

TAP 을 적용한 내단열과 외단열구조의 열성능 평가에 관한 연구

A Study on Thermal Performance Evaluation with TAP (Thermosyphoning Air Panel) in Inside and Outside Insulated Constructions

이 경 회* 유 호 천** 홍 영 우*** 전 채 휘***
Lee, Kyung-Hoi Yoo, Ho-Chun Hong, Yung-Woo Chun, Chai-Hwi

ABSTRACT

TAP system, a kind of natural convective space heating collector, has a good heat loss by night. The aim of this paper is to induce and to study an hourly heat flow theory by response factors analysis with TAP in inside and outside insulated construction, to compare and evaluate on thermal performance an hourly natural temperature, heated room temperature and heating load in abovementioned constructions with computer simulation. The results of the study can be summarized as follows.

According that there is no TAP and with TAP, it is inside insulated construction and outside insulated construction, daily natural range of temperature each shows 12.5°C and 16.7°C , 2.7°C and 3.7°C , daily heated range of temperature with normal control heating system each shows 6.6°C and 12.1°C , 1.7°C and 3.1°C , heating hours each show 10 hr and 7 hr, 9 hr and 4 hr and heating energy saving percentage in January 123% and 79%, 100% and 40%. Therefore, energy saving percentage shows that outside insulated construction saves about 54% in comparison with inside insulated construction.

1. 서 론

주간 열성능이 우수한 자연대류형 태양열 집열기 (TAP: Thermosyphoning Air Panel)를 사용한 열성능에 관한 이론적 기초연구가 발표된 데 이어서 TAP을 내단열구조와 외단열구조에 적용시켰을 때 건물의 열성능 거동현상을 건축환경적인 차원에서 규명해 볼 필요가 있다.

내단열구조는 실내축열체 (internal heat storage mass)의 열용량을 감소시켜 실내온도의 변화폭을 크게하는 단점이 있으나 외단열구조는 내부벽체를 축열체로 이용할 수 있고 열교현상 (heat bridge), 결로방지 등에 유리하다.

* 정회원: 연세대학교 건축공학과

** 정회원: 울산대학교 건축공학과

*** 정회원: 연세대학교 대학원 연구조교

현재 시간별 동적열류 해석 (dynamic heat flow analysis)은 DOE-2, HASP/ACLD-8001 등 외국에서 개발된 프로그램에 의해 이루어지고 있으나 이들 프로그램에 필요한 광범위한 기상자료와 전문적인 알고리즘을 이해하는데는 많은 시간이 필요하다.

따라서 본 연구는 내단열구조와 외단열구조의 건물에 TAP을 적용시켰을 때 TAP에 의한 태양열 획득량을 응답계수 (response factors)에 의해 시간별 열류해석 이론을 유도, 검토하고 이것을 Personal Computer를 사용한 간이방법으로 내-외단열 구조의 평가 모델에 적용시켜 TAP설치 유무에 따른 자연실온, 난방실온 그리고 난방 부하량을 컴퓨터시뮬레이션하여 TAP에 의한 내-외단열구조의 열성능을 비교평가해 보는 데 연구의 목적이 있다.

2. 응답 및 응답계수의 개념

1 차원 유한벽체주위의 초기온도가 0℃로 일정하다고 가정할 때 순간 (t=0) 의 공기를 1℃로 상승시켜 그 상태가 계속될 때 그 벽체 양표면 열류를 단위응답 (indicial response) 이라 한다.

이 단위응답은 벽체의 전열특성 (단열성, 열용량 등) 을 가장 함축적으로 나타내는 개념으로써 비정상 열류해석 (unsteady state heat flow analysis) 의 기초가 된다.

후리에 (Fourier) 의 비정상 1 차원 열전도 방정식에 의해 임의의 Z+2 층에 대한 벽체의 물성치, 그리고 온도(θ)와 열류(q)관계를 4 인자 행렬로 표시하면 다음 그림 1 및 식(1)과 같다.

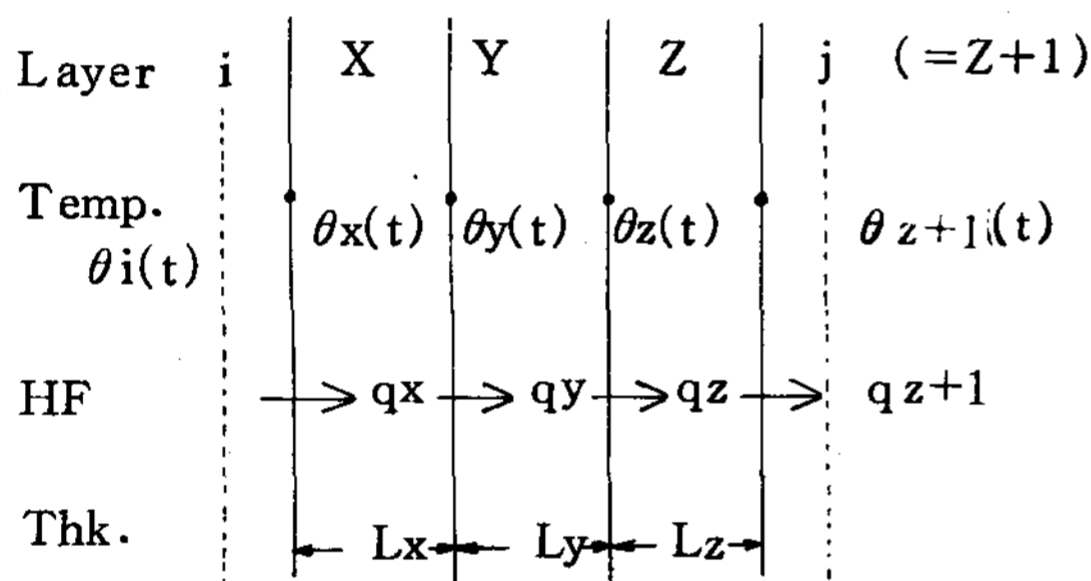


그림 1 전열 물성치

$$\begin{bmatrix} H_i(s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_j^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_z(s) & B_z(s) \\ C_z(s) & D_z(s) \end{bmatrix} \dots$$

$$\begin{bmatrix} A_x(s) & B_x(s) \\ C_x(s) & D_x(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & T_i^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_j(s) \\ Q_j(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$A(s), D(s) = \cosh \sqrt{s/a} L$$

$$B(s) = \frac{1}{\lambda \sqrt{s/a}} \sinh \sqrt{s/a} L$$

$$C(s) = \lambda \sqrt{s/a} \sinh \sqrt{s/a} L$$

L, λ, a: 층의 두께(m), 열전도율 (kcal/mh℃)

온도전도율 (a = λ / Cr: m²/h)

T_i, T_j, R: 열전달률 (kcal/m²h℃), 열저항 (R = L / λ)

H, Q: 온도(θ), 열류(q)의 라플라스변환

$$\begin{bmatrix} 1 & T_j^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_z(s) & B_z(s) \\ C_z(s) & D_z(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x(s) & B_x(s) \\ C_x(s) & D_x(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & T_i^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}(s) & \bar{B}(s) \\ \bar{C}(s) & \bar{D}(s) \end{bmatrix}$$

라 두면 다음의 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} H_i(s) \\ Q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}(s) & \bar{B}(s) \\ \bar{C}(s) & \bar{D}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_j(s) \\ Q_j(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

단위응답을 구하기 위하여 식(2)를 라플라스 변환시켜 정리하면

$$Q_j(s) = \frac{1}{s\bar{B}(s)} \quad (3a)$$

$$Q_i(s) = \frac{\bar{D}(s)}{s\bar{B}(s)} \quad (3b)$$

식(3)의 분모항 s $\bar{B}(s)$ =0로 두고 유수정리에 의해 역변환시켜 구한 값을 -α_k (k=0, 1, 2, ...) 라 하면 관류응답 φ_T(t), 흡열응답 φ_A(t)는 다음 식(4), 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \phi_T(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\frac{d}{ds} s\bar{B}(s)} \right\}_{s=-\alpha_k} e^{-\alpha_k t} [\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}] \\ &= T_0 + \sum_{k=1}^{\infty} T_k e^{-\alpha_k t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi_A(t) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\bar{D}(s)}{\frac{d}{ds} s\bar{B}(s)} \right\}_{s=-\alpha_k} e^{-\alpha_k t} [\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}] \\ &= A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\alpha_k t} \end{aligned} \quad (5)$$

응답계수 (response factor)는 위에서 해석된 열류응답 (heat flux response)을 시간계열 (time series)로 나타낸 개념으로서 관류 응답계수 (transmission response factor)와 흡열응답계수 (absorption response factor)가 있다. 응답계수를 해석하기 위해서는 유체 온도를 1℃ 상승시키는 단위파 (unit pulse)를 기본으로하여 단위삼각파를 구하고 여기에 임의 시간 t에 대해 jΔt 만큼 이전에 발생한 f(t-jΔt) 함수를 곱하여 이전의 모든 삼각파에 대해 적분해 나간다.

즉, 단위 응답계수를 φ_V(t)라 하면

$$\phi_V(t) = T_0(A_0) + \sum_k T_k(A_k) e^{-\alpha_k t} \quad (6)$$

이것을 램프함수 (ramp function)에 의한 응답을 구하고 t=jΔt 로써 φ_i 수열로 정리하면 다음 식(7)과 같이 관류응답계수 (φ_{Tj})와 흡열응답계수

(ϕ_{Aj})를 구할 수 있다.

$$\phi_{Tj} = -\sum_k \frac{T_k}{\alpha_k \Delta t} (1 - e^{-\alpha_k t})^2 e^{-\alpha_k(j-1)\Delta t} \quad j \geq 1$$

$$\phi_{Aj} = -\sum_k \frac{A_k}{\alpha_k \Delta t} (1 - e^{-\alpha_k t})^2 e^{-\alpha_k(j-1)\Delta t} \quad (7)$$

3. 응답 계수에 의한 열부하산정 이론식

3.1 부위별 열류해석

난방공간의 실온을 산정하는데는 먼저 실의 각 부위에 대한 열류해석이 필요하다. 예를 들면 동측벽체(BW)에 대한 1일(j=1 to 24)간의 열류량(QRW)을 시간별 관류응답계수(WT)를 이용하여 누적산정식을 유도하면 다음 식(8)과 같다.

[예] 동측벽체에 대한 열류량 누적산정식

QRWn=

$$\begin{aligned} & (RSTn-23-ITn-24)WTn*RA+(RSTn-22-ITn-23) \\ & *WTn-1*RA+(RSTn-21-ITn-22)WTn-2*RA \\ & +(RSTn-20-ITn-21)WTn-3*RA+(RSTn-19-ITn-20) \\ & *WTn-4*RA+(RSTn-18-ITn-19)WTn-5*RA \\ & +(RSTn-17-ITn-18)WTn-6*RA+(RSTn-16-ITn-17) \\ & *WTn-7*RA+(RSTn-15-ITn-16)WTn-8*RA \\ & +(RSTn-14-ITn-15)WTn-9*RA+(RSTn-13-ITn-14) \\ & *WTn-10*RA+(RSTn-12-ITn-13)WTn-11*RA \\ & +(RSTn-11-ITn-12)WTn-12*RA+(RSTn-10-ITn-11) \\ & *WTn-13*RA+(RSTn-9-ITn-10)WTn-14*RA \\ & +(RSTn-8-ITn-9)WTn-15*RA+(RSTn-7-ITn-8) \\ & *WTn-16*RA+(RSTn-6-ITn-7)WTn-17*RA \\ & +(RSTn-5-ITn-6)WTn-18*RA+(RSTn-4-ITn-5) \\ & *WTn-19*RA+(RSTn-3-ITn-4)WTn-20*RA \\ & +(RSTn-2-ITn-3)WTn-21*RA+(RSTn-1-ITn-2) \\ & *WTn-22*RA+(RSTn-ITn-1)WTn-23*RA \\ & +(ITn-24-ITn-23)WTn*RA/2+(ITn-23-ITn-22) \\ & *WTn-1*RA/2+(ITn-22-ITn-21)WTn-2*RA/2 \\ & +(ITn-21-ITn-20)WTn-3*RA/2+(ITn-20-ITn-19) \\ & *WTn-4*RA/2+(ITn-19-ITn-18)WTn-5*RA/2 \\ & +(ITn-18-ITn-17)WTn-6*RA/2+(ITn-17-ITn-16) \\ & *WTn-7*RA/2+(ITn-16-ITn-15)WTn-8*RA/2 \\ & +(ITn-15-ITn-14)WTn-9*RA/2+(ITn-14-ITn-13) \\ & *WTn-10*RA/2+(ITn-13-ITn-12)WTn-11*RA/2 \\ & +(ITn-12-ITn-11)WTn-12*RA/2+(ITn-11-ITn-10) \\ & *WTn-13*RA/2+(ITn-10-ITn-9)WTn-14*RA/2 \\ & +(ITn-9-ITn-8)WTn-15*RA/2+(ITn-8-ITn-7) \\ & *WTn-16*RA/2+(ITn-7-ITn-6)WTn-17*RA/2 \\ & +(ITn-6-ITn-5)WTn-18*RA/2+(ITn-5-ITn-4) \\ & *WTn-19*RA/2+(ITn-4-ITn-3)WTn-20*RA/2 \\ & +(ITn-3-ITn-2)WTn-21*RA/2+(ITn-2-ITn-1) \\ & *WTn-22*RA/2+(ITn-1-ITn)WTn-23*RA/2 \end{aligned} \quad (8)$$

QRWn : n시 동측벽(RW) 열류량(kcal)

RSTn : n시 동측벽(RW) 상당외기온(°C)

$$RSTn = OTn + \frac{ABR \times RINSON}{20}$$

OTn : n시 외기온(°C)

ABR : 외표면 일사흡수율

RINSON : n시의 외벽에 도달한 수직면일사량(kcal)

ITn : n시 자연실온(°C)

WTn : n시 동측벽(RW) 관류응답계수

RA : 동측벽(RW)의 벽면적(m²)

3.2 자연실온 산정이론식

식(8)에 의한 각 부위별 열류량과 실온에 영향을 미치는 변수들을 고려하여 실온산정식을 유도하면 다음과 같다.

$$ITn = ITn-1 - \frac{QTn + X}{IMC + (Y + Z)} \quad (9)$$

ITn : n시의 자연실온(°C)

QTn : TAP에 의한 취득열량, 창에 의한 취득 손실열량, 내부발생열량, 침기·환기에 의한 손실열량을 고려한 n시의 열류량(kcal)

$$QTn = QTAPn + QRWWn + QFWWn + QLWWn + QBWWn + QINTn - QINFn - QWLn - QVENTn$$

$$X = QRWn + QFWn + QLWn + QBWn + QFn + QBn$$

IMC : 내부 열저장용량의 50% (kcal/°C)

$$Y = 0.24 * 1.2 * 1.005 * W * D * H$$

$$Z = 0.5 * \{ WT1(RA + FA + LA + BA) + (CT1 * CA) + (FT1 * FA) \}$$

RA, FA, LA, BA, CA : 부위별 면적(m²)

WT, CT, FT : 부위별 관류응답계수

3.3 시간별 난방부하량 산정이론식

전술한 시간별 자연실온(ITn)을 설계기준온도(=18°C)로 상승시켜 유지하는 데 필요한 시간별 난방부하량(H-QHEATn)은 다음과 같다.

$$H-QHEATn = UH * (18 - ITn) \quad (10)$$

여기서,

$$UH = IMC + (Y + Z)$$

$$= IMC + (0.24 * 1.2 * 1.005 * W * D * H) + 0.5 * \{ WT1 (RA + FA + LA + BA) + (CT1 * CA) + (FT1 * FA) \} \quad (11)$$

일별 난방부하량 (D-QHEAT) 은

$$D-QHEAT = \sum_n H-QHEAT(n) \quad (kcal) \quad (12)$$

월별 난방부하량 (M-QHEAT)

$$M-QHEAT = \sum_n D-QHEAT(n) \quad (kcal) \quad (13)$$

4. 컴퓨터시뮬레이션 평가모델과 프로그래밍

4.1 평가모델의 개요

건물에 대한 평가모델은 그림 2, 그림 3 및 그림 4와 같고, TAP에 대한 평가모델과 개요는 그림 5와 같다.

- * 건물평가모델 개요
- 위 치 : 서울
- 방 위 : 정 남
- 거주인원 : 4 인

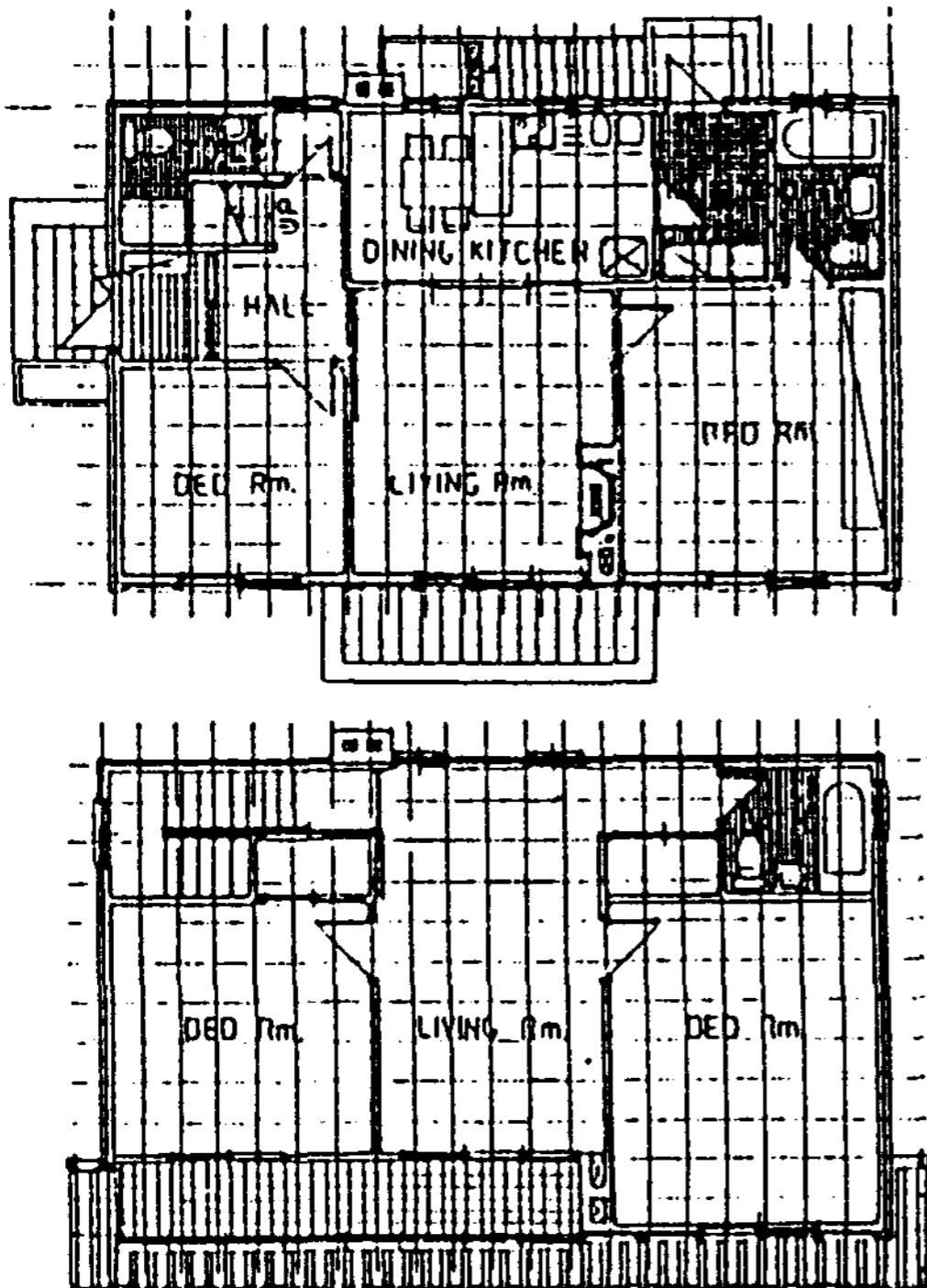


그림 2 1,2층 평면도

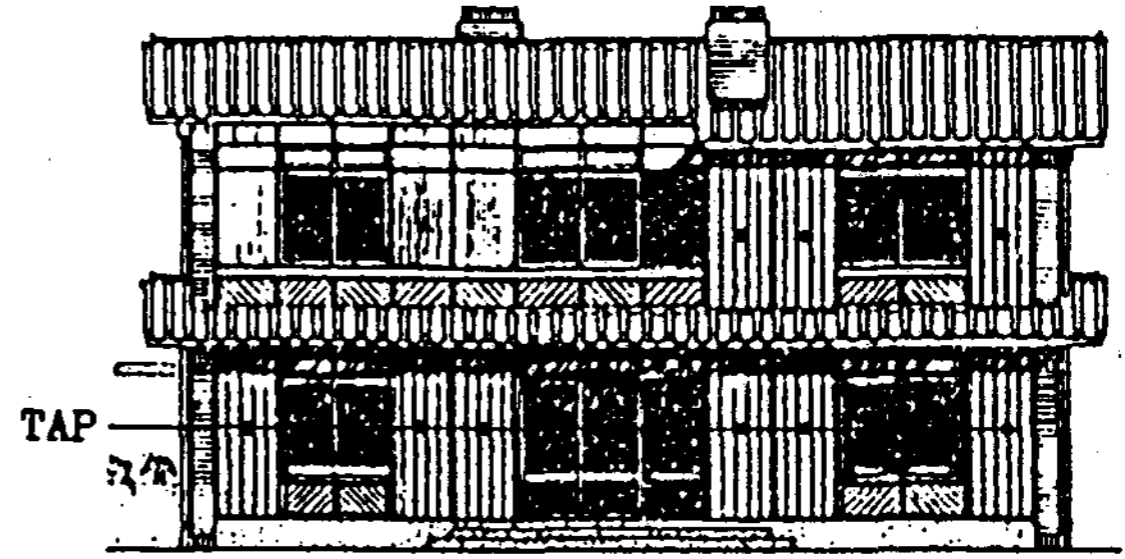


그림 3 입면도

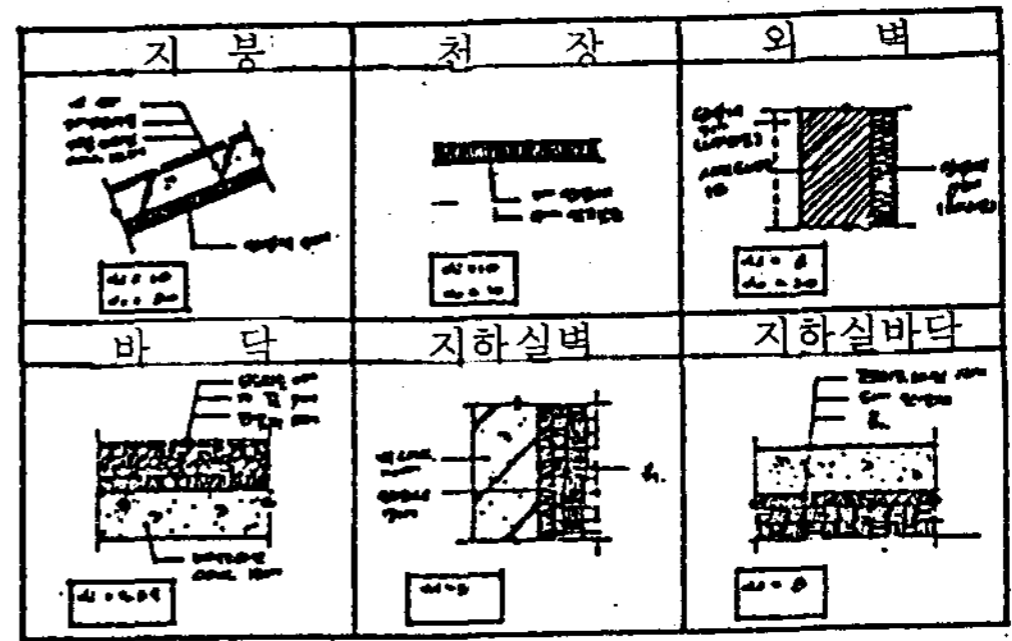


그림 4 부위별 단면도

- * TAP의 개요
- 크 기 : 0.9m * 2.1m
- 집열판형태 : Rib 형
- 유효두께 : 5 cm
- 열효율 : 43 %

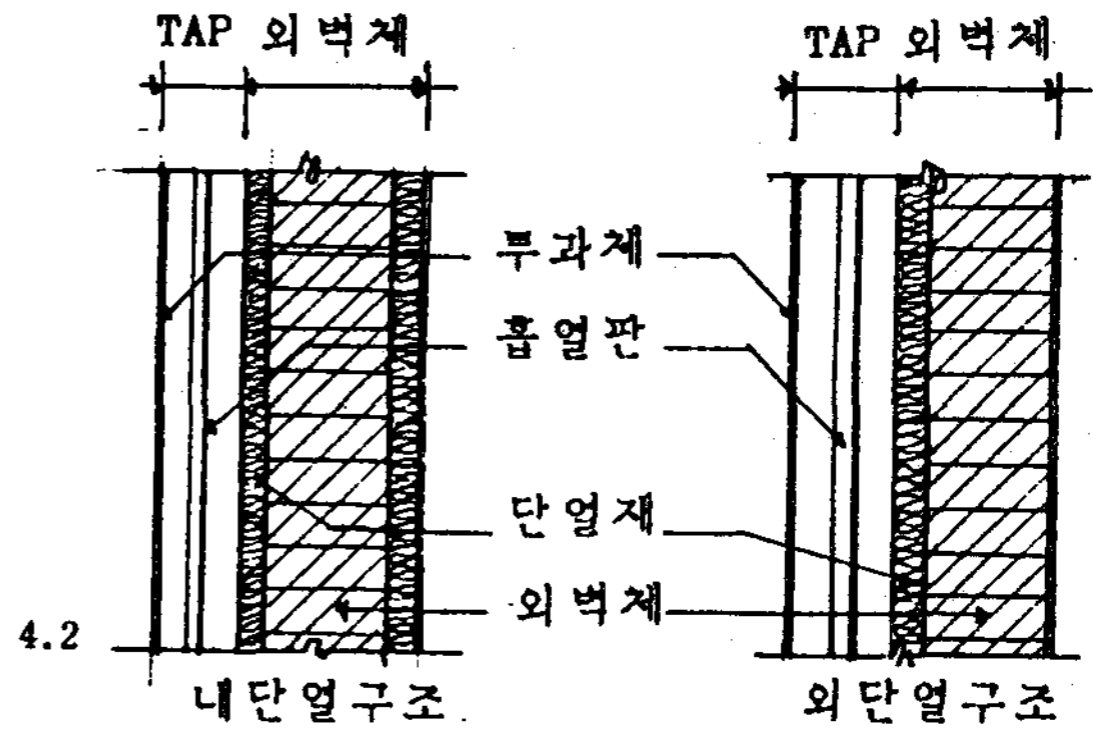


그림 5 TAP의 개요

4.2 평가프로그램

본 연구에서 개발한 열부하산정 프로그램은 캐나다인 Stephenson-Mitalas에 의해 개발된 응답

계수이론을 기초로 Personal Computer 로도 사용할 수 있도록 구성되어 있는데 단계별 주요내용은 다음과 같다.

- [제1단계] 부위별 응답 및 응답계수해석
- [제2단계] 건물의 디자인요소, TAP에 의한 시간별 일사량
- [제3단계] 열부하산정 - 외기조건, 건물사용조건

5. 단열구조별 열성능 비교

5.1 시간별 자연실온

내단열구조에서의 자연실온일교차는 TAP을 적용, 비적용할 경우 각각 16.7°C , 12.5°C 외단열구조에 의한 자연실온 일교차는 각각 3.7°C , 2.7°C 로 나타났다.

내단열구조에서의 평균자연실온은 TAP을 적용 비적용할 경우 14.9°C , 10.4°C , 외단열구조에 의한 평균자연실온은 각각 15.5°C , 10.9°C 로 나타났다.

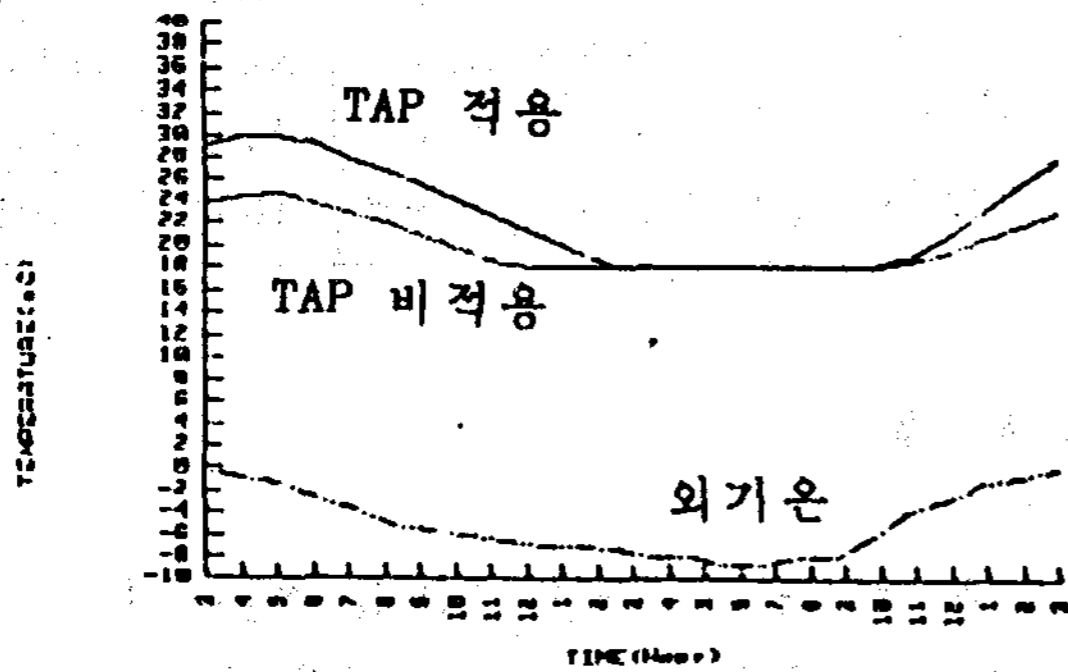


그림 6 내단열 구조에서의 TAP적용에 따른 자연실온 비교

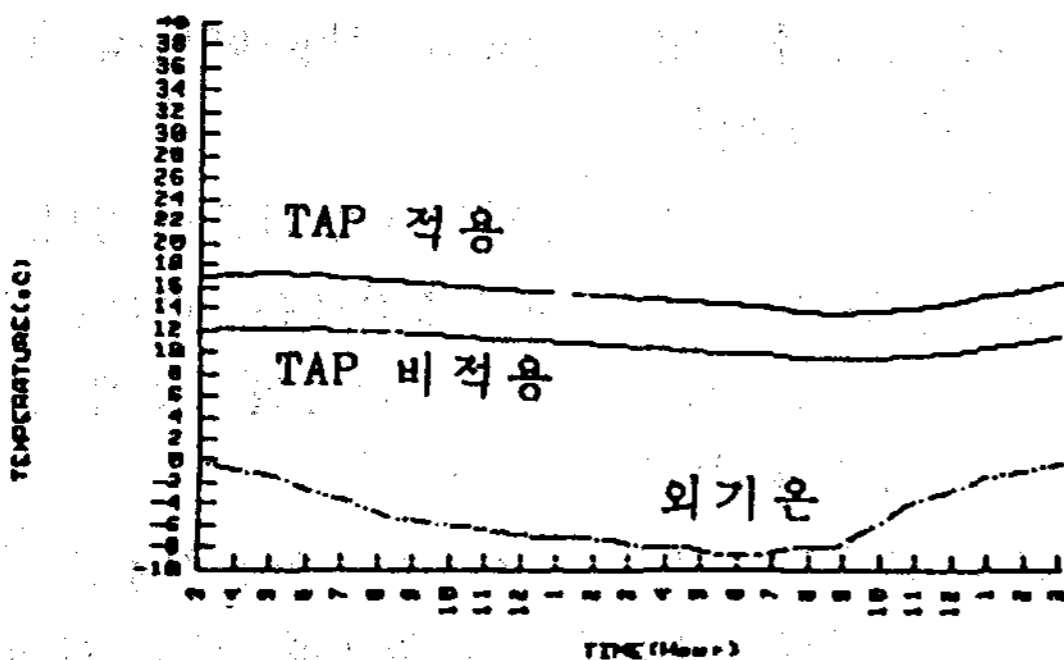


그림 7 외단열구조에서의 TAP적용에 따른 자연실온 비교

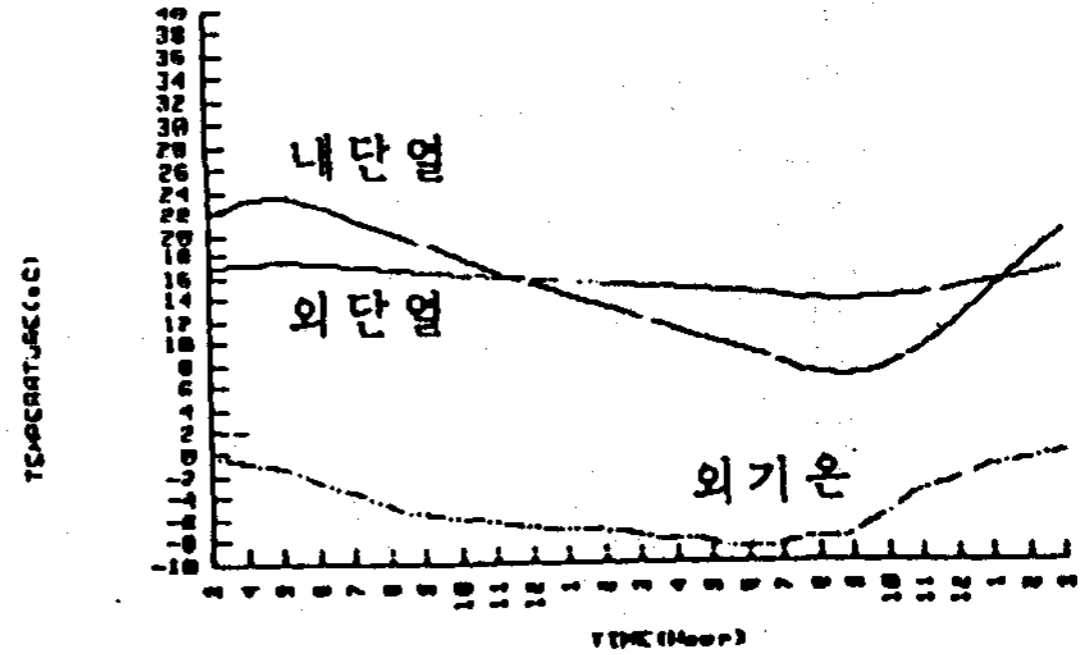


그림 8 TAP을 적용한 건물의 단열구조별 자연실온 비교

5.2 시간별 난방실온

연속난방을 할 경우 내단열구조에서의 난방실온차는 TAP을 적용, 비적용했을 경우 각각 12.1°C , 6.6°C , 외단열구조에서의 난방실온 일교차는 각각 3.1°C , 1.7°C 로 나타났다.

그리고, 내단열구조에서의 평균난방실온은 TAP을 적용, 비적용했을 경우 각각 22.7°C , 20.1°C 외단열구조에서의 평균난방실온은 각각 19.4°C , 18.6°C 로 나타났다.

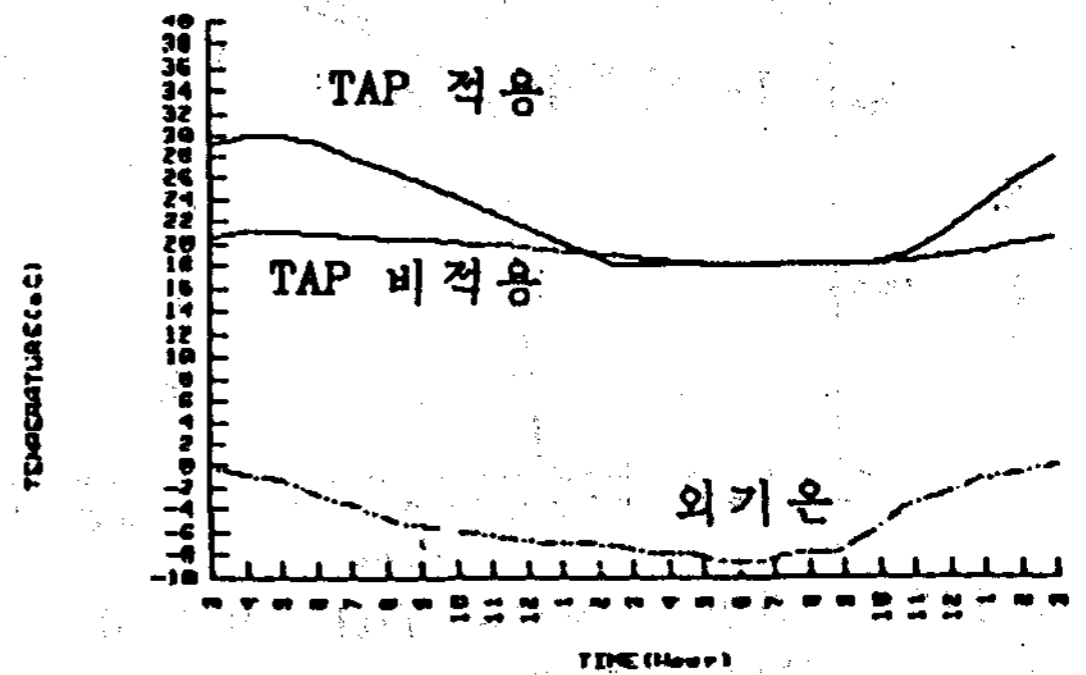


그림 9 내단열구조에서의 TAP적용에 따른 난방실온 비교

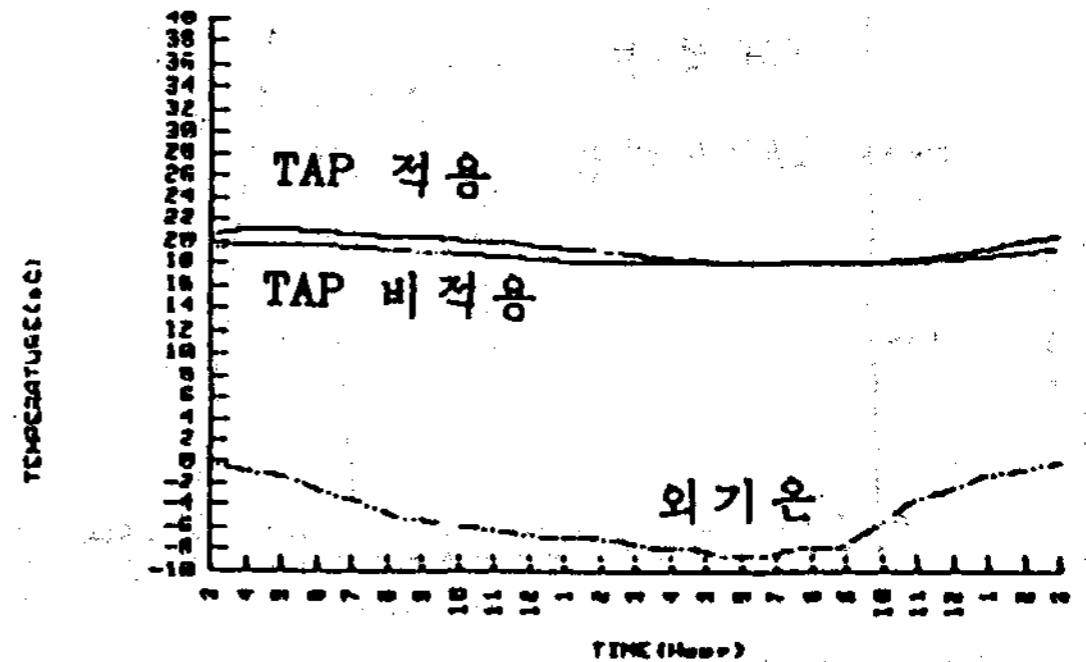


그림 10 외단열구조에서의 TAP적용에 따른 난방실온 비교

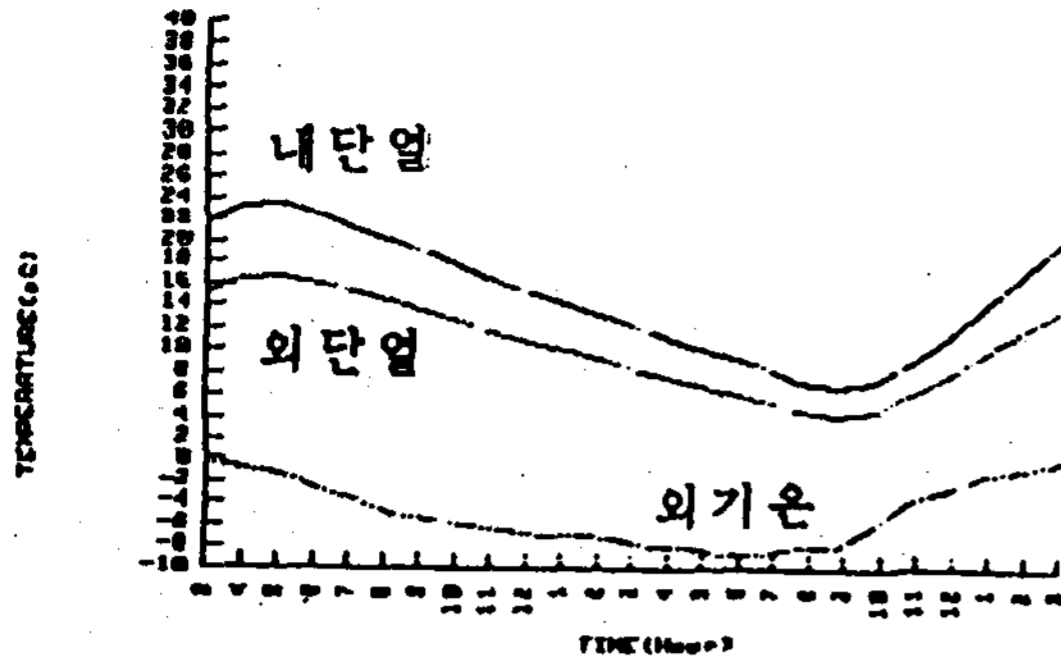


그림 11 TAP을 적용한 건물의 단열구조별 난방 실온 비교

5.3 시간별 난방부하량

연속난방을 할 경우 내단열구조에서의 난방시간은 TAP적용, 비적용했을 경우 각각 7시간, 10시간, 외단열구조에서는 각각 4시간, 9시간으로 나타났다.

그리고, 내단열구조에서의 난방부하량은 TAP 적용, 비적용했을 경우 각각 472000kcal, 662000

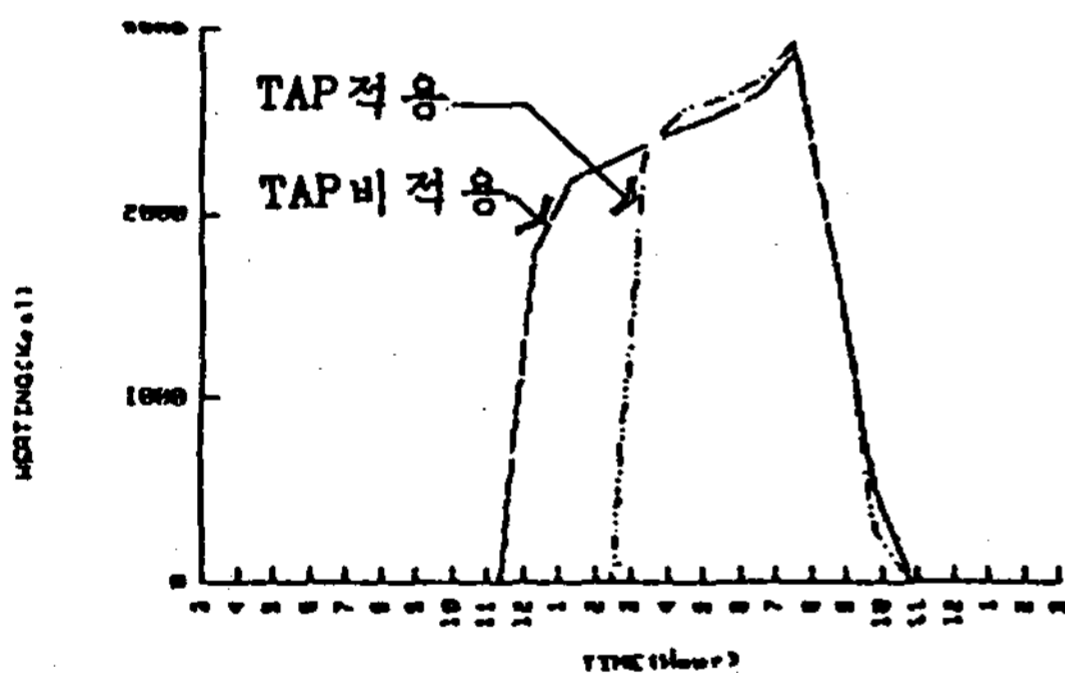


그림 12 내단열구조에서의 TAP적용에 따른 난방부하량 비교

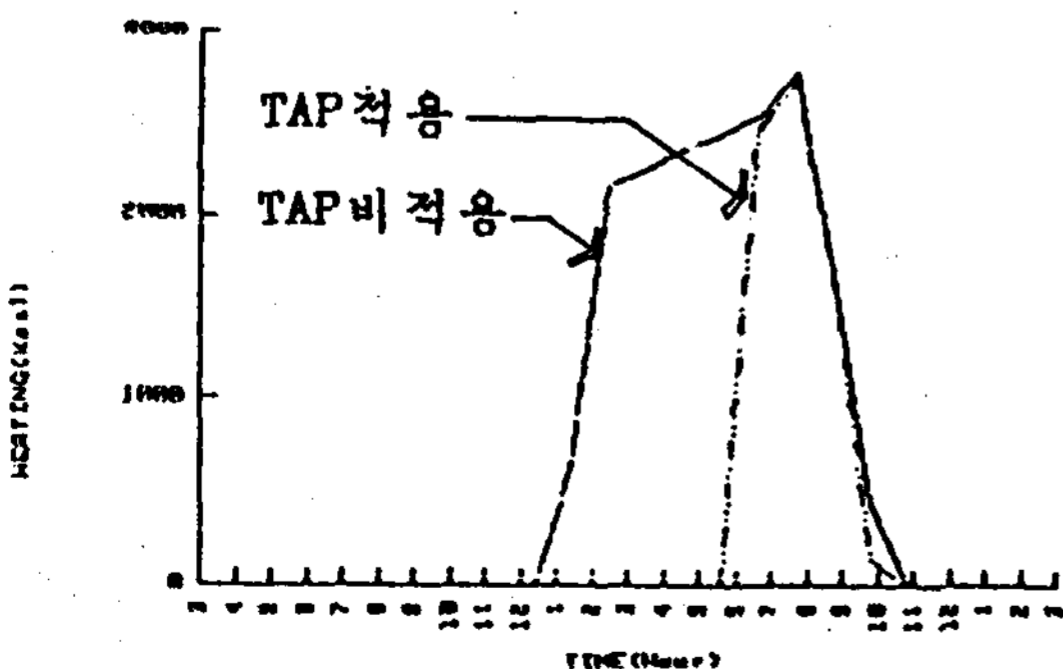


그림 13 외단열구조에서의 TAP적용에 따른 난방부하량 비교

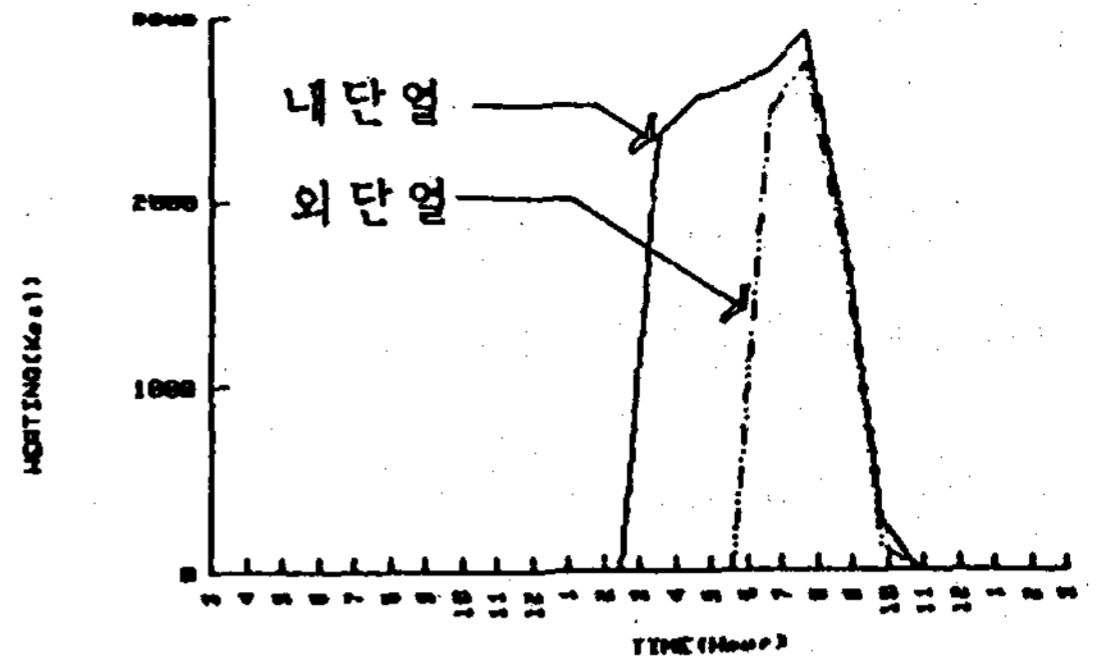


그림 14 TAP을 적용한 건물의 단열구조별 난방 부하량 비교

kcal 이고, 외단열구조에서는 각각 217000kcal 537000kcal 으로 나타났다.(그림 12,13,14)

이상의 내-외단열구조에 따른 연구 결과를 구분하여 정리하면 다음 표1과 같다.

표1 내-외단열 구조별, TAP 적용-비적용비교

연구결과항목	내 단 열		외 단 열	
	비적용	적 용	비적용	적 용
자연실온일교차	12.5℃	16.7℃	2.7℃	3.7℃
난방실온일교차	6.6℃	12.1℃	1.7℃	3.1℃
난 방 시 간	10hr	7hr	9hr	4hr
1월난방부하량	662000 kcal	472000 kcal	537000 kcal	217000 kcal
에너지절감대비	123%	79%	100%	40%

6. 결 론

본 연구에서 수행한 TAP을 적용한 건물의 단열구조 종류에 따른 TAP의 열적 성능은 내단열 구조에 비해 외단열 구조에서 양호하다는 것이 응답 계수를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인 되었다.

이러한 연구결과를 요약해보면 다음과 같다.

- [1] TAP에 의한 에너지 절감율은 내단열구조에서는 28.6% 이고, 외단열구조에서는 59.5%이다.
- [2] TAP의 열성능은 외단열구조에 적용할 경우 내단열구조에 비해 약 2배 정도 향상 된다.

REFERENCES

1. 이경희, 건축환경계획, 문운당, 1986.
2. 이경희의 연구보고서, 건물의 부위별 성능 및 설비기준(안)-1, 한국동력자원연구소, 1986.
3. 한국태양에너지학회지, vol.4 No.2, 한국태양에너지학회, 1985.11.
4. '86 춘계 한국태양에너지학회(초록집), 한국태양에너지학회, 1985.5
5. 中村泰人의, 新建築學大系, vol.10, 環境物理, 彰國社, 1984.
6. 田中俊六의, 最新建築環境工學, 井上書院, 1986.
7. 中原信生의, ビル・建築設備の省エネルギー, 財團法人 エネルギーセンター, 1983.
8. ASHRAE FUNDAMENTALS, 1985.
9. T. Kusuda, Thermal Response Factors for Multilayer Structures of Various Heat Systems, ASHRAE Transaction vol. 75, Part 1, 1969, p. 246.
10. G.P. Mitalas and D.G. Stephenson, Room Thermal Response Factors ASHRAE Transaction, vol. 73, Part 2, 1967, p. 3-2-1.