Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.4.588>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Winter Forage Crops Reduced Fine Dust in Saemangeum Reclaimed Tideland during High Concentration of Fine Dust Season

Jin-Hyeob Kwak^{1*}, Seok-In Yun², Boram Choi³, Gi-Yong Kim³, and Kwangseung Lee⁴

¹Assistant Professor, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

²Associate Professor, Department of Bio-Environment Chemistry, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

³Researcher, Grassland and Forages Division, Navigational Institute of Animal Science, RDA, Cheonan 31000, Korea

⁴Post-Doctoral Fellow, Reclaimed Land Agriculture Research Team, NICS, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: jh_kwak@jbnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: November 2, 2021

Revised: November 10, 2021

Accepted: November 11, 2021

ORCID

Jin-Hyeob Kwak

<https://orcid.org/0000-0001-7392-0287>

Seok-In Yun

<https://orcid.org/0000-0002-0456-9216>

In South Korea, the concentration of fine dust is highest in spring, when the consumption of fossil fuels for heating and power generation is high, and thus efforts to reduce it are underway nationally. Cultivation of forage crops in the Saemangeum reclaimed land can not only increase the income of farmers and decrease the cost for forage, but also reduce the concentration of fine dust. Cultivating forage crops increases the adsorption of fine dust and reduce the generation of scattering dust by stabilizing the soil. However, there is no study on the effects of winter crop cultivation on fine dust in reclaimed land. Therefore, this study evaluated the effects of cultivation of winter crops (forage crops and grassland crops) on fine dust reduction during the high-concentration season (spring). Tall fescue (TF) and Italian ryegrass (IRG), which have evaluated to have excellent adaptation in reclaimed land, were sown in October 2019, and fine dust concentration was measured at 1 m and 2 m above ground in April to June 2020. The concentration of fine dust in the early stage of crop growth (April) was not affected by the treatment and the measured height. However, on May 12 - 13, the period when crops are growing vigorously, and May 20 - 21, just before harvest, the concentration of fine dust decreased at all measurement times by IRG at a measurement height of 1 m. However, there was no effect of reducing the concentration of fine dust by the TF. This is thought to be because the IRG leaf area is wider than the TF and the concentration of fine dust has decreased due to the adsorption of fine dust to the IRG leaf. At a measurement height of 2 m, there was no difference in concentration regardless of the monitoring location, which means that there was an effect of reducing the concentration of fine dust by the crop only at the point close to the crop. In this study, the effect of cultivation of winter crops on reducing fine dust in Saemangeum reclaimed land was identified, and it is judged that the mechanism of fine dust reduction can be elucidated through analysis of components according to the treatment area after collecting fine dust.

Keywords: Italian ryegrass, Particulate matter, Saemangeum, Tall fescue, Winter crop

Fine dust concentration reduced by Italian ryegrass at the period when crops are growing vigorously.

Introduction

전북 지역은 도 내 발생하는 미세먼지와 더불어 서해를 통해 유입되는 국외 미세먼지는 많은 반면, 동쪽 산맥으로 인해 공기 확산이 안 되는 지형적 특성을 가지고 있으며, 이로 인해 미세먼지 농도가 전국 평균 대비 높은 수준을 보인다 (Ministry of Environment, 2021). 또한 미세먼지 농도는 최근 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있다 (Ministry of Environment, 2021). 미세먼지 발생원인은 화석연료 연소, 농업, 축산, 비산먼지 등 다양하지만, 전북 지역은 새만금 간척지로부터 유래되는 비산먼지는 사회적인 문제로 대두되고 있다.

새만금 간척지는 점토함량이 5% 미만으로 토성은 대부분 사질 또는 사양질에 속한다. 또한 유기물 함량이 낮아 입단 형성이 잘 되어 있지 않기 때문에 편서풍에 의해 비산먼지가 발생하기 쉬운 조건이다 (Son and Cho, 2000). 또한 새만금 간척지의 경우 기존의 시화 간척지나 영산강 간척지와 달리 서쪽에서 바람을 막아 줄 산이나 섬이 없고, 그 면적이 넓어 그로 인해 발생하는 비산먼지 영향이 더 클 것으로 예상된다. 새만금 간척지 끝막이 공사가 완료된 2006년도에 총부유물질 (total suspended particle, TSP) 농도가 군산지역은 약 $162.9 \mu\text{g m}^{-3}$, 김제지역은 $248.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다 (Hwang et al., 2008, 2009a). 미세먼지 농도는 지역별로 차이가 있었으며 군산, 김제, 부안 지역의 PM 10의 평균 농도는 각각 86, 111, $98 \mu\text{g m}^{-3}$ 이었으며, 봄, 가을, 여름, 겨울 순으로 나타났다 (Hwang et al., 2009a, 2009b).

새만금 간척지는 주요 비산먼지 발생원이지만, 토양 관리 및 작물 재배를 통해 미세먼지 저감을 기대할 수 있다. 선행 연구에 따르면 간척지 내 염색식물 피복과 방조제로 인해 PM 10이 29%, TSP는 47% 감소하는 것으로 보고되었다 (Hwang et al., 2009b). 나무 등 식물에 의한 미세먼지 흡착 및 제거 효과도 보고되고 있다. 국립산림과학원에서 측정한 결과 고속도로에서 발생하는 미세먼지 농도가 산림에 의해 PM 10과 PM 2.5가 각각 17.4%, 11.4% 저감된 것으로 보고되었다. 식물에 의한 미세먼지 저감 기작은 풍속 저감에 따른 미세먼지 차단, 식물체 표면의 미세한 구조에 의한 미세먼지 부착, 잎의 기공을 통한 흡수 등이 있다 (Ministry of Forest, 2021). 식물에 의한 미세먼지 저감 기작은 다양하지만 새만금 간척지 내 식물에 의한 미세먼지 저감 효과를 규명한 연구는 없었다.

간척지 토양은 pH, EC, 교환성 Na 함량이 높은 반면 유기물과 유효인산함량이 낮기 때문에 (Ahn et al., 2016) 제염이 충분히 되기 전까지는 발작물이나 나무가 자라기 어려운 조건이다 (Bae et al., 2018). 비산먼지 저감을 위해 섬기린초, 나문재, 해국 등이 선발되어 사용되었다 (Kim et al., 2010). 보리는 내염성이 강한 식량작물로 알려져 있으며

(Kim et al., 2013), 보리 재배에 따라 새만금 간척지 내 비산먼지 저감 효과가 나타났다 (Hyun et al., 2021). 국립축산과학원에서 목초 및 사료작물 초종 및 품종 간 생육특성과 생산성을 비교한 결과 툴 페스큐 (Tall fescue, *Festuca arundinacea*)와 이탈리아인 라이그라스 (Italian ryegrass, *Festuca perennis*)가 타 작물에 비해 간척지 토양 적응성 및 생산성이 우수한 것으로 평가되었다. 새만금 간척지에서 툴 페스큐와 이탈리아인 라이그라스와 같은 사료작물을 대규모로 재배 시 미세먼지 저감 뿐만 아니라 농가소득 증대 및 식량자원 및 사료수입을 줄이는 효과도 기대할 수 있다. 또한 툴 페스큐와 이탈리아인 라이그라스는 가을 파종 및 월동 후 5 - 6월에 수확하는 동계 작물로써 미세먼지 농도가 높은 봄철 미세먼지 농도 저감에 효과가 있을 것으로 판단된다. 하지만 현재까지 간척지 내 동계작물 재배에 따른 미세먼지 저감 효과를 규명한 연구는 없었다.

본 연구는 간척지 내 적응성이 우수하다고 판단된 툴 페스큐와 이탈리아인 라이그라스 재배 시 미세먼지 저감 효과를 평가하기 위해 수행되었다. 동계작물 재배에 의해 미세먼지 농도가 저감될 것으로 기대하였으며, 툴 페스큐와 이탈리아인 라이그라스의 엽면적 등 생육 특성이 다르기 때문에 미세먼지 저감 효과는 상이할 것으로 기대하였다.

Materials and Methods

연구지역 본 연구는 새만금간척지 5공구에 위치한 국립식량과학원 광활시험지 (35°49'47"N, 126°41'9"E)와 새만금간척지 현장실증 포장 (전북 부안군 하서면 불등리, 35°45'1"N, 126°36'6"E)에서 2020년 4월부터 6월까지 수행되었다 (Fig. 1). 연구지역 1991년부터 2020년까지의 연평균 기온과 연평균 강수량은 12.9°C와 1,238.0 mm이었다 (KMA, 2021). 연구기간 중 최저, 최대, 평균 일 기온은 각각 6.8, 25.2, 16.8°C, 최저, 최대, 평균 일 강수량은 각각 0.0, 48.6, 8.3 mm이었다. 일평균 풍속의 최저, 최대, 평균 값은 각각 0.7, 4.9, 1.8 m s⁻¹이었으며, 주 풍향은 서남서 (250°)이었다 (KMA, 2021).

Fig. 1. Study sites used in this study. ● RDA National Institute of Crop Science research site and ■ Saemangeum field demonstration test plot in Buan-gun.

2019년 10월에 식량과학원 광활시험지에는 염농도가 높은 간척지에서 적응성이 높다고 평가된 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스를 각각 0.25 ha (50 m × 50 m)를 파종하였으며, 현장실증 포장은 새만금간척지 내 대규모 사료작물 재배 시험포장이며 이탈리아 라이그라스를 450 ha에 파종하였다. 파종 전 후 작물별 추천 시비량에 맞춰 시비하였으며, 관개는 하지 않았다. 비료는 요소, 용성인비, 염화칼륨을 이용하여 N-P₂O₅-K₂O기준으로 톨 페스큐 포장에 153-275-160 kg ha⁻¹로 시비하였고, 파종 일에 밑거름 (80-200-70 kg ha⁻¹)과 월동 후 3월 4일에 웃거름 (73-75-90 kg ha⁻¹)으로 나누어 주었다. 이탈리아 라이그라스 포장에는 140-120-120 kg ha⁻¹로 시비하였고, 파종 일에 밑거름 (42-60-60 kg ha⁻¹)과 월동 후 3월 4일에 웃거름 (98-60-60 kg ha⁻¹)으로 나누어 주었다.

미세먼지 농도 모니터링 미세먼지 농도는 SENSIRION SEK-SPS30 (SENSIRION, Korea) 센서를 사용하여 모니터링하였다. SEK-SPS30 미세먼지 모니터링 센서는 PM 1.0, PM 2.5, PM 4.0, PM 10 상시 모니터링이 가능하며 1초, 10초, 100초, 1,000초 간격으로 데이터 저장이 가능하다. 센서와 함께 사용할 수 있는 데이터 로거가 없어 노트북 컴퓨터에 연결하여 사용하였으며, 24시간 모니터링을 위하여 보조 전력을 연결하여 사용하였다.

모니터링 센서는 식량과학원 광활시험장에 40개, 새만금간척지 현장실증 포장에 12개 설치하였다. 두 연구포장 모두 동일 지점에 지상의로부터 1 m와 2 m 높이에 센서를 설치하였으며, 광활시험장은 20지점, 현장실증 포장에는 6 지점을 선정하였다 (Fig. 2). 광활시험장은 이탈리아 라이그라스와 톨 페스큐 포장 내 각 3지점, 포장 외부 각 6지점,

Fig. 2. Locations of sensor installation at (a) RDA National Institute of Crop Science research site and (b) Saemangeum field demonstration test plot in Buan-gun, and (c) images of sensor installation.

대조구 2지점을 선정하였다. 포장 상황을 고려하여 센서 설치 지점 간 간격은 포장 내부 20 m, 포장 외부 외부 40 m, 대조구 20 m를 유지하였다. 현장실증 포장의 경우 대조구 2지점, 포장 내부 4지점을 선정하였으며, 센서 설치 지점 간 간격은 40 m를 유지하였다. 두 연구 포장 모두 대조구는 식생이 없는 나지를 선택하였다.

미세먼지 농도 모니터링은 광활시험장의 경우 생육 초기인 4월 28일 10:00-17:00, 수확 중기인 5월 12일 13:00 - 5월 13일 15:00, 수확 직전인 5월 20일 12:00 - 5월 21일 1:00 수행하였으며, 모니터링 데이터는 100초 간격으로 저장하였다. 현장실증 포장에서는 생육 중·후반 집중적으로 모니터링을 수행하였으며, 6월 4일 12:00 - 6월 5일 11:00, 6월 8일 10:00 - 6월 8일 11:00, 6월 16일 10:00 - 6월 16일 9:00에 100초 간격으로 모니터링 하였다.

데이터 분석 각 센서에서 100초 간격으로 모니터링 된 데이터는 센서 별로 1시간 평균값을 계산한 후 처리구 별 평균값을 계산하였다. 시간별 평균값을 그래프로 나타냈으며, 각 모니터링 총 시간의 평균값을 표로 제시하였다. 모니터링 위치, 작물의 영향을 평가하기 위해 분산분석 (analysis of variance)을 수행하였으며, 처리구 별 차이를 판별하기 위해 LSD 사후분석을 수행하였다. 통계분석은 SPSS 23.0 (IBM, USA)을 이용하여 수행하였으며 유의수준은 0.05를 이용하였다.

Results and Discussion

작물 성장 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스 모두 4월 초까지는 성장이 더디다가 이후 급격하게 성장하는 패턴을 보였다 (Fig. 3). 두 작물 모두 파종 후 3월까지는 10 cm 이하로 유지되었으며 수확 시기에는 톨 페스큐는 80 cm, 이탈리아 라이그라스는 92 cm 까지 성장하였다 (Fig. 3). 수확 시기 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스의 건물중은 각각 $4,570 \text{ kg ha}^{-1}$ 과 $6,430 \text{ kg ha}^{-1}$ 로써 이탈리아 라이그라스의 건물중이 톨 페스큐에 비해 약 41% 더 높았다. 수확 시기 이탈리아 라이그라스의 초장이 톨 페스큐에 비해 10% 가량 높았지만 건물중은 그에 비해 높은 (41%) 이유는 이탈리아 라이그라스의 엽면적이 톨 페스큐에 비해 높기 때문이며, 톨 페스큐는 주로 저부에 엽이 형성되고 지상 30 cm 이후 높이에는 주로 줄기와 화서로 구성되고 잎의 밀도는 높지 않았다 (Fig. 3).

일반 농경지에서 재배된 동일 품종의 건물중은 톨 페스큐가 $15 - 17 \text{ Mg ha}^{-1}$, 이탈리아 라이그라스가 $9 - 10 \text{ Mg ha}^{-1}$ 으로써 (Lee and Yun, 2014; Kim et al., 2016), 본 연구에서 조사된 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스의 건물중은 일반 농경지 대비 27 - 30%, 64 - 71%의 수확량을 보였다. 이는 연구지역 토양의 총질소, 유기물 함량, 유효인산, CEC는 각각 0.5 g kg^{-1} , 4.9 g kg^{-1} , 26.7 mg kg^{-1} , $5.6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 으로, 일반 농경지 이탈리아 라이그라스와 톨 페스큐 재배 토양의 양분 유효도 (총질소, 유기물 함량, 유효인산, CEC 각각 1.4 g kg^{-1} , 20.1 g kg^{-1} , 300.9 mg kg^{-1} , $16.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)에 비해 현저하게 낮았기 때문으로 판단된다. 이탈리아 라이그라스의 경우 토양 염농도가 증가할수록 수확량이 감소하는 경향을 보였지만, EC 3.4 dS m^{-1} 에서 건물중 6.7 Mg ha^{-1} (Shin et al., 2005), EC $0.2 - 2.8 \text{ dS m}^{-1}$ 에서 건물중 9.4 Mg ha^{-1} (Yang et al., 2012), 본 연구에서는 토양 EC가 0.5 dS m^{-1} 이하였음에도 수확량이 선행연구에 비해 낮았다. 또한 토양 양분 유효도는 선행연구의 경우 총질소, 유기물 함량, 유효인산이 각각 0.46 g kg^{-1} , 0.82 g kg^{-1} , 76 mg kg^{-1} (Shin et al., 2005), 0.2 g kg^{-1} , 3.9 g kg^{-1} , 9 mg kg^{-1} (Yang et al., 2012)로써 본 연구에 사용된 토양의 양분 유효도에 비해 좋지 않았다. 토양 염도 및 양분 유효도가 선행 연구에 비해 좋음에도 건물 수량이 낮은 이유는 입모율이 낮고 (80%), 3월과 4월 월 강수량이 평년 대비 20 mm 가량 낮아 생육 초기 성장 저해가 큰 요인으로 판단된다.

Fig. 3. Changes in height of crops in RDA National Institute of Crop Science research site and images of crops on the monitoring dates.

미세먼지 저감 효과 연구 기간(4 - 6월) 중 미세먼지 농도는 전국 평균 PM 2.5와 PM 10은 각각 36.3, 18.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었으며, 연구 지역과 인접한 부안과 김제에서 측정된 평균 PM 2.5와 PM 10은 각각 37.8, 22.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다(Air Korea, 2021). 동일 기간, 동일 지점에서 2019년도에 측정된 미세먼지 농도는 전국 평균 41.7, 21.7 $\mu\text{g m}^{-3}$, 부안, 김제 지역 평균 48.0, 24.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로써 연구 기간 동안 측정된 미세먼지 농도가 전년 대비 낮게 나타났다. 이는 COVID-19으로 인한 경제활동 감소에 따른 전 세계적인 현상이다.

현장에서 측정된 미세먼지 농도는 측정 일자, 측정 시간에 따라 차이가 있었다(Figs. 4 - 9). 4월 28일 측정된 미세먼지 농도는 PM 2.5이 9.3 - 20.1 $\mu\text{g m}^{-3}$, PM 10이 9.6 - 20.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났으며, 시간이 경과함에 따라 꾸준히 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). 높이에 따른 유의한 차이는 없었으나 2 m 높이에서 1 m에 비해 5 - 10% 정도 높게 나타났다(Table 1). 처리구 별 미세먼지 농도는 유의한 차이가 없었다. 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스 모두 5월에 급격하게 성장량이 증가하였으며(Fig. 3), 4월에는 측정 높이(1 m와 2 m)에 비해 작물 초장이 작아 작물에 의해 미세먼지 저감 효과가 있었다고 하더라도 농도 차이가 측정되지 않은 것으로 판단된다.

톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스의 생육 후반(5월 12일-13일)과 수확 직전(5월 20일-21일) 측정된 미세먼지 농도 저감 효과는 생육 초기와 상이한 결과가 나타났다(Figs. 5, 6). 미세먼지 농도는 시간에 따라 변동하였으며, 5월

12일-13일 측정된 농도는 PM 2.5이 $1.6 - 24.7 \mu\text{g m}^{-3}$, PM 10이 $1.6 - 23.6 \mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 5)로 나타났으며, 5월 20일-21일 측정된 농도는 PM 2.5이 $1.1 - 7.0 \mu\text{g m}^{-3}$, PM 10이 $1.2 - 7.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다 (Fig. 6). 두 측정 시기 모두 측정 높이에 따른 유의한 농도 차이는 없었다. 작물 생육 후반 측정된 미세먼지 농도는 이탈리아 라이그라스에 의해 1 m 높이에서 PM 2.5와 PM 10 모두 5월 12 - 13일은 약 36%, 5월 20 - 21일은 약 31% 저감되는 것으로 나타났다 (Table 1). 하지만 2 m 높이에서는 같은 처리구에서 농도 차이가 없었다. 또한 톨 페스큐는 미세먼지 농도 저감에 효과가 없었다.

Fig. 4. Changes in concentrations of (a) particulate matter (PM) 2.5 at 1 m above ground, (b) PM 2.5 at 2 m above ground, (c) PM 10 at 1 m above ground, and (d) PM 10 at 2 m above ground on April 28 in RDA National Institute of Crop Science research site.

Table 1. Concentrations of particulate matter monitored in RDA National Institute of Crop Science research site.

Monitoring time	PM	Monitoring height	Concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)				
			CK [†]	IRG_IN	IRG_OUT	TF_IN	TF_OUT
April 28, 10:00 - 17:00	PM 2.5	1 m	14.4 (1.7) a	14.6 (1.0) a	14.0 (0.5) a	13.8 (1.3) a	14.3 (0.7) a
		2 m	15.4 (1.4) a	15.6 (0.9) a	15.5 (0.6) a	15.0 (1.2) a	14.6 (0.8) a
	PM 10	1 m	14.5 (1.7) a	14.8 (1.1) a	14.0 (0.5) a	13.9 (1.6) a	14.4 (0.8) a
		2 m	15.4 (1.4) a	15.6 (0.9) a	15.5 (0.6) a	15.1 (1.5) a	14.7 (0.8) a

Table 1. Concentrations of particulate matter monitored in RDA National Institute of Crop Science research site. (Continued)

Monitoring time	PM	Monitoring height	Concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)				
			CK [†]	IRG_IN	IRG_OUT	TF_IN	TF_OUT
May 12 13:00 - May 13 15:00	PM 2.5	1 m	8.0 (0.7) b	4.9 (2.7) a	8.1 (0.3) b	8.1 (0.3) b	8.1 (0.6) b
		2 m	8.3 (0.5) b	8.2 (0.4) b	8.4 (0.3) b	8.1 (0.3) b	8.3 (0.6) b
	PM 10	1 m	8.1 (0.7) b	5.0 (2.7) a	8.1 (0.4) b	8.1 (0.3) b	8.2 (0.6) b
		2 m	8.3 (0.5) b	8.2 (0.4) b	8.4 (0.4) b	8.2 (0.3) b	8.3 (0.6) b
May 20 12:00 - May 21 1:00	PM 2.5	1 m	3.1 (0.2) b	2.1 (0.8) a	3.2 (0.2) b	3.3 (0.1) b	3.0 (0.2) b
		2 m	3.2 (0.2) b	3.3 (0.3) b	3.3 (0.2) b	3.4 (0.2) b	3.2 (0.3) b
	PM 10	1 m	3.1 (0.2) b	2.0 (0.7) b	3.0 (0.2) b	3.0 (0.1) b	3.0 (0.2) b
		2 m	3.2 (0.2) b	3.1 (0.3) b	3.0 (0.2) b	3.1 (0.1) b	3.0 (0.3) b

Values are means with standard error of means in the parentheses.

Different lowercase letters indicate that the values are significantly different among the samples of same monitoring date at $\alpha = 0.05$.

[†]CK, control; IRG_IN, inside of Italian ryegrass plot; IRG_OUT, outside of Italian ryegrass plot; TF_IN, inside of Tall fescue plot; TF_OUT, outside of Tall fescue plot.

Fig. 5. Changes in concentrations of (a) particulate matter (PM) 2.5 at 1 m above ground, (b) PM 2.5 at 2 m above ground, (c) PM 10 at 1 m above ground, and (d) PM 10 at 2 m above ground on May 12 - 13 in RDA National Institute of Crop Science research site.

Fig. 6. Changes in concentrations of (a) particulate matter (PM) 2.5 at 1 m above ground, (b) PM 2.5 at 2 m above ground, (c) PM 10 at 1 m above ground, and (d) PM 10 at 2 m above ground on May 20 - 21 in RDA National Institute of Crop Science research site.

생육 후반 수확 직전 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스의 초장은 각각 80 cm와 92 cm로써 측정 높이인 1 m에 근접하였다. 작물에 의한 미세먼지 농도 저감은 작물 앞에 미세먼지가 흡착된 결과로 판단되며, 생육 중후반 작물 생육이 급격하게 증가함에 따라 미세먼지 저감 효과가 증가하였고, 측정 높이인 1 m에서 저감 효과가 실질적으로 측정된 것으로 판단된다. 하지만 2 m 높이에서는 작물과 거리가 멀어 저감 효과가 측정되지 않은 것으로 판단된다.

생육 후반 수확 직전 톨 페스큐와 이탈리아 라이그라스의 초장은 각각 80 cm와 92 cm로써 측정 높이인 1 m에 근접하였다. 작물에 의한 미세먼지 농도 저감은 작물 앞에 미세먼지가 흡착된 결과로 판단되며, 생육 중후반 작물 생육이 급격하게 증가함에 따라 미세먼지 저감 효과가 증가하였고, 측정 높이인 1 m에서 저감 효과가 실질적으로 측정된 것으로 판단된다. 하지만 2 m 높이에서는 작물과 거리가 멀어 저감 효과가 측정되지 않은 것으로 판단된다.

톨 페스큐에 비해 이탈리아 라이그라스의 미세먼지 저감 효과가 우수하였는데, 이 또한 미세먼지 앞에 의한 미세먼지 흡착 효과가 이탈리아 라이그라스가 톨 페스큐에 비해 컸음을 의미한다. 수확 당시 건물중은 이탈리아 라이그라스가 톨 페스큐에 비해 약 41% 높았으며, 이는 이탈리아 라이그라스의 엽면적 및 생체량이 컸음을 의미한다. 톨 페스큐의 경우 잎이 저부에 발달하고 지상 30 cm 이후 높이에는 주로 줄기와 화서로 구성되어 있어 지상에서 떨어질수록 미세먼지 저감효과가 감소함을 의미한다. 간척지에서 작물 생육에 따른 미세먼지 농도를 측정한 선행연구는 없지만, 엽생식물의 피복 상태가 높을수록 비산먼지 발생량이 감소한다는 결과가 보고되었으며 (Hwang et al., 2008), 새만금

간척지 내 보리 재배 시 피복량이 증가할수록 미세먼지 농도가 감소하였다 (Hyun et al., 2021). 수목에 의한 미세먼지 농도 저감 효과를 측정 한 결과 PM 10과 PM 2.5가 산림에 의해 각각 17.4%, 11.4% 저감된 것으로 보고되었다 (Ministry of Forest, 2021). 이는 식물에 의해 미세먼지가 흡착 및 기공을 통해 흡수된 결과로써 본 연구에서 확인된 미세먼지 농도 저감 또한 이탈리아 라이그라스의 잎에 의해 미세먼지가 흡착 및 흡수 된 결과로 판단된다. 톨 페스큐에 의한 미세먼지 저감 효과가 수치적으로 나타나지는 않았지만, 잎의 밀도가 높은 저부에서 미세먼지 농도 측정 시 유사한 결과가 도출될 것으로 판단된다.

본 연구에서 동계작물 재배 결과 포장 내 미세먼지 저감 효과가 규명되었지만 포장 외부의 미세먼지 농도는 풍향과 상관없이 대조구와 유사한 결과나 나타났다. 이러한 결과는 미세먼지가 확산되는 면적 (새만금간척지)에 비해 연구 포장 규모가 작기 때문으로 판단된다. 하지만 동계작물이 대규모로 재배된다면 미세먼지 확산 저감에도 기여할 것으로 판단된다.

이를 평가하기 위해 새만금 간척지 부안 현장실증 포장 (이탈리안 라이그라스 450 ha)에서 미세먼지 농도를 측정하였다. 6월 4 - 5일 PM 2.5이 $3.4 - 14.8 \mu\text{g m}^{-3}$, PM 10이 $3.4 - 14.8 \mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 7), 6월 8 - 9일 PM 2.5이 $20.9 - 70.0 \mu\text{g m}^{-3}$, PM 10이 $20.2 - 70.9 \mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 8), 6월 16 - 17일 PM 2.5이 $25.3 - 52.4 \mu\text{g m}^{-3}$, PM 10이 $25.5 - 52.9 \mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 9)로 나타났으며, 높이에 따른 차이는 없었다. 6월 8 - 9일과 16 - 17일은 이탈리아 라이그라스에 의한 미세먼지 농도 저감 효과가 없었으나 6월 4 - 5일은 이탈리아 라이그라스에 의해 미세먼지 농도가 22% 저감되었다 (Table 2). 부안군 현장실증 포장은 수확 시기를 놓쳐 전체 포장의 50% 정도의 이탈리아 라이그라스가 누워져 있는 상태였으며, 미세먼지 농도 측정 시기가 수확 예정 시기보다 늦어질수록 이탈리아 라이그라스에 의한 미세먼지 농도 저감 효과가 측정되지 않은 것으로 판단된다. 또한 6월 8 - 9일과 16 - 17일은 4 - 5일 또는 4 - 5월에 광활시험장에서 측정된 농도에 비해 월등히 높았는데, 이는 주변 공사를 위해 시험 포장 바로 옆 도로는 통과하는 공사차량과 공사장에서 발생하는 먼지가 많았기 때문이며, 높은 미세먼지 농도에 비해 작물 직립 밀도가 낮아 그 효과가 더 작은 것으로 판단된다.

Fig. 7. Changes in concentrations of (a) particulate matter (PM) 2.5 and (b) PM 10 on June 4 - 5 in Saemangeum field demonstration test plot in Buan-gun.

Fig. 8. Changes in concentrations of (a) particulate matter (PM) 2.5 and (b) PM 10 on June 8 - 9 in aemangeum field demonstration test plot in Buan-gun.

Fig. 9. Changes in concentrations of (a) particulate matter (PM) 2.5 and (b) PM 10 on June 16 - 17 in aemangeum field demonstration test plot in Buan-gun.

Table 2. Concentrations of particulate matter monitored in Saemangeum field demonstration test plot in Buan-gun.

Monitoring time	PM	Monitoring height	Concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)	
			CK [†]	IRG_IN
June 4 12:00 - June 5 11:00	PM 2.5	1 m	8.2 (0.8) b	6.8 (1.0) a
		2 m	8.6 (0.7) b	8.9 (0.4) b
	PM 10	1 m	8.5 (0.8) b	7.1 (1.1) a
		2 m	8.8 (0.7) b	9.2 (0.5) b
June 8 10:00 - June 9 11:00	PM 2.5	1 m	41.3 (2.2) a	41.2 (2.0) a
		2 m	41.9 (1.0) a	42.5 (1.6) a
	PM 10	1 m	42.0 (2.4) a	41.6 (2.1) a
		2 m	42.1 (1.0) a	42.8 (1.5) a
June 16 10:00 - June 16 9:00	PM 2.5	1 m	35.9 (2.8) a	35.8 (1.4) a
		2 m	36.5 (1.0) a	35.8 (0.9) a
	PM 10	1 m	36.5 (3.0) a	36.7 (1.7) a
		2 m	36.9 (2.2) a	36.4 (1.0) a

Values are means with standard error of means in the parentheses.

Different lowercase letters indicate that the values are significantly different among the samples of same monitoring date at $\alpha = 0.05$.

[†]CK, control; IRG_IN, inside of Italian ryegrass plot.

Conclusions

본 연구 결과 동계작물에 의한 미세먼지 저감 효과가 구명되었다. 특히 이탈리아 라이그라스 생육 후반 그 효과가 월등하였으며, 새만금 간척지 내 이탈리아 라이그라스 재배에 따른 미세먼지 고농도 시준 미세먼지 저감 효과가 탁월할 것으로 판단된다. 톨 페스큐는 미세먼지 저감 효과가 수치적으로 측정되지는 않았지만 지상 저부에서는 잎의 밀도가 높기 때문에 미세먼지 흡착 및 농도 저감 효과가 있을 것으로 판단된다. 또한 톨 페스큐는 다년생 작물로서 1년차에 비해 이후에 생육이 활발한 점을 감안할 때 장기적으로 톨 페스큐 재배 시 이탈리아 라이그라스와 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 간척지 내 동계 사료작물에 의한 미세먼지 저감 효과를 증대하기 위해서는 작물 생육이 증가하여야 하며, 이를 위해 유기물 투입 등을 통한 토양 개량 및 양분 유효도 증대를 위한 노력이 필요하다. 본 연구를 통해 동계작물에 의한 미세먼지 저감 효과는 구명되었지만, 정확한 기작은 실험적으로 평가하지 못하였다. 작물별 미세먼지 흡착량 및 미세먼지 농도 저감을 수치화할 수 있는 흡착 실험이 수반 될 경우 미세먼지 저감 기작을 밝힐 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업 ‘동계 초지관리에 따른 봄철 고농도 미세먼지 저감 영향 평가(PJ0150372021)’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, B.K., Y.Y. Lim, D.Y. Ko, C.K. Lee, J.H. Kim, Y.J. Song, and J.H. Lee. 2016. Investigation of soil physico-chemical properties in Saemangeum reclaimed tidal land in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49:347-354.
- Air Korea. 2021. Monthly and annual report of air quality. https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on April 20, 2021).
- Bae, H.S., H. Jang, J.B. Hwang, T.S. Park, K.S. Lee, D.S. Lee, and D.Y. Chung. 2018. Managing soil organic matter and salinity by crop cultivation in Saemangeum reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51:50-60.
- Hwang, H.S., I.B. Lee, M.H. Shin, G.Y. Lee, S.W. Hong, I.H. Seo, J.I. Ryu, J.P. Bitog, K.S. Kwon, and Y.H. Kim. 2009b. Monitoring of the fugitive and suspended dust dispersion at the Saemangeum reclaimed land and neighboring farm areas. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 51(5):9-17.
- Hwang, H.S., I.B. Lee, M.H. Shin, 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(4):39-50.
- Hwang, H.S., I.B. Lee, M.H. Shin, S.W. Hong, I.H. Seo, J.I. Ryu, J.P. Bitog, K.S. Kwon, and Y.H. Kim. 2009a. 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(2):59-67.
- 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.
- Kim, D.Y., S.J. Yim, H.M. Kwon, and J.H. Yim. 2010. Monitoring of vegetation coverage for selecting plants for beach revegetation. *KSCE J. Civ. Environ. Eng. Res.* 30(5B):519-524.
- Kim, K.Y., G.J. Choi, S.H. Lee, T.Y. Hwang, G.W. Lee, H.C. Ji, and S.M. Park. 2016. Effect of harvest time of rice after seeding of Italian ryegrass on growth characteristics and dry matter yield of IRG in paddy field. *J. Korean Soc. Grassl. Forage Sci.* 36:287-292.
- Kim, S., J.H. Jeong, J.H. Lee, W.Y. Choil, Y.B. Lee, and I.B. Kim. 2013. Change of vegetation characteristics and soil chemical properties at Saemangeum reclaimed land in Korea. *Weed & Turfgrass Sci.* 2(3):260-266.
- KMA (Korea Meteorological Administration) 2021. Historical meteorological data. https://web.kma.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp (Accessed on April 20, 2021).
- Lee, J.E. and S.I. Yun. 2014. Effects of compost and gypsum on soil water movement and retention of a reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47:340-344.
- Ministry of Environment. 2021. Air pollutant emission statistics for 2017. https://www.air.go.kr/jbmd/sub43_detail.do?tabPage=3&detailKey=70026P07&inputSchTxt=&typeSchOption=sj&menuId=POT041# (Accessed on April 20, 2021).
- Ministry of Forest. 2021. https://www.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1036&mn=NKFS_04_02_01&nttId=3124638 (Accessed on May 20, 2021).
- Shin, J.S., S.H. Lee, W.H. Kim, S.H. Yoon, J.G. Kim, and J.W. Nam. 2005. Comparison of dry matter and feed value of major winter forage crops in the reclaimed tidal land. *J. Korean Grassl. Sci.* 25:113-118.
- Son, J.G. and J.Y. Cho. 2000. Effect of organic material treatments on soil aggregate formation in reclaimed tidelands. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(3):201-206.
- Yang, C.H., J.H. Lee, S. Kim, J.H. Jeong, N.H. Baek, W.Y. Choi, S.B. Lee, Y.D. Kim, S.J. Kim, and G.B. Lee. 2012. Study on forage cropping system adapted to soil characteristics in reclaimed tidal land. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:385-392.