



## 한우사 내부 위치 및 TMR 배합 작업에 따른 분진 모니터링 Dust Concentration Monitoring in Korean Native Cattle Farm according to Sampling Location and TMR Process

박관용\* · 권경석\*\*† · 이인복\* · 여옥현\* · 이상연\* · 김준규\*

Park, Gwanyong · Kwon, Kyeong-Seok · Lee, In-bok · Yeo, Uk-Hyeon · Lee, Sang-Yeon · Kim, Jun-Gyu

### Abstract

Many parts of problems in livestock industry today are associated with organic dust. Endotoxin and toxic gasses on the surface of dust and dust itself can cause aesthetic displeasure and respiratory disease. It also reduces livestock productivity by suppressing immunity of animals and carrying microbes causing animal disease. However, dust level of cattle farm was rarely reported in Korea, and regulation for cattle farm worker does not exist. In this paper, dust concentration and environmental condition were regularly monitored in a commercial Korean native cattle farm. The measurement was conducted according to location and working activities. From the measurement, distribution of dust concentration was affected by wind environment, as the result of natural ventilation. TMR mixer was a major source of dust in target cattle house. The maximum inhalable dust concentration was 637.8 times higher than exposure limit as feed dropped into the TMR mixer. It was expected that dust generation could be affected by particle size and drop height of feed. This study suggests potential risk of dust in cattle farm, and necessity for latter study. Effect of aerodynamic condition and TMR processing should be investigated for dust reduction study.

**Keywords:** Aerosol, Inhalable dust, Korean native cattle farm, PM10, Respirable dust, TSP

### 1. 서 론

지난 30년간 우리나라의 경제 수준 향상과 외식 의업 발달은 지속적인 육류 수요 증가와 축산업 발전을 이끌었다. 특히 우육 소비량은 2005년 1인당 6.6 kg에서 2015년 10.9 kg으로 1.6배 이상 증가하여 국내 주요 육류 공급원으로 자리매김하였다고 할 수 있다(MAFRA, 2016). 그러나 축산농가에 의한 환경오염과 악취발생 문제, 동절기 가축질병의 지속적인 발생은 현재 축산업이 당면한 과제로 지적되고 있다. 축산시설로 인한 공해는 분뇨로 인한 토양, 지하수 및 하천 오염 문제, 분진과 축산악취로 인한 민원 발생, 축산질병의 확산 등이 대표적이다. 이 중 분진은 다른 공해 물질을 이송할 수 있으며 공기 확산을 통하여 비교적 먼 거리로 전파될 수 있는 주요 공

해 물질이다. 축산시설 내부에서 발생하는 분진은 주로 가축의 피부, 사료, 분변에서 유래한 유기성 물질이다. 표면에 부착되는 병원성 미생물로 인하여 구제역을 비롯한 축산질병의 공기를 통한 확산의 매개체로 기능할 수 있다(Ryan et al., 2009). 특히 소는 공기전파로 감염을 유발할 수 있는 축산 질병에 대한 감수성이 가장 높은 가축에 해당한다(Park et al., 2008). 이러한 위험성 때문에 구제역 등 재난성 질병의 공기 전파 가능성을 분석하고 수치모델 등을 활용하여 확산을 추적하기 위한 연구가 이루어지고 있다(Ha et al., 2012). 또한 유기분진은 암모니아와 황화수소를 비롯한 가스상 오염물질과 내독소를 이송하여 심미적 불쾌감뿐만 아니라 작업자에게 안구 자극, 직업성 천식 등 건강상의 이상을 초래할 수 있다(Takai et al., 1998; Zuker et al., 2000).

우사에서 발생한 분진의 위험성은 지속적으로 보고되고 있다. 유우시설 사육시설 작업자의 거주 공간과 같은 생활공간에서 채취한 분진에서 소에서 유래된 내독소와 알레르기 항원이 검출된 바 있으며(D'Ann et al., 2014; Böhländt et al., 2016), 국내 유우사의 TMR 배합 과정에서 높은 수준의 분진 환경이 조성되는 것으로 보고되었다(Park et al., 2017). 또한 우사 내부에서의 농작업 전후 작업자의 폐기능이 유의하게 저하됨이 확인되었으며(Arteaga et al., 2015), 국내 농업의 유기분진 노출 평가 결과 우사를 포함한 축산시설 작업자의

\* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of 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.: +82-63-238-7431 Fax: +82-63-238-7447

E-mail: kskwon0512@korea.kr

Received: May 2, 2017

Revised: July 19, 2017

Accepted: July 20, 2017

천식 유발률이 일반 인구집단과 타 작목 작업자에 비하여 높은 것으로 나타났다(Lee, 2016). 유기성 분진의 발생원에 따라서 구성 물질과 부착된 내독소, 미생물 등의 차이가 존재하기 때문에 작업자에 대한 위험성과 노출 기준이 개별적으로 평가되어야 할 필요가 있다. 그러나 돈사 및 계사 작업자를 대상으로 한 분진 노출 기준은 제시된 바 있지만(Donham & Reynolds, 1995; Donham et al., 2000), 우사에서의 분진 노출 기준은 국내의 모두 제시되지 않은 실정이다. 특히 국내는 일반 제조업 현장과 공공시설 대상 노출 기준은 존재하지만 농작업 관련 기준이 부족한 실정이다.

육우 생산량의 증진 및 작업자의 보건 환경 개선을 위해서는 우사 내부 분진 기준의 수립과 저감 방안의 도출이 필요하며, 이를 위해서 분진환경의 실태 파악과 분진 발생 과정에 대한 이해가 선행되어야 한다. 그러나 국내 축산시설을 대상으로 한 분진환경 연구는 아직 기초 연구가 이루어지고 있는 상태이며, 특히 우사를 대상으로 한 연구는 극히 적은 실정이다. 본 연구는 한우사를 대상으로 분진 환경의 모니터링을 실시하였으며, 위치와 작업 형태에 따른 측정치의 분석을 통해 영향인자를 규명하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험 대상 시설

본 연구에서는 국내 대표적인 유형의 한우 사육 시설로서 경기도 화성시 우정읍에 위치한 한우사를 대상으로 정기적인 분진 모니터링을 실시하였다(Fig. 1).

대상 한우사는 총 길이 40.0 m, 폭 30.0 m, 측고 5.0 m 및 동고 7.5 m 규모로 내부에 동일한 크기의 사육 공간(stall)이 6 개로 나누어져 설치되어 있다. 총 사육 두수는 95 두로 그 중

93 두는 한우, 2 두는 육우로 구성되어 있다. 농장 출입구 기준 우측에는 환우의 격리 및 회복까지 관리를 위한 환축사 1개 구역이 설치되어 있으며, 환축사의 한쪽 측면은 비닐롤 형태로 포장된 짚단이 외풍을 막기 위하여 일종의 방풍벽 형태로 설치되어 있다(Fig. 1 (b)). 기본적으로 자연환기를 실시하며 혹한기 일부 기간에 한하여 윈치커튼을 내려 차가운 외기의 유입을 방지한다. 직경 1.0 m (22,500 CMH)의 환기팬이 총 24개 지붕 경사를 따라 지붕 하단에 설치되어 있다. 바닥 톱밥은 1년에 2회, 주로 겨울철에 교체 작업을 실시한다. TMR 배합 작업은 4일에 1회 실시하며 고정형 TMR 기기를 이용하고 있다. TMR 배합이 실시되는 일을 기준으로 주요 업무 및 일과는 오전 6시 30분에 시작하여 오후 6시경 종료되며 오전 6시 30분부터 약 2시간 동안 TMR 사료 투입 및 배합을 실시한다. 사료 급이는 손수레를 이용하여 작업자가 직접 급이하는 방식으로 수행되며 오전 10시 및 오후 5시 30분 1일 2회 실시된다. 오전, 오후 사료 급이 직후 바닥에 떨어진 사료 입자에 대한 바닥 청소를 약 30분간 실시한다.

### 2. 측정 대상 분진

대상 분진의 모니터링은 입자의 공기역학적 직경을 기준으로 분류하여 개별적으로 실시하였다. 측정을 실한 분진은 대기환경 분야에서 사용하는 TSP, PM10과 산업보건 분야에서 사용하는 흡입성 및 호흡성 분진이다. TSP (Total Suspended Particles)는 공기 중 부유하는 모든 입자를, PM10은 공기역학적 직경이 10  $\mu\text{m}$  이하인 입자를 의미한다(US EPA, 2001). 흡입성 분진(Inhalable dust)은 사람의 호흡 과정에서 폐포까지 침착되는 분진을 의미하여 0~100  $\mu\text{m}$ 의 입경 범위를 가진다. 호흡성 분진(Respirable dust)은 입경 범위는 0~10  $\mu\text{m}$ 이며 폐포까지 침착되는 분진으로서, 평균 직경에 해당하는 4  $\mu\text{m}$  입자는 폐포에서 50%의 침착률을 보인다(Kwon et al., 2016).



(a) Aerial view of experimental Korean native cattle farm



(b) Frontal view of experimental Korean native cattle farm

Fig. 1 Aerial and frontal view of experimental cow farms

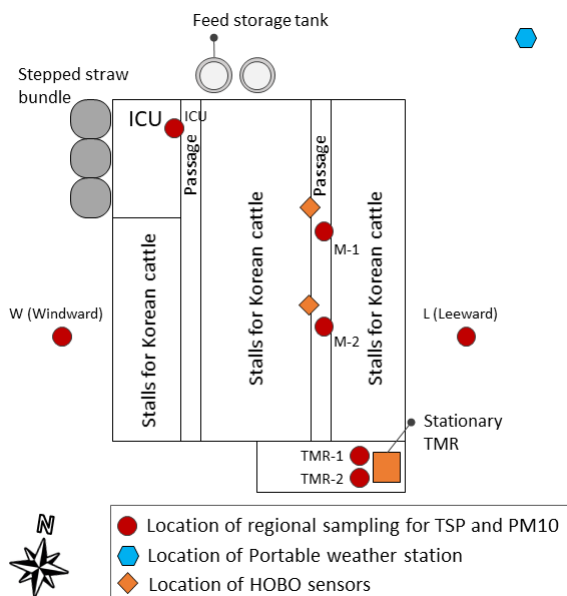
**Table 1** Occupational exposure limit of inhalable and respirable dust for livestock farmer and livestock (Unit : mg/m<sup>3</sup>)

	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

축산 시설에서의 노출 대상에 따른 흡입성 및 호흡성 분진의 허용 노출 기준은 Table 1과 같다. 작업 시 분진 노출에 따른 작업자의 폐 기능 저하를 고려한 양돈 및 양계 농가 작업자의 분진 노출 기준은 제시되어 있으나, 우사 작업자를 대상으로 한 기준은 현재 존재하지 않는다.

### 3. 실험 장비

대기환경분야 기준에 따른 분진의 측정은 PTFE 멤브레인 필터 (SKC Inc., Eighty Four, PA, USA)와 AirChek XR5000 펌프 (SKC Inc.)를 통한 포집을 실시하였다. TSP 측정을 위한 필터는 폴리스틸렌 카세트에 삽입하여 공기중 모든 입자를 포집하였다. PM10 측정을 위한 필터는 Personal Environmental Monitor (SKC Inc.)에 삽입하여 관성분리를 통해 분리 직경에 해당하는 10 µm 이하의 입자만을 포집하였다. 포집 전후 필터의 무게를 완전 건조 후 0.01 mg 감도의 전자저울 (DVG214C;



**Fig. 2** Location of regional sampling of dust and measuring instruments for environmental condition monitoring

Ohaus Co.)을 통해 측정하여 공기 중 분진의 농도를 산정하였다. 산업보건 기준에 따른 분진 농도 측정에는 Aerosol spectrometer (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co.)가 사용되었다 (Fig. 2 (b)). 기기 내부로 흡입된 공기의 분진의 입경에 따른 농도를 레이저 회절을 통해 실시간으로 측정하며, 측정 감도는 0.001 mg이다.

추가적으로 대상 시설 내외 환경변수를 모니터링하여 분진 발생의 영향인자 분석에 활용하고자 하였다. 시설 내부의 온도 및 상대습도를 측정하기 위하여 HOBO UX100-003 (Onset Computer Co.)를 설치하였으며, 시설 외부의 풍향, 풍속, 기온, 상대습도 등의 기상자료의 모니터링을 위해 간이 기상대인 WatchDog 2700 (Spectrum Tech, Inc.)를 사용하였다.

### 4. 분진 농도 모니터링

대상 시설의 분진 및 환경 변수 모니터링은 2015년 6월부터 10월까지 정기적으로 실시되었다. 대기 환경 기준에 따른 TSP와 PM10 시료는 지역시료로써 각각 2 l/min, 4 l/min의 일정한 유량을 통해 흡입한 공기에 포함된 분진을 PTFE 멤브레인 필터를 통해 장시간 포집하였다 (Fig. 3 (a)). 포집 장비는 작업자의 평균 호흡기 높이에 해당하는 1.5 m 높이에 설치되었다. Fig. 2는 대상 우사의 분진 측정 위치를 나타낸다. 대상 지역의 최근 10년간의 기상자료 분석 결과 우세풍은 서풍으로 나타났다. 이를 바탕으로 결정된 풍상측 및 풍하측과 더불어 환축사 (ICU; Intensive Care Unit), 중앙 복도 (2개 지점)에 대하여 8시간 장시간 포집을 실시하였으며, TMR 배합이 실시되는 2시간 동안 배합기 인근 2개 지점에서 추가적인 포집 실험을 실시하였다. 농장 근로자의 작업 일정에 따라 오전 8시부터 TMR 기기 인근에서의 지역 시료 포집을, 나머지 5개 지점에 대하여 오전 10시 30분부터 포집을 실시하였다.

흡입성 및 호흡성 분진의 측정은 Aerosol spectrometer를 이용하여 지역시료와 마찬가지로 바닥으로부터 1.5 m 높이에서 실시하였다. TMR 배합, 바닥 청소 등과 같은 작업 시 인근 영역에서 분진 발생 수준을 측정하였으며, 특히 TMR 배합의 경우 사료의 주입 방식, 배합되는 사료의 종류에 따라 세분화하여 TMR 배합기 주변의 분진 농도를 측정하였다. 각 샘플은 6초 간격으로 5~10분간 측정하였다. Fig. 3 (b)는 대상 한 우사의 TMR 배합기에 사료 공급 시 흡입성 및 호흡성 분진의 실시간 측정 장면이다.

내부 환경 측정을 위하여 온·습도 센서를 각 시설 내 중앙부에 두 개 설치하였으며 5초 간격으로 데이터를 기록하였다. 농장 인근에 위치한 개활지에 간이 기상대를 설치하여 풍향, 풍속, 온도, 습도, 일사량, 강수량 등에 대한 외부 기상 자료를 확보하였다. 농장에서 사용되는 각 사료 입자의 입경 분



(a) Measuring of TSP and PM10 concentration



(b) Measuring of inhalable and respirable dust concentration

Fig. 3 Measuring of TSP and PM10 concentration (a) and inhalable and respirable dust concentration (b)

포를 체가름시험법과 Malvern Mastersizer (MS3000, Malvern Instrument Ltd., UK)를 통하여 평가하고 TMR 배합 시 주변 분진 농도와의 관계를 규명하고자 하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. TSP 및 PM10 농도 모니터링 결과

Table 2는 실험 한우사 시설 내 중앙 복도와 TMR 배합기 인근에서 측정된 TSP 및 PM10 농도에 대한 결과 요약이다.

실험 대상에서 모니터링 된 TSP 및 PM10 농도는 국내 양계 및 양돈 시설에서 측정된 결과에 비하여 낮은 수준이었으

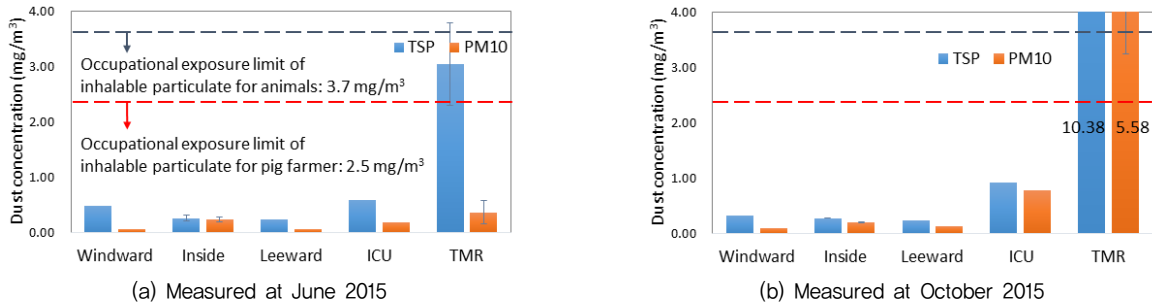
며 (Table 3), 이는 선행연구의 경향과 일치한다 (Takai et al., 1998). 대상 한우사에서 측정된 평균 PM10 농도  $0.14 \text{ mg/m}^3$  는 본 연구진이 국내 비육돈사, 강제환기식 계사, 원치커튼식 계사를 대상으로 모니터링한 결과의 19.5 %, 8.0 %, 10.3 %에 해당한다. 국내 유우사에서 측정된 평균 PM10 농도는  $0.08 \text{ mg/m}^3$ 로 한우사의 57% 수준이며, 이러한 경향은 축사의 구조와 사육 밀도의 차이에서 기인하는 것으로 분석된다. Park et al. (2017)의 대상 유우사는 측벽이 존재하지 않는 개방된 구조이며 사육밀도는  $100 \text{ m}^2$ 당 5.9 두이다. 반면 대상 한우사의 사육밀도는  $100 \text{ m}^2$ 당 7.9 두이며, 측면이 펜스 (Fig. 3 (a))와 방풍벽으로 둘러 쌓여있어 상대적으로 분진이 축적되기 쉬운 환경인 것으로 간주된다.

Table 2 TSP and PM10 concentration according to the locations in experimental Korean native cattle farm (unit :  $\text{mg/m}^3$ )

Date	Aisle		TMR processing	
	TSP	PM10	TSP	PM10
Jun. 23. 2015	$0.26 \pm 0.10$	$0.24 \pm 0.08$	$3.04 \pm 1.50$	$0.36 \pm 0.43$
Jul. 13. 2015	$0.13 \pm 0.03$	$0.07 \pm 0.02$	$0.65 \pm 0.53$	$0.23 \pm 0.17$
Aug. 7. 2015	$0.32 \pm 0.12$	$0.18 \pm 0.03$	$1.81 \pm 0.13$	$0.88 \pm 0.00$
Aug. 21. 2015	$0.13 \pm 0.12$	$0.1 \pm 0.00$	$5.90 \pm 6.45$	$1.35 \pm 1.24$
Oct. 5. 2015	$0.28 \pm 0.00$	$0.20 \pm 0.03$	$10.38 \pm 10.75$	$5.58 \pm 4.67$
Oct. 6. 2015	$0.29 \pm 0.22$	$0.06 \pm 0.05$		

**Table 3** Mean TSP and PM10 concentration in Korean livestock houses (unit : mg/m<sup>3</sup>)

	TSP	PM10
Korean native cattle farm	0.23±0.08	0.14±0.07
Dairy cattle farm (Park et al., 2017)	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



**Fig. 4** Examples of TSP and PM10 concentration according to location and working place in experimental Korean native cattle farm

작업자가 통행하는 복도에서 측정된 분진 농도는 모두 양돈 시설과 양계 시설 작업자를 대상으로 한 노출 기준을 초과하지 않았다(Table 1). 그러나 TMR 기기 인근에서 포집된 평균 분진 농도는 TSP의 경우 복도 대비 18.5배, PM10의 경우 11.9배 높은 수준이었으며, 대다수가 양돈 작업자 대상 기준치를 초과하였다. 이를 고려하여 본 연구에서는 TMR 배합과정에서 발생하는 분진이 작업자의 건강에 유해한 영향을 끼칠 가능성이 존재하는 것으로 판단하여 TMR 배합작업 시 실시간 분진 농도를 모니터링 하였다.

Fig. 4는 실험 한우사내 2015년 6월 (Fig. 4 (a)) 및 2015년 10월 (Fig. 4 (b))에 측정된 측정 위치별 작업 형태별 TSP 및 PM10 분진 농도 포집 결과이다. 해당 결과는 대상 시설의 공기역학적 특성에 의하여 일정치 않은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 예를 들어, 2015년 6월 실험 시 풍상측 TSP 농도는 풍하측 결과 (0.23 mg/m<sup>3</sup>) 대비 2.1배 높은 값이 산정되었으나 PM10 농도의 경우 풍상측 및 풍하측 모두 동일하였다 (0.06 mg/m<sup>3</sup>). 2015년 10월의 경우, 풍상측 TSP 농도는 0.32 mg/m<sup>3</sup>로 풍하측 측정치 (0.23 mg/m<sup>3</sup>) 대비 상대적으로 높은 값이 관측되었다. 실험이 이루어진 10월 5, 6일의 대상지 우세 풍향은 동풍 계열로, 최근 10년치 기상 자료를 통해 분석한 주풍 방향과 일치하지 않았다. 반면 2015년 6월 23일의 우세 풍향은 서풍으로 주풍 방향과 일치하였으나, 농도 경향의 경우 대부분 풍하측에서 풍상측에 비해 높은 분진이 관측된 선행 연구와는 상이한 양상을 보였다. 해당 결과는 실험 한우사

내 실험 환경과 관련이 있을 것으로 추정 가능하다. 환축사 내 풍상측에는 외부 강한 바람의 유입과 그로 인한 체감온도 저하를 방지하기 위해 짚단 묶음을 약 2.5 m 높이로 쌓아올렸다. 따라서 외부로의 원활한 공기 유입이 어려우며 짚단에 의한 재순환 기류가 발생하였을 것이라 추측할 수 있다. 환축사 인근의 TSP 및 PM10 분진 농도가 상대적으로 높은 값을 보였다는 점 또한 이를 뒷받침 한다. 향후 공기역학적 분석 과정을 통하여 우사의 분진환경 조성에 대한 풍환경의 영향을 규명해야 할 것으로 판단되며, 방풍벽이 설치되지 않은 일반적인 한우사에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. TMR 배합 시 기기 인근에서의 측정값의 경우 2015년 6월 측정된 TSP는 3.05 mg/m<sup>3</sup>, PM10은 0.36 mg/m<sup>3</sup>, 2015년 10월 측정치의 경우 각각 10.38 mg/m<sup>3</sup>, 5.58 mg/m<sup>3</sup>로 측정 지점에 비해 높은 값을 보였다. 2015년 6월 및 2015년 10월 TMR 기기 인근에서 측정된 TSP 농도의 경우 양돈 작업자의 분진 허용노출기준을 각각 122%, 415% 초과하는 것으로 나타났다.

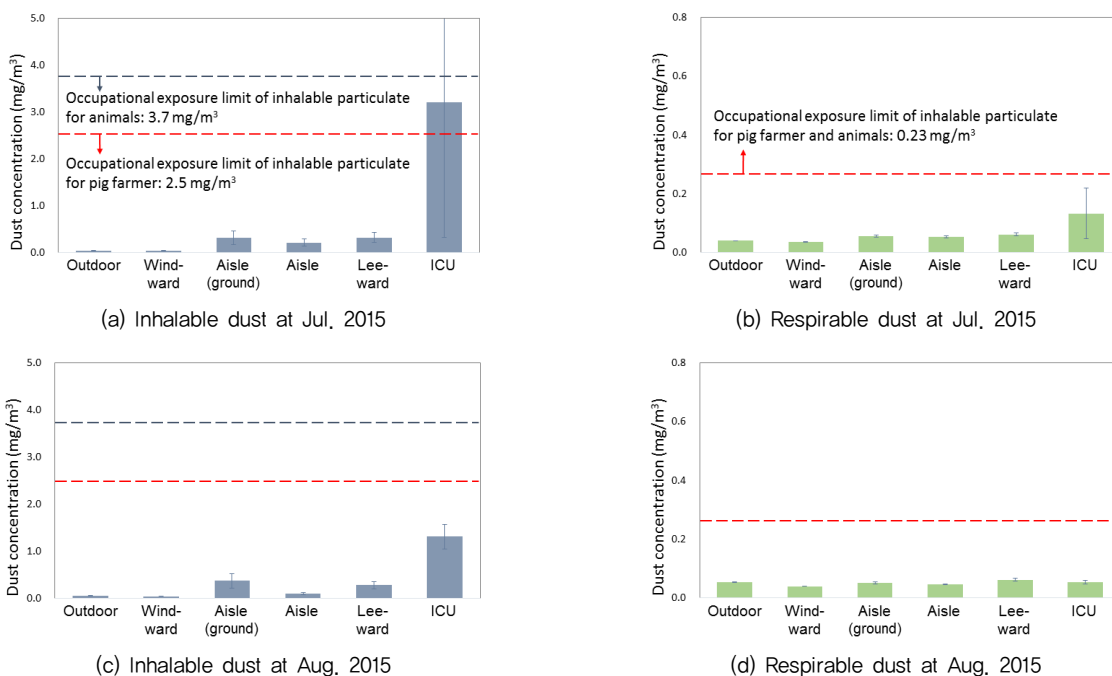
## 2. 흡입성 및 호흡성 분진 농도 모니터링 결과

Table 4는 실험 한우사내 측정별 흡입성 및 호흡성 분진 관측 결과이며, Fig. 5는 2015년 7월 및 8월 내부 측정별 흡입성 분진 및 호흡성 분진에 대한 관측 결과이다. 각 실험 시기의 풍하측 인근 흡입성 분진 농도의 경우 풍상측 측정치 대비 각각 6.6배, 5.6배 높은 수준의 값을 보이는 것으로 나타났다. 반면

**Table 4** Inhalable and respirable dust concentration according to location in experimental Korean native farm (unit : mg/m<sup>3</sup>)

Date	Middle passage		Windward location		Leeward location	
	Inh.	Res.	Inh.	Res.	Inh.	Res.
Jun. 23, 2015	0.60±0.38	0.08±0.02	0.04±0.01	0.04±0.00	0.40±0.26	0.06±0.01
Jul. 13, 2015	0.14±0.01	0.12±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.42±0.41	0.10±0.00
Aug. 7, 2015	0.19±0.15	0.06±0.01	0.06±0.01	0.05±0.00	1.15±1.55	0.08±0.04
Aug. 21, 2015	0.09±0.04	0.06±0.00	0.06±0.00	0.05±0.00	0.33±0.16	0.05±0.00
Oct. 5, 2015	0.51±0.26	0.03±0.01	0.08±0.04	0.02±0.01	0.93±1.82	0.04±0.03
Oct. 6, 2015	0.23±0.37	0.03±0.01	0.03±0.03	0.02±0.00	0.20±0.13	0.07±0.00

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



**Fig. 5** Examples of inhalable and respirable dust concentration according to location of experimental Korean native cattle farm

호흡성 분진의 경우 풍상측 및 풍하측 흡입성 분진이 0.04, 0.06 mg/m<sup>3</sup> (7월), 0.04, 0.06 mg/m<sup>3</sup> (8월) 수준으로 큰 차이를 보이지 않았다. 환축사 내부 흡입성 분진 농도는 5.76±2.88 mg/m<sup>3</sup> (7월), 1.31±0.52 mg/m<sup>3</sup> (8월)으로 타 측정 대비 상대적으로 높은 수준의 농도 값이 관측되었으나 7월 호흡성 분진 측정치의 경우 해당 경향을 따르지 않는 것으로 나타났다. 환축사 내부에 상대적으로 높은 수준의 분진 환경이 관측된 것은 앞서 언급한 바와 같이 환축사 한쪽 측벽에 벗겨진 묽음을 쌓아올렸기 때문에 순환 기류의 형성 및 원활하지 않은 환기 등으로 인하여 오염 물질이 집적되었기 때문으로 판단할 수 있다.

양돈 작업자 분진 허용노출기준과 비교 시 2015년 7월 환축사 내부 흡입성 분진 농도의 경우 기준치 대비 약 128 % 수

준으로 나타났으며 (3.21±5.76 mg/m<sup>3</sup>) 시간에 따른 농도 변화 또한 극심한 것으로 나타났다 (최대값 23.04 mg/m<sup>3</sup>). 상기 결과로부터 시설 내·외부 공기 흐름 및 공기 교환이 원활하지 않은 기류 정체 구역 내에서의 작업 활동의 경우 호흡기에 취약한 분진 환경에 노출될 우려가 있음을 추정할 수 있다. 반면, 2015년 8월 환축사 내 흡입성 분진의 경우 작업자 및 동물군에 대한 허용기준치를 초과하지 않는 것으로 나타났으며 실험 전 기간에 걸친 측정 별 호흡성 분진의 경우 마찬가지로 기준치를 초과하는 사례가 관측되지 않았다.

### 3. TMR 배합 작업에 따른 분진 모니터링 주요 결과

대상 시설에서 TMR 배합 작업은 고정형 TMR 기기를 통해 4일에 1번 실시되며, 사료의 급이는 손수레를 이용하여 직

접 실시하였다. TMR 기기로의 사료 공급은 대부분 지게차를 이용하여 공중에 사료를 쏟아 붓는 자유 낙하 방식으로 실시되었다(Fig. 3 (b)). Table 5는 TMR 배합에 사용된 사료 정보 및 평균 직경 ( $d_{50}$ ) 측정 결과이다. #1 사료(뽕튀기)의 경우 마대와 비닐봉지 형태의 두 가지 용기를 통해 공급하여 공급 방식에 따라 추가 측정을 실시하였다.

Fig. 6, Table 6은 TMR 관련 작업 시 흡입성 및 호흡성 분진에 대한 측정 결과이다. Fig. 6은 전 실험 기간 동안 측정된 자료 중 각 작업별 최댓값을 표시하였다. #1 사료의 경우 마대

에 담긴 사료를 지게차를 통해 바닥에서 약 1.5~2.0 m 높이에서 투하하는 방식(#1-1)과 비닐봉지에 담긴 사료를 작업자 가 허리 높이(약 0.8~1.0 m)에서 직접 투하하는 방식(#1-2)의 두 가지 공급 방식이 존재하였다. 측정 결과 #1-1는 최대  $109.64 \text{ mg/m}^3$ 의 흡입성 분진이 발생한 반면 #1-2 방식의 경우 #1-1 대비 46% 수준의 분진이 발생하여 분진 농도에 사료 공급 방식에 따른 낙하거리가 밀접한 영향을 주는 것으로 판단된다.

입경이 작은 가루 형태의 #2, #3, #4번 사료의 공급 시 상대

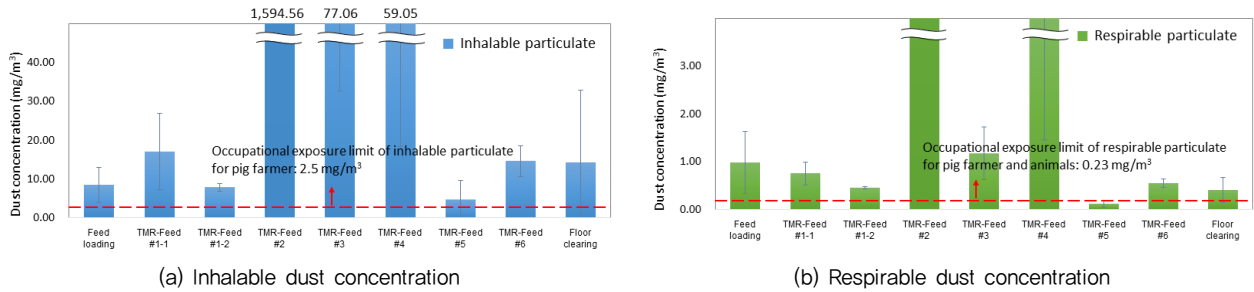


Fig. 6 Maximum inhalable and respirable dust concentration according to feed materials during TMR processing and working activities

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

No.	Type	Information	$d_{50}$ (mm)
#1-1	Puffed grain	Supplied using large size gunny sack	3,56
#1-2	Puffed grain	Supplied using long plastic bag	3,56
#2	Pulverized corn	Feed components	1,95
#3	Pulverized wheat bran	Feed components	0,58
#4	Additives	Probiotics Lime, Tofu, Pureed soybean soup	0,38 -
#5	Rice straw	Feed components	-
#6	Rice flour and snack	Supply of sugar and carbohydrate contents	-

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

Working activities	Inhalable dust		Respirable dust	
	Mean	Max	Mean	Max
Feed loading	$8,5 \pm 9,0$	37,53	$0,98 \pm 1,30$	5,52
#1-1 feed	$17,0 \pm 19,9$	109,64	$0,75 \pm 0,48$	2,46
#1-2 feed	$7,8 \pm 6,4$	31,69	0,45	0,79
#2 feed	$1,594,6 \pm 1,375,2$	5,315,67	$23,75 \pm 18,69$	55,46
#3 feed	$77,1 \pm 88,8$	255,57	$1,17 \pm 1,10$	4,16
#4 feed	$59,1 \pm 81,5$	358,71	$4,10 \pm 5,30$	19,89
#5 feed	$4,7 \pm 9,5$	61,61	$0,12 \pm 0,13$	0,91
#6 feed	$14,6 \pm 8,0$	33,56	$0,55 \pm 0,18$	0,82
Floor clearing	$37,7 \pm 18,9$	170,42	$0,40 \pm 0,52$	1,82

적으로 높은 수준의 분진 환경이 조성되었다. #2 사료 (파옥쇄)의 평균 직경 ( $d_{50}$ )은 1.95 mm이며 평균 흡입성 분진 농도는 1,594.56 mg/m<sup>3</sup>로 측정 결과 중 가장 높은 수준이었다. 이는 양돈 작업자 대상 흡입성 분진 기준의 약 637.8배, 국내 자돈사에서 사료공급 시 측정된 최대 흡입성 분진 농도의 177배에 해당하는 수치이다(Kwon et al., 2016). #3 ( $d_{50}=0.58$  mm), #4 (0.38 mm) 사료 관련 작업 역시 돈사 작업자 대상 기준치를 각각 30.8배, 23.6배 초과하는 고농도의 흡입성 분진 농도가 발생하였다. #4 사료의 경우 사료 입자의 입경이 가장 작음에도 불구하고 상대적으로 낮은 농도 값이 관측되었는데 이는 두부, 콩비지 등과 같은 수분을 함유한 사료를 포함하기 때문인 것으로 판단된다. TMR 배합 과정 시 추가적인 수분 공급과 같은 조치를 취할 경우 분진 발생 억제와 공기 질 개선에 효과적일 것이라 판단된다. 그러나 해당 방안의 적용을 위해선 적정 낙하 거리와 사료 공급 순서, 수분 공급량과 방법 등 변수의 최적치를 도출하기 위한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

TMR 사료의 배식작업 및 바닥에 떨어진 사료의 청소 과정에서 측정된 평균 분진 농도는 호흡성 및 흡입성 분진 모두 돈사 작업자 대상 노출 기준을 초과하였다. 청소작업 시 농도는 국내 유우사의 동일한 작업 시 측정치와 비교했을 때 흡입성 분진의 경우 9.4배, 호흡성 분진의 경우 1.3배에 해당하는 수치가 측정되었다(Park et al., 2017). 건조 옥수수과 펠릿형 사료 등 비교적 입경이 큰 사료의 비중이 높은 해당 유우사와 달리 본 연구의 대상 시설은 가루형 사료를 다량 사용하였기 때문으로 분석된다.

#### IV. 결 론

본 연구는 한우사의 분진 수준의 평가를 위하여 대기환경 및 산업보건 분야의 분류를 바탕으로 분진 농도 모니터링을 실시하였다. 대기환경 분야에 따른 TSP와 PM10은 지역시료로써 풍상측과 풍하측, 중앙 복도, 환축사와 TMR 배합기 주변에서 장시간 포집하였다. 산업보건 분야의 흡입성 및 호흡성 분진의 경우 지역시료와 더불어 TMR 배합과 바닥 청소 작업에 따른 발생 분진의 농도를 추가적으로 측정하였다. 작업자의 분진 노출 수준을 평가하기 위해 모든 측정은 작업자 평균 호흡기 높이에 해당하는 1.5 m 높이에서 이루어졌으며, Donham & Reynolds (1995)가 제시한 돈사 작업자 대상 분진 노출 기준과 비교를 통해 위험성을 평가하였다.

대상 시설 내외 위치에 따른 분진 농도 모니터링 결과 국내 돈사 및 계사를 대상으로 한 선행연구에 비하여 상대적으로 낮은 수치가 관측되었다 (14~38 %). 위치별 모니터링 결과

환축사는 상대적으로 높은 농도가 측정되었으며 주변 방풍벽에 의해 발생한 정체구역에 의해 분진의 배출이 원활하지 않았기 때문으로 분석된다. 추후 방풍벽이 설치되지 않은 한우사에 대한 분진 환경 평가 연구가 추가적으로 시행되어야 할 것으로 사료된다. 실험 당시 외부 풍환경에 따라서 위치별 분진 농도 분포가 변화함을 확인하였으며, 향후 우사의 분진 환경과 배출량의 평가 시 공기역학적 분석을 병행하여 분진의 이동과 분포 특성을 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 우사는 폐쇄된 형태의 계사 및 돈사와 달리 현장실험 시 공기역학적 환경의 제어가 어려우며, 이를 극복하기 위해 수치해석의 적용을 고려할 수 있다.

TMR 배합 관련 작업에 따른 모니터링 결과 흡입성 분진 농도 측정치는 기준치를 최대 637.8배 초과하였다. 대상 시설의 TMR 배합기는 컨베이어 벨트를 사용하지 않고 사료를 직접 낙하하여 공급하는 형태이며, 이 과정에서 육안으로 관측 가능한 다량의 분진이 비산하였다. 공급되는 사료의 입경이 작을수록 발생하는 분진의 농도가 높은 경향을 보여 첨가제와 같은 가루형 사료를 취급할 때 개인 보호구의 착용이 권장된다. 사료의 낙하 높이에 따른 측정 결과 작업자가 직접 허리 높이에서 사료를 투하하는 경우 높이 1.5~2.0 m에서 지게차를 통해 투하하는 방식에 비해 46 % 수준의 농도가 측정되었다. 향후 TMR 배합기의 사료 공급 방식과 낙하 높이 및 사료 종류에 따른 분진 발생량의 분석을 통해 작업자 건강을 고려한 작업 가이드라인이 제시되어야 하며, TMR 배합기 및 자동 급이기의 설계 시 이러한 사항을 반영해야 할 것으로 판단된다. 본 연구 결과를 바탕으로 다양한 시설을 대상으로 한 지속적인 모니터링과 분진 발생 기작의 분석을 통해 분진 저감 방안을 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 작업 시 분진의 개인시료 측정 및 폐 기능 저하 등 작업자에 대한 영향을 규명하여 우사 작업자에 대한 허용 분진 노출 기준이 제시되어야 할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호:PJ00867805)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

#### REFERENCES

1. Arteaga, V. E., D. C. Mitchell, G. E. Matt, P. J. Quintana, J. Schaeffer, S. J. Reynolds, M. B. Schenker, and F. M. Mitloehner, 2015. Occupational Exposure to Endotoxin in PM2.5 and Pre-and Post-Shift Lung Function in California Dairy Workers.



- Journal of Environmental Protection* 6(5): 552.
2. Böhlandt, A., R. Schierl, J. Heizinger, G. Dietrich-Gümperlein, E. Zahradnik, L. Bruckmaier, J. Sülztz, 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.
  3. CIGR, 1994. *Aerial environment in animal housing - concentrations in and emissions from farm buildings*. France: CEMAGREF.
  4. D'Ann, L. W., M. C. McCormack, E. C. Matsui, G. B. Diette, S. E. McKenzie, A. S. Geyh, and P. N. Breysse, 2016. Cow allergen (Bos d2) and endotoxin concentrations are higher in the settled dust of homes proximate to industrial-scale dairy operations. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 26(1): 42-47.
  5. 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.
  6. 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.
  7. Ha, T.-H., I.-B. Lee, K.-S. Kwon, S.-B. Lee, S.-H. Song, J. Bitog, and S.-S. Yoon, 2012. Assessment of instrument efficiency in detecting airborne virus. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(1): 63-72 (in Korean).
  8. 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).
  9. 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.
  10. 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).
  11. 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).
  12. Lee, J., 2016. *Prevalence of Asthma and Organic Dust Exposure among Farmers*. Master's thesis. Hanyang University (in Korean).
  13. MAFRA, 2016. *Agriculture, Food and Rural Affairs Statistics Yearbook*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
  14. Park, G. Y., K. S. Kwon, I.-B. Lee, T. H. Ha, R. W. Kim, and M. H. Lee, 2017. Analysis of Dust Concentration in Dairy Farm according to Sampling Location and Working Activities. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 59(3): 71-81 (in Korean).
  15. Park, J.-H., K.-N. Lee, S.-M. Kim, Y.-J. Ko, H.-S. Lee, E.-J. Heo, C.-H. Kweon, and C.-B. Yang, 2008. The condition for air-borne transmission of foot-and-mouth disease. *Korean Journal of Veterinary Public Health* 32(3): 205-212 (in Korean).
  16. Rylander, R., K. J. Donham, C. Hjort, R. Brouwer, and D. Heederik, 1989. Effects of exposure to dust in swine confinement buildings—a working group report. *Scandinavian journal of work, environment & health* 309-312.
  17. 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.
  18. US EPA, 2012. Appendix J to Part 50 – Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM10 in the Atmosphere.
  19. 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.