

수확, 경운정지, 파종, 정식, 순지르기 작업에서 발생하는 PM₁₀ 노출 특성

정원건 · 서민태 · 김효철*

농촌진흥청 국립농업과학원

PM₁₀ Exposure Characteristics During the Harvesting, Plowing, Sowing, Planting, and Decapitation Tasks of Agricultural Workplaces in South Korea

Wongeon Jung · Mintae Seo · Hyocher Kim*

National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to identify PM₁₀ mass concentration levels and conduct peak identification during five tasks in agricultural works.

Methods: We investigated five agricultural tasks in 12 farms, which were harvesting, plowing, sowing, planting, and decapitation. All samples were measured by using the portable aerosol spectrometer(PAS 1.108) and the aerosol monitor(SidePak AM520). The collected data were compared with the national PM₁₀ concentrations. They were calculated to descriptive statistics, independent t-test, or ANOVA, and the peak identification on time series graph.

Results: The ten investigated farms showed no significant difference with the national PM₁₀ concentrations, but the two greenhouses(AM, 143.31, 85.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) showed significant difference($\alpha 0.05$). As a result of the peak identification, the harvesting tasks showed repeated peak occurrence with the background concentration level of about 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. For plowing and sowing tasks, the peak occurred intermittently when the working was conducted near the sampling sites. Among the five tasks, the arithmetic mean of the harvesting task was $138.84 \pm 294.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which was significantly higher than the other tasks($\alpha 0.05$). In addition, the case of using a tractor was higher than the case of not using the tractor($\alpha 0.05$), and the driver's seat showed the highest concentration(AM, 95.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Conclusions: Works in greenhouses might have exposure to PM₁₀, while outdoor works is similar to general atmospheric PM₁₀ concentration levels. However, there is a possibility of intermittent exposure to high concentrations of PM₁₀ depending on the characteristics of agricultural tasks.


Key words: PM₁₀, agricultural task, dust, farmer, peak identification


I. 서 론

농작업 현장에서는 농업인의 건강에 영향을 주는 농약, 유해가스, 유기 또는 무기 분진 등의 화학적 요인과 곰팡이, 박테리아, 알레르겐과 같은 생물학적 유해요인들이

발생한다(ILO, 2011). 이러한 유해요인 중 입자상 물질은 여러가지 호흡기계 질환에 관여하는 것으로 보고되었다. 특히 농업에서의 입자상 물질은 곡물(grain), 건초(hay), 사료(feed), 동물의 분변(animal confinement), 노지(field) 등에서 발생할 수 있으며, 이러한 발생원에 따라

*Corresponding author: Hyocher Kim, Tel: 063-238-4166, E-mail: hyocher@gmail.com
Division of Agricultural Safety and Health, Department of Agricultural Engineering, 310 Nongsaengmyeong-ro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea 54875
Received: March 21, 2022, Revised: April 22, 2022, Accepted: May 25, 2022

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

 **Mintae Seo** <http://orcid.org/0000-0002-6477-4895>

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

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.

다양한 형태의 분진이 존재한다. 입자상 물질은 호흡기계 질환을 유발하거나 폐기능 저하를 일으킬 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Linaker & Smedley, 2002; Faria et al., 2006; Puvvula et al., 2022). 이렇듯 현재 여러 국가에서는 분진의 건강영향을 우려하여 그 특성에 따라 노출기준을 설정하여 관리하고 있다. 일례로 캐나다의 일부 주에서는 총분진에 대해 노출기준을 10 mg/m^3 로 설정하고 있으며, 독일과 덴마크에서는 곡분 분진에 대하여 각각 4 mg/m^3 , 3 mg/m^3 로 설정하여 관리하고 있다. 영국은 곡분 분진에 대해 8시간 시간가중평균으로 10 mg/m^3 , 15분 단시간노출기준으로 30 mg/m^3 을 정하고 있다. 또한, 핀란드, 노르웨이 등의 북유럽 국가들은 유기분진에 대한 노출기준을 5 mg/m^3 로 설정하는 것과 같이 농작업 시 발생할 수 있는 특정 분진에 대해 별도의 노출기준을 설정하여 관리하고 있다(Kakooei & Marioryad, 2005).

입자상 물질은 일반적으로 입자 직경에 따라 구분된다. 환경보건학적으로는 입자 직경이 $10 \mu\text{m}$ 이하인 크기를 PM_{10} , 직경 $2.5 \mu\text{m}$ 이하를 $\text{PM}_{2.5}$ 로 분류한다. 또한, 산업보건학적으로는 침착 부위 및 직경에 따라 크게 직경 범위가 $100 \mu\text{m}$ 까지인 흡입성 분진(inhalable particulate mass), 기도나 폐포에 침착하는 평균 직경 $10 \mu\text{m}$ 의 흉곽성 분진(thoracic particulate mass), 주로 폐포에 침착하는 평균 직경이 $4 \mu\text{m}$ 인 호흡성 분진(respirable particulate mass)으로 구분한다. 분진의 입자 크기가 큰 경우엔 상기도에서 제거가 가능하지만, 크기가 작을수록 폐포에 침투하기 쉽다(Carvalho et al., 2011; Franck et al., 2011). 분진에 노출되면 천식, 만성폐쇄성폐질환, 과민성 폐장염을 비롯해 뇌심혈관계 질환 등을 야기할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Iversen et al., 2000; Monsó et al., 2000; Franck et al., 2011). 이러한 분진은 농업 분야에서 크게 무기분진, 유기분진으로 나누고 있다. 경운정지 작업 등을 통해 토양의 물리적 현상(e.g., 충돌, 파쇄 등)으로 발생하는 무기분진도 호흡기계에 영향을 주는 것으로 알려져 있으나, PM_{10} 크기 이하에서 무기물과 유기물이 결합된 형태이자 엔도톡신과 같은 내독소가 포함된 유기분진이 농업에서는 주요 관심사로 연구되어 왔다(Malmberg, 1990; Lacey & Dutkiewicz, 1994; Schenker, 2000). 이러한 유기분진은 일반 밭 작목을 대상으로 하는 노지 작업을 비롯해 채소류, 화훼류 등 시설재배환경에서도 발생할 수 있다.

농업 부문에서는 양계, 양돈 작업장에서의 분진 노출

이 주요 연구 대상이었으나, 일반 작물을 재배하는 환경에서도 일반 대기에서의 미세먼지 영향, 농기계 사용, 시설하우스와 같은 작업환경 등의 다양한 조건에 의해 발생하는 분진에 노출될 수 있다. 작물을 파종하여 농산물을 수확하기 까지는 여러가지 작업 과정으로 이루어진다. 농업은 노동 투입 여건이 일반 제조 산업 현장과는 달리 자영농과 같은 농업 특성에 따라 한 명의 작업자가 여러 작업을 수행하는 경우가 많고, 이에 위험이 가중될 우려가 있다. 따라서 농작업 환경에서 농업인이 수행하는 작업별로 노출 수준을 확인하는 것이 기본적으로 필요하며, 작업이 이루어지는 시간 동안 작업장소 내 작업 지점에서 농업인이 어떤 양상으로 분진에 노출되는지를 확인할 필요가 있다.

농작업에서 작물을 재배하기 위한 작업방법은 다양하지만, 모든 작목을 대상으로 수확, 경운정지, 파종, 정식, 순지르기 등의 작업은 공통적으로 이루어지는 작업이다(Sin et al., 2019). 또한, 작업 방법에 따라 하우스 또는 노지에서 작업하거나 트랙터, 콤바인 등의 농기계를 사용하는 것 등과 같이 노출 환경의 복합적인 특성을 가진다(Kromhout & Heederik, 2005). 하우스 내부에서도 여러 환경 인자들에 노출되어 건강에 영향을 줄 수 있다는 우려가 제시되어 왔다(Monsó, 2004; Thilising et al., 2015; Li et al., 2019). 따라서 농업인이 PM_{10} 에 노출되는 전반적인 형태를 살펴보기 위해서는 우선적으로 작목을 재배하기 위해 진행되는 작업 방법별로 PM_{10} 이 발생하는 수준을 확인할 필요가 있다. 덧붙여 작업자의 노출 특성을 확인하기 위해서는 PM_{10} 이 시간적으로 발생하는 양상을 확인해야 한다.

본 연구에서는 농작업 방법에 따라 PM_{10} 의 발생 특성이 다를 것으로 예상하므로 작목 전반에 걸쳐 공통으로 수행되는 수확, 경운정지, 파종, 정식, 순지르기 작업에 대해 실제 농작업 현장에서 발생하는 PM_{10} 농도 수준을 측정하여 일반 대기의 PM_{10} 농도와의 차이를 비교하고, 작업 시간 동안의 피크 발생 형태를 시계열적 그래프를 통해 분석하며, 농기계 사용 여부에 따른 PM_{10} 의 노출 수준을 확인하여 농업인이 PM_{10} 에 노출되는 전반적인 특성을 살펴보고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

기존 연구 결과에서 제시한 작업 분류에 따라 5개(수

Table 1. Sampling information on the 12 farms

Task type	ID	Crop	Sampling time (min)	No. of sampling sites		Type of workplace	Use of the tractor
				In workplaces	Near farmers		
Harvesting	A	Cucumber	60	4	2	Greenhouse	X
	B	Green onion	129	4	2	Greenhouse	X
	C	Sweet potato	113	2	2	Ground	O
	D	Rice	44	4	2	Ground	O
	E	Sweet potato	117	4	1	Ground	X
	F	Bean	55	3	NA	Ground	X
	G	Sweet potato	80	4	1	Ground	O
Plowing	H	Ginger	53	2	1	Ground	O
	I	Sweet potato	116	4	2	Ground	O
Sowing	J	Sweet potato	40	3	2	Ground	X
Planting	K	Sweet potato	50	4	1	Ground	X
Decapitation	L	Sweet potato	32	2	1	Ground	X
Total				40	17		

Abbreviation : NA, not available

확, 경운정지, 파종, 정식, 순지르기)의 농작업방법을 선정하였다(Sin et al., 2019). 사전 조사를 통해 5개의 작업에 포함되는 농가로 고려하였으며, 측정 대상으로 최종 선정된 곳은 12 농가였다(ID, A~L). 이들 중 2곳은 하우스 형태였으며, 나머지 10곳은 노지에서 작물을 재배하였다(작업 면적 900~23,140 m²). 대상 작목은 주로 고구마였으며 그 외 생강, 오이, 대파, 벼, 콩을 재배하고 있었다. 모든 측정은 작업이 이루어지는 시간 동안 실시간으로 진행되었으며, 작업 진행 상황과 이벤트 발생을 기록하였다. 수확 작업이 이루어진 7곳의 농가들(A~G) 중 A, B의 경우 하우스에서 오이와 대파를 각각 재배하는 곳이었고 나머지 C~L 농가는 노지에서 고구마, 벼, 콩을 재배하였다(Table 1).

2. 작업별 시료 측정 방법

섭외된 12개의 농가는 면적, 지형적 특징, 작업 방식, 작업자 및 농기계의 이동 방향 등에 차이가 있다. 이를 고려하여 작업 농가당 2~4개의 지점에서 지면으로부터 작업자 호흡 반경을 고려한 약 1.5 m 높이에 측정장비를 설치하여 지역시료를 확보하였다(Figure 1). 측정은 장비의 안정화 시간을 고려하여 작업이 시작되기 전 최소 약 10분 전부터 작업이 완료되는 시간까지 모니터링 되었으며, 도중에 이벤트(e.g., 장비의 넘어짐 등)가 발생한 경우 데이터에서 제외하였다. 측정에

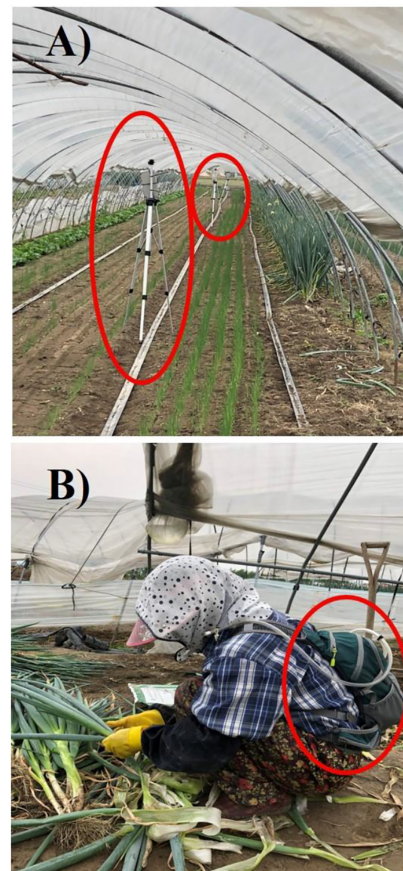


Figure 1. The representative example of the sampling in the greenhouse (A) and near the farmer (B)

활용된 장비는 Portable Aerosol Spectrometer (Model: PAS 1.108 & 11-A, GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co., KG, Germany)이며, PM₁₀의 질량농도를 확인하고자 하였다. 측정 시간 간격(interval time)은 6초당 1회로 설정하였다.

3. 개인 시료 측정 방법

작업에 트랙터를 사용하는 경우에는 캡의 여부와 관계 없이 운전자가 위치하는 운전석에서 측정을 실시하였으며, 트랙터가 사용되지 않고 작업자가 직접 작업하는 경우는 가방에 기기를 넣어 튜브를 통해 작업자의 호흡기 반경 30 cm 내에서 측정하였다. 측정에 활용된 장비는 Aerosol monitor(Model: SidePak AM520, TSI inc., MN, USA)이며, 기기의 주입구 부분에 PM₁₀ 포집에 적합한 사이클론을 부착하여 측정 시간 간격을 1초당 1회로 설정하였다.

4. 국가 미세먼지(PM₁₀) 농도 지표

노지에서의 작업은 일반 대기의 미세먼지 농도에 영향을 받을 수 있기에 해당 차이를 확인하기 위하여 환경부 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)의 국가 미세먼지 지표를 활용하여 비교하였다. 설치된 측정망의 분류 중 용어의 의미상으로는 교외대기가 적합하다고 판단하였으나, 본 연구에서는 도시대기 측정소의 자료를 활용하였다. 교외대기 측정소는 측정 장소 지역의 일대에 2곳 설치되어 있으므로 측정 장소와의 비교가 제한적이었다. 반면, 도시대기 측정소는 전북 지역에만 37곳이 설치되어 있어 측정 장소와 가깝다는 이점이 있으며, 측정 일대에서의 도시대기 측정소들은 도시 환경이기보다 농촌 환경과 유사한 곳에 설치되어 있기에 교외대기 측정소의 환경과 큰 차이가 없는 것으로 판단하였다. 따라서 이러한 기준으로 선정한 도시대기 측정소의 24시간 자료(시간별 평균 농도)를 활용하였다.

5. 자료 분석

측정 시간 간격(6초 또는 1초) 동안 발생한 데이터에 대해 기술통계량과 함께 기하평균, 기하표준편차를 계산하였다. 각 농가 별로 확보된 자료들은 해당 날짜의 24시간 국가 미세먼지 지표 농도와의 비교를 위해 독립 표본 t검정을 수행하였다. 작업별 및 트랙터 사용 유무

에 따른 PM₁₀ 농도 비교는 측정 기록지 또는 측정 시간 별로 확인된 내용을 고려하여 원시 데이터의 처리를 진행한 뒤 ANOVA로 통계적 유의성을 검정하고자 하였다. 모든 자료에 대한 결과의 통계 분석은 SPSS package(version 27.0, IBM SPSS Corp., NY, USA) 소프트웨어를 이용하였다.

III. 연구결과

1. 전체 작업별 PM₁₀ 농도 수준

전체 12곳의 농가 중 10곳은 노지, 2곳은 하우스 내에서 작업이 이루어졌으며, 각 농가별 작업에 대한 PM₁₀ 질량농도 및 국가 미세먼지 지표와 비교한 전체 결과는 Table 2와 같다.

노지에 수확 작업을 진행한 5곳(C, D, E, F, G)의 농가들 중, 고구마를 수확하는 작업을 수행했던 G 농가에서는 PM₁₀의 농도가 $179.51 \pm 558.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $7.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.44)으로 가장 높은 수준이었으며, 최대 $16,880.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 확인되었다. 또한, 경운정지 작업을 진행한 2곳의 농가 중 I 농가에서의 PM₁₀ 농도는 $65.92 \pm 82.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $5.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.19)로 나타나 가장 높은 수준인 것으로 확인되었으며, 다음으로 H 농가에서 측정된 PM₁₀의 농도는 $40.81 \pm 21.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $4.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.10)인 것으로 나타났다. J 농가에서 진행된 파종 작업의 경우 PM₁₀의 농도가 $76.73 \pm 185.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $5.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.26) 수준인 것으로 확인되었으며, K 농가에서 진행된 정식 작업의 경우 PM₁₀의 농도가 $53.45 \pm 77.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $5.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.18)인 것으로 나타났다. L 농가에서 진행한 순지르기 작업의 PM₁₀ 농도는 $56.20 \pm 77.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $5.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.21)로 나타났다. 그러나 노지에 진행된 작업들은 국가 미세먼지 지표와 비교할 때 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p > 0.05$). 2곳(A, B)의 시설하우스 내에서 수행된 작업은 수확 작업이었으며, 각각 $143.31 \pm 120.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (GM, $8.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.24), $85.16 \pm 17.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($6.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$; GSD, 1.07)의 수준으로 나타났다. 또한, 두 곳 모두 국가 미세먼지 지표와 비교했을 때, 통계적으로 유의한 차이를 보이는 것으로 확인되었다($p < 0.05$).

Table 2. Results on the stationary samples and comparison between sampling and national concentrations of PM₁₀

ID	Task	Crop	Type of working site	N ^{b)}	PM ₁₀ concentrations (μg/m ³)				Environmental concentrations of PM ₁₀ ^{a)} (μg/m ³)	
					AM±SD	GM (GSD)	Median	Range	AM±SD	GM (GSD)
A*	Harvesting	Cucumber	Greenhouse	2771	143.31±120.07	8.08 (1.24)	107.3	59.80 – 2137.00	72.04±17.99	6.32 (1.13)
B*	Harvesting	Green onion	Greenhouse	5322	85.16±17.78	6.85 (1.07)	83.80	44.30 – 852.60	53.86±5.00	5.64 (1.04)
C	Harvesting	Sweet potato	Ground	2354	26.64±25.22	3.88 (1.24)	20.50	7.90 – 639.10	27.17±6.33	4.15 (1.11)
D	Harvesting	Rice	Ground	2284	50.81±90.34	4.84 (1.31)	34.50	10.60 – 2569.80	30.21±9.46	4.30 (1.15)
E	Harvesting	Sweet potato	Ground	3736	55.01±78.66	5.46 (1.18)	51.25	13.40 – 3996.30	30.17±7.19	4.34 (1.10)
F	Harvesting	Bean	Ground	1802	55.38±138.75	4.82 (1.34)	35.60	10.80 – 3670.40	44.83±16.24	5.05 (1.20)
G	Harvesting	Sweet potato	Ground	3736	179.51±558.32	7.11 (1.44)	72.05	24.60 – 16880.40	48.14±8.14	5.35 (1.08)
H	Plowing	Ginger	Ground	11942 ^{c)}	40.81±21.44	4.93 (1.10)	38.00	10.00 – 922.00	40.04±9.40	4.91 (1.10)
I	Plowing	Sweet potato	Ground	5082	65.92±82.16	5.81 (1.19)	53.10	26.60 – 3075.00	47.29±17.82	5.18 (1.18)
J	Sowing	Sweet potato	Ground	2956	76.73±185.48	5.98 (1.26)	62.20	10.90 – 7370.50	69.67±17.26	6.23 (1.12)
K	Planting	Sweet potato	Ground	5417	53.45±77.91	5.30 (1.18)	45.50	20.50 – 2657.00	45.88±16.42	5.15 (1.15)
L	Decapitation	Sweet potato	Ground	595	56.20±77.32	5.32 (1.21)	42.70	27.60 – 1304.60	29.33±6.27	4.30 (1.09)

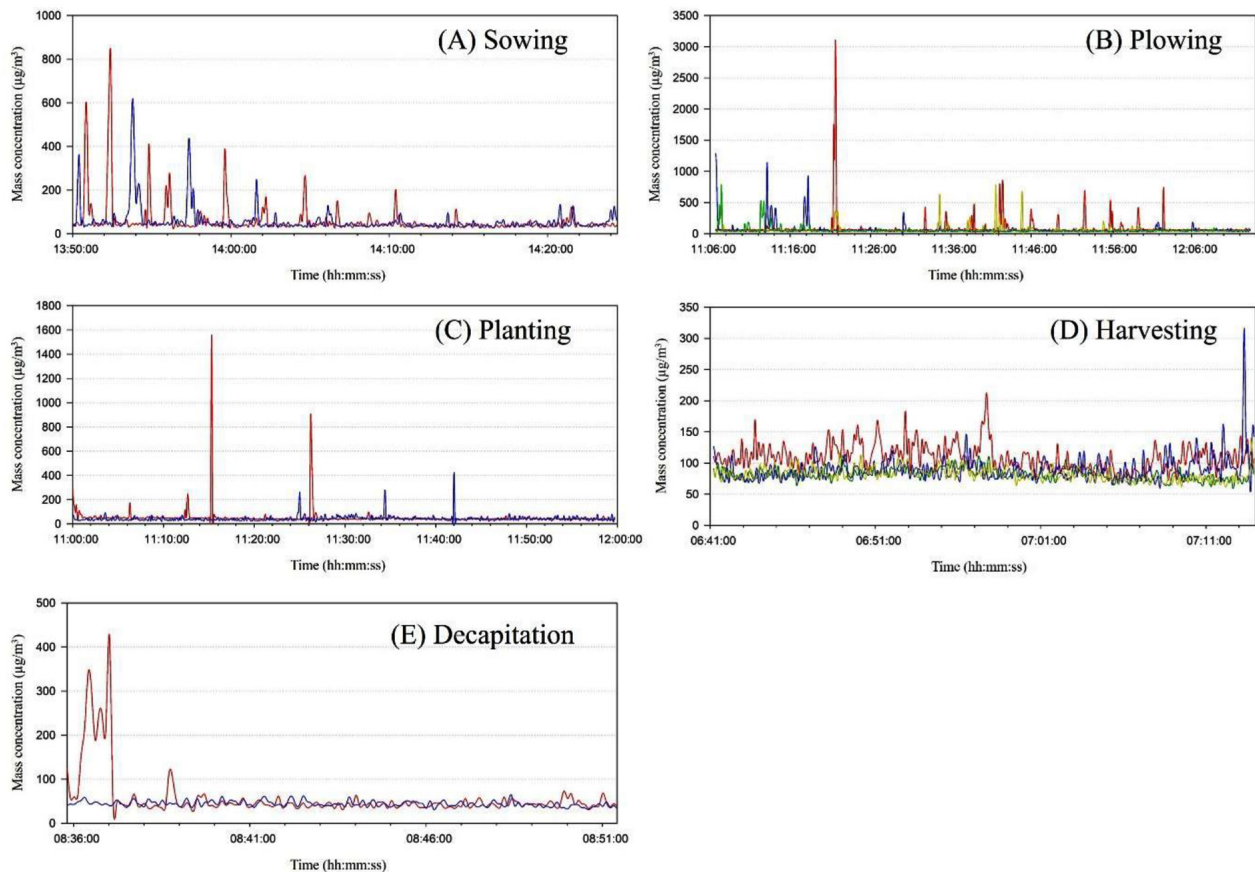
Abbreviations : AM, Arithmetic mean; SD, Standard deviation; GM, Geometric mean; GSD, Geometric standard deviation

a) PM₁₀ concentrations of national measurement networks by Ministry of Environment in Korea(<https://www.airkorea.or.kr/>)

b) Data logged by interval time (6 seconds) in the real-time monitoring device

c) Data logged by interval time (1 seconds) in the real-time monitoring device

* $p < 0.05$

**Figure 2.** Peak characteristics during working time at sampling sites by each work

2. 각 작업별 피크 형태 분석

Figure 2는 5개의 작업에 대해 대표 결과를 선정하여 피크를 확인을 위해 나타난 시계열 그래프이다. 5개의 작업에 대한 피크 발생 형태를 확인해본 결과, 전체적으로 발생 빈도, 배경농도 수준, 피크 형태에 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

3. 각 작업별 PM₁₀ 노출 수준

5개의 작업별 PM₁₀ 발생 농도를 확인해 보았을 때, 수확 작업의 PM₁₀ 농도가 $138.84 \pm 294.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 가장 높은 것으로 확인되었다. 다음은 파종 작업의 PM₁₀ 농도가 $58.36 \pm 72.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았으며, 순지르기, 경운정지, 정식 작업의 PM₁₀ 농도가 각각 $56.20 \pm 77.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $53.31 \pm 86.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $36.83 \pm 19.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 작업별로 발생하는 PM₁₀ 농도에 대해 ANOVA와 사후검정(Duncan)을 실시한 결과, 작업들 간에 대해 통계적 유의성을 확인할 수 없었던 반면, 수확 작업의 경우는 모든 작업과 비교했을 때 통계적 유의성을 확인할 수 있었다($p < 0.05$) (Figure 3).

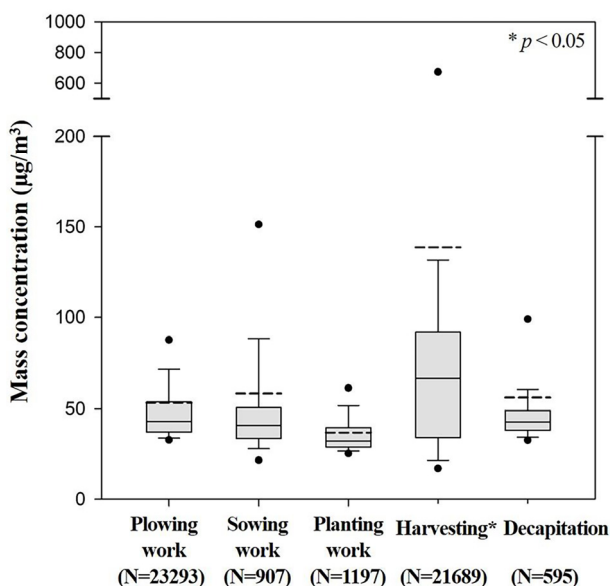


Figure 3. PM₁₀ concentrations by each work (dashed line—arithmetic mean)

4. 트랙터 사용 유무에 따른 PM₁₀ 노출 수준

노지에서 트랙터의 사용 여부에 따른 측정 지역 및 작업자 근처의 PM₁₀ 농도를 비교한 그래프는 Figure 4와 같다. 트랙터가 사용된 작업 지역 혹은 근처 작업자

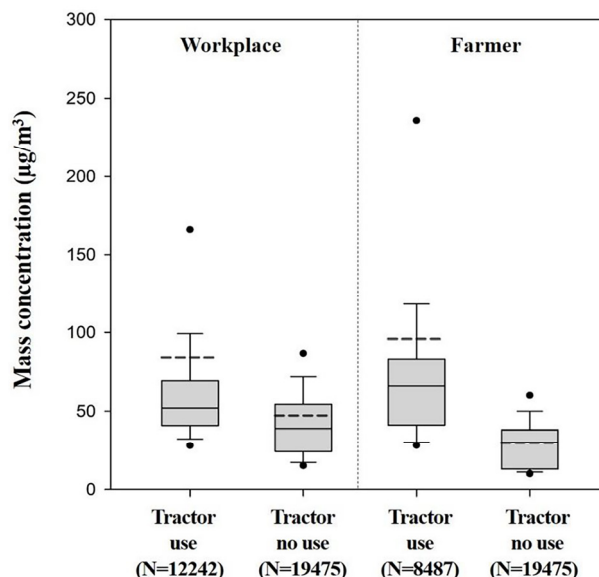


Figure 4. Comparison of PM₁₀ concentrations in workplaces and farmers by tractor use (dashed line—arithmetic mean)

는 트랙터를 사용하지 않은 지역이나 작업자 근처보다 PM₁₀의 농도 수준이 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다($p < 0.05$). 트랙터를 사용하는 작업자의 PM₁₀ 노출 수준은 산술평균과 표준편차로 확인해볼 때 $95.81 \pm 174.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 트랙터가 사용되는 작업 장소에서의 PM₁₀ 농도는 $84.11 \pm 267.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 트랙터를 사용하지 않는 작업 장소의 PM₁₀ 농도는 $47.30 \pm 87.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 트랙터를 사용하지 않는 작업 장소에서의 작업자가 $29.79 \pm 18.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 나타났다.

Ⅳ. 고 찰

본 연구에서는 실제 농작업 현장에서 이루어지는 5개의 작업에 대해 PM₁₀의 노출 특성을 확인하였다. 농업인은 작업 특성상 야외 노지와 하우스 내부에서 작업을 하므로 실내 및 실외 공기 질의 영향을 모두 받는다. 국가 미세먼지 지표와 비교해볼 때, 야외 작업의 경우 대기 PM₁₀의 농도와 비슷한 수준인 반면, 하우스 작업은 야외보다 상대적으로 높은 농도인 것으로 나타났다. 노지에서의 PM₁₀ 발생 양상을 시계열적인 그래프로 확인해볼 때, 평균적으로는 일반 대기에서의 PM₁₀ 농도와 비슷한 수준이었지만 트랙터의 사용이나 특정 작업에

따라 순간적으로 높은 수준의 PM₁₀ 농도에 노출될 수 있음을 확인하였다. 또한, 5개의 작업에 대해 농도 수준을 확인해본 결과, 수확 작업이 유의하게 높은 것으로 나타났으며 나머지 4개의 작업은 비슷한 수준이었다.

본 연구에서 노지 작업은 일반 대기 PM₁₀ 농도와 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 작업별로 피크가 발생하는 양상을 보면 Figure 2의 (A) 파종 작업은 트랙터 작업이 진행되는 경우에 최대 약 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준까지 PM₁₀이 발생하는 것과 같은 반복적인 피크 형태를 나타냈다. (B) 경운정지 작업은 파종 작업과 유사하게 트랙터의 작업에 따라 피크가 발생하는 형태를 보였으나, 발생된 피크의 농도 수준은 파종 작업과 달리 최대 3075 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되어 농도 수준이 상대적으로 높은 것으로 확인되었다. 이는 트랙터를 이용해 밭을 가는 작업이 진행되어 노지에서 발생하는 분진(field dust)의 영향을 받은 것으로 판단된다. (C) 정식 작업의 경우 대부분이 낮은 농도로 확인되었으나, 작업의 특성에 따라 부가적인 작업 활동이 진행되는 경우 피크가 발생하는 것을 제외하면 대부분 낮은 수준으로 나타났다. (D) 수확 작업은 다른 작업에 비해 전반적으로 약 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 배경농도를 보이고 있으며, 모든 측정지역에서 피크가 반복적으로 발생하는 것으로 확인되었다. 시설하우스 내에서 수확 작업을 진행할 경우, 측정 지점과 관계없이 공기 중에 부유하고 있는 분진의 농도 수준이 다른 작업에 비해 높을 것으로 생각된다. (E) 순지르기 작업의 경우는 약 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 전후 수준의 배경농도를 보였으며, 수확 작업과 달리 전반적으로 낮은 농도가 계속적으로 유지되는 것으로 확인되었다.

수확 작업이 다른 작업에 비해 높은 것으로 나타난 것에는 작업 방법, 재배 환경, 작목 특성 등의 다양한 원인이 영향을 주었을 것으로 판단된다. A, B 농가는 시설하우스에서 수확 작업을 했다. 이와 같이 반밀폐 구조의 시설에서 작업을 수행했기 때문에 야외에서 수행된 작업에 비해서 미세먼지 농도가 높았을 것으로 추정된다. 게다가 오이 수확 작업을 진행한 A 농가의 시설하우스 내에는 환기 팬이 6개 설치되어 있었으나 모두 미가동 상태였으며, 환기가 제대로 이루어지지 않았다. 또한, B 농가의 경우엔 재래식 시설하우스이며 특별한 환기장치를 확인할 수 없는 환경이었다. 특히 A 농가와 같이 오이를 수확하는 경우, 오이의 가지와 잎에 많은 털이 있어서 작업 시 분진이 날릴 가능성이 있고, 이것이 수확작업 시 공기 중 분진 수준에 영향을 줄

수 있다고 알려진 바 있다(Madsen et al., 2009). 본 연구에서의 오이 수확작업에 대한 지역시로 측정 결과는 143.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 Madsen et al. (2009)가 여름철 오이 수확 시설하우스 내에서의 개인 흡입성 분진 평균 농도는 1.7 mg/m^3 로 보고한 것을 참고해볼 때, 본 연구대상 농장에서의 작업자 개인 노출은 현재 측정된 지역시로 결과에 비해 더 높았을 것으로 예측된다. 일부 작목을 대상으로 한 작업별 흡입성 분진 및 PM_{2.5}의 노출 평가를 진행한 연구에서는 수확 작업 시 흡입성 분진의 농도가 1,362 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 청소 작업(1,315 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 하는 경우와 비슷하였고, 이는 포장 및 선별 작업보다 높은 것으로 보고한 바 있다(Moran et al., 2014). 특히 아몬드를 수확하는 작업자의 흡입성 분진의 최대 노출은 4,368 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 보고하였는데, 농기계 사용을 통해 아몬드 나무를 흔드는 작업으로 분진 발생이 증가하였다고 판단하였다. 본 연구에서의 수확 작업은 대부분 농기계를 사용하지 않고 노지에서 생육되는 작물들이었기에 PM₁₀의 발생 수준이 Moran et al. (2014)의 연구결과보다 상대적으로 낮았을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과를 기존 문헌에서 보고하고 있는 분진 노출 수준과 비교해보면, 농작업에서의 분진 노출량은 작업 방식과 농기계의 사용 유무에 따라 달라질 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

농작업 시 트랙터나 콤팩트 등의 농기계를 사용할 경우 분진 노출 수준에 관한 연구는 과거부터 수행되어 왔다(Aybek & Arslan, 2007; Lovarelli & Bacenetti, 2019). 본 연구에서도 트랙터 사용 유무에 따라 발생하는 PM₁₀의 농도에 차이를 보였으며, 작업자 근처인 트랙터 운전석에서의 농도가 작업 장소에서의 농도보다 유의하게 높은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 캡이 있거나 또는 캡이 없는 트랙터 전체를 대상으로 운전석 외부에서 측정하였으나, 과거 연구에 따르면 캡이 없는 농기계를 이용하는 경우 캡이 있는 농기계를 이용하는 경우에 비해서 고농도의 분진에 노출될 수 있다고 보고된 바 있다(Aybek & Arslan, 2007). 또한, 트랙터 등의 농기계를 사용할 경우 다양한 유형의 디젤 엔진배출물질에 추가적으로 노출될 수 있다(Sydbom et al., 2001; Stapleton et al., 2018).

분진 또는 PM₁₀과 같은 입자상 물질에 노출될 경우 다양한 호흡기계 질환을 유발할 수 있다. 국내 고용노동부에서는 곡물분진(grain dust)과 곡분분진(flour dust)에 대한 노출기준을 각각 4 mg/m^3 , 0.5 mg/m^3 으로

규정하고 있다(MoEL, 2021). 그러나 이는 곡물 또는 곡분을 다루는 공정을 대상으로 적용하는 것에는 적합하지만, 실제 농작업 현장에서는 곡물, 곡분 분진 이외에도 다양한 분진의 발생원이 있으므로 여러 농작업 현장에 적용하는 것엔 제한이 따른다. 실제로 해당 기준들의 재설정과 범위의 구체화에 관한 연구도 이루어져 왔다(Kim et al., 2006). 국내 환경정책기본법 시행령 별표 1(환경기준)에 따른 PM₁₀의 24시간 평균 기준과 작업 당시 측정된 PM₁₀의 농도 수준을 직접 비교하는 것은 해당 기준의 설정 배경을 고려했을 때 적절하지 않다. 다만, 작업상황에서 발생할 수 있는 피크 노출을 확인할 수 있었고, 당시의 노출 수준을 비교할 수 있는 잣대로 활용할 경우 특정 작업과 상황에서는 노출저감을 위한 예방적인 조치가 필요함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 각 작업별로 충분한 수의 농가와 측정장소를 확보하지 못했다. 하우스 또는 노지작업, 트랙터의 캡 유무 등의 많은 변수가 있음에도 불구하고 샘플 수를 확보하는 것에 제한점이 존재하였다. 본 연구에서 섭외한 농가에서의 작업이 대표적인 특성을 가지는 것으로 판단하였기에 농가별로 측정이 이루어진 측정 장소를 시료로 보는 방법을 대신하여, 측정 장비의 측정 시간 간격 동안 얻어진 자료를 시료로 두어 통계 분석을 실시하였다. 그러나 본 연구에서 확인한 작업 방법은 일반적으로 한국에서 진행되는 농작업 현장에 포함되는 대표성을 가진다. 진행되었던 작업에서 해당 작목의 특성을 고려하지 않았으므로 이에 관한 영향을 확인하지 못한 제한 점이 있으나, 여러 작목에 대해 공통적으로 수행되는 작업 방법 별로 PM₁₀의 발생 수준을 확인하는 것이 작목별 비교에 앞서 우선적으로 수행되었기에 의미를 가진다고 사료된다. 또한, 총분진이나 10 µm 이하의 입자 직경을 가진 분진에 대해서는 파악하지 못했다. 향후 연구로는 작업 방법과 작목의 종류를 함께 고려한 연구가 필요할 것이며, PM₁₀ 이하의 PM_{2.5}에 대한 입자상 물질에 관한 입자 수농도 발생 특성 및 그에 포함된 조성, 성분 분석도 함께 병행하여 호흡기계에 영향을 미치는 인자를 명확히 규명해야 할 필요가 있다. 또한, 농작업 현장에서 주로 발생하는 유기분진의 특성을 고려해 평가하는 추가적인 연구도 필요하다.

V. 결 론

본 연구에서는 실제 농작업 현장에서 수행하는 다섯

개의 작업 방식(수확, 경운정지, 파종, 정식, 순지르기) 별로 PM₁₀의 노출 수준을 확인하여 작업별 차이를 확인하고, 트랙터 사용 유무에 따른 농도 수준을 비교하고자 하였다.

1) 하우스 내에서 작업이 이루어질 경우 노지 작업에 비해 훨씬 높은 수준의 미세먼지에 노출될 수 있다는 것을 확인했다. 노지에서 작업을 수행할 경우는 대기의 미세먼지 농도 수준과 크게 다르지 않았다. 그러나 작업 방식에 따라 피크 발생 특성에 차이가 있었으며, 이는 높은 농도가 발생할 수 있는 단시간 및 고농도 작업에 대한 예방이 필요한 것으로 판단된다.

2) 수확, 경운정지, 파종, 정식, 순지르기 작업에 대해 PM₁₀의 농도 수준을 확인한 결과, 수확 작업이 다른 4개의 작업에 비해 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다. 수확하는 대상 작물을 고려한 추가 연구를 통해 적절한 예방책 마련이 필요한 것으로 판단된다.

3) 트랙터를 사용한 경우엔 그렇지 않은 경우보다 PM₁₀의 농도가 높은 것으로 나타났으며, 특히 트랙터를 사용하는 작업자 근처는 그렇지 않은 작업자 근처보다 통계적으로 유의하게 높은 것을 확인할 수 있었다. 트랙터를 사용할 경우는 보다 엄격한 호흡 보호 예방조치가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 시험연구사업인 농업활동 유해요인 및 질환 평가 DB 구축(세부과제번호: PJ01249101)의 지원에 의해 이루어진 것임

References

- Aybek A & Arslan S. Dust exposures in tractor and combine operations in eastern Mediterranean, Turkey. *J Environ Biol* 2007;28(4):839-844
- Carvalho TC, Peters JI, Williams III RO. Influence of particle size on regional lung deposition - what evidence is there? *Int J Pharm* 2011;406:1-10 (<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.12.040>)
- Faria NM, Facchini LA, Fassa AG, Tomasi E. Farm work, dust exposure and respiratory symptoms among farmers. *Rev Saúde Pública* 2006;40(5):1-9 (<https://doi.org/10.1590/S0034-8910200600500006>)
- Franck U, Odeh S, Wiedensohler A, Wehner B, Herbarth

- O. The effect of particle size on cardiovascular disorders – the smaller the worse. *Sci Total Environ* 2011;409:4217–4221 (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.049>)
- International Labour Organization(ILO). ILO Geneva. ILO code of practice: safety and health in agriculture. 2011 [Accessed 2021 Jul 15]. Available from: URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_159457.pdf
- Iversen M, Korychuk S, Drost H, Jacobson L. Human health effects of dust exposure in animal confinement buildings. *J Agric Saf Health* 2000; 6(4):283–288 (<https://doi.org/10.13031/2013.1911>)
- Kakooei H & Marioryad H. Exposure to inhalable flour dust and respiratory symptoms of workers in a flour mill in Iran. *Iranian J Env Health Sci Eng* 2005;2(1):50–55
- Kim CN, Roh JH, Won JU, Kim HS, Kim KY et al. A study on the enactment and amendment of exposure limits – grain dust. Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA(Korea Occupational Safety and Health Agency). 2006
- Kromhout H & Heederik D. Effects of errors in the measurement of agriculture exposures. *Scand J work Environ Health* 2005;31(suppl 1):33–38 (<https://www.jstor.org/stable/40967434>)
- 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))
- Li J, Li Y, Tian D, Yang H, Dong L et al. The association of self-reported respiratory system diseases with farming activity among farmers of greenhouse vegetables. *J Int Med Res* 2019;47(7):3140–3150 (<https://doi.org/10.1177/0300060519852253>)
- Linaker C & Smedley J. Respiratory illness in agricultural workers. *Occup Med* 2002;52(8):451–459 (<https://doi.org/10.1093/occmed/52.8.451>)
- Lovarelli D & Bacenetti J. Exhaust gases emissions from agricultural tractors: state of the art and future perspectives for machinery operators. *Biosyst Eng* 2019;186:204–213 (<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.07.011>)
- Madsen AM, Hansen VM, Nielsen SH, Olsen TT. Exposure to dust and endotoxin of employees in cucumber and tomato nurseries. *Ann Occup Hyg* 2009;53(2): 129–138 (<http://doi.org/10.1093/annhyg/men073>)
- Malmberg P. Health effects of organic dust exposure in dairy farmers. *Am J Ind Med* 1990;17:7–15 (<https://doi.org/10.1002/ajim.4700170104>)
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure limits for chemicals substances and physical agents(MoEL Public Notice No. 2020–48).; 2020.
- Monsó E, Magarolas R, Radon K, Danuser B, Iversen M et al. Respiratory symptoms of obstructive lung disease in European crop farmers. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;162:1246–1250 (<https://doi.org/10.1164/ajrccm.162.4.9912093>)
- Monsó E. Occupational asthma in greenhouse workers. *Curr Opin Pulm Med* 2004;10(2):147–150
- Moran RE, Bennett DH, Garcia J, Schenker MB. Occupational exposure to particulate matter from three agricultural crops in California. *Int J Hyg Environ Health* 2014;217:226–230 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheh.2013.05.002>)
- Puvvula J, Baccaglini L, Johnson A, Du Y, Bell JE et al. Prevalence and risk factors for pulmonary conditions among farmers and ranchers in the Central United States. *J Agromedicine* 2022;1–13(Ahead-of-print) (<https://doi.org/10.1080/1059924X.2021.2025180>)
- Schenker M. Exposures and health effects from inorganic agricultural dusts. *Environ Health Perspect* 2000; 108(suppl 4):661–664 (<https://doi.org/10.1289/ehp.00108s4661>)
- Sin SJ, Kim HC, Heo JY, Ahn MJ, Kim KR et al. A study of categorization of farm types and crops for exposure assessment in agriculture. *J Korean Soc Occup Hyg* 2019;29(4):500–507 (<http://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.4.500>)
- Stapleton EM, O'Shaughnessy PT, Locke SJ, Altmaier RW, Hofmann JN et al. A task-based analysis of black carbon exposure in Iowa farmers during harvest. *J Occup Environ Hyg* 2018;15(4):293–304 (<https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1422870>)
- Sydbom A, Blomberg A, Parnia S, Stenfors N, Sandström T et al. Health effects of diesel exhaust emissions. *Eur Respir J* 2001;17:733–746
- Thilising T, Madsen AM, Basinas I, Schlünssen V, Tendal K et al. Dust, endotoxin, fungi, and bacteria exposure as determined by work task, season, and type of plant in a flower greenhouse. *Ann Occup Hyg* 2015; 59(2):142–157 (<https://doi.org/10.1093/annhyg/meu090>)

<저자정보>

정원건(석사후연구원), 서민태(농업연구사), 김효철(농업연구사)