소방 배관 동파방지용 열선의 위치 선정을 위한 비정상 열전달 수치해석

최명영**,** · 이동욱*** · 최형권****

*한국화재보험협회 방재시험연구원, **서울과학기술대학교 기계공학과, ***서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Numerical Analysis of Unsteady Heat Transfer for the Location Selection of Anti-freeze for the Fire Protection Piping with Electrical Heat Trace

Myoung-Young Choi**** · Dong-Wook Lee*** · Hyoung-Gwon Choi****

*Fire Insurers Laboratories of Korea

Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology *Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology

(Received January 8, 2014; Revised February 24, 2014; Accepted February 24, 2014)

요 약

본 논문에서는 에너지방정식과 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방적식을 사용하여 동절기 소방배관의 동파방지를 위한 최적의 열선위치를 확인하였다. 물의 자연대류와 소방 배관의 전도 열방정식이 결합된 복합열전달을 해석하였다. 혼합 열전달 배관 내 물의 비정상적인 유동과 온도분포를 확인하기 위하여 SIMPLE 형태의 알고리즘을 기반으로 한 상용코 드(ANSYS-FLUENT)가 사용되었다. 수치해석을 수행하여 등온선과 벡터장을 살펴보았다. 물의 열팽창계수를 일정하다 고 가정할 때 소방 배관 단면의 하부에 열선을 설치하는 것이 다른 위치에 설치하는 것보다 시간에 따른 물의 최저온도 가 가장 높아서 동파방지에 가장 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, the unsteady incompressible Navier-Stokes equations coupled with energy equation were solved to find out the optimal location of electrical heat trace for anti-freeze of water inside the pipe for fire protection. Since the conduction equation of pipe was coupled with the natural convection of water, the analysis of conjugate heat transfer was conducted. A commercial code (ANSYS-FLUENT) based on SIMPLE-type algorithm was used for investigating the unsteady flows and temperature distributions in water region. From the numerical experiments, the isotherms and the vector fields in water region were obtained. Furthermore, it was found that the lowest part of the pipe cross-section was an optimal position of electrical heat trace assuming the constant thermal expansion coefficient of water since the minimum temperature of the water with the position is higher than those with the other positions.

Keywords : Heat tracing, anti-freeze, CFD, Natural convection, Conjugate heat transfer

1. 서 론

최근 기후변화에 따른 이상기후 현상이 크게 증가하고 있다. 동절기의 혹한이나 하절기의 혹서현상 등이 자주 보 고되고 있는데, 혹한기가 장기 지속될수록 쉽게 배관의 동 파사고를 접할 수 있다. 특히 소방 배관의 경우 대부분 배 관 내 물의 유동이 없기 때문에 동파 가능성이 더 크다. 소방 배관의 동파방지대책에는 여러 가지 종류가 있으나 현장에서 가장 잘 쓰이는 대책중의 하나가 배관에 열선과 배관보온재를 시공하는 것이다. 배관에 열선을 시공하게 되면 열선의 열로 인해 온도차가 발생하여 배관 및 배관 내부의 유체로 열전달이 발생하게 된다. 대류에 의한 유체 의 유동은 자연계에서 흔하고 중요한 현상이다. 밀폐계 내 부에 열원 또는 온도차가 존재하는 경우의 자연대류 현상 에 대한 연구가 수행되어 왔는데 그 중에서도 수평 방향 온도 구배를 갖는 사각^(1.3) 또는 환형⁽⁴⁾ 밀폐계 내부에 존 재하는 물체의 열경계 조건에 따른 선행 연구가 많이 존재 하고 있다. 본 연구는 원형 밀폐계 경계의 일부가 일정한 열 유속을 갖고 그 내부에 물이 들어있는 2차원 밀폐계 유 동의 응용 연구이다. 배관의 동파사고는 배관 내 물이 동 결하면서 체적이 증가하는데 이 때 발생하는 압력이 배관 의 최대 내압력 보다 커서 배관이 파손되는 현상이다. 소

[†]Corresponding Author, E-Mail: hgchoi@snut.ac.kr TEL: +82-2-979-6312, FAX: +82-2-949-1458

ISSN: 1738-7167 DOI: http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.1.052

방 배관의 동파방지대책으로 현장에서 주로 사용되고 있 는 방법 중 하나가 배관에 열선을 시공하는 것이다. 본 논 문에서는 소방 배관의 동파방지를 위한 최적의 열선위치 를 CFD 해석을 이용하여 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식 및 사용코드

밀폐계 내부에서 층류 형태의 자연대류가 발생하려면 Rayleigh 수가 일정 범위 안에 있어야 하는데, 밀폐계의 형상에 따라 그 범위에 있어서 약간의 차이가 있다. 본 논 문에서 다루고 있는 수평원형배관의 경우, Kuehn은 수평 원형배관에서 Rayleigh 수는 10⁰에서 10⁷의 범위 안에 있 는 경우 층류 자연대류 열전달이 발생한다는 것을 알아냈 다⁽⁵⁾. 본 논문의 경우, 해석 범위 내 최대 Rayleigh 수는 10⁴ 이하로 배관 내부에서 층류 형태의 자연대류 열전달 이 발생할 것을 예측할 수 있다. 자연대류를 포함한 복합 열전달을 고려한 배관의 열전달 특성을 파악하기 위해 지 배방정식은 2차원 연속방정식, 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식 및 에너지방정식을 적용하였으며 다음과 같다.

$$\begin{split} \cdot \ & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \cdot \ & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \cdot \ & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y \rho} \frac{1}{\rho} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \beta (T - T_{\infty}) \\ \cdot \ & \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{split}$$

물리적인 현상을 나타내는 지배 방정식들을 다음과 같 은 가정들을 적용함으로써 단순화하였다.

- 배관 내 유체는 비정상 상태 2차원 유동이다.
- · 부력항 내의 유체의 밀도에 대해서는 Boussinesq approximation을 적용하였고, 그 이외 유체 및 배관의 모 든 물성치는 일정하다.
- 유체의 압축성 효과, 점성 소산 및 복사 열전달을 무시 한다.
- · 중력가속도는 -y 방향으로 작용한다.

열전달은 배관과 열선에서는 전도방정식을 물과 배관사 이에서는 대류-전도 방정식을 사용하여 해석하였다. 열을 받는 배관 내부에서의 유동을 해석하기 위해 Boussinesq 모델을 사용하였고, 지배방정식의 해법을 위해서 ANSYS-FLUENT 에서 제공하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 시간 이산화는 2차 정확도 내재적 방법을 사용하였고, 대 류항 공간 차분은 2차 정확도의 상류도식(Second Order Upwind)을 사용하였다. 비정상상태의 해석에서 Boussinesq 모델을 사용할 경우 물의 열팽창계수가 온도에 따라 변하 게 되는데, 본 논문에서는 280 K에서의 열팽창계수 값을 사용하였다.

2.2 모델링

본 논문에서 사용한 배관의 규격은 소방 자재로 많이 사용되고 있는 ISO 65, Carbon steel tubes suitable for screwing in accordance with ISO 7-1의 국제표준과의 부합화를 위한 대응 표준인 KS D 3507 중 호칭지름 50의 배관을 참고하여 모델링하였으며, 해석에 사용된 주요 설계치는 Table 1과 같다.

현장에서는 소방 배관의 동파를 방지하기 위해 열선을 배관보온재와 함께 Figure 1과 같이 시공하고 있다. 보다 효율적으로 CFD 해석을 수행하기 위해 Figure 1을 Figure 2와 같이 단순화하였다. 수평하게 설치된 소방 배관의 동 파방지를 위한 가장 효과적인 열선의 위치를 확인하기 위 해 열선(Heat source)을 배관 단면의 12시 방향을 기준으 로 θ=0°, 45°, 90°, 135°, 180°에 시공한 경우를 각각 모델 링하여 온도 분포를 분석하였다.

Table 1. Design Specifications of the System

Properties & Spec.	Value
Outside diameter of pipe	60.5 mm
Thickness of pipe	3.65 mm
Material of pipe	Carbon Steel
Conductivity of pipe	54 W/mK
Density of pipe	7854 kg/m ³
Specific heat of pipe	434 J/kgK
Ambient temperature	0 °C
Intial water temperature	0 °C (Liquid)
Size of heat trace	(W) 10 mm
Nominal power of heat trace	16 W/m



Figure 1. Profile and plan view of the system.



Figure 2. A schematic of the system.

2.3 초기조건 및 경계조건

본 논문은 소방배관의 동파방지를 해결하기 위해 열선 및 배관보온재를 설치하는 것으로써 배관과 배관 내부의 초기 온도는 물의 어는점인 273 K로 설정하였다. 배관보온재가 설치된 배관을 모델링하였다. 보온재의 열전도율 측정방법 KS 기준인 KS L 9016을 살펴보면 배관보온재가 시공된 상 태에서의 열전도율을 측정하는 것이 아니라 배관보온재의 시편에 대한 열전도율을 측정하는 시험으로 현장에서 시공 할 때 배관보온재 접합부 등에서 발생할 수 있는 손실이 반 영되지 않으므로 실제 시공 상태에서의 열전도율과는 차이 가 있어 업체에서 제시한 열전도율이 아닌 단열조건을 입력 하였다. 열선이 설치된 배관의 바깥쪽 경계에 단위 m 당 16 W의 열유속을 갖도록 설정하였으며, 이는 열선 자체가 충분히 가열되어 있는 상태를 가정하여 열선이 가열되는 시 간은 없다는 가정 하에 수치해석을 수행하였다.

2.4 격자계 및 시간간격 실험

본 절에서는 열선의 위치에 따른 소방 배관과 배관 내부



Figure 3. A non-uniform D/60 mesh.



Figure 4. Minimum temperature histories for various grid size.

유체의 수치해석에 사용될 격자계를 결정하기 위하여, 배 관 외경(D)을 기준으로 D/40, D/60, D/80의 다양한 격자 계를 사용하여 그 결과치를 상호 비교하였다. D/40의 격 자개수는 1392개, D/60의 격자개수는 2657개, D/80의 격 자개수는 4731개 였다. 단위 m 당 16 W의 열유속을 갖는 열선으로 수치해석을 수행한 후에 1500 s까지의 온도 데 이터를 물의 평균 온도, 최저 온도, 최대 온도로 산출하여 서로 비교하였다. D/40, D/60, D/80의 서로 다른 분해도를



Figure 5. Minimum temperature histories for various timestep size.

가지는 세 가지의 격자계에 대하여 시간간격 1 s로 지정하 여 수치해석을 Figure 4와 같이 수행하였다. D/40, D/60, D/80의 결과가 거의 같음을 확인할 수 있었으나 동파방지 에 가장 중요한 관찰요소인 배관 내 최저온도분포를 온도 변화를 확대하여 살펴본 결과 가장 조밀한 격자계인 D/80 과 D/60의 격자계 시험 결과치가 유사하나. D/40의 격자 계에서는 다소 차이가 있어 본 연구에서는 모든 수치해석 에 대하여 Figure 3의 D/60 비균일 격자계를 사용하였다. 또한 시간간격을 Figure 5와 같이 0.1 s, 0.5 s, 1 s, 5 s, 10 s, 20 s의 다양한 시간간격으로 수치 해석을 수행한 후 시간에 따른 물의 최저 온도, 평균 온도, 최대 온도를 산 출하여 각각 비교하였다. 시간간격 시험 결과에서는 온도 차가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 다만 배관 내 최저온 도 변화를 확대하여 보면 0.1 s, 0.5 s, 1 s, 5 s, 10 s의 결 과와 20 s의 결과가 다소 차이가 있어, 본 연구에서는 모 든 수치해석에 대하여 10s 시간간격을 적용하여 해석하 였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열선의 위치별 배관 등온선 분포

소방 배관의 동파방지를 위한 가장 효과적인 열선의 위 치를 확인하기 위해 열선을 배관 단면의 12시 방향을 기 준으로 θ=0°, 45°, 90°, 135°, 180°에 시공한 경우를 각각 모델링하여 CFD 해석을 통해 온도 분포를 분석하였다. 배 관 내부의 물의 온도가 273 K 일 때를 초기조건으로 열선 에서 가열한 후 일정 시간이 경과된 후 각 열선의 위치별 등온선과 벡터장을 살펴보았다. Figure 6은 초기조건으로 부터 5000 s가 경과된 순간 열선의 위치에 따른 배관 내 온도 분포이다. Figure 6을 살펴보면 θ가 0°, 45°, 90°, 135°, 180°로 증가할수록 배관 내 물의 온도 차이가 작아지 는 경향을 확인할 수 있다. 이는 시간이 10000 s, 15000 s, 20000 s 경과된 순간의 등온선 분포를 확인하여도 유사한 양상으로 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 열선의 위치별 배관 내부 벡터장 분포

Figure 7은 초기조건으로부터 5000 s가 경과 된 순간 열선의 위치에 따른 벡터장이다. 초기조건으로부터 각각 10000 s, 15000 s, 20000 s의 시간이 경과된 순간의 열선 위치에 내부 벡터장 또한 5000 s가 경과된 경우와 그 양 상이 거의 같음을 확인할 수 있었다. 벡터장의 크기가 일 정 시간이 경과된 후 거의 같은 양상을 갖는 원인을 살펴 보면 배관 내부 유동의 추진력은 부력인데 부력의 크기 는 온도차의 크기에 비례한다. Figure 8의 시간에 따른 배관 내 물의 최대온도와 최소온도의 차이를 살펴보면 초기에는 배관 내 물의 최대온도와 최소온도의 차이가 증가하다가 일정시간이 경과되면 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 따라서 온도차이가 일정하게 되면 배관 내부 유동의 추진력인 부력이 일정하게 되어 시간의 흐 름에 따른 벡터장의 크기가 거의 같은 것을 확인할 수 있 었다.

3.3 열선의 위치별 배관 내부 온도비교

본 연구에서는 소방 배관의 동파방지에 가장 효과적인



Figure 6. Isotherms with various heat source position (t = 5,000 s).



Figure 7. Vector fields with various heat source position (t = 5,000 s).



Figure 8. Difference between T_{max} and T_{min} histories with various heat source position.

열선의 위치에 확인하기 위하여 열선의 위치를 달리하여 배관 내 물의 온도 상승 결과를 상호 비교하였다. 열선의 위치는 배관 단면을 기준으로 θ=0°, 45°, 90°, 135°, 180°에 시공한 경우를 각각 모델링하였으며, 열선이 설치 된 부분은 단위 m 당 16 W의 열유속 경계조건을 입력하 였고 그 이외에 배관 보온재가 설치된 부분은 단열 경계 조건을 적용하여 20,000 s 동안 시간에 따른 배관 내 평 균, 최대, 최소 온도 데이터를 각각 비교해 보았다. 배관



source position.

도 변화를 살펴보면 시간이 경과함에 따라 θ=180°, 135°, 90°, 45°, 0° 순으로 온도가 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 배관 내부 평균온도는 에 따른 열 유속 및 단열조건이 동일하여 같은 온도로 상승하는 것을 확인할 수 있었고, 배관 내부 최대온도는 θ=0°, 45°, 180°, 90°, 135° 순으로 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 9. Minimum temperature histories for various heat



4.결 론

소방 배관의 동파 방지대책으로 주로 인용되고 있는 ANSI/IEEE Std. 515에 따르면 배관에 열선을 시공하는 경우 배관의 하부에 설치하라고 되어 있으나, 여기에 관련 된 기술적인 근거 자료는 제공하고 있지 않다. 본 논문에 서는 동파방지에 가장 효과적인 열선의 위치를 고찰하고 자 배관 내부의 2차원 비정상 열전달 수치해석을 수행하 였다. 열선의 위치는 배관 단면 12시 방향을 기준으로 θ = 0°, 45°, 90°, 135°, 180°에 시공한 경우를 각각 모델링하여 해석을 수행하여 다음의 결론들을 유도하였다.

(1) 물의 열팽창계수는 온도에 무관하게 일정하다고 가 정하여 배관 내부의 자연대류를 해석하고, 배관의 전도와 물의 대류를 동시에 고려한 복합열전달 해석을 수행하였 다. 수치해석으로부터 배관 내부의 물에서 열선의 위치에 따라 자연대류에 의한 유동이 서로 다르게 형성됨을 확인 하였다.

(2) 소방 배관의 동파와 밀접한 관련이 있는 배관 내 최 소온도의 시간에 따른 변화를 살펴보면 θ=180°, 135°, 90°, 45°, 0° 순으로 온도가 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. θ=180°인 경우와 θ=135°인 경우가 거의 차 이가 나지 않지만 θ=180°인 경우가 미세하게 높은 것을 확인할 수 있었다.

(3) 본 수치해석 결과, 소방 배관의 동파 방지를 위해서 열선 및 배관 보온재를 시공하는 경우 배관 단면을 기준으 로 θ = 180°에 열선을 시공하는 것이 가장 효과적으로 확 인되었으나, θ = 135°인 경우와 그 차이가 미비하다. 따라 서, ANSI/IEEE Std. 515의 권고와 같이 잠재적인 설비의 오용(Potential mechanical abuse)을 방지하기 위해서는 열 선을 배관 단면을 기준으로 θ = 135° 방향에 설치하는 것 이 가장 타당함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으 로 수행되었습니다.

참고문헌

1. A. Kumar De and A. Dalal, "A Numerical Study of Nat-

ural Convection Around a Square, Horizontal, Heated Cylinder Placed in a Enclosure", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 49, Issues 23-24, pp. 4608-4623 (2006).

- M. Y. Ha, I. K. Kim, H. S. Yoon and S. S. Lee, "Unsteady Fluid Flow and Temperature Fields in a Horizontal Enclosure with an Adiabatic Body", Physics of Fluids, Vol. 14, No. 9, pp. 3189-3202 (2002).
- M. Y. Ha, I. K. Kim, H. S. Yoon, K. S. Yoon, J. R. Lee, S. Balachandar and H. H. Chum, "Two-Dimensional and Unsteady Natural Convection in a Horizontal Enclosure with a Square Body", Numerical Heat Transfer, Vol. 41, pp. 183-210 (2002).
- 4. R. Kumar, "Study of Natural Convection in Horizontal Annuli", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 6, pp. 1137-1148 (1988).
- T. H. Kuehn and R. J. Goldstein, "Numerical Solution to the Navier-Stokes Equations for Laminar Natural Convection about a Horizontal Isothermal Circular Cylinder", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, No. 7, pp. 971-979 (1980).
- 6. ANSYS Co., ANSYS Fluent User's Guide 13.2.4 (2012).
- I. S. Jeong and W. Y. Song, "An Analysis of Unsteady 2-D Heat Transfer of the Thermal Stratification Flow inside Horizontal Pipe with Electrical Heat Tracing", Journal of Korea Society for Energy Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 119-128 (1997).
- 8. ISO 65, Carbon steel tubes suitable for screwing in accordance with ISO 7-1.
- 9. KS D 3507, Carbon steel pipes for ordinary piping (2008).
- 10. KS L 9016, Test methods for thermal transmission properties of thermal insulations (2012).
- 11. R. R. Gilpin, Trans. ASME, Ser. C, Vol. 103, p. 363 (1981).
- ANSI/IEEE Std. 515, Standard for the Testing, Design, Installation and Maintenance of Electrical Resistance Heat Tracing for Industrial Applications (2005).
- ANSI/IEEE Std. 844, Recommended Practice for Electrical Impedance, Induction, and Skin Effect Heating of Pipelines and Vessels (2000).
- ANSI/NECA 202, Recommended Practice for Installing and Maintaining Industrial Heat Tracing Systems (2001).
- 15. NFPA 70, National Electrical Code 427.1 (2008).