

最適 熱傳達係數를 利用한 斷熱基準算出

李 振 遠* • 李 宗 元*

Abstract

Optimum overall heat transmission coefficient for residential buildings is calculated as a function of building parameter, area/volume.

Equivalent heat transmission coefficient and equivalence factor are introduced and optimized with respect to annual cost including fuel cost, insulation cost and equipment cost.

Comparison with recent standard of West Germany shows similarity of the result.

1. 序 論

住宅斷熱이 經濟的인 明白히 입증되어 있고, 西洋에서는 거의 모든 나라가 단열基準을 마련하여 施行하고 있으며, 매년 그 기준이 엄격하여져가고 있다. 우리나라에서도 조만간 마련될 斷熱基準의 한 形態를 提案해 보고자 한다.

斷熱基準은 그 設定方法과 形式에 따라 區分된다. 形式에는 노출부분 단위면적당의 열손실을 제한하는 법과 건물 전체의 열손실을 제한하는 법이 있다. 노출부분 면적당의 열손실을 제한하는 것은 가장 간단하고 시행이 확실하나, 실제에 지나친 制約을 가하게되며 기후와 생활조건에 따라 여러개의 기준치를 設定할 필요가 있을 때는 매우 많은 기준치를 필요로 한다는 것. 그리고 특정 건물 형태에 의한 열손실증가에 대하여서는 하등 제약을 가할 수 없다는 것이 결점이다. 건물 전체의 열손실을 제한하는 것은 실제의 自由度가 크고 건물형태를 간접적으로 제한할 수 있는 장점이 있으나 기준設定이 복잡하고 시행이 까다롭다는 것이 단점이다. 上記의

* 正회원, 한국과학기술연구소 기계공학연구부

두 가지중에서 自由度와 活用도가 높은 後者의 方法이 보다 바람직할 것으로 생각되며, 극장 체육관등의 特殊건축물에 대해서는 前者의 基準을 並用하도록하면 효과적일 것으로 생각된다.

이 경우에 건물 全體의 總平均열전달계수 \bar{U} 는

$$\bar{U} = \sum U_j (A_j/A) \dots\dots\dots (1)$$

로 정의된다. 여기서 각 部位가 차지하는 면적비 A_j/A 는 건물의 종류 크기에 따라 달라지므로 이 값을 一律적으로 표시하는 것이 필요하게 되며, 本文에서는 건물을 區分하는 代表的인 變數로서 A/V 를 택하여 A_j/A 를 A/V 의 함수로 표시함으로써, 기준치 \bar{U} 를 A/V 에 따른 함수의 형태로 제시하려고 한다. 그 理由와 正當性은 다음과 같은 論理로 說明될 수 있을 것이다. 즉 斷熱基準의 궁극적목표는 주택부문에서 생활공간당의 에너지소비량을 줄도록하자는 것이며, 그림 3에 표시된 바와 같이 기존주택의 실태를 조사하여 불배 전체의 타당성을 입증할 수 있다. 이것을 式으로 표시하면

$$\frac{Q}{V \cdot \Delta T} = \bar{U} \cdot \frac{A}{V} = \text{일정} \dots\dots\dots (2)$$

로 되며, \bar{U} 를 A/V 에 반비례하도록 규제하는

것이 되므로, 熱經濟的인 立場에서의 建物에 대한 parameter 로는 A/V 를 擇하였다.

各 部位의 기준열전달계수 U_j 의 算定에는 여러가지 기준이 있을 수 있으나, 斷熱材부착에 따른 初期투자의 증가와 이로 인한 연료비절감: 난방기기비 절감등을 고려한, 年間 費用을 最少로 하는 經濟的 最適열전달계수를 기준열전달계수로 하는 것이 현재로서는 바람직한 것으로 보인다.

따라서 여기에서는 기본식을 도출하고, 數値를 代入하여 基準을 얻음으로써, 후에 實用的인 基準의 算出에 參考가 되고자한다.

2. 이론식의 도출

1. 等價熱傳達係數

건물 각 部位의 열전달계수 U_j 는 그 部位를 이루고 있는 建築材들의 熱抵抗과 内外面 空氣層의 열저항을 합하면 구할 수 있으며, 그 부위의 열손실 Q_j 는

$$Q_j = A_j U_j (T_i - T_j)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 T_j 는 열유동방향의 외부온도로서, 벽면의 경우에는 外氣온도, 방바닥의 경우에는 地中온도를 가리킨다. 열손실량은 U_j 뿐만아니라 T_j 에 의해서도 變化하므로 실질적인 열손실의 尺度가 되는 열전달계수를 정의하는 것이 편리하다. 基準온도로는 外氣온도를 택하여, 다음과 같이 等價열전달계수 U_j 와 등가계수를 B_j 정의하며 \bar{U}_j 는 열손실량에 正比例한다.

$$\begin{aligned} Q_j &= A_j U_j (T_i - T_o) \cdot B_j \\ &= A_j \bar{U}_j (T_i - T_o) \end{aligned}$$

벽면과 문·창문 및 수평지붕의 경우에는 $U_j = \bar{U}_j$, $B_j = 1$ 이며, 천정온도를 가정한 열평형식으로부터 경사지붕(pitched roof)의 등가열전달계수는

$$\bar{U}_r = \frac{U_c U_r A_r}{U_c A_c + U_r A_r}$$

로 얻어진다. 斷熱은 지붕보다 천정에 하는 것이 유리하므로, U_c 를 基準한 等價係數 B_r 은 아

래와 같이 쓸 수 있다.

$$B_r = \frac{U_r A_r}{U_c A_c + U_r A_r}$$

마찬가지로, 온돌이 아닌 바닥에 대하여는

$$\bar{U}_{uf} = U_{uf} \cdot \frac{T_i - T_g}{T_i - T_o}$$

$$B_{uf} = \frac{T_i - T_g}{T_i - T_o}$$

가 되나 온돌바닥에 대하여는 다른 모델을 택하여야 한다. 즉, 이제까지는 방바닥의 建築材 熱抵抗과 땅(흙)의 열저항을 합한 열저항 R_f 와 室內 및 地中온도差 $T_i - T_g$ 에 근거하여, $\dot{Q}_f = A_f (T_i - T_g) / R_f$ 로써 바닥으로의 열손실을 계산하였으나, 실제로는 중간의 고온부에서 地中으로 열손실이 일어나는 것으로, 이제까지의 계산치는 실제보다 過少評價되었다. 온돌의 구조를 간략화하여, 땅속의 一定 깊이에 온도 T_h 의 高温部가 있고, 여기에서 室內와 地中の 양쪽으로 熱流動이 일어난다고 가정하자. 高温部에서 室內로의 열전달계수를 U_1 , 地中으로의 열전달계수를 U_2 라 하고 이들을 합한-즉 室內로부터 地中으로의-열전달계수를 U_f 라 하면, 실제의 열손실은

$$\dot{Q}_f = A_f U_2 (T_h - T_g)$$

로 쓰여진다. 실제로 난방이 행해지는 동안의 T_h 는 온돌의 종류에 따라 溫水나 煙道개스의

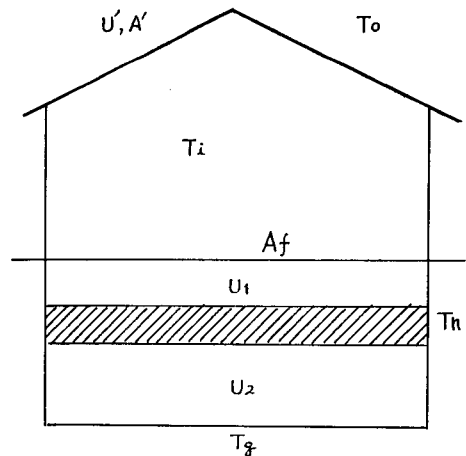


그림 1. 온돌부분의 개략도.

온도가 되겠으나, 年間 열손실량등의 계산을 위해서는 平均온도를 사용하는 것이 바람직하다. 이 값은 앞서와 같은 熱平衡式으로 부터 얻어질 수 있으며, 등가열전달계수를 우리가 알고있는 양으로만 표시하는 것이 가능하다. 즉,

$$U_1 A_f (T_h - T_i) = U' A' (T_i - T_o)$$

$$\dot{Q}_{hf} = U_2 A_f (T_h - T_g)$$

$$= U_2 A_f \left[(T_i - T_g) + \frac{U' A'}{U_1 A_f} (T_i - T_o) \right]$$

$$\equiv \bar{U}_f A_f (T_i - T_o)$$

$$\therefore \bar{U}_{hf} = U_2 \left[\frac{T_i - T_g}{T_i - T_o} + \frac{U' A'}{U_1 A_f} \right]$$

$$= U_f \left(1 + \frac{U_2}{U_1} \right) \left[\frac{T_i - T_g}{T_i - T_o} + \frac{U' A'}{U_1 A_f} \right]$$

$$B_{hf} = \left(1 + \frac{U_2}{U_1} \right) \left[\frac{T_i - T_g}{T_i - T_o} + \frac{U' A'}{U_1 A_f} \right]$$

여기서 U' 과 A' 은 바닥을 제외한 나머지 부분의 평균열전달계수와 면적을 가리킨다. 방바닥의 균일한 온도분포를 위하여 필요한 U_1 의 값은 일정할 것이며, 단열재의 부착은 U_2 의 값을 변화시키게 된다. 실제에 있어서는 온도의 끝면 (edge)을 통한 열손실이 많을 것이나 여기서는 열부분의 단열이 잘되어 밀부분으로만 열손실이 일어난다고 가정하였다.

이외에 지하실이 있는 경우에도 앞에 제시한 식들을 組合하면 비슷한 결과식들을 얻을 수 있으나, 지하실을 난방하거나 지하실의 천정이 온돌일 경우를 제외하면 열손실량(등가열전달계수)은 극히 적다.

2. 經濟的 最適 열전달계수

단열의 경제성판별기준은 여러가지가 있으나, 비용만을 생각하면 단열재 및 施工費·연료비·난방기기가격이 가장 중요하며, 이 값을 합한 총비용은 어떤 단열두께에서 最少가 된다. 난방기와 단열재의 壽命이 다르므로 年相當費用 (annual cost)을 계산하기로 하면 各費用은 다음과 같다.

$$\text{연료비 } C_f = \sum B_j U_j A_j \cdot 24 \cdot D \cdot \alpha / \eta$$

$$\text{난방기기비 } C_e = \sum B_j U_j A_j (T_i - T_{o,d}) r / F'$$

$$\text{단열비 } C_i = \sum A_j t_j \beta_j / F$$

총비용 $C_t = C_f + C_e + C_i$

여기서 $F = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N}$

$$F' = \frac{(1+i)^M - 1}{i(1+i)^M}$$

총비용에는 이외에도 透入空氣에 의한 양이 포함되어야하나 이 값은 단열두께 t_j 의 함수가 아니므로 생략하였고, C_t 를 最少로 하는 最適 단열두께 t_j, opt 와 그때의 최적열전달계수 U_j, opt 는 다음의 식에 의해 구해진다.

$$U_j = \frac{k_j}{t_j + k_j R_j}$$

$$\frac{\partial C_t}{\partial t_j} = 0$$

$$\frac{\partial^2 C_t}{\partial t_j^2} > 0$$

식중의 B_j 도 t_j 의 함수이므로 대입하는 것이 가능하나, 比較와 계산의 편이를 위하여 B_j 를 상수로 생각하여 식을 얻은 후에, 계산시에는 연속 代入法을 이용하기로 한다. 그러면

$$t_{j,opt} = \left[\frac{F B_j k_j \left\{ \frac{24 D \alpha}{\eta} + \frac{(T_i - T_{o,d}) r}{F'} \right\}}{\beta_j} \right]^{\frac{1}{2}} k_j R_j$$

$$U_{j,opt} = \frac{k_j}{\left[\frac{F B_j k_j \left\{ \frac{24 D \alpha}{\eta} + \frac{(T_i - T_{o,d}) r}{F'} \right\}}{\beta_j} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

로 결과를 얻을 수 있으며, $U_{j,opt}$ 는 初期의 단열정도인 R_j 에 무관함을 알 수 있다.

3. 계산 및 결과

이상의 식에 표1의 값을 代入하여 계산한 결과를 표2에 나타내었다. 氣象條件은 서울지방을 기준으로한 5年間の 觀象대자료에 의한 값이며, 난방은 溫水 溫突을 기준으로 하여 경유 보일러를 택하였고, 단열재가격에는 施工費가 포함되었다. Sensitivity analysis 결과, 난방기기의 가격, 수명과 단열재의 수명은 提示된 값을 택하여도 무난할 것으로 생각되나, 이자율·연료비·단열재가격은 결과에 매우 큰 영향을 미치므로 실제에 적용될 결과를 위해서는 보다 자세

한 분석의 結果值를 요약하며, 여기에 보인 數値는 매우 개략적으로 擇한 것이다. 모든 가격은 不變價格으로 고려하였고, 等價油類價는 단열재수명기간의 유류가 인상율(7%로 가정)을 고려

표 1. 기초 계산 자료.

이 자 율	연 리	20 %
기 상 조 건	T_i	18 °C
	$T_{o,d}$	-12 °C
	$T_{g,m}$	7 °C
	$T_{g,d}$	4 °C
	D_{18-14}	2894 °C · day
난 방 기 기	종 류	유류보일러
	수 명	5 년
	가 격	12 원 / kcal / hr
	효 율	65 %
연 료	종 류	경 유
	현 가 격	0.008 원 / kcal
	등가 가격	0.013 원 / kcal
단 열 재	종 류	유리면 20 K
	수 명	20 년
	열전도도	0.032 kcal / m · hr · °C
	가 격	62500 원 / m ²

한 平均 油類價이다.

유리창의 경우에는 위의 식을 이용할 수 없으므로, 단창 · 2중창 · 3중창에 대하여 비슷한 계산을 한 결과 2중창이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 유리의 두께에는 별 영향이 없는 것으로 나타났다.

건물의 部位別 面積比 A_i/A 는, 현재 지어져 있거나 工事中인 75개의 설계圖面을 입수하여 標準이 될 만한 型을 택하여 계산을 수행하였고 그 결과를 표 3에 요약하였다.

표 2 와 표 3의 결과를 식(1)에 代入하여 11개의 A/V 에 대한 \bar{U} 값을 얻었으며, 이 값들을 最少子乘法에 의하여 curve fitting 한 결과식과 함께 그림 2에 나타내었다. curve fitting시에는 식(2)에 따라 \bar{U} 를 A/V 의 역함수로 가정

하였다.

참고로 현재 우리나라와 독일의 住宅斷熱상태 및 독일의 단열기준(법규)와 앞에서 계산된 기준치를 그림 4에 圖示하였다. 그림에 나타난 값은 잘 지어진 양옥의 경우이므로 한옥이나 반양옥식에 대하여는 더욱 열손실이 클 것으로 생각된다.

最適斷熱 絶對的 經濟性은 所謂 償還期間 (payback period)의 계산을 통하여 알 수 있다. 상환기간은 초기단열정도에 따라 달라지며, 그림 3의 우리나라 주택에서 제일 밑에 있는 - 가장 잘 지어진 - 주택에 대해 표 1의 값을 代入하면 약 3~5년이 된다. 따라서 단열상태가 나쁜 주택의 상환기간은 더 짧아지며, 油類價格의 인상율이 높아짐에 따라 상환기간은 더욱 짧아질 것이다.

등가계수는 등가열전달계수를 쉽게 구하는데 이용이 되는데, 예를 들면, 지하실이 없는 주택의 경우에 대한 주택전체의 總平均열전달계수 \bar{U} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{U} = \frac{A_w U_w + A_g U_g + A_d U_d + A_s U_s + 0.8 A_r U_r}{A} + \frac{1.3 A_{hf} U_{hf} + 0.65 A_{uf} U_{uf}}{A}$$

여기서 침자g는 유리창, d는 문, s는 수평지붕, r은 경사지붕을 각각 가리킨다.

표 2. 부위별 최적열전달계수와 최적등가계수

부 위 별	최적등가열전달계수 (kcal / m ² · hr · °C)	최적등가계수
벽 면	0.53	1
유 리 창	2.80	1
지 붕	경 사	0.48
	수 평	0.53
바 닷	온 돌	0.59
	비 난 방	0.45

표 3. 주택 기초 자료

주택종류	구분	건물부위별 면적 구성(%)					A / V
		바닥	천정	창문	문	벽면	
아파트	43 평형 12 세대 × 15 층	8.2	8.2	15.4	11.9	56.4	0.29
	34 평형 8 세대 × 10 층	9.9	9.9	9.0	11.2	60.1	0.36
	34 평형 4 세대 × 5 층	15.6	15.6	7.2	8.8	52.9	0.46
	14 평형 4 세대 × 5 층	10.6	10.6	5.5	6.0	67.4	0.68
연립주택	25 평형 8 세대 × 2 층	25.6	25.6	6.0	6.2	36.7	0.70
	25 평형 4 세대 × 2 층	24.4	24.4	5.7	5.9	39.5	0.73
	10 평형 4 세대 × 2 층	23.2	23.2	4.1	6.5	43.2	0.77
	10 평형 2 세대 × 2 층	20.4	20.4	3.6	5.7	50.0	0.88
단독주택	39 평형 1 층	32.5	32.5	5.6	3.3	26.2	1.10
	25 평형 1 층	30.2	30.2	3.8	3.3	32.5	1.18

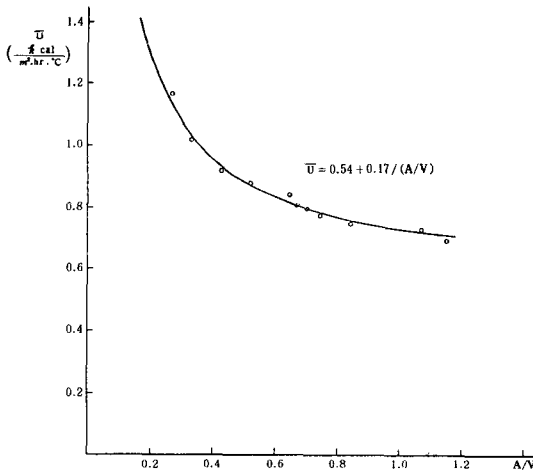


그림 2. A/V에 따른 U의 계산결과

4. 結 論

經濟的 最適열전달계수와 건물의 크기에 따른 部位別 面積構成比 分布로부터 건물 전체의 총 평균열전달계수를 계산함으로써 斷熱基準를 算定하는 방법을 제시하였으며, 獨逸의 최신 단열 기준과의 비교로부터 이 방법이 실용화될 수 있음을 알 수 있다.

특히 등가열전달계수를 도입함으로써 부위별 열손실을 즉시 비교할 수 있도록하였고, 等價係

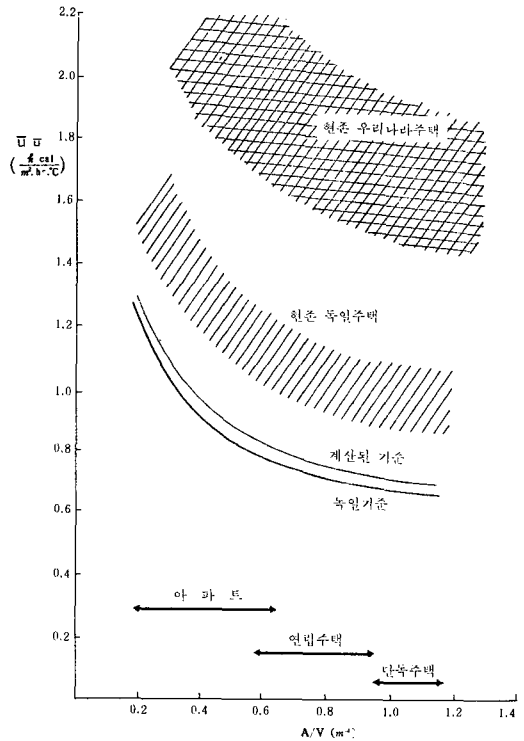


그림 3. 우리나라와 독일의 현존 단열상태 및 단열 기준

數의 개념을 도입한 것은 건축재의 性質(properties)로부터 계산할 수 있는 열전달계수에서 직접 등가열전달계수를 계산할 수 있게하므로 施行에 도움을 줄 것이다.

앞에서의 계산은 傾向을 알기위한 개략적인 계산에 지나지않고, 실제적인 기준계산을 위해서는 이자율·물가상승율·유류가상승율등의 經濟指標를 정확히 책정하는 것 이외에도 시간이 감에 따라 단열재의 성능이 감소하는 것, 건물(특히 高層아파트의 경우)의 冷橋(cold bridge)와 fin effect, 透入空氣(infiltration)에 의한 난방기기용량의 조정, 난방기기의 용량에 따른 용량당가격변화, 땅속으로의 열손실(지하실을 포함하여), 그리고 氣象條件이나 난방方式이 다른 경우에 대한 고려가 있어야하며, 이를 위하여 住宅에 대한 各種 standard의 제정이 필요한 것으로 생각된다.

記 號 說 明

- T_i : 평균 室內 유지온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{o,m}$: 暖房期間동안의 평균 外氣온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{o,d}$: 設計用 外氣온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{g,m}$: 暖房期間동안의 평균 地中온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{g,d}$: 設計用 地中온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- t : 단열재 두께 (m)
- β : 단열재의 단위부피당 가격 ($\text{원}/m^3$)
- k : 단열재의 熱傳導度 ($\text{Kcal}/m \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
- A_j : 건물의 각 部位別 면적 (m^2)
- A : 건물의 總表面積 (m^2)
- V : 건물의 總體積 (m^3)
- U_j : 건물의 각 部位別 熱傳達係數(熱貫流率) ($\text{kcal}/m^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

- \bar{U}_j : 각 部位別 等價 熱傳達係數
- \bar{U} : 건물 전체의 總평균 등가열전달계수
- B_j : 각 部位別 等價係數
- $-R_j$: 斷熱施工前의 部位別 熱抵抗($m^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$)
- D : 年間 暖房度日 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)
- i : 年間 利子率 ($1/\text{yr}$)
- P : 年間 油類價 引上率 ($1/\text{yr}$)
- α : 연료의 發熱量當 價格 ($\text{원}/\text{Kcal}$)
- r : 暖房器機의 容量當 價格 ($\text{원}/\text{Kcal}/\text{hr}$)
- η : 난방기기의 効率
- N : 건물의 수명 (年)
- M : 난방기기 수명 (年)
- $F_1 F'$: 年相當費用係數

하첨자

- j : 건물의 各 部位
- c : 천정
- g : 地中
- r : 지붕
- w : 벽면
- f : 바닥
- hf : 온돌바닥

참 고 문 헌

1. 건물 절연체의 최적두께와 에너지소비량 절감에 관한 연구, 한국과학기술연구소, 1974.
2. 보온재의 경제적 시공방법에 관한 연구, 한국열관리시험연구소, 1977.
3. Bundesgesetzblatt Teil I Z-1997 A, Nr. 56 (1977)
4. K. Gertis, Heizenergieeinsparung durch bauliche Massnahmen, Gesundheits-Ingenieur 96, H 3, 1975.