

전산유체역학 기반 공기방향 제어 알고리즘을 이용한 식물공장 공기 분포 균일화에 관한 연구

송제호*, 유태수**

*전북대학교 융합기술공학부(IT응용시스템공학)

**전북대학교 IT응용시스템공학과

e-mail:songjh@jbnu.ac.kr

A Study on Air Distribution Uniformity in Plant Factories using a Computational Fluid Dynamics-based Air Direction Control Algorithm

Je-Ho Song*, Taesoo Yuk**

*Dept. of Convergence Technology Engineering(IT Applied System Engineering),
Jeonbuk National University

**Dept. of IT Applied System Engineering, Jeonbuk National University

요 약

본 연구에서는 식물공장 내부 재배 공간에서 발생할 수 있는 공기 분포 불균일 문제를 해결하고 작물 생육 환경의 안정성을 확보하기 위하여 전산유체역학 기반 공기방향 제어 알고리즘을 적용한 공기방향 시뮬레이터 시스템을 설계하였다. 제안된 시스템은 송풍 장치와 공기방향 제어 장치를 통해 재배 공간 내 공기 흐름을 능동적으로 제어하여 환경 조건의 균일성을 유지하도록 구성하였다. 실험은 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경과 일반 테스트베드 환경을 각각 구성하여 수행하였으며, 잎 길이, 잎 수, 줄기 길이 및 생존율 등의 생육 지표를 비교 분석하였다. 그 결과, 공기 순환 시스템이 적용된 환경에서 작물 생육 상태가 보다 안정적으로 유지되고 생육 성능이 향상되는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제안한 공기방향 제어 알고리즘은 식물공장 내부 환경의 균일성을 향상시키고 작물 생육 품질을 개선하기 위한 효과적인 환경 제어 기술로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

최근 농업 분야에서는 노동력 감소와 생산성 향상 요구에 대응하기 위하여 정보통신기술과 자동화 기술을 활용한 식물공장(Plant Factory)에 대한 관심이 증가하고 있다. 식물공장은 온도, 습도, 조도, 이산화탄소 농도 등 다양한 환경 조건을 인위적으로 제어하여 작물의 생육을 최적화할 수 있는 시스템으로, 안정적인 생산과 품질 균일화를 동시에 달성할 수 있는 장점을 가진다.[1,2] 특히 엽채류와 같은 작물은 생육 환경 변화에 민감하게 반응하므로, 환경 조건을 균일하게 유지하는 것이 생산성 향상과 품질 관리 측면에서 중요한 요소로 작용한다.

식물공장 내부에서는 공기의 흐름이 온도와 습도 분포, 이산화탄소 농도 및 열 전달 특성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 작물 생육 균일성에 중요한 요인으로 작용한다.[3-5] 그러나 실제 재배 환경에서는 송풍 장치의 설치 위치, 풍향 및 풍속 조건, 시설 구조 등 다양한 요인에 의해 공기 분포가 불균일하게 형성될 수 있으며, 이러한 현상은 특정 구역에서 생육 편차를 발생시키고 전체 생산 효율을 저하시킬 수 있는 원인이 된다. 따라서, 식물공장 내부의 공기 흐름을 적절하게 제어하여 재배 공간 전반에 걸

쳐 균일한 환경을 유지하는 기술이 필요하다.

기존의 공기 흐름 제어 방식은 주로 경험적 설정이나 단순한 풍속 제어에 의존하는 경우가 많아, 다양한 환경 조건 변화에 능동적으로 대응하기 어려운 한계를 가진다. 특히 시설 규모가 확대되거나 작물 재배 밀도가 증가하는 경우, 단순한 제어 방식만으로는 공기 분포를 정밀하게 예측하고 제어하는 데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 활용하여 공기 흐름을 해석하고, 이를 기반으로 공기 방향과 유동 특성을 제어하는 방법이 제안되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 식물공장 내부 공기 흐름 특성을 분석하고 재배 공간 내 공기 분포 균일성을 향상시키기 위하여 전산유체역학 기반 공기방향 제어 알고리즘을 설계하고 이를 공기방향 시뮬레이터 시스템에 적용하였다. 또한 제안된 제어 알고리즘을 통해 재배 공간 내 공기 흐름을 효과적으로 제어하고, 다양한 운용 조건에서 공기 분포 균일화를 구현할 수 있는 가능성을 확인하고자 한다.

2. 본론

본 연구에서는 식물공장 내부 재배 공간에서 발생할 수 있는 공기 분포 불균일 문제를 해결하고 작물 생육 환경의 안정성을 확보하기 위하여 공기방향 시뮬레이터 시스템을 설계하고, 이를 기반으로 전산유체역학 기반 공기방향 제어 알고리즘을 적용하였다. 식물공장 내부는 다층 구조의 재배 베드가 배치된 제한된 공간으로 구성되며, 송풍 장치의 위치와 공기 흐름 방향에 따라 특정 구역에 공기가 집중되거나 정체되는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 공기 흐름의 불균일성은 온도와 습도 분포 차이를 유발하고, 결과적으로 작물 생육 편차를 발생시키는 주요 원인이 될 수 있으므로, 재배 공간 전반에 걸쳐 균일한 공기 흐름을 형성하는 것이 중요한 기술적 과제로 제시된다.

이를 위하여 본 연구에서는 공기 흐름을 능동적으로 제어할 수 있는 공기방향 시뮬레이터 시스템을 적용하였다. 해당 시스템은 송풍 장치, 공기방향 제어 장치, 환경 센서, 제어 장치 및 통신 모듈로 구성되며, 재배 공간 내 공기 흐름을 일정한 방향으로 순환시키고 필요에 따라 송풍 방향을 조정할 수 있도록 설계하였다. 특히 공기방향 제어 장치는 송풍 방향을 조절할 수 있는 구조로 설계되어 재배 환경 조건에 따라 공기 흐름의 방향과 분포를 유연하게 변경할 수 있도록 하였으며, 이를 통해 다양한 재배 조건에 대응할 수 있는 공기 흐름 제어 기능을 구현하였다.

또한 공기 흐름 제어의 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 전산유체역학 기반 공기 흐름 해석을 수행하였다. 전산유체역학은 유체의 흐름과 속도 분포를 수치적으로 계산하여 특정 환경에서의 유동 특성을 예측할 수 있는 해석 기법으로, 식물공장과 같이 복잡한 구조를 가지는 공간에서 공기 흐름을 분석하는 데 효과적으로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 재배 공간의 구조와 송풍 조건을 고려하여 공기 흐름 해석 모델을 구성하고, 다양한 공기 방향 조건에 따른 유동 특성을 비교 분석하였다. 이를 통해 공기 흐름이 특정 구역에 집중되거나 정체되는 영역을 최소화하고 재배 공간 전반에 균일한 공기 흐름을 형성할 수 있도록 공기방향 제어 알고리즘을 설계하였다.

실험은 실제 식물공장 환경과 유사한 밀폐형 테스트베드에서 수행되었으며, 다층 재배 구조를 갖는 공간 내에서 공기 순환 시스템 적용 여부에 따른 환경 제어 성능과 작물 생육 상태를 비교하는 방식으로 구성하였다. 실험 대상 작물은 엽채류 작물인 로메인 상추 계열 작물이었으며, 동일한 재배 조건 하에서 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경과 일반 테스트베드 환경을 각각 구성하여 비교군 실험을 수행하였다. 생육 상태 평가는 온도, 습도, pH, EC와 같은 환경 변수와 함께 줄기 길이, 줄기 둘레, 잎 개수, 잎 길이 및 잎 너비 등의 생육 지표를 중심으로 수행되었으며, 13일 동안의 변화를 추적하여 분석하였다.

공기방향 제어 알고리즘의 적용 효과를 확인하기 위하여 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경에서의 작물 생육 결과와 일반 환경 테스트베드에서의 생육 결과를 비교하였다. 그림 1은 실험

환경 및 테스트베드 구성 모습을 나타낸 것이고, 표 1과 표 2는 로메인 상추의 생육 결과를 각각 나타낸 것이다.

[표 1] 작물 생육 결과 비교(로메인 상추)

일시	온도	습도	pH	EC	줄기 길이	줄기 둘레	잎개수	잎길이	잎너비
일	℃	%	pH	dS/m	mm	mm	개수	mm	mm
1	17.1	61	7	1.5	4	3	6	79	40.5
2	17.2	62	7	1.5	4	3.5	6	81.5	41
3	17.3	62	7	1.5	4	3.8	6	83	41.3
4	17.2	62	7	1.5	4	4.1	6	86	41.6
5	17.4	61	7	1.5	5	4.5	6	88	42
6	17.3	60	7	1.5	5	5	6	89.5	42.5
7	17.6	61	7	1.5	5	5	6	91	42.8
8	17.2	63	7	1.5	5	5.4	6	92.5	43.2
9	17.3	62	7	1.5	5	6	6	93.6	43.5
10	17.1	61	7	1.5	5	6.8	6	97	44
11	17.5	63	7	1.5	5	7.5	6	101	44.4
12	17.3	60	7	1.5	5	7.8	6	104	44.8
13	17.2	60	7	1.5	5	8.5	6	107	45

[표 2] 비교군(일반 환경 테스트베드) 내부 온도 차이 측정 작물 생육 결과(로메인 상추)

일시	온도	습도	pH	EC	줄기 길이	줄기 둘레	잎개수	잎길이	잎너비
일	℃	%	pH	dS/m	mm	mm	개수	mm	mm
1	13	82	7	1.5	4	3	6	71	38.4
2	13	82	7	1.5	4	3	6	71	38.7
3	12	82	7	1.5	4	3	6	72	39.2
4	15	83	7	1.5	4	3	6	72	39.4
5	13	84	7	1.5	4	3.4	6	75	40.1
6	12	83	7	1.5	4	3.5	6	76	40.6
7	11	85	7	1.5	4	3.5	6	76	40.9
8	13	84	7	1.5	4	3.5	6	80	41
9	12	89	7	1.5	4	3.7	6	81	41
10	14	82	7	1.5	4	3.7	6	81	41
11	13	83	7	1.5	5	3.7	6	84	41.2
12	12	82	7	1.5	5	3.8	6	90	41.3
13	13	86	7	1.5	5	4	6	91	41.8



[그림 1] 실험 환경 및 테스트베드 구성 모습

먼저 표 1은 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경에서 측정한 로메인 상추의 생육 결과를 나타낸 것이다. 해당 결과에서는 평균 온도가 약 17°C 수준에서 안정적으로 유지되었고, 습도 및 양액 조건 또한 일정 범위 내에서 유지되면서 잎 길이, 잎 너비, 줄기 둘레 등의 생육 지표가 시간 경과에 따라 안정적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 공기방향 제어 알고리즘이 적용된 환경에서 재배 공간 내 공기 흐름과 온도 분포가 보다 균일하게 유지되었음을 의미하며, 작물 생육에 적합한 환경이 지속적으로 제공되었음을 보여준다.

반면 표 2은 공기 순환 시스템이 적용되지 않은 일반 테스트베드 환경에서 측정한 로메인 상추의 생육 결과를 나타낸 것이다. 비교군 환경에서는 온도와 습도 조건이 제안 시스템 적용 환경에 비해 상대적으로 불안정하게 나타났으며, 동일한 기간 동안의 생육 결과에서도 잎 길이와 잎 너비 증가 폭이 제한적으로 나타났다. 특히 일반 환경에서는 설정 기준인 평균 온도 17°C와 60%의 습도를 유지하지 못하는 것으로 관찰되었으며, 이는 재배 공간 내 공기 흐름의 불균일성과 환경 편차가 작물 생육에 직접적인 영향을 미쳤음을 보여준다.

표 1과 표 2를 비교하면, 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경에서 작물의 생육 상태가 전반적으로 우수한 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 공기 순환 시스템 적용 환경에서는 평균 잎 길이와 줄기 성장, 잎 너비 등의 생육 지표가 비교군보다 크게 나타났으며, 생육 속도 또한 보다 안정적으로 유지되었다. 이는 공기방향 제어 알고리즘을 통해 재배 공간 내 온도 및 공기 분포를 보다 균일하게 유지한 결과로 해석할 수 있으며, 단순한 송풍 방식이 아닌 방향 제어 기반 공기 흐름 제어가 실제 생육 품질 향상에 기여할 수 있음을 의미한다.

3. 결론

본 논문에서는 식물공장 내부 재배 공간에서 발생할 수 있는 공기 분포 불균일 문제를 해결하고 작물 생육 환경의 안정성을 확보하기 위하여 전산유체역학 기반 공기방향 제어 알고리즘을 적용한 공기방향 시뮬레이터 시스템을 설계하고, 이를 실제 식물공장 환경에 적용하여 성능을 검증하였다. 기존의 단순 송풍 방식은 재배 공간 내 특정 구역에 공기가 집중되거나 정체되는 현상이 발생하여 온도 및 환경 편차를 유발할 수 있으나, 본 연구에서 제안한 시스템은 공기 흐름 방향을 제어함으로써 재배 공간 전반에 균일한 공기 분포를 형성할 수 있도록 설계하였다.

또한 제안된 시스템의 효과를 검증하기 위하여 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경과 일반 테스트베드 환경을 각각 구성하고, 동일한 조건에서 작물 생육 상태를 비교 분석하였다. 실험은 다층 구조의 재배 환경에서 13일의 기간 동안 수행되었으며, 잎 길이, 잎 너비, 줄기 길이, 줄기 둘레 등 다양한 생육 지표를

중심으로 데이터를 수집하여 분석하였다.

그 결과, 공기 순환 시스템이 적용된 환경에서는 온도와 공기 흐름이 보다 안정적으로 유지되었으며, 작물 생육 상태 또한 전반적으로 향상되는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 공기 흐름 제어를 통해 재배 공간 내 환경 편차를 감소시킴으로써 작물 생육의 균일성과 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

두 실험군의 비교 결과에서도 공기 순환 시스템이 적용된 식물공장 환경이 일반 테스트베드 환경에 비해 생육 성능 측면에서 우수한 결과를 나타내었으며, 이는 공기 흐름의 방향 제어가 단순한 공기 순환 기능을 넘어 재배 환경 전반의 품질을 향상시키는 핵심 요소로 작용할 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 공기 흐름 제어 기술이 식물공장과 같은 밀폐형 재배 시스템에서 작물 생육 환경을 정밀하게 관리하는 데 중요한 역할을 수행할 수 있음을 보여준다.

따라서, 본 논문에서 제안한 전산유체역학 기반 공기방향 제어 알고리즘은 식물공장 내부 공기 흐름을 효과적으로 제어하여 재배 환경의 균일성과 안정성을 향상시키고, 작물 생육 품질 및 생산 효율을 개선할 수 있는 실질적인 기술적 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] G. S. Yu & C. M. Yeo. (2021). Smart Agriculture. Korea Institute of Science and Technology Planning and Evaluation. Retrieved from http://www.foodsecurity.or.kr/bbs/download.php?&bbs_id=qnaa04&page=3&type=1&doc_num=308
- [2] Y. C. Choi & I. H. Jang. (2019). Smart Farm in the 4th Industrial Revolution Era. Information & Communications Magazine, 36(3), 9–16. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07993379>
- [3] S. G. Sul, Y. T. Baek, Y & Y. Cho. (2022). Effects of Light Intensity, Light Quality and Photoperiod for Growth of Perilla in a Closed-type Plant Factory System. Journal of Bio-Environment Control, 31(3), 180–187. DOI: 10.12791/KSBEC.2022.31.3.180
- [4] S. G. Lee, J. S. Lee & J. H. Won. (2020). Effects of Lettuce Cultivation Using Optical Fiber in Closed Plant Factory. Protected Horticulture and Plant Factory, 29(2), 105–109. DOI: 10.12791/KSBEC.2020.29.2.105
- [5] J. S. Shin & J. Y. Hong. (2020). Simultaneous Heating and Cooling Multi-Air Conditioning System for Agricultural Products Management. The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, 20(6), 65–70. DOI: 10.7236/JIIBC.2020.20.6.65