

사무소 건물을 위한 자연형 태양열 시스템의 응용

박진서*, 서승직**

*인하대학교 대학원 건축공학과(sam0777@naver.com),

**인하대학교 건축공학과 교수(energeti@inha.ac.kr)

Application of Passive Solar Systems for Office Buildings

Park, Jin-Seo* Suh, Seung-Jik**

*Dept. of Architecture, Graduate School, InHa University(sam0777@naver.com),

**Dept. of Architecture Eng., InHa University(energeti@inha.ac.kr)

Abstract

This study analyzed the performance of passive solar system for office building. A unit model of the passive solar system was proposed in order to predict its performance under varying parameters and Seoul weather date. Steady state heat transfer equations were set up using a energy balanced equations and solved using a inverse matrix method. Numerical simulation program to analyze system was developed by using MATLAB. As the results, the passive solar system performance of office building was determined by the insolation and the outdoor air temperature. Also the passive solar system indicate 6.7~16.2% of annual average efficiency. In the comparison with other systems of the conventional wall, mass wall could reduce the heating loads of 7.1% and trombe wall could reduce heating loads of 11.5%. Through this study, performance of passive solar system for office building was verified by numerical method. Consequently, the passive solar system could operate an important role as the alternative for saving energy consumption of office building, and the additional studies should be made through the experimental method for the commercialization.

Keywords : 자연형 태양열 시스템(Passive solar system), 단위모델(Unit model), 기존벽(Conventional wall), 매스월(Mass wall), 트롬월(Trombe wall), Heating load(난방부하), MATLAB

기 호 설 명

A_f : 중공층 횡단면적(m^2)

A_{fi} : 중공층 유·출입구면적(m^2)

A_i : 벽면적(m^2)

H : 중공층 높이(m)

I_{vt} : 수직면일사량(W/m^2)

L : 축열벽두께(m)

C_p : 공기의 비열($J/kg \cdot ^\circ C$)

투고일자 : 2010년 5월 26일, 심사일자 : 2010년 6월 10일, 게재확정일자 : 2010년 8월 15일

교신저자 : 박진서(sam0777@naver.com)

- S_1 : 투과체 흡수일사량(W/m²)
- S_2 : 축열체 흡수일사량(W/m²)
- T : 온도(°C)
- Q : 난방부하(kW)
- Q_{in}^- : 순획득열량(W/m²)
- Q_t : 단위모델 전체부하량(kW)
- Q_{aux} : 설비용량(kW)
- $\frac{Q_{aux}}{V_f}$: 중공층유속(m/s)
- nV : 환기량(m³/h)
- W : 중공층폭(m)

소문자

- h_c : 전도열전달계수(W/m²°C)
- h_r : 복사열전달계수(W/m²°C)
- h_v : 대류열전달계수(W/m²°C)
- k_i : 열관류율(W/m²)
- \dot{m} : 질량유량(kg/s)
- \dot{q} : 중공층열유속(W/m²)

그리스

- σ : 스테판볼프만상수(W/m²K⁴)
- ρ : 밀도(kg/m³)
- ϵ_g : 방사율
- η : 시스템효율(%)

무차원수

- Gr : Grashof number
- Nu : Nusselt number
- Pr : Prandtl number
- Ra : Rayleigh number

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

우리나라 총 에너지 사용량 가운데 건물에서 소비되는 에너지 사용량은 전체 에너지 사용량의 약 1/4에 이르고 있으며 이러한 수치는 생활환경 변화에 따라 점진적으로 증가될 것으로 예상되기 때문에 건물에서의 에너지 절감을 위한 시스템 개발 및 실용화가 시급한 실정이다. 이에 본 연구에서는 건축적 디자인 방법인 자연형 태양열 시스템을 사무소 건물에 적용하기 위한 난간형 매스월 및

트롬월 시스템의 건축 설계 자료를 구축하기 위한 기초적인 연구를 수행하였다.

1.2 연구방법 및 범위

자연형 태양열 시스템에 대한 국내 연구로 트롬월의 열성능에 대한 실증실험을 수행한 바 있으며, 국외의 경우 N. K. BANSAL 등이 다양한 간접획득형 시스템에 대한 효율분석을 연구한 바 있다.¹⁾ 본 논문에서는 사무소 건물의 난방부하 절감을 위한 자연형 태양열 시스템인 매스월 및 트롬월 시스템의 적용을 위한 기초자료를 마련하기 위한 것이다. 따라서, 각 시스템의 수학적 모델을 제시한 후, 열평형 방정식을 통해 시스템을 적용하지 않은 건물과 시스템 적용에 따른 난방부하 절감율의 비교·분석 및 효율분석 등 시스템의 오피스 건물 적용 시, 난방에너지 수급효과 등을 수치해석 및 MATLAB을 이용하여 정량적으로 분석하였다.

2. 이론적 분석

2.1 시스템 개요

그림 1은 사무소 건물을 대상으로, 시스템을 적용하지 않은 기존벽과 트롬월, 매스월 시스템의 적용 시, 각 시스템의 구성 및 적용 기법 등에 대한 개념도를 보여주고 있다. 기존벽의 경우 단일벽으로 구성되어 있는 반면, 매스월과 트롬월의 경우 투과체, 중공층, 축열벽으로 구성되어 있다.

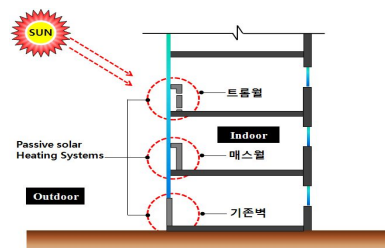


그림 1. 시스템 개념도

1) N.K.BANSAL, A Simple Procedure for Selection and Sizing of Indirect Passive Solar Heating Systems, Building and Environment, Vol. 2, No. 4, pp.381~387, 1991.

또한, 시스템은 전도, 대류, 복사의 복합열 전달 매커니즘을 갖는 시스템이라 할 수 있으며, 이러한 시스템의 수치해석을 위한 기본가정은 다음과 같다.

- ① X축 방향의 온도구배만을 고려한 1차원 정상상태 열전달 문제로 가정.
- ② 중공층 공기를 제외한 재료의 물성값은 온도변화와 무관함.
- ③ 시스템의 집열면에 흡수되는 일사량 계산시, 음영에 대한 영향은 무시함.
- ④ 모든 표면은 회색체로 간주함.
- ⑤ 지표면의 온도는 외기온도와 동일함.

2.2 에너지 평형 방정식

(1) 매스월(Mass Wall)

매스월 시스템의 해석을 위한 열수지 모델은 그림 2와 같다. 열평형 방정식은 투과체, 중공층, 축열벽 외표면 및 내표면으로 구분하여 수립하였으며 식 (1)~(4)와 같다.

$$S_1 - h_{v_a}(T_g - T_{amb}) - h_{r_s}(T_g - T_{sky}) - h_{r_g}(T_g - T_{grd}) + h_{v_g}(T_f - T_g) + h_{r_w}(T_{w1} - T_g) = 0 \quad (1)$$

$$-h_{v_g}(T_f - T_g) + h_{v_w}(T_{w1} - T_f) = 0 \quad (2)$$

$$S_2 - h_{v_w}(T_{w1} - T_f) - h_{r_w}(T_{w1} - T_g) + h_{c_w}(T_{w2} - T_{w1}) = 0 \quad (3)$$

$$-h_{c_w}(T_{w2} - T_{w1}) + h_{r_i}(T_k - T_{w2}) + h_{v_i}(T_r - T_{w2}) = 0 \quad (4)$$

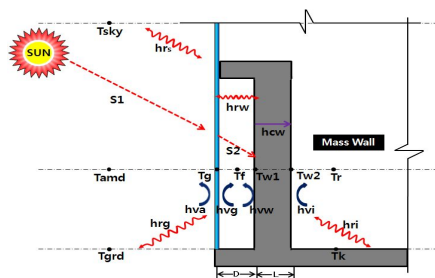


그림 2. 매스월 열수지 모델 개념도

(2) 트롬월(Trombe Wall)

그림 3은 트롬월의 해석을 위한 열수지 모델이다. 열평형 방정식은 투과체, 중공층, 축열벽 외표면 및 내표면으로 나눠 수립할 수 있으며 식 (5)~(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_1 - h_{v_a}(T_g - T_{amb}) - h_{r_s}(T_g - T_{sky}) + h_{v_g}(T_f - T_g) + h_{r_w}(T_{w1} - T_g) = 0 \quad (5)$$

$$-\dot{q} - h_{v_g}(T_f - T_g) + h_{v_w}(T_{w1} - T_f) = 0 \quad (6)$$

$$S_2 - h_{v_w}(T_{w1} - T_f) - h_{r_w}(T_{w1} - T_g) + h_{c_w}(T_{w2} - T_{w1}) = 0 \quad (7)$$

$$-h_{c_w}(T_{w2} - T_{w1}) + h_{r_i}(T_k - T_{w2}) + h_{v_i}(T_r - T_{w2}) = 0 \quad (8)$$

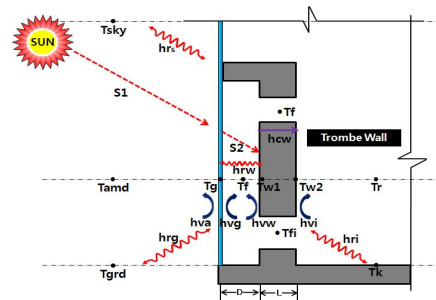


그림 3. 트롬월 열수지 모델 개념도

특히, 식 (6)에서 [\dot{q}]는 트롬월의 중공층 및 실내 대류에 의한 열순환이 발생할 때, 공기에 의한 열유속을 나타낸 것이며, 이는 식 (9)를 이용하여 산출할 수 있다. 여기서 [γ]는 중공층 유·출입구 온도에 대한 “평균온도근사계수”이며, Ong와 Chow가 제안한 0.74를 적용하였다.²⁾

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot C_f(T_f - T_{fi}) / \gamma \cdot W \cdot H \quad (9)$$

2) K. S. Ong, C. C. Chow, Performance of a solar chimney, Solar Energy, 2003, Vol. 74, pp. 1~17

그리고 질량유량[\dot{m}]은 식 (10)를 통해 산출할 수 있고, 중공층의 평균 유속은 식 (13)을 이용하여 계산이 가능하다. 여기서 $C_1(A_f/A_{fi})^2 + C_2$ 는 시스템의 압력손실을 나타내며 특히, 본 논문에서는 무차원 상수인 식 (11)의 C_1 과 C_2 는 Trombe가 제안한 8과 2의 값을 적용하였다.³⁾

$$\dot{m} = \bar{V}_f \cdot A_f \cdot \rho \quad (10)$$

$$\bar{V}_f = \sqrt{\frac{2gH}{C_1(A_f/A_{fi})^2 + C_2} \cdot \frac{(T_f - T_{fi})}{T_f}} \quad (11)$$

2.3 시스템 계수

각 시스템의 축열벽 전도열전달계수는 식 (12)를 통해 산출할 수 있으며 특히, 외기에 면한 수직면의 대류열전달계수의 경우, Watmuff 등이 제안한 식 (13)를 이용하여 산출하였다.⁴⁾ 그리고 축열벽의 내표면과 실내의 대류열전달계수는 Griffiths 및 Davis가 제안한 식 (14)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$hc_w = k_w/L \quad (12)$$

$$hv_a = 2.8 + 3.0Va \quad (13)$$

$$hv_i = 1.7 \cdot (T_{w2} - T_r)^{1/4} \quad (14)$$

또한 중공층의 대류 열전달 계수($h_{v_{w,g}}$)는 중공층과 실내와의 공기 유동 여부에 따라 구분하여 계산하여야 하며 공기유동이 있는 경우(트롬월), 수직면의 자연대류 현상으로 간주하고, 공기유동이 없는 경우(트롬월, 매스월), 밀폐 공간의 자연 대류 현상으로 볼

수 있으며 다음의 식 (15), (16), (17)를 이용하여 계산할 수 있다.⁵⁾⁶⁾

① 중공층을 통한 공기 유동이 있는 경우
($T_f > T_{fi}$)

$$h_{v_{w,g}} = (N \cdot k)/H \quad (15)$$

$$Nu = [0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}]^2 \quad (16)$$

② 중공층을 통한 공기 유동이 없는 경우
($T_f < T_{fi}$)

$$h_{v_{w,g}} = \frac{k}{D/2} \cdot (0.01711 \cdot Ra^{0.29}) \quad (17)$$

그리고 투과체 수직면과 천공 사이의 복사열전달계수와 투과체 수직면과 지면사이의 복사열전달계수는 식 (18), (19)를 이용하여 계산이 가능하며, 특히 식 (18)에서 천공온도(T_{sky})는 Swinbank가 제안한 다음의 식 (20)을 이용하여 산출할 수 있으며, 여기서 지표면온도(T_{grd})는 외기온도(T_{amb})와 동일한 것으로 가정하였다.

$$hr_s = 0.5 \cdot \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_g^2 + T_{sky}^2)(T_g + T_{sky}) \quad (18)$$

$$hr_g = 0.5 \cdot \sigma \cdot \epsilon_g \cdot (T_g^2 + T_{grd}^2)(T_g + T_{grd}) \quad (19)$$

$$T_{sky} = 0.0522 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (20)$$

그리고 투과체와 축열체 외표면 사이와 축열체 내표면 및 실내벽 사이의 복사열전달계수는 식 (21), (22)를 이용하여 계산이 가능하다.

3) Trombe, F., Robert, J. F., Cabanot, M., and Sesolis, B., Concrete Walls to Collect and Hold Heat, Solar Age, 1977, Vol 2, pp 13~19

4) Watmuff, J.H., W. W. S. Charters, and D. Proctor, Solar and Wind induced External Coefficients for Solar Collectors, CPMPLES, 1977, No.2, p. 56

5) Churchill, S.W., and H.H.S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate," Int. J. Heat Mass Transfer, 1975, 18, 1323

6) Randall, K.R., Mitchell, J.W., and Sesolis, B., "Concrete Walls to Collect and Hold Heat", Solar Age, Vol.2, No.8, Aug. 1977, pp. 13~19

$$hr_w = \sigma \cdot \frac{1}{1/\epsilon_g + 1/\epsilon_{w1} - 1} (T_g^2 + T_{w1}^2)(T_g + T_{w1}) \quad (21)$$

$$hr_i = \sigma \cdot \epsilon_{w2} \cdot \epsilon_k \cdot (T_{w2}^2 + T_k^2)(T_{w2} + T_k) \quad (22)$$

2.4 시스템 효율

시스템을 통해 실내에서 얻어지는 총 유입 열량 $[Q_{in}]$ 은 획득된 열량과 손실된 열량의 합으로 산출할 수 있다. 또한, 시스템 전체 효율은 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = (Q_{in}/I_{vt}) \times 100 \quad (23)$$

2.5 분석조건

(1) 자연실온 분석

본 연구에서는 난방부하의 계산 시, 외기온도와 실내 설정온도와의 차이보다는 자연실온과의 차이를 적용함으로써 난방부하 계산을 보다 실제에 가깝게 계산하였다.

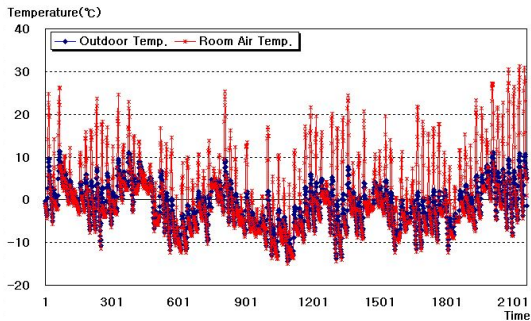


그림 4. 난방기, 외기온도 및 자연실온의 분포

그리고 외기온도의 경우, 평균 약 -1.5°C 로 나타난 반면 자연실온은 평균 약 0.9°C 로 분석되었다. 또한 제시한 단위모델에는 환기량 0.7회/h 만을 고려하였고, 식 (24)를 이용하여 자연실온을 계산하였다.

$$T_n = T_{set} \sum_{i=1}^n A_i \cdot K_i / \sum_{i=1}^n A_i \cdot K_i \quad (24)$$

(2) 일사량 분석

그림 5는 수직/수평면일사량 분포를 나타낸 것이며, TRNSYS 16에서 제공하는 서울 지역 기상데이터 이용하였다.⁷⁾

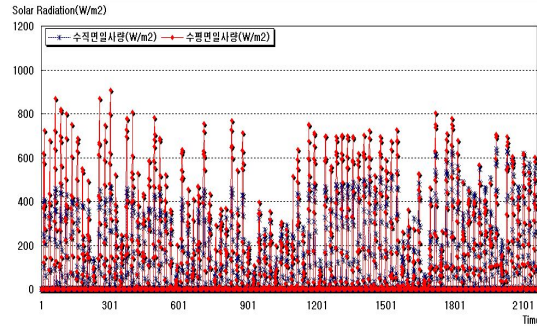


그림 5. 서울지역 수직/수평면 일사량

(3) 단위모델

부하계산을 위한 단위모델의 크기는 $10\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}$ ($W \times D \times H$)이며, 축열체는 $10\text{m} \times 0.3\text{m} \times 1\text{m}$ ($W \times D \times H$)으로 설정하였다. 또한 중공층 두께는 0.1m 로 설정하고, 실내온도는 20°C 로 설정하였다.

(4) 단위모델 물성값

표 1, 2는 시스템에서 이용된 물성값을 나타낸 것이다.

표 1. 재료의 물성값

구분	재료명	두께 (m)	열전도율 (W/mK)	밀도 (kg/m ³)	비열 (kJ/kgK)	흡수율 (-)	방사율 (-)
축열벽 (내부)	콘크리트	0.3	1.627	2,198	0.879	0.7	0.8
						0.9	0.9
중공층	공기	0.1	0.026	1.18	1	(-)	(-)
투과재	유리	0.005	1.06	2,500	0.75	0.06	0.9

(5) SSF(Solar Saving Fraction)

각 시스템들을 통해 건물의 에너지 수급효

7) Hay, J.E., Davies, J.A., "Calculation of The Solar Radiation Incident on An Inclined Surface", Proceedings First Canadian Solar Radiation Workshop, 1980, pp. 59~72

과를 위한 계산은 식 (25)를 이용하였다.

$$SSF = 1 - (Q_{aux}/Q_t) \quad (25)$$

표 2. 벽체 구성 및 열관류율

구분	재료명	면적 (m ²)	열관류율 (W/m ² K)	밀도 (kg/m ³)	비열 (kJ/kgK)
벽체	콘크리트(동,서,북측)	30	0.214	2,198	0.879
	콘크리트(남측)				
	단열재	30	1.724	40	1.21
	플라스터	30	0.130	862	1.13
천장	콘크리트	100	0.214	2,198	0.879
바닥	콘크리트	100	0.214	2,198	0.879

3. 분석 및 고찰

3.1 시스템 성능분석

(1) 난방기 효율분석

그림 6은 난방기 효율 분석을 나타낸 것이다. 또한, 트롬월이 가장 우수한 효율을 보이고 있으며, 기존벽, 매스월 및 트롬월의 최대 효율은 6.7%, 11.8% 및 16.2%로 분석되었다.

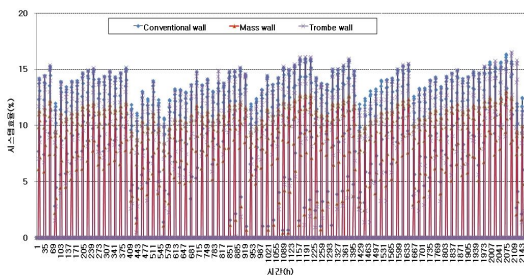


그림 6. 난방기 효율 비교·분석

(2) 월별 및 일일 효율분석

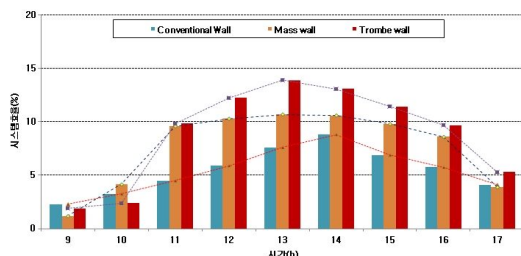


그림 7. 일일 효율 비교 분석

기존벽, 매스월 및 트롬월 시스템의 월 평균 효율은 각각 7.3%, 10.9% 및 13.4%로 분석되었다. 그림 7은 각 시스템들의 일일 효율을 분석한 것이다. 그 결과 시스템효율은 14~16시 사이에서 가장 높게 분석되었으며, 기존벽/매스월/트롬월의 효율은 각각 1.2~8.8%, 2.3~10.8%, 1.9~13.8%인 것으로 분석되었다.

3.2 태양 의존율 분석

그림 8과 표 3은 시스템 적용에 따른 난방부하량 및 시스템 효율에 따른 태양 의존율을 분석한 결과이다. 단위모델(기존벽)의 난방부하는 4.7~5.4kW로 분석되었으며, 매스월과 트롬월은 각각 4.4~5.0kW 및 4.2~4.8kW로 분석되었다. 또한 기존벽 난방부하량 대비, 매스월 및 트롬월 적용시, 태양 의존율은 각각 6.4~7.6% 및 11.0~12.0%인 것으로 분석되었다.

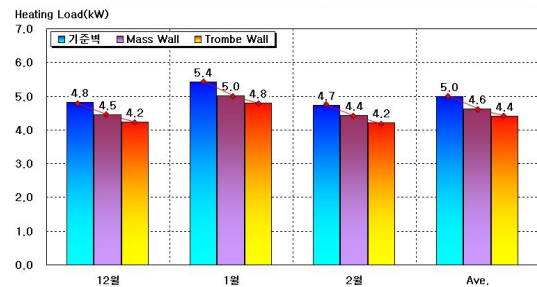


그림 8. 시스템 난방부하 비교·분석

표 3. 시스템 효율에 따른 태양의존율

종류	결과구분	12월	1월	2월	평균
기존벽	난방부하(kW)	4.8	5.4	4.7	5.0
	태양의존율(%)	-	-	-	-
매스월	난방부하(kW)	4.5	5.0	4.4	4.6
	태양의존율(%)	7.6	7.4	6.4	7.1
트롬월	난방부하(kW)	4.2	4.8	4.2	4.4
	태양의존율(%)	12.0	11.4	11.0	11.5

4. 결 론

본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 각 시스템에 대한 효율은 기존벽/매스월/

트롬월에 대한 난방기 전체 효율분포 결과에서 최고 약 9.7%, 13.8%, 16.2%로 분석되었다. 월별 및 일일 평균 효율은 각각 7.3%, 10.9%, 13.4% 및 1.2~8.8%, 2.3~10.8%, 1.9~13.8 %인 것으로 분석되었다.

(2) 각 시스템 적용에 따른 난방부하 및 절감율은 기존벽/매스월/트롬월 각각의 평균 난방부하는 5.0kW, 4.6kW, 4.4kW이며, 기존벽 대비, 매스월 및 트롬월 시스템 적용에 따른 평균 태양의존율은 각각 7.1% 및 11.5%인 것으로 분석되었다.

이상의 연구결과와 같이, 오피스 건물을 중심으로 기존벽 대비, 매스월과 트롬월 시스템을 적용한 결과, 시스템 효율과 난방부하 저감에 효과적인 것으로 분석되었다. 향후, 본 연구 결과를 바탕으로 실험용 모델과 실증 실험을 거쳐 시스템 적용을 위한 설계도가 마련되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. N.K.BANSAL, A Simple Procedure for Selection and Sizing of Indirect Passive Solar Heating Systems, Building and Environment, 1991, Vol. 2, No. 4, pp. 381~387
2. K. S. Ong, C. C. Chow, Performance of a solar chimney, Solar Energy, 2003, Vol. 74, pp. 1~17, 2003
3. Trombe, F., Robert, J .F., Cabanot, M., and Sesolis, B., Concrete Walls to Collect and Hold Heat, Solar Age, 1977, Vol 2, pp. 13~19
4. Watmuff, J.H., W. W. S. Charters, and D. Proctor, Solar and Wind induced External Coefficients for Solar Collectors, Cmples, 1977, No.2, p. 56
5. Churchill, S.W.,and H.H.S.Chu, "Correlating

- Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate, "Int.J.Heat Mass Transfer,1975, 18, 1323
6. Randall, K.R., Mitchell, J.W., and Sesolis, B., "Concrete Walls to Collect and Hold Heat", Solar Age, Vol.2, No.8, Aug. 1977, pp. 13~19
 7. Hay, J.E., Davies, J.A., "Calculation of The Solar Radiation Incident on An Inclined Surface", Proceedings First Canadian Solar Radiation Workshop, 1980, pp. 59~72