

|||||||  
論 文  
|||||||

# 低溫用 貯藏탱크의 保溫計算을 위한 Sol-Air 溫度에 관한 研究

孫炳鎭\*·孟柱星\*·洪性旻\*\*

## A Study of the Sol-Air Temperature for the Calculation of Insulation in Cryogenic Storage Tank

Byung Jin Son\*·Joo Sung Maeng\*and Sung Min Hong\*\*

### ABSTRACT

In this thesis, the Sol-Air temperature distribution for the side-wall of a cylindrical cryogenic storage tank made of nonhomogenous composite layer was studied, in order to calculate the thermal load by Newton's cooling law, when the solar radiation was applied upon the side-wall.

In the analysis, the atmospheric slab was assumed to be horizontal and infinitely large, and the Sol-Air temperature, which was found by the Net-Radiation method considering the longwave radiation with surroundings, was used for boundary condition.

Energy equation and boundary conditions were normalized by the defined reference-temperature, and solved. The solutions were developed by the Fourier cosine series. Then, the Sol-Air temperature distribution for the side-wall of LNG storage tank was calculated.

---

\* 正會員, 漢陽大學校 工科學

\*\* 正會員, 漢陽大學校 大學院

NOMENCLATURE

$A$  ; surface area ( $m^2$ )  
 $B_{ij}$  ; elements of matrix defined in eq.(11)  
 $C_j$  ; elements of column matrix defined in eq. (11)  
 $E_{bj}$  ; total energy emitted from a surface  $j$  per unit time and per unit area ( $w/m^2$ )  
 $F_{ij}$  ; radiation shape factor for radiation from surface  $i$  to surface  $j$   
 $G$  ; irradiation ; total radiation incident upon a surface per unit time and per unit area ( $w/m^2$ )  
 $h$  ; convection heat transfer coefficient ( $w/m^2\text{°K}$ )  
 $I_{ND}$  ; normal direct insolation  
 $I_{th}$  ; total insolation  
 $J$  ; radiosity ; total radiation which leaves a surface per unit time and per unit area ( $w/m^2$ )  
 $k$  ; thermal conductivity ( $w/m\text{°K}$ )  
 $k_{rl}$  ; thermal conductivity in  $r$ -direction ( $w/m\text{°K}$ )  
 $k_{\theta l}$  ; thermal conductivity in  $\theta$ -direction ( $w/m\text{°K}$ )  
 $L$  ; vertical length of cylinder wall (m)  
 $LCT$  ; local civil time  
 $q_i$  ; net radiation input on the area  $A_i$  (w)  
 $q_r$  ; total net radiation incident upon the external wall surface  $i$  (w)  
 $r$  ; radius of cylinder (m)  
 $T$  ; temperature ( $\text{°K}$ )  
 $T_o$  ; reference temperature defined in eq. ( $\text{°K}$ )  
 $T_{ei}$  ; Sol-Air temperature in element of external wall surface ( $\text{°K}$ )

GREEK SYMBOLS

$\alpha$  ; absorptivity  
 $\alpha_o$  ; tilted angle of wall  
 $\beta$  ; altitude of sun  
 $\epsilon$  ; emissivity of external wall surface ( $=\epsilon_i$ )  
 $\epsilon_j$  ; emissivity of a arbitrary surface  
 $\eta$  ; dimensionless  $r$ -coordinate defined on eq. (23)  
 $\rho$  ; reflectivity  
 $\theta$  ; angular displacement between normal direction of wall surface and incident angle of solar radiation  
 $\sigma$  ; Stefan-Boltzman constant ( $w/m^2K^4$ )

SUBSCRIPTS

$a$  ; atmosphere ; external fluid  
 $c$  ; internal fluid  
 $e$  ; Sol-Air  
 $g$  ; ground  
 $i$  ; element of external wall surface ( $i=1, 2, \dots$ )  
 $j$  ; arbitrary surface ( $j=1, 2, \dots, g, a$ )  
 $\ell$  ; each layer of cylinder ( $\ell=I, II$  or  $III$ )

SUPERSCRIPTS

\* ; dimensionless variables defined in eq. (23)  
 ; the 2nd layer

### 1. 緒 論

境界條件으로 輻射를 고려하는 問題는 非線型性 때문에 傳熱計算이 매우 複雜하다. 이러한 複雜性을 해결하고 輻射傳熱 計算을 Newton의 冷却法則만으로 구할 수 있도록 옛부터 Sol-Air 溫度的 概念을 導入해 왔다.

最近에 우리나라에서는 LNG를 輸入하여 實用化할 계획이며, 現在 LNG 貯藏施設을 進行中에 있다. LNG는 極低溫(-164°C)을 維持시켜야 하므로 運送과 貯藏時 熱의 流入을 最大한 抑制하여야 한다. 따라서, LNG 貯藏탱크에서의 最適한 斷熱 層계를 찾기 위하여 傳熱量을 손쉽게 精確하게 計算할 수 있는 Sol-Air 溫度를 얻어내는 것을 目的으로 이 研究를 수행하였다.

Sol-Air 溫度를 사용하면 여러 面으로부터의 冷房負荷등을 간단한 프로그램으로 計算해낼 수 있으며, 長期間에 걸친 에너지 計算등도 전달함수를 사용하여 쉽게 계산할 수 있다.<sup>1)</sup> Mackey와 Wright<sup>2)</sup>는 壁과 지붕에 週期的으로 변하는 열흐름이 있는 경우에 대하여 Sol-Air 溫度的 概念을 사용하여 해석하였다. 또한 Alford 등<sup>4)</sup>은 Harmonic analysis를 適用하여 Sol-Air 溫度를 時間의 함수로 구해내고, 이것을 一次元 slab에 대하여 해석하여 slab 內壁의 溫度 分布를 구해내었다. 그러나, 이들에 의해 해석된 Sol-Air 溫度는 太陽 輻射의 영향은 고려되었지만, 垂直壁에 대하여 低溫輻射의 영향은 無視하여 왔다.<sup>1)5)6)</sup>

Ogunlesi<sup>7)</sup>와 Hoglund 등<sup>8)</sup>은 建物에 있어서 表面과 周圍와의 低溫 輻射를 無視할 수 없다는 測定結果를 발표하였으며, Unsworth와 Monteith<sup>9)</sup>는 이것을 토대로 傾射面에 入射하는 大氣輻射에 관하여 해석하였다. 그런데 大氣輻射에 관하여는 Bliss<sup>11)</sup>가 大氣面을 半球로 假定하는 것 보다는 一連의 水平無限 平板層으로 假定하여 해석하여야 한다고 主張하였다.

本 研究에서는 大氣面을 無限平板으로 假定하

고, Net-Radiation 方法<sup>12)</sup>을 사용하여 低溫輻射를 고려한 Sol-Air 溫度를 구하였다. 또한, Sol-Air 溫度를 이용하여 境界條件을 無次元化<sup>13)</sup>하였으며, 이것을 Fourier 級數로 展開하여 풀어, 低溫用 貯藏 탱크의 保溫計算에 영향을 주는 각 因子에 따른 Sol-Air 溫度 分布를 解析하였다.

### 2. 理論解析

#### 2.1 問題의 定義

本 研究에 사용되는 中空圓筒의 模型과 座標系는 Fig.1과 같고, 問題의 解析을 위하여 다음과 같은 假定을 세웠다.

- ① 壁은 二層形 複合材料로 이루어져 있다.
- ② 各層의 材質은 非等方性이다.
- ③ 熱흐름은 二次元( $r, \theta$ )으로 Z 方向의 溫度 變化를 無視한다.
- ④ 層과 層사이의 熱接觸抵抗은 없다.
- ⑤ 모든 熱物性值는 問題의 溫度 範圍에서 一定하다.
- ⑥ 모든 輻射表面은 不導性, 灰體性의 散亂 放射 및 反射面이다.
- ⑦ 問題의 모델에 대하여 大氣는 一定한 溫度를 갖는 無限平板으로 간주한다.

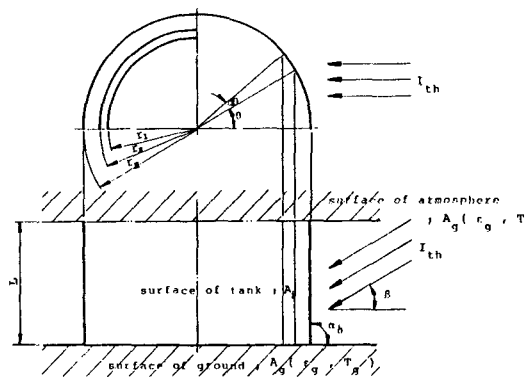


Fig.1 Physical Model and Coordinate System

⑧ 모든 輻射表面은 임의 순간에 溫度 및 G, J의 값을 一定하게 갖는다.

支配方程式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{r1} r \frac{\partial T_1}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (k_{\theta 1} \frac{\partial T_1}{\partial \theta}) = 0$$

$$r_1 < r < r_{II} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (k_{rII} r \frac{\partial T_{II}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (k_{\theta II} \frac{\partial T_{II}}{\partial \theta}) = 0$$

$$r_{II} < r < r_{III} \dots\dots\dots (2)$$

境界條件

$$r = r_1,$$

$$k_{r1} \frac{\partial T_1}{\partial r} = h_c (T_1 - T_c) \dots\dots\dots (3a)$$

$$r = r_{II},$$

$$T_1(r, \theta) = T_{II}(r, \theta) \dots\dots\dots (3b)$$

$$k_{r1} \frac{\partial T_1}{\partial r} = k_{rII} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} \dots\dots\dots (3c)$$

$$r = r_{III},$$

$$k_{rII} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} = -h_a (T_{II} - T_a) + q_r \dots\dots (3d)$$

$$\theta = 0, \pi,$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial \theta} = \frac{\partial T_{II}}{\partial \theta} = 0 \dots\dots\dots (3e)$$

2-2 問題의 解析

境界條件  $r = r_{III}$ 에서 輻射에 의하여 流入되는 에너지  $q_r$ 을 구하기 위하여 다음과 같은 Net-Radiation 方法을 사용하였다.

表面  $A_j$ 에 入射하는 全輻射에너지  $G_j$ 는 다음과 같다.

탱크 表面  $A_i$ 에 대하여

$$G_i = \sum_j G_{ij} + I_{ND} \cos \beta f(\theta);$$

$$f(\theta) = \begin{cases} \cos \theta, & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \end{cases} \dots\dots\dots (4a)$$

地表面  $A_g$ 에 대하여

$$G_g = \sum_j G_{gj} + I_{ND} \sin \beta \dots\dots\dots (4b)$$

大氣面  $A_a$ 에 대하여

$$G_a = \sum_j G_{aj} \dots\dots\dots (4c)$$

表面  $A_j$ 에서의 에너지 平衡을 생각하면 表面  $A_j$ 에 流入되는 正味 輻射 에너지는 表面에 入射되는 全輻射 에너지와 放出되는 全輻射 에너지의 差이다.

$$q_j / A_j = G_j - J_j \dots\dots\dots (5)$$

또한, 式(5)는 吸收된 에너지와 輻射한 에너지와의 差로 나타낼 수도 있으므로 다음의 式으로 表示될 수 있다.

$$q_j / A_j = \alpha_j G_j - \epsilon_j E_{bj} \dots\dots\dots (6)$$

따라서, 不導性 表面( $\alpha_j = \epsilon_j$ )  $A_j$ 에 대하여 式(5)와 式(6)을 結合하면 다음의 式을 얻을 수 있다.

$$J_j - (1 - \epsilon_j) G_j = \epsilon_j E_{bj} \dots\dots\dots (7)$$

탱크 表面  $A_i$ 에 대하여 다른 表面  $A_j$ 로부터 入射하는 入射力  $G_{ij}$ 는  $G_{ij}$ 와  $J_j$ 의 定義와 相互性 原理에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A_i G_{ij} = A_j J_j F_{ji} = A_i F_{ij} J_j \dots\dots\dots (8)$$

$$; G_{ij} = F_{ij} J_j \dots\dots\dots (9a)$$

地表面  $A_g$ 와 大氣面  $A_a$ 에 대하여도 같은 方式으로 다음의 式들이 成立된다.

$$G_{gi} = F_{gi} J_j \dots\dots\dots (9b)$$

$$G_{aj} = F_{aj} J_j \dots\dots\dots (9c)$$

式(9)를 式(4)에 代入하여 各 表面  $A_i$ 에 대한 全輻射 에너지  $G_i$ 를 구하고, 이를 式(7)에 代入하면 各 表面에 대한 래디오시티는 다음과 같다.

$$J_i - (1 - \epsilon_i) \sum_j F_{ij} J_j = \epsilon_i E_{bi} + (1 - \epsilon_i) I_{ND} \cos \beta f(\theta) \dots\dots (10a)$$

$$J_g - (1 - \epsilon_g) \sum_j F_{gj} J_j = \epsilon_g E_{bg} + (1 - \epsilon_g) I_{ND} \sin \beta \dots\dots (10b)$$

$$J_a - (1 - \epsilon_a) \sum_j F_{aj} J_j = \epsilon_a E_{ba} \dots\dots\dots (10c)$$

式(10)에서  $J_j$ 에 대한  $n+2$ 次 列벡터를  $\mathbf{J}$ ,  $J_j$ 의 係數에 대한  $n+2$ 次 正방行列을  $\mathbf{A}$ , 列벡터를  $\mathbf{C}$ 라 하고,  $\mathbf{A}$ 의 逆行列  $\mathbf{A}^{-1}$ 을  $\mathbf{B}$ 라고 한다면, 式(10)은 다음과 같은 行列型으로 表示될 수 있다.

$$\mathbf{A}\mathbf{J} = \mathbf{C}$$

$$; \mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{C} = \mathbf{B}\mathbf{C} \dots\dots\dots (11)$$

式(11)을 탱크 表面  $A_i$ 에 대하여 表示하면 다음과 같다.

$$J_i = B_{ii} \epsilon E_{bi} + B_{ii} (1 - \epsilon) I_{ND} \cos \beta f(\theta) + \sum_{j \neq i} B_{ij} C_j \quad \dots\dots\dots (12)$$

또한, 不導性 表面  $A_j$ 에 대한 래디오시티  $J_j$ 는 表面에서의 反射 에너지와 輻射 에너지와의 합으로 쓸 수 있으므로

$$J_j = \epsilon_j E_{bj} + \rho_j G_j \quad \dots\dots\dots (13)$$

式(5)와 式(13)에 의하여 表面  $A_j$ 에서의 正味輻射 에너지는 다음과 같다.

$$q_j / A_j = \frac{\epsilon_j}{1 - \epsilon_j} (J_j - E_{bj}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

따라서, 式(12)를 式(14)에 대입하면 탱크 表面  $A_i$ 에 대한 正味輻射 에너지를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_i / A_i = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \{ (B_{ii} \epsilon - 1) E_{bi} + B_{ii} (1 - \epsilon) I_{ND} \cos \beta f(\theta) + \sum_{j \neq i} B_{ij} C_j \} \quad \dots\dots\dots (15)$$

여기서, 平衡狀態에서 탱크 表面  $A_i$ 에 대한 에너지 平衡式을 살펴보면,

; 表面에 流入되는 正味輻射 에너지 + 對流에 의하여 流入되는 熱 = 内部로 傳達되는 熱.

$$q_i / A_i + h_a (T_a - T_i) = k_{rII} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (16)$$

또한, 式(16)에 Sol-Air 溫度의 개념을 도입하면 다음과 같이 Newton의 冷却法則 만으로 表示할 수 있다.

$$k_{rII} \frac{\partial T_i}{\partial r} = -h_a (T_i - T_{ei}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

式(15), 式(16), 式(17)에 의하여 탱크 表面  $A_i$ 에 대한 Sol-Air 溫度는 다음과 같다.

$$h_a T_{ei} = h_a T_a + q_i / A_i \quad \dots\dots\dots (18a)$$

$$= h_a T_a + \epsilon B_{ii} I_{ND} \cos \beta f(\theta) + \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \sum_{j \neq i} B_{ij} C_j - \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} (1 - B_{ii} \epsilon) E_{bi} \quad \dots\dots\dots (18b)$$

$$= h_a T_a + \epsilon Q_s f(\theta) + \epsilon Q_a - \epsilon D E_{bi} \quad \dots\dots\dots (18c)$$

여기서,  $Q_s = I_{ND} B_{ii} \cos \beta$ ,  $Q_a = \sum_{j \neq i} B_{ij} C_j / (1 - \epsilon)$ ,  $D = (1 - B_{ii} \epsilon) / (1 - \epsilon)$ 이다.

本 研究에서 탱크 表面은 볼록面이고, 大氣面 및 地表面과는 水直을 이루므로 다음과 같이 탱크面에 대한 形態係數를 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 0, \quad F_{ig} = \frac{1}{2} (1 - \cos \alpha_0) = \frac{1}{2},$$

$$F_{ia} = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha_0) = \frac{1}{2} \quad \dots\dots\dots (19a)$$

또한, 地表面  $A_g$ 는 탱크 表面  $A_i$ 에 비하여 대단히 크며, 大氣面  $A_a$ 는 無限平板으로 假定하였으므로 다음의 式이 成立된다.

地表面  $A_g$ 에 대하여;

$$F_{gi} = 0, \quad F_{gg} = 0, \quad F_{ga} = 1 \quad \dots\dots\dots (19b)$$

大氣面  $A_a$ 에 대하여;

$$F_{ai} = 0, \quad F_{ag} = 1, \quad F_{aa} = 0 \quad \dots\dots\dots (19c)$$

式(19)의 形態係數를 式(10)에 대입하면 다음의 式을 얻을 수 있다.

$$J_j - \frac{1}{2} (1 - \epsilon) (J_g + J_a) = \epsilon E_{bj} + (1 - \epsilon) I_{ND} \cos \beta f(\theta) \quad \dots\dots\dots (20a)$$

$$J_g - (1 - \epsilon_g) J_a = \epsilon_g E_{bg} + (1 - \epsilon_g) I_{ND} \sin \beta \quad \dots\dots\dots (20b)$$

$$J_a - (1 - \epsilon_a) J_g = \epsilon_a E_{ba} \quad \dots\dots\dots (20c)$$

여기서, 式(20a)에 의하여 式(12) 및 式(18c)의 係數들이 결정되므로 式(18)의 Sol-Air 溫度는 다음과 같다.

$$T_{ei} = T_a + \frac{\epsilon}{h_a} \{ I_{ND} \cos \beta f(\theta) + \frac{1}{2} (J_g + J_a) - \sigma E_{bi} \} \quad \dots\dots\dots (21a)$$

$$= T_a + \frac{\epsilon}{h_a} \{ Q_s f(\theta) + Q_a - \sigma T_i^4 \} \quad \dots\dots\dots (21b)$$

따라서,  $r = r_{III}$ 에서 境界條件 式(3d)는 式(17)로 쓸 수 있고, 이때의 Sol-Air 溫度  $T_{ei}$ 는 式(21)에 의하여 구할 수 있다.

本 研究에서는 에너지 方程式의 解析을 위하여 다음과 같은 基準溫度를 定義한다. 式(21b)의 右邊에서 輻射에 의하여 外壁에 流入되는 熱量  $\epsilon Q_s f(\theta) + \epsilon Q_a$ 를  $\epsilon \sigma T_0^4$ 로 나누어 無次元化하고, 이것을 Fourier cosine 級數로 展開할 때  $\alpha_0 = 1$  되는 溫度  $T_0$ 를 基準溫度로 定義한다.

$$Q^* = \frac{\epsilon Q_s f(\theta) + \epsilon Q_a}{\epsilon \sigma T_0^4} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\theta \quad \dots\dots\dots(22a)$$

$$\begin{aligned} \sigma T_0^4 &= \frac{Q_s}{\pi} + Q_a, \quad a_1 = \frac{Q_s}{2\sigma T_0^4}, \\ a_n &= \frac{2Q_s \cos \frac{n\pi}{2}}{\sigma T_0^4 (1-n^2)} \quad (n \geq 2) \dots\dots\dots(22b) \end{aligned}$$

本 研究에서 사용된 無次元 變數는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T^* &= \frac{T - T_0}{T_0}, \quad \eta = \left(\frac{k_{\theta 1}}{k_{r1}}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{r - r_1}{r_{II}}, \\ \eta' &= \left(\frac{k_{\theta II}}{k_{rII}}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{r - r_{II}}{r_{II}}, \quad k_i^* = \frac{k_{\theta i}}{k_{r i}}, \\ k_r^* &= \frac{k_{rII}}{k_{r1}}, \quad k_{\theta}^* = \frac{k_{\theta II}}{k_{\theta 1}}, \quad k_c^* = \frac{k_{r1}}{k_c}, \\ k^* &= \frac{k_{\theta II} (r_{III} - r_{II})}{r_{II}^2 \epsilon \sigma T_0^3}, \quad h^* = \frac{h_0}{\epsilon \sigma T_0^3}, \\ N_u &= \frac{h_c L}{k_c}, \quad m = \frac{r_{II}}{L} \dots\dots\dots(23) \end{aligned}$$

本 研究의 모델은  $(r_{III} - r_{II})/r_{II} \ll 1$  인 경우이므로 微分이 아닌  $r$  을  $r_{II}$  라고 假定한다. 따라서, 式(23)을 사용하여 支配方程式과 境界條件을 無次元化하면 다음과 같다.

無次元 支配方程式

$$\frac{\partial^2 T_I^*}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 T_I^*}{\partial \theta^2} = 0, \quad 0 < \eta < \eta_1 \dots\dots\dots(24)$$

$$\frac{\partial^2 T_{II}^*}{\partial \eta'^2} + \frac{\partial^2 T_{II}^*}{\partial \theta^2} = 0, \quad 0 < \eta' < \eta'_{II} \dots\dots\dots(25)$$

無次元 境界條件

$$\begin{aligned} \eta = 0 \\ \frac{k_c^* (k_i^*)^{\frac{1}{2}}}{Nu \cdot m} \frac{\partial T_I^*}{\partial \eta} = T_I^* - T_c^* \quad \dots\dots\dots(26a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta' = 0 \quad (\eta = \eta_1) \\ T_I^*(\eta, \theta) = T_{II}^*(\eta', \theta) \quad \dots\dots\dots(26b) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T_I^*}{\partial \eta} = (k_r^* k_{\theta}^*)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\partial T_{II}^*}{\partial \eta'} \quad \dots\dots\dots(26c)$$

$$\begin{aligned} \eta' = \eta'_{II} \\ \left(\frac{k^*}{\eta'_{II}}\right) \frac{\partial T_{II}^*}{\partial \eta'} = -h^* (T_{II}^* - T_c^*) \quad \dots\dots\dots(26d) \end{aligned}$$

$$\theta = 0, \pi$$

$$\frac{\partial T_I^*}{\partial \eta} = \frac{\partial T_{II}^*}{\partial \eta'} = 0 \quad \dots\dots\dots(26e)$$

變數分離法을 使用하여 式(24), 式(25)를 풀고, 齊次 境界條件 式(26e)에 의하여 固有值를 구하면 다음의 式이 얻어진다.

$$\begin{aligned} T_I^*(\eta, \theta) &= A_0 \eta + B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \cosh n\eta \\ &+ c_n \sinh n\eta) \cos n\theta \dots\dots\dots(27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{II}^*(\eta', \theta) &= A'_0 \eta' + B'_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (d_n \cosh n\eta' \\ &+ e_n \sinh n\eta') \cos n\theta \dots\dots\dots(28) \end{aligned}$$

또한, 式(26d)에서 無次元 Sol-Air 溫度  $T_e^*$  는  $\theta$  의 함수이므로 Fourier cosine 級數로 展開하여 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$T_e^* = T_{\infty} + \sum_{n=1}^{\infty} T_n \cos n\theta \quad \dots\dots\dots(29)$$

Net-Radiation 方法에 의하여 구한 Sol-Air 溫度 式(21b)를 無次元化하면 다음의 式이 成立된다.

$$T_e^* = T_a^* + \frac{1}{h^*} \{Q^* - (1 + 4 T_{II}^*)\} \quad \dots\dots\dots(30)$$

따라서, 境界條件 式(26)과 無次元 溫度 式(27), 式(28), 式(29), 式(30)에 의하여 다음과 같은 係數行列이 求해진다.

固有值  $\lambda = 0$

$$\begin{bmatrix} E & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \eta_1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -H & 0 & 0 \\ M + h^* \eta'_{II} & 0 & 0 & h^* & -h^* \\ 0 & 0 & 4\eta'_{II} & 4 & h^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \\ A'_0 \\ B'_0 \\ T_{e0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_c^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ h^* T_a^* \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(31)$$

$\lambda = n \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$

$$\begin{bmatrix} -1 & En & -1 & 0 & 0 \\ \cosh n\eta_1 & \sinh n\eta_1 & 0 & 0 & 0 \\ \sinh n\eta_1 & \cosh n\eta_1 & 0 & -H & 0 \\ 0 & 0 & Mn \sinh n\eta'_{II} & Mn \cosh n\eta'_{II} & -h^* \\ 0 & 0 & +h^* \cosh n\eta'_{II} & +h^* \sinh n\eta'_{II} & h^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_n \\ c_n \\ d_n \\ e_n \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_n \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(32)$$

여기서, 常數  $E, H, M$  및  $a_n$  은 다음과 같다.

$$E = \frac{k_c^* (k_1^*)^{\frac{1}{2}}}{Num}, \quad H = (k_r^* k_o^*)^{\frac{1}{2}}$$

$$M = \frac{k^*}{\eta_{II}}, \quad a_1 = \frac{Q_s}{2\sigma T_0^4}$$

$$a_n = \frac{2Q_s \cos \frac{n\pi}{2}}{\sigma T_0^4 (1-n^2)} \quad (n \geq 2)$$

式 (31), 式 (32) 에 의하여  $T_{eo}, T_{em}$  은 다음과 같다.

$$T_{eo} = - \frac{4T_c^* M - h^* T_a^* \{M + h^*(\eta'_{II} + H(\eta_r + E))\}}{h^* \{M + (h^* + 4)(\eta'_{II} + H(\eta_r + E))\}} \dots\dots\dots (33)$$

$$T_{em} = \frac{\left\{ a_n \{ Mn \sinh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \cosh n \eta'_{II} \} \right.}{\left. \left\{ (En \sinh n \eta_1 + \cosh n \eta_1) \times (M \cosh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \sinh n \eta'_{II}) + H (E \cosh n \eta_1 + \sinh n \eta_1) \times (M \sinh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \cosh n \eta'_{II}) \right\} \right.}{\left. \left\{ h^* [ \{ 4 \cosh n \eta'_{II} + (M \sinh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \cosh n \eta'_{II}) \} \times \{ (E \sinh n \eta_1 + \cosh n \eta_1) (M \cosh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \sinh n \eta'_{II}) + H (E \cosh n \eta_1 + \sinh n \eta_1) (M \sinh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \cosh n \eta'_{II}) \} - 4 (E \sinh n \eta_1 + \cosh n \eta_1) \{ (M \cosh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \sinh n \eta'_{II}) \cosh n \eta'_{II} - (M \sinh n \eta'_{II} + (h^* + 4) \cosh n \eta'_{II}) \sinh n \eta'_{II} \} \right. \right.} \dots\dots\dots (34)$$

### 3. 解析結果 및 考察

Fig.1 의 제 1 층과 제 2 층의 材料를 各各 *olurethane* 과 *prestressed concrete* 로 할 경우 다음의 資料를 使用하여 *Sol-Air* 溫度의 分布를 구하였다.

$$r_1 = 31.38 \text{ m}, \quad r_{II} = 31.56 \text{ m}, \quad r_{III} = 32.46 \text{ m}, \\ L = 41.03 \text{ m}, \quad I_{th} = 861 \text{ w/m}^2, \quad T_g = 301.75^\circ\text{K}, \\ T_a = 303.95^\circ\text{K}, \quad T_c = 109.15^\circ\text{K}, \quad LCT = 12, \\ N_u = 100, \quad h_a = 17 \text{ w/m}^2\text{K}, \quad \sigma = 5.669 \times 10^{-8} \\ \text{w/m}^2\text{K}^4, \quad \beta = 66.1^\circ, \quad \epsilon = 0.45, \quad \epsilon_g = 0.8, \\ \epsilon_o = 0.9$$

이때, *Sol-Air* 溫度는  $\theta = 0^\circ$  때  $40.63^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 90^\circ$  때  $32.75^\circ\text{C}$  가 計算되었다.

Fig. 2 는 탱크 表面의 放射率이 輻射 熱傳達 에 미치는 影響을 解析한 것이다. 表面이 *concrete* 로 되어 있고, 어두운 色으로 칠해진 境遇 放射率( $\epsilon$ )은 0.9 를 使用하였고, 밝은 色으로 칠해진 경우는 0.45 를 使用하였다.<sup>14)</sup> 本 研究에 의하면 어두운 色으로 表面이 칠해진 경우의 *Sol-Air* 溫度가  $\theta = 0^\circ$  때 19.2% ( $7.8^\circ\text{C}$ ),  $\theta = 90^\circ$  때 4.6% ( $1.51^\circ\text{C}$ ) 높아졌다.

Fig. 3 은 같은 水平面 日射量 ( $I_{th} = 861 \text{ w/m}^2$ ) 에 대해 *LCT* (地方時)의 影響을 解析하였다. *LCT* 는 太陽의 高度에 影響을 미치며, 入射量이 最大가 되는 方向을 變化시킨다. *LCT* 가 14 인 경우 太陽의 高度( $\beta$ )는  $54.8^\circ$  로 낮아졌고,  $\theta = 0^\circ$  인 方向은  $55^\circ\text{SW}$  이며 이때의 *Sol-Air* 溫度는  $45^\circ\text{C}$  로 10.8% ( $4.37^\circ\text{C}$ ) 높게 計算되었다. 그러므로, 最大 *Sol-Air* 溫度가 存在하는 時間과 方向을 알기 위해서는 日射量의 分布와 더불어 太陽의 位置와 상관되는 影響을 반드시 고려하여야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 는 주위 大氣의 對流熱傳達係數 ( $h_a$ )가 *Sol-Air* 溫度에 미치는 影響을 解析한 것이다. 탱크 表面이 *cement concrete* 로 되어 있는 경우 주위 流體의 流動速度가  $1.23 \text{ m/s}$  이면  $h_a = 17 \text{ w/m}^2\text{K}$  를 使用한다.<sup>14)</sup> 여기서,  $h_a = 34 \text{ w/m}^2\text{K}$  인 경우  $\theta = 0^\circ$  에서 11.47% ( $4.66^\circ\text{C}$ ),  $\theta = 90^\circ$  에서 2.87% ( $0.94^\circ\text{C}$ ) 낮아졌다. 그러므로 일반적으로 알려진 바와 같이 對流에 의한 熱傳達이 *Sol-Air* 溫度에 미치는 影響은 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 는 地面反射率 ( $\rho_g$ )의 影響에 대한 *Sol-Air* 溫度의 變化를 나타낸 것이다. 地面反射率이 0.2 에서 0.45 로 높아진 경우  $\theta = 0^\circ$  때 6.1% ( $2.48^\circ\text{C}$ ),  $\theta = 90^\circ$  때 7.93% ( $2.93^\circ\text{C}$ ) 높아졌다. 그러므로 地面의 反射에 의한 影響은 地面의 再輻射에 의한 影響에 비하여 상당히 크며, 그 影響은  $\theta$  와 무관하게 나타났다. 이 사실은 地面을 散亂反射 및 放射面으로 假定한 사실과 일치하는 것이다.

Fig. 6 은 大氣放射率( $\epsilon_a$ )이 Sol-Air 溫度에 미치는 영향을 解析한 것이다. 大氣放射率은 주로 大氣中에 包含되어 있는 水蒸氣 및 炭酸가스의 放射率과 상관 관계를 갖는다.<sup>11)</sup>  $\epsilon_a$ 가 0.9 인 경우와, 0.99 인 경우의 比較에 있어서 전체적으로 대략 0.5% ( $0.17^\circ\text{C} \sim 0.15^\circ\text{C}$ ) 減少하여 대체적으로 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 또한,  $\theta$ 의 변화에 무관하게 그 차이가 나타난 것도 알 수 있었다.

Fig. 7 은 鉛直壁에서의 低溫輻射가 Sol-Air 溫度에 주는 영향을 알기 위해, ASHRAE에 소개된 方法으로 구한 結果와 比較한 것이다. 本研究에 의하면 ASHRAE의 結果에 비해  $\theta = 0^\circ$  때 6% ( $2.7^\circ\text{C}$ ),  $\theta = 90^\circ$  때 9% ( $1.69^\circ\text{C}$ ) 減少하였다. 여기에서 보는 바와 같이 鉛直壁에 대한 低溫輻射의 영향은 상당히 크며, 결코 무시되어서는 안된다는 것을 알 수 있다.

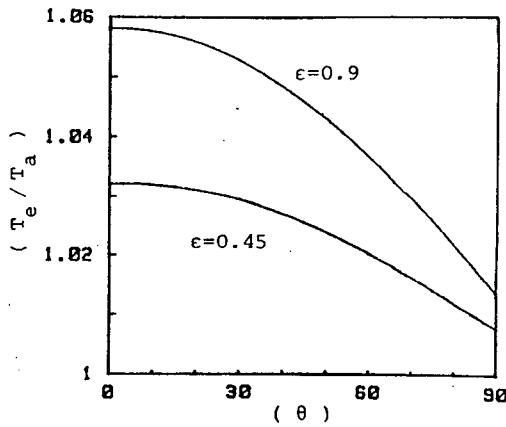


Fig. 2 Effect of Surface Emissivity ( $\epsilon$ )

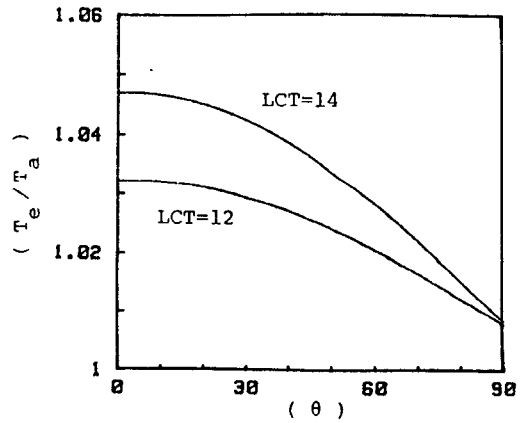


Fig. 3 Effect of Local Civil Time (LCT)

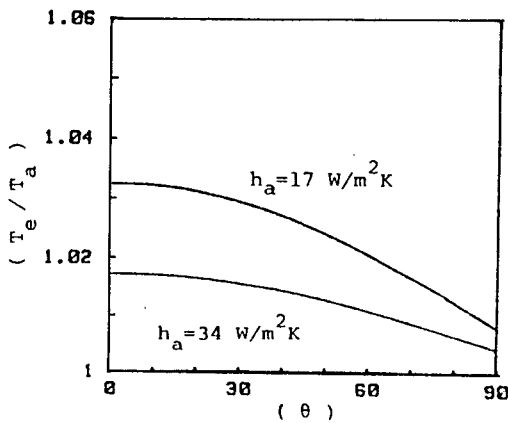


Fig. 4 Effect of Convection Heat Transfer Coefficient ( $h_a$ )

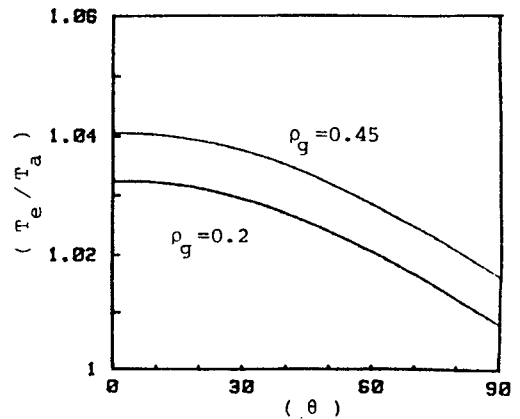


Fig. 5 Effect of Ground Reflectivity ( $\rho_g$ )



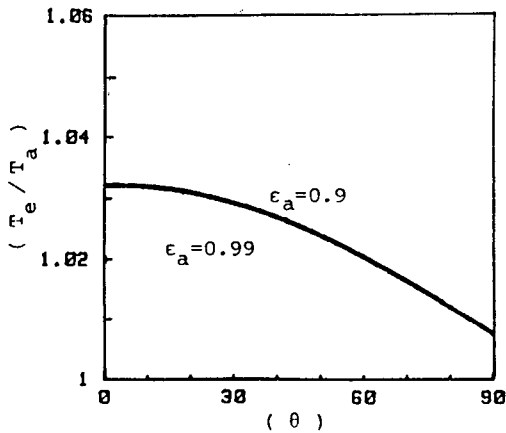


Fig. 7 Comparison with ASHRAE's Result

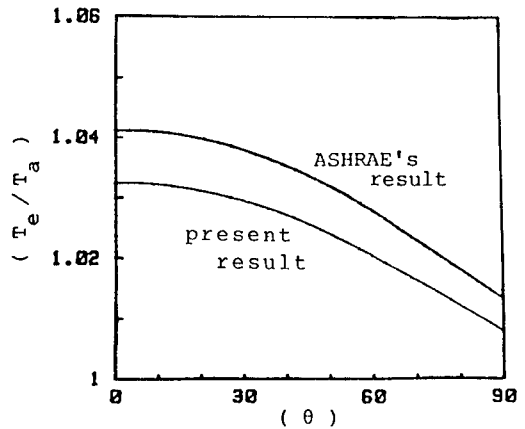


Fig. 8 Effect of Atmospheric Emissivity( $\epsilon_a$ )

#### 4. 結 論

1. 鉛直壁에서의 低溫輻射가 Sol-Air 溫度에 미치는 影響은 상당히 크다. 우리나라 夏節期의 경우, 低溫輻射를 無視하는 경우에 비하여 6% 減少하였다.
2. 大氣放射率의 變化는 Sol-Air 溫度的 變化에 거의 影響을 주지 않는다. 放射率 10%의 變化에 대하여 약 0.5% 정도의 變化를 나타내었다.
3. 地面反射率에 의한 影響은 地面再輻射에 의한 影響에 비하여 상당히 크다. 실제 變化 가능한 地面反射率의 變化( $\rho_g = 0.2 \sim 0.45$ )에 대하여 6% 以上の 차이를 나타내었다.

#### REFERENCE

1. Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, "Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design", 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 131-151, 184-190, 234-246, 1981
2. C.O. Mackey and L. T. Wright, Jr., "Periodic Heat Flow-Homo-geneous Walls or Roofs", ASHVE Transactions, Vol. 52, p. 293, 1944.
3. C.O. Mackey and L. T. Wright, Jr., "Periodic Heat Flow-Composite Walls of Roofs", ASHVE Transactions, Vol. 52, p. 283, 1946.
4. J. S. Alford, J. E. Ryan, and F. O. Urban, "Effects of Heat Storage and Variation in Outdoor Temperature and Solar Intensity on Heat Transfer through Walls," ASHVE Transactions, Vol. 45, p. 387, 1939.
5. ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Ventilating and Air Conditioning Engineers New York pp. 26.1-6, 27, 1-9, 1981.
6. J. L. Threlkeld, "Thermal Environmental Engineering", Prentice-Hall, New York, pp. 367-380, 1962.
7. O. Ogunlesi, "Solar Radiation and Thermal Gradients in Building Units", Build

- Sci. Vol. 1, pp.1-20, 1965.
8. B. L. Hoglund, C. D. Mital, and D. G. Stephenson, "Surface Temperature and Heat Fluxes for Flat Roofs", *Build. Sci. Vol. 2*, pp. 29-36, 1967.
9. M. J. Unsworth, and J. L. Monteith, "Longwave Radiation at the Ground (1): Angular Distribution of Incoming Radiation", *Quart. J. Roy. Soc. Vol. 101*, pp. 1-13, 1975.
10. R. J. Cole, "The Longwave Radiation Incident upon Inclined Surfaces", *Solar Energy, Vol. 22*, pp. 459-462, 1979.
11. R. W. Bliss, Jr., "Atmospheric Radiation near the Surface of Ground: A Summary for Engineers", *Solar Energy, Vol. 5*, pp. 103-120, 1961.
12. J. P. Holman, "Heat Transfer", 5th Ed., McGraw-Hill, pp. 330-332, 368-370, 1981.
13. Kim, Jeong Lyeol, "A Study on Side-Wall Temperature Distribution for a Cryogenic Cylindrical Storage Tank Subjected to Solar Radiation", Master's Thesis, Hanyang Univ., 1984.
14. Svzokolay, "Solar Energy and Building," 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 51-52, 1978.
-