.0 ppm을 나타냈다. 즉, 돈사로부터 대기 중으로 배출되는 NH<sub>3</sub>의 농도는 부지경계선 이전부터 농도가 급격하게 감소되는 것으로 판단되었다. 이는 NH<sub>3</sub>의 분자량이 17으로 다른 기체상의 물질의 분자량과 비교하여 작기 때문에 대기 중으로의 확산 속도가 빠르게 발생한 결과로 판단되고, Xu et al. (2014), Hong et al. (2008)의 연구와 유사한 결과를 보였다. Xu et al. (2014)은 돈사에서부터 배출되는 NH<sub>3</sub>를 거리에 따른 농도 변화를 분석하였으며 돈사로부터 10.0 m 이상 이격되었을 때 0.1 ppm 이하의 농도가 측정되었다. 실험돈사에서 대기 중으로 배출되는 NH<sub>3</sub>가 부지경계선에서 돈사 내부 평균 농도와 비교하여 91% 낮은 농도가 측정되었고 부지경계선 이상의 이격거리에 대해서는 농도가 측정되지 않았기 때문에 현장실험을 통하여 돈사 외

부로 배출되는 NH<sub>3</sub>의 확산 경향을 반복 실험하기에 어려움이 있을 것으로 판단되었다. 따라서 2차 현장실험 (2018년 8월 8일)부터는 NH<sub>3</sub> 농도와 더불어 복합악취시료를 포집하고 공기희석관능법을 통하여 복합악취 농도를 측정하고자 하였다.

2018년 8월 8일 현장실험은 1차 (06시 24분~06시 53분)와 2차 (13시 50분~14시 13분)로 2차례에 걸쳐 수행하였으며, P1, P3으로부터 풍하측 부지경계 (S1)와 140.0 m 지점 (S4)에서 북풍계열의 풍환경이 조성될 때의 대기 중 NH<sub>3</sub>와 복합악취 농도를 측정하였다. P2 내부 NH<sub>3</sub> 농도의 경우에는 측정과정에서 기기결함으로 인하여 분석에 포함하지 않았다. P2에서 측정한 값을 제외하고 돈사 내부 공기 중 NH<sub>3</sub> 농도는 평균 3.4 ppm이 측정되었다. 1차 실험에서 측정한 NH<sub>3</sub> 농도는 P1과 P3에서 각각 3.1 ppm과 1.3 ppm로 나타났다. 그러나 2차 실험에서 측정한 결과는 돈사 외부의 일사의 영향으로 증가한 돈사 내부 기온으로 인하여 분뇨로부터 NH<sub>3</sub>의 발생량이 증가함에 따라 P1과 P3에서 5.7 ppm 그리고 3.5 ppm으로 각각 76%와 85% 증가한 것으로 판단된다. 돈사 내부의 평균 NH<sub>3</sub> 농도가 5월 11일의 현장실험 결과보다 71.5% 낮은 농도가 측정되었으며, 이는 세 가지 요인에 의한 것으로 판단되었다. 첫 번째로는 5월 11일 실험 당시에는 약 90 kg의 비육돈이 사육되었으나 2차 현장실험에는 약 40 kg의 육성돈이 사육됨에 따라 사료섭취량, 분뇨 발생량 등의 냄새 발생원이 감소했을 것으로 판단할 수 있다. 두 번째 요인은 해당 농장은 All-in/All-out 사육방식을 채택하고 있는데 5월 11일과 8월 8일 현장실험 사이에 비육돈을 출하하고 돈사의 청소가 이루어졌다는 점에서 냄새 발생원에서의 농도가 감소되었을 것으로 판단되었다. 세 번째 요인으로 5월 11일 현장실험에는 약 0.2 m 정도로 윈치커튼을 개방하고 있었으나 8월 8일 현장실험에는 윈치커튼을 0.8 m 개방하고 있었기 때문에 윈치커튼의 개방을 차이에 따른 환기율 변화로 돈사 내부에 상대적으로 낮은 농도로 축산악취 물질이 축적된 것으로 판단된다. 이



는 돈사 내부에서의 악취 농도는 사육시설의 관리 및 운영 상태에 따라 현저하게 달라질 수 있음을 의미한다 (Ogink and Groout Koerkamp, 2001).

8월 8일 현장실험은 5월 11일 현장실험의 이격거리별 악취 농도 분포 결과와 유사하게 부지경계선 (S1)에는 돈사 내부의 평균 농도와 비교하여 87% 적었다. 그러나 대기안정도가 안정상태에서는 부지경계 (S1)와 부지경계로부터 140.0 m 지점 (S4)에서의 NH<sub>3</sub> 농도 차이는 거의 없었고, NH<sub>3</sub>의 배출허용기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

9월 6일 현장실험에는 자돈과 비교하여 돈사 내 사료섭취량 및 분뇨 발생량이 많은 비육돈이 사육되었고 피트 내 분뇨가 육안으로 구분될 만큼 많이 쌓였기 때문에 각 돈사에서의 NH<sub>3</sub> 농도가 증가하였다. P1, P2, P3에서 각각 7.63 ppm, 3.97 ppm, 2.56 ppm을 나타냈으며, P2와 P3과 비교하여 돈사 내부 청소 상태가 좋지 않은 P1에서는 상대적으로 높은 NH<sub>3</sub> 농도가 측정되었다. 8월 8일 현장실험과 유사하게 9월 6일 1차 실험 (06시 00분~06시 40분) 측정결과보다 2차 실험 (11시 58분~12시 10분)에 측정된 결과가 평균적으로 1.8배 높고 부지경계 (S1) 및 돈사로부터의 이격거리에 따른 NH<sub>3</sub> 농도 또한 0.1 ppm 이하로 거의 나타나지 않았다.

## 2. 대기중 복합악취 확산 평가

실험기간동안 측정된 돈사별, 이격거리별 복합악취 농도 측정결과는 Table 3과 같다. NH<sub>3</sub> 농도와 동일하게 P1에서 P2와 P3와 비교하여 최대 10.3배 높은 복합악취농도를 나타냈다. 실험돈사의 부지경계 (S1) 및 이격거리별 복합악취 농도 분포의 경우에는 부지경계에서 평균적으로 3.8 OU를 나타내고 있으나 악취 배출허용기준 (15 OU)과 비교하여 NH<sub>3</sub>와 유사하게 62% 적은 값을 보였다. 또한 부지경계 이후 이격거리별 복합악취 농도 분포는 거리가 증가할수록 복합악취 농도

는 감소하는 경향을 나타냈다.

8월 8일 현장실험시 P1에서의 복합악취 농도는 44.8 OU로 가장 높은 악취 농도를 나타냈으며, 3개의 양돈장 평균 악취 농도는 23.7 OU로 측정되었다. 부지경계선 (S1)에서는 돈사 내부의 악취 농도와 비교하여 평균 77%의 농도가 감소하고 돈사의 악취농도가 높을수록 부지경계선에서도 악취 농도가 높게 나타났다. 돈사로부터의 거리에 따라 전체적으로는 복합악취의 농도가 완만하게 감소하는 경향이 나타나지만 돈사로부터 140.0 m 지점에서는 상대적으로 높은 악취 농도가 평가되었다. 이는 풍환경에 영향을 주는 지형적인 요인을 살펴 보았을 때 돈사로부터 140.0 m 지점의 경우 돈사를 기준으로 북쪽에는 아무런 장애물이 위치하고 있지 않으나 동, 서, 남쪽으로는 대추 재배를 위한 비가림 시설이 위치하고 있어 풍하측으로 확산되던 공기가 해당 지점에서 정체되어 상대적으로 높은 악취 농도가 나타난 것으로 판단된다.

9월 6일 현장실험 결과는 P1에서 최대 448.1 OU가 측정되



Fig. 6 Manure condition under pit in the pig house 1 (September, 6, 2018)

Table 3 Odor concentration (OU) inside and outside the pig house

Time	Atmospheric stability	Wind speed (m · s <sup>-1</sup> )	External air temperature (°C)	P1	P2	P3	S1*	S2**	S3***	S4****
Aug. 8th 06:30 (1st)	Stable (F)	< 0.5	26.3	44.8	5.5	20.8	4.6	2.1	1.4	3.0
Aug. 8th 14:00 (2nd)	Stable (F)	< 0.5	33.5	11.8	5.5	5.5	2.1	1.0	1.4	3.1
Sep. 6th 06:00 (1st)	Stable (F)	< 0.5	15.7	310.7	44.8	30.0	1.7	3.1	2.1	1.4
Sep. 6th 12:00 (2nd)	Stable (F)	< 0.5	26.2	448.1	100.0	64.6	6.7	2.5	1.4	1.2

\* farm boundary line

\*\* 50.0m from farm boundary line

\*\*\* 90.0m from farm boundary line

\*\*\*\* 140.0m from farm boundary line

었지만 돈사 내 복합악취 농도는 악취방지법의 배출허용기준 (500 OU)보다 낮은 수치를 보였다. P2와 P3에서는 P1와 비교하였을 때 16.7%와 12.4% 수준의 악취 농도가 측정되었으며 P2와 P3의 경우 현장실험 당시 상대적으로 깨끗한 편이었으나 P1의 경우 피트 내 분뇨의 처리가 늦어져서 돈사 바닥까지 분뇨가 차올라 있는 모습을 확인할 수 있었다 (Fig. 6). 8월 8일 실험과 비교하여 돈사 내부에서 약 38배 복합악취 농도가 증가한 것으로 나타났으며 이는 자돈이 입사된 이후 피트 청소가 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

8월 8일과 9월 6일에 각각 2차례에 걸쳐 돈사 내부 복합악취를 측정하였으며, 8월 8일 2차 실험에서 1차 실험과 비교하여 복합악취의 농도가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 9월 6일 측정 결과의 경우에는 2차 실험에서 1차 실험보다 증가하는 경향을 나타내어 서로 상이한 경향을 보였다. 이는 악취물질이 복합적으로 존재하는 복합악취의 경우 온도, 습도, 일사량 등과 같은 기상조건의 영향과 오염물질의 결합, 중화, 상승, 상쇄 효과 등에 의하여 개별 오염물질의 농도와 악취강도간의 상이한 경향을 나타낸 것으로 판단되었다 (Han and park, 2012).

### 3. 축산악취의 상관관계 분석

현장실험을 통하여 측정한 NH<sub>3</sub>, 복합악취 측정 결과를 활용하여 돈사에서 발생하는 축산악취 (NH<sub>3</sub>, 복합악취) 농도와 부지경계선에서 측정된 축산악취 농도와의 상관관계를 분석하였다. 돈사 내 평균 NH<sub>3</sub> 농도 (P1~P3)와 부지경계선 (S1)에서의 NH<sub>3</sub> 농도는 상관관계수 0.77의 강한 양의 선형관계를 나타냈다. 즉, 돈사 내부에서 발생하는 NH<sub>3</sub>의 농도가 높을수록 부지경계선에서 측정되는 NH<sub>3</sub> 농도가 높다고 설명된다. 또한, 돈사 내 평균 복합악취 농도는 부지경계선에서 측정된 농도 값과의 상관관계수는 0.52로 나타났으며 그 상관관계가 뚜렷한 양의 선형관계를 보였다. NH<sub>3</sub>와 복합악취의 상관관계수

는 0.80으로 강한 양의 선형관계를 나타냈으며, Fig. 7와 같이 NH<sub>3</sub> 농도가 높으면 복합악취의 농도도 일반적으로 높은 경향으로 설명되었다 (R<sup>2</sup>=0.64). 이는 Hayes et al. (2006), Sun et al. (2008)의 선행 연구 결과와 유사함을 보였다.

## IV. 결 론

돈사 내부의 NH<sub>3</sub>와 복합악취 농도는 청소, 환기, 사육조건에 따라 상이하였다. 돈사 내부로부터 외부로 배출되는 NH<sub>3</sub> 농도는 경계부지에서 농도가 평균 0.4 ppm 을 나타냈으며, 그 농도가 매우 낮기 때문에 현장실험을 통하여 거리별 NH<sub>3</sub>의 확산을 평가하는 것에 어려움이 존재하였다. 복합악취는 돈사시설로부터 이격거리가 증가함에 따라 복합악취의 농도는 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였다. 그러나 확산 거리에 있어서 주변 지형 및 장애물에 대한 영향을 받았다. 돈사 내부와 부지경계선에서 NH<sub>3</sub>와 복합악취 농도는 악취공정시험법의 배출허용기준 이하 (돈사 배출구: 500 OU, 1.0 ppm, 부지경계: 15 OU, 1.0 ppm)로 나타났다. 또한, 오전 (일출전)과 오후 (일출후)에 2차례 수행한 현장실험에서 돈사 내 NH<sub>3</sub>는 주변 기온이 증가함에 따라 농도가 증가하는 경향을 보였으나 복합악취는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

돈사 내 평균 NH<sub>3</sub> 농도와 부지경계선에서의 NH<sub>3</sub> 농도는 양의 상관관계를 나타냈으며, 동일하게 돈사 내 평균 복합악취 농도는 부지경계선에서 측정된 악취 농도와 양의 상관관계를 보였다. NH<sub>3</sub>와 복합악취의 상관관계수는 강한 양의 상관관계를 나타냈으며, NH<sub>3</sub> 농도가 높으면 복합악취의 농도도 높은 경향으로 설명되었다.

본 연구에서는 돈사 내부 환경과 기상조건을 고려한 실험 돈사 내부 및 부지 경계 및 인근지역에서의 악취 확산을 평가하고 NH<sub>3</sub>와 복합악취에 대한 관계를 파악하였다. 그러나 현장실험 여건을 고려하였을 때 풍향에 따른 확산평가가 이루어지지 못함에 한계가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01385 0012019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

1. Choi, E. S., J. H. Kim, I. Choi, H. M. Ahn, J. I. Dong, and H. O. Kim, 2015. Microbial additives in controlling

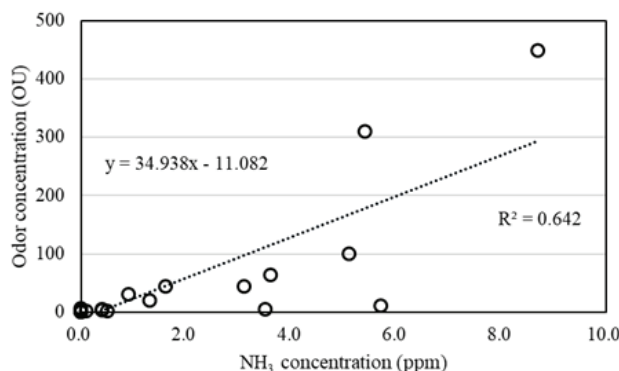


Fig. 7 Correlation analysis between complex odor and NH<sub>3</sub> concentration



- odors from stored swine slurry. *Journal of Water, Air, and Soil Pollution* 226(104): 1-13. doi:10.1007/s11270-015-2357-y.
2. Golder, D., 1972. Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology* 3(1): 47-58. doi:10.1007/BF00769106.
  3. Ha, D. M., and D. H. Kim, 2019. Effect of the liquid manure circulation system on the environmental improvement of swine farm. *Journal of The Korean Environmental Sciences Society* 28(1): 137-145 (in Korean).
  4. Ha, D. M., and D. H. Kim, 2015. The effect of liquid manure circulation system on the odor reduction of swine farm. *Journal of Agriculture and Life Science* 49(4): 57-64. doi:10.5322/JESI.2019.28.1.137 (in Korean).
  5. Han, J. S., and S. J. Park, 2012. A study of the correlation between odor intensity and the concentration of sulfur compounds, NH<sub>3</sub>, and TMA. *Journal of Korean Society of Odor Research and Engineering* 11(4): 87-93. doi:10.11161/jkosore.2013.12.1.8 (in Korean).
  6. Hartung, E., T. Jungbluth, and W. Bascher, 2001. Reduction of ammonia and odor emissions from a piggery with biofilters. *Transactions of the ASAE* 44(1): 113-118. doi:10.13031/2013.2302.
  7. Hayes, E. T., T. P. Curran, and V. A. Dodd, 2006. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland. *Bioresource Technology* 97(7): 940-948. doi:10.1016/j.bior tech.2005.04.023.
  8. Hong, S. W., I. B. Lee, H. S. Hwang, I. H. Seo, H. J. Kwon, J. P. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kwon, T. H. Ha, and Y. H. Kim, 2008. Field experiment for developing and atmospheric diffusion model of a livestock odor. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*: 77-88. doi:10.5389/KSAE.2008.50.4.077 (in Korean).
  9. Jang, Y. K., B. J. Jung, J. Kim, K. B. Song, H. J. Kim, and Y. H. Yoo, 2010. Assessment of odor characterization and odor unit from livestock facilities by animals. *Journal of Korean Society of Environmental Impact Assessment* 19(1): 29-38 (in Korean).
  10. Jeong, C. H., M. J. Park, and D. W. Jeong, 2019. Reduction of odor from swine manure using soil micro organisms on liquid manure circulation system. *Journal of Water Treatment* 27(2): 97-106 (in Korean).
  11. Kim, D. H., I. B. Lee, D. Y. Choi, J. I. Song, J. H. Jeon, and D. M. Ha, 2013. A survey on current state of odor emission and control from livestock operations. *Journal of Animal Environmental Science* 19(2): 123-132. doi:10.11109/JAES.2013.19.2.123 (in Korean).
  12. Kim, K. Y., H. J. Ko, and H. T. Kim, 2012. Comparison of seasonal concentration of ammonia and hydrogen sulfide in swine house according to pig's growth stage. *Journal of Agriculture and Life Science* 46(2): 163-168 (in Korean).
  13. Lee, C. B., and Y. G. Kim, 1990. Evaluation of pasquill stability class with monin-obukhov length and estimation scheme of stability parameter. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 6(2): 168-175 (in Korean).
  14. Lim, T. T., Y. J. J. Q. Ni, and A. J. Heber, 2012. Field evaluation of biofilters in reducing aerial pollutant emissions from a commercial pig finishing building. *Journal of Biosystems Engineering* 112: 192-201. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.04.001.
  15. McCrory, D. F., and P. J. Hobbs, 2001. Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes. *Journal of environmental quality* 30(2), 345-355. doi:10.2134/jeq2001.302345x.
  16. Melse, R. W., and J. M. G. Hol, 2017. Biofiltration of exhaust air from animal houses: Evaluation of removal efficiencies and practical experiences with biobeds at three field sites. *Journal of Biosystems Engineering* 159: 59-69. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.04.007.
  17. Ministry of Environment, 2017. A Study on Improvement of Odor Measurement Method Using Olfactory Odor Method in the Field, 1-3. Sejong, Korea.
  18. Ministry of Environment, 2019. Odor complaints, [Http://stat.me.go.kr](http://stat.me.go.kr). Accessed 29 July. 2019.
  19. Ogink, N. W. M., and P. W. G. Groot Koerkamp, 2001. Comparison of odour emissions from animal housing systems with low ammonia emission. *Water Science and Technology* 44(9): 245-252. doi:10.2166/wst.2001.0551.
  20. Pasquill, F., 1961. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine* 90: 33-49.
  21. Seinfeld, J. H., 1986. *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*, Wiley. doi:10.1029/EO068i046p01595-02.
  22. Sun, G., H. Guo, J. Peterson, B. Predicala, and C. Laguë, 2008. Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58(11): 1434-1448. doi:10.3155/1047-3289.58. 11.1434.
  23. Sung, H. G., S. B. Cho, S. S. Lee, Y. J. Choi, and S. S. Lee, 2017. Study on korean commercial additives and agents for reducing odor of manure in animal farm. *Journal of*

- Agriculture and Life Science* 51(3): 95-104 (in Korean).
24. Xu, W., K. Zheng, X. Liu, L. Meng, R. M. Huaitalla, J. Shen, E. Hartung, E. Gallmann, M. Roelcke, and F. Zhang, 2014. Atmospheric NH<sub>3</sub> dynamics at a typical pig farm in China and their implications. *Atmospheric Pollution Research* 5(3): 455-463. doi:10.5094/APR.2014.053.
25. Yoo, J. H., J. S. Suh, and E. Y. Lee, 2010. Study on the reduction of malodor produced from pig excreta using microbial agents. *Journal of Odor and Indoor Environment* 9(4): 203-207 (in Korean).
26. Zhao, Y., A. J. A. Aarnink, M. C. M. De Jong, N. W. M. Ogink, and P. G. Koerkamp, 2011. Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants from pig houses. *Transactions of the ASABE* 54(1): 285-293.