

# 세정순환 시스템 과 에어와셔 시스템 설치 양돈 농장의 암모니아 와 황화수소 발생량 비교

박철주, 선상수  
전남대학교 동물자원학부  
e-mail:sssun@jnu.ac.kr

## Comparison of ammonia and hydrogen sulfide production in swine farm after circulation washing system (CWS) and air washer system (AWS) operation

Cheol Ju Park, Sang Soo Sun  
Dept. of Animal Science, Chonnam National University

### 요 약

본 연구는 돈사 세정순환 시스템 (Circulation washing system, CWS) 과 에어와셔 시스템 (Air washer system, AWS)을 설치한 양돈장을 선정하여 암모니아와 황화수소를 측정하여 비교하였다. CWS는 호기성 액비에 연계하여 용수 공급용 관개 관로 형태를 갖는 액비 공급관을 통하여 피트 하부에 지속적으로 공급하여 세정수의 흐름을 만들어내어 악취를 저감시킬 수 있다. AWS는 축사의 오염공기가 에어와셔에서 물과 접촉하면서 암모니아가스가 물에 녹고, 바이오필터에 미생물이 생성되어 암모니아가스를 먹어 치움으로서 악취가 저감된 공기를 배출하는 방식이다. CWS 와 AWS 시설이 되어있는 2개 의 농장을 선정하여 대표적인 악취 물질인 NH<sub>3</sub> 와 H<sub>2</sub>S를 측정하였다. 2개의 농장에서 모두 H<sub>2</sub>S는 측정되지 않았으나, NH<sub>3</sub>는 AWS 설치 농장에서 0.5ppm 으로 측정되었다. 결론적으로 CWS 와 AWS 설치 돈사의 악취는 환경부가 정한 허용기준 이하로 측정되었다.

**Abstract** This study examined the NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S in swine farm which installed circulation washing system (CWS) and air washer system (AWS). CWS will reduce waste odor with continuous supply of aerobic liquid waste to inside slurry pit. AWS will diminish waste odor with inside contaminated air filtered through air washer system. Two swine farms, CWS and AWS installed, were selected and then NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S were measured. H<sub>2</sub>S was not detected in both farms, but NH<sub>3</sub> was detected 0.5ppm only in CWS swine farm. In conclusion, waste odor was under the range of DOE standard in CWS and AWS installed swine farms.

**Keyword** : Swine farm, circulation washing, air washing, Ammonia, Hydrogen sulfide

## 1. 서론

비위생적인 축사관리 및 부적절한 가축분뇨 관리는 악취뿐만 아니라 환경오염을 가중시키는 요인으로 지적되고 있으며 이로 인해 축산농가 인근 주민에 의한 민원 발생이 잦아 축산업에 대한 부정적 인식이 확대되고 있다. 양돈시설 냄새물질 중 자돈사의 암모니아 농도는 0.9~21.0ppm 이었으며, 비육사의 암모니아 농도는 1.5~11.3ppm, 모돈사 황화수소는 0.4 ppm 으로 검출 되었다. 돈사 내부에서 발생하는 악취가 돈사 외부로 방출되는 것을 억제하기 위하여 다양한 기술들이 개발되어 보급되고 있다. 축사에서 많이 이용되고 있는 기술이 액비순환 시스템, 배출구 쪽 바이오커튼 시설, 돈방 내부 물분사 스프레이 시설, 미생물제 처리, 라디칼수(OH-) 처리, 방진벽·방취림 설치, 바이오 에어와셔 시설 등의 방법이 있다 [1,3]. 유럽에서는 축사의 냄새저감 시설인 3단 바이오탈취 시스템(물, 화학, 생물학)을 연구하였다. 또한 양돈장에 바이오필터를 설치하여 NH<sub>3</sub>를 N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O 가스형태로 변환하여 배출함으로써 감소시킬 수 있다. [10]

세정순환 시스템 (Circulation washing system, CWS)은 액비저장조에서 발생하는 냄새를 제거하기 위해 먼지 밀폐가 되도록 덮개를 설치한다. 그리고 저장조 옆에 바이오필터 장

치를 설치하여 배출되는 냄새를 줄이도록 한다. 바이오필터 처리 시 암모니아 농도 가스가 89% 감소되었다고 한다. 액비화 시설과 퇴비화 시설에서 많이 이용하는 냄새저감 시설은 습식세정법이다. 습식세정 시스템은 공기 중의 가스나 먼지를 포집한 후 물, 화학 세정액, 미생물 배양액 등을 살포하여 냄새물질이외부로 배출되는 것을 줄이는 방법이다. 공기와 물의 접촉시간, 물 사용량 등에 따라 공기 중의 냄새물질 감소 수준은 다양하다 [13,14]

양돈농가는 돈사 외부로 배출되는 공기중의 냄새를 제거하기 위해 다양한 여과장치를 이용하고 있지만, 많은 먼지를 제대로 제거하지 못하여 냄새저감 효율이 낮다. 냄새물질은 먼지 입자에 부착되어 멀리 이동된다고 한다. 돈사 내부의 공기 중에는 먼지가 많기 때문에 먼지를 제거하면외부로 배출되는 냄새를 감소시킬 수 있다 [7,11]. 그래서 공기 중의 먼지를 포집하여 외부로 냄새가 배출되는 것을 줄여 주는 먼지 제거 시설을 설치하여 이용하고 있다. 에어와셔 시스템 (Air washer system, AWS)의 자연처리법을 이용한 공기정화시설은 암모니아 가스와 분진 그리고 냄새를 자연적인 방법으로 줄여준다. 또한 암모니아가스 제거(70% 감소), 악취제거, 분진제거, 그리고 공기정화의 역할을 한다. 돈사 전체 최대환

기량(여름철 기준)은 에어와서 단위면적당 ( $m^2$ ) 수용할 수 있는 용량( $6,200m^3/h$ )을 나누어 필요한 에어와서 단면적 크기를 산정한다.

본 연구의 목적은 돈사 세정순환 시스템 (Circulation washing system, CWS) 과 에어와서 시스템 (Air washer system, AWS)을 설치한 양돈장을 선정하여 암모니아와 황화수소를 측정하여 비교하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 액비를 이용한 악취 저감 돈사 세정순환 시스템 (Circulation washing system, CWS)

돈사의 피트 내 세정순환 시스템을 구성은, 1)호기성 발효 시스템에 의해서 만들어진 액비를 저장하는 액비 저장조 와; 2)액비 저장조 내에 저장된 액비를 피트의 일측 벽에서 정해진 높이에 관통되게 설치되어 있는 액비 공급관을 통해 공급시켜 주는 액비 송수 펌프 와; 3) 액비 공급관 상에 설치되어 액비 송수 펌프에서 피트 내로 송수되어 오는 액비의 공급량을 제어하는 액비 공급량 제어밸브 와; 4) 피트의 타측 벽과 집수조 사이에 설치되어있는 세정수 배출 파이프에 설치되어 피트의 내부를 세척하고 집수조 측으로 배출되는 액비의 배출량을 제어하여 피트 내의 수위가 일정 수위를 유지하도록 하는 액비 배출량 제어밸브 와; 5) 세정수 배출 파이프와 슬러리 및 세정수 배출용 파이프들을 통해 배출되는 세정수 및 돈 분뇨 슬러리를 포집하여 집수조 와; 6) 집수조에 집수된 세정수 및 돈 분뇨 슬러리를 분뇨 액과 고형분으로 고액분리한 다음 원심분리를 거쳐 분리한 분뇨액을 호기성 미생물을 이용하여 액비로 생산하여 액비 저장조로 보내주는 액비화조로 구성된 것을 특징으로 한다.

따라서, 개별농가에서 생산되어진 호기성 액비에 연계하여 용수 공급용 관개 관로 형태를 갖는 액비 공급관을 통하여 피트 하부에 지속적으로 공급하여 환경적 요인에 의한 영향을 받지 않고 세정수의 흐름을 만들어내어 악취를 저감시킬 수 있다. 또한 여러 질병으로부터 가축과 사육자를 보호하여 친환경 축산환경을 이룰 수 있다. 일정량의 액비를 자동적이고 지속적으로 공급하여 돈방의 세정을 간편하게 할 수 있다. 또한 이렇게 처리된 세정수 여액을 다시 호기성 액비화조로 순환시켜 줌으로서 시설의 부하 및 유입농도를 줄일 수 있고, 처리시설에 도움을 줄 수 있다. 결과적으로, 돼지의 성장에 치명적이 영향을 줄 수 있는 암모니아 나 황화수소 등 유해가스를 저감시킬 수 있어, 돼지의 폐사율을 대폭 줄일 수 있다.

### 2.2 악취-분진 제거 에어와서 시스템 (Air washer system, AWS)

에어와서 시스템은 축사의 오염공기가 에어와서에서 물과 접촉하면서 암모니아가스가 물에 녹고, 바이오필터에 미생물이 생성되어 암모니아가스를 먹어 치움으로서 악취가 저감된 공기를 배출하는 방식이다. 에어와서 시스템의 장점은 축사 악취를 친환경적인 생물학적 처리방식으로 화학제 사용 없이 축사악취를 저감시키는 장치이다. 강력한 복합의 2중 필터 구조로 되어있으며, 필터에 이물질 막힘 방지 및 필터 내 미생물 흡착 기능을 극대화 하였다. 또한 경제적으로 낮은 운영비로 운용이 가능하며, 간단한 유지 및 보수 관리로 가능하다.

### 2.3 Gastec 검지관

Gastec 기체 흡입장치와 암모니아(3L) 와 황화수소(4LT)를 분석할 수 있는 검지관으로 구성되어있다. 흡입장치는 50ml 와 100ml의 기체흡입 선택이 있으며, 흡입구에 검지관을 연결하여 기체를 흡입하여 측정할 수 있다. 검지관은 암모

니아( $NH_3$ ) 와 황화수소( $H_2S$ ) 등 측정할 수 있는 각각의 검지관이 있다. 암모니아( $NH_3$ ) 검지관의 양쪽 말단의 유리를 절단하고 Gastec 흡입장치에 흡입 방향으로 삽입한다. 흡입장치를 100ml로 조정하고 농장 방향으로 사람높이(약 170cm)에서 기체를 5회 흡입한다. 매회 흡입 작동시 손잡이 중앙부에 흰색 버튼을 확인하여 기체가 정량 정확히 흡입되었는지 확인하였다.

### 2.4 암모니아 측정

암모니아 측정장비는 Hario Sci (모델 HSP-10) 으로서 가장 정밀한 암모니아 측정기기이다. 측정 장비는 시료펌프 와 암모니아 포집장비로 되어있으며, 펌프에서 공기(가스)를 흡입하여 포집장비에 포집한다. 장비는 펌프에서 흡입하는데 돈사 내부와 외부의 기체를 포집1과 포집2를 통과하여 건조장치를 지나 펌프로 통한다. 돈사 내부 와 외부의 악취가 포함된 기체를 포집하여 0.5% 붕산(Boric Acid)에 포집하여 분석하는 방법이다. 기체는 분당 10.0L를 흡입하여 전체 50L의 기체를 흡입하여 0.5% 붕산에 포집하였다. 1차 포집장치에 20ml 0.5% 붕산을 넣고, 2차 포집장치에 20ml 0.5% 붕산을 추가하여 포집하고 각각 5.0ml 씩 포집장치를 세척하여 전체 50ml 의 시료가 되도록 하였다. 동시에 측정 당시의 기압 (mbar) 과 온도( $^{\circ}C$ )를 기록하였다. 기체의 흐름은 기압 과 온도 등에 따라 변화할 수 있기 때문에 이를 근거로 보정 하였다.

### 2.5 황화수소( $H_2S$ ) 측정

황화수소 측정 장비는 기체 포집장치와 기체 분석 장치 (Optima 7 Biogas, MRU)로 구성되어있다. 기체 포집장치는 일정 시간 동안 돈사 내부 와 외부의 공기(기체)를 직접 포집하여 분석 장치에서 황화수소를 측정하는 장치이다. 양돈장에서 포집장치에 기체를 Tedlar Bag(3L)에 포집하였다. 포집된 기체를 분석장치에 연결하고 1분 동안 기체를 흡입하여 황화수소를 측정 하였다. 동시에 산소( $O_2$ ), 이산화탄소( $CO_2$ ), 메탄( $CH_4$ ), 온도 등을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 양돈장의 돼지 사육현황

A 농장은 돼지를 일괄사육방식으로 12,000두를 사육하고 있다. 분뇨처리는 세정순환 방식(Circulation washing system, CWS) 설치하여 돼지들에게 쾌적하고 깨끗한 환경을 제공하고 있다 (table 1). A 양돈장에는 번식사에 웅돈 11두를 포함하여 후보돈 138두, 대기돈 61두, 임신돈 658두로서 전체 868두 번식돈이 사육되고 있다. 분만사에는 대기돈 74두, 포유돈 98두 자돈 1,185두로서 전체 1,357두가 사육되고 있다. 자돈사에는 어린 돼지 3,856두가 사육되고 있다. 또한 종돈은 3,385두가 있으며, 비육돈은 2,669두가 사육되고 있다. 종합적으로 본 농장은 일괄사육방식을 채택하고 있으며 종돈을 생산하는 목적으로 유지 관리되고 있다.

C 농장은 돼지 일괄사육방식으로 모돈과 자돈을 합하여 전체 6,000두를 사육하고 있다.(table 1) 악취 처리방식은 에어와서 시스템 (Air washer system, AWS) 를 설치하여 운영하고 있으며, 돼지들에게 쾌적하고 깨끗한 환경을 제공하고 있다. C양돈장의 돼지 사육두수는 모돈 500두, 포유자돈 800두, 육성자돈 1,600두, 비육돈 3,100두가 사육되고 있으며, 전체 6,000여두를 일괄사육방식으로 사육하고 있다. 돼지 백신 프로그램은 아래에 나타난바와 같이 후보돈, 모돈, 자돈 모두에게 일정하게 전염병 예방을 위하여 백신을 접종하고 있다.

돼지백신프로그램은 후보돈 (PRRS, PCV2, JE, PPV, APP, 구제역), 모돈(구제역, SHE, AR, PPV), 자돈(PCV2, 구제역, SHE) 등으로 구성되어있다.

Table 1. Number of livestock in Circulation washing system (CWS) and Air washer system (AWS) installed swine farm

Items	CWS (A farm)	AWS (C farm)
Reproduction barn	868	500
Delivery barn	1,357	
Nursery barn	3,856	2,400
Breeding barn	3,385	
Fatten barn	2,669	3,100
Container	64	
Total	12,199	6,000

CWS(Circulation washing system), AWS(Air washer system)

### 3.2 세정순환 시스템 (A 양돈장)에 의한 분뇨처리

A 농장은 돼지 일괄사육방식으로 13,000두의 돼지를 사육하고 있다. 돈사에서 발생하는 1일 액비발생량은 50톤이며, 1일 순환 처리 능력은 80톤에 이른다. 본 양돈장의 분뇨처리를 위한 최대저장용량은 돈사 5,800톤, 순환조 2,064톤, 및 저장조 3,150톤을 포함하여 전체 11,014톤을 처리할 수 있다 (table 2).

Table 2. Liquid manure production and treatment capacity in circulation washing system (CWS, A pig farm)

Items	Pigpen	Recycle	Storage	Total
Liquid manure (ton/d)	50	-	-	50
Recycle Vol (ton/d)	-	80	-	80
Max Storage Vol (ton)	5,800	2,064	3,150	11,014

돈사 세정순환 시스템 (Fig. 1)을 통한 액비순환 시스템은 돈사에서 ①분뇨배출 되면 ② 원수조로 유입되며, ③ 고액분리기를 통하여 고체(분) 과 액체(노)로 분리하여 고체는 퇴비장으로 보내지고 액체는 ④ 투입조에 유입된다. 투입된 액체는 여러개의 ⑤ 폭기조를 통하여 발효되고 ⑥ 침전조에서 다시 한번 고액 분리되며 ⑦ 순환조를 통하여 ⑧ 돈사에 재투입된다. 이러한 돈사 세정순환 시스템을 거치면서 액화하고 악취를 최대한 저감할 수 있다.

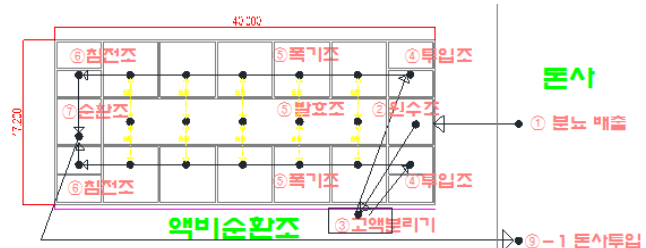


Fig. 1. Liquid manure circulation process in Circulation Washing System (CWS, A farm)

돈사로 재투입된 액비는 돈사내에 10배로 희석하여 평당 1L를 분사하며, 배양된 원액을 평당 10L를 슬러리 내에 살포한다 (table 3). 또한 순환조와 저장조에는 배양된 원액을 평당 10L를 살포한다. 결과적으로 최종 배출물은 악취 허용기준치인 암모니아 2 ppm이하, 황화수소 0.06 ppm 이하, 및 메틸메르캅탄 0.004 ppm 이하로 비교적 깨끗한 배출물을 배출한다. 미생물 배양액 사양은 질산화균 (암모니아 가스 저장용)을 이용하며, 배양방법은 미생물 배양기를 통해 37℃, 150rpm에서 18~20시간 배양 한다.

Table 3. Microorganism inoculation method in Circulation Washing System (CWS, A farm)

Spray in	Pigpen	Slurry	Circulation, Storage
Dilution	10X	original	original
Spray Vol./3.3m3	1L	10L/ton	10L/ton
Spray Interval	2~3/wk		2~3/wk

액비는 돈사에서 배출되어 액비 저장조를 거쳐서 액비 순환조에서 폭기를 통하여 발효과정을 거쳐서 돈사에 재투입된다. 폭기 모터는 5마력짜리 15대를 설치하여 가동하며, 질산화균 활동능력을 증대시키기 위하여 1일 6~7시간 이상 가동한다. 이 과정에서는 거품에 의한 넘침이 발생하지 않도록 타이머를 활용하여 관리하였다. 설치수량은 각 조별 1대 이상 (5마력 15대) 이며, 가동시간은 1일 6~7시간 이상(거품에 의한 넘침이 발생 하지 않도록 타이머 활용관리) 운영했다.

### 3.3 에어와셔 시스템(C 양돈장) 악취저감

C 양돈장의 분뇨처리는 저장 액비화 방식으로서, 발생량 일일 약30톤(월900톤) 이다. 이는 약5500톤 보유 (약6개월 저장용량) 저장조에 저장한다. 저장조에는 액비제조용 폭기 시설 설치되어있으며, 액비는 전량 위탁처리(농지살포) 한다. 환기방식은 채널환기 방식으로, 채널입기와 중앙에 배기 덕트를 이용하여 집중배기 튜브가 설치되어있다. 배기구에 에어와셔가 설치 (KBR,네덜란드) 되어 있다. 또한 전체 돈사에 쿨링패드가 설치되어있으며, 분만사에는 에어컨이 설치되어 있다.(fig 2)

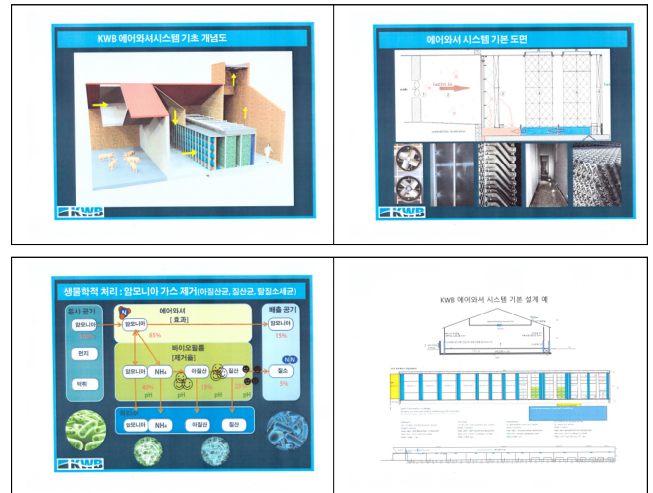


Fig 2. Air washer system (AWS) for reduction of odor and dust in swine farm(KWB)

### 3.4 Gastec 검지관 측정

Gastec 검지관 모든 양돈장에서 황화수소(H<sub>2</sub>S)는 검출되지 않았다. 암모니아(NH<sub>3</sub>)는 A 양돈장에서는 불검출이었으나 C 양돈장에서 0.5ppm으로 검출 되었다. 그러나 이러한 결과는 허용기준치 이하로 측정되었다. 한국환경공단의 허용기준치는 암모니아(NH<sub>3</sub>) 1~2ppm 와 황화수소(H<sub>2</sub>S) 0.002~0.004 ppm 이다. 일반적으로 돈사내부에서 발생하는 암모니아 농도는 8ppm (340 mg/h/m<sup>2</sup>), 황화수소는 300ppb (50 mg/h/m<sup>2</sup>) 정도 이다 [13,14].

부지경계에서 암모니아 발생농도는 평균 0.9~1.0ppm 였으나, 황화수소 와 메틸메르캅탄은 각각 0.37ppb, 0.01ppb로 기준치인 20ppb 와 2ppb 이하로 조사되었다 [4]. 이와 같은 원인은 돈사내 암모니아 발생 농도가 높았으며 돈사외부로 배출된 암모니아와 돈사 옆에 있는 퇴비장에서 발생하는 악취가

혼합되어 부지경계에서 암모니아 농도가 높은 것으로 나타났다. 돈사의 악취 저감을 위하여 돈사내부에 에어와서 시스템을 응용한 악취탈취장치를 설치하여 탈취한 공기는 덕트를 이용하여 0.5m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> 환기율로 돈사내부에 분배되도록 하면 암모니아 농도를 약 33.3% 줄일 수 있었다. [7,8]. 다른 악취 저감 방법으로 습식공기정화기를 설치한 돈사에서 암모니아의 농도는 85% 감소효과를 나타냈으며, 다른 악취는 45% 감소하였다. [7,11]. 그러나 바이오필터를 설치한 돈사에서 황화수소 농도는 5~7ppm으로 저감되었으며,[12] 호소복합체 살포는 돈사내 공기의 질을 개선하고 양돈장의 부지경계선에서의 복합악취 저감에도 효과적으로 작용하는 것으로 나타났다 [5].

Table 4. Ammonia(NH<sub>3</sub>) and hydrogen sulfide(H<sub>2</sub>S) in Circulation washing system (CWS) and Air washer system (AWS) swine farm

Items	CWS (A farm)	AWS (C farm)
Ammonia (NH <sub>3</sub> )	ND	0.5 ppm
Hydrogen sulfide(H <sub>2</sub> S)	ND	ND

### 3.5 황화수소 측정

황화수소(H<sub>2</sub>S)와 메탄(CH<sub>4</sub>)은 2개의 농장에서 모두 불검출 되었다 (table 5). 또한 대기중의 산소 농도는 21.0% 였으며, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도는 0.01%로서 모두 청정지역에서의 대기질 농도를 나타내고 있다. 측정 위치는 농장 부지 경계에서 1~3m이내에서 이루어 졌으며, 바람의 영향에 따라 일시적으로 다르게 나타날 수 있다. 그러나 황화수소(H<sub>2</sub>S) 측정당시 맑은 날씨였으며, 대기압은 1기압(1023~1028mbar) 수준으로 약간의 바람을 제외하면 최적의 상태에서 측정하였다. 물을 세정액으로 사용하는 습식세정식 탈취 시설의 암모니아 제거 효율은 28±10%, 황화수소 제거 효율은 2.2±1.7%이며, NaOH 수용액 (pH 10.44)를 세정액으로 사용하는 습식세정식 탈취 시설의 암모니아 제거 효율은 19±14%, 황화수소 제거 효율은 1.3±1.3%로 나타남. 액비를 세정액으로 사용할 경우 부숙이 잘된 것일수록 암모니아 제거율이 더 높게 나타났다 [1,3].

액비화 시설에서는 산소가 풍부하나 양분이 부족한 상태임으로 미생물 증식에는 그리 좋은 환경은 아니라 라고 판단할 수 있으며 미생물이 영양이 풍부한 돈사피트 슬러리로 재유입 되면서 다시 증식이 왕성해지는 것으로 판단된다 (Han et al., 2018). 또한 탄닌산과 불소 혼합물은 가축분뇨의 악취 발생량을 95% 이상 줄일수 있다 [2,15].

Table 5. Odor of Circulation washing system (CWS) and Air washer system (AWS) swine farm

Swine Farm	CWS (A farm)		AWS (C farm)	
Oxygen (O <sub>2</sub> )	21.0	21.0	21.0	21.0
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	0.01	0.01	0.01	0.01
Methane (CH <sub>4</sub> )	ND	ND	ND	ND
Hydrogen sulfide (H <sub>2</sub> S)	ND	ND	ND	ND
Inner Temp (°C)	24.0	24.0	24.1	24.0
Gas Temp (°C)	26.3	25.9	25.7	25.5

ND : non-detectible

결론적으로 2개 악취저감 시설 모두 메탄(CH<sub>4</sub>) 과 황화수소(H<sub>2</sub>S)는 불검출 되었다. 암모니아(NH<sub>3</sub>)는 CWS (A farm)에서는 불검출이었으나, AWS (C farm)에서 0.5ppm으로 검출 되었다. 그러나 이러한 결과는 허용기준치 이하로 측정되었다. 세정순환 시스템 과 에어와서 시스템을 설치한 돈사의 악취는 환경부가 정한 허용기준 이하로 측정되었다.

## 4. 참고문헌

- [1] S. B. Cho, Efficient facility to reduce odor in swine farm. *Pig & Pork* 2017(11), pp270-273. 2017.
- [2] F. R. Dalby, S. Svane, J. J. Sigurdarson, M. K. ørensen, M. J. Hansen, H. Karring, A. Feilberg, Synergistic tannic acid-fluoride inhibition of ammonia emissions and simultaneous reduction of methane and odor emissions from livestock waste. *Environ. Sci. Technol.* 54, pp7639-7650, 2020
- [3] D. W. Han, Abating odor emission from pig farm through optimized manure management practice. *RDA Research Report*, 2018.
- [4] J. W. Jeong, K. H. Park, M. Y. Heu, D. Y. Choi, M. J. Lee, H. S. Gang, Study on orodor from gestating sow barns and boundary. *J. Lives. Hous. & Env.* 15(2), pp107-114, 2009
- [5] K. H. Jung, J. C. Han, S. J. Kwak, J. D. Jung, J. W. Lee, D. H. Kim, Effects of enzyme complex on odor emission from swine slurry and swine buildings. *J. Lives. Hous. & Env.* 14(1), pp15-22, 2008.
- [6] KWB, Bio Air Washer System. [www.kwb.nl](http://www.kwb.nl).
- [7] <sup>1</sup>S. H. Lee, N. K. Yun, G. W. Kim, S. H. Yum, Y. H. Cho, Development of an odor abatement system for swine manure treatment facilities. *J. Lives. Hous. & Env.* 14(1), pp1-8, 2008
- [8] <sup>2</sup>S. H. Lee, N. K. Yun, K. W. Kim, S. H. Yum, Y. H. Cho, Effects of the odor abatement system in a naturally ventilated Growing Finishing Pig House. *J. Lives. Hous. & Env.* 14(1), pp31~38, 2008.
- [9] J. K. Lee, Swine farm odor reduction using liquid waste in circulation washing system. *KIPO 10-2010-0128949*, 2012. <http://www.kipo.go.kr>
- [10] R. W. Melse, J. Mosquera, Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions from biotrickling filters used for ammonia removal at livestock facilities. *Water Sci Technol.* 69(5), pp994 - 1003. 2014. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.826>
- [11] I. H. Oh, W. G. Kim, H. S. Lee, An air cleaning efficiencies of wet air cleaner in the swine finishing winch curtain stall. *J. Lives. Hous. & Env.* 14(2), pp75~80, 2008.
- [12] J. I. Song, H. L. Choi, H. C. Choi, D. J. Kwon, Y. H. Yoo, J. H. Jeon, Odor removal efficiency of biofilter ducting systems in indoor pig house. *J. Lives. Hous. & Env.* 13(3), pp.195-200, 2007.
- [13] G. Sun, H. Guo, J. Peterson, B. Predicala, C. Lague, Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms. *Air & Waste Manage. Assoc.* 58, pp1434~1448, 2008.
- [14] G. Sun, H. Guo, J. Peterson, Seasonal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide concentration and emission from swine grower-finisher rooms. *J of the Air & Waste Management Association* 60, pp471-473, 2010.
- [15] J. Zhu, L. Jacobson, D. Schmidt, R. Nicolai, Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities. *Applied Engineering in Agriculture.* 16(2), 153-158, 2000.