

미세조류 배양 건축외피의 실내채광 조절성능 분석

- 겨울철 배양 환경을 중심으로 -

Optimizing Lighting Performance by a Microalgae Façade in Winter Season

○최 승 주*

Choe, Seung-Ju

한 승 훈**

Han, Seung-Hoon

Abstract

The aim of this study is to investigate the wintertime operational feasibility of microalgae façades and to examine the variation patterns in indoor daylighting performance. The research method involved the operation of test-bed for empirical data collection, which was subsequently applied to a virtual environment to conduct daylight simulations. The simulated indoor illuminance levels on the floor plane were evaluated against the LEED v4 Daylight Option 02 criteria in order to analyze the variation in potential credit achievement. The results indicate that the winter operation of microalgae façade is species-dependent. Specifically, the optimal cultivation cycle for tank cultured chlorella was identified as 3 days..

키워드 : 미세조류 배양 건축외피, 자연채광환경, 가시광선투과율, 실내조도, LEED

Keywords : Microalgae Façade, Natural Lighting Environment, Visible Light Transmittance, Floor Illuminance, LEED

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

IEA(International Energy Agency)의 Renewables 2024 조사 보고서에 따르면 바이오 에너지는 2030년까지 산업, 건물 및 운송 부문 총 에너지 소비의 5.5%를 분담할 것으로 예측된다. 아울러, 미국, 중국, 유럽 등 국제적으로 재생연료 전담 지원 정책을 통해 온실가스 배출조절 및 태양광, 풍력 발전량 감축에 따른 유연한 신재생에너지 자원으로써 각광받고 있다.

이에 따라 3세대 바이오매스인 미세조류의 배양과 공급에 대한 중요성이 점진적으로 증대되고 있으며, 건축분야 또한 건축 외피와 미세조류 배양 기능을 결합한 차세대 신재생에너지 건축 외피인 미세조류 배양 외피 개념이 대두, 연구되고 있다. 본 외피는 종래 건축물을 에너지 생산체 개념으로 전환시키며 에너지원의 생산 과정에서 실내 공기 정화, 건축물 배출 이산화탄소 제거 등을 통해 건축물에 다각적인 이점을 부여할 수 있다.

그러나, 생물배양 외피의 특성상 건축물은 미세조류 배양에 부합하는 환경을 제공할 수 있어야 하며, 이러한 선행검토 없이 무분별한 배양 외피의 활용이 이루어진다면 본 외피가 가진 고유의 장점들이 비효율적 혹은 미발현되는 상황이 도래할 수 있다. 따라서, 생물배양 외피는 지역의 극한 조건에서도 운영될 수 있는지에 대한 탐색이 반드시 선행되어야 한다.

따라서, 본 연구는 극한의 생물 배양조건을 지닌 계절 중 겨울철을 대상으로 미세조류 배양 외피를 기획, 운영하여 배양 외피의 상호 성능 및 실내 및 환경 변화 경향을 분석하여 미세조류 배양 외피의 겨울철 운영 가능성을 탐색하는 것을 목적으로 수행되었다.

연구는 미세조류 배양 외피 실험체와 축소 모형으로 구성된 Test-bed의 기획, Test-bed의 겨울철 운영을 통한 데이터 수집, 수집 데이터 분석 및 변인이 통제된 환경에서의 분석 데이터 산출을 위한 시뮬레이션 기획, 시뮬레이션 데이터 산출 및 분석의 4단계로 구성되었다.

2. Test-bed 기획 및 운영

2.1 Test-bed의 기획

미세조류 배양 외피 Test-bed는 보편적인 상호 규격과 동일한 단면 구성을 가진 PC(Polycarbonate) 재질의 실험체, 실내환경 모니터링 장비의 운용이 가능한 규모의 축소 모형 Mock-up, 배양 과정에서 요구되는 급·배기, 급·배수 및 배양액의 항온보관이 가능한 챔버로 구분되어 기획되었다. 미세조류 배양 외피 실험체는 바이오 에너지 생산

* 전남대학교 일반대학원 건축토목공학과 박사과정

** 전남대학교 건축학부 교수

(Corresponding author : School of Architecture, Chonnam National University, hshoon@jnu.ac.kr)

이 연구는 2025년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업 중견연구지원사업의 연구비 지원으로 수행하였습니다. (과제번호 : NR059464, 과제명 : 지역대응형 에너지스케이프 구현을 위한 스마트 건축외피 개발)

을 위한 조류 배양용 창호 구성 특허에 작성된 외피의 구동 방식을 시험체에 준용하여 상부 급수, 하부 배수를 통해 배양액을 순환시키며, LX Glass의 Glass Power Catalogue를 준용하여 두께 6T, 중공층 12mm의 보편적인 건축 창호 단면 규격으로 구성된 너비 1,000mm, 높이 1,500mm 규모의 시험체를 Test-bed의 정면부에 설치했다.

축소모형 Mock-up은 내측 너비, 깊이, 높이가 각각 1,310mm, 1,230mm, 1,450mm로 기획되어 실내환경 측정장비의 설치와 연구자의 출입이 가능하도록 기획되었다. Mock-up의 정면부는 시험체의 설치를 위해 SUS 재질의 창틀 프레임을 부착했으며, Mock-up과 프레임 사이의 비어있는 공간을 통해 유입되는 태양광을 통제하기 위해 UV 차단 천막을 시험체 설치 프레임에 부착하여 시험체만을 통해 빛이 유입될 수 있는 환경을 조성했다.

표1. 미세조류 배양 외피 Test-bed의 구성

T-01 (Photo-Cultured)		T-02 (Tank-Cultured)	
			
시험체 정면	시험체 내부	시험체 정면	시험체 내부

챔버는 Test-bed 운영에 필수적인 설비인 배양액 순환 펌프, 수중 온도 조절기, 산소분배기 2구를 배양액 보관용 아이스박스 내부에 설치하여 배양액의 급·배기 및 급·배수, 보온 기능을 부여했으며, 수류발생기를 설치하여 미세조류의 침전을 방지했다.

배양 대상 미세조류 종은 배양의 난이도와 생존성, 원생생물의 분열주기 등을 고려하여 1차적으로 Spirulina, Haematococcus, Chlorella 종을 선정했으며, 종균 공급의 용이성을 고려하여 최종적으로 Chlorella 종을 선정했다.

Chlorella 종 원균은 전북 장수, 광주광역시 농업기술센터 미생물배양센터에서 Photo-Cultured, Tank-Cultured 방식으로 배양된 2종의 Chlorella를 각각 T-01, T-02로 명명된 뒤 독립된 2체의 Test-bed에서 동시 운영되어 겨울철 극한 조건에서의 배양액 및 시험체의 건축적 성능 변화, 실내환경 변화 관련 데이터가 수집되었다.

Test-bed 운영의 시간적 범위는 겨울철 일조 조건 중 가장 짧은 일조시간을 지녀 배양속도가 가장 느린 동지 시점을 전후로 3일의 배양기간을 설정하여 최종적으로 7일간 Test-bed가 운영되었다. 데이터의 수집 시점은 대면적 외피 건축물의 대표유형인 중규모 업무시설의 운영 스케줄을 고려하여 오전 9시, 오후 1시, 오후 5시의 단위 시간을 설정하여 1일 3회, 총 21회 데이터가 수집되었다. 특히, 시험체의 가시광선 투과 정도를 의미하는 VLT(Visible Light Transmittance)가 핵심 데이터로 수집되어 T-01, T-02 시험체 간 비교분석 및 시뮬레이션의 기초 데이터로 활용되었다.

2.2 Test-bed 운영 데이터 분석

Test-bed 운영 데이터는 그림 1과 같이 T-01 배양 시험체의 VLT는 초기 69%에서 83%로 시간 경과에 비례하여 점진적인 상승하는 추세를 보였다. 운영 2일차부터 4일차까지 T-01의 VLT 측정치가 저하되는 구간이 나타나나 해당 구간의 최저 VLT는 71%로 초기 VLT인 69%보다 높게 나타났다. 생물 외피의 특성을 고려할 때 T-01 시험체의 배양 결과는 초기 미세조류 개체수보다 증식되지 않았으며, 이에 따라 T-01은 겨울철 온전한 배양을 통한 미세조류의 증식이 어렵다는 부분이 간접적으로 확인된다. 반면, T-02 시험체의 VLT는 초기 65%에서 운영 3일차에 이르러 51%까지 점진적으로 감소한 이후 시간 경과에 따라 점진적인 상승 추세로 74%까지 증가하는 변화 경향을 보인다. 초기 VLT 대비 3일차VLT가 14% 낮아진 부분을 통해 T-02 미세조류는 겨울철 배양환경에서도 온전한 배양이 진행되었음이 파악되며, 적정 배양기간은 3일로 판단된다.

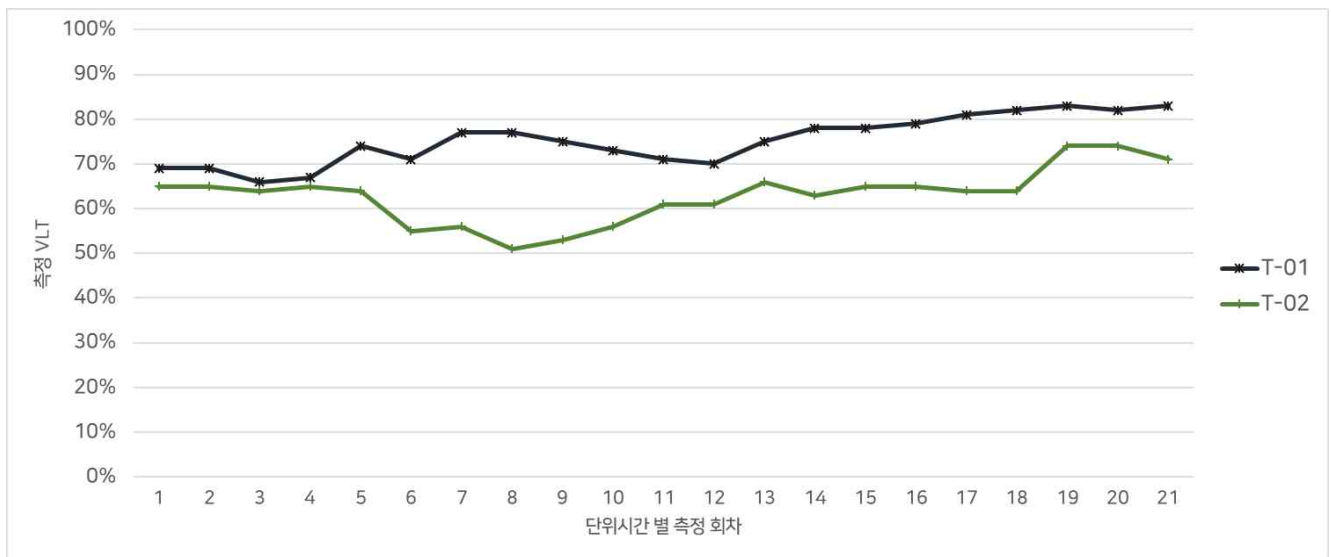


그림1. T-01, T-02 미세조류 배양 외피의 VLT 성능 변화 경향

VLT 데이터와 LX Glass의 Glass Power Catalogue에 명시된 제품군의 비교 결과, T-01 배양 시험체의 VLT는 초기 성능치인 69%를 기준으로 Super Low-E 제품군을 활용한 복층창호와 유사한 투과성능을 보였으나, 시간 경과에 따른 VLT 상승으로 인해 단판 Clear 유리 제품군과 유사한 수준의 성능이 발현되고 있음이 파악되었다. T-02 시험체 또한 초기 성능치는 Super Low-E 제품군을 기반으로 제작된 복층창호 제품군과 유사한 성능치를 보였으나, 운영 3일차까지 VLT가 감소하여 Super Double Low-E 제품군의 복층창호 투과성능인 51%와 유사한 수준의 성능치를 보였다. 하지만, 이후의 운영기간동안 T-02 시험체 또한 점진적인 VLT 상승 추세를 보였으며, 이에 따라 Super Low-E 단층 창호와 유사한 성능치로 변화했다.

이에 따라 겨울철 미세조류 배양 외피의 활용과 관련하여 Photo-Cultured Chlorella 종은 건축, 친환경의 양면에서 활용의 유의미성이 부족할 것으로 판단된다. 반면, Tank-Cultured Chlorella 종은 3일을 배양 한계시간으로 운영한다는 전제에 따라 50~60% 범주의 VLT 성능이 유지되어 건축, 친환경적 관점에서 유의미한 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구단계에서는 실내환경에 대한 변화가 검토되지 않아 미세조류 배양 외피의 겨울철 활용 가능성에 대한 종합적 검토가 수행되었다고 볼 수 없다. 따라서 수집된 VLT 데이터를 기반으로 실내 빛 환경 시뮬레이션을 수행하여 미세조류 배양 외피의 겨울철 활용 가능성에 대한 세부적인 탐색이 진행되었다.

3. 배양외피 적용공간 빛 환경 시뮬레이션 평가

3.1 빛 환경 시뮬레이션의 기획

이전 단계에서 시뮬레이션 수행 필요성이 대두됨에 따라 수집된 VLT 데이터를 특정 분석대상 공간에 적용한 빛 환경 시뮬레이션이 기획되었다. 아울러, 산출 데이터의 유의미성을 판단하기 위해 빛 환경 제도기준과의 비교검

토를 진행하여 실내공간의 쾌적성과 미세조류 배양 외피의 활용 가능성을 검토했다.

빛 환경 시뮬레이션의 핵심 환경 지표는 KS, LEED 등 국내·외 제도기준에서 빛 환경 평가지표로 명시된 실내 바닥면 조도로 설정했다. 이를 산출하기 위한 시뮬레이션 수행 프로그램은 3차원 공간 구현 및 Parametric Modeling 기능을 가진 Rhino Grasshopper와 실내·외 환경분석에 활용되는 Ladybug Series를 이용하여 분석을 진행했다.

분석대상 공간의 용도는 Test-bed 운영기간 설정 단계에서 고려된 미세조류 배양 외피의 대면적 적용 가능 건축유형인 업무시설로 설정되었다. 공간의 규격은 Kim et al(2014)의 연구에서 활용된 ASHRAE Standard 90.1 내용 중 중규모 업무시설로 규정된 11층 규모의 건축물의 Closed Office를 준용하여 너비 6,000mm, 깊이 4,500mm, 높이 2,700mm 규모로 구현되었다. 구현된 공간은 정면부가 정남향이 되도록 배치했으며, 정면부를 투명채 외피가 설치되었다고 설정하여 미세조류 배양외피와 일반 창호가 Double Skin 형식의 Curtain Wall로 구성되었다. 이에 따라 정면부 벽창문비(Wall Window Ratio, WWR)는 Curtain Wall의 최대 비율인 95%로 설정되었다. Double Skin의 내측 창호 물성은 LX Glass의 Glass Power Catalogue 제품군 중 보편적으로 중규모 업무시설의 외피에 활용되고 있는 5SKN376II 제품의 VLT 성능치인 56%를 반영했다.

시뮬레이션의 시간적 범위는 LEED v.4 Daylight Option 02에 명시된 평가 기준을 준용하기 위해 9월 22일 오후 3시로 설정했으며, 모든 VLT 데이터는 동일한 시점을 대상으로 실내 바닥면 조도가 산출되었다. 시뮬레이션의 장소적 범위 또한 VLT 데이터와 산출 데이터 간 정합성을 유지하기 위해 광주광역시 10년 평년 기후 데이터를 활용했다. 기상환경은 국제조명위원회(International Commission on Illumination, CIE)에서 제정한 CIE Standard Sky 방식을 활용했으며, 청명한 하늘모형을 활용하여 시뮬레이션을 수행했다.

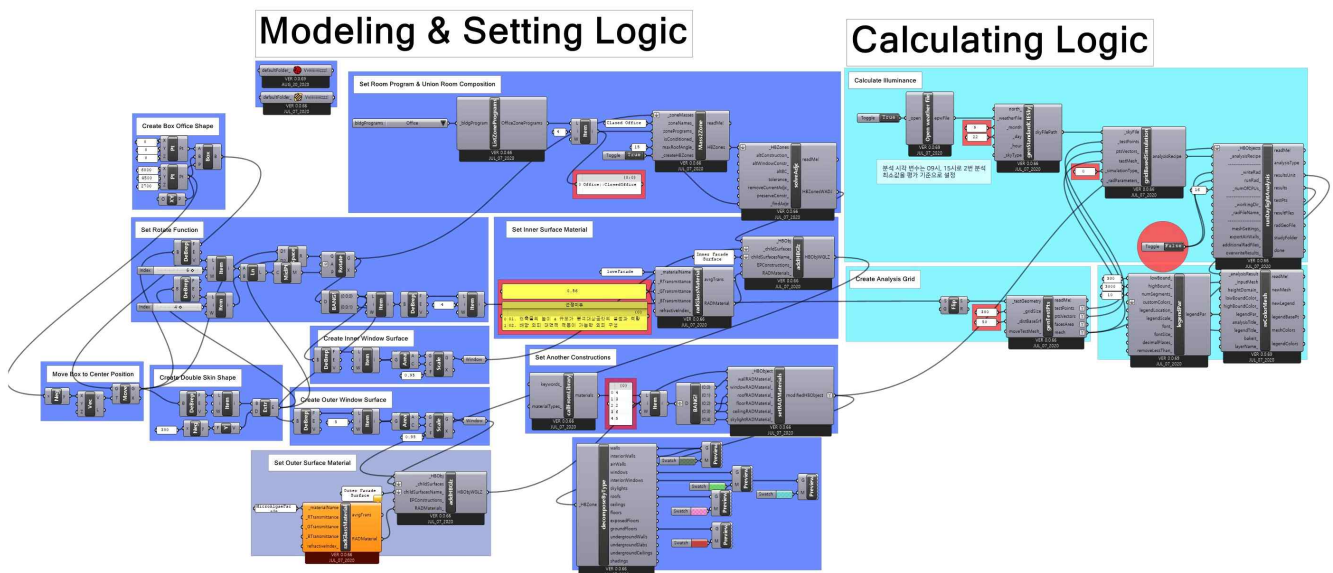


그림2. T-01, T-02 VLT 적용 LEED 기준 층측 면적비 변화 경향



그림2. T-01, T-02 VLT 적용 LEED 기준 층적비 변화 경향

3.2 산출 데이터와 LEED 제도기준 비교분석

산출된 조도 데이터 분석결과, T-01 시험체는 LEED v.4 Daylight Option 02에 명시된 전체면적 대비 300~3,000lx 구간에 분포하는 바닥면적 비율이 Test-bed 운영기간 내 75~75.93% 수준의 층적률을 보인다는 결과가 산출되었다. 최대 3점을 획득할 수 있는 Daylight 평가체계 상 T-01은 상시 2점을 획득할 수 있으며, 비교적 우수한 실내 빛 환경 조성능력을 지녔음이 확인되었다.

반면, T-02에서 산출된 바닥면 조도 데이터는 초기 시험에서 75%로 T-02와 유사한 수준을 보이거나 3일차에 이르기까지 점진적인 감소 추세를 보이며 70.37%까지 저하되어 LEED v.4 Daylight Option 02 평가체계 상 2점을 획득할 수 없다는 분석결과가 도출되었다. 비록 3일차 이후부터 VLT가 상승 추세를 보이며 75.93%까지 증대되는 경향을 보이거나, 미세조류의 배양기능이 핵심인 본 외피의 특성을 감안한다면 겨울철 배양 외피의 운영은 빛 환경 조성능력 관점에서 최소 기준에 미치는 수준일 것으로 판단된다. 하지만, 수치적인 차이는 2점 획득 기준 대비 최대 4.63% 수준으로 비교적 적은 차이를 보인다. 따라서, 10mm, 8mm 등 일반 창호의 단면 규격보다 조금 더 얇은 중공층으로 외피를 구성한다면 실내 빛 환경 조성능력이 LEED 기준 2점을 충족할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론

겨울철 극한환경에서의 미세조류 배양 외피 운영 가능성을 Test-bed 운영을 통해 탐색한 결과, Photo-Cultured 방식으로 배양된 Chlorella 종은 미세조류가 배양되지 않는 경향을 보였다. 비록 LEED 빛 환경 평가 기준과 관련하여 2점 이상의 점수를 상시 확보할 수 있으나, 바이오매스를 생산해야 하는 생물 외피의 특성상 Photo-Cultured의 겨울철 배양은 친환경적 관점의 유의미성이 없다고 사료된다.

반면, Tank-Cultured Chlorella 종은 VLT 감소 추세를

통해 미세조류가 겨울철에도 배양되었음이 확인되었고, 겨울철 한계 운영기간이 3일이라는 연구결과가 함께 도출되었다. 그러나, 실내 빛 환경 쾌적성 평가 결과는 2점 층적기준인 75% 대비 최대 4.63% 떨어져 1점을 획득하는 결과를 보였다. 따라서, 빛 환경이 중요한 공간에 미세조류 배양 외피를 적용하거나 겨울철에 운영하기 위해선 8mm, 10mm 등 얇은 중공층이 외피에 구성되어야 하며, 일반창호 규격을 준용한다면 채광의 중요도가 높지 않아 50~60% 수준의 VLT 성능을 지닌 건축창호가 활용되는 공간에 미세조류 배양 외피가 적용되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 극한의 환경조건을 고려하기 위해 겨울철을 대상으로 미세조류 배양을 진행했다. 그러나, 조건의 설정 대상이 일조환경을 중점으로 설정되었기 때문에 온도, 습도, 풍속 등 생물의 배양에 관여된 주요 환경인자에 대한 극한 조건의 설정이 부족하다는 한계를 지닌다. 따라서 향후에는 온·습도, 풍환경 등 다양한 환경조건이 극한인 상황에서의 Test-bed 운영이 병행되어 다양한 조건에서의 연구가 병행되어야 한다.

참고문헌

1. LX Glass. (2024, January). *Glass Power Catalogue*, LX Glass Homepage, Retrieved on April 04, 2024 from <https://www.lxglas.co.kr/ko/data-room/catalog/>
2. Han S. H., Choe S. J., Lim K. G., & Kim J. H. (2020). KIPO No. 10-2124119-0000, Seoul: Korean Intellectual Property Office. <https://doi.org/10.8080/1020180131532>
3. Kim S. H., Kim S. S., Kim K. W., & Cho Y. H. (2014). A study on the proposes of energy analysis indicator by the window elements of office buildings in Korea, *Energy and Buildings*, 73, 153-165.
4. U.S. Green Building Council (2018). LEED BD+C New Construction v4.1, USGBC, 225-228.