

## 일부 밀폐형 무창계사에서 발생하는 PM<sub>10</sub> 및 엔도톡신의 특성 및 연관성 분석

김효철 · 신소정 · 김경수 · 정원건\*

농촌진흥청 국립농업과학원

## Relationship and Characteristics of PM<sub>10</sub> and Endotoxin Concentrations in Windowless Poultry Houses in South Korea

Hyocheer Kim · Sojung Sin · Kyungsu Kim · Wongeon Jung\*

National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration

### ABSTRACT

**Objectives:** The aim of this study was to evaluate the concentrations and relationships of coarse particles with a diameter of 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) with endotoxins according to the time of measurement in windowless poultry houses.

**Methods:** In this study, measurement was performed on ten windowless poultry houses with a vertically integrated system from July to November. PM<sub>10</sub> was measured using personal environmental monitors and polytetrafluoroethylene (PTFE) filters with a 4 L/min-calibrated pump in selected sampling locations (two near the door and two near an exhaust fan). The endotoxin on PTFE filter was analyzed by the LAL turbidimetric method.

**Results:** The range of geometric mean concentrations of PM<sub>10</sub> and endotoxins for each of the 38 samples were 0.12–3.30 mg/m<sup>3</sup> and 11.9–3553.66 EU/m<sup>3</sup>, respectively. PM<sub>10</sub> and endotoxin concentrations varied by farm, increasing with the decrease in ventilation. The range of the coefficient of determination between PM<sub>10</sub> and endotoxin was 0.0009–0.9249. As the atmospheric temperature decreased, it was confirmed that the concentrations of PM<sub>10</sub> and endotoxin increased because the volume of ventilation was decreased.

**Conclusions:** Endotoxins were more affected by time of measurement and ventilation than PM<sub>10</sub>, which means that endotoxins could be an important indicator for intervention programs for improvement of indoor environments.

**Key words:** PM<sub>10</sub>, endotoxin, poultry house, exposure

### 1. 서 론

국내 양계 농가 수는 2019년을 기준으로 2,784호이며 이는 전국 농가 수(1,007,157호)의 약 0.27%를 차지하고 있다(Seo et al., 2020). 작물을 경작하는 농장의 경우엔 가족 자영농이라는 특성으로 농가당 작업자 수가 1~2명인데 비하여, 양계 농장의 경우는 단위면적


당 생산성을 높이기 위한 고밀도 집중 사육 형태를 갖고 있기에 농가당 피고용 농작업자가 많을 것이라 추정되고 있다(Kim et al., 2014a; Kim et al., 2014b).


축사에서 직업적 건강영향을 일으킬 수 있는 유해요인은 황화수소, 암모니아 등의 가스상 물질과 엔도톡신과 같은 생물학적 유해요인 등을 포함하는 유기 분진이 있다(HSE, 2009; Lawniczek-Walczyk et al., 2013;


\*Corresponding author: Wongeon Jung, Tel: 063-238-4172, E-mail: wongeon@korea.kr


Division of Agricultural Safety and Health, Department of Agricultural Engineering, 310 Nongsangmyeong-ro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea 54875

Received: July 30, 2021, Revised: October 20, 2021, Accepted: November 29, 2021

 Hyocheer Kim <http://orcid.org/0000-0002-8223-0859>

 Kyungsu Kim <http://orcid.org/0000-0001-8585-0773>

 Sojung Sin <http://orcid.org/0000-0001-5193-3167>

 Wongeon Jung <http://orcid.org/0000-0003-0570-2485>

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

Liu et al., 2014; Basinas et al., 2017). 유기 분진은 닭의 분변, 깃털, 사료가루에서 주로 발생하며, 암모니아 등으로부터 변환되는 2차 생성물로서 발생하기도 한다(Kim & Kim, 2003). 유기 분진은 농작업자의 호흡기에 급성적으로 독성, 자극, 알레르기 등을 일으킬 수 있으며, 만성적으로는 폐쇄성 폐질환, 천식, 만성 기관지염, 암 등을 발생시킬 수 있다(Lacey & Dutkiewicz, 1994). 특히 양계 농장에서 일하는 사람들은 소나 돼지 농장에서 일하는 사람들에 비해 유기 분진의 노출 위험 수준이 높다고 보고되고 있다(Herron et al., 2015). Donham et al.(2000)은 5년 이상의 직업적 노출을 가진 양계 농장 작업자들 사이에서 만성 호흡기 증상, 폐기능 저하, 비염 또는 습진 등의 증상을 확인하였다. Faria et al.(2006)은 양계사 내 분진의 노출량에 비해 하여 직업성 천식과 만성 호흡기계 질환의 유병률이 높아지는 것을 보고하였다. Just et al.(2009)는 양계장에서 발생하는 다양한 형태의 유기 분진 중에서 호흡기계 건강영향을 일으키는 특별한 물질로서 엔도톡신을 지목하였다.

근래 들어 재래식 계사는 줄어드는 반면에 생산 효율과 자동화를 고려한 강제 터널 환기식의 무창계사가 늘어나고 있다(Woo & Kim, 2015). 이에 따라 농업인의 노출 위험성이 증가되고 있으나, 이를 예방하거나 관리하기 위한 대책이 부족하여 보완이 필요한 실정이다. 무창계사는 설치된 환기구 이외에 외부로부터 공기나 열이 계사 안으로 들어오지 못하도록 천정이나 벽에 단열재를 이용하여 완전히 밀폐 시킨 형태로 지어져 있기에 내부에서 발생하는 미세먼지 등의 물질에 노출될 위험이 크다. 여기에 더해 국내 양계 시설에 대한 분진 모니터링 연구는 수적으로도 매우 부족한 실정이다(Kwon et al., 2014).

기존 축산의 환경에 관한 연구들은 총분진(total suspended particulate) 또는 흡입성 분진(inhalable dust)을 초점으로 연구를 수행한 경우가 일부 있으나(Basinas et al., 2012; Viegas et al., 2013; Gautam et al., 2018), 일반 대중이나 노지 농작업자들의 미세먼지 노출과 비교할 수 있는 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>10</sub>에 포함된 엔도톡신의 노출 평가를 수행한 경우는 국내외 관련 연구를 확인해볼 때 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 H사와 생산 계약을 맺어서 환기율, 바닥재 등의 사육환경이 유사하게 운영되는 일부 계사들을 대상으로 사내 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 노출평가를 수행하여 농도 특성을

살펴보고, 측정 시기에 따른 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신간의 농도 변화 특성과 상호 연관성을 분석하고자 하였다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 연구 대상

기존에는 양계농장에서 자체적으로 작업 일정을 수립하고 사료 등의 농자재 선정을 하였으나, 2000년대 이후로는 특정 회사가 수직계열화된 방법을 통해 입하, 사료, 시설, 환기 설비의 유지 및 관리까지의 전반에 걸친 부분을 담당하는 수행 방식이 많이 활용되고 있다(Woo & Kim, 2015). 본 연구에서는 바닥재, 사료, 환기설비 등의 시설 및 작업환경 차이로 인한 측정 결과의 변동을 최소화하기 위해 H사에서 수직계열로 계약, 관리하고 있는 전라도 지역의 10개 농장을 연구 대상으로 선정하였다. 계사의 구조 및 환기 방식은 대부분 유사하므로 하나의 농가를 대표적인 예시로 한 전반적인 도면은 Figure 1과 같다.

측정을 수행한 계사 10곳의 면적은 최소 456 m<sup>2</sup>부터 최대 2200 m<sup>2</sup>이었다. 계사 10곳의 구조는 대부분 동일하였는데, 주로 터널 환기를 위하여 터널 배기팬이 출입구 반대쪽 벽에 설치되어 있고 양측 벽에는 플레이트 모양의 입기구가 설치되어 있는 형태였다. 그러나 계

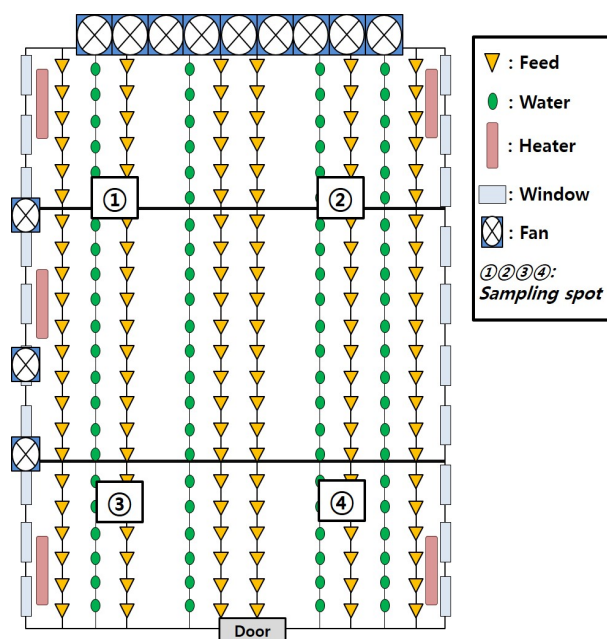


Figure 1. Layout and sampling spots of a windowless poultry house

**Table 1.** Characteristics of the windowless poultry houses

Farm ID	Time of measurement	Number of samples		Temperature (°C)	Humidity (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Age (days)
		PM <sub>10</sub>	Endotoxin				
1	Mid-July	4	4	N.A.	N.A.	992	22
2	Late-July	4	4	28.2	N.A.	816	26
3	Late-July	4	4	32.4	N.A.	1248	30
4	Early-August	3	3	31.2	68.8	2200	25
5	Early-September	4	4	26.0	85.0	456	26
6	Late-September	4	4	23.9	54.9	495	26
7	Early-October	4	4	28.0	77.8	990	22
8	Late-October	4	4	25.8	46.8	1200	22
9	Early-November	4	4	24.9	50.2	1320	29
10	Mid-November	3	3	26.8	64.4	231	23
Total*		38	38	27.5 ± 2.82	64.0 ± 14.3	994.8 ± 559.8	25.1 ± 2.8

Abbreviation: N.A., not available

\*Arithmetic mean ± standard deviation

사별로 환기방식의 차이가 있었는데 측장, 창문, 팬의 방식을 모두 갖춘 곳이 있는 반면, 측장과 창문이 없는 곳도 있었다. 또한, 모든 계사는 계사 내에서 발생하는 분진을 저감시키기 위해 환기팬을 설치 및 가동하였다. 측정 시 내부 온·습도 조건을 강제로 일정하게 유지하는 환기 시스템으로 인하여 평균 온도는 23.9~32.4℃, 평균 상대습도는 50.2~85.0% 사이의 범위로 나타났다. 온·습도의 측정이 이루어지지 않은 계사들(농장 ID 1~3)도 이러한 환기 시스템의 온·습도 장치에 의해 유지되고 있을 것으로 판단된다. 측정을 했던 시기와 온·습도 및 관련 기타 특성은 Table 1과 같다.

연구의 기간은 2019년 7월부터 11월까지 월평균 1~3회로 수행하였으며, 본 연구에서는 닭의 움직임이 가장 활발해 지는 시기인 출하 시기 직전에 분진 노출 수준이 가장 높을 것으로 예상하여 닭의 일령을 22~30 일령 사이로 고려해 수행하였다.

## 2. 측정 및 분석 방법

계사 내부에서 발생하는 PM<sub>10</sub>을 측정하기 위해 직경 10 μm 이하의 미세먼지를 포집할 수 있는 PEM (personal environmental monitor, SKC Inc., USA)에 PTFE 막여과지(polytetrafluoroethylene filter, diameter 37 mm, pore size 2.0 μm, SKC Inc., USA)를 사용하였다. 이후 Tygon tube를 통해 개인시료채취용 펌프(GilAir plus, Gillian Inc., USA)에 연결하여 4 L/min의 유량으로 계사 내 공기를 포집하였다

(Figure 2). 측정에 사용된 개인시료채취용 펌프는 측정 전과 후에 유량 보정기(DryCal Defender 520, Mesa Laboratories Inc., USA)로 각각 5회씩 반복하여 유량을 보정하였다(EPA, 2007). 엔도톡신의 측정은 PM<sub>10</sub> 측정과 동일한 방법으로 포집하였으며, 측정 전 분석을 위해 멸균 처리를 하였다. 측정 후에는 실험실까지 냉동 상태로 운반하였으며, 시료들은 -20℃ 냉동고에 보관하였다.

**Figure 2.** Sampling of PM<sub>10</sub> and endotoxin in a windowless poultry house

모든 측정의 위치는 무창계사 내에서 입구 방향 2곳과 배기팬 방향 2곳을 선정하여 총 4곳에서 진행되었다. 또한, 작업자들의 호흡기 위치를 고려해 바닥으로부터 약 1.5 m 높이에서 진행하였다. 측정 시간은 작업을 시작하는 오전 10시부터 약 6시간 동안 진행하였으며, 모든 측정 동안 온도와 습도에 관한 정보는 온습도 측정 장비(HOBO U23-001, Onset Inc., USA)를 통해 수집하였다.

포집한 PM<sub>10</sub>의 질량 농도를 확인하기 위해 온도와 습도 수준이 각각 27℃, 26%로 일정하게 유지되는 데시게이터에 24시간 보관한 후, 미세저울(Explorer, OHAUS corp., USA)을 이용하여 측정 전과 후의 필터 무게 차이를 중량 분석하여 최종적으로 공시료의 무게를 고려해 질량 농도를 계산하였다. 엔도톡신은 카이네틱 비탁법(kinetic-turbidimetric method)을 이용하여 분석하였다. 0.05% tween 20이 함유된 pyrogen free LAL water에 필터를 넣고 1시간 동안 교반시킨 후 원심분리하여 상층액을 채취하였다. 이 상층액을 96 well micorplate에 넣고 37℃에서 배양(incubating)하였으며, Pyrogen-5000 LAL Reagent를 첨가하여 교반시킨 후, LAL Reader를 이용하여 340 nm에서의 흡광도를 측정하였다(Park, 2014; ASTM, 2016).

수집된 자료는 대수정규분포 특성을 확인하고, 기하평균과 기하표준편차를 계산하였다. 또한, PM<sub>10</sub>과 엔도톡신간의 특성 차이를 확인하기 위해 ANOVA 및 회귀분석을 수행하였다. 모든 결과의 처리는 SPSS package (version 18.0, SPSS Inc., USA)를 이용하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 각 농장별 PM<sub>10</sub> 및 엔도톡신의 농도 특성

농장별로 측정한 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 노출 분석량은 Table 2와 같다. 전반적으로 시기와 관계없이 PM<sub>10</sub>의 경우 최소 0.04 mg/m<sup>3</sup>에서 최대 3.52 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 엔도톡신의 경우는 8.50~5814 EU/m<sup>3</sup>으로 확인되었다. PM<sub>10</sub>에서 기하평균 0.12 mg/m<sup>3</sup>로 최솟값을 보인 농장은 8월 초순에 측정한 4번 농장이었으며, 최댓값이 나타난 농장은 가장 늦은 시기인 11월 중순에 측정한 10번 농장으로 기하평균 3.30 mg/m<sup>3</sup>이었다.

엔도톡신 노출에서의 최솟값은 7월 하순에 측정한 3

번 농장이었으며 기하평균 11.90 EU/m<sup>3</sup>수준이었다. 최댓값이 확인된 농장은 10월 하순에 측정한 8번 농장으로 기하평균 3553.66 EU/m<sup>3</sup>이었다. 엔도톡신의 노출 농도를 PM<sub>10</sub>의 노출 농도로 나눈 비의 최솟값은 3번 농장(7월 하순)의 62.3이었으며, 최댓값은 가장 높은 농도의 엔도톡신이 발생한 것으로 확인된 8번 농장(10월 하순)의 2354.3이었다(Table 2).

#### 2. 농장간의 PM<sub>10</sub>, 엔도톡신 농도 차이

7월 중순과 하순에는 기하평균이 각각 1.12 mg/m<sup>3</sup>, 0.58 mg/m<sup>3</sup>이었으나 8월에 0.10 mg/m<sup>3</sup>으로 감소하여 11월 중순 3.30 mg/m<sup>3</sup>까지 농도가 증가하는 경향을 보였다. 엔도톡신도 마찬가지로 7월 하순경에 11.90 mg/m<sup>3</sup>로 감소하였으나, 10월 말과 11월 중순에서는 높아진 농도를 보였다.

농장별 PM<sub>10</sub>, 엔도톡신은 대수정규분포를 하는 것으로 확인되었으며( $p>0.05$ ) 농장간에 대한 노출량 차이를 ANOVA 분석한 결과, 측정 시기(농장간)에 따라 유의한 차이가 발생하는 것으로 확인되었다( $p<0.01$ ). Duncan 사후 분석 결과, PM<sub>10</sub> 및 엔도톡신 노출에 있어 농장간 차이의 유형을 확인한 결과는 Table 3, 4와 같다. PM<sub>10</sub>의 경우 1번 농장을 제외하고 동절기 가까운 시기에 측정된 7~10번 농장에서 PM<sub>10</sub>이 타 농장보다 유의하게 높은 것으로 확인되었다. 하절기에 측정한 3, 4번 농장과 2, 6번 농장간에도 차이를 확인할 수 있었다. 엔도톡신도 PM<sub>10</sub>과 유사하게 1번 농장을 제외하고 동절기 가까이에 측정한 6~10번 농장에서 엔도톡신 농도가 하절기 가까이에 측정한 2~5번 농장보다 상대적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

#### 3. 농장내 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 상관관계

본 연구에서는 PM<sub>10</sub>의 측정을 한 후 개별 PM<sub>10</sub> 시료에 포함된 엔도톡신을 분석하였다. 농장 내 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신을 각각 독립변수, 종속변수로 상정하여 회귀분석한 결과는 Figure 3과 같다. 가장 결정계수가 낮은 농장은 7번 농장으로 R<sup>2</sup>값은 0.0009이었으며, PM<sub>10</sub> 농도의 변화에 따라 엔도톡신 농도는 영향을 받지 않는 것으로 확인된다( $p=0.9032$ ). 반면 가장 결정계수가 높은 농장은 6번 농장이었으며 R<sup>2</sup>값은 0.9249이고 이는 PM<sub>10</sub>의 농도가 변화함에 따라 엔도톡신의 농도도 함께 영향을 받는 경향을 볼 수 있으며 통계적으로도 유의한

**Table 2.** PM<sub>10</sub> and endotoxin concentrations in windowless poultry houses by time of measurement

Farm ID	Time of measurement	Sampling location	PM <sub>10</sub> concentration (mg/m <sup>3</sup> )			Endotoxin concentration (EU/m <sup>3</sup> )			Ratio <sup>a</sup>	Average <sup>b</sup>
			samples	n	GM(GSD)	samples	n	GM(GSD)		
1	Mid-July	NEF	1.436	4	1.12(1.22)	141.03	4	91.75(1.39)	98.2	83.09
			1.173			96.91			82.6	
		NE	0.915			78.01			85.3	
			1.003			66.47			66.3	
2	Late-July	NEF	1.166	4	0.58(1.76)	219.30	4	86.52(2.76)	188.0	172.3
			0.594			189.89			319.6	
		NE	0.557			47.75			85.8	
			0.294			28.18			95.9	
3	Late-July	NEF	0.199	4	0.20(1.03)	8.50	4	11.90(1.41)	42.7	62.3
			0.196			18.43			93.9	
		NE	0.208			9.87			47.5	
			0.199			12.99			65.3	
4	Early-August	NEF	0.239	3	0.12(2.59)	103.35	3	65.35(1.50)	433.1	681.1
			0.190			48.17			253.8	
		NE	0.041			56.06			1356.5	
5	Early-September	NEF	0.280	4	0.35(1.25)	40.81	4	52.09(1.20)	145.5	159.4
			0.302			52.43			173.3	
		NE	0.390			53.67			137.8	
			0.453			64.10			141.3	
6	Late-September	NEF	0.912	4	0.62(1.66)	1104.51	4	866.03(1.63)	1211.6	1409.9
			1.002			1530.04			1527.2	
		NE	0.407			620.29			1524.0	
			0.390			536.62			1376.9	
7	Early-October	NEF	1.261	4	1.19(1.20)	1426.59	4	1023.24(1.50)	1131.4	1055.1
			1.338			1309.52			978.8	
		NE	1.305			582.67			446.5	
			0.907			1007.09			1109.9	
8	Late-October	NEF	1.986	4	1.91(1.08)	5814.45	4	3553.66(1.44)	2928.4	2354.3
			2.098			3734.01			1780.2	
		NE	1.808			2858.09			1580.6	
			1.784			2570.06			1440.9	
9	Early-November	NEF	1.433	4	1.35(1.07)	399.44	4	539.50(2.08)	278.7	523.3
			1.441			356.93			247.7	
		NE	1.273			367.16			288.4	
			1.266			1618.33			1278.3	
10	Mid-November	NEF	3.249	3	3.30(1.06)	1710.40	3	1526.93(1.10)	526.4	466.0
		NE	3.129			1452.43			464.2	
			3.518			1433.06			407.4	

Abbreviation: AM, arithmetic mean; SD, standard deviation; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; NEF, near exhaust fan; NE, near entrance

<sup>a</sup> Ratio of endotoxin to PM<sub>10</sub>

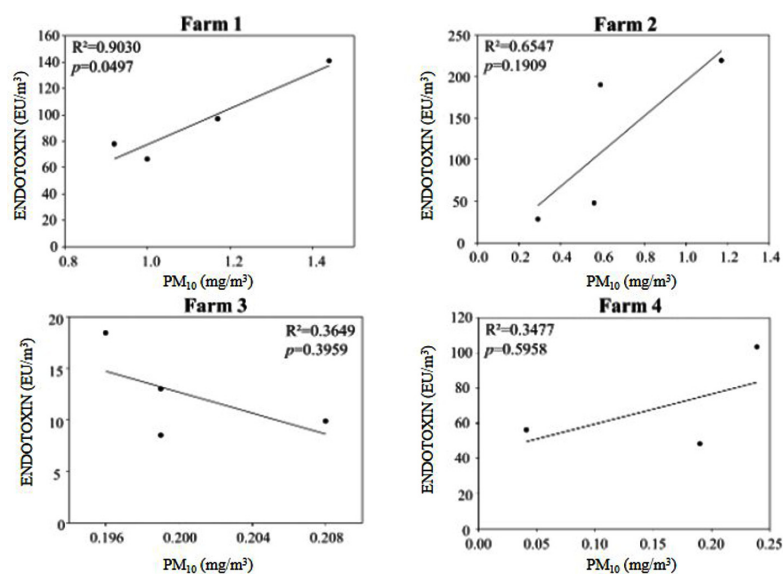
<sup>b</sup> Average on ratio of endotoxin to PM<sub>10</sub>

**Table 3.** Results of Duncan tests for post-hoc with ANOVA analysis ( $PM_{10}$ ,  $mg/m^3$ )

Farm ID	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
4	.16				
3	.20				
5	.36	.36			
2		.65			
6		.68			
1			1.13		
7			1.32		
9			1.35		
8				1.96	
10					3.30
p-value	.276	.083	.228	1.000	1.000

**Table 4.** Results of Duncan tests for post-hoc with ANOVA analysis (endotoxin,  $EU/m^3$ )

Farm ID	Group 1	Group 2	Group 3
3	12.45		
5	52.75		
4	69.19		
2	121.28		
1	648.10	648.10	
9	685.47	685.47	
6	947.87	947.87	
7	1081.47	1081.47	
10		1531.96	
8			4039.51
p-value	.083	.136	1.000

**Figure 3.** Results of regression analysis between  $PM_{10}$  and endotoxin in the windowless poultry houses

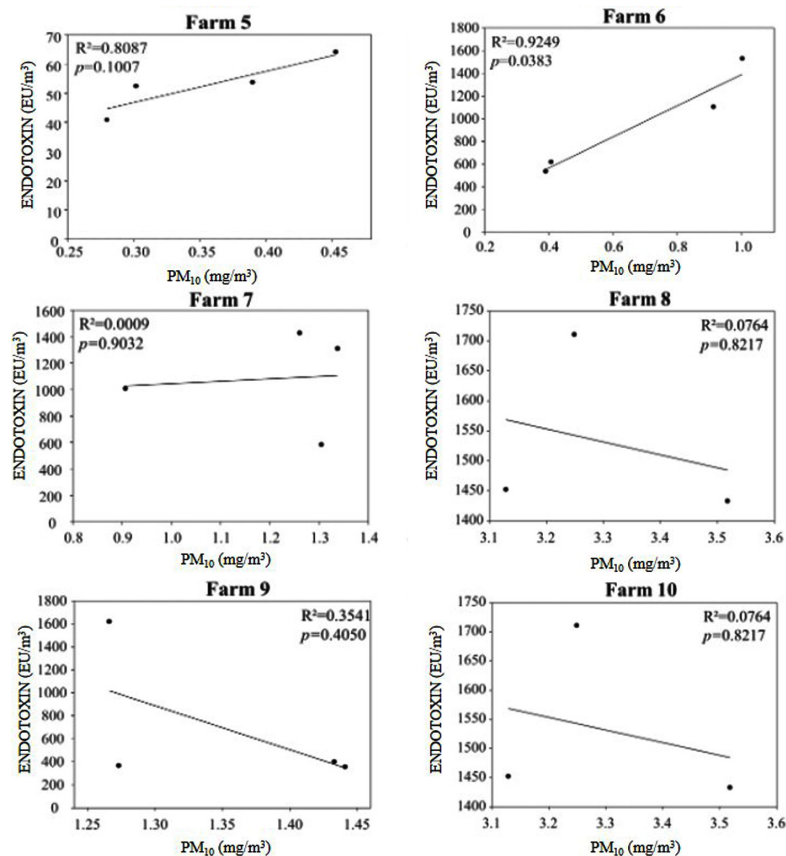


Figure 3. Continued

것으로 확인되었다( $p=0.0383$ ). 전체적인 결과를 살펴볼 때 하절기에 가까운 시기에 농장들이 결정계수가 높아 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신간에 관계를 확인할 수 있는 반면, 동절기에 측정된 농장의 경우 결정계수가 낮아 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 농도에 경향이 없는 것을 보여주었다.

#### IV. 고 찰

본 연구에서는 수직계열화 특성으로 사육 환경이 유사한 10곳의 무창계사를 대상으로 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 농도 특성을 확인하고, 계사간 또는 측정 시간간의 농도에 대해 상관성을 분석하고자 하였다. 계사별 PM<sub>10</sub>의 평균 노출 수준은 기하평균 0.12~3.30 mg/m³으로 나타났다며 엔도톡신의 경우 기하평균 11.90~3553.66 EU/m³으로 확인하였다. 또한, 대체적으로 동절기로 가면서 외부 온도의 감소로 인해 환기율이 줄어드는 경우 PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 농도가 높아지는 경향이 있었다.

국외의 Just et al.(2009) 보고에 따르면 양계시설에

서의 분진 농도가 흡입성 분진 기준으로 0.02~81.33 mg/m³, 호흡성 분진은 0.01~6.5 mg/m³ 수준으로 확인하였다. Basinas et al.(2012)는 계사 내 흡입성 분진의 노출농도로 0.7~18.3 mg/m³라고 언급하였다. Skóra et al.(2016)는 계사에서 총분진 평균 농도가 1.44 mg/m³이었으며, 총분진의 상당량이 PM<sub>10</sub>이었다고 보고하기도 하였다. 국내의 경우는 Shin et al.(2004)이 축사 내 총분진 노출농도를 측정한 결과, 기하평균 4.0 mg/m³으로 보고하였으며, Kim et al.(2014)은 입식 및 출하 작업 시 총분진 농도가 각각 0.07~4.91 mg/m³, 4.37~9.46 mg/m³인 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 입식되어 사육되고 있는 계사에서 각 계사별로 평균 0.16~3.30 mg/m³의 PM<sub>10</sub>에 노출된 것으로 확인하였으며, Viegas et al.(2013)가 7개 양계 농장에서 PM<sub>10</sub>을 측정한 결과인 1.4~15.2 mg/m³의 노출 수준 보다는 낮은 수준의 PM<sub>10</sub>에 노출되는 것으로 확인하였다. 또한, 일령 단위로 PM<sub>10</sub>을 측정하는 Zhang et al.(2019)의 연구를 살펴보면, 3~4월 사이에

20~22일령 사이의 계사에서 측정된  $PM_{10}$  농도가 평균  $0.271 \text{ mg/m}^3$ 이었으며, 38~40일령 사이에 측정된  $PM_{10}$  역시 본 연구의 하절기 농도와 유사한  $0.358 \text{ mg/m}^3$ 이었다.

Radon et al.(2001)은 양계장에서 일하는 농업인이 총분진에 포함된 엔도톡신을 분석한 결과, 중위값으로  $257.6 \text{ EU/m}^3$  ( $19.0 \sim 1634.8 \text{ EU/m}^3$ )수준에 노출되는 것으로 보고하였다. Ngajilo(2014)는 양계장에서의 엔도톡신 노출농도로 연구들에 따라 검출기준 이하부터 최대  $83,640 \text{ EU/m}^3$  (총분진),  $7.1 \sim 704 \text{ EU/m}^3$  (호흡성 분진),  $1,000 \sim 8,600 \text{ EU/m}^3$  (비호흡성 분진)의 수준으로 보고되었다고 언급하였다. Lawniczek-Walczyk et al.(2013)에 따르면 엔도톡신의 차이는 닭의 수와 환기시스템, 분변의 특성에 따라 달라지며,  $PM_{10}$ 에서의 엔도톡신 농도가 닭의 일령이 늘어남에 따라 같이 증가한다고 하였다. Basinas et al.(2012)는 양계농장에서의 21일령에 개인 시료 측정을 하였을 때 흡입성 분진의 평균은  $5.0 \text{ mg/m}^3$ , 엔도톡신은  $1870 \text{ EU/m}^3$ 으로 보고 하였다.

본 연구에서는 일령이 20~30일령대로 일정하게 유지되는 유사환경에서 측정시기에 따라 엔도톡신의 노출 농도와  $PM_{10}$ 에 대한 엔도톡신의 비의 변화를 확인하였다(Table 2). 엔도톡신의 농도는 대체로 동절기로 갈수록 높아지면서 농장간 최대  $4762 \text{ EU/m}^3$  차이가 확인되어 Basinas et al.(2012)의 연구에 비해 높은 엔도톡신 농도를 보여주었다.  $PM_{10}$ 에 대한 엔도톡신의 비는 7월경에는 최대 172.3에서 10월경 2354.3까지 상승하였다. 본 연구에서는 H사에 의한 수직계열 관리로 환기시스템, 닭의 수, 분변 등이 유사하게 유지되고 있는 계사에서 측정이 이루어졌음을 고려할 때 외부 온도 저하에 따른 환기의 강도(시간당 환기량) 감소는  $PM_{10}$ 에 비해 엔도톡신 농도에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이러한 특성이 발현된 원인으로는 환기량이 많은 여름철 엔도톡신의 농도는 낮은 수준이었지만, 환기량이 적어지는 겨울철에서는 분진의 체류 기간이 길어지면서 계사환경 내 미생물의 증식이 상대적으로 더 늘어나게 되고 이로 인하여 엔도톡신은 환기가 안됨에 따라  $PM_{10}$ 에 비해 늘어나는 양이 더 많아졌을 것으로 사료된다.

측정 시기별로 살펴 볼 때, 과거 Lawniczek-Walczyk et al.(2013)의 연구에서는 분진과 엔도톡신의 상관관계(R)가 여름철 0.86, 겨울철 0.88으로 유사하게 나타

났다고 보고하였다. 이와는 반대로 본 연구에서는 7~9월의 경우 회귀분석 후 결정계수( $R^2$ )가  $0.3477 \sim 0.9249$ 로 확인되다가 환기량이 본격적으로 감소하는 시기인 10월경부터  $0.0009 \sim 0.3581$ 로 급격하게 낮아지는 것으로 확인되었다. 바람의 방향과 포집 방향은 미세먼지 포집 결과에 큰 영향을 줄 수 있다. 계사 내 부유하는 미세먼지 중 입경이 크고 무거운 경우 중력의 영향을 받아 하강을 하거나 환기에 따른 기류의 영향을 크게 받지만, 입경이 작고 가벼운 입자는 공기중에 부유하거나 기류와 더불어 계사 내에서의 난기류 흐름을 따라 이동하게 된다. 관련 연구인 Seo et al.(2020)에서는 계사 내 위치별 미세먼지 농도가 입기구에서 배기구로 갈수록 평균적으로 총분진은 22.3%,  $PM_{10}$ 은 9%,  $PM_{2.5}$ 는 56% 증가 하였고, 높은 증가율을 보이는  $PM_{2.5}$ 의 경우 입경이 작고 가벼워 난기류의 영향을 많이 받아 배기구 방향으로 집적된 것으로 판단된다고 하였다. Just et al.(2009)은 분진의 입경이 작을수록 엔도톡신의 함유량이 높아진다고 주장하였다. 본 연구에서도 측정 결과 입구 근처에서 엔도톡신이 높아지는 경향을 감안할 때 입경 크기가 큰 분진보다는  $PM_{2.5}$ 와 같이 입경이 작은 입자에 엔도톡신이 많이 포함되었을 것으로 생각된다. 이러한 특성을 감안할 때 환기율이 떨어지는 동절기에 배기구 근처에서 작업을 할 때에는 농작업자는 호흡기 보호에 특별히 더 신경을 써야 할 것이다.

본 연구에서는 H사에서 일괄로 닭의 밀도, 바닥재, 일령, 환기 특성을 관리하고 있기에 각각 다른 농장에서 측정을 하였을지라도 사육 특성이 유사하다고 볼 수 있으며, 이에 육계사간의 측정시기 및 환기량의 차이에 따른  $PM_{10}$  및 엔도톡신의 농도변화를 보다 정확하게 확인할 수 있었다고 판단된다. Kwon et al.(2014)은 분진 등의 공기중 오염물질의 농도는 하절기가 동절기에 비해 상대적으로 낮은 수준을 보이는 것으로 측정하였으며 이에 대한 원인으로 계사 내 적정 열환경 유지를 위하여 동절기의 환기를 최소화함에 따라 시설 내부의 공기질 개선 효과가 떨어지기 때문으로 판단하였다. 본 연구에서도 온도가 낮아질수록  $PM_{10}$ 의 농도가 높아지는 특성을 확인하였으나, 앞서 기술한 연구 결과들처럼 농도 범위가 매우 크지 않고 농장간(측정 시기간) 최대  $3.1 \text{ mg/m}^3$  내외의 차이만이 확인되었으며(Table 2), 이러한 특성이 발현된 원인으로는 최소한의 환기 변화만으로 계사내부의 공기질을 일정하게 유지할 수 있는

계사내 분변처리 및 환기기술의 발전 때문인 것으로 사료된다.

축산업에서 발생하는 유기 분진은 입자 크기가 작을수록 단위 부피당 표면적이 넓어지는 특성이 있고, 이로 인하여 호흡기에 건강영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kirychuk et al., 2006). 양계사에서 발생하는 암모니아와 유기 분진에 동시 노출될 경우에는 작업 종료 후 강제호기량이 43% 감소하고, 동시 노출로 인한 호흡기계 영향은 전체 호흡기계 영향 중 35~61%를 차지하는 것으로 보고되고 있다(Donham et al., 2002). 양계장 내에서의 분진은 분변, 사료, 닭의 깃털, 계사 내 암모니아로 인한 2차 생성물 등에 영향을 받으며, 이러한 분진은 미생물의 부산물인 엔도톡신을 포함하면서 작업자의 건강에 영향을 미칠 수 있기에 농업인에게서 만성 가래를 일으키는 유의한 지표로 알려져 있다(Kirychuk et al., 2006). Radon et al.(2001)은 돼지 사육 농업인보다 양계 농업인에게서 폐기능이 약화되고, 특히 환기와 사료 급여가 폐기능 약화와 통계적으로 연관되어 있음을 확인하였다. Faria et al.(2006)은 양계 농업인이 타 작목 농업인에 비하여 만성 호흡기계 질환의 유병율(OR=1.60, 95% CI: 1.05~2.42)이 유의하게 높다고 보고하였다. Donham et al.(1995)은 양계 작업장에서 분진 노출과 건강영향간의 양-반응 연관성 분석결과를 토대로 분진 기준을 총분진(2.4 mg/m<sup>3</sup>), 호흡성 분진(0.16 mg/m<sup>3</sup>), 엔도톡신(614 EU/m<sup>3</sup>)으로 권고하였다. 네덜란드에서는 양계장에서 엔도톡신 공기중 농도를 50 EU/m<sup>3</sup>으로 설정하여 직업적 노출 기준으로서 제시하고 있다(Spaan et al., 2006).

본 연구는 뚜렷한 한계점을 가지고 있다. 특히 단일 양계사 내 시료 수가 3~4개로 매우 적었다. 양계장은 일반적으로 조류독감 등에 대비한 방역 절차로 인하여 접근이 매우 어려우며, 측정 대상 계사를 섭외 하였을지라도 계사 내에 측정기기를 설치하기 위한 체류 시간이 방역을 위해 제한되는 상황이 많았다. 따라서 측정장비 설치 시간을 고려할 때 1회 측정 시에 설치할 수 있는 장비의 수가 한정되어 있었고, 이에 시료 수를 확보하는 것에 제한점이 있었다. 향후에는 가축전염병 예방수칙을 철저히 지키면서 기존 산업보건체계에서 수행되고 있는 작업환경 측정제도 등을 활용한 정기적인 측정을 기반으로 하는 연구가 수행될 필요가 있다.

기존 축사에서는 온도, 습도, 분진, 암모니아 등을 평가하여 축사의 환경관리 연구 및 환경개선사업을 수행

을 한다. 이중 분진은 최근 연구에서 동물복지, 농업인의 건강/안전에 대한 다양한 연구에서 주요한 지표로서 활용되고 있다(Kim et al., 2014a; Kwon et al., 2014). 또한, 축산업을 하는 농업인이 실제로 겪게 되는 건강영향은 엔도톡신이 포함된 유기 분진으로 인한 ODS, 직업성 천식, 과민성 폐렴 등이 있다(Guillam et al., 2013). 이러한 건강영향은 단순히 분진 노출만으로 발생 되는 것이 아닌 엔도톡신의 노출농도에 따라 증상의 수준이 달라지게 된다.

본 연구에서는 기존의 재래식 계사에 비해 환경관리 기술이 발전된 형태인 터널환기형 계사의 경우 환기율 변화에 따른 PM<sub>10</sub>의 농도의 변화의 폭이 평균 최소값의 최대 21배 높은데 반해, 엔도톡신은 최대 383배까지 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 닭의 생산성 뿐만 아니라 농업인의 건강영향을 확인하기 위해서 PM<sub>10</sub> 등의 단순 분진 연구뿐만 아니라 엔도톡신, 박테리아와 같은 유기 분진 관련 연구를 진행하여 양계농장의 작업환경을 개선을 위한 비교분석 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구에서는 사육 조건이 상당부분 유사하게 유지되는 계사에서 계사간(측정 시기) PM<sub>10</sub> 및 엔도톡신의 노출 특성을 측정, 비교하였다.

1. 계사별 PM<sub>10</sub>의 평균 노출량은 기하평균 0.16~3.30 mg/m<sup>3</sup>이었다. 엔도톡신 노출의 평균 노출량은 기하평균 12.45 EU/m<sup>3</sup>~4774.23 EU/m<sup>3</sup>이었다. PM<sub>10</sub>과 엔도톡신 모두 외부 온도가 낮아져 환기율이 감소할수록 농도가 유의하게 높아지는 특성을 보여주었다.

2. PM<sub>10</sub>과 엔도톡신의 상관관계는 회귀분석을 통한 결정계수가 0.0009~0.9249이었으며, 대체적으로 동절기로 가면서 환기 횟수가 감소할수록 결정계수가 낮아지는 추세를 보였다. 이는 엔도톡신이 환기량의 감소에 더 많은 영향을 받고 있으며, 기존 문헌에서 PM<sub>2.5</sub>와 같은 입자크기가 작은 미세먼지들이 난기류로 인하여 계사 내 체류시간이 늘어난다고 보고하였음을 고려할 때 엔도톡신은 PM<sub>10</sub>보다는 상대적으로 입경이 작은 미세먼지에서 발생되고 있음을 추측할 수 있다.

3. 터널환기형 계사에서 PM<sub>10</sub>의 농도 변화의 폭이 평균 최소값 대비 최대 21배 정도였는데 반해서, 엔도톡신은 최대 383배까지 변동됨을 확인할 수 있었다. 따

라서 농업인의 건강영향을 확인하고 개선하기 위하여는 향후 단순 분진 노출을 예방하는 것부터 엔도톡신, 박테리아의 농도 평가 및 환기 특성을 비교하는 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01426901)의 지원에 의해 이루어진 것임

## References

- American Society for Testing and Materials(ASTM). Standard practice for personal sampling and analysis of endotoxin in metal removal fluid aerosols in workplace atmosphere(E2144-11). 2016
- Basinas I, Cronin G, Hogan V, Sigsgaard T, Hayes J et al. Exposure to inhalable dust, endotoxin, and total volatile organic carbons on dairy farms using manual and automated feeding systems. *Ann Work Exp Health* 2017;61(3):344-355 (<http://doi.org/10.1093/annweh/wxx023>)
- Basinas I, Sigsgaard T, Heederik D, Takai H, Omland Ø et al. Exposure to inhalable dust and endotoxin among Danish livestock farmers: results from the SUS cohort study. *J Environ Monit* 2012;14(2): 604-614 (<https://doi.org/10.1039/c1em10576k>)
- Donham KJ, Cumro D, Reynolds SJ, Merchant JA. Dose-response relationships between occupational aerosol exposures and cross-shift declines of lung function in poultry workers: recommendations for exposure limits. *J Occup Environ Med* 2000;42(3): 260-269 (<https://doi.org/10.1097/00043764-200003000-00006>)
- Donham KJ, Cumro D, Reynolds S. Synergistic effects of dust and ammonia on the occupational health effects of poultry production workers. *J Agromedicine* 2002;8(2):57-76 ([https://doi.org/10.1300/j096v08n02\\_09](https://doi.org/10.1300/j096v08n02_09))
- Donham KJ, Reynolds SJ, Whitten P, Merchant JA, Burmeister L et al.(1995). Respiratory dysfunction in swine production facility workers: Dose-response relationships of environmental exposures and pulmonary function. *Am J Ind Med* 27(3), 405-418 <https://doi.org/10.1002/ajim.4700270309>
- Faria NMX, Facchini LA, Fassa AG, Tomasi E. Farm work, dust exposure and respiratory symptoms among farmers. *Revista de saúde pública* 2006;40(5):827-836
- Gautam R, Heo Y, Lim G, Song E, Roque K et al. Altered immune responses in broiler chicken husbandry workers and their association with endotoxin exposure. *Ind Health* 2018;56(1):10-19 (<https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0049>)
- Guillam MT, Pedrono G, Bouquin SL, Huneau A, Gaudon J et al. Chronic respiratory symptoms of poultry farmers and model-based estimates of long-term dust exposure. *Ann Agric Environ Med* 2013;20(2): 307-311
- Health and Safety Executive(HSE). Statement of evidence. Statement of evidence, respiratory hazards of poultry dust. 2009 [Accessed 2021 Sep 23] Available from: URL: <https://www.hse.gov.uk/pubns/web40.pdf>
- Herron SL, Brye KR, Sharpley AN, Miller DM, Daniels MB. Nutrient composition of dust emitted from poultry broiler houses in northwest arkansas. *J Environ Prot* 2015;06(11):1257 (<https://doi.org/10.4236/jep.2015.611110>)
- Lacey J. & Dutkiewicz J. Bioaerosols and occupational lung disease. *J Aerosol Sci* 1994;25(8):1371-1404 ([https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90215-1](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90215-1))
- Liu Z., Powers W., Murphy J., Maghirang R. Ammonia and hydrogen sulfide emissions from swine production facilities in North America. *J Anim Sci* 2014;92: 1656-1665
- Just N, Duchaine C, Singh B. An aerobiological perspective of dust in cage-housed and floor-housed poultry operations. *J Occup Med Toxicol* 2009;4(1):13 (<https://doi.org/10.1186/1745-6673-4-13>)
- Kim K, Kim H, Lee K, Chae H. Exposure to dust and organic gas during chicken entrance and shipment tasks in poultry farms. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2014;24(4):471-477 (<https://doi.org/10.15269/jksoeh.2014.24.4.471>)
- <sup>a</sup>Kim I, Kim KR, Lee KS, Chae HS, Kim S. A survey on the workplace environment and personal protective equipment of poultry farmers. *J Environ Health Sci* 2014;40(6):454-468 (<http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2014.4.6.454>)
- <sup>b</sup>Kim KR, Kim I, Kim HC, Lee KS, Chae HS. A survey on the present state of occurrence of safety accidents and safety and health management levels among swine farmers. *J Environ Health Sci* 2014;40(5):413-424 (<http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2014.40.5.413>)
- Kim K, & Kim C. Fluctuation of indoor air pollutants

- emitted from enclosed pig building in winter. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2003;13(3):191-197
- Kiryuchuk SP, Dosman JA, Reynolds SJ, Willson P, Senthilselvan A et al. Total dust and endotoxin in poultry operations & colon; comparison between cage and floor housing and respiratory effects in workers. J Occup Environ Med 2016;48(7):741-748 (<https://doi.org/10.1097/01.jom.0000216215.39521.3c>)
- Kwon K, Jo YS, Lee I, Ha TH, Hong SW. Measurement of dust concentration in a mechanically ventilated broiler house and analysis of dust generation from ground beds. J Korean Soc Agric Eng 2014;56(6):31-43 (<https://doi.org/10.5389/ksae.2014.56.6.031>)
- Lawniczek-Walczyk A, Górny RL, Golofit-Szymczak M, Niesler A, Wlazlo A. Occupational exposure to airborne microorganisms, endotoxins and  $\beta$ -glucans in poultry houses at different stages of the production cycle. Ann Agric Environ Med 2013;20(2):259-268
- Ngajilo D. Respiratory health effects in poultry workers. Curr Allergy Clin Im 2014;27(2):116-124
- Park DU. Comprehensive review of endotoxin level reported in metalworking operation. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2014;24(4):405-415
- Radon K, Weber C, Iversen M, Danuser B, Pedersen S et al. Exposure assessment and lung function in pig and poultry farmers. Occup Environ Med 2001;58(6):405-410
- Seo HJ, Oh BW, Kim H, Sin SJ, Seo IH. Concentrations of particulate matter exposed to farm workers in the broiler houses. J Korean Society Agric Eng 2020;62(5):27-37 (<https://doi.org/10.5389/ksae.2020.62.5.027>)
- Shin CL, Lee KS, Kim KR, Kang TS, Paik NW. A study on exposures to organic dusts and ammonia in poultry confinement buildings. Korean J of Rural Med 2004;29(2):303-314
- Skóra J, Matusiak K, Wojewódzki P, Nowak A, Sulyok M et al. Evaluation of microbiological and chemical contaminants in poultry farms. Int J Environ Res Public Health 2016;13(2):192. (<https://doi.org/10.3390/ijerph13020192>)
- Spaan S, Wouters IM, Oosting I, Doekes G, Heederik D. Exposure to inhalable dust and endotoxins in agricultural industries. J Environ Monit 2006;8(1):63-72 (<https://doi.org/10.1039/b509838f>)
- US Environmental Protection Agency(EPA). EPA-ETV Verification Program Report: SKC Inc., Sioutas Personal Cascade Impactor Sampler with Leland Legacy Pump. 2007 [Accessed 2021 Sep 7] Available from: URL: [https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/vr\\_skcsioutas.pdf](https://archive.epa.gov/nrmrl/archive-etv/web/pdf/vr_skcsioutas.pdf)
- Viegas S, Faisca VM, Dias H, Clérigo A, Carolino E et al. Occupational exposure to poultry dust and effects on the respiratory system in workers. J Toxicol Environ Health Part A 2013;76(4-5):230-239 (<https://doi.org/10.1080/15287394.2013.757199>)
- Woo BJ & Kim HJ. Performance and emerging issues of vertical integration policy in the livestock industry. Korea Rural Economic Institute(KREI). 2015. p. 18-29
- Zhang J, Li Y, Xu E, Jiang L, Tang J, et al. Bacterial communities in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in broiler houses at different broiler growth stages in spring. P J Vet Sci 2019;22(3):495-504 (<https://doi.org/10.24425/pjvs.2019.129957>)

#### <저자정보>

김효철(농업연구사), 신소정(석사후연구원), 김경수(농업연구사), 정원건(석사후연구원)