

인공토양기반 식생바이오필터의 AHU(Air Handling Unit) 연계를 통한 적용식물의 생육지표 분석*

김태한¹⁾ · 이소담²⁾ · 안병렬³⁾

¹⁾ 상명대학교 환경조경학과 · ²⁾ 상명대학교 일반대학원 환경조경학과 · ³⁾ 상명대학교 건설시스템공학과

Analysis of Growth Indicators of Applied Plants by AHU(Air Handling Unit)-linking with Artificial Soil-based Vegetation Bio-filters*

Kim, Tae-Han¹⁾ · Lee, So-Dam²⁾ and An, Byung-Ryul³⁾

¹⁾ Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sang Myung University,

²⁾ Dept. of Environmental Resources, Graduate School, Sang Myung University,

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Sang Myung University.

ABSTRACT

Compared to yellow dust coming from China or particulate matter created naturally in spring due to Total Suspended Particulate(TSP), particulate matter in winter season have much more serious effect on human body as they penetrate cell membranes. Although such particulate matter are becoming a social issue, there are no concrete plans on how to reduce them. Air-purifying plants are limited in maintaining the indoor air quality of large area because it is usually difficult to quantify their performance. In order to improve this, a bio-filter that can be connected to air conditioner is suggested as an option. This study seeks to improve air conditioning model-based monitoring method for bio-filters from prior studies and objectify correlations between applied vegetation and growing environment into quantitative indicators. By doing so, this study seeks to provide criteria on plants applied to artificial soil-based vegetation bio-filters and basic information to set air-conditioning features. The study results confirmed significant tendency on the growing stability of each purifying plant in mechanical air-conditioning environment. Among three models selected for bio-filter vegetation models, *epi-*

* 본 연구는 농촌진흥청연구사업(PJ01221504)의 지원에 의해 수행되었음.

First author : Kim, Tae-Han, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sang Myung University,
Tel : +82-41-550-5303, E-mail : taehankim@smu.ac.kr

Corresponding author : Kim, Tae-Han, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sang Myung University,
Tel : +82-41-550-5303, E-mail : taehankim@smu.ac.kr

Received : 8 May, 2018. **Revised** : 26 June, 2018. **Accepted** : 25 June, 2018.

premmum aureum showed high performance in quantitative indicators, including soil moisture, EC, and leaf temperature, etc., indicating that it would assure the highest growing stability in this test air-conditioning environment.

Key Words : *Bio-filtration, Plant Growth Indicator, Soil Moisture, Soil Electrical Conductivity, Leaf Temperature*

I. 서 론

동절기 미세먼지는 세포막에 투과하여 인체에 보다 심각한 영향을 미치는 초미세먼지(PM_{2.5})로 동절기 난방 등으로 인한 오염물질로 인하여 유발된다. 이는 중국 월경성 황사나 비산먼지로 인한 자연발생적 춘절기 미세먼지에 비해 더욱 위협적이다. 또한 동절기의 실내 환기는 낮은 기온의 외기유입으로 이루어져 난방 에너지사용량 증가의 주요 원인이 된다. 건물에너지 소비의 약 44.2%를 차지하는 난방(Lee et al., 2011)과 실내환기를 위한 신선외기의 오염원 저감은 건물유지 관리비용을 가중시킬 수 있다. 따라서 환기를 위한 동절기 외기유입을 최소화해도 실내공기가 질적으로 유지될 수 있는 지속가능한 실내 환기방안이 요구된다.

일반적으로 공기정화식물은 생태적인 기작에 의한 정화효과로 일반인들에게 대표적인 실내 공기질 개선방안으로 인식되고 있다. 반면 성능 정량화가 어려워 다중이용시설과 같은 대면적 실내공기질 유지관리는 제한적인 상황이다. 이러한 문제를 개선하기 위해 식물의 정화능을 시스템화 한 바이오필터가 방안으로 제시되고 있다. 식생바이오필터 관련 연구는 심지가습법을 통한 소형 식생바이오필터의 토양수분 및 식물 생육상태 모니터링 연구(Kim et al., 2015), 풍속 조건에 따른 평면형 식생바이오필터의 식물생육, 습도, 토양수분 및 압력손실에 대한 모니터링 연구(Choi et al., 2014), 벽면형 식생바이오필터의 실내공기질 개선효과와 식물생육정도에

따른 실내공간 활용성 연구(Jung et al., 2015) 등이 보고되고 있다. 여기서, 식물의 공기정화능을 최적화하기 위해 시스템으로 해석하는 방향은 주요하지만, 대면적 실내공간 정화에 필요한 공조관점의 해석은 미비한 상황이다. 대면적 실내공기 정화효율을 극대화하는 여러접근 중에서 실내 기계환기를 담당하는 건물 공조기(AHU: Air Handling Unit)와 식생바이오필터를 연계하는 방안을 고려해볼 수 있다. 이는 AHU의 공기필터부를 식생바이오필터가 대체하는 것으로 소재와 도입식물의 생육안정성이 제공되어야 한다. 현재 해당 주제와 관련하여 인공 토양기반 식생유니트형 바이오필터의 AHU와 연계 시 예상되는 식생생육평가방법에 대한 선행적 연구(Kim et al., 2017), AHU와 연계 가능한 식생바이오필터의 소재 적합성을 판단하기 위한 압력손실 및 경제성 연구(Kim et al., 2017)가 보고되고 있다.

본 연구는 기존 선행연구에서 진행되었던 공조모델 기반 모니터링을 개선하고, 실측을 통해 적용식생과 식생생육환경 간의 상관관계를 공조환경과 연계하여 제시하려 한다. 이를 통해 인공 토양기반 식생바이오필터의 적용식물기준과 공조특성에 대한 기초정보를 제공하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 공기정화필터

AHU는 실외신선외기를 통해 실내에 유발되는 각종 공기오염물질을 제거하는 일반적인 방

법이다. AHU에 적용되는 공기정화필터는 일정 시간동안 오염된 공기를 정속으로 통과하여 입자상 물질을 물리적으로 여과함으로써 오염농도를 허용기준치 이하로 낮추는 역할을 한다. 이를 통해 재실자의 거주쾌적성을 제고하고, 공기오염원에 의한 건강상의 피해를 최소화하는 기능을 제공한다. 공기정화필터 성능 시험방법에는 중량법, 비색법, 계수법(DOP: Dioctyl-Phthalate) 등이 사용되고 있으며, ASHRAE 52.2-2007에서 입경에 따른 제거효율로 필터 성능을 평가하는 MERV (Minimum Efficiency Reporting Value) 방법이 적용되고 있다. 일반적으로 공기정화필터는 조진용(Pre), 중성능(Medium), 고성능(HEPA: High Efficiency Particulate Air)으로 구분된다. 조진용 필터는 외기 또는 전처리에 합성섬유 및 유리섬유 등의 여과재를 프레임에 긴결하여 분진을 포집한다. 적용 분진농도는 $0.4 \sim 7 \text{mg/m}^3$ 에 적합하다. 중성능 필터도 합성섬유 및 유리섬유가 적용되며, 기계장치의 보호와 실내 청정도를 높이는데 사용된다. 적용분진농도는 $0.1 \sim 0.6 \text{mg/m}^3$ 에 적합하다. 고성능 필터는 극세섬유가 적용되며, 무균실 및 클린룸의 공조에 사용된다. 적용분진농도는 0.3mg/m^3 이하에 적합하고, 계수법기준 $0.3 \mu\text{m}$ 분진에 대해 99.97% 이상의 포집효율을 가진 고효율 필터이다.(Fiti Reliability Assessment Center. 2008)

2. 토양 전기전도도(EC: Electric Conductivity)

식물생장배지는 생육 및 작물생산을 최적화하기 위해 물리성, 화학성을 적합하도록 조절하고, 재배기간 동안에도 일정한 상태로 유지해야 한다. 여기서 물리성은 통기성, 보수성 및 배수성 등을 의미하고, 화학성은 안정된 pH, EC 및 양분간 균형 등이 요구된다(Nelson, 2003). 대표적인 식물생장 배지인 토양의 성능평가는 부가산정, 가중산정 및 배수산정 법 등에 의해 이루어진다. 이중 토양의 성능지표에 대한 가중치를 결정하여 각 인자에 적용한 후 합산하는 방법을

가중산정이라고 한다. (Ok et al., 2005) 국내 관련연구 중 대표적인 경작지 토양에 대한 화학적 성능지표를 가중산정 방법으로 정리하면서 EC의 일반범위를 $0 \sim 2.5 \text{dS/m}$ 로 정의하고, 최적범위를 $0 \sim 0.5 \text{dS/m}$ 로 규정하였다. EC와 더불어 pH, Ca, Mg, OM, P2O5 등의 지표를 평가하여 국내 토양의 평균 화학적 성능지표를 73점, 물리적 성능지표를 76점 그리고 평균 토양의 성능지표를 75점으로 산출하였다(Jung et al., 2002). 또한, 토양의 EC를 평가하기 위한 점수화 모델 연구도 보고되는데, Harris model을 적용하여 $Y = 1/(a+bX^c)$ 의 상관식으로 정의하고 있다. 여기서, 토성에 의존되는 상수는 $a=1.02$, $b=0.02$, $c=10.36$ 로 정리되며, 토양의 EC는 $0.4 \sim 100$ 점의 분포로 평균 98점으로 평가하고 있다. 이는 Figure 1과 같이 정리되고, 토양염류량과 비례되는 EC가 낮을수록 높은 토양성능을 확보하게 된다. (Ok et al., 2005)

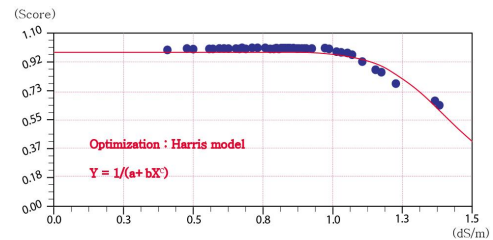


Figure 1. Soil electrical conductivity model for soil quality indicator

3. 엽온

식물은 증산작용을 통해 엽온을 조절하지만 수분공급 및 염류장애, 근권부에서 발생하는 병해 등에 의해 증산작용이 억제되면서 엽온이 기온보다 높아지게 된다. 이러한 현상을 식물 스트레스로 정의할 수 있다(Idso, 1982). 엽온은 식물의 광환경에 밀접한 영향을 받는다. 일조시간대에 식물은 광합성으로 이산화탄소를 고정하며, 동시에 수습에서 수백 배에 해당하는 물이 증산되어 손실된다. 여기서, 증산작용의 통로인 기공의 개폐는 광, 온도, 습도, 토양수분 등의 환

경요인에 따라 영향을 받는다.(Turner et al., 1984) 또한, 포차(VPD, Vapor pressure deficit)와 증산 간의 관계에서 엽온과 기온의 차이가 발생되며, 이는 식물 스트레스와 연계된다. 포차는 포화수증기압과 실제 수증기분압간의 차를 의미하는 것으로 포차가 낮으면 증산이 어렵고, 높으면 과도한 증산으로 식물이 스트레스를 받게 된다. 적절한 포차는 0.5~1.2kPa로 보고되고 있으며, (PHRS, 2011) 이 경우 엽온과 기온의 차이는 거의 없다. 식물의 스트레스 경감을 위해 엽온조절이 요구되며, 엽온을 주변기온에 비해 낮게 유지하는 것이 필요하다.

III. 연구방법 및 내용

1. 연구진행 과정

본 연구는 공조기 연계 실험인프라 구축, 실험조건 설정, 실험편 설계, 식생생육 및 여과풍속 모니터링 조건 설정, 실험편 거치 및 실험 순으로 진행하였다. 실험은 2017년 10월 29일부터 11월 6일까지 총 9일간 진행되었다. 공조기와 직접 연계된 식생바이오필터 시스템에 3종의 공기정화식물이 식재된 실험편을 구비하였으며, 실험편 당 36시간이 소요되었다.

2. 공조기 연계 실험인프라 구축

실험인프라는 실험용 챔버(IAQ Chamber), 공조기(AHU), 풍동관(Flow Nozzle Chamber)으로 구성되어 있다(Rural Development Administration, 2017). 공조기 연계로 인한 식생바이오필터에 작용되는 공조환경과 식생생육상태를 모니터링하기 위해 실험용 챔버는 Figure 2와 같이 유관 국가표준(KS ISO 16000-9)을 참조하여 설계되었다. 구조는 알루미늄프로파일 40mm과 PC t=5mm가 사용되었으며, 1,000mm×1,000mm×1,000mm의 크기로 제작되었다. 공조기는 3,425rpm의 동일한 전동기가 적용된 Supply Fan과 Return Fan으로 구분되고, 냉·난방 설비가 제

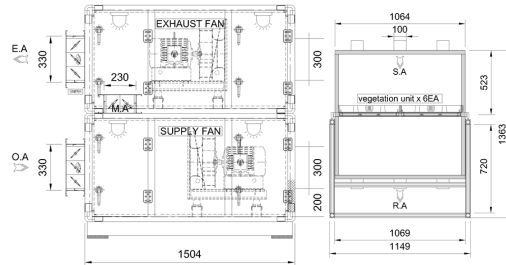


Figure 2. Air handling unit and experimental chamber

외된 일반 건물용 시스템으로 구비되었다.

폐쇄 연계된 공조기와 실험용 챔버는 공조기의 급기(SA: Supply Air)부에서 실험용 챔버 상단으로 송풍되고, 풍량산출을 위한 풍동관을 거쳐 환기(RA: Return Air)부로 연결된다. 공조기의 외기(OA: Outdoor Air)부와 배기(EA: Exhaust Air)부는 댐퍼로 기밀되어 외기유입을 배제한 구조로 실험환경이 조성된다.

3. 실험편 설계

본 실험에 적용된 식생바이오필터는 식생유니트, 기반재, 공기정화용 식물로 구성된 유니트형이다. 우선 식생유니트는 다음 Figure 3과 같이 500mm×333mm×50mm의 규격으로 자외선 차단제가 도포된 H.D.P.E(High Density Poly Ethylene)소재로 제작되었다. 경사면 설치가 용이하도록 Plus Corn이 결합되는 구조로 설계되었으며, 측면에 격자형의 체결홈이 있어 유니트간 안전한 결합이 가능하다. 또한, 유니트 내에서 배수 및 통기가 용이하도록 저면부가 타공되어, 공조기 연계 시 송풍이 가능한 구조이다.

식생유니트에 적용되는 기반재는 Figure 3과 같이 석탄회기반 인공경량골재로 화력발전 폐



Figure 3. Figure of vegetation unit and artificial soil

기물인 바텀애쉬를 소성 가공한 고 기능성 세라믹 인공토양이다. 경량토의 특성을 가진 인공경량골재는 보습기능과 식물생육에 필요한 미네랄을 포함하고 있다. 따라서 식물생장에 필요한 급배수 및 산소 공급 등의 조절기능 최적화할 수 있는 물성을 동반한다. 골재의 형상은 중력식 저속 마쇄기를 이용하여 표면을 구형에 가깝게 가공하였으며, 입도는 8mm이며, 공극률은 약 75%이다(Ministry of Environment, 2016).

식생유니트형 바이오필터에 적용되는 식물재료를 선정하기 위해 공기정화 식물의 선행연구를 확인하고 활용된 식물 종을 정리하였다. 이 중 공기정화 식물의 선행연구(Jung et al., 2015; Park et al., 2008; Lee et al., 2008)와 농진청에서 지정하고 있는 실내식물(National Institute of Horticultural and Herbal Science, 2014)을 비교하여 활용도가 높은 식물인 스파티필름, 스킨답서스, 싱고니움 3종을 선정하였다.

상기 실험편 구성요소를 설정한 후, 우선 석탄회기반 인공경량골재의 미분을 제거하고, 식생유니트에 충전하였다. 기반재로 충전된 식생유니트는 선정된 3종의 공기정화식물별로 6개를 구비하여, 총 18개의 실험편을 준비하였다. 여기서, 실험편 당 정화식물을 9~10분 식재하였으며, 식재 시 식물 뿌리의 잔여 토양이 최소화 되도록 조치하였다.

4. 실험조건 설정

본 실험은 식생바이오필터의 AHU연계에 따른 공조 성능과 식생생육안정성을 객관화하기 위해 유관시험기준(KS B 6141)을 참고하여 통제조건을 설정하였다. 그리고, 선행연구(Kim et al., 2017)를 통해 안정적인 압력손실로 확인된 송풍량 600CMH를 실험공조환경으로 설정하였다. 바이오필터 체결부는 기밀을 유지하기 위해 식생유니트와 알루미늄 테이프로 마감하였다.

송풍구와 배출구는 다음 Figure 5와 같이 지름 100mm로 실험용 챔버 상단과 하단에 각각 3개소



Figure 4. Research process

가 구비되었다. 실험 공기조건은 온도 $25 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도 $55 \pm 15 \%$ (KS B 6740, SPS-KACA004-134)로 설정하였다. 폐쇄적인 실험환경에 따라 풍속은 실험용 챔버에 다기능 종합 환경측정기(Testo 480 professional climate instrument)에 열선(Testo, thermal probe 10mm) · 베인(Testo, vane probe 16mm)형 풍속 프로브를 설치하여, 데이터를 확보하였다.

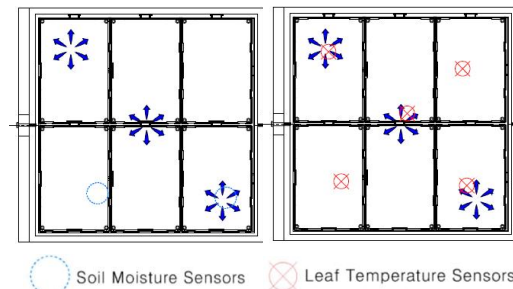





Figure 5. Install location of soil moisture and leaf temperature sensors

5. 식생생육지표 모니터링 조건 설정

식생유니트형 바이오필터에 적용된 공기정화 식물의 생육지표는 관련 연구분석을 통해 시계열 분석 및 정량화가 가능한 토양수분, 토양 전기전도도, 엽온으로 선정하였다. 해당 생육지표의 모니터링을 위해 다음 Table 1과 같이 계측기와 센서를 구비하여 모니터링을 수행하였다.

식재를 완료한 유니트에 5L 관수 후, 24시간 양생을 거친 뒤 실험용 챔버에 식생모델별 6개의 유니트를 체결하였다. 체결 시 실험용 챔버와 유니트 간의 유격은 덕트용 테이프로 기밀하였다. 식생모델별 36시간의 송풍실험이 종료된

Table 1. Specification of monitoring system

	Multi-function measuring instrument	Soil moist sensor	Leaf temperature sensor
Image			
Model	Testo, Testo480	USEM, WT100B	USEM, UE-T200
Range	-100~+100hPa	0 ~ 99.9%	0°C ~ 50°C

챔버는 실험진행 동안 발생된 잔여물을 청소한 후 챔버를 개방한 상태에서 30분간 공조기를 회전시켜 환기하였다.

IV. 연구결과

1. 여과풍속

실험용 챔버에 체결된 식생바이오필터의 상단부에 송풍구가 3개소가 구비되어 공조기로부터 급기가 진행된다. 식생모델별 엽면적 등에 의한 압력손실 변화로 여과풍속이 변화하며, 이를 송풍구와 송풍의 영향이 미비한 음영구로 구분하여 다음과 같이 실험기간동안 모니터링을 진행하였다.

1) 송풍구 여과풍속

송풍구에서 스파티필름은 평균 7.56m/s, 스킨답서스는 평균 7.27m/s, 싱고니움은 평균 7.92m/s를 기록하였다. 송풍구의 여과풍속은 싱고니움이 가장 높았으며, 평균 7.58m/s로 확인되었다.

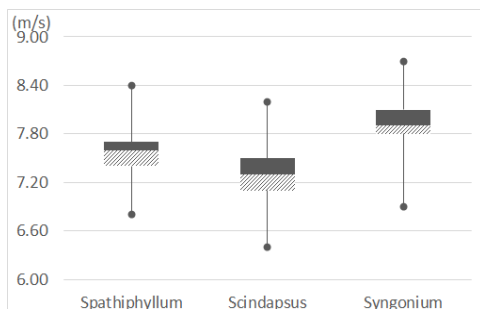


Figure 6. Filtration velocity of air outlet

2) 음영구 여과풍속

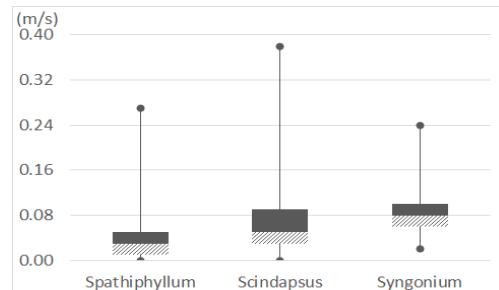


Figure 7. Filtration velocity of air shade area

음영구에서 스파티필름은 평균 0.04m/s, 스킨답서스는 평균 0.07m/s, 싱고니움은 평균 0.08m/s를 기록하였다. 음영구의 여과풍속 또한 싱고니움이 가장 높았으며, 평균 0.06m/s로 확인되었다.

2. 토양수분

공조기 연계로 인한 식물종별 식생바이오필터의 토양수분변화를 파악하기 위해 실험용 챔버의 송풍구와 음영구 부근으로 구분하여 모니터링을 진행하였다. 모델별 시계열 자료는 2차 회귀분석을 통해 다음과 같이 정리하였다.

1) 스파티필름(*Spathiphyllum cannifolium*)

스파티필름이 식재된 바이오필터의 모니터링 결과는 다음 Figure 8과 같다. 평균 여과풍속 7.56m/s를 기록한 송풍구 하단의 토양수분 시계열 변화는 2차 회귀식($y=0.0296x^2-1.8866x+32.363$, $R^2=0.9701$)으로 정리되었다. 토양수분은 실험개시 2시간 동안 27%로 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 25시간 후 3.2%로 수렴하였다. 반면, 평균

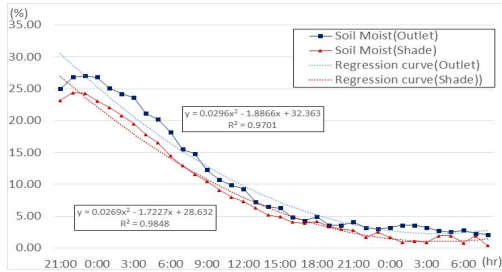


Figure 8. Time-series monitoring for soil moisture contents of *Spathiphyllum cannifolium*

여과풍속 0.04m/s를 기록한 음영구 하단의 토양수분 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0269x^2-1.7227x+28.632$, $R^2=0.9848$)으로 정리되었다. 토양수분은 실험개시 2시간 동안 24.3% 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 27시간 후 1.7%로 수렴하였다.

2) 싱고니움(*Syngonium podophyllum*)

싱고니움이 식재된 바이오필터의 모니터링 결과는 다음 Figure 9와 같다. 평균 여과풍속 7.92m/s를 기록한 송풍구 하단의 토양수분 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0288x^2-1.666x+25.828$, $R^2=0.986$)으로 정리되었다. 토양수분은 실험개시 2시간 동안 21.9% 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 19시간 후 3.9%로 수렴하였다. 반면, 평균 여과풍속 0.08m/s를 기록한 음영구 하단의 토양수분 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.033x^2-1.9699x+28.956$, $R^2=0.9636$)으로 정리되었다. 토양수분은 실험개시 2시간 동안 23.3% 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 24시간 후 0.8%로 수렴하였다.

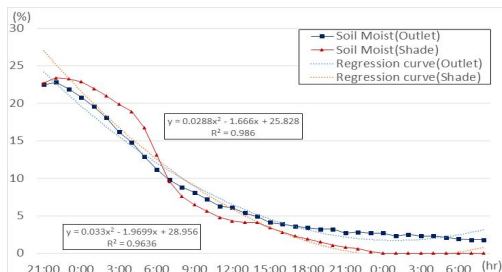


Figure 9. Time-series monitoring for soil moisture contents of *Syngonium podophyllum*

3) 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)

스킨답서스가 식재된 바이오필터의 모니터링 결과는 다음 Figure 10과 같다. 평균 여과풍속 7.27m/s를 기록한 송풍구 하단의 토양수분 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0009x^3-0.0335x^2-0.4962x+25.671$, $R^2=0.9929$)으로 정리되었다. 토양수분은 실험개시 2시간 동안 23.7% 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 29시간 후 4.6%로 수렴하였다.

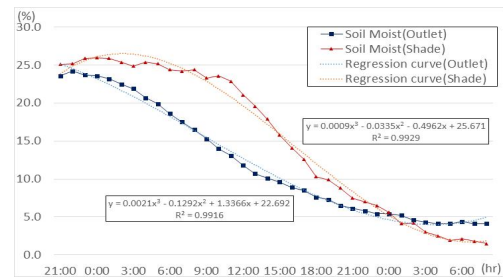


Figure 10. Time-series monitoring for soil moisture contents of *Epipremnum aureum*

반면, 평균 여과풍속 0.07m/s를 기록한 음영구 하단의 토양수분 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0021x^3-0.1292x^2+1.3366x+22.692$, $R^2=0.9916$)으로 정리되었다. 토양수분은 실험개시 2시간 동안 25.9% 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 28시간 후 4.1%로 수렴하였다.

3. 토양전기전도도(EC)

공조기 연계를 통한 식물종별 식생바이오필터의 EC 변화를 파악하기 위해 실험용 챔버의 송풍구와 음영구 부근으로 구분하여 모니터링을 진행하였다. 모델별 시계열 자료는 2차 회귀 분석을 통해 다음과 같이 정리하였다.

1) 스파티필름(*Spathiphyllum cannifolium*)

스파티필름이 식재된 바이오필터의 EC 모니터링 결과는 다음 Figure 11과 같다. 송풍구 하단의 EC 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0001x^3-0.0075x^2+0.085x+0.5033$, $R^2=0.948$)으로 정리되

었다. EC는 실험개시 10시간 동안 0.72dS/m에서 0.77dS/m로 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 21시간 후 0.0dS/m로 수렴하였다. 반면, 음영구 하단의 EC 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0001x^3-0.0064x^2+0.0684x+0.4366$, $R^2=0.9417$)으로 정리되었다. EC는 실험개시 5시간 동안 0.51 dS/m에서 0.72dS/m로 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 19시간 후 0.0dS/m로 수렴하였다.

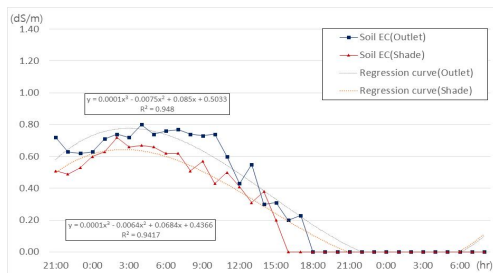


Figure 11. Time-series monitoring for soil electrical conductivity contents of *Spathiphyllum cannifolium*

2) 싱고니움(*Syngonium podophyllum*)

싱고니움이 식재된 바이오필터의 EC 모니터링 결과는 다음 Figure 12와 같다. 송풍구 하단의 EC 시계열변화는 2차 회귀식($y=0.0008x^2-0.048x+0.6696$, $R^2=0.9168$)으로 정리되었다. EC는 실험개시 11시간 동안 0.53dS/m에서 0.34dS/m로 불안정하게 하강한 후 현저한 하강곡선을 거쳐 15시간 후 0.0dS/m로 수렴하였다.

반면, 음영구 하단의 EC 시계열변화는 2차

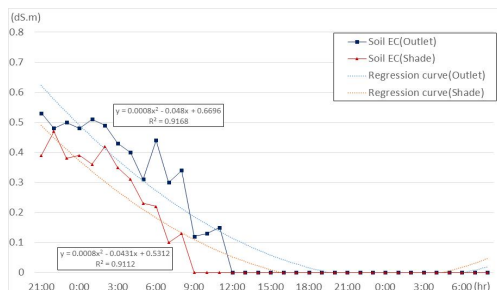


Figure 12. Time-series monitoring for soil electrical conductivity contents of *Syngonium podophyllum*

회귀식($y=0.0008x^2-0.0431x+0.5312$, $R^2=0.9112$)으로 정리되었다. EC는 실험개시 5시간 동안 0.39dS/m에서 0.42dS/m로 상승 후 현저한 하강곡선을 거쳐 12시간 후 0.0dS/m로 수렴하였다.

3) 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)

스킨답서스가 식재된 바이오필터의 EC 모니터링 결과는 다음 Figure 13과 같다. 송풍구 하단의 EC 시계열 변화는 2차 회귀식($y=0.0001x^2-0.0163x+0.3956$, $R^2=0.8758$)으로 정리되었다. EC는 실험개시 16시간 동안 0.3dS/m에서 불안정하게 유지한 후 현저한 하강곡선을 거쳐 21시간 후 0.0dS/m로 수렴하였다.

반면, 음영구 하단의 EC 시계열변화는 2차 회귀식($y=-0.0002x^2-0.0023x+0.2969$, $R^2=0.833$)으로 정리되었다. EC는 실험개시 18시간 동안 0.2dS/m에서 불안정하게 유지한 후 현저한 하강곡선을 거쳐 23시간 후 0.0dS/m로 수렴하였다.

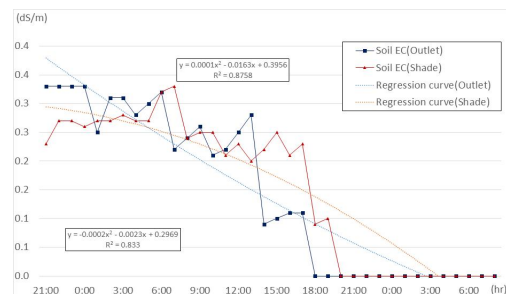


Figure 13. Time-series monitoring for soil electrical conductivity contents of *Epipremnum aureum*

4. 엽온

공조기 연계로 인한 식물종별 식생바이오필터의 엽온 변화를 파악하기 위해 실험용 챔버의 송풍구 3개소와 음영구 2개소로 구분하여 모니터링을 진행하였다. 모델별 시계열 자료를 다음과 같이 정리하였다.

1) 스파티필름(*Spathiphyllum cannifolium*)

스파티필름이 식재된 바이오필터의 엽온 모

니터링 결과는 다음 Figure 14와 같다. 송풍구 하단 3개소의 엽온 시계열변화는 실험개시 8시간 동안 평균 18.3℃에서 평균 28.1℃로 급격히 상승한 후 20시간 경과 후 평균 27.0℃에서 수렴되었다. 반면, 음영구 하단 2개소의 엽온 시계열변화는 실험개시 8시간 동안 평균 18.3℃에서 평균 28.0℃로 급격히 상승한 후 22시간 경과 후 평균 27.0℃에서 수렴되었다.

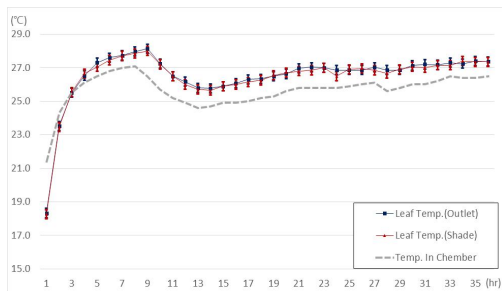


Figure 14. Time-series monitoring for leaf temperature contents of *Spathiphyllum cannifolium*

2) 싱고니움(*Syngonium podophyllum*)

싱고니움이 식재된 바이오필터의 엽온 모니터링 결과는 다음 Figure 15와 같다. 송풍구 하단 3개소의 엽온 시계열변화는 실험개시 7시간 동안 평균 16.7℃에서 평균 25.1℃로 급격히 상승한 후 21시간 경과 후 평균 26.4℃에서 수렴되었다.

반면, 음영구 하단 2개소의 엽온 시계열변화는 실험개시 6시간 동안 평균 16.7℃에서 평균 24.7℃로 급격히 상승한 후 22시간 경과 후 평균 26.1℃에서 수렴되었다.

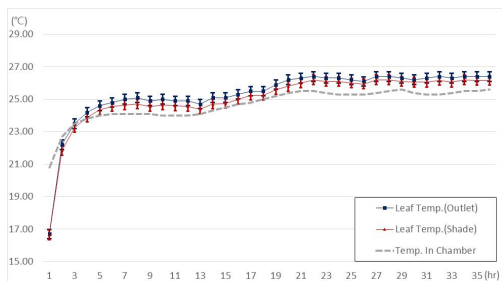


Figure 15. Time-series monitoring for leaf temperature contents of *Syngonium podophyllum*

3) 스킨답서스(*Epipremnum aureum*)

스킨답서스가 식재된 바이오필터의 엽온 모니터링 결과는 다음 Figure 16과 같다. 송풍구 하단 3개소의 엽온 시계열변화는 실험개시 20시간 동안 평균 18.6℃에서 유지한 후 평균 26.9℃로 급격히 상승한 후 29시간 경과 후 평균 27.4℃에서 수렴되었다. 반면, 음영구 하단 2개소의 엽온 시계열변화는 실험개시 21시간 동안 평균 18.8℃에서 유지한 후 평균 26.1℃로 급격히 상승한 후 29시간 경과 후 평균 27.1℃에서 수렴되었다.

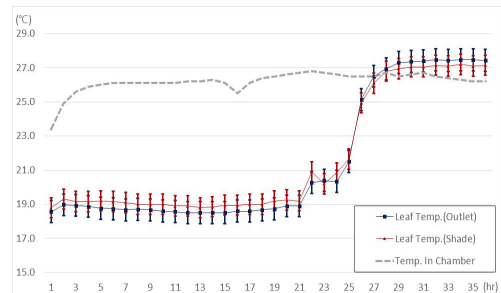


Figure 16. Time-series monitoring for leaf temperature contents of *Epipremnum aureum*

5. 종합분석

본 연구는 실험용 챔버의 송풍구 3개소 평균 여과풍속이 7.58m/s를 기록하는 공조환경 내에서 식생바이오필터에 적용된 식생모델별로 진행되었다. 직·간접적으로 풍속의 영향을 받는 적용 식물의 토양수분, EC, 엽온과 같은 정량화 가능한 생육지표에 대한 시계열변화를 확인할 수 있었다.

우선, 토양공극률에 의한 용적수분함량(WFPS: Water Filled Pore Space)기준의 선행연구(Lee et al., 2014)는 사양토, 미사질양토, 식양토의 한계 수분함량을 33.7%, 56.4% 62.2%로 보고하고 있다. 본 실험에 사용된 식생기반재는 식생유니트 내에 충전된 석탄회기반 인공경량골재와 근권부에 잔존한 상토로 유니트별 5L 관수 후 24시간 양생을 거쳐 초기수분함량 23.3~27%를 기

Table 2. Correlation coefficient value for plant growth index of *Epipremnum aureum* in shade area

	Leaf temperature	Soil moisture	Soil electrical conductivity
Leaf temperature	1	-	-
Soil moisture	-0.882	1	-
Soil electrical conductivity	-0.874	0.954	1

록하였다. 또한, 유니트 거치에서 간헐적인 중력수가 확인되어 식생기반재의 토양수분상태가 포장용수량(field capacity) 이상으로 파악되었다. 이러한 초기토양수분에서 스파티필름과 싱고니움은 송풍구와 음영구 하단이 유사하게 급격한 감소현상을 보였다. 반면, 스킨답서스는 상대적으로 완만한 감소경향을 기록하였으며, 음영구 하단에서는 보다 현저한 차이가 확인되었다.

국내토양의 EC 최적범위를 0~0.5dS/m로 규정(Jung et al., 2002)하고, EC가 토양의 화학적 성능에 반비례하는 것을 규명(Ok et al., 2005)한 선행연구 등에서 보고된 바와 같이 EC는 식물 생육에 저해되는 토양염류량에 비례하는 지표로 이해되고 있다. 반면, EC는 토양수분변화와 높은 상관성을 가지고 있는데, 본 실험에서 가장 완만한 수분변화를 기록한 스킨답서스의 생육지표 간 상관계수를 다음 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

음영구 하단에서 기록된 생육지표 간 상관계수는 토양수분과 EC가 0.954로 매우 강한 양(+)의 상관관계가 확인되었다. 따라서 적정 수분 확보 측면에서는 EC가 “0 dS/m”를 초과해야 하고, 선행연구에서 제시한 “0.5 dS/m” 미만으로 유지되는 것이 적정하다고 판단할 수 있다. 이러한 EC 구간이 시계열로 가장 긴 시간 확보된 식생모델은 스킨답서스였다. 0.4dS/m의 EC 수준이 송풍구 하단에서 21시간 후, 음영구 하단에서는 23시간 후에 각각 0dS/m으로 수렴되어 적용된 식생모델 중 가장 오랜 시간동안 EC 최적범위를 확보하였다. 다만, 토양수분이 5%를 기점으로 송풍구와 음영구 하단의 EC가 서로 반전된 점과 식생기반재의 위조점(wilting point)에 대한 추가적

인 검토가 요구된다.

마지막으로 엽온은 기온보다 높아지는 현상을 식물 스트레스로 정의(Idso, 1982)한 선행연구와 같이 식물의 생육안정성을 평가할 수 있는 정량지표로 이해할 수 있다. 바이오필터의 식생모델 중 스킨답서스가 유일하게 실험개시 후 실험용 챔버 내의 기온보다 낮은 엽온을 20시까지 유지하였다. 21시 이후에는 타 식생모델과 유사한 경향을 보여 실험 공조환경이 일반적인 식물 대사에 부정적인 영향을 미치는 것으로 해석되었다. 따라서 바이오필터의 공조기 연계 시 스킨답서스는 상대적으로 가장 높은 식물 스트레스 관리성능을 보이는 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 유니트형 식생바이오필터와 AHU 연계 시 예상되는 적용식물의 생육안정성을 정량화 할 수 있는 식생지표 분석을 통해 확인해보았다. 해당 식생지표의 시계열 모니터링을 통해 기계식 공조환경에서 정화식물별 생육안정성에 대한 유의미한 경향성을 확인할 수 있었다. 바이오필터용 식생모델로 선정된 3개의 모형 중 스킨답서스가 모든 지표에서 우수한 성능을 기록하였다. 우선 토양수분지표에서 가장 완만한 감소 경향을 기록하였다. EC에서도 0dS/m 초과 0.5dS/m 미만의 적정 구간을 가장 오랜 시간동안 만족하였다. 주요 식물 스트레스 평가지표인 엽온 또한 타 식생모델과는 달리 실험용 챔버 기온대비 저온구간을 20시간 이상 확보하였다. 이러한 정량화 식생지표 결과로 미루어 보아 본 연구의 식생바이오필터의 식생모델 중에서 스킨답

서스가 해당 공조환경에서 가장 높은 생육안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같은 결과에 대한 보다 높은 신뢰성 확보를 위해 식생기반재에 대한 식물유효수분구간과 공조측면의 식생생육을 위한 EC 최소한도와 같은 지표의 추가적인 확인이 필요할 것으로 사료된다. 더불어, 공조측면에서 식생기반재의 음영환경 조성에 직접영향을 제공하는 식생피폭비율(FVC: Fractional Vegetation Cover)등의 식생면적평가와 해당 식생모델의 실질적인 공기정화능에 대한 검토도 후속연구를 통해 보완되어야 할 것이다.

References

- Choi B · Chun MY and Lee CH. 2014. Evaluation for Soil Moisture Stabilization and Plant Growth Response in Horizontal Biofiltration System Depending on Wind Speed and Initial Soil Moisture. The Plant Resources Society of Korea. 27(5) : 546- 555
- Sherwood B. Idso. 1982, Non-water-stressed baselines a key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meteorology 27 : 59-70.
- Jung SK · Chun MY and Lee CH. 2015. Plant Growth Responses and Indoor Air Quality Purification in a Wall-typed Botanical Biofiltration System. The Plant Resources Society of Korea. 28(5) : 665-674.
- Jung YS and Kim JJ. 2002. Development of Environmentally Sound Soil Management. Technology for Alpine Farmland. Suwon. Korea: RDA.
- Kim SJ · Son YS · Son YS · Yoon SL · Kim JC · Kim KS and Kim IW. 2010 .Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Stations. Korean Society for Atmospheric Environment. 26(5) : 533-542
- Kim TH · Lee SD and Park SE. 2017. A Study on Pressure Loss by the Material of AHU-linked Vegetation Bio-filter and its Operational Energy Efficiency. Journal of People Plants Environment. 20(5) : 485-494.
- Kim TH · Park SE and Kim KJ. 2017. Assessment of Plant Growth Stability on Vegetation Unit-based Bio-filter linked to AHU. Journal of People Plants Environment. 20(5): 441-450.
- Kim YN · Chun MY and Lee CH. 2016. Stabilization of Soil Moisture and Plant Growth on a Botanical Biofilter with a Wick-Typed Humidifying Apparatus. The Plant Resources Society of Korea. 29(5) : 579-587.
- KITECH. 2008. Reliability evaluation of fiber material and reliability evaluation of air filter.(in Korean)
- Korean Industrial Standards. 2014. Indoor air — Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds — Emission test chamber method. KS I ISO 16000-9. (in Korean)
- Korean Industrial Standards. 2015. Performance test methods for clean room-air filters. KS B 6740. (in Korean)
- Korean Industrial Standards. 2002. Air filter units for ventilation. KS B 6141. (in Korean)
- Korea air cleaning association. 2015. Air Filters. SPS-KACA004-134. (in Korean)
- Lee CH · Kim MS · Kong MS · Kim YH · Oh TK and Kang SS. 2014. Determination of moisture threshold for solution sampling in different soil texture. Korean Journal of Agricultural Science. 41(4) : 399-404.
- Lee JY and Kim IH. 2017. Characteristics of a Filter Module Adsorption for Fine Dust

- Removal on Road. Korean Society of Environmental Engineers. 39(1) : 19-25.
- Lee YA · Kim ED and Yoo HC. 2011. Characteristics of energy consumption in Buildings of Ulsan Metropolitan City. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment. Ministry of Environment. 2016, Development of Environmentally-Friendly Low-Density Construction Material using Dry-Processed Bottom Ash. (in Korean)
- Nelson, P.V. 2003. Greenhouse operation and management. 6th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Noh JH and Tack HH. 2017. The Implementation of the Fine Dust Measuring System based on Internet of Things(IOT). Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering. 21(4) : 829-835.
- Noh JH and Tack HH. 2017. The Implementation of the Fine Dust Measuring System based on Internet of Things(IoT). Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering. 21(4) : 829-835.
- Ok YS · Yang JE · Park YH and Jung ys. 2005. Framework on Soil Quality Indicator Selection and Assessment for the Sustainable Soil Management. Korea Environment Institute. 4(1) : 93-111.
- Park CJ · Kim JC and Kim HH. 2017. Evaluation on the Risk Reduction of Fine Particle Matter in Multi-use Facilities by Air Cleaner. Journal of Korean Society of Environmental Technology. 18(4) : 329-338.
- Park CB. 2017. Measurement of Atmospheric Dust Mass Concentration Over Daejeon City by Depolarization. Korean Institute of Information Technology. 15(3) : 57-64.
- Park CJ · Kim JC and Kim HH. 2017. Evaluation on the Risk Reduction of Fine Particle Matter in Multi-use Facilities by Air Cleaner. Journal of Korean Society of Environmental Technology. 18(4) : 329-338.
- PHRS (Protected Horticulture Research Station). 2011. Concept of humidity in greenhouse (Relative humidity, vapor pressure deficit).
- P.J. Irga · P. Abdo · M. Zavattaro and F.R. Torpy. 2017. An assessment of the potential fungal bioaerosol production from an active living wall. Building and Environment 111 : 140-146.
- P.J. Irga · N.J. Paull · P.Abdo and F.R.Torpy. 2017. An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system. Building and Environment. 115 : 281-290.
- Rural Development Administration. 2014. National Institute of Horticultural and Herbal Science. (in Korean)
- Rural Development Administration. 2017. Development of Field-applied Technology for the Bio-Building using the Plant-based Biofilter. (in Korean)
- Turner NC · Schulze ED and Gollan T. 1984. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapor pressure deficits and soil water content. Oecol(Berlin). 63 : 338-342.
- http://blog.daum.net /phes_greenhouse
<http://news.donga.com>
http://blog.daum.net /phes_greenhouse
<http://www.bio-wall.co.kr>
<http://howscape.wixsite.com>