

# TTC법을 이용한 축열체의 설계방법에 관한 연구

- A Study on Thermal Mass Design based on TTC Method -

\* 송국섭, \*\* 이관호, \*\*\* 이언구, \*\*\*\* 이명호

(요 약)

본 연구의 목적은 건축물의 초기 설계시 실의 용도에 따른 Time\_Lag과 진폭 감쇄율에 대한 디자인 목표를 구현하기 위한 축열체의 설계 방법을 제시하는 것이다. 연구 방법으로는 TTC법을 컴퓨터 프로그램으로 작성하여 Simulation하였고 실험 실측치와 비교하여 TTC법의 타당성을 규명하였다.

연구의 결과는 다음과 같다. Simulation에 필요한 데이터는 최소 7일 이상이 필요하며 외부의 일총각은 건축물의 축열체에 일주일 정도 저장되는 것으로 판단 되었다. 열환경 설계 변수로 외피 디자인 뿐만 아니라 이용 부위의 축열 성능도 영향을 미침으로 간막이 벽과 Zonning, 가구의 설치 등이 고려 되어야 할 것으로 사료된다.

## 1. 머리말

한국에서 건축물의 열류 해석 방법은 주로 에너지 소비를 예측하고 절약하는 방법에 관한 것으로 경제성 위주로 취급되었다. 건축물의 초기 설계시 실내 환경을 예측하고 건물 구조체를 Modeling하는 방법에 관한 연구는 미진한 상태이다. 특히 자연형 태양열 방식은 열을 건물 구조체인 축열체에 저장함으로써 구조체의 설계 결과에 따라 실내 열환경은 큰 영향을 받게된다. 정상상태에 의한 열류 해석은 에너지의 소비량을 예측하고 절약하는 방법을 규명하는 데에는 큰 문제가 없었으나 자연 실온의 예측과 구조체의 축열능력에 관한 해석은 어려웠다. 본 연구에서는 비정상 상태의 열류 해석 방법을 이용하여 건축물의 구조체에 대한 설계방법을 제시하는 것으로, 연구의 목적과 방법은 다음과 같다.

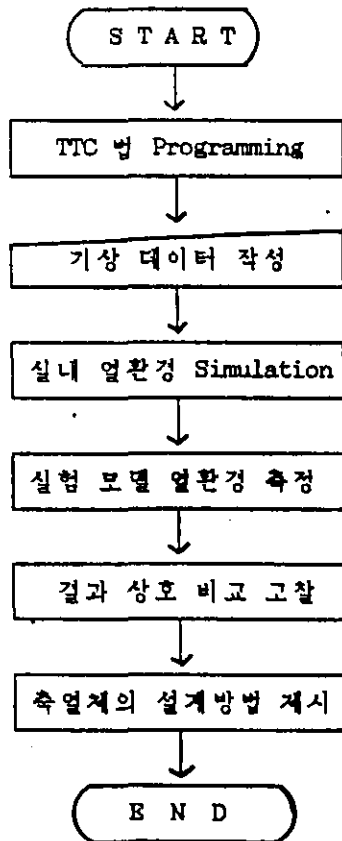
\*부전 공전 부교수, \*\* 중앙대 대학원, \*\*\* 중앙대 건축과 부교수, \*\*\*\* 중앙대 건축과 교수

### 1-1 연구 목적

본 연구의 목적은 열환경을 Simulation 할 수 있는 프로그램을 제작하여 건축물의 초기 설계시에 이용할 수 있도록 하고, 자연 실온을 예측하여 실의 용도에 따른 Time Lag과 진폭감쇄율을 조절하는 축열체의 설계방법을 제시하는 것이다.

### 1-2 연구 방법

연구 방법은 동적 열류 해석 방법중 TTC (열시간 상수) 법을 컴퓨터 프로그램으로 작성하여 Simulation하고 실험 모델을 통한 실험 실측을 한후 상호 결과를 비교하여 건축물의 축열체 설계 방법을 추구하는 것이다 본 연구의 흐름도는 다음과 같다.



<그림 1> 연구의 흐름도

## 2. 열시간 상수 (TTC ; Thermal Time Constant)

열시간 상수 (TTC)에 관한 개념은 Bruckmayer에 의하여 처음 제안되었고 그 후 Raychaudhury와 Chaudhury 에 의하여 발전되었다. 일반 건축물의 열류해석과 태양열 시스템의 열류해석이 가능한것이 TTC법의 특징이라고할 수 있다. TTC는 건축물의 벽체와 같은 외피에 시간당의 외기온도에 비하여 내부온도가 1°C 상승함에 따라 1 M<sup>2</sup>의 표면적에 축열되는 열량을 뜻한다. 열시간 상수는 건물전체의 열응답을 나타내는 열물리적 매개변수 이다. 열시간 상수가 작으면 온도의 단위 변화를 유발하는데 필요한 열의 유동은 작아지고 커지면 온도의 단위 변화를 유발하는데 필요한 열 유동은 커진다. 수학적으로 TTC는 Q/U의 비율로 각각의 다층벽을 해석한다. Q는 축열량이고 U는 열 전도율이다.

$$TTC = Q/U = \sum Q_i/U \text{ ----- (1)}$$

$$Q_1/U = ( R_{so} + l_1/2k_1 ) ( l_{pc} )_1$$

$$Q_2/U = ( R_{so} + l_1/k_1 + l_2/2k_2 ) ( l_{pc} )_2$$

$$Q_i/U = ( R_{so} + l_1/k_1 + \dots + l_i/2k_i ) ( l_{pc} )_i$$

R<sub>so</sub> : 외표면의 열전달율

l<sub>i</sub> : i 층의 두께

k<sub>i</sub> : i 층의 열전도율

(l<sub>pc</sub>)<sub>i</sub> : i 층의 열용량

p : 밀도

c : 비열

Time Lag은 다음과 같다.

$$T_{24} = 1.18 + \frac{2\pi}{24} \frac{Q}{U} \text{ ----- (2)}$$

T<sub>24</sub> : Time Lag

진폭 감쇄율은 다음과 같다.

$$D = \frac{T_{oa} - T_{ia}}{T_{oa}} \quad \text{또는} \quad D = \frac{T_{sol} - T_{ia}}{T_{sol}} \text{ ----- (3)}$$

여기서

D : 진폭 감쇄율

Toa : 외기온 피크치

Tia : 실내 기온 피크치

Tsol: 상당 외기온 피크치

TTC 개념은 그후 Raychaudhury, Chaudhury, Waris, Pratt, Ball 등에 의하여 점점 발전어 실내부의 열 MASS를 포함한 총 열시간 상수는 다음과 같이 표현된다.

$$TTC = TTC_{wall} + Q_i \text{ mass} (R_{wall} + R_{si} + 1/4 R_i \text{ mass}) \text{ ----- (4)}$$

여기서 내부 MASS의 열용량은 다음과 같다.

$$Q_i \text{ mass} = 1/2 (\text{외피 단위 면적당 내부 MASS의 무게}) * (\text{비열})$$

R wall = 외부 공기로 부터 실내부 표면 까지의 열저항

Rsi = 내부 표면의 열저항

Ri mass = 실내 MASS의 열저항

또한 건축물의 구성은 벽체와 창문, 출입문 등으로 구성되어 있으므로 이를 고려한 전체 구조체의 총 열시간 상수는 다음과 같다.

$$TTTCB = \frac{\sum_k A_k (TTTC_k)}{\sum_k A_k} + Q_i \text{ mass} \left( \frac{\sum_k A_k R_k}{\sum_k A_k} + R_{si} + \frac{1}{4} R_i \text{ mass} \right) \text{ ----- (5)}$$

여기서

k = 각 벽체의 번호

Ak = 각 벽체의 표면적

$\sum_k A_k$  = 각 벽체의 표면적 합계

환기를 고려한 TTC는 Hoffman에 의해 다음과 같이 정의되었다.

$$TTC (\text{환기}) = \frac{(TTCB) U_t}{U_t + N (\rho c)_{\text{air}} \frac{V}{A_k}} \quad (6)$$

$U_t$  = 실내에서 실외 공기까지의 열관류율

$N$  = 환기 회수

$(\rho c)_{\text{air}}$  = 공기의 열용량

$V$  = 실내 용적

### 3. 자연실온의 예측

#### 3-1 외피 온도

건축물의 외피온도에 영향을 미치는 요소는 외기온, 일사, 수증기 분압 등이 있다. 시간  $i$  에서 벽체  $k$  표면의 온도는 다음과 같이 계산된다.

$$t(i) = t_{oa}(i) + \sum_{j=i_0}^i \frac{1}{\frac{1}{R_{os}} + \frac{1}{R_{si}} \exp\left(\frac{i-j}{TTC_k}\right)} * (\alpha I_{sk}(j) + \sigma T_{da}(j) (a + b PW^{\frac{1}{2}}(j) - FE)) \quad (7)$$

$$R_s = \frac{TTC_k}{\sum_n \ln \rho_n c_n}$$

$TTC_k$  : Bruckmayer에 의해 제안된  $k$  구조체의 열시간 상수

$\sum_n \ln \rho_n c_n$  : 구조체의 외기로부터  $n$  층의 구조체까지  
외피 면적당 열용량

$t_a$  : 외기온 (°C)

$T_a$  :  $t_a + 273$  (외기 절대온도 Kelvin)

$P_w$  : 공기의 수증기 분압 (mm Hg)

$e$  : 표면의 방사율

$F$  : 교정 인자

$$F = \left( 1 + \frac{t_s - t_o}{t_{oa}} \right)^4$$

$j$  : 시간

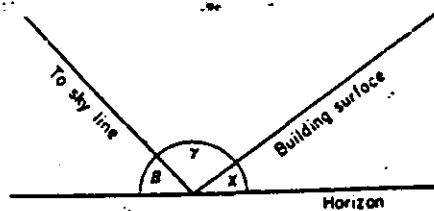
$i_o, j$  : 적분의 범위 (시간)

이와 같은 식에서  $R_s$ 와  $R_{so}$ ,  $TTC_k$ 는 건축 구조물의 외피 열전달과, 건물 재료의 열 물리적 특성을 나타내며  $\alpha$ 는 원칙적으로 외부 색채에 따르는 일사 흡수율을 나타낸다.  $a$ 와  $b$ 는 천공에 대한 건물의 방향에 따라 결정되는 기하학적 계수이다. Holdend에 따르면 다음과 같다.

$$a = 0.32 (1 - \cos \gamma) - 0.0297 (\gamma \cos \alpha + \sin \gamma \cos \beta)$$

$$b = 0.0323 (1 - \cos \gamma) \text{ , [mmHg]}$$

여기서  $\alpha$  Isk( $j$ ) 항은 시간  $j$  에서 표면의 일사의 흡수량을 나타낸다. 다음 그림은 이와같은  $a$  와  $b$  의 계수를 구할 때 적용되는  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$  의 각도이다.



<그림 2> 표면 각도의 정의

천공과 표면 사이에 장파 복사 열교환은 Holdend의 공식으로 나타낼 수

있다.

$$\sigma_{Toa} = 4 (a + b Pw^{\frac{1}{2}}),$$

또 표면으로부터 외계로 방사되는 장파장 복사는 다음의 Stefan Boltzmann공식으로 나타낸다.

$$\sigma_{EF Toa}$$

### 3-2 자연실온

시간 i에서 가공의 내부층 온도 변화 tik는 시간 j (io와 i사이의) 에서 외부 표면온도 변화  $\Delta t(j)_{sk}$ 의 결과로써, 내부 공간에 도달하는 각각의 열전달 경로 k로 계산된다. 이와같은 온도 변화값은 임의의 시간 i에서 다음의 식으로 계산될수 있다.

$$\Delta tik = \sum_{j=io}^i \Delta t(j)_{sk} (1 - \exp(-\frac{i-j}{TICK})) \dots\dots\dots (8)$$

이때, 임의 시간 i에서 내표면 온도 tik는 다음과 같다.

$$tik = t(io)_{sk} + \sum_{j=io}^i \Delta t(j)_{sk} (1 - \exp(-\frac{i-j}{TICK})) \dots\dots\dots (9)$$

여기서 i는 계산 시간이고, io는 계산을 시작한 시간이다. 또한 내부 공기 온도 계산을 위한 다음의 방정식을 이용한다.

$$tio = \frac{\sum_k (\frac{Sk}{Rk} tik)}{\sum_k (\frac{Sk}{Rk})} \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $S_k$  : 열전달 경로인  $k$ 의 내피의 면적

$R_k$  :  $k$  벽체의  $R$ 값

#### 4. 컴퓨터 Programming

##### 4-1 System

TTC법에 의한 열류해석은 수계산으로는 처리할 수 없기 때문에 이를 컴퓨터 프로그램으로 작성하여 계산하도록 하였다. 본연구에 사용된 컴퓨터는 다음과 같다.

- 1) 기종 : IBM - XT Personal Computer ( CPU : 8088 )
- 2) OS : MS - DOS 3.10
- 3) 사용언어 : Quick Basic

##### 4-2 Flow-Chart

본 연구에 사용된 TTC는 열환경에 영향을 주는 모든 변수의 값을 고려한 종합 TTC의 값을 사용하였다. 또한 온도변화 예측 부분에서는 입력자료로 일사흡수율, 표면방사율, 태양의 고도, 벽체의 각도, 외기온, 일사, 수증기분압 등이 있고 출력인자로는 수열면의 표면온도, 실내온도 등이 있다.

이러한 프로그램의 Flow-Chart는 (그림3)과 같다.

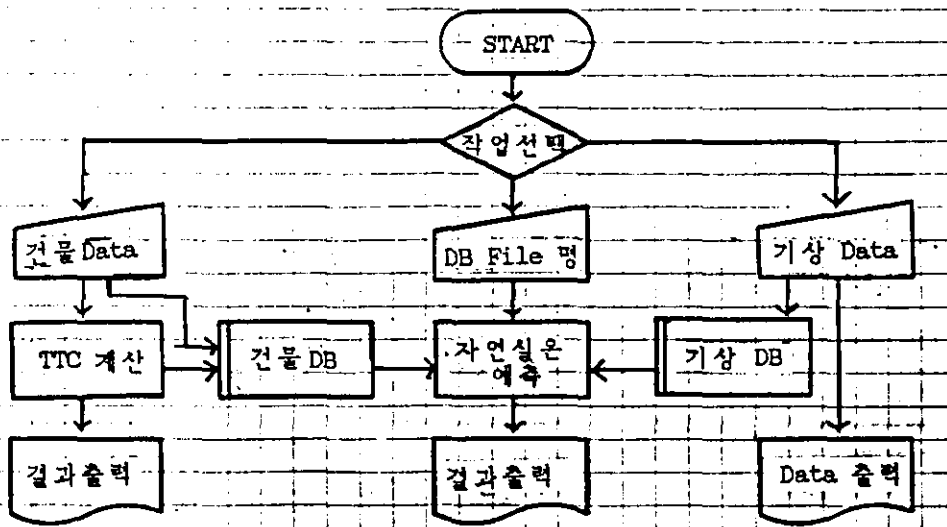


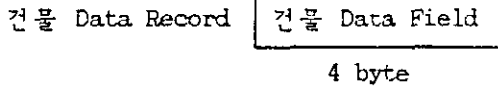
그림3 Flow-Chart



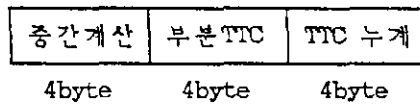
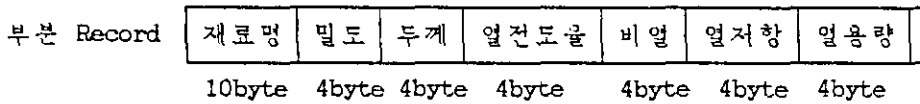
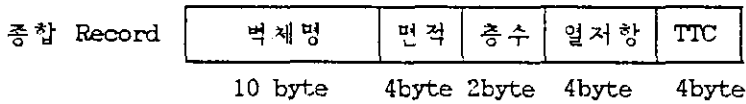
### 4-3 데이터 파일의 설계

입력받은 자료를 저장하는 Data File은 다음과 같이 설계되었다.

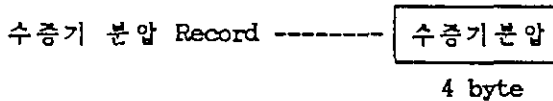
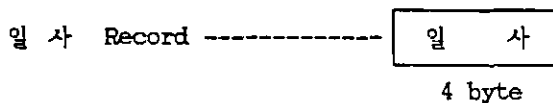
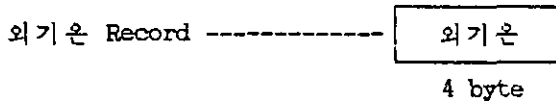
1) 건물 데이터 ---- 1개의 파일로 설계되었다.



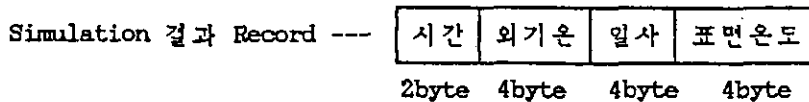
2) TTC 데이터 ---- 2개의 파일로 설계되었다.



3) 기상 데이터 ----- 3개의 파일로 설계되었다.



4) Simulation 결과 데이터 --- 1개의 파일로 설계 되었다.



### 5. 실험 모델을 이용한 실험실측

모델을 통한 실험은 TTC법의 적합성을 증명하기 위한 것으로 다음과 같이 진행되었다.

- 1) 실험 모델의 구성은 외부 축열벽과 내부 축열체를 설치한 모델과 외부 축열벽만을 설치한 2종류의 모델로 실험하였다.
- 2) 실험 기간 : 1988년 3월과 1989년 1월에 2차례 실험하였다.
- 3) 실험 장소 : 서울특별시 동작구 흑석동 중앙대학교 공과대학 옥상에서 실험하였다.

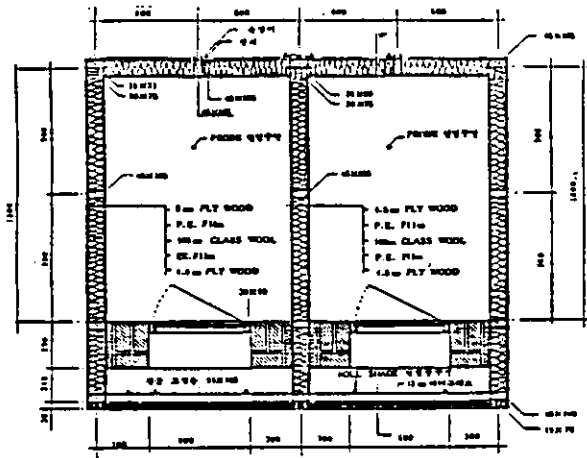
#### 5-1 실험 모델

실험 모델의 기본적인 열특성은 다음과 같다.

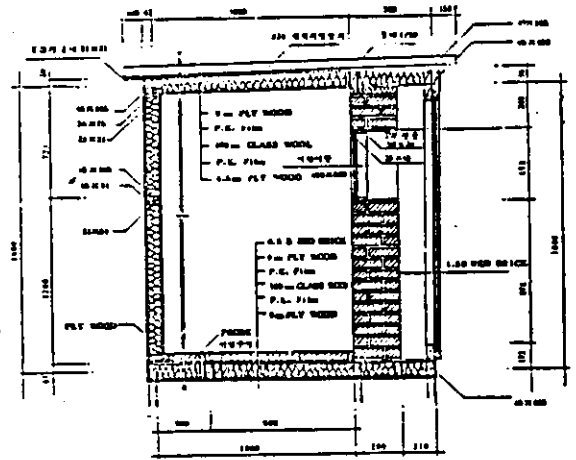
각 부위	재 료	열저항(R) m h C/Kcal	열관류율(K) Kcal/m h C
남면유리 (주간)	3 + 6 + 3 이중유리	0.26	3.846
벽, 천정, 바닥	내표면 P.E.film 4.5mm 내부합판(조건) 100mmGlass Wool 9mm 외부합판(습윤) 외표면	0.139 0.001 0.035 2.941 0.064 0.035	0.311

<그림 4> 스케일 모델의 각 부위별 재료, 열저항 및 열관류율 값

1) 내부 축열체가 설치된 실험모델

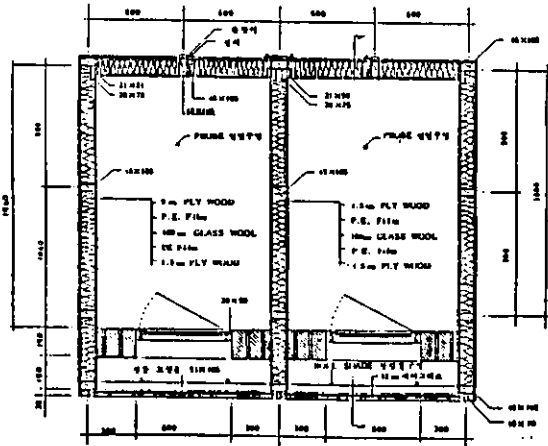


<그림 5> 평 면 도

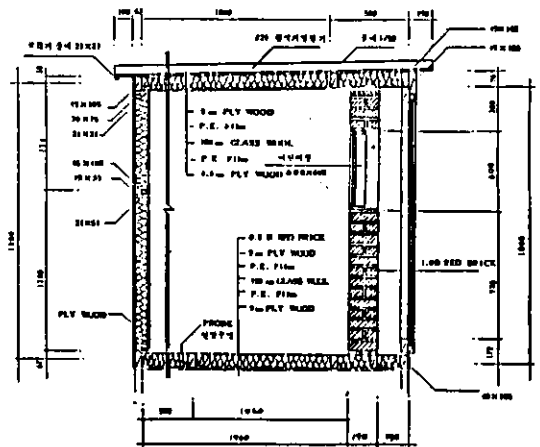


<그림 6> 단 면 도

2) 내부 축열체가 없는 실험모델



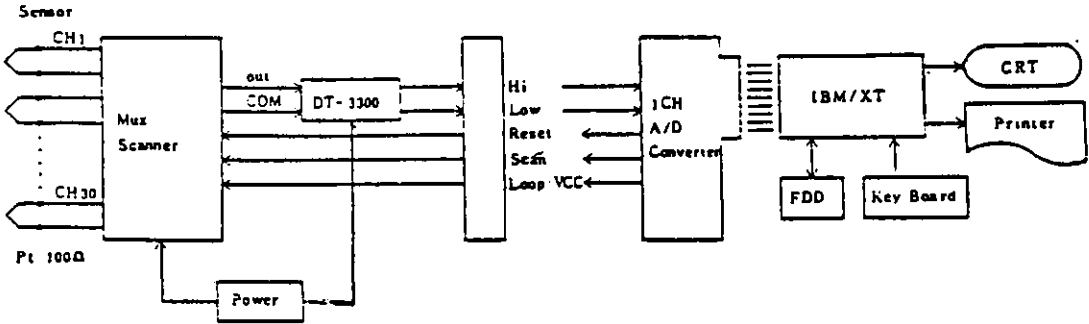
<그림 7> 평 면 도



<그림 8> 단 면 도

### 5-2 실험 장치

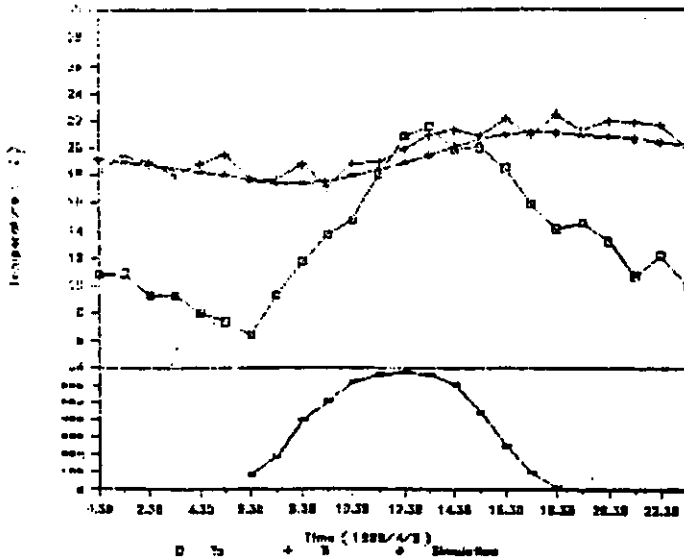
본 연구에 사용된 실험장치는 A/D D/A Converter를 이용한 Data수거 장치를 이용하였다. 기존의 Data Logger에 비하여 정확도는 약간 떨어지나(오차 범위  $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ) Simulation 프로그램과 Data Base를 상호 교환할 수 있고 CAD화 하는데에 유리한 점이 많은것으로 생각된다.



<그림 9> 데이터 수거 System의 Block Diagram

### 5-3 실험 결과

두차례에 걸친 실험과 Simulation의 결과는 다음 <그림 10> <그림 11>과 같다.



(그림 10) 내부 출열체가 설치된 모델의 실험 결과

DAY	TIME	OTDRTEM	Surface		
			R-Value	INSOL	SURF1
					1.98
					0.55
7	0	1.80	0.00	2.63	5.88
7	1	1.80	0.00	2.61	5.24
7	2	1.80	0.00	2.60	4.72
7	3	1.60	0.00	2.41	4.30
7	4	1.50	0.00	2.30	3.93
7	5	0.90	0.00	1.75	3.60
7	6	0.40	0.00	1.36	3.24
7	7	0.70	0.00	1.71	2.87
7	8	-0.10	16.73	1.50	2.64
7	9	0.40	83.65	3.79	2.41
7	10	2.30	210.32	8.91	2.68
7	11	4.30	289.19	12.89	3.92
7	12	6.70	279.63	14.88	5.69
7	13	7.10	320.26	16.40	7.51
7	14	7.40	310.70	16.52	9.27
7	15	6.60	253.34	14.38	10.71
7	16	6.60	157.74	11.87	11.43
7	17	5.30	33.46	7.38	11.52
7	18	4.40	0.00	5.46	10.70
7	19	3.00	0.00	4.58	9.66
7	20	3.50	0.00	5.50	8.66
7	21	4.60	0.00	4.49	8.03
7	22	3.60	0.00	4.44	7.33
7	23	3.60	0.00	4.39	6.76

(그림 11) 내부 출열체가 없는 모델의 실험 결과

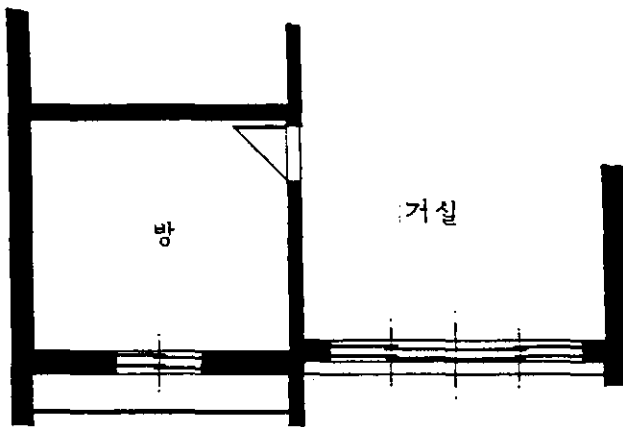
## 6. 결과에 대한 고찰

축열체의 TTC값에 따른 건축물의 자연실온과 Time-Lag 진폭감쇄율에 대하여 컴퓨터 프로그램에 의한 Simulation과 실험 모델을 통한 실측으로 상호 결과를 비교하여 다음과 같은 점을 알 수 있었다.

- 1) TTC법에 의한 Simulation은 1주일간의 데이터를 입력하여 실내온도 변화를 예측하였는데 7일째부터 실험 결과와 유사하였다. 따라서 Simulation에 필요한 데이터는 최소 7일 이상 필요하다는 것을 알 수 있다.
- 2) Simulation 결과와 실험값과의 오차범위는 최대  $1.5^{\circ}\text{C}$ 미만이었다. 오차의 원인은 Scale Model의 물성치를 입력함에 있어서 각 재료의 일반적인 값을 참고자료를 이용하여 입력하였고  $R_{so}$ 값을 입력할 때 바람에 의한 대류 열전달 값을 동적으로 처리하지 않고 일정한 일반적인 값을 이용하였기 때문이며 데이터를 수거하는 A/D Converter의 오차범위가  $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 이기 때문으로 생각된다. 상기의 문제가 있음에도 불구하고 최대오차 범위가  $1.5^{\circ}\text{C}$ 미만인 것으로 보아 TTC법에 의한 Simulation값은 믿을만한 것으로 생각된다.
- 3) TTC법에 의한 Simulation 결과를 통하여 일사의 영향에 따른 표면온도의 변화는 매우 민감한 반응을 나타내었다. 태양열의 적극적인 이용은 겨울철의 난방 부하를 줄일 수 있으며 일사의 영향이 오후 시간에 실내측에도 도달하는 서측벽의 일사에 대한 고려는 일반 부위의 벽체보다 더욱 세심히 배려하여야 한다는 것이 입증되었다.
- 4) 실내 온도에 영향을 미치는 요소중에서 표면 흡수율을 높이고 방사율을 낮추면 Trombe Wall방식의 System에서 실내온도를 높이는데 결정적인 역할을 한다는 것이 입증되었다.
- 5) Raychaudhury에 의하여 제안된 Time Lag은 실험과 Simulation을 통한 결과와 일치하지 않아서 신중히 재검토 되어야 할 것으로 생각된다.

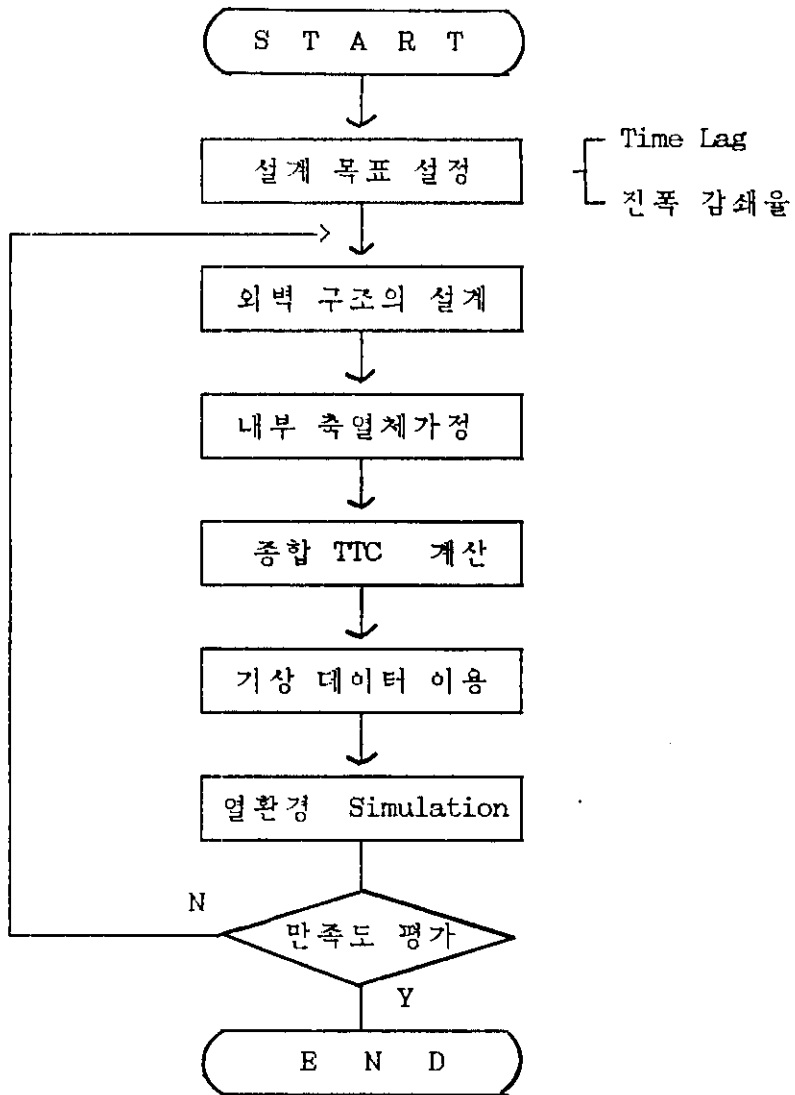
## 7. 축열체의 설계 방법

건축물을 설계할 때 열환경을 고려한 축열체의 모델링은 (Modeling) 정상 상태의 일부 해석으로는 불가능 하였으나 비정상 상태의 방법으로는 실내의 자연 실온을 예측할 수 있고 진폭 감쇄율과 Time Lag을 예측할 수 있기 때문에 열환경 Simulation과 건축물의 Modeling에 매우 편리할 것으로 생각 된다. 본 연구에서는 <그림 12>와 같은 침실을 예로하여 건물외피의 Modeling 방법에 관하여 논술하고자 한다.



<그림 12> 건축물의 Modeling

우선 Design목표로 Time Lag과 진폭 감쇄율을 정한다. 건물 구조체를 설계하고, TTC값을 내부 축열체와 외부 축열벽의 증합한 TTC를 구한다. 표준 기상 데이터 파일을 이용하여 열환경을 Simulation하여 서측벽의 내부 온도와 남측벽의 내부온도를 예측하고 자연 실온을 예측한다. 설계목표에 만족하는지 평가 한다. 불만족할때는 만족할 때까지 반복하여 구조체를 Modeling 한다.



<그림 13> 축열체의 설계 과정



### 3. 결론

본 연구에서는 TTC법을 컴퓨터 프로그램으로 작성하여 Simulation하였고 실험 모델의 실측치와 비교하여 TTC법의 타당성을 증명하였으며 건축물의 축열체를 Modeling 하는 방법을 제시하였다. 본연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) TTC법에 의한 Simulation 결과와 측정실험 결과는 매우 유사하여 오차 범 위는 최대 1.5 C비만이었으므로 건축물의 열류해석 방법중 TTC법은 큰 무리없이 사용할 수 있는 열류해석 방법으로 평가되었다.
- 2) 태양열 시스템의 열류해석은 주로 정상상태에 의존하였으나 비정상 상태에 의한 열류해석 방법을 제시하였고 프로그램으로 작성함으로써 건축설계시 보다 정확한 방법으로 열환경은 Simulation 할 수 있도록 하였고 건축물을 Modeling할 수 있게 하였다.
- 3) 실내 열환경 설계변수로 외피의 디자인에 중점을 두었으나 사용 공간(이용부위)의 축열성능에 관한 항목을 추가 하여야 함이 증명되었다. 즉 칸막이벽, Zonning, 가구의 설치등이 고려되어야 할것으로 사료된다.
- 4) Raychaudhury 에 의해 제안된 Time-Lag은 건축물의 종합적인 변수를 고려하지않고 수열면의 벽체만을 고려하여 결정되었으므로 Time-Lag은 수열면 비수열면의 벽체와 이용 공간의 축열체, 환기 등을 포함한 종합적인 TTC로 평가 되어야할 것이다.

앞으로 열환경 Simulation과 실험 실측 그리고 축열 성능을 고려한 건축물의 설계를 위하여 표준 기상 데이터의 Data Base 구축과 각 건축 재료의 물성치에 대한 Data Basse의 구축이 필요하다고 생각된다.

#### \* 참고 문헌

1. 이 명호, "태양열 시스템 설계 - 자연형 건축 설계", 중앙대학교 건설 대학원, 1984
2. 이 연구, 김광우 역, "건축 환경 과학", 테림 문화사, 1987

3. 이 경희, "건축 환경 계획", 문은당, 1986
4. 한국 과학 재단, "자연형 태양열 시스템을 이용한 건물 에너지 절약 기술에 관한 기초 연구", 1987.
5. 안 태경, "자연형 태양열 직접 획득 방식에서의 야간 단열 구조의 개발 및 열성능에 대한 연구", 중앙 대학교 대학원, 1988
6. 김 동환, "자연형 태양열 트롬웰 방식에서의 야간 단열에 관한 실험적 연구", 중앙 대학교 대학원, 1988
7. 이 관호, "자연형 태양열 시스템의 열성능 분석을 위한 열류해석 방법에 관 고찰", 중앙대학교 대학원, 1988
8. A. W. Pratt, "Heat Transmission in Buildings", John Wiley & Sons Ltd., 1981
9. B. Givoni, "Man Climate & Architecture", Van Nostrand Reinhold Company, 1981
10. P.W.R Muncey, "Heat Transfer Calculations for Buildings", Applied Science Publishers Ltd, 1979