

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 2, 2003

TRNSYS 기반 무창기공형 공기식 집열 시스템 부프로그램 개발에 관한 연구

Study on Development of Subroutine based on TRNSYS for Unglazed Transpired Air Collector System

박준언*, 이의준*, 정모**

Park, J. U.* , Lee, E. J.* , Chung, M.**

Key words : 무창기공형공기식집열기(UTAC), 동적시스템시뮬레이션(TRNSYS), 집열기효율(Collector efficiency), 열교환기유효도(Heat exchanger effectiveness)

Abstract

UTAC(unglazed transpired air collector) system has unique advantage for space heating and tempering ventilation air over the conventional collector system such as flat plate and vacuum collector. UTAC can improve radiative and convective loss due to nonglazed component and enhanced plate surface configuration, and heating energy and its equivalent green house emission performance can be improved from the use of this like collector in building application. The Option D Calibration simulation approach of IPMVP(International Performance Measurement and Verification Protocol) in ESCO businesses has been recommended to use of the calibrated computer modules like these Energy-10, DOE2.1E and TRNSYS(transient system simulation). This study is to develop subroutine type-203 of TRNSYS15.2 program and appraise thermal performance of UTAC. With newly added subroutine type-203, 1) Thermal performance of unglazed transpired collector could be possible based on dimensionless variables such as efficiency and heat exchanger effectiveness, and 2) Assessement of energy consists of solar useful and insulation saving for UTAC could be possible.

* 한국에너지기술연구원 신재생에너지부

* *Department of Renewable Energy, Korean Institute of Energy Research*

** 영남대학교 기계공학부 부교수

** *Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University*

■ 기호설명 ■

- U_{∞} : 평행류 풍속 [m/s]
- ν_a : 공기 동점성 계수 [m²/s]
- v_s : 공기 유입 속도 [m/s]
- T_{∞} : 공기 온도 [°C]
- T_{ple} : 공기층 온도 [°C]
- T_{out} : 집열기 출구온도 [°C]
- h_f : 대류 열전달계수 [W/m²°C]
- T_p : 흡수판 평균 온도 [°C]
- k_a : 공기 열전도도 [W/m°C]
- A_p : 흡수판 면적 [m²]
- \dot{m} : 질량 유량 [kg/hr]
- C_p : 정압 비열 [kJ/kg-°C]
- \bar{T}_{o1} : 기공입구 공기평균 온도 [°C]
- a : 흡수판 흡수율 [%]
- G_s : 태양 조사플럭스율 [W/m²]
- ϵ_{pf} : 슬래트전면 흡수판 방사율 [%]
- T_{∞} : 천공 온도 [°C]
- \bar{T}_{o2} : 기공출구 공기평균 온도 [°C]
- ϵ_{pb} : 슬래트후면 흡수판 방사율 [%]
- ϵ_w : 외벽 흡수판 방사율 [%]
- h_w : 외벽 대류 열전달계수 [W/m²°C]
- A_w : 외벽 면적 [m²]
- Nu : 닷셀수 [-]
- H : 흡수판 높이 [m]
- Re : 외벽 레이놀즈수 [-]
- U_w : 외벽 열전달계수 [W/m²°C]
- T_w : 외벽 표면 온도 [°C]
- T_{room} : 건물 실온도 [°C]
- T_{solair} : 상당외기온도 [°C]
- η : 집열기 효율 [%]
- \dot{Q}_{soluse} : 태양열 유용에너지 [W]

- $F_{o\tau\alpha}$: 평판형 집열기 효율선도 절편
- F_{oU_L} : 평판형 집열기 효율선도 기울기
- T_{in} : 튜브 입구온도 [°C]
- σ_s : Stefan-Boltzmann 상수
- ρ_{air} : 공기밀도 [m³/kg]
- h_r : 장파복사 열전달계수 [W/m²°C]
- ϵ_{th} : 열교환기의 유효도 [-]
- \bar{T}_f : 흡수판 전면 표면 평균 온도 [°C]
- \bar{T}_h : 흡수판 기공 표면 평균 온도 [°C]
- \bar{T}_b : 흡수판 후면 표면 평균 온도 [°C]
- ϵ_f : 흡수판 전면 열교환기유효도 [-]
- ϵ_h : 흡수판 기공 열교환기유효도 [-]
- ϵ_b : 흡수판 후면 열교환기유효도 [-]
- Re_{∞} : 외기풍속 기준 Reynolds 수
- Re_f : 흡수판 전면 기준 Reynolds 수
- Re_h : 흡수판 기공 기준 Reynolds 수
- Re_b : 흡수판 후면 기준 Reynolds 수
- σ : 기공율 $4\pi D^2/P^2$ [%]
- P : 기공피치 [m]
- D : 기공직경 [m]
- W : 흡수판 두께 [m]

1. 서론

국내 총 에너지 소비량 중 건물분야 소비에너지는 약 25%로 매년 그 비율이 증가하고 있으며, 국내 주거용 건물의 에너지성능지수는 보통 연간 200 Mcal/m²을 나타내고 있고 이중 약 45% 정도가 난방에너지로 소요되고 있다. 이러한 연유로 이미 서구 선진 유럽에서는 태양열 활용 자연형 태양열 난방기술인 공기식 태양열 가열 시스템을 건물에 적용하여 난방에너지의 절감효과를 얻고 있으며 국내에서도 난방에너지 저감기술 및 대체 에너지기술인 공기식 태양열 시스템 기술의 개발

및 적용이 요구되고 있다. 특히 건물의 기밀성이 높아짐에 따라 최근 급속히 사회 문제화되고 있는 실내 공기 질(IAQ : indoor air quality)¹⁾의 악화문제로 인해 건물의 최소환기량 요구조건 즉, 신선외기 도입량의 법적 기준을 크게 높이는 쪽으로 강화되어 외기부하의 증가에 따른 건물 총에너지 소비량의 증가를 가져오므로써, 이에 대한 해결방안이 절실한 형편이다.

이러한 필요 추세에 발맞추어 국내에서는 1980년~1990년대 기존 평판형 집열기의 일종인 온수형 집열기와 함께 평판형 집열기 형태의 공기식 집열기의 연구가 진행되어왔으나 상대적으로 고가이며 효율 문제로 인하여 양산 보급되어지지 못하고 있는 것이 현실이다.

본고에서 소개되어지는 무창기공형 공기식집열 시스템은 건물 실 공기 질과 환기 난방 부하 증가 대책에 대비할 수 있는 공기식 태양열 집열기로서 특정 외기 조건하에서 신선공기를 적극적으로 필요로 하는 건물에 환기 공기를 미리 예열하여 주간 일사량이 충분한 경우 보조 난방 설비 없이 건물의 쾌적 온도 조건을 유지케 하는 태양열 요소 설비이다.

아울러스 무창기공형 공기식 집열 시스템은 적절한 일사 조건에서 약 16°C~40°C까지 도입 외기의 온도를 상승시킬 수 있는 요소기술로써 기존 집열기에 비해 일사량 수열 손실과 집열판 외부 표면 대류손실을 최소화함으로써 집열 효율이 우수하다. 또한 집열기 흡수판 자체가 일정 윗로 타공되어진 기공형을 지니는 단순 금속판만으로 구성되어 기존 집열기 가격의 1/2 수준이며, 건물 외벽에 부착하기 때문에 기존 외벽 마감재를 대체할 수 있어 경제성이 매우 뛰어나다. 이런 무창기공형 공기식 집열 시스템의 장점을 고려할 때 화석에너지의 사용 억제와 건물에 대한 거주자의 쾌적 열 환경 요구에 부응하기 위해 시기 적절하게 국내 보급화가 실현 되어야할 태양열 관련 요소 설비 기술의 하나이다.

그러나 기존 집광 및 비집광 집열기에 비하여 UTAC 시스템에 대한 체계적인 성능평가 방안에 대한 연구와 이에 근거한 성능 인증제와 같은 세부 연구와 체계화된 제도의 미비로 인하여 국내 보급 활성화를 위한 방안이 마련되지 못하고 있으며 아울러 성능 평가 방안으로써 대부분 실증시험을 통한 실측치 데이터에 의존하고 있는 현실이다.

따라서 본 연구에서는 UTAC 시스템의 국내 보급 활성화를 일환으로 시스템의 정량적 열성능 도출 방안에 대한 컴퓨터 시뮬레이션기반기술 개발을 위하여 기존 집열기 및 시스템의 성능평가 방법인 OG(operating guide)-300²⁾에 상응하는 컴퓨터 시뮬레이션 도구인 TRNSYS15.2³⁾를 활용하여 무창 기공 집열 시스템의 열성능 평가용 부프로그램 "type-203" 모델 개발에 목적을 둔다.

2. 본 론

2.1 시스템 유동 양식

UTAC 시스템의 개요로 그림 1은 집열기를 건물외피와 일정간격 공기층(plenum)을 두고 남향건물외피에 설치하여 구조체를 형성한후 팬 설비를 통하여 외기를 기공 및 공기층을 통하여 예열한후 건물로 유입하는 복합태양열시스템이다.

그림 2는 평행류 풍속을 고려한 무창기공형 공기식 집열기에서의 유동 형상을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 슬래트전면부에서는 풍속유동(wind flow)과 자유유동장(free stream field)에서 유입된 외기유입 유동이 공존하는 경계층유동장(boundary layer field)이 형성된다.

기공이 없는 단순 평판 유동에 비하여 풍속은 슬래트 전면부에서 첫 번째 슬롯기공으로 유입되고 나머지는 다음 슬래트전면부로 흘러가게 된다. 이러한 유동 형태를 반복함으로써 풍속의 크기는 감소하며 최종적 $z=L$ 집열기 끝단부에서 풍속의

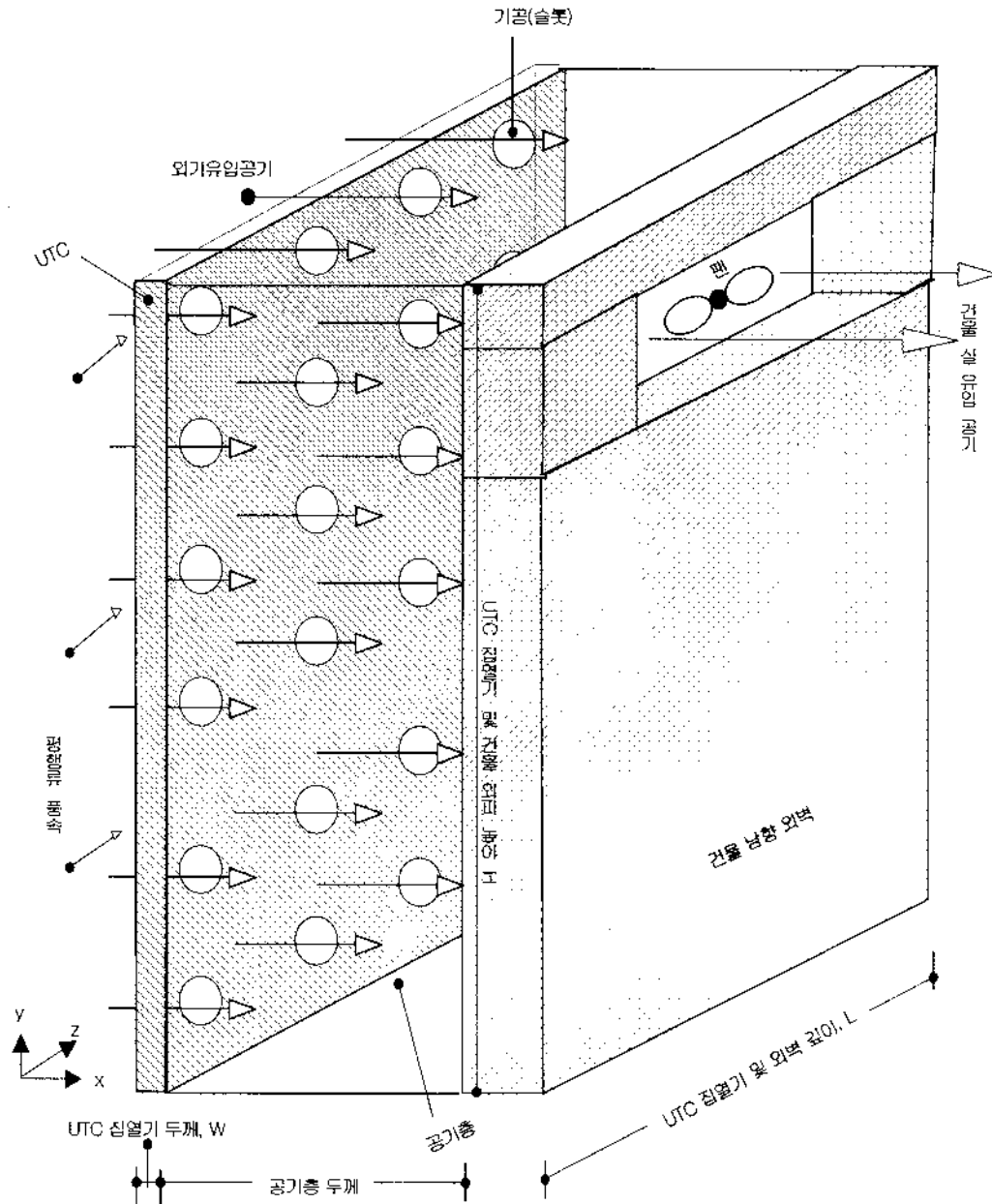


그림 1. 무창기공형 공기식 집열 시스템 작동 개념도

크기는 사라지게 되므로 슬래트전면부에서 풍속에 의한 대류 손실을 무시할수있다. 또한 슬래트전면부에서의 경계층두께는 $z=0$ 에서 시작된 풍속에 의하여 후류 z 방향 길이에 따라 성장하여 경계층 발달영역을 지나 경계층두께가 슬래트영역에서는 증가하고 슬롯기공에서는 감소하지만 평균 경계층두께가 일정한 완전발달영역을 형성하게된다. 완전발달영역이 형성되는 z 방향 길이 L_s 는 $0.96 U_{\infty} \times v_a / v_s^2$ 의 형태로 산정되어지며 외기평행류풍속 U_{∞} , 기공으로의 외기유입속도 v_s 및 점성계수 v_a 의 상대적 크기에 의하여 결정된다. 외기평행류풍속 10 m/s, 외기유입속도 0.02~0.04 m/s, 점성계수 15.7×10^{-6} m²/s 일때 완전발달영역의 길이는 0.1~0.4 m로써 집열기의 대부분은 완전발달영역으로 구성되어지며 본고의 type-203 부프로그램은 완전발달영역만을 해석대상으로 하였다.

슬롯기공에서는 풍속의 일부 유동과 자유유동장의 공기가 혼합된 유동이 형성되어지며 공기층에서의 유동은 팬에 의한 강제 및 밀도차에 의한

자연순환 유동 양식을 통하여 최종적 건물로 유입 되게된다.

2.2 시스템 열전달 양식

그림 3은 무창기공 집열 시스템의 검사체적에서의 열전달 현상을 묘사하고있다. 전열면 특성으로서 상이한 슬래트전면, 슬롯기공, 슬래트후면 및 건물외벽을 경계로 열전달 현상을 나타내고있다. 슬래트내에서의 전도열전달은 비등온 특성에 의하여 슬래트내에서 후류 길이 y 방향과 z 방향으로 일어나게되지만, 일정 열유속경계조건과 두께가 상당히 작으므로 인하여 등온조건을 유지하게 되므로 무시하였다.

슬래트전면에서 대류열전달은 풍속(U_{∞}, T_{∞})에 의하여 형성되는 경계층내 유동과의 온도차에 의한 열전달량과 자유유동장 외기(v_s, T_{∞})에 의한 열전달량으로 구성되어지며 각각의 열전달량을 식 (1)과 식 (2)로 묘사하였다.

$$Q_1 = h_f A_p (T_p - T_{\infty}) = -k_a A_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$$Q_2 = \dot{m} C_p (\bar{T}_{o1} - T_{\infty}) \quad (2)$$

본 고에서는 슬래트전면에서의 복사열전달 해석을 단순화하기 위하여 슬래트전면을 실체(real surface)의 근사 모델인 산란회체 (diffuse and gray surface)로 가정하여 태양 및 천공과의 단파복사 및 장파복사 열전달을 식 (3)~식 (4)의 형태로 묘사하였다.

$$Q_3 = \alpha A_p G_s \quad (3)$$

$$Q_4 = \sigma A_p \epsilon_{pf} (T_p^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

슬롯 기공 및 슬래트 후면에서의 대류열전달량은 평행류 풍속 및 유입외기와 혼합된 공기유동으로의 대류 열전달량으로 식 (5)와 식 (6)의 형태로 표현하였다.

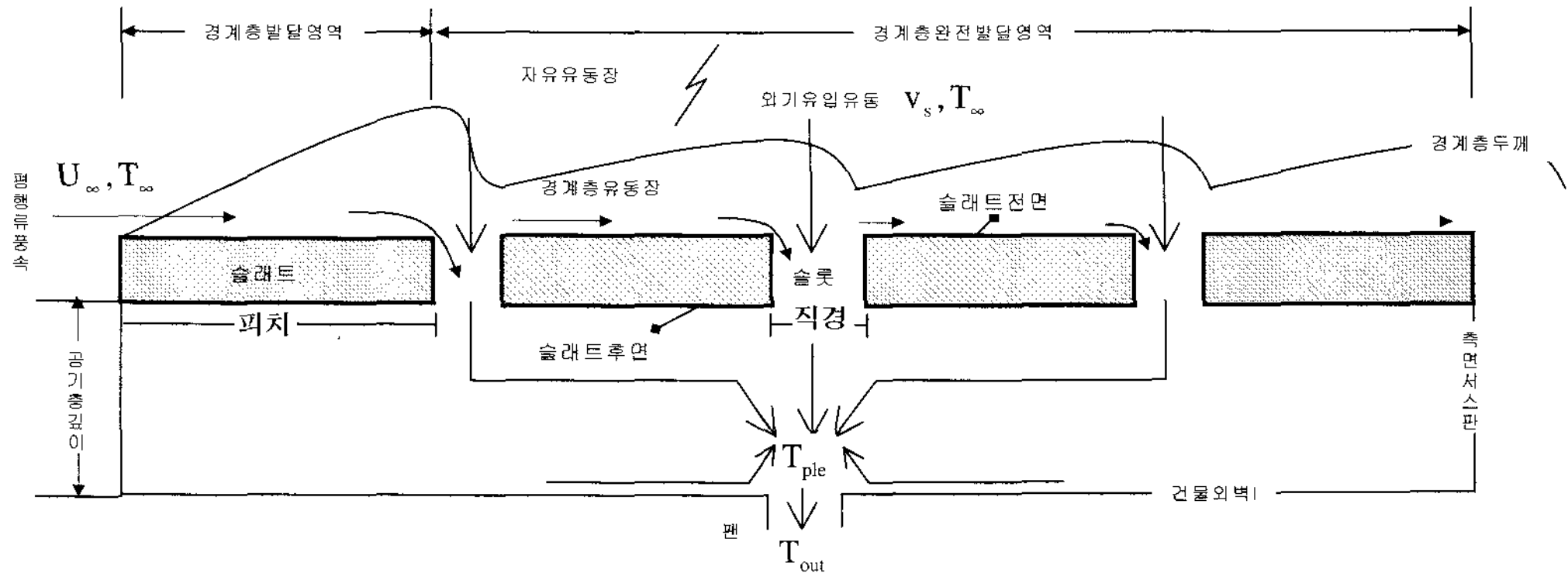


그림 2. 무창기공형 공기식 집열기 유동

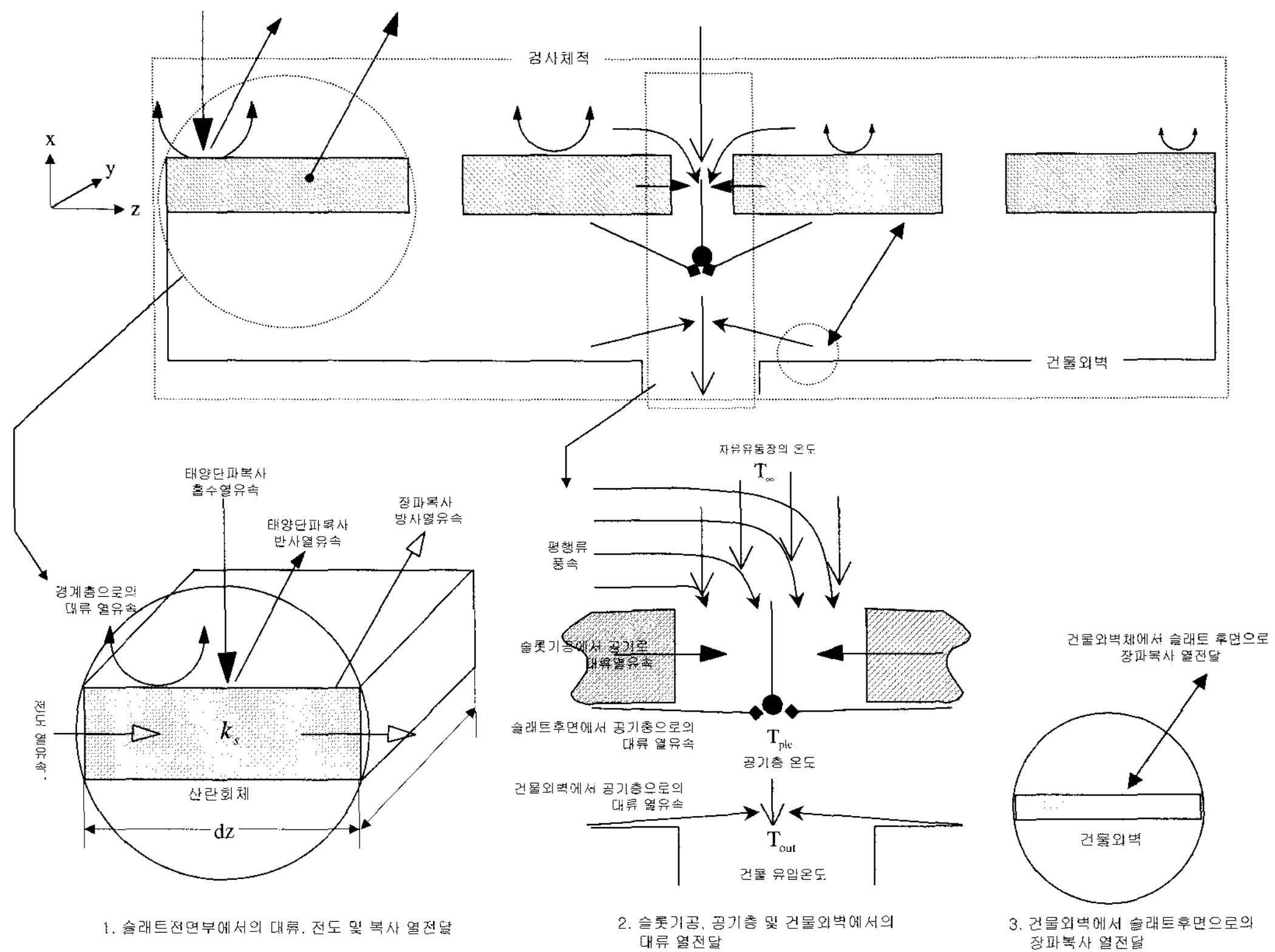


그림 3. 무창기공형 공기식 집열기 열전달

$$Q_5 = \dot{m} C_p (\bar{T}_{o2} - \bar{T}_{o1}) \quad (5)$$

$$Q_6 = \dot{m} C_p (T_{ple} - \bar{T}_{o2}) \quad (6)$$

열전달량 즉 태양열 유용에너지를 식 (1), (2), (5), (6)을 하나의 식(7)로 평가하였다.

$$Q_7 = \dot{m} C_p (T_{ple} - T_{\infty}) \quad (7)$$

외기유입을 통한 슬래트전면, 슬롯 및 슬래트 후면 전열면으로부터 외기유입공기로의전체 대류

건물외벽과 슬래트후면과의 장파복사 열전달량

및 건물외벽에서 공기층으로의 대류 열전달량을 식 (8)과 식 (9)의 형태로 산정하였다.

$$Q_8 = \frac{\sigma A_w (T_p^4 - T_w^4)}{(1/\epsilon_w + 1/\epsilon_{pb})} \quad (8)$$

$$Q_9 = h_w A_w (T_w - T_{ple}) \quad (9)$$

여기서, $h_w = (Nuk_a)/H$ 로 정의되며 낮셀 상관식은 아래의 상관식을 적용하였다.

$$N_u = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} \\ \text{for } Re < 5 \times 10^5, Pr > 0.5$$

건물외벽을 경계로한 전도 열전달량은 식 (10)의 형태로 산정하였다.

$$Q_{10} = U_w A_w (T_{room} - T_w) \quad (10)$$

일반적으로 동계작동 상태에서 건물남측외벽에 설치되는 무창 공기식 집열기에 의하여 외벽체의 전도에 의하여 외기로의 열전달량 손실을 줄이므로써 단열성능 향상 효과를 얻을 수 있다. 이와같은 단열성능향상에 따른 단열보강 열전달량은 식 (12)와 식 (13)의 차로 식 (11)과 같이 표현하였다.

$$Q_{11} = U_w A_w (T_{ple} - T_{solair}) \quad (11)$$

식 (12)은 공기층과 건물실 온도차에 의한 열전달량을 나타내며

$$Q_{12} = U_w A_w (T_{room} - T_{ple}) \quad (12)$$

식 (13)는 무창형 공기식 집열기가 없는 경우 상당외기와 건물실 온도차에 의한 열전달량을 나타낸다.

$$Q_{13} = U_w A_w (T_{room} - T_{solair}) \quad (13)$$

2.2.1 무창 공기식 집열기 효율 상관식

일반적으로 평판형집열기에서의 열성능 평가는 성능 테스트시 기준 실험 식 (14)⁴⁾와 이를 근거로 산정되어지는 효율 상관 식 (15)⁴⁾를 기반으로 평가가 이루어진다.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{soluse}}{AG_s} = \frac{\dot{m}C_p(T_{ple} - T_{\infty})}{AG_s} \quad (14)$$

$$\eta = F_o \tau \alpha - F_o U_L' \frac{(T_{in} - T_{\infty})}{G} \quad (15)$$

반면 무창기공형 공기식 집열기에서의 열성능 평가는 실험식 식(14)를 동일하게 사용하나 외기 공기와 흡수관 전열면과의 직접 열교환을하는 형식이므로 $T_{\infty} = T_{\infty}$ 가 되어서므로 기존 TRNSYS 부프로그램 모듈 type-1 평판형 집열기에서 사용된 모델링 식 (15)와는 상이한 형태의 효율 모델링 상관식의 도출이 필요하다. 무창 공기식 집열기의 효율 상관식 도출은 식 (14)를 근거로 에너지평형식에서 조사플럭스항 G_s 항으로 나머지 열전달량을 표현하여 효율 상관식을 도출하였다.

에너지평형식 항에서 단순화를 위하여 속도 및 열경계층 두께가 증가하는 발달영역은 전체 길이 L에 비하여 상당히 작으며 속도 및 열경계층 두께가 일정한 점근영역(asymptotic region)에서의 외기풍속의 크기는 상대적으로 매우 작아 식 (1) 대류열전달량을 무시하였으며, 또한 상대적으로 크기가 매우 작은 슬래트후면과 건물외피와의 장파복사열전달량을 제외하여 식 (16)과 같이 단순화된 에너지평형식으로 표현하였다.

$$\alpha A_p G_s - \sigma_s A_p \epsilon_{pf} (T_p^4 - T_{room}^4) \\ = A_{pf} \rho_{air} v_s C_p (T_{ple} - T_{\infty}) \quad (16)$$

조사플럭스항으로 재배열하여 식 (17)의 형태로 에너지평형식을 표현하였다.

$$G_s = \frac{1}{\alpha} [\sigma_s \epsilon_{pf} (T_p^4 - T_{r\infty}^4) + \rho_{air} v_s C_p (T_{ple} - T_{\infty})] \quad (17)$$

천공온도가 외기온도와 동일하다라는 조건 $T_{r\infty} = T_{\infty}$ 에 의하여 열교환기유효도를 포함하는 식 (18)로 집열기 효율 상관식을 산정하였다.

$$\eta = \frac{v_s \rho_{air} C_p (T_{ple} - T_{\infty})}{G_s} = \frac{\alpha}{1 + \frac{h_r}{\epsilon_{th} \rho_{air} v_s C_p}} \quad (18)$$

열교환기유효도 및 장파복사 열전달계수는 각각 식 (19) 및 (20)의 형태로 정의하였다.

$$\epsilon_{th} = (T_{ple} - T_{\infty}) / (T_p - T_{\infty}) \quad (19)$$

$$h_r = \sigma_s \epsilon_{pf} (T_p + T_{\infty})(T_p^2 + T_{\infty}^2) \quad (20)$$

식 (19)의 열교환기유효도는 이상적 열전달량에 대한 실제적 열전달량의 비로써 외기온, 공기층온도 및 집열판온도에 대한 함수로 표현하였으며, 식 (20)의 장파복사열전달계수는 집열판의 방사율, 외기온 및 집열판온도와 스테판볼츠만 상수의 함수로 표현하였다.

식 (18)에서와 같이 집열기 효율은 공기밀도, 정압비열, 집열기 흡수율, 장파복사 열전달계수, 공기유입속도 및 열교환기유효도의 상관식으로 도출하였으며 공기의 온도 변화가 크지 않은 범위에서 공기는 열물성치가 일정한 비압축성 유체의 특징을 지니므로 집열기 효율은 단순 열교환기유효도의 함수로만 평가되어짐을 확인할 수 있었다.

2.2.2 무창기공형 공기식 집열기의 열교환기 유효도 상관식

본고에서 열교환기유효도는 집열기 변수인 두께, 피치, 직경, 및 열전도도와 같은 집열기 형상 설계변수와 풍속, 공기유입속도 및 공기의 열물성치(열전도도, 동점성계수, 열확산계수)에 따른 영향을 고려하여 상관식을 도출하였다. 그림 4와 같이 무창 공기식 집열기에서의 외기와의 전열면 형상(집열판 전면, 기공 및 후면)에 따른 유동특성이 서로 상이하므로 각각의 영역에서의 열교환기유효도 상관식을 개별적으로 도출하여 집열기의 벽면 경계조건인 일정 열유속에 따른 등온조건(두께 0.5~0.7mm, 알루미늄 열전도도 64 [W/mK]) 식 (21)의 조건하에서 전체 열교환기유효도를 식 (22)와 같이 슬래트전면, 슬롯기공 및 슬래트후면에서의 열교환기유효도에 의하여 산정되도록 하였다.

$$\bar{T}_f = \bar{T}_h = \bar{T}_b = T_p \quad (21)$$

$$\epsilon_{th} = 1 - (1 - \epsilon_f)(1 - \epsilon_h)(1 - \epsilon_b) \quad (22)$$

식 (22)의 각각의 영역에서의 열교환기유효도는 아래와 같이 정의하였다.

$$\epsilon_f = \frac{\bar{T}_{o1} - T_{\infty}}{T_f - T_{\infty}}, \quad \epsilon_h = \frac{\bar{T}_{o2} - \bar{T}_{o1}}{T_h - \bar{T}_{o1}}$$

$$\epsilon_b = \frac{T_{ple} - \bar{T}_{o2}}{T_b - \bar{T}_{o2}}$$

본고에서는 각각의 영역 및 전체영역에서의 열교환기의 상관식은 유동 및 온도가 완전 발달된 점근영역을 대상으로 Test Rig⁵⁾ 실내 실험 및 TASCflow⁶⁾ 수치해석을 통하여 산정된 상관식을 이용하였다. 이러한 방법을 통하여 슬래트전면, 슬롯기공 및 슬래트후면에서의 열교환기 유효도 상관 식을 (23)~(24)의 형태로 도출하였다.

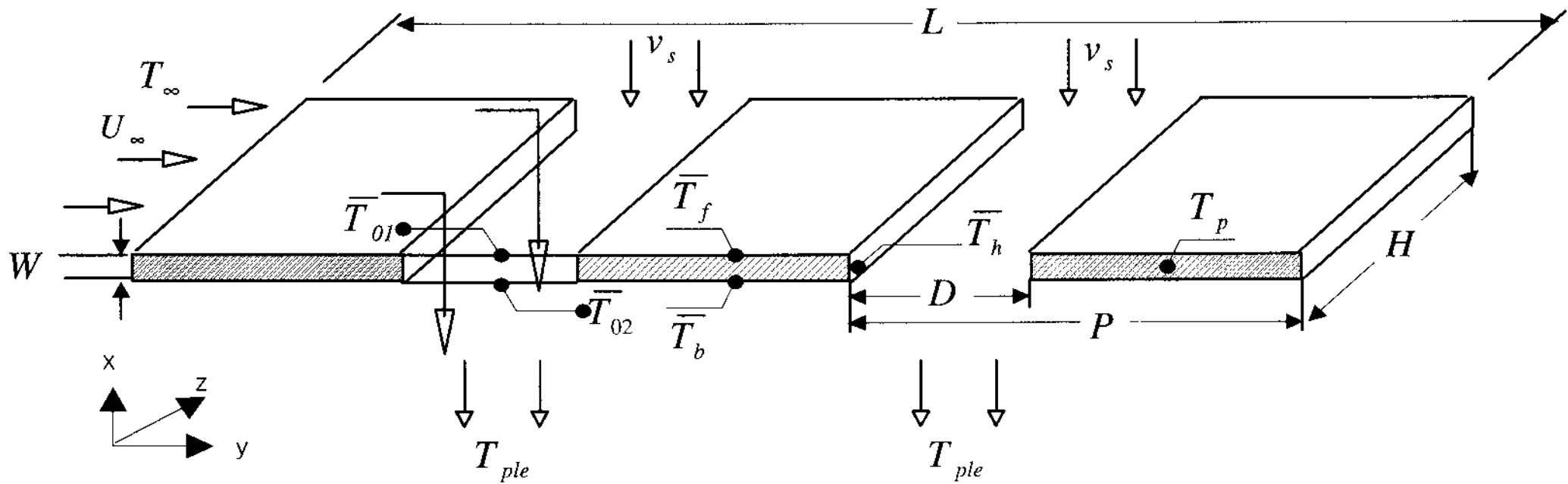


그림 4. UTAC 시스템의 열교환기유�효도 정의를 위한 온도

$$\epsilon_f = \frac{1}{1 + Re_f \min[1.72 Re_\infty^{-1/2}, 0.0654]} \quad (23)$$

$$\epsilon_h = 1 - \exp\left[-\frac{0.16P}{D} + \frac{3.66}{Pr Re_h} \frac{W}{D}\right] \quad (24)$$

$$\epsilon_b = \frac{1}{1 + 0.144 Re_b^{1/3}} \quad (25)$$

상기의 식에서의 프란틀수는 $Pr = \nu_a / \alpha_a$ 로 정의하였으며 레이놀즈수는 외기풍속, 슬래트전면, 슬롯기공 및 슬래트후면을 기준으로 다음과 같이 정의하였다.

$$Re_\infty = U_\infty P / \nu_a, \quad Re_f = v_s P / \nu_a, \\ Re_h = v_s D / \nu_a \sigma, \quad Re_b = v_s P / \nu_a \sigma$$

전체영역에서의 열교환기유�효도는 온도차가 커지 않은 경우 Pr수는 일정한 가정조건과 상기의 각각의 영역에서의 열교환기유�효도 상관식을 근거로하여 식 (22)을 토대로 전체 영역에서의 열교환기유�효도에 대한 상관식을 기공직경에 대한 피치 및 두께비와 레이놀즈수의 함수로 표현되는 식 (26)을 유도하였다.

$$\epsilon_{th} = \left[1 - \frac{1}{(1 + 0.227 Re_b^{1/2})}\right]$$

$$\times \left[1 - \frac{1}{(1 + Re_f \max[1.73 \frac{1}{Re_\infty^{1/2}}, 0.021])}\right] \\ \times \exp\left(\frac{-0.0189P}{D} - \frac{20.62}{Re_h} \frac{W}{D}\right) \quad (26)$$

2.3 무창 공기식 집열 시스템 부프로그램 개발

UTAC 시스템의 열성능 평가용 부프로그램 type-203⁷⁾ 개발은 특정 외기조건하에서 집열기와 에너지 최종 수요처인 건물에서의 열 흐름을 열전달 양식으로 개별화하여 각각의 에너지량을 정량화할 수 있도록 비정상 입력(input)변수와 시간에 무관한 변수(parameter)를 근거로 상술된 에너지 산술 식에 의하여 산정되어지는 출력(output)항으로 세분화하여 모델링하였으며 입력, 변수 및 출력항의 세부항목은 표 1에 나타내었다.

2.3.1 부프로그램 코딩

UTAC 시스템의 부프로그램 type-203은 식 (3), (6), (7), (8), (9) 및 (10)와 집열기를 검사체적으로한 에너지평형식 (27) 및 건물외피를 검사체적으로한 에너지평형식 (28)을 식 (29) 행렬로 표현하였다.

이 행렬은 8×8 행렬로 표현되어지며 역행렬을 푸는 lapack solver를 통하여 표 1에 열거된 출력항을 산정할 수 있도록 코딩하였다.

표 1. Type-203 모델의 변수 및 입출력 항목

변수항	단위
집열기 설치 면적	m ²
집열기 설치 높이	m
집열기 기공 직경	mm
집열기 기공 피치	m
집열기 방사율	-
집열기 두께	mm
집열기 흡수율	-
공기층 두께	m
외벽 방사율	-
외벽 열저항	°Cm ² /W
입력항	단위
집열면 태양 조사 플럭스	W/m ²
외기 온도	°C
외기 유입유량	kg/hr
건물 실 온도	°C
풍속	m/s
출력항	단위
집열기 출구 외기 온도	°C
집열기 출구 외기 유량	kg/hr
공기층 온도	°C
집열기 표면 온도	°C
태양열 유용 열전달량	kWh
외벽에서 공기층으로의 열전달량	kWh
집열면 장파복사 열전달량	kWh
외벽 장파복사 열전달량	kWh
외벽 전도 열전달량	kWh
외벽 단열보강 열전달량	kWh
집열면 수열 열전달량	kWh
집열기 열교환기유효도	-
집열기 효율	[%]

$$Q_3 = Q_4 + Q_7 + Q_8 \quad (27)$$

$$Q_{10} = Q_8 + Q_9 \quad (28)$$

$$[A][X] = [B] \quad (29)$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 & a_{34} & a_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 & a_{45} & a_{46} & 0 & 0 \\ 0 & a_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{57} & 0 \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & 0 & 0 & a_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{74} & 0 & a_{76} & 0 & a_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{85} & 0 & 0 & a_{88} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \\ b_5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\epsilon_{th}, a_{12} = 1 \\ a_{21} &= -\sigma_s \epsilon_{pf} A (T_p^2 + T_{r\infty}^2)(T_p - T_{r\infty}) \\ a_{23} &= 1 \\ a_{31} &= \sigma_s A_w (T_p^2 + T_w^2)(T_p - T_w) \left(\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_{pb}} - 1 \right) \\ a_{34} &= 1 \\ a_{35} &= -\sigma_s A_w (T_p^2 + T_w^2)(T_p - T_w) \left(\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_{pb}} - 1 \right) \\ a_{42} &= h_w A_w, a_{45} = -h_w A_w, a_{46} = 1 \\ a_{52} &= -\dot{m} C_p, a_{57} = 1 \\ a_{63} &= 1, a_{64} = -1, a_{67} = 1 \\ a_{74} &= -1, a_{76} = -1, a_{78} = 1 \\ a_{85} &= U_w A_w, a_{88} = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= T_\infty (1.0 - \epsilon_{th}), \\ b_2 &= -\epsilon_s \sigma A_p (T_p^2 + T_{r\infty}^2)(T_p + T_{r\infty}) T_{r\infty} \\ b_3 &= -\dot{m} C_p T_\infty \\ b_4 &= Q_3 \\ b_5 &= U_w A_w T_{room} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_1 &= T_p, x_2 = T_{ple}, x_3 = Q_4, x_4 = Q_8, x_5 = T_w, \\ x_6 &= Q_9, x_7 = Q_7, x_8 = Q_{10} \end{aligned}$$

3. 결론

본 연구를 통하여 건물 내 IAQ와 환기 난방 부하 저감 효과를 얻을 수 있는 무창기공형 공기식 집열 시스템의 열성능 평가 방안으로써 TRNSYS15.2 기반 부프로그램 "type-203"⁽⁷⁾이 개발되었다. type-203 부프로그램 개발 연구 결과로써

- 1) 특정 집열기 형상(기공직경, 기공피치, 흡수율, 방사율, 공기층 두께) 및 설계 변수(면적, 공기유량)근거 외기온, 풍속 및 일사량과 같은 외기상태 조건에 따라 집열기 열교환기유효도 및 효율에 의한 집열기 성능 평가가 가능하였다. 집열기 효율은 집열기 흡수율, 장파복사 열전달계수, 공기유입 속도 및 열교환기유효도의 함수 형태로 표현되었으며, 아울러 열교환기유효도는 기공직경에 대한 피치 및 두께비와 외기풍속,

집열기전면, 기공 및 후면 기준 레이놀즈수의 함수로 표현됨을 확인하였다.

- 2) 집열기를 경계로한 에너지흐름(흡수판 수열면 복사 열전달량, 흡수판 전면에서 대기로의 장파복사열전달량, 태양열유용에너지) 및 건물남측 외벽의 단열보강에 따른 단열보강열전달량과 같은 개별적 열전달량을 정량적으로 평가할 수 있게 되었다.

결론적으로 본 연구를 통하여 임의의 실외 외기 조건하에서 무창기공형 공기식 집열 시스템의 열성능 평가용 모사 모델인 "type-203" 부프로그램을 통하여 향후 무창공기식 집열 시스템의 국내 보급화 사업 활성화를 위한 열성능 평가 기반기술을 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 대체에너지 기술개발 사업의 일환으로 수행되고 있는 연구 결과의 일부이며, 연구수행에 지원을 준 산업자원부에 감사한다.

참고문헌

1. ASHRAE 62 - 1981, "Outdoor Air Requirement for Ventilation," pp. 74~77.
2. 한국에너지기술연구원, 태양열 온수급탕 시스템의 실험 및 평가방법 개발(III)에 관한 연차보고서, 통상산업부, 1995.2, pp. 47~60.
3. A. S. A. Klein, and W.A. Beckman, TRNSYS15 Vol 1 Reference Manual, ch. 4.2.3.3~4.2.2.5.
4. Duffie. J.A., and W.A. Beckman, "Solar Energy Thermal Process," 2nd edition, pp. 301~312.
5. Van Decker, G.W.E., Hollands, K.G.T., and Brunger, A.P.(1996), "Heat Exchange Effectiveness of Unglazed Transpired Plate Solar Collector in 3D Flow," Proceedings of EuroSun '96', pp.130~135.
6. Advanced Scientific Computing Ltd. (1994), TASCflow-Version 2.3.1: Theory Documentation, Advanced Scientific Computing Ltd., Waterloo, Canada.
7. 박준언, "무창 기공 집열기 단위 모듈 및 태양열 공기 가열 시스템의 열성능 평가 방안과 모델 개발" 박사학위논문. 2002년 6월.