

자연 대류식 태양열 집열기 (TAP)의 설계와 평가

A Design of Thermosiphoning Air Panel and its Performance Analyzing

신 희 영,* 이 경 회**
(H.Y,Shin) (K.H,Lee)

ABSTRACT

The aim of the study is to the thermal performance of TAP (Thermosiphoning Air Panel) which is easily applicable to existing building as well as new building. TAP is one of the advantageous means of passive solar system, with a view to reducing the energy consumption of existing and new building.

The instantaneous thermal efficiency of a thermosiphoning collector depends primarily on the heat loss coefficient of the collector, the effectiveness of heattransfer between the absorber and the air, the average air temperature in the collector, the ambient air temperature, and the transmitted solar radiation.

Because the important design variables are interrelated, it is difficult to determine the effect of design decisions based on intuition. Therefore economical and effective TAP can be used easily, TAP had been designed and analyzed.

I. 서 론

70년대 이후 에너지 절약의 중요성이 대두되기 시작하여 각 분야에서 사용되는 에너지를 줄이기 위한 노력이 경주되었다. 건축 부문에서도 단열성능 기준의 강화, 에너지 절약을 위한 부위별성능 및 설비기준 등 사용 에너지를 줄이기 위한 시도와 함께 태양 에너지를 건물의 난방 열원으로 이용하는 적극적인 에너지 절약 방법으로써 설비형 태양열 시스템이 개발되었고, 기계순환력을 이용하는 설비형 시스템에 요구되는 높은 초기 투자와 유지·관리의 어려움을 개선하기 위해 자연형 태양열 시스템이 개발되어 그 일부는 실용화 단계에 있다.

본 연구에서는 자연형 태양열 난방방식 중 야

* 正會員 延世大學院

** 正會員 延世大學校工大

간단열이 필요없는 자연대류방식 (Convective loop system)의 일종으로서 공기 순환케도가 짧고 높은 열효율이 기대되고 경제성이 있는 TAP의 설계 및 성능 평가를 하였다.

TAP의 효율은 집열판 내부의 평균 공기온도, 외기온도, 유량, 집열판 내부 풍속, 열손실, 마찰 손실 등의 여러가지 변수가 상관되므로 TAP의 설계를 직관에 의존해서는 높은 효율을 기대하기 어렵다. 따라서 일반인들이 TAP을 손쉽게 활용할 수 있도록 경제성이 우수하고 효율이 높은 TAP을 설계하고 평가 하였다.

II. 일사량 DATA의 처리

TAP의 방출열량은 집열기 자체의 손실계수와 함께 외부 대기의 상태에 큰 영향을 받게 된다. 특히 일사량은 TAP의 획득 에너지원이므로 일사량에 따라 방출열량이 좌우된다고 할 수

있다. 따라서 정확한 일사량 DATA를 사용함으로써 획득열량을 정확히 구할 수 있다.

TAP은 건축물의 남쪽 벽면에 부착되므로 수직면 일사량을 알아야 방출열량을 구할 수 있다. 현재 국립 중앙관상대의 기상자료로서 수평면 일사량이 있으나, 수직면 일사량은 실측치가 없으므로 수평면 일사량을 환산해서 사용하고 있다. 그러나 TAP의 경우에는 시간별로 달라지는 광선의 입사각에 따라 투과체의 투과율이 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 월평균 시간별 일사량을 전산처리하여 사용하였다.

건물의 시간별 월평균 일사량을 구하기 위해서는 매일의 시간별 일사량을 적산하여 평균값을 구해야 하지만 본 논문에서는 각 월의 특정일을 선택하여 그 평균값을 사용하였다. 즉 10월부터 5월까지의 매월 7일과 22일을 기준으로 각 월의 시간별 평균 일사량을 구하였다. 즉

$$Q_s = (Q_{s,7} + Q_{s,22}) / 2$$

Q_s : 매월의 시간별 일사량

$Q_{s,7}$: 매월 7일의 시간별 일사량

$Q_{s,22}$: 매월 22일의 시간별 일사량

건물의 시간별 일사량은 입사각을 계산함으로써 계산할 수 있다.

$$Q_s = G_{sc} \times \tau \times I \times \cos \theta$$

Q_s : 시간별 일사량 (Kcal / hr)

G_{sc} : 태양상수 (1164 Kcal / m^2 hr)

τ : 태양빛의 대기권 투과율

θ : 수열면에 대한 입사각

I : 일조율

태양상수, 투과율 등은 상수로 처리할 수 있으며 일조율은 특정지방의 일조율을 사용한다. 입사각은 일적위(δ), 위도(ϕ), 수평면에 대한 경사각(β), 수열면의 방위각(γ), 시간각(w) 등의 변수로 된 다음식에서 부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \\ & \cos \phi \cos \beta \cos w + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos w + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin w \end{aligned}$$

III. 집열관의 성능계산 방법

집열관의 성능계산을 하기 위해서는 방출열량을 구해야 한다. 본 연구에서는 집열관 내부의 순환력을 굴뚝효과로 가정하고 Hottel-Whiller-Bliss 방정식과 Darcy-Weisbach 방정식을 이용하여 획득열량을 전산처리하여 구하였다.

$$q_u \stackrel{*1)}{=} F' \{ (\tau \alpha) H_i - U_L (T_c - T_a) \} \dots\dots\dots (1)$$

Hottel-Whiller-Bliss 방정식

$$\Delta P_b \stackrel{*2)}{=} 7.64H (1 / T_i - 1 / T_c) \dots\dots (2)$$

굴뚝효과에 인한 압력차

$$\Delta P_f \stackrel{*3)}{=} \{ f (L / D_o) (1 / A_{cs})^2 + \Sigma (C_o / A_o^2) \} (QA / 4005) \dots\dots\dots (3)$$

Darcy-Weisbach 방정식

$$q_u = 2.16 Q (T_c - T_i) \dots\dots\dots (4)$$

일반식

여기서

q_u : TAP의 단위면적당 획득열량 (BTU / hr $\cdot f_i^2$)

τ : 투과체의 평균 투과율

α : 흡열관의 평균 흡수율

F' : TAP의 효율계수

H_i : 투과체에 도달하는 순간 일사량 (BTU / hr $\cdot f_i^2$)

U_L : 집열관의 열 손실 계수

T_c : TAP 내부 평균온도

T_a : 외기 온도

ΔP_b : 압력차

H : 집열관의 유효높이

T_i : 실내기온

ΔP_f : TAP 내부 열류덕트의 마찰로 인한 압력손실

* 1) Hottel-Whiller-Bliss 방정식
* 2) ASHRAE FUNDAMENTALS 21.2(2)
* 3) Hottel-Whiller-Bliss 방정식

C₀ : TAP 내부 열류덕트의 형태에 따른 동적 손실 계수

A₀ : TAP 내부 열류덕트의 각각의 단면적

Q : TAP의 단위수열 면적당 유량

A : TAP의 수열 면적

위의 4개 방정식에서 서로 중복되는 변수를 소거하여, 기후자료나, 구성부재의 특성을 나타내는 자료 또는 손쉽게 계산가능한 변수 등으로서만 구성된 획득열량을 계산하는 단일 방정식을 유도할 수는 없다. 그러나 다음의 과정을 밟아서 비교적 간단히 획득열량을 구할 수 있다.

1) 단위면적당 유량(Q)를 가정하여 Q₁으로 하고 (1)식과 (4)식을 등식으로 놓은후 T_c를 중심으로 정리한다.

$$F' \{ (\bar{\tau}\alpha) H_t - U_L (T_c - T_a) \} = 2.16 Q_1 (T_c - T_i)$$

$$\therefore T_c = \frac{F' (\bar{\tau}\alpha) H_t + F' U_L T_a + 2.16 Q_1}{F' U_L + 2.16 Q_1}$$

2) 정상상태 (Steady State) 압력차로 인한 순환력과 마찰손실로 인한 마찰저항이 같아져서 ($\Delta P_s = \Delta P_f$) 등속도로 열류가 순환되게 된다. 따라서 (2)식과 (3)식을 등식으로하여 유량(Q)을 중심으로 정리한다. 이때 (2)식에 포함된 변수 T_c는 1) 단계에서 정리된 T_c를 사용한다.

3) 2) 단계에서 구해진 유량을 Q₂로 하고 Q₂를 가정치 (Q₁)로 대입하여 과정을 반복하여 수렴된 Q₂를 구한다.

4) 3)에서 구해진 Q₂가 TAP의 단위면적당 유량(Q)이며 (1)식에서 집열판의 단위면적당 획득열량(q_u)을 구한다.

획득열량이 구해지면 집열판의 효율(e)은 다음 식에서 쉽게 구할 수 있다.

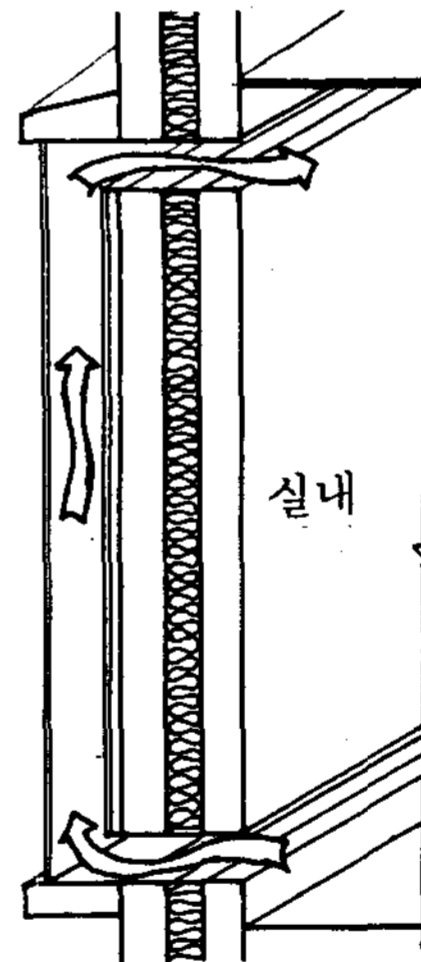
$$e = \frac{q_u}{H_t} \quad (e : \text{효율})$$

IV. 건축적 응용 및 평가

TAP을 건축물에 부착시켜 난방 열원으로 사용하는데 있어 TAP을 유형별로 분류하고 건축물의 특성에 적합한 유형을 선택하는 것이 유리하다. 따라서 본 연구에서는 TAP을 열류 순환 계도에 따라 분류하고 각 유형에 적합한 TAP을 제시하기로 하겠다.

1. 전면 순환형

전면 순환형은 실내에서 자연형 태양열 집열판 내부로 유입되는 공기가 투과체와 흡열판 사이로 흘러 들어가 흡열판의 외기쪽 측면과 접촉하여 열획득을 하게 된다. 이 유형은 열류계도가 짧고 제작 공정도 간단하다. 그러나 투과체의 내측표면과 열류가 직접 접촉하게 되므로 대류에 의한 열 손실이 커지고 결로의 우려가 있다.



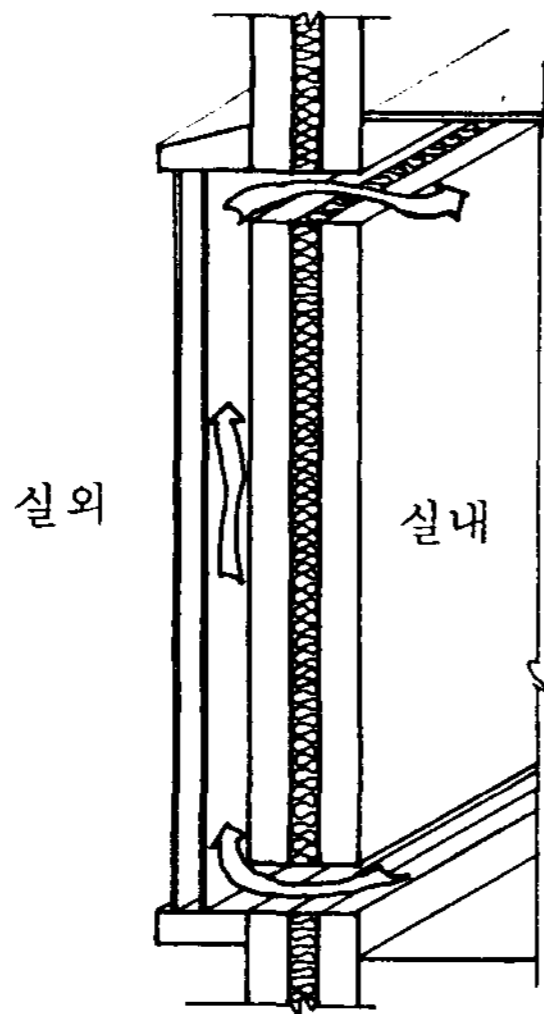
(그림 1) 전면 순환형 TAP의 개념도

자연형 태양열 난방방식 중 축열벽 형과 유사한 형태이지만 야간 방열이 안되며 야간 단열은 통기구만 닫아 주면 된다.

야간 방열이 불가능하고 주간 열효율이 높으므로 기존주택 및 조립식 주택의 보조 열원으로 적합하고 학교 등 주간 사용 건물의 난방용으로 적합하다.

2. 후면 순환형

후면 순환형은 전면 순환형과는 달리 실내에서 유입된 공기가 집열판 후면과 벽체 사이를 흐르게 되어 집열판의 실내측면으로 부터 열획득을 하게 된다. 이 유형은 열류가 외기로 부터 투과체 및 흡열판으로 보호하게 되므로 전면 순환형

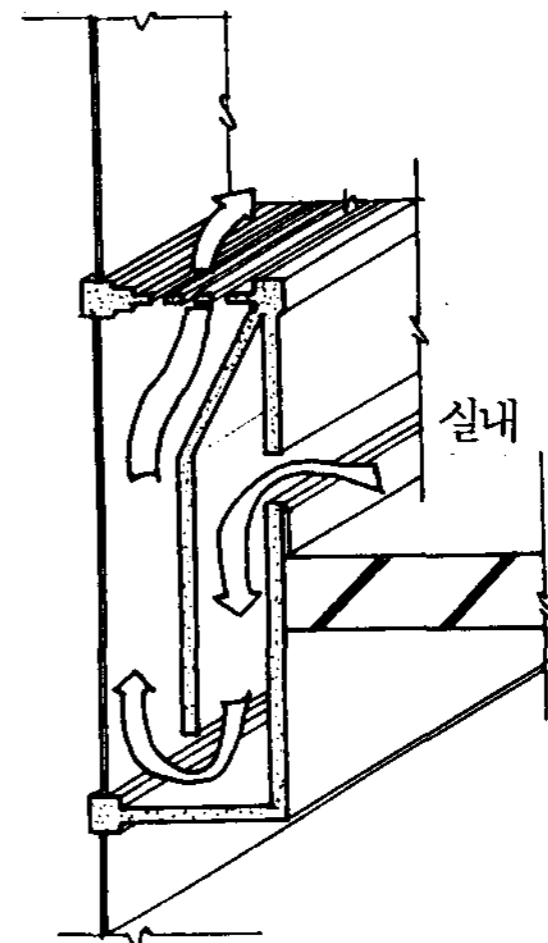


(그림 2) 후면 순환형 TAP의 개념도

에 비해 집열판 전면을 통해 대류에 의한 열손실을 크게 줄일 수 있다. 특히 집열판의 외측 표면에 선택흡수막 (Selective Surface) 을 도장하므로써 햇빛이 흡열판에 도달하여 열에너지로 바뀐후 실외로 향하는 장파장의 열선 복사를 10% 정도로 줄일 수 있으므로 복사에 의한 열손실을 크게 감소시킬 수 있다. 따라서 후면 순환형은 전면 순환형에 비해 전달된 태양에너지가 외부로 손실되는 양을 줄일 수 있다. 그러나 흡열판과 벽체사이에 열류덕트를 위한 공간을 두어야 하므로 집열판의 두께가 두꺼워지고 전면 순환형에 비해 공정도 약간 복잡하다. 기존 주택이나 신축주택과 같은 소규모 건축물의 보조 난방에 적합하며, 투과체와 흡열판을 지지틀과 함께 일체화시킬 수 있으므로 현장제작은 물론 공장제작이 용이하여 대량 생산이 가능하다.

3. U 자 형

U자형의 TAP은 전면 순환형과 마찬가지로 집열판의 외측에서 열획득을 하게되지만 수열면적을 늘리기 위해 열류 순환 덕트를 U자형으로 취한 형태이다. 덕트의 길이가 길어지고 휨정도도 심해서 시스템의 효율은 떨어지지만 수열면적의 증대로 인하여 획득열량은 증가하게 된다.



(그림 3) U자형 TAP의 개념도

이 시스템은 바닥의 걸레반이 부근에서 찬 공기가 집열판 내부로 흘러들어가 흡열판 뒷면을 따라 내려간 후 흡열판 전면에서 가열된다. 가열된 공기는 창대 높이 근처의 출기구를 통하여 실내로 유입된다. 이때 흡열판의 뒷면에 단열재를 부착하지 않으면 뒷면에서도 열획득이 이루어지므로 흡열판 전후면의 열류가 동시에 상승하게 되어 자연대류 현상이 원활하게 일어나지 않는다. U자형 TAP은 아랫층에 비난방 공간이 위치할 때 아랫층의 남쪽 벽면을 수열면적으로 이용할 수 있으며 사무소나 기타 건축물의 스펀드럴 (Spandrel) 부분을 수열면적으로 활용할 수 있다.

4. 기타의 형태

기타의 형태로서 열류가 흡열판의 전후로 흐르게 되는 형태와 그물형 흡열판을 사용하는 경우 등이 있다.

5. TAP의 설계 및 평가

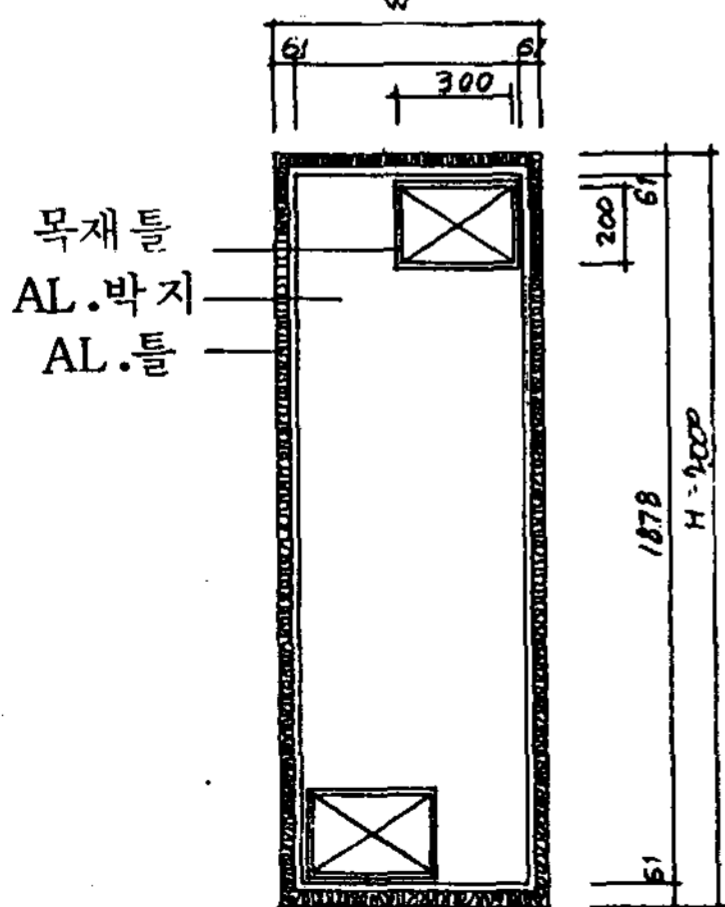
집열기의 설계시 다음과 같은 사항을 주안점으로 하여 설계하였다.

① 성능계산 시뮬레이션 모델에 따라 집열기의 단위 면적당 획득열량을 극대화 시키는 TAP을 설계하였다. *4) (표 1은) 후면 순환형의 경우 높이와 폭을 변화시킬 때 흡열판의 단위 면적당 획득열량을 극대화시키는 TAP내부의 공기 두께를 나타낸다.

L	W	0.6M	0.7M	0.9M	1.2M
1.5M	Do	0.020	0.029	0.026	0.025
	e	0.4353	0.4425	0.4397	0.4340
1.8M	Do	0.032	0.031	0.029	0.025
	e	0.4491	0.4470	0.4429	0.0260
2.0M	Do	0.034	0.032	0.029	0.026
	e	0.4501	0.4480	0.4447	0.3487
2.1M	Do	0.037	0.033	0.032	0.027
	Do	0.4507	0.4489	0.4444	0.4394

(표 1) TAP의 높이(H)와 폭(W)의 변화에 따라 효율이 극대화되는 TAP의 연류두께(D₀)

② 집열기의 크기는 신축주택 및 기존주택의 남면벽 형태와 조화를 이룰 수 있고 모듈 (module)에 맞춰 수요자의 기호에 따라 선택

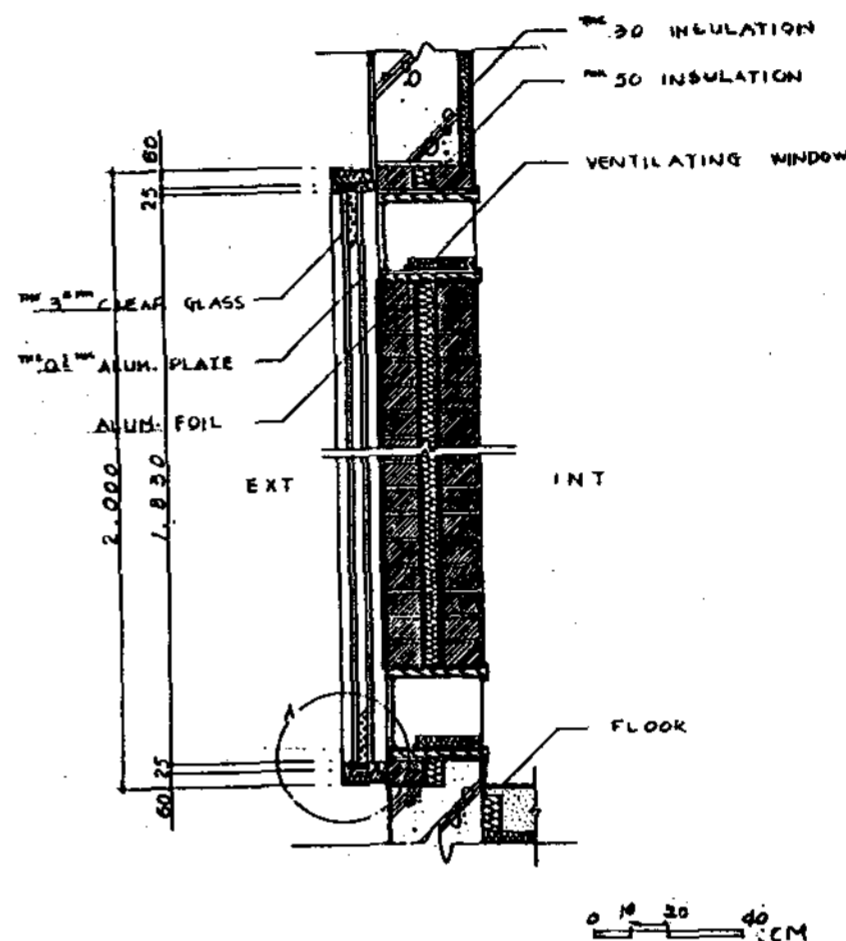


(그림 4) TAP의 입면

* 4) 이경희외, 「태양열을 이용한 기존주택의 보조난방 시스템 개발에 관한 기초연구」 대한건축학회 '84.11.12 월호

할 수 있도록 0.6 m × 1.8 m, 0.6 m × 2.1 m, 0.7 m × 2.0 m, 0.9 m × 1.8 m, 0.9 m × 2.1 m, 1.2 m × 2.1 m 등의 6가지 유형을 제시하였다.

③ 집열기의 부착, 시공시의 편의를 위해 상하 통기구의 크기를 조적식 벽돌 크기를 고려하였고 (1.5 B) 집열기의 부착을 간단한 긴결철물로서 가능케하였다.



(그림 5) TAP의 단면

④ 비난방 기간중 집열기로 인하여 실내가 과열되는 것을 방지하기 위하여 TAP의 상·하단에 외기와 직접 통하는 통기구를 설치하였다.

집열기 각 부위에 대한 사용재료와 특기사항은 다음과 같다.

재	료	흡수율
무광택 흑색 페인트	(Flat black paint)	.95
어두운 회색 페인트	(Dark gray paint)	.91
어두운 청색 락카	(Dark blue lacquer)	.91
흑색 유성 페인트	(Black oil paint)	.90
어두운 갈색 페인트	(Dark brown paint)	.88
어두운 청회색 페인트	(Dark blue-gray paint)	.88
중간 갈색 페인트	(Medium brown paint)	.84
밝은 중간 갈색 페인트	(Medium light brown paint)	.80
갈색, 녹색 락카	(Brown or green lacquer)	.79
중간 적갈색 페인트	(Medium rust paint)	.78
밝은 회색 유성페인트	(Light gray oil paint)	.75
적색 유성페인트	(Red oil paint)	.74
붉은 벽돌	(Red bricks)	.70
콘크리트	(Uncolored concrete)	.65
중간 연한 녹색 페인트	(Medium dull green paint)	.59
중간 오렌지색 페인트	(Medium orange paint)	.58
중간 노란색 페인트	(Medium yellow paint)	.57
중간 청색 페인트	(Medium blue paint)	.51
밝은 녹색 페인트	(Light green paint)	.47

(표 2) 색깔별 태양열 흡수율

① 흡열판은 경량이고, 가공이 용이하며, 열전도성이 높은 ($K = 175 \text{ Kcal} / m \text{ hr } ^\circ\text{C}$) 폴알루미늄판을 사용하였다. TAP은 건축물의 외피 구성요소가 되므로 흡열판의 색깔은 건물의 외관에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 기존 및 신축 건물의 외피 색깔에 따라 선택할 수 있도록 대안을 제시하였다.

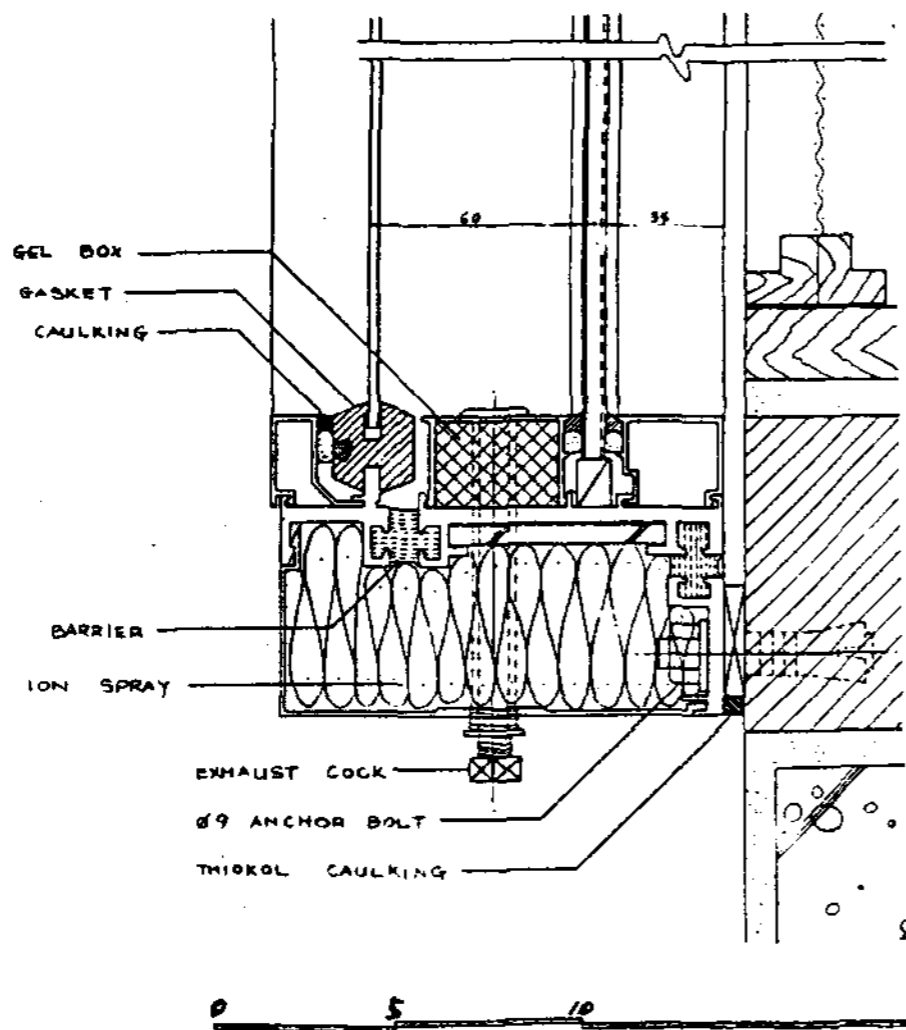
② 투과체는 온도에 따른 변형이 적고 투과율이 높은 물유리를 사용하기로 한다.

③ 통기구에는 야간 열손실을 방지하고 비난방 기간중 열획득을 방지하기 위해 단열문을 설치한다.

④ 고정틀은 기밀성이 우수하고 가공이 용이한 알루미늄 재를 사용하고 측면 손실을 줄이기 위해 단열재를 내부에 부착한다.

⑤ 벽체로 열흡수가 되는 것을 줄이기 위해 알루미늄 열판 (Thermopoly) 을 부착하였다.

⑥ 모든 접합부에는 틈새바람을 막기 위해 고온과 자외선에 강한 실리콘 코오킹을 하였다.



(그림 6) TAP의 하부 단면

TAP의 효율은 그 형태와 함께 기후조건과 재료의 특성에 따라 결정된다. 따라서 TAP의 효율 계산시 요구되는 기후자료와 우리나라에서 생산 가능한 재료들을 적용시켜 계산한다. TAP

의 성능은 성능 평가 시뮬레이션 모델에 의한 결과, 집열기의 유효두께 (열류 덕트의 두께)가 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

설계된 TAP의 열성능 평가를 위해 실제로 표준 주택 모델 (건설부 83년도 표준설계도서 중 도시형 단독주택 24-다)을 대상으로 평가함으로써 그 경제성을 검토하기로 한다.

모델 주택의 부하계수 (BLC)를 구해본 결과, $3786.481 \text{ Kcal} / ^\circ\text{C day}$ 가 되었다. 이를 기준으로 성능평가모델에서 구해진 획득열량 (q_u)를 사용하여 태양열 절감율 (SSF)을 구하면 높이가 2.0 m, 0.7 m인 흑색 무광택의 흡열판을 사용한 경우 TAP 1개당 6.4%의 절감을 할 수 있다. 모델주택이 부착 가능한 6개를 모두 설치하였을 경우는 38.4%로 나타났다.

연료	기간	회수기간 (년)
경유		8.01
등유		7.83
도시가스		5.14
프로판가스		3.22

(표 3)

기존의 비태양열 주택에서 TAP의 설치비용과 태양열로 대체된 난방에너지 절감액을 비교하여 경제성을 검토함으로써, TAP에 대한 투자 가치를 알 수 있다. 여기서 집열기의 설치에 따른 비용산정과 연간 절감비용에 의한 투자·회수기간은 (표 3)과 같다.

V. 결론

TAP은 다수의 기존주택 및 신축주택, 비주거용 건물에도 부착하여 난방 열원으로 이용할 수 있기 때문에 에너지 절약 효과가 매우 크다고 본다.

본 연구에서 제시된 TAP은 효율이나 경제성이 우수하게 나타나 있다. 근래에 들어 유류 상승이 둔화되었지만 유가 상승율이 높아질 것

을 감안한다면 회수기간은 (표 3)에서 제시된 기간보다 훨씬 앞당겨질 것으로 예상된다.

또한 건축물의 모듈에 맞춰서 규격화된 TAP을 대량으로 생산하게 되면 제작비의 저렴화가 가능하여 경제성이 더욱 높아질 것으로 본다.

참 고 문 헌

1. 이경희 외, 태양열을 이용한 기존 주택의 보조난방시스템에 관한 기초연구, 대한건축학회지, '84.11, 12월호.
2. 이경희, 「 건물의 부위별 성능 및 설계 기준안 (I) 」, 동력자원연구소, 1982.
3. 이경희, 「 주택 」, 기존 주택의 자연형 태양열이용방안, 대한주택공사
4. 오정무, 「 자연형 태양열 시스템 개발 」, 동력자원 연구소, 1982.
5. 건설부, 「 단독주택표준 설계도서 」
6. Duffie John A. & Beckman William A. [Solar Engineering of Thermal Process], A Willey Interscience Publication, 1980.
7. Reif Daniel K. [Solar Retrofit Adding Solar to Your Home] Brick House Publishing company, 1981.
8. Solar Age, March, 1981, TAPFLOW, pp. 48-51.
9. ASHRAE FUNDAMENTALS, 1977.
10. Douglas Balcomb, Passive Solar Design Handbook. Vol I & II, Washington, DOE, 1980.
11. Edward Maziria, The Passive Solar Evergy