

양돈장 작업장소별 암모니아 및 황화수소의 실시간 모니터링

박지훈¹ · 강태선^{1,2} · 석지원¹ · 진수현¹ · 허 용³ · 김경란⁴ · 이경숙⁴ · 윤총식^{1,2,*}

¹서울대학교 보건대학원 환경보건학과, ²서울대학교 보건환경연구소,

³대구가톨릭대학교 산업보건학과, ⁴농촌진흥청 국립농업과학원

Real-time Monitoring of Ammonia and Hydrogen Sulfide According to Workplace at Swine Farms

Jihoon Park¹ · Taesun Kang^{1,2} · Jiwon Seok¹, Suhyun Jin¹ · Yong Heo³ ·
Kyungnan Kim⁴ · Kyungsuk Lee⁴ · Chungsik Yoon^{1,2,*}

¹Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

²Institute of Health and Environment, Seoul National University

³Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

⁴National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

ABSTRACT

Objectives: This study aims to assess the concentrations of ammonia and hydrogen sulfide according to task unit area at swine farms.

Methods: A total of six swine farms were selected for this study. Ammonia and hydrogen sulfide were monitored using a real-time multi-gas monitor which could sample the gases simultaneously. The sampling was done in the pig building, manure storage facility and composting facility of each farm.

Results: The concentration of ammonia in the pig buildings(GM 22.6 ppm, GSD 2.3) was significantly higher($p<0.0001$) than in the manure storage facilities(GM 10.4 ppm, GSD 2.7) and composting facilities(GM 8.6 ppm, GSD 2.8). The concentration of hydrogen sulfide in the manure storage facilities(GM 9.8 ppm, GSD 3.2) was higher($p<0.0001$) than in the pig buildings(GM 2.3 ppm, GSD 2.3) and composting facilities(GM 1.9 ppm, GSD 2.5). In particular, the levels of hydrogen sulfide in the confined manure storage facilities were higher than those in open-type facilities and the peak concentration(98 ppm) in the confined facilities was approximate to 100 ppm, at the value of Immediately Dangerous to Life or Health(IDLH).

Conclusions: Suffocation accidents caused by hazardous gases at a swine farm have occurred annually. Real-time monitoring of the hazards should be done in order to protect farm workers and livestock from the sudden accidents.

Key words : pig building, manure storage facility, composting facility, farm worker

I. 서 론

국내 양돈업은 과거 가족 중심의 소규모 사육방식에서 현대화된 시설에서 농장주가 근로자를 고용하여 대규모집약형으로 운영하는 구조로 점차 변화되어 왔다(Kim et al., 2006). 양돈 통계자료에 따르면,

전체 양돈농가 수는 1960년 1,096,730호에서 2010년 7,347호로 줄어든 반면, 사육돼지 수는 1,397,139마리에서 9,880,632마리로 급격히 증가하였다(MIFAFF, 2012). 가족사육규모가 커짐에 따라 가족의 생산성관리와 온습도 등 사육환경의 제어가 용이한 밀폐형 축사(Confined Animal Feeding Operation, CAFO)가

*Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2734, E-mail: csyoon@snu.ac.kr

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-742

Received: November 5, 2013, Revised: November 18, 2013, Accepted: December 12, 2013

보편화 되었다(Donham et al., 1986; Kim & Kim, 2003). 그러나 사육동물의 수가 증가함에 따라 축사 내부의 사육밀도가 높아지고, 밀폐공간의 특성상 내·외부의 공기교환이 어려워짐으로써 가축의 분비물이나 분뇨로부터 발생하는 유기분진, 미생물, 가스 등 유해물질에 대한 작업자와 가축의 노출 위험성은 더욱 높아지고 있다(Throne et al., 2009).

암모니아와 황화수소는 양돈 축사 내부에서 기인하는 유해물질 중 대표적인 유해가스로서 가축의 분뇨가 혐·호기성 미생물에 의해 분해되는 과정에서 생성되는데, 특히 호흡성 유기분진에 흡착되어 작업자와 가축의 호흡기를 통해 흡입될 경우 더욱 심각한 위험을 가할 수 있는 요인으로 작용할 수 있다(Bottcher, 2001). 또한 악취 유발로 인해 해당 작업자는 물론, 축사 주변 지역주민에 이르기까지 불쾌감을 야기하여 민원이 폭증하게 되고, 이는 지역사회의 갈등으로까지 이어지는 심각한 문제로 대두되고 있다(Sun et al., 2008).

국내 고용노동부에서는 암모니아와 황화수소의 노출로 인한 근로자의 건강장해 예방을 위하여 각 항목에 대하여 8시간가중평균농도(8hr Time-weighted average)와 단시간노출기준농도(Short-term exposure limit) 기준을 정하고 있다. 암모니아의 8시간가중평균농도와 단시간노출기준농도는 각각 25 ppm, 35 ppm, 황화수소의 경우 각각 10 ppm, 15 ppm으로 노출기준이 설정되어 있다(MOEL, 2013). 한편, 악취유발로 인한 축사 주변지역에서의 민원이 꾸준히 제기됨에 따라 환경부에서는 2005년부터 악취방지법을 제정 및 시행하고 있다. 악취방지법이 시행되면서 기존 관리대상이 축사시설에서 지역으로 확대됨에 따라 암모니아와 황화수소에 대한 배출 허용기준을 각각 1 ppm, 0.2 ppm으로 설정하여 악취발생에 대한 규제를 강화하고 있다(Lee & Lee, 2010).

양돈장 작업자들이 암모니아와 황화수소에 상시 노출될 수 있는 주 작업 장소는 돈사내부와 분뇨저장시설, 퇴비화시설로 구분할 수 있다. 가축관리와 시설유지보수 등 사육을 위한 작업이 돈사내부에서 이루어지며, 돈사로부터 발생하는 가축 분뇨의 재활용을 위한 분뇨저장시설과 퇴비화시설에서도 간헐적 작업이 이루어진다. 특히, 분뇨저장시설에서의 분뇨처리작업은 단시간동안 고농도의 황화수소에 노출될 경우 질식으로 인해 사망에 이를 수 있는 위험작업

이다. 고농도의 황화수소가 호흡기로 흡입될 경우 호흡 기능이 저하됨으로써 체내 산소분압이 떨어지는 저산소증이 발생할 수 있으며, 이에 뇌의 산소공급이 떨어져 결국 의식을 잃는 녹다운 현상(Knockdown effect)이 발생함으로써 질식사로 이어질 수 있다(Milby & Baselt, 1999). 실제 매년 유해가스 노출로 인한 질식사 사고 사례가 꾸준히 발생하고 있는데, 국내 돈사에서 분뇨처리 시 발생한 질식사 사고 사례를 분석한 결과 1998년부터 2013년까지 15년 동안 28명이 분뇨저장시설에서 작업 시 사망한 것으로 보고되었다(Jin et al., 2013).

기존 양돈 작업장에 대한 연구는 제한되기도 하였지만 이루어진 연구 또한 돈사만을 대상으로 하거나 분뇨처리시설만을 대상으로 하는 등 한 작업 장소를 대상으로 평가한 것이 대부분이다. 따라서 양돈 농가 내 작업장소 별 농도를 비교하여 어떤 작업에서 어떤 유해가스가 어느 정도 발생하는지에 관한 규명이 필요하다. 또한 기존의 여재와 펌프를 이용한 노출농도 정량방법만으로는 질식사 사고 방지를 위한 순간적인 위험성을 파악하기에 제한적이므로 이에 대한 보완방안이 필요하다. 현재까지 국내 양돈장 작업환경 중 유해인자에 대한 연구결과가 일부 보고되었으나, 국외 연구에 비해 다양한 시도가 이루어지지 못하였다. 본 연구에서는 양돈장 작업 종사자들의 주 작업장소인 돈사, 분뇨저장시설, 퇴비화시설에서 암모니아와 황화수소의 노출농도를 평가하여 비교하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

양돈농가는 경기도 내 양돈농가 6곳을 선정하였으며, 동절기의 경우 축사 내부 온도조절을 위해 밀폐형으로 운영이 되므로 실제 작업자와 가축의 고농도 노출이 예상되는 동절기(2013년 1월~3월)에 현장조사를 실시하였다. 양돈장 작업자들이 유해인자에 주로 노출될 수 있는 주 작업장소인 돈사와 분뇨저장시설 및 퇴비화 시설을 대상으로 하였으며, 돈사는 농장의 허가 상황에 따라 비육돈(Growing-finishing pig)사와 자돈(Nursery pig)사 중 한 곳을 측정하거나 두 돈사 모두 측정하였다. 측정대상 농가는 모두 돈사로부터 모아진 분뇨를 모아 저장하는 시설을 갖추

었으며, 퇴비화 시설의 경우 설치되어 있는 농가의 경우에만 가스 측정을 실시하였다.

2. 측정방법 및 자료처리

암모니아와 황화수소의 농도는 실시간 데이터 로깅이 가능한 복합가스측정기를 이용하여 측정을 실시하였다(Multi-RAE Lite, RAE system Inc., USA). 복합가스측정기는 전기화학적 원리를 이용한 센서가 장착되어 암모니아, 황화수소에 대한 동시 측정 및 실시간 데이터 저장이 가능하다. 측정기기에 관한 정보는 Table 1과 같으며, 암모니아와 황화수소에 대한 기기의 분해능은 각각 1 ppm, 0.1 ppm이며, 측정가능 범위는 0에서 100 ppm이다.

복합가스측정기는 현장 측정 전 순수 공기를 이용한 영점보정(Zero calibration)을 실시한 후 제조사에서 제공한 50 ppm의 암모니아와 25 ppm의 황화수소 표준가스(CALCAZ Inc, USA)를 이용하여 보정하였다. 가스측정과 함께 IAQ-CALC Air Quality Meter (Model 7545, TSI Inc, USA)를 이용하여 이산화탄소와 온도 및 습도를 동시 측정하였다.

가스측정은 양돈장 작업자들의 주 작업장소인 돈사내부와 분뇨저장시설, 퇴비화시설을 대상으로 하였으며, 농장 작업상황과 실시간 기기 측정인 점을 고려하여 지역측정을 실시하였다. 고농도의 황화수소에 순간적으로 노출되었을 때 즉시 사망할 수 있기 때문에 이러한 위험성을 고려하여 측정기기의 농도변화 데이터를 5초 간격으로 로깅하였으며, 분 당 12개의 농도 데이터가 기기에 자동 저장되었다.

돈사의 경우 내부를 세 구역으로 구분하여 바닥으로부터 1.5 m 높이에서 각각 구역별 10분 동안 단시

간으로 측정하였으며, 분뇨저장시설과 퇴비화시설에서는 주기적인 작업이 이루어지지 않으므로, 교반봉을 제작하여 직접 교반을 실시함으로써 실제 분뇨처리 작업을 재현하였다. 교반작업에 의한 농도변화를 확인하기 위해 교반작업 전·중·후의 농도를 각각 3분, 9분, 3분으로 하여 총 15분간 측정하였다. 현장 조사와 작업자 인터뷰를 통해 가스 발생과 직접 관련될 수 있는 사육마리 수, 분뇨저장기간 등 돈사환경 및 운영과 관련된 기초정보를 수집하였다.

본 연구에서 측정한 암모니아와 황화수소 농도는 작업 장소에 따라 대수정규분포하거나 정규 분포함에 따라 본문에서의 대표 값들은 기하평균과 기하표준편차로 나타내었으며, 결과표에서는 산술평균과 표준편차, 기하평균과 기하표준편차, 중앙값을 함께 나타내었다. 작업 장소 별 농도차이를 평가하기 위해 SAS 9.3(SAS Institute, USA)를 이용하여 Student t-test와 분산분석 및 다중비교분석을 실시하였다.

III. 연구결과

1. 연구대상 양돈농가 정보

연구대상 양돈농가에 관한 정보는 Table 2에 나타내었다. 모든 농장에서 3~4인의 근로자들이 작업을 하고 있었으며, 이들은 돈사와 분뇨저장시설, 퇴비화시설을 오가며 일 평균 7~8시간 작업을 진행하였다.

6개 농장 중 B, D, E 농장에서는 비육돈사와 자돈사에 대한 가스 측정을 실시하였고, A, C, F 농장의 경우 농가 사정상 비육돈사 내부에서만 측정을 실시하였다. 측정대상 농가의 돈사의 경우 모두 자연환기 방식으로 운영되고 있었으며, 일부 자돈사의 경우 벽면에 기계 환기시설을 구비하고 있었으나 조사 당시 가동을 하지 않는 상태였다. 돈사 내부에서 분뇨를 수거하는 방식은 톱밥을 바닥에 깔아 분뇨와 섞이도록 하여 일괄 수거하는 Litter-bedding 형태(농장 A, B, C, D, E 비육돈사)와 돈사 바닥아래 별도의 분뇨저장시설이 있어 바닥으로부터 수거된 분뇨를 장기간 보관 후 수거하는 Deep-pit 형태(농장 B, D, F 자돈사 및 농장 F 비육돈사)로 이루어져 있었다. 분뇨저장시설의 경우 전면개방형태(농장 B, C)이거나 완전 밀폐형(농장 A, D, E, F)으로 운영되고 있었으며, 퇴비화시설은 모두 반개방 형태로 퇴비화 시킨 분뇨

Table 1. Specifications of Multi-gas Monitor

Instrument specifications		
Instrument	Multi-RAE Lite	
Sensor	Electrochemical sensors for NH ₃ , H ₂ S	
Datalogging	1 ~ 3,600 sec intervals	
Range	NH ₃	0 ~ 100 ppm
	H ₂ S	0 ~ 100 ppm
Resolution	NH ₃	1 ppm
	H ₂ S	0.1 ppm

Table 2. General information on the swine farms in this study

Farm	Sampling location	Volume of pig building (W×L×H,m)	Ventilation type of pig building	Manure collection system	Number of pigs	Workers	Working hours	Manure storage facility	Manure storage period (month)	Composting facility type	Compost disposal
A	- Pig building (G/F) [*]	63×11×3	- Natural	- Litter bedding (G/F)	226	3	7	Closed	8	Semi-closed	Collection & Reuse
	- Manure storage										
B	- Pig building (G/F)	58×9×4	- Natural(G/F)	- Litter bedding (G/F)	- 194	4	8	Open	3	Semi-closed	Collection & Reuse
	- Pig building (Nursery pig)	15×5×3	- Mechanical (Nursery pig)	- Deep-pit (Nursery pig)	- 85						
	- Manure storage	-	-	-	-						
C	- Pig building (G/F)	58×12×3	- Natural	Litter bedding (G/F)	153	3	7	Open	10	Semi-closed	Collection & Reuse
	- Manure storage										
D	- Pig building (G/F)	84×16×3	- Natural(G/F)	- Litter bedding (G/F)	- 148	4	8	Closed	12	Semi-closed	Collection & Reuse
	- Pig building (Nursery pig)	11×6×3	- Natural (Nursery pig)	- Deep-pit (Nursery pig)	- 106						
	- Manure storage	-	-	-	-						
E	- Pig building (G/F)	52×9×3	- Natural	- Litter bedding (G/F)	158	3	8	Closed	6	Semi-closed	Collection & Reuse
	- Manure storage										
F	- Pig building (G/F)	67×13×3	- Natural(G/F)	- Deep-pit(G/F)	- 148	4	8	Closed	6	Semi-closed	Collection & Reuse
	- Pig building (Nursery pig)	23×8×4	- Mechanical (Nursery pig)	- Deep-pit (Nursery pig)	- 106						
	- Manure storage	-	-	-	-						
	- Composting										

* G/F: Growing/finishing pig

를 저장·보관하였다.

2. 농장별 암모니아와 황화수소 농도

각 개별 농장과 각 농장 내 작업장소별 암모니아와 황화수소 측정 농도는 Table 3과 같다. 각 농장별 돈사내부, 분뇨저장시설, 퇴비화시설을 대상으로 측정된 결과로써, 전반적인 농도수준을 나타내었다.

암모니아는 D 농장을 제외한 모든 농장에서 돈사 내부의 노출 농도가 높은 수준을 보였다. A 농장의 비육돈사에서 측정된 암모니아의 기하평균 농도는 85.4 ppm(GSD 1.2)으로, B 농장 비육돈사 27.9 ppm(GSD 1.4), 자돈사 40.6 ppm(GSD 1.3), C 농장 비육돈사 7.4 ppm(GSD 3.2)ppm, D 농장 비육돈사

13.0 ppm(GSD 1.3), 자돈사 12.6 ppm(GSD 1.2), E 농장 비육돈사 37.3 ppm(GSD 1.6), F 농장 비육돈사 20.3 ppm(GSD 1.9), 자돈사 20.9 ppm(GSD 1.6)에 비해 현저히 높은 수준의 농도를 나타내었다. 특히 D 농장에서는 분뇨저장시설에서의 암모니아 농도가 43.2 ppm(GSD 1.1)으로, A 농장의 비육돈사, B농장의 자돈사, E 농장의 비육돈사와 함께 국내 암모니아의 단시간 노출기준 35 ppm을 초과하였다.

황화수소는 분뇨저장시설에서의 농도가 돈사 내부와 퇴비화 시설에 비해 높은 수준을 보였으며, 밀폐 시설인 경우 개방형 시설에 비해 농도가 더 높았다. A 농장 분뇨저장시설에서의 황화수소는 15.8 ppm (GSD 2.9), B 농장 4.2 ppm(GSD 2.8), C 농장 6.9

ppm(GSD 2.6), D 농장 19.5 ppm(GSD 2.2), E 농장 9.3 ppm(GSD 3.2), F 농장 9.7 ppm(GSD 4.1)의 농도를 보였다. A, D, E, F 농장의 분뇨저장시설은 완전 밀폐형으로 운영되는 곳으로, 개방형 시설의 B, C 농장에 비해 높은 농도를 보였고, 이 중 A와 D 농장에서의 농도는 국내 황화수소의 단시간 노출기준 15 ppm을 초과하였다.

3. 작업장소별 암모니아와 황화수소 농도

양돈장 작업자들의 주 작업 장소인 돈사내부와 분뇨저장시설, 분뇨퇴비화 시설에서의 노출농도 수준을 비

교하였다. 암모니아는 각 농장의 돈사 내부와 퇴비화시설에서 분뇨저장시설에 비해 농도가 높았으며, 황화수소는 분뇨저장시설에서 분뇨처리작업 시 다른 작업 장소에 비해 현저히 높은 농도 수준을 보였다.

농가 전체의 작업 장소별 농도를 비교한 결과 (Figure 1), 암모니아는 돈사 내부에서 22.6 ppm(GSD 2.3)로 분뇨저장시설의 10.4 ppm(GSD 2.7), 퇴비화 시설의 8.6 ppm(GSD 2.8)에 비해 노출이 높은 장소 ($p<0.0001$)였고, 황화수소는 분뇨저장시설에서 9.8 ppm(GSD 3.2)로 돈사 내부의 2.3 ppm(GSD 2.3), 퇴비화 시설의 1.9 ppm(GSD 2.5)에 비해 노출이 높은

Table 3. Concentrations of ammonia and hydrogen sulfide at each farm

Farm	Sampling location	Sampling time (min)	Concentration(ppm)								Temp. (°C)	Relative humidity (%)	
			NH ₃				H ₂ S						CO ₂
			Mean±SD*	GM† (GSD‡)	Median	Range	Mean±SD	GM (GSD)	Median	Range			Mean±SD
A	Pig building(G/F [§])	25	86.2±10.0	85.4(1.2)	85.0	22.0-100.0	2.9±3.9	1.9(2.4)	1.3	0.9-19.0	2416.7±59.1	23.4	80.3
	Manure storage	20	16.5±5.5	15.6(1.4)	15.0	0.0-19.0	23.7±23.9	15.8(2.9)	16.7	1.6-92.9	543.4±65.5	9.2	39.3
	Composting	16	11.2±1.3	11.3(1.2)	11.0	9.0-14.0	3.2±1.6	2.8(1.8)	3.1	0.6-7.1	568.6±123.3	9.6	38.7
B	Pig building(G/F)	15	29.0±6.8	27.9(1.4)	31.0	2.0-38.0	1.9±0.7	1.8(1.5)	1.6	0.9-3.8	2160.9±56.2	22.7	73.1
	Pig building (Nursery pig)	15	41.8±7.9	40.6(1.3)	44.0	5.0-54.0	0.5±0.7	0.8(1.8)	0.4	0.0-3.7	1920.2±143.7	22.4	72.9
	Manure storage	23	4.0±0.8	4.2(1.2)	4.0	2.0-6.0	5.2±5.1	4.2(2.8)	3.1	0.0-20.6	408.4±12.5	9.5	41.0
	Composting	15	4.7±3.9	3.3(2.4)	3.0	1.0-17.0	0.5±1.1	1.6(1.9)	0.0	0.0-5.0	447.0±17.5	7.0	41.9
C	Pig building(G/F)	32	11.7±11.8	7.4(3.2)	9.0	0.0-59.0	2.4±2.2	2.8(2.1)	2.3	0.0-14.2	1924.6±92.2	19.9	70.7
	Manure storage	22	7.6±3.2	6.2(2.2)	11.0	1.0-11.0	8.7±5.1	6.9(2.6)	9.1	0.0-20.9	603.2±76.5	12.2	36.1
	Composting	15	9.5±0.8	9.5(1.1)	10.0	7.0-11.0	4.8±1.1	4.7(1.3)	5.1	1.9-6.7	645.2±82.3	11.6	37.8
D	Pig building(G/F)	30	13.2±2.1	13.0(1.3)	14.0	0.0-19.0	5.5±5.2	4.5(1.7)	4.8	1.0-42.2	2037.3±103.5	26.5	74.1
	Pig building (Nursery pig)	15	12.7±2.2	12.6(1.2)	13.0	8.0-16.0	0.6±0.3	0.7(1.3)	0.7	0.0-1.0	1955.4±177.2	23.4	75.3
	Manure storage	28	43.5±5.4	43.2(1.1)	42.0	38.0-59.0	28.1±28.4	19.5(2.2)	14.3	5.8-98.0	4894.4±125.6	9.2	54.5
E	Pig building(G/F)	30	40.6±14.0	37.3(1.6)	46.0	10.0-60.0	3.5±2.9	3.1(2.0)	3.0	0.0-29.6	2023.9±294.8	22.0	83.6
	Manure storage	15	8.9±3.6	7.9(1.8)	10.0	1.0-16.0	17.3±18.5	9.3(3.2)	7.2	1.1-65.8	2066.0±85.32	11.7	35.6
	Composting	15	27.4±9.7	26.1(1.4)	24.0	18.0-56.0	0.5±1.1	1.5(2.0)	1.0	0.0-5.0	705.6±80.4	10.3	34.0
F	Pig building(G/F)	15	23.4±9.1	20.3(1.9)	28.0	4.0-31.0	2.5±1.8	2.0(2.1)	2.4	0.0-8.0	1722.6±153.8	21.8	71.9
	Pig building (Nursery pig)	15	22.3±5.1	20.9(1.6)	24.5	1.0-26.0	1.7±0.2	1.7(1.2)	1.8	0.6-2.1	1468.5±169.8	20.6	64.5
	Manure storage	14	7.3±5.3	5.9(1.9)	5.0	2.0-24.0	16.4±18.6	9.7(4.1)	9.0	0.0-65.8	703.1±75.5	8.5	37.3
	Composting	16	17.6±8.7	13.6(2.4)	22.5	2.0-25.0	0.7±0.2	0.7(1.3)	0.7	0.0-1.0	710.0±82.9	9.2	36.1
Overall	Pig building	-	30.7±24.2	22.6(2.3)	23.0	2.0-100.0	2.8±3.3	2.3(2.3)	2.1	0.0-42.2	1996.4±320.8	22.2	75.0
	Manure storage	-	16.7±15.9	10.4(2.7)	10.0	1.0-59.0	16.6±20.5	9.8(3.2)	10.3	0.0-98.0	1415.5±1628.5	9.8	41.6
	Composting	-	12.8±10.2	8.6(2.8)	10.0	1.0-56.0	1.7±2.0	1.9(2.5)	0.7	0.0-7.1	1996.4±320.8	9.6	37.2

* Standard deviation, † Geometric mean, ‡ Geometric standard deviation, § Growing/finishing pig
 * Korean Occupational Exposure Limits for ammonia and hydrogen sulfide (equal to OSHA PEL) : NH₃ - TWA 25 ppm, STEL 35 ppm, H₂S - TWA 10 ppm, STEL 15 ppm.

Table 4. Concentration differences of ammonia and hydrogen sulfide according to the workplace

Gas	Concentration(ppm)												MSE*	F-value	Overall p-value
	Pig building			Manure storage facility				Composting facility							
	Mean ±SD	GM (GSD)	Median	Range	Mean ±SD	GM (GSD)	Median	Range	Mean ±SD	GM (GSD)	Median	Range			
NH3	30.7±24.2	22.6 (2.3)	23.0	0.0-100.0	16.7±15.9	10.4 (2.7)	10.0	1.0-59.0	12.8±10.2	8.6 (2.8)	11.0	0.0-56.0	80503.4	178.7	p<0.0001
H2S	2.8±3.3	2.3 (2.3)	2.1	0.0-42.2	16.6±20.5	9.8 (3.2)	10.3	0.0-98.0	1.7±2.0	1.9 (2.5)	0.7	0.0-7.1	63720.4	622.9	p<0.0001

*Mean square error.

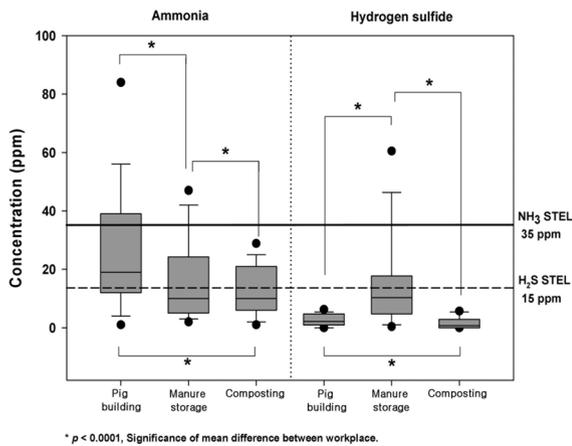


Figure 1. Comparison of ammonia and hydrogen sulfide according to the workplace

장소임을 알 수 있었다($p < 0.0001$).

각 작업 장소 별 농도변화를 확인하기 위한 실시간 모니터링 결과, 돈사에서 암모니아 최고농도는 100 ppm, 분뇨저장시설에서의 황화수소 최고농도는 98 ppm로 미국산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서 제시한 IDLH(Immediately Dangerous to Life or Health) 100 ppm에 가까운 결과를 보였다. Figure 2는 분뇨저장시설에서의 교반작업 시 암모니아와 황화수소의 실시간 농도변화의 예를 나타낸 것이다. 교반작업에 의해 황화수소 농도가 증가함을 알 수 있으며, 이에 따라 작업시간 동안 위험 농도 이상으로 지속될 경우 즉각적인 조치가 가능하다.

Table 5는 개별 작업 장소 간의 다중비교를 위한 사후검정을 실시하여 돈사내부와 분뇨저장시설, 퇴비화시설의 개별 작업장소간 암모니아와 황화수소의 농도차이를 나타낸 결과이다. 암모니아의 경우 돈사

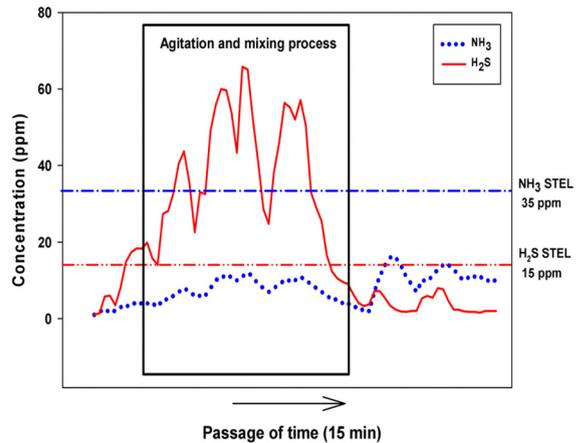


Figure 2. Identification of temporal variation for ammonia and hydrogen sulfide at the manure facility

와 분뇨저장시설간의 농도차이는 11.93 ppm, 돈사와 퇴비화시설 간의 농도차이는 15.78 ppm, 분뇨저장시설과 퇴비화시설 간의 차이는 3.85 ppm으로 장소별 유의한 차이를 보였으며($p < 0.05$), 황화수소의 경우 돈사와 분뇨시설, 돈사와 퇴비화시설, 분뇨저장시설과 퇴비화시설 간의 농도차이는 각각 -13.79 ppm, 1.16 ppm, 14.96 ppm으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 따라서 양돈장 작업자들의 암모니아와 황화수소에 대한 노출농도 수준은 각 작업장소별로 차이가 있었으며, 암모니아의 경우 돈사내부, 분뇨저장시설, 퇴비화시설 순으로 고농도를 보였고, 황화수소의 경우 분뇨저장시설, 돈사내부, 퇴비화시설 순으로 고농도에 노출될 수 있음을 알 수 있었다.

Figure 3은 비육돈사와 자돈사에서의 노출 농도수준을 비교한 결과이며, 두 돈사를 모두 측정된 농장 B, D, F에서의 결과를 바탕으로 제시하였다. 비육돈사 내부의 암모니아 농도는 17.7 ppm(GSD 1.6)으로

Table 5. Mean differences of ammonia and hydrogen sulfide between workplace by Post hoc Tukey test

Gas	Workplace	Mean difference of NH ₃ and H ₂ S		
		Pig building	Manure storage facility	Composting facility
NH ₃	Pig building	-	11.93*	15.78*
	Manure storage facility	-11.93*	-	3.85*
	Composting facility	-15.78*	-3.85*	-
H ₂ S	Pig building	-	-13.79*	1.16*
	Manure storage facility	13.79*	-	14.96*
	Composting facility	-1.16*	-14.96*	-

*p<0.05

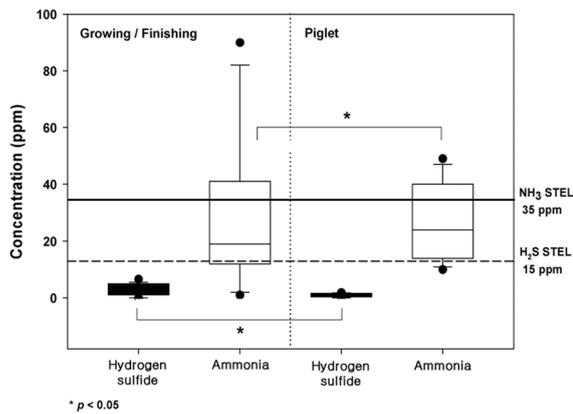


Figure 3. Comparison of ammonia and hydrogen sulfide according to pig type

자돈사 22.4 ppm(GSD 1.8)과 차이를 보였으며 (p<0.0001), 황화수소의 경우 비육돈사에서 3.0 ppm(GSD 2.0)으로 자돈사의 0.9 ppm(GSD 1.7)과 차이를 보였다(p<0.0001). 특히, D 농장 비육돈사와 자돈사에서 암모니아 농도는 각각 13.0 ppm(GSD 1.3), 12.6 ppm(GSD 1.2)으로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 황화수소 농도는 각각 4.5 ppm(GSD 1.7), 0.7 ppm(GSD 1.3)으로 차이를 보였다(p<0.0001).

IV. 고 찰

본 연구는 양돈업 종사 근로자들의 작업이 이루어지는 주 작업 장소, 즉 돈사 내부와 분뇨저장시설, 퇴비화시설을 대상으로 암모니아와 황화수소에 대한 노출농도를 실시간으로 평가함을 목적으로 실시되었

다. 축산업 중 특히 양돈 축사 내 암모니아와 황화수소의 발생량과 농도는 다른 산업에 비해 상대적으로 높으며, 실내온도 유지를 위해 밀폐형으로 유지되는 겨울철의 경우 환기가 제한되므로 양돈장 작업자의 고농도 노출의 위험이 따를 수 있다(Kim et al., 2006).

양돈 작업장에서의 암모니아 농도는 돈사 내부의 환기량이나 육종, 사육마리 수 등에 따라 변이가 클 수 있으나, 본 연구에서는 돈사 내부에서 22.6 ppm, 순간 최고 농도는 100 ppm으로 분뇨저장시설의 10.4 ppm과 퇴비화시설에서의 8.6 ppm에 비해 높은 수준을 보였다.

많은 연구에서 돈사를 대상으로 한 암모니아 평가가 수행되었는데, Ni et al.(2000)의 연구에서는 6-15 ppm 수준을 나타내었고, Groot Koerkamp et al.(1998)의 연구에서도 5-18 ppm으로 비슷한 수준을 나타내었다. Zhu et al.(2000)의 연구에서는 기계 환기시설 가동 전·후 암모니아 농도 변화를 비교하였는데, 가동 전 9-15 ppm에서 가동 후 3-5 ppm 수준으로 낮아지는 결과를 보였다. 다른 연구와 비교하였을 때 양돈장 조건과 환경의 차이와 측정방법 및 측정시간의 차이가 있으나 본 연구에서는 상대적으로 높은 암모니아 농도를 나타내었다.

한편, 돈사에서의 황화수소 농도는 평상 시 돈사 유형별로 0.5-3.4 ppm 수준을 보이는 것으로 알려져 있으나(Zhu et al., 2000; Hoff et al., 2006), 본 연구에서는 2.3 ppm으로 다소 높은 수준을 보였다. 측정이 단시간으로 이루어진 점과 측정방법 또한 실시간 기기를 이용하였기 때문에 상대적으로 장시간동안 모

니터링 한 다른 연구와 직접적 비교는 어려우나 본 연구에서 높은 수준을 보인 것은 짧은 측정시간과 겨울철 온도조절을 위해 환기가 충분히 이루어지지 못한 것에 의한 것이라 판단된다. 돈사 내 분뇨처리 및 청소와 같은 특정 작업이 이루어질 경우 14 ppm 수준까지 발생한다는 보고가 있으며(Lim et al., 2004), 분뇨저장시설에서 처리작업이 이루어질 경우 36 ppm까지 발생한다는 보고가 있다(Hoff et al., 2006). 본 연구에서도 분뇨처리 작업을 재현하였을 때 평균 9.8 ppm의 농도수준을 보였으며, 완전 밀폐형 분뇨저장시설에서는 19.5 ppm으로 위험 수준을 나타내었다.

기존 국내에서 양돈 작업장 내 유해인자의 평가에 관한 연구는 현장접근의 어려움과 돈사 환경과 위생에 대한 기피로 인해 극히 제한적으로 이루어져 왔다. 특히, 양돈 작업장에서 발생하는 유해가스 관한 연구에서는 능동식 시료채취 방법을 주로 이용하여 일정 시간동안의 평균농도만을 제시하였으며, 대상 작업공간 또한 돈사 내부로 한정되었다(Kim et al., 2003; Kim et al., 2006). 양돈장 작업자들이 유해가스에 노출 될 수 있는 공간은 돈사뿐만 아니라 분뇨저장 및 처리가 이루어지는 시설과 분뇨의 재활용을 위한 퇴비화 시설에서도 작업 중 노출이 이루어질 수 있으며, 특히 밀폐형 분뇨저장시설의 경우 고농도의 유해가스에 노출됨으로써 질식으로 인한 사망사고가 매년 발생하는 위험작업장소로 꼽힌다. 고농도의 유해가스에 노출로 인해 발생하는 질식 사고는 대개 단시간에 이루어지기 때문에 즉각적인 농도 파악이 필요하다. 펌프와 여재를 이용한 기존의 능동식 채취방법은 측정시간 동안의 평균 농도만을 제시할 수 있으며, 순간적인 농도변화를 파악하기에 제한점이 있다(Badajgbo et al., 2007). 실시간 기기를 이용하는 방법은 측정시간 동안의 농도변화는 물론 측정시간 동안의 평균 농도 값을 모두 제시할 수 있는 장점을 가지며, 주기적인 기기 보정으로 측정의 정확성만 확보가 된다면 편리한 사용이 가능하다. 이러한 장점으로 인해 최근에는 축산 작업장을 대상으로 실시간 기기를 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다(Chai et al., 2010; Mihina et al., 2012; Ni et al., 2012).

본 연구에서 작업장소별 암모니아와 황화수소의 노출 농도를 평가함에 있어, 암모니아의 경우 돈사내

부, 분뇨저장시설, 퇴비화시설 순으로 고농도로 검출되었다. 돈사 내부는 사육 가축의 밀도가 높고, 겨울철 밀폐공간에서 환기가 제대로 이루어지지 못한 상태에서 가축 분뇨의 혐기성 분해와 가축의 움직임으로 인해 발생하는 암모니아가 고농도로 발생할 수 있다(Mihina et al., 2012). 돈사 내부의 가축 분뇨는 분뇨저장시설에서와 같이 인위적인 교반(Agitation & mixing)이 이루어지지 않기 때문에 황화수소의 발생량은 상대적으로 적은 것으로 추정된다. 황화수소의 경우 분뇨저장시설, 돈사내부, 퇴비화시설 순으로 고농도가 검출되었다. 특히 분뇨저장시설이 완전 밀폐형으로 된 경우(농장 A, D, E, F) 개방 형태로 된 곳에 비해 높은 수준을 보였는데, 개방형태에 따라 발생 농도의 차이가 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 분뇨저장시설에서는 분뇨처리작업 시 분뇨의 교반과정이 이루어지므로 이 때 단시간에 고농도의 황화수소가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이전 연구에서도 분뇨처리작업에서의 황화수소 발생에 관한 위험성을 제시하고 있다(Panti & Clarke, 2003; Muhlbaauer et al., 2008).

한편, 퇴비화 시설에서는 황화수소의 농도는 미미한 데 반해 암모니아의 농도가 높게 나타났다. 퇴비화 시설에서는 분뇨의 재활용을 위한 탈수과정까지 마무리 된 상태로써 질소 성분을 함유한 돈분이 시간이 경과함에 따라 탈카르복실화 되면서 암모니아를 발생하게 된다(Spoelstra, 1980). 양돈장에서 발생하는 황화수소의 주 발생원은 생성하는 가축분뇨에서 기인하는 것이며, 가축 사료 내 황을 함유한 단백질과 아미노산이 미생물에 의해 분해되는 과정에서 발생한 유기성 황 성분이 황 화합물을 생성하게 된다(Clanton & Schmidt, 2000). 분뇨저장시설에서 분뇨는 액상형태로 보관되는데, 저장 층의 깊이에 따라 pH가 달라진다. 액상분뇨의 pH에 따라 황 성분이 수소이온과 결합하는 정도가 다를 수 있으므로, 분뇨의 교반작업이 이루어질 경우 고농도의 황화수소가 발생할 수 있다(Swestka, 2010). 따라서 분뇨저장시설의 경우 분뇨가 액상형태로 보관되므로 처리과정 시 황화수소의 농도가 높은 반면, 탈수과정을 마친 퇴비화 시설에서는 상대적으로 암모니아의 농도가 높은 것으로 추정할 수 있다.

이전까지의 양돈 농가의 유해인자를 대상으로 한

국·내외 연구에서는 대부분 돈사 내부나 분뇨저장 시설을 대상으로 동일 유형의 작업 장소 간 평가가 주로 이루어져 왔다. 실제 양돈장 작업자들은 작업 장소 한 곳에만 머무르지 않고 농가 내 여러 장소를 오가며 작업을 하므로 모든 노출 가능 작업 장소에서의 평가가 필요하다. 최근 측정기기의 성능 또한 발달함에 따라 실시간 기기를 이용한 측정의 정확성 및 정밀성이 과거에 비해 많이 향상되었다. 일부 농가에서 축사 내부에 실시간 유해가스에 대한 모니터링이 가능한 장비를 구비하고 있으나 제대로 활용이 이루어지지 않고 있으며, 아직 대부분의 양돈농가에서 작업자들이 유해가스의 위험성에 대해 인지하고 있으나 이를 확인하는데 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 원거리에서 작업장 내 유해가스에 대한 모니터링이 가능한 무선형 측정 시스템(Wireless sensor network)이 개발되었으며, 실제 국외 연구에서 무선 장비를 이용한 연구도 이루어진 바 있다(Kim et al., 2006; Swestka, 2010).

실제 양돈장 작업장을 비롯한 축산업종의 작업환경을 평가한 연구는 아직까지도 많이 이루어지지 못하고 있다. 본 연구에서는 고농도 노출이 예상되는 작업을 대상으로 단시간 동안 측정되었으나, 연구결과 암모니아와 황화수소의 단시간 노출기준을 초과하는 경우가 많았다. 이전 연구에서도 대부분 일회성 조사형식이나 단시간 측정으로 이루어졌으나 이는 작업장 내 유해가스 농도 변이의 일부분만을 대표할 수 있다. 따라서 추후 양돈업을 비롯한 축산작업장에 대한 장시간 또는 지속적인 모니터링에 관한 연구가 진행될 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 국내 경기도 지역 내 양돈농가 6곳을 대상으로 하였으며, 양돈장 작업자들의 주 작업장소인 돈사와 분뇨저장시설, 퇴비화시설에서의 암모니아와 황화수소의 노출 농도 수준을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 돈사내부에서 암모니아의 농도는 분뇨저장시설과 퇴비화시설에 비해 상대적으로 높은 수준을 보인 반면, 황화수소의 경우 분뇨저장시설에서 높은 수준을 보였다.

2. 암모니아는 돈사내부(GM 2.6 ppm, GSD 2.3)와 분뇨저장시설(GM 10.4 ppm, GSD 2.7), 퇴비화시설(GM 8.6 ppm, GSD 2.8) 순으로 높은 농도 수준을 보였다.

3. 황화수소는 분뇨저장시설(GM 9.8 ppm, GSD 3.2)과 돈사내부(GM 2.3 ppm, GSD 2.3), 퇴비화시설(GM 1.9 ppm, GSD 2.5) 순으로 높은 농도수준을 보였으며, 밀폐형 분뇨저장시설에서의 농도는 개방형 시설에 비해 높은 농도 수준을 보였다.

본 연구에서 사용한 실시간 기기의 결과를 바탕으로 양돈작업장의 유해가스에 대한 위험성을 파악할 수 있었다. 최근에도 유해가스 질식으로 인한 축산 작업자들의 사망사고가 빈번히 발생하고 있으므로, 실제 양돈 작업장에서의 유해가스에 대한 근로자들의 위험성 인지와 비상 시 즉각적인 대처를 위한 실시간 모니터링이 필요하다.

감사의 말씀

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ008678)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Badjagbo K, Sauv  S, Moore S. Real-time continuous monitoring methods for airborne VOCs. *TrAC Trend Anal Chem* 2007;26(9):931-940
- Botcher RW. An environmental nuisance: odor concentrated and transported by dust. *Chem senses* 2001;26(3):327-331
- Chai LL, Ni JQ, Chen Y, Diehl CA, Heber AJ et al. Assessment of long-term gas sampling design at two commercial manure-belt layer barns. *J Air Waste Manage* 2010;60(6):702-710
- Clanton CJ, Schmidt DR. Sulfur compounds in gases emitted from stored manure. *Transactions of the ASAE* 2000;43(5):1229-1239
- Donham KJ, Scallion LJ, Pependorf W, Treuhaft MW, Roberts RC. Characterization of dusts collected from swine confinement buildings. *Am Ind Hyg Assoc J* 1986;47(7):404-410
- Groot Koerkamp P, Metz J, Uenk G, Phillips V, Holden M et al. Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *J Agric*

- Engng Res 1998;70(1):79-95
- Hoff SJ, Bundy DS, Nelson MA, Zelle BC, Jacobson LD et al. Emissions of ammonia, hydrogen sulfide, and odor before, during, and after slurry removal from a deep-pit swine finisher. *J Air Waste Manage* 2006;56(5):581-590
- Jin SH, Seok JW, Kang TS, Yoon CS, Kim HC: Summary of documented fatalities in swine manure handling facilities in Korea (1998-2013). AIHce 2013 Student abstracts. Available from: <http://www.aiha.org/events/AIHce/AIHce2013Abstracts/2013%20Student%20Abstracts.pdf>
- Kim KY, Kim CN. Fluctuation of indoor air pollutants emitted from enclosed pig building in winter. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2003;13(3):191-197
- Kim KY, Park JB, Kim CN, Lee KJ. Field study of emission characteristics of ammonia and hydrogen sulfide by pig building types. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2006;16(1):36-43
- Kim Y, Evans R, Iversen W, Pierce F. Instrumentation and control for wireless sensor network for automated irrigation. An ASABE Meeting Presentation.;2006. Paper No. 061105
- Lee SJ, Lee EY. Emission characterization of ammonia produced from swine nightsoil. *Kor J Microbiol Biotechnol* 2010;38(3):308-314
- Lim T, Heber AJ, Ni JQ, Kendall D, Richert B. Effects of manure removal strategies on odor and gas emissions from swine finishing. *Transactions of the ASAE* 2004;47(6):2041-2050
- Mihina Š, Sauter M, Palkovicova Z, Karandusovska I, Broucek J. Concentration of harmful gases in poultry and pig houses. *Anim Sci Pap Rep* 2012;30(4):395-406
- Milby TH, Baselt RC. Hydrogen sulfide poisoning: clarification of some controversial issues. *Am J Ind Med* 1999;35(2):192-195
- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MIFAFF), Food, agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook(Public Notice No. 11-1541000-000078-10).; 2012. p. 130
- Muhlbauer RV, Swestka RJ, Burns RT, Xin H, Hoff SJ et al. Development and testing of a hydrogen sulfide detection system for use in swine housing. An ASABE Meeting Presentation.;2008. Paper No. 084203
- Ni JQ, Heber AJ, Diehl CA, Lim TT. Ammonia, Hydrogen Sulphide and Carbon Dioxide Release from Pig Manure in Under-floor Deep Pits. *J Agric Engng Res* 2000;77(1):53-66
- Ni JQ, Chai L, Chen L, Bogan BW, Wang K et al. Characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter concentrations in high-rise and manure-belt layer hen houses. *Atmos Environ* 2012;57(0):165-174
- Patni N, Clarke S. Gaseous emissions in swine barns and during slurry mixing in sub-floor pits. In: *Proc 2003 ASAE International Meeting 2003*
- Querellou E, Jaffrelo M, Savary D, Savry C, Perfus J. Fatal outcome of a hydrogen sulfide poisoning. *Ann Fr Anesth Reanim* 2005;24(10):1302-1304
- Spoelstra S. Origin of objectionable odorous components in piggery wastes and the possibility of applying indicator components for studying odour development. *Agric Environ* 1980;5(3):241-260
- Sun G, Guo H, Peterson J, Predicala B, Laguë C. Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms. *J Air Waste Manage* 2008;58(11):1434-1448
- Swestka R. A Wireless sensor network to quantify hydrogen sulfide concentrations in swine housing. Hydrogen sulfide spatial distribution and exposure in deep-pit swine housing. Graduate Theses and Dissertations of Iowa State University.; 2010. Paper 11416
- Thorne PS, Ansley AC, Perry SS: Concentrations of bioaerosols, odors, and hydrogen sulfide inside and downwind from two types of swine livestock operations. *J Occup Environ Hyg* 2009;6(4):211-220
- Zhu J, Jacobson L, Schmidt D, Nicolai R. Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities. *Appl Engng Agric* 2000;16(2):153-158