

溫突面の 放熱量 算定方法에 관한 研究

A Calculation Method on Heat Flux from Ondol Floor Surface

孫 章 烈*, 安 炳 旭**, 方 昇 基***
Jang Yeul Sohn, Byung Wook Ahn, Seung Ki Pang

ABSTRACT

Until recently there was a lack of reliable performance data for the design and operation of Ondol heating systems.

This paper presents a calculation method on heat flux from Ondol floor surface. Total heat flux from floor consists of radiation and convection component. In order to analyse the characteristics of both radiation and convection heat flux, each surface temperature is measured and several temperatures near each wall are measured vertically and horizontally in a practical Ondol heating space.

Radiation heat flux is calculated and analysed by Gebhart's Absorption Factor Method with the consideration of instantaneous radiant exchanges. Convection heat output is derived from the vertical temperature profiles near floor. The vertical temperature profiles could be expressed by nonlinear regression equation models and convection coefficients could be estimated by the equations.

As a result, radiation, convection and total heat flux are suggested by the expression of difference between floor surface and room air temperature.

1. 머리말

溫突은 우리 住居의 暖房수단으로 널리 애용되고 있으나 溫突暖房空間을 對象으로 한 合理的인 暖房負荷의 計算方法이나 溫突面으로부터 放出되는 放熱량의 精確한 평가방법은

아직 定立되어 있지 않은 실정이다.

溫突바닥面으로 부터 放熱량을 계산하기 위하여서는 일반적으로 室溫과 바닥表面溫度를 設定하고 構造體의 熱貫流率을 利用하여 各 內壁의 表面溫度를 구한 후 바닥面으로 부터의 放熱량을 對流成分에 의한 것과 輻射成分

* 正會員, 漢陽大 副教授, 工博

** 正會員, 忠清實業專門大學 助教授

*** 正會員, 漢陽大 大學院

**** 이 論文은 韓國科學財團 目的基礎研究費 (1987年 10月 개시) 에 의하여 研究되었음.

에 의한 것으로 區分하여 계산한다.

對流成分에 의한 放熱量은 對流熱傳達率의 概念을 적용하여 비교적 간단하게 계산하고 있으나, 對流熱傳達現狀은 暖房空間의 特性이나 暖房條件에 따라서 일정하지는 않다. 對流熱傳達現狀에 관한 研究는 제 外國에서 오래 전부터 이루어져 많은 성과를 거두고 있으나 이러한 研究 結果들은 서로 약간씩 다른 값을 제시하고 있다. 溫突暖房空間의 熱環境 解析을 위해서도 이와 같은 研究結果들을 종합하여 적용하고 있으나 여기에는 어느 정도 오차가 있을 것으로 판단된다.

또한, 輻射熱傳達量의 計算은 복잡하고 까다롭기 때문에 實用上으로는 매우 불편하다.

本 研究에서는 溫突暖房空間의 바닥面으로부터 放出되는 放熱量을 實用的으로 계산하여 效果의인 난방계획을 수립할 수 있는 방법을 제안하는 것을 目的으로 하였으며 실제의 溫水溫突 난방공간을 대상으로 室內外 기온, 各벽체의 內表面 溫度, 수직·수평온도 분포를 實測하고 分析하였다.

放熱量의 分析은 輻射熱傳達量과 對流熱傳達量으로 分離하여 검토하였으며, 輻射熱傳達量은 室內 相互輻射를 고려한 Gebhart의 Absorption Factor Method를 적용하여 구하였고 對流熱傳達量은 바닥表面附近의 溫度分布를 이용하여 도출하였다.

2. 放熱量에 관한 基本理論

溫突 바닥面으로부터의 熱流 q_p [kcal/m² h]는

$$q_p = q_{rp} + q_{cvp} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

q_{rp} : 輻射에 의한 熱流 [kcal/m²h]

q_{cvp} : 對流에 의한 熱流 [kcal/m²h]

로 表現할 수 있다.

식 (1)을 다시 나타내면 다음 식과 같다.*3)

$$q_p = \epsilon_p \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - MRT_p^4) + \alpha_{cv}(t_p - t_R) \dots\dots\dots (2)$$

$$= \epsilon_p \cdot \sigma \cdot k(T_p - MRT_p) + \alpha_{cv}(t_p - t_R) \dots\dots\dots (3)$$

$$= \epsilon_p \cdot \sigma \cdot k' \cdot (T_p - T_R) + \alpha_{cv}(t_p - t_R) \dots\dots\dots (4)$$

$$= \alpha_r(t_p - t_R) + \alpha_{cv}(t_p - t_R) \dots\dots (5)$$

$$= \alpha(t_p - t_R) \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

ϵ_p : 바닥面의 輻射率 [-]

σ : Stefan - Boltzmann 상수 [-]

T : 面 i 의 絶대온도 [°K]

$$MRT_p^4 = \sum_{i=1}^n B_{pi} \cdot T_i^4 [^\circ K^4] \dots\dots\dots (7)$$

B_{pi} : 바닥面에 대한 面 i 의 Absorption Factor [-]

$T_p(t_p)$: 바닥表面溫度 [°K] ([°C])

$T_R(t_R)$: 실내기온 [°K] ([°C])

α_r : 복사열 전달율 [kcal/m²h °C] (= $\epsilon_j \cdot \sigma \cdot k'$)

α_{cv} : 대류열 전달율 [kcal/m²h °C]

α : 열전달율 [kcal/m²h °C] (= $\alpha_r + \alpha_{cv}$)

$$k = \frac{T_p^4 - MRT_p^4}{T_p - MRT_p} \dots\dots\dots (8)$$

$$k' = \frac{T_p^4 - MRT_p^4}{T_p - T_R} \dots\dots\dots (9)$$

한편, [Fig 1]에서 表面에서의 對流에 의한 熱流 q_{cv} 는

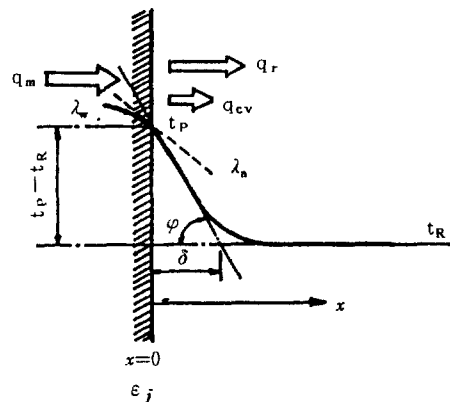


Fig. 1. Heat Transfer Through a Wall Surface

$$q_{cv} = -\lambda_a \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} = \alpha_{cv} (t_P - t_R) \dots (10)$$

로 나타낼 수 있으므로 *5), 對流熱傳達率 α_{cv} 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_{cv} = \frac{-\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} \cdot \lambda_a}{t_P - t_R} = \frac{\tan \varphi \cdot \lambda_a}{t_P - t_R} = \frac{\lambda_a}{\delta} [\text{kcal} / \text{m}^2 \text{h}] \dots (11)$$

여기서,

- λ_a : 空氣의 熱傳導率 [kcal / mh · c]
(= 0.0207 { 1 + t_R / (t_R + 273.15) })
- δ : 境界層의 두께 [m]

또, 무차원수인 Nusselt 수는 Grashof 수와 Prandtl 수에 의하여 다음 식과 같이 표현된다.*5)

$$N_{NU} = C(N_{Gr} \cdot N_{Pr})^n \dots (12)$$

여기서,

- N_{NU} : Nusselt Number
- N_{Gr} : Grashof Number
- N_{Pr} : Prandtl Number

또는,

$$\alpha_{cv} \cdot L / \lambda_a = C [(C_P \cdot \mu / \lambda_a) (\beta \rho^2 g L^3 \Delta t / \mu^2)]^n \dots (13)$$

여기서,

- L : 대표길이 [m]
- C_P : 空氣의 定壓比열 [kcal / kg · °C]
- μ : 空氣의 점성계수 [kg/h · m]
- β : 空氣의 체팽창계수 [1/°C]
- ρ : 空氣의 밀도 [kg/m³]
- g : 중력가속도 [m/h²]
- Δt : 표면온도와 기온의 差 [°C]

식(12)와 식(13)에서 C 와 n 은 조건에 따라서 달라지는 계수이며 N_{Gr} 과 N_{Pr} 의 곱은 Rayleigh 수 N_{Ra} 이다.

3. 測定概要

溫突暖房空間에서 바닥面으로 부터의 熱傳達特性을 把握하기 위하여 경기도 부천시 역곡동에 소재하고 있는 C 아파트에서 한 세대의 안방을 測定對象室로 선정하였다. C 아파

< Table 1 > Measuring Items and Method

Items		Measuring Point	Instrument	Measuring Period
out air temperature		• east side, north side	• sensor : copper-constant thermocouple (ϕ 0.3 mm)	• preliminary test Dec 5 ~ Dec 9 1987
room air temperature		• centre of the room		
neighbouring room temp	living room	at 1.15 m up from floor	• recording YODAC85 S DATA LOGGER	• main test Dec 10 ~ Dec 24 1987
	bath room			
inside surface temperature	ceiling	• 6 points		
	inside wall	• south wall 6 points		
		• west wall 4 points		
	outside wall	• north wall 6 points • east wall 4 points		
	window	• 2 points		
floor	• 22 points			
vertical and horizontal temperature		• total 70 points referring to [Fig 3]		
air velocity		• near each wall surface • centre of the room	• Hybrid anemometer	

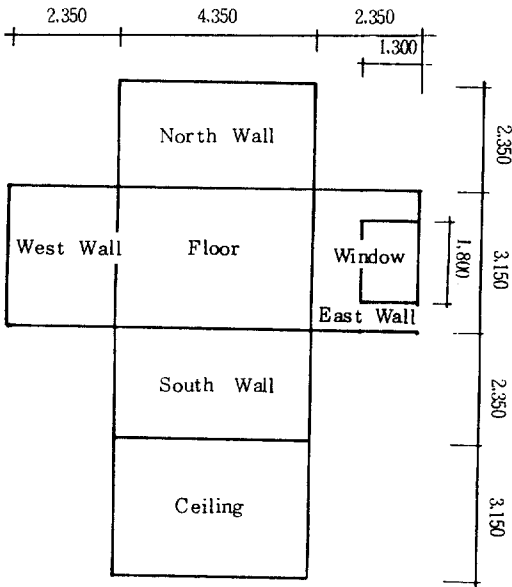


Fig. 2. Room Dimensions

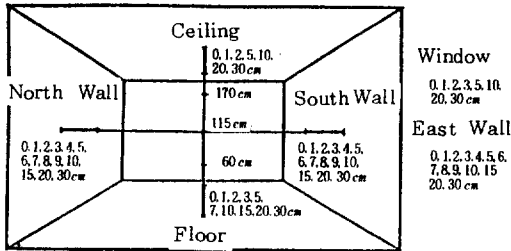


Fig. 3. Measuring Points for Horizontal and Vertical Temperature

트는 4층 건물이며 측정대상 세대는 이중 4층 북측에 위치하고 있고 專用面積은 78.16 m²이다.

[Fig 2]는 측정대상실의 전개도를 나타낸 것이며 < Table 1 >은 測定項目 및 方法을 나타낸 것이다. [Fig 3]은 수직·수평온도 분포를 측정하기 위한 측정점을 표시한다.

4. 結果分析 및 考察

가. 室內 溫度分布 特性

1) 바닥表面溫度 및 室溫分布

測定對象空間을 構成하고 있는 各 內表面의 溫度와 室溫, 外氣溫의 變化 양상을 全 測定期間에 걸쳐 나타내면 [Fig 4]와 같다.

[Fig 4]에서 室溫 및 外氣溫을 제외한 各 內表面 溫度는 各 內表面의 平均溫度이다.

測定期間中 外氣溫은 -7.0~9.4℃ 사이에서 變化하였고, 加熱面인 바닥面의 平均表面溫度는 11.0~31.6℃ 사이에서 變化하였다. 바닥表面溫도의 變化가 비교적 심한 것은 Boiler와 순환펌프가 室內에 설치한 Thermostat와 의 연계에 의하여 作動하였기 때문이다.

室溫은 全測定期間에 걸쳐 10.2~24.6℃ 사이에서 變化하였으며 바닥面을 제외한 타 벽체 표면 보다는 높은 溫度를 기록하였다. [Fig 4]에서 보는 바와 같이 室溫을 포함한 各 壁體의 內表面 溫度는 바닥表面溫도의 變化와 비슷함을 알 수 있으며 이는 外氣溫 보다는 바닥表面溫도의 영향을 더 많이 받기 때문으로 생각된다. 반면, 유리창문의 경우에는 바닥溫 보다는 外氣溫의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 이것은 유리창의 熱性能이

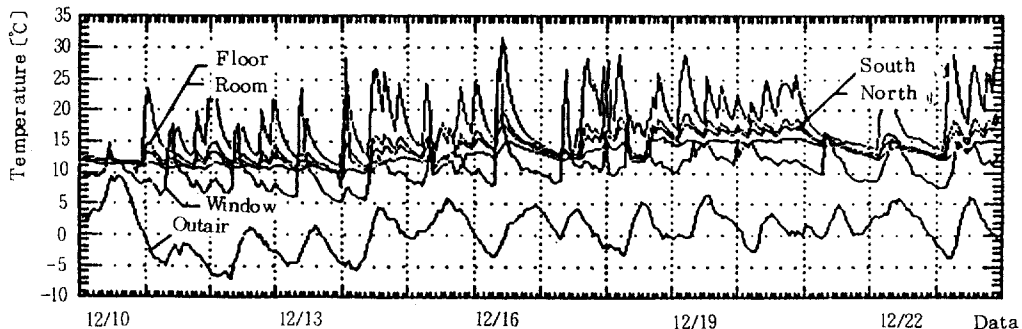


Fig. 4. Air Temperature and Each Temperature Fluctuation

벽체에 비하여 상대적으로 나쁘기 때문으로 당연한 것으로 판단된다.

2) 垂直·水平溫度 分布

暖房空間 內에서의 室內 溫度分布는 暖房方式, 室의 形態, 天障高, 換氣狀態, 構造體의 熱性能 등에 따라서 현저하게 달라지게 된다.

[Fig 5]는 測定對象空間 內의 日平均 垂直溫度 分布를 나타낸 것이며 [Fig6]은 日平均 水平溫度 分布를 나타낸 것이다.

室內垂直溫度 分布는 그림에서 보는 바와 같이 바닥面과 천장面 부근을 제외하면 溫度差가 거의 없는 것을 알 수 있다. 室內水平溫度 分布 역시 壁體附近을 제외하면 거의 均

등한 분포를 나타내고 있다.

이와같이 공간적으로 비교적 균등한실내 열 환경을 조성하는 것은 輻射暖房方式의 장점 중의 하나로 이미 잘 알려진 바 있으며, [Fig 5]와 [Fig6]으로 부터 中央部分의 溫度를 代表室溫으로 간주하여도 무방할 것으로 판단된다.

3) 室內溫度的 豫測

溫突暖房 空間內的 氣溫 형성은 가열面인 바닥面의 放熱特性和 壁面의 熱特性, 換氣의 상태, 室內외의 熱環境條件등에 따라서 달라지게 되어 간단하게 예측하기는 곤란하다. 그러나, 局所으로는 室內 各表面에서 일어나는 熱傳達現象의 綜合的인 結果에 의하여 이루어지기 때문에 室內 各表面의 面積加重平均 表面溫度(Average Surface Temperature,

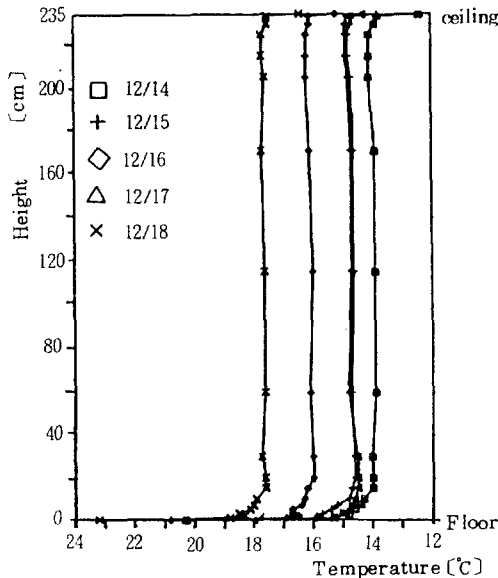


Fig. 5. Daily Mean Vertical Temperature

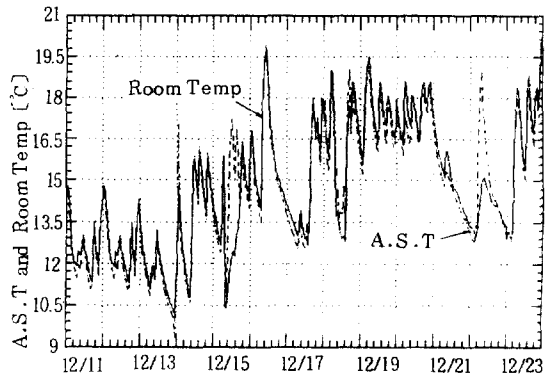


Fig. 7. Plot of A. S. T and Room Air Temperature

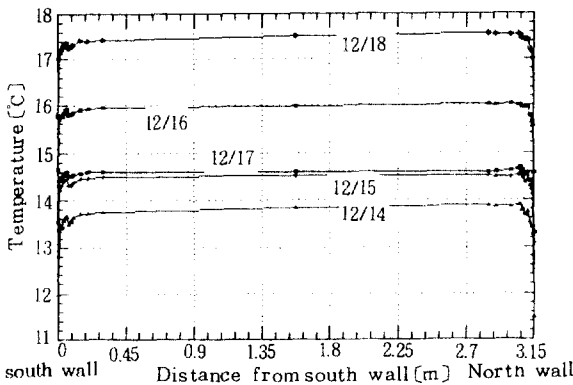


Fig. 6. Daily Mean Horizontal Temperature

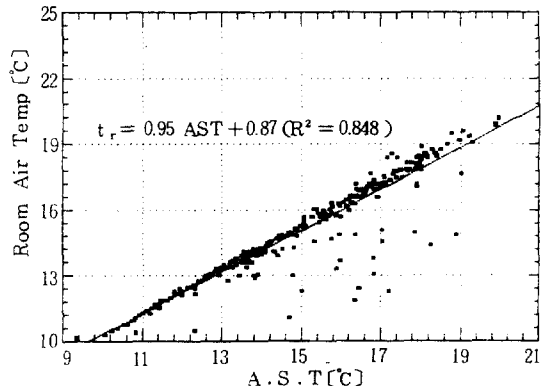


Fig. 8. Regression of Room Temperature on A. S. T

AST)와 室溫은 그 상관성이 크다고 생각할 수 있다.

[Fig 7]은 측정기간 동안의 AST와 室溫의 變化를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 AST와 室溫은 거의 비슷하게 變化하고 있음을 알 수 있다.

[Fig 8]은 AST와 室溫의 相關關係를 나타낸 것으로써 一部分을 제외하면 거의 선형에 가깝게 나타났다.

이때 室溫 t_R 을 AST와의 관계로 나타내면 다음 식과 같다.

$$t_R = 0.95 \text{ AST} + 0.87 \quad (R^2 = 0.848) \dots\dots(14)$$

나. 輻射 熱傳達 特性

식(2)의 輻射項을 이용하여 바닥面으로 부터의 輻射熱流을 算定하고 室溫 및 바닥溫度를 비교하여 나타내면 [Fig 9]와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 바닥溫이 상승함에 따라 室溫 및 輻射熱流도 동시에 상승함을 알 수 있다. 이것은 바닥溫의 상승에 따른 放熱量의 증가로 他壁面의 內表面溫度가 거의 동시에 상승하기 때문인 것으로 판단된다.

바닥面으로 부터의 熱流은 輻射熱流과 對流熱流로 構成되며 輻射熱流과 對流熱流과의 合算을 고려한다면 輻射熱流을 바닥表面溫과 室溫의 差 즉, $(t_P - t_R)$ 과의 관계로 표현하는 것이 바람직하다.

[Fig.10]은 輻射熱流과 $(t_P - t_R)$ 의 상관성을 검토한 것으로써 輻射熱流 q_{rp} 는 다

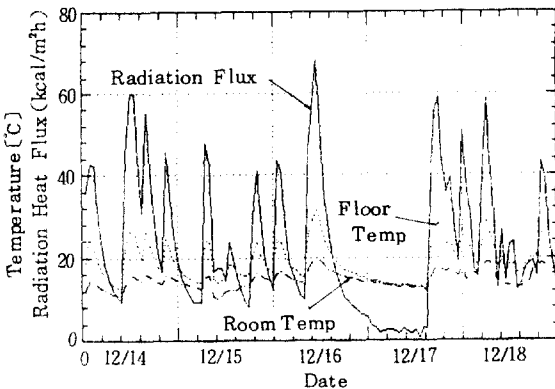


Fig. 9. Plot of Radiation Heat Flux

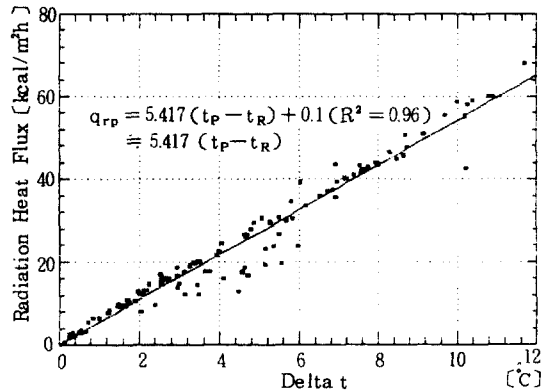


Fig. 10. Regression of Radiation Heat Flux on Delta t

음 식과 같이 나타낼 수 있다.

즉,

$$q_{rp} = 0.1 + 5.417 (t_P - t_R) \quad (R^2 = 0.96) \\ \approx 5.417(t_P - t_R) \dots\dots(15)$$

또, 식(14)로부터 q_{rp} 는

$$q_{rp} = 5.417 (t_P - 0.95 \text{ AST}) - 4.71 \dots(16)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

식(15)와 식(16)은 本 測定對象空間에 對한 結果이지만 實際 暖房空間의 內表面材料의 輻射率은 $\epsilon = 0.9$ 전후로 대개 비슷하며, 暖房空間의 形態도 本 測定空間과 커다란 차이가 없다면 本 式의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

다. 對流熱傳達特性

식(10)으로부터 對流熱流 q_{cv} 를 산정하기 위해서는 바닥面上의 溫度分布를 하나의 曲線式으로 表現하여 表面에서의 도함수 즉,

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} \text{를 구할 必要가 있다.}$$

本 研究에서는 바닥面上的의 높이에 따른 溫度分布 $t(x) = A + Be^{-cx}$ 의 비선형 회귀방정식으로 근사시킴으로써 바닥面 즉, $x = 0$ 에서의 도함수 $\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0}$ 를 구하고 對流熱傳達率과 對流熱流 q_{cv} 를 산정하였다. 분석은 12月 14日~12月 18日(5日間)의 Data를 이용하였다.

[Fig 11]은 對流熱傳達率의 變化를, [Fig

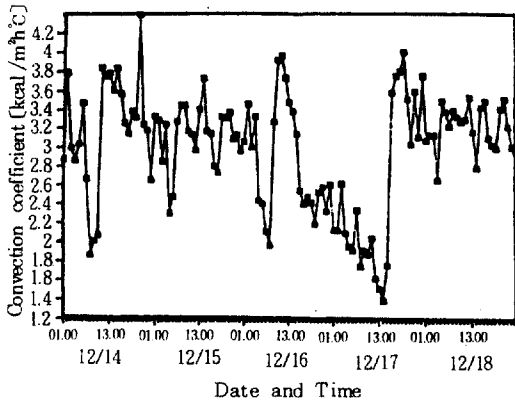


Fig. 11. Plot of Convection Coefficients

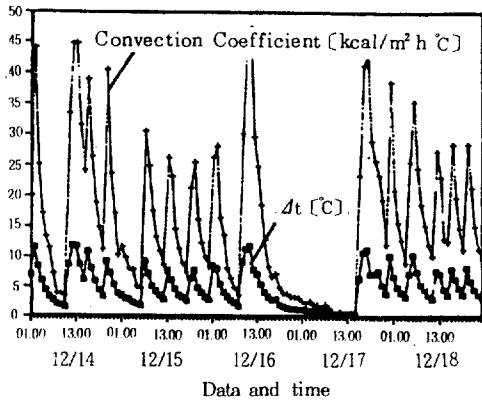


Fig. 12. Convection Heat Flux and Delta t

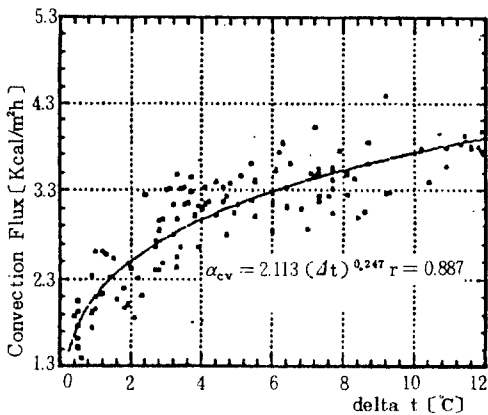


Fig. 13. Regression of Convection Coefficient on Delta t

12]는 對流熱流과 Δt의 變化를 나타낸 것이다.

[Fig 13]은 對流熱傳達率을 온도차 (t_p -

t_R)과의 관계로 회귀시킨 결과이다.

[Fig 13]에서 보는 바와 같이 對流熱傳達率 α_{cv}는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 즉, α_{cvf}는

$$\alpha_{cvf} = 2.113 (t_p - t_R)^{0.247} \quad (R^2 = 0.791)$$

$$\approx 2.113 (t_p - t_R)^{0.25} \quad [\text{kcal/m}^2 \text{h } ^\circ\text{C}] \quad (17)$$

와 같다. 따라서, 바닥면의 對流에 의한 熱流 q_{cvf}는

$$q_{cvf} = 2.113 (t_p - t_R)^{1.25} \quad (18)$$

로 나타낼 수 있다.

또한, 식(12), (13)으로부터 Nusselt 수, Grashof 수, Prandtl 수를 구하고 그 관계를 검토하여 보았으며, [Fig.14]는 Rayleigh수에 대한 Nussert 수의 變化를 곡선회귀식에 의하여 검토한 결과이다.

[Fig 14]에 나타낸 바와 같이 Nusselt 수 N_{NU}는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$N_{NU} = 0.785 (N_{Gr} \cdot N_{Pr})^{0.261} \quad (R^2 = 0.79) \quad (19)$$

이때, Nusselt수, Grashof수, Prantle 수 및 Rayleing수의 범위는 각각 다음과 같다.*1)

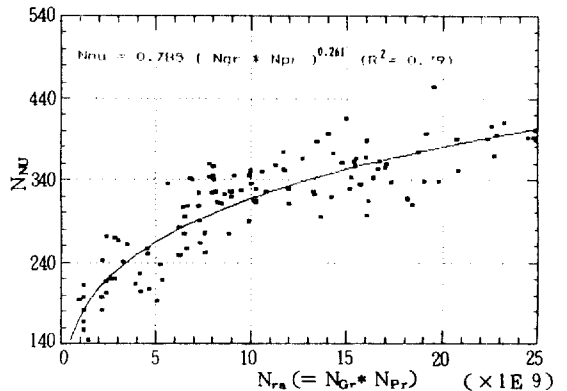


Fig. 14. Regression of Nnu on Nra

* 1) 필자 등이 기 발표한 論文 “溫突바닥면의 對流熱傳達率에 관한 研究”(大韓建築學會 學術發表論文集 第8卷 2號, pp367~371, 1988年10月)의 內容中 (Fig 12) Nusselt 수와 Rayleigh 수), 식(8) N_{NU} 및 N_{NU}, N_{Gr}, N_{Pr}, N_{Pr}의 범위가 오기되었음을 밝힙니다.

N_{NU} : 141.366 ~ 454.748
 N_{Gr} : $1.3 \times 10^9 \sim 3.5 \times 10^{10}$
 N_{Pr} : 0.7102 ~ 0.7154
 N_{Ra} : $9.5 \times 10^8 \sim 2.5 \times 10^{10}$

라. 바닥면으로 부터의 放熱量

[Fig 15]는 熱傳達率의 變化를, [Fig 16]은 바닥면으로 부터의 放熱量을 輻射와 對流成分으로 區分하고 나타낸 그림이다.

[Fig 15]에서 보는 바와 같이 바닥면의 輻射熱傳達率이 對流熱傳達率 보다는 상대적으로 큰 것을 알 수 있으며, 測定期間 동안의 平均對流熱傳達率 $\alpha_{mcv} = 3.0$ [kcal/m²h °C], 平均輻射熱傳達率 $\alpha_{mr} = 5.69$ [kcal/m²h °C], 平均熱傳達率 $\alpha_m = 8.69$ [kcal/m²h °C]이었다. 따라서, 對流에 의한 熱傳達量보다는 輻射에 의한 熱傳達量이 상대적으로 더 많으며 이

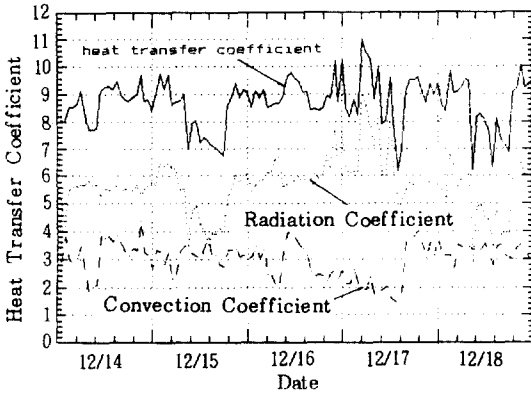


Fig. 15. Plot of Heat Transfer Coefficients

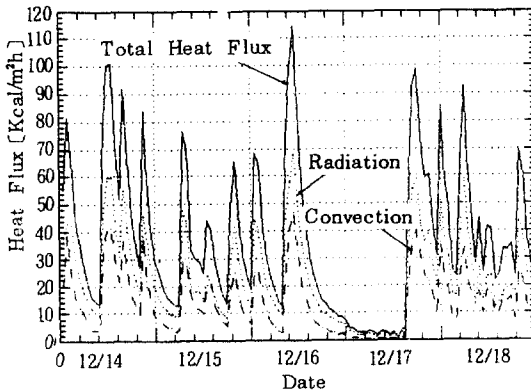


Fig. 16. Plot of Total Heat Flux

중 輻射成分이 평균 62% 對流成分이 평균 38%로 나타났다.

[Fig 17]은 바닥면으로부터의 全放熱量을 바닥表面溫度와 室溫의 差($t_p - t_r$)과 회귀시킨 결과이며, 바닥면으로 부터의 全放熱量 q_f 는

$$q_f = 9.21 (t_p - t_r) - 1.85 \text{ [kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C]} \quad (R^2 = 0.98) \dots\dots\dots (20)$$

로 표현할 수 있다.

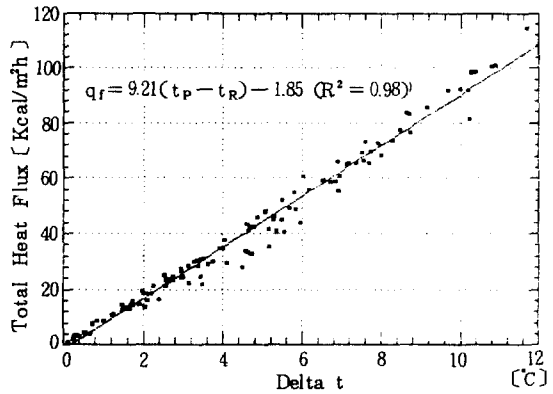


Fig. 17. Regression of Total Heat Flux on Delta t

5. 맺음말

本 研究에서는 溫突暖房空間에 있어서 바닥表面으로부터의 放熱特性을 把握하고 實用的인 放熱量 算定方法을 제안하는 것을 目的으로 하였으며 실제의 난방공간을 대상으로 실측·분석하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 溫突暖房空間에 있어서 室 中央附近의 溫度를 그 室의 代表室溫으로 간주할 수 있었으며, 室溫은 室內 各 表面의 面積加重平均溫度(AST)와의 相關性을 利用하여 다음 식으로 표현할 수 있었다.

$$t_r = 0.95 \text{ AST} + 0.87 \quad (R^2 = 0.848)$$

2) 바닥表面으로부터의 放熱量을 輻射成分과 對流成分으로 區分하여 分析·檢討할 수 있

있으며 輻射成分과 對流成分은 평균 1.63 : 1 의 비로 나타났다. 또한, 輻射熱流 q_{rp} , 對流熱流 q_{cvp} 및 바닥面의 全熱流 q_p 는 각각 다음 식으로 표현할 수 있었다.

$$q_{rp} = 5.417 (t_p - t_R) (R^2 = 0.94)$$

$$q_{cvp} = 2.113 (t_p - t_R)^{1.25} (R^2 = 0.79)$$

$$q_p = 9.21 (t_p - t_R) - 1.85 (R^2 = 0.98)$$

3) 바닥面上的 室溫分布 測定值를 비선형 회귀식으로 추정하여 바닥面의 對流熱傳達率 α_{cvf} 를 구할 수 있었으며, 무차원수인 Nusselt 수와 Rayleigh 수의 관계를 검토한 결과 각각 다음과 같았다.

$$\alpha_{cvf} = 2.113 \Delta t^{0.25} (R^2 = 0.79)$$

$$N_{NU} = 0.785 (N_{Gr} \cdot N_{Pr})^{0.25} (R^2 = 0.79)$$

이상은 특정 暖房空間을 대상으로 한 結果로서 一般化시키기에는 여러가지 미흡한 점이 많지만, 空間形態와 熱性能이 비슷한 一般 暖房空間에 對해서는 適用 가능할 것으로 思料된다. 앞으로는 보다 폭 넓은 檢討와 熱流의 精確한 實測을 통하여 本 研究結果에 對한 보 완·발전이 이루어져야 할 것으로 생각된다. 또한, 本 研究에서는 바닥表面溫을 기준으로

하였으나, 바닥 構造體의 熱性能까지 포함시켜 溫突暖房空間을 對象으로한 熱環境 解析 方法을 발전시켜 나가야 할 것이다.

參考文獻

1. 孫章烈, 安炳旭, 方昇基, 高時應: 溫突面의 輻射放熱量 解析에 관한 研究, 大韓建築學會論文集 第4卷 4號, 1988年8月
2. 安炳旭, 孫章烈, 方昇基: 溫突바닥面의 對流熱傳達率에 관한 研究, 大韓建築學會學術發表論文集, 第8卷 2號, 1988年10月
3. 孫章烈, 安炳旭, 辛容太: 溫突暖房空間의 內表面 輻射熱傳達率에 관한 研究, 空氣調和, 冷凍工學 第17卷 5號, 1988年10月
4. 孫章烈, 朴宰永, 安炳旭, 辛容太: 溫水溫突 暖房空間의 熱負荷解析에 관한 基本的研究, 大韓建築學會論文集 第4卷 2號, 1988年4月
5. J. P. Holman: Heat Transfer, Mc Grawhill, 1981年
6. ASHRAE: ASHRAE 1985 Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1985年