

단열재가 부착된 수직벽 표면의 온도제어 해석

강 병 하, 피 창 현*, 김 석 현†

국민대학교 기계시스템공학부, *국민대학교 대학원

Analysis on Surface Temperature Control of an Insulated Vertical Wall Under Thermal Radiation Environment

Byung Ha Kang, Chang Hun Pi*, Sukhyun Kim†

School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received October 20, 2011; revision received January 27, 2012)

ABSTRACT: In this study, a rational procedures for estimation of insulation thickness of a vertical wall for condensation control or personnel protection has been investigated. Design parameters are 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.

Key words: Vertical wall(수직벽), Condensation control(표면결로 제어), Surface radiation(표면복사), Radiation heat transfer coefficient(복사열전달계수), Insulation thickness(단열재 두께)

기 호 설 명

하첨자

A : 단열재 표면적 [m^2]
 L : 수직벽 높이 [m]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 단열재의 열전도율 [W/mK]
 t : 단열재 두께 [m]

e : 공기 및 벽체
 1 : 수직벽의 외표면
 2 : 단열재의 표면

1. 서 론

각종 기기의 표면으로부터 열손실 또는 열취득을 차단하는 일차적인 목적으로 여러 가지 재질의 단열재를 적용하고 있으며 재질의 선정은 포함하는 적정한 설계에 힘입어 에너지 이용합리화, 환경 관점의 쾌적성, 사용의 편리성, 다양한 용도 등 많은 장점으로 당면한 그린환경 사회구축에 기여하고 있다.⁽¹⁾ 구체적으로 단열재의 적용은 다음 중 하나 이상의 기능을 달성하기 위하여 검토되며 적정한 논리에 근거하여 설계되어야 한다.

그리스 문자

ε : 표면방사율
 θ : 무차원 온도
 σ : Stefan-Boltzman 상수 [W/m^2K^4]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4673; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: skim@kookmin.ac.kr

- 가. 결로 방지를 위한 저온표면 온도조절.
- 나. 화상 등의 사고방지를 위한 표면 온도조절.
- 다. 에너지의 합리적 이용과 경제성의 최적화.
- 라. 공정산업 장치내 작동유체의 온도유지 또는 동결방지.
- 마. 소음제어, 화재안전, 부식방지, 등.

이러한 기계설비 시스템에서의 중요성에도 불구하고 단열기술에 관한 한 기술용어, 정의, 사용부호 등의 일관성이 정립되어 있지 않으며 특히 최근 신소재기술이 발달함에 따라 여러 종류의 단열재가 추가로 출시되고 있어 위에 열거된 여러 기능에 적합한 특징을 지니고 있다고 알려지고 있으나⁽²⁾ 이에 대한 공인된 기술적 검토나 학술적 분석 등이 아직 미흡한 것이 실정이다.

국내의 단열재 관련 열전달 자료는 공인 규격이나 개별적 기술자료를 막론하고 그 근거와 일관성이 약하다. KS2803에서 정하는 보온 보냉 공사의 시공 표준에서 경제적 보온두께 산출을 위한 소위 ‘표면 열전달율’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,⁽³⁾ 국내의 각 기술자료에서는 임의로 $5 \sim 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 사이 값들을 적용하고 있으나 그 근거는 확실하지 못하다. 또한 이들 기준에 근거한 현행 시방서 등도 현실적 한계를 개선해야 할 시점에 있다.⁽⁴⁾

표면온도제어에 관하여는, Sahin and Kalyon⁽⁵⁾이 공정이나 작업자 안전의 목적으로 배관표면온도를 일정하게 유지하는 단열두께에 대하여 연구하였으며 Li and Chow⁽⁶⁾는 동결방지를 위한 열적, 경제적 단열두께 계산 논리를 제시하였다. 우리나라에서도 Lee and Kim⁽⁷⁾이 발포성단열재를 사용한 건물외벽의 열성능을, Ahn and Kong⁽⁸⁾은 PVC 배관의 표면 결로 현상을 연구하는 등 표면 온도 제어에 관한 관심이 증대하였다.

그러나 최근의 신소재를 포함하는 단열재 표면 또는 시공마감재의 표면은 복사특성이 매우 다양하여 방사율이 0.1정도인 알루미늄 시트에서 0.9정도인 고무발포보온재까지 큰 범위에 걸쳐 있으며 기계실과 같은 실내의 경우 표면에 자연대류를 가정할 때 복사특성이 열전달을 지배할 가능성이 충분히 클 것이며 이에 따른 최적 단열재 두께도 변화폭이 커질 것으로 예상된다. 이에 따라 Kang et al.^(9, 10)은 단열재를 포함하는 수평관 및 수직평관의 표면열전달 현상에 대한 엄밀해를 통하여 이러한 효과를

확인하였다.

본 연구에서는 수직표면의 온도제어 목적의 단열설계를 위한 무차원 설계 논리를 제시하고 특히 저온 표면의 결로방지와 고온 표면의 화상방지 등 두 가지 전형적 경우의 단열설계에 대하여 정성적, 정량적 열전달 특성을 고찰하여 특히 복사효과가 적절히 반영되어야 할 여건 등을 제시하였다.

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. u 면을 통하여 전도에 의한 열이동이 있을 것이며 복사 및 대류 열이동은 s 면을 통과한다. 두 면사이의 체적에 대하여 에너지출입의 평형식을 세우면 식(1)과 같다.

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

여기서 \dot{Q}_{cond} 은 유한한 두께의 벽체를 통과하는 일차원 열전도 문제로서 열이동 방향벡터를 n 이라고 할때, 푸리에의 열전도법칙을 적용하여 지배방

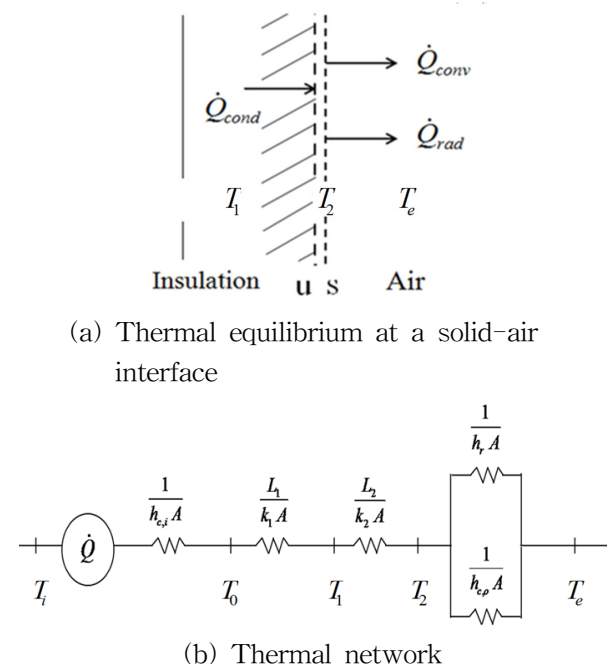


Fig. 1 Insulation for mechanical system.

정식을 세우고 경계조건을 적용하여 풀면 다음과 같은 일반화된 해를 얻는다.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{dT}{dn} = \frac{kA}{t} (T_1 - T_2) \quad (2)$$

여기서 t 는 단열재의 두께를 가리킨다.

식(1)에 포함된 표면 대류열전달 성분은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A (T_2 - T_e) \quad (3)$$

한편 단열재 표면 복사문제에서 표면 2가 확산 회 표면이며 주위 벽면 e 에 밀폐된 상태라면 형상 계수 $F_{2e} = 1$ 가 되고, 특히 실제 상황이 $\frac{\epsilon_2 A_2}{\epsilon_e A_e} (1 - \epsilon_e) \ll 1$ 또는 $\frac{A_2}{A_e} \ll 1$ 임을 감안하여 다음과 같은 선형식을 쓸 수 있다.

$$\dot{Q}_{rad} = h_r A (T_2 - T_e) : h_r = \epsilon \sigma (4T_m^3) \quad (4)$$

여기서 T_m 은 $(T_2 + T_e)/2$ 를 가리킨다.

2.2 표면온도제어

식(2)~식(4)를 에너지 평형식(1)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 단열재의 두께 t 에 관한 엄밀 해를 얻을 수 있다.

$$t = \frac{k}{h_s} \frac{(T_1 - T_2)}{(T_2 - T_e)}; h_s = h_c + h_r \quad (5)$$

또한 유효 Biot 수 Bi 와 무차원 설계온도 θ 를 다음과 같이 정의하여 도입하면 식(5)는 일반화된 간단한 수식으로 나타낼 수 있으며 편리하게 단열설계의 정성적 분석에 이용할 수 있다.

$$Bi = \theta : \quad (6)$$

$$Bi = \frac{h_s t}{k}, \theta = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_e}$$

여기서 Bi 는 대류와 복사를 포함한 공기층 열저항과 단열재층 열저항의 비로서 무차원화된 단열두

께라고 볼 수 있으며 단열설계의 개념상 매우 중요한 지표가 된다. 기계설비의 보온 시스템 계산에서 요구되는 표면온도 등의 온도조건이 주어지면 Bi 를 구할 수 있고 온도 제어에 필요한 단열재의 두께 t 를 얻을 수 있다. 이러한 절차는 단순히 식(5)를 통한 계산보다는 번거로운 것으로 생각할 수도 있으나 실상은 기능적 설계에 흐르지 않고 시스템의 본질을 파악한다는 점에서 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

한편 표면 열전달현상의 특성을 파악하기 위하여 표면 총 열전달계수의 복사분율 f_r 를 다음과 같이 정의하여 정성적 검토에 이용하였다.

$$f_r = \frac{h_r}{h_s} \quad (7)$$

계산에서 대류열전달계수 h_c 에 관해서는 Churchill and Chu⁽¹¹⁾가 제시한 다음의 Nusselt 수 관계식을 적용하여 계산을 수행하였다.

$$\overline{Nu_L} = 0.68 + 0.67 (Ra_L \Psi)^{0.25} (1 + 1.6 \times 10^{-8})^{1/12} : 10^9 \leq Ra \leq 10^{12} \quad (8)$$

여기서,

$$\Psi = \left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} \quad (9)$$

Table 1 Standard conditions

	Ambient, T_e	Wall, T_1	Insulation surface, T_2
<Case 1> Low temperature	30°C	5°C	27.3°C
<Case 2> High temperature	15°C	250°C	60°C

Table 2 Parameter range

	Units	Standard case	Range
Height of vertical wall, L	m	2	1~4
Emissivity, ϵ	-	0.5	0.0~1.0
Thermal conductivity, k	W/mK	0.024(case 1) 0.038(case 2)	0.020~0.045 0.035~0.070

이며 Ra 및 Pr 은 각각 수직벽의 높이에 기준한 Rayleigh 수 및 Prandtl 수를 나타낸다.

2.3 조건 및 계산 방법

본 연구는 전술한 단열설계의 목적 중 표면 결로 방지를 위한 저온 시스템의 경우(case 1)와 화상 등의 안전문제에 대한 고온시스템의 경우(case 2) 등 두가지로 대별하여 진행하였으며 필요한 표준 온도 조건과 계산상의 변수범위는 Table 1과 Table 2에 각각 나타나 있다. case 1의 경우 한국표준산업규격(KS)⁽³⁾에서 제시하고 있는 표준조건으로 주위온도 30°C, 상대습도 85%, 그리고 수직벽체 표면 온도 5°C를 기준하였으며 단열재의 열전도율은 경질우레탄 폼을 기준으로 하여 0.024 W/mK를 택하였다. 한편 case 2의 경우 화상 방지를 위한 단열재 표면 온도는 65°C로 설정하였고 열전도율은 유리면을 기준으로 하여 0.038 W/mK를 적용하였다. 수직벽의 높이는 1~4 m 사이의 것으로 범위를 설정하였고 표준계산은 2 m로 사용하였다. 방사율의 값은 단열재료나 마감재료에 따라 다르겠지만 표면복사를 무시한 경우($\epsilon = 0$)로 부터 흑체($\epsilon = 1$)에 이르기까지의 범위를 설정하였다. 신소재로 각광받고 있는 발포고무재질의 경우 표면방사율이 0.88~0.90로서 흑체에 가까운 것으로 간주된다.

계산 수행은 EES(engineering equation solver)를 이용하여 필요한 물성치의 값을 얻고 위의 식을 통한 계산과정으로부터 실질적인 단열재의 두께 t 를 구하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

Fig. 2에 결로방지 설계에 대하여 수직벽의 높이에 따른 표면 총 열전달계수 h_s 와 소요 단열두께 t 가 주어져 있다. 수직벽 높이의 증가에 따라 표면총 열전달계수는 소폭 감소하며 이에 따라 공기 측 열저항이 다소 증대되어 표면온도를 노점온도 이상으로 유지하기 위한 소요 단열두께는 증가하게 된다.

Fig. 3에는 유효 Biot 수 Bi 와 복사분율 f_r 의 변화를 나타내었다. 단열재 설계에서 Bi 는 8이상의 다소 큰 값을 가지며 수직벽 높이에 상관없이 그리고 표면열복사가 증가할 때도 일정함을 알 수 있다. 하지만 이 경우 단열재 자체의 열저항이 증가하여 단열재의 열화 등에 의한 열전도율의 변화를 정확하

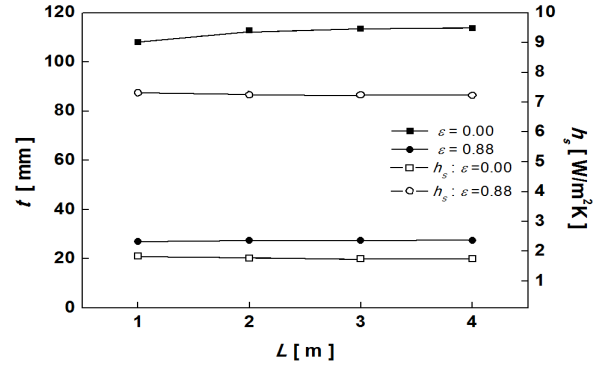


Fig. 2 Insulation thickness t vs. L for case 1.

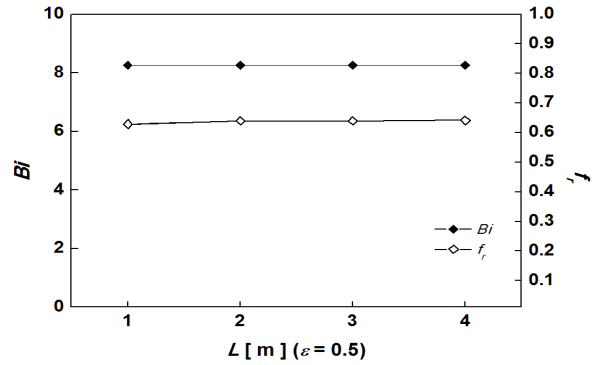


Fig. 3 Biot number Bi and f_r vs. L for case 1.

게 확보하는 것이 설계상 중요한 사항이 될 것이다.

표면 복사의 중요성이 Fig. 4에 나타나 있으며 복사현상이 무시될 경우 보온재의 두께가 2배 이상 과잉추산 될 가능성이 있음을 보이고 있다.

Fig. 5에는 표면방사율에 따른 유효 Biot 수와 표면총열전달계수의 복사분율을 나타내었으며 표면복사의 효과가 전체의 75%에 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 열전도율과 표면방사율에 따른 결로방지 단열 두께와 한국표준규격(KS)에서 정한 ‘보랭두께’를 나타내었다. KS에서 규정된 보랭두께는 표면 복사가 다소 큰 경우에 해당되며 표면방사율이 작은 경우 표면마감에 신중을 기하지 않으면 결로를 방지하지 못할 위험이 클 것이다.

Fig. 7은 단열재 표면의 노점온도 T_2 의 변화에 따른 단열 소요두께를 나타내었다. T_2 에 따라 단 단열두께가 크게 변화 하는 것을 알 수 있으며, 기계실 등의 주위 환경에 따라 설계조건이 명확하게 주어져야 하며 단열설계도 달라져야 할 것이다. 여기서도 표면방사율의 중요성이 나타나 있다.

고온 배관시스템에서 표면 접촉을 통한 화상 등

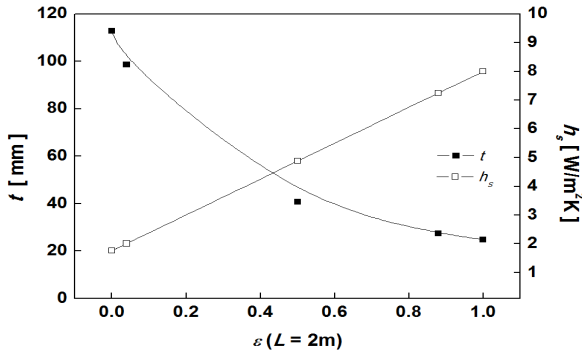


Fig. 4 Insulation thickness t vs. ϵ for case 1.

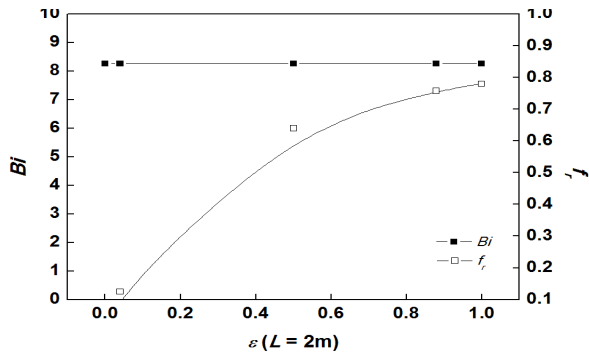


Fig. 5 Biot number Bi and f_r vs. ϵ for case 1.

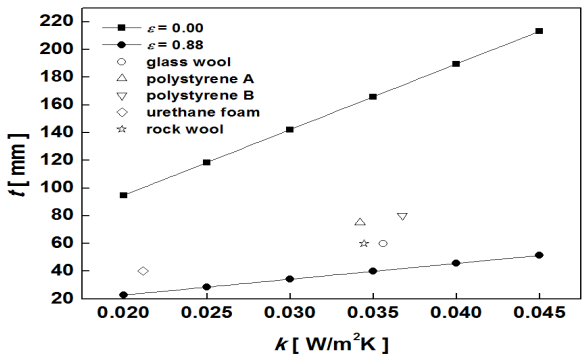


Fig. 6 Insulation thickness t vs. k for case 1.

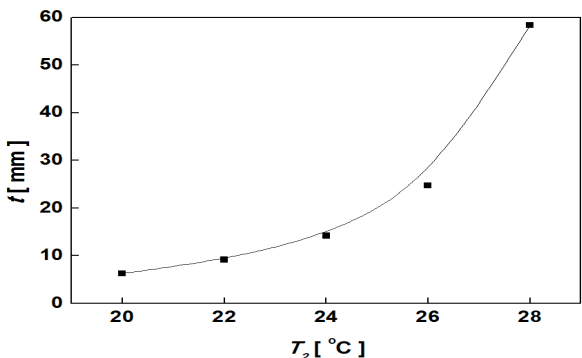


Fig. 7 Insulation thickness t vs. T_2 for case 1.

안전문제에 대한 단열설계로서 벽체의 온도가 25 0°C인 경우에 대하여 표면 온도를 65°C 이하로 유지하기 위한 경우(case 2)의 계산결과가 Fig. 8에서 Fig. 12까지에 주어져 있다.

수직벽의 높이에 따라 요구되는 단열재의 두께를 Fig. 8에 나타내었다. 정성적인 경향은 case 1과 유사하나 Bi 의 크기는 4.2정도로 작아서 표면 열전달의 정확한 계산이 필수적이 된다.

Fig. 9와 Fig. 10에는 case 2에서 표면방사율에 따른 단열재의 두께와 표면 총 열전달계수의 복사 분율을 나타내었으며 case 1과 유사 하게 표면복사

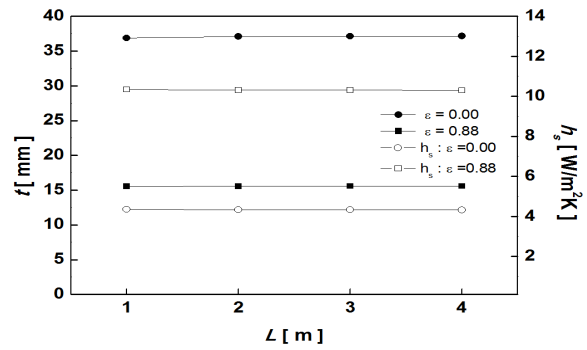


Fig. 8 Insulation thickness t vs. L for case 2.

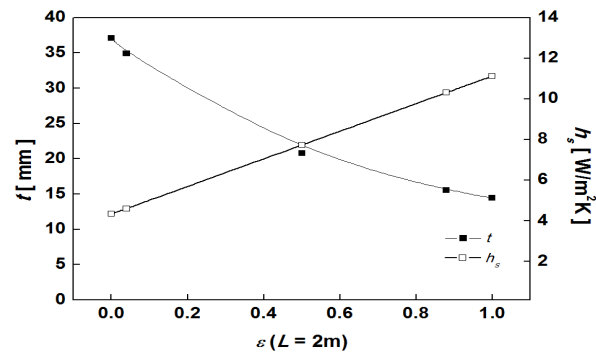


Fig. 9 Insulation thickness t vs. ϵ for case 2.

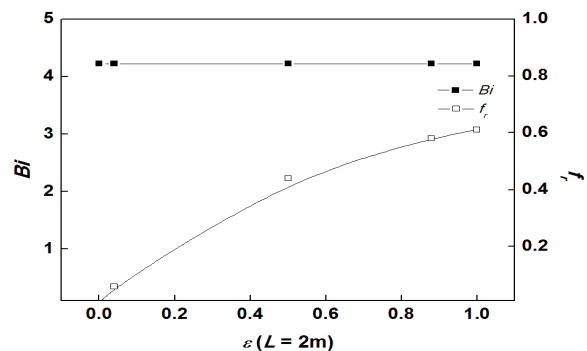


Fig. 10 Biot number Bi and f_r vs. ϵ for case 2.

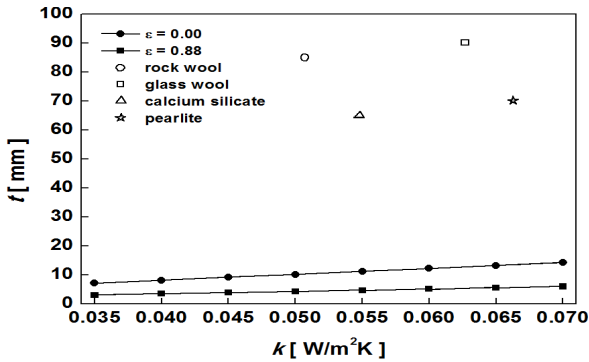


Fig. 11 Insulation thickness t vs. k for case 2.

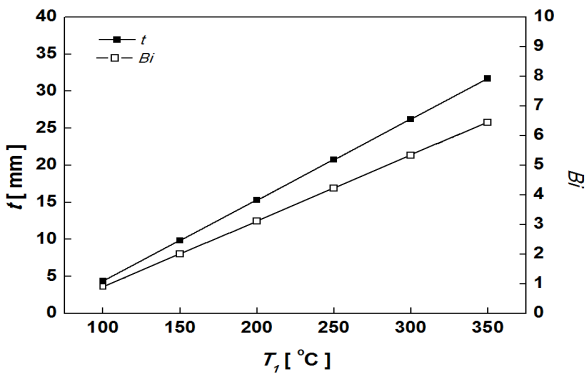


Fig. 12 Insulation thickness t and biot number Bi vs. T_1 for case 2.

효과가 전체의 60%를 차지하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 case 2에서 열전도율에 따른 단열재의 두께를 나타낸 것으로서 현행 기준의 과잉설계 가능성을 보여 준다.

마지막으로 수직벽의 외표면 T_1 의 변화에 따른 단열소요두께와 유효 Biot 수가 Fig. 12에 주어졌으며 수직벽의 온도조건이 단열설계의 중요한 인자가 됨을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 덕트나 기기 등의 수직표면에 대한 온도제어를 위하여 설치하는 단열재의 두께 산정 방법을 무차원화된 엄밀해로 제시하였다.

특히 결로방지 및 화상방지를 위한 두 가지 실용상 전형적인 경우에 대하여 계산을 수행하였으며 단열설계를 지배하는 현상과 표면의 복사특성이 미치는 영향 등에 대한 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 저온 배관의 결로방지용 단열재 설계에서는 Bi 가 8이상의 다소 큰 값을 가지며 관경과 표면열

복사가 증가할수록 점차 증가하여 Bi 를 증가시키므로 결로방지 설계에서는 투습에 의한 단열재의 열화 등 열전도율의 변화를 정확하게 파악하는 것이 설계상 중요한 사항이 된다.

(2) 한편 고온 배관시스템의 안전설계에서는 결로방지의 경우와는 달리 Bi 의 크기가 4정도까지 감소하므로 표면열전달의 중요성이 증가하고 복사특성의 정확한 계산이 필수적이 된다.

(3) 표준 온도조건하에 있는 1~4 m 높이 범위의 수직벽에 대하여 평균 대류열전달계수는 높이에 사실상 무관하며 단열재의 소요 두께는 표면온도 등 다른 설계조건에 따라서만 변화한다.

(4) 결로방지 설계에 있어 단열두께는 표면방사율에 따라 4배까지 증가하며 노점온도에 따라서도 크게 변화하므로 명확한 설계조건을 제시 할 필요가 있으며 실무상 설계시 노점온도 조건에 따라 규격 적용을 수정 보완하여야 한다.

(5) 본 연구의 계산범위에서 표면복사의 효과는 표면대류의 2배에 달하여 복사현상이 무시될 경우 단열 두께가 과잉 또는 과소 추산될 가능성이 있다. 또한 복사효과가 지배적인 범위에서 비선형 현상의 실험적 검증이 요망된다.

(6) 신소재의 적용과 마감재의 발달로 에너지 절약을 도모하고 있는 추세에 맞추어 현행 설계규격이나 시방 등 단열설계 자료들의 열설계 측면의 취약점을 적절히 보완하여야 한다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20114010100070)과 2011년도 국민대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드린다.

참고문헌

1. Kim, H. K., 1976, Study on thermal properties of heat insulation materials in Korea, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 98-107.
2. Yoon, K. S. and Lee, K. Y., 2008, A suitable thickness of flexible elastomeric foam, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 429-433.
3. Korean Standards, F2803, 2006, Standard prac-

- tice for thermal insulation works.
4. The Ministry of Construction and Transportation, 01030(heat insulation), 2005, Mechanical Standard Specification, pp 51-71.
 5. Sahin, A. Z. and Kalyon, M., 2005, Maintaining uniform surface temperature along pipes by insulation, *Energy*, Vol. 30, No. 5, pp. 637-647.
 6. Li, Y. F. and Chow W. K., 2005, Optimum insulation-thickness for thermal and freezing protection, *Applied Energy*, Vol. 80, No. 1, pp. 23-33.
 7. Lee, H. K. and Kim, M. J., 1985, A study on thermal performance of external masonry wall structures by using foamed plastic as thermal insulation materials, *Korean Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 5, No. 2, pp. 267-270.
 8. Ahn, C. H. and Kong, S. H., 2007, A study on the interpretation of surface condensation depending on piping materials, *Korean Journal of the Society of Living Environment System*, Vol. 14, No. 3, pp. 171-179.
 9. Kang, B. H., Pi C. H., and Kim, S., 2011, Nondimensionalized analysis on surface temperature control of an insulated vertical wall, *International Journal of Air Conditioning and Refrigeration*, Vol. 19, No. 2, pp. 99-105.
 10. Kang, B. H., Pi, C. H., and Kim, S., 2011, Surface Temperature Control of an Insulated Horizontal Pipe under Thermal Radiation Environment, *Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 54-60.
 11. Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., 1975, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, Vol. 18, pp. 1323-1329.