

새만금 내 동계 사료작물 재배에 따른 미세먼지 농도 변화 모니터링

이성원¹ · 강방훈² · 서일환^{3*}

¹전북대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과 대학원생, ²농촌진흥청 디지털농업추진단 농업연구관,

³전북대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과 교수

Monitoring of Particulate Matter Concentration for Forage Crop Cultivation during Winter Season in Saemangeum

Seong-Won Lee¹, Bang-Hun Kang², and Il-Hwan Seo^{3*}

¹Graduate Student, Jeonbuk National University, College of Agriculture & Life Sciences, Department of Rural Construction Engineering, Jeonju 54896, Korea

²Research Officer, Digital Agriculture Promotion Team, RDA, Wanju 55365, Korea

³Professor, Jeonbuk National University, College of Agriculture & Life Sciences, Department of Rural Construction Engineering, Jeonju 54896, Korea

Abstract. The Saemangeum has a dry surface characteristic with a low moisture content ratio due to the saline and silt soil, so the vegetation cover is low compared to other areas. In areas with low vegetation cover, wind erosion has a high probability of scattering dust. If the vegetation cover is increased by cultivating crops that can withstand the Saemangeum reclaimed environment, scattering dust can be reduced by reducing the flow rate at the bottom. Thus, the purpose of this study is to analyze the effect of suppressing the generation of fine dust and scattering dust by cultivating winter forage crops on the Saemangeum reclaimed land. While growing 0.5 ha of barley and 0.5 ha of triticale in Saemangeum reclaimed land, the concentration of fine dust was monitored according to agricultural work and growth stage. Changes in the concentrations of PM-10, PM-2.5, and PM-1.0 were monitored on the leeward, the windward and centering on the crop field. As a result of monitoring, PM-1.0 had little effect on crop cultivation. the concentration of PM-10 and PM-2.5 increased according to tillage and harvesting, and tillage had a higher increasing the concentration of PM-10 and PM-2.5 than that of harvesting. According to the growth stage of crops, the effect of suppressing scattering dust was shown, and the effect of suppressing scattering dust was higher in the heading stage than in the seedling stage. So, it was found that there was an effect of suppressing scattering dust other than the effect of land covering. Through this study, it was possible to know about the generation and suppression effect of scattering dust according to crop cultivation.

Additional key words : crop cultivation, field monitoring, particle matter, Saemangeum, winter forage crop

서론

미세먼지는 입자의 지름이 10 μ m 이하인 먼지를 총칭하며, 이러한 미세먼지는 PM-10이라고 하며, 입자의 지름이 2.5 μ m 이하인 먼지를 초미세먼지로 정의된다(US EPA, 2019). Ministry of Environment(2021)에 따르면 비산먼지는 미세 먼지 중 일정한 배출구 없이 대기 중에 직접 배출되는 경우로 정의하며, 자연적인 현상에 의해 지표면에 있던 흙이 부유하여 바람을 타고 발생할 수 있으며, 자동차, 공사, 농업활동 등

인위적인 현상에 의해서도 발생할 수 있다. 사람이 미세먼지에 노출될 경우, 호흡기 질환, 심장 및 뇌혈관 질환 등 인체 건강에 직·간접적 영향으로 인해 수명이 단축될 위험이 있다(Fairbairn과 Reid, 1958; Samet 등, 2000; Pope와 Dockery, 2006; Wong 등, 2008). 농업에 있어 미세먼지는 농작물의 생장에 필요한 햇빛을 차단하여 작물 생장에 영향을 미쳐 농업 생산량 감소를 유발할 수 있다(Li 등, 2018; Shuai 등, 2013). 황사 때 시설하우스 표면에 부착된 미세먼지가 태양 투광량을 평상 시 대비 7.6% 감소시켜 작물의 광합성을 억제하여 시설 내부 온도상승을 지연시켜 작물생육에 장애를 발생시킨 사례가 있다(RDA, 2021). 이처럼 미세먼지의 증가는 농산물의 생산 저하, 기대수명 감소와 관련이 있어 미세먼지의 농도를 관

*Corresponding author: ihseo@jbnu.ac.kr

Received January 26, 2022; Revised April 22, 2022;

Accepted April 26, 2022

리할 필요가 있다. Clean Air Policy Support System (2021)에 따르면 2018년 기준 전국 미세먼지(PM-10) 발생량 중 48.3%를 비산먼지가 차지하고 있다. 비산먼지는 물리적인 작용에 의하여 발생하며, 새만금 지역의 경우 간척사업이 완료된 노지에서 비산먼지가 발생 및 인근지역에 영향을 미칠 수 있다. 이에 Hwang 등(2009)은 새만금 비산먼지 저감을 위하여 염생식물 재배를 통한 토지 피복률을 높여 비산먼지를 저감하는 연구를 수행한 바 있다.

새만금 간척지는 토지 291km²와 호소 118km²로 나눌 수 있으며, 인근에 산이 거의 없는 개활지의 특징을 지니고 있다(Hwang 등, 2008). 새만금 내 토양은 작물 성장에 불리한 염분농도 분포를 보이며(Kim 등, 2012; Kim 등, 2016; Ryu 등, 2020; Son과 Cho, 2009), 양분이 불균형적으로 구성되어 있어 식생 피복도가 낮다(Choi 등, 2014; Hyun 등, 2021; Kim 등, 2007). 새만금 간척지의 토성은 미사질양토-세사양토이고 점토함량은 대부분 5%이하로 매우 적은 것으로 나타났으며(Son과 Cho, 2009; Son 등, 2009), 풍식에 대한 저항성이 낮아 비산먼지 발생의 가능성이 높을 것으로 추정되었다(Hyun 등, 2021).

새만금 내 비산먼지 저감을 위한 방법으로는 토양에 물을 살포하거나 지하수를 통한 토양의 수분을 관리하거나, 지피식물 등을 통한 토양표면을 피복하여 풍식을 방지하는 방법이 있으며(Kim, 2005; Kim 등, 2018), 방풍림을 조성하여 풍속을 감소시키는 방법이 있다(Hwang 등, 2008). 선행 연구에 따르면 새만금 내에 식물 재배를 통한 피복률 증가를 통한 미세먼지 저감에 관련된 연구가 진행되었으며(Hwang 등, 2009; Kwak 등, 2021), 새만금 내 식물 재배를 통한 경제적 이윤 창출 효과에 관한 연구가 진행되었다(Kim 등, 2013; Son, 2006; Yang 등, 2012).

새만금 간척지 인근지역인 군산과 김제시에서 미세먼지 모니터링 수행연구가 진행되었으며(Hwang 등, 2008; Hwang 등, 2009), 비산먼지의 인근지역 확산에 대한 연구도 진행된 바 있다(Bitog 등, 2009; Seo 등, 2007; Seo 등, 2010a). 간척지의 토지가 드러난 초기에는 염분의 농도가 높은 관계로 염생식물을 활용하여 비산먼지를 저감하였으나, 최근에는 농경지의 조성구획화를 기반으로 하여 경제작물을 재배할 수 있게 되면서, 염분에 상대적으로 강한 작물에 대한 재배시험이 진행되고 있다(Sin 등, 2015; Yang 등, 2012). 이러한 작물의 재배는 바람에 대한 장애물 역할을 하면서, 토양표면에서의 유속을 낮추는 효과가 있어 비산먼지의 발생원인인 토양의 구름비산(creeping)과 도약비산(saltation)의 억제효과가 있다(Park과 Lee, 2000; Song 등, 2007). 비산먼지의 발생 저감 대책 마련을 위해 재배환경과 작업환경을 고려한 간척지의 비

산먼지 발생농도 및 미세먼지의 농도에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 새만금 간척지 내에서 염분에 강한 동계 사료작물에 해당하는 청보리와 라이밀 재배지를 대상으로, 농작업으로 인한 비산먼지의 발생 증가량과 작물의 생육에 따른 비산먼지 발생 억제 효과를 현장 모니터링을 통해 산정하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

현장실험 대상지역은 김제시 광활면 인근에 위치한 새만금 6공구 농생명용지(위도: 35°49'44.11"N, 경도: 126°41'13.91"E)로 실험을 위한 작물재배구역이었다. 실험용 재배지는 3개 구역으로 각 면적은 0.5ha이다. 실험작물은 새만금 토양 내의 염분에 저항성이 있으며, 건조한 토양 환경에서도 재배가 가능한 동계 사료발작물을 대상으로 하여, 현지 농작업을 고려하여 청보리와 라이밀로 선정하였다(Fig. 1). 청보리와 라이밀은 단파로 재배하였다. 대조군은 나대지로 어떠한 작물을 재배하지 않고 있었으며, 약간의 잡초가 있었지만 거의 식물이 자라고 있지 않았다.

2. 연구방법

2.1 연구 장비

대상 지역의 실시간 기상 관측을 위해 자동기상관측기(U-30, Onset Inc., USA)를 대상지역 인근에 설치하였다. 현장에서 미세먼지를 측정하는 실험 특성상 미세먼지의 농도 변화는 풍환경에 민감하게 반응한다. 풍환경 변화를 실시간으

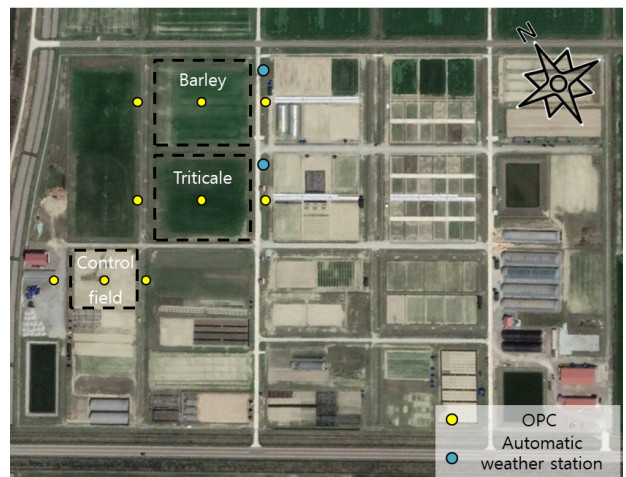


Fig. 1. Satellite image of barley and triticale control fields within the experimental site.

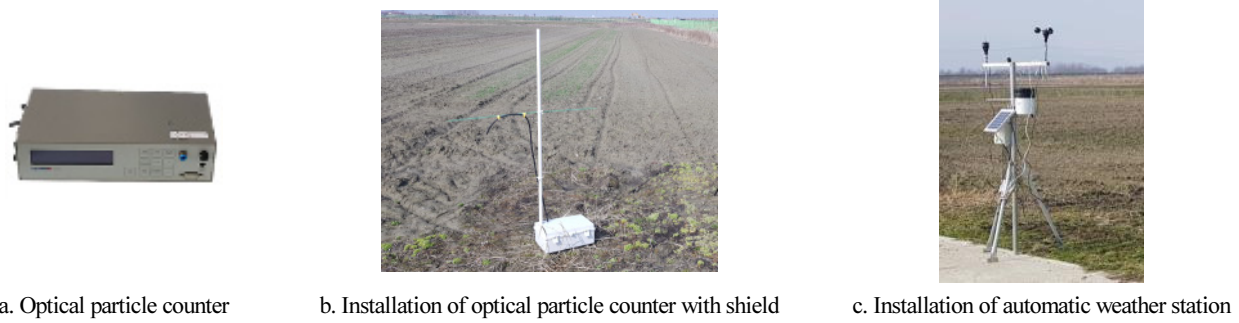


Fig. 2. Fine dust monitoring device and site in the experimental field in Saemangeum.

로 관측하기 위해 기상관측장비를 설치하였으며, 기상 정보를 1분 간격으로 수집하였다. 미세먼지 농도 측정을 위해 광학 입자측정기(11-D, Grimm Inc., Germany)를 사용하였다. 광학 입자측정기(OPC, optical particle counter)는 발생지점 및 측정지점에서 실시간으로 시간대별 미세먼지 입경별 농도를 분석할 수 있으며, $0.265\mu\text{m} - 34\mu\text{m}$ 의 범위를 총 31개의 채널로 입경별 미세먼지를 측정할 수 있다. OPC는 수분과 충격에 약해 Fig. 2(b)와 같이 보호기구를 제작하여 현장에서의 입경별 미세먼지의 농도를 측정하였으며, 확산하는 미세먼지의 농도를 측정하기 위해 지면과 1.5m의 거리를 두어 측정하였다.

2.2 연구 방법

노지에서 미세먼지는 물리적인 특성상 풍환경의 영향을 많이 받기 때문에 미세먼지 모니터링에 앞서 풍환경 분석을 수행하였다. 새만금 지역은 바다 인근에 위치하여 해륙풍의 영향을 주요하게 받아 시간에 따라 주풍의 변화가 있다. 작물 재배를 통한 미세먼지의 농도 변화를 보기 위해서는 재배지를 통과하기 전과 일정한 거리만큼 재배지를 통과한 후의 미세먼지 농도 모니터링이 필요하므로 주풍방향의 고정이 필요하다(Hwang 등, 2008). 주풍방향을 설정하기 위해 새만금 지역의 1년 간(2019년) 풍향, 풍속의 빈도분석을 수행하였다. 풍향, 풍속의 빈도분석을 위해 바람장미도를 작성하였으며, 작성된 바람장미도는 각 월별로 3분할하여 36개의 바람장미도를 분석하여 주풍방향이 뚜렷하고 건축물을 통한 방해가 적은 풍향의 빈도가 높은 시기를 선정하였다. 선정된 시기에서 3시간 단위로 나누어 바람장미도를 추가로 작성하여 해당 시기의 적절한 시간대를 선정하였다.

미세먼지 모니터링은 2020년 3월부터 2021년 5월까지 이루어졌으며, 농작업 일정에 맞추어 미세먼지의 농도 측정을 수행하였다. 정보리는 Seo 등(2010b)에 따라 담리작으로 재배하였으며, 3월에 파종 및 비료살포를 수행하여 6월에 수확하였다. 라이밀은 Song 등(2009)에 따라 10월에 파종 및 비료

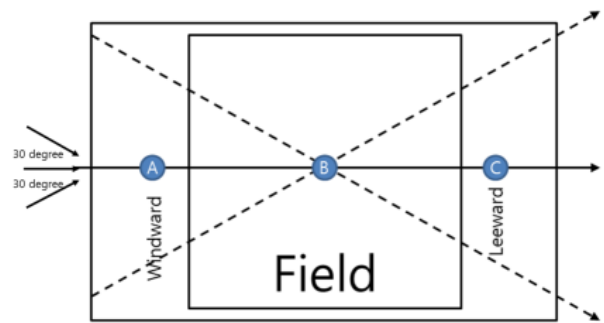


Fig. 3. Schematic diagram of OPC devices arrangement in the field following the direction of wind to monitoring fugitive dust from the agricultural field (A, B, C: OPC installation location).

살포를 수행하여 5월에 수확하였다. 생육 단계에 따른 모니터링 시기는 유묘기와 출수기 이후로 나누어 진행하였다. GRDC(2018)에 따르면 라이밀의 유묘기는 파종 후 약 100일, 출수기는 약 180일 이후로 구분하였으며, Ju 등(2009)에 따르면 청보리는 유묘기는 3월경이며, 출수기는 4월경으로 구분하였다.

미세먼지의 농도를 측정하기 위해 필지 전후와 필지 내부의 농도를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 주풍 방향과 일직선 상에 위치한 부분에서 측정하였으며, 미세먼지의 측정 위치는 대기공정시험법에 따라 작물의 예상 생육 높이인 1.2m의 2배 이상의 거리인 2.4m를 이격하여 설치하였으며, 기상측정 위치는 3배 이상의 거리인 3.6m 거리에 이격하여 설치하였다. 실험은 30분 단위로 나누어 반복 실험을 수행하였으며, Table 1과 같이 현장의 대기환경을 고려하여 실험을 수행하였다. 작물 재배가 비산먼지에 영향이 있는지를 확인하기 위해 나대지에서 미세먼지 모니터링을 수행하였으며, 나대지에서의 비산먼지 발생량을 분석하였다. 모니터링 실험 차수는 나대지에서 12회, 청보리는 경운 11회, 수확 10회, 생육 초기 24회, 생육 후기 8회로 총 53회 수행하였으며, 라이밀은 경운 11회, 수확 11회, 생육 초기 23회, 생육 후기 23회로 총 68회 수행하였

Table 1. Monitoring information by experiment date in Saemangeum site; wind direction of '0' represents north.

Crops	Date	Growth stages (plant height [cm]) & agricultural work	No. of replicates	Average temperature (°C)	Average relative humidity (RH, %)	Average wind speed (m/s)	Main wind direction (°)
Control field	2020/02/27	Control field	12	9.6	63	1.8	290
	2020/03/13	Tillage	11	7.9	52	3.7	290
Barley	2020/03/18	Seedling stage 10-20	12	17.5	27	1.7	187
	2020/03/24	Seedling stage 10-20	12	15.3	45	2.8	205
	2020/05/21	Heading stage 90-150	8	21.1	64	1.8	298
	2020/06/09	Harvesting	10	29.5	49	2.9	280
	2020/10/22	Tillage	11	16.3	64	2.9	315
Triti cale	2021/01/05	Seedling stage 10-20	11	-0.9	58	2.2	333
	2021/01/28	Seedling stage 10-20	12	1.6	68	4.5	305
	2021/04/02	Heading stage 90-150	11	22.7	45	2.0	170
	2021/04/15	Heading stage 90-150	12	16.2	38	2.0	218
	2021/05/18	Harvesting	11	21.0	69	2.1	292

다. 현장에서 모니터링 데이터의 정확도를 분석하기 위해 농작업이 종료될 때까지 실시간 기상대로부터 모니터링된 풍향으로부터 ± 30 범위와 현장에서 세팅한 모니터링 장비의 각도를 비교하여 일치율을 분석하였다.

비산먼지의 변화를 보기 위해서는 대기 중에 존재하는 미세먼지가 작물 재배지를 통과하기 전의 농도와 통과한 후의 미세먼지의 농도 차를 통해 알 수 있기 때문에 미세먼지 모니터링을 통해 얻은 데이터는 풍상측(바람이 불어오는 쪽)과 풍하측(바람이 나가는 쪽)의 차를 계산하였다. 재배지 통과 전후의 미세먼지 농도 차를 통해 경운과 수확작업에 따른 비산먼지의 발생량을 분석하였으며, 생육초기와 후기에 따라 비산먼지의 발생이 억제되는 농도의 양을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 풍환경 분석 결과

2019년 기준 1년 간의 바람장미도를 월별로 3등분하여 Fig. 4와 같이 나타냈다. 모니터링 일정은 내륙의 미세먼지의 영향을 최소화하기 위해 해풍이 부는 180-360° 풍향의 범위에서 상대적으로 바람이 안정적으로 유지되는 높은 풍향 빈도를 가진 계절을 탐색하였다. Fig. 4를 보면 1월부터 6월, 10월 말부터 12월까지 3m/s 이상의 풍속이 해풍 영역에서 주풍으로 관측되었다. 7월부터 10월 중순까지는 3m/s 이상의 풍속이 해풍과 육풍으로 분산되어 안정적인 바람의 방향을 설계하는데 어려움이 있었다. 농작업 중에서의 미세먼지에 대한 모니터링은 주풍 방향이 높은 빈도로 뚜렷하게 나타나는 시기에서

진행되었다. 바람은 하루 중에도 연속적으로 변화하기 때문에 미세먼지 모니터링 시간대를 선정하기 위해 Fig. 5와 같이 선정된 계절(봄, 겨울)의 3시간 단위의 바람장미도를 작성하였다. Fig. 5를 보면 AM 0-AM 8, PM 12-PM 8에서 뚜렷한 주풍 방향을 나타냈으며, 해풍 영역의 주풍인 PM 12-PM 8로 모니터링 시간대를 선정하였다.

현재의 시간과 예상되는 주풍방향을 고려하여 농경지의 풍상측과 풍하측으로 설치한 모니터링 장비가 실제 실험기간 동안에 바람의 변화로 인하여 풍상측과 풍하측이 변동될 수 있다. 때문에 설치된 장비의 방향이 실제 바람의 방향을 나타내는 지를 확인하기 위하여 미세먼지 모니터링의 일치율을 설치된 장비의 각도에서 ± 30도 이내를 일치하는 방향으로 설정하였다. 이를 기준으로 바람의 방향에 대한 미세먼지 모니터링의 일치율을 보기 위해 Fig. 6과 같이 그래프를 작성하여 일치율을 분석하여, Table 2와 같이 미세먼지 측정기의 설정 각도와 현장에서 기상관측기로 측정된 주풍방향을 비교하였다. 모니터링 결과 평균적으로 83%의 일치율을 보이며, 모니터링 데이터의 활용은 50% 이하의 일치율을 보인 데이터를 제외하고 분석하였다.

2. 농작업 및 작물 생육 시기에 따른 미세먼지 농도 변화

새만금 지역은 주변에 산이 적고 개활지의 형태를 띠고 있으며, 이로 인하여 바람에 의해 미세먼지에 많은 영향을 미칠 수 있다. 농작업을 통해 비산되는 먼지는 바람에 의해 확산될 수 있기 때문에 경운과 수확과 같은 농작업을 수행하는 동안 미세먼지의 농도 변화를 통해 비산먼지 농도 증가량을 확인하였

다. 새만금 내 동계 사료작물(청보리, 라이밀)의 작물재배를 통한 미세먼지 모니터링 결과를 Table 3과 같이 정리하였다. PM-1.0은 농작업과 작물생육 단계와 비교해보면 특정한 패턴의 증감 추세를 보이지 않았으며, 풍상측과 풍하측에서 일

정한 농도로 유지되었다. Watson 등(2010)에 따르면 PM-1.0은 물리적인 영향보다는 화학적인 영향에 기인한다고 하였으며, 미세먼지 모니터링 결과 농작업이나 작물 생육에 따른 영향을 크게 보이지 않았다.

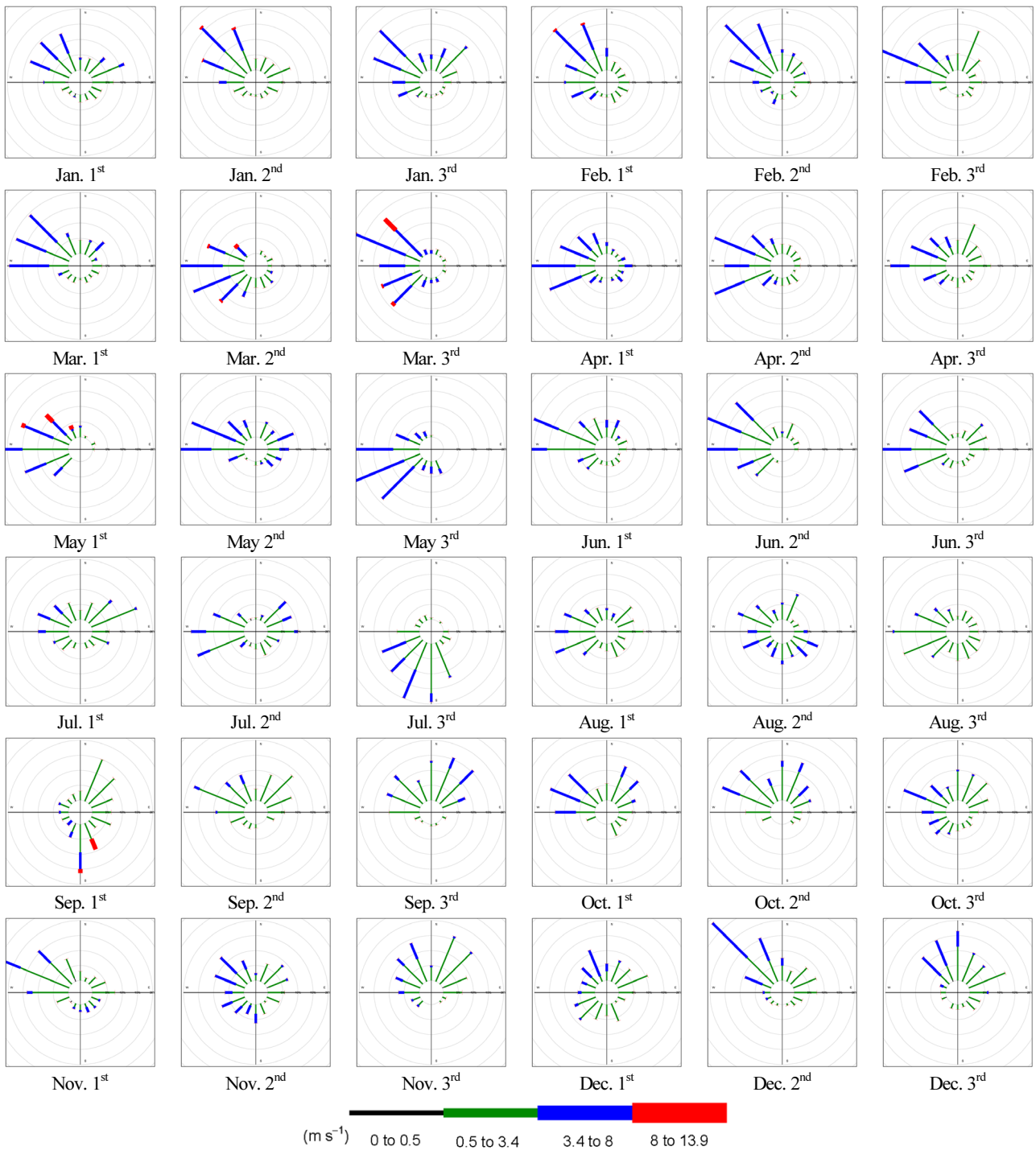


Fig. 4. Monthly wind rose map at the Saemangeum meteorological station during 2019 (latitude: 35°43'45.88"N, longitude: 126°31'43.93"E).

새만금 내 동계 사료작물 재배에 따른 미세먼지 농도 변화 모니터링

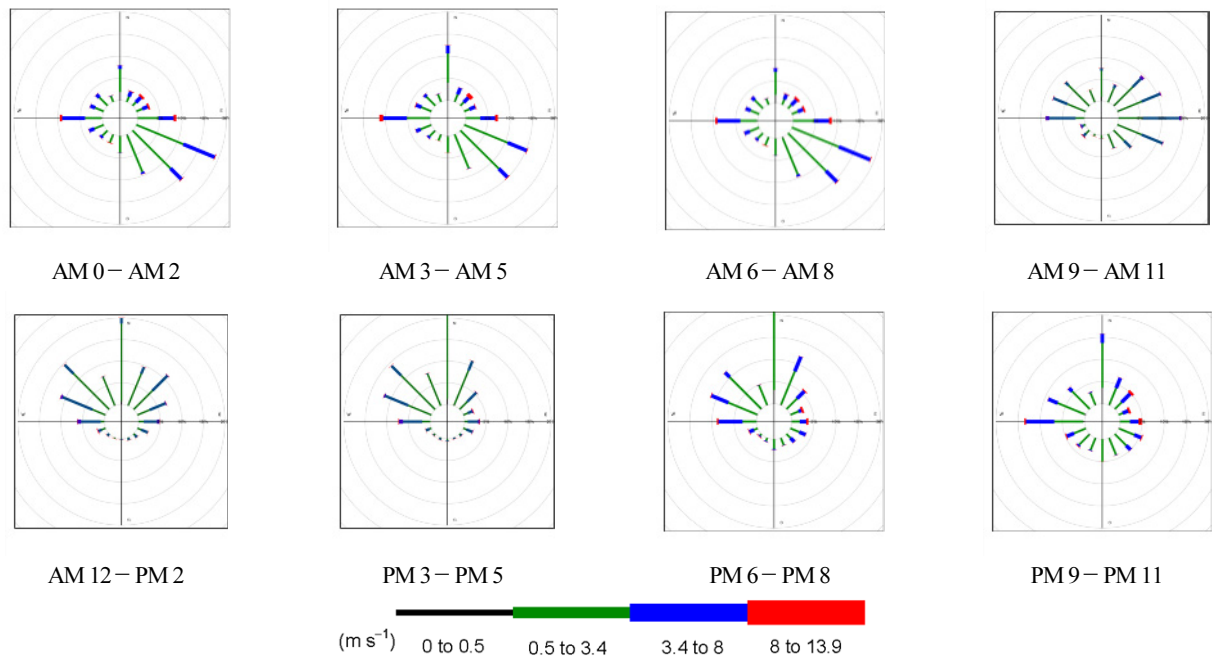


Fig. 5. Wind rose map by hour during a certain period of agricultural work (Jan. to Jun., Oct. to Dec.) at the Saemangeum Meteorological Station (latitude: 35°43'45.88"N, longitude: 126°31'43.93"E) (2019).

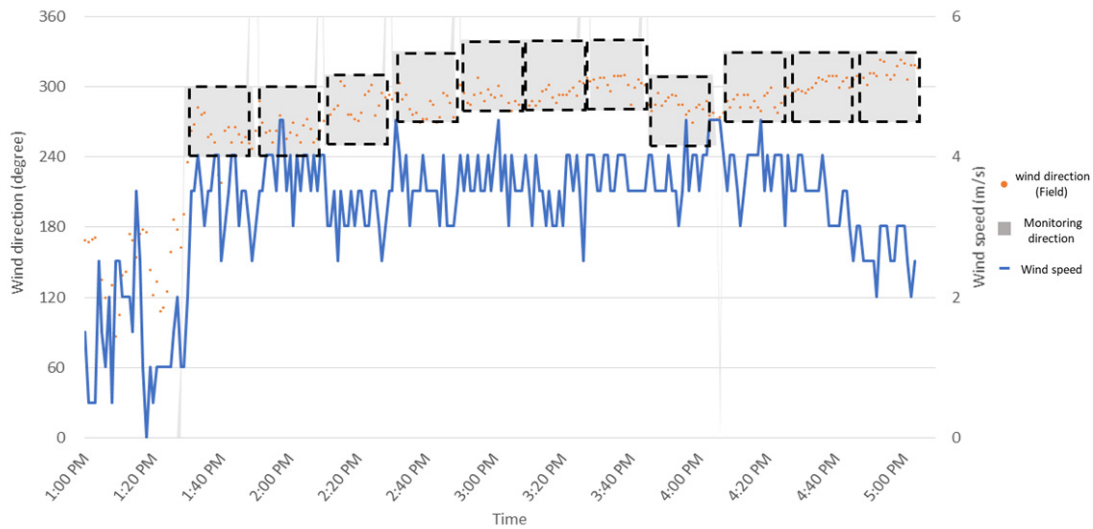


Fig. 6. Matching rate between the main wind direction and the monitoring direction (Sample 2021/05/18).

PM-10과 PM-2.5의 경우 작물 재배에 따른 영향을 모니터링을 통해 볼 수 있었으며, 경운이나 수확 작업을 통해 농도 증가를 확인할 수 있었다. 작업을 하지 않는 나대지를 대상으로 미세먼지 모니터링을 진행하였다. Fig. 7과 같이 나대지 통과 전후 차에 따른 비산먼지 발생량을 보면 PM-10에서 6.6% 미세먼지 농도 증가를 볼 수 있었으며, PM-2.5에서 8.7%의 농도 증가를 볼 수 있었다. 나대지에서는 일부 잡초 이외의 작

물이 거의 없기 때문에 지속적으로 바람의 영향에 따라 먼지가 비산되는 것으로 나타났다.

Fig. 8(a)와 (c)를 보면 경운에 따라 청보리는 PM-10이 20.9% 증가하였으며, PM-2.5는 22.2% 증가하였다. 라이밀은 경운 작업에 따라 PM-10이 26.3% 증가하였으며, PM-2.5에서 6.5%가 증가하였다. 수확작업의 경우 청보리는 PM-10이 3.2% 증가하였으며, PM-2.5는 0.5% 증가하였다. 이 시기

Table 2. Matching rate between the main wind direction and the monitoring direction by monitoring date and crops.

Crop	Date	Average match rate (%)	Matching rate by experiments (%)											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Control field	2020/02/27	77	62	78	68	76	80	77	73	69	80	88	92	80
	2020/03/13	72	63	62	81	83	79	64	70	71	75	77	72	-
Barley	2020/03/18	75	48	33	71	72	70	70	91	74	71	75	77	72
	2020/03/24	82	65	70	74	71	70	82	98	90	94	83	97	95
	2020/05/21	76	69	72	73	70	70	80	92	85	-	-	-	-
	2020/06/09	90	82	80	88	82	83	92	99	92	100	100	-	-
	2020/10/22	92	75	88	90	88	92	90	94	98	100	99	100	-
Triti cale	2021/01/05	83	72	71	73	83	91	89	100	73	77	92	97	-
	2021/01/28	71	52	61	69	71	76	80	71	70	82	79	76	70
	2021/04/02	85	78	82	85	81	88	89	78	77	92	91	95	-
	2021/04/15	87	69	72	77	84	81	88	92	97	93	86	100	100
	2021/05/18	100	99	100	100	99	100	100	100	99	100	100	99	-

Table 3. Concentrations of PM-10, 2.5 and 1.0 in windward and leeward according to agricultural work and crop growth stage.

Crop	Date	Growth stage (plant height [cm]) and agricultural work	Sampling No.	Windward mean (SD) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Leeward mean (SD) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
				PM-10	PM-2.5	PM-1.0	PM-10	PM-2.5	PM-1.0
Barley	2020/03/13	Tillage	11	23.4 (6.2)	16.2 (3.5)	16.1 (3.4)	28.3 (5.0)	19.8 (4.7)	14.5 (3.3)
	2020/03/18	Seedling stage (10–20)	12	29.4 (6.2)	25.0 (4.5)	14.8 (4.3)	23.3 (5.0)	13.0 (3.5)	11.3 (3.4)
	2020/03/24	Seedling stage (10–20)	12	16.6 (15.1)	6.7 (1.5)	4.7 (0.4)	13.9 (9.2)	5.3 (1.4)	4.9 (0.4)
	2020/05/21	Heading stage (90–150)	8	59.9 (6.2)	12.1 (0.9)	5.1 (0.3)	46.6 (5.8)	10.6 (1.2)	5.2 (0.3)
	2020/06/09	Harvesting	10	68.7 (37.2)	41.6 (10.0)	21.4 (6.5)	70.9 (14.3)	41.8 (7.1)	21.5 (6.5)
Triti cale	2020/10/22	Tillage	11	27.4 (5.0)	23.2 (2.8)	20.7 (1.8)	34.6 (15.9)	24.7 (4.1)	21.3 (2.0)
	2021/01/05	Seedling stage (10–20)	11	29.7 (0.8)	18.5 (0.3)	8.4 (0.1)	28.5 (2.2)	17.4 (1.1)	8.2 (0.2)
	2021/01/28	Seedling stage (10–20)	12	25.4 (1.9)	16.2 (0.7)	8.5 (0.3)	23.0 (2.3)	15.4 (1.2)	8.9 (0.3)
	2021/04/02	Heading stage (90–150)	11	23.3 (1.9)	18.1 (2.5)	14.7 (2.5)	20.3 (3.0)	17.0 (2.8)	15.1 (2.6)
	2021/04/15	Heading stage (90–150)	12	63.2 (7.5)	48.1 (6.8)	32.8 (5.8)	55.5 (10.3)	38.5 (8.4)	34.6 (6.2)
	2021/05/18	Harvesting	11	35.3 (6.3)	22.2 (3.2)	19.4 (1.9)	40.3 (12.4)	28.9 (7.8)	22.4 (2.3)

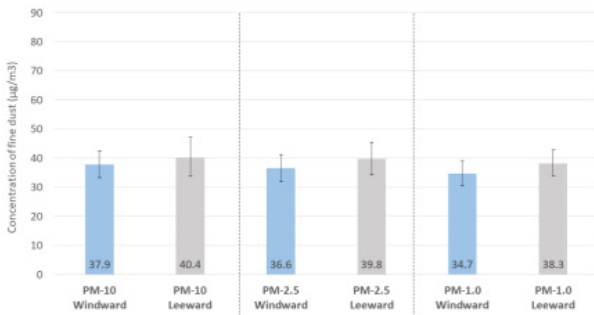


Fig. 7. Changes in average fine dust concentration in control field.

에서는 청보리 수확작업 시 비산먼지가 발생을 우려하여 사전에 물을 살포한 후 작업을 수행하였다. 라이밀은 수확작업에 따라 PM-10이 14.2%가 증가하였으며, PM-2.5의 경우 30.2%가 증가하였다. 청보리와 라이밀의 경우와 수확작업에는 동일한 트랙터를 사용하였다. 청보리 수확작업 시 사전에 물을 살포함에 따라 토양의 수분함량이 증가하여 물을 살포하지 않는 라이밀 작업에 비해 미세먼지가 발생하는 농도를 감소해주는 효과를 보였다. 미세먼지의 농도는 미세먼지의 농도 증가는 Fig. 8(a)와 같이 물리적인 영향으로 인해 증가하는 경우와 Fig. 8(b)와 같이 트랙터에서 발생하는 매연으로 인한 화학적인 영향으로 인해 증가하는 경우로 볼 수 있었다.

새만금 내 동계 사료작물 재배에 따른 미세먼지 농도 변화 모니터링

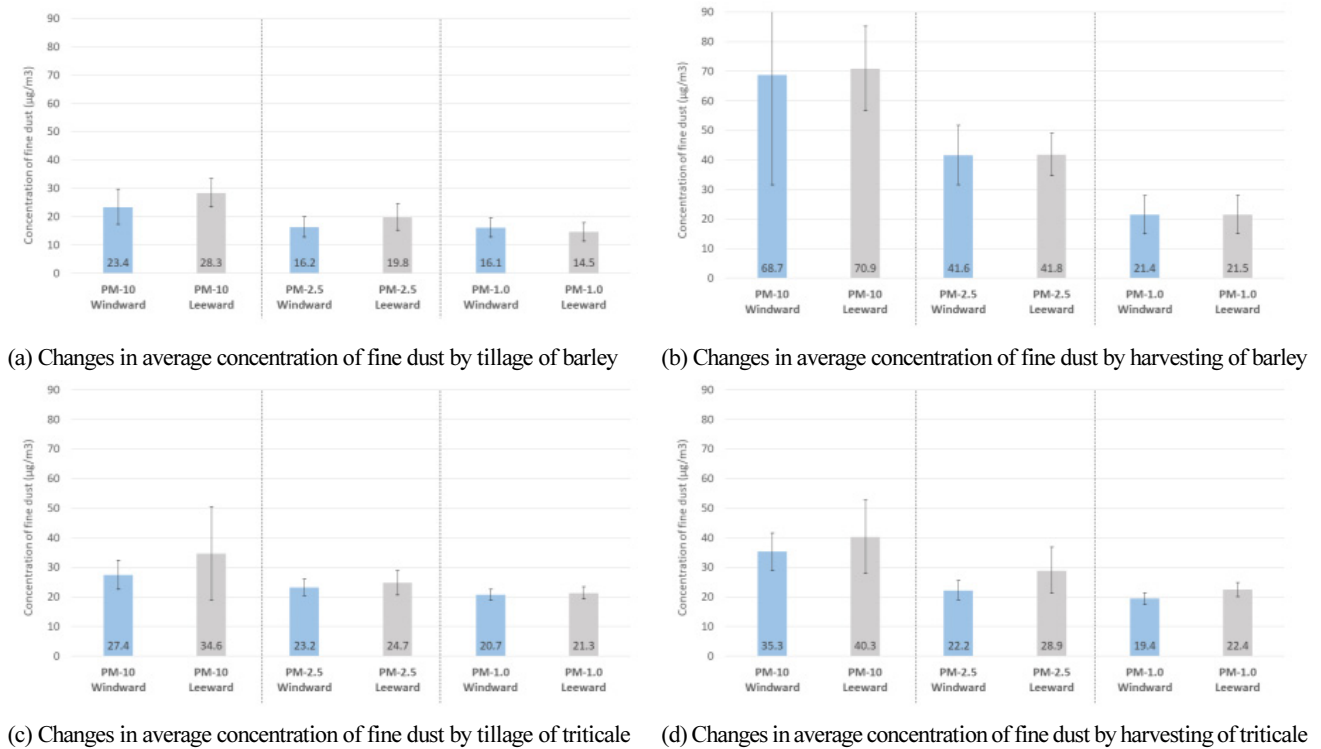


Fig. 8. Changes in the concentration of fine dust according to agricultural work of barley (a, b) and triticale (c, d).



(a) Tractor running for tillage in barley field



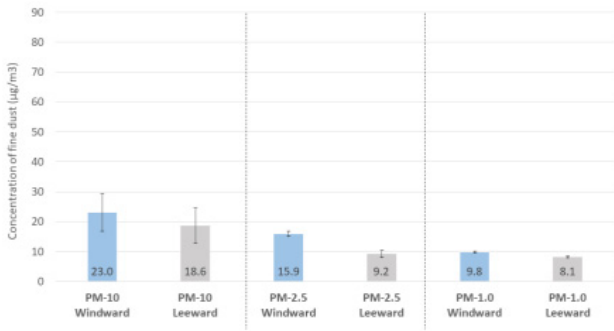
(b) Tractor running for harvesting in barley field

Fig. 9. Agricultural work in fine dust monitoring site of Saemangeum.

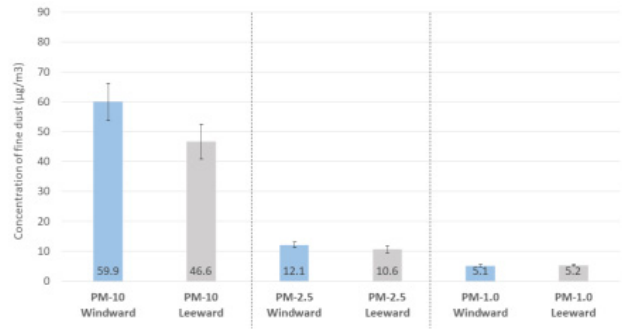
작물 재배에 따른 비산먼지의 발생 억제 효과를 보기 위해 생육단계 따른 미세먼지 농도 변화를 Fig. 9와 같이 모니터링 하였다. Fig. 9를 보면 청보리의 생육초기 단계(유묘기)에서는 PM-10은 19.1%의 비산먼지 발생 억제 효과를 보였으며, PM-2.5에서 42.3%의 발생 억제 효과를 보였다. 라이밀의 생육초기 단계(유묘기)에서는 PM-10이 6.5%, PM-2.5가 5.5%의 비산먼지 발생 억제 효과를 보였다. 청보리의 생육 후기 단계(출수기)에서는 PM-10은 22.2%, PM-2.5에서는 12.4%의 비산먼지 발생 억제 효과를 보였으며, 라이밀의 생육 후기 단계(출수기)에서는 PM-10이 12.4%, PM-2.5가

16.2%의 비산먼지 발생 억제 효과를 보였다. 이를 통해 작물의 높이가 10-20cm의 생육초기 단계보다 90-150cm의 생육 후기 단계에서 비산먼지의 억제 효과가 더 높았으며, 작물의 성장에 따라 이삭이나 작물의 표면에 얇은 털을 통해 바람의 저항성이 높아져 지표에서의 유속을 현저히 저감시킬 수 있기 때문에 토양표면에서의 먼지의 비산을 억제하는데 효과적인 것으로 판단된다.

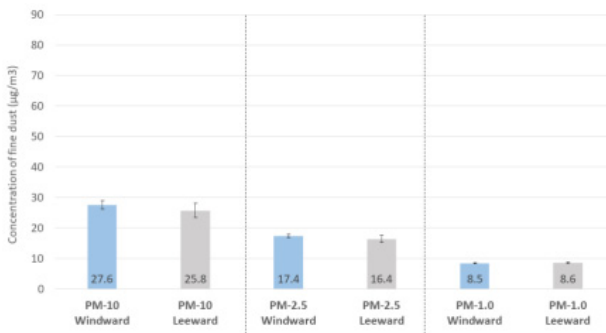
농작업이나 유묘기, 출수기에서의 비산먼지 발생량이나 비산먼지 억제 효과는 바람의 방향에 따른 풍상측과 풍하측의 실시간 미세먼지 농도를 바탕으로 계산 및 추정하였다. 경운



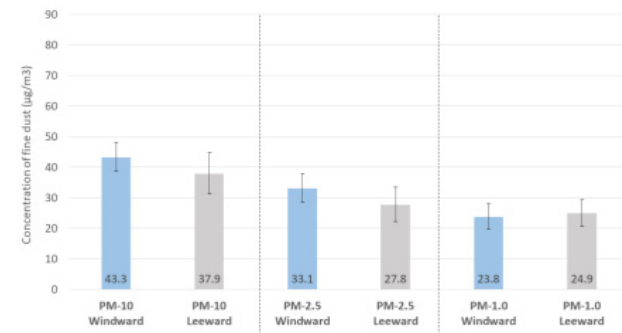
(a) Changes in average concentration of fine dust by seedling stage of barley



(b) Changes in average concentration of fine dust by heading stage of barley



(c) Changes in average concentration of fine dust by seedling stage of triticale



(d) Changes in average concentration of fine dust by heading stage of triticale

Fig. 10. Changes in the concentration of fine dust according to the growth stage of barley (a, b) and triticale (c, d).

작업이나 수확작업의 경우 반복실험을 수행하였다. Fig. 7에서는 비산먼지의 평균 발생량을 나타내고 있으며, 청보리의 경우 작업 시 PM-10은 176.4g/ha·m, PM-2.5는 129.6g/ha·m, 수확 작업 시 PM-10은 79.2g/ha·m, PM-2.5는 7.2g/ha·m가 발생량으로 산정되었다. 라이밀의 경우, 경운 작업 시 PM-10은 259.2g/ha·m, PM-2.5는 54g/ha·m, 수확 작업 시 PM-10은 180g/ha·m, PM-2.5는 241.2g/ha·m가 발생량으로 산정되었다. 작물에 의한 비산먼지 발생 억제량 산정결과, 청보리의 유묘기에서는 PM-10은 158.4g/ha·m/hr, PM-2.5는 241.2g/ha·m/hr, 출수기에서는 PM-10은 478.8g/ha·m/hr, PM-2.5는 54g/ha·m/hr의 발생 억제 효과가 산정되었다. 라이밀은 유묘기에서 PM-10은 64.8g/ha·m/hr, PM-2.5는 36g/ha·m/hr, 출수기에서 PM-10은 194.4g/ha·m/hr, PM-2.5는 194.4g/ha·m/hr의 발생 억제 효과가 산정되었다.

결론

본 연구를 통해 새만금 지역에서 동계 사료작물 재배에 따른 비산먼지 발생 및 억제 효과에 대한 모니터링을 수행하였다. 모니터링 결과 내대지에서의 비산먼지 발생 영향을 보면

PM-10에서 6.6% 미세먼지 농도 증가를 볼 수 있었으며, PM-2.5에서 8.7%의 농도 증가를 볼 수 있었다. 농작업에 따라 경운 수행 시 청보리는 PM-10이 20.9% 증가하였으며, PM-2.5는 22.2% 증가하였으며, 라이밀은 PM-10이 26.3% 증가하였으며, PM-2.5에서 6.5%가 증가하였다. 수확 작업 수행 시 살수 후 작업할 경우 청보리는 PM-10이 3.2% 증가하였으며, PM-2.5는 0.5% 증가한 데에 반해 살수 작업을 하지 않은 라이밀은 수확작업에 따라 PM-10이 14.2%가 증가하였으며, PM-2.5의 경우 30.2%가 증가하였다. 작물의 생육에 따라 비산먼지 발생 억제 효과를 분석하였으며, 생육초기 단계인 유묘기의 경우 청보리는 PM-10은 19.1%, PM-2.5는 42.3%의 비산먼지 발생을 억제하였으며, 라이밀은 PM-10이 6.5%, PM-2.5가 5.5%의 비산먼지 발생을 억제하였다. 생육 후기 단계인 출수기의 경우 청보리는 PM-10은 22.2%, PM-2.5에서는 12.4%의 비산먼지 발생 억제하였으며, 라이밀은 PM-10이 12.4%, PM-2.5가 16.2%의 비산먼지 발생을 억제하였다.

앞선 연구 결과를 통해 PM-1.0의 경우 작물재배에 따른 농도 영향은 낮았으며, PM-10과 PM-2.5의 경우 경운과 수확 작업을 통해 미세먼지의 농도 증가를 볼 수 있었다. 작물의 생육

에 따라 PM-10과 PM-2.5의 비산먼지의 발생 억제 효과를 볼 수 있었다. 유묘기에 비해 출수기에 비산먼지의 억제 효과는 더 높게 나타났으며, 이는 작물의 높이와 작물의 형태가 변화함에 따른 영향으로 추정할 수 있었다. 농작업에 따른 비산먼지의 발생량과 작물생육에 따른 비산먼지의 발생 억제량을 알 수 있었다. 농작업에 따라 발생한 비산먼지의 양은 작물생육에 따라 억제되는 비산먼지의 양에 비해 적게 발생했으며, 작물 재배에 따라 비산먼지를 억제 효과가 있음을 알 수 있다. 작물에 물을 살수한 후 농작업을 수행할 경우 비산먼지의 발생량을 줄일 수 있었으며, 이에 따라 살수나 강우 이후의 비산먼지 발생량이나 발생 억제량의 관계 규명에 관한 추가 연구 수행이 필요하다.

적 요

새만금은 염분과 미사질 토양으로 인해 지표면이 건조하고 함수율이 낮아 다른 지역에 비해 식생피복이 낮다. 식생 피복도가 낮은 지역에서는 바람에 의한 침식으로 인해 먼지가 비산될 가능성이 높습니다. 새만금 간척지에서 견딜 수 있는 작물을 재배하여 식생 피복도를 높이면 바다의 유속을 줄여 비산먼지를 줄일 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 새만금 간척지에 겨울철 동계 발작물을 재배하여 미세먼지 및 비산먼지 발생을 억제하는 효과를 분석하는 것이다. 새만금 간척지에서 보리 0.5ha, 라이밀 0.5ha를 재배하는 동안 농작업 및 생육 단계에 따라 미세먼지 농도를 모니터링하였다. PM-10, PM-2.5 및 PM-1.0 농도의 변화는 풍하층, 풍상층, 경작지 내부를 중심으로 모니터링하였다. 모니터링 결과 PM-1.0은 작물 재배에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, PM-10과 PM-2.5의 농도는 경운과 수확에 따라 증가하였고 수확에 비해 경운 시 PM-10과 PM-2.5의 농도 증가가 더 높았다. 작물의 생육단계에 따라 비산먼지 억제효과를 보였으며, 유묘기보다 출수기에서 비산먼지 억제효과가 높게 나타났다. 따라서 토지피복효과 이외에 캐노피에 따른 비산먼지 억제효과가 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 작물재배에 따른 비산먼지 발생 및 억제 효과에 대해 알 수 있었다.

추가 주제어: 동계 발작물, 미세먼지, 새만금, 현장 모니터링

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구사업(세부과제 번호: PJ0142692021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Bitog J.P., I.B. Lee, M.H. Shin, S.W. Hong, H.S. Hwang, I.H. Seo, J.I. Yoo, K.S. Kwon, Y.H. Kim, and J.W. Han 2009, Numerical simulation of an array of fences in Saemangeum reclaimed land. *Atmos Environ* 43:4612-4621. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.05.050
- Choi J.M., W.J. Park, and M.J. Gim 2014, Relationship between land cover change and socio-economic change, and spatial query for time series data in the Saemangeum area. *Geogr J Korea* 48:363-373. (in Korean)
- Clean air policy support system (CAPSS) 2021, 2018 National air pollutants emission. Ministry of Environment, Sejong, Korea. 11-1481019-000001-10 (in Korean)
- Fairbairn A.S., and D.D. Reid 1958, Air pollution and other local factors in respiratory disease. *Br J Prev Soc Med* 12:94-103. doi:10.1136/jech.12.2.94
- Grains research and development corporation (GRDC) 2018, GRDC Grownotes - triticale. GRDC, Barton, Australia.
- Hwang H.S., I.B. Lee, M.H. Shim, S.W. Hong, I.H. Seo, J.I. Ryu, J.P., Bitog, K.S. Kwon, and Y.H. Kim 2009, Monitoring of the fugitive and suspended dust dispersion at the reclaimed land and neighboring farms: monitoring in Gim-Je. *J Korean Soc Agric Eng* 51:59-67. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2008.50.4.039
- Hwang H.S., I.B. Lee, M.H., Shim, S.W. Hong, I.H. Seo, J.I. Ryu, and S.K. Lee 2008, Monitoring of the fugitive and suspended dust dispersion at the reclaimed land and neighboring farms: monitoring in Gunsan. *J Korean Soc Agric Eng* 50:39-50. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2008.50.4.039
- Hyun B.K., C.H. Ryu, S.B. Lee, C.W. Lee, Y.S. Song, and D.B. Lee 2021, Reduction of fugitive dust by soil management practices for barley and reed in Saemangeum reclaimed land. *Korean J Soil Sci Fert* 54:58-67. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.2021.54.1.058
- Ju J.I., H.G. Choi, Y.S. Gang, J.J. Lee, K.H. Park, and H.B. Lee 2009, Changes of growth and forage yield at different cutting dates among five winter cereals for whole crop silage in middle region. *J Kor Grassl Forage Sci* 29:111-120. (in Korean)
- Kim E.K., Y.S. Jung, H.G. Jeong, Y.K. Joo, and S.U. Chun 2007, Vegetation distribution of intertidal zone and estuary area on anseo port in Saemangeum reclamation zone. *Kor J Env Eco* 21:494-505. (in Korean)
- Kim H.G. 2005, Optimization of fugitive dust control system for meteorological conditions. *J KOSAE* 21:573-583. (in Korean)
- Kim J.K., D.H. Kim, S.H. Joo, and M.C. Lee 2018, Research on characteristics of multifunctional soil binder based on polyacrylamide. *Appl Chem Eng* 29:155-161. (in Korean)

- doi:10.14478/ace.2017.1103
- Kim S., T.K. Kim, J.H. Jeong, C.H. Yang, J.H. Lee, W.Y. Choi, Y.D. Kim, S.J. Kim, and K.Y. Seong 2012, Characteristics of vegetation on soils having different salinity in recently reclaimed Saemangeumin region of Korea. *Korean J Weed Sci* 32:1-9. (in Korean) doi:10.5660/KJWS.2012.32.1.1
- Kim Y.J., J.H. Ryu, S.H. Lee, Y.Y. Oh, S. Kim, J. Jung, H.C. Hong, Y.D. Kim, and S.L. Kim 2016, Spatio-temporal distribution characteristics of the soil salinity in Saemangeum gyeohwa newly reclaimed land. *J Korean Soc Int Agric* 28:113-117. (in Korean) doi:10.12719/KSIA.2016.28.1.113
- Kim Y.S., S.B. Jin, J.R. Choi, Y.H. Park, K.R. Lee, and Y.J. Lee 2013, A new paradigm to revitalize Saemangeum farmland: Benchmarking from Seosan farm. Institute for Intercultural Communication, pp 45-67. (in Korean)
- Kwak J.H., S.I. Yun, B.R. Choi, G.Y. Kim, and K.S. Lee 2021, Winter forage crops reduced fine dust in Saemangeum reclaimed tideland during high concentration of fine dust season. *Korean J Soil Sci Fert* 54:588-600. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.202154.4588
- Li Z., C. Xiahong, and T. Xi 2018, The impact of fine particulate matter (PM_{2.5}) on China's agricultural production from 2001 to 2010. *J Clean Prod* 178:133-141. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.204
- Ministry of Environment 2021, Fugitive dust management manual, Ed 2021. 01. Sejong, Korea, pp 3-6. (in Korean)
- Park K.C., and S.J. Lee 2000, Shelter effect of porous fences on the saltation of sand particles in an atmospheric boundary layer. *Trans Korean Soc Mech Eng B* 24:1175-1184. (in Korean) doi:10.22634/KSME-B.2000.24.9.1175
- Park S.I., H.S. Kim, S.H. Jeong, H. Kim, S.H. Lee, and H.J. Kim 2013, Analysis of the windbreak facilities in the western and southern coasts in Korea. *J Agric Life Sci* 44:21-24. (in Korean)
- Pope C.A., and D.W. Dockery 2006, Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc* 56:709-742. doi:10.1080/10473289.2006.10464485
- Rural Development Administration (RDA) 2021, Information on crop disaster prevention management technology 4:17-61.
- Ryu J.H., Y.Y. Oh, S.H. Lee, K.D. Lee, and Y.J. Kim 2020, Annual changes of soil salinity of the Saemangeum reclaimed tide land during last 10 years. *Korean J Environ Agric* 39:327-333. (in Korean) doi:10.5338/KJEA.2020.39.4.39
- Samet J.M., F. Dominici, F.C. Curriero, I. Coursac, and S.L. Zeger 2000, Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. Cities, 1987-1994. *N Engl J Med* 343:1742-1749 doi:10.1056/NEJM200012143432401
- Seo I.H., I.B. Lee, M.H. Shin, G.Y. Lee, H.S. Hwang, S.W. Hong, J.P. Bitog, J.I. Yoo, K.S. Kwon, Y.H. Kim, and T. Bartzanas 2010a, Numerical prediction of fugitive dust dispersion on reclaimed land in Korea. *Trans ASABE* 53:891-901. doi:10.13031/2013.30072
- Seo S., E.S. Chung, K.Y. Kim, G.J. Choi, J.N. Ahn, J.S. Han, H.K. Park, and Y.S. Kim 2010b, Comparison of forage productivity and quality of Italian ryegrass and barley mono, and mixtures sown in early spring. *J Kor Grassl Forage Sci* 30:115-120. (in Korean) doi: 10.5333/KGFS.2010.30.2.115
- Seo I.H., I.B. Lee, S.W. Hong, and H.S. Hwang 2007, Development of a CFD model to predict dust dispersion from Saemangeum reclaimed land. *J Korean Soc Agric Eng* 49:545-550. (in Korean)
- Shuai J., Z. Zhang, X. Liu, Y. Chen, P. Wang, and P. Shi 2013, Increasing concentrations of aerosols offset the benefits of climate warming on rice yields during 1980-2008 in Jiangsu Province, China. *Reg Environ Change* 13:287-297 doi:10.1007/s10113-012-0332-3
- Sin M.H., and J.D. Choi 2015, Development of optimal management technique for non-point pollutants of fields in Saemangeum. *J Korean Soc Agric Eng* 57:30-38. (in Korean)
- Son J.G. 2006, Optimal management plan for high value added creation in the Saemangeum reclaimed farmland. *KCID Journal* 13:17-25. (in Korean)
- Son J.G., and J.Y. Cho 2009, Effect of organic material treatments on soil aggregate formation in reclaimed tidelands. *Korean J Soil Sci Fert* 42:201-206. (in Korean)
- Son J.G., J.K. Choi, and J.Y. Cho 2009, Chemical properties of soil in the proposed horticultural complexes of Saemangeum reclaimed tideland. *J Korean Soc Agric Eng* 51:67-73. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2009.51.4.067
- Song C.K., J.J. Kim, and D.W. Song 2007, The effects of windbreaks on reduction of suspended particles. *Atmosphere* 17:315-326. (in Korean)
- Song T.H., O.K. Han, S.K. Yun, T.L. Park, J.H. Seo, K.H. Kim, and K.H. Park 2009, Changes in quantity and quality of winter cereal crops for forage at different growing stages. *J Kor Grassl Forage Sci* 29:129-136. (in Korean)
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) 2019, Particulate matter (PM) basics, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics/>. Accessed 22 June 2019
- Watson J.G., J.C. Chow, L. Chen, and X. Wang 2010, Measurement system evaluation for fugitive dust emissions detection and quantification. Prepared by Desert Research Institute, Reno, NV, USA.
- Wong C.M., N. Vichit-Vadakan, H. Kan, and Z. Qian 2008, Public health and air pollution in Asia (PAPA): a multicity study of short-term effects of air pollution on mortality. *Environ Health Perspect* 116:1195-1202. doi:10.1289/ehp.11257
- Yang C.H., S. Kim, J.H. Lee, N.H. Baek, T.K. Kim, W.Y. Choi, J.H. Jeong, S.B. Lee, and G.B. Lee 2012, Effects of nitrogen fertilization increment on forage crops cultivation in saemangum reclaimed land. *Korean J Soil Sci Fert* 45:235-240. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.2012.45.2.235