

보안 과제( ), 일반 과제( O ) / 공개( O ), 비공개( )발간등록번호( O )  
농생명산업기술개발사업 2021년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-003835-01

# 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발

2022. 01. 21.

주관연구기관 / 서울과학기술대학교 산학협력단  
협동연구기관 / 한국방송통신대학교 산학협력단

농 립 축 산 식 품 부  
(전문기관)농림식품기술기획평가원

## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발”(개발기간 : 2019. 11. 26. ~ 2021. 10. 25.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 01. 21.

주관연구기관명 : 서울과학기술대학교 산학협력단 박 근

협동연구기관명 : 한국방송통신대학교 산학협력단 김 태



주관연구책임자 : 김 기 연

협동연구책임자 : 고 한 중

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

최종보고서							보안등급		
							일반[ <input checked="" type="checkbox"/> ], 보안[ <input type="checkbox"/> ]		
중앙행정기관명	농림축산식품부			사업명	사업명		농생명산업기술개발사업		
전문기관명 (해당 시 작성)	농림식품기술기획평가원				내역사업명 (해당 시 작성)				
공고번호	319115-2			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		319115-02			
				연구개발과제번호					
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0608	50%	LB0605	25%	EH0999	2%		
	농림식품과학기술분류	AB0203	70%	AB0201	20%	PA0302	1%		
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	국문								
연구개발과제명	국문	미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발							
	영문	Development of damage prediction and evaluation technology for livestock breeding by fine dust							
주관연구개발기관	기관명	서울과학기술대학교 산학협력단			사업자등록번호		210-82-08420		
	주소	(01811)서울 노원구 공릉로 232			법인등록번호		111371-000404		
연구책임자	성명	김기연			직위		부교수		
	연락처	직장전화	***-****			휴대전화		***-*****	
		전자우편	***@seoultech.ac.kr			국가연구자번호		**** *	
연구개발기간	전체	2019. 11. 26 - 2021. 10. 25 (23개월)							
	단계 (해당 시 작성)	1단계	YYYY. MM. DD - YYYY. MM. DD(년 개월)						
		n단계	YYYY. MM. DD - YYYY. MM. DD(년 개월)						
연구개발비 (단위: 천원)	정부지원	기관부담	그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비 외 지원금
	연구개발비	연구개발비	지방자치단체	기타( )		현금	현물	합계	
총계	350,000								350,000
1단계	1년차	138,000							138,000
	2년차	212,000							212,000
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고			
	역할	기관유형							
공동연구개발기관	한국방송통신대학교 산학협력단	고한중	부교수	***-**** *-****	***@knou.ac.kr	공동	대학		
위탁연구개발기관	연암대학교 산학협력단	송준익	교수	***-**** *-****	***@yonam.ac.kr	위탁	대학		
연구개발담당자 실무담당자	성명	김두영			직위		연구원		
	연락처	직장전화	***-****			휴대전화		***-*****	
		전자우편	***@naver.com			국가연구자번호		**** *	

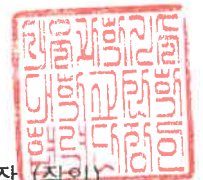
이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 01월 21일

연구책임자: 김 기 연



주관연구개발기관의 장: 서울과학기술대학교 산학협력단장 (직인)  
공동연구개발기관의 장: 한국방송통신대학교 산학협력단장 (직인)



농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

## < 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명	농생명산업기술개발사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)				연구개발과제번호		319115-02	
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0608	50%	LB0605	25%	EH0999	25%
	농림식품 과학기술분류	AB0203	70%	AB0201	20%	PA0302	10%
연구개발과제명	미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발						
전체 연구개발기간	2019. 11. 26 - 2021. 10. 25 (23개월)						
총 연구개발비	총 350,000 천원 (정부지원연구개발비: 350,000천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계	기초[√] 응용[ ] 개발[ ] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(1단계) 종료시점 목표(2단계)	
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발				
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사</li> <li>▶ 돼지와 가금류의 미세먼지로 인한 사육사 환경 오염 가능성 및 위해성 평가</li> <li>▶ 미세먼지 노출에 따른 가축 성장 및 폐사 영향 평가</li> </ul>				

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 국내외 발표 논문 및 보고 자료들을 검색하고 분석한 결과, 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 사례는 일부 보고되었음</li> <li>○ 축사 외부 미세먼지 발생에 따른 돈사와 계사의 내부 환경 오염 평균 기여도는 가스상 오염물질은 10~45%, 입자상 오염물질은 5~35%, 생물학상 오염물질은 5~25%인 것으로 분석됨</li> <li>○ 실외 미세먼지 농도가 높은 연도(2019년)와 Covid-19의 영향으로 상대적으로 미세먼지 농도가 낮은 연도(2020년)의 가축의 생산 지표를 비교한 결과, 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 분석됨</li> <li>○ 미세먼지 노출에 따른 가축의 생산성에 대한 명확한 인과 관계 규명을 위해서는 최소 5년 이상의 장기간 추적 연구 수행이 필요한 것으로 본 연구를 통해 파악됨</li> </ul>
--------	---

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<p>&lt;활용 계획&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미세먼지의 축사 환경 기여율 평가를 통한 향후 모니터링, 예측 모델 개발 등 후속 연구 설계를 위한 기초 자료로 활용</li> </ul> <p>&lt;기대 효과&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 축산 분야의 미세먼지 대응 기술 방안 정립을 위한 기반 역할 기대</li> </ul>
---------------------------	--

연구개발성과의 비공개여부 및 사유												
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 ·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화학물	신품종	
	3		1					생명 정보	생물 자원		정보	실물
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설 ·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	미세먼지		가축		피해		예측		평가			
영문핵심어 (5개 이내)	Fine dust		Livestock		Damage		Prediction		Evaluation			

## 〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	
1-1. 연구개발의 필요성 .....	4
1-2. 연구개발 대상의 국내·외 현황 .....	5
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	
2-1. 최종목표 .....	12
2-2. 연구개발 세부목표 .....	12
2-3. 연구수행 과정 및 내용 .....	12
2-3-1. 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌조사 .....	12
2-3-2. 미세먼지 및 관련 환경 유해인자의 축사 내부 기여도 현장평가 .....	20
2-3-3. 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 가축의 생산성 변화 실태조사	43
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	
3-1. 연구수행 결과 .....	51
3-2. 목표 달성 수준 .....	56
4. 목표미달 시 원인분석(해당 시 작성) .....	57
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 .....	58
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....	58
7. 별첨 자료 (참고 문헌)	

# 1. 연구개발과제의 개요

## 1-1. 연구개발의 필요성

- 미세먼지(PM, Particulate Matter)에 대한 국민적인 관심이 높아지고 있다. 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 연평균 농도는 2000년 초반에 비하여 절반수준으로 감소하여 2017년 연평균 47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 대기환경기준인 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족하고 있으나, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 농도는 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2016년)로 OECD 회원국 중 가장 나쁜 수준에 머물러 있다(KEI, 2017).
- 특히 입경이 10 $\mu\text{m}$  이하의 미세입자는 보건학적 측면에서는 흡입 노출시 폐암 등의 호흡기계 질환을 유발하고, 환경적 측면에서는 시정거리 감소를 유도하는 주요 원인물질 중 하나이며, 축산 시설 유래 미세먼지 표면에 각종 세균, 진균 등이 흡착하여 인체 내부로 유입 될 경우 기침, 알러지, 기관지염, 천식, 천식 유사질환, 폐렴, ODS(Organic dust toxic syndrome) 등과 같은 각종 만성 및 급성 호흡기계 질환을 유발할 수 있다(Cambra-Lopez et al., 2010).
- 미세먼지는 돼지 및 가축에게도 좋지 않다. 미세먼지농도가 매우 높은 비육돈사에서 사육된 돼지들을 도축 시 검사한 결과 87%의 돼지에서 폐렴이 발생했다는 보고가 있다. 또한 먼지 농도가 300 $\text{mg}/\text{m}^3$ 의 높은 수준에서는 성장에 영향을 주며 통상적으로 10 $\text{mg}/\text{m}^3$ 인 경우에는 영향이 없다. 그러나 먼지에 유해가스, 먼지에 축적된 미생물 등 다른 요인들이 결합되었을 경우 돼지 건강에 영향을 미친다.
- 친환경 축산업의 진흥 도모 뿐만 아니라, 가축의 생산성 및 2차 피해 감소, 그로 인한 축산업 종사자와 인근 주변에 정주하는 사람들의 건강보건을 확보하기 위해 축산(Sustainable Livestock) 구축에 중요한 선결과제임을 인식해야 할 시점이다.
- 본 연구에서는 양돈 및 가금류(닭, 오리) 사육사의 입자상 오염물질(미세먼지, 부유 미생물, 중금속)로 인한 환경오염 가능성 및 환경 위해성 평가, 미세먼지의 농도 수준에 따른 사육사 환경에 대한 기여도 평가, 돼지와 가금류(닭, 오리)의 생육 주기를 고려한 미세먼지 노출 수준별 가축의 성장 영향 평가를 통해 미세먼지가 돼지 및 가금류(닭, 오리)의 성장 및 폐사율 등에 끼치는 영향 조사를 실시하고자 한다.



<그림 1> 연구 개발의 전체 개요

## 1-2. 연구개발 대상의 국내·외 현황

### 가. 국외 기술 수준 및 시장 현황

#### ○ 미세먼지 및 부유 미생물의 축사 실내 농도 및 배출계수 산정 측면

▶ 유럽 및 북미의 축산 선진국들은 20여년 전부터 축사 환경과 관련한 효과적인 제어 대책을 강구하기 위해 주로 돈사에서 발생하는 다양한 대기오염물질의 발생 원단위를 설정하는 기초 조사를 이미 완료했거나 수행 중에 있다(<표 1> 참조).

▶ 1998년도에 영국, 독일, 네덜란드, 덴마크 북유럽 4개 국가들이 정부차원에서 공동으로 축사에서 발생하는 대기오염물질 발생으로 인한 환경 피해를 억제한다는 측면에서 전체 329개 축사를 대상으로 분진, 부유 세균에 대한 현장 기초조사를 수행했다(Wathes 등, 1998).

▶ 축사 형태 중 돈사의 예를 들면, 총분진의 평균 농도와 발생량은 슬랫의 경우  $2.4 \text{ mg m}^{-3}$ 과  $120 \text{ mg h}^{-1}\text{m}^{-2}$ , 깔개의 경우  $1.3 \text{ mg m}^{-3}$ 과  $150 \text{ mg h}^{-1}\text{m}^{-2}$  (Takai 등, 1998), 부유 세균의 평균 농도와 발생량은 슬랫의 경우  $5.1 \text{ log}(\text{cfu m}^{-3})$ 과  $1.4 \text{ log}(\text{cfu h}^{-1}\text{m}^{-2})$ 로 분석되었고, 깔개는 조사되지 않았다(Seedorf 등, 1998).

<표 1> 유럽과 미국의 돈사 내 미세먼지 및 생물학상 오염물질의 농도 및 배출계수

			mg/h/1pig		mg/h/2m <sup>2</sup>		
			Mean	Range	Mean	Range	
총분진	유럽	Slats	91.84	-	123.44	-	Takai et al., 1998
		Litter	108.83	-	146.28	-	Takai et al., 1998
호흡성 분진	미국	Slats	9.90	-	13.31	-	Takai et al., 1998
		Litter	10.65	-	14.31	-	Takai et al., 1998
			log(cfu/m <sup>3</sup> )/h/1pig		log(cfu/m <sup>3</sup> )/h/2m <sup>2</sup>		
			Mean	Range	Mean	Range	
부유세균	유럽	Slats	1.05	-	1.41	-	Seedorf et al., 1998
부유진균	유럽	Slats	0.87	-	1.17	-	Seedorf et al., 1998

#### ○ 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 가축의 생산성 및 질병 발생 평가 측면

▶ 지금까지 첨가제 투여 등의 사료 조성 변화를 통한 영양원적 측면과 돈사 환기시스템 및 분뇨처리 방법 개선 등의 동물 복지 측면에서 주로 돼지의 생산성을 평가하였다.

▶ 돈사내 공기오염물질의 경우 돼지의 건강상 장해 측면에서 가스상물질, 입자상물질의 노출 수준에 따른 반응 양상을 연구한 것들이 대부분이나, 생산성 지수의 개발, 이유후전신소 모성증후군 (PMWS) 발병 및 여타 다른 환경유해인자들과의 상호 연관성에 대한 고찰은 검토된 바 없다.

▶ 동물 복지 차원에서 유럽을 중심으로 적정 사육밀도의 적용 및 환기시스템 개선 등의

사양관리 측면에서 돼지의 생산성을 평가한 경우는 있으나, 환경유해인자와 돼지의 생산성 간의 연관성을 연구한 사례는 미진한 상황이다.

▶ 또한 축사의 시설 및 환경관리는 가축의 입식에서부터 출하까지 가축의 생리학적 반응과 질병 발생에 직·간접적으로 연관되어 있으나, 축사 환경에 영향을 주는 미세먼지 등 환경유해물질 가운데 어떠한 물질들이 가축의 최적 생산성에 악영향을 미치고 더 나아가 축산 경영에 큰 부담을 주고 있는 만성질병과 상호연관이 있는가에 대한 통합적인 환경관리 및 예찰 정보는 극히 제한적이다.

### ○ 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 축산물의 안전성 평가 측면

▶ 국외에서는 대부분 실내 공기오염물질의 호흡 노출로 인한 사람만의 건강위해성을 예측하는 데 초점을 맞추고 활용되고 있다(<표 2> 참조).

<표 2> Quantitative Risk Assessment (QRA) 모델을 적용한 국외 연구 사례

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황 및 발표
Finnish Institute of Occupational Health (Finland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 1~6세아동의 Cancer risk : Ingestion(<math>2.3 \times 10^{-6}</math>, <math>1.7 \times 10^{-7}</math>), Dermal(<math>1.5 \times 10^{-6}</math>, <math>1.2 \times 10^{-7}</math>)</li> <li>▶ 결정론적위해성평가 : Ingestion(<math>2.3 \times 10^{-6}</math>), - 건축물에 사용된 PCB 방출에 의한 Dermal(<math>1.55 \times 10^{-6}</math>) 의 건강위해성 평가 활용</li> <li>▶ 확률론적위해성평가 : Ingestion(<math>1.2 \times 10^{-6}</math>), - Priha et al. (2005) Dermal(<math>9.6 \times 10^{-7}</math>)</li> <li>▶ Hazard quotient(비발암) : 고농도노출(0.8, 0.09), 저농도노출(0.06, 0.005)</li> </ul>	
Department of Public Health, Oregon State University (USA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 17개 HAPs가 발암위해도 <math>1 \times 10^{-6}</math>초과</li> <li>▶ Acrolein이 비발암위해도 HI 1초과</li> <li>▶ 일부 HAPs는 mobile source로부터 기여</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 발암/비발암성의 43가지 HAPs에 대한 체영향평가 활용</li> <li>- Tam and Neumann (2004)</li> </ul>
Research Centre for Urban Environmental Technology and Management, The Hong Kong Polytechnic University (Hong Kong)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 모든 그룹에서 VOCs에 의한 발암위해도가 <math>1 \times 10^{-6}</math>을 초과함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가정, 사무실, 학교, 교통수단, 소규모 등에서 VOCs에 노출에 의한 건강가 활용</li> <li>- Schuhmacher et al. (2004)</li> </ul>

▶ 서구 유럽국가에서는 1960년대에서 1970년대로 전환하면서 많은 화학물질의 노출이 건강상에 장해를 유발할 수 있는가에 대한 의문이 증대되었으며, 또한 노출량에 따른 건강상의 장해 정도를 정량적으로 평가하고자 하는 사회적 요구가 제기되었다.

▶ 이에 기존의 화학물질의 노출로 인한 건강상의 장해 유발 가능성을 평가하는데 있어 역학연구 및 독성학적 연구는 오랜 연구기간 및 많은 연구비의 소요 등과 같은 단점을 가지고 있음을 인식하고 이의 단점을 극복하기 위한 과학적 수단으로 건강위해성 평가 기술을 개발하였다.

▶ 이후 최근까지 많은 유해오염물질에 대한 개별 건강위해성평가 연구 뿐만아니라 복합



유해오염물질의 노출로 인한 건강위해성평가 기술이 개발되어졌으며, 최근에는 다중매체 노출에 의한 건강위해성 평가 기술이 개발되어 수행되었다.

▶ 하지만 건강위해성평가 시스템과 관련한 대부분의 연구들이 축산물이 아닌 다른 종류의 음식 섭취에 따른 소비자의 건강과 공기오염물질 노출에 따른 불특정 사람들의 건강 상태를 예측하는데 이용되었으며, 이를 프로그램화하여 상용화한 경우는 아직 보고된 바 없다.

### ○ 미세먼지의 발생원 추적 및 기여도 평가 측면

▶ 일반적으로 미세먼지는 이온 물질 ( $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ), 유기 탄소 (Organic Carbon), 원소 탄소 (Elemental Carbon), 중금속 등을 포함하고 있는 것으로 보고되고 있고, 각 성분별 발생원은 다음과 같다(<그림 2> 참조).

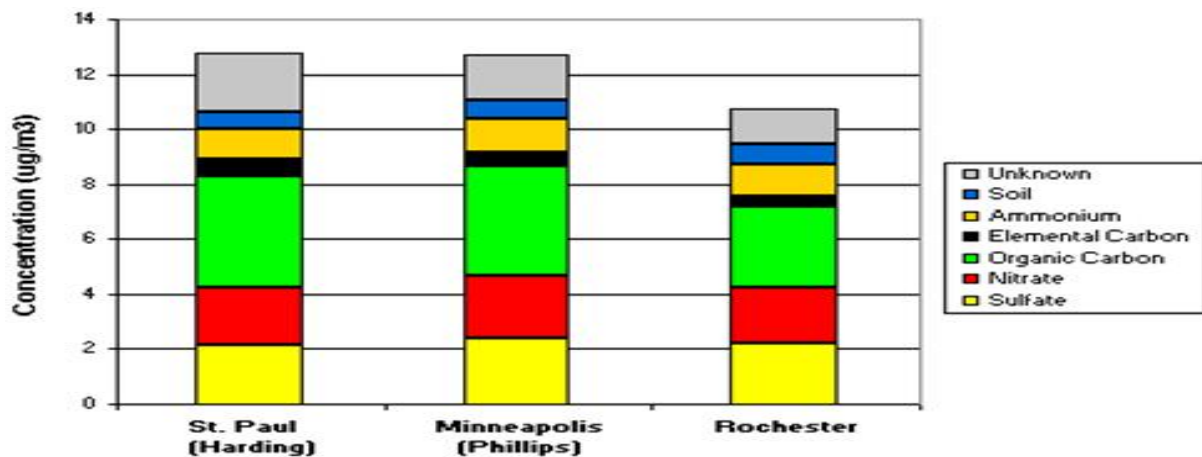
☞ 유기 탄소(Organic Carbon) : 화석연료 또는 biomass burning 에서 배출, 일차적 또는 이차적 오염원.

☞ 원소 탄소(Elemental Carbon) : 숲, 검댕. 등 탄소 배출원에서의 일차적 배출.

☞ Soil :  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  등 토양기원(황사 등)

☞ Unknown : 중금속, 해양입자 등 미량이거나, 미분석 하였거나, 기타 등.

☞ Ammonium, Sulfate, Nitrate : 인위적 도시 배출원.



<그림 2> 미국의 도시별 미세먼지 조성 성분

(출처 : <http://www.pca.state.mn.us/artwork/indicators/0603-figure4.gif>)

▶ 미세먼지의 입경에 따른 화학적 원소 조성은 크게 다음과 같은 3가지로 구성되고 있다 (<그림 3> 참조).

☞ 대륙 거대입자 (주로 토양기원)

: Ca, Si, Al, Fe, K, Ti, Sr 등은 대륙 및 토양에서 이동된 air mass임을 보여줌

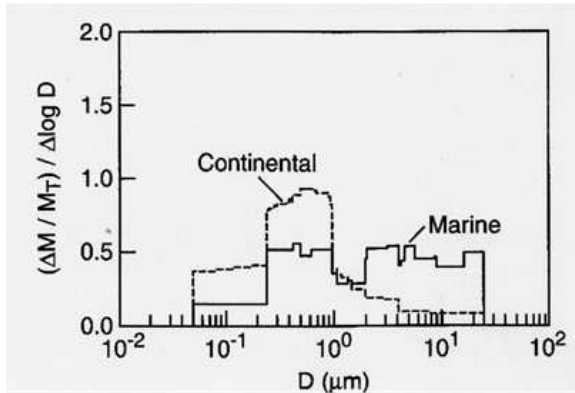
☞ 대륙 미세입자 (주로 산업배출)

: 탄화수소류,  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ 와 Cd, Pb, Hg, Zn, As, Mn 등의 중금속은 대륙에서 가스상 물질이 이동해오는 과정 또는 현재 지역에서 오래 존재하면서 이차적으로 생성된 것

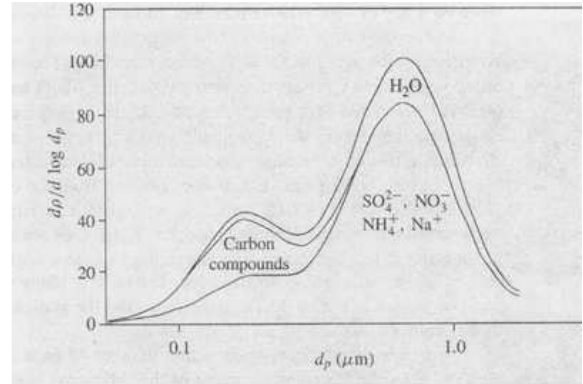
임을 보여줌

☞ 해양 기원 (주로 거대입자)

:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  등은 바다 쪽에서 유래한 것임을 보여줌.



<대륙과 해양기원의 입자크기 비교>  
(출처 : Finlayson-Pitts and Pitts, 2000)



<미세입자의 화학적 조성>  
(출처 : Friedlander, 2000)

<그림 3> 미세먼지의 입경별 화학적 조성

## 나. 국내 기술 수준 및 시장 현황

### ○ 미세먼지 및 부유 미생물의 측사 실내 농도 및 배출계수 산정 측면

▶ 본 연구 제안팀에서 2004년도에 사육사 중 돈사를 대상으로 내부에서 발생하는 공기오염물질을 가스상, 입자상, 생물학상으로 분류하여 내부 농도 및 배출계수를 산정한 것이 국내에서 최초로 수행되었다(Kim et al., 2008a; 2008b; 2008c)(<표 3> 참조).

<표 3> 돈사에서 발생하는 공기오염물질의 내부 농도 및 배출계수

측정 물질		평균 실내 농도	평균 발생량
가스상 물질	암모니아	8 ppm	340 $\text{mg h}^{-1}\text{m}^{-2}$
	황화수소	300 ppb	50 $\text{mg h}^{-1}\text{m}^{-2}$
입자상 물질	총부유먼지	2 $\text{mg m}^{-3}$	50 $\text{mg h}^{-1}\text{m}^{-2}$
	미세먼지	0.6 $\text{mg m}^{-3}$	15 $\text{mg h}^{-1}\text{m}^{-2}$
생물학상 물질	총부유세균	4 $\text{log}(\text{cfu m}^{-3})$	1.3 $\text{log}(\text{cfu m}^{-3}) \text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$
	총부유진균	3 $\text{log}(\text{cfu m}^{-3})$	1.0 $\text{log}(\text{cfu m}^{-3}) \text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$

▶ 하지만 본 연구의 경우 축종별 조사 대상을 돈사(육성/비육돈사)에만 한정하였고, 측정 회수의 부족에 따른 우리나라의 기후적/지형적 조건이 반영되지 못하였으며, 악취 배출 계수의 경우 암모니아와 황화수소만을 대상으로 하였다는 제한점을 내포하고 있다.

### ○ 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 가축의 생산성 및 질병 발생 평가 측면

▶ 외국의 경우와 마찬가지로 가축의 영양원적 측면과 사육형태 측면에서 생산성을 평가

하였으나 소수의 연구 사례만 보고되고 있으며, 가축의 미세먼지 등 환경유해인자 노출관련 연구는 전혀 수행된 바 없다.

▶ 축사 중 돈사를 대상으로 환경유해인자에 대한 기초 연구가 일부 진행되었으나, 선행 연구들은 본 연구과제에서 제안하고자 하는 가축 사육 관련 생장 측면과 사육사 환경오염과는 다소 거리가 있다고 할 수 있다.

▶ 또한 가축의 호흡기계 질환과 세균성 질병의 매개체라 간주되는 입자상 물질이나 생물학상 물질에 대한 농도 분석과 정량화 연구는 극히 초보적인 단계라 할 수 있다.

### ○ 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 축산물의 안전성 평가 측면

▶ 사람을 대상으로한 오염물질의 노출경로 및 건강위해성평가 국내 연구는 1990년대 이후 많은 연구가 진행되었다.

▶ 그러나 아직 가축을 대상으로 한 오염물질의 노출경로 및 누적량 평가, 독성평가 및 건강위해성평가 연구는 외국과 마찬가지로 전무한 실정이며, 또한 축산물의 소비자인 일반 사람들로의 오염물질 전달율에 관한 연구 역시 보고된 바 없다.

### 다. 관련 기술에 대한 본 연구 제안팀의 선행 연구 결과

▶ 국내에서는 유일하게 축사에서 발생하는 미세먼지 등 실내공기오염물질의 정량화 연구를 현장 방문 조사를 통해 수행하여 국외 다수 저널에 발표하였다 (<표 4>와 <그림 4> 참조).

▶ 사육사 중 돈사를 대상으로 유형에 따라 환경유해인자에 해당되는 돈사내 공기오염물질을 가스상 물질, 입자상 물질, 생물학상 물질로 구분하여 대표적 주요 물질들의 농도를 모니터링하여 국내에서는 처음으로 본 자료들의 DB화를 시도함과 동시에 외국의 선행 연구 결과들과 비교하였다.

▶ 이러한 연구 경험 및 관련 측정 기술의 보유를 토대로 본 연구 제안기관에서는 미세먼지와 가축의 생산성과의 연관성을 규명하여 객관적 상관지수를 구축할 계획이다.

<표 4> 본 연구 수행팀의 가축 사육사 실내 환경 연구 사례

연구 주제	연구 내용	발표 학회지
Assessment of airborne bacteria and fungi in pig buildings in Korea	국내에 위치한 돈사들의 유형에 따른 바이오에어로졸 (부유세균 및 진균)의 농도 조사	Biosystems Engin (2008)
Association between pig activity and environmental factors in pig confinement buildings	돈사 유해인자와 돼지 행동성간의 상관성 조사	Australian Journ Environmental Agr (2008)
Influence of extreme seasons on the airborne pollutant levels in a confinement pig building	극단적 기후 조건 (여름과 겨울) 에 따른 돈사내 공기오염물질의 변동 파악	Archives of Environ and Occupational (2007)
Quantification of ammonia and hydrogen sulfide emitted from pig buildings in Korea	돈사에서 발생하는 암모니아와 황화수소의 현장 조사	Journal of Environ Managemen (2008)
Monitoring of aerial pollutants emitted from swine houses in Korea	국내 현장 조사를 통한 돈사내 공기오염물질의 모니터링	Environmental Mo and Assessme (2007)
Sulfuric odorous compounds emitted from pig-feeding operations	돈사로부터 발생하는 황계열 악취물질들의 정량화	Atmospheric Envir (2007)
Farmer and pig exposure to aerial contaminants in a pig confinement building	돈사내 공기오염물질의 작업자 및 돼지의 노출 정도 파악	Transactions of the (2007)
Effect of ventilation rate on gradient of aerial contaminants in the confinement pig building.	환기율 변화에 따른 돈사내 공기오염물질의 농도 변화 조사	Environmental Re (2005)

ASSESSMENT OF KOREAN FARMER'S EXPOSURE LEVEL TO DUST  
IN PIG BUILDINGSKi Youn Kim<sup>1</sup>, Han Jong Ko<sup>2</sup>, Yoon Shin Kim<sup>1</sup>, Chi Nyon Kim<sup>3</sup><sup>1</sup>Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea<sup>2</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Japan<sup>3</sup>Institute for Occupational Health, College of Medicine, Yonsei University, Republic of KoreaKim KY, Ko HJ, Kim YS, Kim CN: Assessment of Korean farmer's exposure level to dust in pig buildings. *Ann Agric Environ Med* 2008, 15, 81-167.

**Abstract:** The purpose of the study was to assess Korean farmer's exposure level to dust in pig buildings and dust emissions by investigating airborne concentrations of total and respirable dust. Five main types of pig buildings operating currently in Korea were selected. For area air sampling, 30 sites per each building type were visited during spring (March–May) and autumn (September–November) seasons. For personal air sampling, concentrations of total and respirable dust were measured for 2–3 hours, during cleaning the pig building before the end of the daily shift, by attaching air sampling equipment near to the farmer's breathing zone. Measurement was taken for 8 hours, e.g. average daily work time (09:00–17:00), at 0.5 m above the floor at three locations on the central alley in the pig building. Emission rates of total and respirable dust were estimated by multiplying the mean concentration of total and respirable dust measured near the air outlet by the mean ventilation rate, and expressed either per area or per pig of live weight. The ranges of farmer's exposure level to total dust and respirable dust in the pig buildings were estimated as 0.6–6.7 mg m<sup>-3</sup> and 0.3–3.5 mg m<sup>-3</sup>, respectively. The pig buildings operated with a deep-litter bed system showed the highest dust level while the naturally ventilated pig buildings with slats represented the lowest dust level ( $p < 0.05$ ). Emission rates ranged from 55–400 mg h<sup>-1</sup>m<sup>2</sup> for total dust and from 4–40 mg h<sup>-1</sup>m<sup>2</sup> for respirable dust, respectively, indicating a similar pattern for the distribution of exposure level. Korean farmers' exposure level to dust in all the pig buildings investigated was below the exposure limit value equal in Korea equal to 10 mg m<sup>-3</sup>, while it exceeded the threshold limit values (TLVs) established in other developed countries. In comparison with previous studies performed in other countries, mean exposure level in the pig buildings of Korea was generally lower for total dust and higher for respirable dust based on the area sampling method.

**Address for correspondence:** Ki Youn Kim, Institute of Industrial and Environmental Medicine, Hanyang University, Seoul 133-791, Republic of Korea.  
E-mail: kkyun5@empal.com

**Key words:** pig building, dust, Korean farmer, threshold limit values.

## INTRODUCTION

The current industry related to pig production in Korea has become larger and more intensified in terms of economics. Social concerns for environmental impact on air, water and soil pollution grew along with the accelerated growth of the industry. Needless to say, a massive amount

of waste water and aerial contaminants emitted from pig production can cause serious environmental problems, which prompted the establishment of strict environmental regulations related to pig production [17, 39].

Of the aerial contaminants generated from pig building, particulate matters like dust play a role in not only deteriorating indoor air quality but also causing an adverse

Received: 25 September 2006  
Accepted: 5 December 2007

## &lt;총부유먼지와 미세먼지&gt;

BIOSYSTEMS ENGINEERING 99 (2008) 565–572



Available at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jae



Research Paper: SE—Structures and Environment

Assessment of airborne bacteria and fungi  
in pig buildings in KoreaKi Youn Kim<sup>a,\*</sup>, Han Jong Ko<sup>b</sup>, Hyeon Tae Kim<sup>b</sup>, Chi Nyon Kim<sup>c</sup>, Yoon Shin Kim<sup>a</sup><sup>a</sup>Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Republic of Korea<sup>b</sup>Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto, Japan<sup>c</sup>Institute for Occupational Health, College of Medicine, Yonsei University, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 28 May 2007

Received in revised form 4 December 2007

Accepted 20 December 2007

Inhalation of biological contaminants in a pig building can be detrimental to a farm worker's health through effects such as infection, allergy or toxicosis. The principal aim of this field study was to determine the concentrations and emissions of biological contaminants, i.e. airborne bacteria and fungi, in the different types of pig buildings in Korea to allow an objective comparison with the other countries in terms of pig housing types. Pig buildings in this research were selected using three criteria such as manure removal system, ventilation mode and the growth stage of the pigs. Measurements of the concentration and emission of total airborne bacteria and fungi in the pig buildings were performed in 5 housing types and on 15 farms.

The concentrations of total airborne bacteria and fungi in the pig buildings were averaged to 4.13 log(cfu m<sup>-3</sup>) and 3.14 log(cfu m<sup>-3</sup>), respectively, and ranged from 1.16 to 10.26 log(cfu m<sup>-3</sup>) and from 0.46 to 6.86 log(cfu m<sup>-3</sup>), respectively. The mean emissions of total airborne bacteria and fungi per pig (75 kg in terms of liveweight) and area (m<sup>2</sup>) from pig buildings were 0.98 log(cfu h<sup>-1</sup> pig<sup>-1</sup>) and 0.73 log(cfu h<sup>-1</sup> pig<sup>-1</sup>) and 1.32 log(cfu h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) and 0.96 log(cfu h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>), respectively.

The pig buildings with a deep-litter bed system showed the highest emissions of total airborne bacteria and fungi ( $p < 0.05$ ). However, the emissions of total airborne bacteria and fungi from the other pig buildings were not significantly different. This study showed that the mean concentrations of total airborne bacteria and fungi in pig buildings situated in Korea were generally lower than those in other countries. The mean emissions of total airborne bacteria and fungi in the pig buildings showed little differences between Korea and other countries. It was concluded that the concentrations and emissions of total airborne bacteria and fungi were relatively higher in the pig buildings which are managed with deep-litter bed systems and those ventilated naturally than other pig housing types.

© 2007 IAgrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Social problems related to environmental pollution and industrial hygiene caused by the operation of intensive pig

production have been raised continuously in Korea. As a result, most pig farm managers in Korea have difficulties in keeping up with much governmental regulations which are imposed to prevent environmental contamination.

\*Corresponding author. Tel.: +82 2 2220 1510, fax: +82 2 2292 2510.  
E-mail address: kkyun5@empal.com (K.Y. Kim).  
1537-5119/\$ - see front matter © 2007 IAgrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.  
doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.12.006

## &lt;부유세균과 부유진균&gt;

<그림 4> 본 연구 수행팀에서 발표한 축사 공기오염물질 관련 주요 국외 논문

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### 2-1. 최종 목표

- 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발
  - ▶ 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사
  - ▶ 돼지와 가금류의 미세먼지로 인한 사육사 환경오염 가능성 및 위해성 평가
  - ▶ 미세먼지 노출에 따른 가축 성장 및 폐사 영향 평가

### 2-2. 연구 개발 세부 목표

- 주관연구기관(서울과학기술대학교)
  - ▶ 돼지와 가금류(닭, 오리)의 미세먼지로 인한 사육사 환경오염 가능성 평가
- 협동연구기관(한국방송통신대학교)
  - ▶ 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사 및 현장 실증 평가
- 위탁기관 (연암대학교)
  - ▶ 현장 실증 평가를 위한 사육사 Test-bed 제공 및 유지 관리

### 2-3. 연구 수행 과정 및 내용

#### 1) 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사

- 검색 방법 : 본 연구 주제와 관련된 키워드(keyword)들을 “또는(or)”로 조합하여 국내외 문헌 검색 사이트(scencedirect, Pubmed, Riss 등)를 통해 검색
  - ▶ 검색 키워드 : 미세먼지(fine dust, PM<sub>10</sub>), 초미세먼지(ultrafine dust, PM<sub>2.5</sub>), 가축(livestock), 돼지(pig 또는 swine), 닭(chicken 또는 poultry), 피해(damage), 평가(evaluation 또는 assessment)

#### 1-1) 미세먼지가 가축에 주는 건강 영향 평가

○ 본 연구는 건강한 쥐, 심혈관 질환이 있는 쥐를 모델로 하여 진행되었다. 5 HRV (심박변이도) 매개변수에 미세먼지에 대한 단기 노출 영향을 평가하였다. HRV는 심장 박동의 미세한 주기 변화를 측정하는 것이다. 실험 결과, 미세먼지에 단기간 노출되면 설치류의 HRV가 감소하여 심장 자율 기능에 영향을 줄 수 있다는 점이 확인되었다. 다만, 노출빈도는 미세먼지와 HRV의 관계에 영향을 미친다는 증거를 발견하지 못했다[ Effects of short-term exposure to particulate matters on heart rate variability: A systematic review and meta-analysis based on controlled animal studies, 256].

○ 본 연구는 감수성에 따라 미세먼지에 대한 악영향의 정도를 확인하기 위해 주된 대기오염물질인 잔류 오일 플라이 애시(ROFA)를 가지고 실험을 하였다. 실험은 쇼

그런 증후군이 자발적으로 나타나는 NOD 쥐의 호흡기에 주입하는 것으로 이루어졌고 기존의 폐병변을 악화시켜 24시간 이내에 폐렴의 증상을 발생시킨다는 것을 증명했다[Ferraro et al, (2015) Air particulate matter exacerbates lung response on Sjögren's Syndrome animals, 67(2): 125-131].

○ 본 연구는 제브라피시 모델을 사용하여 PM<sub>2.5</sub> 노출에 의해 유발된 모세포 손상 및 발달독성을 평가하였다. PM<sub>2.5</sub>에 노출된 제브라피시는 노출되지 않은 무리보다 몸 또는 꼬리가 구부러져 신체길이가 더 짧은 경향을 보였다. 또한 심장의 모양이 비정상적이며 심박수가 크게 감소하였다[Rhee et al, (2019) Assessment of hair cell damage and developmental toxicity after fine particulate matter 2.5µm (PM<sub>2.5</sub>) exposure using zebrafish (Danio rerio) models, 126].

○ 본 연구는 교통량이 많은 곳에서 방출되는 미세먼지가 폐기종의 발달을 악화시키는 지에 대한 연구를 수행하였다. 미세먼지(PM)의 주요 공급원은 디젤 자동차의 배기가스이며 이는 쥐에게 알레르기 폐질환을 일으키는 등 호흡기 건강에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 미세먼지에 만성적으로 노출된 실험동물이 프로테아제-유발 폐기종을 악화시킨다는 것이 확인되었다[Lopes et al, (2009) Exposure to ambient levels of particles emitted by traffic worsens emphysema in mice, 109(5): 544-551].

○ 본 연구는 외기 또는 농축된 주변 입자에 노출된 수컷과 암컷 생쥐의 폐질환의 염증적 차이를 평가했다. 수컷 생쥐에서 대부분 급성 염증으로 발현된 반면, 암컷에서는 만성 염증 반응으로 발현되었다[Yoshizaki et al, (2017) The effects of particulate matter on inflammation of respiratory system: Differences between male and female, 586, 284-295].

○ 본 연구는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 10주 동안 쥐를 흡입 노출시켰는데, 그 결과 지방간, 염증 및 섬유증을 특징으로 하는 비알콜성지방간염(NASH) 유사 표현형을 발달시켰다. 또한, 간에 저장된 글리코겐이 감소되고 포도당 불내성 및 인슐린 저항성을 일으키는 등 간 기능의 저하가 나타났다[Zheng et al, (2014) Exposure to ambient particulate matter induces a NASH-like phenotype and impairs hepatic glucose metabolism in an animal model, 58(1): 148-154].

○ 본 연구는 겨울 밀라노의 대기에서 부유하는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 쥐에게 노출시켜 발현하는 질환에 대해 관찰하였다. 밀라노의 PM<sub>2.5</sub> 화학성분은 다른 유럽 도시들과 유사하고 주로 질산염, 유기탄소, 다환 방향족탄화수소와 Pb, Al, Zn 등의 원소가 있다. 노출된 쥐의 심장조직의 유전자 발현에 강한 영향을 미쳤고 폐조직에서는 이보다 덜한 영향을 미쳤다. 이 결과는 노인 및 구조적 심장질환을 가진 사람들 같이 심장이 약한 사람들에게 치명적일 수 있다[Sancini et al, (2014) Health Risk Assessment for Air Pollutants: Alterations in Lung and Cardiac Gene Expression in Mice Exposed to Milano Winter Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>), 9(10)].

○ 본 연구는 임신 중인 생쥐가 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 흡입 노출되었을 때 조산(PTB) 또는 임신 중 저체중(LBW)을 유발하는지를 조사하였다. 초미세먼지에는 Na, Mg, Al, S, Si, K, Ca 등이 포함되어 있었다. 실험 결과 초미세먼지에 노출된 생쥐는 PTB, LBW가 발생하였지만 태아의 출생 체중에는 영향을 미치지 않았다[Blum et al, (2017) Exposure to Ambient Particulate Matter during Specific Gestational Periods Produces Adverse Obstetric Consequences in Mice, 125(5)].

○ 본 연구는 홍콩과 중국에서 발생하는 PM<sub>2.5</sub>의 주요 무기 성분인 암모늄과 황산염이 노화된 쥐의 신경 생성에 미치는 영향을 평가하였다. 황산암모늄 공기에 노출된 쥐의 해마의 과립하영역에 있는 미성숙 뉴런의 성숙 과정을 억제하고, 미성숙 뉴런의 수지상 복잡성을 감소시키는 것으로 관찰되었다. 간단하게 말해서 PM에 노출되면 신경 발생 중 성숙 과정에 특정한 부작용이 발생한다[Cheng et al, (2017), P M<sub>2.5</sub> exposure suppresses dendritic maturation in subgranular zone in aged rats, 32(1): 50-57].

○ 본 연구는 축사를 대상으로 먼지 입자의 이동 양상을 파악한 것으로 현장 평가 결과, 먼지 입자는 한 축사에서 다른 축사, 또는 축사에서 농가와 인근 주택으로 대기 확산을 통해 이동하면서 동시에 서로 다른 화학적 화합물과 부유 미생물을 먼지 표면에 흡착하여 운반할 수 있음을 보고하고 있다. 이는 미세먼지의 노출이 가축의 공기 중 감염과 악성 질환의 위험을 증가 요인으로 작용할 수 있음을 시사해 주는 연구 결과라 할 수 있다[Mostafa, (2012) Air-polluted with particulate matters from livestock buildings].

## 1-2) 미세먼지 조성

### 가. 일반 대기

○ 본 연구는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 조성 및 공급원을 규명하기 위해 미국 중서부 시골 및 도시 지역을 대상으로 수행되었다. 시골에서의 PM<sub>2.5</sub>에서 황산염, 질산염, 암모늄, 유기탄소가 높은 질량 분율을 차지하였고, 토양에서 Si, Al이 많이 분출되는 것을 알 수 있었다. 한편 도시 지역에는 2차 에어로졸 (질산염, 황산염, 암모늄) 및 연소 생성물(원소 탄소) 수치가 높게 관측되었다. 또한 산업화가 많이 진행된 도시 지역에서는 PM<sub>2.5</sub>와 미량 금속 (Fe, Pb, Zn)의 수치가 높아서 대기 질에 미치는 영향이 큰 것을 보여주었다[Kundu & Stone, (2014) Composition and sources of fine particulate matter across urban and rural sites in the Midwestern United States, 16(6): 1360-1370].

○ 본 연구는 중국 시안의 고속도로 터널 내부의 PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>10</sub>의 화학적 조성에 대해 조사하였다. PM<sub>2.5</sub>의 질량분율은 유기탄소(OC, 34.1%), 원소탄소(EC, 11.96%), 수용성 이온(18.22%), 원소(27.73%) 이었고, PM<sub>10</sub>의 경우 OC(28.48%), EC(8.59%), 수용성 이온(14.17%), 원소(33.36%)인 것을 확인하였다. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 OC/EC 비율은 각각 2.99%, 3.3%로 EC의 질량비율이 높았다. EC는 불완전 연



소로 형성되고, OC는 1차 유기탄소(POC)와 2차 유기탄소(SOC)으로 형성되어 두 탄소 모두 자동차에서 직접 방출된다는 점을 시사했다[Hao et al, (2019) Chemical Composition of Particulate Matter from Traffic Emissions in a Road Tunnel in Xi'an, China, 19: 234-246].

○ 본 연구는 독일에서 80km 떨어진 작은 마을 두 곳에서 미세먼지 입자(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5-10</sub>)를 포집하고 미세먼지에 포함되어 있는 내독소(endotoxin) 농도를 측정하였다. 실험 결과 계절마다 내독소에 차이가 있다는 것이 밝혀졌다. 2~4월에는 내독소 농도가 낮았지만, 5~6월엔 그 수치가 2~4배 더 증가하였다. 이는 5~6월에 온화한 기후가 식물 및 미생물의 성장에 영향을 준 것을 확인할 수 있다. 또 다른 연구에서 축사의 내독성 농도는 mg 당 최대 수천 EU로 측정되었으며, PM<sub>10</sub>의 내독소 농도는 미세입자 보다 약 10배 높았다[Heinrich et al, (2003) Endotoxin in fine (PM<sub>2.5</sub>) and coarse (PM<sub>2.5-10</sub>) particle mass of ambient aerosols. A temporo-spatial analysis, 3659-3667].

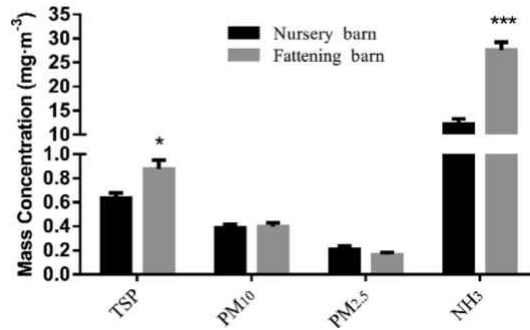
#### 나. 축사 실내

○ 본 연구는 축사에서 발생하는 미세먼지 입자크기 및 조성을 규명하기 위해 진행되었다. 축사의 미세먼지는 90% 유기물로 이루어져 있으며, 돈사에서 배출되는 대부분은 사료에 의한 것으로 확인되었다. 지름이 약 0.65 $\mu$ m인 작은 입자에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 2차 입자에 해당하는 S, O, C가 많았고, 나머지는 생물학적 기원의 입자 성분(C, H, O, N, P, S)이었다(<그림 1> 참조)[Cambrá-López et al, (2010) Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem, 158(1): 1-17].

Sector	PM2.5	PM5	PM10	> PM10
Pigs	8-12%	4-14%	40-45%	55%
Broilers	9%	-	58%	42%
Laying hens	3%	-	33%	67%
Cattle	-	17%	-	-

<그림 1> 축사 실내에 분포하는 총 부유 분진의 입경 분율

○ 본 연구는 고상식 비육돈사 및 고상식 자돈사에서 발생하는 암모니아와 총 부유 분진, 흡입 가능한 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)의 농도를 모니터링 하였다. 두 돈사 모두 암모니아의 농도가 높고 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)보다 미세먼지(PM<sub>10</sub>)농도가 높은 것으로 확인되었다(<그림 2> 참조). 또한 미세먼지의 돈사 내 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 원소 조성을 분석하였을 때 산소가 가장 높은 질량 분율을 차지하였고, C, Si, P, N, Zn, Mg, Na, Fe, Ca 순으로 나타났다. 이들 원소는 주로 분뇨와 사료에서부터 나온 것이며 화석연료 연소로 분출된 입자의 영향이 적은 것으로 추측되었다[Shen et al, (2019) Distribution and physicochemical properties of particulate matter in swine confinement barns, 250: 746-753].



<그림 2> 자돈사(Nursery room)와 비육돈사(Fattening room)에서 측정된 미세먼지 및 암모니아 농도 분포

○ 본 연구는 축사에서 배출되는 입자의 성분 분포를 파악한 것으로 분석 결과, 축사의 인접시설에서 다양한 형태의 초  $\mu\text{m}$  입자가 배출되었다. 높은 농도의 암모니아에서 미립자 암모늄과 질산염이 관찰되었다. 습한 조건 하에서 거름 구덩이에서  $2\mu\text{m}$  크기의 큰 입자(방울)의 상당한 방출이 관찰되었다. 방출된 미세먼지의 질량 증가의 약 3분의 1은 유기탄소 때문이었다. 칼슘과 질산염/질산도 방출되는 것을 확인할 수 있었다[Lammel et al, (2004) Aerosols Emitted from a Livestock Farm in Southern Germany, 154: 313–330].

○ 본 연구는 토끼 사육 시설에서 배출되는 미세먼지의 발생량을 현장 평가한 것으로 토끼 농장의 미세먼지(PM)농도는 계사 및 돈사에 비해 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다. 토사 내부의 평균  $\text{PM}_{10}$  농도는  $0.082\pm 0.059\text{mg}/\text{m}^3$ (비육 토끼),  $0.048\pm 0.058\text{mg}/\text{m}^3$ (임신토끼)이었고, 평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도는  $0.012\pm 0.016\text{mg}/\text{m}^3$ (비육토끼),  $0.012\pm 0.035\text{mg}/\text{m}^3$ (임신토끼)이었다. 토사에서 유래하는 미세먼지는 인간의 활동에 의해 발생한 것이며 털을 쓸고 태우는 과정에서 배출된다[Adell et al, (2012) Particulate matter concentrations and emissions in rabbit farms, 20: 1–20].

○ 본 연구는 산란계사와 그 주변에 위치한 5개 역에서  $\text{PM}_{2.5}$ 의 샘플을 수집하여 OC의 농도를 측정하였다. 산란계사와 역에서 측정한 평균 OC 수치는 각각  $42.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $3.26\sim 3.47\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 주변 역에서 총 탄소 비율이 0.67을 초과하여 제시된 SOC(2차 유기탄소)의 상당 부분을 차지했다. 이는 내부  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 공급원이 가금류 사료에서 발생하였으며, 주변  $\text{PM}_{2.5}$ 은 2차 무기 및 유기 미세먼지(PM)에서 공급되었음을 시사했다[Li et al, (2013) Organic and elemental carbon in atmospheric fine particulate matter in an animal agriculture intensive area in north carolina: estimation of secondary organic carbon concentrations, 7–18].

### 1-3) 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 가축의 생산성 및 질병 발생 평가

○ 국립환경과학원에 따르면 2016년 기준 농·축산분야 초미세먼지 발생량은 20.3천 톤으로 전체 발생량의 5.8%를 차지하고 있으며, 2차 생성 미세먼지 전구물질 배출량은 356천 톤으로 전체 발생량의 12.1%인 것으로 파악되었다.

○ 1차 초미세먼지는 생물성 연소, 농작업간 비산먼지, 노후 농기계 등이 주요 배출원이며, 2차 생성 미세먼지 전구물질은 축산분뇨와 화학비료로 인한 암모니아와 생물성 연소로부터 발생하는 휘발성 유기화합물(VOCs)이다.

○ 특히, 암모니아의 경우 전체 배출량의 82.3%인 237천 톤이 농업·농촌분야에서 배출되는데, 그중 축산분뇨가 91.6%, 화학비료가 8.0%를 차지하였다.

○ 미세먼지 배출원별 상시 저감 대책 중에서 축산 암모니아 발생 감축과 관련되어 축산농가에 미생물제제를 공급하고, 악취저감시설 설치와 축산분뇨에 대한 관리를 강화하는 추세이다.

▶ 농업기술센터를 통해 전체농가의 40%인 69천 농가에 미생물제제 공급, 미생물제제 구매자금을 지원하고(시·도별 연가 3~66억 규모), 축사시설현대화, 광역축산 악취개선사업('19년 15개소)을 통해 바이오커튼, 안개분무시설 등을 지원하며, 축산 환경 개선지역 중점관리를 강화하여 축산농가가 자율적으로 암모니아를 저감하도록 유도, 암모니아 발생의 주원인인 축산분뇨처리와 관련하여 퇴비유통전문조직을 육성하고, 휴대용 퇴비 부숙도 측정기 개발·보급을 통해 농가 퇴비 부숙도 관리 강화, 또한 축산법 시행령(축산업 허가·등록기준) 개정을 통해 악취배출 허용기준 재설정(환경부)하고, 중장기적으로 돈사 밀폐화로 암모니아 방출을 최소화하는 방안을 추진 중에 있다.

표 1. 농축산 분야별 미세먼지 발생 저감 배출원별 현장점검사항

	행동요령	점검내용	점검기관
경종	• 트랙터, 콤바인 활용 등 농작업	• 농기계 사용 및 야외 농작업 지양 계도	• 시군(농정과), 지역농협, 농민단체
축산	• 축사 및 저장시설 분뇨	• 미생물제제 살포	• 시군(축산과), 축산단체지부, 지역축협
	• 축사 외부 적치 퇴비	• 비닐(천막) 덮기	
	• 농경지 퇴·액비	• 살포 중지	
	• 축산농가 등 주변	• 물 살포	
소각	• 영농부산물·폐기물 소각 • 논·밭두렁 태우기	• 소각금지 계도 및 단속	• 농식품부 지역담당관 • 산림청 및 소속기관

○ 한편, 미세먼지로부터의 농업인의 건강 보호와 농축산물과 시설 관리방법에 대한 행동요령을 “농업·농촌 미세먼지 대응 TF” 등의 검토를 거쳐 다음과 같이 제안하였다.

▶ 축사시설과 관련되어 축사 내부에는 안개분무 시설 또는 지붕 스프링클러 가동(해제 시까지), 가축에게 미생물제제 급여, 축사 내 깔짚 바닥 및 분뇨저장조에 미생물제제 살포(1일 1회)한다.

▶ 축종별로는 양돈·가금 등 밀폐 축사의 경우 악취저감시설 흡수액 교체(보충) 및 가동 최대화, 한육우 등 개방형 축사의 경우 깔짚 바닥 뒤집기 중지한다.

▶ 더불어 축사 외부는 퇴비·액비 농경지 살포 중지, 퇴비사 미생물제제 살포(1일 1회) 및 비닐천막 덮기(해제 시까지), 퇴액비화 시설 가동을 일시 중단하고, 축사 주변 및 인근 도로 물청소를 실시한다.

▶ 가축분뇨 처리시설에 대한 관리 요령으로는 퇴비장에 미생물제제 살포, 퇴비 화시설의 교반기·송풍기 가동 중단, 시설 외부에 적치된 퇴비 원료 및 완제품에 비닐 덮기, 악취저감시설 흡수액 교체 및 가동 최대화, 시설 주변 및 인근 도로 물청소 실시, 소규모 축산농가, 밀집사육지역, 전통시장 등 주변에 물을 살포한다.

○ 미세먼지가 가축에 주는 직접적인 영향은 적지만 미세먼지 발생과 관련된 계절별 비육돈의 생산성과 도체 성적에 대한 자료를 살펴보면 비육돈의 등지방 두께는 암퇘지가 거세돈보다 낮게 나타났으나, 계절에 의한 등지방 두께에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 비육돈의 계절과 성별에 대한 상호 작용에서 지육율은 봄과 여름철에서 가을과 겨울철보다 더 높은 비율로 나타났으며, 비육돈의 출생 시기를 기준으로 분석한 결과 도체중은 암·수 모두 여름철이 가장 낮게 나타났다. 본 결과는 여름철에 태어난 돼지들이 성장 과정에서 열 스트레스에 의한 성장과정에서 도체중이 영향을 받은 것으로 판단되었다.

표 2. 비육돈의 계절별 생산성 및 도체성적 결과

구 분	봄		여름		가을		겨울		SEM
	거세 (n=20)	암 (n=20)	거세 (n=20)	암 (n=20)	거세 (n=20)	암 (n=20)	거세 (n=20)	암 (n=20)	
시작체중 (kg)	90.6	89.6	93.2	89.1	89.6	87.7	89.0	89.8	1.05
종료체중 (kg)	111.4	112.5	111.6	109.5	113.7	111.1	108.4	110.3	1.05
일당증체량 (kg)	0.88	0.81	0.85	0.77	0.90	0.81	0.91	0.76	0.04
일당사료섭취량 (kg)	3.25	3.11	3.14	3.02	3.27	3.08	3.39	2.89	0.16
사료효율	0.24	0.26	0.26	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.01
등지방 (mm)	20.9	16.9	21.1	18.5	20.3	18.2	20.8	16.7	0.83
도체중 (kg)	83.2	83.8	83.9	82.6	84.6	82.3	79.1	81.5	0.89
지육율 (%)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.73	0.74	0.01

○ 또한, 미세먼지 영향이 다른 흑서기와 환절기의 환경조건에서 비육돈의 생산성과 도체성적을 비교한 결과에서도 비육돈 성장률이 가장 좋은 봄이 생산성이 가장 나쁜 여름철과 비교분석 시 일당사료섭취량은 흑서기(2.54kg)보다 환절기(3.03kg)에 더

높았고 암태지(2.71kg)보다 거세돼지(2.87kg)가 일당사료섭취량이 더 높았다. 봄, 가을철 사료섭취량은 많은 연구결과에도 거세돼지가 높은 것으로 보고되었다.

표 3. 비육돈의 흑서기와 환절기 생산성 및 도체성적 결과

구 분	여름		가을		SEM
	거세돈 (n=40)	암태지 (n=40)	거세돈 (n=40)	암태지 (n=40)	
시작체중 (kg)	90.3	90.4	89.6	95.8	0.88
종료체중 (kg)	104.9	106.3	106.8	112.3	1.14
일당증체량 (kg)	0.70	0.76	0.82	0.79	0.03
일당사료섭취량 (kg)	2.62	2.47	3.11	2.95	0.02
사료효율	0.27	0.31	0.26	0.27	0.01
증체량 (kg)	14.6	15.9	17.2	16.5	0.65

1-4) 관련 문헌 고찰에 따른 종합 분석 결과

○ 현재까지 미세먼지의 흡입 노출에 따른 가축의 성장 및 건강 관련 피해 연구들은 국내에서는 전혀 보고된 바 없고, 국외에서 수행되었다. 또한 소, 돼지, 닭 등 실제 가축이 사육되고 있는 축사에서 현장 평가를 진행된 바는 없고, 쥐 등의 실험동물을 챔버(chamber) 안에 입식시킨 후 규명하고자 하는 환경 조건을 설정하여 인위적으로 미세먼지에 단/장기간 노출시켜 나타나는 급성/만성적인 건강 영향을 파악하는 독성 실험 결과가 대부분인 것으로 조사되었다.

○ 현재까지 미세먼지와 같은 환경유해인자에 노출된 가축의 생산성 및 질병 발생에 미치는 영향에 대한 연구 수행은 매우 미진한 실정이며, 미세먼지로 인한 농축산 분야별 발생량, 농업인의 건강 보호 및 농축산물 시설 관리방법에 대한 일반적인 내용과 대책을 제시하고 있는 수준이다.

○ 미세먼지 발생에 따른 농업인의 건강 우려와 함께 일조량 저하와 가축 질환 등으로 농작물과 가축의 생산성과 품질 저하를 유발할 가능성에 대한 인식을 바탕으로 미세먼지 저감조치에 대한 대책 수립과 행동요령을 권고하고 있으나, 주요 경제 축종(소, 돼지, 닭)별 생산성 및 질병 발생에 대한 위해성 평가 연구는 전무한 실정이다. 따라서 향후 이에 대한 광범위한 연구가 요구되는 바이다.

## 2) 미세먼지 및 관련 환경 유해인자의 측사 내부 기여도 현장 평가

### 2-1) 연구 방법

#### 가. 현장 조사

##### ○ 측정 항목

- ▶ 입자상 오염물질
  - 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>), 유기탄소(Oranic carbon; OC), 원소탄소(Elementary carbon; EC)
- ▶ 생물학상 오염물질
  - 총부유세균(Total airborne bacteria), 부유진균(Total airborne fungi)
- ▶ 가스상 오염물질
  - 총휘발성유기화합물(TVOCs), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 황화수소(H<sub>2</sub>S), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)

##### ○ 평가 대상

- ▶ 돈사 : 외기, 자돈사, 비육돈사
  - 돈사 형태 : 슬러리 분뇨처리 방식의 측벽 강제환기 돈사
  - 사육 규모 : 자돈사(100두), 비육돈사(50두)
- ▶ 계사 : 외기, 산란계사, 육계사
  - 산란계사 형태 및 사육 규모 : 터널식의 환기시스템 방식의 케이지형, 10~12주령의 약 1,000수 사육
  - 육계사 형태 및 사육 규모 : 윈치 커튼(winch-curtain)을 이용한 자연환기 방식의 왕겨 깔개의 평사형, 4주령의 약 500수 사육

##### ○ 측정 시기

- ▶ 미세먼지 농도의 예보등급(좋음, 보통, 나쁨 이상)에 따라 구분
- ▶ 돈사와 계사에 대해 예보 등급별로 각 5회씩 측정 수행



<그림 4> 비육돈사



<그림 5> 자돈사



<그림 6> 산란계사



<그림 7> 육계사



<그림 8> 돈사 및 계사 외부



<그림 9> 축사 외부 측정 모습

## 나. 측정 방법

### ※ 입자상 오염물질(미세먼지) 측정 방법에 대한 표준 절차

1. 시료 포집은 축사의 중앙에 바닥으로부터 30cm와 150cm 위치에서 시료 채취.
2. 여과지의 경우 0.3  $\mu\text{m}$ 의 입자상물질에 대하여 99% 이상의 초기 포집율을 갖는 여과지를 사용하며, 데시케이터 등에서 24시간 이상 보관하여 항량 시킨 후에 사용.
3. 각 시료 채취 위치에 1~30 L/min으로 유량이 설정된 air sampler(No. 800519, Gilian 또는 KMS-4100)를 설치하여 장시간 노출 기준에 근거, 총 6시간 이상 포집.
4. 미세먼지의 농도 보정

○ 환경부고시(제2017-11호) 실내 공기 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 측정방법에 따라 측정 장소의 온도와 압력에 따른 미세먼지 측정 데이터의 보정을 실시하였고, 적용된 절차 과정은 다음과 같다.

▶ 시료채취 유량은 다음 식을 따른다.

$$Q_{ave} = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \dots (\text{식 1})$$

$Q_{ave}$  : 시료채취기간의 평균유량(L/min)

$Q_1$  : 시료채취 시작 시의 유량(L/min)

$Q_2$  : 시료채취 종료 시의 유량(L/min)

▶ 채취한 공기의 부피는 다음 식을 따른다.

$$V = \frac{Q_{vac} \times T}{10^3} \dots (\text{식 2})$$

V : 채취한 공기의 부피(m<sup>3</sup>)

$Q_{vac}$  : 시험 전,후 측정된 유량의 평균(L/min)

T : 채취시간(min)

▶ 채취한 공기는 2에 따라 25℃, 1기압 조건으로 보정 하여 환산한다.

$$V_{(25^\circ\text{C}, 1\text{atm})} = V \times \frac{T_{(25^\circ\text{C})}}{T_2} \times \frac{P_2}{P_{(1\text{atm})}} \dots (\text{식 3})$$

V : 실제로 채취한 기체의 부피

$T_2$  : 기체를 채취할 때의 절대온도(K)

$P_2$  : 기체를 채취할 때의 기압(atm)

▶ (식 3)에 의해 공기 중 미세먼지의 농도를 구한다.

$$C = \frac{(W_2 - W_1) - (B_2 - B_1)}{V_{(25^\circ\text{C}, 1\text{atm})}} \dots (\text{식 4})$$

C : 공기 중 미세먼지의 농도(mg/m<sup>3</sup>)

$W_2$  : 시험 후 여과지 무게(mg)

$W_1$  : 시험 전 여과지 무게(mg)

$B_2$  : 시험 전 바탕시료 여과지 무게(mg)

$B_1$  : 시험 후 바탕시료 여과지 무게(mg)

$V_{(25^\circ\text{C}, 1\text{atm})}$  : 보정된 채취공기의 부피(m<sup>3</sup>)

### ※ 생물학적 오염물질(부유세균 및 부유진균) 측정 방법

1. 생물학적 유해인자인 부유 세균과 진균을 채취하기 위해 이용한 장비는 1단 앤더슨 샘플러(one-stage viable particulate cascade impactor, Model 10-800 Andersen Inc, USA)를 사용
2. 시료 포집은 분당 28.3L의 유량으로 1차 유량계를 이용하여 보정, 현장 환경 조건에 따라 120~150cm 높이에서 5분 가량 동안 최소 20분 간격으로 공기를 채취
3. 멸균 확인된 배지를 측정 장비에 삽입하여 공기 시료를 채취한 후 외부 인자에 의한 오염 방지를 위해 현장에서 즉시 실험실용 파라필름으로 배지를 밀봉한 후 직사광선을 피해 미생물 분석실로 운반



4. 부유 세균 분석을 위한 배지는 진균 생장을 억제하기 위해 cycloheximide 500mg이 첨가된 세균용 배지 Trypticase Soy Agar (TSA) (Lot 3087230, Becton Dickinson and Company, USA), 부유 진균은 반대로 세균의 생장을 억제하기 위해 chloramphenicol 100mg이 첨가된 진균용 배지 Sabourand Dextrose Agar (SDA) (Lot 5111476, Becton Dickinson and Company, USA)로 선정
5. 배양 조건은 부유 세균과 부유 진균 모두 35~37°C 조건하에서 접시 뚜껑이 아래로 가게 뒤집어 48시간으로 하며, 24시간 단위로 증식 상태를 관찰
6. 부유 세균과 진균의 농도는 각 배지에서 배양된 집락 (colony) 수를 시료 채취 공기량(m<sup>3</sup>)으로 나눈 cfu/m<sup>3</sup>의 단위로 산출

※ 현장 측정 준비 과정

			
<p>1. 필터 측정 및 기타 장비 준비</p>	<p>2. 현장 측정</p>	<p>3. 시료 정리 및 분석</p>	<p>4. 측정 결과값 수식 보정</p>

표 4. 본 연구에 활용된 미세먼지 등 공기오염물질의 측정 및 분석 장비

측정 항목		시료채취 장비		분석 방법
미세먼지 (PM <sub>10</sub> &PM <sub>2.5</sub> )	지역 시료	실시간 모니터링 장비 (Dustmate)		광산란 직독식
		Area air sampler (KMS-4100)		중량분석법
	개인 시료	-PTFE filter(37mm, $\mu\text{m}$ ), (SKC Inc, USA) -MSA air pump, (Zefon, USA) -PM <sub>10</sub> sampler		중량분석법
		-PTFE filter(37mm, 5 $\mu\text{m}$ ), (SKC Inc, USA) -MSA air pump, (Zefon, USA) -PM <sub>2.5</sub> sampler		중량분석법
		-PVC filter(37mm, 5 $\mu\text{m}$ ), (SKC Inc, USA) -Aluminum Cyclone, (SKC Inc, USA) -MSA air pump, (Zefon, USA)		중량분석법
부유세균 & 부유진균	지역 시료	TSA(Tryptic Soy Agar) : 부유세균용 SDAC(Sabouraud dextrose agar +Chlormpenicol) : 부유진균용		관성 충돌법을 통한 미생물 배양
중금속	정성 분석	IC(Ion Chromatography)		음이온 분석
		ICP(Induced Couple Plasma)		발광 분광분석
기류	기류 측정 기	기류 측정기		직독식
가스상 물질	복합 유기 용제	Gray wolf		직독식

라. 미세먼지를 포함한 실외 환경 유해인자들의 측사 내부 기여도 산출

○ 돈사 및 계사 외기와 내부의 농도를 비교하여 측사 외부로부터 발생하는 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 및 관련 환경 유해인자들의 측사 내부에 기여하는 정도를 (식 5)를 적용하여 산출하였다.

※ 측사 내부 기여도 산출 공식

$$\sum \frac{B}{A+B} \times 100 \dots (\text{식 } 5)$$

☞ A : 측사 내부의 미세먼지 및 관련 환경 유해인자들의 측정 평균 농도  
 B : 측사 외부의 미세먼지 및 관련 환경 유해인자들의 측정 평균 농도

2-2) 연구결과

가. 돈사

○ 온도 & 상대습도

▶ 온도와 상대습도의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 평균 18.5℃, 79.5%, 보통 예보일 때 평균 18.2℃, 80.9%, 나쁨 이상의 예보일 때 평균 23.0℃와 81.2%로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 평균 14.6℃, 49.0%, 보통 예보일 때 평균 15.2℃, 42.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 평균 18.1℃, 44.3%로 측정되었다. 한편 외기에서는 좋음 예보일 때 평균 11.8℃, 52.8%, 보통 예보일 때 평균 12.1℃, 53.4%, 나쁨 이상의 예보일 때 평균 10.2℃, 41.2%로 측정되었다(<표 5> 참조).

표 5. 돈사 외기 및 내부 온·습도

미세먼지 예보 등급	측정 항목	돈사 외기 (평균±표준편차)	자돈사 (평균±표준편차)	비육돈사 (평균±표준편차)
나쁨이상 (PM <sub>10</sub> 농도 81μg/m <sup>3</sup> 이상)	온도(℃)	10.2(±3.1)	23.0(±2.7)	18.1(±2.2)
	상대습도(%)	41.2(±7.3)	81.2(±11.7)	44.3(±8.6)
보통 (PM <sub>10</sub> 농도 31~80μg/m <sup>3</sup> )	온도(℃)	12.1(±3.4)	18.2(±1.9)	15.2(±2.8)
	상대습도(%)	53.4(±6.6)	80.9(±13.0)	42.3(±7.2)
좋음 (PM <sub>10</sub> 농도 0~30μg/m <sup>3</sup> )	온도(℃)	11.8(±3.5)	18.5(±2.9)	14.6(±1.9)
	상대습도(%)	52.8(±9.1)	79.5(±10.8)	49.0(±6.4)

○ 미세먼지(PM<sub>10</sub>)

▶ 발생 농도 측면

- 미세먼지 측정에서는 기상청의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 예보 등급(한국환경공단 에어코리아)에 따라 “좋음(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”, “보통(31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”, “나쁨 이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 구분하여 현장 평가를 수행하였다. 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 975 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 1,463 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 1,660 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 754 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 967 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 1,108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 363 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 342 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었다(<그림 10>과 <표 6> 참조).

▶ 돈사 내부 기여도 측면

- 실외 미세먼지(PM<sub>10</sub>)가 돈사 내부에 기여하는 평균 수준은 자돈사에서 좋음 예보일 때 21.1%, 보통 예보일 때 19.8%, 나쁨 이상의 예보일 때 17.0%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 25.7%, 보통 예보일 때 27.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 23.6%로 산출되었다.

표 6. 돈사 미세먼지(PM<sub>10</sub>)

미세먼지 예보 등급	돈사 외기 (평균±표준편차)	자돈사 (평균±표준편차)	비육돈사 (평균±표준편차)	돈사 내부 평균 기여도(%)	
				자돈사	비육돈사
나쁨 이상 (81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)	342(±127)	1,660(±352)	1,108(±286)	17.0	23.6
보통 (31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	363(±231)	1,463(±420)	967(±321)	19.8	27.3
좋음 (0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	268(±186)	975(±369)	754(±247)	21.1	25.7



<돈사 외기>



<비육돈사>



<자돈사>



<직독식 측정 장비>

<그림 10> 돈사 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 현장 측정 모습

○ 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)

▶ 발생 농도 측면

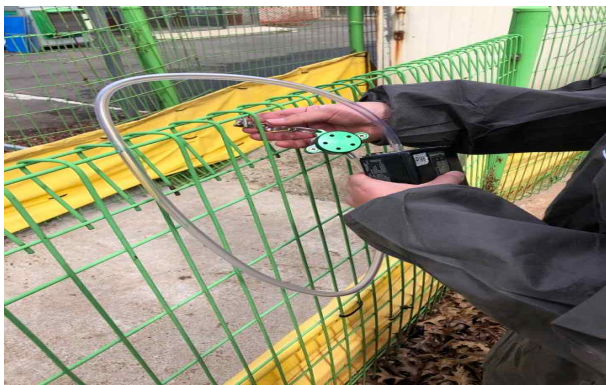
- 초미세먼지 측정에서는 기상청의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 예보 등급(한국환경공단 에어코리아)에 따라 “좋음(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”, “보통(31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”, “나쁨이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 구분하여 현장 평가를 수행하였다. 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 406 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 592 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 263 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 518 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 669 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 평균적으로 좋음 예보일 때 124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 228 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 291 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다(<그림 11>과 <표 7> 참조).

▶ 돈사 내부 기여도 측면

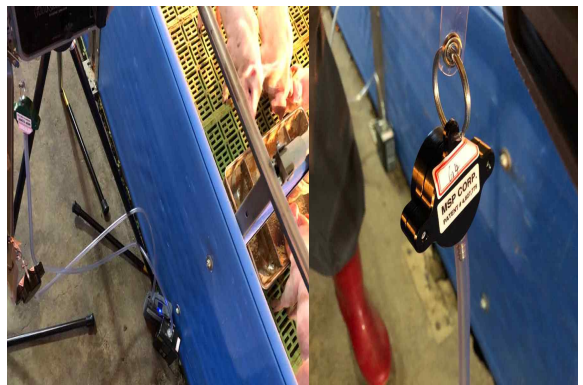
- 실외 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)가 돈사 내부에 기여하는 평균 수준은 자돈사에서 좋음 예보일 때 23.1%, 보통 예보일 때 26.2%, 나쁨 이상의 예보일 때 32.2%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 31.6%, 보통 예보일 때 30.1%, 나쁨 이상의 예보일 때 30.5%로 산출되었다.

표 7. 돈사 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)

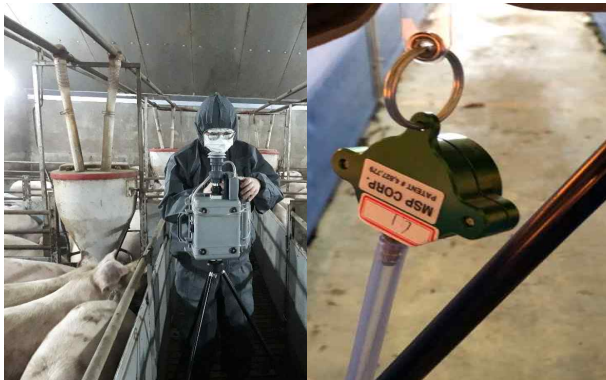
미세먼지 예보 등급	돈사 외기 (평균±표준편차)	자돈사 (평균±표준편차)	비육돈사 (평균±표준편차)	돈사 내부 평균 기여도(%)	
				자돈사	비육돈사
나쁨 이상 (81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)	291(±83)	613(±206)	669(±187)	32.2	30.5
보통 (31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	228(±92)	592(±183)	518(±143)	26.2	30.1
좋음 (0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	124(±77)	406(±135)	263(±64)	23.1	31.6



<돈사 외기>



<자돈사>



<비육돈사>



<직독식 측정 장비>

<그림 11> 돈사 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 현장 측정 모습

○ 총부유세균(Total airborne bacteria)

▶ 발생 농도 측면

- 총부유세균 측정에서는 기상청의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 예보 등급(한국환경공단 에어코리아)에 따라 “좋음(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”, “보통(31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”, “나쁨이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 구분하여 현장 평가를 수행하였다. 자돈사의 경우 좋음 예보일 때 7,563CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 5,821CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 5,672CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 7,915CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 6,124CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 6,723CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 438CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 492CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 581CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다(<표 8> 참조).

▶ 돈사 내부 기여도 측면

- 실외 총부유세균이 돈사 내부에 기여하는 평균 수준은 자돈사에서 좋음 예보일 때 5.5%, 보통 예보일 때 7.8%, 나쁨 이상의 예보일 때 9.3%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 5.2%, 보통 예보일 때 7.4%, 나쁨 이상의 예보일 때 8.0%로 산출되었다.

표 8. 돈사 총부유세균(Total airborne bacteria)

미세먼지 예보 등급	돈사 외기 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	자돈사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	비육돈사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	돈사 내부 평균 기여도(%)	
				자돈사	비육돈사
나쁨 이상 (81 $\mu$ g/m <sup>3</sup> 이상)	581(±106)	5,672(±584)	6,726(±588)	9.3	8.0
보통 (31~80 $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	492(±117)	5,821(±493)	6,124(±709)	7.8	7.4
좋음 (0~30 $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	438(±146)	7,563(±757)	7,915(±822)	5.5	5.2

○ 총부유진균(Total airborne fungi)

▶ 발생 농도 측면

- 총부유진균 측정에서는 기상청의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 예보 등급(한국환경공단 에어코리아)에 따라 “좋음(0~30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>)”, “보통(31~80 $\mu$ g/m<sup>3</sup>)”, “나쁨이상(81 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이상)”으로 구분하여 현장 평가를 수행하였다(<그림 12> 참조). 자돈사의 경우 좋음 예보일 때 6,701CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 5,916CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 5,073CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 5,148CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 5,232CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 5,812CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 496CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 422CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 348CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다(<표 9> 참조).

▶ 돈사 내부 기여도 측면

- 실외 총부유진균이 돈사 내부에 기여하는 평균 수준은 자돈사에서 좋음 예보일 때 6.6%, 보통 예보일 때 6.7%, 나쁨 이상의 예보일 때 6.4%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 8.8%, 보통 예보일 때 7.5%, 나쁨 이상의 예보일 때 5.7%로 산출되었다.

표 9. 돈사 총부유진균(Total airborne fungi)

미세먼지 예보 등급	돈사 외기 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	자돈사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	비육돈사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	돈사 내부 평균 기여도(%)	
				자돈사	비육돈사
나쁨 이상 (81μg/m <sup>3</sup> 이상)	348(±78)	5,073(±711)	5,812(±503)	6.4	5.7
보통 (31~80μg/m <sup>3</sup> )	422(±126)	5,916(±546)	5,232(±620)	6.7	7.5
좋음 (0~30μg/m <sup>3</sup> )	496(±181)	6,701(±483)	5,148(±643)	6.6	8.8



<돈사 외기>

<자돈사>

<비육돈사>

<그림 12> 돈사 총 부유세균과 부유진균 현장 측정 모습

○ 주요 가스상 오염물질

▶ 발생 농도 측면

- 주요 가스상 오염물질 측정에서는 기상청의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 예보 등급(한국환경공단 에어코리아)에 따라 “좋음(0~30μg/m<sup>3</sup>)”, “보통(31~80μg/m<sup>3</sup>)”, “나쁨이상(81μg/m<sup>3</sup> 이상)”으로 구분하여 현장 평가를 수행하였다.

- 총휘발성유기화합물(TVOCs)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 1684μg/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 1,699μg/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 1,821μg/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 1,194μg/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 1,203μg/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 1,411μg/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 447μg/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 431μg/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 621μg/m<sup>3</sup>로 측정되었다.

- 암모니아(NH<sub>3</sub>)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 1.13ppm, 보통 예보일 때 1.37ppm 나쁨 이상의 예보일 때 1.82ppm으로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 1.41ppm, 보통 예보일 때 1.63ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 1.62ppm으로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 0.12ppm, 보통 예보일 때 0.29ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.41ppm으로 측정되었다.

- 황화수소(H<sub>2</sub>S)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 0.12ppm, 보통 예보일 때 0.18ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.31ppm으로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 0.18ppm, 보통 예보일 때 0.08ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.22ppm으로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 불검출, 보통 예보일 때 0.01ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.05ppm으로 측정되었다.



- 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 979ppm, 보통 예보일 때 735ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 928ppm으로 평균적으로 측정되었고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 326ppm, 보통 예보일 때 412ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 522ppm으로 평균적으로 측정되었다. 돈사 외기에서는 좋음 예보일 때 312ppm, 보통 예보일 때 289ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 352ppm으로 측정되었다(<그림 13>과 <표 10> 참조).

▶ 돈사 내부 기여도 측면

- 외부의 주요 가스상 오염물질들이 돈사 내부에 기여하는 평균 수준은 다음과 같다. 총휘발성유기화합물(TVOCs)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 21.0%, 보통 예보일 때 20.2%, 나쁨 이상의 예보일 때 25.4%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 27.2%, 보통 예보일 때 26.4%, 나쁨 이상의 예보일 때 30.6%로 산출되었다. 암모니아(NH<sub>3</sub>)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 9.8%, 보통 예보일 때 18.2%, 나쁨 이상의 예보일 때 18.6%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 7.9%, 보통 예보일 때 15.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 20.4%로 산출되었다. 황화수소(H<sub>2</sub>S)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 기여도는 없는 것으로 나타났고, 보통 예보일 때 5.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 13.9%로 나타났으며, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 기여도가 없는 것으로 나타났고, 보통 예보일 때 11.1%, 나쁨 이상의 예보일 때 18.5%로 산출되었다. 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 경우 자돈사에서 좋음 예보일 때 24.2%, 보통 예보일 때 28.2%, 나쁨 이상의 예보일 때 27.5%로 나타났고, 비육돈사에서는 좋음 예보일 때 48.9%, 보통 예보일 때 41.2%, 나쁨 이상의 예보일 때 40.3%로 산출되었다.

표 10. 돈사 주요 가스상 오염물질

미세먼지 예보 등급	측정 항목	돈사 외기 (평균 ±표준편차)	자돈사 (평균 ±표준편차)	비육돈사 (평균 ±표준편차)	돈사 내부 평균 기여도(%)	
					자돈사	비육돈사
나쁨 이상 (PM <sub>10</sub> 농도 81µg/m <sup>3</sup> 이상)	TVOCs(µg/m <sup>3</sup> )	621(±78)	1,821(±234)	1,411(±406)	25.4	30.6
	NH <sub>3</sub> (ppm)	0.41(±0.12)	1.82(±0.74)	1.62(±0.37)	18.6	20.4
	H <sub>2</sub> S(ppm)	0.05(±0.02)	0.31(±0.08)	0.22(±0.09)	13.9	18.5
	CO <sub>2</sub> (ppm)	352(±31)	928(±233)	522(±94)	27.5	40.3
보통 (PM <sub>10</sub> 농도 31~80µg/m <sup>3</sup> )	TVOCs(µg/m <sup>3</sup> )	431(±54)	1,699(±427)	1,203(±309)	20.2	26.4
	NH <sub>3</sub> (ppm)	0.29(±0.08)	1.37(±0.38)	1.63(±0.42)	18.2	15.3
	H <sub>2</sub> S(ppm)	0.01(±0.02)	0.18(±0.05)	0.08(±0.02)	5.3	11.1
	CO <sub>2</sub> (ppm)	289(±51)	735(±110)	412(±93)	28.2	41.2
좋음 (PM <sub>10</sub> 농도 0~30µg/m <sup>3</sup> )	TVOCs(µg/m <sup>3</sup> )	447(±81)	1,684(±351)	1,194(±255)	21.0	27.2
	NH <sub>3</sub> (ppm)	0.12(±0.03)	1.13(±0.24)	1.41(±0.39)	9.8	7.9
	H <sub>2</sub> S(ppm)	불검출	0.12(±0.05)	0.18(±0.09)	-	-
	CO <sub>2</sub> (ppm)	312(±44)	979(±127)	326(±41)	24.2	48.9



표 11. 돈사 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC)

미세먼지 예보 등급	측정 물질 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	돈사 외기 (평균 $\pm$ 표준편차)	자돈사 (평균 $\pm$ 표준편차)	비육돈사 (평균 $\pm$ 표준편차)	돈사 내부 평균 기여도(%)	
					자돈사	비육돈사
나쁨 이상 (PM <sub>10</sub> 농도 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)	유기탄소(OC)	31.3( $\pm$ 8.3)	492( $\pm$ 138)	331( $\pm$ 73.2)	6.0	8.6
	원소탄소(EC)	33.4( $\pm$ 11.2)	136( $\pm$ 58.2)	80.2( $\pm$ 21.6)	20.3	29.2
보통 (PM <sub>10</sub> 농도 31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	유기탄소(OC)	24.7( $\pm$ 6.9)	410( $\pm$ 91.3)	282( $\pm$ 63.4)	5.5	7.9
	원소탄소(EC)	14.5( $\pm$ 7.1)	127( $\pm$ 24.6)	61.4( $\pm$ 12.8)	10.5	18.9
좋음 (PM <sub>10</sub> 농도 0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	유기탄소(OC)	3.6( $\pm$ 1.2)	213( $\pm$ 33.8)	192( $\pm$ 42.1)	1.4	1.6
	원소탄소(EC)	0.8( $\pm$ 0.3)	40.1( $\pm$ 12.7)	52.7( $\pm$ 11.6)	2.0	1.6



<돈사 외기>



<자돈사>



<비육돈사>

<그림 14> 돈사 유기탄소와 원소탄소 현장 측정 모습

○ 연구 결과에 대한 고찰

▶ 돈사 내 공기오염물질 농도 측면 : “자돈사>비육돈사”

미세먼지를 포함한 돈사 내부의 공기오염물질들의 농도를 모니터링한 기존 국내/외 연구 결과들을 살펴보면 대부분 비육돈사가 자돈사보다 측정 농도 수치가 높게 나타났다. 하지만 본 현장 평가에서는 실외 미세먼지 농도 예보 수준에 상관없이 측정 대상 유해인자들 대부분 자돈사 측정값이 비육돈사 보다 상대적으로 높게 나타났는데, 이에 대한 이유는 다음과 같이 추측된다. 첫째, 비육돈사의 규모가 상대적으로 자돈사보다 크기 때문에 체적에 따른 미세먼지 농도 차이가 발생할 수 있다. 둘째, 자돈사 내 어린 돼지의 성장 속도는 빠르므로 입식 및 출하 과정의 주기가 짧은 특징이 있기 때문에 비슷한 시기더라도 자돈사와 비육돈사 내 돼지의 입식 두수 차이가 발생할 수 있다. 셋째, 자돈사 내 어린 돼지는 비육돈사 내 큰 돼지들보다 상대적으로 외부에서 들려오는 소음이나 외부인의 출입에 민감하여 높은 행동성을 보이므로, 측정 당시 연구원의 출입에 따라 비육돈사보다는 자돈사 내 침전되어 있는 미세먼지가 더 많이 비산되어 미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있다.

▶ 외부 공기오염물질들의 돈사 내부 기여도 측면 : “자돈사<비육돈사”

돈사 내 공기오염물질들의 농도 수준은 전반적으로 자돈사가 비육돈사보다 높았으나, 미세먼지를 포함한 외부 공기오염물질들의 계사 내부 기여도는 오히려 자돈사보다 비육

돈사가 높은 것으로 분석되었다. 이는 자돈사 내부에 형성된 공기오염물질들의 농도가 비육돈사보다 높은 수준이기 때문에 외부에서 유입되는 기여도가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 추정된다.

## 나. 계사

### ○ 온도 & 상대습도

▶ 온도와 상대습도의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 평균 17.3℃와 74.1%, 보통 예보일 때 평균 16.4℃와 68.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 평균 19.6℃와 57.2%로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 평균 19.4℃와 71.2%, 보통 예보일 때 평균 19.1℃와 66.1%, 나쁨 이상의 예보일 때 평균 21.3℃와 61.7%로 측정되었다. 한편 외기에서는 좋음 예보일 때 평균 10.9℃와 41.6%, 보통 예보일 때 평균 11.8℃와 50.6%, 나쁨 이상의 예보일 때 평균 18.2℃와 37.3%로 측정되었다(<표 12> 참조).

표 12. 계사 외기 및 내부 온·습도

미세먼지 예보 등급	측정 항목	계사 외기 (평균±표준편차)	산란계사 (평균±표준편차)	육계사 (평균±표준편차)
나쁨이상 (PM <sub>10</sub> 농도 81μg/m <sup>3</sup> 이상)	온도(℃)	18.2(±4.6)	19.6(±6.1)	21.3(±4.2)
	상대습도(%)	37.3(±9.1)	57.2(±14.2)	61.7(±11.5)
보통 (PM <sub>10</sub> 농도 31~80μg/m <sup>3</sup> )	온도(℃)	11.8(±2.8)	16.4(±3.1)	19.1(±4.3)
	상대습도(%)	50.6(±9.3)	68.3(±18.1)	66.1(±14.4)
좋음 (PM <sub>10</sub> 농도 0~30μg/m <sup>3</sup> )	온도(℃)	10.9(±2.7)	17.3(±4.8)	19.4(±3.8)
	상대습도(%)	41.6(±11.2)	74.1(±16.1)	71.2(±19.1)

### ○ 미세먼지(PM<sub>10</sub>)

#### ▶ 발생 농도 측면

- 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 882μg/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 711μg/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 554μg/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 2,371μg/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 1,179μg/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 901μg/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 58.3μg/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 94.2μg/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 124μg/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다(<그림 15>와 <표 13> 참조).

#### ▶ 계사 내부 기여도 측면

- 실외 미세먼지(PM<sub>10</sub>)가 계사 내부에 기여하는 평균 수준은 산란계사에서 좋음 예보일 때 6.2%, 보통 예보일 때 11.7%, 나쁨 이상의 예보일 때 18.3%로 나타났고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 2.4%, 보통 예보일 때 7.4%, 나쁨 이상의 예보일 때 12.1%로 산출되었다.

표 13. 계사 미세먼지(PM<sub>10</sub>)

미세먼지 예보 등급	계사 외기 (평균±표준편차)	산란계사 (평균±표준편차)	육계사 (평균±표준편차)	계사 내부 평균 기여도(%)	
				산란계사	육계사
나쁨 이상 (81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)	124(±36.1)	554(±108)	901(±236)	18.3	12.1
보통 (31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	94.2(±24.3)	711(±214)	1,179(±561)	11.7	7.4
좋음 (0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	58.3(±17.8)	882(±317)	2,371(±783)	6.2	2.4



<계사 외기>



<직독식 측정 장비>



<산란계사>



<육계사>

<그림 15> 계사 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 현장 측정 모습

○ 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)

▶ 발생 농도 측면

- 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 204 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 201 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 474 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 686 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 624 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 평균적으로 좋음 예보일 때 24.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 보통 예보일 때 46.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 나쁨 이상의 예보일 때 83.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다(<그림 16> 과 <표 14> 참조).

▶ 계사 내부 기여도 측면

- 실외 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)가 계사 내부에 기여하는 평균 수준은 산란계사에서 좋음 예보일 때 16.7%, 보통 예보일 때 18.4%, 나쁨 이상의 예보일 때 29.4%로 나타났고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 4.9%, 보통 예보일 때 6.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 11.8%로 산출되었다.

표 14. 계사 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)

미세먼지 예보 등급	계사 외기 (평균±표준편차)	산란계사 (평균±표준편차)	육계사 (평균±표준편차)	계사 내부 평균 기여도(%)	
				산란계사	육계사
나쁨 이상 (81 $\mu$ g/m <sup>3</sup> 이상)	83.5(±27.3)	201(±67.2)	624(±106)	29.4	11.8
보통 (31~80 $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	46.1(±14.2)	204(±46.5)	686(±211)	18.4	6.3
좋음 (0~30 $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	24.6(±8.8)	123(±24.6)	477(±186)	16.7	4.9



<계사 외기>



<직독식 측정 장비>



<산란계사>



<육계사>

<그림 16> 계사 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 현장 측정 모습

○ 총부유세균(Total airborne bacteria)

▶ 발생 농도 측면

- 산란계사의 경우 좋음 예보일 때 5,130CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 4,265CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 4,293CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 8,192CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 6,351CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때

5,845CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 404CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 427CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 693CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다 (<그림 17>과 <표 15> 참조).

▶ 계사 내부 기여도 측면

- 실외 총부유세균이 계사 내부에 기여하는 평균 수준은 산란계사에서 좋음 예보일 때 7.3%, 보통 예보일 때 9.1%, 나쁨 이상의 예보일 때 13.9%로 나타났고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 4.7%, 보통 예보일 때 6.3%, 나쁨 이상의 예보일 때 10.6%로 산출되었다.

표 15. 계사 총부유세균(Total airborne bacteria)

미세먼지 예보 등급	계사 외기 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	산란계사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	육계사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	계사 내부 평균 기여도(%)	
				산란계사	육계사
나쁨 이상 (81μg/m <sup>3</sup> 이상)	693(±168)	4,293(±869)	5,845(±755)	13.9	10.6
보통 (31~80μg/m <sup>3</sup> )	427(±151)	4,265(±910)	6,351(±905)	9.1	6.3
좋음 (0~30μg/m <sup>3</sup> )	404(±94)	5,130(±761)	8,192(±814)	7.3	4.7

○ 총부유진균(Total airborne fungi)

▶ 발생 농도 측면

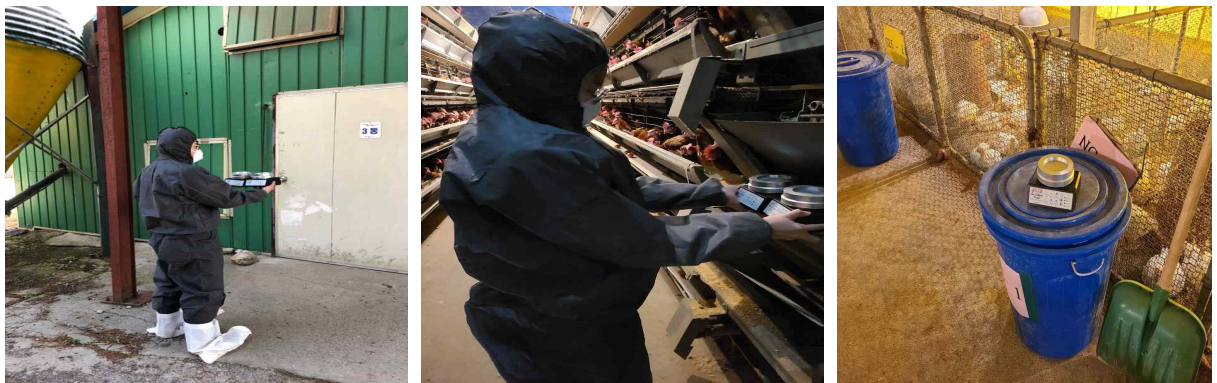
- 산란계사의 경우 좋음 예보일 때 2,675CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 1,469CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 1,500CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 4,524CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 2,247CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 3,508CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 351CFU/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 318CFU/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 492CFU/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다 (<표 16> 참조).

▶ 계사 내부 기여도 측면

- 실외 총부유진균이 계사 내부에 기여하는 평균 수준은 산란계사에서 좋음 예보일 때 11.6%, 보통 예보일 때 17.8%, 나쁨 이상의 예보일 때 24.7%로 나타났고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 7.2%, 보통 예보일 때 12.4%, 나쁨 이상의 예보일 때 12.3%로 산출되었다.

표 16. 계사 총부유진균(Total airborne fungi)

미세먼지 예보 등급	계사 외기 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	산란계사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	육계사 (평균±표준편차) (단위:CFU/m <sup>3</sup> )	계사 내부 평균 기여도(%)	
				산란계사	육계사
나쁨 이상 (81 $\mu$ g/m <sup>3</sup> 이상)	492(±231)	1,500(±762)	3,508(±726)	24.7	12.3
보통 (31~80 $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	318(±116)	1,469(±509)	2,247(±420)	17.8	12.4
좋음 (0~30 $\mu$ g/m <sup>3</sup> )	351(±173)	2,675(±611)	4,524(±516)	11.6	7.2



<계사 외기>

<산란계사>

<육계사>

<그림 16> 계사 총 부유세균과 부유진균 현장 측정 모습

○ 주요 가스상 오염물질

▶ 발생 농도 측면

- 주요 가스상 오염물질 측정에서는 기상청의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 예보 등급(한국환경공단 에어코리아)에 따라 “좋음(0~30 $\mu$ g/m<sup>3</sup>)”, “보통(31~80 $\mu$ g/m<sup>3</sup>)”, “나쁨이상(81 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 이상)”으로 구분하여 현장 평가를 수행하였다.

- 총휘발성유기화합물(TVOCs)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 1,433 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 1,067 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 947 $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 3,078 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 1,609 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 1,595 $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 460 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 보통 예보일 때 438 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 나쁨 이상의 예보일 때 512 $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 측정되었다.

- 암모니아(NH<sub>3</sub>)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 13.6ppm, 보통 예보일 때 7.16ppm 나쁨 이상의 예보일 때 2.89ppm으로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 25.6ppm, 보통 예보일 때 16.9ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 3.70ppm으로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 0.82ppm, 보통 예보일 때 0.76ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.51ppm으로 측정되었다.

- 황화수소(H<sub>2</sub>S)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 1.30ppm, 보통 예보일 때 0.67ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.33ppm으로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 2.25ppm, 보통 예보일 때 1.13ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.51ppm으로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 0.06ppm, 보통 예보일 때 0.08ppm, 나쁨 이상의 예보일 때 0.06ppm으로 측정되었다.

- 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 1,172ppm, 보통 예



보일 때 639ppm, 나뭇 이상의 예보일 때 412ppm으로 평균적으로 측정되었고, 육계사에서  
 서는 좋음 예보일 때 1,859ppm, 보통 예보일 때 983ppm, 나뭇 이상의 예보일 때  
 869ppm으로 평균적으로 측정되었다. 계사 외기에서는 좋음 예보일 때 323ppm, 보통 예  
 보일 때 312ppm, 나뭇 이상의 예보일 때 307ppm으로 측정되었다(<그림 17>과 <표  
 17> 참조).

▶ 계사 내부 기여도 측면

- 외부의 주요 가스상 오염물질들이 계사 내부에 기여하는 평균 수준은 다  
 음과 같다. 총휘발성유기화합물(TVOCs)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 24.3%,  
 보통 예보일 때 29.1%, 나뭇 이상의 예보일 때 35.1%로 나타났고, 육계사에서는 좋음  
 예보일 때 13.0%, 보통 예보일 때 21.4%, 나뭇 이상의 예보일 때 24.3%로 산출되었다.  
 암모니아(NH<sub>3</sub>)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때 5.7%, 보통 예보일 때 9.6%, 나  
 뭇 이상의 예보일 때 15.0%로 나타났고, 육계사에서는 좋음 예보일 때 3.1%, 보통 예보  
 일 때 4.3%, 나뭇 이상의 예보일 때 12.1%로 산출되었다. 황화수소(H<sub>2</sub>S)의 경우 산란계  
 사에서 좋음 예보일 때 4.4%, 보통 예보일 때 10.7%, 나뭇 이상의 예보일 때 15.4%로  
 나타났으며, 육계사에서는 좋음 예보일 때 2.6%, 보통 예보일 때 6.6%, 나뭇 이상의 예  
 보일 때 10.8%로 산출되었다. 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 경우 산란계사에서 좋음 예보일 때  
 21.6%, 보통 예보일 때 32.8%, 나뭇 이상의 예보일 때 42.7%로 나타났고, 육계사에서는  
 좋음 예보일 때 14.8%, 보통 예보일 때 24.1%, 나뭇 이상의 예보일 때 26.1%로 산출되  
 었다.

표 17. 계사 주요 가스상 오염물질

미세먼지 예보 등급	측정 항목	계사 외기 (평균 ±표준편차)	산란계사 (평균 ±표준편차)	육계사 (평균 ±표준편차)	계사 내부 평균 기여도(%)	
					산란계사	육계사
나뭇 이상 (PM <sub>10</sub> 농도 81µg/m <sup>3</sup> 이상)	TVOCs(µg/m <sup>3</sup> )	512(±93)	947(±175)	1,595(±388)	35.1	24.3
	NH <sub>3</sub> (ppm)	0.51(±0.24)	2.89(±0.62)	3.70(±0.81)	15.0	12.1
	H <sub>2</sub> S(ppm)	0.06(±0.04)	0.33(±0.14)	0.50(±0.13)	15.4	10.8
	CO <sub>2</sub> (ppm)	307(±63)	412(±142)	869(±113)	42.7	26.1
보통 (PM <sub>10</sub> 농도 31~80µg/m <sup>3</sup> )	TVOCs(µg/m <sup>3</sup> )	438(±38)	1,067(±308)	1,609(±512)	29.1	21.4
	NH <sub>3</sub> (ppm)	0.76(±0.13)	7.16(±1.22)	16.9(±4.16)	9.6	4.3
	H <sub>2</sub> S(ppm)	0.08(±0.04)	0.67(±0.16)	1.13(±0.33)	10.7	6.6
	CO <sub>2</sub> (ppm)	312(±74)	639(±135)	983(±142)	32.8	24.1
좋음 (PM <sub>10</sub> 농도 0~30µg/m <sup>3</sup> )	TVOCs(µg/m <sup>3</sup> )	460(±59)	1,433(±402)	3,078(±655)	24.3	13.0
	NH <sub>3</sub> (ppm)	0.82(±0.09)	13.6(±3.18)	25.6(±7.42)	5.7	3.1
	H <sub>2</sub> S(ppm)	0.06(±0.03)	1.30(±0.45)	2.25(±0.81)	4.4	2.6
	CO <sub>2</sub> (ppm)	323(±71)	1,172(±321)	1,859(±432)	21.6	14.8





<계사 외기>



<산란계사>



<육계사>

<그림 18> 계사 유기탄소와 원소탄소 현장 측정 모습

### ○ 연구 결과에 대한 고찰

#### ▶ 계사 내 공기오염물질 농도 측면 : “산란계사<육계사”

본 현장 평가에서는 미세먼지를 포함한 측정 대상 유해인자들 대부분 육계사에서 모니터링된 농도 수치가 산란계사 보다 상대적으로 높게 나타난 것으로 분석되었다. 이는 시설 형태 및 사육 방식에 추정할 수 있는데, 산란계사의 경우 강제환기 시스템이 적용되는 밀폐형으로 운용되는 반면, 육계사의 경우 윈치커튼(winch-curtain) 방식의 개방형으로 운용되어 하드웨어적으로 산란계사의 환기량이 육계사보다 상대적으로 높은 수준으로 유지되기 때문에 미세먼지를 포함한 계사 내부의 공기오염물질들의 외부 배출 속도가 높다고 할 수 있다. 또한 산란계사는 닭을 정형화된 케이지(cage)에 입사하여 행동성을 제한시키는 반면, 육계사는 톱밥, 왕겨 등을 깔개로 하여 닭을 방사형으로 사육하여 자유자재로 움직일 수 있기 때문에 바닥의 깔개 재료가 비산되어 미세먼지 농도 증가의 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 미세먼지와 같은 입자상 물질의 표면에 흡착되어 공기 중으로 전파되는 생물학상 물질과 가스상 물질의 농도 양상도 유사한 패턴을 보였다고 할 수 있다.

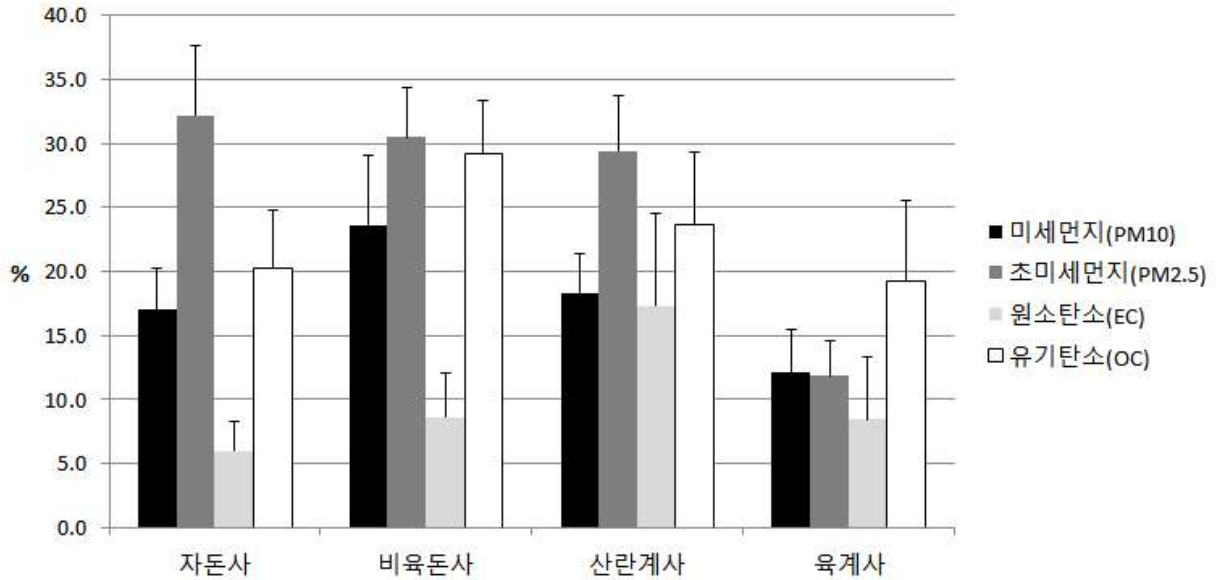
#### ▶ 외부 공기오염물질들의 계사 내부 기여도 측면 : “산란계사>육계사”

계사 내 공기오염물질들의 농도 수준은 전반적으로 육계사가 산란계사보다 높았으나, 미세먼지를 포함한 외부 공기오염물질들의 계사 내부 기여도는 오히려 육계사보다 산란계사가 높은 것으로 분석되었다. 이는 육계사 내부에 형성된 공기오염물질들의 농도가 산란계사보다 높은 수준이기 때문에 외부에서 유입되는 기여도가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 추정된다.

### 다. 종합

#### ○ 입자상 오염물질

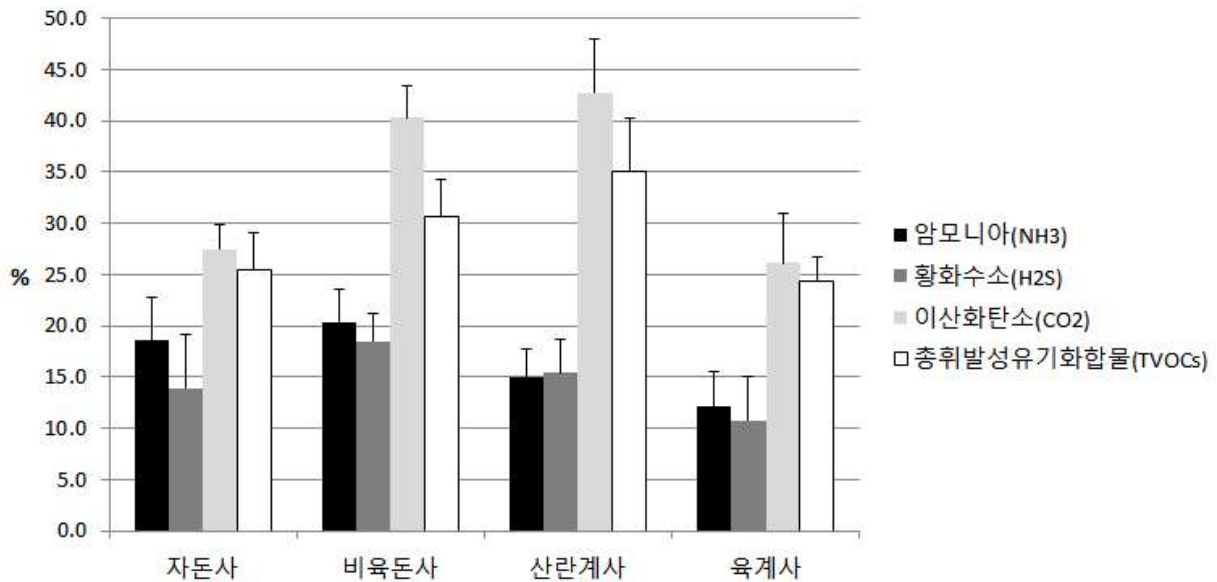
<그림 19>는 현장 측정 전날 미세먼지 농도가 “나쁨 이상( $81\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 예보된 날의 측사 유형에 따른 입자상 오염물질별 내부 평균 기여도를 보여주고 있다. 분석 결과, 미세먼지( $\text{PM}_{10}$ )의 경우 비육돈사>산란계사>자돈사>육계사, 초미세먼지( $\text{PM}_{2.5}$ )의 경우 비육돈사>자돈사>산란계사>육계사, 원소탄소(Elementary Carbon; EC)의 경우 산란계사>육계사>비육돈사>자돈사, 유기탄소(Organic Carbon; OC)의 경우 비육돈사>산란계사>자돈사>육계사 순으로 나타났다.



<그림 19> 실외 미세먼지 농도가 “나쁨 이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 예보된 날의 축사 유형에 따른 입자상 오염물질별 내부 평균 기여도

○ 가스상 오염물질

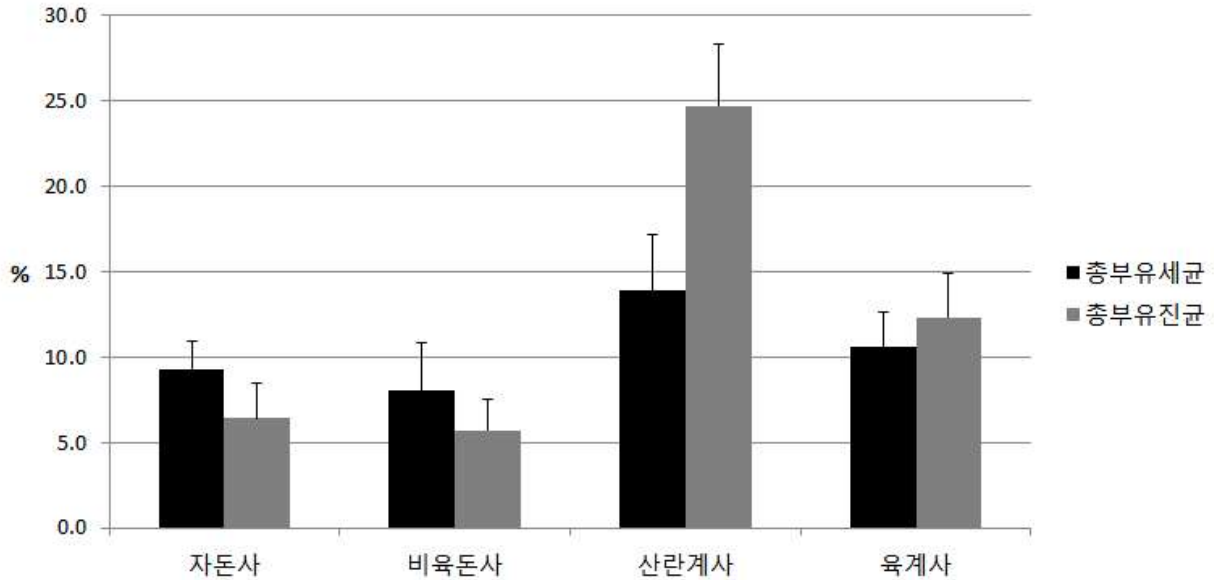
<그림 20>은 현장 측정 전날 미세먼지 농도가 “나쁨 이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 예보된 날의 축사 유형에 따른 입자상 오염물질별 내부 평균 기여도를 보여주고 있다. 분석 결과, 암모니아( $\text{NH}_3$ )의 경우 비육돈사>자돈사>산란계사>육계사, 황화수소( $\text{H}_2\text{S}$ )의 경우 비육돈사>산란계사>자돈사>육계사, 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )의 경우 산란계사>비육돈사>자돈사>육계사, 총휘발성 유기화합물(TVOCs)의 경우 산란계사>비육돈사>자돈사>육계사 순으로 나타났다.



<그림 20> 실외 미세먼지 농도가 “나쁨 이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 예보된 날의 축사 유형에 따른 가스상 오염물질별 내부 평균 기여도

○ 생물학상 오염물질

<그림 20>은 현장 측정 전날 미세먼지 농도가 “나쁨 이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 예보된 날의 축사 유형에 따른 생물학상 오염물질별 내부 평균 기여도를 보여주고 있다. 분석 결과, 총부유세균의 경우 산란계사>육계사>자돈사>비육돈사, 총부유진균의 경우 산란계사>육계사>자돈사>비육돈사 순으로 나타났다.



<그림 21> 실외 미세먼지 농도가 “나쁨 이상( $81\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”으로 예보된 날의 축사 유형에 따른 생물학상 오염물질별 내부 평균 기여도

### ○ 결론

▶ 돈사와 계사 유형에 관계없이 실외 미세먼지 농도 수준에 따라 먼지 등의 입자상 오염물질은 5~35%, 암모니아 등의 가스상 오염물질은 10~45%, 총부유세균 등의 생물학상 오염물질은 5~25%의 축사 내부 발생에 기여하는 것으로 추정되었다.

▶ 축사 유형별로는 돈사의 경우 자돈사보다는 비육돈사가, 계사의 경우 육계사보다는 산란계사가 실외 공기오염물질들에 위한 내부 농도 상승 기여도가 높은 것으로 조사되었다.

▶ 전반적으로 실외 미세먼지 농도가 높아질수록 실외 공기오염물질들의 축사 내부 기여도는 증가하는 것으로 분석되었다.

## 3) 미세먼지 등 환경유해인자 노출에 따른 가축의 생산성 변화 실태조사

### 3-1) 연구 방법

○ 돼지와 닭은 미세먼지 및 고온 스트레스 등 축사 실내 환경 요인에 대하여 생리적으로 피해를 받기 때문에 우리나라처럼 여름철 고온다습 기후에는 생산성이 줄어든다. 국내외 연구자들의 보고에 따르면 고온환경에 따른 폐사나 증체율 감소, 분만율 및 산란율 감소는 농장의 경제적 손실로 돌아올 수밖에 없는 실정이다. 현재 양돈장과 양계장의 경우 모돈과 산란계 방에 에어컨을 설치하여 여름철 손실을 막으려는 움직임이 적극적이다. 하지만 일부 농장의 그것도 일부분(모돈, 산란계)만 설치되어 있을 뿐 육성/비육돈은 거의 외부온도의 영향을 직접적으로 받고 있다. 따라서, 본 연구는 겨울철(혹한기) 및 여름철(혹서기) 농장 내부 온도와 외부온도 차이를 살펴보고 취약성에 대해 알아보고자 비교 분석하였고, 혹한기의 정밀한 사양관리 및 환경관리를 위한 유용한 정보로 활용하기 위해 수행되었다.

▶ 농장 내부에 온·습도계 설치하고 기상청 자료(외부온도)와 비교분석을 실시하였다. 돈사 내부의 실태조사를 위한 온·습도계는 데이터 저장이 용이하고 설치가 간편하며 축사 내부 어떤 곳에서도 농장관리에 불편함을 주지 않아야 한다. 국내외에서 사용 중인 온·습도계 중 위의 내용에 가장 부합이 되는 HOBO 제품을 대량으로 구입하여 농장 내·외부 온·습도

측정을 실시하였다. 농장 내부의 소독 및 청소 시 발생하는 수분을 직접적으로 피하고 바닥으로부터 1m 지점을 기준으로 내부 양쪽 구석에 2곳과 정가운데 지점에 설치하여 돈사 내부의 모든 지점에서 측정되는 온도의 평균값을 측정하였다. 축사 내부의 온·습도는 무창이나 원치라고 하더라도 분단위의 급격한 변화가 거의 없고 완만한 변화체계를 유지하는 것으로 파악되어 측정시간을 한시간(1h) 단위로 설정하였다. 돈사 내부에서 수집된 3개의 측정 자료는 개별 혹은 평균값으로 분석하여 데이터베이스 저장하여 분석에 활용하였다.

### ○ 실태조사 내용

▶겨울철(혹한기, 밀폐형 돈사 적용) 미세먼지 등 축사 실내 환경 조건에 따른 비육돈의 생산성 변화 실태조사 수행

#### - 공시돈

- 비육돈 : 총 160마리의 거세돈 및 암돼지((요크셔×랜드레이스) × 듀록)
- 그룹 : 2(겨울(1월) : 봄(4월 예정)) × 2(성 : 암, 거세)
- 사료 : 상업용 비육돈 후기 사료(3,400DE, kcal/kg)
- 돈방당 16두씩 총 10돈방(암 5, 거세 5) 처리

#### - 온도 측정

- 실시간 온·습도 측정기(Hobo pro v2)를 사용하여 24시간 실시간 온도 측정
- Hoboware program을 이용한 저장데이터 분석

#### - 계절별(겨울, 봄) 비육돈의 생산성 및 도체특성 검사 결과 자료 활용

- 돈사 내부 환경인자에 따른 육질특성을 조사하기 위해 개시체중, 출하체중, 일당증체량, 도체중량, 지육율 및 등지방을 측정

- 돈사 내부는 온도를 기준으로 볼 때 계절별로 많은 편차를 보였다. 하지만 외부가 아닌 내부라는 조건으로 보았을 때 습도의 영향이 모든 계절에 영향을 미쳐 열량지수(THI)는 완만한 결과를 나타냈다. 하지만 THI 지수 60이하의 결과를 나타낸 겨울에 비해 여름철에는 고온다습의 영향을 받아 최소 80이상의 지수를 나타낼 것으로 예상된다. 따라서, 여름철 돈사 내부의 온·습도는 돼지의 사육환경에 큰 손실이 될 것으로 판단하였다.




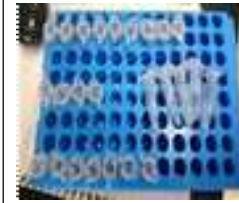






- 축사내 기온이 상승하고 환경 유해인자의 농도가 높은 조건하에서 일반적으로 가축은 음수량이 늘고 체온을 조절하기 위해 호흡량 증가하면서 혈액 내 cortisol 농도가 올라간다.

- 혈액을 채취하여 혈액 내 cortisol 농도를 측정하는 방법이 있으나 혈액 채취시 발생 되는 스트레스가 혈액 내에 cortisol 농도를 높일 수 있고 채취 방법 또한 상당한 인력과 노력이 투입되어야 가능하므로 스트레스 지표로 삼기에는 상당한 무리가 있다.

- 하지만 Hair cortisol(HCC)은 변동성이 큰 혈액의 cortisol보다 스트레스 지표로서 신뢰할 수 있는데 스트레스를 받을 당시의 cortisol 농도가 hair가 자라는 순간에 반영되기 때문이다.

- 따라서, hair는 장기간 cortisol 농도 변화를 반영하기 때문에 기간별 스트레스를 파악하는데 적용 가능하다고 사료된다.

- 털 코티졸 농도(HCC) 분석의 준비는 각 개체에서 면도, 샘플을 알루미늄 호일로 감싸기, 프로판올로 씻기, 분말로 분쇄, 메탄올을 샘플에 첨가, 건조 및 Enzyme Immuno Assay (EIA)를 사용하여 분석하였다(<그림 22> 참조).

1. 헤어 컬렉션	2. 샘플 준비	3. 연삭 및 미세 절단	4. 코티졸 추출	5. 최종 분석
1.1. 돼지털 채취 (> 1g) 	2.1. 이소프로판올 (5mL, 2 회, 3 분)을 통한 계량 (250mg) 및 세척 샘플 	3.1. 수술 용 가위 (1 <mm)로 샘플을 분쇄 후 무게 측정 (50mg) 	4.1. 메탄올 (1mL) 	5.1. Salimetric EIA 키트 
1.2. 알루미늄 호일 및 넘버링 	2.2. 샘플 건조 (7d, 22-24 °C) 	3.2. 비드 비터 (8분-50Hz)로 분쇄 후 샘플 무게 측정 (50mg) 	4.2. 회전 (30 rpm 및 24 시간) 	5.2. 450nm에서 Microplate 판독기를 사용하여 OD 판독 

<그림 22> 가축 털 코티졸 분석방법

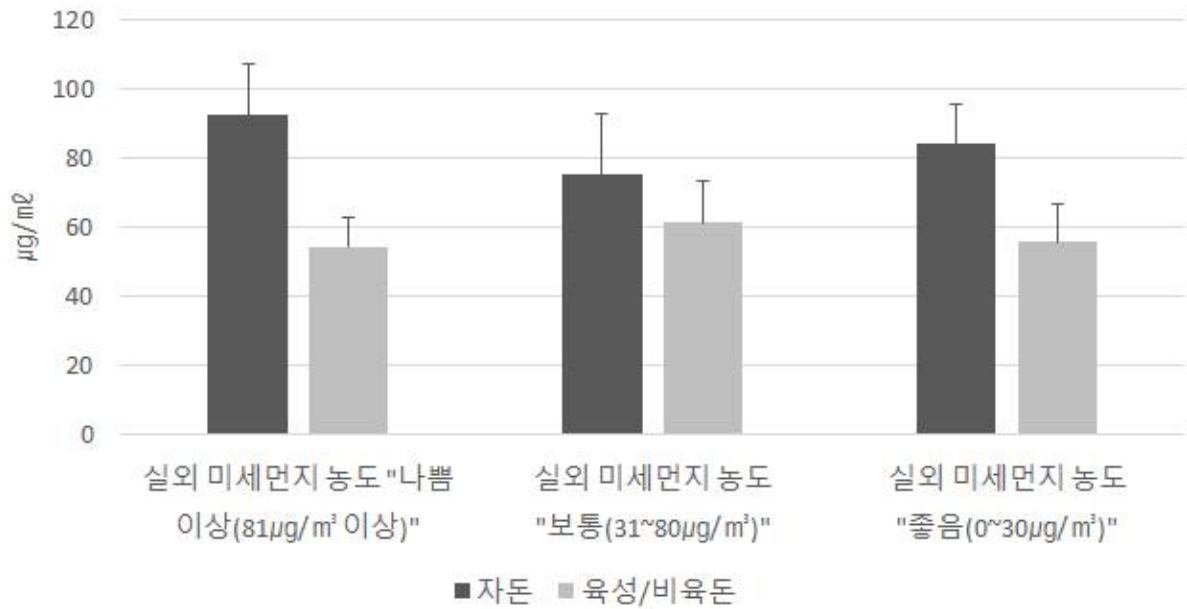
### 3-2) 연구 결과

○ 실외 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 수준에 따른 축종별 코티졸(cortisol) 수치 변화

#### ▶ 돼지

<그림 23>은 돈사 외부의 미세먼지 농도 수준(나쁨 이상, 보통, 좋음)에 따른 돼지(자돈과 육성/비육돈)의 털내 코티졸 농도 변화를 보여주고 있다. 현장 조사 결과, 실외 미세먼지 농도가 “나쁨 이상(81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)”인 날에는 자돈과 육성/비육돈의 경우 각각 평균 92.3( $\pm 15.1$ ) $\mu\text{g}/\text{ml}$ 와 54.3( $\pm 8.7$ ) $\mu\text{g}/\text{ml}$ , “보통(31~80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”인 날에는 75.6( $\pm 17.3$ ) $\mu\text{g}/\text{ml}$ 와 61.2( $\pm 12.4$ ) $\mu\text{g}/\text{ml}$ , “좋음(0~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )”인 날에는 84.1( $\pm 11.6$ ) $\mu\text{g}/\text{ml}$ 와 55.7( $\pm 10.9$ ) $\mu\text{g}/\text{ml}$ 를 나타냈다.

본 분석 결과에 근거한다면 돈사 외부 미세먼지 농도 수준에 관계없이 육성/비육돈보다 자돈의 생체 내 코티졸 농도가 상대적으로 높았고, 돈사 외부 미세먼지 농도 수준과 돼지 생체 내 코티졸 농도와의 연관성은 자돈과 육성/비육돈 모두 통계적으로 유의하지 않았다 ( $p > 0.05$ ).

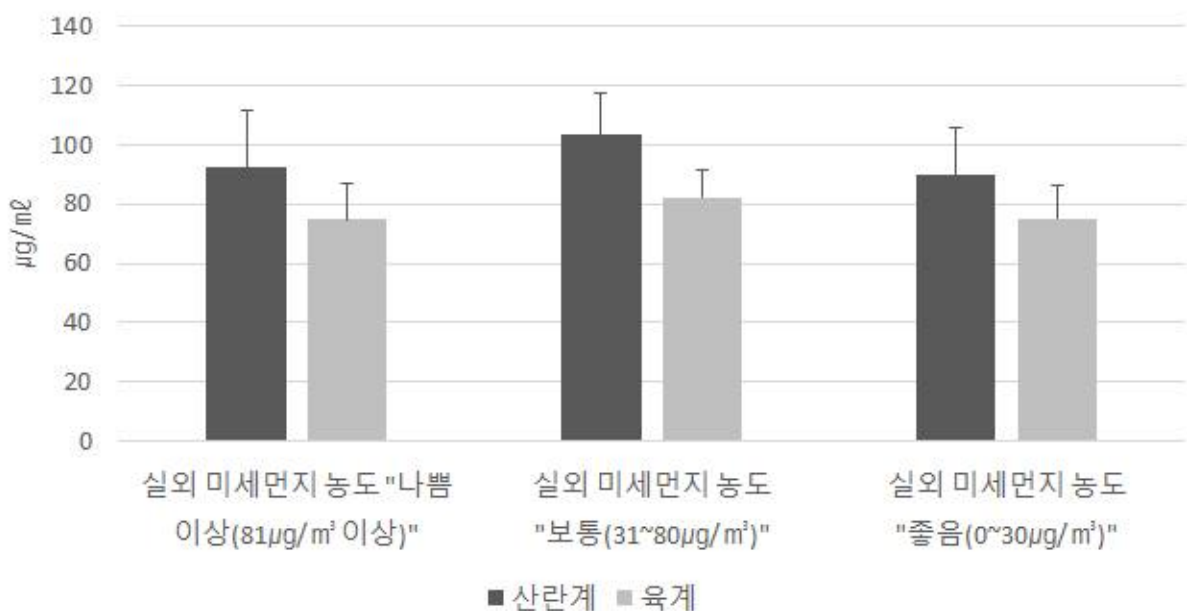


<그림 23> 돈사 외부 미세먼지 농도 수준에 따른 돼지(자돈과 육성/비육돈)의 털내 코티졸 농도 변화

▶ 닭

<그림 24>는 계사 외부의 미세먼지 농도 수준(나쁨 이상, 보통, 좋음)에 따른 닭(산란계와 육계)의 깃털내 코티졸 농도 변화를 보여주고 있다. 현장 조사 결과, 실외 미세먼지 농도가 “나쁨 이상(81µg/m³ 이상)”인 날에는 산란계와 육계의 경우 각각 평균 92.4(±19.1)µg/ml와 74.8(±12.3)µg/ml, “보통(31~80µg/m³)”인 날에는 103.2(±14.5)µg/ml와 82.3(±9.2)µg/ml, “좋음(0~30µg/m³)”인 날에는 89.7(±16.3)µg/ml와 75.1(±11.3)µg/ml를 나타냈다.

본 분석 결과에 근거한다면 계사 외부 미세먼지 농도 수준에 관계없이 육계보다 산란계의 생체 내 코티졸 농도가 상대적으로 높았고, 돼지의 경우와 유사하게 계사 외부 미세먼지 농도 수준과 닭의 생체 내 코티졸 농도와의 연관성은 산란계와 육계 모두 모두 통계적으로 유의하지 않았다 (p>0.05).



<그림 24> 계사 외부 미세먼지 농도 수준에 따른 닭(산란계와 육계)의 깃털내 코티졸 농도 변화



▶ 고찰

Webel (1997) 선행 연구에 의하면 증체량이 줄어드는 것에 혈액내 스트레스 호르몬 중 코티졸(Cortisol)이 높아지게 되면 증체량은 상대적으로 줄게 되는 것으로 조사되었다. 코티졸과 같은 스트레스 호르몬은 스트레스 부하에 따른 생식기능, 면역기능, 지각능력, 대사작용 등 신체적 기능에 미치는 부정적 영향도 연구되고 있다 (Groot et al., 2001; Roussel et al., 2004; Ott, 2005). 특히 스트레스에 따른 면역기능저하에 따른 질병발생 감수성 증가와 같은 스트레스와 면역기능변화의 상관성에 대한 연구가 집중적으로 진행되고 있다 (Elenkov and Chrousos, 1999). 돼지가 스트레스와 같은 위협 상황이 오면 몸은 그러한 위협에 대항하기 위해 에너지를 생산해 내야 하는데 돼지의 신경계 중 교감 신경계가 활동을 시작하고 부신(adrenal gland)에서 에피네프린(epinephrine), 노르에피네프린(norepinephrine), 스테로이드(steroid) 계열의 호르몬이 분비되는데 코티졸은 부신 피질에서 분비되는 스테로이드계 호르몬으로 스트레스와 같은 위협 상황이 오면 각 기관의 혈액 방출량이 많아지고 상대적으로 맥박과 호흡이 빨라지며, 감각기관이 예민해 진다.

하지만 본 연구 결과에서는 축사 외부 미세먼지 농도가 나쁨 이상, 보통, 좋음에 관계없이 돼지와 닭의 생체내 코티졸 농도가 참고치 범위(reference value; 25 $\mu$ g/ml ~ 125 $\mu$ g/ml) 안에 모두 포함되어 있어 실외 미세먼지가 축사 내부로 유입되어 가축에게 주는 스트레스 정도는 거의 없는 것으로 판단된다. 한편 돼지의 경우 육성/비육돈보다는 자돈이 상대적으로 생체내 코티졸 농도가 높게 나타난 이유는 외부 미세먼지의 영향이 아닌 다른 여러 복합적인 환경적 요인들에 새끼 돼지들이 더 민감하게 반응해 스트레스 형태로 나타난 결과라 사료된다. 또한 닭의 경우 육계보다는 산란계가 상대적으로 생체내 코티졸 농도가 높게 나타난 이유는 역시 외부 미세먼지의 영향보다는 방사형으로 자유롭게 사육되는 육계보다는 케이지(cage)에 가둬져 사육되는 산란계가 행동적 제한으로 받는 스트레스에 의한 것으로 추정된다.

○ 실외 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 농도 수준에 따른 가축의 생산성 변화

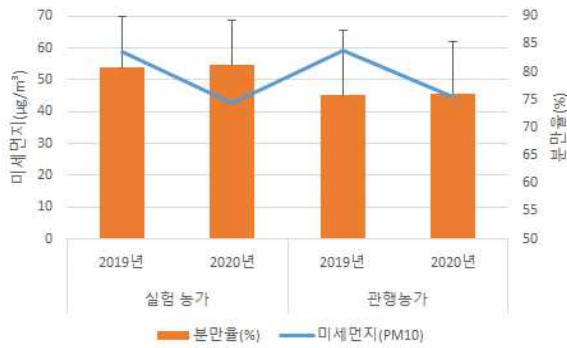
▶ 2020년 초 Covid 19 감염 확산으로 인해 전반적인 산업 활동이 위축되어 Covid 19 감염 발생 이전의 2019년도에 비해 2020년도의 미세먼지 발생 농도가 급격히 감소된 것이 기상청 자료 분석을 통해 확인되었다.

▶ 따라서 2019년도와 2020년도를 대상으로 현장 실증 실험이 수행된 연암대학교 실험 농장의 가축 생산성 관련 성적 자료와 객관적 비교를 위해 특정 지역의 관행 농가의 가축 생산성 관련 성적 자료를 분석하였다.

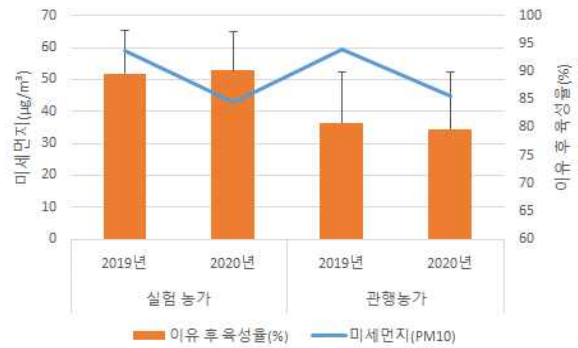
▶ 가축 생산성 관련 성적 자료는 돼지의 경우 분만율, 이유 후 육성율, PSY, MSY, 폐사율을, 닭의 경우 산란율을 분석 대상으로 하였다.

▶ 미세먼지 농도 데이터의 경우 연암대학교가 위치한 천안시와 관행 농가가 위치한 안성시에서 측정된 2019년도와 2020년도의 자료 중 황사 및 기상 조건 등 상대적으로 미세먼지 발생 수준이 높은 상반기(1~6월) 자료를 분석하였다.

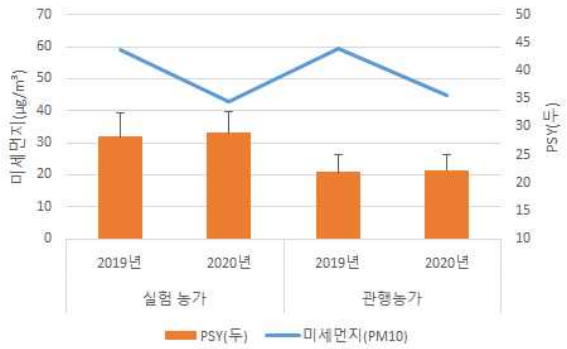
▶ 2019년도와 2020년도의 미세먼지 농도 수준에 따른 가축 생산성 지표별 변화 양상은 <그림 25>와 같다.



<미세먼지 vs 분만율>



<미세먼지 vs 이유 후 육성율>



<미세먼지 vs PSY>



<미세먼지 vs MSY>



<미세먼지 vs 폐사율>



<미세먼지 vs 산란율>

<그림 25> 연도별(2019년과 2020년) 실외 미세먼지 농도 수준에 따른 가축 생산성 지표별 변화

▶ 2019년도와 2020년도의 “미세먼지” 평균 농도는 연암대학교 실험 농장이 위치한 충남 천안시의 경우 각각  $59.1(\pm 15.2)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $42.8(\pm 16.1)\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 비교 대상 관행 농가가 위치한 경기 안성시의 경우 각각  $59.3(\pm 16.7)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $44.8(\pm 14.6)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되었고, 두 지역 모두 2019년도와 2020년도의 농도 차이가 통계적으로 유의하였다( $p < 0.05$ ).

▶ 2019년도와 2020년도의 평균 “모든 분만율”은 연암대학교 실험 농장의 경우 각각  $80.7(\pm 9.2)\%$ 와  $81.2(\pm 8.1)\%$ , 비교 대상 관행 농가의 경우 각각  $75.8(\pm 11.7)\%$ 와  $76.1(\pm 9.3)\%$ 로 측정되었고, 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 2019년도와 2020년도의 모든 분만율의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다( $p > 0.05$ ).

▶ 2019년도와 2020년도의 평균 “이유 후 육성율”은 연암대학교 실험 농장의 경우 각각  $89.6(\pm 7.8)\%$ 와  $90.2(\pm 6.9)\%$ , 비교 대상 관행 농가의 경우 각각  $80.8(\pm 9.2)\%$ 와  $79.7(\pm 10.3)\%$ 로 측정되었고, 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 2019년도와 2020년도의 이유 후 육성율의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다( $p > 0.05$ ).

▶ 2019년도와 2020년도의 평균 “PSY”는 연암대학교 실험 농장의 경우 각각

28.2(±4.2)두와 28.9(±3.8)두, 비교 대상 관행 농가의 경우 각각 21.9(±3.1)두와 22.3(±3.1)두로 측정되었고, 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 2019년도와 2020년도의 PSY의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다( $p>0.05$ ).

▶ 2019년도와 2020년도의 평균 “MSY”는 연암대학교 실험 농장의 경우 각각 26.3(±3.7)두와 25.4(±3.5)두, 비교 대상 관행 농가의 경우 각각 19.7(±1.9)두와 19.5(±2.6)두로 측정되었고, 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 2019년도와 2020년도의 MSY의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다( $p>0.05$ ).

▶ 2019년도와 2020년도의 평균 “폐사율”은 연암대학교 실험 농장의 경우 각각 3.3(±0.8)%와 3.5(±1.3)%, 비교 대상 관행 농가의 경우 각각 4.2(±1.1)%와 4.8(±0.9)%로 측정되었고, 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 2019년도와 2020년도의 폐사율의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다( $p>0.05$ ).

▶ 2019년도와 2020년도의 평균 “산란율”은 연암대학교 실험 농장의 경우 각각 62.3(±6.3)%와 61.9(±6.9)%, 비교 대상 관행 농가의 경우 각각 50.9(±4.2)%와 51.2(±3.7)%로 측정되었고, 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 2019년도와 2020년도의 산란율의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다( $p>0.05$ ).

▶ 분석 결과, Covid 19 감염 사태가 발생되기 이전의 2019년도 평균 미세먼지 농도가 Covid 19 감염 확산이 시작된 2020년도보다 연암대학교 실험 농장과 관행 농가가 위치한 충남 천안시와 경기 안성시 모두 통계적으로 유의하게 높았다( $p<0.05$ ). 하지만 평가 대상 가축 생산성 지표들(분만율, 이유 후 육성율, PSY, MSY, 폐사율, 산란율)의 경우 연암대학교 실험 농장과 관행 농가 모두 미세먼지 농도 수준이 높은 2019년도와 상대적으로 낮은 2020년도 비교시 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다( $p>0.05$ ).

☞ 따라서 본 연구 결과에 근거한다면 축사 외부 미세먼지는 가축의 생산성에 유의한 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

#### ▶ 제한점

- 가축 생산성 지표의 경우 농가 내부 성적 자료이기 때문에 대부분 공개를 꺼려하는 이유로 자료 협조에 호의적인 특정 1개소의 관행 농가만을 평가 대상으로 하여 본 분석 결과를 대표 자료로 일반화하기에는 무리가 있다.

☞ 따라서 실외 미세먼지가 가축의 생산성에 주는 영향을 좀 더 객관적으로 평가하기 위해서는 통계적으로 유의한 판정을 내릴 수 있는 N수 이상의 지역별 축산 농가들의 성적 자료의 확보가 필요하다.

- 기상청 미세먼지 농도 예보 수치가 실제 현장 측정 농도 수치가 서로 상응하지 않는 결과가 나타났는데, 이는 센서에 의한 예보 모니터링의 불확실성으로 미세먼지 농도 “나쁨 이상”의 신뢰도 문제를 고려할 필요가 있다.

- Covid19의 감염 지속과 돼지열병바이러스(ASF) 및 조류독감 바이러스(AI)의 발병으로 조사 대상 농가의 섭외 및 현장 방문의 어려움으로 당초 계획된 농가 수 조사가 불가능하여 측정 데이터의 통계적 유효성이 결여된 측면이 있다.

- 단기간(2년) 현장 연구 특성상 연구 결과를 일반화하기에는 한계가 있으므로 외부 미세먼지가 가축 생산성에 주는 영향을 객관적으로 파악하기 위해서는 장기간(최소 5년 이상)의 연구 수행 검토가 요구된다.

○ 제언

▶ 미국, EU 등 선진 국가들의 경우 미세먼지 등의 공기오염물질 노출에 따른 사람의 건강 및 가축의 생산성과의 연관성을 파악하기 위해 최소 5년 이상의 코호트 추적 연구를 수행하나, 본 연구 기간은 2년으로 한정되어 있어 객관적인 결론 도출의 한계성을 가지고 있다.

▶ 하지만 미세먼지 농도 수준에 따른 축사 내부의 공기오염물질 발생 기여도를 국내외적으로 처음 추정된 현장 평가 연구라는 데 의의가 있으며, 실외 미세먼지 농도가 상승하게 되면 축사 내 미세먼지의 농도 또한 증가한다라는 점이 본 연구를 통해 실증되었다.

▶ 본 연구는 미세먼지가 가축에게 주는 생체 영향을 미세먼지 농도의 정량적 측면만 평가하였다는 한계성을 가지고 있기 때문에 그 원인이 미세먼지 그 자체인지, 아니면 미세먼지가 함유하는 유해 화학 성분들인지를 규명하기 위해서는 향후 돼지나 닭을 해부하여 병리학적 이상을 파악하거나 양-반응(dose-response relationship) 평가를 통한 위해성 평가(risk assessment) 관련 추가 연구가 필요하다.

▶ 또한 돈사나 계사의 경우 실외 미세먼지 농도보다 내부 자체의 농도가 워낙 높게 형성되고 있기 때문에 미세먼지 노출에 따른 가축의 생산성 향상 방안을 도출하기 위해서는 돈사와 계사 내부의 미세먼지를 저감하기 위한 기술 개발 및 적정 관리 기준의 마련 등의 후속 연구가 수행되어야 것이다.

### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 1) 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

- ▶ 실외 미세먼지 농도 수준에 따른 축사 유형별 입자상 오염물질 내부 기여도 규명
- ▶ 실외 미세먼지 농도 수준에 따른 축사 유형별 가스상 오염물질 내부 기여도 규명
- ▶ 실외 미세먼지 농도 수준에 따른 축사 유형별 생물학상 오염물질 내부 기여도 규명
- ▶ 실외 미세먼지 농도 수준에 따른 축종별 스트레스 영향 평가
- ▶ 실외 미세먼지 농도 수준에 따른 축종별 생산성 변화 분석

##### (2) 정량적 연구개발성과

☞ 해당사항 없음

##### (3) 세부 정량적 연구개발성과

###### [과학적 성과]

###### □ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	On-Site Investigation of Airborne Bacteria and Fungi According to Type of Poultry Houses in South Korea	Processes	이상준, 김기연	9(9)	스위스	MDPI	SCIE	2021년 8월 30일	2227-9717	100%
2	육가공 작업장에서 발생하는 바이오에어로졸 저감을 위한 살균제 효능 실증 평가	한국산업 보건학회지	황주영, 김기연	31(2)	한국	한국산업보건학회	비SCIE	2021년 6월 30일	2384-132X	80%
3	돈사에서 발생하는 악취물질과 분진과의 상관 분석	한국축산 시설환경학회지	최원, 김기연	23(2)	한국	한국축산환경학회지	비SCIE	2021년 6월 30일	1226-0274	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021년 한국냄새환경학회 춘계학술대회	김기연	2021년 5월 20일	온라인	한국
2	2021년 한국냄새환경학회 춘계학술대회	김두영	2021년 5월 20일	온라인	한국
3	2021년 한국냄새환경학회 춘계학술대회	황주영	2021년 5월 20일	온라인	한국
4	한국산업보건학회 창립 30주년 기념 학술대회	김두영	2020년 10월 19일	온라인	한국
5	2020년 한국냄새환경학회 추계학술대회	황주영	2020년 11월 12일	온라인	한국
6	2020년 한국냄새환경학회 추계학술대회	오수진	2020년 11월 19일	온라인	한국
7	2020년도 한국산업보건학회 춘계학술대회	김기연	2020년 4월 9일	수원 컨벤션센터	한국
8	2020년도 한국산업보건학회 춘계학술대회	김기연	2020년 4월 9일	수원 컨벤션센터	한국

□ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

□ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

□ 신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 <sup>1)</sup>	인증여부 <sup>2)</sup>	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 <sup>3)</sup>	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 <sup>1)</sup>	표준명	표준기구명 <sup>2)</sup>	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 <sup>3)</sup>	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

\* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

사업화 현황

번호	사업화 방식 <sup>1)</sup>	사업화 형태 <sup>2)</sup>	지역 <sup>3)</sup>	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

\* 1) 기술이전 또는 자기실시

\* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등

\* 3) 국내 또는 국외

매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
	국외				
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

고용 효과

구분			고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력		
		생산인력		
	개발 후	연구인력		
		생산인력		

비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원



□ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	미세먼지에 의한 축사 작업장 내 공기오염물질의 발생 기여도	한국산업안전보건공단 (산업안전보건연구원)	2021	검토 중
2	제안	축산환경 관련 축산농가 교육 및 관련 사업 정책 수립	서귀포시청 (축산과)	2021	검토 중

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사 배출	2020		1			1	여	1				

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	원고 기고	잡지(월간 낙농/육우)	한우사 환경 관리	2021년 3월 1일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

\* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사	○ 국내외 발표 논문 및 보고 자료들을 검색하고 분석한 결과, 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 사례는 일부 보고되었음	○ 100
○ 돼지와 가금류의 미세먼지로 인한 사육사 환경오염 가능성 및 위해성 평가	○ 축사 외부 미세먼지 발생에 따른 돈사와 계사의 내부 환경 오염 평균 기여도는 가스상 오염물질은 10~45%, 입자상 오염물질은 5~35%, 생물학상 오염물질은 5~25%인 것으로 분석됨	○ 100
○ 미세먼지 노출에 따른 가축 성장 및 폐사 영향 평가	○ 실외 미세먼지 농도가 높은 연도(2019년)와 Covid-19의 영향으로 상대적으로 미세먼지 농도가 낮은 연도(2020년)의 가축의 생산 지표를 비교한 결과, 통계적으로 유의한 차이는 없는 것으로 분석됨	○ 100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

---

2) 자체 보완활동

---

3) 연구개발 과정의 성실성

---

## 5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

---

### 가. 기술적 측면

- 미세먼지의 가축 성장 영향 수준에 대한 기초 자료 확보
- 축산 분야의 미세먼지 대응 기술 방안 정립
- 미세먼지 노출에 따른 가축의 보건 위해 등급 산정

### 나. 경제적·산업적 측면

- 국제적 비용 분담 관련 국가간 협약에서 미세먼지 감소 근거로서 제시함으로써 국가 이익 달성을 위한 자료로 활용
  - 미세먼지와 관련한 여러 환경 협약에 대해 과학적으로 대응할 수 있는 논리적 근거 마련 및 환경 친화적 국가 위상도 고취
  - 미세먼지의 축산 피해 상황 수준을 파악하여 국민과 축산인들에게 미세먼지의 위해성 인식 제고
- 

## 6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

---

- 축사로부터 발생하는 미세먼지 절대량 분석기술 개발 및 국가 인벤토리 구축자료로 활용
  - 미세먼지의 축사 환경 기여율 평가를 통한 향후 모니터링, 예측 모델 개발 등 후속 연구 설계를 위한 자료로 활용
  - 가축의 유해 분진 노출 위험도 평가 및 공기질 개선을 위한 정책마련, 축산 환경보건을 위한 교육 자료 등으로 활용
  - 미세먼지로 인한 축종별 피해 유형 및 인과관계 및 폐사 소요기간 규명 자료로 활용
  - 미세먼지에 의한 가축의 피해 영향 관련 정책 자료로 활용
-

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE	1
	비SCIE	
	계	1
국내논문	SCIE	
	비SCIE	2
	계	2
특허출원	국내	
	국외	
	계	
특허등록	국내	
	국외	
	계	
인력양성	학사	
	석사	
	박사	
	계	
사업화	상품출시	
	기술이전	
	공정개발	
제품개발	시제품개발	
비임상시험 실시		
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상
		2상
		3상
	의료기기	
진료지침개발		
신의료기술개발		
성과홍보		
포상 및 수상실적		
정성적 성과 주요 내용		

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
2.	1)
	2)

## 자체평가의견서

### 1. 과제현황

		과제번호	319115-2		
사업구분	OOOOOO사업				
연구분야	축산분야			과제구분	단위
사업명	농생명산업기술개발사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발			과제유형	(기초,응용,개발)
연구개발기관	서울과학기술대학교 산학협력단			연구책임자	김기연
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2019. 11. 26 - 2020. 04. 25	138,000		138,000
	2차년도	2020. 04. 26 - 2021. 10. 25	212,000		212,000
	3차년도				
	4차년도				
	5차년도				
	계	2019. 11. 26 - 2021. 10. 25	350,000		350,000
참여기업	-				
상대국	-	상대국연구개발기관	-		

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2021년 12월 27일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
서울과학기술대학교 산학협력단	부교수	김기연

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	
----	---

## I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수

- 외부 미세먼지가 축사 내부 오염과 가축의 생산성에 주는 영향을 국내외 처음 평가한 연구임

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수

- 미세먼지의 축사 내부 오염 기여도 및 가축 성장 영향 수준에 대한 기초 자료를 확보함으로써 국민과 축산인들에게 미세먼지의 위해성을 인식시킬 수 있는 기회라 판단됨

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수

- 미세먼지의 축사 환경 기여율 평가를 통한 향후 모니터링, 예측 모델 개발 등 후속 연구 설계를 위한 자료로 활용될 것으로 기대됨

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 보통

- 연구 목표에 따라 연차별로 계획된 연구 내용을 순차적으로 수행된 것으로 판단됨

### 5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수

- 연구 협약시 설정되었던 연구 정량 목표(SCIE급 국외 논문 1편, 국내 논문 2편, 학술대회 발표 4건, 정책활용 2건, 기타활용 1건, 인력양성 1건)를 연구 기간내에 모두 달성하였음

## II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
○ 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사	20	100	- 연구 계획대로 목표 달성한 것으로 판단됨
○ 돼지와 가금류의 미세먼지로 인한 사육사 환경오염 가능성 및 위해성 평가	50	100	- 연구 계획대로 목표 달성한 것으로 판단됨
○ 미세먼지 노출에 따른 가축 성장 및 폐사 영향 평가	30	100	- 연구 계획대로 목표 달성한 것으로 판단됨
합계	100점	100	

## III. 종합의견

### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 연구 협약 시 제안되었던 연구 세부 목표 3가지를 연구 수행을 통해 달성한 것으로 판단됨

### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 코로나 19로 인한 축사 현장 방문의 애로사항 고려

### 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 가축의 유해 분진 노출 위험도 평가 및 공기질 개선을 위한 정책마련, 축산 환경보건을 위한 교육 자료 등으로 활용



#### IV. 보안성 검토

○ 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구개발기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

##### 1. 연구책임자의 의견

##### 2. 연구개발기관 자체의 검토결과

## 연구성과 활용계획서

### 1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야	축산분야	
연구과제명	미세먼지에 의한 가축 축종별 피해예측 및 평가기술 개발			
주관연구개발기관	서울과학기술대학교 산학협력단	주관연구책임자	김기연	
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	350,000,000원			350,000,000원
연구개발기간	2019. 11. 26 - 2021. 10. 25			
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input checked="" type="checkbox"/> 정책자료 <input type="checkbox"/> 기타(                      ) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:                      )			

### 2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 문헌 조사	▶ 국내외 발표 논문 및 보고 자료들을 검색하고 분석한 결과, 미세먼지에 의한 가축 축종별 피해 사례는 현재까지 보고된 바 없음
② 돼지와 가금류의 미세먼지로 인한 사육사 환경 오염 가능성 및 위해성 평가	▶ 축사 외부 미세먼지 농도 수준에 따른 돈사와 계사의 내부 환경 오염 기여도는 가스상 10~20%, 입자상 20~40%, 생물학상 10~30%인 것으로 분석되었고, 이에 따른 위해성은 미미한 수준인 것으로 조사됨
③ 미세먼지 노출에 따른 가축 성장 및 폐사 영향 평가	▶ 실외 미세먼지 농도가 높은 연도(2019년)와 Covid-19의 영향으로 상대적으로 미세먼지 농도가 낮은 연도(2020년)의 가축의 생산 지표를 비교한 결과, 큰 차이가 없는 것으로 평가됨

\* 결과에 대한 의견 첨부 가능

### 3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용· 홍보		기타 (타연구 활용등)	
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출		투 자 유 치	논 문				학 술 발 표	정 책 활 용		홍 보 전 시
													S C I	비 S C I						
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	명	건	건			
가중치														30	10	50		10		
최종 목표												1	2	4	1	2		1		
당해 년도	목표											1	2	4	1	2		1		
	실적											1	2	8	1	2		1		
달성률 (%)												100	100	200	100	100		100		

### 4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	
②	
③	

### 5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복 제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장애로 해 결	정책 자료	기타
①의 기술										
②의 기술										
③의 기술										
·										
·										

\* 각 해당란에 v 표시

### 6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	
②의 기술	
③의 기술	

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용· 홍보		기타 (타연구 활용등)	
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출		투 자 유 치	논문				학 술 발 표	정 책 활 용		홍 보 전 시
													S C I	비 S C I						
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	명	건	건			
가중치																				
최종목표												1	2							
연구기간내 달성실적												1	2							
연구종료후 성과창출 계획												1	2							

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 <sup>1)</sup>			
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식 <sup>2)</sup>	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타( )		
이전소요기간	실용화에상시기 <sup>3)</sup>		
기술이전시 선행조건 <sup>4)</sup>			

1) 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성

2) 전용실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 다른 1인에게 독점적으로 허락한 권리  
 통상실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 제3자에게 중복적으로 허락한 권리

3) 실용화에상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등

4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농생명산업기술개발 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농생명산업기술개발 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.