대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 152~157 KSME 01S418

태양열 외기 난방 시스템의 열성능 시뮬레이션 및 검증 연구

강동언*· 이의준*· 현명택**

Solar Air Heating System Thermal Performance Simulation and Verification

Dong-Un Kang*, Euy-Joon Lee*, Myung-Taek Hyun**

Key Words: UTC(Unglazed Transpired Collector), TRNSYS(Transient System Simulation program), EES(Engineering Equation Solver)

Abstract

UTC(Unglazed Transpired Collector) system has recently emerged as a new solar air heating technology. It is relatively inexpensive because it has not a glazed material. And it demonstrates efficient particularly for the applications in which larger wall area facilities with a high outdoor air requirement. Mathematical algorithm for UTC thermal modeling has been understood for further improvement of the system. EES and TRNSYS model of actual solar wall panel could be developed for computer simulations under other conditions. Computer models could be validated with the measured data from fixed outdoor test cell in KIER(Korea Institute of Energy Research). Major design parameters could be identified such as panel configuration and absorptivity and emissivity values for UTC design.

기호설명

A : 총 집열판 면적[m^2]
A_s : 집열판 표면면적[m^2] = $(1-\sigma)A$
c_p : 비열[J/kg-K]
D : 기공직경[m]
h : 열전달 계수[W/m^2-K]
I_T : 집열기에서 흡수한 일사량[W/m^2]
$\dot{m}_{out}$: 집열기를 통과하는 공기질량유량[kg/s]
Nu_D : D가 특성길이인 Nusselt number
P : 기공 피치[m]
$\dot{Q}_{abs}$: 태양흡수에너지[W]
$\dot{Q}$: 부하[W]
$\dot{Q}_u$: 유효 획득 에너지(W)
Re_D : D가 특성길이인 Reynolds number
T : 온도(℃)
α : 흡수율
ε : 방사율
ε_{HX} : 집열기의 열교환 유효도
σ : 집열판 공극율
σ_{sb} : 스테판-볼츠만 상수[W/m^2-K^4]

하첨자

cond : 전도
conv : 대류
rad : 복사
sur : 주위
amb : 외기
col : 집열판
out : 집열판 출구
plen : 공기층
wall : 외벽체 표면

* 한국에너지기술연구원
** 제주대학교 기계공학과

1. 서 론

최근 국제유가의 지속적인 상승과 에너지 수요의 증가로 에너지 공급의 90%이상을 수입에 의존할 수밖에 없는 우리나라로서는 특히 급신장세를 보이고 있는 건물관련 에너지소비에 대한 혁신적인 에너지저감기술 개발 및 환경오염대책 차원에서 대체에너지기술 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

대체에너지기술의 성공적인 활용을 위해서는 손쉬운 적용, 환경 친화 그리고 적정 경제성을 포함해야 한다. 그러나 대부분의 국내 태양열 난방시스템은 설치 운영부분과 경제성 부분에 많은 제약이 있는게 사실이었다. 이에 본 연구에서는 태양열 공기 난방 시스템으로 최근 경제적으로 우수하다고 알려진 UTC(unglazed transpired collector) 시스템의 국내적용 기술개발을 위해 체계적인 UTC 시스템의 이론해석을 정립하고 실제로 실험을 통하여 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 시스템 적용시 열성능에 중요한 요소로 작용하는 주요변수들에 대해 민감도를 분석하고 향후 시스템 개선을 위한 연구의 토대를 마련하고자 한다.

2. 시스템 이론

2.1 UTC 시스템

최근 건물의 난방에너지 절감기술로 세계적으로 주목받고 있는 UTC 시스템은 시스템이 단순, 간단하여 조립화 모듈화 부품으로 보급성과 생산성이 우수할 뿐만 아니라 단순히 유리커버가 없

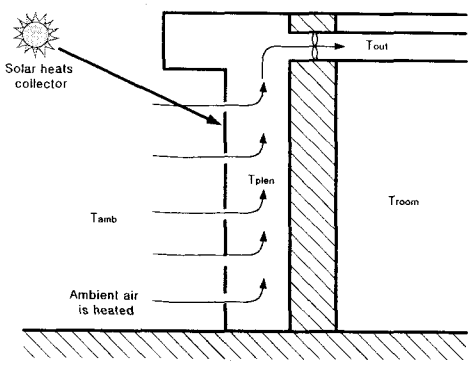

Fig. 1 Perspective view of an UTC system

는 집열판을 건물의 남쪽벽에 설치하기만 하면 되기때문에 초기투자 설치비용이 상대적으로 아주 저렴하고 경제적으로 매우 우수한 기술이다. 이 시스템의 주요기술인 UTC 집열판은 수많은 기공들로 이루어진 천공철판식 집열판이다. 집열판의 형상은 파형 또는 절곡형이며 건물의 남쪽벽면에 설치하였을 때 태양열 흡수율 측면과 구조강성유지 측면에서 유리한 장점을 가지고 있다. 건물 외부의 공기는 Fig. 1과 같이 집열판과 외벽사이의 공기층으로 집열판의 기공들을 통하여 태양열을 흡수하여 빨려들어 온 후 공기층 위로 상승하여 최종적으로 건물 내부로 연결된 덕트를 통하여 유입된다. 이 시스템은 건물내부의 순환공기를 재가열하지 않고 난방부하의 증가없이 충분한 신선외기를 유입할 수 있으므로 실내 공기환경을 크게 개선할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러므로 신선한 외기를 많이 요구하는 건물인 공장형 건물 또는 학교건물과 같은 대형 건물에 적용시 에너지 절감으로 막대한 이익을 창출할 수 있다.

UTC 시스템의 에너지절감방법은 3가지이다. 에너지 절감량 중 대부분은 집열판에 직접 입사된 일사량이며 이 에너지는 집열판을 통과하여 흐르는 공기와 대류에 의해 공기층으로 에너지가 전달된다. 두 번째는 집열판을 통과한 공기가 외벽과 집열판 사이의 공기층에서 위로 상승하면서 외벽표면으로부터 대류에 의해 에너지를 전달받는다. 마지막으로 세 번째는 벽체 열 손실감소로 외벽을 통과하는 온도차가 UTC 집열판에 의해 감소되기 때문에 건물내부와 공기층 사이의 낮은 온도차가 벽을 통과하는 전도 열전달률을 감소시킴으로써 결과적으로 에너지를 절감하게 된다.

UTC 시스템의 열성능평가를 위해서는 연간 시뮬레이션 동안 많은 계산이 요구되므로 여기에 필요한 이론식들은 정확하게 적용할 필요가 있다. 다음절에 시스템의 전반적인 이론을 제시하였다.

2.2. 열성능 분석 이론

UTC 시스템의 열성능은 건물에서 요구하는 공기유량에 대하여 일사량(I_T) 대비 집열판과 건물벽체 사이의 공기층 온도와 외기온도차 즉, 공기상승온도($T_{plen} - T_{amb}$)로 산정한다. 열전달

메커니즘은 4개의 에너지평형방정식으로 크게 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{out} c_p (T_{plen} - T_{amb}) = \dot{Q}_{conv,col-air} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{out} c_p (T_{out} - T_{plen}) = \dot{Q}_{conv,wall-air} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{cond,wall} = \dot{Q}_{conv,wall-air} + \dot{Q}_{rad,wall-col} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{rad,wall-col} = \dot{Q}_{conv,col-air} + \dot{Q}_{rad,col-sur} \quad (4)$$

식 (1)과 (2)는 외부에서 공기층(plenum)으로, 그리고 공기층에서 건물내부로의 공기유량에 기초한 에너지 평형 방정식이다. 공기층에서 공기온도는 균일하다고 가정하였는데[1] 이는 복잡한 CFD 분석에 대한 필요한 조건들을 해소할 수 있다. 식 (3)은 외벽표면에서의 에너지 평형 방정식이다. 식 (4)는 집열판에서의 에너지 평형 방정식이다. 에너지흐름에 대한 표시는 $\dot{Q}_{mode,from-to}$와 같다. 즉, $\dot{Q}_{conv,col-air}$는 집열판에서 공기로의 대류를 표시한다.

식 (4)에서는 집열판에서 외기로의 대류손실은 없다고 가정하였다. 이 가정은, 공기접근속도(즉, 단위 유로면적 당 공기유량)가 0.02 m/s 이상이고 집열판 면적이 구석손실을 무시할 수 있을 정도로 충분히 클 때 실험적으로 이미 증명되었다[1].

위 4개의 에너지평형방정식을 계산하기 위해서는 에너지흐름에 관한 몇 개의 비율방정식이 요구된다. 먼저 집열판에서 공기층으로의 대류에 의한 열전달 상관식으로 검증된 실험식을 사용하였다[1].

$$Nu_D = 2.75(P/D)^{-1.2} Re_D^{0.43} \quad (5)$$

이 상관식은 기공 직경 변수에 기초하여 Nusselt number를 결정하고 $h_{conv,col-air}$를 구하기 위해 사용된다. 집열판의 열교환 유효도는 식 (6)에 의해 계산한다[2].

$$\varepsilon_{HX} = 1 - \exp\left(-\frac{h_{conv,col-air} A_s}{\dot{m}_{out} c_p}\right) \quad (6)$$

이 유효도는 공기층 온도와 집열판 온도사이의 관계식으로 적용되어 온도계산에 이용된다.

$$\varepsilon_{HX} = \left(\frac{T_{plen} - T_{amb}}{T_{col} - T_{amb}}\right) \quad (7)$$

집열판 온도는 균일하다고 가정하였다. 실제로 실험적으로도 대체로 균일하였으며 이는 집열판을 통과하는 흐름이 상대적으로 균일하다는 가정이 이미 검증된 것이다[1]. 집열판을 통과하는 균일한 흐름을 보장하기 위해서는 집열판을 통과하는 압력강하는 최소한 25Pa 이상이 되어야 한다.

다음 식들은 외부 벽체표면과 집열판에서의 에너지 평형방정식과 관계된 식들이다.

$$\dot{Q}_{conv,wall-air} = h_{conv,wall-air} A (T_{wall} - T_{plen}) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{cond,wall} = U_{cond,wall} A (T_{room} - T_{wall}) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{rad,wall-col} = \sigma_{sb} A \frac{T_{wall}^4 - T_{col}^4}{\frac{1}{\varepsilon_{wall}} - \frac{1}{\varepsilon_{col}} - 1} \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha_{col} I_T A_s \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{rad,col-sur} = \varepsilon_{col} \sigma_{sb} A_s (T_{col}^4 - T_{sur}^4) \quad (12)$$

여기서 식 (9)는 벽체 내부로부터의 전도 열전달에 대한 식이고, 식 (10)은 밀폐공간에서의 아주 긴 두 개의 평행평판에 대한 식[2]이며 식 (11)은 집열판의 흡수율에 관계된 식이다. 식

(12)는 주변으로의 복사 열손실에 관한 식으로 UTC 집열판이 수직으로 설치되었을 때 주변온도는 지표면온도와 천공온도의 식으로 사용될 수 있고 주변온도는 다음과 같다.

$$T_{sur}^4 = 0.5(T_{gnd}^4 + T_{sky}^4) \quad (13)$$

여기서 계수 값 0.5는 형태계수 값으로 경사면의 천공에 대한 형태계수와 경사면의 지면에 대한 형태계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{sky} = (1+\cos\delta)/2$$
$$F_{grd} = (1-\cos\delta)/2 \quad (14)$$

여기서 δ는 집열판의 기울기로 90° 이다. 식(13)은 단지 수직으로 설치된 UTC 집열판에 대한 식으로 지표면온도는 외기 온도와 동일하다고 가정하였다. 천공온도를 계산하기 위해서 Martin과 Berdahl는 광범위한 데이터를 사용하여 유효천공온도를 노점온도(T_{dp}), 외기온도(T_{amb}) 그리고 자정으로부터의 시간(t_w)에 대해서 다음과 같은 실험식을 제시하였다[3].

$$T_{sky}+273.15$$
$$=(T_{amb}+273.15)(0.711+0.0056T_{dp} \quad (15)$$
$$+0.000073T_{dp}^2+0.013\cos(t_w))^{1/4}$$

외기는 집열판과 벽체에 의해 가열되어 출구온도(T_{out})가 되는데 이 때 UTC 시스템으로 얻을 수 있는 유효획득에너지는 집열판과 외벽체면으로부터의 대류항의 합이다.

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{conv,col-air} + \dot{Q}_{conv,wall-air} \quad (16)$$

3. 시스템 모니터링

시스템의 성능을 평가하기 위해서는 먼저 UTC 집열판의 재질특성을 알고 이에 따른 시스템의 성능을 분석하여야 한다. 여기서는 UTC 집열판의 재질특성실험을 거쳐 흡수율을 측정하였고, 실제로 시스템을 한국에너지기술연구원의 실험동에 설치하여 일정한 공기접근속도에 따라 집열판의 태양입사에너지와 공기상승온도에 대한 열성능곡선을 도출하였다.

3.1 UTC 집열판의 재질특성실험

집열판의 흡수율을 측정하기 위해서 스펙트로미터(spectrometer)를 이용하여 측정하였다. 측정방법은 스펙트로미터 우측 끝에 있는 측면덮개를 열어서 집열판 시편을 렌즈에 고정시킨 후 다시 덮개로 밀폐시켜서 컴퓨터를 이용하여 스펙트로미터 소프트웨어를 실행시킨다. 이때 주의할 점은 측정에 앞서 먼저 표준시편인 Labsphere를 이용하여 보정을 해주어야 한다. 위와 같은 작업이 모두 수행되면 소프트웨어를 이용하여 집열판의 반사율과 투과율을 측정할 수 있다.

UTC 집열판은 불투명체이지만 스펙트로미터의 측정범위인 렌즈의 직경이 2cm 이기 때문에 기공피치를 초과함에 따라 실제로 투과율이 측정됨을 알 수 있었다. 그러나 기공의 직경이 매우 작기 때문에 거의 일정한 반사율을 측정할 수 있었다.

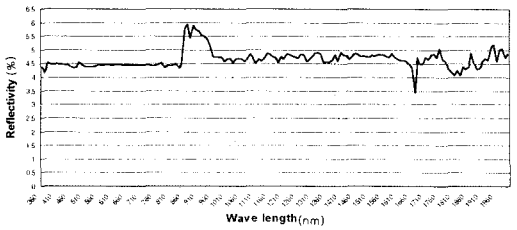

Fig. 2 Result of the reflectivity measurement

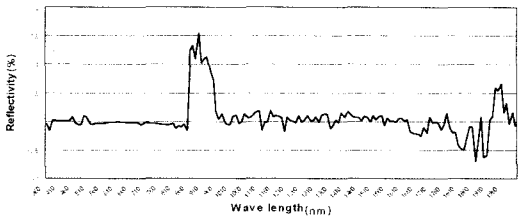

Fig. 3 Result of the transmittance measurement

위의 결과를 이용하여 집열판의 흡수율을 구하기 위해서는 다음 식에서 투과율을 "0"로 하여 구할 수 있다.

흡수율 + 반사율 + 투과율 = 1 (17)

따라서 UTC 집열판의 흡수율은 0.95~0.96의 매우 좋은 재질표면특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

3.2 UTC 시스템의 성능특성실험

UTC 시스템의 성능이라 함은 공기상승온도 즉, 일정한 공기접근속도(공기유입유량/집열판면적)와 입사에너지에 대하여 단위면적 당 얼마만큼 공기온도가 상승하는가로 나타낼 수 있다. 이와 같은 실험을 수행하기 위해 한국에너지기술연구원 소재 테스트용 실험동 중 1개 동을 이용하여 남쪽벽에 UTC 집열판을 설치하여 실험을 수행하였다. 덕트는 공기층 위로부터 천장을 통하여 건물내부로 연결하였으며 이는 집열판을 통하여 유입된 공기의 속도를 균일하게 상승시키기 위한 것이다. Fig. 4는 온도센서와 일사량계의 위치 그리고, 덕트를 통한 벤츄리관(ISO 5167-1980(E))을 보여주고 있다[4].

본 연구에서 사용한 센서로 일사량계는 미국 LI-COR사의 PYRANOMETER PY11166과 PYRANOMETER PY11167을 사용하였고 온도센서는 OMEGA사의 T-type thermocouple을 사용하였으며 차압측정은 Aerolab사의 Digital Multimanometer를 사용하였다.

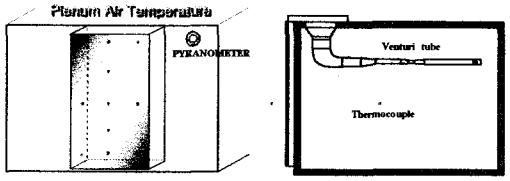

Fig. 4 The installed sensor locations

4. 시스템 모델링

4.1 시스템 모델 검증

UTC 시스템의 민감도 분석 및 성능평가를 위해 미국 윈스콘신 대학의 Solar Energy Laboratory(SEL)에서 개발한 세계적으로 공인된 상용 프로그램인 TRNSYS 14.2[5]와 EES[6]를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 다음은 실험결과와 비교검증하기 위해서 시스템의 공기접근속도가 0.005m/s, 0.02m/s, 0.035m/s일 때의 시스템의 성능곡선을 나타낸 그래프이다.

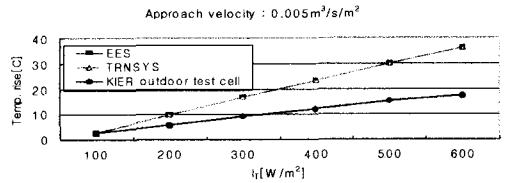

Fig. 5 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in V=0.005m/s

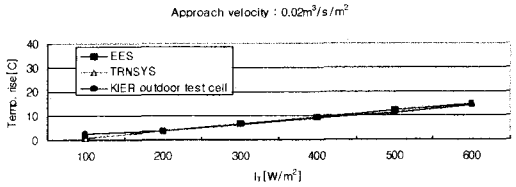

Fig. 6 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in V=0.020m/s

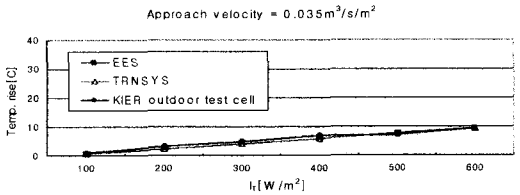

Fig. 7 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in V=0.035m/s

공기접근속도가 0.020m/s와 0.035m/s일 때의 시뮬레이션 모델의 결과값은 입사일사량에 대해서 실험값과 비슷한 결과를 나타내고 있지만 이보다 더 느린 공기접근속도에서는 외부로의 대류손실로 인하여 크게 예견하고 있다. 이는 0.02m/s 미만에서는 집열판에서 주위로의 대류손실을 무시할 수 없지만 시뮬레이션 모델에서는 여전히 대류손실을 무시하기 때문인 것으로 확인되었다[7].

4.2 민감도 분석

본 절에서는 TRNSYS14.2를 사용하여 우리나라 기후영향에 따른 UTC 시스템의 성능을 평가

하기 위해 난방피크기간인 1월을 기준으로 대전 지역 기상데이터를 사용하여 대해 민감도를 분석하였다. 여기서 적용한 기상데이터는 현재 한국에너지기술연구원에서 보유하고 있는 실제 대전 지역 기상데이터로 한 시간 간격으로 저장된 연간 기상데이터를 이용하였다. Table. 1은 주요변수들에 대한 민감도 분석결과를 보여주고 있다.

Table 1. Sensitivity analysis results in TRNSYS14.2

Property	Base value	New value	Qu [MJ]	Change	
				Value	Qu[%]
Base case	-	-	512	-	-
A[m^2]	1.932	2.123	556	+0.191	+8.6
α_{col}	0.95	0.855	458	-0.095	-10.6
Approach velocity[$m^3/s/m^2$]	0.035	0.0315	505	-0.0035	-1.4
		0.02	469	-0.015	-8.4
ε_{col}	0.95	0.855	525	-0.095	+2.5
plenum depth[m]	0.1	0.07	512	-0.03	<<0.1
wall R-value[m^2-C-hr/kJ]	0.6048	0.4	514	-0.2048	+1.0
ε_{wall}	0.2	0.5	512	+0.3	<<0.1
ht[m]	2.445	1	512	-1.445	<<0.1

분석한 결과 유입공기의 유량에 따라서 가장 민감한 요소들은 집열판 흡수율과 집열판 면적으로써 시스템의 성능을 개선하려면 이 두 개의 요소를 충분히 고려해야 함을 알 수 있었다. 그러나 95%의 흡수율을 더 개선하기는 어렵기 때문에 집열판 방사율에 따른 외부로의 방사손실감소 방안을 추후 고려함이 더 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문을 통해서 기존의 태양열 난방 시스템의 제한사항이었던 경제성과 설치 운영상의 문제점을 개선할 수 있는 건축 외장재료로 활용할 수 있는 Solar Air Heating UTC 시스템이 소개되었고 이 시스템의 열성능 분석 기술들이 소개되었다. 또한 성능실험을 위해 집열판의 흡수율을 측정하여 한국에너지기술연구원 내의 고정형 시스템 성능 실증시설을 활용하여 성능곡선을 도출하였으며 실험을 통해 검증된 시뮬레이션을 이용하여 열성능 분석을 수행한 결과 집열판의 형상면적과 흡수율이 시스템 성능개선에 중요한 요소임을 알 수 있었다. 그러므로 보급활성화를 위해서는 향후 시스템 성능 개선을 위해 먼저 태양열 에너지를 많이 흡수할 수 있는 집열판의 최적형상 제안과 집열판 표면 코팅기술에 따른 흡수율 개선 그리고 외부로의 방사손실감소 즉, 방사율 감소에 대한 모듈성능개선 연구와 아울러 시스템 총괄제어를 위한 storage 시스템 설계제어모듈에 대한 연구진행이 바람직할 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) Kutscher, C. F., 1992, An Investigation of Heat Transfer for Air Flow Through Low Porosity Perforated Plates, U Colorado, Ph.D.thesis.

(2) Incropera, F.P. and DeWitt, 1996, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Trasdfer, Wiley & Sons, New York, pp599-607.

(3) Duffie,J.A., and Beckman, W.A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley Interscience, New York, NY, 2nd ed., pp.296-300.(2) Klein,S.A., et al., 1994, TRNSYS Version 14.1, U Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory.

(4) International Standard ISO 5167, Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full, 1st Edition-1980-02-01, Ref. No. ISO 5167-1980(E).

(5) Klein,S.A., and Alvarado, F.L., 1999, EES: Engnieerin Equation Solver, F-Chart Software, Middleton, WI.

(6) Klein,S.A., et al., 1994, TRNSYS Version 14.1, U Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory.

(7) 강동언, 2000년, "태양열 공기난방 건축외장 판넬 시스템의 열성능 분석에 관한 연구", 석사학위논문, 제주대학교 대학원