

인공 습지 모형을 활용한 습지의 미세먼지 저감 효과

손가연·김재근*[†]

서울대학교 생물교육과
*서울대학교 교육종합연구원

Assessing removal effects on particulate matters using artificial wetland modules

Ga Yeon Son·Jae Geun Kim**

Department of Biology Education, Seoul National University

**Center for Education Research, Seoul National University*

(Received : 03 January 2020, Revised: 04 February 2020, Accepted: 14 February 2020)

요약

본 연구에서는 습지 조성 및 습지 내 식물에 따른 미세먼지 저감 능력 규명을 통해 습지생태계의 가치에 대하여 새로운 시각의 해석을 제공하고자 하였다. 소형 간이온실(70cm W × 70cm L × 60cm H)로 닫힌계를 형성하였으며, 간이온실 내 메조코즘에 일정 수위가 유지되는 습지(W) 혹은 건조 상태를 유지하는 육상(L) 조건을 조성하였다. 육상과 습지 조건 각각에 식물종 미식재, 단일종 식재 그리고 두 종 혼합 식재의 총 8가지 조건을 4반복씩 조성하였다. 열린계의 메조코즘에서 초기 대기질과 닫힌계로의 전환 1시간 경과한 후의 대기질을 측정하여 공기 정화능을 확인하였다. 각 실험구의 대기질로서 PM_{2.5}, PM₁₀ 농도를 중점적으로 측정하였으며, 2차 실험에서는 식물체의 건조량을 측정하였다. 닫힌계 형성 1시간 후 습지 환경에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 감소량은 1차 실험에서 각각 13.7±1.3, 15.0±1.4 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났으며, 2차 실험에서는 각각 10.5±2.1, 11.2±2.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다. 육지 환경에서의 미세먼지 감소량은 1차 실험에서 각각 13.2±1.3, 13.8±1.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났으며, 2차 실험에서는 각각 9.2±1.5, 8.8±1.4 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 습지의 높은 생산성으로 인한 식물의 생장으로 식물의 조직에 미세먼지 흡착을 통한 저감이나 증산작용을 통한 수분, 또 습지 자체의 수생태계적 특성을 통한 미세먼지 저감 효과가 드러난 것으로 여겨진다. 따라서 습지의 미세먼지 저감 능력은 습지의 또 다른 가치로 볼 수 있으며 이는 미세먼지 문제에 대한 해결방안 중의 하나로 제시될 수 있을 것이다.

핵심용어 : PM_{2.5}, PM₁₀, 미세먼지, 생물량, 습지생태계

Abstract

To assess the wetland systems' capability to reduce fine dust, we used an artificial wetland module of small-sized greenhouse (70cm W × 70cm L × 60cm H) which creates a closed system. Experiment was performed twice using four species in each experiment. Non-plantation, one species, or two species condition was created in each mesocosm. We measured air quality, primarily PM_{2.5} and PM₁₀ at the initial open mesocosms and 1hr later since mesocosms were closed. The dry weight of vegetation was measured at the 2nd experiment. The decreased amount of PM_{2.5} and PM₁₀ was 13.7±1.3 and 13.2±1.3 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ in wetland condition and 15.0±1.4 and 13.8±1.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ in dryland condition, respectively. In 2nd experiment, the decreased amount of PM 2.5 and PM 10 in wetland condition was 13.7±1.3 and 9.2±1.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$, 15.0±1.4 and 8.8±1.4 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ in dryland condition, respectively. Wetland showed higher removal effect due to its high productivity leading to more effective absorption of particulate matter. Furthermore, the aquatic characteristics of wetland system and high humidity helped purifying the air quality. This can be seen as another value of wetlands, which can be presented as one of the solutions to the problem of fine dust.

Key words : Biomass, Fine dust, PM_{2.5}, PM₁₀, Wetland ecosystem

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Biology Education, Seoul National University
E-mail: jaegkim@snu.ac.kr

• Ga Yeon Son Seoul National University / Graduate student (karen0327@snu.ac.kr)
• Jae Geun Kim Seoul National University / Professor (jaegkim@snu.ac.kr)

1. 서 론

대기 미세먼지(PM, particulate matter)는 대기 중에 떠다니는 입자상 물질 중에서 직경이 10 μm 이하이거나(PM10) 2.5 μm 이하인 입자(PM2.5)를 의미하며, 국제적으로 중요한 사회적 이슈이자 환경문제로 대두되고 있다. 최근 중국발 미세먼지의 유입, 국내 오염원 등으로 인해 점차 우리나라에서도 그 문제가 심각해지고 있다(국립환경과학원 2012). 이에 따라 환경부에서 2019년 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법을 제정하여 시행하고 있으며 자동차 운행제한, 교육시설의 휴업 등 대기 중 미세먼지 농도가 높은 날에 대한 규제사항을 명시하고 있다(환경부 2019). 그러나 이러한 제재 및 규제는 미세먼지에 대한 근본적인 해결책이기 보다는 개인의 활동 제한 및 일시적인 해결책으로 문제에 대한 미봉책에 가까운 실정이다.

미세먼지가 끼치는 영향에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다. 미세먼지는 그 입자가 작아 천식이나 폐암 등 호흡기 관련 질병 등을 유발하는 것으로 알려져 있으며(명준표 2016, 장안수 2015), PM2.5 및 PM10의 농도의 증가는 일별 사망자 발생건수와 상관되지는 않지만 유의한 상관관계가 있다고 밝혀졌다(Anderson 2009). 건강문제뿐만 아니라 미세먼지로 인한 경제적 손실을 추정한 연구도 국내에서 이루어지고 있다(박해우와 조영민 2013, 진형아 등 2012). 더불어 기후변화에 따른 미세먼지의 추이, 생태계별 어떠한 미세먼지 발생 추이 등 미세먼지에 대한 예측을 하는 연구들도 이루어지고 있다(Tai et al. 2010, Pateraki et al. 2012). 그러나 미세먼지의 발생에 대처하는 방안 관해서는 주로 실내 조정, 제품 개발 등에 그치고 있으며(이장희 등 2015, 권계정과 박봉주 2017, 권계정과 박봉주 2018), 이는 적용 규모가 매우 한정적일 수 있다. 보다 넓은 규모에서의 미세먼지 발생 대처 방안을 마련하기 위해서는 기존의 자연환경과 생태계 차원에서의 미세먼지 저감 능력을 탐색하고 이를 활용할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

실내 조정에서는 주로 식물체에의 흡착을 통한 미세먼지 저감 효과를 도모하며, 이는 자연 생태계의 식생에 의해서도 이루어지고 있다. 또한 기후학적 요소와의 상관관계를 살펴보면 상대습도와 음의 상관관계를 가지는 연구 사례들을 찾아볼 수 있다(Qiu et al 2015). 이러한 현상은 대기 중의 오염물질이 대부분 양이온을 띄고 있어 물에 쉽게 녹아서 나타난 현상이라고 볼 수 있다(박지연과 임호진 2006). 따라서 물이 주요 구성 요소인 자연 생태계의 경우 자연적인 미세먼지 저감 효과를 도모할 수 있을 것으로 예상된다. 이 중 습지생태계는 가장 높은 생산성을 가지는 생태계 중 하나로서 다양한 생물들의 서식처로서 기능할 뿐만 아니라(Hong et al. 2019), 우리나라와 같이 여름철에 강우가 집중되는 지역의 치수와 이수에 핵심적인 기능을 수행하는 등 수문학적 기능도 뛰어난 생태계라 할 수 있다(홍문기와 김재근 2017). 특히 습지생태계는 수질 정화 기능이 탁월하며, 그 중 이탄습지의 경우 지속적으로 이탄을 축적함으로써 메탄과 같은 온실가스를 효과적으로 저감하는 등 일종의 대기정화 기능을 수행하는 것으로도 잘 알려

져 있다(Roucoux et al. 2017).

다른 선진국의 경우 습지생태계의 생태적 가치에 대한 인식이 높아져 훼손된 습지에 대한 개선이나 복원 및 추가적인 조성 등에 많은 노력을 기하고 있는 한편, 우리나라의 경우 최근에 들어서야 국내 습지 분포 특성 및 면적 등에 대한 기초적인 조사를 시작하고 있는 수준에 그치고 있다(강수진 등 2012). 무엇보다도 아직까지 미세먼지를 대상으로 한 습지생태계의 공기 정화능 규명에 관한 연구는 국내외로 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 습지생태계가 실제로 공기 정화 기능을 수행하는지 여부 및 수준을 실험적으로 규명하고자 하였다. 습지생태계의 속성을 담은 디자인적 요소들을 반영한 인공 습지생태계 모형을 활용하여 습지생태계의 공기 정화능을 육상생태계와 비교하여 정량적으로 파악하였다. 특히, 본 연구는 습지생태계의 공기 정화능 규명과 관련하여 육상생태계와의 비교를 통해 습지생태계의 다양한 기능 수행 가능성에 대한 실제적 타진과 더불어 이를 토대로 하여 습지생태계의 생태적 가치에 대한 인식 제고에도 기여할 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 인공 습지생태계와 육상생태계 모듈 설계

본 연구에서는 습지생태계와 육상생태계의 공기 정화 능력을 비교하기 위하여 간이 온실을 활용한 인공 습지생태계 및 육상생태계 모듈을 설계하였다(Fig. 1). 서울특별시 관악구 서울대학교 내 야외포장(37° 37' 25" N 127° 08' 37" E)에서 화분(세로 60 cm × 가로 40 cm × 높이 21 cm)에 혼합 토양(수도용 상토 : 모래 = 1:5)을 넣은 후 식물을 식재하였다. 습지생태계 환경을 조성하기 위한 실험구는 수돗물을 이용하여 수위를 3 cm로 유지하였으며, 육상생태계 환경을 조성하기 위한 실험구는 식물이 마르지 않을 정도의 물을 최소한으로 공급하였다.

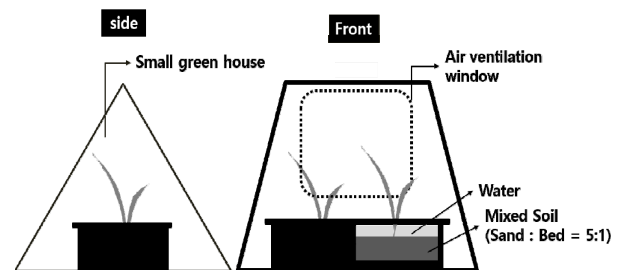


Fig. 1. Simple diagram of the established artificial wetland.

2.2 식물종 식재

2018년 5월부터 6월까지 1차 실험이 진행되었으며, 같은 해 9월부터 10월까지 2차 실험이 진행되었다. 환경과 실험 시기를 고려하여 식재 시기와 조성 환경(육상, 습지)에 따라 다른 식물 종을 식재하였다(Table 1). 같은 실험 시기에 식재하는 육상 식물과 습지 식물은 다양성을 보이기 위해 광엽성 초본과 협엽성 초본을 식재하였으며 두 환경에 식재되는 식물의

Table 1. Planted species of each experimental condition (n=4 for each condition)

Environment	Scientific name of planted species	
	1 st experiment	2 nd experiment
Wetland	<i>Iris ensata</i> (꽃창포)	<i>Hydrocotyle verticillata</i> (워터코인)
	<i>Polygonum thunbergii</i> (고마리)	<i>Carex jackiana</i> var. <i>macroglossa</i> (보리사초)
	<i>Iris ensata</i> & <i>Polygonum thunbergii</i>	<i>Hydrocotyle verticillata</i> & <i>Carex jackiana</i> var. <i>macroglossa</i>
Land	<i>Crepidiastrum sonchifolium</i> (고들빼기)	<i>Hosta longipes</i> (비비추)
	<i>Iris sanguinea</i> (붓꽃)	<i>Plantago asiatica</i> (질경이)
	<i>Crepidiastrum sonchifolium</i> & <i>Iris sanguinea</i>	<i>Hosta longipes</i> & <i>Plantago asiatica</i>

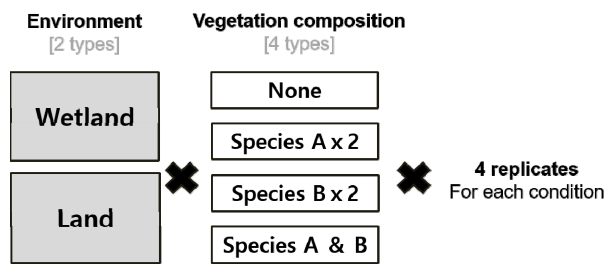


Fig. 2. The scheme of mesocosm experiment.

형태학적인 특징이 비슷하도록 종을 구성하였다. 이 때 같은 형태로 분류된 두 종에 해당하는 개체들의 초기 생장 정도를 일치시키기 위해 개체간 초고의 차이는 1 cm 이하, 엽면적 차이는 2 cm² 이하가 되도록 하여 식재하였다. 두 환경에서 식물을 식재하지 않은 실험구, 습지 식물 또는 육상 식물을 각 1종씩만 2개체씩 식재한 실험구, 습지 식물 또는 육상 식물 2종을 각 1개체씩 함께 식재한 실험구를 각각 4개씩 조성하였다(Fig. 2).

2.3 데이터 수집 및 통계 분석

2.3.1 대기질 측정

미세먼지 농도가 높은 날의 경우 간이 온실 내 공기가 충분히 주입되어 균질함이 확보되는 것을 사전에 반복 실험을 통해 확인하였다. 초기 미세먼지 농도 측정 후 개폐구(air ventilation window)를 닫아 닫힌계를 만들어주었다. 1시간 후 최종 미세먼지 농도를 측정하였으며 미세먼지 측정기(BR-SMART-12LI, Wooju mulsan Co., Korea)를 사용하였다. 실험구의 온도 및 습도 그리고 PM2.5와 PM10 농도를 측정하였으며 초기 측정값과 최종 측정값의 차이를 계산하여 그 감소량을 공기정화 능력의 척도로 활용하였다.

2.3.2 식물 생육 측정

식재된 식물의 생육 상태와 대기정화에 영향을 미칠 수 있는 식물체의 생장 정도를 파악하기 위하여 2차 실험 종료 후 각 식물체의 건중량을 측정하였다. 생물량 측정은 식물의 생장 차이를 보였던 2차 실험 때만 이루어졌다.

2.3.3 통계 분석

각 실험구별로 측정된 PM2.5와 PM10의 농도 감소량과 식

물 생육 정도의 차이의 통계적 유의성을 검증하기 위하여 SPSS(ver 22.0)를 이용하여 유의수준 0.05에서 분산분석 및 Mann-Whitney U 검정을 실시하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 인공 습지생태계와 육상생태계의 공기 정화 차이

상대습도와 온도를 살펴보았을 때 상대습도의 경우 습지생태계 조건에서 유의미하게 높은 값을 보였으며($p < 0.05$), 온도는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 대기 중의 습도는 실제 자연에서의 미세먼지 농도와도 밀접한 관계를 가진다. 실제 습지에서 습도와 미세먼지의 농도는 음의 상관관계를 보이며(Qiu et al. 2015), 이는 수증기와 맞닿은 미세먼지 분자들이 수포에 포집되어 수층에 가라앉은 결과라고 볼 수 있다(Yang et al. 2002). PM2.5 농도의 감소량은 1차 실험과 2차 실험 각각 습지 환경은 13.7 ± 1.3 , $10.5 \pm 2.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$, 육지 환경은 13.2 ± 1.3 , $9.2 \pm 1.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 모두 습지에서 다소 크게 나타났다. PM10 역시 마찬가지로 1차 실험 및 2차 실험에서 각각 습지 환경은 15.0 ± 1.4 , $11.2 \pm 2.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$, 육지 환경은 13.8 ± 1.5 , $8.8 \pm 1.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 로 나타났다. 실험 1에서 PM2.5의 농도 감소량은 습지가 더 크긴 했으나 거의 유사했으며($p = 0.3$), 실험 1에서 PM10은 습지에서 더 크게 감소하였으나 유의수준 5%에서 통계적으로 유의미하지 않았다($p = 0.1$; Fig. 3(a)). 실험 2에서 역시 습지에서 각 요소의 감소량이 다소 크게 나타났다(PM 2.5: $p = 0.1$; PM10: $p = 0.1$; Fig. 3(b)). 이러한 결과는 습도가 높을수록 미세먼지의 강하가 이루어질 확률이 높아지기 때문이라고 볼 수 있다(Prajapati and Tripathi 2008).

미세먼지는 그 크기가 작기 때문에 특정 물질에 흡착되거나 흡수시킴으로써 그 제거가 용이해질 수 있다(권계정과 박봉주 2017). PM2.5나 PM10을 구성하는 성분으로는 물질은 NH₄⁺, SO₄²⁻ 등 이온성 물질로서, 물에 쉽게 녹는 특성을 가진다(Xu et al. 2007, 이경빈 등). 그 중에서도 도심의 PM2.5와 PM10의 구성요소 중에서 PM10이 이온성 물질의 함유량이 더 높다는 선행연구의 결과에 따라 PM2.5보다 PM10이 습지생태계의 표면에 녹기 쉽다고 볼 수 있다(Suresh et al). 따라서

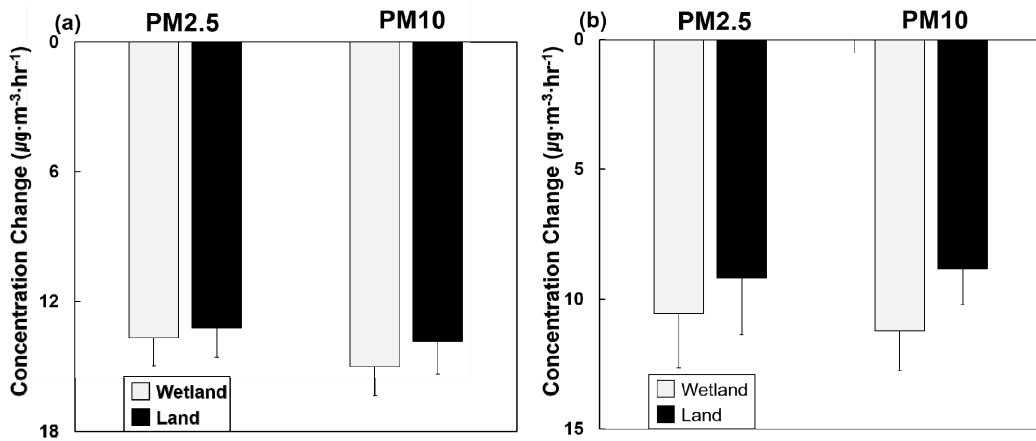


Fig. 3. Concentration change of particulate matters of each wetland and land condition. Vertical bars indicate \pm SE. $n=80$ for 1st experiment and $n=96$ for 2nd experiment for each condition. (a) 1st experiment; (b) 2nd experiment.

습지생태계에서는 대기 중으로 드리난 수면에 미세먼지들이 닿아 직접 녹을 수도 있으며, 수증기에 포집된 먼지가 침강하여 빠르게 미세먼지 농도의 저하가 이루어졌다고 볼 수 있다.

3.2 식생과 미세먼지 정화능

2차 실험의 식물의 지상부와 지하부 건중량의 실험구별 합은 습지생태계 환경과 육상생태계 환경에서 다르게 나타났다 (Fig. 4). 전반적으로 습지식물의 건중량이 육상식물의 건중량보다 크게 나타났다. 습지생태계 환경에서는 지상부와 지하부 모두 *H. verticillata*(위터코인)만 식재한 경우에 가장 높은 건중량을 나타냈으며(32.6 ± 4.5 g, 19.9 ± 1.9 g), 식생 구성 유형에 따라 지상부와 지하부 건중량 합이 유의미하게 나타났다($p < 0.05$). 한편, 육상생태계 환경에서는 식생 구성에 따라 지상부와 지하부의 건중량의 양상이 다르게 나타났다.

식생에 따른 미세먼지 감소량은 PM2.5의 경우 1차 실험은 습지생태계의 복합식생이($34.875 \pm 12.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{hr}^{-1}$), 2차

실험의 경우 습지생태계의 *H. verticillata*가 식재된 실험구의 감소량이 가장 컸으며($26.07 \pm 7.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{hr}^{-1}$) 육상생태계의 경우 전반적으로 습지생태계보다 감소량이 낮았고 식생들 간 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 5). PM10의 경우 같은 경향성을 보이며 1차 실험에서 복합식생이($36.31 \pm 15.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{hr}^{-1}$), *H. verticillata*가 식재된 실험구의 감소량이 가장 컸다($94.14 \pm 64.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{hr}^{-1}$)(Fig. 6). 2차 실험에서는 전반적으로 습지 식물의 생산량이 육상 식물보다 더 컸고, 특히 지상부의 건중량은 습지 식물이 평균적으로 약 3배 정도 높았다. 도시에서 미세먼지 농도가 높으며 교통량이 많은 곳에 식재된 식물의 잎의 표면 및 왁스 층에 미세먼지가 많이 흡착된 것이 밝혀진 바 있다(Terazaghi et al. 2013). 뿐만 아니라 실내의 식물성 바이오 필터가 실내공기 오염 제거 방안 등으로 효과를 보이는 것이 연구로 밝혀졌다(Soreanu et al. 2013). 이를 통하여 식생 역시 대기오염 정화에 주요한 부분을 차지함을 알 수 있다. 따라서 이러한 공기 정화에 주요 역할을

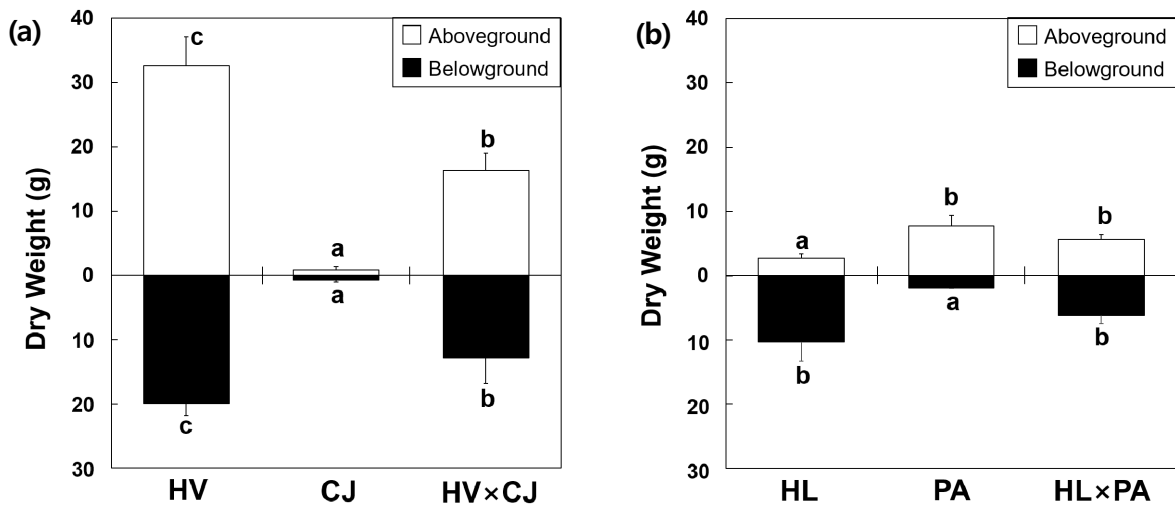


Fig. 4. Total above- and belowground dry weight for each experimental condition. Vertical bars indicate \pm SE (a) Wetland condition; (b) Land condition. (HV = *H. verticillata*; CJ = *C. jackiana* var. *macroglossa*; HL = *H. longipes*; PA = *P. asiatica*).

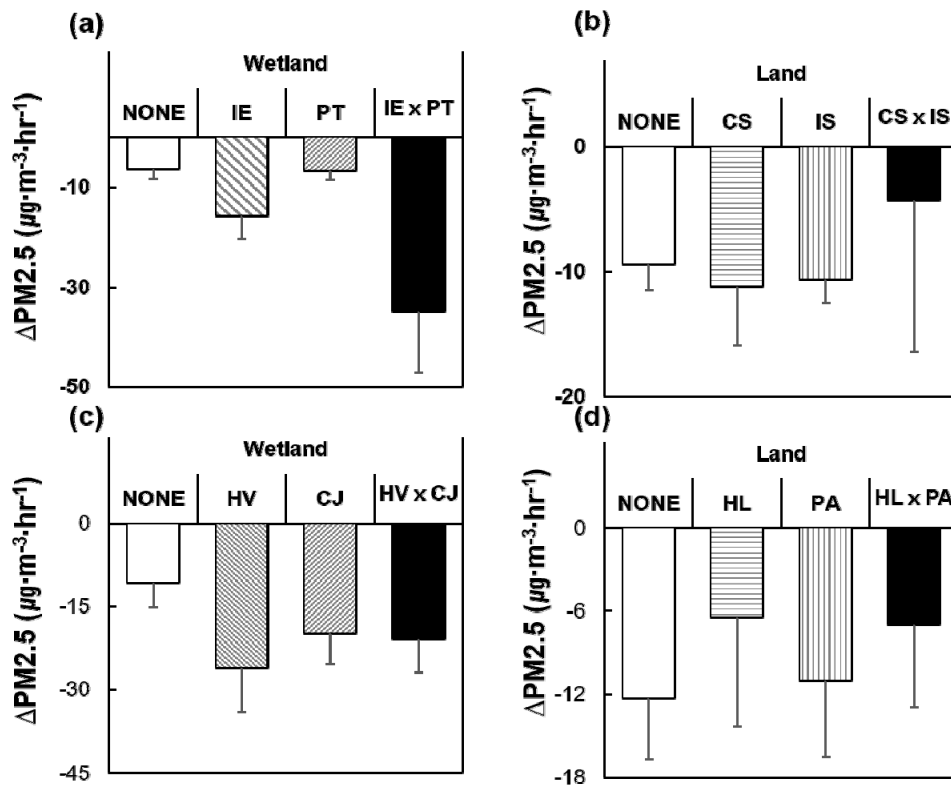


Fig. 5. Concentration change of PM_{2.5} of wetland and land environment condition of each vegetation condition. Vertical bars indicate \pm SE. (a), (b) 1st experiment; (c), (d) 2nd experiment. (IE = *I. ensata* PT = *P. thunbergii*, HV = *H. verticillata*; CS = *C. sonchifolium* IS = *I. sanguinea*, CJ = *C. jackiana* var. *macroGLOSSA*; HL = *H. longipes*; PA = *P. asiatica*).

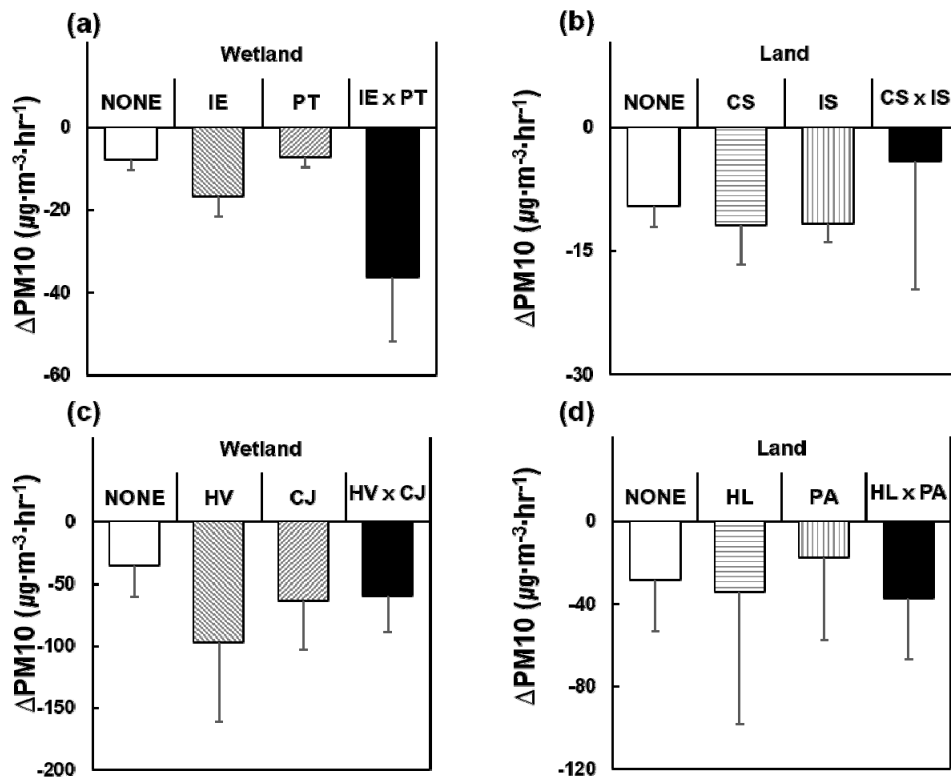


Fig. 6. Concentration change of PM₁₀ of wetland and land environment condition of each vegetation condition. Vertical bars indicate \pm SE. (a), (b) 1st experiment; (c), (d) 2nd experiment. (IE = *I. ensata* PT = *P. thunbergii*, HV = *H. verticillata*; CS = *C. sonchifolium* IS = *I. sanguinea*, CJ = *C. jackiana* var. *macroGLOSSA*; HL = *H. longipes*; PA = *P. asiatica*).

하는 잎 및 줄기와 같은 지상부 기관의 양은 식물체의 생물량으로서 살펴볼 수 있다. 따라서 습지 식물들의 높은 지상부의 생물량이 미세먼지 감소에 영향을 주어, 습지 환경에서 더 큰 미세먼지 감소량이 나타날 수 있었다고 판단된다.

습지생태계 환경에서 식생 구성 유형에 따른 미세먼지의 감소량은 해당 식생을 구성하고 있는 종이 1종일 때에 더 크게 나타났다(Fig. 5, 6). 어떤 생태계가 가지고 있는 기능은 그 생태계를 구성하는 종의 다양도에 따라 달라질 수 있으며, 그 기능을 나타낼 수 있는 종이 다양해질수록 기능의 정도도 강화된다(Engelhardt and Ritchie 2001). 따라서 다양한 종 구성으로 습지의 미세먼지 저감 능력이 강화되기 위해서는 구성하는 종이 지상부의 생물량을 생태적 지위 분할을 통해 서로 보완해주는 관계일 때 가능하다. 이는 생물량에서 큰 차이를 보이지 않았던 1차 실험에서 드러났다. 2차 실험의 경우 *H. verticillata*의 생장으로 인해 생물량의 효과가 더 잘 드러났다고 볼 수 있다. 2차 실험에서 사용한 습지 식물은 *H. verticillata* 한 종으로만 구성하였을 때에 더 높은 지상부 건중량을 보였다. 이로 인해 닫힌계 내에서 실질적으로 미세먼지 저감에 크게 기여하는 식물체의 비중이 단일 종 조성 조건에서 더 컸으므로 두 종이 혼합 식재된 실험구보다 더 좋은 미세먼지 저감 능력을 보인 것으로 판단된다. 일반적인 습지의 생태계 서비스 증진을 위해서는 종다양도를 크게 조성하고 유지하는 것도 중요하지만 미세먼지 저감 능력을 극대화하기 위해서는 다양한 지상부 생태적 지위 분할을 통한 식생의 구성이 필요할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서 설계한 인공 습지생태계 환경과 육상생태계 환경에서 미세먼지 저감 능력을 비교하였을 때, 습지생태계 환경의 미세먼지 저감 능력이 더 좋은 것을 확인할 수 있었다. 이는 대기 중의 미세먼지가 습지 환경을 구성하는 물에 포집되어 침강하였고, 추가로 습지 식물의 지상부에 흡착된 결과로 보인다(Fig. 7). 이러한 결과로 볼 때, 습지는 높은 생산성을 보일 뿐만 아니라, 미세먼지 저감에도 효과적인 생태계로 여겨진다. 본 연구의 결과는 습지의 가치에 대한 제고뿐만 아니라 미세먼지 문제 해결에 대한 기초자료를 제공하며, 공기 정화형 인공습지 조성과 같은 습지생태계를 활용한 환경기술에 대한 토대가 될 수 있을 것이다.

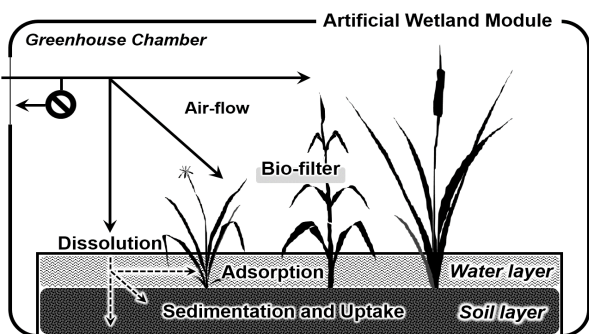


Fig. 7. Mechanism of fine dust reduction in artificial wetland module.

사 사

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No. 2018R1A2B2002267).

References

Anderson, HR (2008). Air pollution and mortality: a history. *Atmospheric Environment*, 43(1), pp. 142–152. [DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.09.026]

Choe, J and Lee, YS (2015). A study on the impact of PM2.5 emissions on respiratory diseases. *J. of Environmental Policy and Administration*, 24(4), pp. 155–172. [Korean Literature] [DOI: 10.15301/jepa.2015.23.4.155]

Chow, JC and Watson, JG (2002). Review of PM2.5 and PM10 apportionment for fossil fuel combustion and other sources by the chemical mass balance receptor model. *Energy and Fuels*, 16(2), pp. 222–260. [DOI: 10.1021/ef0101715]

Ha, EH, Lee, JT, Kim, H, Hong, YC, Lee, BE, Park, HS and Christiani, DC (2003). Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea. *Pediatrics*, 111(2), pp. 284–290. [DOI: 10.1542/peds.111.2.284]

Hong, MG and Kim, JG (2017). An analysis of trends in wetland function assessments and further suggestions. *J. of Wetlands Research* 19(1), pp. 1–15. [Korean Literature] [DOI: 10.17663/JWR.2017.19.1.001]

Hong, MG, Park, H, Nam, BE and Kim, JG (2019). Vegetational characteristics of abandoned paddy terraces in comparison with natural and constructed wetlands. *J. of Wetland Research*, 21(3), pp. 199–206. [DOI: 10.17663/JWR.2019.21.3.199]

Jang, AS (2015). Review: Particulate matter and bronchial asthma. *Korean J. of Medicine*, 88(2), pp. 150–155. [Korean Literature] [DOI: 10.3904/kjm.2016.91.2.106]

Jin, H, Lee, J, Lee, K, Lee, H, Kim, B, Lee, D and Hong, Y (2012). The Estimation of PM2.5 Emissions and Their contribution analysis by source categories in Korea. *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(2), pp. 211–221. [Korean Literature] [DOI: 10.5572/KOSAE.2012.28.2.211]

Kang, SJ, Kang, JG, Hong, I and Yeo, HK (2012). Proposal of functional assessment for wetland-type abandoned channel. *J. of Wetlands Research*, 14(4), pp. 547–559. [Korean Literature] [DOI: 10.17663/JWR.2012.14.4.547]

Engelhardt, KAM and Ritchie, ME (2001). Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature*, 411, pp. 687–689.

Kim, MY (2004). Physical and chemical characteristics of Asian dust. *J. of Korean Medical Association*, 47(5), pp. 453–464.

- [DOI: 10.5124/jkma.2004.47.5.453]
- Ko, HJ, Lee, YS, Kim, WH, Song, JM and Kang, CH (2014). Chemical composition characteristics of fine particulate matter at atmospheric boundary layer of background area in fall, 2012. *J. of the Korean Chemical Society*, 58(3), pp. 267–276. [Korean Literature] [DOI: 10.5012/jkcs.2014.58.3.267]
- Kwon, K and Park, B (2017). Effects of indoor greening method on temperature, relative humidity and particulate matter concentration. *J. of The Korean Institute of Landscape Architecture*, 45(4), pp. 1–10. [Korean Literature] [DOI:10.9715/KILA.2017.45.4.001]
- Kwon, K and Park, B (2018). Particulate matter removal of indoor plants, *Dieffenbachia amoena* ‘Marianne’ and *Spathiphyllum* spp. according to light intensity. *J. of The Korean Institute of Landscape Architecture*, 46(2), pp. 62–68. [Korean Literature] [DOI:10.9715/KILA.2018.46.2.062]
- Lee, CH, Choi, B and Chun MY (2015). Stabilizing soil moisture and indoor air quality purification in a wall-typed botanical biofiltration system controlled by humidifying cycle. *Korean J. of Horticultural Science & Technology*, 33(4), pp. 605–617. [Korean Literature] [DOI:10.7235/hort.2015.15047]
- Lee, K, Kim, S and Kim D (2015) Ion compositional existence forms of PM10 in Seoul area. *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(4), pp. 197–203. [Korean Literature] [DOI: 10.4491/KSEE.2015.37.4.197]
- Ministry of environment (2019). *Particulate Matter Management Plan (2020~2024)*
- Myong, J (2016). Health effects of particulate matter. *Korean J. of Medicine*, 91(2), pp. 106–113. [Korean Literature] [DOI: 10.3904/kjm.2016.91.2.106]
- National Institute of Environmental Research (2012). *Emission Sources and Behaviour of PM2.5 Organic Materials (III)*
- Park, H and Jo, YM (2013). Regulation standard of fine particles and control techniques of emission sources. *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), pp. 486–503.
- Pateraki, S, Asmiakopoulos, DN, Flocas, HA, Maggos, T and Vasilakos, C (2012). The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10}). *Science of the Total Environment*, 419, pp. 124–135. [DOI: j.scitotenv.2011.12.064]
- Prajapati, SK and Tripathi, BD (2008). Biomonitoring seasonal variation of urban air polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using *Ficus benghalensis* leaves. *J. of Environmental Pollution*, 151(3), pp. 543–548. [DOI:10.1016/j.envpol.2007.04.013]
- Qiu, D, Liu, J, Zhu, L, Mo, L and Zhang, Z (2015). Particulate matter assessment of a wetland in Beijing. *J. of Environmental Sciences*, 36, pp. 93–101. [DOI: 10.1016/j.jes.2015.04.016]
- Roucoux, KH, Lawson, IT, Baker, TR, Torres, DC, Draper, FC, Lahteenohja, O, Gilmore, MP, Coronado, ENH, Kelly, TJ, Mitchard, ETA and Vriesendorp, CF (2017). Threats to intact tropical peatlands and opportunities for their conservation. *Conservation Biology*, 31, pp. 1283–1292. [DOI: 10.1111/cobi.12925]
- Soreanu, G, Dixon, M and Darlington, A (2013). Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants – A mini-review. *Chemical Engineering Journal*, 229(1), pp. 585–594. [DOI: 10.1016/j.cej.2013.06.074]
- Tai, AP, Mickle, LJ and Jacob, DJ (2010). Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change. *Atmospheric Environment*, 44(32), pp. 3976–3984. [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.060]
- Terazaghi, E, Wild, E, Zacchello, G, Cerabolini, BE, Jones, KC and DiGuardo, A (2013). Forest filter effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmospheric Environment*, 74, pp. 378–384. [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.013]
- Tiwari S, Srivastava AK, Bisht DS, Bano T, Singh S, Behura S, Srivastava M, Chate DM, Padmanabhamurty B (2009). Black carbon and chemical characteristics of PM10 and PM2.5 at urban site of North India. *J. of Atmospheric Chemistry*, 62(3), pp. 193–209 [DOI: 10.1007/s10874-010-9148-z]
- Xu, X and Kim, J (2017). Planting design strategies and green space planning to mitigate respirable particulate matters – case studies in Beijing, China-. *J. of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 45(6), pp. 40–49. [Korean Literature] [DOI: 10.9715/KILA.2017.45.6.040]
- Yang, DZ, Yu, HQ, Ding, GA, Wang, SF and He, DS (2002). An analysis of aerosols in the lower-level atmosphere over Beijing northern suburbs in winter. *Quarterly J. of Applied Meteorology*, 13(S1), pp. 110–125