

기후변화에 따른 에너지 저장시설 극한 한파 위험성 평가에 관한 연구

A Study on Risk Assessment of extreme Cold Waves in Energy Storage Facilities According to Climate Change

김한덕¹ · 함은구^{2*} · 고세영³Han-Duk Kim¹, Eun-Gu Ham^{2*}, Se-Young Ko³¹Ph. D. Candidate, Department of Construction Safety Engineering, Kyonggi University, Suwon, Republic of Korea²Professor, Department of Safety Engineering, Eulji University of Korea, Seongnam, Republic of Korea³Ph. D. Candidate, Department of Construction Safety Engineering, Kyonggi University, Suwon, Republic of Korea

*Corresponding author: Eun-Gu Ham, hameg@eulji.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The biggest concern in cold wave situations is that the fire extinguishing water initially supplied through dry pipes with empty pipes consumes enthalpy and freezes as it rapidly approaches the surface temperature of steel pipes that have been exposed to sub-zero outdoor air for a long time. It has no choice but to be. **Method:** Therefore, the study found that ice crystals were generated during transport, making it difficult to transport fire extinguishing water, and as a result of the review, when the heat load passed through the piping material, the heat loss per unit length from the piping to the surroundings was 0.946. **Results:** When calculating the volume of the main pipe, it was calculated that the fire extinguishing water supplied at a temperature of 15 degrees from the underground pipe would have a volume of 3.33m³ to reach the first branch point. If we calculate the heat required until this volume reaches below zero, we get 316.350 kcal. When the results were reviewed using the related formula, the time required for the fire extinguishing water to completely freeze up to the first branch of the steel pipe was found to be 3,412 seconds. **Conclusion:** Fire-fighting water, which must reach from the main pipe to the branch pipe and nozzle in good condition, must minimize heat loss through the pipe surface along the transfer path. To achieve this, it is necessary to supplement insulation of the main pipe and branch pipes. In this study, the use of inorganic perlite material or flame-retardant rubber foam insulation was proposed through analysis of insulation properties.

Keywords: Energy Storage Facilities, Cold Wave Risk Assessment, Enthalpy, Fire Fighting Water, Freezing, Heat Loss

요약

연구목적: 한파 상황에서 가장 우려되는 것은 배관 내부가 빈 상태인 건식 배관을 통해 초기에 공급되는 소화용수가 엔탈피를 소모하게 되고 영하의 외기에 장시간 노출되어 있던 강관의 표면온도에 급속하게 가까워지면서 결빙될 수밖에 없다. **연구방법:** 따라서 연구는 이송 중에 얼음결정이 발생하고 그에 따라 소화용수의 이송이 어렵게 되고 검토 결과 배관재 통과 열부하 경우 배관에서 주위로의 단위 길이 당 열손실은 0.946 kcal/m 나타났다. **연구 결과:** 주 배관의 용적을 구하면 지중 배관에서 영상 15도로 공급되는 소화용수가 첫 분기 지점까지 도달하는데 3.33m³ 체적을 가지는 것으로 산정되었다. 이 체적이 영하에 도달할 때까지 필요한 전열을 구하면 316.350 kcal 이 된다. 해당 결과를 관련 공식으로 연계 검토하면 강관의 첫 분기 지점까지의 소화용수가 완전히 결빙하는데 소요되는 시간은 3,412초로 나타났다. **결론:** 주 배관에서 분기 배관 및 노즐까지 영상의 상태로 도달하여야 하는 소화용수는 이송 경로상에서 배관표면을 통한 열손실을 최소화하여야 한다. 이를 위해서 주 배관 및 분기 배관까지 단열을 보완할 필요가 있다. 본 연구에서는 단열특성 분석을 통한 무기질의 퍼라이트(Perlite)재질 또는 난연성의 고무발포 보온재를 사용을 제안하였다.

핵심용어: 에너지저장시설, 한파 위험성평가, 엔탈피, 소화용수, 동결, 열손실

Received | 15 July, 2024

Revised | 24 September, 2024

Accepted | 24 September, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

한파는 겨울철에 북극의 한랭기단이 위도가 낮은 지방으로 내습하여 발생하는 갑작스런 기온강하 및 그에 따른 현상을 말한다. 우리나라의 기상청은 겨울철에 한파 발생으로 초래될 수 있는 인적 및 물적 피해를 감소시키기 위해 한파를 한파주의보와 한파경보의 두 단계로 나누어 알리는 한파특보 제도를 운영하고 있다. 2010년 이전까지는 전일 아침 최저기온보다 10도가 낮아지면 한파주의보, 15도가 낮아지면 한파경보를 발표하였다. 그러나 이와 같은 기준은 초겨울이나 초봄에 찬 대륙고기압이 확장하여 기온이 급격하게 떨어질 때 인체의 건강 및 농·수산 피해 예방에는 유용하였지만, 추위가 며칠간 지속될 경우에는 특보 발표기준에 해당되지 않는 경우가 있어 피해예방 차원에서 특보의 효력이 미흡하였다. 이에 2010년부터 기상청은 한파특보 기준을 변경하여 아침 최저기온이 영하 12도 이하가 2일 이상 지속될 것이 예상될 때 한파주의보, 아침 최저기온이 영하 15도 이하가 2일 이상 지속될 것이 예상될 때 한파경보를 발표하도록 하여 겨울철에 발생하는 지속적인 추위에 대비할 수 있도록 개선되었다. 또한 기존의 한파특보 발효 기준값 용어 중 표준편차를 평년값으로 변경하였으며, 급격한 저온 현상으로 중대한 피해가 예상될 때 한파특보를 발표하여 재해예방에 적극 대응할 수 있도록 발표 기준을 추가하였다. 개선된 한파특보 발표기준인 영하 12도는 최근 10년 동안 우리나라에서 일 최저기온 중 낮은 쪽에서 5%에 해당하는 기온으로, 영하 12도가 일정기간 지속되면 동파가 급증하는 것으로 분석되었다.

한파는 수십일 또는 수 십년 주기로 강약이 반복되는 북극의 제트기류가 약해진 때 북극의 한랭 기단이 약해진 제트기류를 뚫고 남하하여 해상에 적운열의 형상을 띠며 한반도를 감싸는 형태로 나타난다. 그러므로 한파는 북부지역일수록, 또한 해안 지역일수록 더욱 강력하게 피해를 줄 수 있는 형태로 나타났으며 앞으로도 유사한 형태로 반복될 것을 예측할 수 있다.

북극진동

북반구의 중위도 지역을 강타하는 한파의 원인으로 ‘북극진동’이 지목되고 있다. ‘북극진동’이란, 북극에 존재하는 찬 공기의 소용돌이가 수십 일 또는 수십 년 주기로 강약을 되풀이하는 현상으로, 이를 지수화한 것이 ‘북극진동지수’이다. 북극진동지수가 양(+)의 값이면 중위도 지역에 따뜻한 겨울, 음(-)의 값일 경우 추운 겨울이 나타난다. 특히, 북극진동지수(AO: Arctic Oscillation)는 북극해빙 감소가 기상·기후에 영향을 주는 원리. 북극해빙 감소 지역에서 열과 수증기(지표면 열속)를 방출하면 대기 흐름에 따라 성층권에 전달되고, 이에 따라 북극 소용돌이가 약해져 중위도 지역까지 처지면서 북극 한기를 전파해 한파와 폭설이 발생한다. 대륙고기압이 발달하고, 북극진동지수가 음(-)으로 떨어져 제트기류가 약해지면서 찬 공기가 남하한 것이다. 미국, 동유럽 및 동아시아 지역에 극지방의 차가운 공기가 상층기압골을 따라 남하해 한파와 폭설이 발생한다. 북극진동이 음의 값을 보인 원인은 여러 가지가 있겠으나 가장 큰 원인으로서는 ‘북극의 온난화’가 지목되고 있다. 이에 따라 북극지역 기온이 낮아야 제트기류가 강해져 찬 공기가 중위도로 내려오지 않는다.

적운열

2011년 1월 16일 한파 내습으로 철원 영하 24.3도, 문산 영하 23.0도, 서울 영하 17.8도, 춘천 영하 22.5도, 대전 영하 16.1도, 대구 영하 13.1도, 부산 영하 12.8도, 광주 영하 11.7도 등 전국에 걸쳐 기록적인 낮은 기온을 보였다. 일반적으로 겨울철 한파가 내습할 때 Fig. 1위성 영상에서 보듯이 구름 분포를 보면 한기가 남하하면서 해상을 통과할 때 해기차(해수면온도와 850hPa 기온의 차)에 의해 해상에 적운열이 바람 방향을 따라 발생한다.

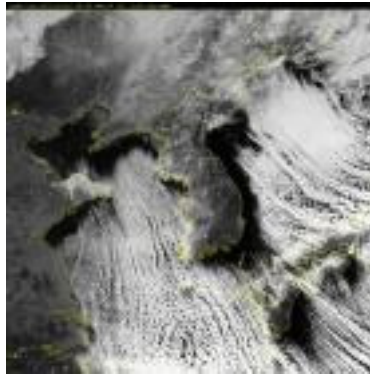


Fig. 1. Cumulus heat generated at sea due to southward movement of cold air

Fig. 1는 강한 한파가 내습한 날에 천리안 위성으로 관측한 한반도 주변 가시 영상으로 중국과 몽골에서 남하하는 한기에 의해 해상에서 쓸어내리는 형상의 적운열을 잘 보여주고 있다.

한반도 한파현상 분석

한반도 한파의 원인

한반도 주변의 서고동저형 기압 배치는 시베리아 고기압의 발달과 이동, 그리고 동중국해에서 형성되어 동아시아 해안을 따라 북동진하면서 발달하는 저기압에 의해 이루어진다(류상범과 권원태, 2002). 서고동저형의 기압 배치로 인한 한반도 부근의 기압 경도의 증가와 한반도 북쪽의 한기역에 의한 강한 한기 이류가 한반도 혹한 발생 기작이다. 류상범(2003)은 한반도의 겨울철 혹한일 발생빈도가 감소하였음에도 불구하고 한파 발생빈도는 전혀 변하지 않았음을 지적하였으며, 이것은 혹한일 발생 기작과 한파 발생 기작이 서로 일치하지 않기 때문임을 밝혔다. Ding and Krishnamurti(1987)는 시베리아 고기압의 영향에 따른 열원의 공간적 구조에 대하여 중국을 중심으로 분석하였다. 겨울 몬순 순환에 의하여 동아시아에 행성 규모의 발산순환이 나타나고, 그에 따른 이류 효과와 단열 효과가 열원에 주로 영향을 주며, 현열과 복사도 열원에 영향을 주어서 냉각에 기여한다. 시베리아 고기압은 겨울 동안 하층 대류권에 열흡수원이 나타나며, 열원(heat source)과 열흡수원(heat sink)이 시베리아 고기압의 수명과 연관이 있다는 것을 밝혔다. 열원의 계산 방법은 다음과 같다(Yanai and Tomita, 1998)

$$Q_1 = C_p \left[\frac{\delta\theta}{\delta t} + V \times \Delta\theta + \omega \frac{\delta\theta}{\delta p} \right] \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (1)$$

C_p	: 정압비열	[	$kcal/kg \cdot ^\circ C$]
θ	: 온위	[	$^\circ C$]
t	: 온도	[	$^\circ C$]
V	: 수평바람	[	m/s]
ω	: 등압좌표에서의 연직 속도	[	m/s]
p	: 기압	[	hPa]
p_0	: 1,000 hPa	[	hPa]
R	: 열저항	[	$m.h. \cdot ^\circ C/kcal$]

위 식에서 Q_1 은 열원을 나타내는데 양의 값을 가지면 열원(Heat source)이라 하고, 음의 값을 가지면 열흡수원(Heat sink)이라 한다.

한파의 현상

2017년~2018년 한파의 경우 강원도 일부 지역은 11월 초부터 평년기온을 계속 밑돌며 혹한의 서막을 알린 것을 기점으로 지역 불문하고 전국적으로 12월 초부터 한파의 절정이 나타났다. 일부 지역에서는 -20°C 에 이르는 낮은 기온을 기록했다. 2017년 12월 15일 기상청은 한강이 공식 결빙되었다고 발표했으며, 1946년 12월 12일 이후로 71년 만에 가장 빠른 결빙이다. 2018년 1월 2일 기상청 홈페이지에 올라온 통계에 따르면 2017년 1월부터 10월까지의 기상학적으로 통계자료에 쓰는 평년치에 비해 높은 수치를 유지했으나 11월부터 -0.8 의 편차가 뜨기 시작하여 12월에는 -1.7°C 로 일부 지역에서는 통계상 최저기온의 극점을 갱신하였다.

Table 1에서는 최근 3년간의 기상특보 발효 현황을 집계하였다. 각 기상특보의 상황들을 서로 정확한 연결식으로 구해질 수는 없겠으나 최근의 발효 현황에서 나타나듯이 대설, 한파 및 폭염특보가 발효된 빈도가 년도 별로 서로 비례하여 늘어나고 줄어든 것을 알 수 있다.

Table 1. Status of effective weather warnings for the past three years

Division	Strong wind	Storm	Torrential rain	Heavy snow	Dryness	Tsunami	Dust storm	Cold wave	Typhoon	Heat wave
2021	235	459	264	143	189	3	16	28	50	101
2022	280	496	358	199	139	2	7	81	34	171
2023	345	552	476	197	176	0	0	87	13	203

에너지 저장시설 한파위험성 평가

시설 개요

LPG 터미널의 주요시설에서 운용중에 가장 위험성이 높은 곳은 탱크로리 출하대로 판단된다. Fig. 2와 같이 탱크로리 출하대(T.L.Bay ; Truck Loading Bay)는 총 14열로서 횡 방향 1열로 설치되어 탱크로리의 접안이 연속적으로 가능한 구조로 되어 있다. 탱크로리와 공급관은 서로 다른 전계 상태에서 접속되므로 정전기가 대전된 상태에서 접지 및 본딩 조치가 이뤄지지 않고 근접한다면 방전하여 점화원이 되는 현상을 초래할 수 있으며 이것만이 아니라 각종 근접, 이동 작업이 이뤄지는 특성 상 점화원작용 및 가연성가스의 누설 위험이 상존하기 때문이다. 이에 따른 대비책으로 T.L.Bay에는 접지, 본딩 및 가스누설감지기 및 Water Spray System이 설치되어 있다.

Water Spray System 분석

(1) Piping System 개요

LPG터미널 T.L.Bay에서의 Water Spray System은 Fig. 3에 나타나듯이 Bay의 서쪽 끝에 있는 지중배관에서 인출된 주배관이 전자식 개폐밸브와 연결송수관의 접결을 거쳐 2 Zone으로 나뉘어져 Tree방식으로 공급되는 형태이다.



Fig. 2. LPG terminal T.L.Bay panorama

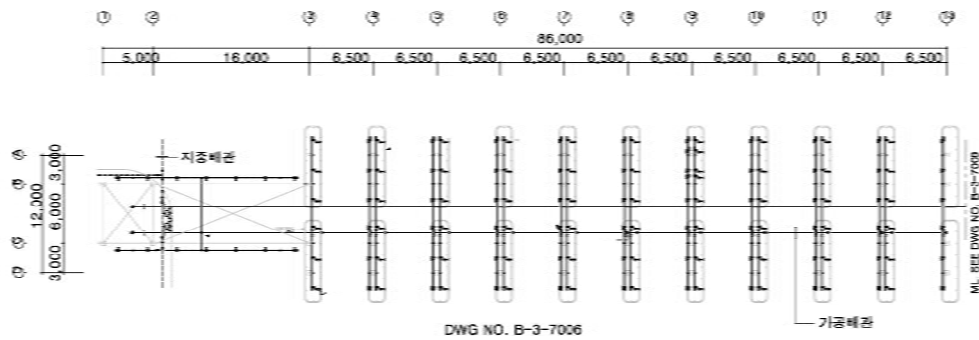


Fig. 3. LPG terminal T.L.Bay's water spray system plan

Fig. 4와 같은 배관방식으로 구성되었을 때 한파 상황에서 가장 우려되는 것은 배관속이 빈 상태인 건식배관을 통해 초기에 공급되는 소화용수가 엔탈피를 소모하게 되고 급기야 영하의 외기에 장시간 노출되어 있던 강관의 표면온도에 급속하게 가까워지면서 이송 중에 얼음결정이 발생하고 그에 따라 소화 용수의 이송이 어려울 수 있으며, 본 연구에서 기존 사례를 분

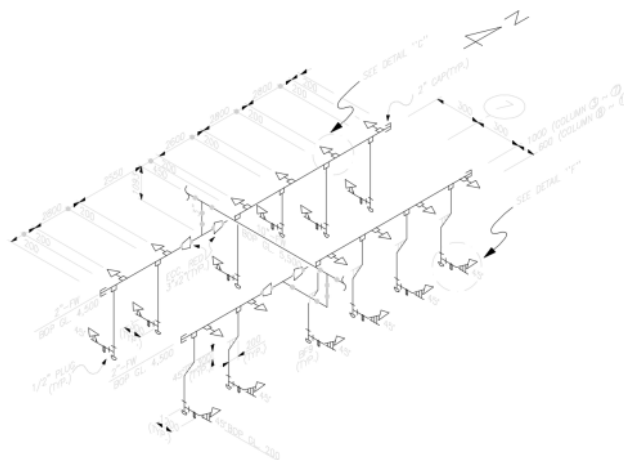


Fig. 4. T.L.Bay's water spray system ISO drawing

석한 결과 노즐의 말단까지 송수압력이 전달된다고 하더라도 얼음 입자의 장애로 인해 원만한 미립화가 이뤄지지 않은 상태로 살수 될 우려가 크다. 지중 배관에서 인출된 배관은 전자식 개폐밸브까지는 단열 및 케이싱으로 보호된 상태이므로 본 연구에서는 전자식 개폐밸브 이후로 나관 상태로 노출된 배관에서의 이송 안전성을 검토해 보았다.

(2) 배관재 통과 열부하

배관에서 주위로의 단위 길이당의 열손실은 다음식으로 구한다.

$$q_p = \frac{t_i - t_o}{R} \tag{2}$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_0\alpha_1} + \frac{1}{\lambda_0} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right) + \frac{1}{(n+1) \cdot \alpha_2} \right\} \tag{3}$$

여기서,

q_p	:	단위길이 당 열손실	[	$kcal/h.m$]
t_i	:	배관 내 온도	[	$^{\circ}C$]
t_o	:	배관 주위 온도	[	$^{\circ}C$]
R	:	배관의 열저항	[	$m.h.^{\circ}C/kcal$]
r_0	:	배관의 내반경	[	m]
r_1	:	배관의 외반경	[	m]
r_n	:	각 보온재의 외경	[	m]
α_1	:	배관 내표면 열전달율	[	$kcal/^{\circ}C.h.m^2$]
α_2	:	배관 외표면 열전달율	[	$kcal/^{\circ}C.h.m^2$]
λ_0	:	원관의 열전도율	[	$kcal/^{\circ}C.h.m$]
λ_1	:	각 보온재의 열전도율	[	$kcal/^{\circ}C.h.m$]

① 열저항을 계산하면서 수계소화설비에서와 같이 내부유체가 물이며 배관재가 강관인 경우에는 $\frac{1}{r_0\alpha_1}$ 항과 $\frac{1}{\lambda_0} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)$ 항은 0으로 할 수 있다.

② 배관은 단열하지 않은 나관상태이므로 $\ln\frac{r_2}{r_1} = \ln 1 = 0$ 이다.

③ 아연도강관의 열전달율은 $7.74 kcal/^{\circ}C.h.m^2$

따라서,

$$\begin{aligned} q_p &= \frac{t_i - t_o}{R} = \frac{15 - (-20)}{[(2\pi)(1+1)\alpha_2]^{-1}} = 35 \times 4\pi \times \alpha_2 \\ &= 140\pi \times 7.74 = 3,404 kcal/h.m \\ &= 3404 / 3600 = 0.946 kcal/s.m \end{aligned} \tag{4}$$

가 된다. 이는 배관이 단위길이 당 열손실이 0.946 kcal/m 에 달하는 것으로서 최대길이가 98m 정도인 8inch (200mm)소화용수 주배관이 첫 번째 Bay에서 분기하기 시작할 때의 수온이 몇 도에 도달할지를 판단할 수 있는 근거가 된다.

주배관의 용적을 구하면,

$$V_{200} = A \times l = \frac{\pi}{4} d^2 \times l = \frac{\pi}{4} (0.208)^2 \times 98 = 3.33 \text{ m}^3 \tag{5}$$

가 된다. 이 값은 지중배관에서 영상 15도로 공급되는 소화용수가 첫 분기 지점까지 도달하는데 3.33 세제곱미터의 체적을 가진다는 것으로 이 체적이 영하에 도달할 때까지 필요한 전열을 구하면,

$$H = h_1 + \Delta t \times h_2 = 80 + (15 \times 1) = 95 \text{ kcal/kg} = 95,000 \text{ kcal/m}^3, \tag{6}$$

$$\therefore 95,000 \times 3.3 = 316,350 \text{ kcal}$$

이 된다.

(3) 연계검토

위 계산식들의 결과를 연계하여 검토하면,

$$316,350 / (0.946 \times 98) = 3,412 \text{ s} \tag{7}$$

이 된다. 이는 강관의 첫 분기지점까지의 소화용수가 완전히 결빙하는데 소요되는 시간이 3,412초로 나타났다.

Water Spray System의 동결방지

(1) 단열보완

주 배관에서 분기배관 및 노즐까지 영상의 상태로 도달하여야 하는 소화용수는 이송 경로상에서 배관표면을 통한 열손실을 최소화하여야 한다. 이를 위해서 주 배관 및 분기배관까지 단열을 보완할 필요가 있다.

Table 2나타나듯이 LNG접안 시설과 같은 설비의 배관에 적용하는 단열재를 결정하는데 가장 중요한 두 가지 요소는 단열성과 화재 안전성이다. 아울러 옥외에 설치하여야 하는 조건을 고려하면 내수성이 확보되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 무기질의 퍼라이트(Perlite)재질 또는 난연성의 고무발포 보온재를 사용을 제안한다.

Table 2. Types of insulation materials for mechanical equipment

Division	Product Name	Highest Temperature	Product Features	
mineral	Glass wool	300	Manufactured into fiber form by melting glass	
	Fiber material (Open Cell)	600	Manufactured into fiber form by melting natural minerals	
	Silica (Silica)		Formed by reacting calcium silicate powder and mixing inorganic fibers	
organic	Perlight (Perlite)	1000	Hollow spherical tissue obtained by crushing and rapidly heating glassy rock	
	Foamed polyurethane	80~110	Foaming resin polymerized with unit bonds of urethane	
	Foam material (Closed Cell)		Expanded polyethylene foam	Foaming chemically cross-linked polyethylene sheets
	Expanded polystyrene			Foaming chemically cross-linked polyethylene sheets
	Rubber foam			Foaming by mixing additives with natural rubber

결론

극한 한파 상황에서 가장 우려되는 것은 배관속이 빈 상태인 건식배관을 통해 초기에 공급되는 소화용수가 엔탈피를 소모하게 되고 급기야 영하의 외기에 장시간 노출되어 있던 강관의 표면온도에 급속하게 가까워지면서 이송 중에 얼음결정이 발생하고 그에 따라 소화 용수의 이송이 어려울 수 있으며, 본 연구에서 기존 사례를 분석한 결과 노즐의 말단까지 송수압력이 전달된다고 하더라도 얼음 입자의 장애로 인해 원만한 미립화가 이뤄지지 않은 상태로 살수 될 우려가 크다. 해당 설비는 지중 배관에서 인출된 배관은 전자식 개폐밸브까지는 단열 및 케이싱으로 보호된 상태이므로 본 연구에서는 전자식 개폐밸브 이후로 나관 상태로 노출된 배관에서의 이송 안전성을 분석하였다. 분석 결과 배관재 통과 열부하 경우 배관에서 주위로의 단위 길이 당 열손실은 0.946 kcal/m 에 달하는 것으로서 나타났으며 이는 최대길이가 98m 정도인 8inch (200mm) 소화용수 주배관이 첫 번째 Bay에서 분기하기 시작할 때의 수온이 몇 도에 도달할지를 판단할 수 있는 근거가 된다.

또한 주배관의 용적을 구하면 지중배관에서 영상 15도로 공급되는 소화용수가 첫 분기 지점까지 도달하는데 3.33 세제곱미터의 체적을 가진다는 것으로 이 체적이 영하에 도달할 때까지 필요한 전열을 구하면 316.350 kcal 이 된다. 해당 결과를 관련 공식으로 연계 검토하면 강관의 첫 분기 지점까지의 소화용수가 완전히 결빙하는데 소요되는 시간이 3,412초로 나타났다. 주 배관에서 분기배관 및 노즐까지 영상의 상태로 도달하여야 하는 소화용수는 이송 경로상에서 배관표면을 통한 열손실을 최소화하여야 한다. 이를 위해서 주 배관 및 분기배관까지 단열을 보완할 필요가 있다. 본 연구에서는 단열특성 분석을 통한 무기질의 퍼라이트(Perlite)재질 또는 난연성의 고무발포 보온재를 사용을 제안하였다.

References

- [1] Ham, E.-G. (2016). Safety Assessment Against Climate Change. Korea Gas Safety Corporation. Seoul, Korea.
- [2] Ham, E.-G. (2017). Reduction of Damage from Flood Damage to Facilities. Disaster Prevention and Safety Specialist

Training Program, Seoul, Korea.

- [3] Ham, E.-G. (2020). "A study on the response plan natural disaster risk by climate change" Proceedings of the 25th The Society of Disaster Information, Seoul, Korea, pp.1102-1125.
- [4] The WAMDI group, Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P.A.E.M., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V.C., Greenwood, J.A., Reistad, M., Zambresky, L. and Ewing, J.A. (1988). "The WAM model - a third generation ocean wave prediction model." Journal of Physical Oceanography, Vol. 18, pp. 1775-1810