



# 강제환기식 육계 사육시설의 계절별, 지점별, 주령별 PM, NH<sub>3</sub> 농도 조사 및 분석

## Investigation and Analysis of Particulate-matters and Ammonia Concentrations in Mechanically Ventilated Broiler House According to Seasonal Change, Measurement Locations and Age of Broilers

장동화<sup>a</sup> · 권경석<sup>b,†</sup> · 김종복<sup>c</sup> · 김종곤<sup>d</sup> · 양가영<sup>e</sup> · 최성민<sup>f</sup> · 장유나<sup>g</sup>

Jang, Dong-hwa · Kwon, Kyeong-seok · Kim, Jong-bok · Kim, Jung-kon · Yang, Ka-young · Choi, Sung-min · Jang, YuNa

### ABSTRACT

Air quality related to particulate matters and ammonia is being come to the fore as the national concern in Korea. CAPSS (Clean Air Policy Support System) provides emission coefficients of these kinds of particulate and gaseous matters in the fields of livestock; however reliability issues are consistently mentioned. Evaluation of emission rates of PM<sub>2.5</sub> and NH<sub>3</sub> of the country is very important, but only few studies are available as the background related to observation of the concentration of the particulate matter and ammonia, especially within livestock house in Korea. In this paper, long-term measurement of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and ammonia within the mechanically ventilated broiler house were carried out to introduce backgrounds of generation and emission of the particulate matters and ammonia. Measurement results were analyzed according to seasonal changes, age of broilers(weeks) and measurement locations. Concentration of inhalable and respirable dust were also evaluated in terms of occupational respiratory health according to increase in broiler's activity. From the results of this study, identification of the generation mechanisms of the particulate and gaseous matters, and evaluation of the emission rate of these in the broiler house will be carried out.

**Keywords:** Ammonia; broiler; inhalable dust; PM<sub>10</sub>; PM<sub>2.5</sub>; respirable dust

### 1. 서론

가축 분뇨로부터 배출되는 암모니아가 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>) 2차 발생원의 주요 전구물질로 지적되면서 축산 분야에서 발생하는 미세먼지, 암모니아에 대한 관심이 증대되었다. 2016년 국가 대기오염물질 배출량 보고서 (NIER, 2019)에 따르면 농업 부문에서 배출되는 암모니아는 국가 전체 배출량

의 78.7%를 차지하고 있으며 이 중 무려 91.8%가 축산 분뇨관 리와 관련되는 것으로 보고된 바 있다 (Jo et al., 2020). 암모니아는 자극성 가스로 고농도에 노출될 경우 구토나 어지럼증을 유발할 수 있다. 암모니아는 일반 대기 중으로 배출 시 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등과 결합하여 황산암모늄염, 질산암모늄염 등으로 전환되는 등 2차 무기 에어로졸 형성과 관련한 주요 전구체 역할을 한다. 환경부의 대기정책지원시스템 (CAPSS, Clean Air Policy Support System)에서는 암모니아를 포함한 9개 대상물질의 배출량 정보를 제공하고 있는데 농업, 특히 축산 분야 가축사육시설의 경우 암모니아에 한하여, 일부 축종에 대한 국내 고유 값이 단기간 실험을 통해 제한적으로 측정되어 높은 불확도를 보이는 등 신뢰성에 문제가 제기되고 있다. 또한, CAPSS에서 제공되고 있는 대부분의 배출계수가 Battye et al. (1994), EEA-CORINAIR (2005) 등과 같은 국외 측정값에 기원하고 있는 실정이다. 현재 제시되고 있는 배출계수의 경우 가장 간단한 수준인 Tier-1 수준으로 연중 가축 사육두수가 일정하고 사육기간에 대하여 동일한 오염물질이 배출된다고 가정하고 있어, 가축의 사육주기, 휴지기, 일령 등에 따른 발생 경향에 대한 반영 또한 미비한 실정이다. 더욱이 국내의 사육시설 형태, 환경, 사양 관리 양상이 반영되지 않아 국내 고유 현실을 고려한 배출계수의 현행화가 무엇보다 중요하다.

<sup>a</sup> Post M.S., National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>b</sup> Researcher, Ph.D., National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>c</sup> Senior Researcher, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>d</sup> Researcher, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>e</sup> Post Doc, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>f</sup> Assistant Researcher, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>g</sup> Researcher, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-63-238-7431, Fax: +82-63-238-7447

E-mail: [kswon0512@korea.kr](mailto:kswon0512@korea.kr)

Received: November 24, 2020

Revised: December 15, 2020

Accepted: December 15, 2020

한편, 가금 생산성 증대 및 사육환경 조절의 용이성을 위해 무창 형태의 현대화된 사육시설이 널리 보급되고 있는데, 밀폐된 사육 시설 내부에서는 닭의 깃털, 사료, 깔짚을 포함한 바닥재, 분뇨 등으로부터 다양한 입자상, 가스상 물질이 발생되어 농장 근로자 및 가축의 건강을 위협하는 요소로 작용한다 (Kristensen et al., 2000; Cambra-Lopez et al., 2010; Kwon et al., 2014). 축산시설 내부에서 발생하는 입자상, 가스상 물질에 지속적으로 노출될 경우 근로자가 폐렴, 천식, 천식 유사질환, 알레르기 반응 등과 같은 만성 혹은 급성 호흡기계 질환을 겪을 수 있으며 (Donham, 1995; Donham and Cumro, 1999; Radon et al., 2001), 가축 또한 호흡 과정에서 미세먼지, 암모니아 등이 체내로 유입될 경우 상피 조직에 대한 염증으로 면역체계 이상이 유발될 수 있고 그에 따라 사료 섭취량 감소, 생산성 하락, 질병 감염 기회의 증가 등으로 이어질 수 있다 (Harry, 1978; Kemeny, 2000). 유럽, 북미의 축산 선진국에서는 축사 내 발생하는 미세먼지와 같은 입자상 물질, 암모니아, 황화수소 등과 같은 가스상 물질의 발생 수준을 측정하고 (Takai et al., 1998; Cambra-Lopez et al., 2010) 축산시설 내부의 공기 질 기준을 규제하거나 배출량을 관리하기 위한 다양한 연구 및 정책이 추진되고 있는 가운데 국내의 경우, 축산 분야에 공기질에 대한 공감대조차 마련되고 있지 않은 실정이다. 또한, 축산 시설에서의 미세먼지, 암모니아 발생 수준에 대한 국내 연구는 대부분 1~4주 혹은 그 이하의 단기간의 실험에 그쳐 (Choi et al., 2005; Kim et al., 2013), 활용 가능한 자료 수준이 매우 제한적이며, 1년 이상의 장기적인 관측 또한 돼지와 같은 일부 축종 (Kwon et al., 2016)에 그치고 있다.

본 연구에서는 강제환기식 무창형태의 육계 사육시설을 대상으로 미세먼지, 암모니아의 발생량 및 배출량 산정을 위한 기초 연구로서, 사육 시설 내부에서 발생하는 입경별 미세먼지 (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), 산업안전 측면에서의 흡입성분진, 호흡성분진, 그리고 암모니아 농도에 대한 계절별 지점별 모니터링 및

분석을 실시하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험대상 육계 사육시설

실험 대상 육계 사육시설은 전라북도 김제시에 소재하는 강제환기식 무창 육계사로 총 3개동에서 90,000~92,000 수 규모로 연평균 6회 사육을 실시한다 (Fig. 1). 축사표준설계에 준하는 시설 형태이며, 바닥 면적은 폭 16.0 m, 길이 100.0 m로, 사육밀도는 18.8~20.0 수/m<sup>2</sup> 규모이다. 하절기에는 터널 배기팬과 쿨링패드를 이용한 터널환기 방식을, 환절기, 동절기 및 육추 초기에는 측벽 배기팬과 입기베플을 이용한 크로스환기 방식을 적용한다.

### 2. 공기 중 입경별 미세먼지, 암모니아 측정 장비

#### 가. 중량법 기반 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 포집 장비

중량법 (Gravimetric method)에 기반한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 포집은 Air sampler set (AirChek Touch, SKC, Inc.)를 이용하여 실시되었으며 이때 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 포집을 위한 필터는 PTFE filter (37 mm diameter, 2.0 μm pore size, SKC, Inc.)를 이용하였다. PTFE filter는 각각 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> Personal impactor (SKC, Inc.)에 삽입되었다. 실험 전 후 필터 무게 칭량은 최소 분해능 0.001 mg의 전자저울 (Ohaus Discovery Balance, Ohaus Co.)을 이용하였다.

#### 나. 광산란방식 기반 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 흡입성 분진, 호흡성 분진 측정 장비

상황별 실시간 입경별 미세먼지의 측정을 위하여 광산란방식의 직독식 미세먼지 측정장치 (OPC, Portable Aerosol Spectrometer, Grimm, Inc.)를 이용하였으며, 해당 장비는 질량 농



Fig. 1 External and internal view of experimental broiler house

도 (Mass concentration)뿐만 아니라 수 농도 (Count concentration)에 대한 계측이 가능하다. 본 연구에서는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 흡입성 분진 및 호흡성 분진의 질량 농도를 분석하였다.

다. 전기화학식 기반 암모니아 측정 장비

암모니아는 전기화학식 센서 (MultiRAE lite, RAE System, Inc.)를 이용하여 측정하였다. 대기공정시험법의 경우 인도페놀법 (Indophenol method)을 기반으로 암모니아를 측정하도록 제시되어 있으나, 해당 방법의 경우 단시간 포집 (5~15분)에 적합하여, 내부 온도 및 환기량에 따라 내부 암모니아 농도가 실시간으로 변화하는 측사의 경우 인도페놀법에 의한 측정 및 분석에 한계가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 전기화학식 센서를 이용하여 측사 내부 암모니아 농도의 실시간 변화 추이를 측정하였으며, 국립축산과학원 축산환경과 축산냄새연구실에서 분기별 1회씩 암모니아 표준가스를 이용, 자체적으로 QA/QC를 실시하였다. 이때 측정항목은 표준가스 농도 대비 오차율과, 응답시간 (Response time)으로 측정 결과를 토대로 현장 실측값에 대한 보정 및 응답시간을 기준으로 데이터 분석 구간에 대한 설정을 실시하였다.

3. 실험 방법

육계사의 입경별 PM, NH<sub>3</sub> 모니터링은 2019년 7월부터 2020년 11월까지 1번의 예비실험을 포함하여 총 25회 실시되었다. 1회 사육주기 당 14, 21, 28일령 시 정기적으로 모니터링을 실시하였으며 입경별 PM 및 NH<sub>3</sub> 측정 장치의 설치 지점은 Fig. 2에 도시된 바와 같으며, 실험 장면은 Fig. 3과 같다. 지점별 측정을 위해 우선 내부 3개 지점 (M-1, M-2, M-3)에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 포집장치 및 NH<sub>3</sub> 측정을 위한 전기화학식 센서를 설치하였다. 배기구 인근 영역의 경우, 실험 당시 환기 방식에 따라 하절기 터널환기 방식을 실시할 때는 TE-1, TE-2, TE-3 3개 지점에서, 환절기, 동절기 혹은 육추 초기 크로스환기 방식을 실시할 때는 CE-1, CE-2, CE-3 3개 지점에서 측정을 실

시하였다. 또한, 계사 외부 부지 경계 인근에 1개 측정 지점을 선정하였다. 각 실험 장치는 근로자의 평균 호흡기 높이를 고려하여 바닥으로부터 1.5 m 높이에 설치하였다. 입경별 PM 농도는 NIOSH (National Institute of Occupational Safety & Health) 공정시험법에 따라 실시되었으며 각 시료의 포집 시간은 최소 6시간 이상 실시하였다. 실험 전 후 포집 필터는 48시간 이상 데시케이터에 보관하여 건조 과정을 거쳤으며, 전자저울을 이용하여 3회 이상 칭량을 실시하였다. 입경별 PM의 농도는 수식 (1)을 이용하여 산정된다.

$$C = \frac{[(WS_p - WS_i) - (WB_p - WB_i)]}{\text{flow rate} \times \text{sampling time}} \times 10^3 \quad (1)$$

여기서, C는 concentration (mg/m<sup>3</sup>), WS<sub>i</sub>, WS<sub>p</sub>는 각각 실험 실시 전 후의 필터 무게 (mg), WB<sub>i</sub>, WB<sub>p</sub>는 각각 실험 전후의 공시료 필터 무게 (mg)를 의미한다.

공기 포집 펌프의 경우 실험 전후의 유량을 각각 3회 이상 측정하여 보정작업을 실시하였다. 암모니아 측정을 위한 전기화학식 가스센서는 PM 포집을 위한 Sampler set와 동일한 방식으로 설치하였다.

근로자의 출입 시 PM 발생 수준 측정을 위하여 직독식 미세먼지 측정장치 (Gimm, Inc.)를 이용하여 근로자의 평균 호흡기 높이 (1.5 m)에서 실시간 측정을 실시하였다. 이때 측정 간격은 6초 간격이다. 본 연구에서는 Donham et al. (2000)이 제시한 양계 사육시설 근로자의 폐기능 저하와 관련한 분진 허용노출기준 (흡입성 분진 2.40 mg/m<sup>3</sup>, 호흡성 분진 0.16 mg/m<sup>3</sup>)을 기준으로 해당 기준치에 대한 초과 여부를 추가로 분석하였다. 근로자 미 출입 시, 계군이 안정되어 있을 때, 그리고 근로자 출입에 따라 계군이 강한 활동성을 보이는 시기로 명목변수 형태로 구분하여 측정을 실시하였다.

계사 내부 온도, 습도, 외부 기상, 바닥재 함수비, 환기팬 작동 기록 등 실험 조건에 대하여 동시 측정을 실시하였으며,

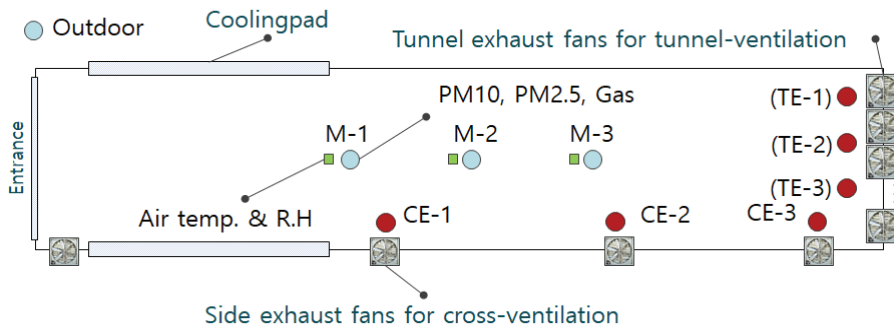


Fig. 2 Measurement locations for PM and NH<sub>3</sub> in broiler house





(a) Sampling set installed at the outside of broiler house



(b) Sampling set installed at M-2 measurement point



(c) Sampling set installed in front of tunnel-exhaust fans



(d) Measurement of inhalable and respirable dust using OPC

**Fig. 3** Experimental view for measuring PM and NH<sub>3</sub> inside and outside broiler house

해당 자료는 추후 연구에서 계사 내부 입경별 PM 발생에 대한 영향성 평가에 활용될 예정이다. 여기서, 환기량의 경우 Aero-flow meter를 별도 제작하여 계절별, 일령별에 따른 모든 환기 경우의 수를 고려하여 환기팬의 실제 풍량 값을 측정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 시기별 일령별 지점별 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도 측정 결과

중량법에 의해 산정한 무창 육계사의 시기별, 일령별, 지점별 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도 측정 결과는 Table 1, 2와 같다. 전체 실험 기간에 대한 평균 농도는 PM<sub>10</sub>의 경우 시설 내부에서 0.72±0.54 mg/m<sup>3</sup>, 배기구 인근에서 0.88±0.66 mg/m<sup>3</sup>로 배기구 인근에서의 농도가 약 1.22배 높게 관측되었다. PM<sub>2.5</sub>의 경우 시설 내부 및 배기구에서 각각 0.18±0.12, 0.22±0.14 mg/m<sup>3</sup>로 관측되었다.

계절별 비교 시, 계사 내부의 PM<sub>10</sub> 농도의 경우 (Figs. 4, 5), 하절기에는 0.32±0.20 mg/m<sup>3</sup> 수준의 농도 값을 보였으며 환절기, 동절기에는 각각 2.99, 5.04배인 0.96±0.40, 1.61±0.36 mg/m<sup>3</sup> 농도 값을 보였다. 배기구 인근에서의 측정값도 Fig. 5에 도시된 바와 같이 유사한 경향을 보였으며 하절기, 환절기, 동절기에 각각 0.38±0.20, 1.14±0.39, 2.11±0.32 mg/m<sup>3</sup> 수준의 농도 값을 보였다. 이는 외기 온도 감소에 따라 계사 내부 적온 유지를 위하여 낮은 설계 환기량을 적용함으로써, 시설 내부의 각종 입자상, 가스상 물질의 배출이 원활하지 않기 때문으로 판단할 수 있으며, 이는 Takai et al. (1998), Kwon et al. (2014)의 실험 결과와도 유사하다. 실제로, 하절기에는 시설 내부에 집적된 열을 빠르게 제거하고 신선한 공기를 공급하기 위해 시설 길이 방향에 대하여 일정한 유속을 고르게 형성시켜주기 위한 터널 환기 방식을 높은 설계 환기량과 함께 적용하며, 환절기, 동절기 및 육추 초기의 경우 계군 내 호흡기 질환 발생을 방지하기 위하여 최대한 외부로부터 입기된 공기가 시설 내 존재하는 가온된 공기 덩어리와 열교환

**Table 1** Measurement results of PM<sub>10</sub> concentrations at the experimental broiler house by gravimetric method(Unit : mg/m<sup>3</sup>)

Season	Date	Age of broilers (days)	Outdoor	Inside (Ave. of M-1, 2, 3)	Exhaust (Ave. of E-1, 2, 3)
Summer	19. 07. 03	11	0.08	0.56±0.12	0.62±0.10
	19. 07. 10	18	0.03	0.67±0.02	0.69±0.01
	19. 07. 17	25	0.01	0.24±0.02	0.25±0.03
	19. 07. 22	30	0.02	0.21±0.05	0.33±0.02
	19. 08. 14	15	0.01	0.05±0.01	0.11±0.01
	19. 08. 20	21	0.03	0.11±0.02	0.13±0.02
	19. 08. 27	28	0.00	0.18±0.03	0.26±0.07
Change of seasons	19. 10. 01	15	0.03	0.63±0.07	0.65±0.06
	19. 10. 08	22	0.02	1.03±0.00	1.08±0.09
	19. 10. 14	28	0.13	0.72±0.12	0.91±0.04
Winter	20. 02. 27	14	0.01	1.97±0.16	2.32±0.20
	20. 03. 04	21	0.04	1.61±0.22	2.27±0.20
	20. 03. 12	29	0.02	1.24±0.17	1.75±0.19
Change of seasons	20. 04. 20	15	0.02	1.66±0.21	1.78±0.41
	20. 04. 27	22	0.02	1.40±0.11	1.45±0.11
	20. 05. 01	26	0.05	0.50±0.02	0.68±0.05
Summer	20. 06. 09	15	0.07	0.57±0.05	0.66±0.14
	20. 06. 15	22	0.04	0.41±0.05	0.46±0.04
	20. 06. 22	29	-	0.29±0.06	0.38±0.08
	20. 07. 15	14	0.01	0.59±0.11	0.66±0.04
	20. 07. 22	21	0.01	0.33±0.08	0.41±0.02
	20. 07. 29	28	0.02	0.13±0.08	0.20±0.04
Change of seasons	20. 10. 19	15	0.00	0.76±0.18	1.28±0.18
	20. 10. 26	22	0.02	1.02±0.21	1.24±0.13
	20. 11. 02	29	0.05	0.99±0.07	1.18±0.04

이 실시되도록 유도한 후, 계군에 도달할 수 있도록 낮은 설계 환기량을 적용한 크로스 환기 방식을 적용하고 있다.

PM<sub>2.5</sub> 농도 관측결과에 대한 계절별 비교 시, 계사 내부의 경우 하절기에는 0.11±0.07 mg/m<sup>3</sup> 수준의 농도 값이 관측되었으며, 환절기와 동절기에는 각각 2.17, 1.50배인 0.24±0.12, 0.33±0.12 mg/m<sup>3</sup> 농도 값을 보였다. 앞선, PM<sub>10</sub> 측정결과와 마찬가지로 배기구 인근에서 시설 내부보다 상대적으로 높은 수준의 측정값이 관측되었는데, 이는 시설 내부에 존재하는 입자상 물질이 배기구를 향해 형성된 유선을 통해 배출되는 과정에서 기인한 결과로 추정가능하다. 특히, 이는 하절기, 환기 시스템 작동 시 터널 배기팬 인근에서 높은 수준의 열환경이 관측되는 것과 유사한 원리이다.

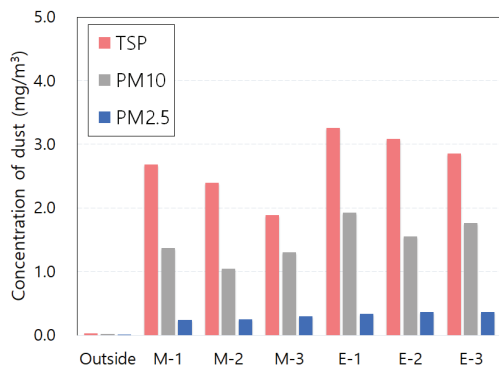
Fig. 6은 계사 내부에서 측정된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도에 대하여 계절별로 동일 일령 (주령) 관측치를 취합하여 도시한 결과이

다. 하절기와 동절기의 경우 전체적으로 일령이 증가할수록 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도가 점차 낮아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. PM<sub>10</sub>의 경우, 하절기에, 14, 21, 28일령 순으로 각각 0.47±0.26, 0.28±0.11, 0.21±0.08 mg/m<sup>3</sup> 농도 값이 관측되었으며, 동절기에는 각각 1.98±0.16, 1.61±0.22, 1.24±0.17 mg/m<sup>3</sup> 수준의 농도 값이 관측되었다. 이는 닭의 일령이 증가할수록 요구되는 생육 적온이 점차 낮아짐에 따라, 적정 열환경 달성을 위해 설계 환기량을 늘려가는 과정 중에 나타난 결과로 판단할 수 있다. 실제로 닭의 일령이 증가할수록 여름철의 경우, 터널 환기팬의 가동 대수를 증가시키거나 겨울철의 경우, 측벽 환기팬의 가동 시간을 점차 증가시킴으로써 설계 환기량을 늘려간다.

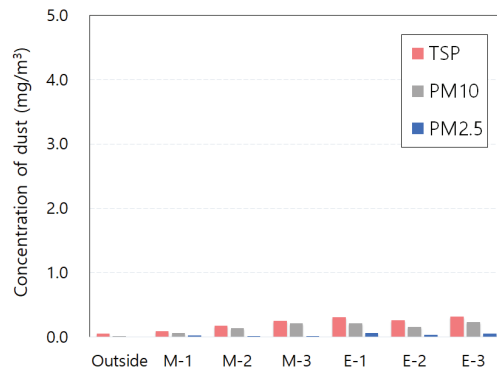
**Table 2** Measurement results of PM<sub>2.5</sub> concentrations at the experimental broiler house by gravimetric method

(Unit : mg/m<sup>3</sup>)

Season	Date	Age of broilers (days)	Outdoor	Inside (Ave. of M-1, 2, 3)	Exhaust (Ave. of E-1, 2, 3)
Summer	19. 07. 03	11	0.00	0.34±0.07	0.37±0.11
	19. 07. 10	18	0.00	0.23±0.03	0.27±0.02
	19. 07. 17	25	0.00	0.34±0.07	0.37±0.07
	19. 07. 22	30	0.00	0.11±0.02	0.15±0.05
	19. 08. 14	15	0.00	0.04±0.01	0.07±0.02
	19. 08. 20	21	0.00	0.04±0.01	0.06±0.01
	19. 08. 27	28	0.00	0.05±0.01	0.08±0.00
Change of seasons	19. 10. 01	15	0.00	0.09±0.02	0.12±0.03
	19. 10. 08	22	0.00	0.37±0.11	0.28±0.05
	19. 10. 14	28	0.00	0.21±0.07	0.20±0.01
Winter	20. 02. 27	14	0.03	0.40±0.20	0.51±0.15
	20. 03. 04	21	0.02	0.33±0.06	0.46±0.01
	20. 03. 12	29	0.01	0.26±0.03	0.36±0.02
Change of seasons	20. 04. 20	15	0.02	0.44±0.12	0.33±0.08
	20. 04. 27	22	0.01	0.27±0.06	0.39±0.06
	20. 05. 01	26	0.02	0.13±0.05	0.16±0.04
Summer	20. 06. 09	15	0.02	0.13±0.02	0.20±0.07
	20. 06. 15	22	0.03	0.12±0.01	0.12±0.04
	20. 06. 22	29	0.03	0.17±0.05	0.20±0.05
	20. 07. 15	14	0.00	0.18±0.03	0.50±0.45
	20. 07. 22	21	0.00	0.14±0.02	0.13±0.02
	20. 07. 29	28	0.01	0.02±0.01	0.05±0.02
Change of seasons	20. 10. 19	15	0.00	0.23±0.12	0.29±0.19
	20. 10. 26	22	0.01	0.28±0.09	0.26±0.15
	20. 11. 02	29	0.04	0.21±0.04	0.25±0.09



(a) 20. 3. 12 (29 days of age)



(b) 20. 7. 29 (28 days of age)

**Fig. 4** Measurement results of PM concentrations at the experimental broiler house

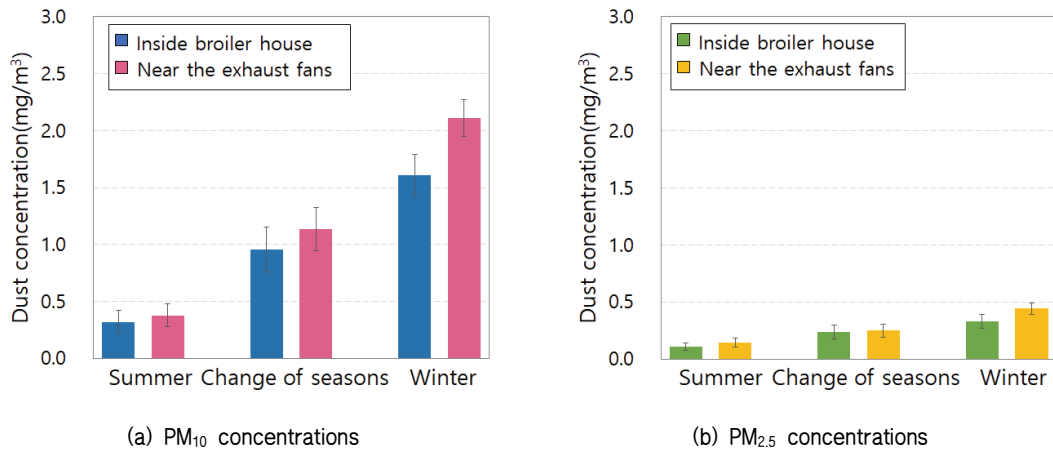


Fig. 5 Measurement results of average PM concentrations according to seasons and measurement locations

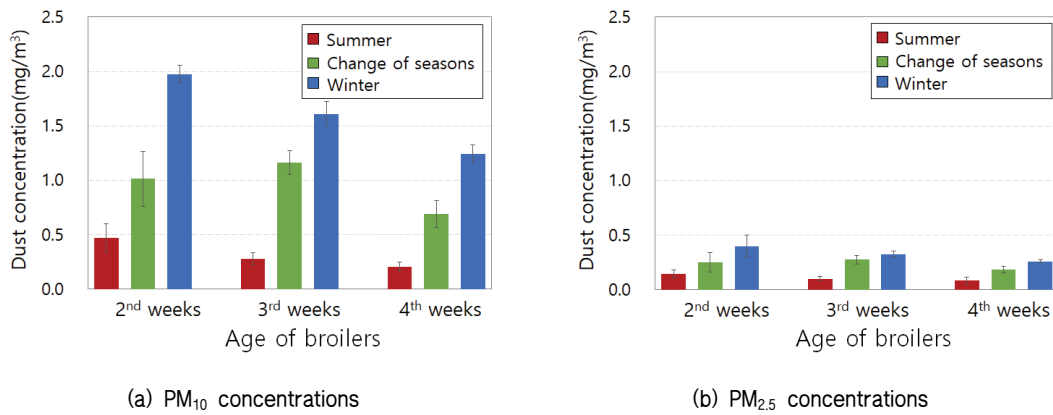


Fig. 6 Measurement results of PM concentrations according to seasons and age of broilers

## 2. 시기별 일령별 상황별 흡입성 분진, 호흡성 분진 농도 측정 결과

광산란방식의 직독식 미세먼지 측정장치를 이용하여 근로자의 평균 호흡기 높이에서 실시간으로 측정된 무창 육계사의 시기별, 일령별, 상황별 흡입성 분진 및 호흡성 분진의 농도 측정 결과는 Table 3, 4와 같다. 상황별 분석의 경우, 평상시 닭이 안정 상태에 있을 때와, 근로자 출입에 따라 닭의 활동성이 급격하게 증가하는 시기 등 두 단계로 구분하여 분석을 실시하였다. 전체 실험 기간에 대한 흡입성 분진의 평균 농도는  $1.46 \pm 0.93 \text{ mg/m}^3$ 로 관측되었으며 닭의 활동성 증가 시, 약 1.73배 높은  $2.53 \pm 1.53 \text{ mg/m}^3$  수준으로 나타났다. 호흡성 분진의 경우, 각각  $0.19 \pm 0.14$ ,  $0.26 \pm 0.17 \text{ mg/m}^3$ 로 관측되었다. Takai et al. (1998)은 영국, 네덜란드, 덴마크, 독일에 위치한 육계 사육시설에서 흡입성 분진 및 호흡성 분진에 대한 모니터링을 실시하였으며, 각각  $7.15$ ,  $0.81 \text{ mg/m}^3$  수준으로 보고하였다. 본 연구에서 근로자의 호흡기 높이에서 측정된

전 기간에 걸친 흡입성 및 호흡성 분진 농도의 경우, Takai et al. (1998)의 관측 결과 대비 각각, 20, 23% 수준으로 낮게 산정된 것으로 분석되었다. Takai et al. (1998)가 실시한 실험의 경우, 주간, 야간에 각각 중량법에 기반한 모니터링을 실시한 후 평균값을 보고하였는데, 이에 반해 본 연구의 경우 닭이 비교적 활발한 운동성을 보이는 주간에 측정된 값으로, 평균적으로 농도 수준이 낮아지는 야간 시간대의 관측 결과를 포함할 경우, 보다 낮은 수준의 농도 값이 산출될 것이라 추정할 수 있다.

계절별 비교 시, 닭의 안정 상태 시 흡입성 분진은 하절기에 평균  $1.08 \pm 0.88 \text{ mg/m}^3$  수준의 농도 값을 보였으며, 환절기, 동절기에는 각각  $1.65$ ,  $1.86$ 배인  $1.78 \pm 0.80$ ,  $2.00 \pm 1.24 \text{ mg/m}^3$  농도 값을 보였다 (Fig. 7). 닭 활동성이 증가되는 시기에는 시기별로 안정 시 대비 각각  $1.61$ ,  $1.91$ ,  $1.58$ 배 증가한  $1.74 \pm 1.21$ ,  $3.38 \pm 0.84$ ,  $3.15 \pm 2.90 \text{ mg/m}^3$  수준의 농도 값이 관측되었다. 호흡성 분진의 경우, 하절기, 환절기, 동절기에 각각

0.14±0.08, 0.22±0.17, 0.29±0.20 mg/m<sup>3</sup> 수준의 농도 값이 나타났으며, 닭 활동성이 증가될 경우, 1.37, 1.35, 1.39배 증가한 0.20±0.11, 0.30±0.16, 0.41±0.31 mg/m<sup>3</sup> 수준의 농도 값이 관측되었다.

Kwon et al. (2014)은 무창 육계사 (30,000수, 사육밀도 23.53 수/m<sup>2</sup>)를 대상으로 하절기 2회, 환절기 1회, 동절기 1회 사육주기에 대하여, 7, 14, 28일령 조건 시 작업자의 평균 호흡기 높이에서 흡입성 분진 및 호흡성 분진에 대한 관측을 실시하였다. 14일령 조건을 기준으로 본 연구의 관측 결과와 비교할 경우, Kwon et al. (2014)의 연구 결과에서는 하절기, 환절기, 동절기 관측 값이 각각 1.46, 1.69, 2.59 mg/m<sup>3</sup> 수준으로 본 연구 결과 대비 하절기, 환절기에는 각각 91, 88% 수준으로 유사한 결과 값을 보였으나, 동절기의 경우 본 연구의 관측 값 대비 약 1.64배 높은 수준을 보이는 것으로 산정되었다. 실험 농가의 평균 사육 밀도는 19.4 수/m<sup>2</sup> 규모로 Kwon et

al. (2014)의 실험이 수행된 시설 대비 약 82% 수준이다. 하절기, 환절기에 두 실험 결과가 큰 차이를 보이지는 않으나, 본 연구의 실험 농가의 사육 밀도가 낮음에도 불구하고 다소 높은 수준의 농도 수준을 보이는 데는 바닥 관리 방식의 차이에서 그 원인을 찾을 수 있다. Kwon et al. (2014)의 실험이 실시될 당시, 입추 전 바닥재를 깔고, 출하 시까지 깔짚에 대한 추가 살포를 실시하지 않았으나, 본 연구가 실시된 농가의 경우 바닥의 수분 관리를 위해 주기적으로 왕겨를 일부 구간에 살포하여 상대적으로 건조한 수분 환경이 조성되었을 것으로 추정가능하다. 반면 동절기에 반대로 낮은 수준의 농도 값을 보이는데, Kwon et al. (2014)의 실험 농가의 경우 등유 온풍기가 바닥면에 근접하게 설치되어 난방을 실시하면서 바닥면을 직접 건조하는데 반해, 본 연구의 농가의 경우 천정 하단에 가스터빈 방식의 복사열 난방기가 설치되어, 사육 기간 중 깔짚 추가 살포에도 불구하고 바닥면의 수분 건조에 미치는 영

**Table 3** Measurement results of inhalable dust concentrations at the experimental broiler house by OPC

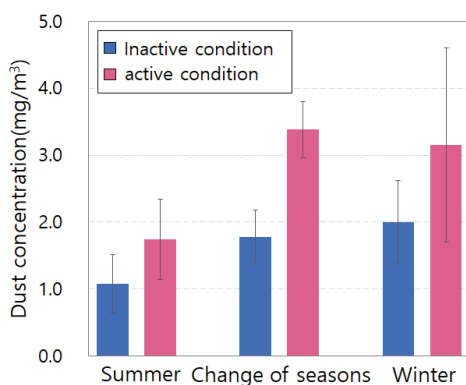
(Unit : mg/m<sup>3</sup>)

Season	Date	Age of broilers (days)	Outdoor	Inactive condition	Active condition
Summer	19. 07. 03	11	0.05±0.02	0.65±0.16	0.75±0.25
	19. 07. 10	18	0.03±0.04	1.49±0.23	1.99±0.59
	19. 07. 17	25	0.03±0.04	0.26±0.04	0.55±0.27
	19. 07. 22	30	0.03±0.01	0.54±0.37	1.13±0.37
	19. 08. 14	15	0.01±0.00	0.13±0.20	0.38±0.12
	19. 08. 20	21	0.05±0.05	0.47±0.21	0.53±0.33
	19. 08. 27	28	-	-	-
Change of seasons	19. 10. 01	15	0.04±0.02	1.14±0.36	1.74±0.36
	19. 10. 08	22	0.04±0.09	1.85±0.59	2.70±0.90
	19. 10. 14	28	0.08±0.18	2.01±0.52	3.10±0.70
Winter	20. 02. 27	14	0.04±0.04	1.08±0.80	1.39±0.46
	20. 03. 04	21	0.06±0.05	1.51±1.69	1.57±0.33
	20. 03. 12	29	0.06±0.05	3.41±2.25	6.50±2.33
Change of seasons	20. 04. 20	15	0.04±0.04	2.55±0.66	3.97±0.87
	20. 04. 27	22	0.06±0.09	3.35±0.92	4.61±3.29
	20. 05. 01	26	0.08±0.11	0.77±0.52	3.59±2.59
Summer	20. 06. 09	15	0.27±0.26	1.64±0.47	2.54±2.29
	20. 06. 15	22	0.08±0.19	1.32±0.74	3.27±2.27
	20. 06. 22	29	0.08±0.19	1.09±0.61	3.10±3.14
	20. 07. 15	14	0.06±0.07	1.68±0.61	2.18±0.56
	20. 07. 22	21	0.08±0.08	3.25±0.82	3.72±0.59
	20. 07. 29	28	0.04±0.04	0.61±0.18	0.73±0.22
Change of seasons	20. 10. 19	15	0.06±0.05	1.08±0.45	3.07±1.56
	20. 10. 26	22	0.05±0.04	1.53±0.57	3.79±1.20
	20. 11. 02	29	0.05±0.04	1.70±0.68	3.88±1.61

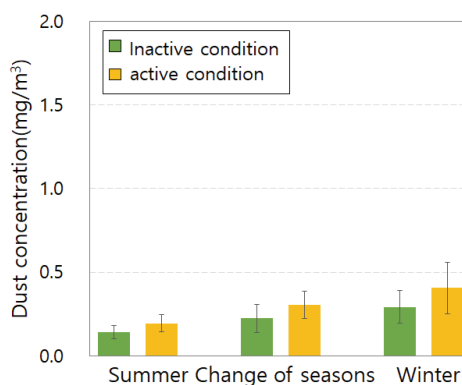


**Table 4** Measurement results of respirable dust concentrations at the experimental broiler house by OPC(Unit : mg/m<sup>3</sup>)

Season	Date	Age of broilers (days)	Outdoor	Inactive condition	Active condition
Summer	19. 07. 03	11	0.04±0.00	0.14±0.01	0.14±0.02
	19. 07. 10	18	0.01±0.00	0.19±0.01	0.20±0.04
	19. 07. 17	25	0.01±0.00	0.08±0.01	0.13±0.06
	19. 07. 22	30	0.02±0.00	0.08±0.04	0.15±0.03
	19. 08. 14	15	0.01±0.00	0.02±0.01	0.04±0.01
	19. 08. 20	21	0.04±0.00	0.08±0.02	0.09±0.05
	19. 08. 27	28	-	-	-
Change of seasons	19. 10. 01	15	0.02±0.00	0.19±0.05	0.25±0.07
	19. 10. 08	22	0.01±0.00	0.28±0.09	0.34±0.08
	19. 10. 14	28	0.04±0.00	0.25±0.08	0.33±0.06
Winter	20. 02. 27	14	0.02±0.00	0.21±0.04	0.26±0.06
	20. 03. 04	21	0.02±0.00	0.15±0.05	0.20±0.02
	20. 03. 12	29	0.02±0.00	0.52±0.12	0.76±0.26
Change of seasons	20. 04. 20	15	0.02±0.00	0.56±0.08	0.58±0.11
	20. 04. 27	22	0.03±0.00	0.39±0.08	0.47±0.18
	20. 05. 01	26	0.03±0.00	0.13±0.04	0.38±0.24
Summer	20. 06. 09	15	0.09±0.01	0.23±0.03	0.27±0.09
	20. 06. 15	22	0.01±0.00	0.13±0.04	0.31±0.22
	20. 06. 22	29	0.01±0.00	0.18±0.05	0.33±0.31
	20. 07. 15	14	0.01±0.00	0.21±0.05	0.24±0.02
	20. 07. 22	21	0.01±0.00	0.30±0.03	0.36±0.04
	20. 07. 29	28	0.01±0.00	0.07±0.02	0.08±0.01
Change of seasons	20. 10. 19	15	0.03±0.00	0.07±0.02	0.11±0.04
	20. 10. 26	22	0.02±0.00	0.07±0.02	0.10±0.03
	20. 11. 02	29	0.01±0.01	0.08±0.03	0.17±0.05



(a) inhalable dust concentrations



(b) respirable dust concentrations

**Fig. 7** Measurement results of inhalable and respirable dust concentrations according to seasons and status of broiler's activity

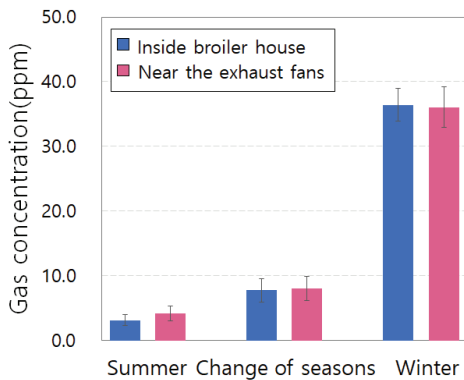
향이 다소 적었을 것으로 추정가능하며 또한, 복사열 난방기 도입에 따라 난방비 지출 부담이 적어, 환기 주기를 상대적으로 짧게 가져가기 때문으로 오염물질 배출이 수월했을 것으로 판단할 수 있다. 먼지 발생과 관련한 바닥재 함수비, 온도, 습도, 환기량 등의 사양, 환경 변수 간의 복합적인 관계는 추후 연구에서 기술될 예정이다. 근로자의 호흡기 건강과 관련되는 Donham et al. (2000)의 분진허용노출기준과의 비교 시, 외부 기온 하락에 따라 낮은 설계 환기량이 적용되는 환절기, 동절기 시 그리고 출하에 가까운 일령 조건일수록 근로자의 시설 내부 출입에 따라 닭의 활동성이 증가할 경우 흡입성 및 호흡성 분진의 관측치가 노출기준을 쉽게 초과하는 것으로 나타났다. 예를 들어 동절기 29일령 조건에서 근로자 출입 시, 평균 호흡기 높이에서의 흡입성 분진 농도는 6.50±2.33 mg/m<sup>3</sup> 수준으로 기준치 대비 271% 초과하는 것으로 나타났으며 호흡 과정에서 인체 내 폐포에 침착이 가능한 호흡성 분진의 경우 동일 시기에 475% 초과하는 것으로 나타나 특히 동절기 후기 일령일수록 유해한 실내 공기질이 형성되는 것으로 나타났다.

### 3. 시기별 일령별 지점별 NH<sub>3</sub> 농도 측정 결과

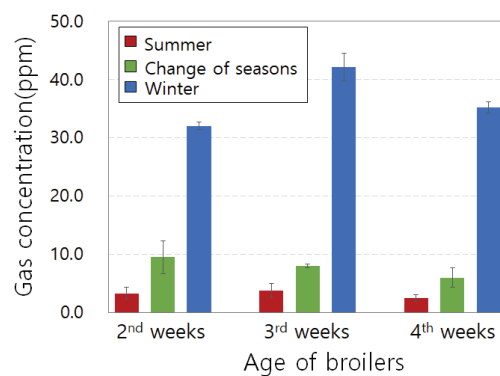
전기화학식 가스 측정 장치를 이용하여 시기별 일령별 지점별로 측정된 NH<sub>3</sub>의 농도 측정 결과는 Table 5와 같다. 전체 실험 기간에 대한 NH<sub>3</sub> 평균 농도의 경우, 시설 내부에서 8.80±11.01 ppm, 배기구 인근에서 9.39±10.71 ppm으로 PM 측정 결과와 마찬가지로 배기구 인근에서의 농도가 약 1.07배 높게 관측되었다.

계절별 비교 시, 계사 내부의 경우 (Fig. 8(a)), 하절기에는 3.14±1.75 ppm 수준의 농도 값을 보였으며 환절기, 동절기에는 각각 2.47, 11.60배인 7.77±3.59, 36.43±5.17 ppm 수준의 농도 값을 보였다. 동절기의 경우, 일반적인 암모니아 관리 기준으로 제시되는 25 ppm 대비 146% 수준의 높은 값이 관측되었다. 배기구 인근에서의 측정값 또한 Fig. 8 (a)에 도시된 바와 같이 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났는데, 하절기, 환절기, 동절기에 각각 4.16±2.29, 8.05±3.67, 36.04±6.23 ppm 수준의 농도 값을 보였다. 앞서 언급한 PM 관측 사례와 마찬가지로 외기 온도 감소에 따라 점차 낮은 설계 환기량을 적용함으로써 기인한 결과로 판단 가능하다. 동절기 3주령 (21일령) 시기의 경우, 시설 내부에서 평균 42.11±4.77 ppm, 최대 53.00 ppm을 기록하였으며 배기구 인근에서는 평균 43.21±9.14 ppm, 최대 61.00 ppm의 농도 값이 관측되어 가축뿐만 아니라 시설 내 방문하는 근로자의 호흡기에 매우 유해한 환경이 조성되는 것으로 나타나 개인 보호구의 착용이 필수적으로 요구되는 것으로 판단된다.

Fig. 8(b)는 계사 내부에서 측정된 NH<sub>3</sub> 농도에 대하여 계절별로 동일 일령 (주령) 관측치를 취합하여 도시한 결과이다. 하절기와 동절기의 경우 2주령에서 3주령 진입 시 증가하였다가 출하 직전인 4주령 시 다소 감소된 농도 값을 보이는 것으로 나타났으나, 환절기의 경우 9.46±5.54, 7.94±0.60, 5.92±3.33 ppm으로 일령에 따라 점차 낮은 농도 값을 보이는 것으로 관측되었다. 이는 각 계절과 일령마다 당시의 외부 온도, 습도 등을 고려하여 내부의 적온 유지를 위해 환기량이 다른 추이로 적용됨에 따라 기인할 수 있는 결과로, 추후 연구를 통해



(a) NH<sub>3</sub> concentrations according to seasons and measurement locations



(b) NH<sub>3</sub> concentrations according to seasons and age of broilers

Fig. 8 Measurement results of NH<sub>3</sub> concentrations according to seasons and measurement locations (a) and seasons and age of broilers (b)

Table 5 Measurement results of NH<sub>3</sub> concentrations at the experimental broiler house

(Unit : ppm)

Season	Date	Age of broilers (days)	Outdoor	Inside (Ave. of M-1, 2, 3)	Exhaust (Ave. of E-1, 2, 3)
Summer	19. 07. 03	11	0.00±0.00	2.97±1.25	2.98±0.77
	19. 07. 10	18	0.00±0.00	4.83±1.62	5.20±0.94
	19. 07. 17	25	0.00±0.00	3.02±0.61	4.77±2.34
	19. 07. 22	30	0.00±0.00	1.83±0.57	3.41±2.08
	19. 08. 14	15	0.17±0.38	1.02±0.04	1.01±0.01
	19. 08. 20	21	0.00±0.00	1.00±0.00	2.31±0.29
	19. 08. 27	28	0.41±0.88	1.82±0.44	3.17±1.39
Change of seasons	19. 10. 01	15	0.00±0.00	7.75±0.79	10.35±1.80
	19. 10. 08	22	0.00±0.00	7.28±0.98	8.34±2.53
	19. 10. 14	28	0.07±0.26	7.82±0.80	7.35±0.26
Winter	20. 02. 27	14	0.00±0.00	32.00±1.24	31.90±6.52
	20. 03. 04	21	1.97±0.19	42.11±4.76	43.21±9.14
	20. 03. 12	29	1.93±0.25	35.20±1.95	33.01±6.65
Change of seasons	20. 04. 20	15	0.18±0.38	15.65±0.76	16.04±0.33
	20. 04. 27	22	0.00±0.00	8.08±3.16	7.63±2.01
	20. 05. 01	26	0.00±0.00	2.07±0.14	2.40±0.47
Summer	20. 06. 09	15	0.00±0.00	1.92±0.06	1.91±0.07
	20. 06. 15	22	0.00±0.01	4.28±1.10	7.80±4.20
	20. 06. 22	29	0.00±0.00	2.13±0.39	3.07±0.69
	20. 07. 15	14	0.00±0.00	5.21±0.00	7.68±0.66
	20. 07. 22	21	0.00±0.00	6.64±1.34	7.68±0.78
	20. 07. 29	28	0.09±0.29	4.16±2.52	3.12±0.39
Change of seasons	20. 10. 19	15	0.00±0.00	4.97±0.41	6.15±1.83
	20. 10. 26	22	0.00±0.00	8.45±0.76	7.74±2.16
	20. 11. 02	29	0.00±0.00	7.87±1.34	6.47±1.81

각 시기별 정량적인 설계 환기량 조건이 농도 발생에 미치는 영향에 대한 분석이 실시될 예정이다.

#### IV. 결론

본 연구는 축사표준설계도에 준하는 강제환기식 무창 육계 사육시설을 대상으로 입경별 미세먼지, 암모니아의 발생량 및 배출량 산정을 위한 기초 연구로서, 사육 시설 내부와 배기구 인근에서의 미세먼지 (PM<sub>10</sub>), 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>), 암모니아 (NH<sub>3</sub>) 및 근로자의 호흡기 건강을 고려한 산업안전 측면에서의 흡입성분진, 호흡성분진에 대한 계절별, 일령별, 지점별 측정 및 분석을 실시하였다.

국내·외 선행 연구 사례와 유사하게, 계사 내부보다 배기구 인근에서 상대적으로 높은 PM, NH<sub>3</sub> 농도 추이를 보였으

며, 이는 환기 설비 가동으로 내부에 형성된 유선을 따라 배기구 인근에서 입자상, 가스상 물질이 집적되기 때문이다. 일반적으로 모든 일령 구간에 대하여 하절기, 환절기, 동절기 순으로 측정 대상 물질의 농도가 높게 관측되었는데 이는 외기 온도 하락에 따라 내부 생육 적온 유지를 위하여 낮은 설계 환기량이 적용되어 외부로 오염물질의 배출이 원활히 실시되지 않는 것으로 판단할 수 있다.

근로자의 호흡기 질환 발생 가능성 여부와 관련되는 흡입성 및 호흡성 분진 농도의 경우, 유럽의 선행 연구 대비 20, 23% 수준으로 낮은 값이 관측되었다. 유럽의 선행 연구의 경우 주간 및 야간에 농도 측정을 실시하고 이에 대한 평균값을 제시하였는데, 본 연구에서는 닭이 비교적 활발한 운동성을 보이는 주간 시간대의 측정값이 제시되고 있어, 야간 시간대의 관측 결과를 포함할 경우, 보다 더 낮은 수준의 농도 값이

기대될 것이라 추정할 수 있다. 유럽 관측치 대비 낮은 수준의 농도 값을 보이는 데는 내부 온도, 습도와 같은 미기상, 미기상 상태를 결정하는 환기량, 급이, 급수와 같은 사양 관리 및 바닥재 관리 방식 등 다양하고 복합적인 영향 요소가 존재할 수 있다. 따라서, Kwon et al. (2016)의 사례와 같이 다수의 변수가 시설 내부의 입자상 혹은 가스상 물질의 농도에 미치는 상관관계에 대한 규명을 토대로 영향성 평가가 실시될 필요가 있다. 이는 추후 연구를 통해 별도로 기술될 예정이다.

근로자의 시설 내 출입에 따른 닭 활동성 증가시의 호흡기 높이에서의 분진 노출 수준의 경우, 낮은 설계 환기량이 적용되는 동절기에 가까울수록, 그리고 출하일령에 가까울수록 호흡기에 유해한 공기질이 형성되는 것으로 나타났으며, 모니터링 기간 중 동절기 29일령 조건 시 흡입성 분진의 경우 평균 2.71배, 호흡성 분진의 경우 평균 4.75배 기준치를 초과하는 것으로 산정되었다. 따라서 이와 같은 환경에 지속적으로 노출되는 근로자의 경우 만성 혹은 급성 호흡기 질환에 노출될 우려가 있어, 마스크와 같은 개인 보호구의 착용이 필수적으로 요구되는 것으로 판단할 수 있다. 더욱이, 해당 시기에 입경별 먼지와 함께 암모니아 농도 또한 축사 공기질 관리 기준인 25 ppm을 크게 상회하는 것으로 시설 내 출입 시 주의가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 측정된 강제환기식 무창 육계사 내의 계절별, 일령별, 지점별 PM 및 NH<sub>3</sub> 측정 결과를 통해 향후 그간 동시 측정된 환경 변수와의 상관관계 및 발생 기작 도출, 국가 배출계수 산정에 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ01424803)의 지원 사업과 2020년도 농촌진흥청 국립축산과학원 전문연구원 연수과정 지원사업에 의해 이루어진 것으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Battye, R., W. Battye, C. Overcash, and S. Fudge, 1994. Development and selection of ammonia emission factors final report. U.S. *Environmental Protection Agency*.
2. Cambra-Lopez, M., A. J. Aarnink, Y. Zhao, S. Calvet, and A. G. Torres, 2010. Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem. *Environmental Pollution* 158(1): 1-17. doi:

- 10.1016/j.envpol.2009.07.011.
3. Choi, H. C., G. Y. Yeon, J. I. Song, H. S. Kang, D. J. Kwon, and Y. H. Yoo, 2005. Seasonal dust concentration and characteristics of windowless broiler building. *Journal of Livestock Housing and Environment* 11(3): 197-206 (in Korean).
4. Donham, K. J., S. J. Reynolds, P. Whitten, J. A. Merchant, and L. Burmeister, 1995. Respiratory dysfunction in swine production facility worker: dose-response relationship of environmental exposure and pulmonary function. *American Journal in Medicine* 27: 405-418. doi:10.1002/ajim.4700270309.
5. Donham, K. J., and D. Cumro, 1999. Setting maximum dust exposure levels for people and animals in livestock facilities. *Aarhus, Dust Control in Animal Production Facilities* (Scandinavian Congress Center) 93-110.
6. Donham, K. J., D. Cumro, S. J. Reynolds, and J. A. Merchant, 2000. Dose response relationships between occupational aerosol exposures and cross-shift declines of lung function in poultry workers: recommendations for exposure limits. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 42(3): 260-269. doi: 10.1097/00043764-200003000-00006.
7. EEA(European Environment Agency), 2006. EMEP/CORINAIR Atmospheric emission Inventory guidebook, 3rd edition.
8. Harry, E. G., 1978. Air pollution in farm building and methods of control: a review. *Avian Pathology* 7: 441-454. doi:10.1080/03079457808418301.
9. Jo, G. G., T. W. Ha, S. H. Yoon, Y. N. Jang, and M. W. Jung, 2020. Comparison of regression models for estimating ventilation rate of mechanically ventilated swine farm. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(1): 61-70(in Korean). doi:10.5389/KSAE.2020.62.1.061.
10. Kemeny, D. M., 2000. The effects of pollutants on the allergic immune response. *Toxicology* 152: 3-12. doi: 10.1016/S0300-483X(00)00286-9.
11. Kim, H. A., J. Y. Kim, K. M. Shin, J. H. Jo, K. Roque, G. H. Jo, and Y. Heo, 2013. Relationship between Endotoxin level of in swine farm dust and cellular immunity of husbandry workers. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 23(4): 393-401 (in Korean). doi: 10.15269/JKSOEH.2013.23.4.393.
12. Kristensen, H. H., L. R. Burgess, T. G. H. Demmers, and



- C. M. Wathes, 2000. The preferences of laying hens for different concentrations of atmospheric ammonia. *Applied Animal Behaviour Science* 68: 307-318. doi:10.1016/S0168-1591(00)00110-6.
13. Kwon, K. S., Y. S. Jo, I. B. Lee, T. H. Ha, and S. W. Hong, 2014. Measurement of dust concentration in a mechanically ventilated broiler house and analysis of dust generation from ground beds. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 31-43 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.6.031.
14. Kwon, K. S., I. B. Lee, and T. H. Ha, 2016. Identification of key factors for dust generation in a nursery pig house and evaluation of dust reduction efficiency using a CFD technique. *Biosystems Engineering*, 151: 28-52. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.08.020.
15. Ministry of environment, Clean air policy support system. National air pollutants emission service.
16. National institute of environmental research, 2019. National air pollutants emission 2006.
17. Radon, K., C. Weber, M. Iversen, B. Danuser, S. Pedersen, and D. Nowak, 2001. Exposure assessment and lung function in pig and poultry farmers. *Occupational and Environmental Medicine* 58(6): 405-410. doi:10.1136/oem.58.6.405.
18. Takai, H., S. Pedersen, J. O. Johnsen, J. H. M. Metz, P. W. G. Groot Koerkamp, G. H. Uenk, V. R. Phillips, M. R. Holden, R. W. Sneath, J. L. Short, R. P. White, J. Hartung, J. Seedorf, M. Schroder, K. H. Linkert, and C. M. Wathes, 1998. Concentration and emissions of airborne dust in livestock buildings in northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70: 59-77. doi: 10.1006/jaer.1997.0280.