한국환경보건학회지, 제45권 제6호(2019)
J Environ Health Sci. 2019; 45(6): 630-637

pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2019.45.6.630

원 저 Original articles

비육돈사 공기중 분진 수준에 대한 시계열적 분석 및 돈사내외부 분진 수준 비교분석

김형아* · 김창열** · Ravi Gautam** · 양수정** · Manju Acharya** · 조지훈** · Anju Maharjan** · 신소정** · 송은섭** · 이윤범*** · 김효철**** · 김경란**** · 이경숙**** · 허 용**†

*가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실, **대구가톨릭대학교 산업보건학과,
***대구가톨릭대학교 화학물질독성평가학과, ****농촌진흥청 국립농업과학원

Secular Trend in Indoor Dust Levels with a Comparison of Indoor and Exhaust Outlet Dust Levels in Swine Confinement Buildings

HyoungAh Kim*, ChangYul Kim, Ravi Gautam**, SuJeong Yang**, Manju Acharya**, JiHoon Jo**, Anju Maharjan**, SoJung Sin**, EunSeob Song**, YoonBum Lee***, Hyocher Kim****, Kyung-ran Kim****, Kyung-suk Lee****, and Yong Heo**†**

**Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University*
***Department of Occupational Health, Daegu Catholic University*
****Department of Toxicity Assessment, Daegu Catholic University*
*****National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration*

ABSTRACT

Objectives: This study was performed to evaluate the secular changes in indoor airborne dust or endotoxin levels in the dust from swine confinement buildings. Indoor levels were compared with the level at the exhaust outlet in order to examine the contribution potential of indoor dust to nearby ambient air dust.

Methods: Comparisons were made on inhalable and respirable dust levels reported in 2002, 2012, and 2017 from 14, 10, and 36 swine fattening confinement buildings in Korea, respectively. This data was produced by the same research group. Levels of endotoxin adsorbed into inhalable or respirable dust were also compared. Samples of inhalable or respirable dust were collected indoors and at exhaust outlets from 17 swine fattening confinement buildings in 2019, and dust levels were compared between the indoor and the outlet.

Results: The outlet inhalable dust level (0.111 mg/m^3) was approximately 19% of that from indoors, and the respirable dust level (0.033 mg/m^3) was approximately 74% of that from indoors. The outlet respirable dust levels were lower than the airborne fine dust levels in the towns where those farms are located. No significant difference was observed in the inhalable dust levels among the years examined, but the respirable dust level in 2017 (0.143 mg/m^3) was significantly lower than in 2002 (0.328 mg/m^3). The level of endotoxin in inhalable dust was significantly higher in 2017 (722 EU/m^3) than in both 2002 (75 EU/m^3) and 2012 (171 EU/m^3).

Conclusion: Even though no apparent contribution from swine farm indoor dust to nearby ambient air dust was observed in terms of amount, a certain control strategy to reduce the production of airborne dust and endotoxin from swine farms is merited.

Key words: Airborne endotoxin, indoor or exhaust out dust level, inhalable and respirable particulate matter, swine confinement buildings

†Corresponding author: Dept. Occupational Health, College of Bio and Medical Sciences, Deagu Catholic University, Gyeongsan-si, Gyeongbuk, Korea, Tel: +82-53-850-3737, E-mail:yheo@cu.ac.kr
Received: 11 October 2019, Revised: 12 November 2019, Accepted: 13 November 2019

I. 서 론

유기분진은 주로 사육동물의 털이나 분뇨, 사료, 깔짚, 축사내 기생하는 진드기나 바퀴벌레 분비물, 분변 등에서 유래되는 미생물 또는 독소, 잡초 화분 등이 혼합되어 비산되는 분진을 칭하며 산업동물 사육 축사에서 대표적으로 발생된다.[1-2] 유기분진은 작업자들에게 직업성 천식, 만성 폐쇄성 폐질환 같은 농부폐증을 유발할 수 있고 사육 동물에게도 호흡기 질환을 촉발시키는 것으로 알려져 있다. 특히 유기분진 중 내독소는 면역체계를 교란시켜 각종 감염병에 대한 저항력을 저하시키는 주요 인자로 밝혀져 있다.[3-4] 고농도의(기하평균 109 EU/m^3) 내독소에 노출된 양돈 작업자들의 경우 저농도(기하평균 1 EU/m^3) 내독소에 노출된 양돈 작업자들에 비해 알레르기성 질환 발생과 관련된 2형 보조 T 림프구 활성도의 항진이 두드러진 면역기능 편향성이 보고되고 있다.[4] 이러한 편향성은 양계 작업자들에게서도 보고된 바 있다.[5] 이러한 점은 축산업의 현대화와 더불어 진행되고 있는 밀폐형 축사 증가에 따라 축사내 작업자들에 대한 직업성 건강관리를 강화해야한다는 배경이 되고 있다.

유기분진을 포함한 농업현장에서 발생하는 분진, 특히 초미세먼지에 대해서는 국가 정책적인 차원에서도 최근 언급되고 있다.[6] 국내 미세먼지는 주로 제조업 연소과정, 화력발전과 같은 에너지산업 연소과정, 경유차 등 차량 운행에 따른 연소과정, 냉난방 등 생활환경관련 연소과정에서 주로 발생되는 것으로 보고되고 있으며 계절과 기상조건에 따라 국외로부터 유입도 심각한 것으로 보고되고 있다.[6-7] 농업의 경우 토양 경작과정, 영농기계 운용과정, 경제동물 사육과정 등에서 분진 발생이 이루어지고 있으며 특히 영농폐기물 불법소각, 축사 배출 암모니아가 $PM_{2.5}$ 초미세먼지 발생에 기여하는 것으로 보고되고 있다.[1,8] 암모니아는 대기중 오존과 화학반응을 통하여 황산암모늄, 질산암모늄 등 2차 생성 초미세먼지를 발생시키는 원인 화학물질로 여겨지고 있다. 초미세먼지는 폐질환, 심혈관계질환 뿐만 아니라 뇌신경기능장애 발생까지도 관여하는 것으로 보고되고 있다.[9]

농작업에 기인한 미세먼지 발생은 환경보건학적 또는 해당 작업자들에 미치는 건강 영향 측면에서 지속적인 연구가 수행되었다.[1,2,4,5,10-13] 주로 비육돈사 내부 흡입성분진 또는 호흡성분진 수준을 측정분석하였고 분진내 함유 내독소 수준을 평가한 경우도 있으며 이들 분진 또는 내독소 수준과 작업자 건강영향 특히 면역기능과의 상관성은 지속적으로 평가되고 있다.[1-4,10-12] 최근 20여년간 축산업 특히 양돈업의 경우 사육 방식이 윈치커튼 개방형 방식에서 밀폐형으로 전환되고 강제환기시스템 도입, 분뇨처리시설 개선 등 많은 변화가 있었다. 사육환경 변수 중 사육 비육돈 주령, 돈사내부 온도, 돈사바닥 형태, 돈사내 작업시간, 분뇨처리 주기 등 변수가 돈사내 흡입성분진 및 흡입성분진내 내독소 수준에 유의하게 영향을 미치는 변수였는데 이러한 변수 중 돈사바닥 형태, 돈사내 작업시간, 분뇨처리 주기 변수는 호흡성분진내 내독소 수준에도 유의하게 영향을 미치는 변수였다.[1] 이처럼 과거에서 현재에 이르기까지 돈사내 분진 및 분진중 내독소 수준에 영향을 미칠 수 있는 여러 사육환경이 변화되었지만 관련하여 분진 및 분진내 내독소 생성 수준은 어떻게 변화되었는지 아직까지 체계적으로 분석.평가된 보고는 없다.

본 연구에서는 2000년대 초반부터 최근까지 발표된 우리나라 돈사내 흡입성분진, 호흡성분진 수준 및 각 분진 중 내독소 수준의 변화 추이를 분석하였다. 그리고 돈사내부와 돈사 외벽에 있는 환기구에서 흡입성분진 및 호흡성분진 수준을 측정.분석하여 비교함으로써 돈사내 발생 분진이 돈사 주변 대기로 어느 정도 배출되어 나가는지 그 기여 정도를 추정하고자 하였다. 궁극적으로 양돈작업관련 발생 미세먼지의 대기환경 미세먼지 오염 기여정도를 분석하여 우리나라 농업분야의 미세먼지 저감 대책 수립에 기초자료로서 활용되고자 본 연구를 수행하였다.

II. 연구 방법

1. 분진 및 내독소 수준 시계열분석 자료원

본 연구진이 2002년, 2012년, 2017년에 비육돈사 대상으로 측정분석하여 발표한 자료를 활용하였다. 2002년의 경우 경기도 용인, 이천, 여주에 위치하고 있는 14개 비육돈사 내부에서 측정한 흡입성분진, 호흡성분진 및 각 분진 중 내독소 수준을 측정분석하여 발표한 자료가 이용되었다.[14] 2012년 경우는 경기도 안성, 김포, 이천 소재 10개 비육돈사 내부

분진 및 내독소 측정분석하여 발표한 자료가 이용되었다.[4] 2017년 경우는 경상북도 경주, 경기도 가평, 충청남도 보령, 강원도 철원, 충청북도 음성, 전라북도 김제, 전라남도 해남에 위치한 36개 비육돈사 내부 분진 및 내독소 수준을 분석한 자료가 이용되었다.[1] 년차별 분진 포집은 모두 4월에서 9월 사이에 동일 연구팀에 의해 이루어졌다.

2. 분진 및 내독소 수준 분석

분진 포집 및 분진 중 내독소 수준 분석에 대한 방법은 위에서 언급한 자료원 인용 논문에 자세히 기술되어 있다.[1,4,14] 포집 및 분석 방법에 대해 약술하면 다음과 같다. 각 농장에서 농장 대표가 지정한 1개 비육돈사에서 6시간 동안 돈사 출입구에서 1/3 및 2/3 각 지점에서 흡입성분진과 호흡성분진을 모두 포집하였다. 흡입성분진은 37 mm polyvinyl chloride (PVC) membrane filter (SKC, Eighty Four, PA, USA)를 3단 카세트홀더에 장착시켜 1.7 L/min 유속으로 포집하였고, 호흡성분진은 PVC membrane filter를 aluminum cyclone (SKC)에 장착시켜 2.5 L/min 유속으로 포집하였다. 각 포집기는 작업자들의 호흡기 위치를 고려하여 돈사 바닥으로부터 1.5 m 정도 높이에 고정시켰다. 전자미세저울(Qunitix 125D, Sartorius, Germany)을 사용하여 공시료 또는 분진 포집 여지를 건조한 뒤 중량을 3번 반복 측정하고 평균값을 계산하였다. 2019년 돈사내외부 분진 수준 비교를 위하여 제주도 제주시 소재 13개 농장, 전라남도 해남군 소재 4개 농장 비육돈사에서 위에서 기술한 분진 포집 방법과 동일한 방법으로 분진을 포집하였다. 돈사내외부 분진 포집은 동일한 시간대에 이루어졌으며, 돈사 외부의 경우 돈사 내부 분진 포집 지점과 가장 인접한 2개 환기구 입구에 흡입성분진과 호흡성분진 포집기를 밀착시켜 포집하였다. 분진 포집은 2월말부터 7월초에 수행되었다.

각 분진 중 내독소 수준은 Limulus Amebocyte Lysate (LAL) Kinetic QCL 시험법을 이용한 분석키트(Lonza, Walkersville, MD, USA)를 사용하여 분석하였다.[1,4,14] 여지를 0.05% Tween 20 (Sigma, Saint Louis, MO, USA)가 함유된 pyrogen free LAL water 3 mL에 넣고 500 rpm 속도로 1시간 교반시키고 곧바로 원심분리한 뒤(3,000 rpm, 10분) 상등액을 채취하였다. 각 상등액을 96-well microplate에 복수로 (100 μL/well) 넣고 30분간 37°C microbiology incubator에 정치시켰다. 이후 각 well에 100 μL Kinetic-QCL reagent를 넣고 50분간 200 rpm에서 교반시킨 뒤 LAL reader를 이용하여 405 nm에서 흡광도를 측정하였다. 내독소 수준은 공기 m^3 당 활성 내독소 단위(EU, bioactive endotoxin unit/m^3)로 계산하였다.

3. 통계 분석

년도별 각 분진 또는 내독소 수준 비교 및 돈사 내부와 외부 분진 수준의 차이는 Sigmalpot (version 14.0, Systat Software, San Jose, CA, USA) 통계프로그램을 이용하여 통계적 유의성을 검토하였다. 일차적으로 자료의 정규분포 여부를 검증한 뒤 정규분포를 하는 경우에는 Student's *t*-test 검정을 실시하였고, 비정규분포를 하는 경우에는 Mann-Whitney

Table 1. Description on husbandry environmental factors related with dust production in the swine confinement buildings

Factors (unit)	2012	2017	2019	P-value
Stocking density (m^2/head)	0.45±0.49	1.35±0.78	1.56±1.03	0.001*
Indoor working hours (hours/week)	33.0±19.0	46.2±21.1	38.9±22.6	
Ventilation mode				
Forced	1	19	17	
Natural	9	17	0	
Feeding style				
Ad libitium	7	36	17	
Restricted	3	0	0	

Data: mean±SD for stocking density and indoor working hours, and frequencies for ventilation mode and feeding style.
*Significantly lower at 2012 than 2017 and 2019.

Rank Sum test를 실시하였다. 사육환경 조건 중 범주형 변수에 대한 년도별 분포의 유의성은 chi-squared test로 검정하였다. p-value가 0.05 이하일 때를 유의한 차이로 판정하였다.

III. 결 과

1. 분석 대상 양돈 농장 사육환경 조건

양돈 사육환경 변수 중 돈사내 분진 및 분진중 내독소 수준에 영향을 미칠 수 있는 여러 사육환경 변수가 있는데, 2012년, 2017년, 2019년 공통적으로 정보를 얻을 수 있었던 사육밀도, 돈사내 일주간 작업시간, 환기 방식, 급이 형태에 대해 분석하였다(Table 1). 2002년은 관련 공통자료를 얻을 수 없어 제외하였다. 사육밀도는 최근 년도일수록 두당 사육면적이 넓어지고 있음을 알 수 있었는데, 2017년과 2019년의 경우 2012년에 비해 유의하게 넓은 사육밀도를 나타내었다. 일주일동안 돈사내 각종 사육환경 관리를 위한 총작업시간에 있어서는 대상 년도별로 유의한 차이는 없었다. 환기방식의 경우 무창돈사비율이 높아지면서 강제환기방식 농장이 많아짐을 알 수 있었으며 급이형태는 2017년, 2019년 대상 농장 모두 무제한 자유급이 형태를 운용하고 있었다.

2. 분진 및 내독소 수준 시계열분석

2002년 돈사내부 흡입성분진의 산술평균 및 표준편차는 0.609±0.443 mg/m^3, 호흡성분진의 평균 및 편차는 0.328±0.263 mg/m^{3}이었다(Fig. 1). 2012년 경우는 흡입성분진 평균.편차는 0.560±0.452 mg/m^3, 호흡성분진의 경우 0.520±0.388 mg/m^{3}이었으며, 2017년 경우는 흡입성분진 0.532±0.357 mg/m^3, 호흡성분진 0.143±0.130 mg/m^{3}이었다. 흡입성분진 수준은 2002, 2012, 2017년 지속적으로 감소하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 아니었다. 반면 2017년 호흡성분진 수준은 2002년에 비해 통계적으로도 유의하게 감소되었다.

분진 중 내독소 수준은 2002년 흡입성분진 중 산술평균 및 편차가 75.0±98.7 EU/m^3, 호흡성분진 중 평균 및 편차가 55.8±90.0 EU/m^{3}이었다(Fig. 1). 2012년 경우 흡입성분진 중 내독소 수준은 170.7±390.2 EU/m^3, 호흡성분진 중 내독소 수준은 1.8±3.4 EU/m^{3}이었으며, 2017년은 흡입성분진 중 수준이 722.0±477.8 EU/m^3, 호흡성분진 중 수준이 53.4±75.8 EU/m^{3}이었다. 2017년 흡입성분진 중 내독소 수준은 2002년에 비해서는 약 10배, 2012년 수준에 비해서는 약 4배 정도 유의하게 높았으며, 년차별로 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 2012년 호흡성분진 중 내독소 수준은 2002년의 약 1/31 수준, 2017년에 비해 약 1/30 수준으로 유의하게 낮았다. 그러나 2017년 호흡성분진 중 내독소 수준을 2002년과 비교하였을 때는 비슷한 수준이었다.

3. 돈사 내부와 외부 분진 수준 차이

2019년 17개 양돈농장 비육돈사 외부 환기구에서

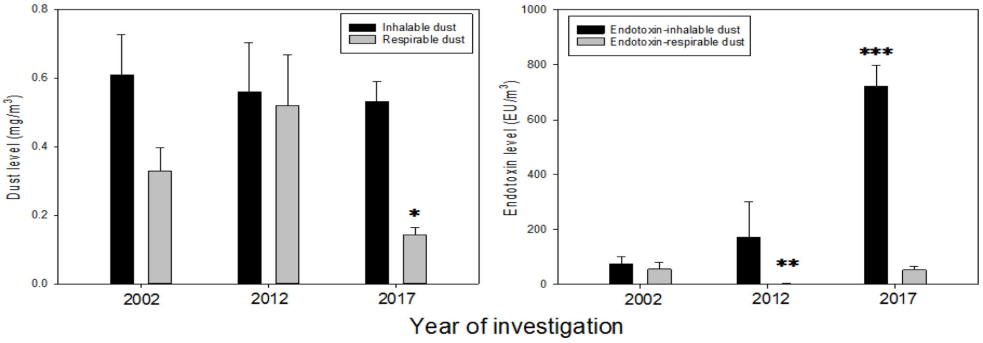

Fig. 1. Levels of airborne dust or endotoxin in the dust from indoor of swine confinement buildings at the year of 2002, 2012, and 2017. Data are expressed as mean±SE. One asterisk indicates significantly lower than the respirable dust level at 2002. Concerning on the endotoxin level, triple asterisk indicates significantly higher than the endotoxin level in inhalable dust at both 2002 and 2012, and double asterisk indicates significantly lower than the endotoxin level in respirable dust at both 2002 and 2017.

Table 2. Comparison of inhalable and respirable dusts (mean±SD) between indoor and outside of swine confinement buildings*

Dust level (mg/m^3)	Inside barn	Outside barn	%†
Inhalable dust (mg/m^3)	0.650±0.312	0.111±0.116‡	18.9±17.4
Respirable dust (mg/m^3)	0.049±0.026	0.033±0.023	73.5±48.8

†Rates(%) were calculated through dividing the outside dust level by the inside dust level followed by multiplication of 100 at each individual swine confinement building.
‡Significantly lower than the inhalable dust in inside barn.
*Levels of dust were evaluated at 17 swine farms, 2019.

Table 3. Korean regulatory standards on dust level in ambient or indoor air

	Total dust	Particulate matter<10 μm
Framework act on environmental policy (ME)*		≤100 μg/m^3
Indoor air quality control act (ME)†		≤200 μg/m^3
Threshold limit values for chemical substances and physical agents (MOEL)‡	10 mg/m^3	

*ME: Ministry of Environment. The level for 24 hour average in the air.
†The level at business facility.
‡MOEL: Ministry of Employment and Labor. The level applied to particulates not otherwise regulated.

측정된 흡입성분진 평균은 0.111 mg/m^{3}로 돈사내부 흡입성분진 평균 0.650 mg/m^{3}에 비해 약 19% 수준이었으며 통계적으로 유의하게 낮은 수준이었다(Table 2). 반면, 돈사 외부 환기구에서 측정된 호흡성분진 평균은 0.033 mg/m^{3}로 돈사 내부 평균 0.049 mg/m^{3}에 비해 약 74% 수준이었는데 통계적으로 유의한 차이는 아니었다.

4. 분진수준 관련 각종 법령 기준치와 돈사 내부 분진 수준 비교

환경정책기본법 시행령에[15] 따르면 대기중 미세먼지(PM_{10}) 기준은 24시간 평균치 100 μg/m^3 이하이고, 실내공기질 관리법 시행규칙에 의하면 업무시설의 경우 실내공기중 미세먼지 기준은 200 μg/m^3 이하이다(Table 3).[16] 고용노동부의 「화학물질 및 물리적 인자의 노출기준」에 의하면 돈사분진의 경우 적용할 수 있는 '기타 분진'의 시간가중평균노출기준(Time Weighted Average, TWA)이 10 mg/m^{3}이다.[17] 본 연구에서 측정.제시된 흡입성분진 수준이 2002, 2012, 2017, 2019년 각각 0.609, 0.560, 0.532, 0.650 mg/m^{3}으로 노동부 TWA와 비교하였을 때 약 1/17 수준으로 낮았다. 호흡성분진은 2002, 2012, 2017, 2019년 각각 0.328, 0.520, 0.143, 0.049 mg/m^{3}으로 객관적인 비교는 어렵다 하더라도 실내공기질 관리법에 따른 업무시설의 미세먼지 수준과 비교하면 2002년과 2012년에는 높았으나 2017년에는 낮았으며, 특히 2019년에는 1/4 수준이었다. 대기중 미세먼지 기준인 100 μg/m^3 이하와 비교하였을 때 2019년 돈사외부 환기구에서 호흡성분진 수준은 33 μg/m^{3}로 1/3 수준이었다.

IV. 고 찰

환경부에서 발표한 2016년 PM_{10} 미세먼지 배출량 통계에 의하면 제조업연소, 비도로이동오염원, 도로이동오염원, 생산공정, 에너지산업연소 순으로 대기중 미세먼지 배출량에 주요하게 기여하는 것으로 나타났다.[18] 농축산업시설이 포함된 비산업연소의 경우는 전체 배출량의 1.7%에 해당되는 것으로 보고되었다. 비록 타 산업 혹은 발생원에 비해 미세먼지 배출 기여도는 낮더라도 최근 축사 배출 암모니아의 $PM_{2.5}$ 초미세먼지 발생 기여 정도에 대한 연구결과가 보고되면서 축산업시설로 부터 미세먼지 또는 초미세먼지 발생에 관심이 모아지고 있다.[8] 그러나 아직까지 축산업 특히 양돈업에 있어서 돈사 내부 발생 미세먼지의 환기를 통한 배출이 돈사 주변 대기중 미세먼지 농도에 어느 정도 기여하는지에 대한 연구는 수행되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는

전체 양돈업을 대표한다고 할 수는 없지만 2개 지자체 17개 양돈농장에서 돈사 내부 흡입성분진 및 호흡성분진 수준과 환기통로 외부 배출구에서 각 분진 수준을 비교분석하였다. 본 연구의 분진 측정 지역 및 시기와 동일하고 환경부에서 공식적으로 발표된 자료가 있는 2019년 2월에서 4월까지 전남 해남과 제주의 미세먼지 농도와 비교하였을 때(전남 해남: 2월 43 μg/m^3, 3월 52 μg/m^3, 4월 34 μg/m^3, 제주: 2월 46 μg/m^3, 3월 56 μg/m^3, 4월 43 μg/m^3)[19-21], 미세먼지로 일컫는 호흡성분진의 돈사 환기 배출구 인접 외부가 33 μg/m^{3}로 해당 지역의 모든 월별 평균 농도에 비해 낮았다. 본 결과가 비록 소수의 양돈 농장을 대상으로 탐색적 연구를 수행하여 얻어진 것이지만, 돈사에서 배출되는 미세먼지가 주변 대기환경 미세먼지 수준에 유의미한 기여는 하지 않고 있음을 예측해볼 수 있다고 판단된다.

본 연구에서 제시된 년도별 비육돈사내 호흡성분진의 평균±표준편차를 (2002년: 0.33±0.26 mg/m^3, 2012년: 0.52±0.39 mg/m^3, 2017년: 0.14±0.13 mg/m^3) 비슷한 시기에 수행된 타 연구자들의 결과와 비교하였을 때 2002년 돈사 측정 결과[10] (평균 0.64±0.24 mg/m^3), 2012년 돈사 측정 결과[22] (기하평균(편차) 0.53(0.14) mg/m^3) 보다는 낮은 수준이었지만 편차를 고려하면 유의한 차이는 아니라고 판단된다. 2017년 호흡성분진 평균은 2018년 돈사 작업자 개인노출 측정 결과[12] (머리부위: 0.058±0.038 mg/m^3, 목부위: 0.065±0.046 mg/m^3, 허리부위: 0.066±0.059 mg/m^3) 보다는 높았지만 이 역시 편차를 고려하면 유의한 차이는 아니라고 판단된다. 이들 타 연구 역시 호흡성분진 발생이 과거에 비해 감소하고 있음을 보여주는 결과로 여겨진다.

분진 및 분진 중 내독소 수준을 시계열적으로 비교하였을 때 돈사내 호흡성분진 수준은 2002, 2012년에 비해 2017년 유의하게 감소되었지만 흡입성분진 수준은 년도별 유의한 차이가 없었다. 호흡성분진 중 내독소 수준은 2002년과 2017년을 비교하였을 때 비슷하였던 반면, 흡입성분진 중 내독소 수준은 지속적으로 증가하는 경향을 보였고 2017년 수준은 앞선 2개 년도에 비해 통계적으로도 유의하게 높았다. 이러한 분석 결과는 지난 20여년간 무창돈사시설 확대, 강제환기시스템 도입, 분뇨처리방법 개선 등을 위주로 양돈업 사육 환경 개선을 위해 다양한 방법이 이용되었지만[23] 돈사내부 흡입성분진 및 흡입성분진 중 내독소 수준 저감에는 효율적이지 못했음을 반영하는 것이라 여겨진다. 본 연구에서 제시된 흡입성분진, 호흡성분진 수준은 미국 The American Conference of Governmental Industrial Hygienists에서[24] 제조업 적용 TWA 기준으로 제시한 흡입성분진 <10 mg/m^3, 호흡성분진 <3 mg/m^3, 우리나라 고용노동부 기타 분진에 대한 TWA[17] <10 mg/m^3, 또는 과거 양돈 축산인 노출 한계 권장치로 제안된 적이 있는 흡입성분진 2.5 mg/m^{3}에 비해서 훨씬 낮았다.[25] 농부폐증과 같은 직업성질환 발생에 분진 노출이 중요한 요인으로 작용하지만 분진에 부착되어 호흡기로 들어오는 내독소가 면역체계 교란의 핵심적인 물질이라는 점은 주지의 사실이다.[1] 특히 항바이러스/항암성 저하와 알레르기성 증가와 같은 면역체계의 불균형을 반영하는 여러 면역지표들과 흡입성분진 중 내독소 수준이 상관성이 높다는 보고는[4,5] 2002, 2012, 2017년에 흡입성분진 수준이 유의한 차이를 보이지 않고 있는 반면, 년차별로 지속적으로 증가하고 있는 흡입성분진 중 내독소 수준을 고려한다면 양돈작업자들의 직업적 건강복지증진을 위해 심각하게 그 개선책을 강구해야할 시점이라 판단된다. 추가적으로 초미세먼지의 환경 노출을 통한 건강 위해성에 대한 연구결과를 바탕으로 농업인들에 대한 초미세먼지 노출 건강영향 역시 본격적인 연구가 필요하리라 판단된다.[26,27]

IV. 결 론

2002, 2012, 2017년에 양돈농장 비육돈사내 공기중 흡입성분진, 호흡성분진 및 각 분진 중 내독소 수준 변화추이를 분석하였고 아울러 돈사 내부 및 외부 환기구에서 각 분진 수준을 분석하여 돈사 발생 분진의 대기 중 분진 수준 기여 정도를 예측하고자 하였다. 흡입성분진 수준은 상기 3개 년도에서 유의한 차이는 없었지만 호흡성분진은 2002, 2012년에 비해 2017년에 유의하게 감소되었다. 흡입성분진 중 내독소 수준은 지속적으로 증가되는 경향을 보였는데 앞선 2개 년도에 비해 2017년에 유의하게 증가하였다. 2019년 비육돈사 외부 환기구에서 측정된 흡입성분진 수준은 돈사내부 흡입성분진 수준에 비해 약 19% 수준으로 유의하게 낮았던 반면 호흡

성분진 경우는 돈사내외부간 유의한 차이는 없었다. 해당 지역의 비슷한 시기에 측정된 대기중 PM_{10} 미세먼지 평균 농도와 비교하였을 때 돈사 배출 미세먼지가 주변 대기환경 미세먼지 수준에 유의미한 기여는 하지 않는 것으로 판단되었다. 특징적으로 돈사 사육환경의 지속적인 개선이 병행되고 있지만 돈사내 흡입성분진 중 내독소는 증가하고 있어 양돈작업자들의 건강복지증진 차원에서 체계적인 개선책이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 어젠다 연구개발사업(미세먼지의 농작업자 영향 실태조사 및 농작업 환경개선 기술개발 과제-미세먼지 노출로 인한 작업자 면역체계 영향 평가) 및 한국화학물질관리협회 화학물질 위해성 평가·관리 전문인력 양성 사업의 지원을 받아 수행되었음.

References

1. Shin SJ, Song ES, Kim JW, Lee JH, Gautam R, Kim HJ, et al. Major environmental characteristics of swine husbandry that affect exposure to dust and airborne endotoxin. *J Toxicol Environ Health A.* 2019; 82(4): 233-243.
2. Roque K, Lim GD, Jo JH, Shin KM, Song ES, Gautam R, et al. Epizootiological characteristics of viable bacteria and fungi in indoor air from porcine, chicken, or bovine husbandry confinement buildings. *J Vet Sci* 2016; 17(4): 531-538.
3. Roque K, Shin KM, Jo JH, Lim GD, Song ES, Shin SJ, et al. Association between endotoxin levels in dust from indoor swine housing environments and the immune responses of pigs. *J Vet Sci* 2018; 19(3): 331-338.
4. Kim HA, Kim JY, Shin KM, Jo JH, Roque K, Jo GH, et al. Relationship between endotoxin level of swine farm dust and cellular immunity of husbandry workers. *J. Korean Soc. Occup. Environ Hyg* 2013; 23(4): 393-401.
5. Gautam R, Heo Y, Lim GD, Song ES, Roque K, Lee JH, et al. Altered immune responses in broiler chicken husbandry workers and their association with endotoxin exposure. *Ind Health* 2018; 56: 1-10.
6. Korean Government. Comprehensive control strategy for generation of fine dust particles. Available: http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile [accessed at 11 September 2019].
7. Kim JB. Assessment and estimation of particulate matter formation potential and respiratory effects from air emission in industrial sectors and cities/regions. *J Korean Soc Environ Eng* 2017; 39(4): 220-228.
8. Hristov AN. Technical note: contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter in the United States. *J Dairy Sci* 2011; 94: 3130-3136.
9. Ohlwein S, Kappeler R, Joss MK, Kunzli N, Hoffmann B. Health effects of ultrafine particles: a systemic literature review update of epidemiological evidence. *Int J Public Health* 2019; 64: 547-559.
10. Kim KY, Lee KJ, Park JB, Kim CN. Field study of concentrations and emissions of particulate contaminants by types of swine houses in Korea. *J Prev Med Public Health* 2005; 38(2): 141-146.
11. Kwon KS, Lee IB, Hwang HS, Ha TH, Ha JS, Park SJ, et al. Measurement and analysis of dust concentration in a fattening pig house considering respiratory welfare of pig farmers. *J Korean Soc Agri Eng* 2013; 55(5): 25-35.
12. Sin SJ, Kim HC, Kim KR, Seo MT, Park SI, Kim KM, et al. A comparison of PM_{10} exposure characteristics of swine farmers by body parts using direct-reading instrument. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2019; 29(2): 159-166.
13. Park GY, Kwon KS, Lee IB, Ha TH, Kim RW, Lee MH. Analysis of dust concentration in dairy farm according to sampling location and working activities. *J Korean Soc Agri Eng* 2017; 59(3): 71-81.
14. Yoo DH, Kim HA, Heo Y, Sung JH, Lee HK, Park YG. Concentration of dusts and endotoxin in swine confinement buildings. *J Korean Soc Agri Eng* 2003; 13(1): 45-52.
15. Ministry of Environment. Framework act on environmental policy. Available: http://www.law.go.kr/act/framework act on environmental policy [accessed at 11 September 2019].
16. Ministry of Environment. Indoor air quality control act. Available: http://www.law.go.kr/act/indoor air quality control act [accessed at 11 September 2019].
17. Ministry of Employment and Labor. Threshold limit values for chemical substances and physical agents. http://www.moel.go.kr/common/downloadFile [accessed at 11 September 2019].
18. National Air Pollutants Emission Service. Emission

volume by sources. http://airemiss.nier.go.kr/mbshome/mbs/airemiss/index.do [accessed at 11 September 2019].
19. National Institute of Environmental Research. Montly report of air quality, February 2019. NIER-GP2019-043.
20. National Institute of Environmental Research. Montly report of air quality, March 2019. NIER-GP2019-050.
21. National Institute of Environmental Research. Montly report of air quality, April 2019. NIER-GP2019-051.
22. Paik JM, Kim KY. Comparison of dust exposure levels among farmers with and without feeding. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013; 23(2): 103-107.
23. National Institute of Animal Science. Sixty year history of animal science research. Rural Development Agency; 2012. p.317-372.
24. ACGIH. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents. Cincinnati; Signature Publications; 2010.
25. Reynolds SJ, Donham KJ, Whitten P, Merchant JA, Burmeister LF, Popendorf WJ. Longitudinal evaluation of dose-response relationships for environmental exposures and pulmonary function in swine production workers. *Am J Ind Med* 1996; 29: 33-40.
26. Park JH, Yang SY, Park YK, Ryu HS, Kim EC, Choe YT, et al. Exposure and risk assessment of benzene and PM_{10} for sub-populations using Monte-Carlo simulations. *J Environ Health Sci* 2019; 45(3): 247-257.
27. Kim SC. Investigation of the concentration of $PM_{2.1}$ & PM_{10} and alveolar deposition ratio. *J Environ Health Sci* 2019; 45(2): 126-133.

<저자정보>

김형아(교수), 김창열(연구교수),
Ravi Gautam(대학원생), 양수정(대학원생),
Manju Acharya(대학원생), 조지훈(대학원생),
Anju Maharjan(대학원생), 신소정(대학원생),
송은섭(대학원생), 이윤범(대학원생),
김효철(연구사), 김경란(연구관), 이경숙(연구관),
허 용(교수)