

식물공장 이중창호의 하절기 열전달 성능 분석

소 재 현, 김 우 태^{*†}

공주대학교 에너지시스템공학과, *공주대학교 기계자동차공학부

Performance Analysis of Summertime Heat Transfer Characteristics of the Double Skin Window for Plant Factory

Jae Hyun So, Woo Tae Kim^{*†}

Department of Energy System Engineering, Kongju National University, Cheonan 331-717, Korea

*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 331-717, Korea

(Received November 29, 2011; revision received February 3, 2012)

ABSTRACT: To reduce the summertime cooling load of a plant factory, a concept design was performed for the double skin window which utilizes the low temperature air from a ground coupled heat exchanger. The design parameters were selected as the number of cavity air inlet, the cavity thickness, the location of cavity air inlet, and the configuration of cavity air outlet. A parametric study was conducted in a systematic way to evaluate the heat transfer characteristics of the double skin window. As the number of cavity air inlet and the cavity thickness increase, the heat flux from outside air to indoor air was decreased. The effect of the location of cavity air inlet was not significant and the larger cavity air outlet area gave us relatively better heat blocking performance from outside hot air. This study demonstrated that it is possible to develop an improved double skin window by utilizing a ground coupled heat exchanger.

Key words: Double skin window(이중창호), Cool tube(쿨튜브), Ground coupled heat exchanger(지중매설관), Cooling load(냉방부하)

기 호 설 명

C_p	: 비열 [J/kg K]
k	: 열전도도 [W/m K]
T	: 온도 [°C]
$q_{in,IS}$: 이중창호 내피 유입 열유속 [W/m ²]
$q_{in,OS}$: 이중창호 외피 유입 열유속 [W/m ²]
V	: 공기속도 [cm/s]
ρ	: 밀도 [kg/m ³]

1. 서 론

최근 일본의 지진과 원전 사태, 호주의 홍수 등과 같은 세계적인 재난과 이상 기후 현상이 농업 생산의 불확실성을 증대시키고 식량 안보를 위협하고 있다. 이에 대한 안정적인 식량공급의 대응책으로 주변 환경에 구애 받지 않고 작물 성장에 필요한 환경을 제어함으로써 계획적인 생산이 가능한 식물공장에 대한 관심과 필요성이 증가하고 있다.⁽¹⁾

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

† Corresponding author

Tel.: +82-41-521-9256; fax: +82-41-555-9123

E-mail address: wtkim@kongju.ac.kr

제어형과 달리 LED(Light Emitting Diode) 램프와 같은 기존 광원에 더하여 태양광을 함께 사용한다. 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 냉난방부하를 발생시킨다. 특히, 최대부하가 발생하는 하절기의 식물공장 냉방부하 저감을 위해 창호의 성능개선이 중요하다.

건물에너지 부하저감기술의 하나인 지중매설관(cool tube 또는 ground coupled heat exchanger)은 지중의 적정 깊이에 금속관을 매립하여 건물의 공조에 필요한 외기를 유입시키는 장치이다. 유입된 외기는 지중매설관을 통과하는 과정에서 지중과 열교환을 하여 하절기에는 외기보다 낮은 온도의 공기를 제공한다. 지중매설관에서 얻은 낮은 온도의 공기를 이중창호의 중공층에 공급할 경우 하절기 냉방부하를 절감할 수 있는 한 가지 방안이 될 수 있다.

본 연구에서는 하절기 식물공장 냉방부하의 저감을 위해 지중매설관에서 공급되는 저온의 공기를 활용한 이중창호 시스템의 개념설계를 수행하였다. 이중창호 설계변수를 변화시키며 범용 열유동 해석 프로그램인 FLUENT⁽²⁾를 사용하여 시스템의 열전달 성능을 분석하였다. 인자별 성능변화를 비교분석하여 식물공장에 적용 가능한 시스템의 형태를 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 식물공장 이중창호 시스템

Fig. 1은 공주대학교 에너지자립형 그린빌리지 핵심기술 사업단에서 개발 중인 KNU 식물공장의 3차원 모델의 외관이다. 육각형 유리온실 단위유닛 3개가 결합된 3층 구조물을 1개 동으로 하며 6개 동



Fig. 1 The KNU plant factory.

이 별집 형태로 결합된 구조물이다. 영국 Design Builder사에서 개발한 건축물 에너지 및 환경 시뮬레이션 프로그램인 DesignBuilder⁽³⁾를 활용하여 Fig. 1의 식물공장에 유리재질의 이중창호를 채택한 경우에 대하여 냉난방부하 해석을 실시하였다.⁽⁴⁾

수치해석에 사용된 식물공장의 상세조건을 요약하면 다음과 같다. 단위유닛 1개 동의 한 변의 길이는 4.5 m이고 높이는 3.5 m이다. 1층의 바닥면에만 지면바닥조건으로 설정하였고 천장과 외벽은 모두 유리창호로 설정하였다. 모든 창호는 6 mm soda-lime glass 2장 사이에 공기층 12 mm가 존재하는 이중창이 적용되었다. 환기량 0 ACH(Air Change per Hour), 실내상대습도 61.4%, 외기조건은 공주대학교 천안공과대학과 인접한 평택의 EPW(Energy Plus Weather file)형식 기후 데이터의 조건을 사용하였다.

내부온도를 20℃로 유지한 경우 연간 냉방부하가 151 MWh이고 난방부하는 115 MWh로 냉방부하로 인한 에너지 요구량이 크게 나타났다. 특히, 열채류 생육에 필요한 LED광을 조사하고 LED에 공급된 전력의 80%가 열로 전환되는 조건에서는 냉방부하가 250 MWh이고 난방부하는 57 MWh로 냉난방부하의 차이가 더 커졌다. 따라서 식물공장의 에너지 부하를 절감하기 위해 하절기 냉방부하를 감소시키는 것이 가장 효과적인 방법이 될 수 있다.

본 연구에서 식물공장의 에너지 소비를 저감하기 위해 채택한 지중매설관을 활용한 이중창호 시스템의 개념도는 Fig. 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 내부표면에는 입자를 코팅하여 세균이나 곰팡이 발생을 억제하는 것이 가능하다.⁽⁵⁾ Fig. 3은 지중매설관을 통해

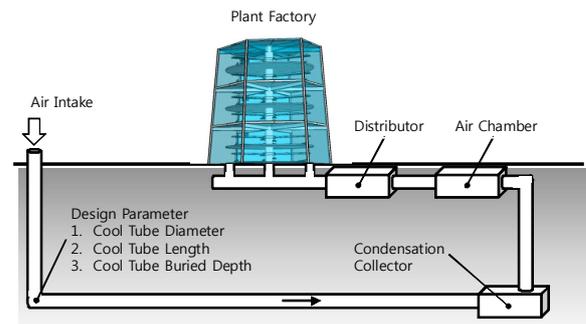


Fig. 2 A schematic of the cool tube system.

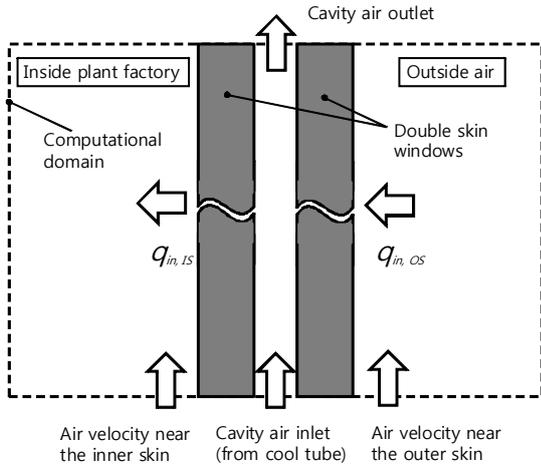


Fig. 3 A schematic of the double skin window cross section.

연중 일정한 온도의 공기가 이중창호의 중공층으로 공급되어 식물공장 내외부의 공기와 열적상호작용을 하는 개념도를 나타낸다. 이중창호를 통한 열전달은 내외기 사이의 온도차로 인해 발생하지만 내피와 외피 표면 근처에서의 유동조건에 따라 대류 열전달량이 변화하며 이로 인해 이중창호 전체의 열관류율이 달라진다.

2.2 해석 방법

2.2.1 해석 도구

이중창호 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 이중창호 표면을 통한 열전달량을 분석하였다. 난류 유동의 해석에는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. Fig. 3에 점선으로 표시된 영역은 이중창호의 단면을 포함하는 계산영역을 나타낸다.

2.2.2 케이스 선정

이중창호의 성능을 결정하는 핵심변수로 공기유입구의 개수, 이중창호 중공층의 두께, 공기유입구의 위치, 공기유출구의 배치를 선정했다. 공기유입구의 개수는 1개, 3개, 5개를 고려하였고, 이중창호 중공층의 두께는 10 mm, 20 mm, 30 mm의 경우를 고려하였다. 공기유입구의 위치와 공기유출구의 배치는 이중창호 전면에서 바라보았을 때 Fig. 4와 같이 5가지 type에 대한 해석을 수행하였다.

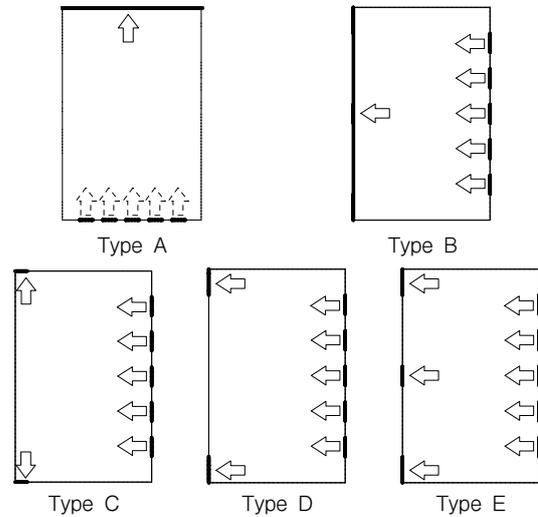


Fig. 4 Configurations of inlet and outlet.

Table 1 Properties of the double skin windows

	Material	C_p (J/kg-K)	ρ (kg/m ³)	k (W/m-K)
Outer Skin	Poly-carbonate	1200	1090	0.19
Inner Skin	Poly-carbonate	1200	1090	0.19
Cavity	Air	1006.4	1.2	0.02

Fig. 1의 육각형 단위유닛의 한쪽 측면은 이중창호 2개를 사용하여 구성할 계획이므로 본 연구에 사용된 이중창호의 계산영역은 높이 3.5 m, 폭 2.25 m의 크기로 설정하였다. 이중창호는 5 mm 두께의 polycarbonate 재질을 가지고 있으며 Table 1에 물성치가 주어져 있다. 내피와 외피 사이의 중공층 두께는 설계인자의 하나로 고려하였다. 이중창호 중공층에 공급되는 공기의 온도는 참고문헌을 바탕으로 16.5°C로 설정하였다.⁽⁶⁾

3. 결과 및 토의

3.1 이중창호의 경계조건

전 장에서 선택된 4가지 핵심변수가 이중창호의 열전달 성능에 미치는 영향을 계산하기 위해서 이중창호 내외부의 온도 및 유동조건을 우선적으로 설정해야 한다. 먼저 생산기간이 짧아 식물공장에서 손쉽게 재배가 가능한 엽채류의 성장조건인 20°C를 실내온도로 유지한다고 가정하였다. 식물공장 외부

는 하절기 혹서기 조건인 30°C의 온도를 설정하였다. 창호의 열전달 성능은 창호 내외부의 온도뿐만 아니라 대류열전달을 지배하는 창호표면에서의 평균 공기속도에 의해 크게 좌우된다. 연중 운영되는 식물공장의 창호표면에서의 평균 공기속도에 대한 정보가 부족한 상태이므로 Table 2와 같이 이중창호 표면의 공기속도조건을 변화시키며 이중창호 내피, 외피를 통해 유입되는 단위면적당 열전달률, 열유속($q_{in,IS}$, $q_{in,OS}$)을 계산하였다. (Type A configuration in Fig. 4) 이때, 이중창호의 중공층은 정체된 공기로 채워져 있고 이중창호 내부표면과 외부표면에서의 평균 공기속도는 동일하다고 가정하였다. Table 2에서 이중창호 표면의 평균 공기속도에 따라 $q_{in,IS}$ 가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 평균

Table 2 Heat flux through the inner and outer skins depending on the convective air velocity near the skin surfaces ($T_{inside} = 20^{\circ}\text{C}$, $T_{outside} = 30^{\circ}\text{C}$)

Test No.	V_{air} (cm/s)	$q_{in,IS}$ (W/m^2)	$q_{in,OS}$ (W/m^2)
1	1	1.8	1.8
2	5	3.9	3.9
3	10	5.1	5.1
4	50	8.9	8.9
5	100	11.7	11.7
6	200	14.5	14.5
7	500	17.5	17.5

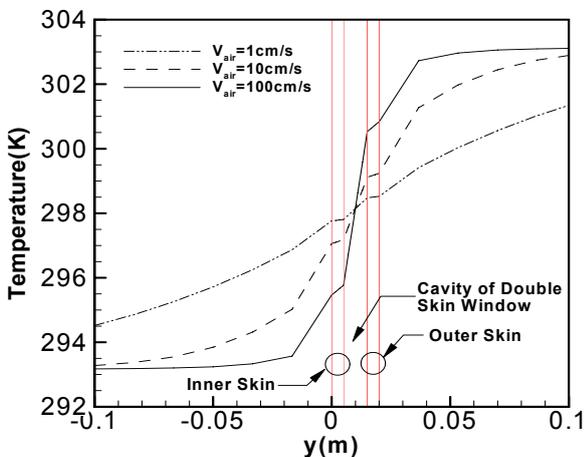


Fig. 5 Temperature profile along the center line of the double skin window and surrounding air.

공기속도의 변화에 따른 이중창호를 관통하는 중심선에서의 온도분포를 나타낸다. 공기속도가 빨라질수록 표면 근처에서의 온도구배는 커지고 이로 인해 열유속이 증가한다. 본 연구에서 수행된 4가지 핵심변수별 민감도 계산에서는 통상적인 식물공장 운전조건 하의 이중창호 내외부 표면에서의 평균 공기속도를 1 m/s로 가정하였다.

3.2 공기유입구 개수의 영향

이중창호의 중공층으로 공기를 공급하는 유입구의 개수는 열전달 성능에 영향을 미치는 한 가지 변수이다. 유입구의 개수가 증가하면 공기유입의 안정성이 좋아지며 이로 인해 창호 외부에서 내부로 유입되는 열에너지 차단효과가 증가한다. 식물공장에 공급되어야 하는 저온공기의 유량은 지중매설관의 개수, 길이, 매설깊이를 결정하는 인자이다. 따라서 지중매설관 시스템의 설치비용을 절감하려면 가장 효율적으로 외부로부터의 열유입을 차단할 수 있는 유입구의 형태와 개수의 선정이 중요하다. Table 3에 나타난 바와 같이 Case 1~Case 3에서 중공층 공기가 정체되어 있고 중공층 두께만 변하는 경우의 $q_{in,IS}$ 를 계산하여 모든 민감도 해석의 기준으로 삼았다. 와 중공층 두께가 증가할 때 공기층의 열차단 효과가 증가하여 $q_{in,IS}$ 가 감소하였다. Case 4~Case 6에서 다른 설계변수는 고정하고 공기유입구의 개수를 1, 3, 5개로 변화시켰다. 유입구당 공기유입량이 일정하므로 유입구의 개수가 늘어날수록 저온의 공기유입량이 증가하여 $q_{in,IS}$ 가 감소하는 결과를 얻었다. Case 1과 비교해본다면 유입구가 1개 일 때는 오히려 중공층에 공기유입이 없을 경우보다 $q_{in,IS}$ 가 더 크게 나타났다. Case 1에서 중공층 전체공기의 평균온도는 25°C이며, Case 4의 경우 저온공기의 유입으로 중공층 평균온도가 24.72°C로 낮아졌다. 이에 따라 Case 4에서 외피를 통해 중공층으로 유입되는 열전달량은 Case 1의 92 W에서 117 W로 25 W가 증가하였으나 중공층 유출구를 통해서 유입구로 유입되는 열전달량 대비 16 W가 더 배출되었다. 따라서 Case 4에서 내피를 통해 내부로 유입되는 열전달량은 Case 1의 92 W에 대하여 9 W가 더 많은 101 W로 나타났다. 하지만 유량이 증가한 Case 6의 경우 Case 1 대비 외피를 통해 중공층으로 유입되는 열전달량은 66 W가 늘어난 반면, 중공층 유출구로는 76 W가 더 배출되어 내피를 통해 내부로 유입되는 열전달량은 10 W가 감소하였다.

Table 3 Simulation cases

Case No.	T_{inside} (°C)	$T_{outside}$ (°C)	T_{in} (°C)	Inlet Location	No. of Inlet	Outlet Type (Fig. 4)	V_{in} (cm/s)	Cavity Thickness (mm)	q_{in, IS_2} (W/m ²)	q_{in, OS_2} (W/m ²)				
Case 1	20	30	16.5	-	-	-	-	10	11.7	11.7				
Case 2								20	7.9	7.9				
Case 3								30	5.8	5.8				
Case 4								Bottom	Type A	75	10	12.7	14.7	
Case 5										3	75	10	11.7	17.7
Case 6										5	75	10	10.3	19.9
Case 7										75	20	3.4	21.1	
Case 8										5	75	30	-0.2	21.6
Case 9								Side	Type A	50	30	1.7	18.7	
Case 10										Type B	32	30	1.1	18.3
Case 11										Type B	48	30	-0.1	23.5
Case 12										Type C	48	30	0.4	23.2
Case 13										Type D	48	30	0.3	23.4
Case 14								Type E	48	30	0.1	23.5		

Case 6의 경우 유입구 5개로 유량은 증가했지만 내피를 통해 내부로 유입되는 열전달량은 82 W로 여전히 큰 값을 가진다. 내피를 통한 열전달을 더 효과적으로 차단하기 위해서는 중공층을 통해 유입되는 저온의 공기유량을 증가시킬 필요가 있다. Fig. 6은 공기유입구 개수의 변화에 따른 이중창호 중공층 내부공기의 온도분포를 나타낸다.

3.3 이중창호 중공층 두께의 영향

Case 6~Case 8에서 중공층 두께의 변화에 따른 영향을 계산해 보았다. 중공층 유입구를 통해 공급되는 공기의 유속이 75 cm/s로 중공층 두께가 증가

함에 따라 공기유입량이 비례하여 증가하고 열차단 성능 또한 증가하였다. 특히, Case 8의 경우 이중창호 내피를 통해 실내로 유입되는 열이 완전히 차단되고 오히려 중공층 내의 저온의 공기가 열을 빼앗아 가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 이중창호의 중앙을 관통하는 선상에서의 이중창호와 주위공기의 온도분포를 나타낸다.

Fig. 7에서 실내 쪽은 y축의 음의 방향이며, 실외 쪽은 y축의 양의 방향이다. Case 8의 경우 중공층의 공기온도가 실내온도보다 낮게 유지되어 실내로부터 중공층으로 열이 빠져나오는 것이 관찰된다. Case 8과 Case 9를 비교해보면 중공층으로의 공기

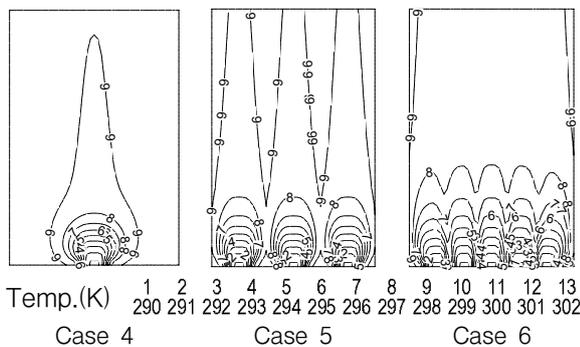


Fig. 6 Temperature distribution in the double skin window cavity in terms of the number of cavity air inlet.

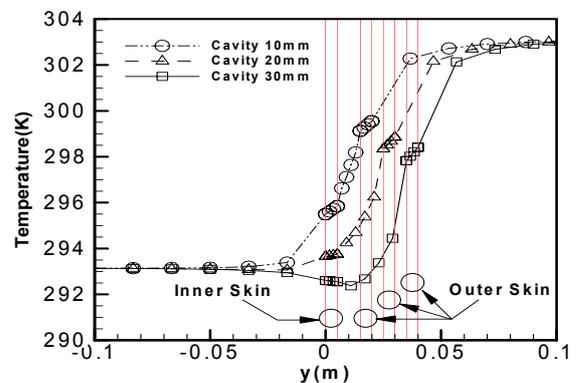


Fig. 7 Temperature profile along the center line of the double skin window and surrounding air(Case 6~Case 8).

유입속도가 빨라지면 이중창호의 열차단 성능이 향상됨을 알 수 있다. 하지만, Case 9에서 공기유입속도가 33% 감소하였으나 $q_{in,IS}$ 는 그다지 증가하지 않는 결과를 얻었다.

공기유입속도가 클수록 지중매설관 시스템에서 지중과 공기 사이의 열교환 부하가 증가하므로 이중창호의 열차단 성능이 확보되는 한도 내에서 최대한 중공층으로 유입되는 공기속도를 낮게 유지하는 것이 필요하다.⁽⁶⁾ 지중매설관 시스템의 부하 증가에 따른 설치비를 분석하여 최적의 중공층 유입 공기속도를 결정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 중공층 유입구 위치의 영향

이중창호 중공층으로의 공기유입구가 아래에 위치한 경우 상대적으로 긴 거리를 유입공기가 통과하여야 하므로 창호의 열차단 성능이 낮을 것으로 예상되어 공기유입구의 위치를 측면으로 배치한 Type B 방식에 대한 계산을 Case 10과 Case 11에서 수행하였다. Case 8, Case 11과 Case 9, Case 10의 조합은 동일한 유량 조건이지만 공기유입구의 위치만 하부에서 측면으로 변경된 경우를 비교한 계산이다. 하지만, 공기유입구의 위치변화에 따른 열차단 효과에의 영향은 크지 않았다. 하지만, 유입구 형상 및 위치에 따른 중공층 공기유동의 변화가 이중창호 열차단 성능에 미치는 영향은 차 후에 좀 더 면밀한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

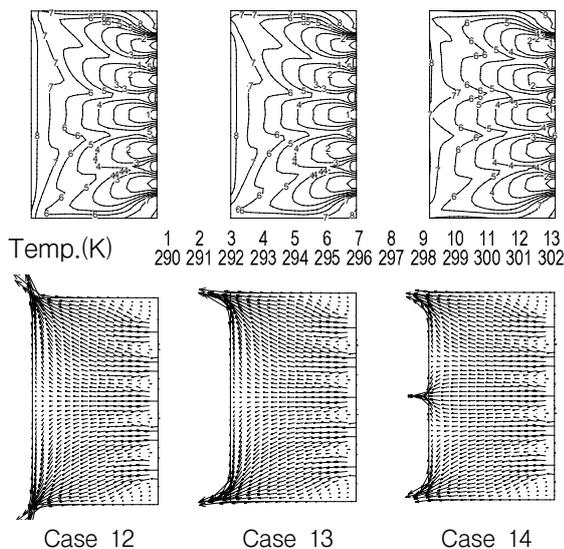


Fig. 8 Temperature and velocity distributions in terms of the cavity air outlet configuration.

3.5 중공층 유출구 배치의 영향

공기유입구의 영향에 더하여 중공층에서 배출되는 공기의 유출구 배치가 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Case 8, Case 11~Case 14에서 공기유량은 동일하지만 출구조건이 Fig. 4의 5가지 type으로 주어졌던 경우들의 계산을 수행하였다. 계산결과 중공층 내부공기의 속도분포와 온도분포에 다소간의 차이는 발생하지만 $q_{in,IS}$ 에는 큰 차이가 발생하지 않았다. $q_{in,IS}$ 의 차이는 최대 0.5 W/m²로 나타났다. 유출부의 면적이 상대적으로 큰 Type A와 Type B의 열차단 성능이 더 크게 나타났다. Fig. 8은 Case 12~Case 14에 대한 중공층 내부공기의 온도분포와 속도분포를 나타낸다.

4. 결 론

지중매설관에서 공급되는 저온의 공기를 활용하는 이중창호의 열차단 성능에 영향을 미치는 인자들에 대한 수치해석을 수행하였다.

(1) 공기유입구의 개수를 1개, 3개, 5개로 변화시켰을 때 공기유입량의 증가와 함께 열차단 성능이 향상되었다.

(2) 중공층의 두께를 10 mm, 20 mm, 30 mm로 변화시켰을 때 공기유입량의 증가와 함께 열차단 성능이 향상되었다. 하지만, 공기유입량의 증가는 지중매설관 시스템의 부하를 증가시키는 단점이 있다.

(3) 공기유입량을 일정하게 유지한 채 공기유입구 위치를 하부와 측면에 두었을 때를 비교한 결과 열차단 성능의 차이는 크지 않았다. 하지만, 추가의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 공기유출구의 배치에 따른 차이를 비교한 결과 공기유출구의 면적이 클 때의 열차단 성능이 더 크게 나타났다.

향후 최적의 이중창호 시스템을 설계하기 위해 본 연구에서 고려된 인자들에 더하여 지역별 외기온도 변화, 복사열전달 효과 등을 고려한 연구를 추가적으로 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/에너지자립형 그린빌리지 핵심기술 사업단).

참고문헌

1. Do, J., Kwon, S., and Lim, J., 2011, A Design of Context-Aware Architecture to Improve Luminous Intensity Uniformity of Plant Factory, Proceedings of the Korean Society for Internet Information 2011 Summer Annual Conference, pp. 113-114.
2. ANSYS Inc., 2010, ANSYS FLUENT User's Guide Release 13.0.
3. DesignBuilder, 2010, DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation for Design Builder v2.3.
4. Lee, C. and Kim, W. T., 2012, 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.
5. REHAU Ltd., REHAU AWADUKT THERMO, Air-ground Heat Exchanger System for Controlled Ventilation, www.rehau.co.uk
6. Lee, Y. and Yoon, J., 2001, Optimal System Design Method for a Building Application of Cool Tube System, Journal of the Architectural Institute of Korea (Planning and Design), Vol. 17, No. 6, pp. 177-186.