



유우사 내부 위치 및 작업 형태에 따른 분진 모니터링 및 분석

Analysis of Dust Concentration in Dairy Farm according to Sampling Location and Working Activities

박관용* · 권경석**† · 이인복* · 하태환* · 김락우* · 이민형*

Park, Gwanyong · Kwon, Kyeong-Seok · Lee, In-bok · Ha, Taehwan · Kim, Rack-Woo · Lee, Minhyung

Abstract

Organic dust generated inside livestock facilities includes toxic organic matters such as bacteria and endotoxin. Dust can cause respiratory disease for worker and livestock, and consequently, degradation of welfare and productivity. Influence of dust on livestock workers has been studied since the 1970s. However, exposure limit for cattle farmer has not been established, unlike exposure limit for pig and poultry farmer. Furthermore, study on air quality inside livestock facility, especially inside dairy farm has been rarely conducted in Korea. In this study, dust concentration of TSP, PM10, inhalable and respirable dust has been monitored in the commercial dairy house according to location and working activities. Bedding material inside the stall was one of the major sources of dust. The amount of dust was related to water content level of the bedding material. Dust concentration was relatively high in leeward location, and the highest concentration was measured during TMR mixing process. The maximum value of inhalable dust concentration was 29.1 times higher than the reference value as fine particles drop to the TMR mixer. Dust generated by TMR mixing was presumed to decrease by adjusting moisture and drop height of feed.

Keywords: Aerosol; Dairy cattle farm; Inhalable dust; PM10; Respirable dust; TSP

1. 서론

경제 성장과 국민 생활의 질적 향상, 식습관의 서구화로 인하여 축산물의 수요는 지속적으로 증가하였다. 이에 따라 대표적인 축산 분야인 양우 산업 역시 성장하였으며, 1인당 우유 소비량은 2005년 62.9 kg에서 2015년 75.7 kg으로 증가하였다(MAFRA, 2016). 그러나 구제역을 비롯한 가축 전염병의 지속적인 유행 및 농촌 인구의 노령화로 인하여 국내 낙농 산업의 여건은 악화되고 있다. 또한 가축 사육시설 및 가축분뇨 자원화 시설에서 발생하는 악취는 인근에 환경 및 관능적 공해를 유발하며, 국정과제로써 지속가능한 축산업 육성 사업이 추진됨에 따라(MAFRA, 2014) 환경 부담과 악취 배출 완화의 필요성이 대두되고 있다.

축산시설에서 발생하는 분진, 유해 가스, 각종 악취 성분 등은 심미적 불쾌감을 유발할 뿐만 아니라 작업자 및 가축의

건강을 저해하며 외부로 배출될 시 사회적 갈등을 유발한다. 특히 가축의 피부, 분변, 사료 입자 등에서 발생하는 유기 분진은 작업자의 호흡기를 자극하여 기관지 염증, 직업성 천식 등을 유발하며(Pearson et al., 1995; Donham et al., 2000), 가축의 질병 감염을 야기하여 사료 섭취량과 생산성을 감소시킨다(Harry, 1978; Kemeny, 2000). 또한 분진은 각종 질병을 유발하는 바이러스 등 생물학상 물질과 악취와 관련된 물질을 공기 중으로 수송하기 때문에, 외부로 배출 시 가축 전염병과 악취를 확산하는 매개체가 된다(Takai et al., 1998; Zucker et al., 2000).

축산시설에서 분진 노출 기준은 가축과 양계 시설 및 양돈 시설 작업자를 대상으로 제안된 바 있으나(CIGR, 1994; Donham & Reynolds, 1995; Donham et al., 2000), 양우 시설의 작업자를 대상으로 한 기준은 제시되지 않았다. 우사 작업자를 대상으로 한 노출 기준의 수립을 위해서는 우사의 분진 발생 특성과 위험성에 관한 연구가 선행되어야 한다. 무창 형태의 계사 또는 돈사와 달리 우사는 주로 개방된 형태이며, 따라서 위치에 따른 분진 농도의 편차가 상대적으로 크다. 이를 고려하여 우사의 분진 농도 평가를 위하여 Purdy et al. (2009), Gonzales et al. (2012), Topisirović et al. (2013)은 시설 내부 각 지점 및 주변 풍환경 분포에 따라 풍상, 풍하측으로 구분하여 위치별 분진 농도를 측정하였다. 또한 근로자의 호흡기 건강에 대한 영향 평가를 위하여 우사 내부뿐만 아니라 근로자의 거주지 내 거실과 침구류 등의 분진, 내독소, 알레르겐 농도가 측정된

* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

** Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration

† Corresponding author

Tel.: +82-10-7343-0418 Fax: +82-63-238-7431

E-mail: kskwon0512@korea.kr

Received: April 25, 2017

Revised: May 22, 2017

Accepted: May 22, 2017

바 있다(Berger et al., 2005; D'Ann et al., 2014; Böhländt et al., 2016). Razote et al. (2004; 2006), Baddock et al. (2011), Guo et al. (2011)은 소의 발굽 디딤(hoof action)에 의해 발생하는 분진 발생량을 바닥재의 특성에 따라 분석하였다. 자연 건조로 인하여 흡수비가 낮은 우사의 바닥재는 소의 활동에 의해 다량의 분진이 발생하기 때문에 우사 내 분진환경의 분석 시 바닥재의 특성과 가축의 활동성을 고려해야한다.

국내 양우시설의 근로자 작업 환경 개선과 생산성 향상을 위해서는 분진 발생 저감을 위한 선행연구로서 시설 내 분진 농도 평가와 발생 특성에 대한 연구가 이루어져야 할 필요성이 있다. 그러나 국내 축산시설의 분진 환경에 대한 연구는 돈사(Yoo et al., 2003; Kwon et al., 2013; 2016) 및 계사(Shin et al., 2004; Choi et al., 2006; Kwon et al., 2014; Jo et al., 2015)를 대상으로 시행된 바 있으나 우사를 대상으로 한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 대표적인 양우시설인 유우사를 대상으로 분진 환경을 평가 및 분석하고자 하였다. 위치 및 작업 형태에 따라 입경별 분진 농도에 대한 모니터링을 실시하였으며, 환경 변수에 따른 분석을 시도하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 대상 시설

본 연구에서는 국내 대표적인 유형의 양우 시설로서 경기도 화성시 우정읍에 위치한 유우사를 실험 대상으로 선정하여 정기적인 분진 모니터링을 실시하였다 (Fig. 1).

실험 유우사 농장은 총 길이 62.0 m, 폭 40.0 m, 측고 3.9 m, 동고 5.5 m 규모로 농장 입구 인근에 착유 시설 (90 m²)이 위치하며 착유 시설이 위치한 서쪽 구획에 착유사가, 반대쪽 동

쪽 구획에 육성우사가 위치한다. 실험 기간 동안 총 145 두(착유우 60 두, 송아지 85 두)에 대한 사육을 실시하고 있으며 일당 우유 생산량은 약 2.3 m³ 규모이다. 윈치커튼 개방에 따른 자연 환기 방식을 기본적으로 운영하되 동절기 혹한기 일부에 대하여 윈치 커튼을 폐쇄하여 차가운 외기의 유입을 방지하고 있다. 하절기 분진 및 가스의 원활한 배출 및 동물군의 체감 온도 저감을 위하여 직경 1.0 m (22,500 CMH) 크기의 환기팬이 지붕 경사면을 따라 총 30대 설치되어 있다. 환기팬은 착유 작업 종료 이후 실시되는 착유사의 물청소 직후 가동된다. 분뇨 처리는 6개월 당 1~2회 정도 실시한다. 바닥의 깔짚은 1년에 5~6회 교체 작업을 실시하며 주로 겨울철에 실시한다. 착유 작업은 일당 2회(오전 6시, 오후 5시) 약 2시간 동안 진행되며, 착유 작업 종료 후 착유사의 물청소 작업이 오전 8시와 오후 7시 경에 실시된다. 사료 TMR (Total mixed ration)의 혼합 및 급이는 오전 7시 및 오후 5시 30분(오후의 경우 급이만 실시)에 실시된다. TMR 배합기는 레일형으로 농장 입구 인근에 설치되어 있으며 배합이 완료된 후 레일을 따라 자동으로 양측 우사 급이부에 사료가 투입된다.

2. 측정 대상 분진

분진은 대기환경 분야와 산업보건 분야의 기준에 따라 입경별로 분류할 수 있다. 대기환경 분야에서는 공기 질을 평가하기 위한 척도로 TSP, PM10과 같은 개념을 주로 사용한다(US EPA, 2001). TSP는 일반적으로 대기 중에 부유하는 모든 입경의 분진을 의미한다. PM10은 공기역학적 직경(AED, Aerodynamic diameter)을 기준으로 한 포집 장비의 분리 직경(cut-off diameter) 10 μm에 대하여 TSP 대비 50%의 포집 효율을 보이는 입자를 의미한다(Kwon et al., 2016).

ISO (1995)에서는 산업보건 분야와 관련하여 분진을 인체 내 거동과 침투 깊이를 기준으로 정의하고 있다. 흡입성 분진



(a) Aerial view



(b) Frontal view

Fig. 1 Aerial and frontal view of experimental dairy cattle farm

(Inhalable dust)은 사람의 호흡 과정에서 코와 목 등과 같은 상기도 부위에 침착되는 분진을, 호흡성 분진 (Respirable dust)은 후두부 이하 폐포 등에까지 침착되는 분진을 의미한다 (Cambra-Lopez et al., 2010). 흡입성 분진은 0~100 μm의 입경 범위를 가지고 100 μm의 입경에서 상기도 부위에 대해 50% 호흡기 침착률을 보이며, 호흡성 분진은 0~10 μm의 입경 범위를 가지고 평균 직경 4 μm에 대하여 폐포에서 50% 침착률을 보인다. Cambra-Lopez et al. (2010)는 흡입성 분진의 경우 TSP와, 호흡성 분진의 경우 PM4나 PM5와 그 입경 범위와 거동이 유사하다고 지적한 바 있다.

Table 1은 가축 사육 시설 내에서 노출 대상에 따른 흡입성 분진과 호흡성 분진의 허용 농도를 나타낸다. 현재 양돈 및 양계 시설에 대해서는 분진 노출에 따른 작업자의 폐기능 악화를 고려한 분진의 허용 노출이 제시되어 있으나 우사의 경우 관련 연구가 미진한 실정이다.

3. 실험 장비

TSP 및 PM10의 포집을 위하여 PTFE 멤브레인 필터 (SKC Inc., Eighty Four, PA, USA)를 이용하였다. 해당 필터는 TSP 포집을 위하여 3단 폴리스틸렌 카세트에, PM10 포집을 위하여 PEM (Personal Environmental Monitor, SKC Inc.)에 삽입되었다. PEM 기기의 분리 직경은 10 μm로, 해당 직경 이하의 입자가 PEM 기기 내부 PTFE 필터에 포집된다. 3단 카세트 및 PEM 기기는 공기의 흡입을 위한 air-sampler (AirChek XR5000, SKC Inc.) 펌프에 연결하였다. TSP 및 PM10 분진의 농도 산정은 중량법에 의해 실시하였으며 각 분진의 포집 전후 필터 무게는 완전 건조 후 감도 0.01 mg의 전자저울 (Ohaus Discovery balance DVG214C, Ohaus Co.)을 이용하여 칭량을 실시하였다.

흡입성 및 호흡성 분진의 농도는 Aerosol spectrometer (Model 1.109; GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.)를 이용하여 실험 상황에 따른 실시간 측정을 실시하였다. 해당 기기는 자체 내장된 펌프를 이용하여 공기 중 분진을 챔버 내로 흡입하고 레이저 회절을 통해 각 입경별 분진의 농도 및 개

수 농도를 산정한다. 측정 감도는 0.001 mg 수준이며 측정 범위는 0.001~100 mg/m³이다. 최소 6초 간격의 실시간 측정이 가능하며 데이터는 내장된 메모리 카드에 저장된다.

환경 변수에 따른 축산 시설 내 분진 발생 양상 파악 및 발생 메커니즘 규명을 위하여 다양한 실험 장비를 이용한 모니터링을 실시하였다. 시설 내부 상대습도 및 내부 온도의 경우 HOBO 센서 (UX100-003, Onset Computer Co., Bourne, MA, USA)를 이용하여 측정하였다. 외부 풍향, 풍속, 일사량, 강수량, 외부 기온, 외부 습도 등과 같은 기상 자료 확보를 위하여 간이 기상대 (WatchDog 2700, Spectrum Tech, Inc., Aurora, IL, USA)를 이용하였다.

4. 분진 농도 모니터링

실험 유우사를 대상으로 분진 및 환경 변수에 대한 모니터링을 2015년 6월부터 2016년까지 정기적으로 실시하였다. TSP 및 PM10의 경우 지역 시료 형태로 8시간 장시간 포집을 실시하였다. 추가적으로 각 실험 농장 내 작업 현황에 따라 TMR 배합과 착유 작업 등에 대하여 2시간 포집을 실시하였다. 24시간 완전 건조된 PTFE 필터는 TSP 포집을 위한 3단 카세트 및 PM10 포집을 위한 PEM 기기 내부에 삽입하였으며, air-sampler를 이용하여 각각 2, 4 l/min의 유량으로 해당 분진의 포집을 실시하였다. 모든 TSP, PM10 포집 장비는 작업자의 평균 호흡기 높이를 고려하여 바닥으로부터 1.5 m 높이에서 실시하였다.

실험 유우사 내부 총 9개 지점을 선정하여 TSP 및 PM10 시료의 포집을 실시하였다 (Fig. 2). 농장 인근에 위치한 기상 관

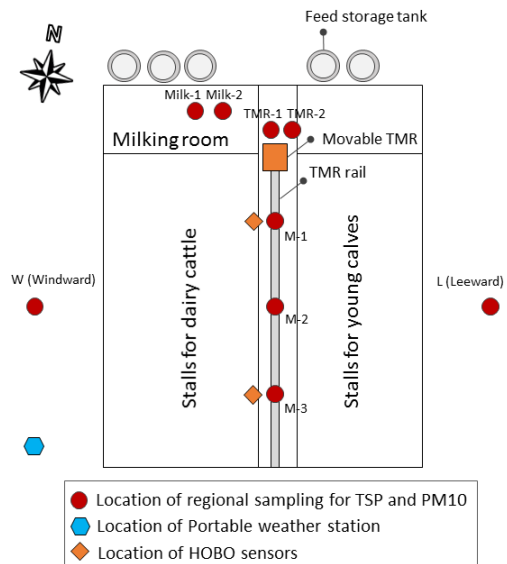


Fig. 2 Location of regional dust and environmental condition monitoring

Table 1 Occupational exposure limit of inhalable and respirable dust for livestock farmer and livestock (unit: mg/m³)

	Inhalable dust	Respirable dust
Pig farmer (Donham & Reynolds, 1995; Reynolds et al., 1996)	2.5	0.23
Poultry farmer (Donham et al., 2000)	2.4	0.16
Livestock (CIGR, 1994)	3.7	0.23

측소(수원 기상대)의 최근 10년간 풍환경 사전 분석 결과에 따라 각각 풍상측 및 풍하측 지점을 결정하였으며 각 지점에는 TSP와 PM10 포집을 위한 air-sampler set를 1개씩 설치하였고, 농장 중앙 복도에 일정 간격으로 3개 지점을 선정하여 총 5개 지점에 대하여 8시간 장시간 포집을 실시하였다(Fig. 3 (a)). 추가적으로 오전 중 착유 작업 및 TMR 배합이 진행되는 2시간에 대하여 착유실 내 2개 지점, TMR 기기 인근 2개

지점을 선정하여 포집 실험을 실시하였다. 착유실 내부에서의 TSP 및 PM10의 포집 모습은 Fig. 3 (b)와 같다.

흡입성 및 호흡성 분진에 대한 측정은 Aerosol spectrometer를 이용하여 작업자의 평균 호흡기 높이를 고려하여 바닥으로부터 1.5 m 높이에서 실시하였으며 TMR 배합, 착유, 바닥 청소 등과 같은 작업 일정에 따른 분진 발생 수준을 측정하고자 하였다. 특히 TMR 배합의 경우 사료 투입 방식, 벧짚, 옥수수 및 각종 첨가제 등과 같은 사료 종류 등에 따라 세분화하여 TMR 기기 주변에서 비산되는 공기 중 분진 농도를 측정하였다. 각 샘플은 5~10분간 획득하였으며 샘플링 간격은 6초로 설정하였다. Fig. 3 (c)는 TMR 배합기에 사료 공급 시 흡입성 및 호흡성 분진의 실시간 측정 장면이다. 한편 양우 시설 작업 종사자를 대상으로 한 분진의 허용노출기준은 현재까지 제시되지 않았기 때문에 본 연구에서는 Donham & Reynolds (1995)가 제시한 양돈 시설 작업자의 폐 기능과 관련한 분진의 허용노출기준(Table 1)을 참고하여 측정 분진환경의 위해성 분석을 실시하였다.

내부 온도 및 습도 자료 확보를 위하여 HOBO 센서를 시설 중앙부에 2개씩 설치하였으며 데이터는 5초 간격으로 기록하였다. 실험 농장 인근 개활지에 간이 기상대를 설치하여 풍향, 풍속, 온도, 습도, 일사량, 강수량 등에 대한 외부 기상 자료를 확보하였다. 또한 농장에서 사용되는 사료 입자를 샘플링하여 체가름시험법(KS F2502)과 Malvern Mastersizer(MS3000, Malvern Instrument Ltd., UK)를 통하여 각 사료의 평균 입경을 산정하고 TMR 배합 시 주변으로 비산하는 분진 농도와와의 관계를 규명하고자 하였다.



(a) Measuring at aisle (b) Measuring at milking room



(c) Measuring during TMR mixing process

Fig. 3 Measuring of (a) TSP, PM10, inhalable and respirable dust at aisle, (b) TSP and PM10 at milking room, (c) inhalable and respirable dust during TMR mixing process

III. 결과 및 고찰

1. TSP 및 PM10 농도 모니터링 결과

Table 2는 실험 유우사 내부의 중앙 복도와 TMR 배합기

Table 2 TSP and PM10 concentration according to the locations in experimental dairy cattle farm (unit: mg/m³)

Date	Aisle		TMR mixing		Milking processing	
	TSP	PM10	TSP	PM10	TSP	PM10
Jun. 23, 2015	0.11±0.01	0.09	0.79±0.26	0.46±0.10	0.14±0.04	0.14±0.05
Jul. 13, 2015	0.07±0.01	0.07	0.38±0.05	0.05±0.00	0.09	0.09
Aug. 7, 2015	0.13±0.04	0.0±70.06	0.41±0.25	0.07±0.03	0.07±0.06	0.06±0.07
Aug. 21, 2015	0.02±0.01	-	0.15±0.07	0.05±0.02	0.07±0.07	0.02±0.02
Oct. 5, 2015	0.08±0.04	0.06±0.02	0.18	0.07	0.12±0.00	0.07±0.01
Oct. 6, 2015	0.08±0.03	0.07	0.27±0.15	0.19	0.27±0.03	0.19±0.06
Aug. 19, 2016	0.11±0.01	0.10±0.03	0.50±0.00	0.32±0.06	0.11±0.07	0.09±0.01
Sep. 7, 2016	0.04±0.01	0.04±0.00	0.14±0.08	0.04±0.01	0.11±0.05	0.02±0.02

인근, 착유사 내부에서 측정된 TSP 및 PM10 농도에 대한 결과 요약이다.

실험 대상지의 TSP 및 PM10 농도 측정 결과 TMR 배합 작업 시 인근에서 측정된 일부 결과를 제외하면 국내 양계 및 양돈 시설에서 측정된 결과에 비하여 낮은 수준의 분진이 관측되었다 (Table 3). 대상 유우사에서 측정된 평균 PM10 농도는 0.08 mg/m³으로 본 연구진이 국내 대표적인 강제환기식 계사(Kwon et al., 2014) 및 윈치커튼식 계사(Jo et al., 2015)에서 측정된 수치의 각각 8.0%, 10.3% 수준이었으며, 비육돈사(Kwon et al., 2013)의 19.5%에 해당하는 수치이다. Takai et al. (1998)에 따르면 유럽 축산시설의 분진 농도 측정 결과 우사의 평균 호흡성 분진 농도는 계사의 13.0%, 돈사의 30.4%에 해당하는 0.07 mg/m³로 나타났으며, 이러한 경향은 본 연구의 측정 결과와 유사한 것으로 판단되었다. 이러한 경향은 양우 시설이 양계 및 양돈 시설에 비하여 개방된 구조를 가지기 때문에 상대적으로 내부에 분진의 배출이 용이하기 때문으로 판단된다.

실험 농장 인근 개활지에 설치한 간이 기상대로부터 획득한 풍환경 자료를 토대로 풍빈도 분석 결과, 실험 유우사의 경우 우세풍은 서풍 계열에 해당했다. 2015년 6월 풍상측 분진 농도를 기준으로 풍하측 TSP의 경우 약 3.29배 수준인 0.46 mg/m³, 풍하측 PM10의 경우 약 2.75배 수준인 0.11 mg/m³

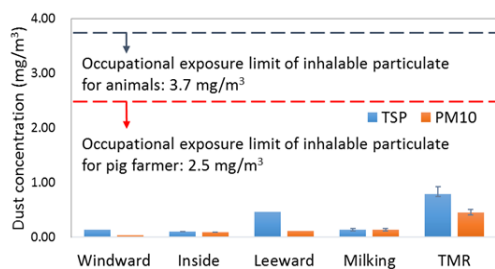
의 농도가 관측되었다 (Fig. 4 (a)). 2015년 10월 풍하측 농도의 경우 (Fig. 4 (b)), 풍상측 대비 TSP, PM10 분진 농도가 각각 약 9.11 배 (0.82 mg/m³), 4.00배 (0.28 mg/m³) 높은 값이 관측되었다. 이는 Purdy et al. (2009) 등 우사를 대상으로 한 선행연구에서 보고된 경향과 일치한다. 복도를 사이에 두고 풍상측 인근에 위치한 젖소사(stalls for dairy cattle)는 바닥이 콘크리트로 덮여있으며 착유작업 이후 실시하는 물청소로 인해 대부분의 경우 바닥이 습윤한 상태이다. 반면 풍하측 인근의 육성우사(stalls for young calves)는 톱밥, 마른 분변과 점토질 흙으로 이루어져 있으며 육성우가 바닥에 발굽을 디을 때 다량의 분진이 비산하는 현상이 육안으로 관측되었다. 이로 인해 발생한 분진의 확산 작용 역시 풍하측의 높은 분진 농도에 기여하였을 것으로 추측할 수 있다.

한편, 2015년 10월 풍하측에서 측정된 TSP 및 PM10 분진 농도는 2015년 6월 동일 지점에서 측정된 분진 농도 대비 각각 178%, 254% 높은 값을 보였다. 각 실험 당시 환경 인자에 대한 측정 결과를 비교하면 2015년 6월의 경우 평균 온도는 27.7 °C, 평균 상대 습도는 71.2%이었으며, 2015년 10월의 경우 평균 온도는 19.6 °C, 평균 상대 습도는 55.7%이었다. 2015년 10월의 경우 오후 1시 이후 실험 유우사 내부 상대 습도가 30% 전후로 측정되어 분진이 비산하기 용이한 건조한 환경이 조성되었을 것으로 추정할 수 있다. 또한 해당 실험일의 경우, 임신 젖소의 분만으로 인하여 수의사 및 근로자가 자주 육성우사 내부로 출입함에 따라 소들의 잦은 발굽 디딤 행위가 발생하였으며, 이로 인하여 다량의 분진이 공기 중으로 비산하는 현상이 목격되었다. 상기 결과로부터 실험 유우사의 풍하측 인근 지역에서 시설물 관리와 같은 작업 시 호흡기에 유해한 환경에 조성될 확률이 높을 것이라 추정할 수 있다.

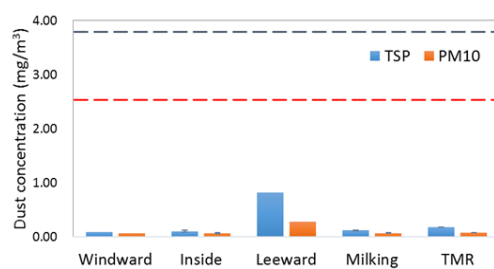
2015년 6월 실험 중 가장 높은 분진 농도가 관측된 지점은 TMR 기기 인근으로 TSP는 0.79 mg/m³, PM10는 0.46 mg/m³의 값을 보였으며 이는 착유사 내부 측정치 대비 각각 5.64배, 3.29배 수준이었다. 한편, 착유사 내부 TSP, PM10 분진 농도의 경우 0.14 mg/m³, 0.14 mg/m³로 상대적으로 낮은 값이 관

Table 3 Mean TSP and PM10 concentration in Korean livestock houses (unit: mg/m³)

Livestock house	TSP	PM10
Dairy cattle farm	0.09±0.05	0.08±0.02
Mechanically ventilated broiler house (Kwon et al., 2014)	1.29±1.02	1.00±0.78
Naturally ventilated broiler house (Jo et al., 2015)	1.14±0.62	0.78±0.64
Nursery pig house (Kwon et al., 2016)	1.15±0.48	0.63±0.32
Fattening pig house (Kwon et al., 2013)	0.61±0.28	0.41±0.18



(a) Measured at June 2015



(b) Measured at October 2015

Fig. 4 Examples of TSP and PM10 concentration according to location

측되었는데 이는 착유사 내부 습윤한 공기 상태와 밀접한 관련이 있을 것이라 추정된다. 예를 들어 2015년 6월 착유사 내부 평균 상대 습도는 93.7% 수준이었으며, 이는 각 개체의 착유 전후 물 세척에 의한 영향으로 판단할 수 있다. 타 실험 시기의 착유사 내 분진 농도 측정 결과 또한 유사한 농도 분포를 보이는 것으로 나타났다.

2. 흡입성 및 호흡성 분진 농도 모니터링 결과

Table 4는 대상 시설의 측정 지점별 호흡성 및 흡입성 분진 농도의 측정 결과이다. 앞선 TSP, PM10 측정 결과에서 제시

된 바와 같이 풍하측 흡입성 분진의 경우 풍상측 측정치 대비 각각 53.4배, 19.7배 높은 값을 보이는 것으로 관측되었으나 호흡성 분진의 경우 풍상측 및 풍하측 측정치 간 유의미한 차이를 보이지 않았다 (2015년 7월, 풍상측: 0.04 mg/m³, 풍하측: 0.06 mg/m³, 2015년 8월, 풍상측: 0.02 mg/m³, 풍하측: 0.04 mg/m³). 측정별 자료의 경우, 육성우사 내부에서 가장 고농도의 분진 환경이 관측되었다. Fig. 5 (a), (b)에 제시된 바와 같이 2015년 7월 실험의 경우 육성우사 내부의 흡입성 및 호흡성 분진의 경우 복도 측 작업자 호흡기 높이 측정치 대비 각각 126.1배, 8.75배 높은 수준의 농도가 관측되었다. 이는

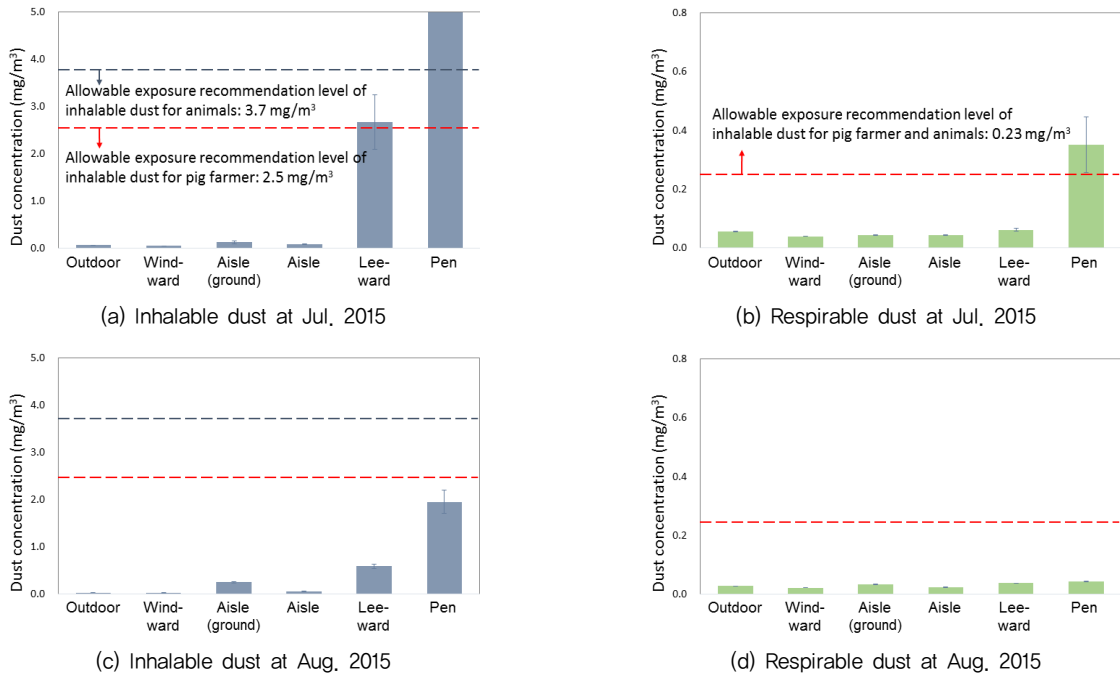


Fig. 5 Examples of inhalable and respirable dust concentration according to location

Table 4 Inhalable and respirable dust concentration according to location in experimental dairy cattle farm (unit: mg/m³)

Date	Middle passage		Windward location		Leeward location	
	Inh.	Res.	Inh.	Res.	Inh.	Res.
Jun. 23, 2015	0.08±0.01	0.05±0.00	0.06±0.01	0.05±0.00	2.74±1.51	0.05±0.01
Jul. 13, 2015	0.00±0.00	0.00±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.26±0.02	0.07±0.00
Aug. 7, 2015	0.07±0.00	0.06±0.00	0.09±0.02	0.06±0.00	0.17±0.03	0.03±0.00
Aug. 21, 2015	0.06±0.01	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	0.61±0.08	0.04±0.00
Oct. 5, 2015	0.24±0.05	0.04±0.00	0.06±0.01	0.03±0.00	1.23±0.12	0.01±0.00
Oct. 6, 2015	0.24±0.04	0.03±0.00	0.04±0.00	0.03±0.00	1.66±0.12	0.03±0.00
Aug. 19, 2016	0.15±0.04	0.09±0.00	0.09±0.00	0.08±0.00	0.56±0.25	0.11±0.03
Sep. 7, 2016	0.14±0.03	0.09±0.00	0.08±0.00	0.08±0.00	1.20±0.74	0.06±0.02
Sep. 8, 2016	0.17±0.04	0.07±0.00	0.10±0.01	0.07±0.00	0.43±0.27	0.07±0.00

* Inh. = Inhalable dust; Res. = Respirable dust

육성우사 바닥의 경우 부드러운 톱밥, 건조된 분변, 흙 등으로 덮여 있으며 소의 잣은 발 디딤 행위로 인하여 다량의 분진이 공기 중으로 비산하는 결과로 판단된다. 흡입성 분진의 실시간 측정 자료의 경우 시간의 흐름에 따라 농도의 변동 폭이 크게 관측되었는데 이는 Pearson & Sharples (1995)이 보고한 바와 같이, 상대적으로 입경이 큰 분진일수록 동물의 활동에 따른 영향성이 두드러지기 때문이다.

양돈 시설 작업자의 폐 기능을 고려한 분진의 허용노출기준과 비교하여, 2015년 7월 실험 결과의 경우 풍하측 ($2.67 \pm 1.15 \text{ mg/m}^3$) 및 육성우사 내부 ($10.09 \pm 2.51 \text{ mg/m}^3$)에서 측정된 흡입성 분진의 경우 기준치 대비 각각 1.07배, 4.04배 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 육성우사 내부 흡입성 분진 측정치의 경우 동물 호흡기 관련 기준치 (CIGR, 1994)를 2.72배 초과하였으며, 동일한 시기에 측정된 호흡성 분진의 경우 육성우사 내부 측정치는 $0.35 \pm 0.19 \text{ mg/m}^3$ 수준으로 작업자 관련 기준치 대비 1.52배 초과하였다. 반면 2015년 8월 측정치의 경우 작업자 및 동물 관련 기준치를 초과하는 사례가 관측되지 않았다.

Fig. 6은 전 실험 기간에 대하여 풍하측 및 육성우사 내부 흡입성 및 호흡성 분진 농도 측정치 대비 바닥재의 평균 함수비에 대한 관계를 도시하고 있다. 풍하측 및 육성우사 내부에서 측정된 흡입성 분진의 경우 바닥재 함수비에 대하여 역선형 관계를 보이는 것으로 나타났으며 이때 각 R^2 는 0.44, 0.67 수준으로 산정되었다. 반면 호흡성 분진의 경우 함수비에 대

하여 특이 경향을 보이지 않는 것으로 관측되었다 ($R^2=1.0e-05, 0.21$). 해당 결과는 바닥재의 함수비 관리를 통한 내부 분진 농도 및 배출량의 관리 가능성을 시사하나, 앞서 기술한 바와 같이 바닥재의 수분 함량 증가는 내독소를 포함한 각종 미생물의 증식과 밀접한 관련이 있으므로 바닥재 수분 함량 증가에 따른 동물 및 작업자 호흡기 건강과 관련한 화학적, 생물학적 규명이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 한편 양계 시설 바닥재의 경우 실험을 통해 흡입성 분진이 더 이상 발생하지 않는 임계 함수비가 약 45% 수준으로 산정된 바 있으나 (Kwon et al., 2014), 실험 유우사의 경우 70% 수준으로 산정되었다. 양계 시설 바닥재는 왕겨와 같이 상대적으로 입경이 큰 입자상 물질들로 구성되어 있는 반면 유우사 바닥재의 경우 톱밥, 건조 분변 등과 같이 상대적으로 미세한 입경의 입자상 물질로 구성되어 있다. 따라서 바닥재를 구성하고 있는 물질의 입경 및 조성비가 함수비에 따른 분진 비산 정도에 큰 영향을 미쳤을 것이라 추정할 수 있다. 또한 유우사 실험 결과의 경우 바닥재 및 동물에 의한 영향성이 모두 통제되지 않은 현장에서의 측정값이라는 상황을 고려할 때, 바닥재를 구성하고 있는 입자상 물질의 물리적, 화학적 특성 등에 따른 분진 비산과의 관련성 규명을 위한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 작업 형태에 따른 분진 모니터링 주요 결과

Table 5는 실험 유우사의 TMR 배합 사료 종류별 평균 직경 (d_{50})을 나타낸다. 펠릿이나 벧짚 등과 같이 구의 형태가 아

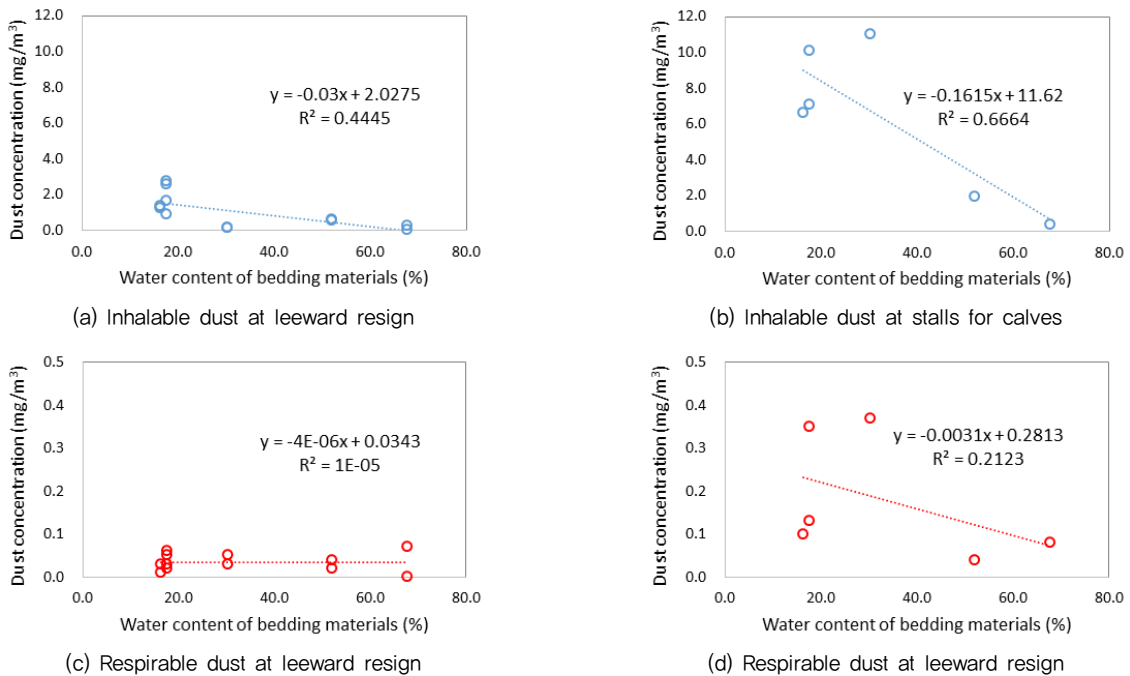


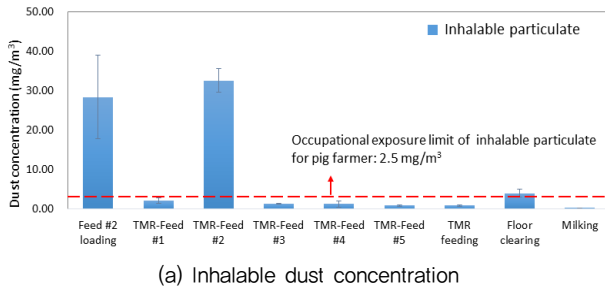
Fig. 6 Correlation between moisture content of bedding material and inhalable and respirable dust concentration according to location

Table 5 Composition and median diameter (d_{50}) of TMR of experimental dairy cattle farm

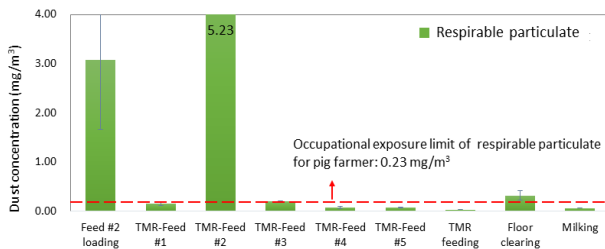
No.	Type	Information	d_{50} (mm)
#1	Rice straw	Dried rice straw	2.77 *
#2	Additives	Silicate / Sodium / Probiotics	0.06 / 0.06 / 0.38
#3	Corn	Feed components	6.58
#4	Mixture of rice straw, corn and beans	Feed materials for mature dairy cattle	-
#5	Cotton seed hull pellet	Feed components	342.3 **

* Mean length of randomly sampled fragment of rice straws

** Mean length of randomly sampled pellets



(a) Inhalable dust concentration



(b) Respirable dust concentration

Fig. 7 Maximum inhalable and respirable dust concentration according to working activities feed materials during TMR mixing process

닌 사료의 경우 각 사료 조각의 길이를 측정하여 산술평균을 실시하였다.

Fig. 7, Table 6은 실험 유우사 전 실험 기간 동안 측정된 TMR 관련 작업 시 흡입성 및 호흡성 분진에 대한 측정 결과이다. Fig. 7은 전 실험 기간 동안 측정된 자료 중 각 작업별 분진 농도의 최댓값을 기준으로 작성되었다. TMR 관련 작업 시, #2 사료 관련 작업, 예를 들어 손수레에 분말 형태의 각 사료를 선적하는 작업 ($28.39 \pm 21.17 \text{ mg/m}^3$) 및 TMR 기기 내 공급 작업 ($32.54 \pm 5.99 \text{ mg/m}^3$) 시 상대적으로 높은 수준의 흡입성 분진이 발생하는 것으로 관측되었다. 해당 작업의 경우 양돈 시설 작업자에 대한 분진의 허용노출기준에 대하여 각각 11.4배, 13.0배 초과하는 것으로 산정되었다. 호흡성 분진의 경우 양돈 시설 작업자에 대한 허용노출기준 대비 각각 13.4배 ($3.08 \pm 2.83 \text{ mg/m}^3$), 22.7배 ($5.23 \pm 1.45 \text{ mg/m}^3$) 초과

Table 6 Inhalable and respirable dust concentration according to feed materials during TMR mixing process and working activities (unit: mg/m^3)

Working activities	Inhalable dust		Respirable dust	
	Mean	Max	Mean	Max
#2 loading	28.42 ± 1.2	78.78	3.08 ± 2.83	10.59
#1 feed	2.1 ± 1.2	3.64	0.15 ± 0.08	0.25
#2 feed	32.5 ± 6.0	39.83	5.23 ± 1.45	7.33
#3 feed	1.3 ± 0.2	1.97	0.20 ± 0.03	0.26
#4 feed	1.3 ± 1.6	6.21	0.07 ± 0.06	0.3
#5 feed	0.9 ± 0.4	1.61	0.07 ± 0.01	0.09
TMR feeding	0.8 ± 0.4	1.44	0.03 ± 0.01	0.04
Floor clearing	4.0 ± 2.0	8.12	0.31 ± 0.19	0.73
Milking	0.2 ± 0.1	0.35	0.06 ± 0.00	0.07

하는 것으로 관측되었다. #2 사료 ($< 0.38 \mu\text{m}$)와 같이 상대적으로 평균 입径의 크기가 작은 사료를 대상으로 한 작업 시 육안으로 관측될 정도로 공기 중으로 분진이 비산되는 현상이 관측되었으며 실제 농도 수준 또한 허용 노출 기준을 쉽게 초과하는 것으로 나타났다. 반면, 상대적으로 입径의 크기가 큰 #1, #3, #4, #5 사료 관련 작업 시 일부 순간 농도의 경우 허용 노출기준을 초과하는 사례가 관측되었으나, 평균 농도를 산정할 경우 흡입성 분진 및 호흡성 분진 모두 기준치를 초과하지 않다. TMR 배합 작업 후 근로자는 약 5~10분간 바닥에 떨어진 사료 잔여물에 대하여 빗자루 청소를 실시한다. 전 실험 기간 동안 바닥 청소 작업 시 흡입성 분진의 평균 농도는 $4.00 \pm 1.98 \text{ mg/m}^3$ 로 허용노출기준 대비 1.6배 초과하였으며, 호흡성 분진의 경우 $0.31 \pm 0.19 \text{ mg/m}^3$ 로 1.3배 가량 초과하는 것으로 나타났다. 착유 작업의 경우 흡입성 분진의 최대 농도는 0.35 mg/m^3 , 호흡성 분진의 최대 농도는 0.07 mg/m^3 수준으로 관측되었다. 앞서 언급한 바와 같이 착유 작업 전후 잦은 물 세척 작업으로 인하여 착유사내 상대 습도가 90% 이상 조성되었기 때문에 분진 발생 확률이 극히 낮았을 것이라 추정할 수 있다.

지역별 흡입성 및 호흡성 분진에 대한 측정 결과와는 달리 작업 형태에 따른 분진 농도의 경우, 앞서 기술한 바와 같이 특정 작업 시 분진 허용농출기준을 쉽게 초과하는 사례가 관측되었다. 특히 평균 입경이 작은 #2 사료 관련 작업 시 상대적으로 높은 수준의 분진 환경이 조성되었으며, 작업 과정에서 2명의 농장 근로자가 잦은 기침 및 가래와 같은 증세를 보였다. 대부분의 사료 관련 작업 시 측정된 분진의 농도는 국내 비육돈사에서 사료 공급 시 측정된 흡입성 분진 ($0.714\sim 8.824\text{ mg/m}^3$) 및 호흡성 분진 농도 ($0.043\sim 0.982\text{ mg/m}^3$)에 비해 낮은 수준인 반면, #2 사료 작업 시 측정된 분진 농도는 해당 수치를 상회한다 (Kwon et al., 2013). 돈사에서 공급하는 사료는 펠렛 형태로서 입경이 상대적으로 일정한 반면, 우사의 경우 다양한 종류의 사료를 혼합함에 따라 분진 농도의 편차가 발생하는 것으로 분석된다. 사료 공급이 자동화된 돈사와 계사의 급이 시설과 달리 우사의 TMR 배합기는 작업자가 직접 사료를 공급해야 하며 이 과정에서 분진에 대한 노출의 위험성이 존재한다. 따라서 상대적으로 입경이 작은 사료의 TMR 배합 작업 시 마스크 등과 같은 개인 보호구의 착용이 필수적으로 권고되어야 할 것으로 판단된다.

대상 시설에서 사용된 TMR 배합기는 컨베이어 벨트를 통해 사료를 배합부에 투하하는 구조이다 (Fig. 3 (c)). 사료의 배합 작업 중 컨베이어 벨트에서 배합기 내부로 사료가 투하되는 과정에서 비산된 분진이 주변으로 확산되는 현상이 육안으로 관측되었다. 따라서 투하 부분 주변 덮개의 설치와 컨베이어 벨트로 인한 낙하 높이의 조절을 통하여 비산되는 분진의 농도를 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 대상 농가에서는 하절기에 TMR 배합 과정 중 물에 용해한 포도당을 배합기 내부에 스프레이 형태로 공급하였으며, 그에 따라 분진 발생량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 TMR 배합 과정 시 스프레이 등을 이용한 액적 살포 등과 같은 조치를 취할 경우 작업 환경 및 공기 질 개선에 효과적인 것이라 판단할 수 있다. 그러나 해당 방안의 경우 생물학적, 화학적 안정성 등을 고려하고 낙하거리, 적정 수분 공급량, 살포 방법, 스프레이 방식 등과 같이 다양한 환경 변수에 대하여 공학적인 접근 및 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 양우 시설 내 분진 환경과 작업자를 대상으로 한 위해성의 평가를 위한 기초 연구로서 유우사를 대상으로 위치와 작업 형태에 따른 분진 농도 모니터링을 실시하였으며, Donham & Reynolds (1995)가 제시한 돈사 작업자 대상 분진 노출 기준 및 국내 돈사와 계사 측정 결과를 통하여 분

석을 시도하였다. 대상 시설 내부 위치에 따라 대기환경 기준 및 산업보건 기준에 따른 농도를 측정된 결과, 돈사 및 계사에서 측정된 분진 농도에 비하여 전반적으로 낮은 농도가 나타났다. 그러나 TMR 배합기와 우사 내부 등 특정 위치에서 돈사 작업자 대상 분진 기준치를 초과하는 농도가 측정되었다. 축사 내부의 경우 건조한 톱밥 및 분변으로 구성된 바닥재 표면에서 소의 발굽 디딤에 의해 발생한 분진의 영향으로 분석된다. 이러한 바닥재에서의 분진 발생은 바닥재의 함수비와 입경의 영향을 받는 것으로 추정된다.

대상지의 풍환경 분석을 통해 도출된 풍하측의 경우 풍상측 및 축사 내부의 분진이 유입됨에 따라 상대적으로 높은 수준의 분진이 측정되었다. 이에 따라 축사 시설의 분진 환경에 대한 평가 시 공기역학적 분석이 필요한 것으로 판단된다. 전산유체역학을 통하여 시설 내의 유동장의 형성과 분진 입자의 수송에 대한 해석을 수행할 경우 내부 분진의 분포와 인근 지역으로의 확산을 예측할 수 있다. 또한 대상지의 환기량 파악을 통해 분진 배출량에 대한 정량적 평가가 가능할 것으로 기대된다.

작업 형태에 따른 산업보건 기준 분진 농도의 측정 결과 상대습도 90% 이상의 환경에서 실시하는 착유 작업의 경우 모든 측정 결과가 기준치를 초과하지 않아 상대적으로 분진의 위험성이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 TMR 사료의 배합과 급이 및 이후 실시되는 바닥 청소 작업의 경우 대부분 기준치를 초과하는 높은 수준의 분진이 발생하였다. 특히 TMR 배합기에 사료를 투하하는 과정에서 흡입성 분진의 농도가 기준치를 최대 29.1 배 초과하여 작업자의 개인 보호구 착용이 필수적인 것으로 판단된다. 사료의 투하 시 발생하는 분진 양은 사료의 직경이 작을수록 증가하는 경향이 나타났으며, 수분 함량이 높은 사료의 투입과 낙하 거리의 감소에 의해 분진 발생량이 저감되는 것으로 분석되었다. 향후 사료 배합 작업에 대한 통제된 환경에서의 실험을 수행하여 발생하는 분진 농도와 환경변수 간 상관관계를 규명함과 함께 작업 가이드라인을 제시해야 할 것으로 판단된다. 또한 국내 축사 시설의 분진 환경에 대한 연구가 부족함에 따라 양우 시설 내 분진 환경의 지속적인 모니터링과 작업자에 미치는 영향을 고려한 기준 제정이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ008678)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Baddock, M. C., T. M. Zobeck, R. S. Van Pelt, and E. L. Fredrickson, 2011. Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces: cattle trampling effects. *Aeolian Research* 3(1): 31-41.
2. Berger, I., R. Schierl, U. Ochmann, U. Egger, E. Scharrer, and D. Nowak, 2005. Concentrations of dust, allergens and endotoxin in stables, living rooms and mattresses from cattle farmers in southern Bavaria. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 12(1): 101-107.
3. Böhländt, A., R. Schierl, J. Heizinger, G. Dietrich-Gümperlein, E. Zahradnik, L. Bruckmaier, J. Sülzt, M. Raulf, and D. Nowak, 2016. Cow hair allergen concentrations in dairy farms with automatic and conventional milking systems: from stable to bedroom. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 219(1): 79-87.
4. Choi, H., G. Yeon, J. Song, H. Kang, D. Kwon, Y. Yoo, C. Yang, S. Chun, and Y. Kim, 2006. Dust spatial distribution and emission of tunnel ventilated windowless broiler building. *Journal of Animal Environmental Science* 12(3): 115-122 (in Korean).
5. CIGR, 1994. *Aerial environment in animal housing - concentrations in and emissions from farm buildings*. France: CEMAGREF.
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.
7. Donham, K. J., S. J. Reynolds, P. Whitten, J. A. Merchant, L. Burmeister, and W. J. Pependorf, 1995. Respiratory dysfunction in swine production facility workers: Dose-response relationships of environmental exposures and pulmonary function. *American Journal of Industrial Medicine* 27(3): 405-418.
8. Gonzales, H., R. Maghirang, J. Wilson, E. Razote, and L. Guo, 2011. Measuring cattle feedlot dust using laser diffraction analysis. *Trans. ASABE* 54(6): 2319-2327.
9. Guo, L., R. G. Maghirang, E. B. Razote, and B. W. Auvermann, 2011. Laboratory evaluation of dust-control effectiveness of pen surface treatments for cattle feedlots. *Journal of environmental quality* 40(5): 1503-1509.
10. Harry, E. G., 1978. Air pollution in farm buildings and methods of control: A review. *Avian Pathology* 7(4): 441-454.
11. ISO, 1995. ISO 7708:1995 (E): Air quality-particle size fraction definitions for health related sampling. ISO Publications.
12. Jo, Y. S., K. S. Kwon, I. B. Lee, T. H. Ha, S. J. Park, R. W. Kim, U. H. Yeo, S. Y. Lee, and S. N. Lee, 2015. Measurement of Dust Concentration in a Naturally Ventilated Broiler House according to Season and Worker's Access. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 57(6): 35-46 (in Korean).
13. Kemeny, D. M., 2000. The effects of pollutants on the allergic immune response. *Toxicology* 152(1-3): 3-12.
14. Kwon, K. S., I. B. Lee, and T. 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.
15. Kwon, K. S., I. B. Lee, H. S. Hwang, T. H. Ha, J. S. Ha, S. J. Park, and Y. S. Jo, 2013. Measurement and Analysis of Dust Concentration in a Fattening Pig House Considering Respiratory Welfare of Pig Farmers. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 55(5): 25-35 (in Korean).
16. 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).
17. MAFRA, 2014. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs established sustainable and eco-friendly comprehensive plan for livestock industry. <http://www.mafra.go.kr>. Accessed 9 March. 2017.
18. MAFRA, 2016. *Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
19. Pearson, C. C. and T. J. Sharples, 1995. Airborne Dust Concentrations in Livestock Buildings and the Effect of Feed. *Journal of Agricultural Engineering Research* 60(3): 145-154.
20. Purdy, C. W., R. N. Clark, and D. C. Straus, 2009. Ambient and indoor particulate aerosols generated by dairies in the southern High Plains I. *Journal of Dairy Science* 92(12): 6033-6045.
21. Razote, E. B., R. G. Maghirang, B. Z. Predicala, J. P. Murphy, B. W. Auvermann, J. P. Harner III, and W. L. Hargrove, 2004. *Dust-emission potential of cattle feedlots as affected by feedlot surface characteristics*. Paper presented at the ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa, Ontario, Canada, Aug.
22. Razote, E., R. Maghirang, B. Predicala, J. Murphy, B. Auvermann, J. Hamer III, and W. Hargrove, 2006. Laboratory evaluation of the dust-emission potential of cattle feedlot surfaces. *Transactions of the ASABE* 49(4): 1117-1124.
23. Reynolds, S. J., K. J. Donham, P. Whitten, J. A. Merchant, L. F. Burmeister, and W. J. Pependorf, 1996. Longitudinal evaluation of dose-response relationships for environmental exposures and pulmonary function in swine production workers. *American Journal of Industrial Medicine* 29(1): 33-40.
24. Shin, C.-L., K.-S. Lee, K.-R. Kim, T.-S. Kang, and N.-W. Paik, 2004. A Study on Exposure to Organic Dust and Ammonia in Poultry Confinement Buildings. *Journal of agricultural medicine*

- and community health* 29(2): 303-314 (in Korean).
25. 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. Schröder, K. H. Linkert, and C. M. Wathes, 1998. Concentrations and Emissions of Airborne Dust in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70(1): 59-77.
 26. Topisirović, G., D. Petrović, and R. Maletić, 2013. Spatial distributions of airborne dust in a cows barn exposed to influence of different ventilation rates. *Biotechnology in Animal Husbandry* 29(2): 373-383.
 27. US EPA, 2012. Appendix J to Part 50 – Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM10 in the Atmosphere.
 28. Williams, D. A. L., M. C. McCormack, E. C. Matsui, G. B. Diette, S. E. McKenzie, A. S. Geyh, and P. N. Breyse, 2016. Cow allergen (Bos d2) and endotoxin concentrations are higher in the settled dust of homes proximate to industrial-scale dairy operations. *J Expos Sci Environ Epidemiol* 26(1): 42-47.
 29. Yoo, D.-H., H.-A. Kim, Y. Heo, J.-H. Sung, H.-K. Lee, and Y.-G. Park, 2003. Concentration of Dusts and Endotoxin in Swine Confinement Buildings. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 13(1): 45-52 (in Korean).
 30. Zucker, B. A., S. Trojan, and W. Müller, 2000. Airborne Gram-Negative Bacterial Flora in Animal Houses. *Journal of Veterinary Medicine, Series B* 47(1): 37-46.