

가장자리를 傾斜지게 만든 슬랩 바닥에 對한 季節別 熱損失量의 計算

T. Kusuda, M. Mizuno, J. W. Bean

— 編輯委員會 —

“本 論文은 1982年 9月 15日 秋季學術講演會에서 發表한 NBSIR-81-2420 內容을 轉載한 것임”

요 약

DOE-2, BLAST AND NBSLD와 같은 광범위한 에너지 해석 프로그램에 의거하여 효과적으로 가장자리를 경사지게 만든 슬랩에서의 열전달 계산을 할 수 있도록 그 바닥에서 일어나는 열전달 계산을 재현하였다.

슬랩 바닥면으로부터의 깊이에 따른 매달의 평균 온도를 만들어내기 위해 Lachenbruch 방법에 근거를 둔 수치해석 과정을 깊이 연구하였다. Lachenbruch 방법으로 얻어진 자료들을 사용하여 슬랩 바닥면으로부터의 깊이에 따른 매달의 평균 온도를 결정하는 간단한 과정을 만들어냈다.

또한, 이 슬랩에서의 열전달을 매 시간별 레스폰스 인자로 해석하는 데에도 이 매달 평균 온도의 자료들을 사용하였다.

記 號 說 明

$A = T_R - T_M$

a = half length of a rectangular slab, ft

b = half width of a rectangular slab, ft

B = amplitude of annual cycle of monthly normal outdoor temperature, °F

c = specific heat, Btu/lbm · °F

C = amplitude of annual indoor temperature cycle, °F

C_R = common ratio of the slab response factors

d = number of days elapsed after April 1

e = edge distance, ft

F = slab heat transfer factor, Btu/h·ft

k = thermal conductivity of soil, Btu/h·ft·°F

ℓ = thickness of soil, ft

N = number of the slab response factor terms

P = perimeter length of the slab, ft

\bar{P} = period of temperature cycle, hr

Q = local floor heat flux, Btu/h·ft²

q = integrated floor heat loss, Btu/h

$R = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}$, ft

$r = \sqrt{R^2 + Z^2}$, ft

T = temperature of a field point, °F

T_m = mean temperature of the annual cycle of the monthly normal outdoor temperature, °F

T_R = mean temperature of the slab in the building, which is assumed equal to the house temperature, °F

$T_{R'}$ = slab-soil interface temperature for insulated floor slab, °F

T_Z = mean temperatures of earth at a given depth Z , °F

T_i = the house temperature, °F

T_o = outdoor temperature, °F

U_F = overall thermal conductance of floor slab, Btu/hr·ft²·°F

U_G = overall thermal conductance of soil layer, Btu/hr·ft²·°F

$V = T - T_m$ = temperature difference, °F

X_j, Y_j, CR = floor slab thermal response factors, Btu/hr·ft²·°F

α = thermal diffusivity of soil, ft²/h

$$\beta = r \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$$

ω = angular frequency of the annual cycle dy⁻¹

$$= \frac{2\pi}{365}$$

θ = time, hr

Ω = a solid angle subtended by the slab with respect to a field point

ψ, ϕ = functions defined in the text

ρ = density, lbm/ft³

λ = angle subtended by the slab

1. 서 론

주택 설계에 있어 에너지 해석을 하는데는 가장자리를 경사지게 만든 슬랩바닥에 대한 열전달 계산이 중요한 인자이긴 하지만, 지금까지의

경우 정확한 계산 방법론을 적용한다는 것은 적합하지 않았다. 이 문제에 정확한 계산 방법론을 쓰지 못하는 이유는 지면과 접촉함으로써 발생하는 열전달 과정을 포함하는 복잡한 3차원 문제인데다 시간에 따라 변화하는 성질을 포함하는 열전도과정이기 때문이다.

게다가, 건물 주위의 토양에 대해서 본래부터 결정하기 어려운 물리적 성질과 온도를 선택하는 데 근본적인 문제가 있다.

이것은 토양의 습도가 변화함에 따라 열적인 물성치뿐만 아니라 온도분포에도 변화를 주며 영향력을 끼치기 때문이다. 이러한 열량과 습기를 동시에 전달하는 문제를 정확히 해석하는 것은 이 논문의 목적에서 벗어나므로 다루지 않았다.

1977년 ASHRAE Handbook [1]에서 가장자리를 경사지게 만든 슬랩바닥에 대한 열전달량을 계산한 과정에서 F_2 라는 슬랩 둘레의 길이에 다른 열손실계수를 사용하여 다음과 같이 나타냈다.

$$q = F_2 \cdot P \cdot (T_i - T_o)$$

여기서

q = 바닥에서의 열손실

P = 슬랩 둘레의 길이

T_i = 실내 공기온도

T_o = 실외 공기온도

슬랩 둘레를 단열시키지 않았을 때와 각각 1인치, 2인치로 단열시켰을 때의 F_2 값은 각각 0.81, 0.55, 0.50으로써 유용하게 사용할 수 있다. 이 값들은 National Bureau of Standards [2]와 University of Illinois [3]에서 행해진 실험적인 측정에서 얻어낸 것들이다.

이들 ASHRAE의 자료들을 슬랩의 크기나 모양이 다르거나 토양의 물리적 성질들이 다를 때의 가장자리를 경사지게 만든 슬랩의 열손실량을 계산하는 데 적용한다는 것은 어렵다. 즉, 이 자료들은 특수한 형태의 슬랩과 일정한 측정

조건에서만 적용하기에 타당하며 시간별 혹은 계절별 열전달량을 계산하는 데에는 적합치 않다.

이 가장자리를 경사지게 만든 슬랩의 문제를 해석하는 전형적인 방법은 FDM이나 FEM 같은 수치적 계산기술을 이용하는 것이다. FDM은 많은 경우에 있어서 유력한 방법이며 현실적인 여러 문제들을 해결할 수 있는 유일한 방법이지만, 가장자리를 경사지게 만든 슬랩 구조에서는 열전도 영역이 매우 광범위하기 때문에 이 3차원 문제를 풀려면 많은 수의 격자점이 필요하며 컴퓨터의 사용시간이 길어진다. 즉, 지중온도의 일정한 년간주기를 얻어내려면 몇년간의 시간이 필요하게 된다. 예를 들면, Akasaka [4]는 3 m × 6 m의 2차원 영역을 유한차 격자 30 × 60개로 잡아 계산하여 정상 상태에 가까운 근사해를 얻어내는 데 3000번 이상의 반복 계산이 필요했다.

과거에 몇몇 권위자들이 가장자리를 경사지게 만든 슬랩바닥으로부터의 열손실량을 계산하는 방법을 이론적으로 뒷받침할 수 있도록 시도했는데, 그 중에서 가장 유명한 것이 A. H. Lachenbruch의 논문이다. 이 논문에서 그는 Green 함수를 사용했다. [5]

수학적으로 조직화하기에는 복잡하기 때문에 Lachenbruch는 정교한 도식화 과정으로 발전시켜 30 ft × 100 ft의 직사각형 모양의 슬랩에 대해 그 과정을 보여 주었다. Lachenbruch의 계산에서 발전하게 된 가장 놀라운 것은 건물 하부의 정상적인 년간 주기적 온도변화를 경험으로 알 수 있기까지는 약 3년 이상이 걸린다는 것이다.

B. Adamson [6]은 10 m × 10 m 슬랩에 Lachenbruch의 계산 과정을 적용하여 슬랩 표면에서의 열손실은 물론 가장자리를 경사지게 만든 슬랩 하부의 정상적인 년간 주기적 온도 분포를 구해냈다. Adamson의 계산 결과로부터 거

울철에는 열유동 경로가 슬랩둘레에 중심을 둔 반원형이나 다름없으며 여름철에는 슬랩면에 대해 온도분포는 평행하며 열유동 경로는 수직방향이라는 것을 알 수 있다. 또, 여름철에는 열전달량이 슬랩전면에 거의 일정하며 겨울철에는 가장자리에서 일어나는 열전달량이 중심부근보다 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

Muncey와 Spencer [7]는 도수응답解(Fourier 급수解)에 근거를 둔 애드미턴스 계수와 전달 계수를 고안해냈다. 그들은 여러가지 형태의 가장자리를 경사지게 만든 슬랩의 정상상태 하에서 열저항값을 결정하는 방법을 고안해낸 것이다. 자세한 것은 부록에 실었다.

Peavy [8]도 2차원 가장자리를 경사지게 만든 슬랩문제를 해석했다.

이 논문은 바닥 슬랩하부의 월 평균 지중온도를 만들어 내는데 있으며 이에 Lachenbruch의 과정을 사용할 것이다. 이 방법은 NBSL, DOE 2와 BLAST [8] 같은 에너지 해석 프로그램에서 사용되는 것이다. Lachenbruch가 발전시킨 도식解를 구하는 방법을 디지털 컴퓨터에서 쓸 수 있는 과정으로 전환시켰다. 그리고 바닥 슬랩하부의 깊이마다 다른 토양의 평균 온도를 구하는데 이 컴퓨터 프로그램을 사용했다. 이 슬랩하부의 깊이에 따른 토양의 평균 온도는 시간별 열전달량을 구하기 위해 적어도 한달간은 일정하다고 가정하였다. 또 이 온도를 이용하여 다음과 같은 응답인자 [9] 계산을 하였다.

$$Q_t = \sum_{j=1}^N X_j T_{R, t-j} - \sum_{j=1}^N Y_j T'_{R, t-j} + CR \cdot Q_{t-1}$$

여기에서

Q_t = 시간 t 일때 시간당 바닥에서의 열손실량

Q_{t-1} = 시간 t-1 일때 시간당 바닥에서의 열손실량

X_j 와 y_j 는 바닥표면에서의 열저항을 포함하는 바닥슬랩에 관하여 미리 계산된 열적 응답인자

$T_{R,t-j}$ = 시간 $t-j$ 일때 바닥슬랩 상부의 실내 온도

$T'_{R,t-j}$ = 시간 $t-j$ 일때 슬랩-토양의 접측면 온도

CR = 슬랩 열적 응답 인자 [9]의 공비
시간별 열손실 계산에서 $T'_{R,t-j}$ 는 항상 불변이라고 가정하지만 (그래서 지금부터는 T'_R 로 표시하겠다.), 이 온도는 계절에 따라 변화하고 바닥의 형태나 토양의 열적 성질들에 따라 다를 것이다.

이 방법의 이론적 근거는 건물 주위의 지중온도의 점차적 변화를 포함시켜 바닥에서의 열전달 과정을 고려하는 것이다. 적당한 슬랩바닥 하부의 온도 T'_R 를 결정하는 것이 이 시간별 열전달량을 계산하는데 어려운 문제였다. 이에 좀더 적당한 자료를 얻기 위하여 실내의 산술 평균 온도, 우물물의 온도나 10 피트 하부의 평균 지중온도 또는 월 평균 대기온도등을 과거에 사용해 왔다. 이 논문의 주 목적은 좀더 나은 T'_R 에 대한 자료를 결정하는 방법을 제공하는데 있다.

2. Lachenbruch 解

그림 1에서 지표면상에 S 라고 나타낸 열을 받는 슬랩의 수학적인 구조를 보여주고 있으며 다음은 기본 열전도 방정식과 그 경계조건들이다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} \dots\dots (1)$$

$$z = 0, T = T_R \text{ (S 면상)}$$

$$T = T_m + B \sin \left(\frac{2\pi\theta}{\bar{P}} \right) \text{ (S 면 이외의 부분)}$$

$$(z \rightarrow \infty \quad T = T_m)$$

여기서

T = 지중온도

α = 토양의 열확산계수

θ = 시간

T_R = 실내온도

T_m = 토양의 월 평균온도

B = 월 평균 지표면 온도의 연간 진폭

\bar{P} = 연간 온도변화의 주기

(1)식의 일반해를 Green 함수의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$T(x, y, z, \theta) = \frac{z}{8(\pi\alpha)^{3/2}} \int_0^\theta \left[\int_S \int \frac{\phi(x', y', t) e^{-\frac{r^2}{4\alpha(\theta-t)}}}{(\theta-t)^{5/2}} dx' dy' \right] dt \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\phi(x', y', t) = S$ 표면의 온도분포

$$r = [(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2]^{1/2}$$

(2)식에서 슬랩 S 하부의 지중 온도를 시간 t 와 슬랩 S 의 표면 온도분포 $\phi(x', y', t)$ 를 사용한 삼중적분으로 나타냈다. Lachenbruch 는 그림 1에 나타낸 경계조건을 이 일반해에 적용하여 (3)과 같이 지중 온도의 분포를 구하였다.

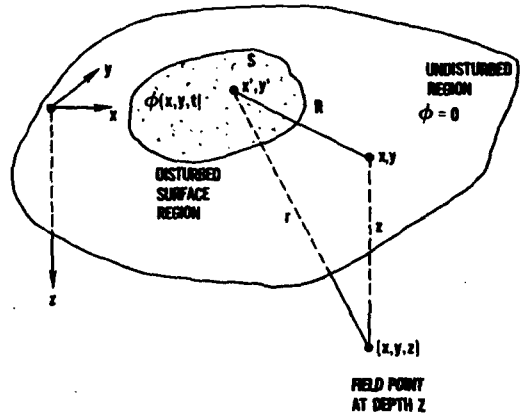


그림 1. Lachenbruch 가 사용한 열전도 방정식의 경계조건

$$T = T_m + \left[\frac{T_R - T_m}{2\pi} \right] \Omega + B e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}}$$

$$\sin(\omega\theta - z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}) + \frac{B}{2\pi} \int \Omega \int \Psi(\beta, \theta) d\Omega \dots \dots \dots (3)$$

여기에서

$$\Omega = \int \int_S dr = \int \int_S \frac{z dx' dy'}{r^3}$$

: S에 상응하는 양각

$$= \tan^{-1} \frac{(x+a)(y+b)}{z \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}}$$

$$- \tan^{-1} \frac{(x-a)(y+b)}{z \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}}$$

$$- \tan^{-1} \frac{(x+a)(y-b)}{z \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2}}$$

$$+ \tan^{-1} \frac{(x-a)(y-b)}{z \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}}$$

$$\Psi(\beta, \theta) = e^{-\beta} \{ (1+\beta) \sin(\omega\theta - \beta) + \beta \cos(\omega\theta - \beta) \}$$

$$\beta = r \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{P}$$

(3)식을 z로 미분하면 다음과 같은 표면에서의 열유속을 구할 수 있다.

$$Q(x, y, 0, \theta) = -k \left(\frac{dT}{dz} \right)$$

$$= k \sqrt{\frac{\omega}{2a}} B (\sin \omega\theta + \alpha \omega\theta)$$

$$+ \frac{k}{2\pi} (T_R - T_m) \left\{ \frac{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2}}{(x+a)(y+b)} \right.$$

$$- \frac{\sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2}}{(x-a)(y+b)}$$

$$- \frac{\sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2}}{(x+a)(y-b)}$$

$$\left. + \frac{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}}{(x-a)(y-b)} \right\}$$

$$- \frac{k^B}{2\pi} \int \int_S \frac{\Psi(\beta_0, \theta) dS}{R_0^3} \dots \dots \dots (4)$$

여기에서

$$\beta_0 = R_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$$

$$R_0 = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}$$

$$|dS| = dx' dy'$$

$$q = \frac{1}{S} \int \int_S Q dx' dy'$$

이 논문의 주 목적이 슬랩하부의 깊이에 따른 온도분포를 구하는 것이므로 (3)식에 대해서만 언급하겠다.

(3)식을 풀기 위해서는 $\Psi(\beta, \theta)$ 를 주어진 점인 (x, y, z) 에 대한 모든 양각 Ω 에 대해서 적분할 필요가 있다.

지표면상의 점 (x, y) 로부터 만들어지는 고리모양의 부분들을 중첩하여 적분하는 그림을 그림 2-1과 2-2에 나타냈다. 이 그림은 $\Psi(\beta, \theta)$ 라는 함수가 점 (x, y, z) 로부터의 반지름 R_i 와 R_{i-1} 사이의 고리모양의 구간에서 해석적으로 적분할 수 있다는 근거로 Lachenbruch가 독창적으로 개발해 낸 것이다.

(5)식은 고리모양의 부분들을 사용한 적분의 역반형태를 나타내고 있다.

$$\frac{B}{2\pi} \int \int_S \Psi(\beta, \theta) d\Omega = \frac{B}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \{ \phi(R_i) - \phi(R_{i-1}) \} \dots \dots \dots (5)$$

여기에서

$$\phi(R) = \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} e^{-\sqrt{z^2 + R^2} \sqrt{\frac{\omega}{2a}}}$$

$$\sin(\omega\theta - \sqrt{z^2 + R^2} \sqrt{\frac{\omega}{2a}})$$

물론 이 방법을 사용하려면 슬랩상에 많은 ϵ 의 두께가 얇은 고리모양의 영역을 필요로 하지만, 그 고리모양의 영역이 슬랩을 벗어날 때

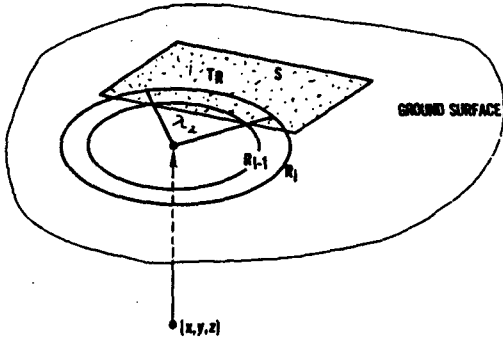


그림 2-1. 고리모양의 부분으로 나누어 가장자리를 경사지게 만든 슬랩문제를 계산하는 방법.

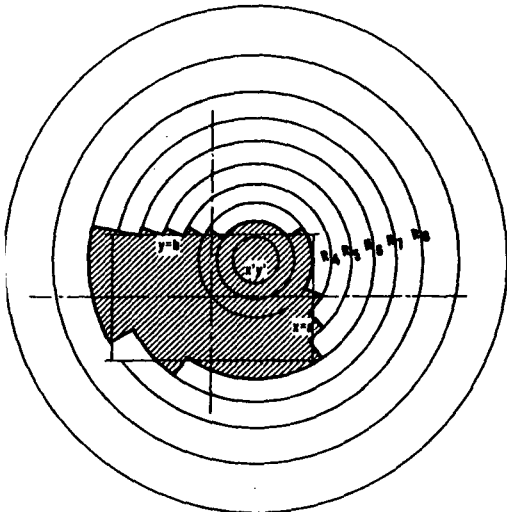


그림 2-2. 고리모양을 중첩하여 직사각형을 만드는 방법

함수의 값이 사라지기 때문에 건물 외부의 넓은 면적을 다루기에 이 방법이 상당히 효과적이다. (λ 는 문제에서 주어진 점으로부터 슬랩의 경계에 해당하는 각도를 나타낸다) 또한, 이 $\phi(R)$ 의 값은 R 이 커짐에 따라 급격히 감소한다.

여러가지 형태와 온도가 다른 슬랩하부의 월별 지중온도분포를 구하는 효과적인 컴퓨터 프로그램을 개발해냈다. 몇가지 경우를 선택하여 바닥의 중심선으로 자른 단면에 나타나는 등온선을 (3)식에서 구할 수 있는 $(T - T_m) / (T_R - T_m)$ 의 값으로 나타내어 그림 3-1에서 3-4에

절쳐 실었다. 이에 사용한 바닥은 크기가 20 ft \times 20 ft의 정사각형모양이며 토양의 열확산계수는 각각 평균의 값과 습할때의 조건인 0.027과 0.039 (ft² / hr) 사이에서 변화시켰다.

그 결과 다음과 같은 흥미있는 자료를 얻어냈다.

1. 바닥의 바로 밑부분을 벗어난 지역의 지중온도도 건물의 한변의 길이만큼까지는 영향을 받는다.
2. 겨울철에는 바닥의 가장자리 근처에서 커다란 온도 구배를 나타낸다.
3. 여름철에는 겨울철에 나타나는 가장자리에서의 열유동현상이 없고 슬랩에 직각인 방향으로 일차원적인 열전달 현상을 보인다.
4. 지중온도의 변화는 30 ft 이상 지하에서도 나타난다.

그림 4는 슬랩하부의 년평균 온도분포를 나타낸 것으로서 (3)식의 두번째 항인 정상상태의 열전도함을 푼 것이다.

그림 4에서 0으로 나타낸 지역은 슬랩의 영향을 받지 않는 지역으로 그곳의 온도는 수치적으로 T_m 과 일치한다. 건물로부터의 거리를 선택하여 월별 지중온도를 그림 5-1과 5-2에 나타냈다.

각각 토양의 조건이 평균일때와 습한 경우, 일년간의 진폭 $T_R - T_m$ 의 1배와 1.5배인 경우에 대해서 나타냈다. 이 그림을 보면 연평균 변화가 건물로부터 5 ft 이상 떨어지면 거의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

가장자리를 傾斜지게 만든 슬랩바닥에 對한 季節別 熱損失量의 計算

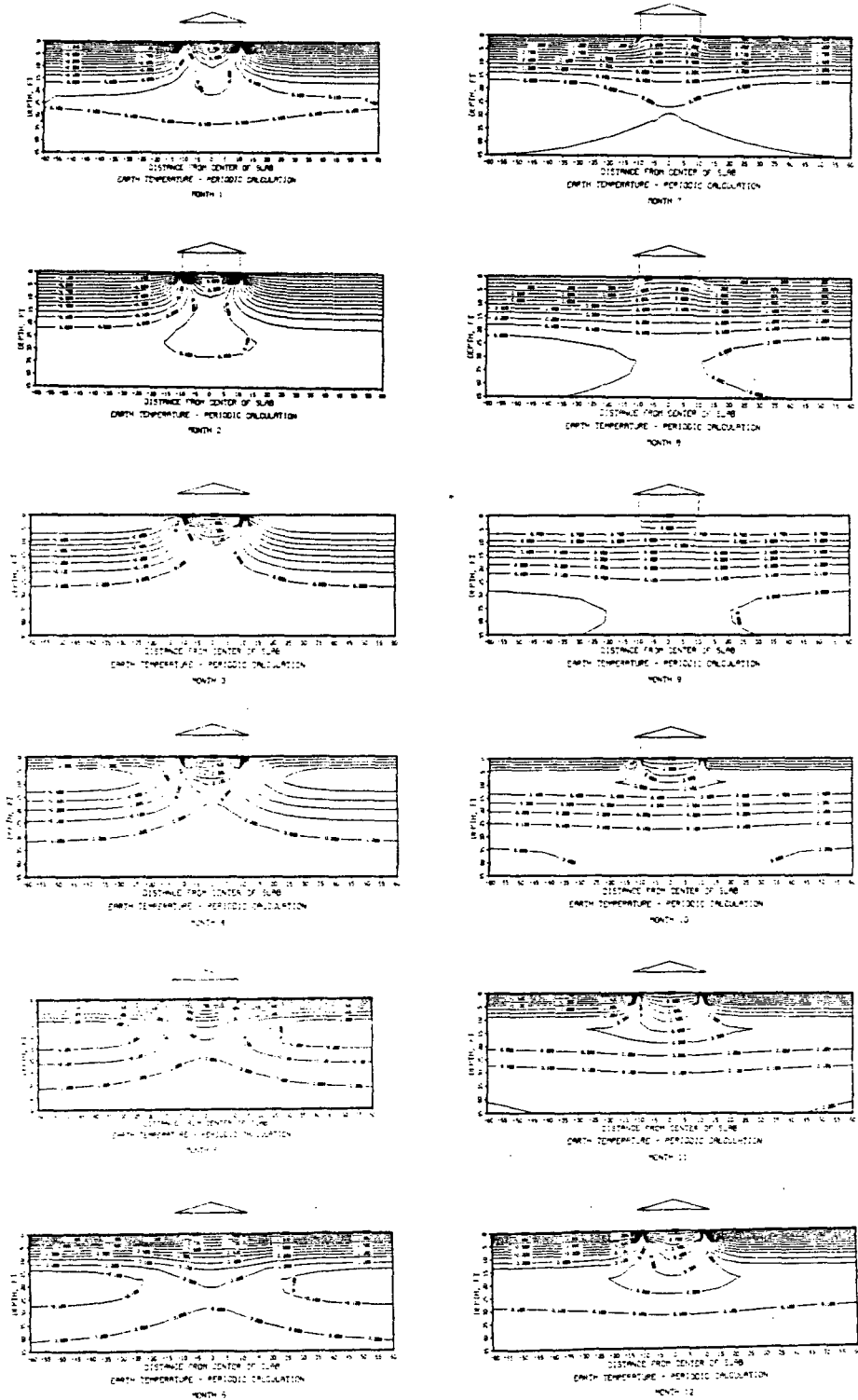


그림 3-1. 가장자리를 경사지게 만든 슬랩 하부의 $(T-T_R)/A$ 로 표시한 연간 지중온도 $\alpha = (.93 \text{ ft}^2/\text{day})$ $b/a = 1.5$

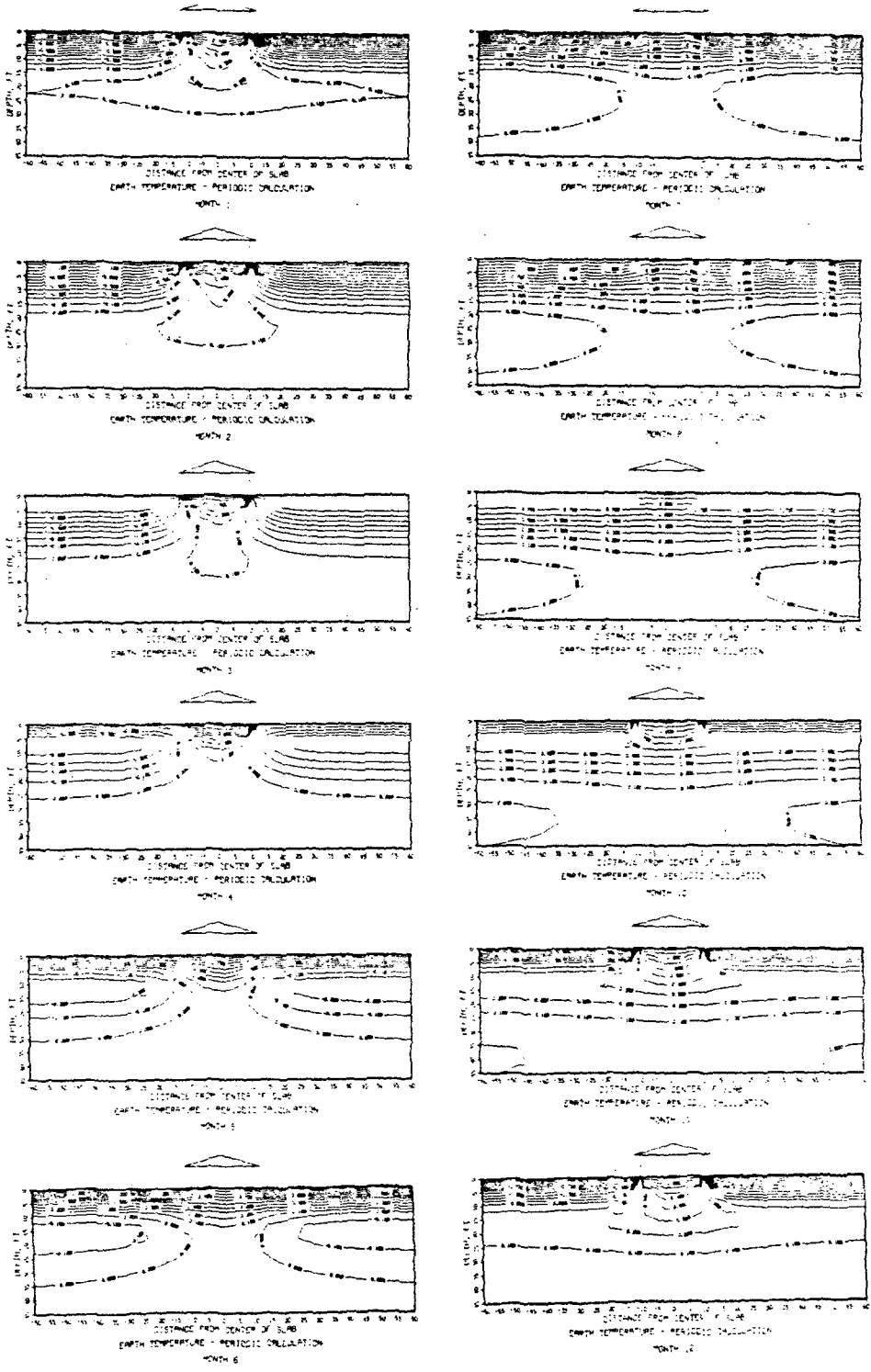


그림 3-2. 가장자리를 경사지게 만든 슬랩 하부의 $(T - T_R) / A$ 로 표시한 연간 지중온도 $\alpha \approx (.65 \text{ ft}^2 / \text{day})$ $b/a = 1.5$

가장자리를 傾斜지게 만든 슬랩바닥에 對한 季節別 熱損失量의 計算

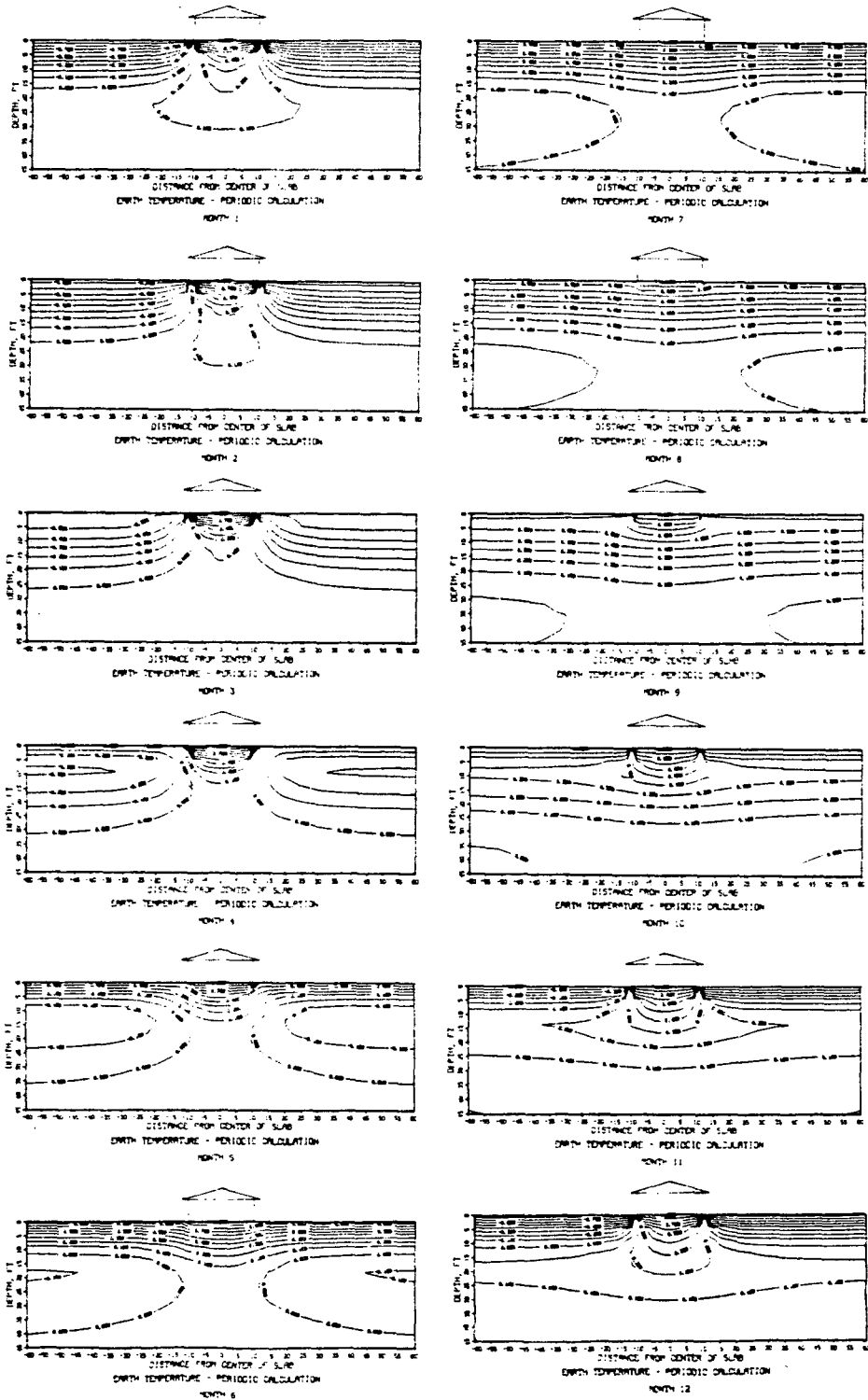


그림 3-3. 가장자리를 경사지게 만든 슬랩 하부의 $(T - T_R) / A$ 로 표시한 연간 지중 온도 $\alpha = (.93 \text{ ft}^2 / \text{day})$ $b/a = 1.0$

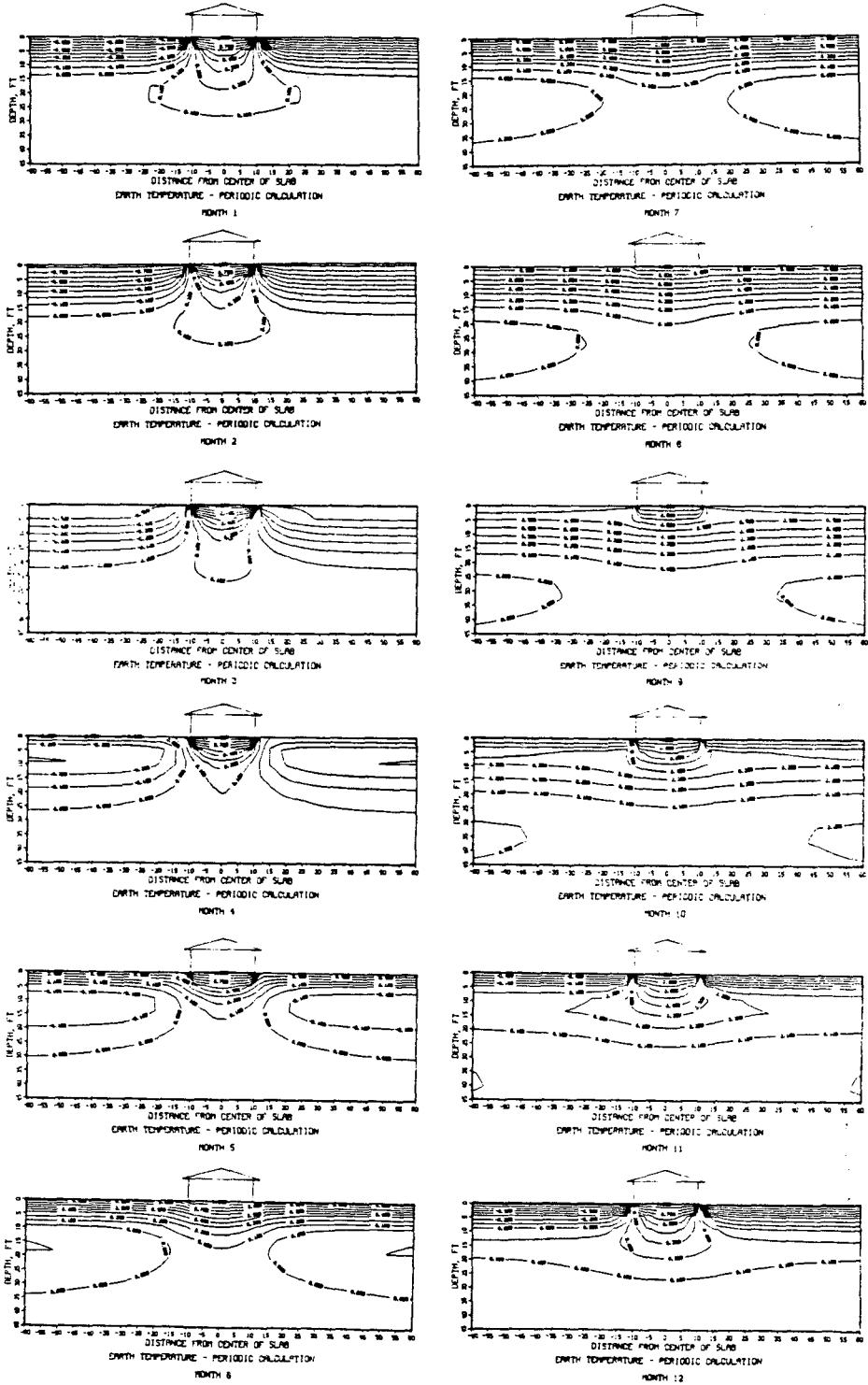


그림 3-4. 가장자리를 경사지게 만든 슬랩 하부의 $(T - T_R)/A$ 로 표시한 연간 지중온도 $\alpha = (.65 \text{ ft}^2/\text{day})$ $b/a = 1.0$

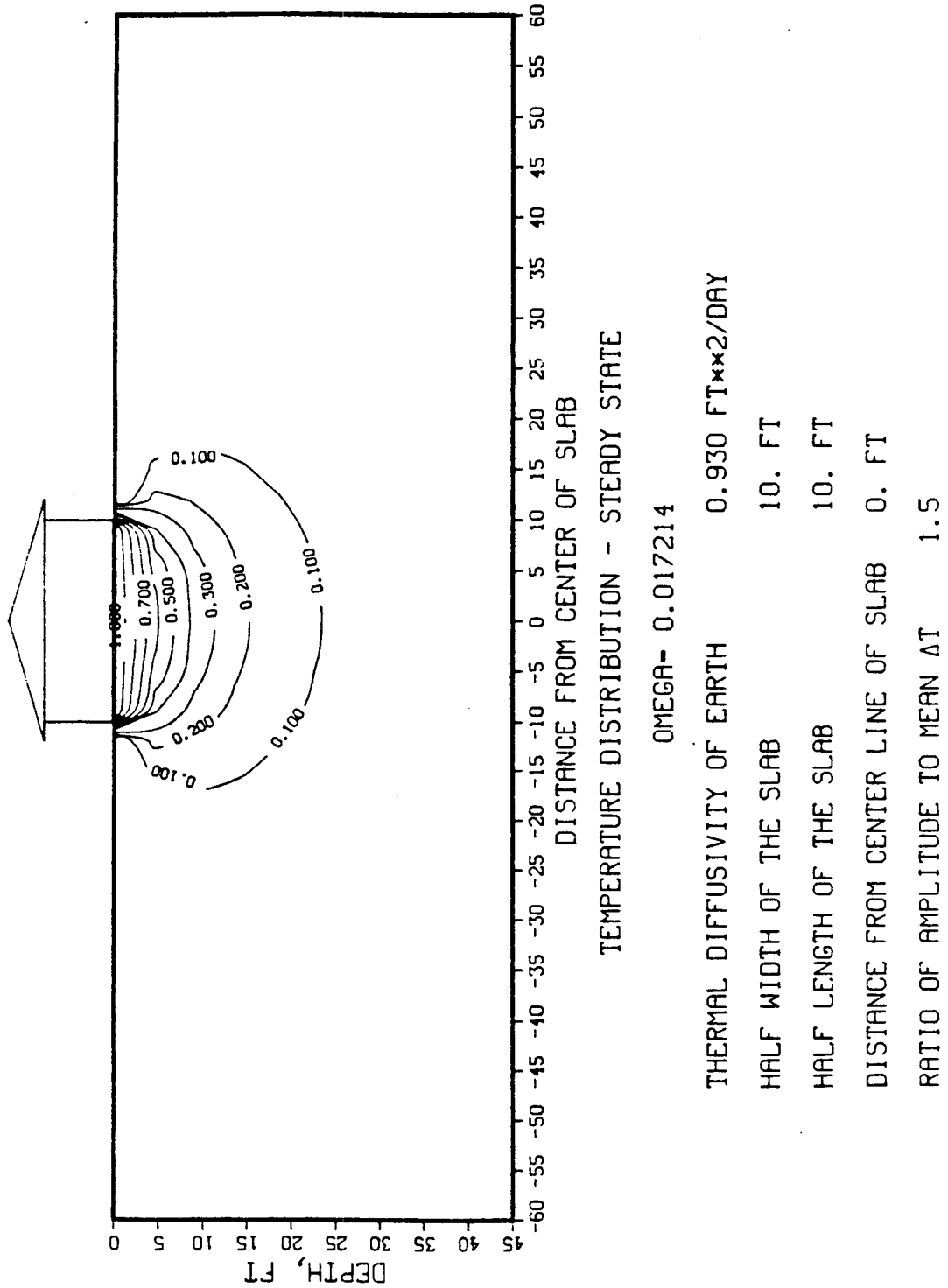


Fig 4. $(T - T_R) / (T_R - T_m)$ 으로 표시한 연평균 지중온도

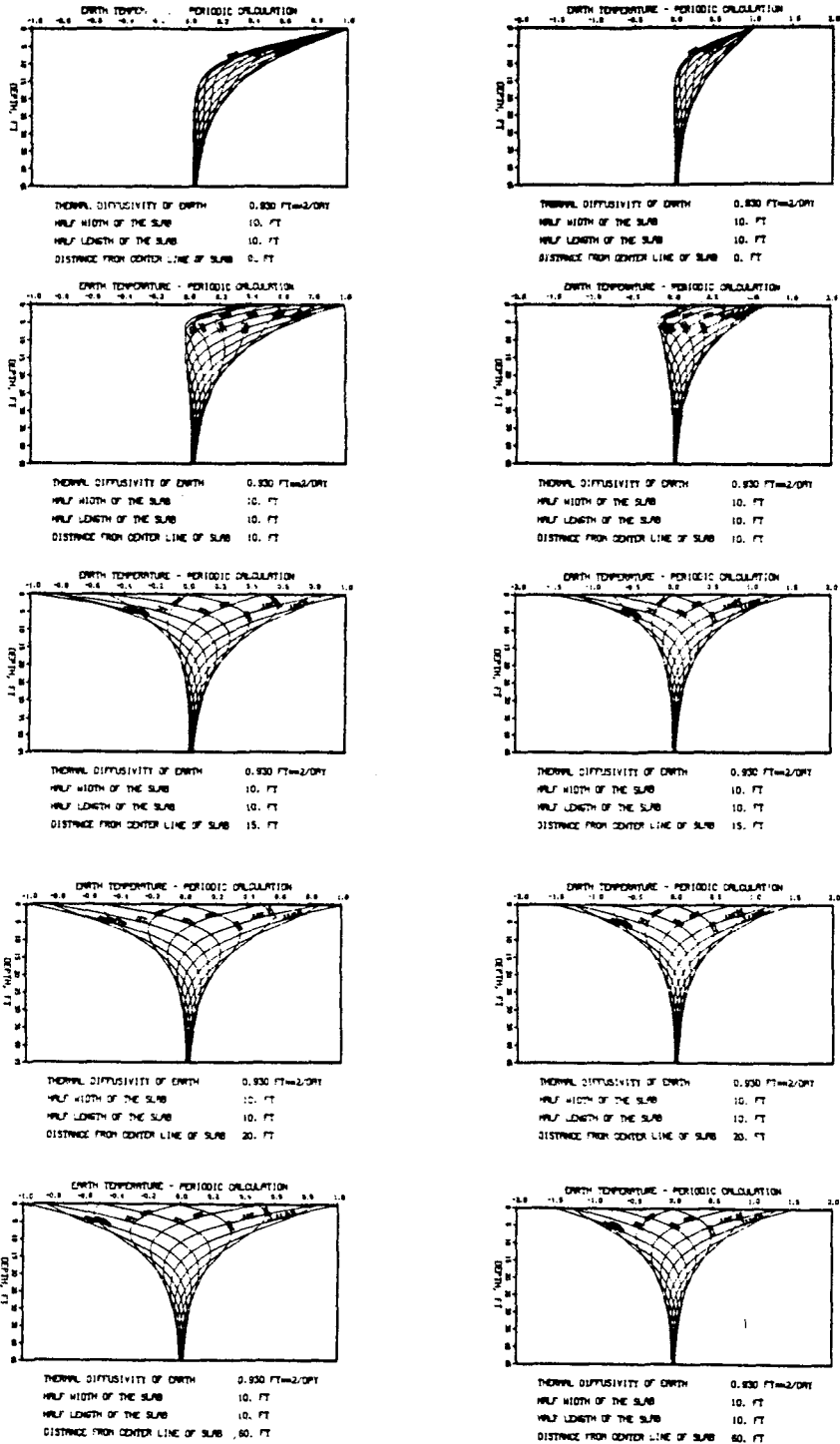


그림 5-1. 슬랩으로부터의 거리에 따른 지중온도의 분포 $\alpha = (.93 \text{ ft}^2/\text{day})$

가장자리를 傾斜지게 만든 슬랩바닥에 對한 季節別 熱損失量의 計算

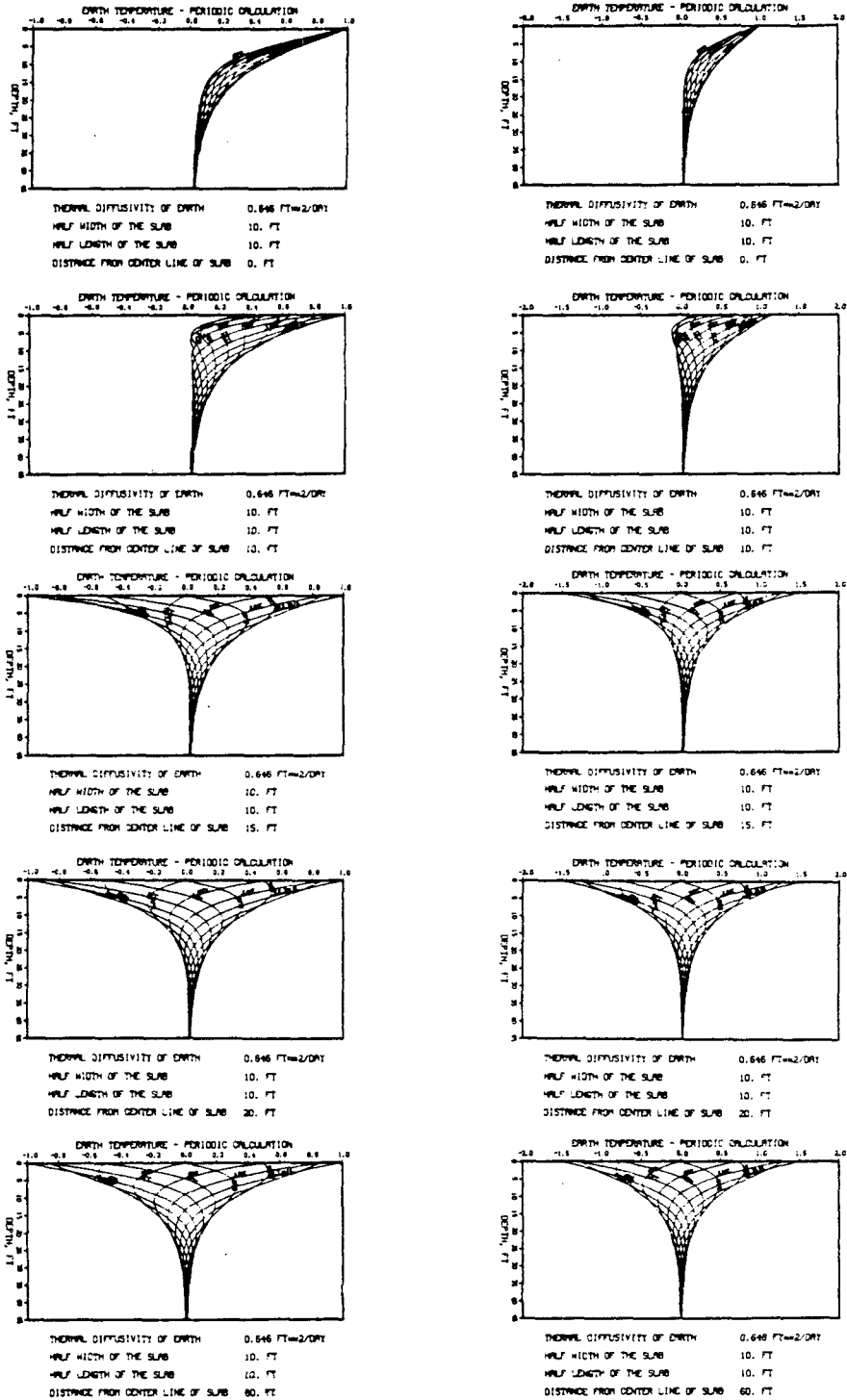


그림 5-2. 슬랩으로부터의 거리에 따른 지중온도의 분포 $\alpha = (.65 \text{ ft}^2 / \text{day})$

3. 건물의 에너지 해석을 위한 월 평균 온도와 깊이에 따른 면적 평균 온도 계산

슬랩바닥의 열전달 문제를 계산하는 앞장의 해를 이용하기 위하여 월 평균 온도와 깊이에 따른 면적 평균 지중온도가 필요하다.

다음과 같은 방법으로 슬랩면 하부의 지중온도를 적분으로 구할 수 있다.

$$\bar{T}(z) = \frac{1}{ab} \int_a^b \int_0^b T(x, y, z) dx dy \quad (6)$$

$\bar{T}(z)$ 를 다음의 여러 경우에 대해서 얻는다.

$$\alpha = 0.015, 0.025, 0.035 \text{ ft}^2 / \text{h}$$

$$T_R - T_m = -10, 7.5, 15, 20, 25 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\beta = 3, 10, 20, 30 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$10 \times 10 \quad 10 \times 6.67 \quad 10 \times 5$$

$$a \times b = 15 \times 15 \quad 15 \times 10 \quad 15 \times 7.5$$

$$20 \times 20 \quad 20 \times 13.33 \quad 20 \times 10$$

$$30 \times 30 \quad 30 \times 20 \quad 30 \times 15$$

그림 6-1, 2, 3은 $T_R - T_m = 20 \text{ }^\circ\text{F}$ 이고 $B = 30, 20, 10 \text{ }^\circ\text{F}$ 일 때 $z = 1 \text{ ft}$ 에서의 결과를 나타내고 있다. 이것은 $20 \text{ ft} \times 20 \text{ ft}$, 30×40 , 40×40 인 슬랩바닥면 하부 1 ft 에서의 면적 평균 온도를 나타내고 있다. 이 그림을 보면 슬랩하부의 온도에 대한 열확산계수의 영향은 모든 계절에 걸쳐 거의 없으며 겨울철에는 바닥의 종횡비에 따라 큰 영향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이 그림으로 바닥에서의 열손실을 계산하려면 토양의 연평균 온도 T_m (이것은 지하 깊은 곳의 온도나 우물물의 온도와 아주 근사하다.)과 연간 최고, 최저 월별 기온을 필요로 하는 데 이 자료들은 U.S. Weather Record Center [10]으로부터 쉽게 얻을 수 있었다.

예를 들어, [9]에 의하면 Washington D.C.에 대한 연 평균온도와 월별 최고, 최저 기온은 (30년 평균) 각각 $56.8 \text{ }^\circ\text{F}$, $77.8 \text{ }^\circ\text{F}$, $36.5 \text{ }^\circ\text{F}$ 이다. 이로부터 $T_m = 56.5 \text{ }^\circ\text{F}$ 로 하고 $B = (77.8 - 36.5) / 2 = 20.65 \text{ }^\circ\text{F}$ 또는 약 20

$^\circ\text{F}$ 로 산출할 수 있다.

그림 6-2를 사용하면 슬랩의 온도가 $56.5 + 20 = 76.5 \text{ }^\circ\text{F}$ 인 경우에 대해서 슬랩의 열적 성질들이 토양의 열적 성질들과 거의 비슷하다면 슬랩바닥에서의 계절별 열손실량을 계산할 수 있다. 만약 토양의 열확산 계수가 $0.025 \text{ ft}^2 / \text{h}$ 이고 열전도 계수가 $0.5 \text{ Btu} / \text{h} \cdot \text{ft} \cdot \text{ }^\circ\text{F}$ 이고 슬랩바닥이 $30 \text{ ft} \times 40 \text{ ft}$ (종횡비 0.75) 라면 그림 6-2를 사용하여 다음과 같이 바닥으로부터의 열 손실량을 계산할 수 있다.

월	$T_R - T_z = 1$	$Q = 0.5 (T_R - T_z)(1200)$
1월	4.3	2580 Btu/h
4월	3.4	2040 Btu/h
7월	1.3	780 Btu/h
10월	2.3	1380 Btu/h

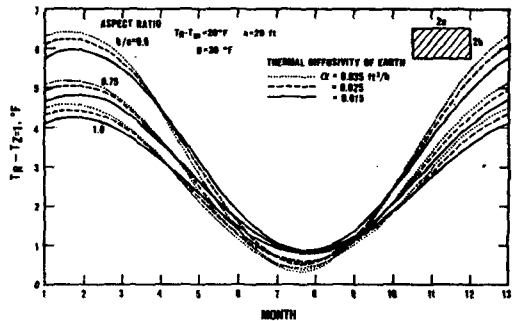


그림 6-1. B = 30 일때 슬랩바닥 1 ft 하면의 평균 온도

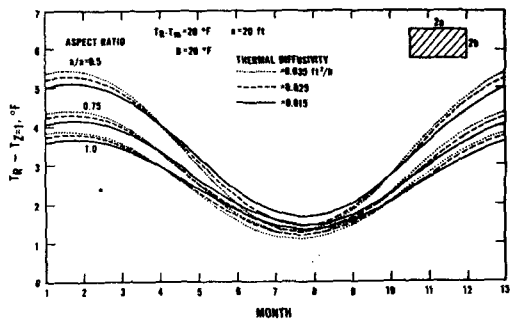


그림 6-2. B = 20 일때 슬랩바닥 1 ft 하면의 평균 온도

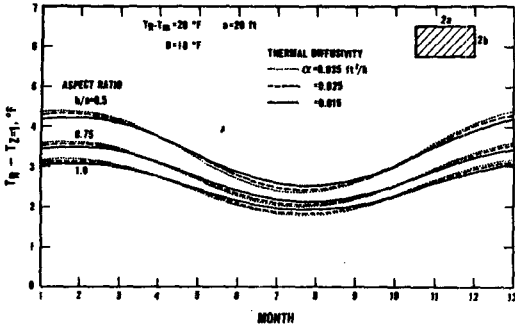


그림 6-3. B = 10 일때 슬랩바닥 1ft하면의 평균 온도

슬랩 온도가 76.5 °F와 다를 때는 건물의 실내 기온과 바닥 단열재의 온도가 달라지기 때문에 그 계산 과정은 복잡하게 된다. 다음 장에서는 열적 성질이 다른 슬랩들에 적용되는 일반적인 과정을 보이기로 하겠다.

4. 가장자리를 경사지게 만든 슬랩으로부터의 계절별 열손실량을 계산하는 요약 과정

가장자리를 경사지게 만든 슬랩바닥에 대해 개발된 계절별 열손실량을 계산하는 과정은 바닥 하부 토양의 계절별, 연 평균 온도와 실내온도와 바닥의 열전도계수(슬랩하부의 토양층을 포함하는)에 근거를 두고 있다. 이미 앞 장에서 다룬 여러가지 바닥의 총횡비, 월별 온도의 연간 변화, 토양의 열확산 계수들을 조합하였을 경우에 대해 광범위한 Lachenbruch 형태의 계산을 통해 바닥 하부의 온도에 대한 자료들을 구할 수 있다. 여름철과 겨울철에 각각 다른 온도를 유지하도록 장치를 설치하여 연간 실내 기온의 변화량을 조정하여 해석하는 문제로 다루었다. 이 과정에서 바닥하부의 평균 온도를 \bar{T}_z 로 (3)식과 같은 표현을 썼다.

$$\bar{T}_z = T_m + (T_R - T_m) \theta'_{1m} + \beta \theta'_{2m} + (C - B) \theta'_{3m} \dots \dots \dots (7)$$

여기에서

T_m = 연 평균 외기 온도

B = 월별 기온 변화의 진폭

C = 건물 온도 변화의 진폭

θ'_{1m} = 그림 7에 나타나는 연 평균 온도 상승함수
 θ'_{1m} 은 다음과 같은 실험 관계식으로 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\theta'_{1m} = e^{-\left(\frac{z}{a}\right)^{0.8} \cdot \{ 3.312 - 3.324 \left(\frac{b}{a}\right) + 1.476 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \}}$$

θ'_{2m} = 다른 인자에 의해 영향을 받지 않는 지중온도의 연간 주기적 변화

$$\theta'_{2m} = e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \sin \left(\omega t - z \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right)$$

θ'_{3m} = 슬랩하부 온도에 대한 연간 주기적 온도 변화의 영향.

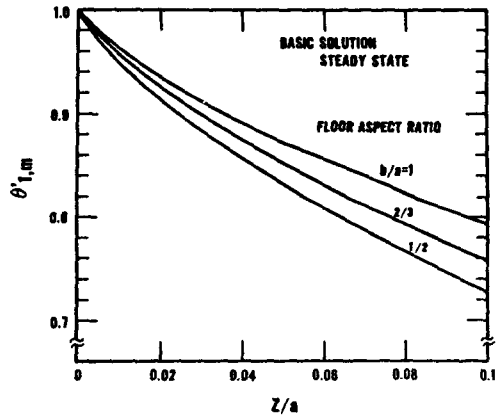


그림 7. 정상상태 하에서의 평균온도함수

θ'_{3m} 는 두가지 요소인 β 와 Ψ 를 사용하여 다음 식으로 결정할 수 있으며 그림 8-1, 2, 3에 각각 다른 세가지 총횡비에 대해 그 결과를 나타내었다.

$$\theta'_{3m} = \beta \sin(\omega t - \Psi) \dots \dots \dots (9)$$

β 와 Ψ 는 또 다음과 같은 실험식으로 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$\beta = e^{-\left(\frac{z}{a}\right)^m \{ A_1 + B_1 \left(\frac{a^2 \omega}{\alpha}\right)^n \}}$$

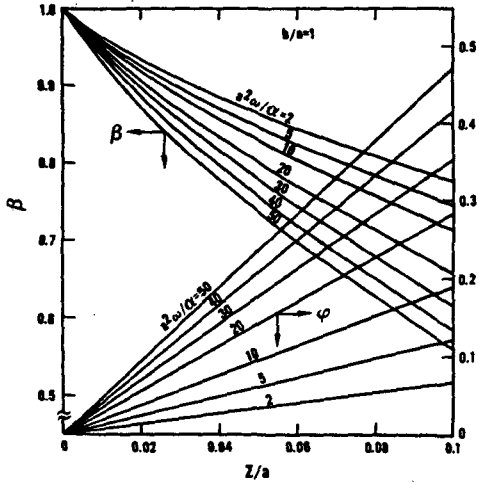


그림 8-1. 바닥의 종횡비 1 : 1에 대한 슬랩하부의 온도계수

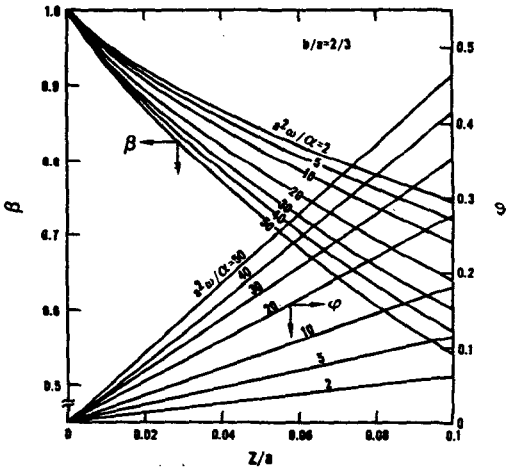


그림 8-2. 바닥의 종횡비 2 : 3에 대한 슬랩하부의 온도계수

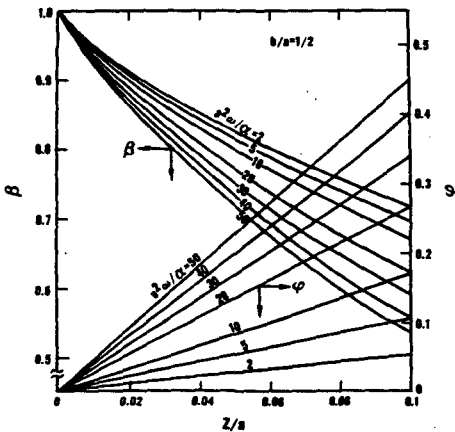


그림 8-3. 바닥의 종횡비 1 : 2에 대한 슬랩하부의 온도계수

여기서

$$A_1 = 2.919 - 3.029 \left(\frac{b}{a}\right) + 1.362 \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

$$B_1 = 0.1957 + 0.0936 \left(\frac{b}{a}\right) + 0.0144 \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

$$n = 0.6773 + 0.0141 \left(\frac{b}{a}\right) - 0.0426 \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

$$m = \left(\frac{a^2\omega}{\alpha}\right)^{0.035} \{ 0.756 + 0.046 \left(\frac{b}{a}\right) \}$$

$$\psi = \left\{ C_1 + D_1 \left(\frac{b}{a}\right) \right\} \left(\frac{a^2\omega}{\alpha}\right)^{E_1 - F_1} \left(\frac{b}{a}\right)$$

또, 여기에서 C_1, D_1, E_1, F_1 의 값들은 $a^2\omega/\alpha$ 의 함수로서 표에서 찾을 수 있다.

$C_1 \quad D_1 \quad E_1 \quad F_1$

$$1.8 < \frac{a^2\omega}{\alpha} < 7 \quad 0.236 \quad 0.168 \quad 0.800 \quad 0.111$$

$$7 < \frac{a^2\omega}{\alpha} < 16 \quad 0.278 \quad 0.207 \quad 0.713 \quad 0.119$$

$$16 < \frac{a^2\omega}{\alpha} < 45 \quad 0.372 \quad 0.170 \quad 0.623 \quad 0.067$$

그런다음 토양의 두께 ℓ 에 대한 전열전달계수 U_G 를 알면 바닥에서의 열손실량을 계산할 수 있다.

$$Q = U_G (T_R - \bar{T}_z) A \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$U_G = \frac{k}{\ell} \quad \dots\dots\dots (11)$$

바닥이 단열된 슬랩

앞의 해석에서는 슬랩의 열적 성질이 토양의 열적 성질과 같다고 생각한 반면에 (비교적 습한 토양위의 단열하지 않은 콘크리트바닥에 대해서는 근사적으로 맞는다.), 단열재를 포함한 많은 경우에는 그들의 열적 성질이 하부 토양의 열적 성질과 큰 차이가 있다. 단열된 바닥을 다룰 때에는 그 단열재를 따라 발생하는 적당한 온도 강하를 생각해 주어야 한다. 그러므로 (7)식의 T_R 과 C 의 값에 이 사실을 고려해서 조정해야

한다. 이 변형된 T_R 과 C 를 구하는 방법을 다음에 제시했다.

$$T'_R = \frac{U_F T_R + U_G \bar{T}_z}{U_F + U_G} \dots\dots\dots (12)$$

$$C' = \frac{U_F C}{U_F + U_G} \dots\dots\dots (13)$$

여기서

T'_R = 토양과 바닥 접촉면의 연평균 온도

C' = 토양과 바닥 접촉면의 연변화 주기

U_F = 단열된 바닥계의 전 열전달 계수

U_G = 하부토양의 전 열전달 계수

$$= \frac{k}{2}$$

(7)식에 T_R 과 C 대신에 T'_R 와 C' 를 대입하여 각 항을 재배치하면 다음과 같다.

$$\bar{T}_z = \frac{U_F + U_G}{U_F + U_G (1 - \theta'_{1m})} \left[T_m + \left(\frac{U_F T_R}{U_F + U_G} - T_m \right) \theta'_{1m} + B \theta'_{2m} + \left(\frac{U_F C}{U_F + U_G} - B \right) \theta'_{3m} \right] \dots\dots\dots (14)$$

계산실례

Washington D.C. 의 40 ft × 30 ft 인 건물의 가장자리를 경사지게 만든 슬랩바닥으로부터의 1 월과 8 월의 열손실량을 계산한다. 두께 4 인치인 콘크리트 슬랩위에 마루가 덮여있고 토양은 습기를 중간정도 포함하고 있다고 가정한 다. 또 1 인치 두께의 폴리스틸렌으로 토양과 콘크리트 슬랩 사이를 단열시켰다고 가정하자. 실내 기온은 여름에 78 °F, 겨울에는 68 °F 로 조절하였다.

1. 바닥계의 열 저항값 hr·ft²·°F/Btu

- 내부표면의 저항 0.6
- 카펫 1.0
- 마루 1.4
- 4 인치 콘크리트 0.3

1 인치 폴리스틸렌 판 3.5
6.8

$$U_F = \frac{1}{6.8} = 0.147 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°F}$$

2. 토양의 열적 성질들은 다음과 같이 가정한다.

열전달계수 : $k = 0.5 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}\cdot\text{°F}$

열확산계수 : $\alpha = 0.025 \text{ ft}^2/\text{h}$

$U_G = 0.5 \text{ Btu/hr}\cdot\text{ft}\cdot\text{°F}$ ($z = 1 \text{ ft}$)

3. 표면 온도 조건 (앞의 예를 보라)

$T_m = 56.5 \text{ °F}$

$B = 20.65 \text{ °F}$

4. 실내 온도 조건

$T_R = (78 + 68) / 2 = 73$

$C = (78 - 68) / 2 = 5$

5. $2a = 40$, $2b = 30$ 이므로

중형비는 $b/a = 15/20 = 0.75$

깊이의 계수 $z/a = 1/20 = 0.050$

$\theta'_{1m} = 0.85$ (그림 7)

6. 4 월 1 일로부터 경과한 시간은

$$\omega t = \frac{2\pi}{365} (275) = 4.73 \text{ (1 월 1 일)}$$

$$\frac{2\pi}{365} (122) = 2.100 \text{ (8 월 1 일)}$$

$$z \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} = (1) \sqrt{\frac{2\pi}{365 \times 0.025 \times 24}} = 0.170$$

$$\theta'_{2m} = e^{-0.17} \sin(4.73 - 0.17) = -0.834 \text{ (1 월 1 일)}$$

$$= e^{-0.17} \sin(2.10 - 0.17) = 0.790$$

(8 월 1 일)

$$7. \frac{a^2 w}{\alpha} = \frac{(20)^2 \left(\frac{2\pi}{365} \right)}{0.025 \times 24} = 11.5$$

그림 8 - 2 에서 $z/a = 0.050$ 일때

$\beta = 0.84$

$\psi = 0.10$

8. (9)식을 이용하면

$$\begin{aligned} \theta'_{im} &= 0.81 \sin(4.73 - 0.10) = -0.807 \\ &\quad (1 \text{ 월 } 1 \text{ 일}) \\ &= 0.81 \sin(2.11 - 0.10) = 0.733 \\ &\quad (8 \text{ 월 } 1 \text{ 일}) \end{aligned}$$

$$9. \frac{U_F T_R}{U_F + U_G} = \frac{(0.147)(73)}{0.147 + 0.5} = 16.6$$

$$\frac{U_F C}{U_F + U_G} = \frac{(0.147)(5)}{0.147 + 0.5} = 1.14$$

$$\begin{aligned} \frac{U_F + U_G}{U_F + U_G (1 - \theta'_{im})} &= \frac{0.147 + 0.5}{0.147 + 0.5(1 - 0.85)} \\ &= \frac{0.647}{0.222} = 2.91 \end{aligned}$$

10. 1월 1일에 대해서는

$$\begin{aligned} \bar{T}_{z=1} &= 2.91 [56.5 + (16.6 - 56.5)(0.85) \\ &\quad + (20.65)(-0.834) + (1.14 - \\ &\quad 20.65)(-0.807)] \\ &= 2.91 [56.6 - 33.9 - 17.2 + 15.74] \\ &= 2.91 [21.14] = 61.5 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

8월 1일에 대해서는

$$\begin{aligned} T_{z=1} &= 2.91 [56.5 + (16.6 - 56.5)(0.85) \\ &\quad + (20.65)(0.79) \\ &\quad + (1.14 - 20.65)(0.733)] \\ &= 2.91 [56.5 - 33.9 + 16.31 - 14.30] \\ &= (2.91)(24.61) = 71.6 \end{aligned}$$

11. 건물 내의 온도

$$1 \text{ 월 } 1 \text{ 일 } : 73 + 5 \sin(4.73) = 68 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$8 \text{ 월 } 1 \text{ 일 } : 73 + 5 \sin(2.10) = 79 \text{ } ^\circ\text{F}$$

12. 바닥과 토양의 전 열전달 계수

$$\begin{aligned} \frac{1}{U} &= \frac{1}{U_F} + \frac{1}{U_G} = 6.8 + 2 = 8.8 \\ U &= 0.1136 \end{aligned}$$

13. 바닥에서의 열손실량

$$1 \text{ 월 } 1 \text{ 일 } : (0.11367)(68 - 61.5)(1200) = 886 \text{ Btu/h}$$

$$8 \text{ 월 } 1 \text{ 일 } : (0.1136)(77 - 71.8)(1200) = 736 \text{ Btu/h}$$

슬랩의 열적 성질들이 토양의 열적 성질과 거의 같은 단열되지 않은 슬랩에 대해서도 거의 비슷한 과정을 행하면 바닥하부로 1 ft 에서의 온도를 (7)식을 써서 직접 구할 수 있다.

1월 1일 :

$$\begin{aligned} T_{z=1} &= 56.5 + (73 - 56.5)(0.85) + (20.65) \\ &\quad (-0.834) + (5 - 20.65)(-0.807) \\ &= 56.5 + 14.03 - 17.22 + 12.63 = 65.9 \end{aligned}$$

8월 1일 :

$$\begin{aligned} T_{z=1} &= 56.5 + (73 - 56.5)(0.85) + (20.65) \\ &\quad (0.79) + (5 - 20.65)(0.733) \\ &= 56.5 + 14.03 + 16.30 - 11.47 = 75.4 \end{aligned}$$

바닥에서의 열손실량은 다음과 같다.

$$1 \text{ 월 } : (0.5)(68 - 65.9)(1200) = 1260 \text{ Btu/h}$$

$$8 \text{ 월 } (0.5)(77 - 75.4)(1200) = 960 \text{ Btu/h}$$

이 계산을 해 보면 바닥이 단열되어 있을 때에 그렇지 않은때보다 바닥하부의 온도가 더 낮다는 것을 알 수 있다.

ASHRAE Hand book의 방정식으로 계산한 것과 단열되지 않은 바닥의 열손실을 비교해 보았다.

$$q = (0.81)(140)(68 - 36.5) = 3572 \text{ Btu/h}$$

이때 겨울철 외기 온도는 약 36.5 °F로 가정하였다.

5. 요약 및 검토

슬랩하부의 깊이에 따른 지중온도의 월별 분포를 Lachenbruch 방법을 사용하여 결정했다. 이 결과는 슬랩면 하부로의 면적 평균 온도를 구하는 간단한 과정에 사용되었다. 이 면적 평균 온도는 바닥에서의 월별 열손실량을 근사적으로 구하는 데 사용할 수 있었다.

그리고, 이 방법에서 구한 면적 평균 온도는 바닥에서의 시간별 열손실량을 Fourier 급수로 푸는 계산에 좋은 참고자료가 될 것이다.

그러나, 바닥에서의 열손실량을 계산하는 가운데 바닥하부 토양의 평균 온도를 사용하는데

주의해야 할 점들이 있다. 왜냐하면 이 방법에서는 다음과 같은 몇가지 중요한 사실들을 무시하였기 때문이다.

1. 바닥 기초의 영향 : 슬랩은 일반적으로 복잡한 형상의 콘크리트 기초 위에 세워지게 된다. 이 콘크리트 기초의 열전도계수가 주위 토양의 열전도 계수와 다르기 때문에 슬랩 주위의 온도분포를 복잡하게 만드는 요인이 된다.

2. 가장자리의 단열 : 어떤 가장자리를 경사지게 만든 슬랩들은 가장자리를 단열하기 때문에 이 논문에서 예견된 온도 분포와는 다른 온도 분포를 나타낼 수도 있다.

3. 건물 벽 두께의 효과 : 이 논문의 해석에서는 실내 온도가 일정하다고 가정하였고 실내에서 실외로 변하는 슬랩의 끝부분에서 갑작스러운 온도 변화가 있다고 가정한다. 사실상, 슬랩의 가장자리에서 점차적인 온도 변화가 있고 실내에서 실외의 조건으로 바뀔 때 온도 분포는 벽의 두께와 열전도 계수등에 따라 상당히 좌우된다. 만약 벽이 더 두껍고 더 잘 단열되어 있다면 얇을 때 보다 실내의 온도 차이가 심하게 된다.

슬랩의 온도 분포가 알려져 있는 한 그 온도 분포가 일정하지 않을 때에도 Lachenbruch과정을 사용할 수 있었다. 슬랩과 외기 온도 분포를 함수로 미리 가정하면 Muncey / Spencer [6] 관계식을 이용하여 건물 벽면문제를 풀 수도 있다.

이 면적 평균 지중온도 개념의 한가지 모호한 점은 면적 평균을 수행해야 하는 깊이가 확실히 정해져 있지 않다는 것이다. 만약 그 깊이를 너무 크게 잡으면 가장자리 부근에서 일어나는 열손실 효과가 잘 나타나지 않을 것이며, 반면에 그 깊이를 너무 작게 잡으면 위에서 말한 벽면 두께의 효과 때문에 슬랩 가장자리에서의 열손실이 너무 크게 나타날 것이다. 실제로 1981년 1월에 NBC의 시험 건물에 대해서 열유속을 측정한 결과 슬랩 가장자리에서의 열손실 효과가 (4)식을 이용하여 계산하였을 때보다 크게 나타나지 않음을 알 수 있었다. 적절한 깊이를

정하는 데 좀 더 깊은 노력을 해야 하지만 슬랩의 월별 열손실량을 계산하는 데는 슬랩하부로 1 ft 깊이에서 면적 평균 온도를 사용하는 것이 좋은 근거가 된다는 것을 알 수 있었다.

6. 참고서적

1. Chapter 24, "Handbook of Fundamentals", ASHRAE, page 24.4, 1977.
2. R. S. Dill, W. C. Robinson, and H. E. Robinson, "Measurements of Heat Losses from Slab Floors," "NBS Building Material and Structures Report BMS 103", March 1943.
3. H. D. Bareither, A. N. Fleming, and B. E. Alberty, "Temperature and Heat Loss Characteristics of Concrete Floors Laid on the Ground," "University of Illinois Small Homes Council Technical Report", PB 93920, 1948.
4. A. H. Lachenbruch, "Three Dimensional Heat Conduction in Permafrost Beneath Heated Buildings," "Geological Survey Bulletin 1052-B", U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1957.
5. B. Adamson, "Soil Temperature Under Houses Without Basements," "Bygghandlingen", Nr 46 Transactions, 1964.
6. R. W. R. Muncey and J. W. Spencer, "Heat Flow into the Ground Under a House," "Energy Conservation in Heating, Cooling, and Ventilating Buildings", Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., Vol. 2, pp. 649-660, 1978.
7. H. Akasaka, "Calculation Methods of The Heat Loss Through a Floor and Basement Walls," "Transactions of the Society of Heating, Air-Conditioning, and Sanitary

Engineers of Japan, No. 7, pp. 21-35,
June 1978.

8. T. Kusuda, "Review of Current Calculation Procedures for Building Energy Analysis," National Bureau of Standards NBSIR 80-2068, July 1980.
9. T. Kusuda, "Thermal Response Factors for Multi-Layer Structures of Various Heat Conduction Systems" ASHRAE Transactions, pp. 250-269, Part I, 1969.
10. _____, "Monthly Normal Temperatures, Precipitations and Degree Days," U.S. Weather Bureau, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 1956.

부 록 A

1977년에 Muncey / Spencer 는 여러해 동안 연구한 결과를 발표했는데 [6], 그 속에 Lachenbruch 가 Green 함수로 풀 미분방정식을 [4] Fourier 급수로 풀 解를 실었다.

다음의 방정식들은 Muncey / Spencer 가 슬랩 표면의 온도를 V, 슬랩에서의 열유속을 Q, 그리고 슬랩 상부의 실내온도 X를 각각 나타낸 것이다.

$$V = \frac{T(x, y, 0, \theta)}{T_R} = \sum \sum T_{m, n} \cos\left(\frac{\pi m x}{f u}\right) \cos\left(\frac{\pi n y}{g v}\right) e^{i \omega \theta} \quad (A-1)$$

$$Q(x, y, 0, \theta) = \sum \sum W_{m, n} \cos\left(\frac{\pi m n}{f u}\right) \cos\left(\frac{\pi n y}{g v}\right) e^{i \omega \theta} = \frac{1}{R_a} [X - V] \quad (A-2)$$

where R_a = thermal resistance of the slab surface

$$X(x, y, 0, \theta) = \sum \sum Z_{m, n} \cos\left(\frac{\pi m x}{f u}\right)$$

$$\cos\left(\frac{\pi n y}{g v}\right) e^{i \omega \theta} \quad (A-3)$$

여기에서 u, v, f, g는 그림 A-1에 나타내었다.

또, Fourier 급수의 항들은 1에서 16까지 합하는 것이 좋겠다.

바닥에서의 평균 열손실량을 적분해보면

$$q = \int_{-v}^v \int_{-u}^u Q(x, y, 0, \theta) dx dy \quad (A-4)$$

$$= \sum_m \sum_n W_{m, n} \cos\left(\frac{\pi m x}{f u}\right) \cos\left(\frac{\pi n y}{g v}\right) e^{i \omega \theta}$$

$$= \frac{W_{0,0}}{fg} + \sum_{m=1}^{16} \frac{2 W_{m,0}}{fg} \left(\frac{\sin \frac{\pi m}{f}}{f}\right)^2$$

$$+ \sum_{n=1}^{16} \frac{2 W_{0,n}}{fg} \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{g}}{g}\right)^2 + \sum_{m=1}^{16} \sum_{n=1}^{16} \frac{4 W_{m,n}}{fg} \left(\frac{\sin \frac{\pi m}{f}}{f}\right)^2 \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{g}}{g}\right)^2$$

여기서

$$W_{m, n} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\pi m}{f u}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{g v}\right)^2 + j \frac{\omega \rho c}{k} \cdot z_{m, n}}}{1 + \sqrt{\left(\frac{\pi m}{f u}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{g v}\right)^2 + j \frac{\omega \rho c}{k} \cdot R_a}}$$

$$Z_{0,0} = \frac{1}{fg}$$

$$Z_{m,0} = \frac{2}{\pi m g} \sin\left(\frac{\pi m}{f}\right)$$

$$Z_{0,n} = \frac{2}{\pi n f} \sin\left(\frac{\pi n}{g}\right)$$

$$Z_{m,n} = \frac{4 m n}{\pi^2} \sin\left(\frac{\pi m}{f}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{g}\right)$$

$$\alpha = \frac{k}{c \rho} \quad \text{or} \quad \frac{\omega c \rho}{k} = \frac{\omega}{\alpha}$$

$$j = \sqrt{-1}$$

실내의 실외 온도사이의 전 열전달 계수를 구할 수도 있는 열유속에 관한 解인 (A-4)는 슬랩표면의 온도 V 대신에 실내의 온도 X를 슬랩 상부에서 일정하게 놓거나 그림 (A-1)과 같이 $-u \leq x \leq u$, $-v \leq y \leq v$ 인 구간에서 일정하게 놓고 구할 수 있다.

(A-4)의 解를 여러가지 슬랩문제에 적용하여 Muncey와 Spencer는 그림 A-2에 나타낸 바와 같이 표준 열저항 곡선 R_s 를 만들어 낼 수 있었다. 이것은 열전도계수 $1W/m \cdot k$ 인 토양 위에 $10m \times 10m$ 인 정사각형 슬랩에 관한 것이다. 이 R_s 에 관한 자료를 알게되면 다음 관계식을 사용하여 다른 슬랩들의 열저항 값을 구할 수도 있다.

$$R(\beta k, \alpha P, \ell, R_a) = F \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) R_s \left(k, P, \ell, \frac{R_a \beta}{\alpha} \right)$$

여기서

- α = 표준 슬랩에 대한 둘레의 비
- β = 표준 슬랩에 대한 열전도 계수의 비
- ℓ = 벽 두께
- F = 형상계수, 다음의 함수로 정의됨.

$$\frac{A}{[P/4]^2} \quad \text{[그림 A-3]}$$

- A = 슬랩의 면적
- P = 슬랩의 둘레 길이

그러나 이 Muncey / Spencer의 특정한 解는 가장자리를 경사지게 만든 슬랩의 계절별 열전달량을 계산하는데 적용할 수 없다.

MUNCEY/SPENCER SYSTEM

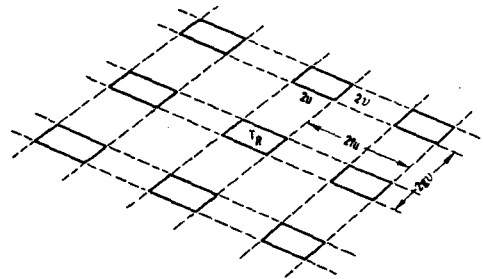


그림 A-1. Muncey / Spencer 슬랩 모델

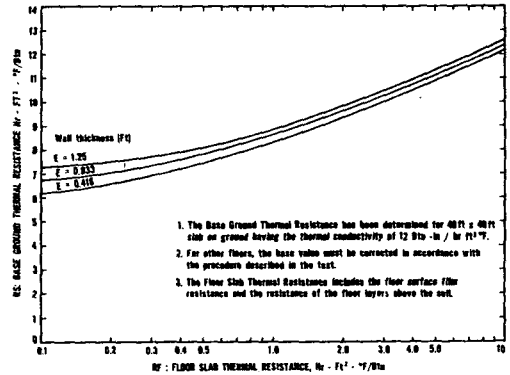


그림 A-2. 벽면 두께 ℓ 와 공기막 저항값 H가 변화할때 토양의 열전도계수 $1.0W/m \cdot k$ 와 둘레길이 $40m$ 인 사각형 슬랩에 대한 열 저항값

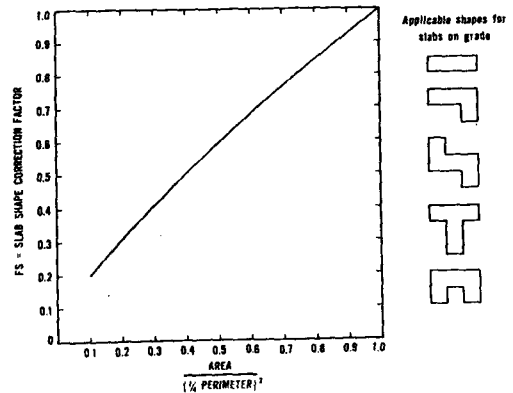


그림 A-3. 정사각형이 아닌 슬랩의 형상계수