

碩士學位論文

태양열 공기난방 건축외장판넬
시스템의 열성능 분석에 관한 연구

19.2.25



濟州大學校 大學院
제주대학교 중앙도서관
機械工學科 LIBRARY

姜 同 彦

2000年 12月

태양열 공기난방 건축외장판넬
시스템의 열성능 분석에 관한 연구

指導教授 玄 明 澤

姜 同 彦

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



姜同彦의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 許 鐘 哲 印
委 員 이 의 준 印
委 員 이우현 印

濟州大學校 大學院

2000年 12月

Study on the Thermal Analysis for a Solar Air Heating Panel System in an Architectural External Wall

Dong-Un Kang

(Supervised by Professor Myung-Taek Hyun)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

December 2000

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
NOMENCLATURE	vi
SUMMARY	x
I. 서론	1
1-1. 연구 배경	1
1-2. 연구 동향 및 목적	2
1-3. 연구 방법	3
II. 시스템 이론	5
2-1. 에너지균형방정식	8
2-2. 비율방정식	11
2-3. UTC 시스템 운영	14
2-4. 벽체 열손실감소	17
2-5. 최소공기접근속도와 최대집열판면적	19
2-6. 집열판 면적에 따른 공기접근속도	21
2-7. 압력강하와 팬 동력	22
2-8. 에너지 절감	25

III. 시스템 모니터링	28
3-1. 실험 목적	28
3-2. UTC 집열판의 재질특성실험	28
3-2-1. 재질특성실험방법	28
3-2-2. 재질특성실험결과	29
3-3. UTC 시스템의 성능특성실험	32
3-3-1. 유량 측정 방법	34
3-3-2. 일사량과 온도 측정 방법	36
3-3-3. 시스템 성능특성실험결과	37
3-4. 소결	39
IV. 시스템 모델링	40
4-1. EES 및 TRNSYS 소개	40
4-2. 프로그램모델 해석	43
4-3. 시스템 모델 검증	44
4-4. 민감도 분석	48
4-4-1. EES를 이용한 민감도 분석	48
4-4-2. TRNSYS14.2/IISiBat을 이용한 민감도 분석	49
4-5. 연간 에너지성능 분석	52
4-6. 소결	54
V. 결론	56
VI. 참고문헌	58

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Shape of the UTC panel	5
Fig. 2 Perspective view of an UTC system	7
Fig. 3 Cross-sectional view of an UTC system	7
Fig. 4 Energy balance on air	9
Fig. 5 Energy balance on wall	9
Fig. 6 Energy balance on collector plate	10
Fig. 7 Basic overview of UTC system model	15
Fig. 8 Approach velocity and air flow rate for different collector areas	22
Fig. 9 Directions of the pressure drop	23
Fig. 10 Lambda 19 Spectrometer photograph	29
Fig. 11 Result of the reflectivity measurement for one hole panel case	30
Fig. 12 Result of the transmittance measurement for one hole panel case	30
Fig. 13 Result of the reflectivity measurement for three hole panel case	31
Fig. 14 Result of the transmittance measurement for three hole panel case	31
Fig. 15 Internal venturi duct flow measurement system	33
Fig. 16 Position of the installed sensors	33
Fig. 17 Venturi tube flow measurement design	34

Fig. 18 Data logging process for the pressure drop	36
Fig. 19 PYRANOMETER photograph	37
Fig. 20 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.005\text{m/s}$	38
Fig. 21 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.020\text{m/s}$	38
Fig. 22 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.035\text{m/s}$	38
Fig. 23 UTC system modeling with Engineering Equation Solver(EES)	42
Fig. 24 UTC system modeling with TRNSYS14.2/IISiBat	42
Fig. 25 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.005\text{m/s}$	46
Fig. 26 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.020\text{m/s}$	46
Fig. 27 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.035\text{m/s}$	46
Fig. 28 UTC thermal system modeling in TRNSYS14.2/IISiBat	50
Fig. 29 Information flow diagram for the UTC thermal system modeling	50
Fig. 30 Simulation result for ambient temperature and useful energy in TRNSYS14.2/IISiBat	53
Fig. 31 Simulation result for monthly useful energy	53

LIST OF TABLES

Table 1 Sample UTC system parameters for reduced wall loss calculation	18
Table 2 KIER outdoor test cell UTC system parameters	45
Table 3 Sensitivity analysis results in EES	49
Table 4 Sensitivity analysis results in TRNSYS14.2/IISiBat	51



NOMENCLATURE

Roman

A : total collector area(m^2)

A_c : cross-sectional area of plenum in direction of air flow(m^2)

A_s : collector surface area(m^2) = $(1 - \sigma)A$

c_p : specific heat(J/kg-K)

d_1 : diameter of throat of primary device at operating conditions

d_2 : upstream internal pipediameter at operating conditions

D : hole diameter(m)

D_h : hydraulic diameter(m)

E : velocity of approach factor

f : friction factor

g : acceleration of gravity(m/s^2)

Gains : internal building gain

h : heat rate coefficient(W/m^2-K)

ht : collector height(m)

I_T : incident solar radiation on the collector surface(W/m^2)

\dot{m} : mass flow rate(kg/s)

Nu_x : Nusselt number where x is the characteristic length

P : hole pitch(m)

q_v : volume rate of flow

Q : annual energy(J/year)

\dot{Q} : heat rate(W)

Re_x : Reynolds number where x is the characteristic length

t_w : hour from midnight

T : temperature($^{\circ}\text{C}$) of (K)

U : heat rate coefficient($\text{W}/\text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}$)

UA : total UA for walls and roof($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)

V : approach velocity(m/s)

V_{plen} : plenum velocity(m/s)



Greek

α : absorptivity

β : diameter ratio

ΔP : pressure drop(Pa)

$\Delta\rho$: density difference between ambient and plenum air(kg/m^3)

δ : slope of collector

ε : emissivity

ε_{HX} : heat exchanger effectiveness of collector

η_{sol} : solar efficiency

ρ : density(kg/m^3)

σ : porosity of the collector plate

σ_{sb} : Stefan-Boltzmann constant(W/m^2-K^4)

ξ : non-dimensional pressure drop across collector

Subscripts

abs : absorbed solar

acc : acceleration

amb : ambient air

aux : auxiliary

bldg : building

buoy : buoyancy in the plenum

col : collector plate

cond,wall : conduction through the wall

conv,col-air : convection from the collector to the air

conv,wall-air : convection from the outside wall surface to the air

dp : dew point

D : hole diameter

film : average film coefficient for air against the original wall

fric : friction in the plenum

gnd : radiative ground

ht : collector height

load : total load

max : maximum

min : minimum

out : collector outlet air

pot : potential conduction through the wall

plen : plenum air

rad,col-sur : radiation from the collector to the surroundings

rad,wall-col : radiation from the outside wall surface to the back of the
collector

red,wall : reduced wall loss

room : room air

save : saved

skin : skin loss from building

sky : radiative sky

solair : sol-air

sup : supply air

sur : radiative surroundings

trad : traditional heating system

u : useful energy

wall : outside wall surface



SUMMARY

Considering the major energy consumptions in Korea consist of industrial, transportation and building energy sectors, about 24 % of them are used for building energies for heating and cooling purposes. Therefore, a solution for the ever-increasing oil price in these days has been necessary and a new technology using a clean renewable solar energy for heating the buildings is recommended for one of the solutions. An UTC(Unglazed Transpired Collector) system without using glazed materials is drawing a key attention in worldwide due to simpler design and operation concept over the conventional glazed system. The purpose of this study is to develop mathematical algorithm, computer models and monitoring techniques of the UTC type solar air heating panel(SAHP) system used for building exterior in conjunction with heating duct system.

To achieve the goal, first, UTC modules has been analyzed mathematically with thermal principles: mass and energy conservation. Second, computer models have been developed for the solar wall panel with reliable computer tools - EES(Engineering Equation Solver) and TRNSYS14.2. Third, the models have been compared and verified with the measured data from KIER outdoor test cell built for this study. Fourth, sensitivity simulations have been conducted to find out the most influential design parameters on annual energy savings.

To summarize the based on the proposed approach, the following major conclusions could have been made and those are:

- Mathematical algorithm for UTC theory has been devised for further understand and improvement of the system.

- EES and TRNSYS model of actual solar wall panel could be developed for more simulations under other conditions
- The computer models could be validated with the measured data from KIER outdoor test cell.
- The major design parameters could be identified such as panel configuration and absorptivity and emissivity values.

Besides the conclusions made from this work, future study items could lead to the following areas:

- Optimum panel configuration study for optimum selective coating solution
- TRNSED model development study for optimum solar integrated building
- Monitoring study of the building integrated computer models with system test cell
- More compact and reliable economic analysis tool study using EXCEL for a feasibility justification
- Optimization of UTC system integrated building considering storage system and solar wall PV(Photo Voltaic) system

I. 서론

1-1. 연구 배경

향후 에너지 수급은 21세기의 다양한 경제·사회적 여건 변화에 따라 에너지부문의 제약조건에 의해 크게 영향을 받을 것이다. 이는 에너지공급의 불안정성, 투자재원의 조달, 공급시설의 입지, 환경오염 등의 문제가 중요한 문제로 대두될 것이고 이 중에서도 화석연료의 사용에 따른 환경문제는 국지적 환경오염 차원에서 뿐만 아니라 지구환경보전 면에서 중요한 제약조건으로 대두될 것이다. 지구환경보전을 위해 제시되고 있는 각종 국제환경협약은 지구환경보전의 수단으로 각종 무역규제조치를 수반할 것으로 예상되어 향후 우리나라의 교역 및 경제성장에도 큰 영향을 미칠 것으로 보인다.

설상가상으로 최근 1년 7개월 이상 계속되어온 국제유가의 지속적 상승과 에너지 수요의 증가로 에너지 공급의 90%이상을 수입에 의존할 수밖에 없는 우리나라로서는 2000년도 전체 에너지 수입액이 최초로 300억불을 초과할 것으로 예상되고 있다. 이는 '99년 대비 33.3%의 증가율을 보이는 것이다. 에너지 소비부문을 살펴보면 '99년 1월부터 10월까지 산업부문 에너지 소비 증가가 전년 대비 5.7% 증가에 그친 반면, 가정·상업부문은 20.4%로 90년 이래 가장 높은 증가율을 보였다. 특히 최근 급신장세를 보이고 있는 가정·상업용 부문 에너지 소비는 전적으로 건물 관련 에너지 소비임으로 건물에 대한 혁신적인 에너지저감기술 개발 및 환경오염대책 차원에서 대체에너지기술 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다[1].

대체에너지기술의 성공적 활용을 위해서는 손쉬운 적용, 환경 친화 그리고 적정 경제성을 포함해야 한다. 그러나 일반적으로 대체에너지기술은 기존시설에 비해 초기투자비 증대분을 연료비 절감비용으로 회수해야 하는데 대다수의 대체에너지

기술들이 과다한 투자비용에 비해 경제성이 적정치 않아 활용과 보급이 원활하지 않은 것이 사실이다. 그러므로 본 연구에서는 에너지수급을 거의 전적으로 수입에 의존하고 있는 우리나라 실정에 맞게 유가상승과 환경오염 등의 문제를 대처하기 위한 방안으로 최근의 IEA(International Energy Agency) 연구사업 현황을 근거로 관심이 고조되고 있는 건물관련 에너지소비를 해결하기 위하여 경제성이 우수한 대체에너지활용기술의 한가지인 Solar Air System(SAS)으로 전환하기 위한 연구를 수행하였다.

1-2. 연구 동향 및 목적

연구배경에서 언급한 바와 같이 대체에너지기술 개발이 절실한 시점인 지금 본 연구에서는 최근 SAS 시스템 중 태양열 공기난방 건축 외장 판넬 시스템으로써 세계적으로 주목을 받고 있는 UTC(Unglazed Transpired Collector) 시스템에 대한 연구를 수행하였다. UTC 시스템은 건물의 난방부하를 줄이기 위해 건물의 남쪽벽면에 설치된 유리커버가 없는 천공 철판식 집열판으로 태양열을 집열하여 신선한 외부공기를 가열한 뒤 건물 내부의 덕트를 통하여 따뜻한 공기를 공급하는 시스템이다. 건물지붕에 설치하는 기존의 유리커버가 있는 공기식 집열기에 비해서 시스템이 단순 간단하기 때문에 시공 및 유지보수가 수월할 뿐만 아니라 초기 설치비용이 매우 저렴하다고 알려져 있다.

UTC 시스템에 대한 국내연구는 지금까지 전무한 실정이지만 선진국에서는 이미 1969년에 다공판[2]에 대한 연구부터 격자형태공기히터[3] 그리고 유리커버가 있는 천공판 공기히터[4] 등과 같은 연구들이 진행되어 시스템 개발에 대한 기초를 제공하였으며, 시스템 이론의 전반적인 연구는 1992년 Kutscher에 의해 수행되었다[5]. 그는 낮은 기공률을 가지는 판을 통과하는 공기흐름의 열전달에 대하여 이론과 수치해석 그리고 실험을 통하여 분석을 수행하였는데 이후 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 계속 수행된 결과가 보고되었

다[6, 7]. 이와 비슷한 연구가 Golneshan에 의해서 슬릿형 천공판에 대해서 수행되었다[8]. 천공판을 통하는 공기흐름분포에 대한 연구는 Gunnewiek에 의해 수행되었고[9] 1995년에는 미국 위스콘신(Wisconsin) 대학에서 UTC 시스템을 위스콘신 주의 건물에 적용시 열성능과 경제성평가에 대한 논문이 제출된 바 있다[10].

본 연구의 목적은 위의 주요논문을 근거로 하여 상기 UTC 기술 국내적용 가능성 및 기술개발을 위해 보다 체계적인 UTC 태양 시스템에 대한 이론분석을 수행하고 시스템 열성능을 조사하고자 한다. 즉, UTC 시스템의 이론적 연구를 토대로 EES(Engineering Equation Solver) 및 TRNSYS14.2/IISiBat 프로그램 모델을 개발하고, 시스템 주요성능 변수들에 대해 민감도 분석을 수행하기 위해 검증된 프로그램모델을 활용하여 시스템 열성능의 주요변수들을 도출하여 연간 시스템 열성능을 정량적으로 분석하고자 한다.

1-3. 연구 방법



UTC 시스템에 대한 열성능 분석을 위해 연구의 구성은 크게 4단계로 구분하였으며 각 단계에서 진행되는 연구의 내용은 다음과 같다.

1단계 : 시스템 이론 해석

시스템의 작동개략도를 바탕으로 시스템에서 일어날 수 있는 열전달을 해석하고 프로그램모델에서 이용되는 방정식들을 이론식과 실험식을 근거로 해석하였다. 또한 시스템에서 유입된 공기를 재사용하지 않는 건물을 선정하여 시스템 운영에 따른 에너지 절감량 산출식을 설명하였고 집열판 설치면적 산정식과 압력강하에 따른 팬동력 계산식을 설명하였다.

2단계 : 시스템 모니터링

UTC 집열관의 재질특성실험을 거쳐 흡수율을 측정하였고, 실제로 시스템을 한국에너지기술연구소의 실험동에 설치하여 일정한 공기접근속도에 따라 집열관의 태양입사에너지와 공기상승온도에 대한 열성능곡선을 도출하였다.

3단계 : 시스템 모델링

1단계의 방정식들을 바탕으로 EES 및 TRNSYS14.2/IISiBat 시스템 열성능 프로그램모델을 개발하여 2단계의 실험데이터와 비교 검증하였다. 검증된 모델을 가지고 주요성능변수들에 대한 민감도분석을 수행하여 시스템 열성능에 주요한 영향을 미치는 변수들을 도출하였다. 아울러 한국에너지기술연구소에서 보유하고 있는 대전기상데이터를 프로그램모델에 활용하여 월간 및 연간 열성능분석을 정량적으로 수행하였다.



4단계 : 향후 연구방향 제시

3단계까지의 UTC 시스템에 대한 연구를 토대로 결론에서 향후 태양열 공기난방 건축외장판넬 시스템의 개선을 위한 연구방향을 제시하였다.

II. 시스템 이론

최근 건물의 난방에너지 절감기술로 세계적으로 주목받고 있는 UTC 시스템은 시스템이 단순, 간단하여 조립화 모듈화 부품으로 보급성과 생산성이 우수할 뿐만 아니라 초기투자 설치비용이 상대적으로 아주 저렴하여 경제적으로 매우 우수한 기술이다. 이 시스템의 주요기술인 UTC 집열판은 유리커버가 필요 없는 수많은 기공들로 이루어진 천공 철판식 집열판이다. 집열판의 형상은 파형 또는 절곡형으로 이루어져 건물의 남쪽벽면에 설치하였을 때 태양열 흡수율 측면과 구조강성유지 측면에서 유리한 장점을 가지고 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 UTC 집열판 형상을 보여주고 있다. 건물 외부의 공기는 Fig. 2와 같이 집열판과 외벽사이의 공기층으로 집열판의 기공들을 통하여 태양열을 흡수하여 빨려들어 온 후 공기층 위로 상승하여 최종적으로 건물 내부로 연결된 덕트를 통하여 유입된다. 외기온도가 바이패스 설정온도를 초과하였을 때 바이패스 댐퍼는 자동적으로 열리고 외기는 직접 건물 내부로 유입되며 이때 집열판을 통과한 더운 공기는 건물 내부로의 유입이 차단된다.



Fig. 1 Shape of the UTC panel

Fig. 2와 같이 기존의 태양열 공기난방 시스템인 유리커버가 있는 공기식 집열기와는 별개로 UTC 시스템은 유리커버가 없기 때문에 막대한 초기비용을 줄일 수 있고 건물내부의 순환공기를 재가열하지 않고 난방부하의 증가 없이 충분한 신선외기를 유입할 수 있으므로 실내공기 환경을 크게 개선할 수 있는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 기존 시스템의 유리커버에 의한 반사손실도 제거할 수도 있다. 이러한 이유로 UTC 시스템은 신선한 외기를 많이 요구하는 건물인 공장형 건물 또는 학교건물과 같은 대형 건물에 적용시 에너지 절감으로 막대한 이익을 창출할 수 있다.

UTC 시스템의 에너지절감 방법은 3가지이다. 에너지 절감량 중 대부분은 집열판에 직접 입사된 일사량이며 이 에너지는 집열판을 통과하여 흐르는 공기와 대류에 의해 공기층으로 에너지가 전달된다. 두 번째는 집열판을 통과한 공기는 외벽과 집열판 사이의 공기층에서 위로 상승하면서 외벽표면으로부터 대류에 의해 에너지를 전달받는다. 마지막으로 세 번째 에너지절감은 벽체 열손실 감소로 외벽을 가로지르는 온도차가 UTC 시스템에 의해 감소되기 때문에 건물내부와 공기층 사이의 낮은 온도차가 벽을 통과하는 전도 열전달률을 감소시켜 열손실을 감소시킴으로써 결과적으로 에너지를 절감하게 된다. Fig. 3은 에너지 획득에 대한 UTC 시스템의 작동 개략도를 보여주고 있다.

UTC 시스템의 열 성능평가를 위해서는 연간 시뮬레이션 동안 수천 번의 계산이 필요하므로 여기에 필요한 이론식들을 정확하게 적용할 필요가 있다. 그러므로 이 장에서는 UTC 시스템의 전반적인 이론을 제시하였다.

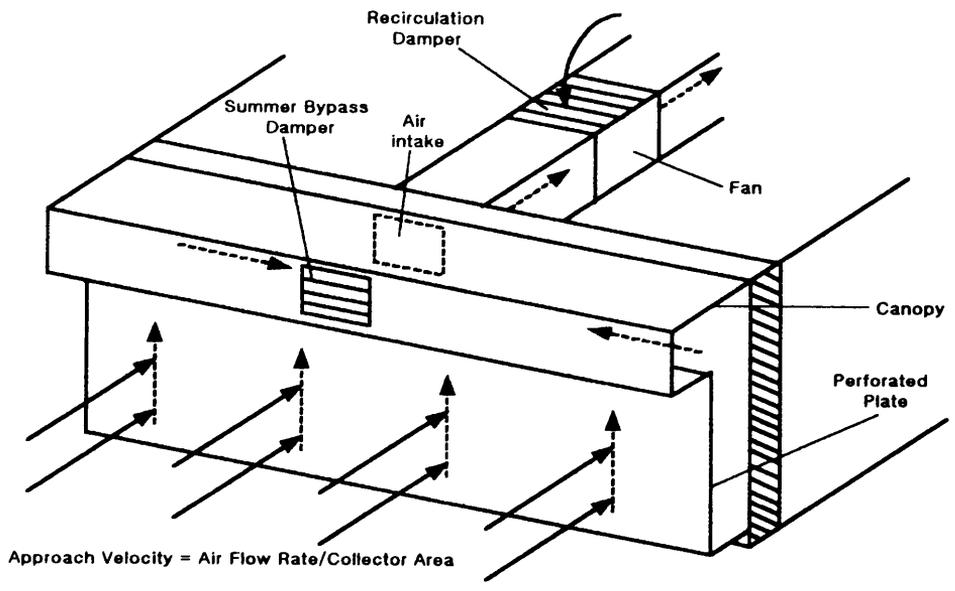


Fig. 2 Perspective view of an UTC system

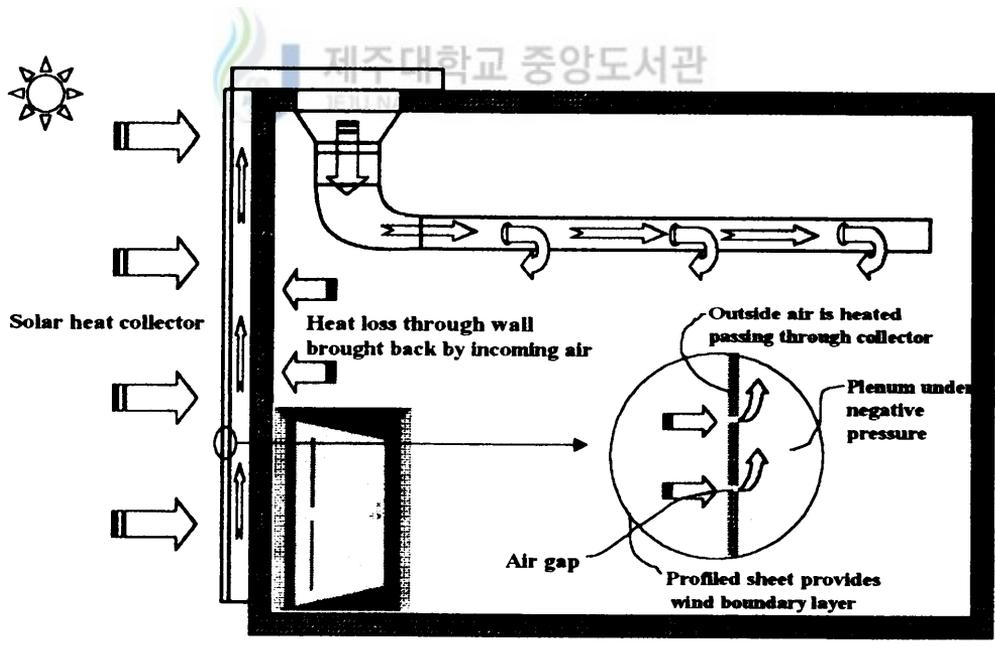


Fig. 3 Cross-sectional view of an UTC system

2-1. 에너지균형방정식

UTC 시스템의 열성능을 예견하기 위해서는 집열판을 통하여 건물내부로 유입되는 온도, 즉 출구공기온도(T_{out})를 계산함으로써 여러 가지 열성능 변수들을 구할 수 있다. 여기에는 시스템 이론의 기본적인 방정식으로 4개의 에너지 균형방정식을 사용하였다.

천정덮개는 공기가 일정한 속도로 작동하는 덮개로 가정하였다. 이는 공기층 내부에 있는 공기가 수직 방향으로만 흐르고 수평 방향으로는 흐르지 않는다는 것을 의미하며 따라서 Fig. 4와 같이 2차원으로 해석 가능하다. 외부공기는 집열판 내부의 기공들을 통하여 공기층 내부로 유입되는데 공기층 내부의 집열판을 통과하는 공기유량은 집열판 표면으로부터 대류에 의해 에너지를 흡수한다.

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

공기 유량 \dot{m}_{out} 은 집열판을 통과하는 외부공기유량이다. 공기층에서 공기온도는 균일하다고 가정하였는데[5], 이는 복잡한 CFD 분석에 대한 필요한 조건들을 해소할 수 있다. 또한 Fig. 4에서처럼 공기는 위로 흐르면서 외벽 표면과의 대류에 의해 에너지를 흡수한다.

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

Fig. 5는 외벽표면에서의 에너지균형을 보여주고 있다.

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

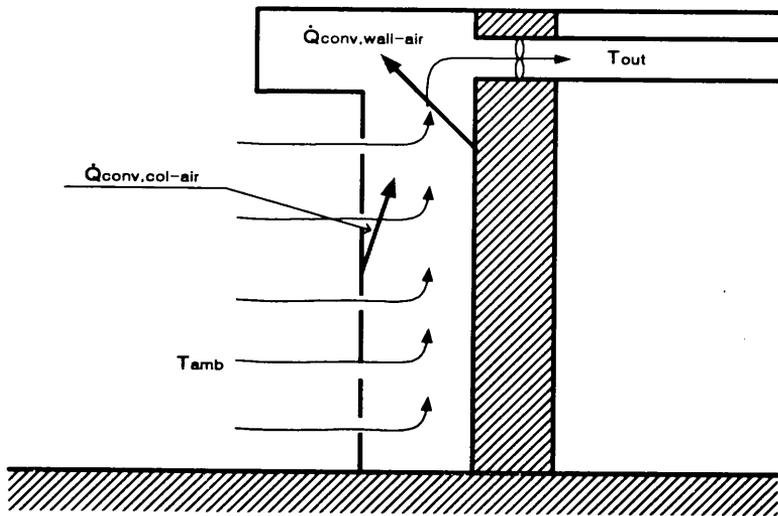


Fig. 4 Energy balance on air

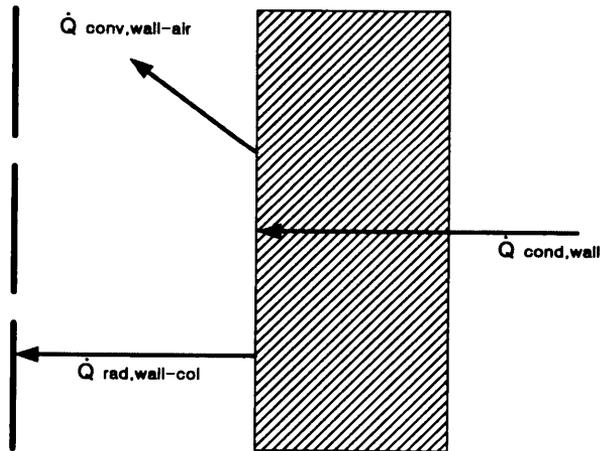
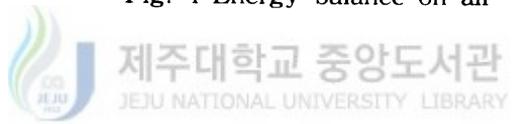


Fig. 5 Energy balance on wall

외벽표면은 건물 내부로부터 벽체를 통과하는 전도에 의하여 에너지를 얻어서 공기층에서 공기에 의한 대류와 컬렉터 뒤 표면으로 복사에 의해 에너지를 방출한다.

집열판에서의 에너지 균형은 Fig. 6과 같다. 집열판에서 얻은 에너지는 태양열 복사에너지와 외벽체 표면으로부터 적외선영역의 복사에너지이고, 집열판에서 손실된 에너지는 집열판 내부의 기공들을 통과하여 흐르는 공기 흐름에 의한 대류손실과 집열판에서 주변으로의 복사손실이다.

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

집열판에서 공기로의 대류는 집열판의 앞 표면과 기공 그리고 뒤 표면에서부터의 대류를 모두 포함한다.

식 (4)에서 집열판에서 주변으로의 대류손실은 없다고 가정하였다. 이 가정은 집열판에서 주변으로의 자연대류손실과 바람에 의한 강제대류손실이 없다는 것을 의

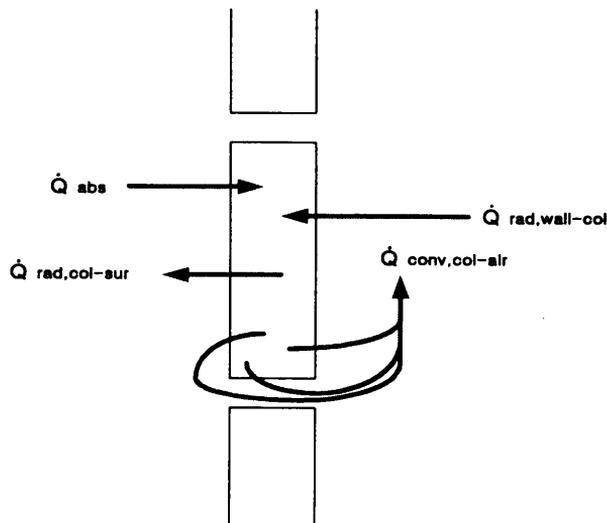


Fig. 6 Energy balance on collector plate

미한다. 이러한 근사는 단위 집열판 면적 당 공기유량, 즉 공기접근속도가 0.02m/s 이상이고 집열판 면적이 구석손실을 무시할 수 있을 정도로 충분히 클 때 실험적으로 이미 증명되었다[5].

2-2. 비율방정식

2-1절에 있는 에너지 균형 방정식을 계산하기 위해서는 에너지흐름에 관한 몇 개의 비율방정식이 요구된다.

먼저 집열판에서 공기층으로의 대류에 의한 열전달 상관식으로 검증된 실험식을 사용하였다[5].

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

여기서 P는 기공 중심들 사이의 거리, 즉 기공 피치이고 D는 기공 직경이다. 이 상관식에서 $h_{conv, col-air}$ 를 찾는데 사용되는 Nusselt 수는 기공직경을 기초로 하여 계산한다. 집열판에 관한 열교환 유효도는 식 (6)에 의해 계산된다[11].

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

유효도는 다시 공기층의 공기 온도와 집열판 온도 사이의 관계식으로 적용되어 온도계산에 이용된다.

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

집열관 온도는 균일하다고 가정하였다. 실제로 실험적으로도 집열관의 온도가 대체로 균일하였으며 이는 집열관을 통과하는 흐름이 상대적으로 균일하다는 가정이 이미 검증된 것이다[5]. 집열관을 통과하는 균일한 흐름을 보장하기 위해 집열관을 통과하는 압력강하는 최소한 25Pa 이상이 되어야 한다.

외부 벽체에서 공기로의 대류에 대한 열전달 상관식은 평행유동에 대한 평판형 상관식을 사용하였다[11]. 식 (8)은 혼합된 흐름 상관식으로 $Re_{ht} > 5 \times 10^5$ 일 때 사용된다.

$$Nu_{ht} = (0.037 Re_{ht}^{0.8} - 871) Pr^{1/3} \quad (8)$$

$Re_{ht} < 5 \times 10^5$ 에 대해서는, 다음의 층류유동 상관식이 사용된다.



제주대학교 중앙도서관
Jeju University Central Library

$$Nu_{ht} = 0.064 Re_{ht}^{0.5} Pr^{1/3} \quad (9)$$

이 상관식에는 평균 공기층속도가 사용된다. 공기층 속도는 바닥의 0에서 천정의 최대속도까지 변하기 때문에 평균 속도는 단순히 최대속도의 1/2을 적용한다. 위의 상관식은 $h_{conv, wall-air}$ 를 구하는데 사용되고, 다음의 비울방정식에 적용된다.

$$\dot{Q}_{conv, wall-air} = h_{conv, wall-air} A (T_{wall} - T_{plen}) \quad (10)$$

여기서 외벽체 표면의 온도는 균일하다고 가정하였다. 평판형 상관식은 공기층에서의 흐름에 대한 연구가 부족하기 때문에 사실상 의문스러울 수도 있다. 그러나 이보다 더 나은 상관식을 제공하는 실험적인 연구는 아직 수행되지 않았으므로 평판형(flat-plate) 상관식을 사용하였다. 이러한 근사는 4-3절에서 입사에너지가 작

을 때 벽체에서 공기로의 대류 열전달을 하향적으로 예견하는 결과를 초래하였다.
 다음의 비율방정식들은 외부 벽체표면과 집열판에서의 에너지 균형과 관계된 식
 들이다.

$$\dot{Q}_{\text{cond, wall}} = U_{\text{cond, wall}} A (T_{\text{room}} - T_{\text{wall}}) \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad, wall-col}} = \sigma_{\text{sb}} A \frac{T_{\text{wall}}^4 - T_{\text{col}}^4}{\frac{1}{\epsilon_{\text{wall}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{col}}} - 1} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \alpha_{\text{col}} I_T A_s \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad, col-sur}} = \epsilon_{\text{col}} \sigma_{\text{sb}} A_s (T_{\text{col}}^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (14)$$



여기서 식 (11)은 벽체 내부로부터의 전도 열전달률식이고, 식 (12)는 밀폐공간에
 서의 아주 긴 두 개의 평행평판에 대한 식[11]이며 식 (13)은 집열판에서의 흡수율
 에 관계된 식이다. 식 (14)는 주변으로의 복사 열손실에 관한 식으로 UTC 집열판
 이 수직으로 설치되었을 때 주변온도는 지표면온도와 천공온도의 식으로 사용될
 수 있고 주변온도는 다음과 같다.

$$T_{\text{sur}}^4 = 0.5 (T_{\text{gnd}}^4 + T_{\text{sky}}^4) \quad (15)$$

여기서 계수 값 0.5는 형상계수 값으로 경사면의 천공에 대한 형상계수와 경사면
 의 지면에 대한 형상계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_{sky} = (1 + \cos \delta)/2$$

$$F_{grd} = (1 - \cos \delta)/2$$
(16)

여기서 δ 는 집열판의 기울기로 90° 이다. 식 (15)는 단지 수직으로 설치된 UTC 집열판에 대한 식으로 지표면온도는 외기 온도와 동일하다고 가정하였다. 천공온도를 계산하기 위해서 Martin 과 Berdahl는 광범위한 데이터를 사용하여 유효천공온도를 노점온도(T_{dp}), 외기온도(T_{amb}) 그리고 자정으로부터의 시간(t_w)에 대해서 다음과 같은 실험식을 제시하였다[13].

$$T_{sky} + 273.15 = (T_{amb} + 273.15)(0.711 + 0.0056T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013\cos(t_w))^{1/4}$$
(17)

2-3. UTC 시스템 운영  **제주대학교 중앙도서관**
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

외기 공기는 집열판에 의해서 출구온도(T_{out})까지 가열되는데 여기서 얻어진 유효획득에너지는 집열판으로부터의 대류와 벽체 표면으로부터의 대류의 합으로 나타낸다.

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_{conv, col-air} + \dot{Q}_{conv, wall-air}$$
(18)

여기서 $\dot{Q}_{conv, col-air}$ 와 $\dot{Q}_{conv, wall-air}$ 는 식 (1)과 식 (2)를 적용하였다. Fig. 7은 UTC 시스템에서 나오는 공기를 건물 내부의 순환공기와 혼합하지 않는 간단한 건물의 운영시스템을 보여주고 있다. 집열판을 통과하여 건물내부로 유입되는 출구공기는 건물내부 온도에 따라 Fig. 7과 같이 난방부하를 만족하기 위해 필요한 공급온도까지 가열된다.

바이패스 댐퍼는 외기 온도가 설정온도를 초과할 때 열린다. 바이패스 댐퍼는 건물 공기 입구의 바로 앞인 집열판 안쪽에 설치된다. 바이패스 댐퍼가 열리면 외부공기는 집열판에 의해 가열되지 않고 직접 건물 안으로 유입되고 집열판을 통과하여 가열된 공기는 자연대류에 의해 건물내부로 유입되지 않게 하기 위해 건물 공기유입구가 차단된다.

건물내부로 들어가는 공급 공기유량 \dot{m} 은 팬 용량에 따라 고정된다. 따라서 전체 시스템에서 에너지균형은 난방부하를 만족하기 위해 요구되는 보조에너지를 계산한다.

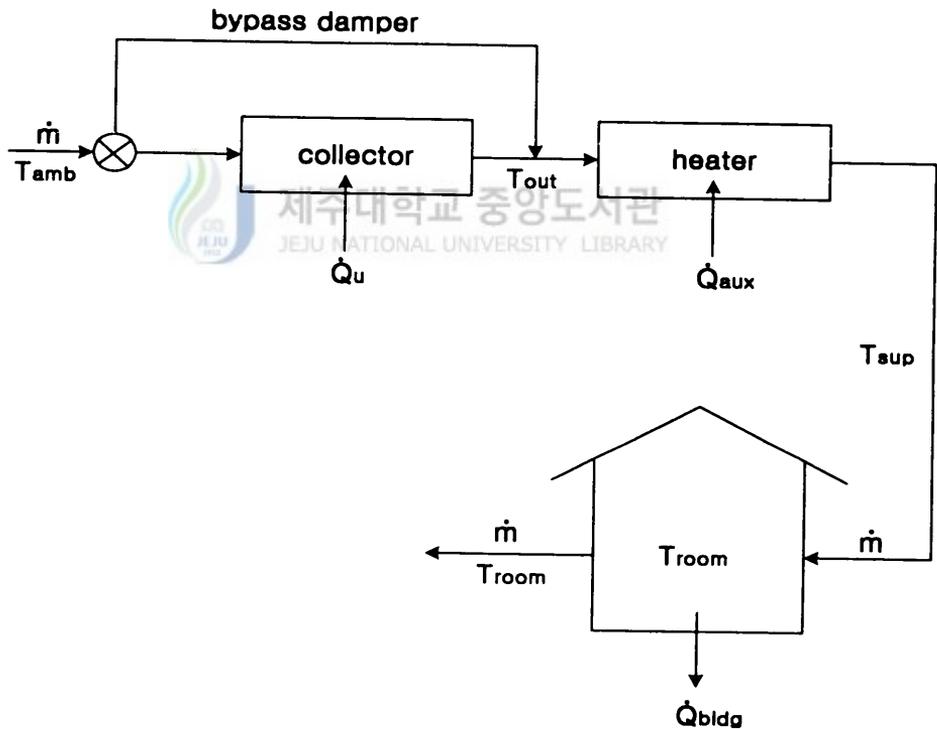


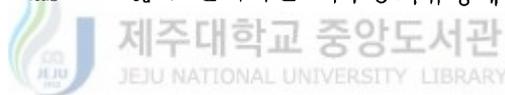
Fig. 7 Basic overview of UTC system model

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{aux} &= \dot{m}c_p(T_{room} - T_{amb}) + \dot{Q}_{bldg} - \dot{Q}_u \\ &= \dot{Q}_{load} - \dot{Q}_u\end{aligned}\quad (19)$$

주어진 건물 운영조건에서 \dot{Q}_{bldg} 는 벽체 관류손실과 사람, 조명등 등과 같은 내부 획득으로 구성된다.

$$\dot{Q}_{bldg} = UA(T_{room} - T_{amb}) - Gains \quad (20)$$

집열판에서 얻을 수 있는 유효 획득에너지 (\dot{Q}_u)의 양은 제한되어 있는데 이는 집열판에서 흡수된 태양에너지 양과 벽체 관류손실 재회수량이 한정되었기 때문이다. UTC 시스템은 \dot{Q}_{aux} , 즉 $\dot{Q}_{load} - \dot{Q}_u$ 를 최소화하기 위해 제어된다. 그러므로 UTC 시스템은 \dot{Q}_{load} 와 \dot{Q}_u 가 일치하는 외부공기유량에서 작동하는 것이 바람직하다.



T_{out} 과 T_{sup} 가 동일한 \dot{m} 에서는 \dot{Q}_{aux} 가 0이다. 그러므로 UTC 시스템은 이 허용범위에 있는 외부공기유량에서 작동해야 한다. 만약 외부공기유량이 적다면 T_{out} 에서의 공기는 너무 더울 뿐만 아니라 모자란 외부공기유량은 내부공기 질을 개선할 수 있는 잇점을 얻을 수 없다. 그러나 만약 외부공기유량이 많다면 \dot{Q}_u 는 증가하고 내부공기 질을 더 많이 개선할 수 있으나 보조에너지 (\dot{Q}_{aux})가 많이 요구된다.

외기 온도가 높은 여름에는 보조에너지가 0인 상태 ($\dot{Q}_{load} \leq \dot{Q}_u$)로 외부공기유량의 최대기준을 초과할 수 있다. 이때 T_{out} 은 요구되는 T_{sup} 보다 온도가 더 크게 되므로 바이패스 댐퍼가 열려서 더 이상 집열판에 의해 가열된 공기가 유입되지 않게 한다.

2-4. 벽체 열손실감소

벽체 열손실감소는 남쪽 벽체를 통하는 포텐셜 전도와 실제 전도의 차를 가지고 계산된다. 벽체를 통하는 포텐셜 전도는 벽체를 가로지르는 두 온도차 즉, $(T_{\text{room}} - T_{\text{solair}})$ 에 의하여 계산된다. 따라서 남쪽 벽체에 설치된 UTC 집열판에 대한 실제 온도차는 $(T_{\text{room}} - T_{\text{plen}})$ 이므로 벽체 손실이 감소된다.

UTC 집열판에 의해 표면이 단혀진 벽체를 통하는 전도는 다음 식 (21)에 나타났다.

$$\dot{Q}_{\text{cond, wall}} = U_{\text{cond, wall}} A (T_{\text{room}} - T_{\text{plen}}) \quad (21)$$

만약 UTC 집열판이 설치되어 있지 않다면 벽체를 통하는 전도는 상당 외기온도를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q}_{\text{pot}} = U_{\text{cond, wall}} A (T_{\text{room}} - T_{\text{solair}}) \quad (22)$$

상당 외기온도는 벽에 미치는 태양 입사에너지, 천공과 주위의 방사에너지 교환 그리고 주위와의 대류 열 교환을 하나로 통합하여 나타낸 표면에서의 외기온도로써 건물 외벽, 즉 수직벽에 적용시 식 (23)에 나타냈다[14].

$$T_{\text{solair}} = T_{\text{amb}} + \alpha_{\text{wall}} I_T / h_{\text{film}} \quad (23)$$

벽체에 대한 공기막의 평균 열전도계수는 보통 건물에 적용하는 $15 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ 로 가정하였다[10]. 그래서 UTC 집열판으로 인하여 벽체를 통하는 열전도 감소에 대한 식은 식 (24)와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{red, wall}} &= \dot{Q}_{\text{pot}} - \dot{Q}_{\text{cond, wall}} \\ &= U_{\text{cond, wall}} A (T_{\text{plen}} - T_{\text{solair}})\end{aligned}\quad (24)$$

벽체 열손실감소는 UTC 시스템에서 저장되는 전체에너지에 비해 미소한 요소로 간단한 수치적 계산 예는 다음과 같다. 계산에 이용되는 파라메타 값들은 Table 1과 같다.

상당외기온도는 식 (25)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}T_{\text{solair}} &= T_{\text{amb}} + \alpha_{\text{wall}} I_T / h_{\text{film}} \\ &= 0 + (0.4)(700)/(15) = 18.7^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (25)$$

벽체 열손실감소는 식 (26)에 의해 계산된다.



Table 1 Sample UTC system parameters for reduced wall loss calculation

Parameter	Value
$U_{\text{cond, wall}}$	$0.568 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$
collector area, A	100.0 m^2
ambient air temperature, T_{amb}	$0.0 \text{ }^\circ\text{C}$
plenum air temperature, T_{plen}	$10.0 \text{ }^\circ\text{C}$
wall absorptivity, α_{wall}	0.4
solar radiation, I_T	700.0 W/m^2
air density, ρ	1.200 kg/m^3
approach velocity, V	0.035 m/s
air specific heat, c_p	$1006.0 \text{ J/kg-}^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{red, wall}} &= U_{\text{cond, wall}}A(T_{\text{plen}} - T_{\text{solair}}) \\ &= (0.568)(100)[10 - 18.7] = -492\text{W}\end{aligned}\quad (26)$$

이 예에서는 벽체 열손실은 실제로 증가하고 있으며 벽체 열손실은 상당 외기온도가 공기층의 온도보다 클 때 더 증가하게 된다. 사실상 UTC 집열판은 벽체를 그늘지게 함으로써 벽체를 통하는 전도를 증가시킨다.

UTC 시스템에서 공기유량에 의해 얻어지는 유효획득에너지의 대부분은 식 (1)에서 얻어지는 집열판에서 공기로의 대류에 의한 것이다. 집열판을 통하는 질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{\text{out}} = \rho VA = (1.2)(0.035)(100) = 4.2\text{kg/s}\quad (27)$$

식 (1)을 적용하면



$$\dot{Q}_{\text{conv, col-air}} = (4.2)(1006)(10) = 42,250\text{W}\quad (28)$$

따라서 벽체 열손실감소의 양은 UTC 집열판에서 얻어진 유효획득에너지의 1% 정도로 전체 유효획득에너지에 비해 아주 적은 양이므로 에너지절감량 계산시 무시한다. 벽체 열손실감소는 밤과 구름이 많이 낀 날에 더 증가한다.

2-5. 최소공기접근속도와 최대집열판면적

집열판면적은 남쪽 벽체 표면면적보다 클 수가 없고 집열판의 최대면적을 구하기 위해서는 몇 가지 요건을 필요로 한다. 즉 집열판에서 주위로의 대류손실은 없다고 하였는데 이 가정은 단지 공기접근속도가 0.02 m/s 이상일 때 유효하다[5].

그러므로 최소 외부공기요구량이 주어진 건물에서 최대 효율로 운영되기 위한 최대유효집열판면적을 구할 수 있다.

$$A_{\max} = \dot{m}_{\text{trad}} / (\rho V_{\min}) \quad (29)$$

만약 집열판면적이 최대치보다 크다면 공기접근속도가 0.02m/s이하로 되어 집열판에서 대류손실이 발생하게 된다.

다음 식은 집열판을 가로지르는 압력강하를 계산하기 위해 사용된다[5].

$$\Delta P_{\text{col}} = \zeta \rho V^2 / 2 \quad (30)$$

무차원 압력강하계수, ζ , 는 실험적인 상관식을 이용하여 계산한다[5].



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\zeta = 6.82 \left((1 - \sigma) / \sigma \right)^2 (\text{Re}_D)^{-0.236} \quad (31)$$

UTC 집열판의 기공률은 다음 식으로 주어진다[5].

$$\sigma = 0.907 (D/P)^2 \quad (32)$$

집열판에서 균일한 유동분포를 확보하기 위해 집열판을 가로지르는 압력강하는 적어도 25 Pa 이상이 되어야 한다. 균일한 유동분포는 집열판에서 균일한 온도분포의 결과로 나타나게 되어 집열판의 성능을 최적화한다. 만약 온도분포가 균일하지 않다면 집열판에서 뜨거운 부분들이 주위로의 복사손실을 증가시켜서 UTC 시스템 효율을 떨어뜨릴 것이다. 집열판의 기공률에 의존하여 판을 가로지르는 압력강하는 공기접근속도 0.02 m/s에 대해 25 Pa 보다 적게 될 수도 있다. 이러한 경

우 최소공기접근속도는 0.02 m/s 보다 더 커야 한다. 이 때 최소공기접근속도의 증가로 인하여 결국 최대 집열판면적도 감소하게 된다.

2-6. 집열판 면적에 따른 공기접근속도

공기접근속도와 집열판을 통과하는 공기유량은 집열판 면적과 관계가 있다.

$$\text{Air Flow Rate} = \dot{m}_{\text{out}} / \rho = V \times A \quad (33)$$

Fig. 8은 UTC 시스템에서 집열판 면적의 함수로 공기접근속도를 간단하게 보여 주고 있다. 임의의 집열판 면적에서 \dot{m}_{out} 이 \dot{m}_{trad} 으로 될 때 집열판을 통과하는 공기유량은 요구되는 외부공기의 모든 조건을 만족한다. Fig. 8에서 집열판을 통과하는 공기유량은 400 m² 이상에서 외부 공기요구량과 만나게 된다. 최대 집열판면적은 바로 앞 절에서 논의한 대로 결정된다. Fig. 8에서 최대 집열판면적은 1,000 m² 인데 이는 공기접근속도가 0.02 m/s 이상이어야 하기 때문이다.

Fig. 8에서 제시한 바와 같이 면적이 작은 집열판에 대한 \dot{m}_{trad} 의 공기접근속도는 0.05 m/s 이다. 이 값은 UTC 집열판 효율이 실제로 공기접근속도가 0.05 m/s 이상일 때는 증가하지 않기 때문이며[5], 이 이상의 속도에서는 팬 동력이 필요하다. 만약 더 낮은 공기접근속도가 사용된다면 UTC 시스템의 효율은 더 낮게 된다 [5]. 또한 면적이 작은 집열판에서는 건물의 최소 외부공기요구량은 집열판을 통과하는 공기유량에 의해서만 만족할 수는 없기 때문에 부가적인 공조장치가 추가로 설치되어 모자란 나머지 외부공기를 제공할 수도 있다.

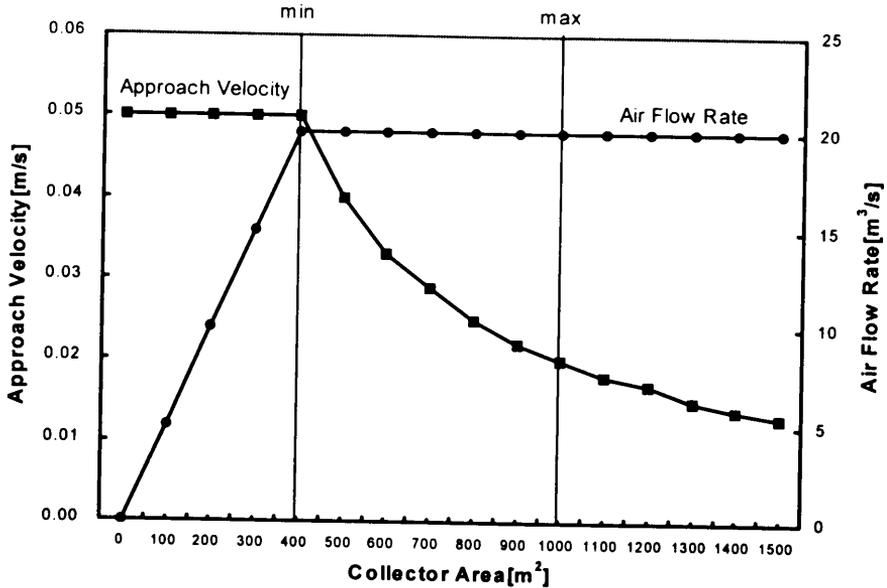


Fig. 8 Approach velocity and air flow rate for different collector areas



2-7. 압력강하와 팬 동력

UTC 시스템의 총 압력강하는 집열판을 가로지르는 압력뿐만 아니라 공기층을 통과하는 압력강하에 기인한다. 여기서 계산되는 총 압력강하는 UTC 시스템에서의 압력강하이므로 UTC 시스템은 건물의 추가적인 시스템이므로 여기서 계산되는 팬 동력은 보조 팬 동력이다. 보조 팬 동력을 결정짓는 압력은 다음과 같다(Fig. 9).

시스템의 팬 동력에 요구되는 총 압력강하는 집열판을 통과하는 압력강하 그리고 공기층에서의 압력강하인 마찰, 부력, 가속도로 구성된다.

$$\Delta P = \Delta P_{col} + \Delta P_{fric} - \Delta P_{buoy} + \Delta P_{acc} \quad (34)$$

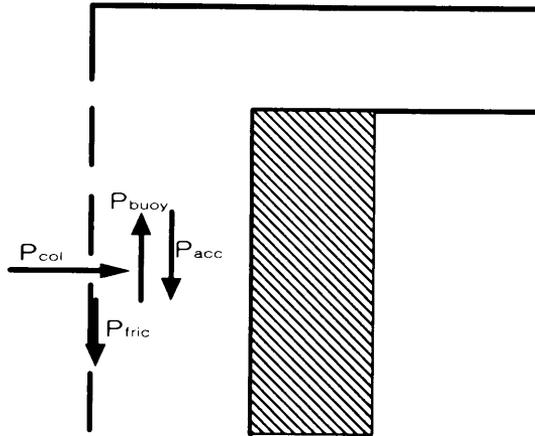


Fig. 9 Directions of the pressure drop

집열판을 통과하는 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P_{col} = \zeta \rho V^2 / 2 \quad (35)$$

여기서 무차원 압력강하계수와 기공률은 다음과 같다.

$$\zeta = 6.82 \left((1 - \sigma) / \sigma \right)^2 \text{Re}_D^{-0.236}$$

$$\sigma = 0.907 (D/P)^2$$

공기층에서 마찰에 의한 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P_{fric} = f \frac{ht}{D_h} \frac{\rho V_{plen, avg}^2}{2} \quad (36)$$

여기서 수력직경(D_h)과 평균공기층속도($V_{plen,avg}$)는 다음과 같다.

$$D_h = 4A_c/P_c \quad (37)$$

$$V_{plen,avg} = \frac{V_{plen,max}}{2} \quad (38)$$

여기서 최대공기층속도($V_{plen,max}$)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{plen,max} &= (\text{Air Flow Rate})/(\text{plenum depth} \times \text{collector length}) \\ &= (\text{Approach Velocity} \times ht)/(\text{collector length}) \end{aligned} \quad (39)$$

공기층에서 부력에 의한 압력강하는 다음과 같다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\Delta P_{buoy} = \Delta \rho g ht \quad (40)$$

$\Delta \rho$ 는 공기층의 바닥과 천정에서의 밀도차이므로 이 위치에서의 온도를 측정하여 밀도를 산정한다. 공기층에서 중력에 의한 압력강하는 다음과 같다.

$$\Delta P_{acc} = \frac{\rho (V_{plen,max})^2}{2} \quad (41)$$

따라서 UTC 시스템의 팬 파워는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Fan Power} = \frac{\dot{m}_{out} \Delta P}{\rho} = \Delta P \cdot A \cdot V \quad (42)$$

여기서

$$\dot{m}_{out} = \rho VA$$

식 (42)에서 팬 동력의 에너지소비량은 총 에너지절감량에 비해 매우 미소한 양이기 때문에 다음 절의 총 에너지절감량에는 포함하지 않았다.

2-8. 에너지 절감

UTC 시스템은 태양열 획득, 벽체 관류손실 재회수, 벽체 열손실감소 등 3가지 에너지 절약 메커니즘이 있다. 그러나 UTC 시스템의 에너지 절감량은 이 3가지 요소들의 합으로 간단하게 구할 수 없다. 기본적으로 에너지 절감은 기존의 전형적 시스템에서 요구하는 열량의 감소, 즉 난방비용의 감소라고 할 수 있다. 따라서 UTC 시스템을 건물에 적용시 보조히터에서 요구하는 열량은 기존 건물의 난방 시스템에서 요구하는 열량보다 적게 된다.

$$\dot{Q}_{save} = \dot{Q}_{trad} - \dot{Q}_{aux} \quad (43)$$

UTC 시스템에서 보조에너지는 건물부하와 UTC 시스템에서 얻어진 유효획득에너지와의 차로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{aux} &= \dot{Q}_{load} - \dot{Q}_u \\ &= \dot{Q}_{load} - (\dot{Q}_{conv, col-air} + \dot{Q}_{conv, wall-air}) \end{aligned} \quad (44)$$

건물부하는 건물 안으로 유입하는 외부 공기유량에 의존한다.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{load} &= \dot{m}_{load} c_p (T_{room} - T_{amb}) + \dot{Q}_{bldg} \\ &= \dot{m}_{load} c_p (T_{room} - T_{amb}) + \dot{Q}_{skin} - Gains - \dot{Q}_{red, wall}\end{aligned}\quad (45)$$

기존 시스템은 최소 외부공기요구량($0.02m^3/s/m^2$)보다 더 많은 외부 공기를 공급하지 않기 때문에 기존 시스템에서 공급하는 열량은 최소 외부공기유량(\dot{m}_{trad})을 이용하는 건물부하이다.

$$\dot{Q}_{trad} = \dot{m}_{trad} c_p (T_{room} - T_{amb}) + \dot{Q}_{skin} - Gains \quad (46)$$

식 (44)-(46)를 식 (43)에 대입하여 건물내부로 유입되는 외부 공기량의 함수로서 에너지 절감을 산출하면 다음과 같다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{save} &= \dot{Q}_{conv, col-air} + \dot{Q}_{conv, wall-air} + \dot{Q}_{red, wall} \\ &\quad - (\dot{m}_{load} - \dot{m}_{trad}) c_p (T_{room} - T_{amb})\end{aligned}\quad (47)$$

UTC 시스템이 최소 외부공기유량에서 작동할 때($\dot{m}_{load} = \dot{m}_{trad}$) 에너지 절감량은 UTC 시스템의 세 가지 에너지 절감요소의 합과 같게 된다. UTC 시스템을 적용한 건물에서 댐퍼는 보조에너지의 요구를 제거하기 위해 외부공기가 최소의 유량으로 유입되게 하고, 이러한 조건하에서 유효획득에너지는 건물부하와 같게 될 수 있다.

$$\dot{Q}_{load} = \dot{Q}_u \quad (48)$$

따라서 식 (47)은 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{save}} &= \dot{Q}_{\text{load}} + \dot{Q}_{\text{red, wall}} - (\dot{m}_{\text{load}} - \dot{m}_{\text{trad}})c_p(T_{\text{room}} - T_{\text{amb}}) \\ &= \dot{Q}_{\text{skin}} - \text{Gains} + \dot{m}_{\text{trad}}c_p(T_{\text{room}} - T_{\text{amb}}) \\ &= \dot{Q}_{\text{trad}}\end{aligned}\tag{49}$$

즉, 에너지 절감은 결코 기존 건물시스템의 난방부하를 초과할 수 없을 뿐만 아니라 건물 안으로 외기를 더 많이 유입하는 것은 UTC 시스템에서 얻을 수 있는 에너지 양을 증가시키고 공기질을 개선하지만 실질적으로 에너지를 더 절감하지는 못한다.



Ⅲ. 시스템 모니터링

3-1. 실험 목적

시스템의 성능을 평가하기 위해서는 먼저 UTC 집열판의 재질특성을 알고 이에 따른 시스템의 성능을 분석하여야 한다. 이를 위해서는 UTC 시스템을 시험시설에 설치하여 집열판에 직접적으로 입사된 일사량에 대하여 얼마만큼의 에너지를 흡수하여 이용가능한지 분석하여야 한다.

본 실험에서는 연구 진행 중에 있는 UTC 집열판을 사용하여 성능을 분석하였다. 집열판 형상은 Fig. 1과 동일하며 집열판이 태양에너지를 얼마만큼 흡수하여 이용가능한지 분석하기 위해서 방사율이 0.95인 집열판의 재질특성실험을 거쳐 집열판 흡수율을 측정하였다. UTC 시스템 성능특성실험은 한국에너지기술연구소의 실험동(KIER outdoor test cell)에 시스템을 설치하여 수행하였으며, 유입공기유량이 일정할 때 입사에너지에 대하여 공기층의 온도가 실제 외기온도에 비해 어느 정도 상승가능한지 즉, 공기상승온도가 단위면적 당 입사에너지에 대해 얼마만큼 상승하는가에 대한 곡선을 도출하여 성능을 분석하였다.

3-2. UTC 집열판의 재질특성실험

3-2-1. 재질특성실험방법

공기 난방용 집열판으로 사용되는 집열판의 형상은 Fig. 1과 같다. 그 형상은 절곡형으로 되어있으며, 사양은 기공 0.0015m, 피치 0.0165m, 두께 0.0005m이다.

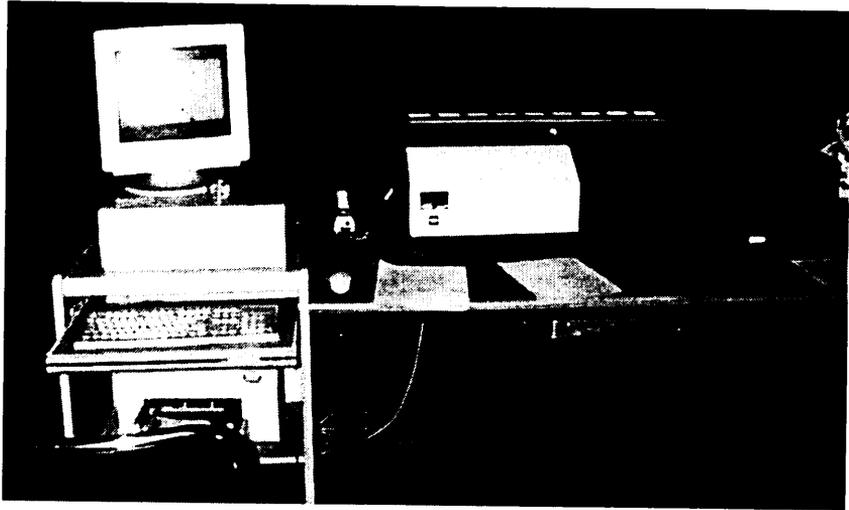


Fig. 10 Lambda 19 Spectrometer photograph

집열판의 흡수율을 측정하기 위해서 스펙트로미터(spectrometer)를 이용하여 측정하였다(Fig. 10). 측정 방법은 스펙트로미터 우측 끝에 있는 측면 덮개를 열어 집열판 시편을 렌즈에 고정시킨 후 다시 덮개로 밀폐시켜서 컴퓨터를 이용하여 스펙트로미터 소프트웨어를 실행시킨다. 이때 주의할 점은 측정에 앞서 먼저 표준시편인 Labsphere을 이용하여 보정을 해주어야 한다. 위와 같은 작업이 모두 수행되면 소프트웨어를 이용하여 집열판의 반사율과 투과율을 측정할 수 있다.

3-2-2. 재질특성실험결과

UTC 집열판은 불투명체이지만 스펙트로미터의 측정범위인 렌즈의 직경이 2cm이기 때문에 기공피치를 초과함에 따라 실제로 투과율이 측정됨을 알 수 있었다. 그러나 기공의 직경이 매우 작기 때문에 거의 일정한 반사율을 보여주고 있었다. 다음 Figs. 11-14는 기공이 측정렌즈범위 안에 1개가 있을 때와 3개가 있을 때의 각각 반사율과 투과율의 측정결과이다.

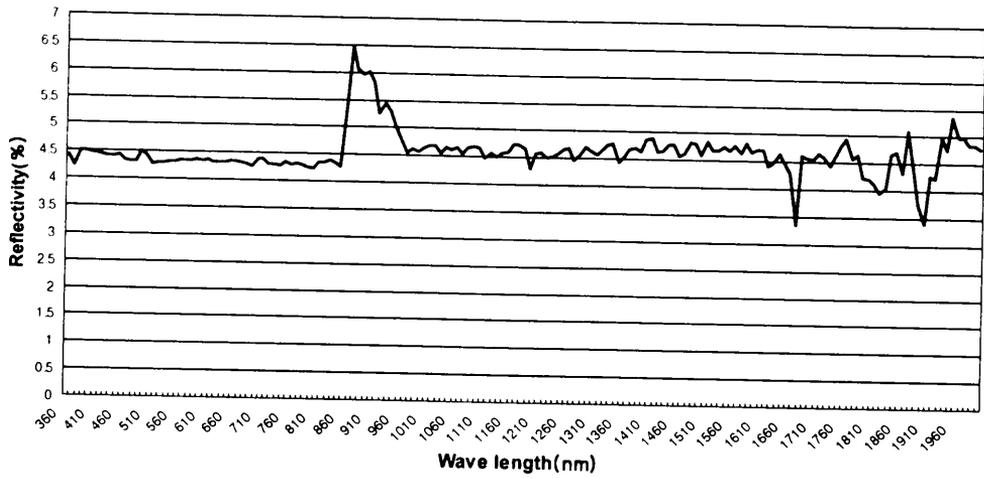


Fig. 11 Result of the reflectivity measurement for one hole panel case

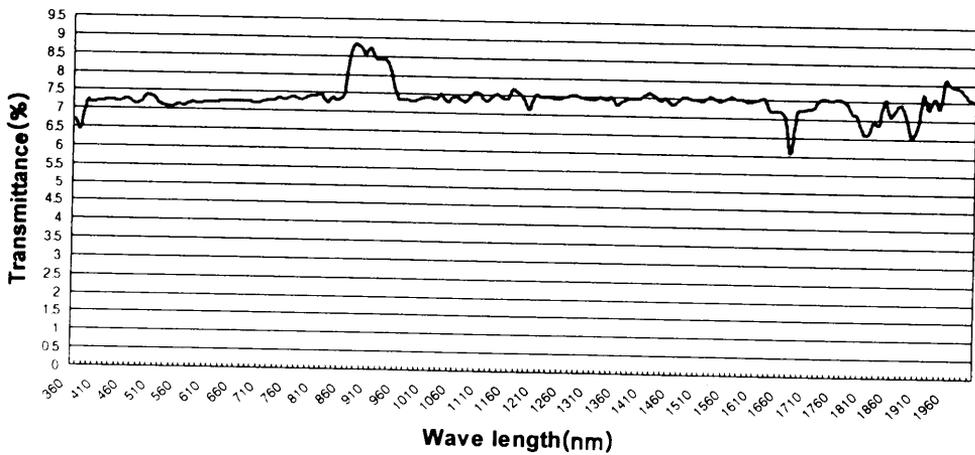


Fig. 12 Result of the transmittance measurement for one hole panel case

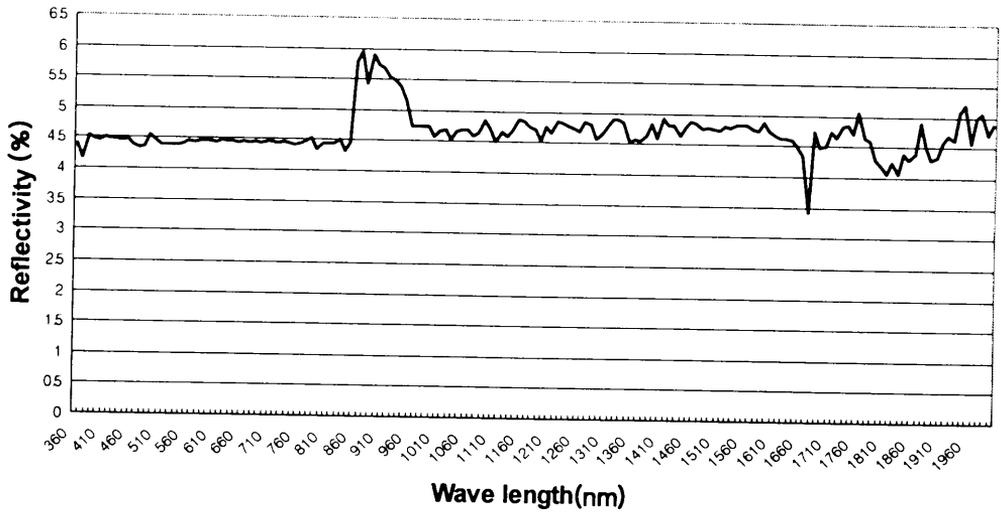


Fig. 13 Result of the reflectivity measurement for three hole panel case

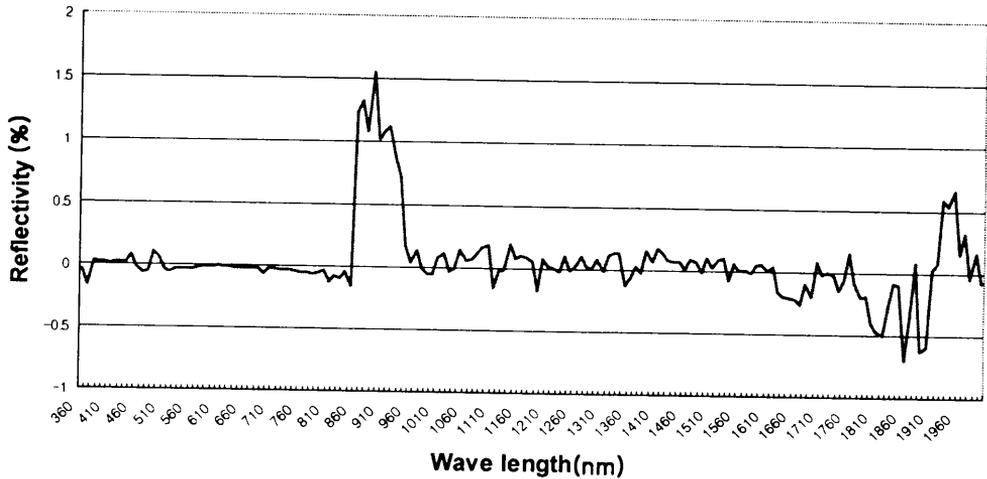
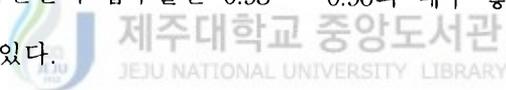


Fig. 14 Result of the transmittance measurement for three hole panel case

위 결과에서 기공이 1개일 때의 투과율이 기공 3개일 때 보다 훨씬 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 기공이 1개일 때는 기공이 렌즈 정 중앙에 위치하여 있어서 투과율을 정확히 측정할 수 있었던 반면 기공이 3개일 때는 기공이 정 삼각형 모양으로 렌즈의 가장자리에 위치하여 있어서 측정장치에서 나오는 빛이 제대로 투과하지 못하였음을 알 수 있었다. 그러나 반사율 그래프를 보면 4%에서 5%로 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 기공 직경이 매우 작아서 기공에 의한 투과율이 전체 집열판의 반사율 측정값에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그러므로 기공에 의한 투과율은 무시해도 가능하다. 위의 결과를 이용하여 집열판의 흡수율을 구하기 위해서는 다음 식에서 투과율을 “0”로 하여 구할 수 있다.

$$\text{흡수율} + \text{반사율} + \text{투과율} = 1 \quad (50)$$

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



3-3. UTC 시스템의 성능특성실험

UTC 시스템의 성능이라 함은 공기상승온도($T_{plen} - T_{amb}$) 즉, 일정한 공기접근 속도(공기유입유량/집열판면적)와 입사에너지에 대하여 단위면적 당 얼마만큼 공기온도가 상승하는가로 나타낼 수 있다.

이와 같은 실험을 수행하기 위해 테스트용 실험동 중 1개 동을 이용하여 남쪽벽에 UTC 집열판을 설치하여 실험을 수행하였다. Fig. 15는 실험동 내부 덕트에 설치된 벤츄리관을 보여주고 있다. 덕트는 공기층 위로부터 건물내부로 연결하였으며 이는 천장덮개의 역할 즉, 공기가 기공을 통하여 유입되는 속도를 균일하게 하기 위한 것이다. Fig. 16은 센서의 위치와 이 위치에서의 측정값을 기록하기 위해 LabVIEW 프로그램을 사용하여 모니터링 한 그림을 보여주고 있다.

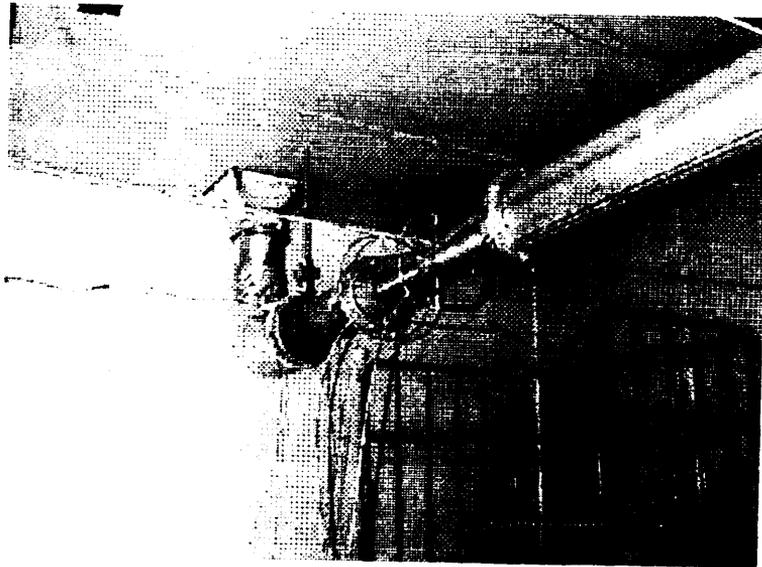


Fig. 15 Internal venturi duct flow measurement system

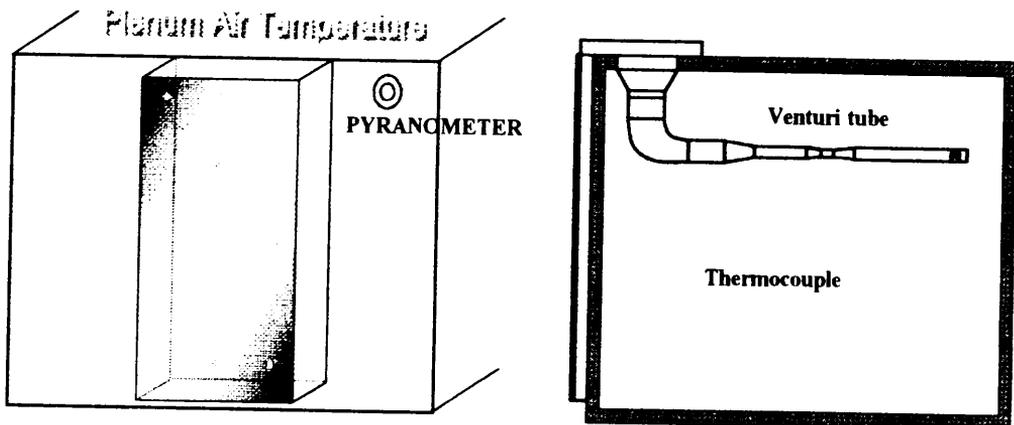


Fig. 16 Position of the installed sensors

3-3-1. 유량 측정 방법

UTC 시스템의 성능실험을 수행하는데 중요한 변수인 일정한 공기접근속도를 유지하기 위해서는 공기유량조절과 여기에 맞는 측정장치가 아주 중요하다. 그러나 본 실험에서 적용되는 덕트의 크기는 상대적으로 아주 작아서 일반적으로 널리 사용되는 피토투브는 현재규격인 직경이 400mm 이상을 만족하지 못하기 때문에 벤츄리관을 설계 제작하여 사용하였다. 유량조절 또한 일정한 유량을 공급하기 위해 인버터를 설치하여 제어하였다. Fig. 17은 벤츄리관의 치수를 나타내고 있다.

따라서 본 실험에서는 공기유량을 측정하기 위해 국제규격인 ISO 5167-1980 (E)에 명시된 “벤츄리관에 의한 유량 측정방법”을 사용하였다[15]. 이 방법은 벤츄리관을 사용하여 원형 관로 속을 흐르는 유체의 유량을 측정하는 경우의 방법으로 벤츄리관을 유체가 흐르고 있는 관로 속에 부착하여 벤츄리관의 상류부와 목부와의 사이에 생기는 정압차(Δp)를 측정하여 유량을 구하는 방법이다. 식 (51)은 유량 계산식이다.

$$q_v = C_D E \frac{\pi}{4} d_i^2 \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\gamma}} \quad (51)$$

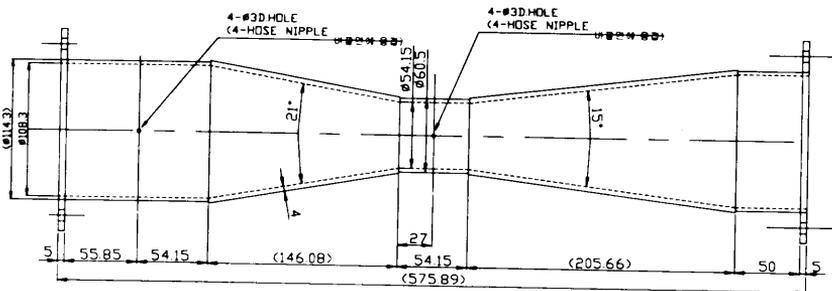


Fig. 17 Venturi tube flow measurement design

여기서 q_v 는 용적유량이고 d_1 는 벤츠히관의 목부지름이다. 유체의 비중량(γ)은 벤츠히관의 상류측 압력 연결구의 축을 포함한 관로 단면에서의 상태 값을 규격으로 한다. 유출계수(C_D)의 값은 0.995를 적용하였으며 이 값의 적용범위는 다음과 같다.

- 선삭 입구 원추관 붙이의 경우
- $50\text{mm} \leq d_2 \leq 250\text{mm}$
- $0.4 \leq \beta (= \frac{d_1}{d_2}) \leq 0.75$
- $2 \times 10^5 \leq \text{Re}_{d_2} \leq 2 \times 10^6$

접근속도계수(E)는 다음 식으로 계산한다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$E = (1 - \beta^4)^{-\frac{1}{2}}$$

(52)

여기서 β 는 교축지름비로써 d_1/d_2 로 정의하며, d_1 과 d_2 는 벤츠히관의 목부와 상류부의 지름이다.

본 실험에서 측정되는 차압은 Fig. 18와 같이 Aerolab사의 디지털 멀티마노미터(Digital Multimanometer)에 연결하여 여기서 출력되는 전압 신호를 HP 34970A에서 읽어들이 컴퓨터에서 실행된 LabVIEW 프로그램을 이용하여 1분 간격마다 데이터를 획득하여 유량 또는 공기접근속도로 환산하였다. 여기서 주의할 점은 정확한 데이터 획득을 위해서 항상 실험 시작 시 디지털 멀티마노미터를 0으로 셋팅하여야 한다.

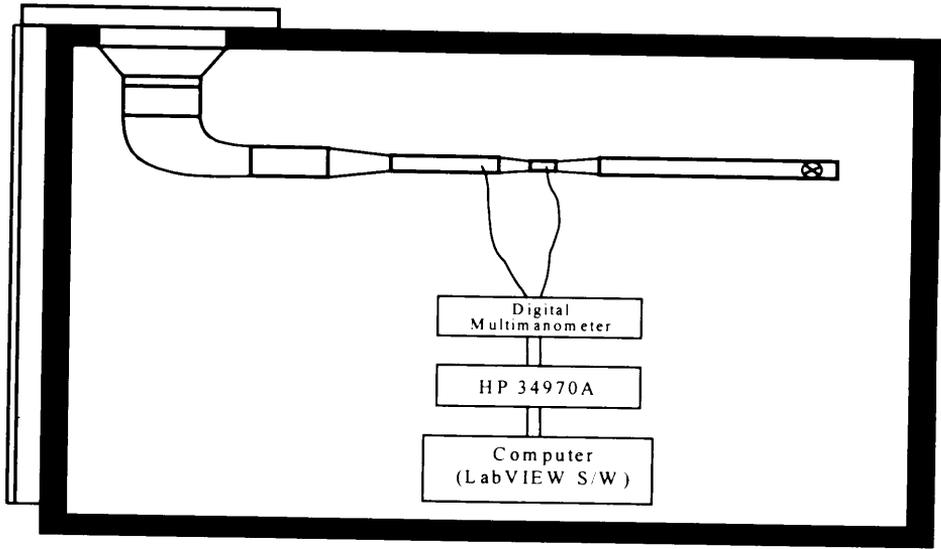


Fig. 18 Data logging process for the pressure drop

3-3-2. 일사량과 온도 측정 방법 | 학교 중앙도서관



JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

일사량계는 미국 LI-COR사의 PYRANOMETER PY11166과 PYRANOMETER PY11167을 이용하여 일사량을 측정하였고 Fig. 19와 같이 집열판 옆에 수직으로 2개를 설치하였다. 그리고 온도센서는 OMEGA사의 T-type 열전대를 이용하여 사용하였다. 데이터를 로깅하는 방법은 유량 측정에서와 같이 일사량계와 열전대를 데이터로거(data logger)인 HP 34970A에 내장되어 있는 슬롯에 연결한 뒤, 인터페이스 케이블을 이용하여 데이터로거와 컴퓨터 본체에 따로 설치된 HP-IB 포트를 연결하여 LabVIEW 프로그램을 이용하여 보정값을 프로그램으로 입력한 뒤 1분 간격마다 데이터를 습득하였다.

이 때 온도센서의 위치는 Fig. 16과 같다.



Fig. 19 PYRANOMETER photograph

3-3-3. 시스템 성능특성실험결과

실험은 집열판 면적에 따른 공기접근속도를 0.005m/s에서부터 집열판 효율이 50~70%까지 도달할 수 있는 공기접근속도의 유효범위인 0.02m/s~0.05m/s 까지 유량을 변형하여 수행하였다. Fig. 20은 공기접근속도가 0.005m/s일 때의 공기상승 온도를 보여주고 있는데 이 때의 집열판 평균효율은 약 25%였다. 여기서 공기상승 온도는 공기층에서의 평균온도와 외기온도의 차이이며, 집열판 효율은 다음 식과 같다.

$$\eta_{sol} = \frac{\rho V c_p (T_{plen} - T_{amb})}{I_T} \quad (53)$$

이때 공기의 밀도와 비열은 온도에 따라 변하지만 각각 1.204 kg/m³, 1007 J/kg-°C로 일정한 값을 사용하였다. 마찬가지로 Fig. 21과 Fig. 22는 공기접근속도가 0.02m/s, 0.035m/s일 때의 그래프를 보여주고 있으며 이때의 집열판 평균효율은 각각 50%와 63%였다.

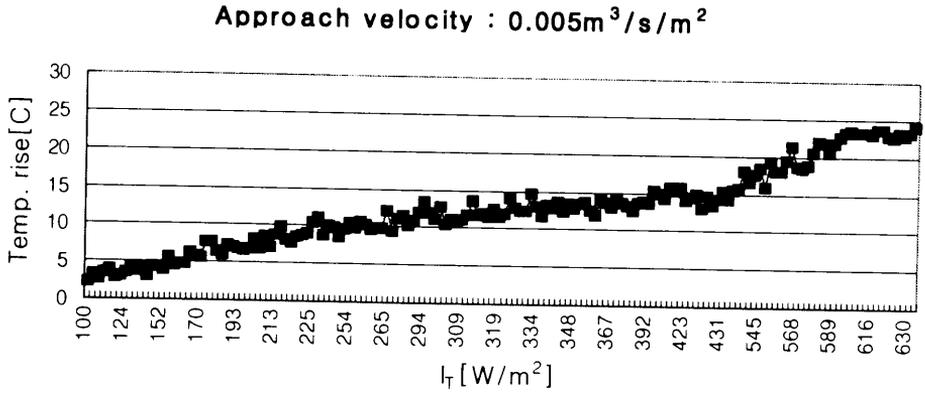


Fig. 20 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.005\text{m}/\text{s}$

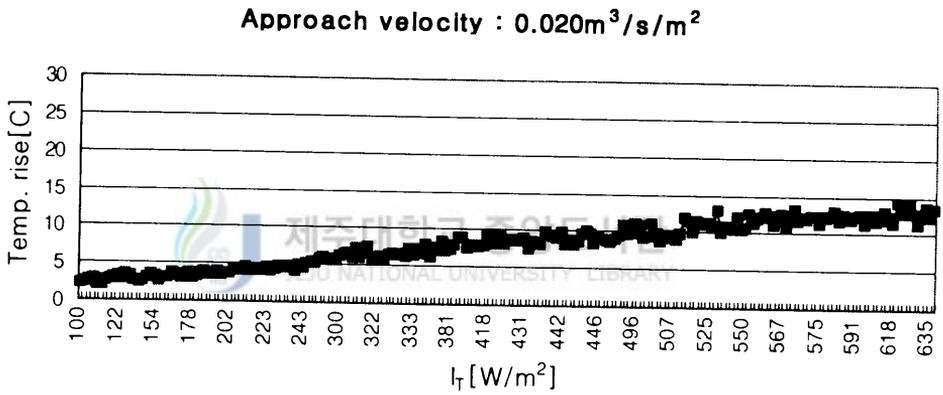


Fig. 21 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.020\text{m}/\text{s}$

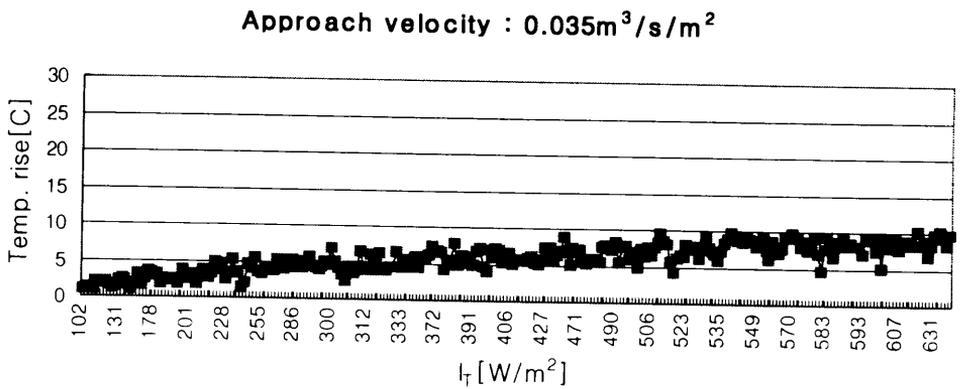


Fig. 22 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.035\text{m}/\text{s}$

위의 그래프들을 살펴보면 0.005 m/s일 때 공기상승온도가 가장 높게 나타났는데 이는 최소공기접근속도가 0.02m/s 이하일 때는 공기유량이 적게 유입됨으로 그만큼 공기가 입사에너지를 충분히 획득할 수 있음을 의미한다. 또한 공기접근속도가 빠를수록 공기유량이 증가하므로 공기상승온도는 감소함을 알 수 있다. 그러나 0.005 m/s일 때 집열판 효율이 가장 낮게 나타났는데, 이는 2장에서도 설명한 바와 같이 최소공기접근속도인 0.02m/s 이하일 때는 외부로 자연대류에 의한 손실이 증가하기 때문이다. 특히 이 때는 외기의 풍속과 풍향에 대한 영향도 무시하지 못한다. 식 (53)에 의한 집열판의 평균효율은 공기접근속도가 0.02m/s와 0.035m/s일 때 각각 50%와 63%였지만 이때의 외기온도 실험조건이 20℃이상일 때를 감안하면 대체로 좋은 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

3-4. 소결

지금까지 본 장에서는 시스템 성능 평가를 목적으로 UTC 집열판의 재질특성과 UTC 시스템의 성능특성 실험을 수행하였다. 요약하면 다음과 같다.

집열판의 흡수율은 0.95~0.96으로 아주 좋은 재질표면특성을 지니고 있었음을 알 수 있었다.

외기조건에서의 시스템 성능실험결과 공기접근속도가 작을수록 공기상승온도는 증가하였다. 그러나 공기접근속도가 0.005m/s일 때 그래프의 기울기가 일정치 않음을 알 수 있는데 이는 외부로의 대류손실에 기인한 결과로 외기풍속과 풍향에 대한 영향을 많이 받음을 알 수 있었다. 또한 이때의 집열판 효율은 25%로 가장 낮게 나타났다. 따라서 외부로의 손실을 최소화하고 시스템 성능을 향상시키기 위해서는 공기접근속도가 최소 0.02m/s이상이어야 함을 알 수 있었다.

IV. 시스템 모델링

본 장에서는 2장에서 시스템 이론방정식들을 근거로 EES(Engineering Equation Solver)와 과도시스템 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS14.2/IISiBat을 이용하여 UTC 프로그램모델을 개발하였으며, 3장의 시스템 성능실험결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다. 또한 검증된 모델을 활용하여 시스템 주요성능변수들에 대한 민감도분석을 수행하였으며, 대전 지역의 기상데이터를 활용하여 월간 및 연간 열성능을 정량적으로 분석하였다.

4-1. EES와 TRNSYS 소개

UTC 시스템의 열성능을 평가하기 위해 EES와 TRNSYS를 사용하여 해석하였다. EES는 비선형방정식으로 이루어진, 즉 동 시간대의 시스템을 계산하는데 사용된다[16]. 이 프로그램은 방정식들이 어떤 특정형식으로 입력되는 것을 요구하지 않으며 각 방정식들은 간략화 또는 형식화 할 필요가 없다. 그러므로 프로그램을 코딩할 때 매우 쉬우며 에러를 찾기도 쉬울 뿐만 아니라 최근 열 시스템 공학에 매우 탁월한 프로그램으로 알려져 있다. 그러나 실내 실험이 아닌 외기조건에 따른 열 시스템을 평가하는데는 기상데이터를 적용해야 하는데 EES는 제한된 수의 입력 값과 파라메타 값을 취급하므로 연간 시뮬레이션을 수행하는데는 어렵다. 다른 방법으로는 EES모델을 TRNSYS의 구성요소로 이용할 수 있는데 이 역시 두 개의 프로그램을 통합 실행해야 하므로 시뮬레이션 시간이 길어지는 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 EES를 이용하여 간단한 입력값에 대해 TRNSYS UTC 시스템 서브루틴을 비교하고 실험동에 설치된 UTC 시스템에 대하여 일정한 파라메타 및 입력값 변수들에 대한 민감도를 분석하였다.

TRNSYS는 과도시스템 시뮬레이션 프로그램으로 미국에 있는 위스콘신 주립대

학의 태양에너지실험실(solar energy laboratory)에서 개발한 프로그램으로 열 시스템 성능을 모델화하는데 이용된다[17]. 시스템의 각 요소는 분할된 포트란 서브루틴(Fortran subroutine)에 의해 모델화 되어 TRNSYS 메인 프로그램에 의해 링크 되어 제어된다. 시스템의 요소들로 모듈화 된 포트란 서브루틴은 사용자에게 의해 변형되어질 수 있을 뿐만 아니라 시스템에 필요한 요소들을 추가하거나 제거하여 사용할 수 있고 새로운 요소들을 TRNSYS component library에 추가하여 사용할 수 있다. UTC 시스템을 TRNSYS 서브루틴 요소로 모델화 하였는데 유효 획득 에너지와 출구온도를 시뮬레이션 동안의 각 시간에 대하여 계산할 수 있게 하였다. 시스템 상에서 요소와 요소들 사이의 링크들은 TRNSYS 덱(deck) 파일로 지정할 수 있다. TRNSYS 덱 파일은 각 요소들의 파라메타들과 입력 값들이 지정된 곳이다. 파라메타와 입력 값의 다른 점은 파라메타는 전 시뮬레이션 동안 일정한 값으로 사용되고 입력값은 변화될 수 있는 값이라는데 있다. 이 프로그램은 우리나라의 지역기후에 따른 UTC 시스템의 연간 시스템 성능을 파라메타 및 입력값에 대해서 분석하기 위해 사용되었다. 또한 추후 이 프로그램은 간단한 실행프로그램으로 TRNSED 파일로 변환해서 일반 사용자에게 공급하여 사용자가 적용할 지역에 대한 입력값과 UTC 시스템의 파라메타를 변형하여 쉽게 성능결과를 도출할 수 있다. Fig. 23과 Fig. 24는 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat의 작업환경을 보여주고 있다.

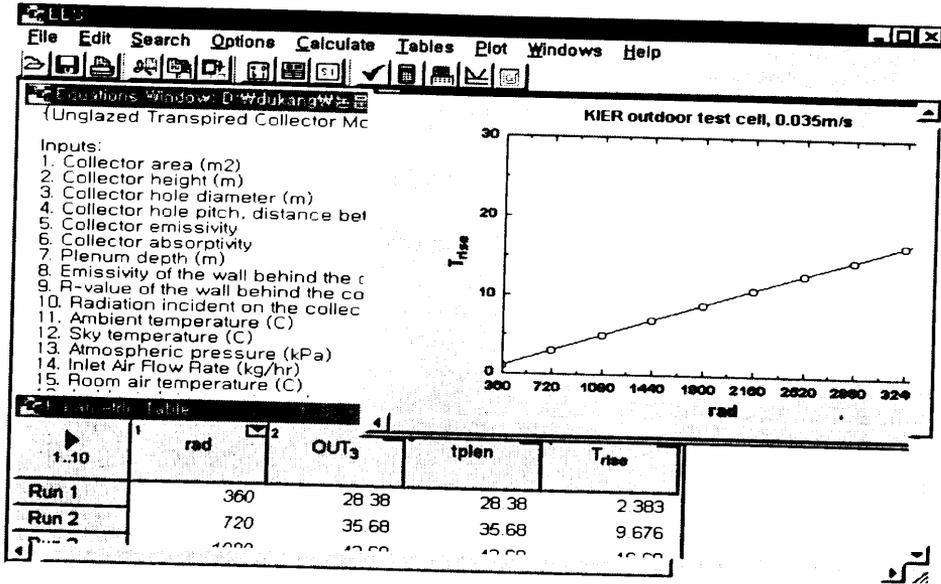


Fig. 23 UTC system modeling with Engineering Equation Solver(EES)

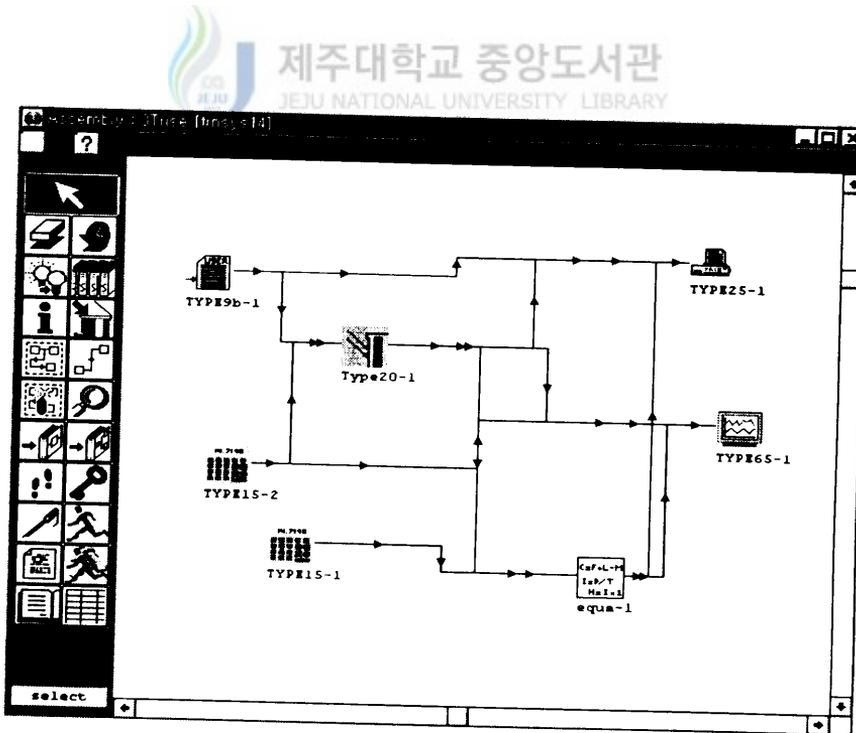


Fig. 24 UTC system modeling with TRNSYS14.2/IISiBat

4-2. 프로그램모델 해석

EES와 TRNSYS14.2/II SiBat 시스템 프로그램모델은 2장의 이론을 중심으로 개발하였으며 프로그램모델의 수학적 계산방법은 8개의 방정식들을 동시에 계산하여 8개의 미지수들을 계산할 수 있는 행렬로 조합하여 구성하였다. 다음의 8개 방정식들은 2장에서 설명한 3개의 에너지 균형방정식과 5개의 비율방정식들이다. 앞 2장에서 식 (7), 식 (14), 식 (12), 식 (10), 식 (1), 식 (4), 식 (3), 식 (11), 식 (2)를 다시 나열하면 다음과 같다.

$$-\epsilon_{HX} T_{col} + T_{plen} = T_{amb}(1 - \epsilon_{HX}) \quad (54)$$

$$\dot{Q}_{rad, col-sur} - \epsilon_{col} \sigma_{sb} A_s T_{col}^4 = -\epsilon_{col} \sigma_{sb} A_s T_{sur}^4 \quad (55)$$

$$\dot{Q}_{rad, wall-col} - \sigma_{sb} A \frac{T_{wall}^4}{\frac{1}{\epsilon_{wall}} - \frac{1}{\epsilon_{col}} - 1} + \frac{T_{col}^4}{\frac{1}{\epsilon_{wall}} - \frac{1}{\epsilon_{col}} - 1} = 0 \quad (56)$$

$$\dot{Q}_{conv, wall-air} - h_{conv, wall-air} A T_{wall} + h_{conv, wall-air} A T_{plen} = 0 \quad (57)$$

$$\dot{Q}_{conv, col-air} - \dot{m}_{out} c_p T_{plen} = \dot{m}_{out} c_p T_{amb} \quad (58)$$

$$-\dot{Q}_{rad, wall-col} + \dot{Q}_{conv, col-air} + \dot{Q}_{rad, col-sur} = +\dot{Q}_{abs} \quad (59)$$

$$\dot{Q}_{cond, wall} - \dot{Q}_{conv, wall-air} - \dot{Q}_{rad, wall-col} = 0 \quad (60)$$

$$\dot{Q}_{cond, wall} + U_{cond, wall} A T_{wall} = U_{cond, wall} A T_{room} \quad (61)$$

위의 8개의 방정식들은 다음과 같은 행렬로 나타낼 수 있다.

$$[A] [X] = [b] \quad (62)$$

행렬을 다시 나열하면 다음과 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} -\epsilon_{wx} & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ \left[\begin{array}{c} -\sigma_{sb}\epsilon_c A_s (T_{col}^2 \\ + T_{sur}^2)(T_{col} + T_{sur}) \end{array} \right] & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ \left[\begin{array}{c} \sigma_{sb} A (T_{col}^2 + T_{wall}^2)(T_{col} \\ + T_{sur})(1/\epsilon_w + 1/\epsilon_c - 1) \end{array} \right] & 0.0 & 0.0 & 1.0 & \left[\begin{array}{c} -\sigma_{sb} A (T_{col}^2 + T_{wall}^2)(T_{col} \\ + T_{sur})(1/\epsilon_w + 1/\epsilon_c - 1) \end{array} \right] & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & h_{v,wall}A & 0.0 & 0.0 & -h_{v,wall}A & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -\dot{m}c_p & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & -1.0 & 0.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & U_{d,wall}A & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

$$[X] = \begin{bmatrix} T_{col} \\ T_{plen} \\ \dot{Q}_{rad, col - sur} \\ \dot{Q}_{rad, wall - col} \\ T_{wall} \\ \dot{Q}_{conv, wall - air} \\ \dot{Q}_{conv, col - air} \\ \dot{Q}_{cond, wall} \end{bmatrix} \quad [b] = \begin{bmatrix} T_{amb}(1.0 - \epsilon_{wx}) \\ \left[\begin{array}{c} -\sigma_{sb}\epsilon_c A_s (T_{col}^2 \\ + T_{sur}^2)(T_{col} + T_{sur})T_{sur} \end{array} \right] \\ 0.0 \\ 0.0 \\ -\dot{m}c_p T_{amb} \\ \dot{Q}_{abs} \\ 0.0 \\ U_{d,wall}AT_{room} \end{bmatrix}$$

위의 행렬이 계산되면, 건물모델에 적용되는 출구온도(T_{out})는 2장의 식 (2)를 적용하여 다음과 같이 계산된다.

$$T_{out} = T_{plen} + \dot{Q}_{conv, wall - air} / (\dot{m}_{out} c_p) \quad (63)$$

4-3. 시스템 모델 검증

EES & TRNSYS14.2/II SiBat UTC 시스템 프로그램모델 검증실험은 3장의 실험 동에서의 시험시설을 통하여 수행되었다. 검증실험에서 사용된 UTC 시스템에 대

한 파라메타들은 Table 2에 나타내었다. 실험결과와 비교 검증하기 위해서 시스템의 공기접근속도 $V=0.035$ m/s, 0.020 m/s 그리고 0.005 m/s에 대해서 입사일사량 대비 공기상승온도의 곡선을 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat 프로그램모델을 사용하여 도출하였다. 3장에서의 실험결과는 외기에서의 실험이므로 이를 고려하여 외기 풍속이 평균풍속인 0.9 m/s일 때와 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$ 의 외기온도 중 대표값을 이용하여 비교하였다. Figs. 25-27은 실험에서 사용된 Table 2의 변수들에 대하여 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat 프로그램 모델을 이용하여 수행한 결과와 실험결과 값을 비교한 그래프이다. Fig. 24는 UTC 시스템을 TRNSYS 서브루틴으로 생성하여 TRNSYS14.2/IISiBat에서 EES와 비교하기 위해 연간 시뮬레이션을 적용하지 않은 간단한 모델을 보여주고 있다.

Table 2 KIER outdoor test cell UTC system parameters

Parameter	Value
collector height, ht	2.445m
collector length	0.790m
collector area, A	1.932 m^2
plenum depth	0.1m
hole pitch, P	0.0165m
hole diameter, D	0.0015m
collector emissivity	0.95
collector absorptivity	0.95
wall emissivity	0.20
R-value of the wall	$0.6048 \text{ Km}^2\text{hr/kJ}$

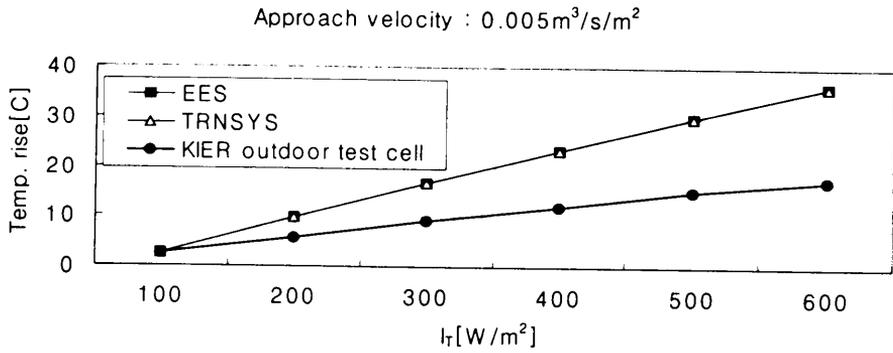


Fig. 25 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.005\text{m/s}$

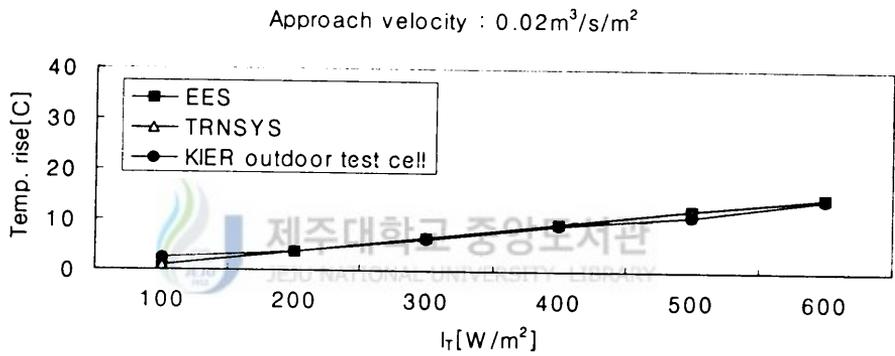


Fig. 26 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.020\text{m/s}$

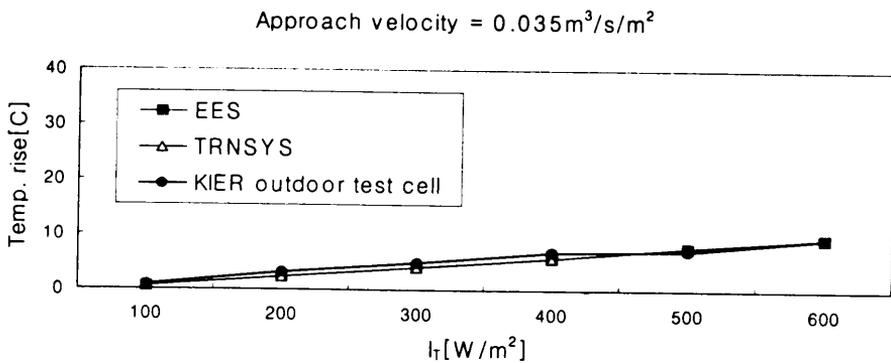


Fig. 27 Air temperature rise vs. Incident solar radiation in $V=0.035\text{m/s}$

이러한 결과에서 유효 공기접근속도 범위안에 있는 0.02m/s와 0.035m/s에서의 실험곡선은 시뮬레이션 데이터와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat 프로그램모델 시뮬레이션 결과가 동일하게 나타난 것으로 보아 TRNSYS14.2/IISiBat 프로그램모델 소스코드가 타당함을 알 수 있었다. 집열판에서의 에너지균형식은 다음과 같다.

$$\rho V c_p (T_{plen} - T_{amb}) = \eta_{sol} I_T \quad (64)$$

여기서 공기의 밀도와 비열은 온도와 압력에 따라서 변하므로 EES를 사용하여 온도와 압력에 대한 식을 계산하여 사용하였다. 식은 다음과 같다.

$$\rho = a_0 + a_1 T_{air} + a_2 T_{air}^2 \quad (65)$$

$$a_0 = -5.193 \times 10^{-5} + 1.2758 \times 10^{-2} \times P_{atm}$$

$$a_1 = -5.7037 \times 10^{-7} - 4.6856 \times 10^{-5} \times P_{atm}$$

$$a_2 = -5.6746 \times 10^{-9} + 1.5511 \times 10^{-7} \times P_{atm}$$

$$c_p = 1.0062 + 3.6028 \times 10^{-5} T_{air} - 1.0885 \times 10^{-6} T_{air}^2 + 1.3791 \times 10^{-8} T_{air}^3 \quad (66)$$

식 (64)에서 최대 공기상승온도는 집열판에 입사된 모든 에너지가 유입되는 공기를 가열하는데 모두 쓰여질 때 가능하다($\eta_{sol} = 1.0$). 공기는 온도에 따라 열용량이 변하므로 집열판의 효율은 외기온도가 높을 때 낮아진다. 따라서 본 시뮬레이션 모델에서도 외기온도를 실험 시 온도조건으로 하기 위해 26°C로 하였다. 식 (63)은 $I_T = 200 \text{ W/m}^2$, $T_{amb} = 26^\circ\text{C}$, $V = 0.035\text{m/s}$ 일 때 공기상승온도가 2.344°C을 가리키고 있지만 실험 데이터는 3.16°C를 나타내고 있다. 따라서 실제 실험에서는 적은

입사일사량에서 약간 높게 나타나고 있었으며 이는 벽체 관류손실 재회수 에너지가 상대적으로 더 많은 양을 나타내고 있음을 알 수 있다.

공기접근속도가 0.02m/s와 0.035m/s일 때의 시뮬레이션 모델의 결과 값은 입사일사량에 대해서 실험값과 비슷한 결과를 나타내고 있지만 이 보다 더 느린 공기 접근속도에서는 아주 크게 예견하고 있다. 이는 0.02m/s 미만에서는 집열판에서 주위로의 대류손실을 무시할 수 없지만[5] 시뮬레이션 모델에서는 여전히 대류손실을 0으로 인식하기 때문이다.

4-4. 민감도 분석

UTC 시스템의 파라메타, 입력 값 변수들을 분석하기 위해 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat을 사용하여 민감도 분석을 수행하였다.



4-4-1. EES를 이용한 민감도 분석

앞에서도 언급했지만 EES는 프로그램을 쉽게 코딩할 수 있을 뿐만 아니라 빠른 응답에 따른 결과 값을 용이하게 볼 수 있다. 본 논문에서는 한국에너지기술연구소에 설치된 UTC 시스템에 대한 입력값과 파라메타 값의 변수들에 대해서 민감도를 분석하였다. 이에 먼저 기본 파라메타와 입력 값 변수들에 대해 총 획득된 에너지를 계산하였고 다음으로 변수들의 값을 하나씩 변화함으로써 기본 변수들에서 얻은 에너지 획득량과 비교하였다. Table 3은 이러한 민감도 분석에 대한 결과를 요약하였다.

분석한 결과 가장 민감한 두 개의 요소들은 집열판 흡수율과 집열판 면적이었다. 집열판에 흡수된 태양열 입사 에너지와 직접적인 관련이 기대되는 이 두 요소들에 대해 분석한 결과 집열판면적에 대해서 7.9%와 집열판 흡수율과 입사에너지에 대해서 9.6%까지 에너지를 더 획득할 수 있음을 알 수 있었다. 다음으로 미세

Table 3 Sensitivity analysis results in EES

Property	Base value	New value	Qu [kJ/hr]	Change	
				Value	Qu[%]
Base case	-	-	3,328	-	-
A[m ²]	1.932	2.123	3,614	+0.191	+7.9
α_{col}	0.95	0.855	3,009	-0.095	-9.6
I _T [W/m ²]	600	540	3,009	-60	-9.6
Approach velocity[m ³ /s/m ²]	0.035	0.0315	3283	-0.0035	-1.4
		0.02	3053	-0.015	-8.3
ϵ_{col}	0.95	0.855	3,380	-0.095	+1.6
plenum depth[m]	0.1	0.07	3,330	-0.03	<<+0.1
wall R-value[m ² -C-hr/kJ]	0.6048	0.4	3,339	-0.2048	<<+0.1
ϵ_{wall}	0.2	0.5	3,328	+0.3	<<+0.1
ht[m]	2.445	1	3,328	-1.445	<<+0.1

하지만 민감한 변화를 보이는 요소는 집열판 방사율(ϵ_{col})로써 이 요소는 집열판에서 주위로의 복사손실에 관련된 요소이다. 그 외 다른 요소들은 그렇게 많은 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있었다. 물론 유입 공기의 유량과 태양 입사에너지에 따라서 시스템에서 획득할 수 있는 에너지 양이 달라짐을 알 수 있다. 따라서 이 시스템의 성능을 개선하려면 요구되는 신선외기유량에 따라 집열판의 흡수율과 면적을 충분히 고려해야 함을 알 수 있다.

4-4-2. TRNSYS14.2/IISiBat을 이용한 민감도 분석

본 절에서는 TRNSYS14.2/IISiBat을 사용하여 우리나라 기후영향에 따른 UTC 시스템의 성능을 평가하기 위해 난방피크 기간인 1월을 기준으로 대전지역 기상데이터에 대해 민감도를 분석하였다. Fig. 28과 Fig. 29는 TRNSYS14.2/IISiBat을 이용하여 실험장치에 대해서 UTC 시스템을 모델링한 과정과 정보흐름 다이어그램

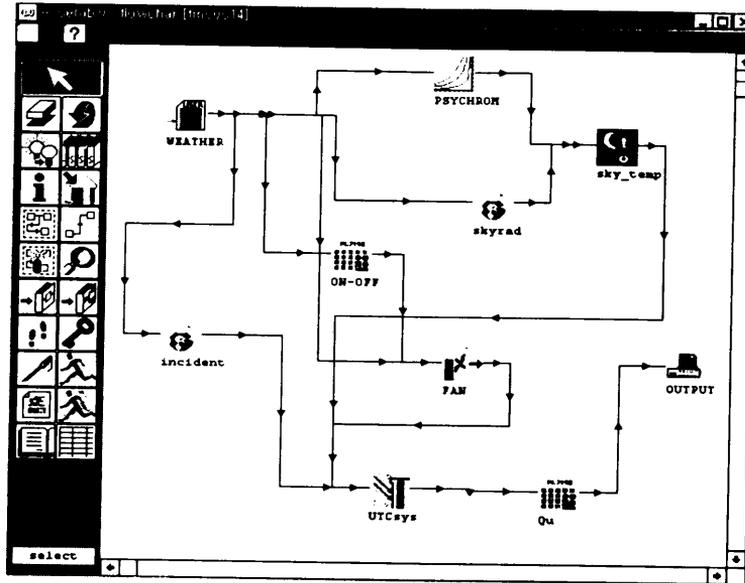


Fig. 28 UTC thermal system modeling in TRNSYS14.2/IISiBat

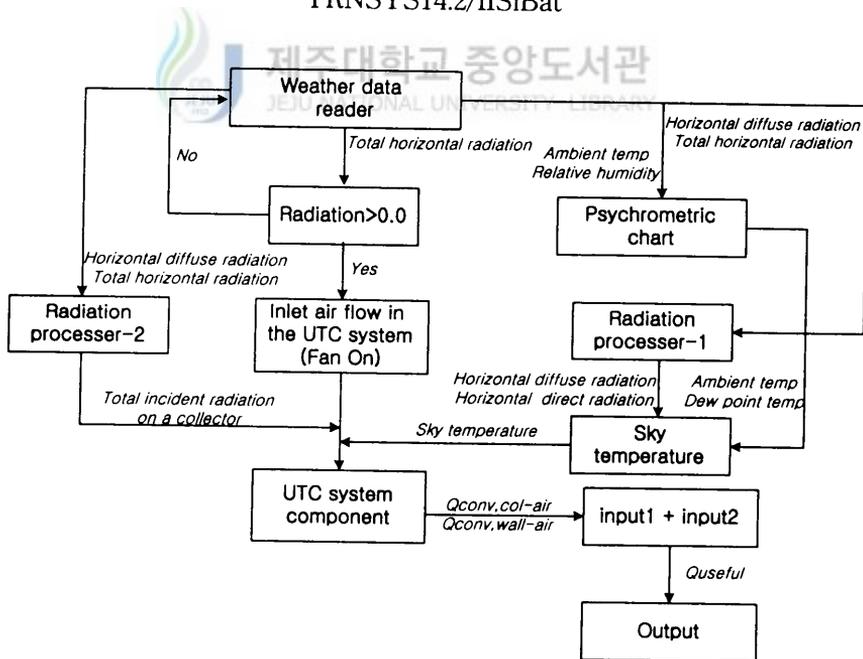


Fig. 29 Information flow diagram for the UTC thermal system modeling

을 보여주고 있다. Fig. 28을 살펴보면 아이콘 형태의 그림과 이들을 서로 연결하는 연결선으로 구성됨을 알 수 있는데 여기서 아이콘 형태의 그림은 TRNSYS에서 이용되는 각각의 서브루틴으로 UTC 시스템도 포함되어 있음을 알 수 있다. Fig. 29는 Fig. 28에 대한 정보를 설명하고 있는데 각각의 박스 형태는 TRNSYS 서브루틴 모듈을 나타내고 있으며 각 모듈에 대한 연결선의 전반부와 후반부의 주석들은 그 모듈의 입력 값과 이 입력 값을 가지고 그 모듈에서 계산한 출력 값을 설명하고 있다. 마찬가지로 앞 절의 EES를 통하여 민감도 분석을 수행한 바와 같이 Table 4에도 TRNSYS14.2/IISiBat을 사용하여 민감도 분석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 여기서 적용한 기상데이터는 현재 한국에너지기술연구소에서 보유하고 있는 대전지역 기상데이터로 한 시간 간격으로 저장된 연간 기상데이터를 이용하였다. 따라서 여기서의 민감도 분석은 대전 지역의 실제 기상데이터를 적용해서 외기온도는 물론 천공온도와 수직면에 입사하는 에너지(I_T)를 계산하여 UTC 시스템의 입력 값으로 이용하였다[17].

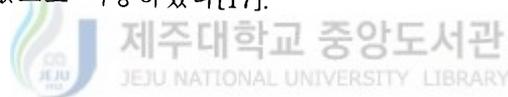


Table 4 Sensitivity analysis results in TRNSYS14.2/IISiBat

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

Table 4의 민감도 분석 결과를 보면 에너지 획득 비율이 EES에서 분석한 결과와 마찬가지로 시스템 성능의 주요한 변수는 UTC 집열판 면적과 집열판의 흡수율이 시스템 설계 시 중요한 요소임을 알 수 있다. 또한 다음으로 민감한 변화를 보이는 요소는 집열판 방사율로써 외부로의 방사손실임을 알 수 있다.

4-5. 연간 에너지성능 분석

건물의 유출입 열량조절이 에너지 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 1년, 8760시간에 대한 냉난방 연간에너지의 종합적인 검토가 이루어져야 한다. 그러나 본 연구에서는 난방기의 UTC 시스템 설치에 의한 에너지성능을 주요 평가항목으로 선정하였으므로 연중 난방기간을 중점으로 해석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 1년중 난방이 필요한 기간으로 판단되는 외기온도 18℃이하일 때 시스템이 작동하는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 30은 TRNSYS14.2/IIISiBat UTC 시스템 민감도분석모델을 이용하여 연간 시뮬레이션을 수행한 결과로써 연간 외기온도와 유효획득에너지(Q_u)를 보여주고 있다. Fig. 31은 시뮬레이션 결과데이터를 분석하여 유효획득에너지를 월간 적산치로 환산한 그래프이다.

Fig. 30과 Fig. 31은 외기온도가 낮은 난방피크기간일 때 유효획득에너지를 더 많이 획득할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 태양고도가 낮은 동절기로 갈수록 수직으로 설치된 UTC 집열판에 입사되는 태양에너지가 다른 계절에 비해서 더 크기 때문이다. 또한 하절기에는 유효획득에너지를 거의 얻을 수 없는데 이는 외기온도가 18℃이상에서는 바이패스 댐퍼가 열리게 되어 외부공기가 집열판을 통과하지 않고 직접 유입되기 때문이다. 따라서 열성능 측면에서 UTC 시스템은 난방기간에 매우 우수한 시스템임을 알 수 있다.

연간 시뮬레이션을 수행한 결과 3014.4MJ/year의 유효획득에너지를 얻을 수 있다. 이는 집열판 면적이 1.93155m²이므로 연간 집열판 단위면적 당 1560.6MJ/m²

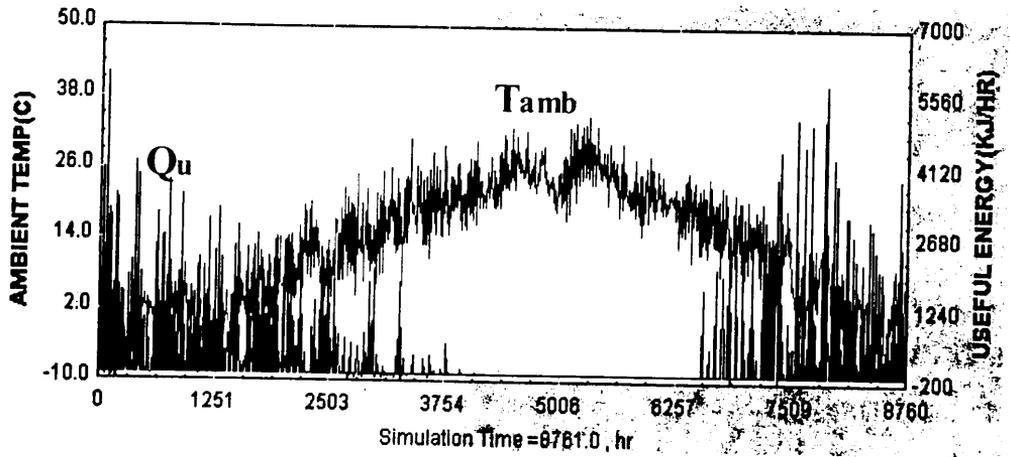


Fig. 30 Simulation result for ambient temperature and useful energy in TRNSYS14.2/IISiBat

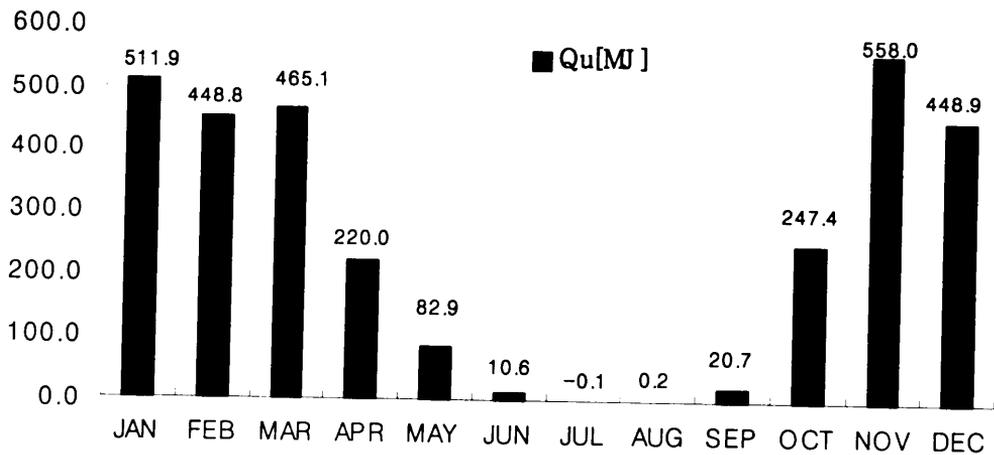


Fig. 31 Simulation result for monthly useful energy

(433.3kWh/m²)의 에너지를 얻을 수 있음을 의미한다.

에너지경제연구원[18]에서 제공하는 2000년 현행 전기요금표를 이용하면 일반 가정용에서 사용하는 전력량 요금은 100kWh 이하사용시 기본요금 390원과 kWh 당 81.70원을 적용하고 있다. 그러므로 연간 유효획득에너지를 비용으로 환산하면 단위면적당 35,791원의 에너지를 획득할 수 있음을 의미한다. 또한 난방유를 사용하는 주택일 경우 한국석유공사 석유정보처[19]에서 제공한 자료에 의하면 2000년 10월 국내유가는 경유 691.95원/liter로써 경유의 저위발열량은 8,466kcal/liter이므로 kWh당 70.25원을 나타내고있다. 그러므로 집열판 단위면적당 획득할 수 있는 연간 유효획득에너지비용은 30,439원임을 알 수 있다. 이는 현재 미국에서 이 시스템을 신규시와 개수시에 집열판 단위면적당 설치비용이 각각 \$40(45,600원)과 \$80(91,200)원을 감안하면 신규건물 적용시 열 성능이 매우 우수한 시스템임을 알 수 있다.

4-6. 소결



본 장에서는 2장의 이론을 기초로 프로그램모델을 개발하였으며 3장의 실험데이터와 비교 검증한 결과 거의 일치함을 알 수 있었고 시스템 모델에 대한 신뢰성을 확인하였다.

검증된 EES 및 TRNSYS14.2/II SiBat 모델을 이용하여 시스템 모델의 주요변수들에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 건물용도에 따른 공기접근속도와 입사 일사량에 대해서 집열판의 면적과 흡수율이 시스템 성능에 주요변수로 작용하고 있음을 알 수 있었다. 그러므로 건물용도에 따라 요구되는 신선외기유량 즉, 공기접근속도의 유량에 따라 시스템의 성능을 개선하려면 집열판의 흡수율과 면적을 우선적으로 고려해야 함을 알 수 있다. 그러나 95%의 흡수율을 더 이상 개선하기는 어렵기 때문에 집열판 방사율에 따른 외부로의 방사손실감소를 고려함이 더 바람직할 것이다.

마지막으로 한국에너지기술연구소에서 보유하고 있는 기상데이터를 가지고 실험
동에 설치된 시스템에 대해서 대전지역에서의 연간에너지 획득량을 분석한 결과
난방기간에 매우 탁월한 시스템임을 알 수 있었고, 연간 집열판 단위면적 당 획득
할 수 있는 에너지량은 $1560.06\text{MJ}/\text{m}^2(433.3\text{kWh}/\text{m}^2)$ 로 이 시스템을 신규건물에 적
용시 초기 시스템 설치비용에 비해 매우 우수한 열성능을 가지고 있음을 알 수 있
었다.



VI. 결론

본 연구는 건물의 난방에너지저감기술 개발에 대한 연구로써 건축외장판넬로 사용되는 UTC 시스템의 열전달 이론을 해석하고 시스템의 에너지성능분석을 수행하였다. 2장에서는 시스템에서 일어날 수 있는 열전달을 이론적으로 해석하였으며, 3장에서는 실제 시스템성능을 분석하기 위해 한국에너지기술연구소의 실험동에 UTC 시스템을 설치하여 실험을 수행하였다. 4장에서는 2장의 열전달 이론에 근거하여 해석모델을 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat을 이용하여 개발하였으며 해석모델 검증에 위해 3장의 실험결과 값과 비교검증하여 신뢰성을 확인하였다. 또한 시스템성능을 구성하는 다양한 변수들에 대해 민감도 분석을 수행하였으며, 월간 및 연간 시스템 열성능을 정량적으로 분석하였다.

본 연구를 통해 도출된 주요결과는 다음과 같다.

- UTC 시스템의 열전달을 이론적으로 해석하였다.
- 실험동의 시험시설을 통하여 시스템 열성능 분석을 수행하였다.
- 열전달 이론을 기초로 EES와 TRNSYS14.2/IISiBat UTC 시스템 해석모델을 개발하여 시험실험을 통한 시스템 프로그램해석모델을 검증하였다.
- 시스템 민감도 분석을 수행하여 집열판 면적과 흡수율이 시스템 성능에 주요한 변수임을 확인하였다.
- 시스템의 연간 열성능 분석을 수행한 결과 집열판 단위면적 당 1.56GJ/m^2 의 에너지를 획득할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구개발에 의한 시스템이 국내에 보급 활성화되었을 경우 국가적으로 화석연료 사용 에너지절감과 이에 따른 공해 환경 개선 효과의 창출이 가능한 기술임이 평가되었다. 그러므로 보급 활성화를 위해서는 향후 연구계획으로 시스템 성능 개선을 위해 먼저 태양열 에너지를 많이 흡수할 수 있는 집열판의 최적형상 및 집열판 표면 코팅기술에 따른 외부로의 방사손실감소에 대한 연구를 수행할

필요가 있다. 위의 연구를 토대로 각 모듈 및 시스템 성능개선 및 건물 통합시스템 최적설계연구가 요구된다. 보다 정확한 시스템 성능평가를 위해서는 이 시스템을 국내의 실제건물에 적용한 사례를 통하여 모니터링과 경제성 평가에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.



VII. 참고문헌

1. 김기세, 2000년, “복사차단 열반사 단열시스템의 에너지성능 평가 연구”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원.
2. Hamid, Y.H. and Beckman, W.A., 1969, “Transpiration Cooling of Radiatively Heated Porous Bed”, ASME Paper, No 69-WA/Sol-6.
3. Neepser, D.A., 1979, “Analysis of Matrix Air Heater, In Sun II”, Proceedings of the International Solar Energy Society, Atlanta, pp 298~301.
4. Rhee, S.J. and Edwards, D.K., 1983, “Comparison of Test Results for Flat-Plate, Transpired Flat-Plate, Corrugated, and Transpired Corrugated Solar Air Heaters”, J. Solar Ener. Eng.(Transactions ASME), Vol 105, pp. 231~236.
5. Kutscher, C.F., 1992, “An Investigation of Heat Transfer for Air Flow Through Low Porosity Perforated Plates”, Ph.D. thesis, Univ. Colorado.
6. Kutscher, C.F., Christensen, C.B., and Barker, G.M., 1993, “Unglazed Transpired Solar Collectors: Heat Loss Theory”, J. Sol Ener. Eng.(Transactions ASME), Vol 115, pp. 182~188.
7. Kutscher, C.F., 1994, “Heat Exchange Effectiveness and Pressure Drop for Air Flow Through Perforated Plates With and Without Crosswind”, J. Heat

- Transfer(Transactions ASME), Vol 116, pp 391 ~ 399.
8. Golneshan, A.A., 1994, "Forced Convection Heat Transfer from Low Porosity Slotted Transpired Plates", Ph.D. thesis, Univ. Waterloo, Ontario, Canada.
 9. Gunnewiek, L.H., 1994, "An Investigation of the Flow Distribution Through Unglazed Transpired-Plate Solar Air Heater", M.S. thesis, Univ. Waterloo, Ontario, Canada.
 10. Summers, D.N., 1995, "Thermal simulation and Economical Assessment of Unglazed Transpired Collector Systems", M.S. thesis, Univ. Wisconsin-Madison.
 11. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc., 4th Ed.
 12. Yunus A. Çengel, 1998, Heat Transfer a Practical Approach, McGraw-Hill, Inc., pp. 715~720.
 13. Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed.
 14. Jan F. Kreider and Ari Rabl, 1994, Heating and Cooling of Building, McGraw-Hill, Inc., pp. 250~254.
 15. 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)

16. Klein, S.A., and Alvarado, F.L., 1999, EES: Engineering Equation Solver,
F-Chart Software, Middleton, WI.

17. Klein, S.A., et al., 1996, TRNSYS: A Transient System Simulation Program
Volume I Reference Manual, Solar Energy Laboratory, Univ. Wisconsin-Madison.

18. 한국에너지경제연구원, <http://www.keei.re.kr/index.html>

19. 한국석유공사, <http://www.knoc.co.kr/korea/main.htm>



감사의 글

본 논문을 마치면서 지금까지 2년이라는 시간이 어떻게 흘러갔는지 생각해봅니다. 느끼기엔 아주 짧고 아쉬운 시간이었지만 가만히 생각해보면 여러 사람들의 도움을 받아 많은 경험을 얻었다고 생각합니다.

오늘이 있기까지 언제나 부족한 저에게 항상 따뜻한 사랑과 자상하신 가르침으로 지도를 아끼지 않으신 현명택 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 배우는데 항상 시간이 모자란 저에게 학문적으로나 인격적으로 많은 배려와 지도를 해주신 이의준 박사님께도 다시 한번 진심으로 감사드립니다.

부족한 논문에 자상한 검토와 지도를 아끼지 않으신 권기린 교수님, 허종철 교수님께 감사드립니다. 한결같은 사랑으로 많은 조언과 격려를 하여주신 김귀식 교수님, 임종환 교수님, 정동원 교수님께 다시 한번 감사드립니다. 논문발표 때 관심을 가지고 끝까지 지켜봐 주신 조경호 교수님과 최경원 교수님께도 감사드립니다.

한국에너지기술연구소에서 배움의 기회를 제공해주신 태양열이용연구팀의 백남춘 박사님, 강용혁 박사님, 윤종호 박사님, 광희열 박사님, 이진국 선생님, 조일식 선생님, 윤웅상 선생님, 유창균 선생님, 그리고 바쁘신 중에도 실험장치 전반에서 세심한 관심과 많은 도움을 주신 유체기계연구팀의 이철형 박사님, 태양열이용연구팀의 이동원 박사님, 윤환기 선생님, 주문창 선생님께 깊이 감사드립니다.

항상 따뜻한 사랑과 관심으로 용기를 주신 제주대학교 열전달 및 열 시스템 실험실의 이동원 선배님, 김양훈 선배님, 김성만 선생님, 조혁진, 김석우, 그리고 후배님들에게 감사의 마음을 전하며, 제주대학교 기계공학과 대학원 선후배님들 모두의 만남을 소중하게 생각합니다.

늘 함께 지내면서 많은 도움과 충고를 주신 태양열이용연구팀의 김기세 박사님, 박준연 선배님, 강인석 선배님, 이동규 선배님, 강명철 선배님, 윤현식, 현성택, 송병하, 이호준 님, 유지용 님께 감사드리며, 지금은 미국에 있지만 김창범 선배님께 진심으로 감사드립니다.

끝으로 오늘의 제가 있기까지 수많은 도움과 격려가 되어준 누님과 매형, 아우, 그리고 크나큰 내리사랑과 헌신으로 돌보아주신 존경하는 아버님, 어머님께 이 작은 결실을 바칩니다.