

표면복사특성이 단열성능에 미치는 영향

오동은, 박종일*, 이민우**, 홍진관***, 강병하****, 김석현*****
국민대학교 대학원, *동의대학교, **삼우설비컨설팅, ***경원대학교, ****국민대학교

Effects of surface radiation on the insulation for mechanical system

Dong Eun Oh, Jong Il Park*, Min Woo Lee**, Jin Kwan Hong***,
Byung Ha Kang****, Sukhyun Kim*****†

ABSTRACT: In this study, a rational procedures for estimation of insulation thickness for condensation control or personnel protection has been investigated. Both horizontal pipe and vertical wall configuration are included. Design parameters are pipe diameter or, height of the wall, thermal conductivity, emissivity, and operating temperatures. The results indicated that the surface emissivity plays a very important role in the design of insulation for the purpose of surface temperature control, especially in natural convection situation. radiation heat transfer coefficients for some new insulation material surface, such as elastomers, estimated to be more than 90% of the total surface heat transfer coefficient. Adequate revision of specifications or standards has been also suggested.

Key words: Surface radiation(표면복사), Radiation heat transfer coefficient(복사열전달계수), Condensation control(표면결로제어), Personnel protection(표면온도제어), Insulation thickness(단열재 두께).

기 호 설 명

- D : 수평관 직경 [m]
- A : 단열재 표면적 [m^2]
- L : 수직평판 높이 [m]
- L_e : 단열재 등가두께 [m]
- T : 온도 [℃]
- k : 열전도율 [W/mK]
- h : 열전달계수 [W/m^2K]
- t : 단열재두께 [m]
- Nu : Nusselt 수, $h_c L / k$
- Ra : Rayleigh 수, $\beta \Delta T g L^3 / \nu \alpha$
- Pr : Prandtl 수, ν / α

그리스 문자

- ϵ_s : 표면 방사율
- σ : Stefan-Boltzmann 상수 [W/m^2K^4]

하첨자

- i : 단열재
- 1 : 벽면 또는 관 표면 외부
- 2 : 단열재 표면

1. 서 론

단열재는 주위온도보다 높거나 낮은 온도레벨에서 가동되는 배관 및 각종 기기의 표면으로부터 열손실 또는 열취득을 차단하는 일차적인 목적을 가지고 있으며 궁극적으로 에너지 이용합리화, 환경 관점의 쾌적성, 사용의 편리성, 다양한 용도 등 많은 장점으로 당면한 에너지-환경-웰빙 사회구축에 기여하고 있다.⁽¹⁾ 구체적으로 단열재의 적용은 다음 중 하나 이상의 기능을 달성하기

†Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4673; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: skim@kookmin.ac.kr

위하여 검토되며 적절한 논리에 근거하여 설계되어야 한다.

- 가. 에너지의 합리적 이용과 경제성의 최적화.
- 나. 화재 등의 사고방지를 위한 표면온도 조절.
- 다. 결로 방지를 위한 표면온도 조절.
- 라. 공정산업의 작동유체 온도유지 또는 동결방지.
- 마. 기타 소음제어, 화재안전, 부식방지, 등.

최근 신소재기술이 발달함에 따라 여러 종류의 단열재가 추가로 출시되고 있어 위에 열거된 여러 기능에 적합한 특징을 지니고 있다고 알려지고 있으나^(2, 3) 이에 대한 공인된 기술적 검토나 학술적 분석 등이 아직 미흡하여 기존의 소재들을 포함하여 단열재의 적절한 적용에 문제를 제기하고 있다. 또한 이러한 기계설비시스템에서의 중요성에도 불구하고 단열기술에 관한 한 기술용어, 정의, 사용부호 등의 일관성조차 정립되어 있지 않아 이 분야의 현대화와 기술적 관심이 요구되고 있는 실정이다.

단열재의 열전달계산에서는 벽체의 온도와 주위온도가 주어져 있는 경우 단열재를 관통하는 열전도와 마감표면의 대류열전달 및 복사열전달 등이 합당하게 검토되어야 한다. 단열재의 열전도율에 관해서는 측정방법이 KS 등에 규정되고 있어서^(4, 5) 대체로 신뢰할 수 있을 정도의 데이터가 유통되고 있다. 다만 대부분의 단열재는 다공성 물질로서 투습성의 문제가 있어 일부 독립기포로 구성된 재질을 제외하고는 열전도성의 경년열화가 설계에 전제되어야 한다.

단열재표면에서의 열전달 자료는 공인 규격이나 개별적 기술자료를 막론하고 그 신뢰성이 매우 미흡한 실정이다. KS2803에서 정하는 보온보냉 공사의 시공 표준에서 경제적보온두께 산출을 위한 소위 '표면열전달율'은 $12\text{W/m}^2\text{K}$ 를, '보냉 공사에 사용하는 보냉재의 두께' 등의 산출에는 $8\text{W/m}^2\text{K}$ 를 적용하게 되어 있으며^(6, 7) 국내의 각 기술자료에서는 임의로 $5\text{--}10\text{W/m}^2\text{K}$ 사이 값들을 적용하고 있으나 그 근거는 확실하지 못하다. 또한 이들 기준에 근거한 현행 지방서 등도 현실적 한계를 개선해야 할 시점에 있다.⁽⁸⁾

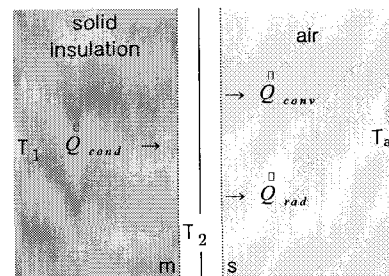
실제로 신소재를 포함하는 단열재의 표면 또는 시공마감재의 표면은 복사특성이 매우 다양하여 방사율이 알루미늄시트 등의 0.1 정도에서 고무발포보온재 등의 0.9까지 범위에 있으며 기계설

과 같은 실내의 경우 표면에 자연대류를 가정할 때 복사특성이 열전달을 지배할 가능성이 충분히 클 것이며 이에 따른 최적 단열재 두께도 변화폭이 커질 것으로 예상된다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 표면의 복사특성이 표면열전달에 미치는 영향을 고찰하고 결로나 화상을 방지하는 목적의 표면온도제어를 위한 단열두께 산정에 대한 합리적 방안을 제시하고자 하였다.

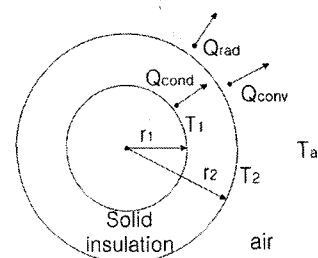
2. 이론적 배경

2.1 표면에너지평형

단열재를 포함하는 시스템에 열전달 현상을 해석하기 위하여 대기에 면하고 있는 불투명한 고체물체 표면부근에 고체측과 공기측의 실질적인 두 개 계면을 Fig. 1에 나타내었다. m면을 통하여 전도에 의한 열이동이 있을 것이며 복사 및 대류 열이동은 s면을 통과한다. 두 면사이의 체적에 대하여 에너지출입의 평형식을 세우면



(a)



(b)

Fig. 1 Insulation for mechanical system
 (a) Thermal equilibrium at a solid-gas interface
 (b) Condensation control nomenclature for a cylindrical coordinate

$$\sum \dot{Q} = \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{rad} = 0 \quad (1)$$

가 된다.

유한한 두께의 벽체를 통과하는 일차원 열전도 문제는 열전달을 \dot{Q}_{cond} 이 열이동방향 n 의 온도구배 dT/dn 에 비례하는 푸리에의 열전도법칙

$$\dot{Q}_{cond} = -k_i A dT / dn \quad (2)$$

의 지배를 받으며 적정한 경계조건과 같이 해를 구하면 일반적인 형태

$$\dot{Q}_{cond} = k_i A (T_1 - T_2) / L_e \quad (3)$$

로 전도 열전달을 구할 수 있다.

단열재의 등가두께 t 는 평판의 경우 벽체두께를 가리키며 내경 D_1 , 외경 D_2 인 원통 및 구형의 단열재에 대하여는 각각

$$L_e = \frac{D_2}{2} \ln(D_2 / D_1) \quad : \text{cylinder} \quad (4a)$$

$$L_e = D_2 (1 / D_1 - 1 / D_2) \quad : \text{sphere} \quad (4b)$$

와 같이 주어진다.

표면의 대류열전달은 대류열전달계수 h_c 를 사용하여 $\dot{Q}_{conv} = h_c A (T_2 - T_a)$ 로 주어지므로 표면에서의 복사열전달계수에 이를 유추한 복사열전달계수 h_r 을 도입하면 계산과정을 단순히 할 수 있다. 단열재표면이 회표면이며 그 면적이 주변 벽체의 면적에 비하여 작다고 가정할 때, 또한 주위벽체의 온도가 T_a 에 있다고 할 때

$$\dot{Q}_{rad} = h_r A (T_1 - T_a) \quad ; \quad h_r = \epsilon_s \sigma (4T_m^3) \quad (5)$$

이며 $T_m = (T_2 + T_a) / 2$ 이다. s표면을 통과하는 열전달을 \dot{Q}_s 은 대류 및 복사열전달이 병행하여 발생하는 현상이므로

$$\dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_s = (h_c + h_r) A (T_s - T_a) \quad (6)$$

와 같다.

2.2 표면온도제어

식 (1)에 (3)과 (6)을 대입하여 에너지 평형식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(k_i / L_e) A (T_1 - T_2) = (h_c + h_r) A (T_2 - T_a) \quad (7)$$

기계설비의 보온시스템 계산에서 요구되는 표면온도가 주어지면 필요한 보온재의 등가두께는

$$L_e = (k / h_s) [(T_1 - T_2) / (T_2 - T_a)] \quad ; \quad h_s = h_c + h_r \quad (8)$$

와 같이 계산할 수 있으며 여기서 h_c 와 h_r 는 모두 온도의 함수가 된다.

단열재 주위에 강제대류가 없다고 가정할 때 자연대류열전달계수의 경우 수직벽체에 대하여 Churchill and Chu⁽¹⁰⁾로부터

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + 0.670 (Ra_L \psi)^{1/4} \\ \psi = [1 + (\frac{0.492}{Pr})^{9/16}]^{-16/9} \quad ; \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (9)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + 0.670 (Ra_L \psi)^{1/4} (1 + 1.6 \times 10^{-8} Ra_L \psi)^{1/2} \\ ; \quad 10^9 \leq Ra_L \leq 10^{12} \quad (10)$$

를 이용하여 산출할 수 있다. 수직관의 경우도 곡률을 무시하면 같은 적용이 가능하다. 수평관의 경우 실용범위에서 층류자연대류가 예상되므로 Churchill and Chu⁽¹¹⁾로부터

$$\overline{Nu}_D = 0.36 + \frac{0.518 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \\ ; \quad 10^{-6} \leq Ra_D \leq 10^9 \quad (11)$$

을 적용하여 계산을 수행한다.

Table 1 Temperature conditions for the sample cases

case	ambient, T_a	wall, T_1	insulation surface, T_2
condensation control	30°C	5°C	27°C*
personnel protection 1	20°C	60°C	40°C
personnel protection 2	20°C	120°C	40°C

* 상대습도 78% 기준

Table 2 Parameter range

	units	standard case	range
diameter of horizontal pipe, D_1	m	0.10	0.05 -0.20
height of vertical wall, L	m	2.0	1.0 -4.0
emissivity, ϵ_s	-	0.5	0.1 -0.9
thermal conductivity, k_i	W/mK	0.035	0.030 -0.045

3. 계산결과 및 고찰

단열재를 포함하는 시스템에 열전달 현상을 해석하기 위하여 대기에 면하고 있는 불투명한 고체물체 표면부근에 고체측과 공기측의 실질적인 두 개 계면을 Fig. 1 에 나타내었다. m면을 통하여 전도에 의한 열이동이 있을 것이며 복사 및 대류 열이동은 s면을 통과한다. 두 면사이의 체적에 대하여 에너지출입의 평형식을 세우면

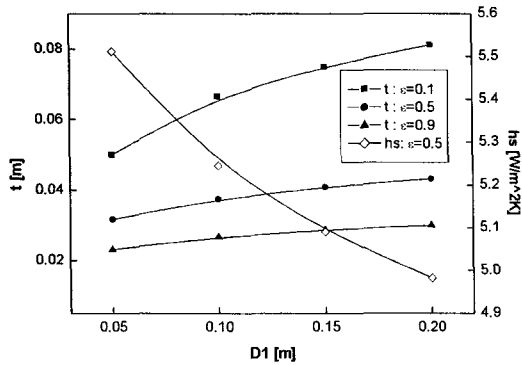


Fig. 3 t and hs for horizontal pipes (condensation control)

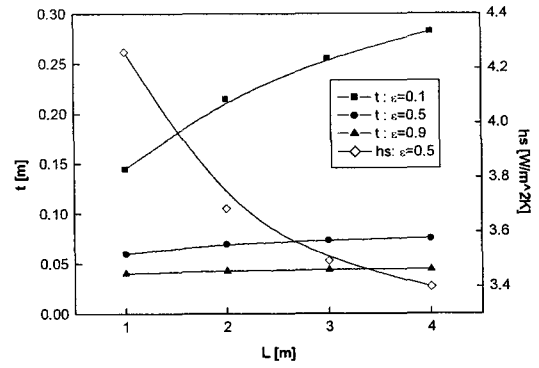


Fig. 4 t and hs for vertical walls (condensation control)

Fig. 3과 4는 각각 수평원관의 외경 및 수직벽의 높이와 표면 방사율에 따라 표면온도를 노점 온도 이상으로 올리기 위한 단열재의 두께를 나타낸 것이다. 외경 또는 수직벽의 높이가 증가함에 따라 평균 복합열전달계수는 감소하며 단열재의 두께는 완만히 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서 수평원관의 표면 방사율이 변할 때 소요 단열재두께가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며 $\epsilon=0.9$ 일 때 단열재두께는 $\epsilon=0.1$ 일 경우에 비교하여 60%이상 감소하였다. 이는 표면 열전달 중 복사에 의한 것이 25%정도에서 70%이상으로 증가하기 때문이다.

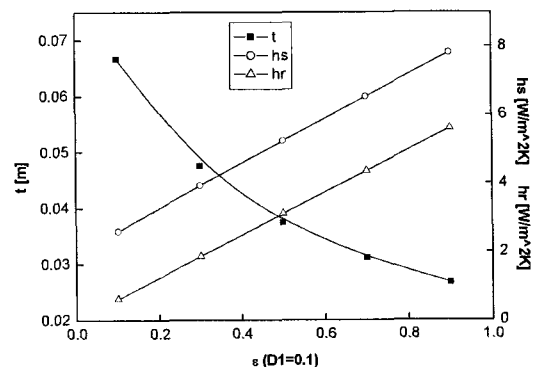


Fig. 5 Effects of ϵ_s on insulation thickness (condensation control for a 0.1cm OD horizontal pipe)

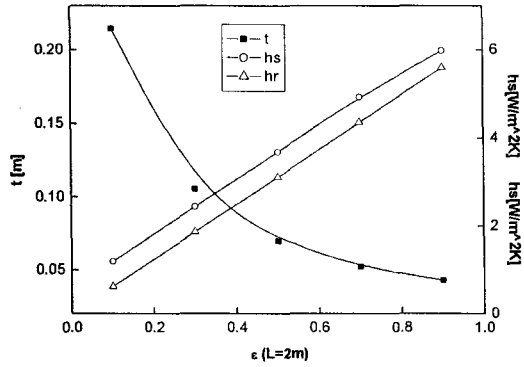


Fig. 6 Effects of ϵ_s on insulation thickness (condensation control for a 2m high vertical wall)

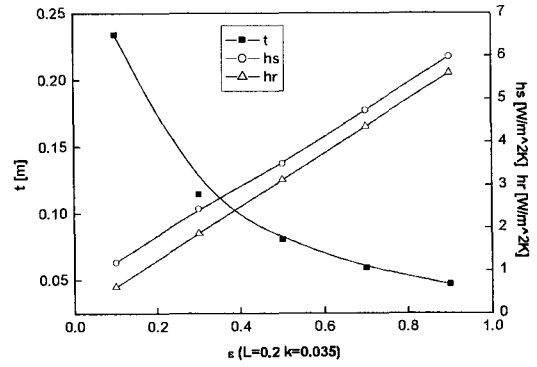


Fig. 9 Effects of ϵ_s on t and hs for a 2m high vertical hot wall ($T_1 = 120^\circ\text{C}$)

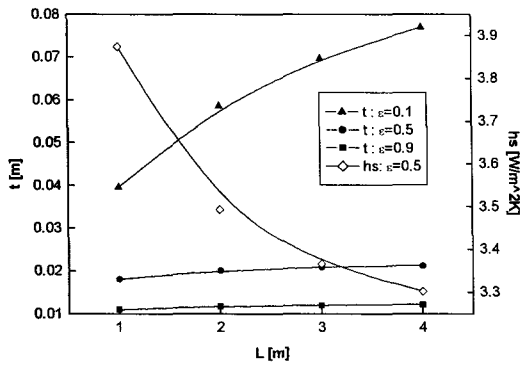


Fig. 7 t and hs for a vertical wall ($T_1 = 60^\circ\text{C}$) to keep $T_2 = 40^\circ\text{C}$

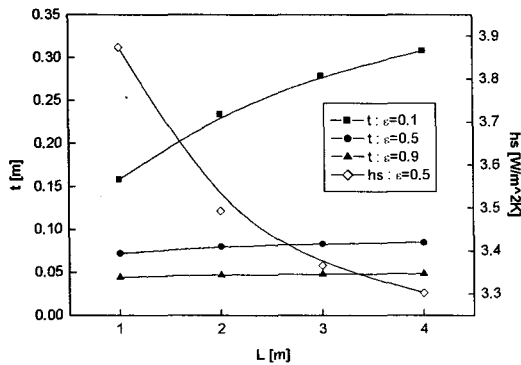


Fig. 8 t and hs for a vertical wall ($T_1 = 120^\circ\text{C}$) to keep $T_2 = 40^\circ\text{C}$

Fig. 6에는 수직벽에 대한 계산결과가 나타나 있으며 자연대류에 비하여 복사 영향이 더욱 커서 복합열전달계수의 90% 이상이 복사에 의한 것으로 분석된다. 방사율의 증가에 따라 단열재 두께는 더욱 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 60°C 수직벽의 높이를 독립변수로 할 때 단열재의 표면온도를 40°C 이내로 유지하기 위한 단열재의 보온두께를 방사율의 변화에 따라 나타낸 것이다. 정성적인 경향은 단열재두께의 경우(Fig. 4)와 유사하게 나타나고 있다. 단열재를 가로지르는 온도차이가 유사한데도 불구하고 표면 열저항이 큰 영향을 주는 경우이므로 보온재 두께는 1/3정도에 불과함을 알 수 있다.

Fig. 8에는 120°C 수직벽에 대한 표면온도제어를 위한 단열재의 보온두께가 주어져 있으며 60°C 경우에 비하여 크게 증가하였다. 이 경우 표면 열저항은 같으나 단열층의 열저항이 크게 요구되기 때문이다.

Fig. 9에 나타나 있듯이 표면 방사율이 큰 단열재의 경우 표면복사는 대류열전달의 10배가 넘어 열손실에 지배적인 역할을 하고 있으며 안전한 표면온도(40°C)유지에 요구되는 단열재두께를 대폭 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에는 120°C 수평판에서 표면을 안전한 온도 이하로 유지하기 위한 단열재의 두께를 보이고 있다. 모든 경우에서 열전도율이 작으면 단열재 두께는 감소한다. 그 감소율은 표면방사율의 크기에 따라 다르며 방사율이 커지면 그 변화는 작다. 대체로 열전도율이 작고 표면 방사율이 클 때 소요두께는 현저히 작음을 알 수 있다.

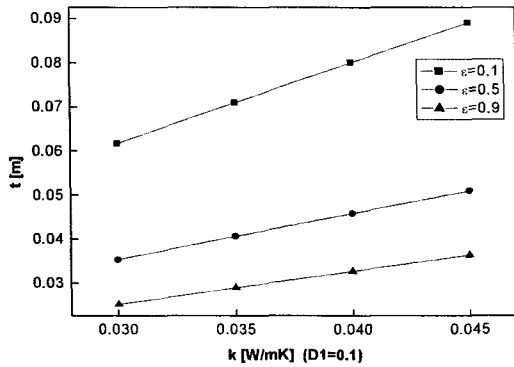


Fig. 10 Effects of k_i on t for a 0.1m OD horizontal pipe ($T_1 = 120^\circ\text{C}$)

4. 결론

음(Ohm)의 법칙에 따라 단열층의 열저항과 표면열전달저항에 비례하여 표면온도가 결정되므로 단열층의 열저항이 작으면 즉 표면열전달계수가 크면 클수록 표면온도를 주위온도에 접근시킬 수 있다. 본 연구에서는 표면의 복사특성이 표면열전달에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 표면온도제어를 위한 단열두께 산정방안을 제시하였으며 대체로 열전도율이 작고 표면 방사율이 클 때 소요두께는 크게 감소하는 것으로 나타났다.

(1) 신소재 등 표면 방사율이 큰 표면에서의 열전달은 복사현상이 지배하고 있으며 소요 단열재 두께가 크게 감소한다. 표면 방사율이 큰 단열재의 경우 복사현상이 표면열전달의 90%를 상회하였다.

(2) 열전도율의 증가에 따라 단열의 목적을 막론하고 소요 단열재두께는 증가하며 그 변화율은 방사율이 작을수록 더 커진다.

(3) 외경 또는 수직벽의 높이의 증가에 따라 평균 복합열전달계수는 감소하며 단열재의 두께는 완만히 증가한다.

본 연구의 해석은 표면에서의 자연대류만을 고려한 것으로 필요시 강제대류가 복합적으로 작용하는 경우에 대한 해석이 추가로 검토되어야

할 것이다. 향후 현행 규격이나 기준 등 공인 기술자료들이 이와 같은 논리와 자료를 반영하여 개선되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김효경, 1976, 국산 단열재의 열특성 연구, 공기조화 냉공공학회지, Vol 5, No 2, pp. 98-107.
2. 윤관선, 2005, 친환경 고무발포 단열재, 대한설비공학회 2005하계학술대회 논문집, pp. 399-404.
3. Glicksman, L. R. and Hong, J. K., 1995, A Study on Rigid Foam/Evacuated Powder Composite Panels for Thermal Insulation, 공기조화 냉동공학회 1995 하계학술발표회 논문집, pp 445-451.
4. 한국표준협회, 1995, 보온재의 열전도율 측정방법, 한국산업규격, No. 9016.
5. Paek, J. U., Kim, S. Y. and Kang, B. H., 2000, Effect thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials, Int. J. Thermophysics, Vol. 21 pp. 1464-1469.
6. 김석현, 김성찬, 1994, 보온재의 경제적 표준시공규격, 공기조화냉동공학회 연구보고서.
7. 한국표준협회, 1996 보온 보랭 공사의 시공 표준, 한국산업규격, No. F 2803.
8. 건설교통부, 2005, 건축기계설비공사표준시방서, 01030장(보온공사), pp 51-71.
9. ASHRAE, 2005, Insulation for Mechanical Systems, ASHRAE Handbook of Fundamentals, Ch 26, pp. 26.1-26.17.
10. Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., 1975, Correlating equations for laminar and turbulent free convection form a vertical plate, Vol 18, pp. 1323-1329.
11. Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., 1975, Correlating equations for laminar and turbulent free convection form a vertical plate, Vol 18, pp. 1049-1053.