

## U자형 배관 내 결빙에 대한 해석적 연구

박용석\*, 서정세\*\*,#

\*경상대학교 융합기계공학과, \*\*경상대학교 기계공학부, ReCAPT

### Numerical Analysis of Freezing Phenomena of Water in a U-Type Tube

Yong-Seok Park\*, Jeong-Se Suh\*\*,#

\*School of Convergence Mechanical Engineering, Gyeongsang National University,

\*\*School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National UNIV.

(Received 19 September 2019; received in revised form 8 October 2019; accepted 20 October 2019)

#### ABSTRACT

This study numerically analyzed the icing process in a U-shaped pipe exposed to the outside by considering the mushy zone of freezing water. Numerical results showed that the flow was pulled outward due to the U-shaped bend in the freezing section exposed to the outside, which resulted in the ice wave formation on the wall of the bended pipe behind. At the same time, the formation of a corrugated ice layer became apparent due to the venturi effect caused by the ice. The factors affecting the freezing were investigated, including the change of the pipe wall temperature, the water inflow velocity, and the pipe bend spacing. It was found that, as a whole, the thickness of the freezing layer increased as the pipe wall temperature decreased. It was also found that the freezing layer became relatively thin when the inflow rate of water was increased, and that the spacing of the pipe bends did not significantly impact the change in the freezing layer.

**Key Words** : Freezing(결빙), U-Type Tube(U자형 배관), Ice Thickness(결빙층), Water(물), Numerical Analysis(수치해석)

#### 1. 서 론

외기온도가 결빙온도이하로 내려가는 조건에서 외부로 노출된 배관내부로 흐르는 유체는 외기온도가 결빙온도이하로 내려가면은 결빙과정을 겪게 된다. 산업현장의 플랜트 설비 등은 배관설비를 많이 갖추고 있으며, 동절기 한파 등으로 인해 외부로

노출된 배관의 동파가 자주 발생하면서 산업재해로 많이 이어지고 있다. 이러한 배관설비의 동파사고는 플랜트의 설비에 기술적, 경제적 손실을 야기한다. 외기의 온도가 영하로 내려가는 겨울의 경우에 Fig. 1과 같은 물공급 설비 또는 하수처리의 폐열회수장치 등의 플랜트에서 외부로 노출된 배관에서 결빙문제를 겪게 된다. 따라서, 이러한 배관의 결빙 및 동파현상을 방지하기 위해 외부로 노출된 배관의 특정 선로에 유체의 흐름을 인위적으로 차단하는 시스템을 갖추기도 한다<sup>[1]</sup>.

# Corresponding Author : [jssuh@gnu.ac.kr](mailto:jssuh@gnu.ac.kr)  
Tel: +82-55-772-1625, Fax: +82-55-772-1577

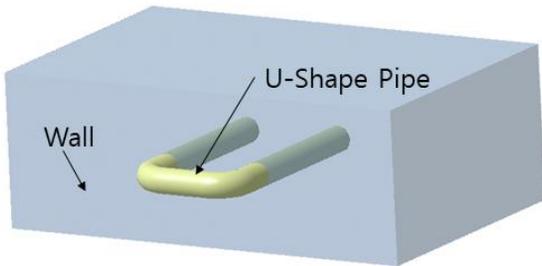


Fig. 1 Schematic diagram of the U-shape pipe installed into the wall of plant system

배관 결빙시 배관 내에 형성된 얼음을 아이스 플러그(ice plug)라 부르며, 이의 형성은 관내 유체의 종류, 온도, 유량, 압력 및 관의 벽면온도, 관직경, 관길이 등에 의해 영향을 받는다<sup>[2]</sup>. 서<sup>[3-5]</sup> 등은 배관의 직관내 결빙에 미치는 인자 등에 대해 살펴보았으며, 정 등<sup>[6]</sup>은 자연대류의 영향을 고려하여 직배관내 결빙과정을 분석하였다. 또한, 배관 내 결빙으로 인한 동절기 동파 사고를 방지하기 위해 Ohm<sup>[7]</sup>은 배관용 탄소강, 강관, 동관, 일반 배관용 스테인레스 강관, 수도용 경질 염화비닐관내에서 물의 동결시 각 배관의 직경에 대한 최대압력 및 한계 얼음 생성 비를 제시하였고, Yun 등<sup>[8]</sup>은 상변화물질을 이용한 동파 방지 밸브를 개발하였다. 그리고 Choi 등<sup>[9]</sup>은 배관 동파 방지를 위해 CFD 해석을 통해 전열선의 설치에 따른 벽면온도를 측정하여 최적의 열선위치를 결정하였다. 이와 같이 최근 동파 방지에 관한 연구는 꾸준히 진행되고 있지만, 설비의 구축에 대한 어려움과 제작 원가 상승에 대한 부담감으로 인해 수도계량기 등에 직접 적용이 어려운 것이 현실이다<sup>[10,11]</sup>.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 외부로 노출된 U자형 배관 내 결빙과정을 수치 해석적으로 살펴보고, 결빙에 미치는 인자를 파악하기 위해 노출된 동관 벽면온도의 변화 그리고 유속변화, 곡관부 간의 간격차 등 결빙에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 동시에 결빙구간에서 배관 길이방향으로 결빙의 두께 변화 경향을 파악하여 보고, 배관 출구 부근의 단면에서 결빙형성모양 등을 살펴보고자 한다.

## 2. 수치해석

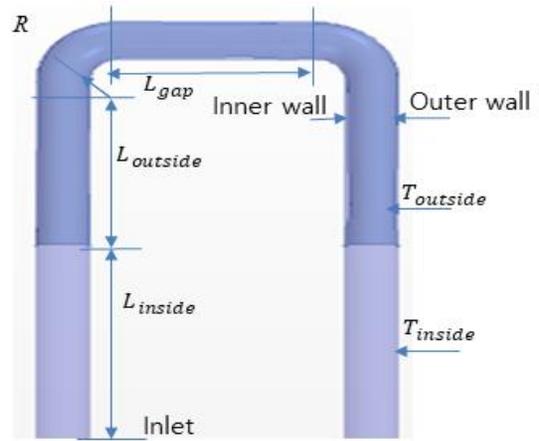


Fig. 2 Schematic diagram of the freezing phenomena of water in a U-shape pipe

### 2.1 문제설정

배관은 일반적으로 Fig. 1과 같이 산업시설의 실내에서 외벽을 통해 일부분의 길이로 외부에 노출할 수 있다. 외기온도가 영하로 내려갔을 경우에 배관 내 흐르는 물이 외부로 노출된 부분의 배관 내부 벽면에서 결빙이 이루어지게 된다. 이러한 상황을 고려하여, Fig. 2와 같이 직경  $D$ 를 갖는 U자형 배관이 외부로  $2L_{outer}$ 의 길이만큼 노출이 이루어지고, 외부의 기온이 영하로 내려가 노출된 배관의 벽면온도가  $T_{outer}$ 를 유지하는 상황에서 노출된 배관의 벽면에 결빙이 이루어진다. 배관 내 흐르는 물의 밀도는 온도와 무관하게 일정하다고 가정하고, 관내 입구의 유속은 균일하다고 가정한다. 동시에 관 출구의 압력은 대기압으로 일정하다고 가정한다. 본 연구에서는 고정 격자계 (fixed grid) 와 연속적 기법 (continuum formulation)에 기초한 오일러인 다상모델(Eulerian multiphase model)를 이용해서 배관 결빙과정에서 나타나는 배관내부 상변화물질을 해석하고자 한다. 지배방정식과 관련방정식은 참고문헌(14)에 자세히 언급되어 있다.

### 2.2 해석방법 및 조건

배관의 입·출구는 대기압으로 가정하였으며, 이때 물이 274K의 온도를 가지고, 균일한 속도로 유입되

**Table 1 Configuration reference conditions for a U-shape pipe with water freezing**

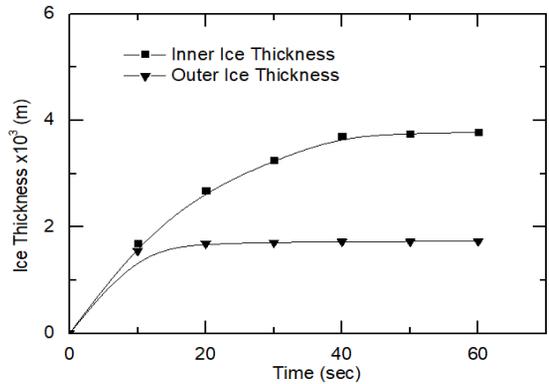
Specification	Physical Values
Pipe Diameter ( $D$ )	20mm
Inside Pipe Length ( $L_{inside}$ )	300mm
Outside Pipe Length ( $L_{outside}$ )	100mm
Gap Pipe Length ( $L_{gap}$ )	70mm
Radius of Rounded Pipe ( $R$ )	10mm
Inlet Velocity ( $V_{in}$ )	0.05m/s
Outside Wall Temperature ( $T_{outside}$ )	263k
Inside Wall Temperature ( $T_{inside}$ )	275k

는 것으로 하였다. 배관은 결빙온도 이하인 외부온도에 노출된 벽면과 물의 유입온도와 같은 실내 벽면온도 조건을 부여하였으며, 시간에 따른 결빙상태를 해석하였다. 배관크기 및 배관벽면의 온도, 유속에 대한 기본조건이 Table 1과 같다.

U자형 배관내의 물의 결빙과정을 수치해석적으로 해석하기 위하여 유한체적기법을 사용하여, 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 등의 지배방정식이 이산화되었으며, 대수 방정식으로 정리해서 상용 CFD Solver인 Star-CCM+를 사용하여 최종적으로 해를 구하였다. 특히, 결빙에 따른 경계면의 이동은 고정격자에 기초하여, 머시존의 고려하여 결빙 체적비율(volume fraction)로 처리하였으며, 온도에 따른 물 및 얼음의 밀도변화를 무시하였다. 대류항에 대해 분리모델(Segregated Model)<sup>[12]</sup>을 적용하였으며, 난류에 대해서는  $k-\epsilon$ 표준모델을 적용하여 속도장 및 온도장을 계산하였다. 계산에 사용된 격자는 다면체 Polyhedral 격자를 기본으로, 벽면에서 점성력 및 결빙층의 정밀한 계산을 위해 trim 격자를 적용하였으며, 격자수는 약 1,500천 개 정도 사용되었다.

### 3. 해석결과 및 고찰

먼저, 본 연구의 수치해석에 사용된 수치적 모델에 대한검증을 위해 결빙에 관하여 본 연구와 유사한 조건을 가지고 있는 Kikuchi 등<sup>[13]</sup>의 실험결과와

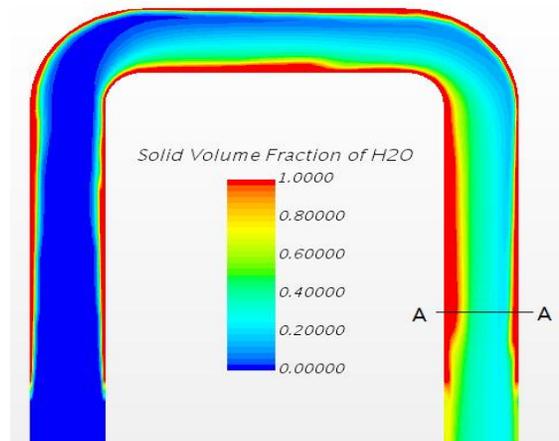


**Fig. 3 Timewise variation of ice thickness of water in the U-shape pipe (A-A section in Fig. 4)**

본 연구에서 취한 수치해석방법에 의한 결과를 비교하였으며, 참고문헌<sup>[14]</sup>에 자세히 언급되어 있으며, 실험결과와 본 연구의 해석결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

#### 3.1 U자형 배관 내 결빙형성의 특성

영하의 외기에 노출된 U자형 배관내의 결빙현상을 파악하기 위해, 가장 대표적인 경우인 Table 1의 조건을 기준으로, Fig. 3에서 보듯이 결빙층의 형성이 충분히 정상상태로 이루어졌을 때인 결빙시작 후 60sec 경과 후 결과를 중심으로 살펴보았다.



**Fig. 4 Variation of ice thickness at symmetric plane along the U-shape pipe**

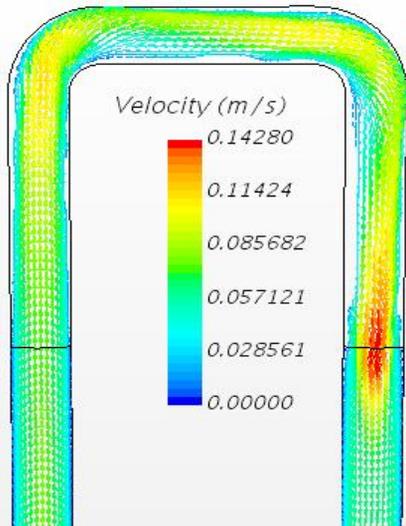


Fig. 5 Velocity distribution of water flow during ice forming at symmetric plane along a U-shape pipe

Fig. 4은 외부로 노출된 U자형 배관의 대칭면에서 길이방향으로 결빙이 형성된 모양을 나타낸 것이며, 벽면쪽의 진한 붉은 색은 결빙층을 나타낸다. 배관내 결빙층의 길이방향 두께변화를 보면, 결빙층이 길이방향으로 점차 두껍게 형성되어 가다가 2개의 곡관 부위 전후로 두께변화 경향이 달라지고 있다. 곡관부위를 지나면서 결빙층이 파형모양으로 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 물의 흐름이 곡관부위를 지나면서 바깥쪽으로 쏠려 곡관 안쪽면의 유속이 느려지면서 결빙층이 상대적으로 두껍게 형성되는 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 외부 벽면온도의 영향

외부에 노출된 배관벽면의 온도변화에 따른 결빙층의 두께변화를 살펴보기 위해, Fig. 6에 배관출구 10cm 전의 단면적(즉, Fig. 4의 단면적A-A)에서 배관의 벽면온도변화에 따른 결빙층의 형상 변화를 나타낸 것이다. 벽면온도가 상승함에 따라 전반적으로 결빙층의 두께가 감소하였으며, 결빙층이 U배관의 곡면 안쪽에서 더욱 두텁게 형성됨을 확인할 수 있다.

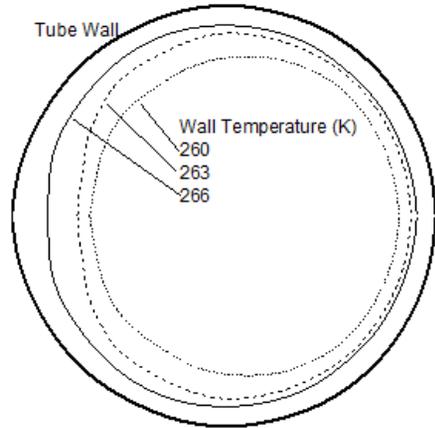


Fig. 6 Variation of ice shape formed on the wall of pipe with the outside wall temperature (A-A section in Fig. 4)

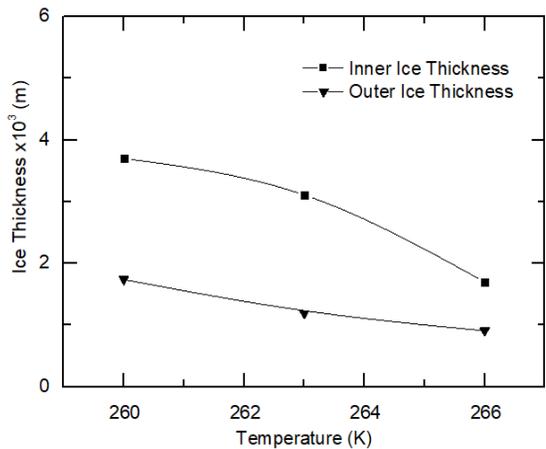


Fig. 7 Variation of ice thickness formed on the wall of pipe with the outside wall temperature at 10cm ahead of the exit port of pipe

외부 벽면온도의 변화에 따른 결빙층의 두께변화 경향을 보기 위해 배관의 상하 대칭면에서의 결빙층의 두께변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 사각 심볼은 곡관의 가장 안쪽 대칭면에서의 결빙층 두께를 나타낸 것이고, 역삼각형 심볼은 곡관의 가장 바깥쪽 대칭면에서의 결빙층 두께를 나타낸 것이다. 결빙층의 두께감소가 곡관의 안쪽에서 가장 빠르게 감소하는 특성을 보이고 있다. 이는 벽면의

온도증가에 따라 결빙층이 얇아지면서 유체의 쓸림 현상이 줄어들면서 안쪽 면과 바깥쪽 면에 미치는 영향의 차이가 상대적으로 줄어들면서 나타나는 것을 의미한다.

### 3.3 유속의 영향

배관으로 유입되는 물의 속도에 따른 결빙층의 두께변화를 보기 위해 Fig. 8에 물의 유속의 변화에

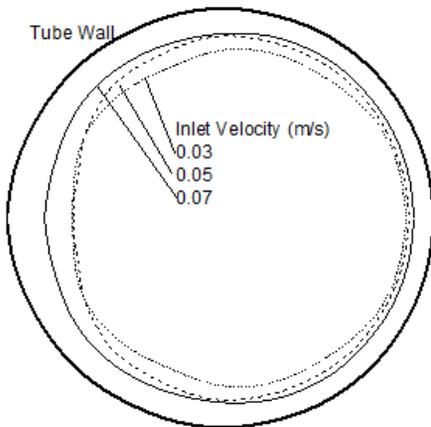


Fig. 8 Variation of ice shape formed on the wall of pipe with the inlet velocity of water (A-A section in Fig. 4)

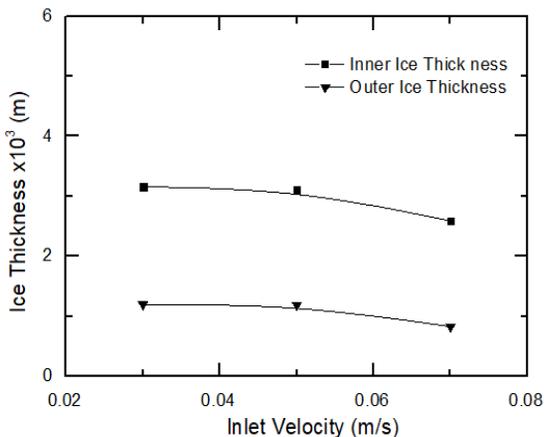


Fig. 9 Variation of ice thickness formed on the wall of pipe with the inlet velocity of water (A-A section in Fig. 4)

따른 배관내 결빙층의 두께변화를 Fig. 4의 단면적 A-A에 대해 나타낸 것이다. 물의 유입속도가 증가함에 따라 배관의 안쪽면과 바깥쪽면에서 모두 결빙층이 점차 얇아지는 경향을 보이고 있다. 이는 유속이 빨라지면서 배관길이를 따라 관의 중심부 물의 온도가 전반적으로 느리게 낮아지는 경향으로 인한 것으로 보인다. 배관 물의 유입속도의 변화에 따른 결빙층의 두께변화 경향을 보기 위해 배관의 상하 대칭면에서의 결빙층의 두께변화를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 사각심볼은 배관의 가장 안쪽에서의 벽면에서의 결빙층 두께를 나타낸 것이고, 역삼각심볼은 배관의 가장 바깥쪽의 결빙층 두께를 나타낸 것이다. 유속이 증가함에 따라 배관의 바깥쪽과 안쪽에서 결빙층이 점차 얇아지는 경향을 보이고 있다.

### 3.4 곡관부 간격의 영향

배관의 곡관부 간격에 따른 결빙층의 두께변화를 보기 위해 Fig. 10에 간격 변화에 따른 배관내 결빙층의 두께변화를 Fig. 4의 단면적A-A에 대해 나타낸 것이다. 곡관부 간격이 증가함에 따라 전반적으로 결빙층의 두께가 증가하고 있으나, 배관의 상하 대칭면에서의 결빙층의 두께변화를 나타내고 있는 Fig. 11에서 보면은 대칭면에서는 거의 변화가 없는 것으로 나타나고 있다.

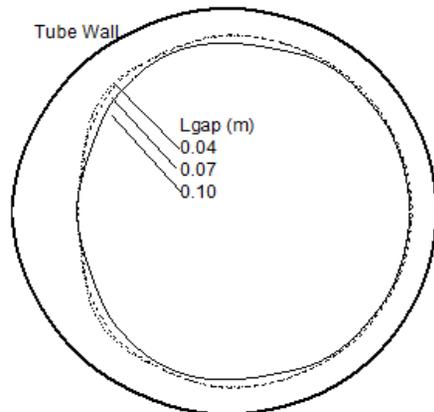


Fig. 10 Variation of ice shape formed on the wall of pipe with the gap of curved tube parts (A-A section in Fig. 4)

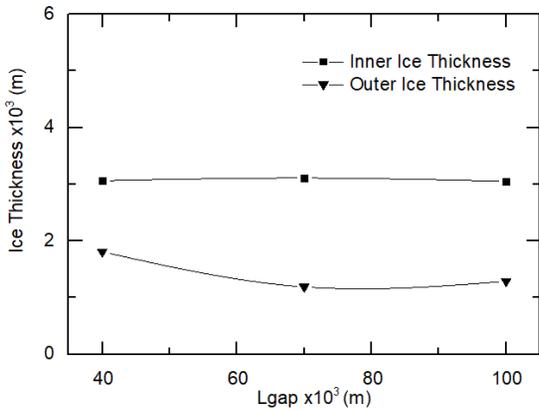


Fig. 11 Variation of ice thickness formed on the wall of pipe with the gap of curved tube parts (A-A section in Fig. 4)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 외부로 노출된 U자형 배관 내 결빙과정을 수치 해석적으로 살펴보았다. 수치해석적 결과에서 외부로 노출된 결빙구간에서 U자형 곡관부의 영향으로 유동이 바깥쪽 방향으로 쏠림현상이 발생하게 되고, 이로 인해 곡관부 이후 배관의 벽면에서는 결빙이 파형모양으로 두께가 형성됨을 알았다. 동시에 배관내 속도분포와 연계하여 살펴본 바에 의해 결빙으로 인한 벤츄리 효과(ventri effect) 등으로 인해 파형모양의 결빙층 형성이 더욱 뚜렷하게 나타남을 확인하였다.

또한, 결빙에 미치는 인자를 파악하기 위해 배관 벽면온도변화와 물의 유입속도변화 그리고 배관 곡관부의 간격변화 등에 대해 알아 보았으며, 배관벽면온도가 낮아질수록 결빙층의 두께가 전체적으로 증가하였으며, 결빙층 두께변화에 상당한 영향을 미침을 알았다. 물의 유입속도를 증가시켰을 때 결빙층이 상대적으로 얇아짐을 알았으며, 배관 곡관부의 간격은 상대적으로 결빙층의 변화에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 파악되었다.

#### REFERENCES

1. EPRI, "A Guide for Nuclear Power Plant

Maintenance Personnel," Freeze Sealing of Piping, 1989.

2. Flaman, M. T. and Shah, N. N., "Structural Integrity Investigation of Ice Plugging Procedure on Feeder Pipe," Ontario Hydro Research Division, 1985.

3. Suh, J.-S., Ro, S. T., "Analysis of Ice - Formation Phenomena for Fully Developed Laminar Water Flow in Concentric Circular - Tube Annuli," Transaction of Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 1552-1561, 1997.

4. Suh, J.-S., "Analysis of Ice - Formation Phenomena for Laminar Water Flow in a Concentric Tube," Proceeding of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, pp.185-190, 1996.

5. Suh, J.-S., Kim, M. G., Ro, S. T., Lim, C. S., "Ice - Formation Phenomena for Laminar Water Flow in a Stenotic Tube," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 11-21, 1998.

6. Jeong, G, Ahn, B., Choi, B., Kim, K., "Numerical Analysis of Phase Change and Natural Convection Phenomena during Pipe Freezing Process," Proceeding of Korean Society of Mechanical Engineering, pp.1263-1269, 2002.

7. Ohm, K.-C., "Freezing of Water and Generating Pressure of Fluid in Pipe," Journal of College Education, Vol. 2, No. 4, pp. 497~504, 2001.

8. Yun, J.-H., Kim, J.-H., Jeong, S.-Y., Yang, Y.-S., Kim, S.-H. and Song, D.-Y., "An Experimental Study on the Freezing Protection Valve Using Phase Change Material (PCM) for the Heat Exchanger," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 6, pp. 127~133, 2012.

9. Choi, M.-Y., Lee, D.-W. and Choi, H.-G., "Numerical Analysis of Unsteady Heat Transfer for the Location Selection of Anti-freeze for the Fire Protection Piping with Electrical Heat Trace," Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 1, pp.

52-57, 2014.

10. Choi, M.-Y. and Choi, H.-G., "Numerical Analysis of Unsteady Heat Transfer for Location Selection of CPVC Piping.", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 33-39, 2015.
11. Galić, I., Tonković, Z. and Vučković, K., "Experimental and Numerical Investigation of Collapse and Burst Pressures for a Valve Housing," International Journal for Experimental Mechanics, Vol. 47, pp. 519-524, 2011.
12. CD-ADAPCO, STARCCM+ User's Manual Version 10.6, Siemens Inc., pp. 5326-5333, 2015.
13. Kikuchi, Y., Shigemasa, Y., Oe, A. and Ogata, T., "Steady-State Freezing of Liquids in Laminar Flow between Two Parallel Plates," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 23, pp. 979-991, 1986.
14. Lee, C. H. and Suh, J. S., "Numerical Analysis on the Freezing Process of Internal Water Flow in a L-Shape Pipe, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp.144-150, 2018.