# 단일창호를 적용한 KNU 식물공장의 냉난방 에너지 부하 해석

이찬규*, 김우태**
*공주대학교 기계공학과
**공주대학교 기계자동차공학부
e-mail:wtkim@kongju.ac.kr

# Analysis of the Heating and Cooling Energy Load of the KNU Plant Factory with Single Skin Windows

Chan Kyu Lee* and Woo Tae Kim**
*Dept. of Mechanical Eng., Kongju National University
**Dept. of Mechanical and Automotive Eng., Kongju National University

요 약

단일창호를 적용한 KNU 식물공장 모델의 냉난방 에너지 부하를 DesignBuilder를 이용하여 해석하였다. 상추의 적정생육온도인 20℃를 기준으로 이중창호를 적용한 경우와 에너지 소모량을 비교 분석하였다. 단일창호가 이중창호에 비해 연간 냉방부하는 약 128 MWh 감소하고 난방부하는 약 26 MWh 증가하여 단일창호가 냉방부하저감에 유리하다고 판단된다. KNU 식물공장의 중앙에 위치한 공간의 상부를 지붕구조물로 닫거나 계절별로 개폐하면서 냉난방부하에 미치는 영향을 계산하였다. 지붕구조물을 설치하게 되면 단위유닛이 취득하는 태양열이 감소하여 냉방부하가 감소하게 된다. 또한 지붕구조물을 상시 닫아두는 것이 계절별로 여닫는 것보다 냉방부하 저감에 유리하다. 식물공장 측면벽에 overhang과 sidefin을 설치하면 차양효과로 냉방부하가 감소하지만 감소비율은 크지 않았다. 에너지 부하의 대부분을 차지하는 냉방부하를 낮추기 위해 구조물이나 차양을 설치할 수 있으나 절감효과에 비해 설치비가 증가할 수 있기 때문에 추가 경제성 연구가 필요하다.

## 1. 서론

최근 이상 기후와 환경오염으로 인해 안정적인 농작물 생산이 어려워지면서 식량자원의 계획적 생산과 공급의 필요성이 대두되고 있다. 많은 국가들이 이를 해결하기 위해 다양한 연구를 하고 있으며 그 중 주목받는 기술적 대안으로는 식물공장의 개발을 들 수 있다. 식물공장은 내부의 환경을 일정하게 유지하여 사계절 내내 외부 조건의 영향을 받지 않고 일정한 작업을 통하여 계획적으로 작물을 키울 수 있는 생산시스템을 말한다.[1] 식물공장은 크게 완전제어형, 태양광 병용형, 태양광 이용형 세 가지 형식으로 나눌 수 있으며 본 연구에서 사용할 형태는 태양광 병용형이다. 태양광 병용형은 유리나 플라스틱 등의 광투과성 재료를 사용하여 태양광을 이용하고 흐린 날이나 일조시간이 짧을 때 인공광원을 보광하는 형태이다. 태양광을 이용하기 때문에 광원을 간단하게 확보할 수 있고 외부기후의 영향을 최소화 할 수 있다면 완전제어형에 가까운 재배가 가능하다.[2] 하지만 인공광원을 이용한 보광과 공조 등 환경유지에 추가적인 에너지와 비용이 든다. 최근 고유가로 인한 에너지 비용이 증가하면서 식물공장 분야에서도 LED(light emitting diode) 조명제어, 식물의 생육단계별 최적광량 제어, 신재생에너지 사용[3,4,5] 등의 에너지 절감과 효율을 최대화하기 위한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 DesignBuilder[6]를 이용하여 에너지 해석 연구를 수행하였다. KNU(Kongju National University) 식물공장 모델을 제작하여 국내 기후 데이터를 바탕으로 기준 식물생육온도, LED 보광주기, LED 보광량을 설정하고 식물공장 외피의 특성, 지붕구조물과 차양을 위한 overhang, sidefin 설치에 따른 에너지 부하의 변화를 분석하였다.

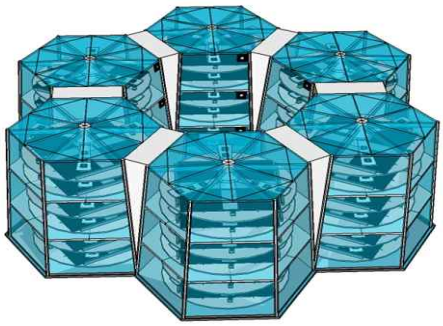
## 2. 연구방법

### 2.1. 식물공장모델

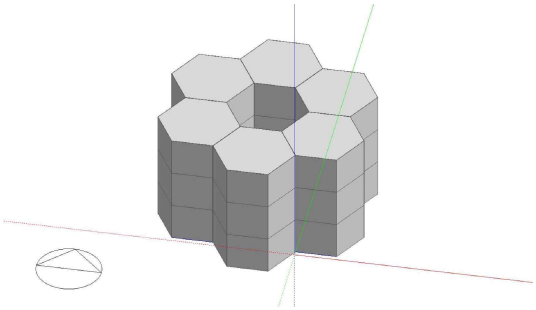
그림 1은 공주대학교 에너지자립형 그린빌리지 핵심기술 사업단 내에서 개발 중인 KNU 식물공장의 3차원 형상모델을 나타낸다. 육각형의 유리 온실 단위유닛의 면적은 52.4 $m^2$이며 단위유닛 3개가 결합된 3층 구조물을 1개 동으로 하며 6개 동이 벌집 형태로 결합된 구조물이다.

본 연구에서는 바닥면에 대해 직각을 이루고 있는 상태에서 서로 결합되어 있다고 가정하고 그림 2와 같은 DesignBuilder 모델로 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다. 1층 바닥면은 지면바닥조건, 1층과 2층 사이, 2층과 3층

사이는 100 mm 콘크리트 벽으로 설정하고 3층 천장은 창호가 적용되었다. 모든 측면 외벽은 창호가 적용되었다. KNU 식물공장은 농약을 사용하지 않고 작물을 계획생산하기 위해 밀폐 및 환경제어를 한다. 또한 태양광을 식물재배에 이용하기 위해 태양광 병용형으로 설계되었다. 본 연구에서는 식물생장 조절에 필요한 LED 램프의 발열만을 고려하고 그 이외의 내부 설비에 의한 발열은 고려하지 않았다.



[그림 1] KNU 식물공장 모델



[그림 2] KNU 식물공장의 DesignBuilder 해석모델

[표 1] 기준 시뮬레이션 조건

| | |
|---|---|
| 실내설정온도 | 20℃ |
| LED 발열 | 2단 재배시설<br>164 W/m$^2$ |
| LED 보광기간 | 18:00~10:00 |
| 창호조건 | 단일창호 PPG사<br>Clear Glass |
| 환기량 | 0 ACH |

## 2.2. 계산조건

먼저 LED 보광 및 냉난방공조를 하지 않은 식물공장 내부의 온도변화를 계산하였다. 하절기 7월 26일 최고 실내온도가 약 65.8℃, 동절기 12월 26일 최저 실내온도가 약 -9℃로 계산되었다. 문헌을 통해 조사한 상추의 재배조건에 맞추기 위해서는[7,8] 냉난방 공조시설을 사용해야 한다. 조사한 문헌에 따라 본 연구에서는 실내온도 20℃, 자연광에 더하여 LED 램프를 사용하여 보광주기를 16시간으로 맞추고 내부습도는 제습, 가습기를 사용하여 항시 60%를 유지하고 $CO_2$ 가스를 인위적으로 주입하며 긴급히 환기가 필요한 경우에만 환기를 하는 인공광 병용형 모델을 가정하였다. 공주대학교 천안공과대학과 인접한 평택의 EPW(EnergyPlus Weather file) 형식[9,10] 기후데이터를 사용하였다. 표 1의 조건을 기준으로 식물공장 실내설정온도, LED 보광량 및 보광주기, 유리외피의 구조를 변화시키며 냉난방 에너지 요구량을 계산하였다.

# 3. 결과 및 토의

## 3.1 식물공장 유리외피의 구조변화

기존 이중창호가 적용된 식물공장에서 식물 적정 생육온도 20℃에서 이중창호가 적용된 식물공장 건물자체의 에너지 부하는 연간 냉방부하 149 MWh, 난방부하 116 MWh였다. LED 보광으로 인한 발열을 고려할 경우 연간 냉방부하 910 MWh, 난방부하 8 MWh로 냉방부하가 급격히 증가했다.[11] 본 연구에서는 냉방부하를 저감하기 위해 이중창호를 단일창호로 변경하여 계산하였다. 외벽이 창호로 이루어져있지만 2단 재배시설을 사용하고 창호를 통해 들어오는 빛이 식물생장에는 부족하기 때문에 LED 보광을 적용한다. 실내설정온도가 20℃인 식물공장의 외벽에 PPG 사의 clear glass를 사용하여 계산하였으며 SCL로 표시하였다. 그림 3은 이중창호와 단일창호의 냉난방부하를 비교한 결과를 나타낸다. 단일창호의 경우 연간 냉방부하 782 MWh, 난방부하 34 MWh였다. 이중창호에 비해 단일창호가 냉방부하는 약 128 MWh 작지만 난방부하는 약 26 MWh 커진다. LED의 발열량이 크기 때문에 단일창호의 큰 열관류율이 냉방부하 저감에 유리하다. 실내의 발열량이 많은 경우는 단일창호를 사용하는 것이 냉방부하를 줄여 에너지 절감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

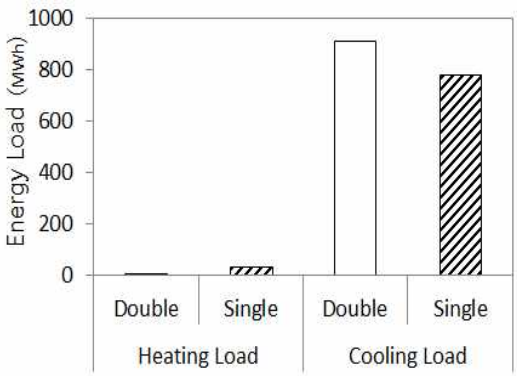
## 3.2 지붕구조물 변화에 따른 냉난방부하

그림 2의 가운데 공간 활용에 따른 냉난방부하 변화를 확인하기 위해 가운데 공간 지붕 개폐에 따른 영향을 해석하였다. 그림 2의 식물공장 가운데 공간에 지붕에 없는 기준 구조물을 W/O Roof로 표시하였고 가운데 부분에 지붕구조물을 설치한 경우는 W/ Roof로 표시하였다. 또한 지붕의 구조물을 계절에 따라 설치, 제거하며 냉난방부하를 계산하였다. 그림 4는 지붕구조물의 유무에 따른 각 층별 냉난방부하를 계산한 결과이다. 2층의 경우 외부 창호를 통한 열교환량은 1층과 비슷하나 1층의 천정면, 3 층의 바닥면에서 열을 얻게 되어 냉방부하가 크게 나타났다. 3층은 바닥을 제외한 모든 외피가 창호로 되어있고 특히 겨울철 지붕을 통해 손실되는 열이 각 층의 외부와 접하는 창호전체가 잃는 열보다 약 2배 많기 때문에 난방부하가 크게 나타났다. 표 2는 계절별 지붕구조물 개폐에 따른 4가지 Case의 연간 냉난방부하 계산 결과를 나타낸다. 지

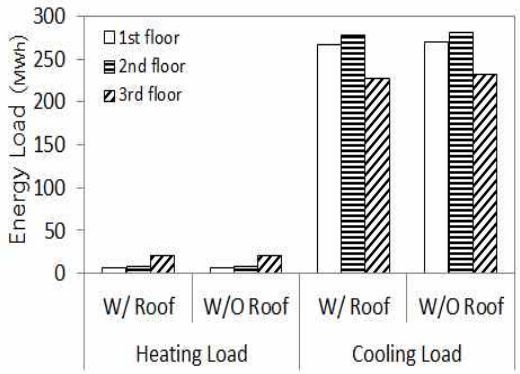
붕구조물이 있는 All Close Case는 지붕구조물이 없는 All Open Case에 비해 냉방부하가 약 11 MWh 정도 작았고 난방부하는 약 2 MWh 정도 컸다. 지붕구조물로 인해 지붕구조물 아래 단위유닛의 안쪽 창호에 들어오는 태양광량이 줄어들고 창호를 통해 얻는 열이 줄어 냉방부하는 감소하고 난방부하는 증가하게 된다. 지붕구조물이 있는 경우와 없는 경우를 기준으로 All Open Case에서 여름 6, 7, 8월만 지붕구조물을 설치한 Case와 All Close Case에서 겨울 1, 2, 12월만 지붕구조물을 제거한 Case를 분석하였다. 지붕구조물을 항시 닫아 놓는 것이 냉방부하 저감에는 가장 좋았다. 계절별로 열고 닫는 것보다는 닫아두는 것이 에너지 측면에서 유리하다고 판단된다. 하지만 냉방부하의 감소비율은 약 1% 정도로 작기 때문에 지붕구조물 설치에 따른 초기비용 증가를 고려하면 지붕구조물의 개폐를 위한 설비의 유용성은 크지 않은 것으로 판단된다.

### 3.3 Overhang, sidefin 설치에 따른 냉난방부하

3.2의 계산에서 지붕구조물이 차양역할을 해 냉방부하 저감에 도움이 된다는 것을 확인했다. 지붕구조물이 있는 식물공장 각 층 창호에 차양을 위한 overhang과 sidefin을 추가로 설치하고 냉난방부하 변화를 계산하였다. 그림 5와 6은 overhang과 sidefin의 설치 모습이다. 냉난방부하 계산결과는 표 3과 같다. Overhang과 sidefin의 길이가 길어질수록 차양효과 때문에 냉방부하는 감소하게 되고 난방부하는 증가하게 된다. 하지만 구조물의 형상을 고려할 때 0.5m 정도가 적합할 것으로 판단된다. Overhang과 sidefin을 0.5m로 동시에 적용할 경우 냉방부하는 746 MWh, 난방부하는 39 MWh였다. Overhang과 sidefin을 설치해도 냉방부하 감소비율은 크지 않고 설치에 따른 추가 비용이 발생할 수 있어 경제성 분석이 필요할 것으로 판단된다.



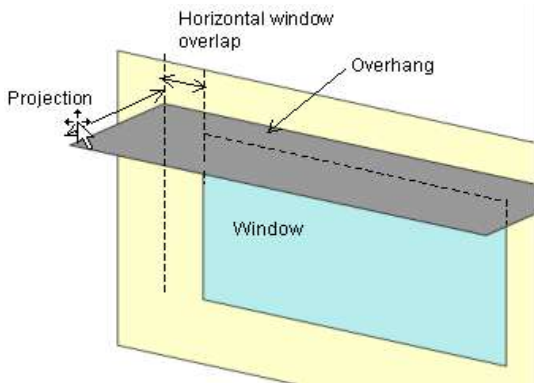

[그림 3] 이중창호와 단일창호의 연간 냉난방부하 비교



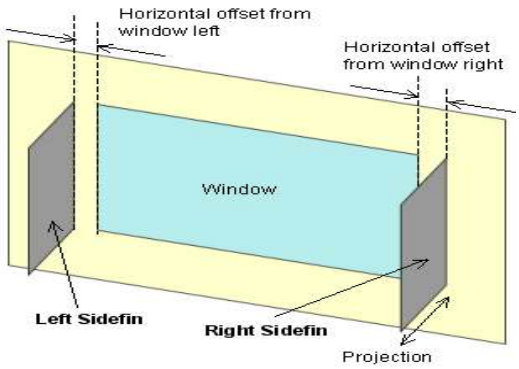

[그림 4] 지붕구조물에 따른 식물공장의 층별 연간 냉난방부하

[표 2] 계절별 지붕구조물의 여닫음에 따른 냉난방부하 변화

| | Cooling Load (MWh) | Heating Load (MWh) |
|---|---|---|
| All Open | 782 | 34 |
| Summer Close | 779 | 34 |
| Winter Open | 772 | 35 |
| All Close | 771 | 36 |




[그림 5] Overhang 설치모습




[그림 6] Sidefin 설치모습

[표 3] Overhang과 sidefin을 적용했을 때의 연간 냉난방부하 변화

| | Overhang | | Sidefin | |
|---|---|---|---|---|
| Length | Cooling Load (MWh) | Heating Load (MWh) | Cooling Load (MWh) | Heating Load (MWh) |
| 0.5m | 755 | 37 | 759 | 37 |
| 1.0m | 742 | 39 | 749 | 39 |
| 2.0m | 726 | 41 | 730 | 42 |

## 3. 결론

본 연구에서는 DesignBuilder를 이용하여 식물공장 외피의 특성, 지붕구조물 변화, 차양을 위한 overhang, sidefin 설치 여부가 냉난방부하에 미치는 영향을 분석하였다.

(1) 식물공장은 내부시설과 인공광원조명 발열로 에너지 소비 중 냉방부하가 차지하는 비율이 크다. 따라서 냉방부하를 줄이면 에너지 소비를 상당부분 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 냉방부하를 저감시키기 위해 식물공장 외피에 단일창호와 야간보광을 적용시켰다. 이중창호 대비 냉방부하는 약 128 MWh 감소하고 난방부하는 약 26 MWh 증가하였다.

(3) 지붕구조물을 식물공장에 적용하면 냉방부하를 약 11 MWh 정도 저감시킬 수 있다. 또한 지붕을 계절별로 개폐하는 것보다 1년 내내 닫아 놓는 것이 에너지 측면에서 유리하다. 또한 overhang과 sidefin의 설치는 차양효과로 냉방부하를 저감시킬 수 있으나 난방부하가 증가한다.

(4) 식물공장 냉방부하 절감을 위해 지붕구조물과 차양장치를 설치할 경우 추가비용이 발생하므로 냉난방부하 감소효과대비 추가설치비에 대한 경제성분석이 필요하다.

## 참고문헌

[1] Y. C. Um, S. S. Oh, J. G. Lee, S. Y. Kim, and Y. A. Jang, “The Development of Container-type Plant Factory and Growth of Leafy Vegetables as Affected by Different Light Sources”, Journal of Bio-Environment Control, Vol. 19, No. 4, pp. 333-342, 2010.

[2] J. H. Yun, “Status of Automatization in Protected Horticultural Facilities and Prospect of Plant Factory in Korea”, Journal of Bio-Environment Control, pp. 93-115, 1996.

[3] J. G. Han, S. Y. Kwon, and J. H. Lim, “A Design of LED Light Control System based on Ultrasonic Sensor for Energy Saving of Plant Factory”, Proceeding of the Korean Society for Internet Information Conference, Vol. 12, No. 1, pp. 401-402, 2011.

[4] S. Y. Kwon and J. H. Lim, “Improvement of Energy Efficiency in Plant Factory using Optimum Light Intensity Control According to Growth Stages of Plant”, Proceeding of the Korean Society for Internet Information Conference, Vol. 12, No. 1, pp. 85-86, 2011.

[5] H. Y. Lee, M. J. Kim, and S. Y. Shin, “Un-cooled High Efficient Solar Lighting System and its Application”, The Journal of Korea Information and Communications Society, Vol. 36, No. 11, pp. 1384-1402, 2011.

[6] DesignBuilder, “DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation for Design Builder v2.3”, 2010.

[7] Y. B. Lee, Y. H. Jin, S. S. Jo, and C. E. Lee, “Lettuce Production in Factory-style Plant Production System”, Korean Journal of Horticultural Science & Technology, Vol. 18, No. 2, P-1-2, 2000.

[8] K. Y. Choi and Y. B. Lee, “Effect of Air Temperature on Tipburn Incidence of Butterhead and Leaf Lettuce in a Plant Factory”, Journal of Korean Journal of Horticultural Science & Technology, Vol. 44, No. 6, pp. 805-808, 2003.

[9] U.S. Department of Energy, “Auxiliary EnergyPlus Programs - Extra programs for EnergyPlus”, 2010.

[10] ASHRAE., “ASHRAE Handbook —Fundamentals, Chapter 28, Climate Design Information”, pp. 28.1-28.10, 2005.

[11] C. K. Lee and W. T. Kim, “A Study on the Heating and Cooling Energy Load Analysis of the KNU Plant Factory”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, in press, 2012.