

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 이용허락조건 을 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 🖃







2016년 8월 교육학석사(기계 • 금속)학위논문

전기신호에 의한 수도관 동파 감지에 대한 연구

조선대학교 교육대학원 기계·금속 교육전공 강 영 준



전기신호에 의한 수도관 동파 감지에 대한 연구

A Study on Freezing and Burst Detection of Water-Pipe by Electrical Signal

2016년 8월 25일

조선대학교 교육대학원 기계·금속 교육전공 강 영 준



전기신호에 의한 수도관 동파 감지에 대한 연구

지도교수 정 상 화

이 논문을 교육학석사(기계 • 금속)학위 신청 논문으로 제출함.

2016년 4월

조선대학교 교육대학원 기계·금속 교육전공 강 영 준





강영준의 교육학 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 <u>정 재 강 (인)</u>

위 원 조선대학교 교수 _ 조 규 재 (인)

위 원 조선대학교 교수 <u>정 상 화 (인)</u>

2016년 5월

조선대학교 교육대학원





목 차

LIST OF TABLES	Ш
LIST OF FIGURES	IV
ABSTRACT	· v
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 목적	· 1
제 2 절 연구 동향	. 3
제 3 절 연구 방법 및 내용	• 5
제 2 장 이론적 배경	··· 7
제 1 절 물의 상태 변화	· 7
제 2 절 원통에 작용하는 응력	. 9
제 3 장 실 험	13
제 1 절 동파 실험 장치	13
제 2 절 동파 실험 방법	19
제 4 장 결과 및 고찰	23
제 1 절 외경에 따른 온도 특성	23
제 2 절 두께에 따른 온도 특성	27
제 3 절 재질에 따른 온도 특성	31





제	5	장	결	론	 34
참.	고:	문한]	•••••	 35



LIST OF TABLES

Table	3-1	Mechanical properties of metal and size	15
Table	3-2	Infrared radiation thermometer specification	16
Table	3-3	Digital multimeter specification	17
Table	3-4	Refrigerator specification	18
Table	3-5	PVC pipe of different diameters	20
Table	3-6	PVC pipe of different thickness	20
Table	3-7	Pipe of different material	20
Table	3-8	Resistance change per image frame	22
Table	4-1	Measurement temperature according to time during the pipe	
		bursting at dia. = 42mm, dia. = 48mm and dia. = 60mm \cdots	24
Table	4-2	Measurement temperature according to time during the pipe	
		bursting at $t = 1.8$ mm and $t = 3.6$ mm	29
Table	4-3	Measurement temperature according to time during the pipe	
		bursting for PVC and copper	32





LIST OF FIGURES

Fig.	1-1	Schematic diagram of burst testing	4
Fig.	2-1	Density of water ·····	7
Fig.	2-2	Phase change of water ·····	8
Fig.	2-3	Normal stress of a cylindrical pressure vessel	9
Fig.	2-4	Longitudinal stress of circular section	10
Fig.	2-5	Circumferential stress of the vessel wall	11
Fig.	3-1	Schematic diagram of the freezing and burst testing	14
Fig.	3-2	Support fixture	15
Fig.	3-3	Infrared radiation thermometer	16
Fig.	3-4	Digital multimeter	17
Fig.	3-5	Refrigerator ····	18
Fig.	3-6	Variation of temperature and resistance according to time at VG2-	-40
			21
Fig.	3-7	Resistance variation of the bursting moment	22
Fig.	4-1	Fracture shapes of PVC for (a) dia. = 42mm, (b) dia. = 48mm,	
		(c) dia. = 60mm	25
Fig.	4-2	Temperature variation of time according to the pipe diameter for	
		t = 1.8mm ····	26
Fig.	4-3	Two types of PVC pipe at thickness $t = 1.8$ mm and $t = 3.6$ mm	28
Fig.	4-4	Bulging of PVC pipe at thickness $t = 3.6mm$	28
Fig.	4-5	Temperature variation of time according to the pipe thickness for	
		dia. = 48mm ····	30
Fig.	4-6	Fracture shape of copper pipe for dia. = 34.92mm, t = 1.07mm	32
Fig.	4-7	Temperature variation of time according to the pipe material	33





ABSTRACT

A Study on Freezing and burst Detection of Water-Pipe by Electrical Signal

Kang Young Jun

Advisor: Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Major in Mechanical & Metallurgical Education

Graduate School of Chosun University

The damages of the water plumbing system are usually caused by the freezing and material failure of pipe. The freezing of burst of pipe is generated by the extreme pressure of the iced water, while the volume of the pipe is reduced by ice-plug growth. Due to the rapid climate change on global warming, it gives serious damage to society and the economy such as cold wave, heavy snowfall, heavy rain, and drought, etc. No exception was in korea last winter, and it suffered a lot of damage to a record cold snap.

Indirect damage caused by leaking is greater than the direct damage caused by pipe failure. It should detect the water pipes burst and repair plumbing problems to minimize the damage.

In this paper, the method to detect the freezing and burst of the water pipe by an electric signal was proposed. When the aluminum film adhered to the pipe is broken by pipe failure, Freezing and burst was detected by measuring the change in resistance. Temperature of pipe surface was measured by an infrared thermometer. The effect on cold tolerance was investigated by measuring the temperature characteristics according to the diameter, the outer diameter of the pipe, and the material.





Three factors such as diameter, thickness, and material that affect cold resistance's improvement was analyzed by an experimental result.

- (1) 42mm(OD) pipe froze and burst after 1 hour 59 minutes and surface temperature of the pipe is -1.4°C. 48mm pipe was after 4 hours 53 minutes and surface temperature is -5°C. 60mm pipe was after 9 hours 44 minutes and surface temperature is -6.4°C.
- (2) 1.8mm(thickness) PVC pipe was unable to withstand the pressure and froze and burst. 3.6mm PVC pipe did not fracture even after 16 hours at -2 5° C.
- (3) Although copper pipe is thinner than the thickness and smaller than the diameter of PVC pipe, copper pipe endured a long period of time at a lower temperature.

As the outer diameter of the pipe increases at the same thickness, the thickness of pipe increases at the same outer diameter, and when the material is copper rather than PVC, it can better withstand long time at low temperature and the cold resistance is improved.





제 1 장 서 론

제 1 절 연구 목적

기상청의 이상기후보고서에 따르면 북극의 기온이 평년보다 높아지면서 차가운 공기가 중위도까지 내려와 북반구 지역에서 한파와 폭설의 발생 원인으로 보고 있다. 미국 남부지역에서 1월 10일 폭설과 한파로 9명이 사망하고 도로 마비와 수 천 가구가 정전이 발생하고 미국 북동부 뉴 잉글랜드 일부 지역에서는 1월 25일 체감온도 영하 50℃에 육박하는 한파로 한파주의보 및 한파경보 발령되었다. 1월 24일에 미국 캘리포니아 남부 및 동부 지역에서 한파와 폭설이 발생하고 10월 20일에는 미국 중부 사우스다코타주에 강풍과 폭설로 인해 정부폐쇄 사태가 발생했다.[1-2]

우리나라의 유례없는 이상기후 발생으로 2010년 12월 말부터 1월 말까지 한파가 39일간 지속되었고 1월 평균 기온은 -4.4℃로 평년보다 3.7℃ 낮았다. 특히 찬대륙고기압이 우리나라 남부지방까지 크게 확장하여 부산 아침 최저기온 -12.8℃로 1915년 이후 96년만의 가장 낮은 온도를 기록하며 강한 한파가 나타났다.^[1]

이상기후 발생에 의한 한파는 북극의 평균 기온이 평년보다 약 10°C가 높은 이상고온 현상이 오랫동안 지속되어 해빙면적이 점차 감소하는 경향을 보이다가 2012년에 북극해빙의 면적은 역대 최소면적을 기록하였다. 겨울철 중위도 지역의 한파와 폭설을 유발하는 음의 북극진동은 북극의 해빙면적의 감소와 관련이 있다. 이로 인해 북극에 있는 찬 공기를 차단시켜주는 역할을 하는 제트기류라는 강풍대가 점차 느슨해지고 그에 따라 북극에 차단되어있던 찬 공기가 중위도까지 내려오면서 북반구 지역에 한파와 폭설이 나타난다.[2]

동결에 의한 급수 배관의 파손은 피해 범위가 광범위하고 경제적 비용이 크다. Property Loss Reduction 보험학회에 따르면 미국에서 지난 10년 동안 파이프 동파 관련해서 손실 비용이 40억 달러를 초과하는 것으로 추정하고 있다.^[3]

미국 남부는 북부에 비해 온난한 기후 때문에 동파예방에 대한 인식이 취약하 여 예년보다 추운 겨울철 동결에 의한 동파 피해가 매우 크다.^[4]





올해 국내에서 한파가 지나간 뒤 날이 풀리면서 동파 사고가 발생했다. 겨울저녁 서울 양천구의 한 아파트 물탱크 수도관이 터져 50여 가구가 피해를 입었다. 노원구에서도 소화전 배관이 터져 10여 세대가 침수 피해를 입었다. 서초구에서는 가정용 상수도관 파열로 도로에 1시간 넘게 물줄기가 치솟았다. 모두 한파 때 동파되었던 배관의 얼음이 녹으면서 파열된 부위에 누수가 일어나 발생한사고이다. 서울 상수도사업본부에 따르면 최저기온과 동파 신고 건수를 비교해보면 실제로 최저기온이 13도 이상 계속 오르는데도 동파 신고는 크게 줄지 않고하루 6백 건 이상 접수되었다. 이처럼 수도관의 동파는 파이프가 파손되는 직접적인 피해보다 해빙기 누수에 의한 간접피해가 더 크기 때문에 누수가 진행되기 전 수도관 동파를 감지하고 문제의 배관을 보수하여 피해를 최소화해야 한다. 기존의 누수탐지기는 배관의 누수를 탐지하는 기기로 동파를 감지할 수 없기 때문에 수도관의 동파를 감지하기 위한 방법과 기술이 필요하다.

급수 배관 설비의 파손원인은 보통 파이프 동결과 재료의 파괴에 기인한다. [6] 파이프의 동파는 확장된 얼음이 파이프 벽에 직접적인 압력을 가하여 파손된 것이 아니라 얼음 플러그(ice plug) 성장으로 인해 파이프 안의 체적이 감소되고이때 물에 의한 극도의 압력이 작용하여 발생된다. [7]

본 논문에서 전기 신호에 의해 수도관의 동파를 감지하기 위한 방법을 고안하 였으며 파이프의 직경, 외경과 재질에 따라 온도특성을 측정하여 내한성에 미치 는 영향을 고찰하고자 한다.





제 2 절 연구 동향

Lozowski, Jones and Hill은 얇은 얼음 성장 예측을 위해 준 정상상태 모델을 이용하여 선형 온도 분포에 따라 표면 열전달율의 추정을 제시하였다.^[8]

과냉각 물에 얼음 결정의 수지상 성장 속도를 측정하기 위한 장치를 고안하였다. 열 확산 모델을 기반으로 수지상의 성장 속도의 예측은 이론적으로 상당한 편차를 보인다. 측정값과 예측값의 불확실성을 제거하고 정확도를 높이기 위한 진단기술의 개선 방안을 논의하였다.^[9]

과냉각 현상 제어에 필요한 요소를 찾기 위해 다양한 실험을 수행하였다. 대류, 진동, 접촉이 없는 충격 요소는 과냉각 물의 동결에 영향을 주지 않고 고체사이 또는 고체와 액체 사이의 충돌과 마찰이 동결 요인으로 작용한다.^[10]

원자력 발전소의 유지 보수 작업을 위해 일시적으로 파이프를 분리할 필요가 있다. 관의 개폐를 조절하는 기계장치를 사용할 수 없을 때 동결 밀봉 기술이 사용된다. 액체질소로 채워진 열교환기에 둘러싸인 파이프 내에 얼음 플러그(ice-plug)를 형성한다. 파이프의 초기온도와 냉각 온도(-196℃)사이의 온도범위에서 응력이 발생하고 재료의 작은 결함이 존재할 때 파괴될 수 있다. Messelier-Gouze^[11] 등은 동결상태에서 파단 없이 수용할 수 있는 결함의 최대 크기를 평가하였다. 화력 또는 원자력 발전소의 배관의 기하학적 구성, 강(steel)과 초기 환경설정을 달리하여 실험하였다. 물리적 현상과 관계하여 동결에 의한 열응력의 발생 실험을 가능케 했다. 온도 하강에 따라 두께, 축 방향 및 방위각에서 열 변화속도를 측정하였다. 압력에 대한 저항력 실험에서 동결에 의해 형성된 파이프 내의 얼음 플러그가 높은 압력에 견딜 수 있음을 확인하였다. [12]

극소 유체 동결에 의한 파이프에 발생하는 응력을 축대칭 쉘 이론에 기초하여 분석하였다. 파이프 벽과 냉동재킷에 의해 형성된 얼음 플러그사이의 해석모델을 설정하여 전단 해석 및 파이프 거동을 재현하여 분석하였다. 실험값과 예측값을 비교하여 검증 된 수치해석 방법을 제시하였다.^[13-14]

물의 부피 팽창에 대한 물 응력은 식품의 동결과 얼음의 생산과 같은 산업적 인 과정뿐만 아니라 동파에 의한 파이프 손상 등에 중요하다. 열응력에 대한 이 론적인 분석은 얼음의 기계적 성질이 명백하게 규명되지 않았다. 또한 얼음의 온





도, 얼음 결정의 내부구조와 얼음 안의 변형률 등과 같이 많은 요인에 크게 영향을 받는다. 얼음의 결빙 과정에서 열응력 해석을 위해 모델링을 단순화하였다. 원통형의 황동 관 내부의 동결에 대한 열응력 해석 모델을 제시하였다.

M. AKYURT^[16]가 구성한 동파 시험 장치의 모식도를 Fig. 1-1에 나타내었다. 냉동용 액체로 액체탄산을 사용하고 파이프 내의 압력 변화를 측정하였다. 압력 센서를 이용한 장치구성으로 얼음에 갇힌 액체의 압력 측정을 가능하게 하였다. 1000bar를 초과하는 압력 조건에서 동파 실험의 가능성을 제안했다.

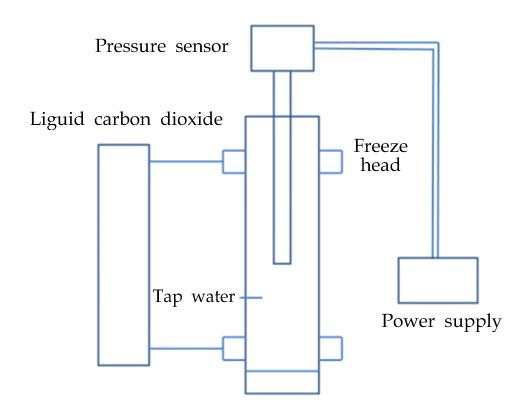


Fig. 1-1 Schematic diagram of burst testing^[16]





제 3 절 연구 방법 및 내용

수도용 파이프의 동파를 전기신호에 의해 감지하기 위해 파이프 표면에 알루미늄 피막을 부착하고 수돗물을 채워 동결시켰다. 알루미늄 피막에 멀티미터를 연결시켜 동파 순간의 저항 변화를 측정하였다.

파이프는 수도용으로 사용되는 PVC파이프와 구리파이프를 사용하였다. 부도체인 PVC와 도체인 구리파이프에 알루미늄 피막을 부착하고 저항 변화에 의해 동파를 감지하였다.

파이프의 외경, 두께와 재질에 따라 동파까지 걸리는 시간과 온도변화를 측정하였다. 외경에 따른 내한성을 평가하기 위해 PVC 재질의 VG2 얇은 관에서 두께는 같고 외경이 다른 파이프를 사용하였다. 두께에 따른 내한성을 평가하기 위해 재질이 PVC로 같고 두께 차이가 있는 VG2 얇은 관과 VG1 두꺼운 관에서 외경이 같은 파이프를 사용하였다. 재질에 따른 내한성을 평가하기 위해 두께 1.8mm, 외경 48mm 규격의 VG2 얇은 관과 두께 1.07mm, 외경 34.92mm 규격의 구리파이프를 사용하였다.

실험 장치를 특별히 제작하여 -25℃에서 각각의 파이프를 동결시켰다.

본 연구는 파이프에 부착한 알루미늄 피막의 저항변화에 의해 동파를 감지하고 파이프의 외경, 두께 및 재질에 따라 온도를 측정하여 내한성을 평가하였으며 다음과 같이 논문은 5장으로 구성되어 있다.

제 1장에서는 본 논문의 연구목적, 연구동향, 연구 목적 및 방법 등을 설명하였다.

제 2장에서는 본 연구의 이론적 배경으로 물의 상태변화와 파이프에 작용하는 응력을 검토하고 응력에 의한 파단 형성과 저항측정을 위해 부착한 알루미늄 피 막의 단선에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 실험 장치를 구성하는 기기와 사양을 기술하고 멀티미터와 카메라를 이용해 저항 변화를 측정하는 방법과 적외선온도계를 이용해 온도 변화를





측정하는 방법 등을 설명하였다.

제 4장에서는 제 1절에서 외경에 따른 온도 특성, 제 2절에서 두께에 따른 온도 특성, 제 3절에서 재질에 따른 온도 특성을 고찰하여 조건에 따른 파이프의 내한성을 평가하였다.

제 5장에서는 실험에서 얻어진 결과를 요약하여 결론을 서술하였다.





제 2 장 이론적 배경

제 1 절 물의 상태 변화

물의 밀도 변화는 분자간의 수소결합에 따른 특성이다. 물의 밀도는 Fig. 2-1^[17]에 나타낸 바와 같은 변화를 보인다. 물의 온도가 감소하여 4℃ 이하에서 일부의 수소결합이 끊어져 분자 주위의 빈 공간을 채워 밀도는 감소하고 부피는 증가한다. 4℃이상에서 물 분자 결합이 끊어지면 분자 간 운동이 활발해져서 부피가 증가하고 밀도는 감소한다.^[18-19] 얼음에서는 물 분자들이 빈 공간이 많은 육방정계결정을 형성하여 물보다 부피가 크다.^[20]

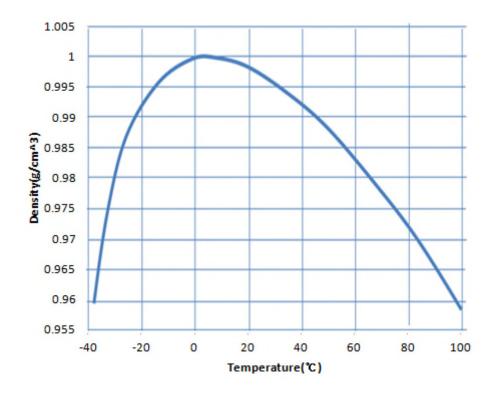


Fig. 2-1 Density of water^[17]



Fig. 2-2에 온도와 압력에 따른 얼음 상 변화를 나타내었다. [21] 얼음 Ih는 육방 정계 결정으로 일반적으로 볼 수 있는 거의 모든 얼음에 속하는 상태이다. 얼음 Ⅲ은 정방정계 결정으로 300 MPa 압력에서 250 K에서 형성된다. [22-23] 바닷물보다 밀도가 작은 빙산이 떠오르는 것 같이 대기압에서 얼음 Ih의 결정이 생성되면서 부피가 커진다. [24] 이러한 물의 부피 변화에 의해 발생하는 현상에는 냉동실에 넣어 둔 물병이 파열되고 바위 틈에 물의 동결 융해 작용에 의한 암석의 파괴[25] 등을 들 수 있다. 수도관 동결에 의한 동파 또한 물의 상태 변화에 의해 발생하는 현상 중 하나이다. [26]

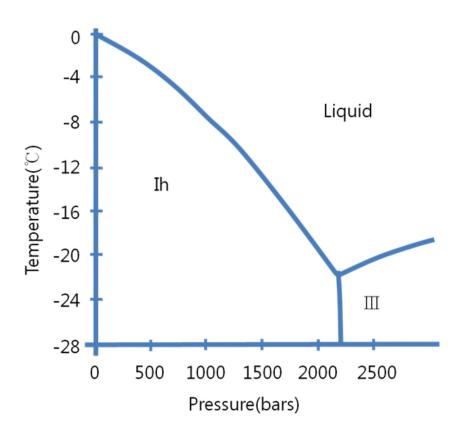


Fig. 2-2 Phase change of water^[21]





제 2 절 원통에 작용하는 응력

내압을 받는 원통형 용기는 산업분야 및 실생활에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 내압용기는 고온, 고압의 열원을 공급하는 보일러 이외에 압축공기의 저장용기, 압력용기에 소화제를 가압하여 충전한 소화기, 알루미늄 음료 캔 또는 수도관 및 가스관 등 유체를 수송하는 파이프에서 볼 수 있다.[27]

직경에 비해 무시할 정도의 얇은 두께의 원통형 압력용기에 작용하는 응력은 Fig. 2-3에 나타내었다. 여기에서 σ_1 는 원주응력이고 σ_2 는 길이방향 응력이다. 파이프 벽면의 임의의 면적에 작용하는 수직응력에 의해 해석 가능하며 원통형 용기의 대칭성 때문에 전단 응력은 고려하지 않는다. [28]

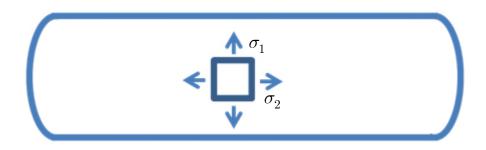


Fig. 2-3 Normal stress of a cylindrical pressure vessel^[27]

길이방향 응력은 Fig. 2-4와 같이 길이방향 축에 수직으로 잘린 절단면에 길이 방향으로 작용하는 응력은 σ_2 이고 길이방향 응력의 합력은 식(1)와 같다. 파이프 내압은 ρ 이고 단면적에 작용하는 힘의 합력은 식(2)와 같다. 여기에서 r은 파이프 안쪽의 반지름이다. 길이 방향 응력의 합력과 파이프 내압의 합력이 평형을 이루고 있다. 원통형 압력용기의 길이방향 응력은 식(3)과 같이 평형방정식으로 얻을 수 있다.





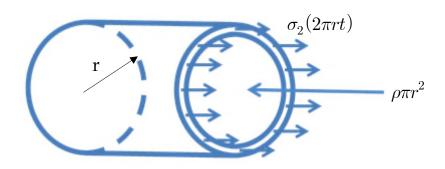


Fig. 2-4 Longitudinal stress of circular section^[27]

절단면에 길이방향으로 작용하는 응력의 합력은

Force =
$$\sigma_2(2\pi rt)$$
 (1)

파이프 내압에 작용하는 합력은

Force =
$$\rho \pi r^2$$
 (2)

위 두 식 (1)과 (2)를 결합하여 얻어진 길이방향 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_2 = \frac{\rho r}{2t} \tag{3}$$





원주응력은 Fig. 2-5와 같이 길이방향의 절단면에 작용하는 원주응력은 σ_1 이고 원주응력의 합력은 식(4)와 같다. 절단면에 작용하는 파이프 내압의 합력은 식(5)와 같다. 여기에서 b는 파이프 절단면의 길이 t는 파이프 두께이다. 원주응력의 합력과 파이프 내압의 합력이 평형을 이루고 있다. 원통형 압력용기의 원주 응력은 식(6)과 같이 평형방정식으로 얻을 수 있다.

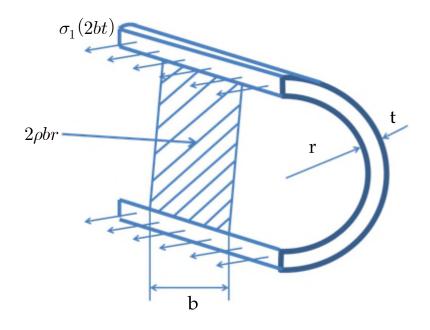


Fig. 2-5 Circumferential stress of the vessel wall^[27]

절단면에 원주방향으로 작용하는 응력의 합력은

Force =
$$\sigma_1(2bt)$$
 (4)



파이프 내압의 합력은

Force =
$$2\rho br$$
 (5)

위 두 식 (4)와 (5)를 결합하여 얻어진 원주응력은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \frac{\rho r}{t} \tag{6}$$

앞에서 구한 응력을 비교하면 원주응력이 길이방향 응력에 비해 2배 크다. 따라서 파이프의 파단은 원주응력에 의해 결정되고 파단의 진행은 최대원주응력선에 수직 방향이다.[29]

파이프 동파는 원주응력에 수직 방향으로 파단이 진행되기 때문에 파이프 표면에 원주 방향으로 알루미늄 피막을 부착하면 파단 형상에 따라서 피막이 단선된다. 따라서 피막이 단선되면 저항이 변하는 원리를 이용해 전기신호에 의해 파이프 동파를 감지할 수 있다.





제 3 장 실 험

제 1 절 동파 실험 장치

제 2장 연구동향에서 M. AKYURT^[21]은 파이프에 냉동 재킷을 설치하고 냉동 용 액체탄산을 주입해 열 교환시켜 파이프를 동결시켰다. 본 실험에서 액체탄산 은 다루기 위험하기 때문에 냉장냉동기기를 사용하여 파이프를 동결시켰다. 냉장 기기의 최저온도는 -25℃로 파이프가 겨울철 한파에 노출된 상황을 구현할 수 있 다. 또한 압력 변화에 의한 동파를 감지하기 위해 압력센서를 사용하였지만 설치 하기 어렵고 센서튜브 안에 액체가 침투하여 동결될 수 있어 사용하기에 조심스 럽다. 따라서 파이프 표면에 알루미늄 피막 전선을 부착해 저항의 변화에 의한 수도관의 동파를 전기신호로 감지하고 온도 변화를 적외선 온도계로 측정하는 실험 장치의 모식도를 Fig. 3-1에 나타내었다. 엔드 플러그(End plug)를 사용해 누수를 막고 수돗물의 동결이 진행되는 동안 파이프 양쪽 끝에 걸리는 압력을 견딜 수 있도록 사용하였다. 실험 장치의 지지틀은 동결이 진행되는 동안 압력 증가에 의해 엔드 플러그가 밀려나지 않도록 고정하는 역할을 한다. 실험을 위해 제작한 지지틀은 Fig. 3-2에 나타내었고 기계적 성질과 규격은 Table 3-1에 나타 내었다. Fig. 3-3은 적외선 복사에너지가 온도에 따라 달라지는 원리를 이용한 적 외선 온도계, Fig. 3-4은 알루미늄 피막 전선의 저항의 변화를 측정하기 위한 디 지털 멀티미터이고 빙점 이하의 온도를 유지시켜주는 냉동기기는 Fig. 3-5에 나 타내었다. 각 장치의 사양은 Table 3-2, 3-3, 3-4에 정리하였다. 본 실험을 통해 전기신호에 의해 수도관의 동파를 감지하고 파이프의 직경, 두께와 재질 차이에 따라 내한성 및 동파되는 온도특성을 고찰하고자 한다.





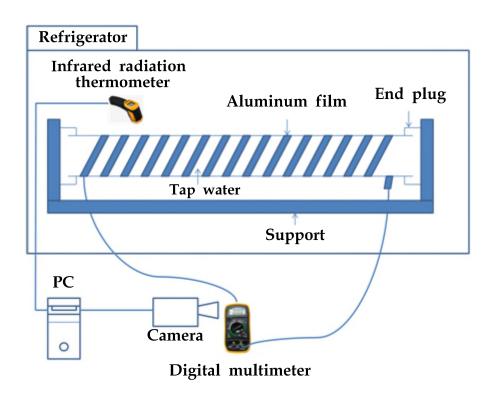


Fig. 3-1 Schematic diagram of the freezing and burst testing





Fig. 3-2 Support fixture

Table 3-1 Mechanical properties of metal and size

Material	SM45C		
$Y.S.(Kg_f/mm^2)$	50.0		
$\mathrm{T.S.}(Kg_f/mm^2)$	70.0		
EL (%)	17		
Width \times Height \times Length(cm)	15 × 15 × 75		







Fig. 3-3 Infrared radiation thermometer

Table 3-2 Infrared radiation thermometer specification

IR thermometer	Specification		
Measuring range	- 32℃ ~ 320℃		
Response time	500ms		
Accuracy	± 1% or ± 1℃		
Usage power	3V		







Fig. 3-4 Digital multimeter

Table 3-3 Digital multimeter specification

Digital multimeter	Specification		
Range(Ω)	0 ~ 2M Ω		
$Resolution(\Omega)$	0.1 ~ 1KΩ		
Accuracy	± (0.8% + 3) ~ ± (1.0% + 3)		
Rated voltage	3.2V		







Fig. 3-5 Refrigerator

Table 3-4 Refrigerator specification

Refrigerator	Specification		
Rated voltage	AC220V, 60HZ		
Power consumption	200W		
Refrigerant	R 12, 220g		
Capacity	240L		



제 2 절 동파 실험 방법

파이프의 길이는 M. AKYURT^[16]의 실험에서 정한 60mm로 정하였다. 수도용 배관에 대표적으로 사용되고 있는 동파이프 및 PVC 파이프를 본 실험에 사용하였다. 파이프에 수돗물을 채우고 표면에 폭 10mm 알루미늄 피막을 원주방향으로 접착제를 이용해 부착하였다. 파이프 내의 액체 상태의 수돗물이 고체 상태의 얼음으로 변하면서 늘어나는 부피에 비례해 파이프 내의 압력 증가로 동파가 일어나기까지 파이프 표면온도 및 시간에 따라 알루미늄 피막의 저항을 측정하였다. 외경이 42mm이고 두께가 1.8mm 규격의 VG2-35 파이프의 온도측정은 30분 간격으로 하고 그 이외의 모든 파이프에 대해 1시간 간격으로 적외선 온도계로 측정하여 PC에 저장하였다. 모든 실험의 온도 환경은 냉장냉동기기의 설정 최저온도 -25℃에서 진행하였다.

본 논문에서 구성한 동파 실험 방법에 의해 파이프의 외경, 두께 및 재질에 따라 파이프의 내한성을 평가하기 위해서 실험 조건은 첫 번째로 파이프 외경 크기에 따른 온도 특성을 측정하기 위해 VG2 얇은 관에서 두께가 같고 외경이 다른 파이프를 사용하였고 파이프의 규격은 Table 3-5에 정리하였다. 두 번째로 파이프 두께 차이에 따른 온도 특성을 측정하기 위해 두께가 서로 다른 VG1 두꺼운 관과 VG2 얇은 관에서 외경이 같은 파이프를 사용하였고 파이프의 규격은 Table 3-6에 정리하였다. 마지막으로 재질에 따른 온도 특성을 측정하기 위해 M-32 파이프와 VG2-35 파이프를 사용하였다. 외경과 두께가 같은 구리 파이프와 PVC 파이프가 제작되지 않아 사이즈가 다른 파이프를 사용하였고 파이프의 규격은 Table 3-7에 정리하였다.





Table 3-5 PVC Pipe of different diameters

Туре	Diameter(mm)	Thickness(mm)	Material
VG2-35	42	1.8	
VG2-40	48	1.8	PVC
VG2-50	60	1.8	

Table 3-6 PVC pipe of different thickness

Туре	Diameter(mm)	Thickness(mm)	Material	
VG1-40	48	3.6	DVC	
VG2-40	48	1.8	PVC	

Table 3-7 Pipe of different material

Туре	Diameter(mm)	Thickness(mm)	Material	
M-32	34.92	1.07	copper	
VG2-35	42	1.8	PVC	



본 실험에서 외경이 48mm이고 두께가 1.8mm 규격의 VG2-40 파이프 표면의 온도와 알루미늄 피막의 저항 변화를 시간에 따라 Fig. 3-6과 같이 나타내었다. -25℃를 유지하고 있는 냉장냉동기기 안의 환경에 노출된 파이프는 1시간 만에 급격히 영하의 온도로 떨어지고 파이프 내의 물이 얼음으로 성장하는 동안의 온 도 변화를 보여준다.

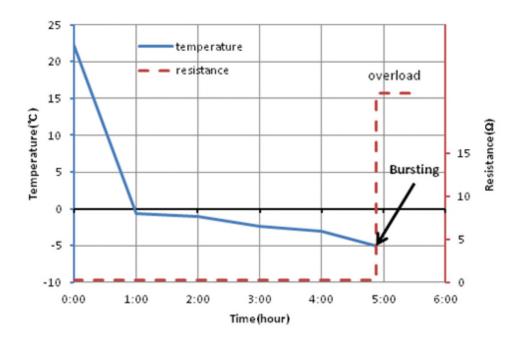


Fig. 3-6 Variation of temperature and resistance according to time at VG2-40

동파 순간의 저항은 멀티미터로 측정하였으며 짧은 순간의 저항 변화를 측정하기 위해 멀티미터 화면의 수치를 카메라로 녹화하였다. 실험에 사용한 카메라는 1초당 30프레임(Frame per second)의 이미지를 영상으로 녹화한다. 녹화된 영상을 PC로 저장해 프레임에 기록된 저항 크기를 Table 3-8와 같이 기록하였다. 동파가 발생한 1초간의 저항변화는 4frame 이전까지 파이프에 아무 변화가 없기때문에 알루미늄 피막의 저항은 0.4Ω 을 유지하고 있다. 파이프 파단면에 따라 전





선이 단선되어 4frame에서 100.4Ω로 변한 저항이 7frame부터 저항을 측정할 수없는 값인 overload로 나타났다. 시간으로 환산하면 1프레임이 1/30초이기 때문에 알루미늄 피막 전선의 저항 변화를 시간에 따라 Fig. 3-7에 나타내었다.

Table 3-8 Resistance change per image frame

Frame	1	2	3	4	5	6	7	•••	30
0	0.4	0.4	0.4	100.4 100	100.4	100.4 over		over	
22	0.4	0.4	0.4	100.4	100.4	100.4	load		load

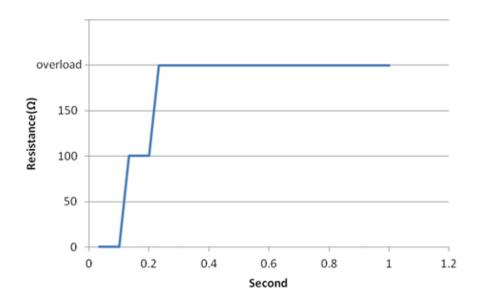


Fig. 3-7 Resistance variation of the bursting moment





제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 외경에 따른 온도 특성

실험에 사용된 파이프는 길이가 60mm, 두께가 1.8mm인 일반용 경질 폴리염 화비닐관을 사용하고 외경을 42mm, 48mm, 60mm로 제작하여 실험하였다. Table 4-1과 같이 각 파이프의 온도변화를 적외선 온도계로 측정하였다. Fig. 4-1 은 파이프 외경크기에 따라 동결에 의해 파단 된 형상이다. (a)는 VG2-35 파이프 의 파단 형상으로 원주응력에 수직인 방향으로 파단이 진행되었음을 알 수 있다. 또한 (b)와 (c)에서 VG2-40과 VG2-50 파이프의 파단이 원주응력에 영향을 받아 여러 방향으로 진행된다고 사료된다. (c)는 Gilpin R.R.[30]가 밝힌 파이프 중앙 위 쪽에 얼음결정의 성장을 볼 수 있고 응력의 집중이 일어난다고 생각된다. 파단까 지의 온도변화를 Fig. 4-2에 나타내었다. 영하 -25℃의 냉장고 안에서 VG2-35 파 이프의 표면 온도는 1시간 동안 22.3℃에서 -0.9℃까지 급격히 떨어진 후 59분 지 나서 -1.4℃에서 동파되어 총 1시간 59분이 걸렸다. VG2-40 파이프는 1시간 동안 22.4℃에서 -0.7℃까지 급격히 떨어진 후 3시간 53분 동안 온도가 완만하게 떨어 져 -5℃에서 동파되어 총 4시간 53분이 걸렸다. VG2-50 파이프는 2시간 동안 21.6℃에서 -0.7℃까지 급격히 떨어진 후 7시간 44분 동안 온도가 완만하게 떨어 져 -6.4℃에서 동파되어 총 9시간 44분이 걸렸다. 이와 같이 외경에 따라 동파되 는 시간과 온도를 비교해 본 결과 외경이 커질수록 동파되기까지 견디는 시간이 길어지고 낮은 온도 환경에서 견딜 수 있다.



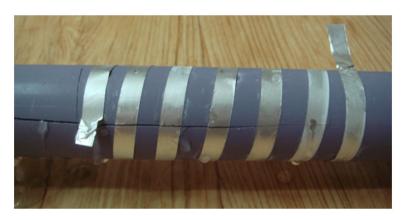


Table 4-1 Measurement temperature according to time during the pipe bursting at dia. = 42mm, dia. = 48mm and dia. = 60mm

Diameter Material	42mm(VG2-35)		48mm(VG2-40)		60mm(VG2-50)	
PVC	Time	Temp.	Time	Temp.	Time	Temp.
	0:00	22.3	0:00	22.4	0:00	21.6
	0:30	8.4	1:00	-0.7	1:00	6.5
	1:00	-0.9	2:00	-1.1	2:00	-0.7
	1:30	-0.9	3:00	-2.4	3:00	-1.8
			4:00	-3	4:00	-2.1
					5:00	-2.6
					6:00	-4.3
					7:00	-5.2
					8:00	-5.7
					9:00	-6.1
Bursting instant	1:59	-1.4	4:53	-5	9:44	-6.4







(a) dia. = 42mm



(b) dia. = 48mm



(c) dia. = 60mm

Fig. 4-1 Fracture shapes of PVC for (a) dia. = 42mm, (b) dia. = 48mm, (c) dia. = 60mm





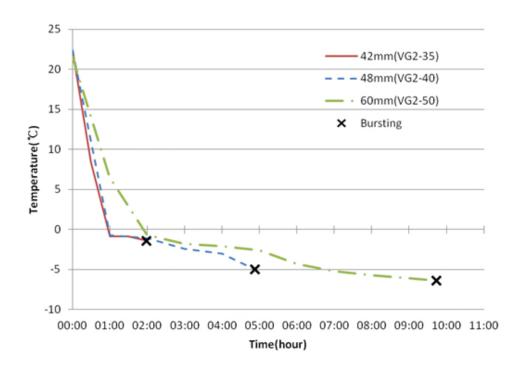


Fig. 4-2 Temperature variation of time according to the pipe diameter for t = 1.8mm





제 2 절 두께에 따른 온도 특성

외경이 같고 두께가 다른 파이프를 사용하였고 Fig. 4-3에 나타내었다. 사진에 왼쪽은 외경 48mm, 두께 1.8mm 규격의 VG2-40 파이프이고 오른쪽은 외경 48mm, 두께 3.6mm 규격의 VG1-40 파이프이다. Fig. 4-4와 같이 외경 48mm, 두께 3.6mm 규격의 VG1-40 파이프는 동파되지 않고 배가 부르는 벌장(Bulging)현상이 나타났다. 파이프 중앙 위쪽이 부분적으로 확장되는 것으로 보아 응력이 집중되었음을 알 수 있다. Table 4-2에 VG1-40과 VG2-40 파이프 동파실험에서 온도변화를 기록하였다. VG1-40 파이프의 표면온도를 측정하기 시작해 2시간 후에 23.3℃에서 -6.7℃까지 급격히 떨어진 후 온도가 완만하게 떨어져 6시간 후에 -8.1℃가 되었다. 다시 급격히 온도가 떨어져 11시간 후에 -24.2℃가 되어 -25℃까지 완만하게 도달하였다. 실험에 걸린 시간은 총 16시간이고 동파되지 않았다. VG1-40과 VG2-40 파이프 동파시험에서 기록한 파이프 표면온도의 변화를 Fig. 4-5에 비교하여 나타내었다. 같은 조건에서 두께 1.8mm 규격의 VG2-40 파이프의 표면 온도는 4시 53분 후에 영하 5℃가 되었다.

두께 1.8mm 규격의 VG2-40 파이프는 체적팽창에 의한 압력을 견디지 못하고 동파되어 수도관 파손 및 누수가 발생하였다. 하지만 두께 3.6mm 규격의 VG1-40 파이프는 빙점하에서 16시간 동안 최저온도 -25℃까지 동파되지 않는 것으로 보아 겨울철 동파 가능 환경에 견딜 수 있을 것이다. 동파방지를 위한 보온 재와 열선을 설치하지 않아도 두께를 고려해 파이프의 내한성을 높여 파손에 의한 누수현상을 막을 수 있으며 해빙 후에도 물을 공급하는 기능에 문제가 없을 것이다. 실험을 통해 두께가 두꺼울수록 영하의 온도에 잘 견뎌 동파를 방지할수 있음을 확인하였다.





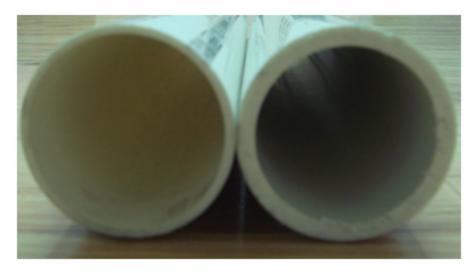


Fig. 4-3 Two types of PVC pipe at thickness t = 1.8mm and t = 3.6mm



Fig. 4-4 Bulging of PVC pipe at thickness t = 3.6mm



Table 4-2 Measurement temperature according to time during the pipe bursting at t=1.8 mm and t=3.6 mm

Thickness Material	1.8mm(VG2-40)		3.6mm(VG1-40)	
PVC	Time	Temp.	Time	Temp.
	0:00	22.4	0:00	23.3
	1:00	-0.7	1:00	-2
	2:00	-1.1	2:00	-6.7
	3:00	-2.4	3:00	-7.2
	4:00	-3	4:00	-7
			5:00	<i>-7</i> .5
			6:00	-8.1
			7:00	-14.4
			8:00	-16.8
			9:00	-21.4
			10:00	-22.1
			11:00	-24.2
			12:00	-24.4
			13:00	-24.3
			14:00	-24.5
			15:00	-24.7
			16:00	-25
Bursting instant	4:53	-5		





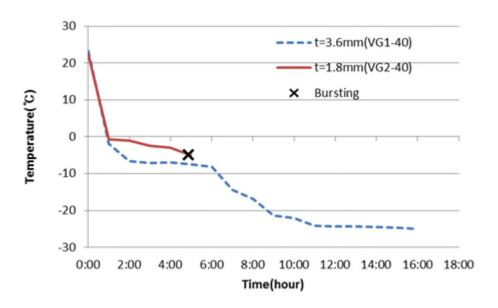


Fig. 4-5 Temperature variation of time according to the pipe thickness for dia. = 48mm





제 3 절 재질에 따른 온도 특성

재질에 따른 동파 실험에서 직경 34.92mm, 두께 1.07mm 규격의 M-32 파이프 를 사용하고 재질은 구리이다. - 25℃에서 M-32 파이프가 동결되어 파손되는 온 도변화를 Table 4-3에 기록하였다. Fig. 4-6은 외경 34.92mm, 두께 1.07mm 규격 의 M-32 파이프가 동파된 형상이다. VG2-35 파이프는 파이프 중앙에 압력을 받 아 동파되었지만 M-32 파이프는 엔드 플러그 근처에서 동파되었다. VG2-35 파이 프와 마찬가지로 원통에 발생하는 응력 중에 가장 큰 원주응력에 수직한 방향으 로 파단을 이루고 있음을 볼 수 있다. 구리 파이프와 알루미늄 피막 전선 사이의 접착체가 절연체 역할을 하여 전기적 접촉이 일어나지 않는다. 따라서 파단부의 알루미늄 피막 전선이 단선됨에 따라 저항이 0.4Ω에서 overload로 변하기 때문 에 도체 재질의 파이프 또한 전기 신호에 의해 동파를 감지할 수 있다. VG2-35 파이프에 설치한 엔드 플러그는 변화가 없었지만 M-32 파이프의 파단 부위에 가 까운 엔드 플러그가 부풀어 올랐다. 구리파이프에 설치된 엔드 플러그가 증가된 압력을 견디기에 충분하지 않기 때문에 취약한 부분에 압력이 전달되어 엔드 플 러그 부근에서 M-32 파이프가 동파되었다고 판단된다. M-32 파이프의 표면 온도 변화를 VG2-35 파이프의 표면 온도와 비교하여 Fig. 4-7에 나타내었다. 파단까지 의 파이프 표면온도 변화는 기온 -25℃에서 1시간 동안 21.8℃에서 0.5℃까지 급 격히 떨어진 후 3시간 3분 동안 온도가 점진적으로 떨어져서 -4.3℃에서 동파되 어 총 4시간 3분이 걸렸다. 1절과 2절에서 재질이 같은 경우 외경이 크고 두께가 두꺼울수록 더 낮은 온도에서 긴 시간을 견뎌 동파를 방지할 수 있다. M-32 파 이프는 VG2-35 파이프와 비교해 직경이 작고 두께가 얇지만 한랭 기후에 견디는 시간이 길고 더 낮은 온도에서 동파되었다. 따라서 구리가 경질 폴리염화비닐에 비해 내한성 및 내후성이 뛰어난 재질임을 알 수 있다.





Table 4-3 Measurement temperature according to time during the pipe bursting for PVC and copper

Туре	PVC		copper	
	VG2-35		M-32	
	Time	Temp.	Time	Temp.
	0:00	22.3	0:00	21.8
	0:30	8.4	1:00	0.5
	1:00	-0.9	2:00	-1.8
	1:30	-0.9	3:00	-2.6
			4:00	-4.3
Bursting instant	1:59	-1.4	4:03	-4.3



Fig. 4-6 Fracture shape of copper pipe for dia. = 34.92mm, t = 1.07mm



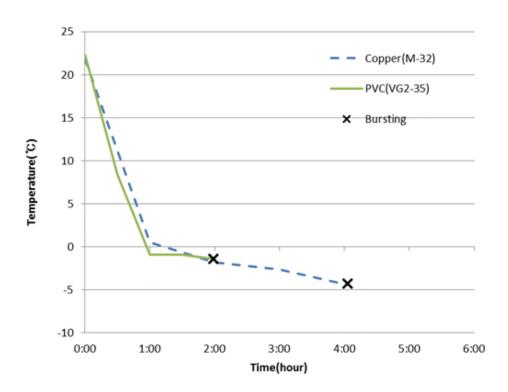


Fig. 4-7 Temperature variation of time according to the pipe material





제 5 장 결 론

본 논문은 파이프 표면에 알루미늄 피막 전선을 부착해 저항의 변화에 의한 수도관의 동파를 전기신호로 감지하고 파이프의 직경, 두께와 재질 차이에 따라 온도 변화를 적외선 온도계로 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 영하 25℃에서 외경 42mm 파이프는 1시간 59분 후에 동파되었고 파이프의 표면온도는 영하 1.4℃이다. 외경 48mm 파이프는 4시간 53분 후에 동파되었고 파이프의 표면온도는 영하 5℃이다. 외경 60mm 파이프는 9시간 44분 후에 동파되었고 파이프의 표면온도는 영하 6.4℃이다. 파이프의 두께가 같은 조건에서 외경의 크기가 증가할수록 더 낮은 온도에서 오랜 시간 견딜 수 있어 내한성이 향상된다.
- (2) 두께 1.8mm PVC파이프는 압력을 견디지 못하고 동파되었다. 하지만 두께 3.6mm PVC파이프는 영하 25도에서 16시간 후에도 동파되지 않았다. 파이프의 외경이 같은 조건에서 두께가 두꺼울수록 더 낮은 온도에서 오랜 시간 견딜 수 있어 내한성이 향상된다.
- (3) 앞에서 외경이 크고 두께가 두꺼울수록 내한성이 향상되었다. 재질에 따른 온도특성에서 구리파이프가 PVC파이프에 비해 직경이 작고 두께가 얇지만 더 낮은 온도에서 오랜 시간을 견뎌냈다. 따라서 구리가 PVC에 비해 내한성이 뛰어난 재질임을 알 수 있다.





참고문헌

- 1. 기상청, "2011 이상기후 보고서", 2011.
- 2. 기상청, "2013 이상기후 보고서", 2013.
- 3. Anon. "Frozen and broken water pipes", www.insurancecompany.com, 2000.
- 4. Insurance institute for business & home safety, "freezing and bursting pipes"
- 5. http://imnews.imbc.com/replay/2016/nwdesk/article/3870363_19842.html
- 6. https://disastersafety.org/ibhs/water-damage-studies/
- 7. http://www.profengineering.com/node/2403
- 8. Lozowski, E. P., S. J. Jones, B. Hill, "Laboratory measurements of growth in thin ice and flooded ice", Cold Regions Science and Technology, Vol. 20, Issue 1, pp. 25-37, 1991.
- 9. Ohsaka, K., E.H. Trinh, "Apparatus for measuring the growth velocity of dendritic ice in undercooled water", Journal of Crystal Growth 194, pp. 138-142, 1998
- 10. Saito, A., S. Okawa, A. Tojiki, H. Une, K. Tanogashira, "Fundamental research on external factors affecting the freezing of supercooled water", Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 35, Issue 10, pp. 2527-2536, 1992
- 11. Messelier-Gouze, Clarisse Brezillon, Christian Tubiana, Andre Rousseau, Gilles, "Justification of the use of liquid nitrogen to make ice-plugs in carbon-manganese steel pipes for maintenance purposes in nuclear power plants", ASME Pressure Vessels Piping Div Publ PVP, Vol. 443, No. 2, pp. 45-50, 2002.
- 12. A Lannoy, B Flaix, "Experimental analysis of the obturation of pipes by ice plugs", Nuclear Engineering and Design Vol. 86, Issue 3, pp. 305-313, 1985.
- 13. Syngellakis, S. Keary, A. Bowen, R.J., "On the prediction of stresses in





- pipes caused by ice plug formation", Proc Inst Mech Eng Part E J Process Mech Eng, Vol. 210, No. E3, pp. 151-158, 1996.
- Keary, A C, S Syngellakis, R J Bowen, "Experimental and analytical study of thermal stresses during pipe freezing", Proc Instn Mech Engrs Vol. 215 Part E, pp. 63-77, 2001.
- Lin, S. Gao, D.Y. Yu, X.C., "Thermal stresses induced by water solidification in a cylindrical tube", J Heat Transfer Trans ASME Vol. 112, No. 4, pp. 1079-1082, 1990.
- 16. M. AKYURT, A.N.A. ALJAWI and S. ALDOUSARI, "Ice-Based Technique for Burst Testing of Tubular Elements", JKAU: Eng. Sci., Vol. 16, No. 1, pp. 103-130.
- 17. http://www1.lsbu.ac.uk/water/density_anomalies.html#c
- 18. http://www.gi.alaska.edu/ScienceForum/ASF3/330/html.
- 19. Lide, D. R., ed., "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 86th ed., Boca Raton, CRC Press, 2005.
- 20. Sreepat, Jain, "Fundamentals of Physical Geology", New Delhi India, Private, 2014.
- 21. Guillermo Petzold, José M. Aguilera, "Ice Morphology: Fundamentals and Technological Applications in Foods", Food Biophysics, Vol 4, Issue 4, pp. 378-396, 2009.
- 22. Fletcher NH., "The chemical physics of ice", Cambridge University Press, Cambridge, 1970.
- 23. Hobbs PV, "Ice Physics", Clarendon Press, Oxford, 1974.
- 24. 박미용, "물속으로 얼음이 가라앉네?", 과학동아, 제 296호, pp. 138~143, 2010.
- 25. Zhang, S.J., Lai, Y.M., Zhang, X.F., et al., "Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze thaw cycle condition", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, No 3, pp. 295-302, 2004.
- 26. M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah, "Freezing phenomena in ice water





- systems", Energ Convers Manage 43, pp. 1773-1789, 2002.
- 27. 이종원, 김문생, 조효남, "재료역학", 인터비전, pp. 548-551, 2006.
- 28. 홍장표, "기계설계", 교보문고, pp. 362-363, 2013.
- 29. https://www.fose1.plymouth.ac.uk/fatiguefracture/tutorials/FractureMechanics/Fatigue/Solutions/Solution1.htm
- 30. Gilpin R.R., "The effects of dendritic ice formation in water pipes", Int J Heat Mass Transfer, Vol. 20, Issue 6, pp. 693-699, 1977.

