쿨튜브를 적용한 식물공장 다중창호의 냉방부하 저감에 관한 연구

소재현*, 김우태**
*공주대학교 에너지시스템공학과
**공주대학교 기계자동차공학부
e-mail:wtkim@kongju.ac.kr

A Study on the Reduction of Cooling Load of the Multiple Skin Windows for Plant Factory using Cool Tube

Jae Hyun So*, Woo Tae Kim**
*Dept. of Energy System Eng., Kongju National University
**Dept. of Mechanical and Automotive Eng., Kongju National University

요 약

본 논문에서는 쿨튜브를 적용한 식물공장 이중창호와 삼중창호의 열전달 차단성능을 3차원 수치해석을 통해 비교분석하였다. 이중창호 설계변수인 유입구의 개수와 중공층 두께조건에 따라 창호를 통해 식물공장 외부에서 내부로 유입되는 열전달량을 분석하였다. 쿨튜브를 통해 중공층으로 유입되는 공기속도가 이중창호에서는 0.95 m/s, 삼중창호의 경우는 0.50 m/s 이상일 때 창호를 관통하여 외부에서 내부로 유입되는 열에너지가 차단되는 결과를 얻었다. 삼중창호의 경우에 중공층 유입 공기속도를 0.50 m/s 이상으로 증가시킬 경우 오히려 식물공장 내부의 열에너지가 중공층으로 빠져나가 실내온도를 낮추는 효과가 나타났다. 본 연구의 결과를 바탕으로 국내 지역별 기후데이터의 온도조건을 고려한 분석을 추가적으로 진행할 계획이다.

1. 서론

최근 지구 온난화로 경작지가 줄어들어 세계적 식량위기가 가시화될 것으로 보인다.[1] 국내에서도 폭염, 태풍, 강우 등 연이은 이상기후에 따른 작황 부진으로 식물공장의 필요성이 증대되고 있다. 식물공장은 자연환경을 조절하여 계절에 관계없이 일정한 작업을 통하여 계획적으로 작물을 재배 할 수 있는 생산시스템을 말한다.[2] 식물공장은 1957년에 덴마크의 크리스텐센 농장에서 처음 시작되었다. 이 농장에서 채소의 일종인 크레스를 파종해서 수확까지 일괄 자동 생산한 것이 시초이다. 그 후 유럽을 중심으로 식물공장에 관한 연구가 진행되었고, 1970년대에 미국에서 인공광을 이용하는 완전제어형 식물공장이 개발되었다. 1980년대 들어서면서 미국에서 태양광을 이용하는 자동화된 대규모 식물공장이 실용화되었으며, 일본에서는 1997년에 히다치의 중앙연구소를 시작으로 1998년 20여개의 식물공장이 설치 가동되었다.[3]

식물공장의 종류는 완전 제어형과 광원 병합형으로 분류할 수 있다. 완전 제어형은 인위적으로 환경을 제어하여 사계절 내내 외부 조건의 영향을 받지 않고 식물을 키우는 방식이다. 광원 병합형은 완전 제어형과 달리 LED(light emitting diode)램프와 같은 인공 광원에 더하여 태양광을 함께 사용한다. 우리나라의 에너지 조사 보고서에 의하면 건축 분야의 에너지 소비는 국내 총 에너지 소비량의 약 25%를 차지하는 막대한 양이다. 이 중에서 창문을 통한 에너지 손실은 건물 전체 에너지 소비량의 약 10~30%를 차지한다.[4]

광원 병합형 식물공장은 태양광을 사용하기 때문에 창호의 사용 면적이 상대적으로 더 넓다. 일반 외피와 비교할 때 창호의 열관류율이 상대적으로 크기 때문에 외피가 주로 창호로 이루어진 식물공장은 일반 건물대비 더 큰 냉난방부하가 발생된다. 이러한 이유로 식물공장의 에너지 소비를 저감할 수 있는 대체에너지의 적극적인 활용이 필요한 실정이다. 태양열, 풍력, 수소 에너지와 같은 여러가지 대체에너지 기술의 적용과 함께 지열을 이용한 지중매설관에 관한 연구가 지금까지 국내외적으로 진행되고 있다. 대체에너지 이용기술 중 하나인 지중 매설관은 땅속에 플라스틱이나 금속관을 매설시키고, 그 안으로 공기를 불어넣어서 연중 일정한 지중의 열을 이용해 건축물의 냉난방 에너지를 줄이는 장치이다. 개념자체는 비교적 간단하지만, 기후 조건에 따라서는 많게는 50%가 넘는 냉방부하를 줄일 수 있다.[5]

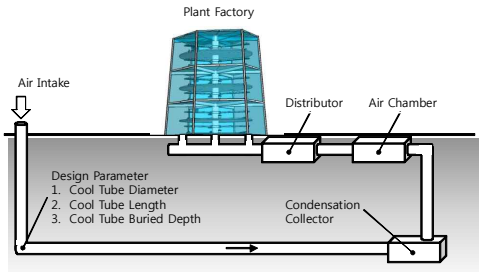
본 논문에서는 식물공장의 냉방부하 저감을 위해 지중매설관에서 공급되는 저온의 공기를 활용한 이중창호와 삼중창호 시스템의 구조 및 설계변수조건에 따른 열차단 성능을 비교하였다. 식물공장 다중창호를 통해 외부에서 내부로 유입되는 열전달량을 계산하기 위하여 범용 열유동 해석 프로그램인 FLUENT[7]를 사용하였다.

2. 연구방법

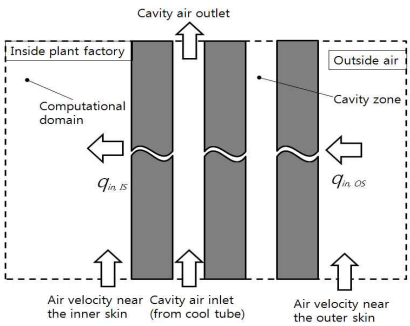
2.1. 식물공장 다중창호 시스템

[그림 1] KNU 식물공장

그림 1은 공주대학교 에너지자립형 그린빌리지 핵심기술 사업단에서 개발한 KNU 식물공장의 3차원 모델의 외관이다. 육각형 유리온실 단위유닛 3개가 결합된 3층 구조물을 1개 동으로 하며 6개 동이 벌집 형태로 결합된 구조물이다. 영국 DesignBuilder사에서 개발한 건축물 에너지 및 환경 시뮬레이션 프로그램인 DesignBuilder[8]를 활용하여 그림 1의 식물공장에 유리재질의 이중창호를 채택한 경우에 대하여 냉난방부하 해석이 실시되었다.[9]



[그림 2] 쿨튜브 시스템 개요도



[그림 3] 삼중창호 시스템의 단면 개요도

본 연구에서 식물공장의 에너지 소비를 저감하기 위해 채택한 지중매설관을 활용한 다중창호 시스템의 개념도는 그림 2와 같다. 지중매설관 설치 시 하절기 습기응축에 의한 응축수를 배수하기 위해서는 관의 기울기를 2%이상으로 유지해야하며 응축수 배수장치를 설치하여 배수펌프 또는 자연배수를 통해 응축수를 배출하여야 한다. 또한, 관 내부표면에 은 입자를 코팅하여 세균이나 곰팡이 발생을 억제하는 것이 가능하다.[10]

그림 3은 지중매설관을 통해 연중 일정한 온도의 공기가 삼중창호의 내부쪽 중공층으로 공급되어 식물공장 내외부의 공기와 열적상호작용을 하며 다른 한쪽의 중공층은 공기가 유입되지 않는 삼중창호의 개념도를 나타낸다. 그림 3에서 다중창호 내피, 외피를 통해 유입되는 단위면적당 열전달률, 열유속은 $q_{in,IS}$, $q_{in,OS}$ 으로 표기하였다. 삼중창호를 통한 열전달은 내외기 사이의 온도차로 인해 발생하지만 내피와 외피 표면 근처에서의 유동조건에 따라 대류열전달량이 변화하며 이로 인해 삼중창호 전체의 열관류율이 달라진다. 이중창호의 경우에는 그림 3에서 오른쪽에 위치한 중공층과 유리외피 한 장이 생략된 구조이다.

2.2. 해석 방법

2.2.1 해석도구

다중창호 내외기의 온도와 유동조건에 따른 열전달 현상을 분석하기 위해 FLUENT를 사용한 계산을 수행하였다. 3차원 정상상태의 유동으로 가정하였으며 질량보존, 운동량보존, 에너지보존 방정식의 해법을 통해 속도장과 온도장 분포를 계산하고 다중창호 표면을 통한 열전달량을 분석하였다. 난류유동의 해석에는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 그림 3에 점선으로 표시된 영역은 다중창호의 단면을 포함하는 계산영역을 나타낸다.

2.2.2 케이스 선정

창호의 성능을 결정하는 핵심변수로 공기유입구의 개수, 다중창호 중공층의 두께를 선정했다. 공기유입구의 개수는 3개, 5개를 고려하고 다중창호 내부쪽 중공층의 두께는 10 mm, 20 mm, 30 mm의 경우로 선정하여 분석을 하였다. 삼중창호의 경우 외부쪽 중공층의 두께는 10 mm로 고정하였다. 설정된 설계변수를 이중창호와 삼중창호에 적용하고 중공층 유입공기속도에 따른 열전달 차단성능을 분석하였다.

[표 1] 삼중창호 물성치

	Material	Cp (J/kg-K)	ρ (kg/m^3)	k (W/m-K)
Outer Skin	Glass	1000	1000	0.9
Center Skin	Glass	1000	1000	0.9
Inner Skin	Glass	1000	1000	0.9
Cavity	Air	1006.4	1.2	0.02

[표 2] 계산 케이스

Case No.	Glass Type	T_{inside} (℃)	$T_{outside}$ (℃)	T_{in} (℃)	Inlet Location	No. of Inlet	V_{in} (cm/s)	Cavity Thickness (mm)	$q_{in,\ IS}$ (W/m^2)	$q_{in,\ OS}$ (W/m^2)
1	Double Skin Window	20	30	16.5	Bottom	3	95	10	12.1	19.6
2								20	6.4	20.4
3								30	3.0	22.2
4						5		10	10.3	22.5
5								20	3.6	25.1
6								30	0.0	28.0
7	Triple Skin Window					5	50	10	5.9	11.0
8								20	2.0	11.7
9								30	-0.6	12.5
10							95	10	3.3	12.4
11								20	-1.4	13.8
12								30	-3.8	14.6

그림 1의 육각형 단위유닛의 한쪽 측면은 다중창호 2개 유닛을 측면으로 연결해 구성할 계획이므로 본 연구에 사용된 다중창호의 계산영역은 높이 3.5 m, 폭 2.25 m의 크기로 설정하였다. 다중창호는 5 mm 두께의 sodalime glass 재질을 가지고 있으며 표 1에 물성치가 주어져 있다. 내피와 외피 사이의 중공층 두께는 설계인자의 하나로 고려하였다. 다중창호 중공층에 공급되는 공기의 온도는 참고문헌을 바탕으로 16.5℃로 설정하였다.[11]

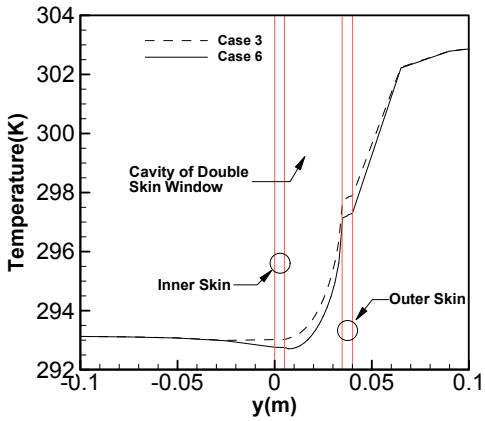
3. 결과 및 토의

3.1. 창호의 경계조건

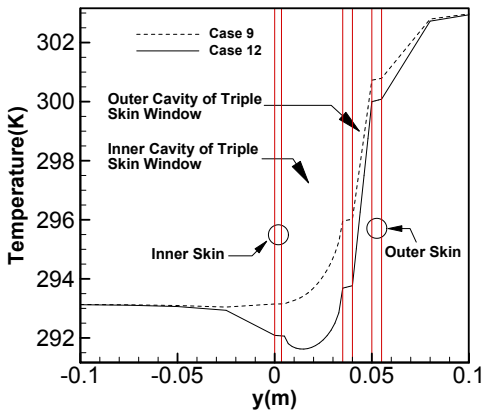
창호의 열전달 성능에 미치는 영향을 계산하기위해 창호 내외부의 온도 및 유동조건을 우선적으로 설정해야 한다. 먼저 생산기간이 짧아 식물공장에서 손쉽게 재배가 가능한 엽채류의 생장조건인 20℃를 실내온도로 유지한다고 가정하였다. 식물공장 외부는 하절기 혹서기 조건인 30℃의 온도를 설정하였다. 창호의 열전달 성능은 창호 내외부의 온도뿐만 아니라 대류열전달을 지배하는 창호표면에서의 평균 공기속도에 의해 크게 좌우된다. 본 논문에서는 연중 운영되는 식물공장의 창호표면에서의 평균 공기속도는 1 m/s로 가정하였다.[6]

3.2. 이중창호의 열차단 성능

이중창호의 중공층 두께와 유입구 개수에 따라 내부로 유입되는 $q_{in,\ IS}$의 변화량을 분석하였다. Case 1~6을 보면 공기유입구의 개수가 증가할수록 열차단 성능이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 이중창호의 중앙을 관통하는 선상에서의 이중창호와 주위공기의 온도분포를 나타낸다. 그림 4에서 실내 쪽은 y축의 음의 방향이며, 실외 쪽은 y축의 양의 방향이다. 유입구의 개수가 증가하면 내부로 유입되는 열유속이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. Case 6의 경우 외부에서 내부로 유입되는 열이 대부분 차단되는 것을 확인 할 수 있다.



[그림 4] 주위공기를 포함한 이중창호 단면 중심선에서의 온도분포



[그림 5] 주위공기를 포함한 삼중창호 단면 중심선에서의 온도분포

3.3. 삼중창호의 열차단 성능

삼중창호와 이중창호의 단열성능을 비교하기 위해 공기가 정체되어 있는 추가적인 중공층 이외에는 모든 조건을 동일하게 설정하고 성능을 비교하였다. Case 9에서 삼중창호의 내부측 중공층으로 유입되는 공기의 속도가 0.50 m/s일 때 식물공장 내부로 유입되는 열이 대부분 차단되었다. Case 12의 경우 중공층의 공기온도가 실내온도보다 더 낮게 유지되어 실내로부터 중공층으로 열이 빠져나오

는 것이 관찰된다. Case 9와 12를 비교해보면 중공층으로 유입되는 공기속도가 빨라지면 삼중창호의 열차단 성능이 향상됨을 알 수 있다. 또한 식물공장 내부에 LED광원이나 내부설비로 인한 발열량이 클 경우 중공층을 통해 여분의 열을 제거할 수 있다면 식물공장 냉방부하를 저감할 수 있는 요인이 된다. 하지만 중공층에 유입되는 공기속도가 클수록 지중매설관 시스템에서 지중과 공기 사이의 열교환 부하가 증가한다.[11]

4. 결론

본 논문에서는 식물공장에 적용된 창호의 종류와 설계변수에 따른 열차단 성능을 비교분석하였다.

1) 이중창호의 경우는 0.95 m/s의 공기유속에서 외부에서 내부로의 열전달이 차단되는 결과를 확인하였다.

2) 삼중창호의 경우는 내부의 중공층 두께조건에 따른 공기유입속도의 변화를 비교한 결과 0.50 m/s부터 중공층에서 식물공장 내부로 유입되는 열전달이 차단되는 것을 확인하였다.

3) 중공층 유입 공기속도가 같을 경우 중공층의 두께가 얇을수록 이중창호 대비 삼중창호의 열차단 성능의 차이가 더 크게 나타났다.

본 연구의 결과를 바탕으로 국내 지역별 기후데이터의 온도조건을 고려한 분석을 추가적으로 진행할 계획이다.

참고문헌

[1] A. Elizabeth, “Rice Production in a Changing Climate: A Meta-analysis of Responses to Elevated Carbon Dioxide and Elevated Ozone Concentration”, Global Change Biology, Vol. 14, No. 6, pp. 1642-1650, 2008.

[2] 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 Vege표 as Affected by Different Light Sources”, Journal of Bio-Environment Control, Vol. 19, No. 4, pp. 333-342, 2010.

[3] Y. S. Chang, H. G. Song, and D. E. Kim, “Development of a Chain Conveyor Type Row-Spacing System for Plant Factory”, Journal of Bio-Environment Control, Vol. 14, No. 1, pp. 7-14, 2005.

[4] E. Y. Kang, M. W. Oh, and B. S. Kim, “A Study on the Heat Transfer Phenomenon through the Glazing System”. Journal of Korean Solar Energy Society, Vol. 29, No. 2, pp. 32-37, 2009.

[5] K. H. Lee and R. K. Strand, “The Cooling and Heating Potential of an Earth Tube System in Buildings”, Energy and Buildings, 40, pp 486 - 494, 2008.

[6] J. H. So and W. T. Kim, “A Study on the Reduction of Summertime Cooling Load of the Triple Skin Window for Plant Factory”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 351-357, 2012.

[7] ANSYS Inc., “ANSYS FLUENT User's Guide Release 13.0” 2010.

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

[9] 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.

[10] REHAU Ltd., “REHAU AWADUKT THERMO”, Air-ground Heat Exchanger System for Controlled Ventilation, www.rehau.co.uk

[11] Y. Lee and J. Yoon, “Optimal System Design Method for a Building Application of Cool Tube System”, Journal of the Architectural Institute of Korea (Planning & Design), Vol. 17, No. 6, pp. 177-186, 2001.