



## 공조기연계 석탄회 토양기반 식생유니트형 바이오필터의 여과풍속과 적용식물의 지상부 생육분석

### *Analysis on the Filtering Speed of AHU-linked Fly Ash Soil-based Vegetation Unit-type Bio-filters and the Growing Stability of Aerial Part of Applied Plants*

김태한\* · 이소담\*\* · 김광진\*\*\*

Kim, Tae-Han\* · Lee, So-Dam\*\* · Kim, Kwang-Jin\*\*\*

\* Dept. of Environmental Landscape Architecture, SangMyung University(taehankim@smu.ac.kr)

\*\* Dept. of Environmental Resources, Graduate School, SangMyung University(dami7138@naver.com)

\*\*\* Dept. of Urban Agriculture Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, 55365 Wanju, Korea(kwangjin@korea.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Due to the aggravating fine dust issue originating from China, ventilating indoor space by introducing fresh outdoor air became increasingly difficult. Such indoor environment will trigger health problems such as respiratory diseases to people today who spend about 21 hours per day on average indoor. Also, as some issues are raised on filters for air purifiers, which have been considered an efficient way to improve indoor air quality, social interests in improving indoor air quality are higher than ever. **Method:** Among various air purifying methods, the one using plants is perceived as an ecological purifying method that could minimize negative feelings toward chemicals. Vegetation on bio-filter is technology using plant-based purification, and there are discussions on linking this system into building AHUs in order to optimize purifying performance. **Result:** This study analyzed the growing stability of the aerial part of plants that are expected to be applied when vegetation unit-type bio-filters are linked with AHUs. According to the analysis of stability through chlorophyll and FVC analysis, among scindapsus, spath and goose foot, scindapsus showed the highest growing stability at 600±52CMH air conditioning air volume.

#### KEYWORD

식생바이오필터  
인공경량골재  
식물생육모니터링  
공조시스템  
공조풍속

Vegetation Biofilter  
Artificial lightweight aggregate  
Monitoring plant growth  
AHU System  
AHU Wind Velocity

#### ACCEPTANCE INFO

Received June 15, 2018  
Final revision received June 27, 2018  
Accepted June 28, 2018

© 2018 KIEAE Journal

## 1. 개요

중국의 월경성 미세먼지와 더불어 국내에서 발생하는 전구물질의 화학적 2차반응에 따른 초미세먼지 문제가 심화되면서 신선외기 유입을 통한 실내공간 환기가 점차 어려워지는 상황이다. 외기와 단절된 실내공간은 음식을 조리하거나 전자제품을 사용하면서 발생하는 화학오염물질이 지속적으로 배출된다[1]. 이러한 실내환경은 하루 평균 약 21시간을 실내에서 생활하는 현대인들에게 호흡기 질환 등의 건강문제를 유발하게 된다[2]. 그리고 기존 실내공기질 개선방법 중에서 효율적이라고 인식되던 공기청정기의 OIT(옥틸이소티아졸론) 항균필터 위해성 문제가 제기되면서, 실내공기질 개선에 대한 사회적 관심이 높아지게 되었다[3]. 다양한 공기정화방식 중에서 식물을 이용한 방법은 화학물질에 대한 반감을 최소화 할 수 있는 생태적 정화방안으로 인식되고 있다. 반면 식물의 생물학적 공기정화 성능 정량화 및 유지관리의 한계로 인하여, 다중이용시설과 같은 대규모 실내공간에서는 공기질 개선효과와 예측이 어려워 산업적 확산이 제한적인 상황이다. 이렇게 제한적인 식물을 활용한 실내공기정화의

효율화를 위한 방안들이 논의되고 있으며, 이중 식생 바이오필터는 대표적인 시스템 방안이다[4]. 관련연구는 침지가습법을 적용한 소형 식생바이오필터의 토양수분 및 식물생육상태를 분석한 연구[5], 풍속조건에 따른 평면형 식생바이오필터의 식물생육, 습도, 토양수분 및 압력손실을 모니터링하여 필터성능과 식물 생육의 적절한 풍속을 규명한 연구[6], 벽면형 식생바이오필터의 실내공기질 개선효과와 식물생육정도에 따른 실내공간 활용성 연구[7] 등이 보고되고 있다.

반면, 실내공기질 개선이 가능한 식물활용의 산업화를 위해서는 다중이용시설 등 대규모 공간에 대한 적용이 검토되어야한다. 이를 위해 기존 건물공조설비 연계를 통한 새로운 관점의 식생시스템이 요구된다[8]. 관련연구는 인공토양기반의 식생유니트형 바이오필터를 AHU(Air Handling Unit)와 연계할 경우 예상되는 시스템 안정성을 식생생육평가를 통해 도출한 연구[9], AHU와 연계된 식생바이오필터의 식생기반재 소재별 압력손실을 규명하고, 경제적 검토방안을 제시한 연구[10] 등이 보고되고 있다.

기존 식생바이오필터 연구는 AHU 연계한 바이오필터의 소재와 식물생육 안정성을 평가[9,10]한 연구를 제외하면 일반 AHU와 연

계가 고려되지 않은 식생 바이오필터 연구가 주를 이루었다. 해당 식생바이오필터는 토양기반재를 통과하는 적정 여과풍속이 1~3cm/s [6, 8]로 일반 공조기의 총풍량 부하를 수렴하기 어려운 구조이다. 또한, 기존 AHU 연계 식생바이오필터 관련 연구에서도 적응식물기준과 상호 연관성에 대한 고찰이 요구되었다.

본 연구는 식물의 실내공기질 개선기능에 대한 정량화 및 산업화 방안으로 건물공조설비와 연계할 경우 예상되는 식물스트레스 지표와 물리적 식생지표를 분석하여 식생 생육안정성을 평가하고자 한다. 그리고 기존 공기정화식물관련연구에서 사용빈도가 높은 3종의 공기정화식물을 선정하여 AHU연계에 적합한 식생모델을 제안하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 식생바이오필터의 유형

식생바이오필터는 식물의 잎과 근권부 미생물의 기작을 최적화하여 객관적인 공기정화성능을 제공하는 시스템으로 정의할 수 있다. 현재 상용화된 식생바이오필터 시스템은 다양한 유형이 소개되고 있다[11]. 여기서 공조 연계 및 공기질 개선에 특화된 식생바이오필터 시스템 유형을 다음과 같이 살펴볼 수 있다.

국내 벽면녹화 업체인 가든 포유의 “Bio wall”은 실내벽면녹화 시스템을 공기 청정기에 결합한 것으로 농촌진흥청과 공동연구로 개발된 제품이다. 해당 시스템의 정화기작은 토양 내 미생물의 생분해작용을 통한 1차 유해물질 제거 후 미디엄 필터에 의한 2차 여과를 통해 정화된 공기가 상단에 구비된 저소음 모터와 연계된 송풍구로 토출된다. 시스템 하단에는 물탱크가 내장되어 있어 펌프에 의한 자동순환형 급배수가 가능하며, 2중 case방식으로 보수 및 유지관리가 용이하다[12].

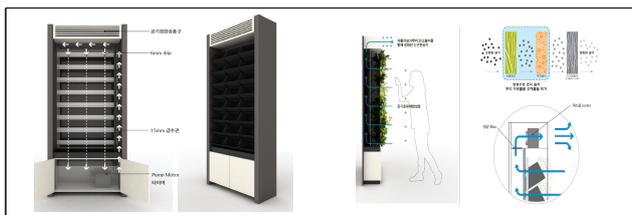


Fig. 1. Biowall, Garden4U

또 다른 국내 업체인 뉴테크의 “DWSS(Direct Water Sprinkling System)”은 스펀지형태의 인공토양기반재를 플랜트형 바이오필터화한 것으로 한국 산업대학교와 공동연구로 개발된 제품이다. 스펀지 형태의 인공토양은 연속기공의 다공질기반재로 공기의 함유 및 유지가 용이하고, 재활용이 가능하다.



Fig. 2. DWSS(Direct Water Sprinkling System), New-Tech

기존 토양기반 바이오필터의 문제점인 침하, 해충발생 및 악취 등도 저감이 가능하여 실내공기질 관리에 유리하다. 또한, 플랜트 상부에서 하부로 자동관수시스템에 의한 순환자동관수가 구비된 것이 특징이다[13].

오스트레일리아 벽면녹화 업체인 Junglify의 “Breathing Wall”은 모듈별 취입식 식생바이오필터이다. 해당 시스템의 정화기작은 오염된 공기를 강제흡기용 팬을 사용하여 폴리에틸렌 소재의 유니트(500mm × 500mm × 130mm, 두께 7.5mm) 후면에 구비된 고밀도 폴리에틸렌(HDPE: High Density Polyethylene) 백을 거쳐 15mm 유격의 중공층을 통과한다. 정화식물이 식재된 식생기반재로 여과된 공기는 전면대비 36.3% 개방된 16개의 식재홀을 거쳐 실내에 공급된다[14]. 실험을 통해 0.25㎡의 단위 모듈당 11.25L/sec의 송풍량이 제공될 경우 TSP(Total Suspended Particles), PM10, PM2.5을 각각 53.35 ± 9.73%, 53.51 ± 15.99%, 48.21 ± 14.71% 저감하여 입자상 오염원에 효과적인 것으로 기록하고 있다[15].



Fig. 3. Breathing wall, Junglify

현재 보고된 식생바이오필터 시스템은 대부분 공조풍량에 대한 정보가 미비하거나, 총량적으로 충분하지 못한 처리용량을 보이고 있다. 이는 단위 면적당 여과풍속 또는 풍량이 적음을 의미한다. 현재, 제한된 사례에서 다중이용시설과 같은 대면적 실내공간의 공기질 개선이 이루어지고 있으며, 이를 효율적으로 처리하기 위해서 해당 공조관점의 이해가 필요할 것으로 사료된다.

### 2.2. 여과풍속산정

식생유니트형 바이오필터의 AHU 연계를 위해 공기정화필터에 부합하는 성능평가가 요구되며, 본 연구에서는 유관시험기준(AMCA Standard 210, KS B 6311)을 참조하였다. 차압식 유량측정을 통해 공조측면에서 중요한 지표인 여과풍속, 총풍량, 압력손실 등을 도출할 수 있다. 여기서, 여과풍속은 팽창계수, 유출계수, 노즐차압, 유체밀도 간의 상관관계로 다음 (식 1)과 같이 정리할 수 있다.

$$V(m/s) = YC\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_5}} \dots \dots \dots \text{식1)}$$

V = Airflow Velocity (m/s)

Y = Expansion Coefficient

C = Discharge Coefficient

ΔP = Nozzle Differential Pressure (Pa)

ρ<sub>5</sub> = Density (kg/m<sup>3</sup>)

일반적으로 차압식 유량측정은 차압 발생을 위해 노즐이 설치되며, 노즐은 풍동관의 종단면적을 축소하게 되어 축류가 유발된다. 발생하는 축류는 유체밀도 또는 기구의 형상에 따라 유동적이며, 실제

측정의 정확도를 제한하는 요소로 작용한다. 이를 보완하기 위해 노즐 단면적에 유출계수가 적용되며, 유체 동역학의 주요 무차원 수인 레이놀즈 수를 적용하여 동적 상사성이 제고하게 되며, 다음 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C = 0.9986 - \frac{7.006}{\sqrt{Re}} + \frac{134.6}{Re} \dots \dots \dots \text{식2)}$$

C = Discharge Coefficient

Re = Reynolds Number (Dimensionless)

### 2.3. 식생피복비율(FVC: Fractional Vegetation Cover)

일반적으로 식물의 생육상태는 지하부의 일정한 이·화학적 성능 제공에 의해 유지된다. 여기서, 물리적 성능은 통기성, 보수성 및 배수성 등이며, 화학적 성능은 pH, EC 및 양분간 균형 등이 요구된다. 반면, 지상부는 이산화탄소, 토양수분, 태양복사에너지 등의 환경조건에 의해 건전한 식물생육이 가능하다. 이는 엽면적지수(LAI: Leaf Area Index), 식생피복비율(FVC: Fractional Vegetation Cover), 식물생체량(Plant Biomass), 광합성량(Photosynthesis) 등의 정량화 가능한 식생평가지표들로 정의할 수 있다. 여기서 FVC는 식생의 생육 정도를 평면적 총량으로 환산하기 위해 식물로 형성되는 지표면 음영면적을 비율로 표현한 식생지표이다.

FVC는 주로 광학적 해석방법에 의해 표현이 가능하며, 이 중에서 디지털 전천사진(DHP: Digital Hemispherical Photography)은 초광각 렌즈를 활용하여 식생 간극비를 측정하여 식생의 피복 정도를 산출하게 된다. 일반 광학장비를 이용하는 FVC 측정방법은 높은 사용편의성이 제공되며, 국외에 여러 해석프로그램들이 소개되고 있다. 이 중 CAN EYE는 프랑스 국립농업연구소(INRA: L'Institut National de la Recherche Agronomique)에서 개발된 DHP 기반 FVC 해석 소프트웨어이다. 이 프로그램은 DHP 이미지를 위한 어안렌즈(fish-eye lens)는 물론 일반렌즈도 혼용 가능하며, 촬영된 트루컬러 이미지 기반의 식생개노피 면적비에 의한 FVC를 산출하게 된다[16]. 산출되는 FVC는 f COVER로 표현되며 식생 또는 토양의 피복비율(Cover Fraction)로 해석된다. 그리고, 천저향에서 식생에 의해 피복된 토양의 면적비율, 피복분율, 천정각 범위, 식생피복비율 등의 변인에 의해 FVC가 결정된다.

## 3. 연구방법 및 내용

### 3.1. 연구진행 과정

본 연구는 실험용 챔버 구축, 바이오필터 설계, 사전 지상부 생육 모니터링, 공조기 실험 조건 설정, 바이오필터 거치 및 실험, 사후 지상부 생육 모니터링 순으로 이루어졌다. 공조기와 연계되는 바이오필터에는 3종의 공기정화식물을 선정하여 식물별 실험편을 제작하였다. 실험은 2017년 10월 29일부터 11월 6일까지 총 9일간 진행되었으며, 실험편 당 36시간의 총 실험시간과 사전·사후 지상부 생육 모니터링 측정시간이 소요되었다.

### 3.2. 실험용 챔버 구축

식생유니트형 바이오필터의 공기정화필터 관점의 성능평가를 위해 실험환경은 다음 Fig. 4와 같이 실험용챔버(IAQ Chamber), AHU, 플로우 노즐 챔버(Flow Nozzle Chamber)로 구성되어 있다 [4]. 여기서 실험용 챔버는 공기질 실험 관련 국가표준(KS ISO 16000-9)을 참조하여 설계하였다.

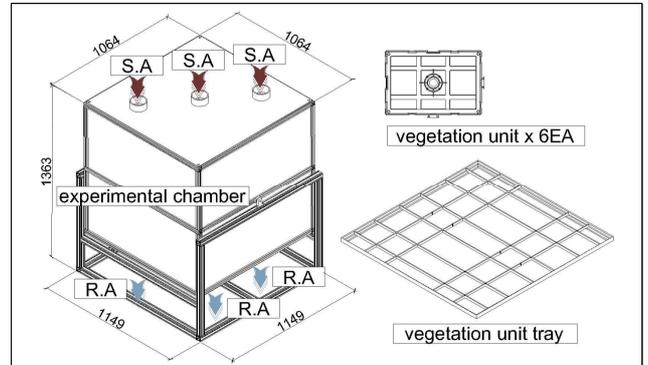


Fig. 4. Experimental chamber connected by AHU

알루미늄 프로파일 40mm로 이루어진 구조체에 PC t=5mm로 제작된 1,000mm× 1,000mm ×1,000mm 크기의 공기질 실험용 챔버가 체결되었다. 실험용 챔버 상단은 공조기의 급기(SA: Supply Air)부와 연계되고, 하단은 풍량산출을 위해 설치된 풍동관을 거쳐 공조기의 환기(RA: Return Air)부로 연결된다. 챔버 내부에는 개별 유니트형 바이오필터 거치가 가능한 선반이 삽입되어, 총 6개의 바이오필터가 설치되도록 구비하였다.

### 3.3. 바이오필터 실험편 제작

식생유니트형 바이오필터는 식생기반재, 식생유니트, 공기정화식물로 구성된다. 우선, 식생기반재는 다음 Fig. 5와 같이 석탄회기반의 인공경량골재로 화력발전 폐기물인 바텀애쉬를 건식공정에 의해 가공된 기능성 세라믹 인공토양이다. 보습기능과 식물생육에 필요한 미네랄을 포함한 석탄회기반 인공경량골재는 일반적인 경량토의 특성을 가지고 있다. 이는 식물생장에서 요구되는 급배수 및 산소공급 등을 최적화할 수 있는 물성으로 이해할 수 있다. 골재 가공은 중력식 저속 마쇄기를 통해 표면처리로 이루어지며, 입도는 8mm이며, 공극률은 약 75%이다[17]. 인공경량골재형 식생기반재 및 공기정화식물이 거치되는 식생유니트는 500mm× 333mm×50mm 크기로 자외선 차단제가 도포된 H.D.P.E(High Density Poly Ethylene)소재로 제작되었다. 유니트 하부는 배수 및 통기가 용이한 미세 타공이 구비되어 식물 근권부와 토양 내 유효 미생물에 의한 공기오염원 정화에 적합한 구조이다.

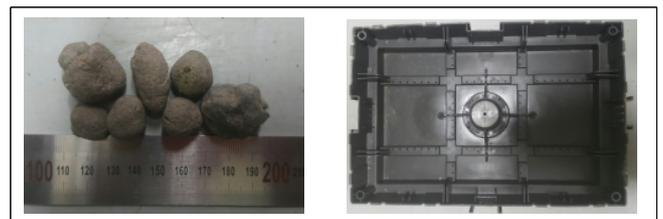


Fig. 5. Vegetation units and coal ash-based artificial lightweight aggregate

공기정화용 식물은 기존 관련 선행연구(Jung et al., 2015; Park et al., 2008; Lee et al., 2008)를 확인하여 높은 출현빈도의 식물로 선정하였다. 이중 공기정화 식물의 선행연구와 농진청에서 지정하고 있는 공기정화 실내식물[18]을 비교하여 다음 Table 1.과 같이 스킨답서스, 스파티필름, 싱고니움 3종을 선정하였다.

Table 1. Vegetation Models for Bio-filter

		
Scindapsus	Spathiphyllum	Syngonium

상기 실험편 구성요소 조합을 위해 미분이 제거된 석탄회기반 인공경량골재를 식생유니트에 포설하였다. 이렇게 구비된 식생유니트에 기존 연구문헌 검토를 통해 선정된 공기정화식물 3종을 식재하여 종별 6개, 총 18개의 실험편을 준비하였다. 정화식물은 실험편 당 9~10본이 소요되었다. 식재가 완료된 식생유니트 별로 5L를 관수하였으며, 관수 후 24시간 양생을 거친 후 실험용 챔버에 체결하였다.

### 3.4. 공조기 실험조건 설정

실험용 공조풍량 정량화를 위해 다음 Fig. 6.과 같이 공조기(AHU: Air Handling Unit), 플로우 노즐 챔버(Flow Nozzle Chamber)로 구분하여 실험인프라가 조성되었다. AHU는 Supply Fan과 Return Fan으로 나누어진 동력부에 3,425rpm의 동일한 전동기가 적용된 일 반건물용 시스템으로 구비되었다.

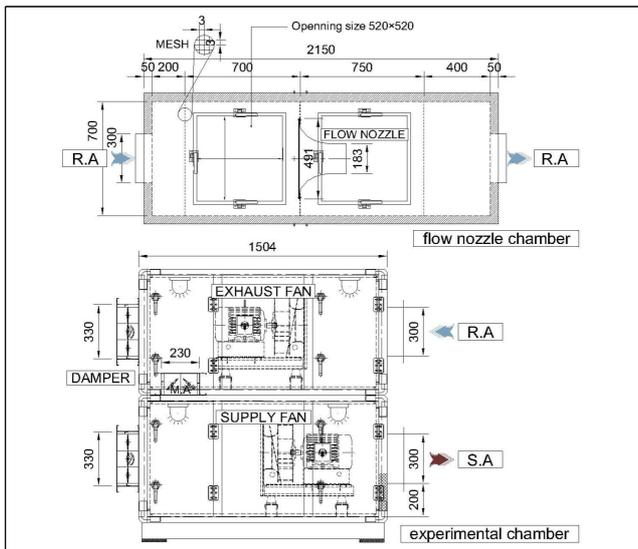


Fig. 6. Flow nozzle chamber and AHU(Air Handling Unit)

플로우 노즐 챔버는 AHU의 정격출력에 대한 모니터링 대역을 확보하기 위해 3인치 및 7인치 노즐을 선택적으로 사용할 수 있도록 설계되었다. 데이터 신뢰성 확보를 위해 노즐지경에 따라 노즐풍속을 35m/s 이하로 유지하여 차압 및 압력손실을 측정하였다. 그리고, AHU의 외기(OA: Outdoor Air)부와 배기(EA: Exhaust Air)부는

뎀퍼로 기밀되어 외기유입이 배제된 구조로 실험환경을 조성하였다. 여기서, 폐쇄 연계된 AHU와 실험용 챔버는 AHU의 SA에서 실험용 챔버 상단으로 송풍되고, 풍량산출을 위한 풍동관을 거쳐 RA로 연결된다. 총풍량은 선행연구[10]를 통해 해당 실험인프라의 안정적인 압력손실로 확인된 600CMH를 실험공조환경으로 설정하였다.

### 3.5. 지상부 식생생육모니터링 설정

식생유니트형 바이오필터 지상부의 식생생육지표는 FVC, 엽록소로 선정하였으며, 식생유니트형 바이오필터의 압력손실 및 식물생육환경 기초 데이터 확보를 위해 다음 Table 2.와 같은 관련 계측기기 및 센서가 모니터링에 사용되었다.

Table 2. Specification of Monitoring System

	Climate Measuring Instrument	Chlorophyll Meter	Fish-Eye lens
Image			
Model	Testo, Testo480	SPAD-502	8mm Fish Eye CS
Range	-100~+100hPa	-9.9 ~ 199.9SPAD	T3.5 ~ T22

식생생육지표는 식생유니트형 바이오필터의 실험 전과 후에 동일한 방법으로 측정하였다. FVC는 어안렌즈가 적용된 DSLR로 트루 컬러 이미지를 촬영한 후 CANEYE 해석을 진행하였다. 엽록소는 개별 유니트 당 5회 반복 측정하여 평균을 도출하였다.



Fig. 7. FVC measurement of vegetation bio-filter

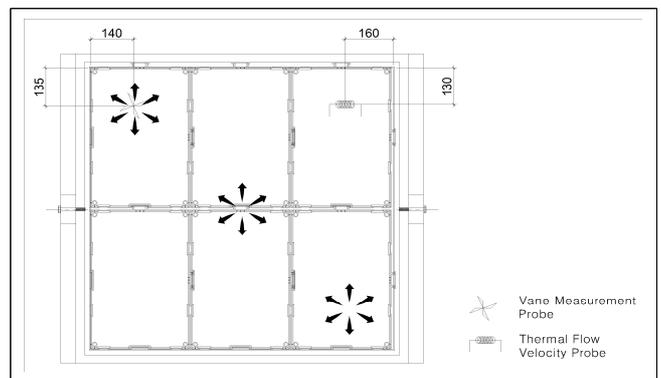


Fig. 8. Location of wind velocity sensor

실험용 챔버 내 공기조건은 온도  $25 \pm 10$  °C, 습도  $55 \pm 15$  % (KS B 6740, SPS-KACA004-134)로 설정하였다. 폐쇄적인 실험환경에 따라 풍속은 상기 Fig. 8.과 같이 실험용 챔버에 다기능 종합 환경측정기(testo 480 professional climate instrument)에 열선(testo, thermal probe 10mm)·베인(testo, vane probe 16mm)형 풍속 프로브로 데이터를 확보하였다.

## 4. 연구결과

### 4.1. 여과풍속 검토

식생유니트형 바이오필터에 적용된 식생모델별 엽면적 등에 의한 압력손실 변화로 여과풍속이 상이해진다. 실험용 챔버 상단에 구비된 송풍구 3개소와 송풍의 영향이 미비한 음영구로 구분하여 모니터링을 진행하였다. 식생유니트형 바이오필터에 적용된 식물종인 스파티필름, 스킨답서스, 싱고니움을 기준으로 여과풍속 산정을 위해 차압을 측정하였다. 이때 적용식물 종에 따른 평균 총풍량은  $600 \pm 52$  CMH로 설정하였다. 풍동관의 플로우노즐에서 발생하는 평균 차압은 스킨답서스 882.58 Pa, 스파티필름 824.06 Pa, 싱고니움 824.43 Pa로 기록되었다. 연산풍속은 스킨답서스 16.67cm/sec, 스파티필름 16.69cm/sec, 싱고니움 16.69cm/sec로 산출되었다.

#### (1) 송풍구 여과풍속

산출된 연산풍속을 다음 Fig. 9.와 같이 송풍구의 실측 풍속과 비교해보았다. 송풍구에서 스킨답서스는 평균 7.27m/s, 스파티필름은 평균 7.56m/s, 싱고니움은 평균 7.92m/s를 기록하였다. 송풍구의 여과풍속은 싱고니움이 가장 높았으며, 스킨답서스가 가장 낮게 집계되었다.

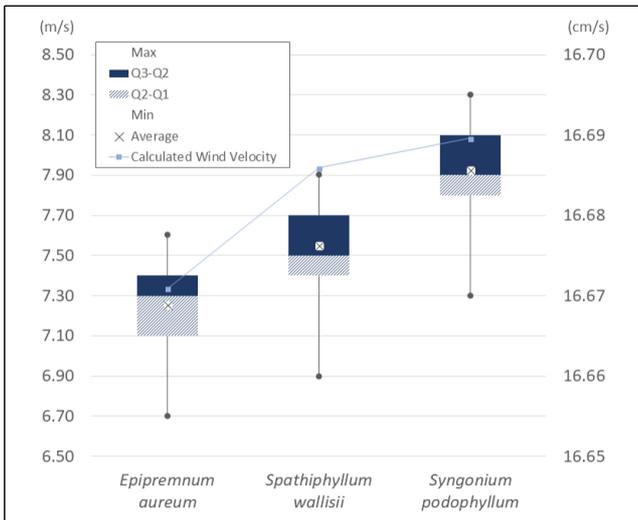


Fig. 9. Filtration velocity of air outlet

특히 스킨답서스의 Q1-Q2 구간이 다른식물종에 비해 상대적으로 넓어 지속적인 낮은 풍속이 확보된 것으로 확인되었다. 또한 1m<sup>2</sup> 면적의 필터 면풍속인 연산풍속과 동일한 변화추이가 기록되었다.

#### (2) 음영구 여과풍속

산출된 연산풍속을 다음 Fig. 10.과 같이 음영구의 실측 풍속과 비

교해보았다. 음영구에서 스킨답서스는 평균 0.07m/s, 스파티필름은 평균 0.04m/s, 싱고니움은 평균 0.08m/s를 기록하였다. 음영구의 여과풍속 또한 싱고니움이 가장 높았으며, 스파티필름이 가장 낮게 집계되었다. 특히, 음영구의 여과풍속 분포가 송풍구에 비해 현저히 낮아 안정된 풍속이 확인되었다. 또한, 1m<sup>2</sup> 면적의 필터 면풍속인 연산풍속과 상이한 경향이 기록되었다.

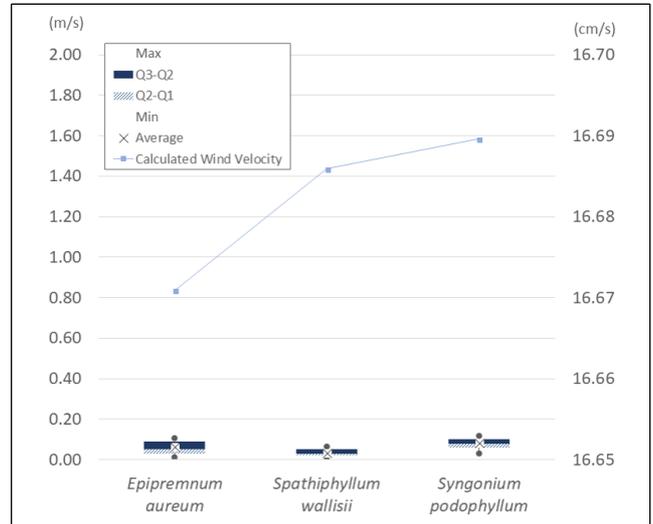


Fig. 10. Filtration velocity of air shade area

### 4.2. 엽록소 측정결과

적용식생의 엽록소 변화는 식생유니트형 바이오필터의 실험 전과 후에 동일한 방법으로 측정하였다. 다음 Table 3.과 같이 식생종 개별 유니트 당 5회 반복 측정으로 평균을 도출하였다.

#### (1) 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)

스킨답서스는 실험 전에 최대 47.2 SPAD, 최소 35.2 SPAD를 기록하였으며, 평균 39.6 SPAD, 표준편차는 2.6~9.5로 집계되었다. 실험 후에는 최대 41.8 SPAD, 최소 33.2 SPAD를 기록하였으며, 평균 37.4 SPAD, 표준편차는 1.9~6.5로 집계되었다. 스킨답서스의 엽록소는 실험 후 평균 2.2 SPAD 감소되었다.

#### (2) 스파티필름(*Spathiphyllum wallisii*)

스파티필름은 실험 전에 최대 48.7 SPAD, 최소 39.1 SPAD를 기록하였으며, 평균 44.2 SPAD, 표준편차는 2.1~5.8로 집계되었다. 실험 후에는 최대 53.8 SPAD, 최소 35.9 SPAD를 기록하였으며, 평균 44.9 SPAD, 표준편차는 4.6~8.2로 집계되었다. 스파티필름의 엽록소는 실험 후 평균 0.7SPAD 증가되었다

#### (3) 싱고니움(*Syngonium podophyllum*)

싱고니움은 실험 전에 최대 36.1 SPAD, 최소 25.0 SPAD를 기록하였으며, 평균 30.7 SPAD, 표준편차는 3.4~6.2로 집계되었다. 실험 후에는 최대 34.3 SPAD, 최소 22.4 SPAD를 기록하였으며, 평균 28.2 SPAD, 표준편차는 2.8~7.0로 집계되었다. 싱고니움의 엽록소는 실험 후 평균 2.5 SPAD 감소되었다.

Table 3. Chlorophyll monitoring of plant species

	Epipremnum aureum: Before (Unit: SPAD)							Epipremnum aureum: After (Unit: SPAD)					
	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6		Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6
min	30.0	37.9	36.1	32.2	36.3	38.7	min	35.2	37.5	24.8	30.2	32.8	38.7
avg	37.1	42.3	40.4	37.4	39.4	41.1	avg	36.9	40.8	31.9	38.5	35.6	40.8
max	53.4	48.5	50.1	41.8	44.6	45.0	max	39.7	43.3	40.8	41.5	41.8	43.7
sd	9.5	4.2	5.6	3.6	3.2	2.6	sd	1.9	2.3	6.5	4.7	3.5	2.0
	Spathiphyllum wallisii: Before (Unit: SPAD)							Spathiphyllum wallisii: After (Unit: SPAD)					
	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6		Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6
min	43.3	38.8	37.1	38.1	36.0	41.5	min	36.4	34.3	43.4	34.7	33.1	33.2
avg	52.0	41.6	40.6	43.3	43.1	44.5	avg	46.3	43.0	46.4	50.3	42.3	41.0
max	58.3	44.2	42.2	49.7	47.7	50.2	max	55.9	54.5	54.5	58.3	53.2	46.2
sd	5.8	2.1	2.1	4.3	5.6	3.8	sd	7.0	7.3	4.6	9.6	8.2	6.1
	Syngonium podophyllum: Before (Unit: SPAD)							Syngonium podophyllum: After (Unit: SPAD)					
	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6		Unit1	Unit2	Unit3	Unit4	Unit5	Unit6
min	20.0	24.5	24.0	31.1	23.4	26.8	min	22.7	20.2	20.4	28.2	21.0	21.9
avg	29.7	30.1	29.8	34.8	27.2	32.6	avg	28.3	28.4	25.3	34.0	27.7	25.7
max	35.8	36.3	34.0	41.4	30.6	38.7	max	34.3	32.2	33.0	40.8	35.8	29.8
sd	6.2	4.2	4.4	3.9	3.4	5.4	sd	4.8	4.8	4.9	5.7	7.0	2.8

4.3. FVC 측정결과

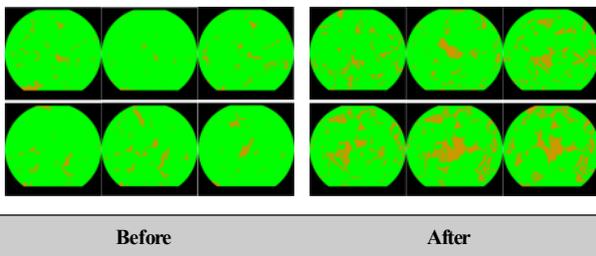
적용식생의 FVC 변화는 식생유니트형 바이오필터의 실험 전·후 동일 측정하였다. 식생종별 유니트를 어안렌즈가 적용된 DSLR로 트루컬러 이미지 촬영 후 CANEYE로 해석하였다.

(1) 스킨답서스(Epipremnum aureum)

식생유니트형 바이오필터에 적용된 스킨답서스의 실험 전·후 FVC 분석은 다음 Table 4.와 같다.

Table 4. FVC evaluation of Epipremnum aureum

FVC(%)	Before	After
min	93.3	78.5
avg	95.7	84.7
max	98.7	90.3
sd	1.8	5.1



실험 전에 스킨답서스의 FVC는 최대 98.7%, 최소 93.3%를 기록하였으며, 평균 95.7%, 표준편차는 1.8로 집계되었다. 실험 후에는 최대 90.3%, 최소 78.5%를 기록하였으며, 평균 84.7%, 표준편차는 5.1로 집계되었다. 스킨답서스의 FVC는 실험 후 평균 14.8% 저감되었다.

있으며, 표준편차는 3.3 이 증가하였다.

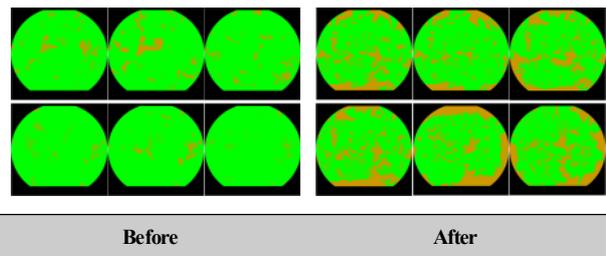
(2) 스파티필름(Spathiphyllum wallisii)

식생유니트형 바이오필터에 적용된 스파티필름의 실험 전·후 FVC 분석은 다음 Table 5.와 같다.

실험 전에 스파티필름의 FVC는 최대 98.4%, 최소 90.3%를 기록하였으며, 평균 94.8%, 표준편차는 2.8로 집계되었다. 실험 후에는 최대 80.3%, 최소 70.5%를 기록하였으며, 평균 73.7%, 표준편차는 3.6로 집계되었다. 스파티필름의 FVC는 실험 후 평균 19.8% 저감되었으며, 표준편차는 0.8이 증가하였다.

Table 5. FVC Evaluation of Spathiphyllum wallisii

FVC(%)	Before	After
min	90.3	70.5
avg	94.8	73.7
max	98.4	80.3
sd	2.8	3.6



(3) 싱고니움(Syngonium podophyllum)

식생유니트형 바이오필터에 적용된 싱고니움의 실험 전·후 FVC

분석은 다음 Table 6.과 같다. 실험 전에 싱고니움의 FVC는 최대 92.6%, 최소 86.4%를 기록하였으며, 평균 89.8%, 표준편차는 2.1로 집계되었다. 실험 후에는 최대 72.3%, 최소 59.3%를 기록하였으며, 평균 65.9%, 표준편차는 5.1로 집계되었다. 싱고니움의 FVC는 실험 후 평균 27.1% 저감되었으며, 표준편차는 3.0이 증가하였다.

Table 6. FVC Evaluation of *Syngonium podophyllum*

FVC(%)	Before	After
min	86.4	59.3
avg	89.8	65.9
max	92.6	72.3
sd	2.1	5.1

### 5. 결론

본 연구는 식생유니트형 바이오필터와 건축물 AHU연계 시 예상되는 식물생육 환경을 적용 식생종별로 엽록소, FVC를 기준으로 지상부 생육안정성에 대한 기초 데이터를 확보하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 여과풍속의 연산결과와 실측값은 송풍구 부분에서 동일한 변화 추이가 집계되었으며, 스킨답서스가 7.27m/sec를 기록하여 가장 낮은 여과풍속을 기록하였다. 반면, 싱고니움은 7.92m/sec의 높은 여과풍속으로 공조풍량에 상대적으로 많이 노출되는 것으로 판단된다.
- 2) 엽록소 모니터링 결과 스파티필름은 실험 후에 0.7 SPAD 증가하였고, 스킨답서스는 2.2 SPAD, 싱고니움은 2.5 SPAD 감소되었다. 자연채광 및 36시간의 제한된 실험 환경 내에서 적용 식생의 엽록소 변화는 유의미한 변화를 확인할 수 없었다.
- 3) FVC 모니터링 결과 스킨답서스는 실험 후에 14.8% 감소되었고, 스파티필름은 19.8%, 싱고니움은 27.1% 감소되었다. FVC는 스킨답서스가 가장 변화율이 적어 동일한 공조풍량 조건에서 우수한 생육성능을 기록한 것으로 해석할 수 있었다.
- 4) 적용식생의 엽록소 변화는 유의미한 결과를 도출하지 못하였다. 반면, 스킨답서스가 동일한 공조풍량 조건에서 가장 낮은 여과풍속과 FVC 변화율을 기록하였다. 식생유니트형 바이오필터의 AHU연계시 실험대상 식생 중에서 스킨답서스가 가장 높은 생육안정성을 기록한 것으로 판단된다.

엽록소와 FVC를 기준으로 식생유니트형 바이오필터의 적용식생에 대한 모니터링을 통해 AHU연계에 따른 생육환경 및 안정성에 대한 객관적 평가가 가능하였다. 다만, 본 연구는 제한된 실험시간과 식물종에 의해 실험되어 결과에 대한 검증이 요구된다. 따라서 이에 대한 보완연구가 필요할 것으로 사료된다.

### Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ01221504)의 지원으로 수행되었습니다.

### Reference

- [1] 강효석, 가전제품의 오염물질 방출특성을 고려한 실내공기질 관리기준 설정연구, 가천대학교 대학원, 박사 학위논문, 2012 // (Kang, Hyo Seok, "A Study on the chemical emission from home alliances and those criteria evaluated with testing chamber method", Gachon Univ. Gyeonggi, Doctor's thesis, 2012)
- [2] 국립환경과학원, 국민일일시간활동 양상에 따른 개인노출평가연구, 2010
- [3] 환경부, 공기청정기-에어컨 OIT 항균필터 위해 평가결과, 2016
- [4] 이소담, 김태한, 박정현, 김철민 "식생연계 공기정화용 바이오필터 기술 및 사례분석" 환경복원기술학회 2016년도 춘계 학술발표대회, 2016, pp 45-46,
- [5] 김유나, 천만영, 이창희. "심지형 가습장치를 이용한 식물바이오필터의 토양수분 및 식물 생육의 안정성", 한국자원식물학회지, 제 29권 제 5호, 2016, pp. 579-587 // (Kim, You Na, Chun, Man Young and Lee, Chang Hee "Stabilization of Soil Moisture and Plant Growth on a Botanical Biofilter with a Wick-Typed Humidifying Apparatus," Korean Journal of Plant Resources, Vol. 29, No. 5, 2016, pp.579-587)
- [6] 최봄, 천만영, 이창희. "풍속과 초기 토양수분에 따른 평면형 바이오필터 내 토양수분 안정화 및 식물 생육반응 평가." 한국자원식물학회지, 제 27권 제 5호, 2014, pp 546-555 // (Choi, Bom, Chun, Man Young, and Lee, Chang H. "Evaluation for soil moisture stabilization and plant growth response in horizontal biofiltration system depending on wind speed and initial soil moisture." Korean J. Plant Resour. VOL.27 NO.5, 2014, pp 546-555.)
- [7] 정슬기, 천만영, 이창희, 벽면형 "식물바이오필터 내 식물 생육 및 실내 공기질 정화." 한국자원식물학회지, Vol. 28, No. 5, 2015, pp. 665-674 // (Jung, Seul Ki, Chun, Man Young and Lee, Chang Hee, "Plant Growth Responses and Indoor Air Quality Purification in a Wall-typed Botanical Biofiltration System," Korean Journal of Plant Resources, Vol. 28, No. 5, 2015, pp. 665-674)
- [8] 김태한, 안병렬, "식생기반 바이오필터의 AHU 연계 적합성에 관한 모니터링 연구" 한국태양에너지학회 학술대회논문집, Vol.2016, No. 10,2016. pp.6-6 // (Kim, Tae-Han, An, Byungryul. "A Study on Monitoring the Adequacy of Linking Vegetation-based Bio-filters with AHU." The Korean Solar Energy Society, Vol.2016, No.10.2016. pp. 6-6)
- [9] 김태한, 박성은, 김광진 "AHU와 연계된 식생유니트형 바이오필터의 식물생장 안정성 평가"인간식물환경학회, 제 20권 제 5호, 2017, pp. 441-450 // (Kim, Tae-Han, Park, Sung-Eun, Kim, Kwang-Jin. "Assessment of Plant Growth Stability on Vegetation Unit-based Bio-filter linked to AHU," Journal of People Plants and Environment, Vol.20 No.5. 2017. pp. 441-450)
- [10] 김태한, 이소담, 박성은, "AHU(Air Handling Unit) 연계 식생바이오필터의 소재별 압력손실 모니터링 및 운용에 따른 에너지 효율성 연구.", 인간식물환경학회, 제 20권 제 5호, 2017. p.485-494 // (Kim, Tae-Han, Lee, So-Dam, Park, Sung-Eun, "A Study on Pressure Loss by the Material of AHU-linked Vegetation Bio-filter and its Operational Energy Efficiency.", Journal of People Plants and Environment, Vol.20 No.5. 2017. p.485-494)
- [11] 농촌진흥청, 국립원예특작과학원, 식물 바이오필터를 활용한 바이오빌딩 현장적용 기술개발, 2017
- [12] 방성원, 김정예, 송중은, 김광진, 김두환. "기능성 모듈을 이용한 Bio Green Wall System의 제작", 한국원예학회 학술발표요지, Vol.2013 No.5, 2013, pp. 203-204 // (Bang, Sung Won, Kim, Jung Yea, Song, Jong Eun, Kim, Kwang Jin, Kim, Doo Hwan, "Construction of Bio Green Wall System with Functional Modle", Vol.2013 No. 5, 2013, 203-204)
- [13] 특허정보넷 키프리스, "1020140026693", <http://kportal.kipris.or.kr>
- [14] P.J. Irga, P. Abdo, M. Zavattaro, F.R. Torpy An assessment of the potential fungal bioaerosol production from an active living wall, Building and Environment Vol.111, 2017, pp. 140-146
- [15] P.J.Irga, N.J.Paull, P..Abdo, F.R.Torpy, An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system, Building and Environment Vol.115, 2017, pp. 281-290
- [16] Jonckheere, 2004, Review of methods for in situ leaf area index

- determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography, Agricultural and Forest Meteorology Vol.121, 2004, pp. 19-35
- [17] 환경부, 건식공정 바텀에시를 이용한 친환경 저밀도 건설용 소재 개발, 2016
- [18] 농촌진흥청, 국립원예특작과학원, 에코힐링을 위한 실내공기정화식물, 2014