



농작업자 미세먼지 노출 특성 및 저감 방안

National Institute of Agricultural Sciences



요약

1. 농업인 미세먼지 노출 특성

- 농업인은 야외 작업으로 인하여 대기중 미세먼지에 가장 많이 노출되는 직업군입니다.
- 농업인은 대기중 미세먼지에 노출되는 것에 더해서 농작업 중에 발생하는 미세먼지에 이 중으로 노출이 되며, 노출되는 양은 작목과 작업에 따라 매우 다르게 나타납니다.
 - 축산 > 시설 > 노지 순으로 작목에 따라 미세먼지에 노출되는 양은 달라집니다.
 - 축산작목과 일부 작목에서는 미세먼지 노출기준 (환경부, 24시간 평균 노출, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 넘는 것으로 나타났습니다.
- 고농도 미세먼지 노출이 우려되는 농작업을 할 때에는 분진마스크를 반드시 착용해야 합니다.
 - 축산작업, 선별작업 (복숭아, 절화 등), 콤바인작업, 시설하우스 내 경운정지 작업 등

작목	직업	미세먼지 마스크 착용			비고
		선택	권장	필수	
수도작	수확작업			○	
노지작목	경운정지 (생강·고구마)		○		
	비료살포 작업 (생강)	○			
	수확 작업 (파, 고구마)			○	파 (뽑는 작업)
		○			고구마 (줍는 작업)
	파종 작업	○			-
화훼	가지, 꽃순 정리 작업 (장미)		○		-
시설과채	경운정지 작업 (토마토)			○	-
	잎따기 작업 (딸기)			○	-
	수확 작업 (오이)			○	-
과수	비닐피복 작업 (포도)		○		-
	반사필름 제거 작업 (사과)	○			-
	비료살포 작업 (배)		○		-
	수정 작업 (배)	○			-
	선별작업 (복숭아)			○	-
축산	양계			○	-

2. 농업인 미세먼지 노출 저감 방안

- 미세먼지 노출 특성별 적합한 규격의 개인보호구 착용이 중요하며, 작업자의 개인보호구 사용 목적과 방법에 대한 올바른 인지가 필요합니다.
- 개인보호구를 활용한 미세먼지 저감 효율 분석 결과 미세먼지 노출이 예상되는 농작업시에 면마스크 착용은 불가하며, 고농도의 미세먼지에 노출이 확인되는 축산작업, 콤바인작업 등에는 KF94 마스크 활용이 필요함을 확인하였습니다.
 - 면마스크 저감 효율: PM_{10} , 50%; $PM_{2.5}$, 45%; $PM_{1.0}$, 30% 차단
 - KF80 마스크 저감 효율: PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 모두 90% 이상 차단
 - KF94 마스크 저감 효율: 전체 입경의 98% 이상 차단
- 복숭아 선별작업시의 국소배기장치를 활용한 미세먼지 저감 효율 분석 결과 미세먼지 발생 저감효과가 약 85% 내외로 확인되어 KF80 마스크의 착용효과와 유사한 것으로 확인되었습니다.
 - (복숭아 필름지 제거 작업시) 저감장치 가동 후 총분진 84.9% 저감 효율
 - (복숭아 털 제거 작업시) 저감장치 가동 후 총분진 87.9% 저감 효율



머 리 말

농업인은 야외 작업을 하면서 미세먼지가 나쁜 시기에 대기환경의 고농도 미세먼지에 노출될 수 있으며, 농업시설 내부에서 발생하는 유기분진 등에도 노출될 위험성이 높아 호흡기계 질환에 대한 세심한 주의 및 보호조치가 필요합니다.

특히 작목의 종류, 사용 농기계, 시설별 구조적 특징, 환기시스템 등 외부 환경조건에 따라 발생된 미세먼지 농도의 양상은 차이를 보이며, 미세먼지의 성상 또한 다르게 나타납니다. 따라서, 농작업자의 미세먼지 노출 저감을 위해서는 미세먼지 노출 현황과 발생 특성에 대하여 인지하는 것이 필수적입니다.

본 지침서에서는 농업시설 중 축사, 시설하우스, 과수, 노지 대상의 농작업자의 미세먼지 노출 현황과 발생 특성에 대한 결과 및 농작업자의 미세먼지 노출 저감 방안 마련과 그와 관련된 제안사항에 관한 내용을 담았습니다.



Contents

1. 미세먼지의 개념과 이해	6
2. 분진 허용기준과 측정값의 해석	8
3. 미세먼지 측정법	10
4. 농업에서 분진의 농작업자 노출 경로	11
5. 작목/작업별 미세먼지 노출 특성	12
6. 미세먼지 노출 저감 방안	26
7. 참고문헌	41



01 ▶ 미세먼지의 개념과 이해



가. 먼지의 정의와 분류

1) 먼지의 크기에 따른 분류

가) 총분진 (TSP, Total Suspended Particulate)

총분진은 이름 그대로 입경(particle size)¹⁾에 상관없이 공기 중에 부유하고 있는 모든 분진을 뜻합니다. 총분진은 입경 크기에 따라서 PM₁₀, PM_{2.5} 등으로 구분할 수 있습니다. 총분진 중 PM₁₀보다 크기가 큰 분진은 물리적 요인(파쇄, 충돌 등)으로 인하여 발생하는 경우가 대다수입니다. 농업에서 물리적 요인에 의해 분진이 발생하는 대표적인 작업에는 경운정지, 비료살포, 정식, 수확, 가축출하(양계) 작업 등이 있습니다.

나) 미세먼지 (PM₁₀, Particulate Matter₁₀)

PM₁₀은 입경이 10 μm보다 작은 크기의 분진을 총칭하며 다른 이름으로 미세먼지(coarse particle)라고도 일컬어집니다. 미세먼지는 앞서 이야기한 파쇄, 충돌 등의 물리적 요인으로 발생하기도 하지만, 연소나 응결 등의 화학적 반응으로도 생성됩니다. 농업에서 연소, 응결 등의 반응을 통해 미세먼지를 일으키는 대표적인 작목, 작업은 경운정지(트랙터 배기가스), 축산작업, 폐기물 소각 작업 등이 있습니다.

다) 초미세먼지 (PM_{2.5}, Particulate Matter_{2.5})

PM_{2.5}는 입경이 2.5 μm보다 작은 크기의 분진을 총칭하며 다른 표현으로 초미세먼지(fine particle)라고도 일컬어집니다.

1) United States Department of Agriculture(2011) Biofilters for Odor and Air Pollution Mitigation in Animal Agriculture.

2) 먼지의 성상에 따른 분류

가) 무기분진

생물학적 활성물질을 포함하고 있지 않은 분진으로서 농업에서는 경운정지 작업을 하면서 발생하는 흙먼지 또는 트랙터 운전 시 발생하는 디젤 연소물질 등이 여기에 속합니다. 무기분진의 일반적인 특성은 다음과 같습니다.

분진의 크기가 상대적으로 크다.
충돌, 파쇄, 물리적 현상에 의해 발생한다.
분진의 구성은 무기물이 대부분이다.

나) 유기분진

유기물질, 세균, 곰팡이 등으로 이뤄진 분진으로서 농업에서 발생하는 대다수의 분진이 여기에 속합니다. 특히 유기분진에 함유된 세균(그람음성 박테리아)의 부산물로서 발생하는 엔도톡신(내독소)라는 물질은 시설하우스, 축산 작목의 농작업자의 호흡기계에 건강영향을 일으키는 것이 여러 연구에서 확인되고 있습니다.

분진의 크기가 상대적으로 작다.
응결, 파쇄 등 다양한 물리, 화학적 현상에 의해 발생한다.
분진의 구성은 무기물과 유기물이 혼합되어 있는 형태이다.

02 ▶ 분진 허용기준과 측정값의 해석



가. 허용기준의 정의와 미세먼지

1) 허용기준과 입자의 크기

분진은 크기가 큰 분진의 경우 코에서 걸러지나, 크기가 작아질수록 기관지, 폐포에 들어갈 수 있는 확률이 높아집니다. 따라서 허용기준도 각각 코, 기관지, 폐에 영향을 일으키는 특성에 맞추어서 분진의 크기별로 허용기준이 정해지고 있습니다.

2) 허용기준의 정의와 적용 대상

국내에서 먼지에 대한 허용기준을 정하고 있는 국가 부처는 환경부와 고용노동부가 있습니다. 환경부 허용기준은 갓난아기에서부터 초고령자까지 모든 연령대의 사람들에 대해서 24시간 또는 연간 노출이 되었을 때 건강영향이 없을 농도를 허용기준으로 정합니다. 고용노동부의 분진 허용기준은 20~60세 사이의 건강한 작업자가 먼지에 하루 8시간 주 5일 노출이 된다는 가정하에서 건강영향이 없을 것으로 예상되는 농도를 허용기준으로 제정합니다.

일반적으로 20~60대의 작업자는 유아나 60대 이상의 고령자보다 높은 농도의 먼지 노출에도 견딜 수 있으며, 이러한 가정으로 인하여 고용노동부의 허용기준은 환경부의 허용기준보다 매우 높습니다(덜 엄격합니다). 농업에서의 먼지 허용기준은 아래 기술한 농업, 농촌의 특성을 고려할 때, 환경부의 미세먼지 허용기준을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단됩니다.

논, 밭과 같은 작업환경과 생활환경이 겹쳐 있는 경우가 많다.
60대 이상의 고령자가 전체 농어촌 인구의 절반 이상이다.
작업시간이 정해져 있지 않다.

나. 분진의 허용기준

1) 고용노동부 허용기준

산업안전보건법에 기반한 고용노동부 기준(고시 제2020-48호)에서는 구성물질과 화학적 성상, 입경 크기 등을 종합하여 분진의 허용기준을 제시하고 있습니다. 농업과 관련해서는 곡물분진, 면 분진, 목재분진에 대한 노출기준만을 제시하고 있습니다. 화학적 성상이 특정되지 않는 흙먼지 등 무기분진 대해서는 표 1에 제시된 기타분진의 허용기준을 활용할 수 있습니다. 국내에서는 유기분진에 대하여 허용기준이 제공되고 있지 않지만, 유럽 등에서는 5 mg/m³로 권고기준을 제정하고 있습니다.

[표 1] 고용노동부 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준

유해물질의 명칭		노출기준 (TWA ²⁾ , mg/m ³)	비고 (CAS번호 등)
국문표기	영문표기		
기타 분진 (산화규소 결정체 1% 이하)	Particulates not otherwise regulated(no more than 1% crystalline silica)	10	발암성 1A (산화규소 결정체 0.1% 이상에 한함)
곡물분진	Grain dust	4	-
곡분분진(밀가루 등)	Flour dust(Inhalable fraction)	0.5	흡입성 ⁴⁾
면분진	Cotton dust, raw	0.2	-
목재분진(적삼목)	Wood dust(Western red cedar, Inhalable fraction)	0.5	흡입성, 발암성 1A
목재분진 (적삼목외 기타 모든 종)	Wood dust(All other species, Inhalable fraction)	1	흡입성, 발암성 1A
유리 섬유 분진	Fibrous glass dust	5	-
석탄분진	Coal dust(Respirable fraction)	1	호흡성
구리(분진 및 미스트)	Copper(Dust & mist, as Cu)	1	[7440-50-8]
산화아연 분진	Zinc oxide(Respirable fraction)	2	[1314-13-2] 호흡성
알루미늄(금속분진)	Aluminum(Metal dust)	10	[7429-90-5]
용접 흙 및 분진	Welding fumes and dust	5	발암성 2
은(금속, 분진 및 흙)	Silver(Metal, dust and fume)	0.1	[7440-22-4]
철바나듐 분진	Ferovanadium dust	1	[12604-58-9]
카프로락탐(분진)	Caprolactum(Dust)(Inhalable fraction)	1	[105-60-2] 흡입성
황화니켈 (흙 및 분진)	Nickel sulfide roasting (Fume & dust, as Ni)	1	[16812-54-7] 발암성 1A, 생식세포 변이원성 2

2) Time Weighted Average (시간가중평균) : 특정 시간 동안 포집된 모든 분진의 양을 포집시간으로 나누어준 값

3) 1 mg/m³ = 1,000 µg/m³

4) 작업자의 코나 목까지 침투할 수 있는 크기의 분진을 가르켜 흡입성 분진이라고 함

2) 환경부 허용기준

환경부에서는 모든 국민에게 적용되는 환경기준으로 대기 중의 미세먼지에 대하여 성상에 상관없이 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기준으로 하고 있습니다. 환경부 허용기준을 농업인에게 적용할 경우에는 다음의 원칙 및 순서를 고려하여 활용하도록 합니다.

- 현행 환경부 허용기준은 24시간 동안 측정된 평균 값이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘지 않는 것을 원칙으로 한다.
- 본 지침서에서는 농작업을 수행하는 제한된 시간 동안만 측정하였다(예: 수확작업 2시간, 양계 작업 4시간 등).
- 따라서 환경부 허용기준을 적용하기 위해서 작업 시간외에 일반시간은 대기 중 평균 PM_{10} 농도수준에 노출되는 것으로 가정하여 비교한다.
 - 예 : 고구마 경운정지작업 2시간 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일반생활시간 22시간 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

03 ▶ 미세먼지 측정법

농작업장의 상황에 맞추어서 작업 중 발생하는 PM_{10} 을 효율적으로 측정하기 위해 본 지침서에서는 중량법과 직독식 측정법을 혼용하여 공기 중 PM_{10} 의 농도를 측정한 결과를 제공하였습니다.

가. 중량법

분진 중 PM_{10} 을 분리, 포집하기 위해 직경 10 μm 이하의 미세먼지를 포집할 수 있는 PEM(Personal Environmental Monitor, SKC Inc., USA)에 PTFE 막여과지(polytetrafluoroethylene filter, diameter 37 mm, pore size 2.0 μm , SKC Inc., USA)를 사용하였습니다.

Tygon tube를 통해 필터가 들어간 틀(카세트)과 개인시료채취용 펌프(Model: GilAir plus, Gillian Inc., USA)를 연결하여 4 L/min의 유량으로 계사 내 공기를 포집하였고, 측정에 사용된 개인시료채취용 펌프는 측정 전과 후에 유량 보정기(Model: DryCal Defender 520, Mesa Laboratories Inc., USA)로 각각 5회씩 반복하여 유량을 보정하였습니다.

모든 측정 위치는 작업장을 2~3등분한 뒤, 각 교차지점을 지정하여 측정장비를 설치하였습니다. 또한, 작업자들의 호흡기 위치를 고려해 바닥으로부터 약 1.5 m 높이에서 포집하였으며, 측정 시간은 작업을 시작하는 시간부터 끝나는 시간까지 진행하였습니다.

포집한 PM₁₀의 질량 농도를 확인하기 위해 필터는 온도와 습도 수준이 각각 27°C, 26%로 일정하게 유지되는 데시케이터에 24시간 보관한 후에 미세저울(Model: Explorer, OHAUS corp., USA)을 이용하여 측정 전과 후의 필터 무게 차이를 중량 분석하였으며, 최종적으로 공시료(Blank sample)의 무게를 고려해 질량 농도를 계산하였습니다.

나. 직독식 측정법

광산란식 측정장비인 PAS(Portable Aerosol Spectrometer, GRIMM-1109, Germany)와 Sidepak(TSI Inc., USA)을 활용하여 작업시간에 걸쳐 각 6초 및 1초 간격으로 PM₁₀을 측정하였습니다. 측정 위치 및 방식은 앞서 설명한 중량법을 이용한 측정 방식과 동일하게 하였습니다.

04 ▶ 농업에서 분진의 농작업자 노출 경로

농업에서 분진이 발생하고 작업자에게 노출되는 경로는 일반제조업과 마찬가지로 작물, 농업시설 같은 분진 발생원이 고정된 상태로 있으면서 사람이 발생원에 접근함에 따라 노출이 되는 경우가 있으며, 사람이나 트랙터와 같이 분진을 일으키는 발생원이 이동을 하면서 근처에 있는 작업자가 노출이 되는 방식이 있습니다.

05 ▶ 작목/작업별 미세먼지 노출 특성



가. 수도작

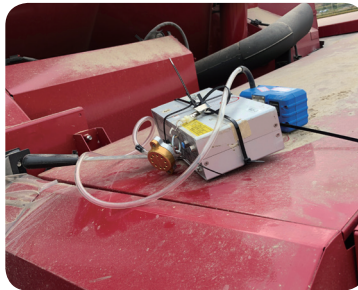
1) 수확작업

수도작에서 분진이 가장 많이 발생하는 작업은 수확작업입니다. 수확작업은 일반적으로 콤바인을 운전하는 작업자와 콤바인 옆을 따라다니면서 보조를 하는 작업자 2명이 수행을 합니다. 벼 수확 작업에서 분진 발생원은 야외에서 넓은 면적을 이동하는 콤바인이기에 본 지침서에서는 콤바인 외부와 운전석 내부의 PM₁₀을 측정한 결과를 표시하였습니다.

[그림 1] 벼 수확작업 시 미세먼지 노출 측정



측정 대상 콤바인



콤바인 외부 측정



운전석 내부 측정

콤바인 외부에 측정기기를 부착하여 측정한 PM₁₀의 기하평균⁵⁾ 농도 값은 1차 측정 시 7418.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 측정 시 1678.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났습니다. PM₁₀의 노출량이 매우 크기 때문에 콤바인 근처에서 작업을 할 때에는 반드시 분진마스크를 착용해야 합니다.

5) 산술평균의 경우 기본적으로 측정한 값의 총합을 측정한 횟수(n)로 나누어 계산함. 그러나 단순 산술평균 값만으로 대표성을 보장하기 어려운 경우(예: 측정한 값의 표준편차가 매우 크거나, 최댓값과 최솟값의 차이가 매우 클 때) 측정한 개별 측정값에 Log를 씌운 후 대표성 있는 평균과 표준편차를 계산하며, 이때 구해지는 평균과 표준편차를 기하평균, 기하표준편차라고 함

문을 닫은 상태인 운전석 내부에서의 PM₁₀ 기하평균 농도 값은 각 453 µg/m³, 157 µg/m³으로 확인되었으며, 이러한 수준은 수확시기에 콤바인의 하루 운전시간이 약 6~8시간임을 감안할 때 운전석 내부에서도 분진마스크를 반드시 착용하는 것이 바람직한 수준으로 확인되었습니다.

[표 2] 직독식 기기 활용 콤바인 외/내부 PM₁₀ 기하평균 농도(단위: µg/m³)

1차 측정		2차 측정	
콤바인 외부	운전석 내부	콤바인 외부	운전석 내부
7,414.8	452.8	1,678.2	157.3

나. 노지 작목

노지 작목에서 분진이 가장 많이 발생하는 작업은 경운정지, 비료살포 작업 등이있습니다. 또한 감자, 고구마 같이 땅속 작물을 수확하거나 줄기를 뽑아내야 하는 경우에도 먼지가 많이 발생합니다. 다음은 생강, 고구마, 파 작목에 대하여 PM₁₀의 발생 농도를 지역시료와 개인시료로 나누어서 측정한 결과입니다.

1) 경운정지 작업(생강, 고구마)

[그림 2] 고구마, 생강 경운정지 작업 시 미세먼지 노출 측정



생강 경운정지
(트랙터 캡 X)



고구마 경운정지
(트랙터 캡 O)



지역시료 포집

운전석 캡이 없는 소형 트랙터(생강)와 캡이 있는 대형 트랙터를 대상으로 PM₁₀을 측정한 결과, 지역시료는 캡이 있는 대형 트랙터에서 3배 정도 높게 나타났습니다. 그러나 먼지를 막아주는 캡이 있는 관계로 개인시료는 캡이 없는 트랙터 대비 약 40% 수준으로 PM₁₀ 노출이 저감되는 것을 확인하였습니다.

대형 트랙터의 경우 트랙터의 크기가 커질수록 캡이 달려있기에 운전석에서의 미세먼지 노출은 크게 상관할 필요없지만, 외부에서 측정한 지역시료의 경우 상황에 따라 환경부 기준 100 µg/m³을 넘을 수 있으므로 가급적 경운정지 작업장에서 트랙터 옆에 있을 경우 마스크를 착용하는 것을 권장합니다.

[표 3] 경운정지 작업 시 PM₁₀의 산술평균 농도(단위: µg/m³)

생강 경운정지(트랙터 캡 X)		고구마 경운정지(트랙터 캡 O)	
지역시료 ⁶⁾	개인시료 ⁷⁾	지역시료	개인시료
42.8	94.4	146.5	39.0

2) 비료살포 작업 (생강) : 산술평균 농도(단위: µg/m³)

[그림 3] 생강 비료살포 작업 시 미세먼지 노출 측정



생강 비료살포기



살포 비료



개인시료 포집

6) 분진의 발생원 또는 작업장 내 특정 지역에 설치한 측정 시료

7) 작업자에 호흡기 근처 30 cm 이내에 부착한 측정 시료

비료살포작업은 비료살포기가 연결된 트랙터를 이용한 작업을 대상으로 PM₁₀을 측정하였습니다. 지역시료와 개인시료 모두 100 µg/m³을 넘지 않았으며, 작업자는 별도의 분진마스크를 착용할 필요가 없을 것으로 판단됩니다.

[표 4] 비료살포 작업 시 PM₁₀의 산술평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료	개인시료
39.3	61.9

3) 수확 작업 (파, 고구마)

[그림 4] 파 수확 작업 시 미세먼지 노출 측정



지역시료 포집

개인시료 포집

파 수확은 기계의 도움이 없이 작업자가 직접 파를 뽑아서 수확하는 방식으로 이루어집니다. 반면 고구마 수확의 경우 트랙터를 활용하여 고구마를 땅 밖으로 올리고 이를 주워 담는 방식으로 작업이 수행됩니다. 이러한 특성으로 인하여 고구마의 경우 노출수준이 대기 중 PM₁₀ 농도 수준으로 확인되었으나, 파 수확 시의 농작업자의 노출은 100 µg/m³을 넘는 것으로 확인되었습니다. 작업시간 평균 노출농도로 확인된 121.9 µg/m³을 24시간 평균으로 가정할 경우 농업인이 최종적으로 하루에 노출되는 미세먼지는 환경부 허용기준을 넘지 않을 수 있습니다. 그러나 측정 당시 파 수확을 하면서 간헐적으로 눈에 보일 정도로 고농도의 분진에 노출이 되는 것으로 확인되었으며, 이에 분진마스크 등을 착용하는 것이 바람직할 것으로 생각됩니다.

[표 5] 파/고구마 수확 작업 시 PM₁₀의 산술평균 농도(단위: µg/m³)

파 수확		고구마 수확	
지역시료	개인시료	지역시료	개인시료
81.8	121.9	26.6	12.7

4) 파종작업 (고구마)

파종작업은 트랙터 운전 등의 먼지 발생 활동 없이 작업자만으로 야외에서 이뤄지는 작업입니다. 작업자가 흙을 만지는 활동으로 인하여 지역시료보다 개인시료가 높은 것으로 확인이 되었으나 일반 대기 중 미세먼지 노출수준인 것으로 확인이 되었으며 작업 중 마스크를 착용할 필요는 없을 것으로 판단됩니다.

[표 6] 직독식 기기를 활용한 PM₁₀ 산술평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료	개인시료
37.1	53.9

다. 화훼

1) 가지, 꽃순 정리작업 (장미)

[그림 5] 장미 가지정리 작업 시 미세먼지 노출 측정



측정대상 시설하우스

지역시료 포집

개인시료 포집

장미 시설하우스 일반 대기환경 수준의 미세먼지 노출이 발생하는 가운데, 지역시료와 개인시료 간의 유의미한 차이는 확인되지 않았습니다. 이러한 특성은 가지, 꽃순 정리작업의 경우 미세먼지를 발생시키는 원인이 아니며, 장미 시설하우스 내에서는 특별한 미세먼지 발생원이 존재하지 않음을 의미합니다.

[표 7] 장미 작업 시 PM₁₀ 기하평균 농도(단위: µg/m³)

1차 (11월 초순)		2차 (11월 중순)		3차 (11월 중순)	
시설하우스	개인	시설하우스	개인	시설하우스	개인
20.7	30.7	10.1	9.7	13.5	15.0

그러나 중량법을 활용하여 PM₁₀과 같이 시설하우스 내 엔도톡신 농도를 동시에 측정한 결과, 측정된 엔도톡신 농도는 PM₁₀ 농도에 비할 때 매우 높은 수준이었으며, 엔도톡신의 농도는 일부 시료에서 유럽(네덜란드) 작업자 노출 권고기준인 90 EU/m³를 넘는 것으로 확인되었습니다. 이에 미세먼지에 고농도의 엔도톡신이 포함되어 있을 것으로 생각되며, 장미 시설하우스에서 작업을 할 경우 분진마스크를 착용하는 것을 권장합니다.

[표 8] 중량법으로 측정한 장미 작업 시 PM₁₀ 및 엔도톡신 산술평균 농도(단위: µg/m³)

	1차 (11월 초순)		2차 (11월 중순)		3차 (11월 중순)	
	시설하우스	개인	시설하우스	개인	시설하우스	개인
PM ₁₀	20.8	—	47.2	55.2	43.6	70.1
엔도톡신	91.7	—	13.6	106.3	99.4	59.7

라. 시설 과채

1) 경운정지 작업(토마토)

[그림 6] 시설 토마토 경운정지 작업 시 미세먼지 노출 측정



개인시료 포집

지역시료 포집

경운정지 작업

반밀폐된 시설하우스 내에서 캡이 없는 트랙터를 활용한 경운정지 작업에 대하여 PM_{10} 을 측정한 결과는 아래 표와 같습니다. 트랙터의 경운정지 작업이 분진의 주요한 발생원이기 때문에 개인시료가 $1854.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나왔습니다. 야외 노지와는 달리 바람이 없는 반밀폐된 환경이기에 발생한 먼지가 실내에서 계속 있으면서 지역시료가 $239.5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 1139.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 내부환경의 PM_{10} 농도가 유지되는 것을 확인할 수 있었습니다.

농업인이 $1800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 노출이 되면서 2시간 작업을 하고 대기 중의 PM_{10} 농도를 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가정했을 때 24시간 동안 노출되는 평균 PM_{10} 의 양은 $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 환경부 기준인 ‘24시간 평균 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ’을 넘게 됩니다. 따라서 시설하우스에서 경운정지 작업을 할 때에는 반드시 분진 마스크를 착용하도록 해야 합니다.

[표 9] 시설하우스 내 경운정지 작업 시 PM_{10} 의 기하평균 농도(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

지역시료 1	지역시료 2	지역시료 3	지역시료 4	개인시료 1
1,139.9	239.5	697.2	723.5	1,854.8

2) 잎따기 작업 (딸기)

[그림 7] 딸기 잎따기 작업 시 미세먼지 노출 측정



딸기 시설하우스

잎따기 작업

딸기 시설하우스에서의 잎따기 작업에 대한 PM₁₀ 농도 중 지역시료는 일반 대기환경 수준으로 노출이 확인된 반면에, 개인시료의 경우는 250 µg/m³를 넘는 것으로 확인되었습니다. 이는 시설하우스 내의 환경조건이 PM₁₀의 발생원이 아니라, 작업자의 활동이 PM₁₀의 발생 원인임을 뜻합니다.

따라서 시설하우스의 환기를 통해서도 PM₁₀ 노출 저감의 효과가 크게 없으며, 작업자의 분진마스크 등의 착용을 통해서만 노출 저감이 가능할 것으로 판단됩니다.

[표 10] 잎 따기 작업(딸기) 시 PM₁₀의 기하평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료 1	지역시료 2	지역시료 3	개인시료 3
15.01	40.2	47.4	259.0

3) 수확작업 (오이)

[그림 8] 시설 오이 수확 작업 시 미세먼지 노출 측정



오이 시설하우스

지역시료 포집

개인시료 포집

오이 수확작업의 경우 오이작목 자체의 특성에 의해 먼지가 많이 발생하는 것으로 알려져 있습니다. 본 연구에서도 아래 표와 같이 지역시료와 개인시료가 유사한 수준으로 발생하는 것을 확인하였는데, 앞서 설명한 딸기와는 달리 작업자 개인활동으로 인한 PM10의 발생보다 작업환경내의 PM₁₀ 농도가 작업자의 PM₁₀ 노출에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 오이 수확작업 시에는 마스크 착용과 더불어서 작업장의 환기가 필요한 것으로 판단됩니다.

[표 11] 오이 수확작업 시 PM₁₀의 산술평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료 ⁸⁾	개인시료 ⁹⁾
140.0	130.4

8) 지역시료 : 작업장 내 고정된 특정 지점에서 분진을 측정된 농도

9) 개인시료 : 작업자의 호흡기에 노출되는 분진을 측정된 농도

마. 과수

1) 비닐피복 제거 작업 (포도)

[그림 9] 시설 포도 비닐피복 제거 작업 시 미세먼지 노출 측정



포도 시설하우스

비닐제거 작업

개인시료 포집

포도 작목에서 먼지가 가장 많이 발생하는 작업은 비닐피복 제거 작업입니다. 측정 결과, 비닐 피복 제거 시에 지역시료는 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 넘었으나, 개인 노출은 일반적인 대기환경 수준의 PM_{10} 에 노출되는 것으로 확인되었습니다. 비닐제거를 직접 하는 작업자가 작업을 하면서 먼지 발생지점을 빠져나가기 때문에 개인노출이 적었으며, 작업이 이뤄진 곳에서는 비닐을 제거하면서 발생한 비산 먼지가 가라앉지 않고 있었을 것으로 판단됩니다. 따라서 비닐피복 제거 작업자보다는 옆에서 가지정리 등을 하는 작업자가 분진마스크 착용을 해야할 것으로 판단됩니다.

[표 12] 비닐피복 제거 작업(포도) 시 PM_{10} 의 기하평균 농도(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

지역시료 1	지역시료 2	개인시료 1
112.9	154.8	32.5

2) 반사필름 제거 작업(사과)

[그림 10] 반사필름 제거 작업(사과) 시 미세먼지 노출 측정



사과 과수원

지역시료 포집

반사필름 제거 작업(사과)에 대하여 미세먼지 지역시료 측정을 한 결과는 아래 표와 같습니다. 일반 대기 중 미세먼지 노출수준인 것으로 확인이 되었으며, 작업 중 마스크를 착용할 필요는 없을 것으로 판단됩니다.

[표 13] 반사필름 제거 작업(사과) 시 PM₁₀의 기하평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료 1	지역시료 2	지역시료 3	지역시료 4
31.0	14.7	33.1	31.8

3) 비료살포 작업(배)

[그림 11] 배 비료살포 작업 시 미세먼지 노출 측정



개인시료 포집 (배)

지역시료 포집 (배)

비료살포 (배)

배 작목의 트랙터 활용 비료살포 작업에 대하여 PM₁₀ 노출을 측정한 결과는 아래 표와 같습니다. 지역 시료의 농도는 일반 대기환경 수준의 PM₁₀ 노출 수준을 나타내었으나, 개인 시료의 경우 100 µg/m³을 넘는 것으로 확인되었습니다. 이러한 특성을 통해 트랙터 비료 살포가 PM₁₀의 주요 발생원임을 알 수 있습니다. 평균적으로 높은 농도는 아니지만 경우에 따라 고농도의 PM₁₀에 노출될 수 있기에 트랙터를 운전하는 농업인에게는 마스크를 착용하는 것을 권장합니다.

[표 14] 배 비료살포 작업 시 PM₁₀ 기하평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료 1	지역시료 2	개인시료 1
19.1	32.6	110.9

4) 수정 (배)

[그림 12] 배 수정작업 시 미세먼지 노출 측정



수정 작업



개인시료 포집



지역시료 포집

배 작목 수정작업의 경우 PM₁₀의 개인노출이 지역노출보다 높게 나왔지만, 환경부 허용기준과 비교했을 때 개인, 지역 모두 매우 낮게 나왔습니다. 따라서 수정작업 시 별도의 마스크 착용을 할 필요는 없을 것으로 판단됩니다.

[표 15] 배 수정작업 시 PM₁₀ 기하평균 농도(단위: µg/m³)

지역시료 1	지역시료 2	지역시료 3	지역시료 4	개인시료 1
29.3	16.2	12.1	25.6	56.7

5) 선별 (복숭아)

[그림 13] 복숭아 선별 작업 시 미세먼지 노출 측정



선별 작업장

선별작업장 내부 측정

과수작목 중 복숭아와 같은 유모계 과실은 선별작업 시 고농도의 미세분진에 노출될 수 있습니다. 복숭아 선별작업장에서의 PM₁₀ 지역시료는 에어컨 작동 여부, 문 개/폐 여부, 측정지점에 따라 변화하는 양상을 보였습니다. 그러나 발생하는 분진의 특성상 노출 시 알레르기를 일으킬 수 있음을 고려할 때 작업에 관한 안전보건 관리를 하는 것은 필수적입니다. 복숭아 선별작업장에서 가장 고농도의 분진이 발생하는 지점은 수확한 복숭아의 보호비닐을 제거하는 작업입니다. 따라서 가능하다면 국소배기 설비를 해당 작업이 이뤄지는 지점에 설치하는 것이 가장 권장되며, 농작업자는 산업용 분진마스크에 더해서 피부 등을 보호할 수 있는 장갑과 토시를 하는 것을 권장합니다.

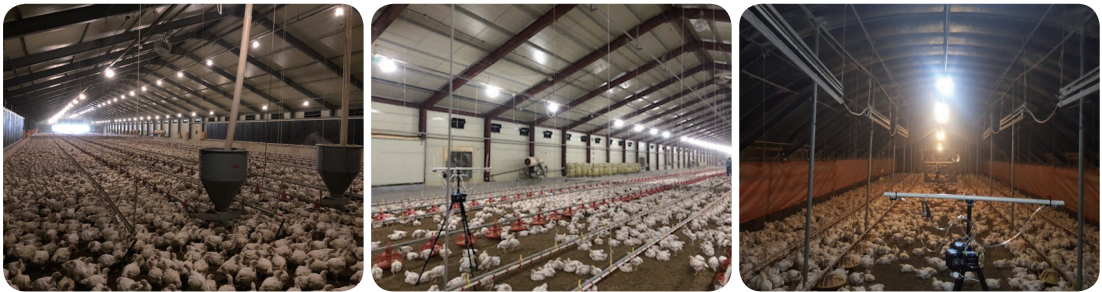
[표 16] 복숭아 선별작업 시 PM₁₀의 기하평균 농도(단위: µg/m³)

1차 (7월 상순)			2차 (7월 하순)		
작업장 안쪽	작업장 중간	입구	작업장 안쪽	작업장 중간	입구
664.8	511.1	315.2	76.1	90.9	126.4

바. 축산

1) 양계

[그림 14] 양계 축사 내 미세먼지 노출 측정



양계장

지역시료 측정

축사에서 분진 발생은 닭의 분변, 깃털, 사료 가루에서 주로 발생하며, 암모니아 등으로부터 변환되는 2차 생성물로서 발생하기도 합니다. 양계 농장에서 일하는 사람들은 소나 양돈 농장에서 일하는 사람들에 비해 유기분진의 노출 위험 수준이 높다고 보고되고 있습니다. 2019년 A사와 계약된 양계농장들을 대상으로 하여 7월부터 11월까지 PM₁₀을 측정한 결과, 외부 온도가 낮아지는 10월 이후 측정부터 PM₁₀과 엔도톡신 농도가 증가하는 것으로 나타났습니다.

외부 온도 저하에 따른 환기의 강도(시간당 환기량) 감소는 PM₁₀에 비해 엔도톡신 농도에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단됩니다. 이러한 특징이 나타난 원인으로는 환기량이 많은 여름철 엔도톡신의 농도가 낮은 수준이었지만, 환기량이 적어지는 겨울철에서 분진의 체류 기간이 길어지게 되므로 계사환경 내의 미생물 증식이 상대적으로 더 증가하게 되어 이로 인해 엔도톡신의 양이 PM₁₀에 비해 더 많아진 것으로 판단됩니다.

특히 계사 내 부유하는 미세먼지 중 입경이 크고 무거운 경우 중력의 영향을 받아 하강을 하거나 환기에 따른 바람의 영향을 크게 받지만, 입경이 작고 가벼운 입자는 공기 중에 부유하거나 기류의 흐름이 아닌 계사 내에서의 난기류 흐름을 따라 이동하게 됩니다. 이러한 특성을 감안할 때 환기율이 떨어지는 동절기에 난기류가 많은 배기구 근처에서 작업을 할 경우 농작업자는 호흡기 보호에 특별히 더 신경을 써야 할 것입니다.

[표 17] 양계 축사 내 PM₁₀ 및 엔도톡신 농도(단위: PM₁₀ µg/m³, 엔도톡신 EU/m³)

측정시기	7월 중순	7월 하순	7월 하순	8월 초순	9월 초순	9월 하순
PM ₁₀	97.6	89.1	30.9	23.1	173.7	529.2
엔도톡신	95.6	121.3	12.5	69.2	52.8	947.9

측정시기	10월 초순	10월 하순	10월 하순	11월 초순	11월 하순
PM ₁₀	473.3	2,596.9	1,047.1	642.4	2,884
엔도톡신	1,081.5	2,869.4	3,744.2	685.5	1,532.0

06 ▶ 미세먼지 노출 저감 방안

가. 개인보호구를 활용한 미세먼지 저감

최근, COVID-19을 비롯하여 환경 및 보건에 대한 국민적 관심이 증가함에 따라 마스크에 대한 착용은 우리 일상생활에 선택이 아닌 의무가 되었습니다. 면마스크의 경우 착용성과 사용 접근성 그리고 비용 부분에서 다른 호흡용 개인보호구에 비해 용이하기 때문에 농업인은 면마스크 사용을 선호할 수 있습니다. 하지만, 면마스크의 경우 작업 시 땀에 자주 젖거나 재사용으로 인해 마스크 착용에 대한 불편함과 미세먼지 차단 효율에 대한 신뢰성 문제 등이 발생할 수 있습니다. 본 장에서는 미세먼지 노출 특성에 따른 마스크의 유형별 미세먼지 차단 효율 평가 결과를 기술하였습니다.

1) 개인보호구 규격별 성능 평가 실험

마스크 유형별 미세먼지 차단 효율을 평가하기 위하여 폭, 높이, 길이가 각각 1m인 정사각형의 실험 챔버를 제작하였습니다. 챔버 내 미세먼지 측정은 마스크를 기준으로 광학식 부유분진측정기(OPC, Optical Particle Counter)를 2대 설치하여 전·후 미세먼지 농도를 측정하였습니다. 챔버 내부 미세먼지 발생을 위해서 PM₁₀, PM_{2.5}의 입경을 가지는 시험용 미세분진을 활용하였습니다. 챔버 상단부에 제작된 투입구에 시험용 분진을 투하한 후 챔버 내 중앙에 위치한 순환 휠을 이용해 미세분진을 균일하게 분포시켰습니다. 마스크 규격 선정은 일반적으로 사용되고 있는 면마스크(Normal), 보건용 마스크인 KF80, KF94를 기준으로 규격을 선정하였습니다(그림 15, 16).

[그림 15] 실험 시 사용한 유형별 마스크

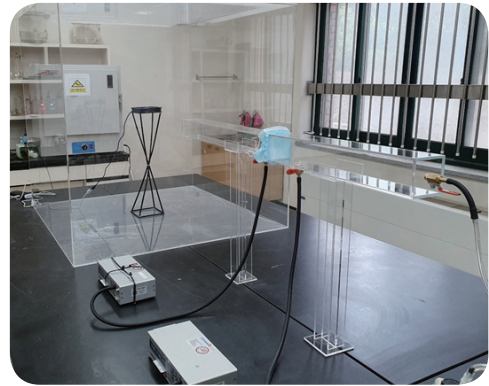
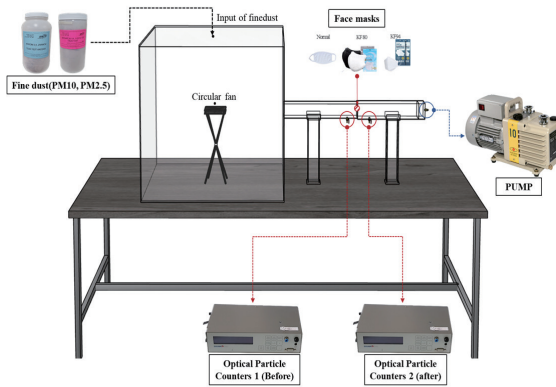


일반 면마스크

KF80 마스크

KF94 마스크

[그림 16] 호흡용 개인보호구 규격별 미세먼지 차단 실험



2) 호흡용 개인보호구 규격별 미세먼지 차단 효율

호흡용 개인보호구 규격별 미세먼지 차단 효율을 분석한 결과, 마스크 착용 시간에 따른 미세먼지 차단 효율은 큰 변화를 보이지 않았지만, 각 마스크 규격별로 상이한 차단 효율을 보였습니다. 각 마스크의 규격은 특정 시험 입자 크기 분포에서 여과되는 효율을 나타낸 것이기 때문에 작업자의 호흡이나 착용 상태에 따라 차이를 보일 수 있습니다. 따라서, 작업 종류와 강도 그리고 노출되는 미세먼지의 입경 특성 및 농도 등에 따라 적절한 마스크의 가이드 라인이 필요하다고 판단됩니다.

일반 면마스크의 경우 PM₁₀에 대한 차단 효율이 50%, PM_{2.5}가 45%, PM_{1.0}이 30% 이하로 나타났습니다. 평균적으로 일반 면마스크의 차단 효율은 약 40%이며, 미세먼지의 입경이 작을수록 차단 효율이 감소하였습니다. 세부 입경에 따른 미세먼지 차단 효율을 분석한 결과, 부유분진측정기의 측정가능한 입자 크기 범위에서 입경이 작아질수록(최소 0.325 um) 차단 효율이 상대적으로 낮아지는 것을 확인하였습니다. KF80 마스크의 경우 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} 모두 90% 이상의 차단 효율을 보였습니다. 미세먼지의 세부 입경별 분석 결과, 0.325um에서는 80% 이하의 차단 효율을 보였습니다.

KF94 마스크의 경우 전체 입경의 98% 이상이 미세먼지 차단 효율을 보여주었으며, 세부 입경별 분석 결과에서도 모든 입경의 분포에서 95% 이상의 차단 효율을 보였습니다. 이에 비교적 큰 입경의 분포를 가지는 미세먼지가 발생하는 농작업시에는 상대적으로 착용성과 호흡성이 편리한 KF80 마스크 착용이 가능할 것으로 판단됩니다.

작업자의 미세먼지 노출 저감을 위해서는 작업자의 미세먼지 노출 특성에 따른 적합한 규격의 개인보호구 착용이 중요합니다. 또한, 작업자 개인의 개인보호구 사용 목적과 방법에 대한 올바른 인지를 하는 것이 중요합니다. 그 중, 안면마스크를 활용한 개인보호구의 경우 안면마스크와 작업자의 밀착된 정도를 확인하는 것이 중요합니다. 아무리 미세먼지 차단 효율이 좋은 KF94를 착용하여도 밀착이 이루어지지 않아 누설이 된다면 마스크 착용에 따른 미세먼지 저감 효과가 없는 것으로 볼 수 있습니다. 따라서 농작업시 마스크를 착용하는 경우 마스크를 안면에 밀착이 잘 되도록 착용하는 것에도 주의를 기울이는 것이 필요합니다.

나. 환기를 활용한 미세먼지 저감

환기란 시설 내부의 공기를 외부 공기로 치환하는 것을 의미하며, 실내의 온도변화뿐만 아니라 습도·탄산가스·유해가스·공기흐름 등을 동시에 조절하는 기능을 말합니다. 환기방식의 효과는 시설 내부의 위치·방향·배치·내부구조·단열정도·냉난방정도·생산량 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 시설의 특성에 따른 환기 방식의 선정이 중요합니다. 따라서, 농장의 여러 환경조건과 유해공기 발생원의 분포 및 시설 내부의 공간적 특성을 고려하는 것이 중요합니다.

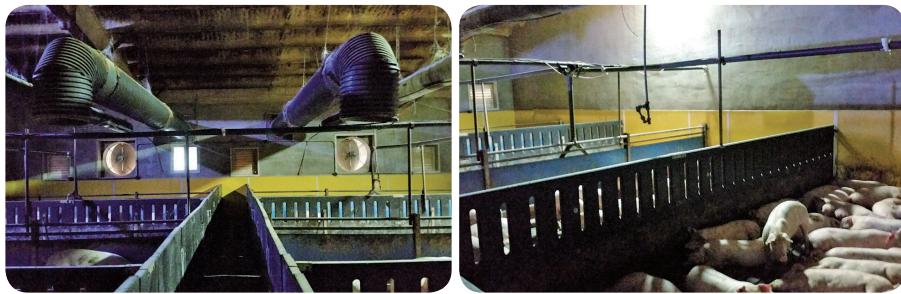
1) 환기의 중요성

겨울철에 밀폐된 온실 내에서 작물을 재배하게 되면, 습도가 높아져 병충해가 발생하기 쉽고, 탄산가스 농도의 결핍으로 인하여 생육이 불량해지며, 암모니아 가스 등과 같은 유해가스의 농도가 높아져 작물과 농작업자가 피해를 받을 수 있습니다.

축사의 환기 또한 가축의 최적 사육환경 조성을 위하여 축사 내 온도·습도·악취·부유세균·분진 등의 환경요인을 조절하기 위한 주요 수단입니다. 축산시설에서 적절한 환기를 수행하지 않을 경우, 여름철 공기의 정체구역이 발생하여 가축에게 고온 스트레스가 발생하거나, 겨울철 내부 공기질이 악화되어 가축의 면역력이 떨어질 수 있습니다. 이는 질병 등의 문제가 발생하여 성장저하 및 폐사율을 증가시킬 수 있습니다. 환기장치의 적절한 설계와 운영을 통해 가축 및 농작업자에게 바람직한 환경을 제공할 수 있습니다.

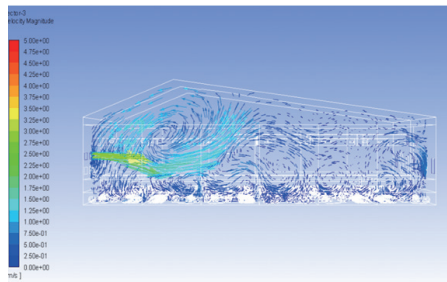
최근에는 농업생산시설의 환기를 통해 시설 내 사육환경 및 작업 환경을 개선할 목적으로 내부의 환경을 정밀하게 분석 및 진단할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하는 연구들이 활발히 이루어지고 있습니다. 개발된 시뮬레이션 모델을 통해 시설 내부에 오염된 공기를 외부의 신선한 공기로 교환하고, 시설 내부의 환경적 문제점 파악과 다양한 환기 구조들을 조합하여 환기효율성 분석을 수행하고 있습니다 (그림 17). 또한, 농작업장의 유해가스 및 분진 등을 대상으로 효율적으로 저감할 수 있는 환기운영관리방안 마련을 통해 농가의 작업 환경 개선 및 생산성 증대를 기대할 수 있습니다.

[그림 17] 축산시설 내 환기효율성 분석을 위한 시뮬레이션 모델(Oh et al., 2019)

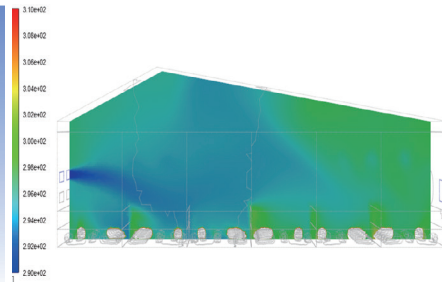


(a) 돈방 내부 환기구조

(b) 돈방 내부 전경



(c) 시뮬레이션을 활용한 돈사 유동장 (flow field) 분석



(d) 돈사 내부 열 확산 분석

2) 전체 및 국소환기 설비의 이해 및 활용

가) 전체환기

전체환기(General Ventilation)란 공간의 전체를 대상으로 환기를 수행하는 의미입니다. 전체환기는 발생원이 여러 곳에 있어 제어가 쉽지 않거나, 이동하는 경우 국소적으로 환기시키는 것이 불가능할 때에 실내 내부에 신선한 공기를 공급하여 공기 중의 화학적 유해인자를 희석하여 농도를 낮추는 환기시스템입니다. 실내 유해물질의 농도는 낮아지지만, 유해인자에 대한 농업인의 노출을 완전히 피할 수는 없습니다. 그러므로 전체환기 시스템은 유해성이 낮은 화학물질에 대한 농도 희석이나 실내환경에 적용하는 것이 바람직합니다.

환기방법은 외부의 공기(깨끗한 공기)를 실내 공간 전체에 공급하여 오염물질의 농도를 희석하는 것과 외부공기를 공급하는 방법 두 가지가 있습니다. 실내·외의 자연적인 압력 차에 의한 자연환기 방식 그리고 기계적으로 압력 차를 형성하여 공급하는 방법인 기계환기 방식이 있습니다. 자연환기 방식은 주로 열린 창문이나 틈을 통해 이루어지며, 기계환기 방식은 일정 규모 이상의 시설·빌딩·지하철·병원·호텔 등에서 이용되고 있습니다.

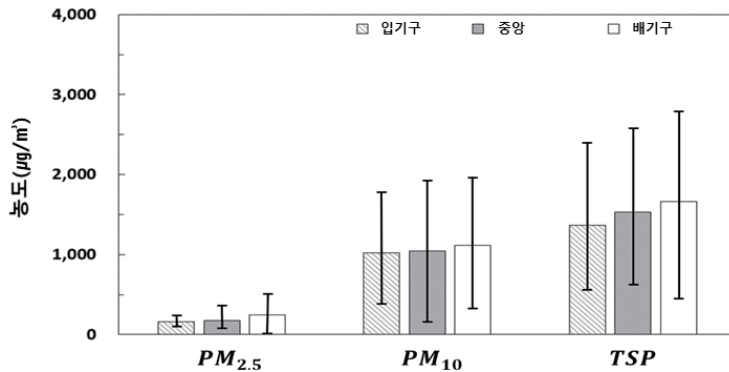
※ 전체환기 적용 상황

- 오염발생원의 유해물질 발생량이 적어 국소배기로 필요환기량이 불가능한 경우
- 작업자가 근무하는 장소에서 오염발생원이 멀리 떨어져 있거나 공기 중 유해물질 농도가 노출기준 이하인 경우
- 유해물질의 독성이 낮은 경우
- 소량의 오염물질이 일정 속도로 작업장으로 배출되는 경우
- 동일 작업장에 다수의 오염발생원이 분산되어 있는 경우
- 오염발생원에 이동성이 있는 경우

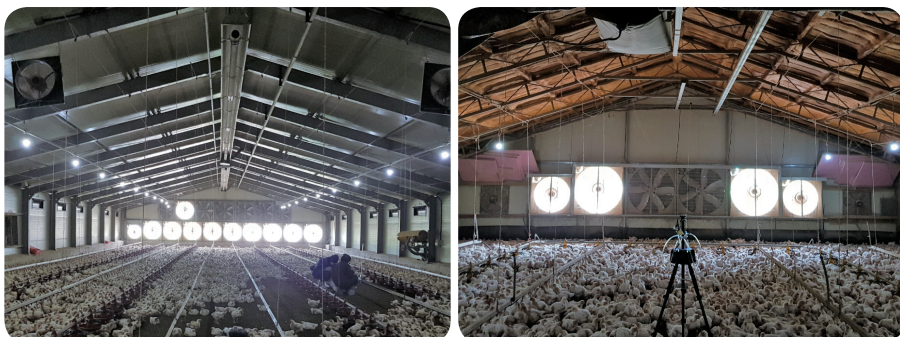
(1) 전체환기 예시 : 강제환기식 계사

전체환기 중 강제환기를 수행하는 계사 내부 미세먼지 농도 분포 영향을 파악한 결과입니다. 계사 내 위치별 미세먼지 평균 농도는 입기구에서 배기구로 갈수록 (TSP-총분진 22.3%, PM₁₀ 9%, PM_{2.5} 56%) 증가하였습니다. 입기구를 거쳐 바닥에서 발생하는 미세먼지의 농도가 배기구로 누적되어 먼지의 농도가 상승하는 경향을 보였습니다(그림 18). 이는 국내 강제환기식 육계사의 환기가 터널형 구조로 이루어져 유동이 길이 방향으로 형성되기 때문입니다(그림 19). 이처럼 계사 내부 환기 구조는 시설 내부의 공기 유동 및 미세먼지 발생 농도 분포에 영향을 줄 수 있습니다. 특히, 강제환기식 계사의 경우 배기구 주변 작업자는 상대적으로 더 많은 미세먼지에 노출되는 환경이므로 작업 시 개인보호구 착용 및 적절한 환기시스템 조절을 통해 미세먼지 저감 조치가 필요하다고 판단됩니다.

[그림 18] 육계사 내 위치별 미세먼지 농도 추이



[그림 19] 기계환기식 계사 내부 전경



나) 국소배기장치

국소배기장치는 오염물질(유해물질)을 희석하는 전체환기와는 다르게 오염원에서 배출된 오염물질이 작업장 내로 확산되기 이전에 포집하여 적절하게 처리되도록 하는 시설입니다. 국소배기장치는 후드, 덕트, 공기정화장치, 송풍기, 배출구 등으로 구성되어 있습니다.

※ 국소배기장치 적용 상황

1. 유해물질의 발생량이 많은 경우
2. 유해물질의 독성이 강한 경우
3. 근로자의 작업위치가 유해물질 발생원에 근접한 경우
4. 발생 주기가 균일하지 않은 경우
5. 발생원이 주로 고정되어 있는 경우
6. 법적으로 국소배기장치를 설치해야 하는 경우

(1) 국소배기장치 : 후드

후드(hood)는 국소배기장치의 시작점으로 오염물질이 포함된 공기를 흡입합니다. 오염물질이 유입되는 입구인 개구부는 그 모양에 관계없이 후드라고 할 수 있습니다. 작업이나 활동에 지장을 주지 않으면서 오염된 공기가 모두 유입되도록 제어속도, 크기, 모양 등을 갖추어야 합니다.

(가) 후드의 형태

후드는 오염물질이 발생하는 근원을 기준으로 구분하는 것이 편리하며, 발생원이 후드 안에 있는 경우 포위식(enclosing), 발생원과 후드가 일정 거리가 떨어져 있는 경우 외부식(exterior)으로 나뉩니다.

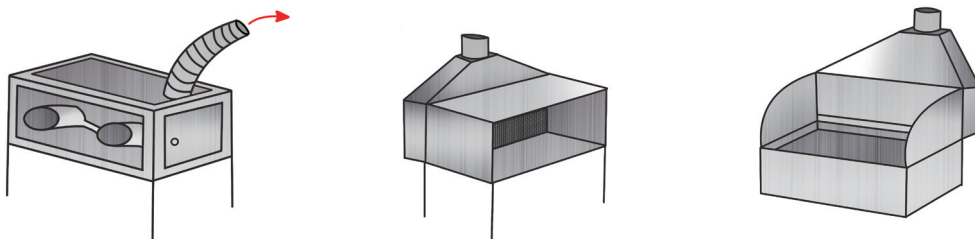
[그림 20] 관리대상 유해물질 관련 국소배기장치 후드의 제어풍속

관리대상유해물질 관련 국소배기장치 후드의 제어풍속			분진작업장소에 설치하는 국소배기장치의 제어풍속				
물질의 상태	후드 형식	제어풍속 (m/sec)	분진 작업 장소	제어풍속(m/sec)			제어풍속(m/sec)
				포위식 후드의 경우	외부식 후드의 경우		
				측방 흡인형	하방 흡인형	상방 흡인형	
가스상	포위식 포위형	0.4	암석 등 탄소원료 또는 알루미늄박을 체질하는 장소 주물모래를 재생하는 장소 주형을 부수고 모래를 타는 장소 그 밖의 분진작업 장소	0.7	-	-	-
	외부식 측방흡인형	0.5		0.7	-	-	-
	외부식 하방흡인형	0.5		0.7	1.3	1.3	-
	외부식 상방흡인형	1.0		0.7	1.0	1.0	1.2
입자상	포위식 포위형	0.7	후드의 설치 방법		제어풍속(m/sec)		
	외부식 측방흡인형	1.0	회전체를 가지는 기계 전체를 포위하는 방법		0.5		
	외부식 하방흡인형	1.0	회전체의 회전에 의하여 발생하는 분진의 흩날림 방향을 후드의 개구면으로 덮는 방법		5.0		
	외부식 상방흡인형	1.2	회전체만을 포위하는 방법		5.0		

(나) 포위식 후드

포위식 후드(enclosing hood)는 오염원을 가능한 최대로 포위하여 오염물질이 후드 밖으로 누출되는 것을 막고, 필요한 공기량을 최소한으로 줄일 수 있습니다. 포위식 후드는 오염 발생원을 모두 포위하기 때문에 작업에 지장이 없는 경우에 적합합니다. 유해물질 발생원의 바깥쪽에 설치한 외부식 후드인 경우, 후드를 향해서 흡입되는 기류와 방향이 다른 기류(난기류)가 있으면, 유해물질이 난기류에 밀려 후드에 들어가지 못하게 될 수 있습니다. 포위식 후드인 경우에는 측면에서 형성된 난기류를 만나도 후드의 측면이 막아 주기 때문에 발생원에는 영향이 없습니다. 또한, 발생원이 후드 안에 있으므로 외부식에 비해 유해물질의 노출 가능성이 상대적으로 적습니다.

[그림 21] 포위식 후드의 예



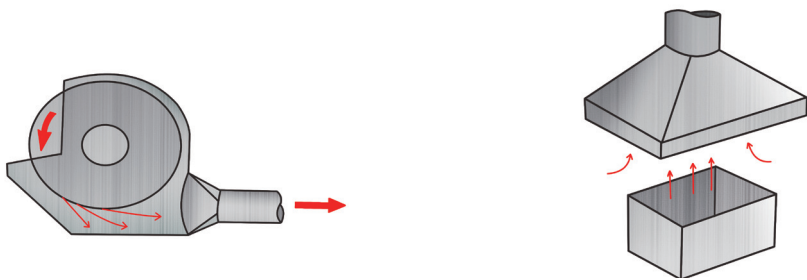
(a) 6면 포위

(b) 6면 포위

(c) 4면 포위

리시버식 후드(receiving hood, 수동형 후드)는 공정 특성을 그대로 이용하여 오염물질을 수동적으로 제어하는 후드입니다. 연삭기를 이용한 공정은 연삭기의 회전력에 의해 발생하는 오염물질이 일정한 방향으로 배출됩니다. 따라서 배출되는 방향에 후드를 설치하여 오염물질을 받을 수 있도록 설치한 후드입니다.

[그림 22] 외부식 후드의 예



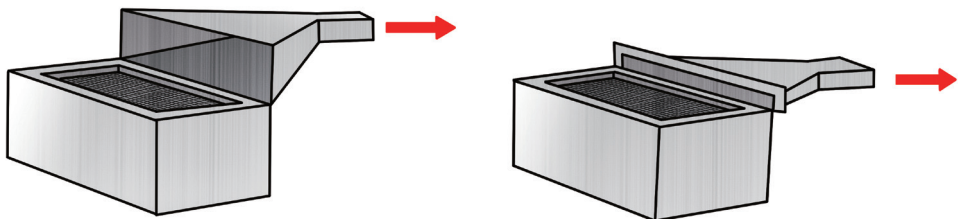
(a) 유해물질이 일정방향으로 비산하는 경우

(b) 열상승 기류가 있는 경우

(라) 포집식(형) 후드

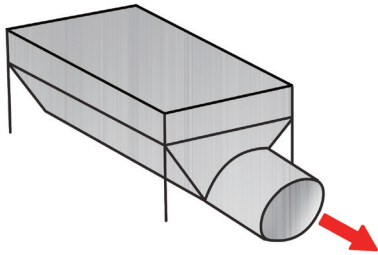
포집식 후드(capturing hood)는 국소배기장치의 송풍기 힘에 의해 능동적으로 오염물질을 후드로 끌어들이는 형태입니다. 즉, 오염원의 외부에 설치하여 송풍기에 의해 발생하는 흡인력을 이용하여 발생원에서 발생하는 오염물질을 후드로 끌어들여 처리하는 후드입니다.

[그림 23] 포집식(형) 후드의 종류

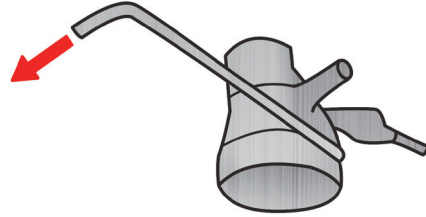


(a) 측방형 후드

(b) 슬롯 후드



(a) 측방형 후드



(b) 슬롯 후드

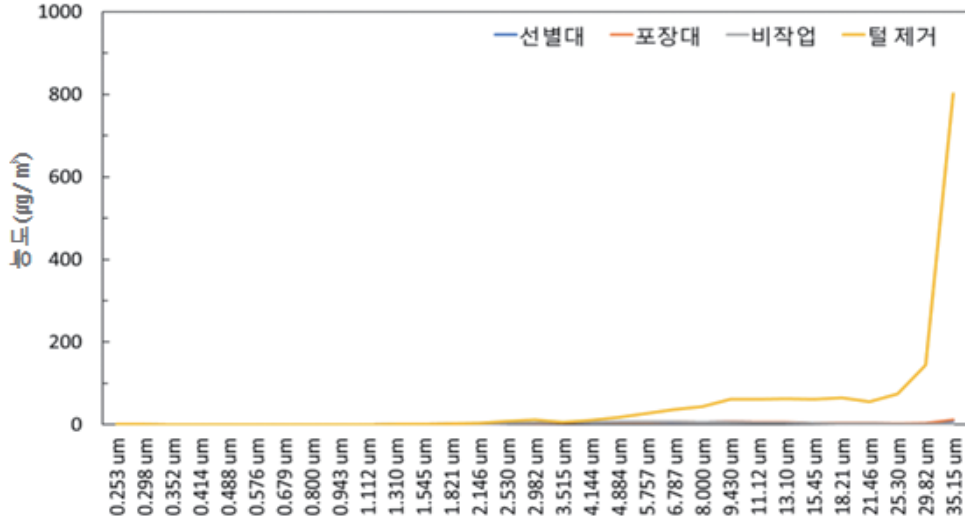
3) 복숭아 선별작업장 내 미세먼지 저감 실험

가) 미세먼지 저감장치 개발

복숭아 선별작업 중 작업자에게 노출되는 미세먼지를 저감하기 위해 미세먼지 저감 장치 개발 및 저감 효율을 평가하고자 하였습니다. 미세먼지 저감장치 실험은 미세먼지 저감장치 가동 전, 미세먼지 저감장치만 가동한 경우, 미세먼지 저감장치와 환기 팬을 동시에 가동한 경우로 구분하여 수행하였습니다. 미세먼지 저감효율 평가를 위해 고농도의 미세먼지를 발생시키는 복숭아 필름지 제거 작업과 털 제거 작업으로 선정하였습니다. 털 제거 작업을 수행하는 지역의 경우 $35.15 \mu\text{m}$ 이상의 입경을 가진 미세먼지의 농도가 65~289배 증가하는 것으로 나타났습니다(그림 24). 또한, 복숭아 필름지를 제거하는 경우와 표면의 털을 제거할 때 복숭아의 털이 공기 중으로 비산 및 하강하는 것을 확인할 수 있었습니다(그림 25).

이처럼 복숭아 선별작업장 내 미세먼지의 입경은 PM_{10} 이상의 크기를 갖고 있어 강하분진의 특성을 지니고 있습니다. 이를 고려하여, 미세먼지 저감장치 함체 상부에 부착된 써큘레이터 휠의 가동을 통해 하강기류를 형성하여 미세먼지가 저감장치에 포집될 수 있도록 설계하였습니다(그림 26). 복숭아 미세먼지 저감실험의 미세먼지 측정지점은 복숭아의 털, 필름지 등을 제거할 때 작업자 호흡기 높이에서 미세먼지가 발생하는 지점과 미세먼지 저감장치를 통해 정화된 공기가 장치 외부로 배출되는 저감 지점으로 선정하였습니다.

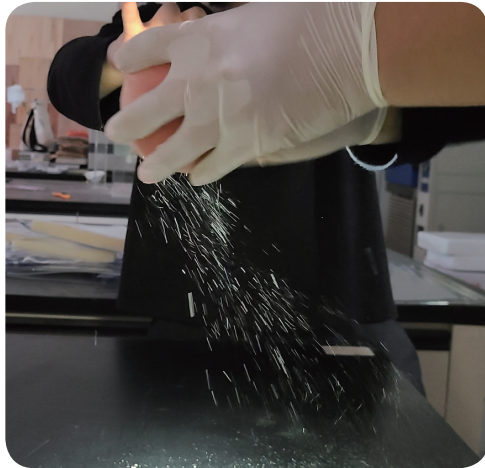
[그림 24] 복숭아 선별작업장 입경별 미세먼지 농도



[그림 25] 복숭아 표면 털 제거 시 분진 비산 장면

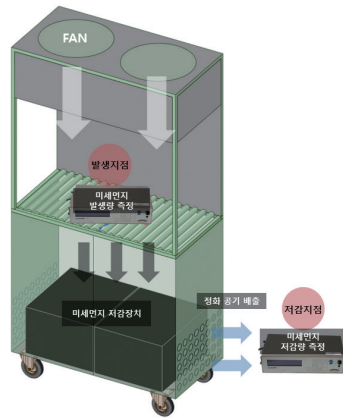


(a) 복숭아 표면의 털



(b) 복숭아 털 비산 장면

[그림 26] 복숭아 미세먼지 저감장치 개요



(a) 미세먼지 저감 장치 실험



(b) 미세먼지 저감 장치 외관

나) 미세먼지 저감장치 실험 결과

미세먼지 저감장치를 가동하지 않고 복숭아 필름지 제거를 수행한 미세먼지 발생지점에서 총부진 농도가 1,217.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났습니다. 또한, 미세먼지 저감장치를 가동하는 경우 TSP의 농도가 감소하는 경향을 알 수 있습니다(그림 28a). 미세먼지 발생지점에서 미세먼지 저감장치를 일부 가동한 경우 미가동 시와 비교하였을 때, TSP의 농도 저감률은 23.9%이고, 흰과 미세먼지 저감장치 모두 가동한 경우 84.9% 저감률을 보였습니다. 반면, 각 저감장치의 가동유무에 따른 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 농도는 큰 편차를 보이지 않았습니다(그림 28b, 28c).

[그림 27] 복숭아 선별작업장

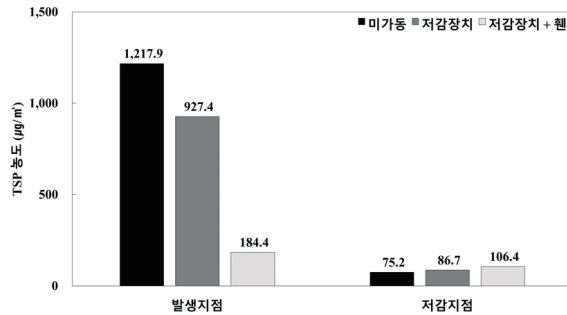


(a) 선별작업장 내부 전경

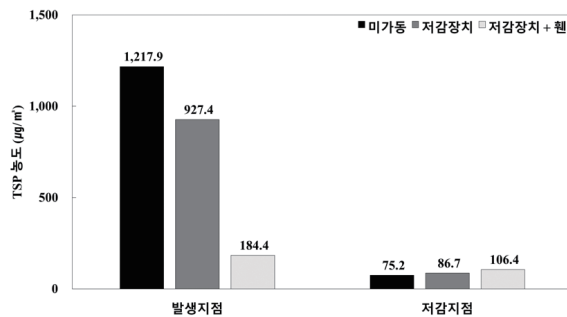


(b) 복숭아 털 제거 작업

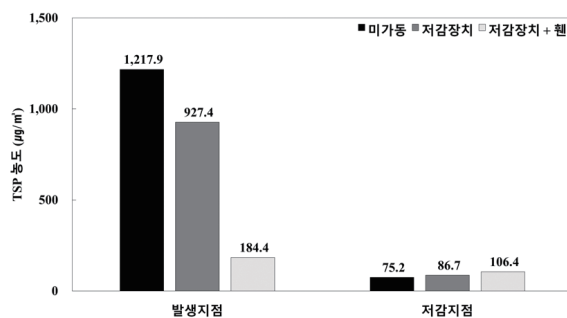
[그림 28] 복숭아 필름지 제거 시 입경별 미세먼지 농도



(a) TSP 농도 저감 변화 추이



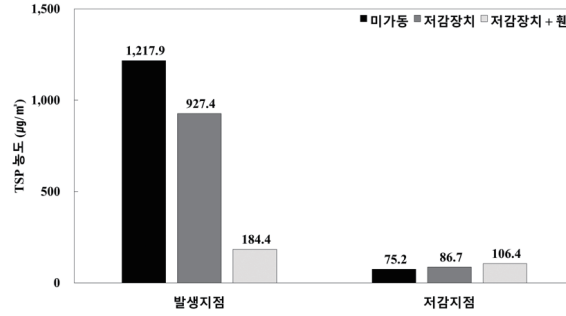
(b) PM₁₀ 농도 저감 변화 추이



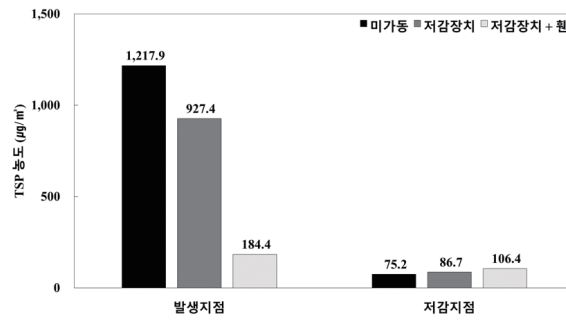
(c) PM_{2.5} 농도 저감 변화 추이

복숭아 털 제거 작업을 수행하는 경우도 미세먼지 저감장치를 가동하지 않고 직접 복숭아의 털을 제거를 수행한 미세먼지 발생지점에서 TSP 농도가 59,018µg/m³으로 가장 높게 나타났습니다(그림 29a). 미세먼지 발생지점에서 저감장치를 가동한 경우와 가동하지 않은 경우를 비교하였을 때, TSP의 농도 저감률은 70.2%이고, 흰과 미세먼지 저감장치를 함께 가동한 경우 87.9% 저감률을 보였습니다. PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 저감장치 가동유무와 측정지점별 미세먼지 농도에 큰 편차를 보이지 않았습니다(그림 29b, 29c).

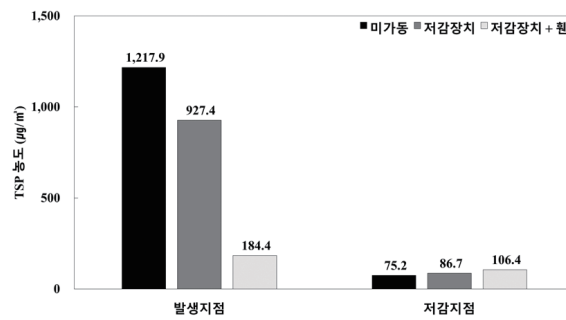
[그림 29] 복숭아 털 제거작업 시 입경별 미세먼지 농도



(a) TSP(총분진) 농도 저감 변화 추이



(b) PM-10 농도 저감 변화 추이



(c) PM-2.5 농도 저감 변화 추이

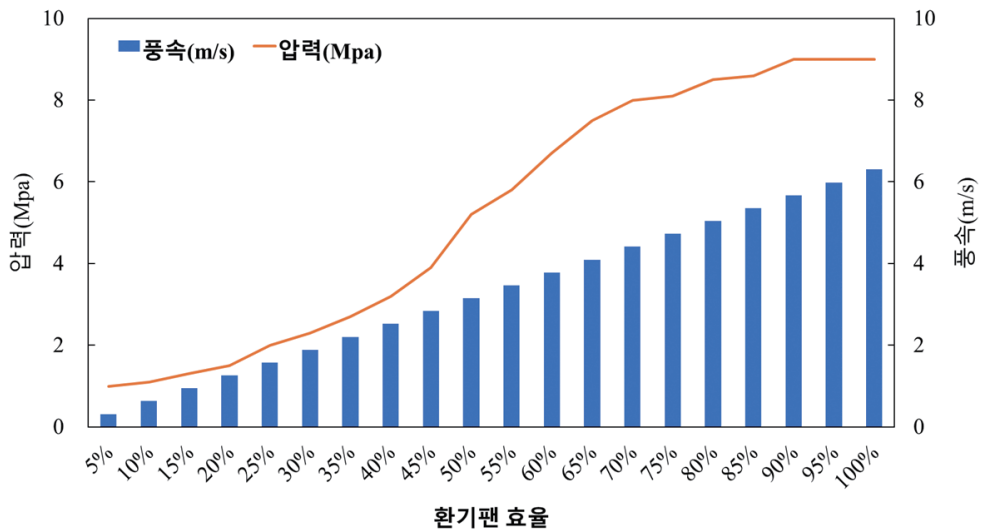
4) 국소배기장치 설계 시 고려사항(제안사항)

국소배기장치를 활용하여 농작업 시 발생하는 미세먼지 및 분진 등을 저감하기 위해선 저감하고자 하는 유해물질의 물리적 특성을 이해하는 것이 중요합니다. 특히, 미세먼지 입자의 크기는 미세먼지의 입경 분포 특성에 따라 강하, 부유 분진으로 나뉠 수 있습니다. 이처럼 공기의 흐름에 영향을 쉽게 받을 수 있는 유해물질의 경우 포집부의 방향을 고려하여 설치해야 합니다. 만일 포집부를 향해서 흡입되는 기류와 방향이 다른 기류(난기류)가 있으면 유해물질이 난류에 밀려 포집이 제대로 이루어지지 않을 수도 있습니다.

또한, 유해물질이 열 상승 기류를 타거나 입경이 작고 가벼운 부유분진과 같은 성질을 가지고 있다면 포집부를 유해물질의 이동 방향으로 설치해야 적절한 유해물질을 포집할 수 있습니다.

그림30은 환기팬의 유속이 증가함에 따른 저감장치 내부 압력이 증가하는 것을 보여주고 있습니다. 저감장치 내부 유속으로 인한 압력차이가 발생하는 경우 저감장치 내부 공기의 유동이 난류가 형성되어 미세먼지가 외부로 확산될 수 있습니다. 따라서 미세먼지 저감장치 내부의 미세먼지가 외부로 확산되는 것을 방지하기 위해서는 적절한 환의 유속 설계를 통해 장치 내부 압력 차이를 개선시키는 것이 중요합니다.

[그림 30] 팬 풍속 증가에 따른 압력 증가



07 ▶ 참고문헌



1. Harry, E. G., 1978. Air pollution in farm buildings and methods of control : a review. Avian Pathology 7(4): 441-454. doi:10.1080/03079457808418301.
2. Jones, W., K Moring, S A Olenchock, T Williams, J Hickey, 1984. Environmental study of Poultry confinement buildings. American Industrial Hygiene Association Journal 45(11) : 760-766
3. 남상운, 윤용철, 이현우, 『신고 농업시설공학』, 향문사, 2018, 240-247p
4. 박동욱, 최상준, 양원호, 『작업환경관리 산업환기』, KNOUPRESS, 2018, 55-176p
5. Oh, B. W., S. W. Lee, H. C. Kim, I. H. Seo, 2019. Analysis of Working Environment and Ventilation Efficiency in Pig House using Computational Fluid Dynamics. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 61(2): 85-95. doi:10.5389/KSAE.2019.61.2.085
6. Seo H. J., B. W. Oh, H. C. Kim, S. J. Sin, I. H. Seo, 2020, Concentrations of particulate matter exposed to farm workers in the broiler houses. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 62(5): 27-37. doi:10.5389/KSAE.2020.62.5.027

본 기술보급서는 농촌진흥청 공동연구개발사업(PJ014269)의 수행을 통해 나온 성과물입니다.

주관과제명 : 미세먼지의 농작업자 영향 실태조사 및 농작업 환경개선 기술 개발 (국립농업과학원 김효철)

협동과제명 : 농작업별 농업인 미세먼지 노출 특성 구명 (국립농업과학원 김효철)

육내 농작업장의 미세먼지 발생에 영향을 미치는 요소 구명 및 개선 연구 (전북대 서일환)

농작업자 미세먼지 노출 특성 및 저감 방안

발행일 2021년 12월

발행인 농촌진흥청 국립농업과학원 김상남

편집인 농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부장 이강진

편집기획 농촌진흥청 국립농업과학원 농업인안전보건팀장 김경란

편집위원 국립농업과학원 : 김효철, 김경수, 채혜선, 신소정, 정원건, 김경민, 허진영

전북대 : 서일환, 서효재

발행처 농촌진흥청 국립농업과학원

전라북도 완주군 이서면 농생명로 166

063-238-2000

발간등록번호 11-1390802-001542-01

ISBN 978-89-480-7168-9 93520