

복사효과를 포함하는 수평관 표면의 온도제어

강 병 하, 피 창 현*, 김 석 현†
 국민대학교 기계시스템공학부, *국민대학교 대학원

Surface Temperature Control of an Insulated Horizontal Pipe under Thermal Radiation Environment

Byung Ha Kang, Chang Hun Pi*, Sukhyun Kim†
 School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea 136-702
 *Graduate School, Kookmin University, Seoul, Korea 136-702

(Received September 3, 2010; revision received December 2, 2010)

ABSTRACT: Procedures for estimation of insulation thickness for a horizontal pipe for condensation control or personnel protection has been investigated, parallel to the previous work of a vertical wall case. Parameters include pipe diameter, emissivity, thermal conductivity, and operating temperatures. The results indicated that the surface emissivity plays a very important role in the design of insulation, specially for the case of high temperature application with low Bi. The effect of surface radiation in such case could be up to 65% of the total. Required insulation thickness for the surface temperature control increases as pipe diameter increases and as surface emissivity decreases. Adequate revision of specifications or standards to include newly invented insulation materials with high emissivity has been also suggested.

Key words: Insulation thickness(단열재 두께), Surface temperature control(표면온도 제어), Horizontal pipe(수평관), Surface radiation(표면복사), Radiation Coefficient(복사열 전달계수)

기 호 설 명

A : 단열재 표면적 [m^2]
 D : 원통 직경 [m]
 Le : 단열재 등가두께 [m]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 단열재의 열전도율 [W/mK]
 t : 단열재 두께 [m]
 Bi : Biot 수, $hsLe/k$
 Nu : Nusselt 수, $h_s D/k_f$

Ra : Rayleigh 수, $\beta \Delta T g D^3 / \nu a$
 Pr : Prandtl 수, ν / a

그리스 문자

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

하첨자

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

† Corresponding author

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

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

1. 서 론

주위온도보다 높거나 낮은 온도 레벨에서 작동되는 배관 및 각종 기기에 단열재가 사용되고 있으며 일차적인 목적은 표면으로부터의 열손실 또는 열취득을 차단하기 위한 것이라 할 수 있다. 그러나 단열재는 이차적으로 에너지의 합리적 이용을 통한 경제성의 최적화, 인체 화상 등의 사고방지나 표면결로의 방지를 위한 표면온도 조절, 작동유체 온도유지 또는 동결방지, 그리고 소음차단에 이르기까지 매우 다양한 목적을 추구하기 위하여 적용되고 있으며 각각의 목적에 따라 그 안전성이나 열적성능이 적절한 논리와 방법에 근거하여 설계되어야 한다.

최근 신소재기술이 발달함에 따라 여러 종류의 단열재가 추가로 출시되고 있어 상기 기능들에 적합한 특징을 추구하고 있는 것으로 알려지고 있으나 이에 대한 공인된 기술적 검토나 학술적 분석 등이 아직 미흡하여 기존의 소재들을 포함하여 단열재의 적절한 적용에 상당한 개선이 필요한 것이 현실이다.

벽체의 온도와 주위온도 조건이 주어지 있는 경우 단열재의 열설계 계산에서는 단열재를 관통하는 열전도와 마감표면의 대류열전달 및 복사열전달 등이 필요한 다른 설계 지표들과 함께 합당하게 검토되어야 한다. 이를테면 경제적 최적두께는 단열비용과 이를 통한 에너지절약 비용을 합한 것이 최저가 되는 보온두께로서 최근 Mahlia et al.⁽¹⁾과 Bahadori et al.⁽²⁾에 의해 수식형태로 제안되었으며 표면 온도제어에 관하여는 Sahin et al.⁽³⁾이 공정이나 안전의 목적으로 배관표면온도를 일정하게 유지하는 단열 두께에 대하여, Li et al.⁽⁴⁾은 동결방지를 위한 열적, 경제적 단열 두께 계산 논리를 제시하였다. 우리나라에서도 Lee et al.⁽⁵⁾이 발포성단열재를 사용한 건물외벽의 열성능을 Ahn et al.⁽⁶⁾은 PVC 배관의 표면결로 현상을 연구하는 등 표면 온도 제어에 관한 관심이 증대하였고 특히 Yoon et al.⁽⁷⁾은 최근 출시되어 주목을 받고 있는 고무발포 보온재의 성능과 적정두께에 대한 계산, 측정결과들을 제시하였다. 그러나 Oh et al.⁽⁸⁾이 제시한 바와 같이 단열재의 표면 또는 시공마감재의 표면은 복사특성이 매우 다양하여 자연대류 환경을 가정할 때 복사특성이 열전달을 지배할 가능성이 충분히 클 것으로 예상하며 이에 따른 단열재 두께의 적절한 예측이

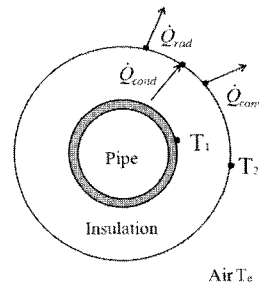
단열재설계의 중요한 부분이 될 것이므로 선행연구들에서 적절하게 반영되지 않은 표면복사현상이 규명되어 설계의 정확성을 기할 필요가 있다.

본 연구에서는 자연대류환경에 있는 수평관에 대하여 표면복사특성이 단열재 표면 온도제어 목적의 단열두께에 미치는 영향을 고찰하여 단열설계에 대한 합리적 방안을 제시하고자 하였다.

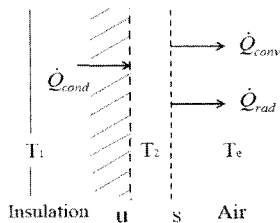
2. 이론적 배경

2.1 표면에너지평형

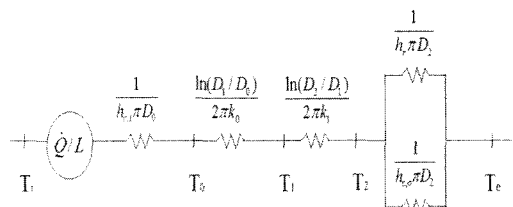
단열재를 포함하는 배관 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(b)에 표시한 단열재의 외표면(u-면)



(a) Thermal equilibrium at an insulation-air interface



(b) Condensation control nomenclature for a cylindrical coordinate



(c) Thermal network

Fig. 1 Insulation for mechanical system.

과 공기층 계면(s-면) 사이에 에너지 평형식을 적용하면 식(1)과 같다.

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

여기서 \dot{Q}_{cond} 은 유한한 두께의 벽체를 통과하는 일차원 열전도 문제로서 열이동 방향벡터를 n이라고 할 때, 푸리에의 열전도법칙을 적용하여 지배방정식을 세우고 경계조건을 적용하여 풀면 다음과 같이 단열두께에 대해 일반화된 해를 얻는다.

$$\dot{Q}_{cond} = kA_0 \frac{dT}{dn} = \frac{kA_0}{L_e} (T_1 - T_2) \quad (2)$$

식(2)는 좌표계에 무관하게 적용될 수 있는 유용한 형태로서 L_e 는 단열재의 등가두께를 나타낸다. 내경 D_1 , 외경 D_2 인 원통 형태에 대하여 등가두께 L_e 는 다음과 같이 주어진다.

$$L_e = \frac{D_2}{2} \ln(D_2/D_1) \quad (3)$$

단열재 표면 2가 확산 회표면이며 주위 벽면 e에 밀폐된 상태라면 형상 계수 $F_{2e} = 1$ 가 되고 표면 2와 e간의 표면복사 \dot{Q}_{rad} 는 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{\epsilon_2 A_2}{1 + \frac{\epsilon_2 A_2}{\epsilon_e A_e} (1 - \epsilon_e)} (\sigma T_2^4 - \sigma T_e^4) \quad (4)$$

특히 실제 상황이 $\frac{\epsilon_2 A_2}{\epsilon_e A_e} (1 - \epsilon_e) \ll 1$ 또는 $\frac{A_2}{A_e} \ll 1$ 이므로 식(4)는 더욱 단순히 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon_2 A (\sigma T_2^4 - \sigma T_e^4) \quad (5)$$

한편 식(1)에 포함된 표면 대류열전달 성분은 다음 식(6)으로 주어진다.

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A (T_2 - T_e) \quad (6)$$

s표면을 통과하는 총열전달을 \dot{Q}_s 은 대류와 복사 열전달이 병행하여 발생하므로 $\dot{Q}_s = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad}$ 가

되고 복사열전달계수 $h_r = \epsilon\sigma(4T_m^3)$ 을 도입할 때 다음 식(7)과 같이 간단히 선형화하여 쓸 수 있다.

$$\dot{Q}_s = h_s A (T_2 - T_e); \quad h_s = h_c + h_r \quad (7)$$

여기서 h_s 는 표면 총열전달계수를 나타내며 온도 $T_m = (T_2 + T_e)/2$ 의 함수가 된다.

2.2 표면온도제어

식(2)와 식(7)을 이용하면 에너지 평형식 식(1)은 다음과 같다.

$$(k/L_e)A(T_1 - T_2) = h_s A(T_2 - T_e) \quad (8)$$

여기서 유효 Biot 수 $Bi = \frac{h_s L_e}{k}$ 와 무차원설계온도 $\theta = \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_e}$ 를 정의하면 식(8)을 일반화된 간단한 수식으로 쓸 수 있다.

$$Bi = \theta \quad (9)$$

식(9)는 단열설계의 기본식으로 간편하게 사용될 수 있다. 기계설비의 보온시스템 계산에서 요구되는 표면온도 등의 온도조건이 주어지면 Bi를 구할 수 있고 온도 제어에 필요한 등가 보온 두께 L_e 및 대응하는 보온재의 두께 t 를 얻을 수 있다. 이 과정에서 표면총열전달계수 h_s 를 적정하게 얻는 것이 필수적이다.

대류열전달계수 h_c 에 관해서는 $Ra \leq 10^7$ 범위의 수평관 주위의 공기에 대한 층류자연대류에 대한 Corcione et al.⁽⁹⁾의 관계식을 적용하여 계산을 수행하였다.

$$\overline{Nu_D} = 0.701 + 0.411 Ra^{0.25}; \quad 10^1 \leq Ra \leq 10^7 \quad (Pr = 0.71) \quad (10)$$

한편 표면열전달현상의 특성을 파악하기 위하여 표면총열전달계수의 복사분율 f_{hr} 를 다음과 같이 정의하여 정성적 검토에 이용하였다.

$$f_{hr} = \frac{h_r}{h_s} \quad (11)$$

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. 또한 관내유동과 관 벽체의 열저항은 무시하여 공정유체의 사용온도를 T_1 으로 적용하였다.

case 1의 경우 KS⁽¹⁰⁾에서 제시하고 있는 표준조건으로 주위온도 30℃, 상대 습도 85%, 그리고 수평관 표면 온도 5℃를 기준하였으며 단열재의 열전도율은 경질우레탄폼을 기준으로 하여 0.024 W/mK를 택하였다. 한편 case 2의 경우 화상 방지를 위한 단열재 표면 온도는 ASHRAE⁽¹¹⁾에 따라 60℃로 설정하였고 열전도율은 유리면을 기준으로 하여 0.038 W/mK를 적용하였다. 환경은 호칭환경 1/2인치로부터 8인치 사이의 것으로 상용 규격에 합당한 외경을 사용하였으며 표준계산은 3인치 강관에 대한 것이다. 방사율의 값은 단열재료나 마감재료에 따라 다르겠으나 표면복사를 무시한 경우($\epsilon=0$)로부터 흑체($\epsilon=1$)에 이르기까지의 범위를 설정하였다. 신소재로 각광받고 있는 발포고무재질의 경우 표면방사율이 0.88~0.90로서 흑체에 가까운 값을 가진다.

계산 수행은 EES(Engineering Equation Solver)를 이용하여 필요한 물성치의 값을 얻고 위의 식을

Table 1 Standard conditions

rotection	Ambient, T_c	Pipe, T_1	Insulation surface, T_2
<case 1>	30℃	5℃	27.3℃
<case 2>	15℃	250℃	60℃

Table 2 Parameter range

	Units	Standard case	Range
Pipe diameter OD, D_1	m	0.089	0.0213~0.219
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
Temperature, T	℃	27.3(case 1, T_2) 250(case 2, T_1)	20~28 100~350

통한 계산과정으로부터 단열재의 등가두께 L_e 및 실질두께 t 등을 구하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

결로방지 설계에 대하여 수평관의 환경에 따른 소요 단열두께 t 가 표면총열전달계수 h_s 와 함께 Fig. 2에 주어져 있다. 외경의 증가에 따라 표면총열전달계수는 감소하며 이는 곡률 효과의 감소로 대류열전달계수가 감소하기 때문이다. 이에 따라 공기층 열저항이 증대하며 표면온도를 노점온도 이상으로 유지하기 위한 소요 단열두께는 증가하게 된다.

Fig. 3에는 무차원 단열 두께인 Bi와 복사 분율 f_{hr} 의 변화를 나타내었다. 단열재 설계에서 Bi는 5이상의 다소 큰 값을 가지며 환경이 증가할수록 그리고 표면열복사가 증가할수록 점차 증가함을 보여주고 있다. 환경 증가에 따라 대류열전달계수가 감소

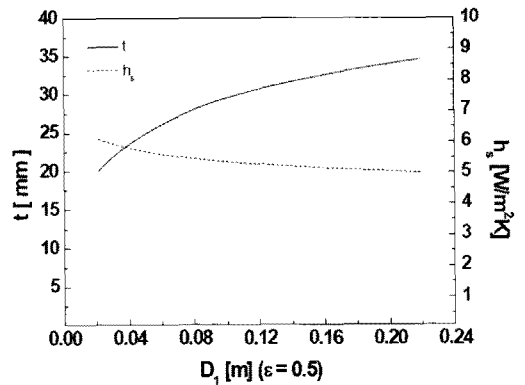


Fig. 2 Insulation thickness t vs D_1 (case 1).

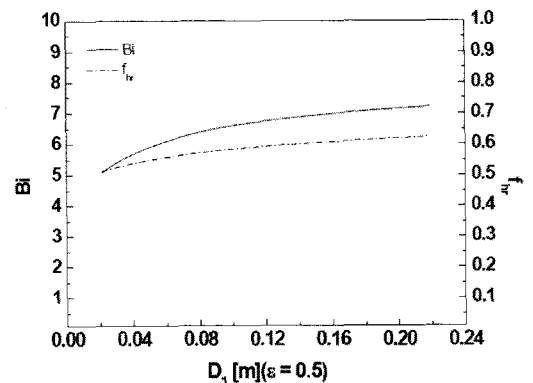


Fig. 3 Bi and f_{hr} vs D_1 (case 1).

하므로 복사분율은 증가하는 경향을 보이며 환경이 큰 시스템의 경우일수록 표면복사현상의 문제가 중요함을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에는 표면방사율에 따른 단열 설계 특성치들의 변화가 나타나 있다. 무차원 단열 두께인 Bi와 복사 분율 f_{hr} 의 변화를 보면 복사의 효과가 전체 표면열전달의 65%에 미칠 수 있다는 것을 알 수 있으며 복사현상이 무시될 경우 보온재의 두께가 2배 이상 과잉추산 될 가능성이 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6에는 열전도율과 표면 방사율에 따른 결로 방지 단열 두께와 KS⁽¹⁰⁾에서 규정한 값을 나타내었다. 후자의 경우 규정된 수치는 표면 복사가 다소 큰 경우에 해당되며 표면방사율이 작은 재료를 적용할 경우 결로를 방지하지 못할 위험이 클 것이다.

Fig. 7은 단열재 표면의 노점온도 T_2 의 변화에 따른 단열 소요두께를 나타내었다. T_2 에 따라 단열 두께가 크게 변화 하는 것을 알 수 있으며, 기계실

등의 주위 환경에 따라 설계조건이 명확하게 주어 젤야 하며 단열설계도 달라져야 할 것이다. 여기서도 표면 복사의 중요성이 나타나 있다.

한편 고온 배관시스템에서 표면 접촉을 통한 화상 등 안전문제에 대한 단열설계로서 배관의 온도가 250℃인 경우에 대하여 표면 온도를 60℃이하로 유지하기 위한 경우(case 2)의 계산결과가 Fig. 8에서 Fig. 10에 주어져 있다. 외경의 크기에 따라 요구되는 단열재의 두께에 대하여 곡률의 영향을 포함하는 정성적인 경향은 case 1과 유사하나 Bi의 크기는 상대적으로 작아져서 표면 열전달이 점차 중요해지는 현상으로 판단되며 복사의 정확한 계산이 필수적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 case 2에서 열전도율에 따른 단열재의 두께와 KS에서 규정한 값을 나타낸 것으로서 열적 현상만의 관점에서는 개선의 여지가 있다.

관내의 공정유체의 온도에 대한 소요 단열두께와 총열전달계수의 변화가 Fig. 11에 나타나 있다. 고

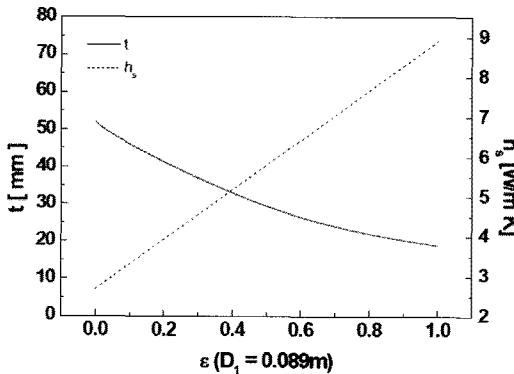


Fig. 4 Insulation thickness t vs ϵ (case 1).

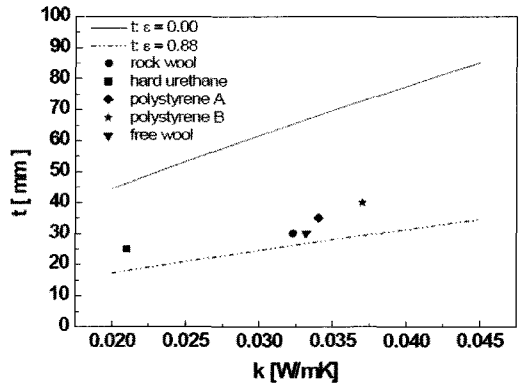


Fig. 6 Insulation thickness t vs k (case 1).

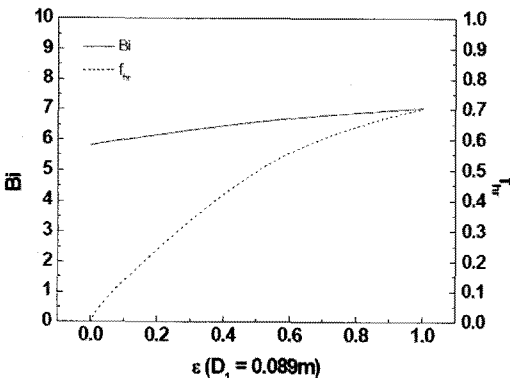


Fig. 5 Bi and f_{hr} vs ϵ (case 1).

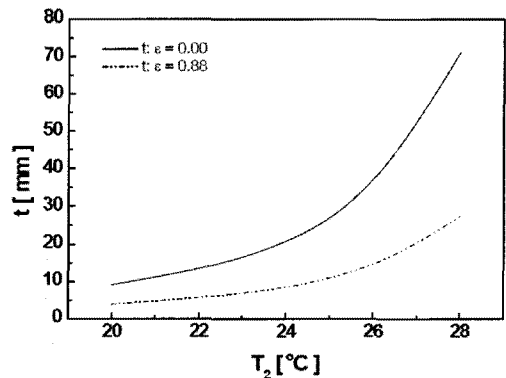


Fig. 7. Insulation thickness t vs T_2 (case 1).

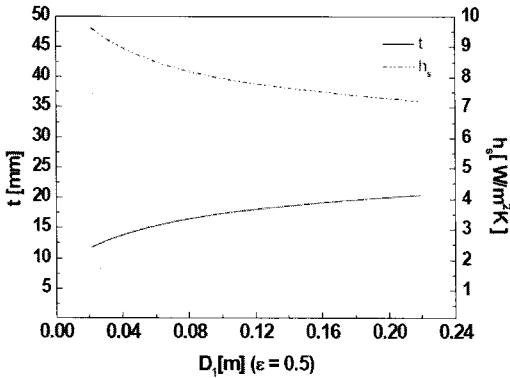


Fig. 8 Insulation thickness t vs D_1 (case 2).

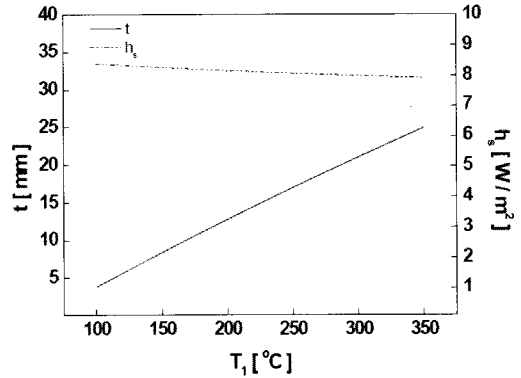


Fig. 11 Insulation thickness t vs T_1 (case 2).

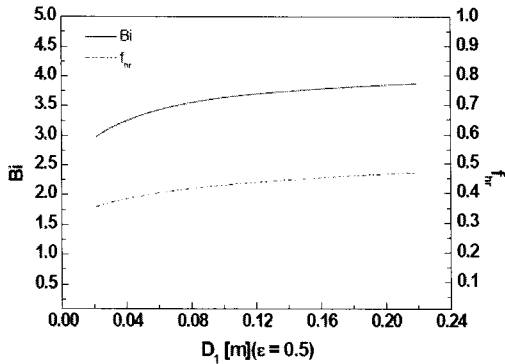


Fig. 9 Bi and f_{hr} vs D_1 (case 2).

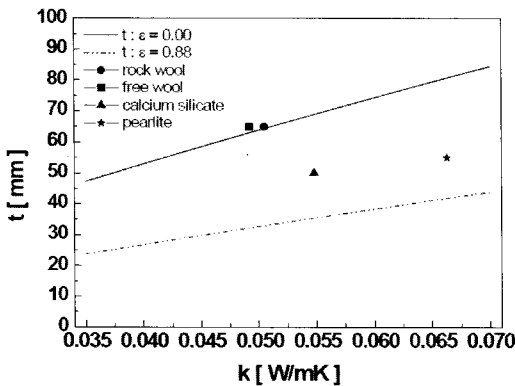


Fig. 10 Insulation thickness t vs k (case 2).

온이 될수록 Ra와 Nu는 점차 증가하나 단열 두께의 급격한 단조 증가로 표면총열전달계수는 다소 감소하는 경향을 보인다. 고온 영역에서의 Ra는 식(10)의 한계인 10^7 에 이른다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평관의 저온 및 고온 수평배관의 표면 온도제어를 위한 단열설계에서 단열재 두께 산정논리를 일반화하여 간단한 무차원 수식으로 제시하였고 표면의 복사특성이 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본문 내에 제시된 무차원화 된 식(9)는 여러 연구에서 실증된 엄밀해이며 시스템의 좌표계에 관계없이 단열설계의 기본식으로 간편하게 사용될 수 있다.

(2) 저온 배관의 단열 설계에서는 Bi가 5이상의 다소 큰 값을 가지며 환경과 표면열복사의 증가에 따라 더욱 증가하므로 단열재 층의 열전달현상이 지배적인 역할을 하게 되며 단열재의 열화 등에 의한 열전도율의 변화를 정확하게 확보하는 것이 설계상 중요한 관점이 되어야 한다. 또한 T_2 에 따라 단열두께가 크게 변화 하므로 주위 환경에 따라 설계조건이 명확하게 주어질 필요가 있다.

(3) 한편 고온 배관시스템의 안전설계에서는 결로 방지의 경우와는 달리 Bi의 크기가 상당히 작아지므로 단열재 표면의 열전달현상이 큰 영향을 미치게 되고 복사특성 등 정확한 표면 열전달의 계산이 필수적이 된다.

(4) 환경 증가에 따른 대류열전달계수의 감소에 따라 복사분율은 증가하는 경향을 보이며 환경이 큰 시스템 일수록 표면복사의 역할이 크다.

(5) 단열설계에서 표면복사의 효과가 전체의 65%에 미칠 수 있으며 복사현상이 무시될 경우 단열 두께가 과잉 또는 과소 추산될 가능성이 있다.

(6) 신소재의 적용과 마감재의 발달로 에너지 절약을 도모하고 있는 현 추세에 비추어 볼 때 관련된 규격이나 기준 등 공인 기술 자료의 적절한 대응과 개선이 필요하다.

후 기

본 연구는 2009년도 국민대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드린다.

참고문헌

- Mahlia, T. M. I., Taufiq, B. N., and Masjuki, H. H., 2007, Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall, *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 2, pp. 182-187.
- Bahadori, A. and Vuthaluru, H. B., 2010, A simple correlation for estimation of economic thickness of thermal insulation for process piping and equipment, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 2-3, pp. 254-259.
- Sahin, A. Z. and Kalyon, M., 2005, Maintaining uniform surface temperature along pipes by insulation, *Energy*, Vol. 30, No. 5, pp. 637-647.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Oh, D. E., Park, J. I., Lee, M. W., Hong, J. K., Kang, B. H., and Kim, S. H., 2006, Effects of surface radiation on the insulation for mechanical system, *Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference*, pp. 1006-1011.
- Cianfrini, C., Corcione, M. and Habib, E., 2006, Free convection heat transfer from a horizontal cylinder affected by a downstream parallel cylinder of different diameter, *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 45, pp. 923-931.
- Korean Standards, F2803, 2006, Standard practice for thermal insulation works.
- ASHRAE Handbook-Fundamentals, 2005, *Insulation for mechanical system*, Vol. 26, pp. 1-6, 26.