



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

상변화물질PCM을 이용한
소방배관의 동파방지에 관한 연구



2022년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 영 해

공학석사 학위논문

상변화물질PCM을 이용한 소방배관의

동파방지에 관한 연구

A Study on the Prevention of Freeze in Fire Piping by Using

Phase Change Material PCM

지도교수 금 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 영 해

김영해의 공학석사 학위논문을 인준함

2022년 2월 25일



주 심 공학박사 윤 정 인 (인)

위 원 공학박사 설 성 훈 (인)

위 원 공학박사 금 종 수 (인)

목 차

List of figures	iv
List of tables	vi
Abstract	vii
제 1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 기존 연구	3
1.3 연구 범위	4
제 2장 기초 이론	5
2.1 1차원 정상 상태 전도 열전달	5
2.2 1차원 과도 전도 열전달	7
2.3 대류 열전달	8
2.4 유한차분법(Finite Difference Method)	11
2.5 상변화물질(Phase Change Material : PCM)	12
2.6 상변화 판별법	13

제 3장 실측 실험	14
3.1 수치해석	14
3.2 실험 방법	14
3.3 실험 결과	18
제 4장 PCM의 동파방지 효과	20
4.1 실험 목적	20
4.2 실험 방법	20
4.3 실험 결과	22
제 5장 열선이 설치된 소방배관에서 PCM의 전력사용량 절감효과	23
5.1 실험 목적	23
5.2 실험 방법	23
5.3 실험 결과	25
제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측	28
6.1 실험 목적	28
6.2 실험 방법	28
6.3 인자 선정	28

6.4 실험 결과	31
6.4.1 PCM의 인자별 동파방지 효과	31
6.4.2 지역에 따른 소방배관의 동결시간	33
6.5 선형회귀분석	36
6.5.1 변수	36
6.5.2 선형회귀분석 결과	37
제 7장 결 론	39
참고문헌	41
Appendix	44
감사의 글	62



List of figures

Fig. 2.1 A steady state 1D heat transfer passing through a slab or wall	5
Fig. 2.2 1D radial conduction heat transfer	6
Fig. 2.3 Transient heat transfer	8
Fig. 2.4 The number of Nusselt number expressed as a function of Reynolds number when air flows orthogonally around the cylinder	10
Fig. 2.5 Volume element of any internal nodal point(m,n) for two-dimensional heat conduction	12
Fig. 2.6 PCM temperature change due to outside air	13
Fig. 3.1 Temperature and Humidity Chamber	14
Fig. 3.2 Actual measurement model	15
Fig. 3.3 Temperature measurement point	16
Fig. 3.4 Comparing the results of the numerical analysis model and the actual measurement model	19
Fig. 4.1 The shape of the numerical analysis model	21
Fig. 4.2 Comparison of the changes in water temperature at fire piping in Seoul	22
Fig. 5.1 The location of the heating wire in the fire piping	24
Fig. 5.2 Changes in water temperature and on-off of the heating wire in fire	

piping with PCM	26
Fig. 5.3 Changes in water temperature and on-off of the heating wire in the normal fire piping	27
Fig. 6.1 Changes in water temperature according to latent heat	31
Fig. 6.2 Changes in water temperature according to melting point	32
Fig. 6.3 Changes in water temperature according to thickness of PCM	32
Fig. 6.4 Freezing time depending on each factor	33
Fig. 6.5 Water temperature by region	35
Fig. 6.6 Freezing time by region	36
Fig. 6.7 Comparison of actual and predicted values through linear regression analysis	38
Fig. A.1.1 Temperature point of the actual model	44
Fig. A.2.1 Temperature point of the fire piping with PCM	50
Fig. A.3.1 Temperature point of the fire piping without PCM	57

List of tables

Table 1.1 Simulation Case	4
Table 2.1 According to Equation (1), C and m	10
Table 3.1 Chamber specifications	15
Table 3.2 Material properties	16
Table 3.3 Outer diameter and thickness of the ingredients	17
Table 4.1 Experimental conditions	21
Table 4.2 Property of PCM(savE HS01)	21
Table 5.1 The location and operating conditions of the heating wire	24
Table 6.1 Properities of PCM	29
Table 6.2 Case classification according to latent heat	30
Table 6.3 Case classification according to melting point	30
Table 6.4 Case classification according to thickness of the PCM	30
Table 6.5 Air velocity and Nu according to region	30
Table 6.6 Regression analysis statistics	38

A Study on the Prevention of Freeze in Fire Piping by Using Phase Change Material PCM

Young-Hae Kim

Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering,
Graduate School, Pukyong National University

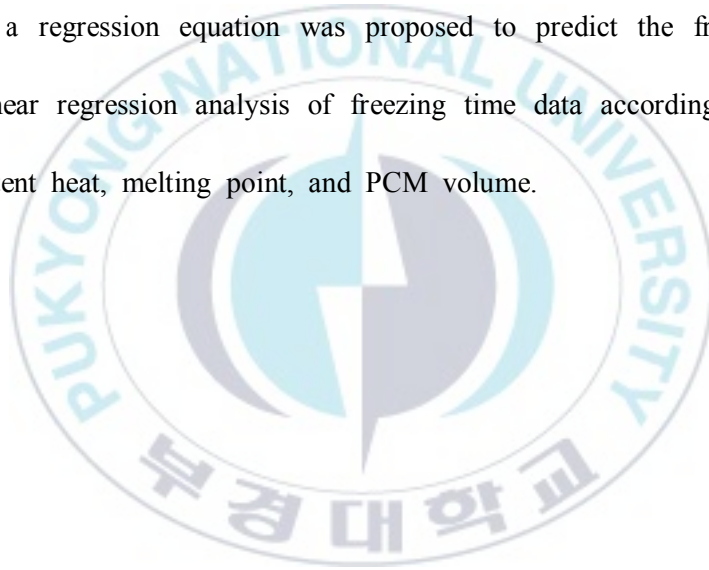
Abstract

Freeze accidents are frequently occurring due to low outside temperatures in winter. In particular, if the fire piping is frozen, it is exposed to the risk of fire during the maintenance period. Various methods are used to solve this problem, but there is a risk of fire or installation costs are expensive. Therefore, in this study, PCM is used to prevent freezing or to reduce power consumption of heating wires.

First, a numerical analysis model was created by using a finite difference method in the Matlab program. After that, the numerical analysis model was verified by comparing it with the actual measurement experiment results. Through numerical analysis simulation, it was confirmed that when PCM was

used, the freezing time was delayed and freeze was prevented compared to general insulation fire piping. In the case of fire piping with heating wires, it was confirmed that the use of PCM reduced the operation rate of heating wires, thereby reducing power consumption.

Finally, in this study, information on whether PCM selection and heating wire installation are necessary is required for proper design of fire piping. Therefore, a regression equation was proposed to predict the freezing time through linear regression analysis of freezing time data according to various regions, latent heat, melting point, and PCM volume.



제 1장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

매년 겨울철 외기온이 0°C 이하인 날이 지속될 경우, 배관내 수온이 0°C 에 도달하여 동결이 시작된다. 물 분자는 0°C 에서 액체에서 고체로 상변화가 시작되면서 부피가 팽창하는 특징을 가지고 있다. 따라서, 배관의 제한된 공간에서 물이 동결되면 부피가 팽창하여 배관내에 엄청난 내압을 발생시켜고 이로 인해 배관계를 구성하는 부품들을 파괴시킨다.¹⁾ 이것이 우리가 겨울철 흔히 접하게 되는 배관의 동파이다.

최근 10년간 서울시의 동파사고 건수는 11933건 신고가 되었으며, 소방 배관의 동파사고도 매년 꾸준히 발생하고 있다. 특히, 소방배관에 동파가 발생할 경우 보수기간동안 소방시스템이 마비가 된다. 그로인해, 화재의 위험에 그대로 노출이 되고 인명피해와 재산피해가 발생할 수 있다.

이러한 사고를 막기 위해 다양한 동파 방지 방법이 존재한다. 우리가 흔히 사용하는 방법은 열선을 설치하는 방법이다. 열선의 저항체에 전류가 흐르면서 열이 발생하는 원리를 이용하는 방법으로 배관 곁에 둘러서 보온을 하는 방식이다. 따라서, 누구나 쉽게 구입하여 설치할 수 있다. 하지만 절연피복의 손상이나 수분의 침투등 열선의 관리가 잘 되지 못 할 경우 누설전류가 발생하여 감전 및 발화의 가능성이 있다. 소방청에 따르면 최근 3년간 전기열선에 의한 화재는 총 1089건으로 매년 300여건 이상 전기열선에 의해 화재사고가 발생하였다.

또 다른 방법은 건식 스프링클러와 준비작동식 스프링클러를 사용하는 것이다. 하지만 건식 스프링클러는 스프링클러내 물을 빼두는 방식으로 소화시간이 지연되고 설치면적이 크며 설치비가 고가이다. 준비작동식 스프링클러의 경우는 감지기를 설치해야 하므로 경비가 많이 소모되며, 오작동의 우려가 있다. 게다가 건식 스프링클러와 비교하여도 상당히 고가

이다.

상변화물질 이하 PCM은 상변화시 많은 잠열을 흡수하거나 방출하는 성질을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 PCM의 잠열을 흡수하는 성질을 소방배관에 이용하여, 겨울철 0°C 이하의 낮은 온도에 수일간 노출 될 경우 PCM이 사용된 소방배관과 단열재만 쓰인 소방배관과 동결시간을 추출하여 PCM이 동파방지에 효과가 있는지 수치해석 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다. 또한 열선이 설치된 소방배관의 경우 PCM의 사용이 열선의 가동시간을 감소시켜 전력사용량을 줄일 수 있는지 확인하고자 한다.

마지막으로 동파방지를 위한 소방배관의 적절한 설계를 위해 수치해석 시뮬레이션을 이용하여 지역에 따른 외기의 평균온도와 풍속, PCM의 물성치를 독립변수로하여 동결시간을 추출하고 해당 결과값을 선형회귀분석을 통해 동결시간을 예측할 수 있는 회귀식을 제시하고자 한다.

1.2 기존 연구

낮은 온도에 의해 발생하는 동파문제는 다양한 분야에서 일어나고 있고 이를 해결하기 위한 연구도 다양하다. 동파를 방지하기 위한 연구들은 다음과 같이 진행되었다.

정순영 외 5명(2012)은 ‘상변화물질(PCM)을 이용한 공기조화 시스템용 동파방지밸브에 관한 실험적 연구’²⁾를 통해 액체에서 고체로 상변화시 체적이 수축하는 PCM의 성질을 이용하여 2~4℃ 조건에서 PCM의 수축에 의해 밸브가 열려 배관의 물을 빼주어 동파를 방지하는 연구를 진행하였다.

최명영 외 2명(2014)은 ‘소방배관 동파방지용 열선의 위치선정을 위한 비정상 열전달 수치해석’³⁾을 통해 열선의 위치를 12시 방향을 기준으로 0°, 45°, 90°, 135°, 180°로 설정하여 에너지방정식과 비정상 비압축성 Navier-Stokes방정식을 사용하여 동절기 소방배관의 동파방지를 위한 최적의 열선위치를 찾는 연구를 진행하였다.

최명영 외 2명(2016)은 ‘열선의 직선시공과 감기시공의 동파방지 효과 비교를 위한 3차원 비정상 수치해석’⁴⁾를 통해 동절기 소방배관의 동파방지를 위한 열선의 직선시공과 감기시공의 효과를 ANSYS-FLUENT의 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 3차원 비정상 수치해석연구를 진행하였다.

이다솜 외 1명(2018)은 ‘수도계량기의 동파 방지를 위한 벨로즈 튜브 설계’⁵⁾를 통해 저온에서 수도계량기 내 동결에 따른 파손예방을 위해 유한요소 해석을 이용하였고, 벨로즈 튜브의 체적 증가를 이용하여 동결로 인한 수도계량기 내 체적증가를 충분히 수용할 수 있는지 연구를 진행하였다.

현재 배관의 동파방지를 위한 기존의 연구들은 열선을 이용하거나 변화하는 체적을 이용하여 동파를 방지하는 연구들을 진행하였다.

1.3 연구 범위

본 연구에서는 소방시설공사 표준시방서⁶⁾에 제시하는 소방배관의 재질과 보온두께를 이용하여 실측모델과 수치해석모델을 제작하였으며, PCM의 동파방지 효과와 열선의 전력사용량 절감을 확인하였다.

1) 수치해석모델의 검증을 위한 실측실험은 저온의 환경인 -6°C 를 일정하게 유지할 수 있는 항온항습실에서 실험을 진행하였다.

2) 본 실험에서 외기온과 풍속은 기상청에서 제시하는 실제 기상데이터⁷⁾를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3) PCM은 종류는 회사에서 제시하는 데이터시트⁸⁾를 참고하여 물의 융점에 근처에서 상변화를 하도록 $1\sim 5^{\circ}\text{C}$ 의 융점을 가지는 PCM으로 선택하였다.

Table 1.1 Simulation Case

Variable	Case			
	with			without
The amount of PCM	5mm	10mm	15mm	0mm
Region	Seoul	Busan	Daejeon	Gangwon
Air Velocity [m/s]	2.4	3.4	1.5	2.1

제 2장 기초 이론

2.1 1차원 정상 상태 전도 열전달

소방배관의 열해석을 위한 수치해석모델을 만들기 위해서는 전도 열전달에 대해서 알아야한다. 1차원 정상 상태 전도 열전달은 여러 가지 중요한 실제 열전달 과정을 기술하는데 사용되는 이상화 과정이다.

1차원 정상 상태 전도 열전달의 지배 방정식은 에너지 발생이 없을 때 직교 좌표계에서 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{d}{dx}k\frac{dT}{dx}=0 \quad (2.1)$$

k : 열전도률[W/m°C]

열전도도를 상수로 잡으면, 이 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k\frac{d^2T}{dx^2}=0 \quad (2.2)$$

이 식의 해를 구하려면 2개의 경계 조건이 필요하다. 경계 조건은 전형적으로 두 위치(x 좌표에서의 두 점)에서의 온도 또는 여러 경계 가운데 한 경계에서의 열전달 $\dot{Q}_x$ 이다. Fig. 2.1 같이 길이와 높이가 두께 Δx 가 다음과 같이 주어졌다고 가정하자.

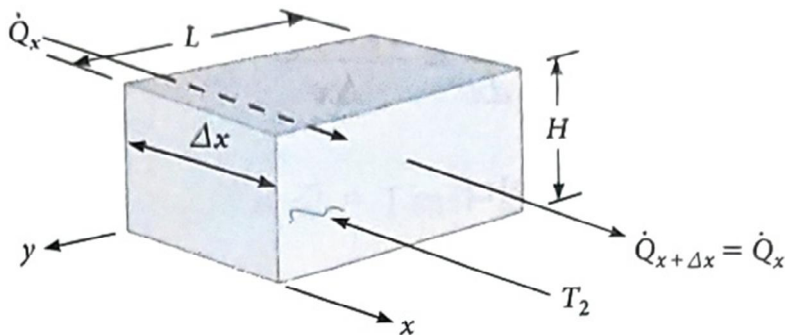


Fig. 2.1 A steady state 1D heat transfer passing through a slab or wall

경계조건이 다음과 같을 때,

$$x=0 \text{에서 } T(x) = T_1 \quad (2.3)$$

$$x=\Delta x \text{에서 } T(x) = T_2 \quad (2.4)$$

지배 방정식, 식 (2.2)를 두 번 적분하면 다음과 같이 나타난다.

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.5)$$

이 식은 x 좌표에서의 선형 온도 분포를 나타낸다. 경계조건들을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x) = \left(\frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \right) x + T_1 \quad (2.6)$$

따라서, Fourier 법칙으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

$\dot{Q}$: 열전달량[W]

A : 면적[m²]

본 연구에서의 열전달은 배관을 대상으로하는 열전달, 즉 원통 좌표계를 통한 해석을 필요로 한다.

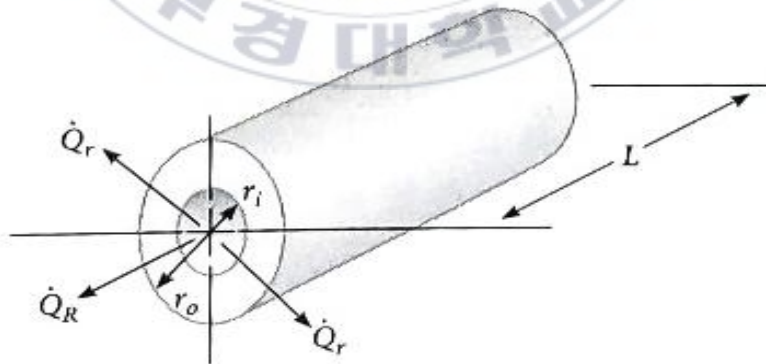


Fig. 2.2 1D radial conduction heat transfer

그림 Fig. 2.2는 원통좌표계에서 1차원 열전도를 나타내고 있다. 원통 좌

표계에서의 r방향 열전달은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_r = \frac{2\pi kl}{\ln(r_o/r_i)}(T_i - T_o) \quad (2.8)$$

l : 원통의 길이[m]

r_o : 원통의 외부반경[m]

r_i : 원통의 내부반경[m]

T_i : 원통의 외부온도[K]

T_o : 원통의 내부온도[K]

2.2 1차원 과도 전도 열전달

본 연구에서의 소방배관을 이루고 있는 재료들의 온도는 시간에 따라 변화한다. 이러한 열전달 방식을 과도 전도 열전달이라 한다. 에너지 보존 개념을 적용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = \frac{dE}{dt} = \rho V c_p \frac{dT}{dt} - \dot{E}_{gen} \quad (2.9)$$

$\dot{Q}_{in}$: 계의 내부로 유입되는 열량[W]

$\dot{Q}_{out}$: 계의 외부로 나가는 열량[W]

$\frac{dE}{dt}$: 단위 시간당 계의 엔탈피 변화율[W]

ρ : 계의 밀도[kg/m³]

V : 계의 부피[m³]

c_p : 계의 정압비열[J/kgK]

$\dot{E}_{gen}$: 계의 에너지발생량[W]

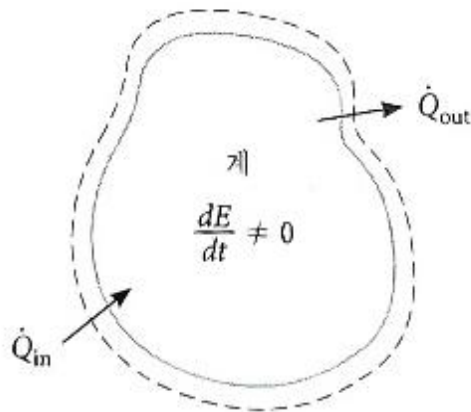


Fig. 2.3 Transient heat transfer

2.3 대류 열전달

소방배관은 겨울철 외기와 대류 열전달을 통해서 열을 잃는다. 따라서, 소방배관의 수치해석모델을 만들기 위해 대류 열전달에 대해 알아볼 필요가 있다. 대류 열전달은 다음 식을 이용해 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = hA\Delta T = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

h : 대류 열전달 계수[W/m²]

A : 면적[m²]

T_s : 물체 표면온도[K]

T_∞ : 표면에서 충분히 떨어진 곳의 유체온도[K]

다음은 대류 열전달 계수 h 를 구하기 위한 무차원 수, 레이놀즈 수와 누셀 수에 대해서 알아보고 대류 열전달 계수 h 를 구하는 방법에 대해서술하겠다.

1) 레이놀즈 수(Reynolds number : Re)

레이놀즈 수는 유체의 점성력에 대한 관성력의 비를 무차원 수로 나타낸 값이다. 유체의 유동형상이 층류 유동인지 난류 유동인지를 구분해주는 정량적인 척도로 이용된다.

레이놀즈 수는 다음과 같은 식으로 타나낼 수 있다.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.11)$$

ρ : 계의 밀도[kg/m³]

V : 유체의 속도[m/s]

L : 특성길이[m]

μ : 유체의 점성계수[g/ms]

ν : 유체의 동점성계수[m²/s]

2) 누셀 수(Nusselt number : Nu)

누셀 수는 유체 층을 통과하는 전도 열전달에 대한 대류 열전달의 비를 무차원 수로 나타낸 값이다. 원기둥체에 교차 유동하는 유체 사이의 열전달에서 누셀 수는 연구자들이 실험적으로 결정해왔다. Hilpert⁹⁾는 다음과 같이 경험식을 제시하였다.

$$Nu_{D,ave} = \frac{h_{ave} D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (2.12)$$

h_{ave} : 평균 대류 열전달 계수[W/m²]

D : 원기둥체의 직경[m]

k : 열전도율[W/m°C]

Pr : 프란틀 수

식 (2.12)에서 매개변수 C와 m은 Table 2.1를 이용하여 구할 수 있다.

Table 2.1 According to Equation (1), C and m¹⁰⁾

	C	m
0.4 ~ 4	0.989	0.330
4 ~ 40	0.911	0.385
40 ~ 4000	0.683	0.466
4000 ~ 40000	0.193	0.618
40000 ~ 400000	0.027	0.805

Fig. 2.4를 통해서 원기둥체에서 레이놀즈 수에 따른 누셀 수를 쉽게 관독할 수 있다.

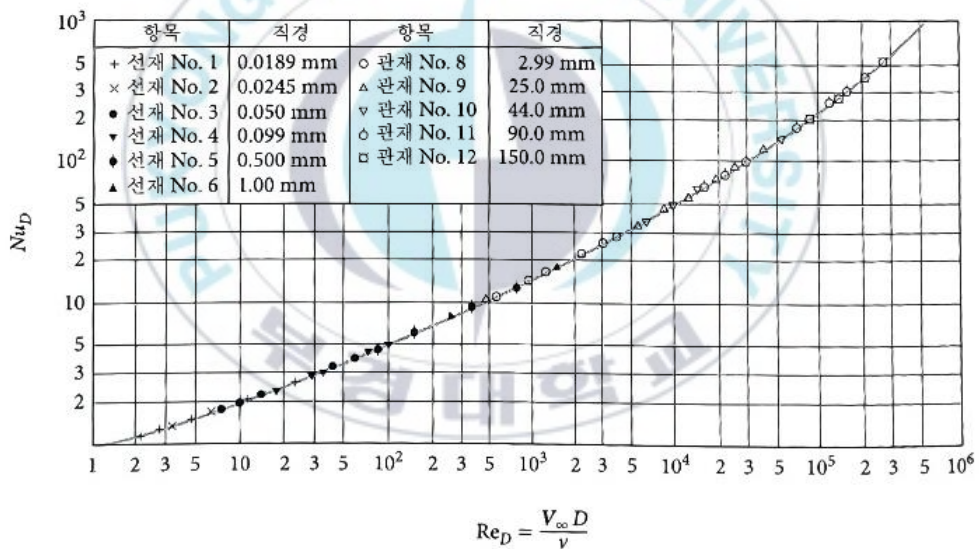


Fig. 2.4 The number of Nusselt number expressed as a function of Reynolds number when air flows orthogonally around the cylinder

마지막으로 Churchill과 Bernstein¹¹⁾이 누셀 수를 산출하는 다음 식을 제시하였다.

$$Nu_D = 0.3 + \frac{(0.62Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3})[1 + (Re_D/282000)^{5/8}]^{4/5}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \quad (2.13)$$

식 (2.13)은 $Re_D \cdot Pr \geq 0.2$ 인 모든 경우에 대해서 적용할 수가 있다.

위 식들을 이용하여 누셀 수가 결정되면 식 (2.12)를 통해서 평균 대류 열전달 계수를 구할 수 있다.

2.4 유한차분법(Finite Difference Method)

유한차분법은 연속된 대상을 유한한 크기의 절점으로 세분화 한 뒤 미분방정식을 이용하여 근사해로 열해석을 하는 방법이다. 복잡계나 비정상 열해석에서 쉽고 편리하게 사용할 수 있는 해법이다. 과도 열전달에서의 유한차분 근사식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_n^{\Delta t} - T_n}{\Delta t} \quad (2.14)$$

시간 간격 Δt 에 따른 해당 절점의 엔탈피변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H_n}{\partial t} = \dot{H}_n = \sum_{in} \dot{Q} - \sum_{out} \dot{Q} = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial t} \approx \rho V c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.15)$$

$\dot{H}_n$: 단위 시간당 엔탈피 변화량[W]

$\sum_{in} \dot{Q}$: 단위 시간당 절점에 들어가는 총 열량[W]

$\sum_{out} \dot{Q}$: 단위 시간당 절점에 나가는 총 열량[W]

ρ : 절점의 밀도[kg/m³]

V : 절점의 부피[m³]

c_p : 절점의 정압비열[J/kgK]

식 (2.15)를 $T_n^{\Delta t}$ 에 대해서 나타내면 다음과 같다.

$$T_n^{\Delta t} = T_n + \frac{\Delta t}{\rho V c_p} (\sum_{in} \dot{Q} - \sum_{out} \dot{Q}) \quad (16)$$

따라서, 초기조건과 시간 간격 Δt 에 대해서 정의가 되면 시간이 경과함에 따른 절점의 온도변화값을 구할 수 있다.

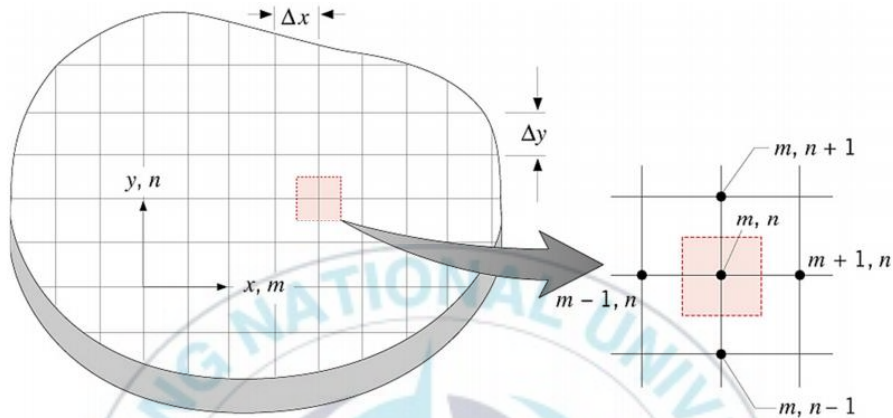


Fig. 2.5 Volume element of any internal nodal point(m,n) for two-dimensional heat conduction

2.5 상변화물질(Phase Change Material : PCM)

상변화물질은 물질의 온도가 변화하면서 고체에서 액체, 액체에서 기체 등의 상변화과정에서 많은 양의 열에너지를 흡수하거나 방출하는 물질이다. 따라서 외부의 온도변화에 의해 특정온도에 도달하게 되면 상변화를 시작하면서 상당시간 특정온도에서 머물게 된다. 이러한 성질을 이용하여 축열재, 잠열재, 열조절성물질로 많이 이용되고 있다.

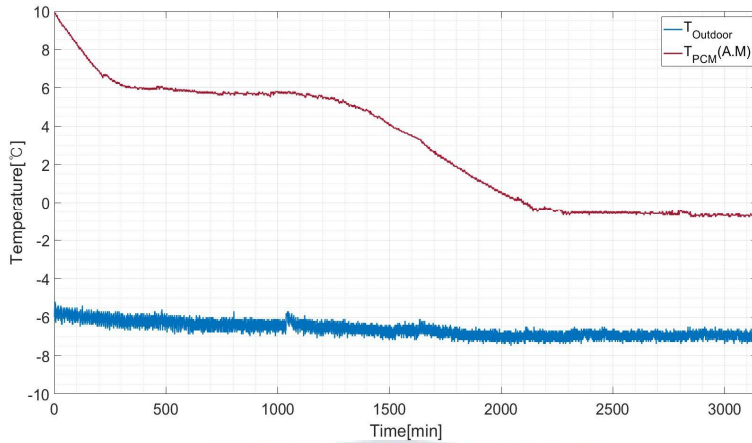


Fig. 2.6 PCM temperature change due to outside air

2.6 상변화 판별법

동일한 물질이라도 고체, 액체, 기체의 상태에 따라 물성치는 달라진다. 본 연구에서는 PCM의 상변화를 이용하여 실험을 진행하므로 시간경과에 따라 물질의 상변화를 정확히 판별해야 한다.

본 연구에서는 PCM의 상이 고체 혹은 액체로 존재한다. 따라서 PCM이 융점에서 고체상태일 때 0J/kg 으로 가정하여 다음과 같이 PCM의 상변화를 판별하였다.

$$h_{pcm} < 0 \text{이면, } PCM = \text{고체} \quad (2.17)$$

$$0 \leq h_{pcm} < h_{latent} \text{ 이면, } PCM = \text{상변화} \quad (2.18)$$

$$h_{latent} < h_{pcm} \text{ 이면, } PCM = \text{액체} \quad (2.19)$$

h_{pcm} : PCM이 가지고 있는 엔탈피[J]

h_{latent} : PCM의 잠열량[J]

제 3장 실측 실험

3.1 수치해석

본 연구에서는 소방배관의 동파를 방지하는 실험을 위해서 다양한 외기 온, 상변화물질의 물성치 등 다양한 변수에 따른 결과데이터를 필요로 한다. 하지만, 해당 실험을 모두 실측을 통해서 실험하는 것은 무리가 있다. 따라서, 유한차분법을 이용하여 Matlab프로그램에 각 절점의 온도에 대한 근사식을 코딩하고 초기조건 및 경계조건을 주어 시간경과에 따른 절점별 온도의 변화를 확인하였다. 수치해석을 위한 Matlab프로그램의 m-file은 Appendix(A.1)에 기록하였다.

3.2 실험 방법

시뮬레이션 검증에 위한 실측실험은 온습도를 조절할 수 있는 항온항습기에서 실시하였다. Fig. 3.1는 항온항습기의 모습을 Table 3.1은 항온항습기의 사양을 나타내고 있다.



Fig. 3.1 Temperature and Humidity Chamber

Table 3.1 Chamber specifications

Model	SCA-5AT
Comp	3.75kW
Air Volume	100CMH
Humidifier	20kW(SCR)
Power	220V 60Hz
Cooling Capacity	13500kcal/h
Heating Capacity	17200kcal/h
Refrigerant	R-22

실측실험을 수행하기 위하여 실측모델을 제작하여 실증상에 배치하였다. 항온항습기의 온도를 -7°C 로 설정하여 3일 정도 실험을 진행하였다. 다음은 Fig. 3.2은 실측모델의 모습과 구성재료를 나타내고 있다. Table 3.2, 3.3은 구성재료의 물성치와 두께를 나타내고 있다.

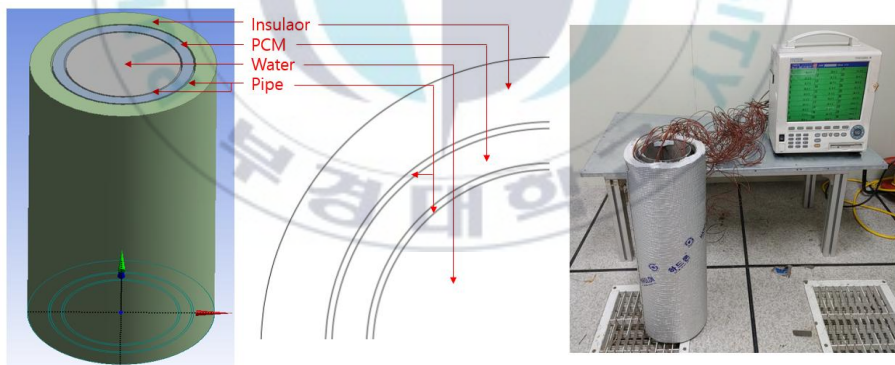
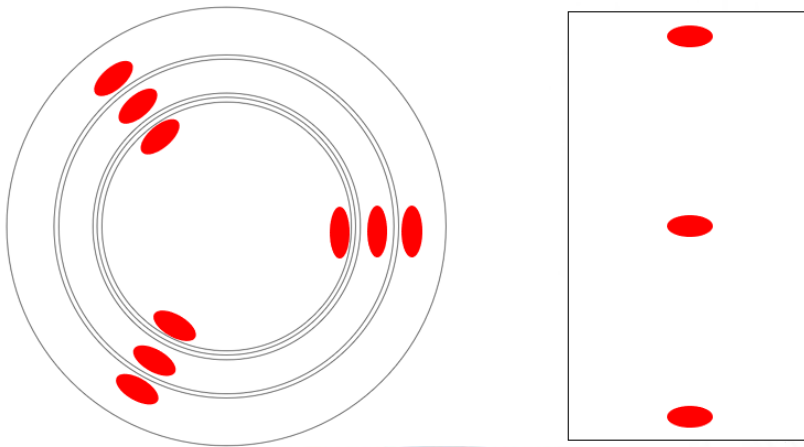


Fig. 3.2 Actual measurement model



(a) From the top

(b) from the side

Fig. 3.3 Temperature measurement point

Table 3.2 Material properties

	Pipe insulator	Insulator (XPS)	PCM (C ₁₄ H ₃₀)	Pipe (STS304)	Water
Thermal conductivity (W/m°C)	0.037	0.029	0.14(Lig)	16.3	0.592(Lig)
			0.14(Sol)		2.23(Sol)
Specific heat (J/kg°C)	700	1200	2100(Lig)	500	4186(Lig)
			1800(Sol)		2093(Sol)
Density (kg/m ³)	25	35	767(Lig)	8000	1000(Lig)
			810(Sol)		917(Sol)
Latent heat (J/kg)	-	-	229000	-	333540
Melting point (°C)	-	-	5.9	-	0

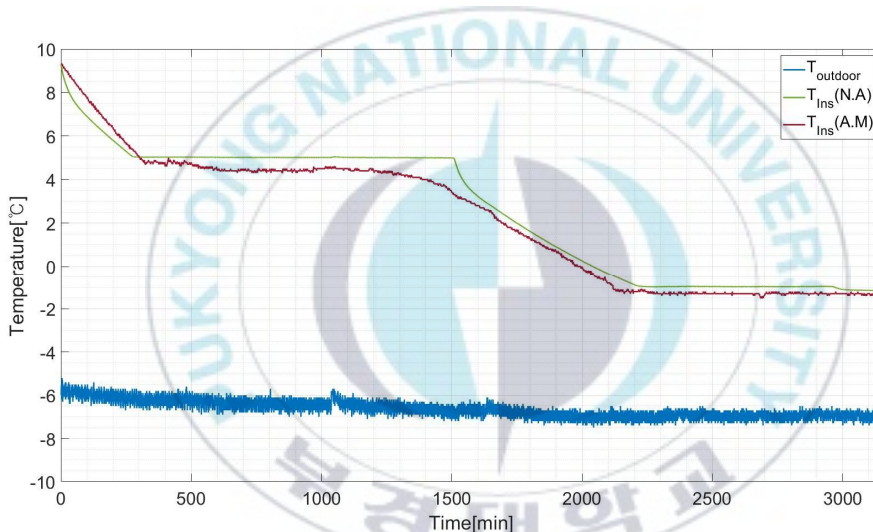
Table 3.3 Outer diameter and thickness of the ingredients

Ingredients	Outer diameter(mm)	Thickness(mm)
Insulator	179.8	20
Outer Pipe	139.8	2
PCM	135.8	10.75
Inner Pipe	114.3	2

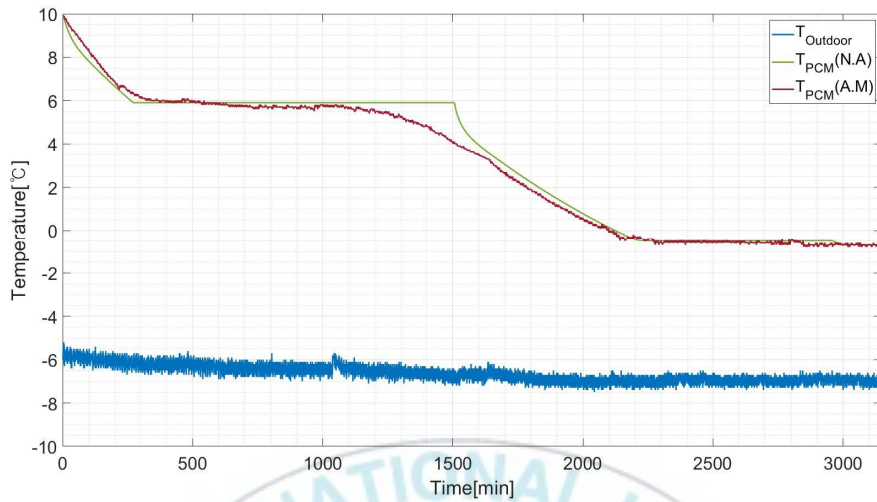
항온항습기를 가동하여 실측모델의 온도변화를 데이터로거를 이용하여 30초 간격으로 기록하였다. 수치해석모델에 실측모델의 물성치와 초기조건, 항온항습기의 온도변화를 입력하여 시뮬레이션을 진행하였다. 수치해석 시뮬레이션 결과와 실측모델의 결과값을 비교하여 수치해석모델의 타당성을 검증하였다.

3.3 실험 결과

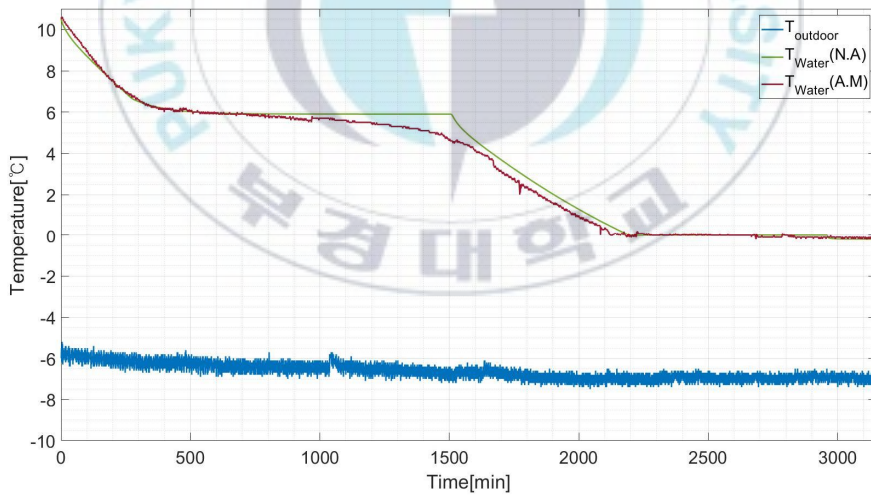
Fig. 3.4은 수치해석 시뮬레이션과 실측모델의 각 재료의 온도를 비교한 그래프이다. N.A는 수치해석 시뮬레이션 결과를 A.M는 실측결과를 나타내었다. 수치해석 시뮬레이션 결과에서 PCM과 수온값이 융점에 도달한 후 온도가 유지되다가 다시 낮아지는 것으로 보아 상변화를 잘 반영하고 있는 것을 알 수 있다. 또 한, 두 결과 그래프의 개형이 비슷한 양상을 보이면서 변화하는 것으로 보아 수치해석모델이 타당하다고 판단하였다.



(a) Comparison of the temperature of the insulator between the measured model and the numerical analysis



(b) Comparison of the temperature of the PCM between the measured model and the numerical analysis



(c) Comparison of the temperature of the water between the measured model and the numerical analysis

Fig. 3.4 Comparing the results of the numerical analysis model and the actual measurement model

제 4장 PCM의 동파방지 효과

4.1 실험 목적

제 3장에서 검증한 수치해석모델을 이용하여 실제 기상데이터에 대한 소방배관의 수온변화를 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다. 단열재만 사용된 소방배관과 PCM이 사용된 소방배관의 수온변화를 관찰하여 PCM의 사용이 소방배관의 동파방지에 효과가 있는지 확인을 한다.

4.2 실험 방법

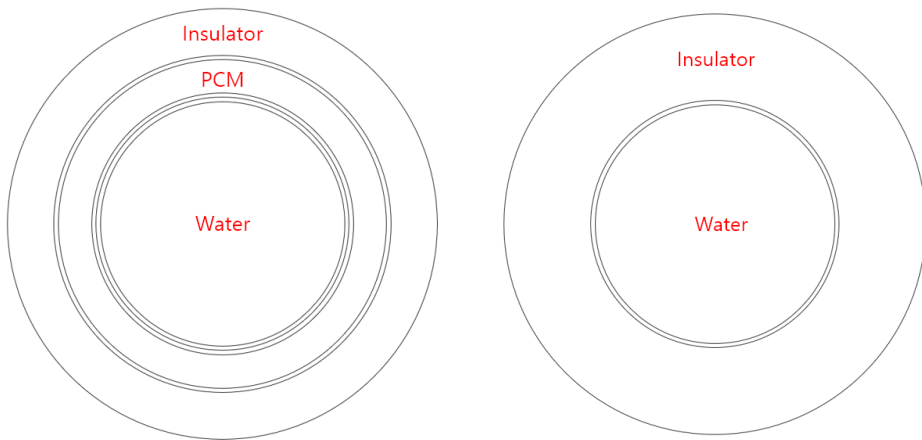
Fig. 4.1은 PCM의 동파방지 효과를 확인하기 위한 두 소방배관의 형상인 (a) PCM이 사용된 소방배관, (b) 단열재만 쓰인 소방배관을 나타내었다.

시뮬레이션의 조건으로 기상데이터는 가장 많은 인구가 거주하는 지역인 서울로 선택을 하고, 올해 가장 추웠던 1월 7일부터 9일까지 3일간의 데이터를 3시간 간격으로 사용하였다.

풍속은 기상청에서 제시하는 해당 지역의 평균풍속 이용하여 2.3 대류열전달 계수에서 기술한 방법들을 이용하여 3개의 누셀 수를 구했고, 그중 중앙값을 사용하였다.

Table 4.1과 4.2를 통해서 시뮬레이션의 세부 조건들을 나타내었다.

제 4장 PCM의 동파방지 효과



(a) Fire piping with PCM

(b) Normal Fire piping

Fig. 4.1 The shape of the numerical analysis model

Table 4.1 Experimental conditions

Region	Seoul
Date	1.7~9, 2021
Air velocity	2.4m/s
Convective heat transfer coefficient	13.72W/m ² °C
PCM	savE HS01
Initial temperature of the pipe	3°C

Table 4.2 Property of PCM(savE HS01)

Thermal conductivity (W/m°C)		Specific heat (J/kg°C)		Density (kg/m ³)		Latent heat (J/kg)	Melting point (°C)
liq	sol	liq	sol	liq	sol		
0.55	2.2	3900	2000	1010	924	350000	1

4.3 실험 결과

시뮬레이션의 결과는 다음과 같다. Fig. 4.2에서 소방배관이 서울지역의 겨울철 외기온에 노출되었을 때 단열재만 쓰인 소방배관은 320분(6시간 20분)만에 동결이 시작되었다. PCM을 사용한 소방배관은 3200분(53시간 20분)만에 동결이 시작되었다. PCM의 사용으로 소방배관의 동결시간이 2880분(47시간) 지연되었다. 지연된 동결시간을 통해서 동파방지의 효과를 알았다.

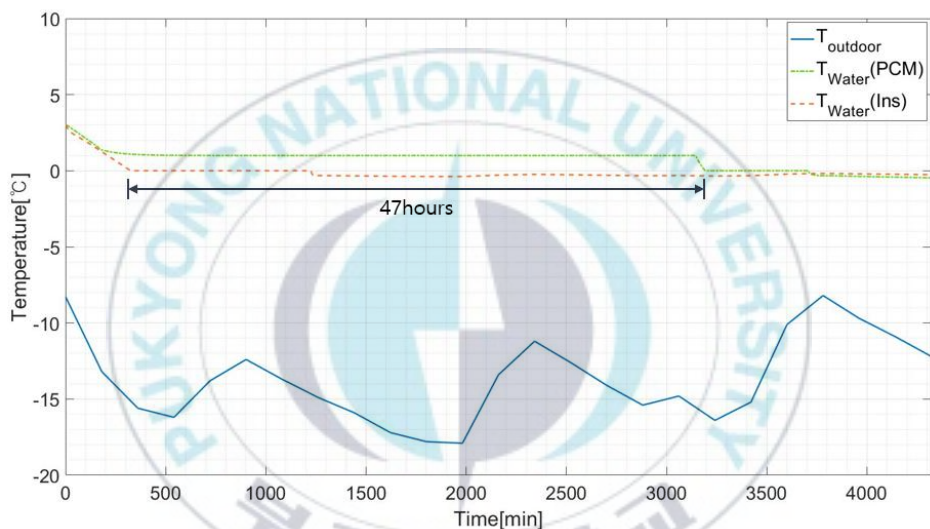


Fig. 4.2 Comparison of the changes in water temperature at fire piping in Seoul

제 5장 열선이 설치된 소방배관에서 PCM의 전력사용량 절감효과

5.1 실험 목적

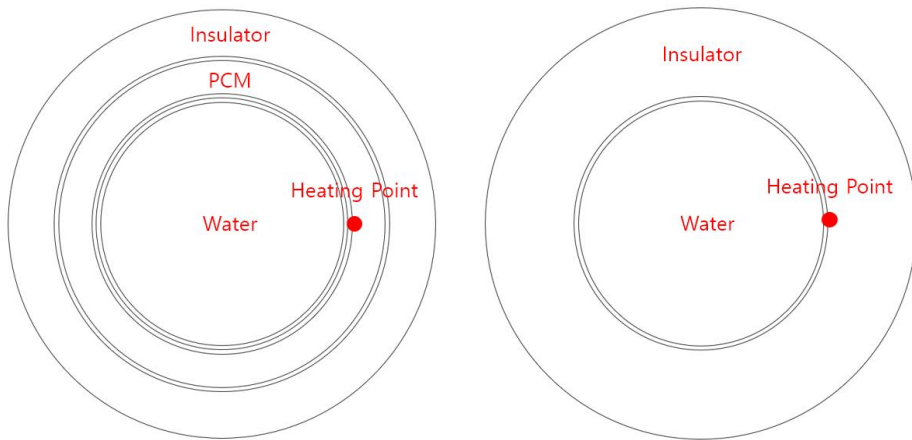
제 4장에서 소방배관에서 PCM의 사용이 동파방지에 효과가 있는지 확인하였다. 하지만 겨울철 기온이 상당히 낮거나 풍속이 빠른 지역은 PCM만으로 동파를 방지하기엔 부족하다. 그러므로, 해당 지역에선 소방배관에 PCM과 열선을 사용하는 방법을 고려해 봐야 한다. 따라서, 본 장에서는 열선이 설치된 소방배관에서 PCM 사용에 따른 열선의 전력사용량 절감 효과에 대해 알아보려고 한다.

5.2 실험 방법

수치해석모델에 특정 재료의 온도가 일정 이하로 내려가면 열이 생성되는 항을 추가하여 소방배관의 수치해석 시뮬레이션을 진행한다. 단열재만 사용된 소방배관과 PCM이 사용된 소방배관에 대한 수온의 변화와 열선의 가동시간을 확인하고 두 소방배관에 대한 전력사용량을 비교하여 열선의 전력사용량 절감효과를 확인한다.

본 장의 소방배관의 형상과 시뮬레이션 세부 조건은 제 4장의 Fig. 4.1과 Table 4.1, 4.2의 값과 동일하다. 하지만, 본 장에는 열선이 추가된다. Fig. 5.1은 두 소방배관의 열선이 설치된 위치를 나타내고 있다. 열선의 용량과 가동조건은 Table 5.1에 나타내었다.

제 5장 열선이 설치된 소방배관에서 PCM의 전력사용량 절감효과



(a) Fire piping with PCM

(b) Normal Fire piping

Fig. 5.1 The location of the heating wire in the fire piping

Table 5.1 The location and operating conditions of the heating wire

	Fire piping with PCM	Normal Fire piping
The amount of heat generated by the heating wire (W)	11	11
The location of the heating wire	PCM	Between the pipe and the insulator
ON	Less than 1℃	
OFF	More than 2℃	

본 실험에서 두 소방배관의 열선의 위치에 차이가 있다. 단열재만 사용된 소방배관에선 일반적으로 열선이 설치되는 위치인 배관과 단열재 사이로 선정하였다. 하지만 PCM을 사용한 소방배관의 경우 PCM의 잠열을 이

제 5장 열선이 설치된 소방배관에서 PCM의 전력사용량 절감효과

용하는 방식이기 때문에 PCM에 설치하여 응고된 PCM이 열선에 의해 빠르게 융해될 수 있도록 하였다. 하지만, 외부에 가까울수록 열에너지가 외부로 빠져나가기 더 쉬워지므로 PCM의 내측에 설치하였다.

열선의 가동조건의 경우 동결이 시작되는 0°C 와 PCM이 응고되는 1°C 사이에서 설정이 되어야 한다. 따라서 PCM의 응고가 끝나는 시점인 1°C 미만을 열선의 가동조건으로 설정하여 2°C 이상 도달하면 꺼지도록 설정하였다.

5.3 실험 결과

PCM이 사용된 소방배관에서 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. Fig. 5.2에서 점선은 열선의 가동상태를 나타낸다. 0은 비가동 1은 가동이다. 열선은 외기에 노출된 뒤 3200분(53시간 20분)에 가동되었다. 가동 후 수온은 조금씩 감소하다가 다시 증가한 뒤 약 1.7°C 에 머무르는 걸 확인할 수 있었다. 이는 PCM이 상변화에 의하여 온도가 고정이 되면서 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다. 3일중 열선의 총 가동시간은 1118분(18시간 38분)으로 확인되었다.

제 5장 열선이 설치된 소방배관에서 PCM의 전력사용량 절감효과

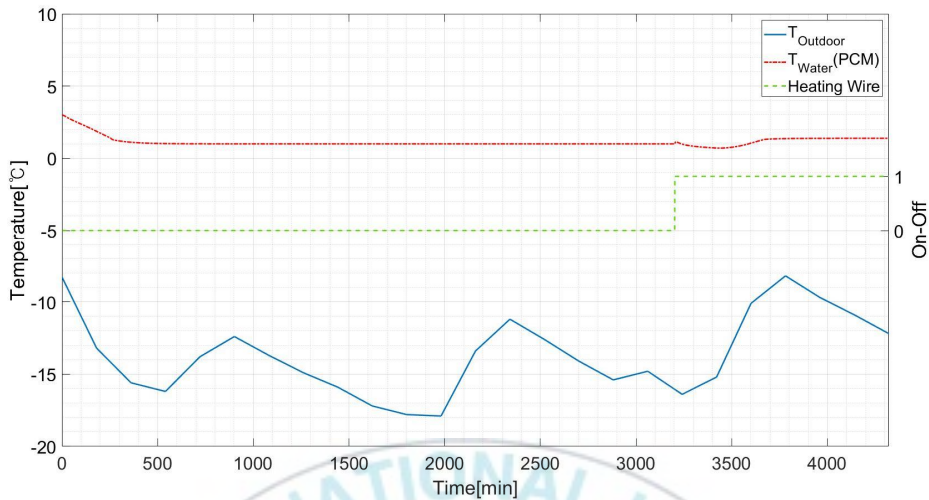


Fig. 5.2 Changes in water temperature and on-off of the heating wire in fire piping with PCM

단열재만 사용된 소방배관에서 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. Fig. 5.3에서 열선은 외기에 노출된 뒤 200분(3시간 20분)에 가동되었다. PCM이 사용된 소방배관의 경우와 달리 열선이 물과 가까이 설치되어있어 열선이 가동되면 수온이 빠르게 올라가는 것을 확인할 수 있다. 하지만 길을 감싸고 있는 단열재의 열용량이 작아 가동이 종료되면 수온이 금방 내려가는 가동과 비가동이 자주 반복되는 것을 알 수 있다. 열선의 가동시간은 2974분(49시간 33분)으로 확인되었다.

제 5장 열선이 설치된 소방배관에서 PCM의 전력사용량 절감효과

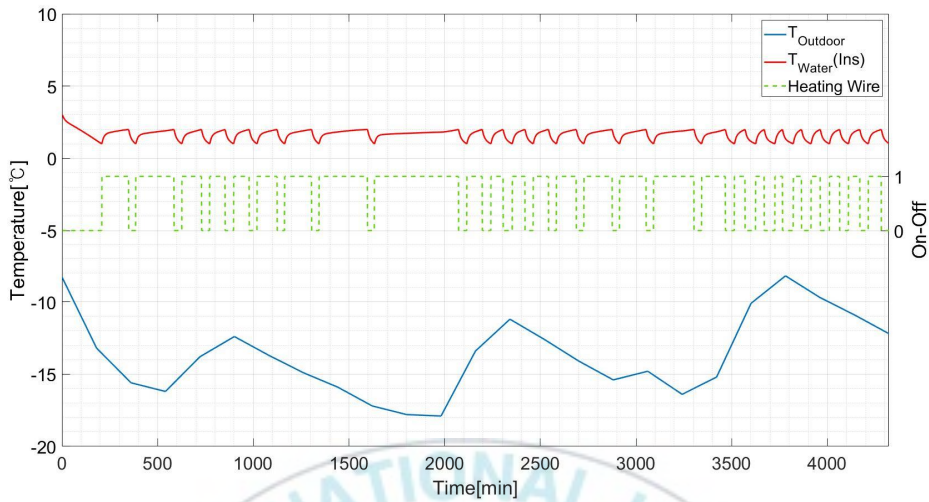


Fig. 5.3 Changes in water temperature and on-off of the heating wire in the normal fire piping

따라서 열선이 설치된 소방배관에서 PCM을 사용하면 총 3일 중 열선의 가동시간을 1856분(30시간 56)분 줄일 수 있었다. 절감된 전력사용량은 1m당 330Wh로 확인된다.

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

6.1 실험 목적

제 4, 5장을 통해 PCM을 사용하면 소방배관의 동파방지에 효과있고 열선을 사용할 경우 전력사용량을 감소할 수 있는 것을 확인하였다. 하지만 지역이나 사용하는 PCM의 종류에 따라서 소방배관의 동결시간은 제각각이다. 즉, 다양한 변수에 따라 소방배관에 사용된 PCM의 양이 과하거나 모자랄 수 있다. 따라서 이번 장을 통해서 PCM의 물성치 변화가 동결시간에 얼마나 영향을 미치는지, 지역에 따라 동결시간 어떻게 달라지는지 알아보고 소방배관 설계시 적절한 PCM의 양이나 종류를 선정할 수 있도록 선형회귀분석을 통해 회귀식을 제안하고자 한다.

6.2 실험 방법

실험조건에 맞는 PCM을 몇 가지 선정하여 물성치값에 따라 Case를 분류한다. 분류된 Case별로 시뮬레이션을 진행하여 PCM의 인자별 동결시간에 미치는 영향을 알아본다. 또한 소방배관의 동결시간예측을 위하여 지역에 따른 동결시간을 확인하고 평균외기온, 누셀 수, 잠열, 융점, PCM의 양을 독립변수로 동결시간을 종속변수로 하여 선형회귀분석을 통해 동결시간에 대한 회귀식을 추출한다.

6.3 인자선정

Table 6.1은 소방배관의 동파방지를 위해서 선정된 PCM들의 물성치값이다. 선정기준은 물의 융점인 0°C에서 6°C사이에 융점을 가져서 물보다 먼저 응고되어 잠열을 방출할 수 있는 PCM들로 선정하였다.

동파방지에 영향을 미치는 인자는 잠열, 융점, 양으로 선정하였다. PCM이 사용된 소방배관에서 동결시간이 지연될지는 PCM이 상변화를 얼마나

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

오래 지속하는지에 달려있다. 따라서, 잠열이 클수록 양이 많을수록 총 잠열량이 커지고 융점이 낮을수록 외기로의 열손실량이 작아져 상변화 시간을 길게 유지할 수 있다고 판단하였기 때문이다.

이하 아래부터는 PCM양을 직관적으로 판단할 수 있도록 두께로 Case분류하여 나타내고자 한다.

Table 6.1 Properties of PCM

		C ₁₄ H ₃₀	savEOM03	Q200-Q1 BioPCM	savE HS01
Thermal conductivity (W/m°C)	(liq)	0.14	0.146	0.58	0.55
	(sol)	0.14	0.224	1.1	2.2
Specific heat (J/kg°C)	(liq)	2100	1910	4100	3900
	(sol)	1800	1760	4200	2000
Density (kg/m ³)	(liq)	767	835	980	1010
	(sol)	810	912	910	924
Latent heat(J/kg)		229000	229000	325000	350000
Melting point(°C)		5.9	3.5	1	1

Table 6.2 ~ 4는 각 수치해석 시뮬레이션에서 사용할 인자들을 3가지로 분류하여 값들을 나타내고 있다. 분류된 Case는 선정된 PCM의 물성치 중에서 최솟값, 중앙값, 최대값으로 3개의 Case로 분류하였다. 그 외 기본값은 조건이 가장 좋지 못한 C₁₄H₃₀의 물성치를 사용하였다.

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

Table 6.2 Case classification according to latent heat

	Case1	Case2	Case3
Latent heat(J/kg)	229000	325000	350000

Table 6.3 Case classification according to melting point

	Case1	Case2	Case3
Melting point(°C)	5.9	3.5	1

Table 6.4 Case classification according to thickness of the PCM

	Case1	Case2	Case3
Thickness(mm)	5	10	15

다음은 PCM이 사용된 소방배관의 동결시간예측을 위해 사용될 기상데이터의 값을 Table 6.5에 나타내었다. 해당 지역들을 선정 한 이유는 사람이 가장 많이 거주하고 있는 서울, 저위도이면서 바람의 영향이 큰 부산, 중위도 지역인 대전, 고위도 지역인 강원으로 선정하였다. 올해 가장 추웠던 1월 7일부터 9일까지 3일간의 데이터를 3시간 간격으로 사용하였다.

Table 6.5 Air velocity and Nu according to region

Region	Seoul	Busan	Daejeon	Gangwon
Air Velocity [m/s]	2.4	3.4	1.5	2.1
Nu	13.72	17.84	10.26	12.65

6.4 실험 결과

6.4.1 PCM의 인자별 동파방지 효과

Fig. 6.1은 잠열에 따른 Case를 분류하여 서울지역에서 소방배관의 수온 변화를 수치해석 시뮬레이션을 통해 그래프로 나타내었다. 결과는 잠열이 가장 작은 Case1부터 동결시간이 1700분(28시간 20분), 2120분(35시간 20분), 2270(37시간 50분)으로 확인되었다. 잠열이 가장 큰 Case3가 Case1에 비해 동결시간이 33.53% 지연된 것을 알 수 있다.

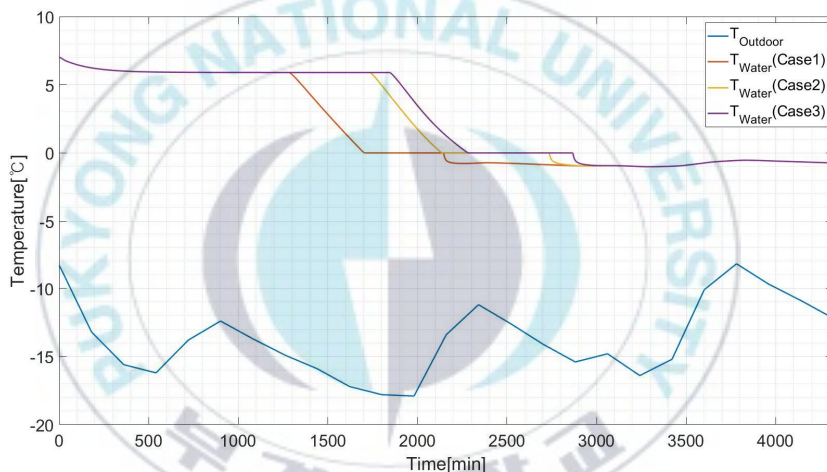


Fig. 6.1 Changes in water temperature according to latent heat

Fig. 6.2는 융점에 따라 Case를 분류하여 서울지역에서 소방배관의 수온 변화를 수치해석 시뮬레이션을 통해 그래프로 나타내었다. 결과는 융점이 가장 높은 Case1부터 동결시간이 1700분(28시간 20분), 1850분(30시간 50분), 2000(33시간 20분)으로 확인되었다. 융점이 가장 낮은 Case3가 Case1에 비해 동결시간이 17.65% 지연된 것을 알 수 있다.

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

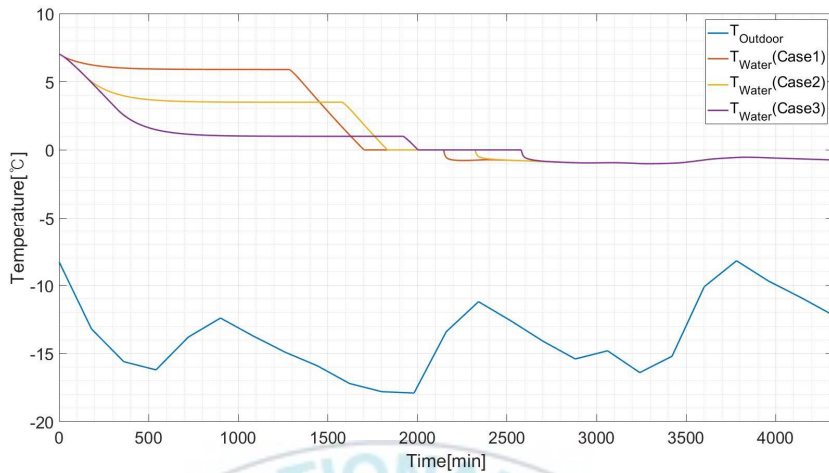


Fig. 6.2 Changes in water temperature according to melting point

Fig. 6.3는 PCM 두께에 따라 Case를 분류하여 서울지역에서 소방배관의 수온변화를 수치해석 시뮬레이션을 통해 그래프로 나타내었다. 결과는 두께가 가장 얇은 Case1부터 동결시간이 1160분(19시간 20분), 1500분(25시간), 1700(28시간 20분)으로 확인되었다. 두께가 가장 두꺼운 Case3가 Case1에 비해 동결시간이 46.55% 지연된 것을 알 수 있다.

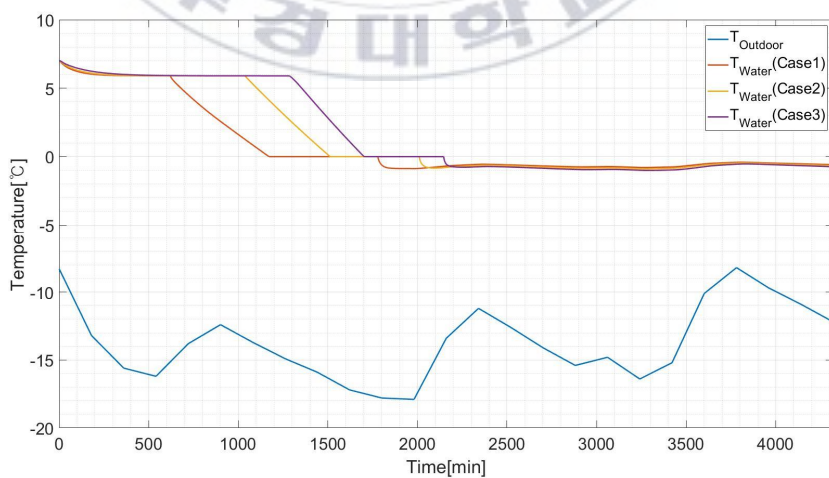


Fig. 6.3 Changes in water temperature according to thickness of PCM

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

따라서 선정된 PCM내에서 양, 잠열, 융점순으로 동결시간에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 6.4를 통해 각 인자와 Case별 동결시간을 그래프로 나타내었다.

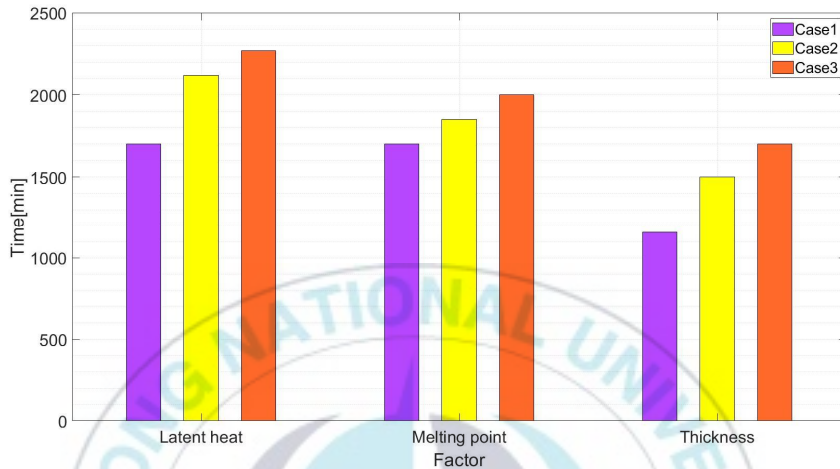


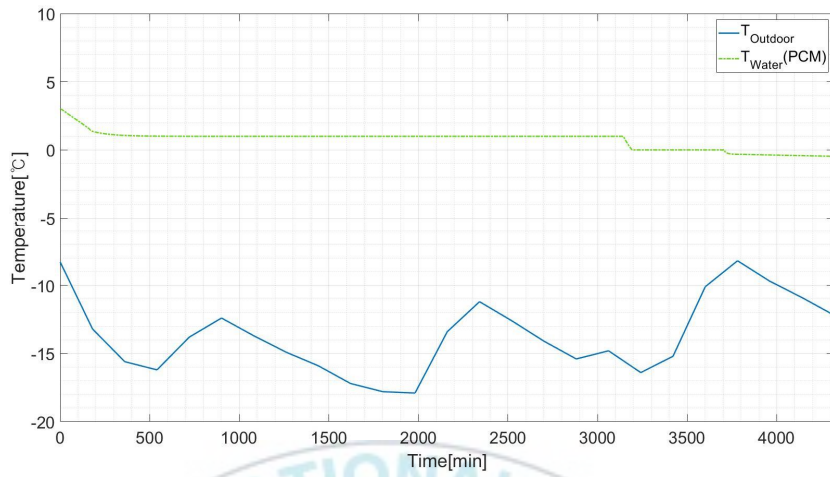
Fig. 6.4 Freezing time depending on each factor

6.4.2 지역에 따른 소방배관의 동결시간

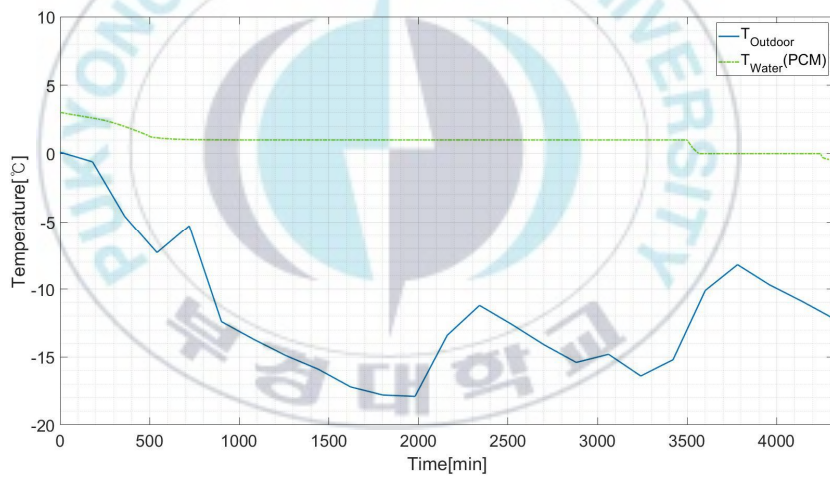
Fig. 6.5는 서울, 부산, 대전, 강원지역에서의 수치해석 시뮬레이션결과를 그래프로 나타내었다. 각 그래프의 실선은 해당 지역의 겨울철 외기온을 나타낸다. 일점쇄선은 각 지역의 겨울철 기온에 따른 소방배관의 수온변화를 타나내고 있다.

서울지역은 3200분(53시간 20분), 부산지역은 3550(59시간 10분), 대전지역은 3840(64시간), 강원지역은 3100(51시간 40분)에 동결이 시작되었다. 외기온이 낮을수록 동결시간이 짧아지는 것으로 나타났다. 하지만 부산의 경우 대전의 기온보다는 약간 높았지만 풍속이 강하여 동결시간이 짧아진 것으로 판단된다.

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

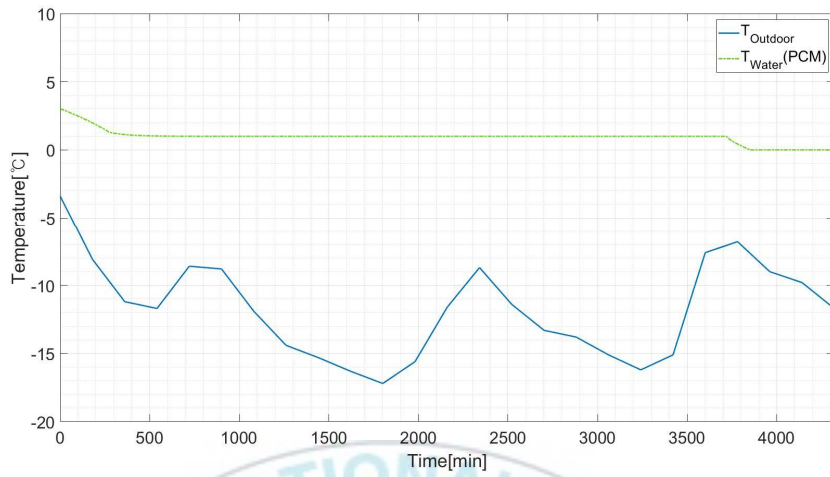


(a) Changes in water temperature in Seoul

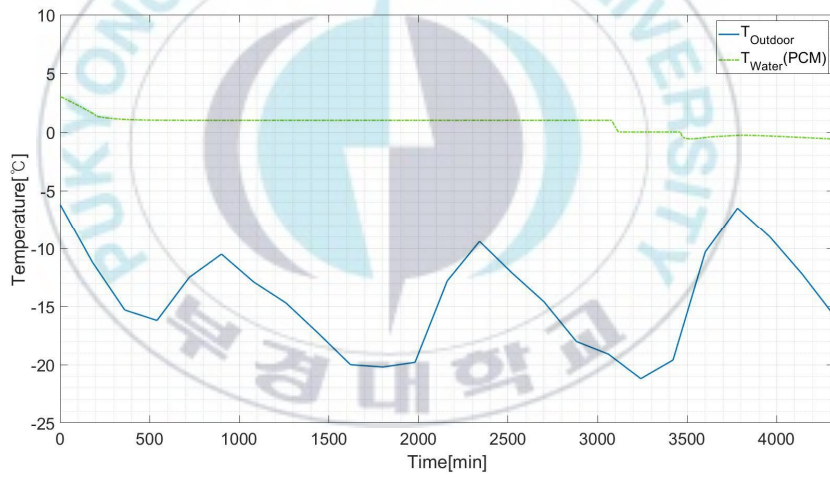


(b) Changes in water temperature in Busan

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측



(c) Changes in water temperature in Daejeon



(d) Changes in water temperature in Gangwon

Fig. 6.5 Water temperature by region

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

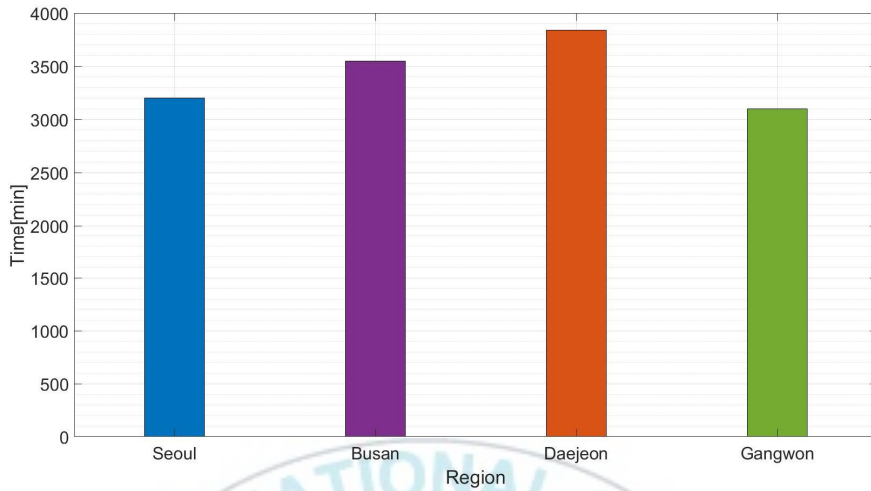


Fig. 6.6 Freezing time by region

6.5 선형회귀분석

6.5.1 변수

선형회귀분석을 통한 회귀식을 추출하기 위해서는 독립변수와 종속변수의 설정이 필요하다. 위 시험들을 통해서 선택할 수 있는 독립변수는 평균 외기온, 누셀 수, PCM의 양, 잠열, 융점, 재료의 초기온도이다. 그 값들을 통해서 종속변수인 동결시간을 제안한다.

6.5.2 선형회귀분석 결과

다음 Table 6.5는 각 Case별 변수들을 나타내고 있다. 각 변수들을 통해서 추출한 회귀식은 다음과 같다.

$$T_{Freeze} = 230.13 T_{Out} - 33.77 Nu + 171687.65 V + 0.005083 h_{latent} - 83.14 T_{Melt} - 126.2 T_{Ini} + 4544.31 \quad (6.1)$$

T_{Freeze} : 동결시간[min]

T_{Out} : 평균외기온[°C]

Nu : 누셀 수

V : PCM의 부피[m³]

h_{latent} : PCM의 잠열[J/kg]

T_{Melt} : PCM의 융점[°C]

T_{Ini} : 소방배관재료의 초기온도[°C]

Fig. 6.7은 실제값과 회귀식을 통한 예측값을 비교하는 그래프이고, Table 6.6은 회귀분석 통계량을 나타내고 있다. 결정계수값이 0.997103으로 회귀식을 통한 동결시간의 예측값이 거의 정확한 것을 알 수 있다.

제 6장 PCM인자별 동파방지 효과와 동결시간 예측

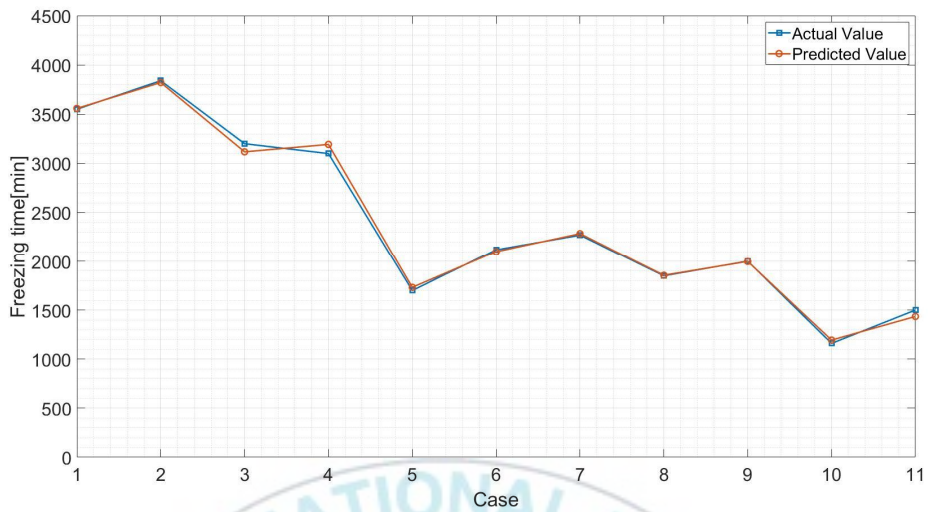


Fig. 6.7 Comparison of actual and predicted values through linear regression analysis

Table 6.6 Regression analysis statistics

Multiple correlation coefficients	0.99855
Coefficient of determination	0.997103
Adjusted coefficient of determination	0.992757
Standard error	75.74011
The number of observations	11

제 7장 결 론

본 연구에서는 PCM이 상변화시 많은 잠열을 방출하는 성질 소방배관에 이용하여 동파를 방지할 수 있는지 알아보았다. 또한, 열선이 설치된 소방배관에서는 열선의 가동시간을 줄여서 전력사용량을 줄일 수 있는지 알아보았다. 다양한 변수에 따른 결과를 확인하기 위해서 Matlab프로그램을 이용하여 유한차분법으로 수치해석 시뮬레이션을 진행하였다. 마지막으로, 동파를 방지하기 위한 PCM이 사용된 소방배관의 설계를 위하여 수치해석 시뮬레이션의 결과를 선형회귀분석을 통해 회귀식도 제안해 보았다. 결론은 다음과 같다.

(1) 단열재만 사용한 소방배관은 겨울철 외기에 의해 320분(6시간 20)에 동결이 시작되었으나, PCM이 사용된 소방배관은 3200분(53시간 20분)에 동결이 시작되었다. PCM을 사용할 경우 동결시간이 2880분(47시간) 지연되는 것을 확인하였고, 동파방지에 효과가 있을 것으로 사료된다.

(2) 겨울철 상당히 낮은 외기온에 의해 열선이 소방배관에 설치될 경우 단열재만 사용한 소방배관은 열선이 3일간 2974분(49시간 34분)가동되었으나, PCM을 사용한 소방배관은 열선이 3일간 1118분(18시간 38분)가동되었다. PCM을 사용할 경우 3일간 열선의 가동시간을 1856분(30시간 56분), 전력사용량을 1m당 330Wh 절감시킬 수 있었다.

(3) 잠열, 융점, 양을 동결시간에 영향을 미치는 인자로 선정하여 그 영향을 확인해본 결과 양, 잠열, 융점순으로 동결시간에 미치는 영향이 컸으며 순서대로 46.55%, 33.53%, 17.65% 동결시간이 지연되었다.

(4) 지역에 따라 동결시간을 확인해본결과 서울지역은 3200분(53시간 20분), 부산지역은 3550분(59시간 10분), 대전지역은 3840분(64시간), 강원지역은 3100분(51시간 40분)만에 동결이 시작되었다. 외기온이 낮고 풍속이 강한지역일수록 동결시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있었다.

(5) PCM이 사용된 소방배관의 설계를 위해 위 시뮬레이션 결과들을 종합하여 선형회귀분석을 한 결과 동결시간 $T_{Freeze} = 230.13 T_{Out} - 33.77 Nu + 171687.65 V + 0.005083 h_{latent} - 83.14 T_{Melt} - 126.2 T_{Ini} + 4544.31$ 로 나타낼 수 있었고, 결정계수 0.997103으로 아주 정확하게 예측할 수 있었다.



참고문헌

1. Kim, Yeong-Ho. Prevention of freezing of exposed piping and equipment. The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea. Pages.503-509. 2007
2. Jeong, Soon-young, Yun, Jea-ho, Kim, Joung-ha, Yang, Yoon-sub, Kim, Seong-Hyun, Song, Duk-yong. An Experimental Study on the Freezing Protection Valve Using Phase Change Material(PCM) for the HVAC System. The Korean Solar Energy Society. , 2012.11, 51-56(6 pages)
3. Myoung-Young Choi, Dong-Wook Lee, Hyoung-Gwon Choi(2014). Numerical Analysis of Unsteady Heat Transfer for the Location Selection of Anti-freeze for the Fire Protection Piping with Electrical Heat Trace,28(1),52-57. Fire Sci. Eng., Vol. 28, No. 1, pp. 52-57, 2014
4. Myoung-Young Choi, Byoung-Jin Jeon, Hyoung-Gwon Choi. Comparison of the Effects of Straight and Twisted Heat Trace Installations Based on Three-dimensional Unsteady Heat Transfer Fire Sci. Eng., Vol. 30, No. 1, pp. 49-56, 2016
5. Da-Som Lee, Jae-Seob Kwak. Bellows Tube Design to Prevent a Water Meter Breakage Caused by Volume Expansion During a Phase Transition. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A 42(9), 2018.9, 831-836(6 pages).
6. National Fire Agency, 2019, Standard Specification Book for Firefighting Equipment Corporation.
7. Meteorological Agency AWS
8. PLUSS-TDS-DOC-431 Version no.-R4, 28-Nov-2017
9. Hilpert, R., Wärmeabgabe von beheizten Drähten und Rohren, Forsch. Geb.

- Ingeneurwes, 4, 215, 1933
10. Hilpert, R., Wärmeabgabe von beheizten Drähten und Rohren, Forsch. Geb. Ingeneurwes, 4, 214, 1933 and Knudsen, J.D., D.L. Katz, Fluid Dynamics and Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1958
 11. Churchill, S. W., and M. Bernstein, A Correlation Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Cylinder in Crossflow, J. Heat Transfer, 99, 300, 1977
 12. Sang Min Seo, Hyun Kyo Oh, Jun Seok Nam. A Study on the Prevention of Freezing of Piping for Water-based Fire Protection System - Focus on Metal Heaters. The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea. 2018.6, 488-494(7 pages)
 13. Jun Kyoung Lee. Inhibitory Effect of adding Phase Change Material (PCM) to Fire Fighter Protective Clothing on Burn Injuries. Fire Science and engineering v.30 no.3 , 2016, pp.16 - 22
 14. Kim, Gihyun, Choi, Seungwon, Jang, Taejin, Kim, Seungwon, Park, Cheolwoo. Effect of PCM Addition Ratio On Concrete Setting Time. Korea Concrete Institute. 2021.11, 603-604 (2 pages)
 15. Yeon, Jung Heum, Oh, Taek Geun, Choi, Wonchang. Long-Term Thermal Behavior of Concrete Slabs with Microencapsulated PCM. Korea Concrete Institute 2019.10, 489-490(2 pages)
 16. Min, Hae Won, Kim, Hee Sun. Investigations of Mechanical and Structural Behaviors of Hollow Core Slabs using Concrete Mixed with PCM. Korea Concrete Institute. 2014.10, 291-292(2 pages)
 17. Jung, Yong Gi, Kim, Seong Eun, Yoo, Min Sang, Park, Jin Chul. Comparison of Floor Surface Temperature in PCM Floor Radiation

Heating System. ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA. 2021.4,
278-279 (2 pages)



Appendix

A.1 실측모델의 수치해석모델의 Matlab code

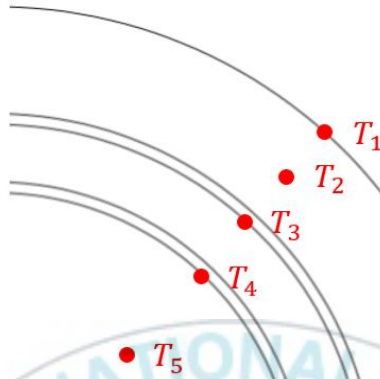


Fig. A.1.1 Temperature point of the actual model

%물성치

```
k_ins=0.037;
c_ins=700;
rho_ins=25;
k_case=0.1105;
c_case=837.2;
rho_case=1530;
k_pipe=16.3;
c_pipe=500;
rho_pipe=8000;
k_water=0.592;
c_water=4186;
rho_water=1000;
lat_water=333540.48
k_ice=2.23;
c_ice=2093;
```

%PCM

```
k_pcmw=0.14;
c_pcmw=2100;
rho_pcmw=767;
k_pcms=0.14;
c_pcms=1800;
rho_pcms=810;
tem_pcm=5.9;
lat_pcm=229000;
```

%부피

```
D_1=0.1798;
D_2=D_1-0.02;
D_3=D_2-0.02;
D_4=D_3-0.004;
D_5=D_4-0.01075;
D_6=D_5-0.01075;
D_7=D_6-0.004;
D_8=D_7-0.004;
D_9=D_8-0.0311;
A_1=D_1*pi;
V_1=D_1^2*pi/4-D_2^2*pi/4
V_2=D_2^2*pi/4-D_3^2*pi/4
V_3=D_3^2*pi/4-D_4^2*pi/4
V_4=(D_4^2*pi/4-D_5^2*pi/4)*0.8644
V_5=(D_5^2*pi/4-D_6^2*pi/4)*0.8644
V_6=D_6^2*pi/4-D_7^2*pi/4
V_7=(D_7^2*pi/4-D_8^2*pi/4)*0.9335
V_8=(D_8^2*pi/4-D_9^2*pi/4)*0.9335
V_9=(D_9^2*pi/4)*0.9335
```

%시간간격

```
deltaT=15
```

%온도

```
T_1(1,1)=-6;
```

```

T_2(1,1)=9.3;
T_3(1,1)=9.9;
T_4(1,1)=10.5;
T_5(1,1)=10.5;
h=13.03;
latentmax=lat_pcm*rho_pcmw*(V_4+V_5);
waterout_latent=lat_water*rho_water*V_7
waterin_latent=lat_water*rho_water*(V_8+V_9)
h_pcm(1,1)=(c_pcmw*rho_pcmw*V_4+c_pcmw*rho_pcmw*V_5)*(T_3(1,1)
-tem_pcm)+lat_pcm*rho_pcmw*(V_4+V_5)
h_waterout(1,1)=(c_pipe*rho_pipe*V_6+c_water*rho_water*V_7)*T_
4(1,1)+waterout_latent
h_waterin(1,1)=(c_water*rho_water*V_8+c_water*rho_water*V_9)*T
_5(1,1)+waterin_latent

for i= 1:12600

T_1(1,i+1)=T_1(1,i)+(h*A_1*(T_outdoor(1,i)-T_1(1,i))+2*pi*k_in
s*(T_2(1,i)-T_1(1,i))/log(D_1/D_3))*deltaT/(c_ins*rho_ins*V_1)

    %PCM층의 비열, 열전달율 결정
    if 0 <= h_pcm(1,i) & h_pcm(1,i) < latentmax
        c_pcm=(c_pcms+c_pcmw)/2
        k_pcm=(k_pcms+k_pcmw)/2
    elseif h_pcm(1,i)<=0
        c_pcm=c_pcms
        k_pcm=k_pcms
    else
        c_pcm=c_pcmw
        k_pcm=k_pcmw
    end

T_2(1,i+1)=T_2(1,i)+(2*pi*k_ins*(T_1(1,i)-T_2(1,i))/log(D_1/D_

```

```
3)+2*pi*(T_3(1,i)-T_2(1,i))/(log(D_3/D_4)/k_pipe+log(D_4/D_5)/
k_pcm))*deltaT/(c_ins*rho_ins*V_2+c_pipe*rho_pipe*V_3)
```

%PCM층 엔탈피 계산

```
h_pcm(1,i+1)=h_pcm(1,i)+(2*pi*(T_2(1,i)-T_3(1,i))/(log(D_3/D_4)
)/k_pipe+log(D_4/D_5)/k_pcm)+2*pi*(T_4(1,i)-T_3(1,i))/(log(D_5
/D_6)/k_pcm+log(D_6/D_7)/k_pipe))*deltaT
```

%PCM층 온도계산

```
if 0 <= h_pcm(1,i+1) & h_pcm(1,i+1)<latentmax
    T_3(1,i+1)=tem_pcm
elseif latentmax <= h_pcm(1,i+1)
    T_3(1,i+1)=tem_pcm+(h_pcm(1,i+1)-latentmax)/(c_pcmw*rho_pcmw*(V_4+V_5))
else
    T_3(1,i+1)=tem_pcm+h_pcm(1,i+1)/(c_pcmw*rho_pcmw*(V_4+V_5))
end
```

%물의 상태

```
if 0<=h_waterout(1,i) & h_waterout(1,i) < waterout_latent
    k_waterout(1,i)=(k_water+k_ice)/2
    c_waterout(1,i)=(c_water+c_ice)/2
elseif waterout_latent <= h_waterout(1,i)
    k_waterout(1,i)=k_water
    c_waterout(1,i)=c_water
else
    k_waterout(1,i)=k_ice
    c_waterout(1,i)=c_ice
end
```

```
if 0 <= h_waterin(1,i) & h_waterin(1,i) < waterin_latent
    k_waterin(1,i)=(k_water+k_ice)/2
```

```

        c_waterin(1,i)=(c_water+c_ice)/2
    elseif waterin_latent <= h_waterin(1,i)
        k_waterin(1,i)=k_water
        c_waterin(1,i)=c_water
    else
        k_waterin(1,i)=k_ice
        c_waterin(1,i)=c_ice
    end

    %물의 엔탈피
    h_waterout(1,i+1)=h_waterout(1,i)+(2*pi*(T_3(1,i)-T_4(1,i))/(log(D_5/D_6)/k_pcm+log(D_6/D_7)/k_pipe)+2*pi*(T_5(1,i)-T_4(1,i))/(log(D_7/D_8)/k_waterout(1,i)+log(D_8/D_9)/k_waterin(1,i)))*deltaT

    h_waterin(1,i+1)=h_waterin(1,i)+(2*pi*(T_4(1,i)-T_5(1,i))/(log(D_7/D_8)/k_waterout(1,i)+log(D_8/D_9)/k_waterin(1,i)))*deltaT

    %수온
    if 0 <= h_waterout(1,i+1) & h_waterout(1,i+1) < waterout_latent
        T_4(1,i+1)=0
    elseif waterout_latent <= h_waterout(1,i+1)

        T_4(1,i+1)=(h_waterout(1,i+1)-waterout_latent)/(c_pipe*rho_pipe*V_6+c_water*rho_water*V_7)
    else

        T_4(1,i+1)=h_waterout(1,i+1)/(c_pipe*k_pipe*V_6+c_water*rho_water*V_7)
    end

    if 0 <= h_waterin(1,i+1) & h_waterin(1,i+1) < waterin_latent

```

```

        T_5(1,i+1)=0
    elseif waterin_latent <= h_waterin(1,i+1)

T_5(1,i+1)=(h_waterin(1,i+1)-waterin_latent)/(c_water*rho_wate
r*(V_8+V_9))
    else

T_5(1,i+1)=h_waterin(1,i+1)/(c_water*rho_water*(V_8+V_9))
    end
end
end

```



A.2 PCM이 사용된 소방배관의 수치해석모델의 Matlab code

해당 Matlab code는 열선이 설치된 소방배관과 동일하게 절점을 뒀으므로 발열항도 같이 표시를 하여 나타내었다.

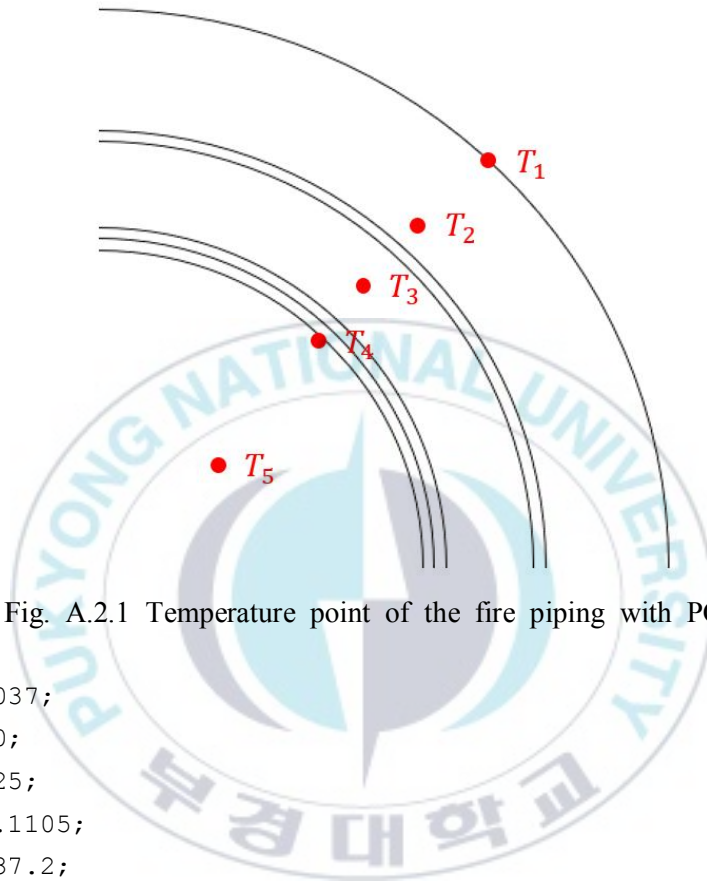


Fig. A.2.1 Temperature point of the fire piping with PCM

%물성치

```
k_ins=0.037;
c_ins=700;
rho_ins=25;
k_case=0.1105;
c_case=837.2;
rho_case=1530;
k_pipe=16.3;
c_pipe=500;
rho_pipe=8000;
k_water=0.592;
c_water=4186;
rho_water=1000;
lat_water=333540.48
k_ice=2.23;
c_ice=2093;
```

```

%PCM(savE HS01)
k_pcmw=0.55;
c_pcmw=3900;
rho_pcmw=1010;
k_pcms=2.2;
c_pcms=2000;
rho_pcms=924;
tem_pcm=1;
lat_pcm=350000;

D_1=0.1943;
D_2=0.1803;
D_3=0.1523;
D_4=0.1505;
D_5=0.1483;
D_6=0.1341;
D_7=0.1181;
D_8=0.1143;
D_9=0.1103;
D_10=0.105;
D_11=0.0742;
A_1=D_1*pi;

V_1=D_1^2*pi/4-D_2^2*pi/4
V_2=D_2^2*pi/4-D_3^2*pi/4
V_3=D_3^2*pi/4-D_4^2*pi/4
V_4=D_4^2*pi/4-D_5^2*pi/4
V_5=D_5^2*pi/4-D_6^2*pi/4
V_6=D_6^2*pi/4-D_7^2*pi/4
V_7=D_7^2*pi/4-D_8^2*pi/4
V_8=D_8^2*pi/4-D_9^2*pi/4
V_9=D_9^2*pi/4-D_10^2*pi/4
V_10=D_10^2*pi/4-D_11^2*pi/4
V_11=D_11^2*pi/4

```

%시간간격

deltaT=10

%온도

T_1(1,1)=3;

T_2(1,1)=3;

T_3(1,1)=3;

T_4(1,1)=3;

T_5(1,1)=3;

h=13.72;

latentmax=lat_pcm*rho_pcmw*(V_5+V_6);

water_latentout=lat_water*rho_water*V_9;

water_latentin=lat_water*rho_water*(V_10+V_11);

h_pcm(1,1)=c_pcmw*rho_pcmw*(V_5+V_6)*(T_3(1,1)-tem_pcm)+latent
max

h_waterout(1,1)=(c_case*rho_case*V_7+c_pipe*rho_pipe*V_8+c_wat
er*rho_water*V_9)*T_4(1,1)+water_latentout

h_waterin(1,1)=(c_water*rho_water*V_10+c_water*rho_water*V_11)
*T_5(1,1)+water_latentin

%발열체 조건

Q_h=11

H_on(1,1)=0

for i= 1:25920

T_1(1,i+1)=T_1(1,i)+(h*A_1*(T_outdoor(1,i)-T_1(1,i))+2*pi*(T_2
(1,i)-T_1(1,i))/(log(D_1/D_3)/k_ins+log(D_3/D_4)/k_case))*delt
aT/(c_ins*rho_ins*V_1)

%PCM층의 비열, 열전달율 결정

if 0 <= h_pcm(1,i) & h_pcm(1,i) < latentmax

k_pcm(1,i)=(k_pcms+k_pcmw)/2

c_pcm(1,i)=(c_pcms+c_pcmw)/2

```

elseif h_pcm(1,i) < 0
    k_pcm(1,i)=k_pcms
    c_pcm(1,i)=c_pcms
else
    k_pcm(1,i)=k_pcmw
    c_pcm(1,i)=c_pcmw

end

```

```

T_2(1,i+1)=T_2(1,i)+(2*pi*(T_1(1,i)-T_2(1,i))/(log(D_1/D_3)/k_
ins+log(D_3/D_4)/k_case)+2*pi*(T_3(1,i)-T_2(1,i))/(log(D_4/D_5
)/k_case+log(D_5/D_6)/(k_pcm(1,i))))*deltaT/(c_ins*rho_ins*V_2
+c_case*rho_case*V_3+c_case*rho_case*V_4)

```

%물의 열전도율 결정

```

if 0<=h_waterout(1,i) & h_waterout(1,i) < water_latentout
    k_waterout(1,i)=(k_ice+k_water)/2
    c_waterout(1,i)=(c_ice+c_water)/2

elseif water_latentout <= h_waterout(1,i)
    k_waterout(1,i)=k_water
    c_waterout(1,i)=c_water

else
    k_waterout(1,i)=k_water
    c_waterout(1,i)=c_water

end

```

```

if 0<=h_waterin(1,i) & h_waterin(1,i) < water_latentin
    k_waterin(1,i)=(k_ice+k_water)/2
    c_waterin(1,i)=(c_ice+c_water)/2

elseif water_latentin <= h_waterin(1,i)
    k_waterin(1,i)=k_water

```

```

        c_waterin(1,i)=c_water
    else

        k_waterin(1,i)=k_water
        c_waterin(1,i)=c_water
    end

%발열체
A=log(D_7/D_8)/k_case+log(D_6/D_7)/k_waterin(1,i)
B=log(D_8/D_9)/k_pipe

%발열체 조건
if T_3(1,i) < (tem_pcm +1)
    H_on(1,i+1)=1
else
    H_on(1,i+1)=0
end

%PCM층 엔탈피 계산
h_pcm(1,i+1)=h_pcm(1,i)+(2*pi*(T_2(1,i)-T_3(1,i))/(log(D_4/D_5)
)/k_case+log(D_5/D_6)/k_pcm(1,i))+2*pi*(T_4(1,i)-T_3(1,i))/(lo
g(D_6/D_7)/k_pcm(1,i)+log(D_7/D_8)/k_case+log(D_8/D_9)/k_pipe)
+H_on(1,i)+(Q_h*B+2*pi*(T_4(1,i)-T_3(1,i)))/(A+B))*deltaT

%PCM층 온도계산
if 0 <= h_pcm(1,i+1) & h_pcm(1,i+1)<latentmax
    T_3(1,i+1)=tem_pcm
elseif latentmax<= h_pcm(1,i+1)

T_3(1,i+1)=tem_pcm+(h_pcm(1,i+1)-latentmax)/(c_pcm(1,i)*rho_pcm
mw*(V_5+V_6))
else

T_3(1,i+1)=tem_pcm+h_pcm(1,i+1)/(c_pcm(1,i)*rho_pcmmw*(V_5+V_6)
)

```

end

%수온

```
h_waterout(1,i+1)=h_waterout(1,i)+(2*pi*(T_3(1,i)-T_4(1,i))/(log(D_6/D_7)/k_pcm(1,i)+log(D_7/D_8)/k_case+log(D_8/D_9)/k_pipe)+2*pi*(T_5(1,i)-T_4(1,i))/(log(D_9/D_10)/k_waterout(1,i)+log(D_10/D_11)/k_waterin(1,i))+H_on(1,i)*(Q_h-((Q_h*B+2*pi*(T_4(1,i)-T_3(1,i)))/(A+B))))*deltaT
```

```
h_waterin(1,i+1)=h_waterin(1,i)+(2*pi*(T_4(1,i)-T_5(1,i))/(log(D_9/D_10)/k_waterout(1,i)+log(D_10/D_11)/k_waterin(1,i)))*deltaT
```

```
if 0 <= h_waterout(1,i+1) & h_waterout(1,i+1) < water_latentout
```

```
    T_4(1,i+1)=0
```

```
elseif water_latentout <= h_waterout(1,i+1)
```

```
T_4(1,i+1)=(h_waterout(1,i+1)-water_latentout)/(c_case*rho_case*V_7+c_pipe*rho_pipe*V_8+c_waterout(1,i)*rho_water*V_9)
```

```
else
```

```
T_4(1,i+1)=h_waterout(1,i+1)/(c_case*rho_case*V_7+c_pipe*rho_pipe*V_8+c_waterout(1,i)*rho_water*V_9)
```

```
end
```

```
if 0 <= h_waterin(1,i+1) & h_waterin(1,i+1) < water_latentin
```

```
    T_5(1,i+1)=0
```

```
elseif water_latentin <= h_waterin(1,i+1)
```

```
T_5(1,i+1)=(h_waterin(1,i+1)-water_latentin)/(c_waterin(1,i)*rho_water*(V_10+V_11))
```

```
else
```

```
T_5(1,i+1)=h_waterin(1,i+1)/(c_waterin(1,i)*rho_water*(V_10+V_11))
```

```
11))  
    end  
end
```



A.3 단열재만 사용된 소방배관의 수치해석모델의 Matlab code

해당 Matlab code는 열선이 설치된 소방배관과 동일하게 절점을 뒀으므로 발열향도 같이 표시를 하여 나타내었다.

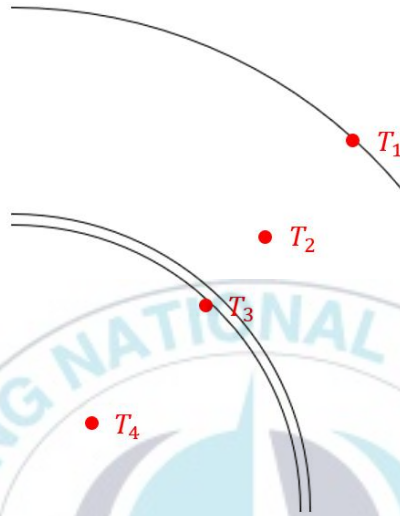


Fig. A.3.1 Temperature point of the fire piping without PCM

%물성치

```
k_ins=0.037;
c_ins=700;
rho_ins=25;
k_case=0.1105;
c_case=837.2;
rho_case=1530;
k_pipe=16.3;
c_pipe=500;
rho_pipe=8000;
k_water=0.592;
c_water=4186;
rho_water=1000;
lat_water=333540.48
k_ice=2.23;
c_ice=2093;
```

%관경, 부피

D_1=0.1943

D_2=0.1727

D_3=0.148

D_4=0.1183

D_5=0.1143

D_6=0.1103

D_7=0.105

D_8=0.0742

A_1=D_1*pi;

V_1=D_1^2*pi/4-D_2^2*pi/4

V_2=D_2^2*pi/4-D_3^2*pi/4

V_3=D_3^2*pi/4-D_4^2*pi/4

V_4=D_4^2*pi/4-D_5^2*pi/4

V_5=D_5^2*pi/4-D_6^2*pi/4

V_6=D_6^2*pi/4-D_7^2*pi/4

V_7=D_7^2*pi/4-D_8^2*pi/4

V_8=D_8^2*pi/4

%시간간격

deltaT=10

%온도조건

T_1(1,1)=3;

T_2(1,1)=3;

T_3(1,1)=3;

T_4(1,1)=3;

h=10.26;

water_latentout=lat_water*rho_water*V_6;

water_latentin=lat_water*rho_water*(V_7+V_8);

h_waterout(1,1)=(c_ins*rho_ins*V_4+c_pipe*rho_pipe*V_5+c_water
*rho_water*V_6)*T_3(1,1)+water_latentout

h_waterin(1,1)=(c_water*rho_water*V_7+c_water*rho_water*V_8)*T

```
_4(1,1)+water_latentin
```

```
for i= 1:25921
```

```
    %절점의 온도계산
```

```
    T_1(1,i+1)=T_1(1,i)+(h*A_1*(T_outdoor(1,i)-T_1(1,i))+2*pi*k_in  
    s*(T_2(1,i)-T_1(1,i))/log(D_1/D_3))*deltaT/(c_ins*rho_ins*V_1)
```

```
    T_2(1,i+1)=T_2(1,i)+(2*pi*k_ins*(T_1(1,i)-T_2(1,i))/log(D_1/D_  
    3)+2*pi*(T_3(1,i)-T_2(1,i))/(log(D_3/D_5)/k_ins+log(D_5/D_6)/k  
    _pipe))*deltaT/(c_ins*rho_ins*(V_2+V_3))
```

```
    %물의 열전도율 결정
```

```
    if 0<=h_waterout(1,i) & h_waterout(1,i) < water_latentout  
        k_waterout(1,i)=(k_ice+k_water)/2  
        c_waterout(1,i)=(c_ice+c_water)/2
```

```
    elseif water_latentout <= h_waterout(1,i)  
        k_waterout(1,i)=k_water  
        c_waterout(1,i)=c_water
```

```
    else  
        k_waterout(1,i)=k_water  
        c_waterout(1,i)=c_water
```

```
end
```

```
if 0<=h_waterin(1,i) & h_waterin(1,i) < water_latentin  
    k_waterin(1,i)=(k_ice+k_water)/2  
    c_waterin(1,i)=(c_ice+c_water)/2
```

```
elseif water_latentin <= h_waterin(1,i)  
    k_waterin(1,i)=k_water  
    c_waterin(1,i)=c_water
```

```

else
    k_waterin(1,i)=k_water
    c_waterin(1,i)=c_water

end

%수온

h_waterout(1,i+1)=h_waterout(1,i)+(2*pi*(T_2(1,i)-T_3(1,i))/(log(D_3/D_5)/k_ins+log(D_5/D_6)/k_pipe)+2*pi*(T_4(1,i)-T_3(1,i))/(log(D_6/D_7)/k_waterout(1,i)+log(D_7/D_8)/k_waterin(1,i)))*deltaT

h_waterin(1,i+1)=h_waterin(1,i)+2*pi*(T_3(1,i)-T_4(1,i))/(log(D_6/D_7)/k_waterout(1,i)+log(D_7/D_8)/k_waterin(1,i))*deltaT

if 0 <= h_waterout(1,i+1) & h_waterout(1,i+1) < water_latentout
    T_3(1,i+1)=0
elseif water_latentout <= h_waterout(1,i+1)

T_3(1,i+1)=(h_waterout(1,i+1)-water_latentout)/(c_ins*rho_ins*V_4+c_pipe*rho_pipe*V_5+c_water*rho_water*V_6)
else

T_3(1,i+1)=h_waterout(1,i+1)/(c_ins*rho_ins*V_4+c_pipe*rho_pipe*V_5+c_ice*rho_water*V_6)
end

if 0 <= h_waterin(1,i+1) & h_waterin(1,i+1) < water_latentin
    T_4(1,i+1)=0
elseif water_latentin <= h_waterin(1,i+1)

T_4(1,i+1)=(h_waterin(1,i+1)-water_latentin)/(c_water*rho_wate

```

```
r*(V_7+V_8))  
else  
  
T_4(1,i+1)=h_waterin(1,i+1)/(c_ice*rho_water*(V_7+V_8))  
end  
end
```



감사의 글

아직 어리석고 배울 것이 많은 제가, 벌써 2년의 석사 생활이 끝나간다고 하니 기쁘면서도 허무하고 한편으론 걱정되고 만감이 교차하는 것 같습니다. 함께 했기에 끝을 낼 수 있었던 이 논문을 빌어서 감사한 마음을 글로 전하고자 합니다.

먼저, 저의 대학원 생활을 이끌어주시고 대학원 생활뿐만 아니라 사회에 나가서도 바르게 성장할 수 있도록 관심과 조언을 아끼지 않으신 김종수 교수님, 논문에 하고자 하는 말을 명확하게 답을 수 있도록 도움과 조언을 해주신 김동규 교수님, 항상 기쁘신 모습으로 공조와 이상류 그리고 히트파이프의 세계를 알려주신 김종수 교수님, 다양한 냉동설비와 설계 방법을 알려주신 윤정인 교수님, 신재생에너지와 설계 방법을 알려주시고 영어발표를 통해 영어의 두려움을 극복시켜주신 최광환 교수님, 열전달의 원리와 기초를 가르쳐주신 김은필 교수님, 자동제어의 기초를 알려주시고 관심과 흥미를 느끼게 만들어주신 정석권 교수님, 냉동사이클의 기초를 알려주신 손창효 교수님, 얼마 뵙지는 못했으나 언제나 웃는 모습으로 맞아주신 설성훈 교수님께 모두 감사드립니다.

가끔 연구실에 오셔서 자신감을 가질 수 있도록 격려와 조언을 해주신 김민수 박사님, 즐겁거나 힘들 때나 언제나 함께해서 힘이 됐던 해빈이, 쓸쓸한 연구실을 활기차게 바꿔준 석민이와 원호, 전공지식을 다시 다질

감사의 글

기회와 가르침의 뿌듯함을 알려준 많은 학부생분들께도 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로, 제가 부족함 없이 배울 수 있도록 믿어주신 할머니, 부족한 저를 끝까지 믿어주신 부모님께 감사하다는 말 전하고 싶습니다.

