

축사 내 황화수소와 암모니아의 저감방안 고찰: 한중비교

딩옌 · 문찬석*

부산가톨릭대학교 대학원 환경산업보건학과

Literature review of the Reduction of Hydrogen Sulfide and Ammonia in Livestock Pen: Comparison between Korean and Chinese cases

Ding Yan · Chan-Seok Moon*

Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study was to review the reduction methods for ammonia (NH₃) and hydrogen sulfide (H₂S) exposure in livestock.

Methods: By reviewing domestic and international research reports from Korea and China, reducing ammonia and hydrogen sulfide in livestock pens was analyzed in terms of ventilation, deodorant, and feed additives. In addition, exposure limits in Korea and China were examined through a comparison between 'TLV-TWA and STEL under the Industrial Safety and Health Act in Korea' and 'Management Standards for Air of Livestock Pens in China'.

Results and Discussion: In order to effectively control hazardous gases and odors in livestock pens, the enhancement of natural ventilation or the addition of ventilation fans at the pollution source are being examined. Deodorants are used as adsorbents or masking deodorants. Additives to feed were zeolite powder, FeSO₄ · 7H₂O, enzymes, and microbial preparations. Use of feed additives was low-cost and had significant effects compared to other methods. Zeolite was the most commonly used in feed additive in Chinese cases and proved to be low-cost and effective for reducing harmful gases. Enzyme preparations were shown to stimulate the growth of livestock, but were expensive.

Conclusions: This study reviewed and examined domestic and international research papers in Korea and China for reducing ammonia and hydrogen sulfide concentrations in livestock pens. More diverse research and the development of feed additives are needed.

Key words: Livestock pen, ammonia, hydrogen sulfide, zeolite, reduction

I. 서 론

축산 식품의 지속적인 수요증가에 따른 가축의 집약된 생산 강화와 대규모 축산업 운용으로 인하여 축사 내의 공기질의 저하는 생산성이나 가축의 건강상태에도 좋지 않은 영향을 나타낸다. 특히 가축 사육 시설에서 발생하는 황화수소, 암모니아, 일산화탄소와 같은 유해 가스는 축산업 종사자의 호흡기질환 및 유독가스로 인

한 치명적인 사고를 유발하고 있으며, 이러한 심각한 오염은 최근 한국 및 중국의 경우에서도 밀폐공간과 관련한 황화수소 및 일산화탄소 노출 사고와 관련성이 있다 (Lee et al., 2016).

축산물은 인간에게 중요한 단백질 섭취원으로서, 축산물 생산을 위한 생산 관리자 및 가축의 보건안전은 산업보건 및 축산물 생산관리의 측면에서도 중요하다. 축사의 실내 환경 모니터링은 환경오염방지와 더불어

*Corresponding author: Chan-Seok Moon, Tel: +82-51-510-0633, E-mail : csmoon@cup.ac.kr
Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan, 57 Oryundae-ro, Gumjeong-gu, Busan, Korea
Received: September 30, 2019, Revised: November 10, 2019, Accepted: December 3, 2019
Ding Yan <https://orcid.org/0000-0002-0462-3585> Chan-Seok Moon <https://orcid.org/0000-0002-1310-8403>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

효율적이고 안전한 축산물의 생육 및 관리를 위해 의미를 가진다고 볼 수 있다(KREI, 2010).

중국의 경우, 1948년 중국 정부수립 이후 종래의 벼농사에서 축산업을 장려하는 '축산장려 5개년계획'이 1961년에 수립되었고, 1962년 군사정부가 수립한 '제1차 경제개발계획'에 포함되면서 젓소도입, 유가공 공장 및 육가공 공장이 설립되면서 축산업이 발달하지 시작하였다. 1970년대 산업화가 진행됨에 따라 본격적으로 축산업이 발달하였다. 중국의 축산업 관련법은 종래 종축검사, 가축인공수정, 밀도살금지, 가축시장 등에 대해서만 개별적으로 규정하여 가축의 개량, 증식, 도살을 중심으로 축산업발전을 도모하였다. 이후 축산 전업농가에서 가축의 집단사육이 시작되고, 돼지사육두수의 과잉에 따른 돼지의 가격이 하락됨에 따라 양돈농가 보호 및 가축사육동향의 예측 필요성 등이 제기됨에 따라 축산법이 개정되어(1984년) 양돈, 양계를 대상으로 사육규모에 따른 등록허가제가 최초로 도입되었다. 그러나 이러한 영업법제는 1999년에 돼지고기 수입자유화에 따라 수급조절을 위한 등록제의 효용이 다하여 규제개혁 차원에서 폐지되었다(Ma, 2011). 한국의 경우는, 축산업의 발달과정에 볼 때, 유목시대가 없이 농경시대로 들어갔기 때문에 동물성 식품의 섭취량이 비교적 낮았으며, 오랜 기간의 불교 및 유교의 영향으로 축산물의 이용을 기피하는 사회적 여건이 축산업 발달을 저해하였다. 조선시대 이전의 축산업은 축력의 확보, 군마육성, 제물용, 구비의 이용 등의 용도로 사용되었다. 1960년대에 들어와 축산진흥정책을 수립하고 국민소득의 향상으로 생활수준이 향상됨에 따라 축산물의 수요가 급증하는 한편 국민보건·인구문제·식량도입 등의 문제와 관련하여 국가적·사회적인 차원에서의 축산업의 중요성에 관한 인식을 하게 되었다(Song, 2018).

중국 및 한국의 양국의 경우, 축산업의 발달은 중국의 경우 1970년대에 본격적으로 발전이 시작되었으며, 한국의 경우에서도 1960년대에 시작되는 등 양국 모두 축산업의 발전이 비슷한 시기에 출발하였으며, 경제적인 성장과 더불어 육류의 사용량도 점진적인 증가를 나타내고 있다 (Ding, 2019). 축사 내 공기는 가축의 생존, 성장 및 생산을 위한 필수적인 환경요인이며 대기질은 가축의 생활상태, 성장과정 및 생산실적에 직접 또는 간접적인 영향을 미친다. 대규모의 가축양식장의 대기질은 가축의 생육상태 및 생산실적에 영향을 미친다. 최근 돼지와 가금류의 호흡기질환은 양국 모두 대규모 축

산 사육농장에서 문제점으로 대두되고 있으며, 높은 발병률과 사망률을 비롯하여 계절적으로는 겨울철과 봄철에 특징적으로 빈번히 발생한다.(Kim et al., 2011; Hong et al., 2014; Yu et al., 2016) 축사 내 공기는 가축의 생존, 성장 및 생산을 위한 필수적인 환경요인이며 공기질은 가축의 생활상태, 성장과정 및 생산실적에 직접 또는 간접적인 영향을 미치고 있다.(Li et al., 2008). 대규모 사육의 가축 축산개발, 특히 가축의 대규모육종으로 축사의 대기질은 가축의 건강상태 및 생산실적에도 영향을 미친다. 최근 돼지와 가금류의 호흡기질환은 대규모농장에서 문제점으로 나타나고 있고, 이들 질환의 높은 발병률과 사망률은 겨울철과 봄철에 특징적으로 높게 나타나고 있다(Yu et al., 2016). 그 원인으로 주로 가축의 성장환경, 특히 축사에서 공기질이 호흡기 질환 유발의 중요한 요인이다. 그러므로 본 연구에서는 한국과 중국의 국내외 연구 자료의 리뷰를 통하여 양국의 가축사육 현황 및 사육시설의 공기질을 비교 분석하고 향후 황화수소 및 암모니아의 노출 수준을 효율적으로 감소시킬 수 있는 방안을 검토하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

과거 10년간 한국과 중국의 축산농가에서 연구된 축사 내 황화수소와 암모니아 노출 수준과 노출의 원인 및 노출관리방안에 관한 연구논문 및 인용 자료를 인터넷 또는 개별 수집(인터넷 탑재가 되지 않은 중국자료 일부의 경우)하였다. 축사 내 황화수소 및 암모니아 발생원인 및 특성을 양국자료를 통하여 확인하였으며, 위해성에 관하여 사람과 동물의 경우를 비교하였다. 한국과 중국 양국간의 축사 내 대기질 기준을 비교함으로써 축사의 노출농도 설정의 기본 방향을 비교 확인하였다. 한국과 중국의 축사의 실내오염도 및 오염특성의 원인을 비교 분석하였고, 양국의 축사 내 황화수소 및 암모니아 저감방안으로서 환기, 탈취제, 분뇨처리, 사료첨가의 방법으로 분류하여 각 국가별 특성에 적합한 방법을 고찰하였다.

한국내의 연구논문 및 연구자료의 검색은 한국교육학술정보원(KERIS)의 RISS, 한국과학기술정보연구원(KiSTi)의 NDSL(National Digital Science Library), 구글(Google)의 Google Scholar(Google 학술 검색)를 사용하였으며, 중국 논문의 경우 바이두 문고(Baidu; 百度文库), 중국지망(Cnki; 中国知网), 비프망

(CQVIP; 维普网), 만방 데이터베이스(WANFANG DATA; 万方数据库), OALib 무료 논문 검색 엔진(OALib; OALib 免费论文搜索引擎), 하이와이어 스탠포드 학술 문헌(HighWire; 斯坦福学术文献电子期刊)을 사용하였다. 국제저널 중 관련 논문의 검색에는 미국국립의학도서관(National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine)의 PubMed를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 축사 내 황화수소 및 암모니아 발생원인 및 특성

1) 황화수소(H_2S)

황화수소(H_2S)는 가연성의 산성 가스로서 무색이며 저 농도 때 쉼은 알의 냄새가 있으며 고농도 때 독성 높아진다. 주로 대변 중의 미생물에 의해 환원된 황산염에서 발생되고, 시스테인과 메티오닌은 미생물 분해에 의해 황화수소를 생성 할 수 있다. 가축이 단백질이 풍부한 사료를 섭취하고 소화가 되면 다량의 황화수소가 장에서 배출 될 수 있다. 동시에 공기 중 황화수소의 농도는 가축 사료의 황 함량, 대변 중 황화수소 농도는 호기성 또는 혐기성 박테리아의 발효, 온도 및 환기 조건의 영향을 받는다. 일반적으로 공급 된 단백질 함량이 높기 때문에 축사 실내 공기 중 황화수소의 함량도 높아진다. 예를 들어 거대한 닫힌 닭 농장에서는, 더 많은 깨진 달걀이 있을 때 공기 중의 황화수소 농도가 상당히 증가한다(Park et al., 2013, 2015; Li et al., 2013).

2) 암모니아(NH_3)

암모니아(NH_3)는 매운 냄새 무색의 가스이며, 무취 또는 약간 신맛의 가스이기도 한다. 암모니아(NH_3)와 황화수소(H_2S)의 발생방식은 매우 유사하며, 대부분은 신선한 분뇨와 유기 물질의 혐기성 분해에서 비롯된다. 축산 분뇨는 일반적으로 몸에서 소화되지 않는 질소 함유 영양분의 20% ~ 25%를 포함한다. 이 질소 함유 물질은 미생물의 작용에 의해 신속하게 암모니아로 분해되어 주위의 공기 중에 방출된다. 암모니아는 물에 대한 용해성이 높기 때문에 고습 공기 중의 암모니아 농도가 비교적 높다. 암모니아의 휘발은 요소와 암모니아 농도, 온도, 수분 함량 및 환기 조건과 같은 요소에 의해 영향을 받는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2005; Park et al., 2013; Mei, 2015; Feng et al., 2014).

2. 축사 내 황화수소 및 암모니아의 위해성

축사내에서 작업을 하거나 축사 근처에서 생활하는 사람들은 축사에서 발생하는 유해가스에 의한 건강영향이 발생할 수 있다. 이들 유해가스의 경우는 사람뿐만이 아니고(Table 1) 동물들에게도 유해한 영향을 미친다.

1) 황화수소(H_2S)

동물에 있어 황화수소는 주로 점막을 자극하며, 황화수소가 동물의 점막의 수분과 접촉하면 용해되어 점액의 나트륨 이온과 결합, 점막을 자극하는 황화나트륨을 형성한다. 병이 있는 돼지에게는 광포 공, 기침, 비염, 기관지염 및 인후 화상이 발생하고 폐부종도 발생한다. 황화수소는 신속하게 폐포의 혈액으로 흡입되고 황산염 또는 티오황산염으로 산화된다. 혈액에서 유리 된 황화수소는 산화된 사이토크롬옥시데이즈의 제2철에 결합할 수 있다. 황화수소는 세포의 산화 과정에 영향을 미치고, 조직에 저산소를 일으키므로 효소를 불활성화시킨다. 장기간 저 농도 황화수소 환경에서는 가축의 질병 저항성이 낮아져 위장병 및 심장 약화가 발생하기 쉽다. 고농도의 황화수소는 호흡기를 직접적으로 억제하여 사망을 유발한다. 사람의 경우에는 1000-1500ppm에서 급성중독을 일으켜 실신하거나 호흡마비로 사망하며, 500-700ppm 에서아급성 중독이 발생하고 생명이 위협할 수 있다. 200-300ppm에서는 5-8분 경과시 눈, 코, 목구멍 등의 점막에 강한 통증을 느끼고 30-60분 정도 견딜 수 있는 것으로 확인되고 있다(Table 1).

2) 암모니아(NH_3)

암모니아는 동물의 경우, 축축한 땅, 벽 및 가축 점막에 용해되거나 흡착된다. 암모니아를 흡입하면 가축의 코, 목, 기관, 기관지 및 각막의 점막에 점착하여 점막 충혈, 후두 부종, 통증, 기침, 기관지염 및 결막염을 일으키며 심한 경우에는 폐부종, 폐출혈 등이 발생한다. 암모니아 농도가 낮아도 삼차 신경 말단을 자극하여 호흡 기관의 흥분을 유발할 수 있다. 폐에 흡입된 암모니아는 폐포 상피 조직을 통해 혈액에 들어가 헤모글로빈에 결합하여 산소를 대체하고 혈액 산소 전달 기능을 억제한다. 소량의 암모니아를 단기간에 흡입하면 체력, 사료 섭취량이 감소한다. 그리고 암모니아의 고농축은 신체 조직을 직접 자극하여 알칼리성 화학 화상을 유발하여 조직이 용해되고 괴사를 일으키고 중추 신경계 마비, 독성 간 질환, 심근 손상 및 기타 증상을 유발할 수

Table 1. Exposure level and symptoms of hydrogen sulfide and ammonia

Exposure level (ppm)		Symptoms
H ₂ S	0.13	too low to feel
	4.60	moderate odor
	10	eye irritation, TWA (OSHA, ACGIH).
	27	strong unpleasant smell and can not bear it.
	100	Cough, eye irritation, lose sense of smell at 2 minutes later
	200~300	conjunctivitis (inflammation of the eye) at exposure 1 hr, respiratory tract stimulation
	500~700	Loss of consciousness, respiratory arrest, death.
	1000~2000	Immediately lose consciousness, stop breathing and die within a few minutes.
NH ₃	0~25	minimal irritation of eyes and respiratory system
	25~50	allowable exposure levels (OSHA,ACGIH)
	50~100	swollen eyes, conjunctivitis, vomiting, throat irritation
	100~500	the higher the concentration, the more dangerous, the more intense the stimulus and the longer the death.

있다. 사람의 경우에는, 100~500ppm에서 강한 신체적 자극성 및 사망 등의 위험성을 나타낼 수 있으며 시간이나 농도가 더 높아질 경우 더 위험해 진다. 50~100 ppm에서는 눈 자극성, 결막염, 두통, 메스꺼움 등이 나타날 수 있는 것으로 확인되고 있다(Table 1)

3. 축사 내 관리기준 비교

1) 중국의 축사 대기질 기준

중국은 1999년에 ‘축사 대기질 기준’을 제정하였다. 이 기준의 목적은 가축과 축사 주변 환경을 보호하고 축산물의 품질을 유지하며, 가축 사육자들의 건강을 보호하기 위한 목적이다. 축사내의 기준 항목으로서 암모니아, 황화수소, 이산화탄소 및 악취의 4가지이며, 항목 중 황화수소와 암모니아는 Table 2에 나타낸 바와 같다.

2) 한국의 축사 관리 기준

한국의 축사 실내 공기질 관리에 대한 구체적인 기준은 없으며, 축사 내 작업자에 적용할 경우에는 한국의 산업안전보건법상의 8시간 가중평균치(TWA)를 적용하거나 단시간 노출기준(STEL)을 사용할 수 있다. 일반대기의 경우는 한국의 악취방지법상의 지정악취물질에 대한 배출허용기준에 따라 Table 3에 나타난 바와 같이 2019년 현재 22개의 악취물질을 지정하여 관리하고 있다. 다만, TWA와 STEL은 18세이상의 성인을 기준으로 작업장에서의 농도를 말하며 종전의 ‘시설’ 단위에서 ‘지역’ 단위로 악취 관리대상을 지정하고 있다. 효과적인 악취배출원의 관리를 위해 악취 실태조사, 악취관리지

Table 2. Daily average quality standard of ammonia and hydrogen sulfide in Chinese livestock farm*

Species		NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)
Poultry barn	Young	12.5	2.5
	Adult	18.75	12.5
Swine barn		31.25	12.5
Cattle barn		25	10

*Source is agriculture industry ‘NY/T388-1999 livestock and poultry field environment quality standard’ issued by Ministry of Agriculture of the People’s Republic of China.

Table 3. TWA and STEL in Korean exposure limits of ambient air*

	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppm)
TWA	25	10
STEL	35	15

*TWA(Time-Weighted Average), STEL (Short Term Exposure Limit) of workers from the Occupational Safety and Health Act in Korea.

역의 지정, 배출허용기준, 악취관리지역 및 악취관리지역 외의 지역에서의 악취배출시설 설치신고, 악취방지시설의 공동설치 등에 관한 내용으로 시행하고 있다.

4. 축사 실내 오염도 비교

1) 중국 축사 실내오염도 및 오염특성

중국에서 조사한 축사내의 황화수소와 암모니아의 농도를 Table 4에 나타내었다. 사천성 지역의 데이터는 논문내 보고한 평균치의 결과들을 모아 다시 계산하여

1개의 대표치로 나타내었다(Hong et al., 2014). 암모니아와 황화수소의 농도는 온도의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 온도가 올라가면서 배설물이 발효되어 암모니아와 황화수소 가스가 생성된다고 보고 있으며, 습도가 높을수록 암모니아 및 황화수소 가스의 농도는 낮아지는 경향을 나타내었는데 암모니아 가스와 황화수소 가스가 수용성이기 때문에 습도인자와 직접적인 관련을 나타낸다고 보고하고 있다. 해난성은 중국의 최남단 지역으로서 초목이 풍부하고 통풍이 잘 되는 자연 조건을 나타낸다. 해난성의 연구 결과에서는 축사내의 암모니아 농도가 중국 정부에서 정한 노출 기준치보다 낮게 나타났다(Feng et al., 2014). 지역적 특성으로서 바람이 세기 때문에 자연 환기 및 통풍이 잘 이루어지기 때문으로 보고 있다. ‘밀폐형 돼지 사육장에서 황화수소 가스 농도의 변화 연구’에서 평균값은 6.07 ppm로 나타났다(Yu et al., 2016). 그리고 황화수소 가스의 분포가 일정하지 않아 하루 동안의 농도 변화는 매우 크게 나타났다. 아침> 정오> 저녁 기준을 초과하는 아침 농도 이외에는 모두 노출기준 이하였다(Yu et al., 2016). 아침에 농도가 가장 큰 원인으로 주로 황화수소가 분뇨의 혐기성 분해에 기인하기 때문으로 보고하고 있고, 아침 측정 시 밤에 축적 된 분뇨가 원인으로 환기를 실시한 후에는 즉시 농도가 낮게 나타난다고 보고하였다(Yu et al., 2016). 난징 지역에서 시행된 연구보고(Wu QL, et al., 2012)에 따르면 연중 암모니아 농도가 가장 높은 계절은 겨울이며, 겨울철에는 실내

온도를 유지하기 위해 창문이 닫히는 등 실내의 환기량이 감소되어 실내 암모니아의 농도는 비교적 높게 나타났다. 여름이 지나면 환기가 잘 되지만 여름철 고온 고습 환경은 분뇨에서 유기 질소의 분해를 촉진하므로 암모니아 농도는 봄과 가을보다 약간 높게 나타남을 보고하였다. 축사 실내에 있는 황화수소의 평균 농도는 봄> 겨울> 가을> 여름의 순으로 나타나 계절의 영향이 높게 나타나는 것으로 보고하였다. 여름철의 황화수소 농도는 주로 풍속과 관련성을 나타내었으며, 여름철에는 창문을 모두 열고 기계 환기구가 결합되어 실내 황화수소 농도가 낮으며 봄, 가을, 겨울에는 창문을 닫으므로 환기량이 부족하여 여름보다 황화수소의 농도가 높게 나타났다. 중국 화둥지역에서 조사한 보고에서, 암모니아의 평균 농도는 10.90 ppm이며, 축사의 실내 청소 횟수와 관련성을 나타내는 것으로 보고하였다. 겨울에는 축사의 실내 온도를 유지하기 위해 난방을 사용하기 때문에 황화수소의 농도가 높아졌으며, 가축 분뇨를 제거한 후에는 다시 감소하였다(Dai et al., 2016). Li Chun 등의 연구(Li et al., 2013)에서 신강 가축 농장의 경우는 따뜻한 기온과 높은 환기량으로 인하여 암모니아의 농도가 감소하고 있음을 보고하였다. 그러므로 중국에서와 같은 대부분의 자연환기 방식 축사의 경우 가축 분뇨의 제거 및 환기의 관리가 암모니아와 황화수소의 농도를 유의하게 감소시킬 수 있음을 보고하였다. 연구원의 보고(Ding, 2016)에 의하면 1년 중 양사에서 암모니아의 평균 농도를 7.1 ppm으로 계산할 수 있었

Table 4. Ammonia and hydrogen sulfide concentration in livestock pen of China.

	NH ₃ (ppm)	H ₂ S(ppm)	Season	Area	Remarks
Pig farm	10.90	8.20	4 seasons	East China	Dai et al.2016
	10.81	2.56	4 seasons	Nanjing	Wu et al.2012
	8.57	-	winter	Shandong	Ma et al. 2011
	3.10	-	summer	Hainan	Feng et al., 2014
	-	6.20	autumn	Liaoling	Yu et al., 2016
Cattle farm	11.76	-	summer	Hainan	Feng et al., 2014
	5.00	0.00	winter	Xinjiang	Li et al., 2013
	4.94	-	summer	Xinjiang	Mei et al., 2015
Chicken farm	9.90	8.70	winter	Gansu	Xie et al., 1991
	0.41	-	summer	Hainan	Feng et al., 2014
	0.36	-	summer	Shijiazhuang	Gao et al., 2011
Sheep farm	7.10	-	4 seasons	Inner Mongolia	Ding et al., 2016
	4.87	0.0057	summer	Sichuan	Hong et al., 2014

다. 1년 중 암모니아 농도가 가장 높은 계절은 겨울이었으며, 여름철 온도의 증가는 암모니아의 농도를 상승시키는 요인이 되었다. 이산화탄소의 경우, 축사의 온도를 유지하기 위해 각종연료 등의 연소로 인하여 겨울철에 가장 높게 나타났다. 상기의 보고에서 볼 때, 암모니아와 황화수소의 농도가 온도의 증가에 따라 증가한다는 것을 알 수 있었다. 특히 여름과 겨울철에서, 봄과 가을에 비해 실내 축사의 농도에 차이가 나타났다. 그러므로 여름과 겨울에는 환기량을 늘려 축사 내 공기 순환을 원활히 유지되도록 하여야 한다.

2) 한국 축사 실내오염도 및 오염특성

한국 축사의 경우, 계사와 돈사가 다른 축사에 비해 유해가스 및 악취가 더 문제가 되고 있어, 이들 축사에 대한 연구 보고가 비교적 많은 편이다. 양돈 산업은 대규모의 기업형이며, 축사 내의 악취 등 환경오염문제 및 민원 문제가 그동안 문제점으로 지적되어 왔다. 돈사 작업장 내부의 공기 오염물질은 크게 가스상, 입자상, 바이오에어로졸(bioaerosol) 물질로 구분할 수 있다. 이 중 돈사 작업장 내 가스상 오염물질들의 발생은 돼지들에 의해 배설된 분뇨가 피트(pit) 내에서 저장되어 혐기성 미생물에 의해 분해되는 경우가 주요 발생 과정이며, 돼지의 호흡 및 환기시스템의 작동시에도 발생된다(Kim, 2013). 미국과 유럽 등의 선진국에서는 축사 악취에 대해 보건학적 측면에서 주요 원인물질인 암모니아와 황화수소를 대상으로 축사 작업자 노출량 평가 및 주면 지역으로의 악취 확산 정도를 정량화하기 위한 배출계수 산정 연구들이 이미 20여년 전 부터 수행되어 이와 관련한 DB의 구축이 거의 정립화 되고 있는 시점이다(Kim, 2012). 한국의 축사관련 연구에서는 조사대상 돈사 작업장 모두에서 암모니아와 황화수소의 노출기준을 초과하지 않았다. 돈사 작업장의 유형에 관계없이 돈사 내부의 암모니아 평균 농도는 8.60 ppm, 범위는 4.97~14.15 ppm으로 조사 되었으며, 황화수소는 평균 307.54 ppb 였으며, 33.94~831.53 ppb의 범위를 보였다(Table 5). 경기, 충남, 충북 지역의 농장들을 대상으로 5월~6월, 9월~10월에 수행한 조사 연구에 따르면 환기방식의 측면에서는 강제환기가 적용되는 돈사 작업장의 암모니아 농도가 자연환기가 적용되는 돈사 작업장보다 높았다(Kim et al., 2010). 이 연구는 외부 기후 조건이 극단적이지 않은 봄과 가을철에만 국한되어 조사되었기 때문에 환기 상태가 대체로 원활히

이루어진 결과라 판단되었다. 기존의 연구 보고에 의하면 외부의 온도가 극단적으로 낮은 겨울철의 경우 돈사 내부의 온도 유지를 위해 환기율을 적정 수준보다 낮추기 때문에 내부의 암모니아와 황화수소의 농도는 반대로 높아지고 암모니아의 경우 환기 상태가 매우 불량한 경우 노출 기준을 초과할 수 있다(Donhem과 Pendorpf, 1985). 제주 지역에서 7월~10월에 계사를 대상으로 조사한 보고에서는 암모니아는 1.62 (0.44~3.08) ppm, 황화수소는 5.13 (0.81~7.61) ppb로 나타났다. 이 연구의 측정 결과만을 근거로 고찰해보면 환기방식 측면에서 강제 환기가 적용되는 무창 계사와 자연환기가 적용되는 윈치 계사 간의 내부 악취농도 분포는 일정한 변화 양상이 관찰되지 않았고 물질별로 농도 차이가 다양하게 나타난 것으로 확인되었다. 월별 암모니아와 황화수소의 농도는 계사 환기율이 상대적으로 높게 적용되는 여름철(7월, 8월)이 계사 환기율이 감소하는 가을철(9월, 10월) 보다 대체로 높은 것으로 나타났다(Kim et al., 2012). 2011년 7월부터 2012년 6월 까지 총 1년 동안 제주 지역에 위치한 계사 2개소를 대상으로 수행한 조사에서는 강제환기(무창) 계사의 암모니아 농도는 2.75(0.4~13.65) ppm, 황화수소는 4.84(1.81~9.14)ppb로 나타났다. 자연환기(윈치) 계사의 암모니아 농도는 1.79(0.59~3.35) ppm, 황화수소는 6.59(2.04~18.89) ppb로 나타났고, 계사 환기가 감소하는 겨울철(12월~1월)이 계사 환기율이 상대적으로 높은 여름철 (6월~8월)보다 축사 내부의 악취물질 농도가 높게 형성되었다(Kim et al., 2011). 2011년 3월~5월에 농업생명과학대학의 실험농장에서 조사한 연구에서는 측정하는 돈사에 설정된 전체 환기율 30%, 50%, 70% 조건에 관한 연구로서 전체 환기율 30% 조건 시에 악취농도, 암모니아, 황화수소의 평균농도는 609, 18.3 ppm, 132.7 ppb. 50%조건의 경우 447, 9.3 ppm, 118.2 ppb. 70 %조건의 경우 259, 2.1 ppm, 92.37 ppb 인 것으로 나타나 악취농도와 암모니아의 경우 환기율 높아지면 농도가 낮아졌다. 그러나 황화수소의 농도는 환기율 증가에 따라 차이가 크지 나타나지 않았다(Kim et al., 2012). 계절별 암모니아의 경우 평균 농도가 봄은 13.34 ppm, 여름은 4.56 ppm, 가을은 22.8 ppm, 겨울은 22.8 ppm으로 나타났다. 황화수소의 경우 평균 농도가 봄은 139.12 ppb, 여름은 53.7 ppb, 가을은 283.73 ppb, 겨울은 307.15 ppb로 나타났다. 측정 결과를 보면, 돈사 실내

Table 5. Indoor air contaminants in livestock pen in Korea

	NH ₃ (ppm)	H ₂ S(ppb)	season	area	Remarks
Pig farm	14.1	195.9	4 seasons	Jeju	Kim et al., 2012
	11.1	33.9	autumn		Kim et al., 2014
	10	579.3	4 seasons	Gimhae	Kim et al., 2012
	9.8	114.5	spring	School farm	Choi et al. 2011
	7.6	444.0	4 seasons	Gimhae	Kim et al., 2011
	7.5	286.5	autumn	Gyeonggi, Chungnam	Kim et al., 2002
	6.7	831.5	autumn		Kim et al., 2004
	5.3	118.6	autumn	Jeju	Ko et al., 2012
	4.9	163.4	4 seasons	Gimhae	Kim et al., 2012
Chicken farm	12.9	5.7	4 seasons	National	Ko et al., 2010
	2.2	5.7	4 seasons	Jeju	Kim et al., 2011
	1.6	5.1	autumn	Jeju	Kim et al., 2011
	1.6	5.1	summer		Kim et al., 2012

암모니아와 황화수소의 농도가 겨울에 가장 높고 여름에 가장 낮았다(Kim et al., 2012).

요약하면 중국의 가축 농장에 대한 실내 공기 연구에서 유해한 가스의 농도는 여름철과 환기율이 낮은 겨울철에 높았고, 봄과 가을의 농도 변화의 특징은 크지 않았다. 그러나 한국의 경우에는 겨울철에 통풍 환기율이 낮기 때문에 유해가스 농도가 가장 높았다.

5. 축사 내 황화수소 및 암모니아 저감방안

축사내의 황화수소와 암모니아를 효과적으로 저감시키기 위하여 환기시스템, 사료 내 조단백질 조절, 합성아미노산의 사용, 효소제 첨가, 미생물 첨가, 탈취제의 사용, 화학물질 사용하는 방법이 연구되고 있다(Table 6).

축사내의 환기시스템은 현지 기후 조건에 따라 합리적으로 설계되어야 한다. 밀폐형 가축 농장의 경우 일반적으로 기계적 환기방식을 사용한다. 축사 실내의 유해기체제어는 환기시스템과 밀접한 관련이 있으므로 축사의 건축설계가 합리적으로 되어야 한다. 축사 폐수가 원활히 배출되어야 하고 부패로 인한 하수 및 악취의 축적을 피하기 위해 축사의 경사면은 배수로 쪽으로 2~3% 경사각을 이루고, 배수구 바닥은 2~5%의 경사를 만들어야 한다. 축사내부의 악취 발생원은 분뇨, 분뇨저장소, 축사 내 피트, 분뇨수거장치, 축사 바닥, 통로, 사료조 등 축사 내 농장 전역에서 발생하고 있다. 특히 분뇨에서 발생하는 악취가 가장 큰 비중을 차지한다. 이는 미생물에 의한 유기물질 내 영양물질이 분해과정 중에

서 발생한다.(Catalogue of Feed Additives in China, 2010) 가축농장 축사내부에서 발생하는 냄새를 밖으로 배출하는 것은 환기시스템과 밀접한 관계가 있다. 축사에서 발생하는 냄새를 줄이기 위해서는 축사의 환기시스템을 개선하여 한다. 따라서 현재 개방식 축사는 가능한 창이 없는 무창 축사로 개조해야 한다. 가축농장의 분뇨 처리도 악취의 발생에 영향을 미치며, 가축분뇨의 합당한 처리로 악취의 발생을 효과적으로 줄일 수 있다.

축사내의 악취를 저감시킬 수 있는 방안으로서 가축사료의 조단백질 함량을 줄이면 배설물의 질소 배설을 줄일 수 있다. 사료를 통해 공급된 영양소는 가축의 소화기내에서 일정량 소화 흡수된 후 나머지는 분뇨를 통해 배설되어 생태, 환경계로 배출되어진다. 결국 영양소 이용성 정도가 축산으로 인한 환경오염 부하량과 직결된다고 할 수 있다. 가축이 필요로 하는 아미노산 요구량에 대한 정확한 정보를 통하여 아미노산 및 단백질 수준을 적절히 조정하여 배합하면 영양소 배설량을 감소시킬 수 있다. 이러한 정확한 아미노산 요구량에 대한 정보를 '이상 단백질' 혹은 '균형 아미노산' 설명할 수 있으며, 가축의 유지 및 성장에 필요한 모든 아미노산들이 정확한 비율로 균형 있게 구성된 단백질을 의미한다. 사료 배합 시 단백질 요구량의 일부를 합성아미노산으로 대체하는 것은 가축의 분뇨 내 오염물질 배설량을 줄일 수 있는 매우 효과적인 방법이다. 합성아미노산을 사용하면 사료 단백질을 절약하는 효과가 있다. 이는 값

Table 6. Reduction Method of Hydrogen Sulfide and Ammonia in Livestock Pen

	Method	Remarks
Ventilation system	Natural ventilation, adding ventilation fans near pollutants	Kim et al., 2012
Control crude protein in feed	Reduced feed use	Ouyang et al., 2008
Use of synthetic amino acids	Addition of L-threonine in feed	Zhang YH et al., 2015
Enzymatic addition	Addition of amylase, silanase etc.	Ying et al., 2011
Microbial addition	Addition of lactic acid bacteria, synthetic bacteria etc.	Wu, 2014
Deodorant use	Adsorption deodorant, masking deodorant, etc	Wu et al., 2012
Chemical addition	FeSO ₄ · 7H ₂ O (0~10,000 mg/kg H ₂ O)	Zhang et al., 2015

비싼 동물성 단백질을 이용하는 대신 저렴한 식물성 단백질을 이용하고 0.1-0.2%의 합성아미노산을 첨가함으로써 전체 조단백질 수준을 2-3%정도 낮춤으로서 동물에게서 배출되는 황화수소나 암모니아의 배출량을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

효소제를 사용하며 가축의 내생 소화효소에 의해 분해하기 어려운 곡물의 저장성 탄수화물부분과 단백질의 이용성을 높일 수 있다. 가축사료의 가장 기본 원료가 되는 대부분의 곡류는 이들이 갖고 있는 섬유소 함량, 특히 섬유성 다당류, 셀룰로오스, 펙틴, 헤미셀룰로오스, 글리코프로틴, 리그닌 및 비전분성 다당류(NSP) 등의 의해 그 영양적 가치가 감소하게 된다.(Gao et al. 2014a) 그러므로 효소제의 사용에 의해 전분, 단백질 및 지방과 같은 영양소의 이용률을 개선할 수 있으며 원료사료의 에너지가치를 올릴 수 있다.

미생물학적 제제(EM; Effective Micro Organisms)는 광합성 세균, 비피더스균, 유산균, 효모, 방선균, 아세토박터 등 유해 화학 미생물을 포함하지 않는 80 종 이상의 미생물로 구성된다(Wu et al., 2014). EM은 독성 부작용이 없고 환경을 오염시키지 않는 장점을 가지고 있으며 사료 이용을 증가시킬 수 있다. 그리고 EM 기술을 통하여 가축 분뇨에 대한 악취도 감소시킬 수 있다.

탈취제를 사용하여 가축 배설물의 냄새를 줄일 수 있다. 천연 제올라이트는 큰 흡착 선택적으로 흡착시킬 수 있다. 천연 제올라이트의 또다른 장점으로서 수분을 흡수하는 성질 때문에 축사내 공기 습도와 가축 분변의 습기가 줄어들며 암모니아와 같은 유해한 가스의 발생을 줄이는 효과를 나타낼 수 있다. 마스킹 및 희석 확산과 같은 물리적 방법은 간단하다는 장점이 있으나 효과는 우수하지 못하였다. 탈취 장비를 설치하는 방법은 투자비용이 높고, 높은 배출 농도의 점 오염원에 대한 효과

는 뚜렷하게 나타나지만, 축사에서와 같이 오염원이 넓은 경우는 효과가 높지 못하고 경제성의 측면에서도 낮다고 볼 수 있다. 현재 흔히 사용되는 방법으로 탈취제를 사용하는 것인데, 종합적인 해택면에서 미생물 탈취제는 축사 또는 대변에 직접 뿌리거나 사료 또는 식수에 첨가하는 것이 효과적이며, 화학 약품이 아니기 때문에 분뇨에 적용하였을 경우 즉각적인 효과는 나타나지 않는다. 탈취 효과가 나타나기까지 2~3일이 걸리며 1개월 정도 효과가 나타난다고 보고하고 있다(Dachaine et al., 2000; Ni and Heber, 2008).

화학적 방법으로서, 석회를 축사에 적용할 경우 석회가루가 돼지의 호흡 기관으로 이동하여 기침, 재채기 및 기타 증상을 유발한다. 사료에 FeSO₄ · 7H₂O를 첨가하면 암모니아 및 황화수소의 생성을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 가축의 성장도 촉진 할 수 있다. 0~10,000 mg/kg을 가축의 음용수나 사료에 추가해도 가축에 독성을 나타내지 않는다고 보고하고 있다(Zhang et al., 2015).

이외에도 축사 내 암모니아와 황화수소를 저감하기 위한 방안으로 이 외에도 최근 바이오크러버, 바이오 필터 등 많은 물리화학적 방법들도 적용되고 있는 실정이며 추후 이에 대한 고찰이 필요하다(Cho et al., 2018; Jeon et al., 1998).

IV. 결 론

한국과 중국의 축사 내에서 발생하는 황화수소 및 암모니아에 관해 국내외 연구논문을 비교 검토하였으며 저감 방안은 고찰하였다. 한국과 중국의 모두에서 겨울철은 축사 실내 온도를 유지하기 위해 환기량이 감소하여 유해 가스 농도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 여름철에는 고온 조건이 악취가스가 발생하는 요인이었

다. 습도도 암모니아 및 황화수소의 증감에 중요한 요인으로 나타났다. 축사내의 황화수소와 암모니아를 효과적으로 저감시키기 위해서는 환기시스템, 사료 내 조단 백질 조절, 합성아미노산의 사용, 효소제 첨가, 미생물 첨가, 탈취제의 사용, 화학물질 사용하는 방법이 연구되고 있으며, 제올라이트를 이용하는 방법이 현재 중국에서 가장 보편적으로 활용되고 있으며 한국의 경우는 환기시스템을 사용하고 있다. 경제적인 축사 내의 유해가스를 감소시키기 위해 향후 국내외 사례 비교한 다각적인 연구가 필요하다.

Acknowledgments

본 연구는 부산가톨릭대학교 2019년도 학술연구비 지원으로 수행되었음.

References

- Baidu. Available from: URL: <https://wk.baidu.com/?pcf=2>
- Chang CW, Chung H, Huang CF, and Su HJJ. Exposure assessment to airborne endotoxin, dust, ammonia, hydrogen sulfide and carbon dioxide in open style swine house. *Ann Occuo Hyg.* 2001;45:457-465
- Cho J-P, Kang JH, Song JH. Effects of Influent Concentrations on Mass Transfer Coefficients for the Removal of Hydrogen Sulfide and Ammonia in Biogas using a Wet Scrubber. *Proceedings of the 2018 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management.* 2018. P.158
- Cnki. Available from: URL: <https://www.cnki.net>
- CQVIP. Available from: URL: <http://www.cqvip.com>
- Dachaine C, Grimard Y, Cormier Y. Influence of building maintenance, environmental factors and seasons on air borne contaminants of swine confinement buildings. *Am Ind Hyg Assoc J* 2000;61:56-63
- Dai XR, Ni J, Pan Q, Wang QN, Albert JH. Monitoring of Temperature, Humidity and Air Quality inside Pig Weaner House in Eastern China. *Trans Chinese Soc Agri Machin* 2016;47(7):315-322.
- Ding Y. Comparing indoor air quality in Chinese and Korean farms. Thesis of Master Course in Graduate School of Catholic University of Pusan. 2019
- Ding Y. Environmental Impact Assessment of Sheep Houses and Analysis of the Amount of Manure on Sheep Farm in Inner Mongolia. Inner Mongolia Agricultural University 2016
- Donhem and Pependorf. Relationship of airborne endotoxin and bacteria levels in pig farms with the lung function and respiratory symptoms of farmers. 1985
- Feng F, Li YS, Liu YY, Chen W, Wang Y, et al. Analysis on Environmental Pollution of Typical Scale Aquaculture Farms in Haikou City, *Acta Ecologiae Animails Domaistici* 2014;35(11):45-51
- Gao L, Bai Z J, Feng B, Han Y K, Sun J D, Research and application progress of microbial feed additives. *Journal of Microbiology* 2014;2:1
- Gao Lin, Baizijin, Feng Bo, et al. Progress in research and application of microbial feed additives [J]. *Journal of Microbiology*, 2014a, 34 (2): 1-5.
- Gao SS, Deng BL, Liu W, Wang CM, Shi WQ, He HX. Emission concentration of methane and nitrous oxide in fattening pig house, *Swine Science* 2011;12:80-82
- HighWire. Available from: URL: <http://home.highwire.org/>
- Hong N, Yang SG, Ze RDK, Wang Y, Wen YL et al. Tesing of air quality of inner houses for Jianyang Da'er Goat in summer. *Journal of Southwest University for Nationalities. Natural Science Edition* 2014;40(5): 663-667
- Jeon E-C, Song MJ, Sa JH. Removal Characteristics of H₂S in a Bioscrubber *Proceedings of the 1998 Conference of the Korean Society for Atmospheric Environment.* 1998, 143-145.
- Kim KY, Choi JH, Distribution characteristics of odorous compounds concentrations according to type of pig buildings *J. Korean Soc. Odor Res. Eng.* 2013 Vol.12, No.1: 27-37
- Kim KY, Choi JH, Kim DK Temporal Distribution Characteristics of Indoor Concentrations of Odorous Compounds according to Poultry Buildings *J. Korean Soc. Indoor Environ.* 2013 Vol. 10, No.2, pp.69-82
- Kim KY, Choi JH, Kim DK. Temporal Distribution Characteristics of Indoor Concentrations of Odorous Compounds according to Poultry Buildings. *J Korean Soc. Indoor Environ* 2013;10(2):69-82
- Kim KY, Choi JH, Seo SC. Effect of General V entilation Rate on Concentrations of Gaseous Pollutants Emitted from Enclosed Pig Building *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 2014: 24(1): 46-51
- Kim KY, Ko HJ, Kim HT. Comparison of Seasonal Concentration of Ammonia and Hydrogen Sulfide in Swine House according to Pig's Growth Stage *Journal of Agriculture & Life Science* 2011 46(2) pp.163-168
- Kim KY, Ko HJ, Kim HT. Kim DK. Kim YS. Concentration

- Characteristics of Ammonia and Hydrogen Sulfide Emitted From Domestic Types of Chicken Buildings. Korean Indoor Environment Painting Paper 2011 7(4); 216-223
- Kim KY, Ko HJ, On-site Investigation of Distribution Characteristics of Odorous Compounds Emitted from Poultry Buildings Korean Journal of Odor Research and Engineering 2012 Vol.11, No.3, 105-111
- Kim KY, Park JB, Kim CN, Lee KJ. Field Study of Emission Characteristics of Ammonia and Hydrogen Sulfide by Pig Building Type. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2006;16(1):36-43
- Kim KY, Seo SC, Choi JH. Effect of General Ventilation Rate on Concentrations of Gaseous Pollutants Emitted from Enclosed Pig Building. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2014;24(1):46-51
- Kim KY, Song JM, Ko HJ, Kim YJ. A Field Survey of Indoor Odorous Compounds Emitted from Pig Buildings Journal of Korean Society for Indoor Environment 2012 Vol. 9, No.2, pp135-145
- Kim KY. A Study on the Modeling of Atmosphere Diffusion for Stinky Substances J. of Advanced Engineering and Technology Vol. 4 No.3 (2011)pp. 273-281
- Kim KY. Distribution of Concentration and Emission of Dust according to Types of Poultry Buildings in Korea J Environ Health Sci. 2017; 43(3): 185-193
- Kim KY. 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 KY. On-site Investigation of Distribution Characteristics of Odorous Compounds Emitted from Poultry buildings. Korean J Odor Res Eng 2012;11(3): 105-111
- Ko YJ, Kim KY, Ko HJ, A Field Survey of Indoor Odorous Compounds Emitted from Pig Buildings Journal of Korean Society for Indoor Environment 2012 Vol. 9, No.2, pp135-145
- KREI. A Study on Farm Animal Welfare and Policy Roadmap for Korea. KREI Report R618. 2010
- Lee JW, Kim TH, Ha HC, Piao CX, Ahn K. Analysis of Suffocating Accidents in Confined Spaces in the Past 10 Years (2005-2015). J Korean Soc Occup Environ Hyg 2016;26(4):436-444
- Li C, Zhang XH, Yao G, Yang DS, Wu CC, et al Determination and Evaluation on the Ambient Air Quality of Beef Cattle Cowshed in Early Winter of Aksu, Xinjiang. Animal Husbandry and Feed Science 2013;34(4):9-12
- Ma Y, Qingzhou Boner pasture items of basic construction environmental effect evaluation study. Ocean University of China 2011
- Mei W, Comparative Study on the Environmental Indices in Beef Cattle Farms in the North and South of Xinjiang between Summer and Winter Time. Xinjiang Agricultural University 2015
- Ni JQ, Heber AJ. Sampling and measurement of ammonia at animal facilities. Advan Agron 2008;98:201-269 OALib. Available from: URL: <http://www.oalib.com/>
- Ouyang HF. Study on Detection and Control Technology of Air Environment Quality in Closed Sheep Houses in Winter in Xinjiang. Xinjiang Agricultural University. 2008
- Song IJ. The Development Process of Korean Livestock Industry : The World-Historical Origin of Structural Ecological Problems. ECO 2018;22(2):225-266
- WANFANG DATA. Available from: URL: <http://www.wanfangdata.com.cn/index.html>
- Wu QL, Jin LM, Zhou LL, Xiang M, Ding JJ, Liu HM. Study on the Air Quality Inside and Outside the Scaled Pig Farm. China Animal Husbandry Veterin Med 2012;39(11):220-224
- Wu WH. A study on piggy environmental monitoring and control system based on internet of things. Hangzhou Zhejiang University 2014
- Wu WT, Zhai J. Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large opening using computational fluid dynamics (CFD). Atmos Environ 2012;63:179-188
- Xie SG, He MY, Tang JY, Zhang YZ, Zhang YD. Analysis of harmful gases in cattle, pig and chicken house in plastic greenhouse. Gansu animal husbandry and veterinary 1991;(6): 7-8
- Ying HC, Huang DD, Wang KY. Animal husbandry Greenhouse gas detection methods and techniques. Livestock ecology 2011;10(47):56-63
- Yu LH and Liu JC. The influence and control of air quality in pig house in winter in North China. Modern animal husbandry technology Issue 6 2016:31
- Zhang YH, Yuan Z, Peng X, Wang H. FeSO₄ · 7H₂O of zeolite on laying performance of laying hens. animals breeding and feed 2015;7:34-18

<저자정보>

딩옌(석사 졸업생), 문찬석(교수)