

# 동절기 STS 물탱크의 단열재 설계에 따른 물의 동결 특성 분석

이충열<sup>1</sup> · 신현준<sup>2</sup> · 여경윤<sup>3</sup> · 김근표<sup>4</sup> · 김진국<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>석사과정, 서울과학기술대학교, 건설시스템공학과, <sup>2</sup>석사과정, 서울과학기술대학교, 건설시스템공학과,  
<sup>3</sup>수석연구원, 포스코 철강솔루션연구소 구조연구그룹, 공학박사, <sup>4</sup>대표이사, (주)원진, <sup>5</sup>부교수, 서울과학기술대학교, 건설시스템공학과

## Analysis of Water Freezing Characteristics According to Insulation Design of STS Water Tanks in Winter

Lee, Chung-Yeol<sup>1</sup>, Shin, Hyeon-Jun<sup>2</sup>, Yoh, Kyong-Yun<sup>3</sup>, Kim, Geun-Pyo<sup>4</sup>, Kim, Jin-Kook<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student(Master Course), Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

<sup>2</sup>Undergraduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher, Steel Structure Research Group, POSCO, Incheon, 21985, Korea

<sup>4</sup>Chief Executive Officer, WONJIN Co., Boseong, 59443, Korea

<sup>5</sup>Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

**Abstract** - The purpose of this study is to analyze the freezing characteristics of water in STS water tanks for reservoirs exposed to outside temperatures in winter. A large-scale STS water tank was modeled as a 2D symmetric analysis model, and heat transfer analysis was performed for 48 hours using winter outside temperatures to observe temperature trends in water at the tank's outer part of the center and supported part of the bottom by insulation thickness. Through the temperature change rate and phase change time of water, the analysis model confirmed that the bottom is more vulnerable to heat loss of water than the side. Furthermore, parametric study was conducted using the insulation placement at the bottom of the tank as a variable and water freezing characteristics were established based on the heat transfer characteristics change according to insulation placement. An effective insulation design was proposed by comparing freezing time for each insulation placement based on minimum and maximum residence time of water.

**Keywords** - Stainless steel water tank, Water freezing, Phase change, Heat transfer, Insulation

### 1. 서론

스테인리스(STS) 물탱크는 구조의 벽체 패널이 스테인리스 강(STS304)으로 제작되어 강재 등의 재료에 비해 내식성이 뛰어나고<sup>[1]</sup>, 장기간 운용 시 방수 도료가 분리되어 수질 오염의 가능성이 있는 콘크리트 물탱크에 비해 위생성 측면에서 큰 이점을 제공한다<sup>[2],[3]</sup>. 이러한 특성으로 인해 STS 물탱크는 대용량의 배수지용 물탱크에 널리 활용되고 있다.

대용량의 배수지용 물탱크는 배수시설설계기준(KDS 57 65 00)<sup>[4]</sup> 및 Jeong *et al.*<sup>[5]</sup>에 따라 물이 최소 12시간에서 최대 36시간까지 체류하는 것을 목표로 하며, 필요 시 적절한 보온 단열 방식을 적용할 것을 명시하고 있다. 그러나 구체적인 단열 방안에 대한 기준은 명확히 제시되어 있지 않다. 이러한 이유로 STS 물탱크의 구조와 단열 방식은 일반적으로 한국탱크공업협동조합의 단체표준인 SPS-KTIC B 1001-0435<sup>[6]</sup>에 근거하여 설계된다. 높이 5 m, 길이와 폭이 각각 10 m인 배수지용 STS 물탱크의 구조 예시는 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)는 물탱크 전체 형상에 대한 단면도를, Fig. 1(b)는 물탱크 중앙 외측부 및 하단 지지부의 단면도를 나타낸다. 이 기준에 따라 STS 물탱크에는 일반적으로 열전도율이 낮고 단열성능이 우수한 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam) 또는 폴리에틸렌(Polyethylene)과

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 15, 2024; revised November 28, 2024; approved on November 28, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-970-6578 Fax. +82-2-948-0043

E-mail. jinkook.kim@seoultech.ac.kr

같은 품질의 단열재가 50 mm 이상 두께로 설치되며, 단열재 외측에는 단열재 밀착과 외관 보호 및 복사열 차단을 위해 0.6 mm–0.7 mm 두께의 알루미늄 재킷을 부착하고 있다. 물탱크 하단 지지부는 수조를 고정하기 위한 방식으로 콘크리트 기초 슬래브에 ‘c’자 형강 (C-channel) 간 용접된 격자형의 지지구조가 설치되며, STS 물탱크가 높이 4 m를 초과할 경우, 125 × 65 × 6 × 8 규격의 ‘c’자 형강이 사용된다. 그 상단에는 ‘c’자 형강과 STS 패널 간 전위부식 방지용 고무패드와 간격 유지용 STS 강판이 배치되며, 측면에 아연도금 브라켓이 용접되어 단열재 삽입 이후 상단에 STS 패널이 설치된다.

구조물의 열손실은 Fig. 2와 같이 각 부재를 구성하는 재료의 열적 특성에 따른 온도 차로 인해 발생하며, 고온부에서 저온부로 열에너지가 전달되어 외부로 손실되는 열량을 의미한다<sup>[7]</sup>. 열손실은 전도, 대류, 복사의 3가지 방식으로 발생하며, 일반적으로 재료의 열전

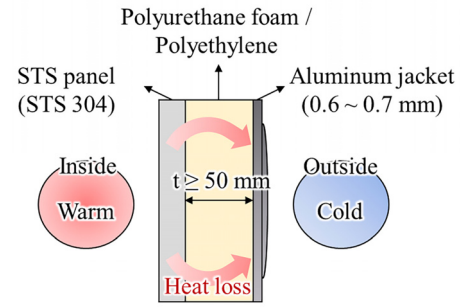


Fig. 2. Schematic of heat loss in STS water tank

도율 및 표면 방사율이 높고 비열이 낮을수록 빠르게 발생한다<sup>[7]</sup>. 특히 사계절 중 외기온도가 급격하게 영하로 감소하는 동절기의 경우, 혹한기 환경에 노출된 STS 물탱크는 하단 지지부의 ‘c’자 형강이 강재로 제작되어 높은 열전도율 및 표면 방사율과 비열이 낮은 특성<sup>[7],[8]</sup>을 가지므로 열손실이 더 빠르게 발생할 수 있다. 열손실 발생으로 물탱크 내 물의 온도가 급격히 감소할 경우, 물의 어는점까지 상변화 시간이 단축되어 동결 가속화의 원인이 될 수 있다. 이로 인해 배수지용 물탱크의 물이 최소 체류시간을 만족하지 못하고 동결되어 부피가 팽창하면 내부 보강재 및 벽체 패널 등에 구조적 손상이 발생하여 누수 피해로 이어질 수 있다<sup>[9],[10]</sup>. 따라서 동절기 외기온도에 노출된 STS 물탱크의 취약부의 물 동결을 지연시키기 위해 단열재 두께 및 배치에 따른 효과적인 단열재 설계가 필요하다.

이 연구에서는 동절기 외기온도에 노출되는 STS 물탱크의 단열재 설계에 따른 물의 동결 특성을 분석하고자 한다. STS 물탱크는 2D 대칭 모델로 구성하였다. 극한의 저온환경에서 열손실 취약부를 검토하기 위해 Nam *et al.*<sup>[11]</sup>의 혹한기 온도와 물의 체류시간을 반영한 48시간 외기온도를 적용하여 단열재 두께에 따른 열전달 해석을 수행하였다. STS 물탱크의 중앙 외측부 및 ‘c’자 형강으로 지지되는 하단부에 대한 물의 온도 변화율 및 상변화 시간을 통해 물의 열전달 특성을 분석하였다. 나아가, 열손실 취약부에 대해 단열재 배치를 변수로 하여 매개변수해석을 수행하고, 단열재 배치에 따른 열전달 특성 변화로 물의 동결 특성을 정립하였다. 이후, 물의 최소·최대 체류시간을 기준으로 동결시간을 비교하여 효과적인 단열재 설계방안을 제안하였다.

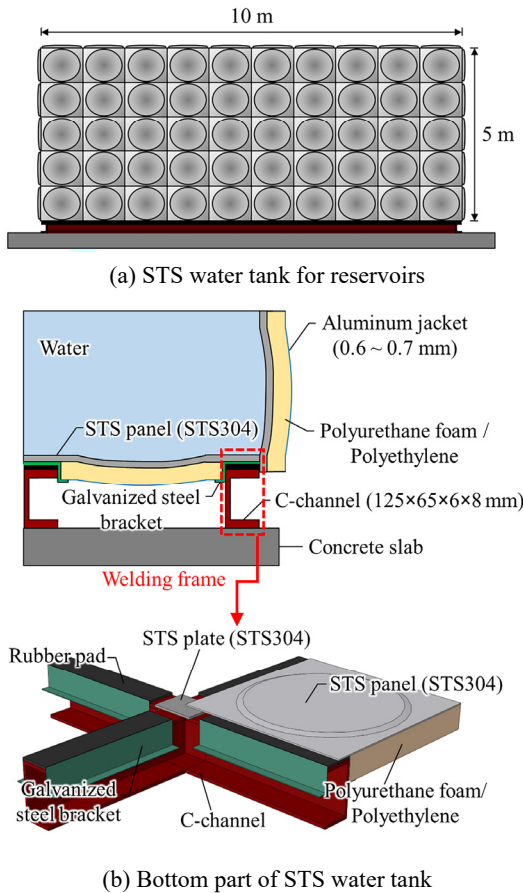


Fig. 1. Schematic of STS water tank structure

## 2. 물탱크 내부 열전달 이론

### 2.1 물탱크 내부 열전달 현상

열전달은 서로 다른 온도를 가지는 물질 사이에서 온도 차이에 의해 전달되는 열 에너지를 의미하며, 전도, 대류, 복사의 3가지 방식으로 전달된다. 그러나 일반적으로 주변 온도와의 차이가 25 °C 미만인 조건과 재료의 표면 방사율이 0.2보다 낮은 조건에서는 복사를 통한 열전달을 무시할 수 있다<sup>[12]</sup>. 이 연구에서는 알루미늄 재킷을 부착한 STS 물탱크의 외측 표면은 알루미늄 재료의 표면 방사율이 약 0.05로 매우 낮기 때문에 복사를 통한 열전달은 고려하지 않는 것으로 가정하였다<sup>[7]</sup>. 전도 열전달은 입자들 간의 상호작용에 의해 높은 에너지가 낮은 에너지로 전달되는 과정을 의미한다. 대류 열전달은 재료의 표면과 맞닿는 면적에서 흐르는 유체와 재료 사이의 열전달을 의미한다. 전도와 대류에 의한 열전달은 다음과 같이 정의할 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$q_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

여기서,  $q_{cond}$  : 전도에 의한 열전달( $W$ ),

$k$  : 재료의 열전도율( $W/m \cdot K$ ),

$A$  : 재료 표면의 단면적( $m^2$ )

$\Delta T$  : 재료 표면의 온도 차이( $K$ ),

$L$  : 재료층의 두께( $m$ ).

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

여기서,  $q_{conv}$  : 대류에 의한 열전달( $W$ ),

$h$  : 대류 열전달계수( $W/m^2 \cdot K$ ),

$A$  : 재료 표면의 단면적( $m^2$ ),

$T_s$  : 재료 표면의 온도( $K$ ),

$T_\infty$  : 유체의 온도( $K$ ).

### 2.2 물의 상변화 과정

액체 상태의 물이 고체 상태의 얼음으로 상변화할 경우, Jingru *et al.*<sup>[14]</sup>에 따라 Fig. 3의 온도 변화 경향을 바탕으로 3가지 주요 구간을 가진다. 각 구간은 온도 감소

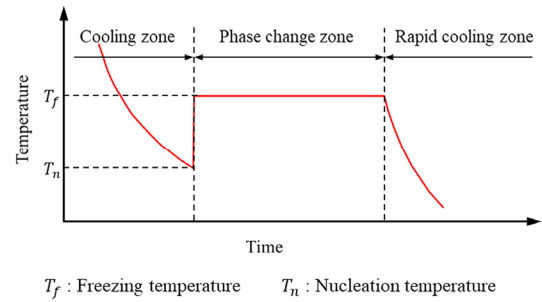
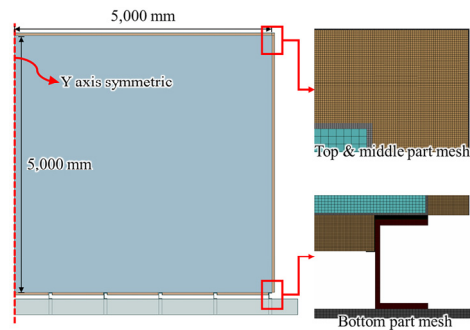
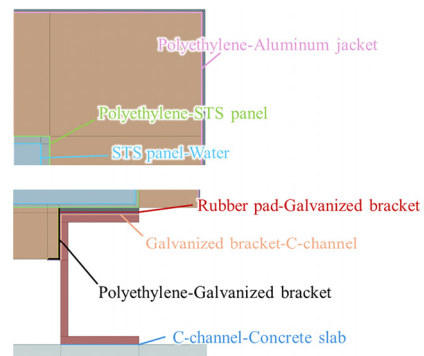


Fig. 3. Time-temperature curve of water freezing (Jingru *et al.*<sup>[14]</sup>)

구간(Cooling zone), 상변화 구간(Phase change zone), 온도 급감 구간(Rapid cooling zone)을 의미한다. 온도 감소 구간은 상변화 전 구간으로, 냉각 속도에 따라 어는 점( $T_f$ ) 이하에 위치한 얼음핵 형성 온도( $T_n$ )까지 과냉각될 수 있다. 잠열은 흡수되거나 방출되는 에너지의 양을 의미하며, 동결과정에서는 용융 시 흡수되는 에너지의 양과 같다<sup>[15]</sup>. 따라서 상변화 구간에서는 물이 액체 상태와 고체 상태가 혼합물 형태로 존재하며, 방출되는 잠열로 인해 온도 변화가 거의 없다. 온도 급감 구



(a) 2D symmetric model for STS water tank



(b) Contact condition of each part

Fig. 4. Modeling of ANSYS fluent analysis

간에서는 물이 완전히 동결되면서 얼음 입자의 온도가 주변 저온 환경의 온도까지 감소한다.

### 3. STS 물탱크의 열전달 해석

#### 3.1 STS 물탱크 열전달 해석 모델링

이 연구에서는 STS 물탱크 내 물의 동결 특성을 분석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS Fluent<sup>[16]</sup>를 사용하여 열전달 해석을 수행하였다. 대규모 배수지용 STS 물탱크를 3D로 모델링할 경우, 장시간의 해석시간이 소요되므로<sup>[17]</sup>, 해석의 효율성을 고려하여 Fig. 4(a)와 같이 Y축을 기준으로 한 2D 대칭 모델로 구성하였다. 각 요소에 대해 콘크리트 기초, ‘ㄷ’자 형강, 단열재, STS 패널, 고무 패드, 아연도금 브라켓 등은 2D Solid 요소로 모델링하였고, 물은 STS 물탱크 내부 열전달과 전체적인 상변화 과정을 모사하기 위해 만수 상태로 가정하고 2D Fluid 요소로 모델링하였다. 각 요소의 접촉조건은 Fig. 4(b)와 같이 Solid-Solid 및 Solid-Fluid 경계에서의 열전달이 이루어지도록 Coupled Wall로 적용하였다<sup>[16]</sup>. Solid 요소에 적용한 재료모델은 Table 1과 같이 ANSYS Fluent 내 기본 재료모델을 적용하였으며, 단열재의 경우, 폴리에틸렌의 열적 특성을 적용하였다. 물은 ANSYS Fluent 내 H<sub>2</sub>O liquid 모델을 적용하였으며, 열적 특성은 Ramesh *et al.*<sup>[17]</sup>에 따라 적용하였다. 물탱크 내 유동은 물의 체류시간 내 유동이 없다고 가정하여 층류(Laminar)를 적용하였다. 물의 상변화 과정

**Table 1.** Thermal properties of materials

Material	Thermal conductivity (W/m·K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg·K)
Aluminum	202.4	2,719	871
Carbon steel	53.34	7,850	439.8
Concrete	2.0712	2,391.7	936.35
Galvanized steel	51.962	7,849.8	481.98
Polyethylene	0.038	34.2	2,300
Polyurethane	0.044	191.6	1,546.6
Rubber pad	0.42426	1,423	1,613.7
STS 304	15.311	7,954.3	473.62

**Table 2.** Information of the 2D symmetric model grid

Mesh type	Number of nodes	Number of elements	Orthogonal quality	
			Min.	Max.
Quad/Tri	2,552,650	2,490,227	0.99759	1

은 Solidification/Melting 모델을 적용하여 모사하였으며, 액체와 고체 사이의 변화 상태 중 고체에 가까운 변화 영역인 흐릿한 영역(Mushy zone)은 그 값이 변화함에 따라 고체-액체 계면의 매끄러움 정도 차이가 크기 때문에 ANSYS Fluent의 기본 값인 10<sup>6</sup>을 적용하였다.

열전달 해석 모델의 Mesh는 Fig. 4(a)와 같이 수치해석의 오류를 최소화하기 위해 모든 요소를 다중 구역으로 분할하여 균일한 Mesh 분할이 가능한 Multizone Method를 적용하였다<sup>[16]</sup>. Table 2는 Mesh에 대한 상세 정보를 나타내며, 2,552,650개 노드, 2,490,227개 요소를 생성하였다. 유체의 흐름을 모사하는 CFD 해석의 경우, Mesh의 품질은 해석의 수렴성 및 필요하다. Mesh의 기하학적 특성을 평가하는 중요한 지표인 직교 품질(Orthogonal quality)은 Mesh의 직교성을 말하며, 최소 0.1 이상의 값이 요구되고, 1에 가까울수록 좋은 Mesh 품질임을 의미한다<sup>[16],[18]</sup>. Mesh의 직교 품질 산출식은 다음과 같다<sup>[16]</sup>.

$$m_{oq} = \left( \frac{\overline{A_i e_i}}{|\overline{A_i e_i}|} \right) \tag{3}$$

여기서,  $m_{oq}$  : Mesh의 직교 품질(Orthogonal quality)

$\overline{A_i}$  : 2차원에서 각 변의 모서리에 수직인 벡터

$\overline{e_i}$  : 도심으로부터 각 변 모서리에 수직인 벡터

STS 물탱크에 대한 2D 대칭 모델의 경우, 최솟값이 0.99759, 최댓값이 1로 매우 우수한 직교 품질로 나타났다.

#### 3.2 열전달 해석 기법 타당성 검증

STS 물탱크 2D 대칭 모델에 대한 열전달 해석을 수행하기 전, 층류 및 Solidification/Melting 모델을 적용하여 물의 온도 변화와 상변화를 모사하는 해석적 방법이 적절한 지 검증하기 위해 Chen and Lee<sup>[19]</sup>가 수행한

동결 실험을 2D 해석 모델로 재현하였다. Chen and Lee<sup>[19]</sup>는 Fig. 5(a)와 같이 외경 82.8 mm, 두께 2.5 mm의 구리관에 물을 가득 채워 영하 20 °C의 일정한 온도에서 5,000초 동안 동결 실험을 수행하였다. Chen and Lee<sup>[19]</sup>의 실험 재현을 위한 구리 및 물의 열적 특성은 ANSYS Fluent 기본 재료모델을 사용하였다. STS 물탱크 해석 모델의 경우, 대규모 용량으로 인해 온도 변화가 크지 않을 것으로 예상되는 물의 중심부가 아닌 STS 패널과 가까운 지점의 온도 변화를 중점으로 확인하기 때문에 Chen and Lee<sup>[19]</sup>의 실험 결과에서 물의 하단부 7 mm지점 데이터와 비교하였다.

Fig. 5(b) 및 Table 3에 나타난 바와 같이 Chen and Lee<sup>[17]</sup>의 하단부 데이터와 해석 모델은 물의 온도가 시간에 따라 유사한 감소 경향으로 나타났다. 또한, 초기 0 °C 도달 시간은 각각 500초, 490초로 약 98 %, 해석 종료 시 온도는 각각 -17.1 °C, -15.8 °C로 약 92.4 %의 높은 정확도를 보이므로 Chen and Lee<sup>[19]</sup>의 동결 실험 결과에 대해 물의 동결과정을 비교적 정확하게 모사하는 것으로 판단된다.

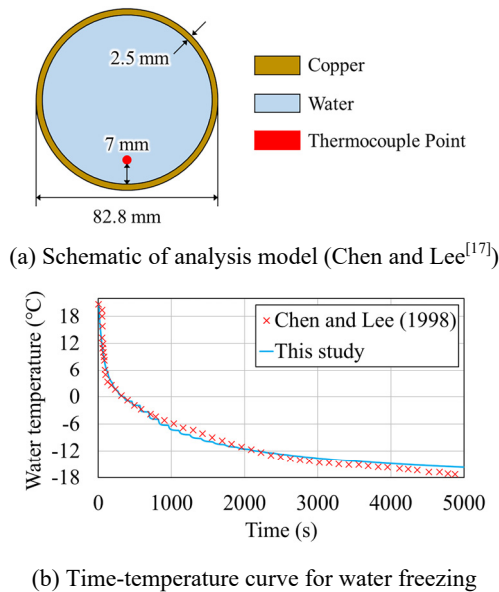


Fig. 5. Verification of analysis model

Table 3. Comparison of accuracy for water freezing data

Data	Chen and Lee <sup>[19]</sup>	This study	Accuracy (%)
Initial freezing time (s)	500	490	98.00
Water temperature (°C)	-17.1	-15.8	92.40

### 3.3 STS 물탱크 해석 모델의 초기온도 및 경계조건

이 연구에서는 물의 동결과정을 모사하기 위한 해석적 방법의 타당성 검증 이후, STS 물탱크 2D 대칭 모델의 열전달 해석 수행을 위한 초기온도 및 경계조건을 적용하였다. 초기온도의 경우, Sohn<sup>[20]</sup>의 지역별 동결기 급수온도를 참고하여 5 °C로 적용하였다. 해석 모델의 경계조건은 Fig. 6와 같이 Nam *et al.*<sup>[11]</sup>에 따라 혹한기 환경을 조성한 챔버의 온도 변화와 배수지용 물탱크 내 물의 체류시간 범위를 고려하여 48시간 동안의 외기 온도를 적용하였다. 경계조건의 최저온도는 -18.5 °C까지 하강하여 극한의 외부환경에 노출된 STS 물탱크에서 열손실이 빠르게 발생하는 지점에 대해 검토하였다. 외기온도 적용 요소는 Fig. 4의 물탱크 해석 모델에서 외부에 노출된 알루미늄 재킷, ‘C’자 형강, 고무패드, 콘크리트 슬래브에 대해 적용하였다. 대류 열전달 계수는 Liu *et al.*<sup>[21]</sup>에 따라 겨울철 대류 열전달 계수값인 10 W/m<sup>2</sup>K를 적용하였다.

## 4. STS 물탱크 내 열전달 특성

### 4.1 STS 물탱크 중앙 외측부의 열전달 특성

배수지용 STS 물탱크는 Fig. 1(a)와 같이 큰 규모로 시공되기 때문에 동결기 물의 중앙부 온도 변화가 크지 않다. 따라서 물의 온도 도출 지점은 먼저, Fig. 7(a)와 같이 STS 패널과 가까운 측면 10 mm로 설정하였다. 단열재 두께에 따른 물의 온도 변화 경향을 확인하고자 STS 물탱크 내부 단열재 두께를 각각 30 mm, 40 mm, 50 mm로 설정하였다. Fig. 7(b) 및 Table 4와 같이 물의 온도가 단열재 두께에 따라 초기 5 °C에서 0 °C에 도달하는 시간은 각각 6시간, 8시간, 11시간으로 나타났다.

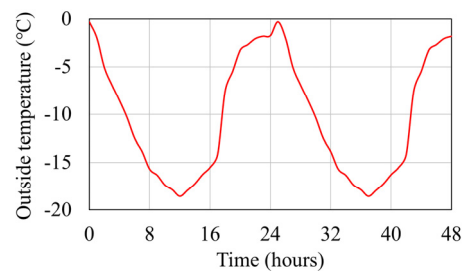
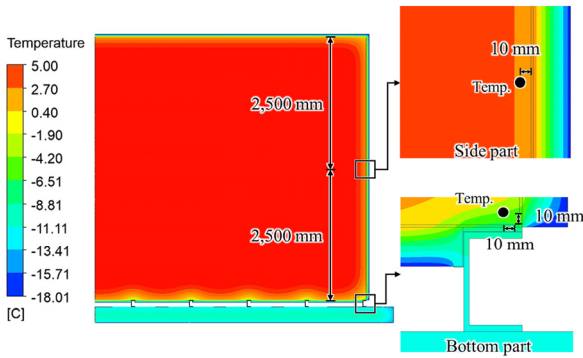
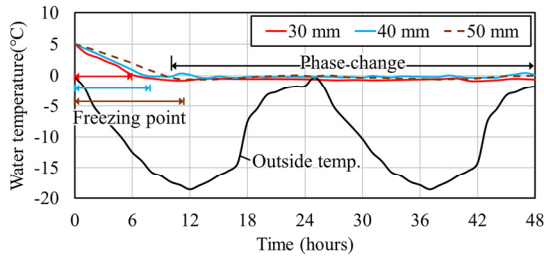


Fig. 6. Outside temperature for 48 hours (Nam *et al.*<sup>[11]</sup>)

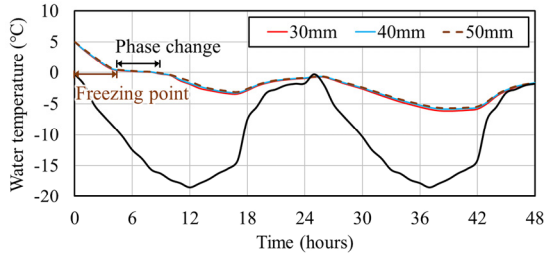




(a) Temperature contour of STS water tank analysis model



(b) Time-temperature curve for side part water



(c) Time-temperature curve for bottom part water

**Fig. 7.** Heat transfer analysis results of STS water tank analysis models

온도 감소 구간에 대한 변화율은 각각  $-0.836\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ ,  $-0.625\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ ,  $-0.454\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ 로 나타났다.  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  도달 시간은 해석 모델에서 최대 단열재 두께인 50 mm와 최소 단열재 두께인 30 mm 간 비교 시 최대가 되며 5시간 가량의 차이가 발생하는데, 이는 단열재 두께가 두꺼워질수록 온도 변화율이 작게 나타나므로 동결을 지연시키는 시간도 비례하게 증가함을 의미한다. 물의 상변화

구간은 해석결과에서 물의 온도가 액체 상태와 고체 상태가 혼합물 형태로 존재하는  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 구간으로 산정하였다<sup>[17]</sup>. 온도 감소 구간 이후 물의 상변화 구간은 단열재 두께에 따른 차이 없이 모두 해석 종료 시점인 48시간까지 지속되는 경향으로 나타났다. 이는 외기온도가 시간에 따라 변화하는 조건에서 물이 상변화 이후, 영하로 감소하는데까지 시간이 오래 소요될 수 있기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다<sup>[22]</sup>. 상변화 시간은 배수지용 물탱크에 물이 체류하는 최소 시간인 12시간을 만족하고, 물과 외부의 열전달 간에 열전도율이 낮은 단열재를 거쳐 열손실이 적게 발생하기 때문에 48시간의 외기온도에 노출 시 동결의 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

#### 4.2 STS 물탱크 하단 지지부의 열전달 특성

Fig. 1(b)와 같이 STS 물탱크 하단 지지부에 설치된 ‘ㄷ’자 형강은 강재로 제작되어 높은 열전도율과 낮은 비열을 가지게 된다. 따라서 동절기 열손실에 특히 취약할 수 있기 때문에 온도 도출 지점을 Fig. 7(a)와 같이 ‘ㄷ’자 형강과 STS 패널에 가까운 측면 및 하면 10 mm 지점으로 설정하였다. 단열재 두께는 중앙 외측부와 동일하게 각각 30 mm, 40 mm, 50 mm를 설정하였다. 모든 해석 모델은 Fig. 7(c) 및 Table 4와 같이 물의 온도가  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 도달하는 시간과 온도 감소 구간에 대한 변화율이 각각 5시간,  $-1\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ 로 동일하게 나타났다. STS 물탱크 중앙 외측부와 비교 시,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  도달 시간에 대한 차이는 각각 1시간, 3시간, 6시간, 온도 변화율 차이는 각각  $-0.164\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ ,  $-0.375\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ ,  $-0.546\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ 으로 하단 지지부가 중앙 외측부에 비해 온도 감소가 더 빠르게 나타났다. 이는 중앙 외측부와 달리, 물과 외부의 열전달 간에 하면의 구성요소 중 열손실에 취약한 ‘ㄷ’자 형강을 거치기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

물의 상변화 구간은 온도 감소 구간 이후, 단열재 두

**Table 4.** Results of heat transfer analysis for bottom and side part water

Insulation thickness (mm)	Freezing point reach time (hrs)		Temperature change ratio ( $^{\circ}\text{C/hr}$ )		Phase change time (hrs)	
	Side	Bottom	Side	Bottom	Side	Bottom
30	6	5	-0.836	-1	42	4
40	8	5	-0.625	-1	40	4
50	11	5	-0.454	-1	37	4

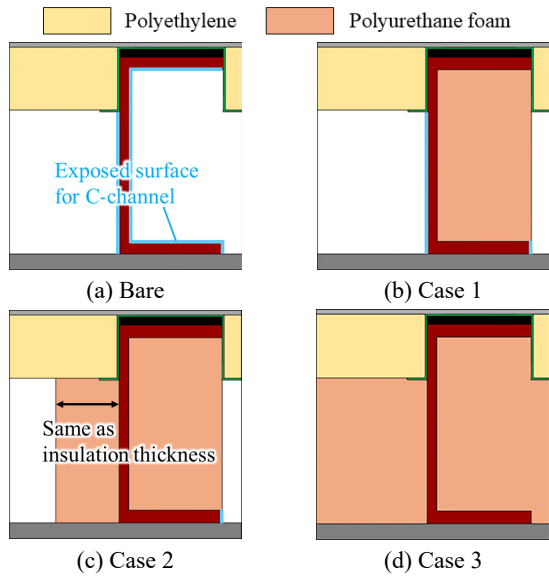


Fig. 8. Details of insulation placement parameters

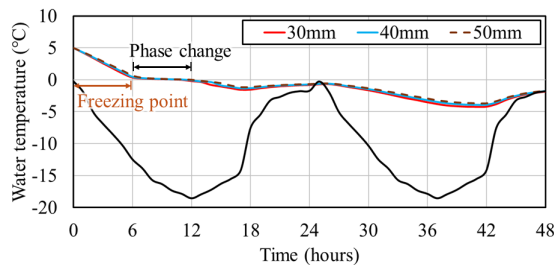
계와 관계없이 모두 4시간 정도 유지되었다. 물의 온도 감소는 단열재 적용 및 상변화 과정으로 인해 지연되어 상변화 구간 이후, 영하로 감소되면서 외기온도가 변화함에 따라 영하의 범위에서 상승 또는 하강하는 경향으로 나타났다. 또한, 해석 종료 시점까지 물이 최소 체류 시간을 만족하지 못하고, 완전 동결 상태에 있는 것으로 나타났다. 따라서 외기온도에 노출된 STS 물탱크 하단 지지부에 단열재 적용 및 물의 상변화가 물의 온

도 감소를 지연시키나, 단열재 두께에 대한 온도 지연의 영향보다 단열이 취약한 ‘ㄷ’자 형강에서 발생하는 열손실이 더 크기 때문에 외기온도 노출 시 열손실에 취약한 ‘ㄷ’자 형강에 대한 효과적인 단열 방식이 필요할 것으로 판단된다.

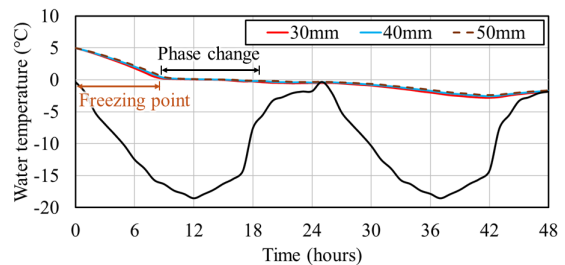
## 5. 매개변수해석

### 5.1 매개변수 설정 및 목적

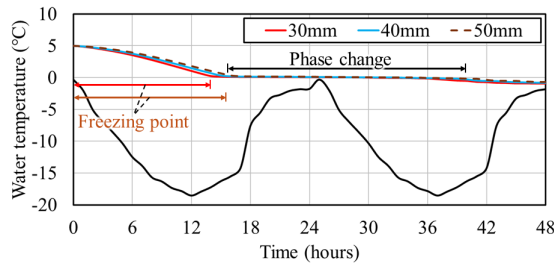
이 연구에서는 열손실에 취약한 STS 물탱크 하단 지지부에 대해 두께별 배치방식에 따른 열전달 특성 변화를 분석하고, 물의 동결 특성을 정립하기 위해 확장 해석을 수행하였다. 물탱크 하단 지지부에 추가로 배치되는 단열재는 스프레이형 폼을 가정하여 Table 1과 같은 열적 특성을 가지는 폴리우레탄 폼을 적용하였다. 물탱크 하단 지지부의 단열재 두께별 배치방식에 따른 변수는 Fig. 8과 같고, 각 Case에 적용한 폴리에틸렌 두께는 30 mm, 40 mm, 50 mm로 설정하였다. Case 1의 단열재 배치방식은 ‘ㄷ’자 형강의 플랜지 사이 공간이 외기온도에 노출되는 것을 최소화하기 위해 그 공간만큼 폴리우레탄 폼을 배치하였다. Case 2의 경우 Case 1의 배치방식에서 ‘ㄷ’자 형강 웹 외측에 폴리에틸렌과 동



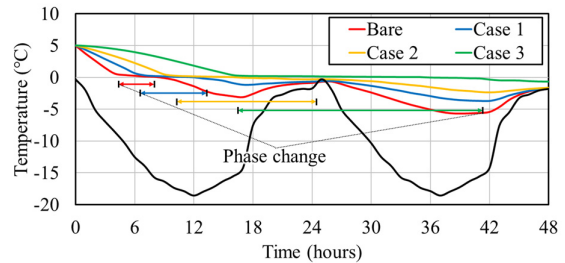
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Comparison of trends between insulation placements (50 mm)

Fig. 9. Time-temperature curve of parametric analysis models

**Table 5.** Results of water freezing data for parametric analysis models

Model case	Insulation thickness (mm)	Temperature change ratio (°C/hr)	Phase change time (hrs)	Total freezing time (hrs)
Bare	30	-1	4	9
	40	-1	4	9
	50	-1	4	9
Case 1	30	-0.83	6	12
	40	-0.83	7	13
	50	-0.71	7	14
Case 2	30	-0.56	10	19
	40	-0.50	10	20
	50	-0.45	14	25
Case 3	30	-0.36	23	37
	40	-0.31	23	39
	50	-0.29	24	41

일한 두께로 폴리우레탄 폼을 배치하였다. Case 3는 외기온도에 노출되는 단면적이 없도록 물탱크 하단 지지부의 비단열 구간 전체에 단열재를 충전하였다.

5.2 단열재 배치에 따른 열전달 특성 변화

단열재 배치방식에 따른 물탱크 내부 열전달 특성 변화를 비교하기 위해 Fig. 7(a)의 하단 지지부 온도 측정 지점과 동일한 위치에서 물의 온도 변화를 비교하였다. Fig. 9 및 Table 5와 같이 배치방식에서 ‘ㄷ’자 형강 주변에 단열재가 추가됨에 따라 온도 변화율이 -1 °C/hr에서 -0.29 °C/hr까지 변화하고, 기존 해석 모델인 Bare에 비해 온도 변화율이 Case 1, Case 2, Case 3에서 각각 최대 29 %, 55 %, 70.5 % 감소하는 것으로 나타났다. 물의 상변화 구간은 추가 단열재 배치방식에 따라 6~24시간의 범위 내로 도출되었다. Case 1, Case 2, Case 3의 상변화 소요 시간은 기존 해석 모델인 Bare에 비해 각각 최대 3시간, 10시간, 20시간씩 증가하였다. 이는 열손실에 취약한 ‘ㄷ’자 형강에 외기온도 노출면을 최소화할 수 있도록 추가 단열재를 배치함으로써 물의 온도 감소 속도를 지연시켜 나타나는 현상으로 판단된다.

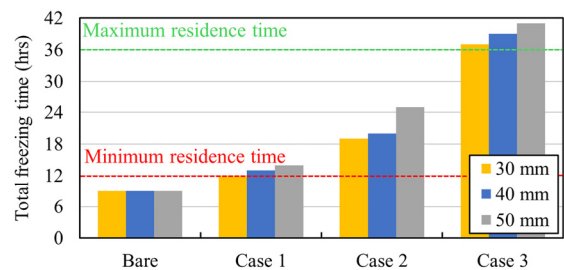
동일한 배치방식 내에서 상변화 지속 시간의 차이는 Case 1과 Case 3의 경우 1시간, Case 2의 경우 최대 4시간이 발생하였다. 이는 상변화 지속 시간에 차이가 없는 Bare와 달리, 상변화 과정에서 열손실에 취약한 ‘ㄷ’자 형강이 추가 단열재 배치로 인해 보호되어 물탱크 중앙 외측부와 같이 단열재 두께의 영향이 점진적으로

나타나는 현상으로 판단된다.

5.3 최소·최대 체류시간에 따른 배치방식 비교

보편적으로 배수지용 물탱크 내 물의 체류시간은 최소 12시간에서 최대 36시간의 범위를 가진다. 동결시간은 물의 온도가 감소하는 시점부터 물의 상변화구간이 끝나는 구간까지의 시간을 의미한다. 이러한 동결시간이 체류시간보다 짧을 경우, 체류 중인 물에 동결이 발생하면서 구조적 손상 등과 같은 사용성 저하의 원인이 될 수 있다. 또한, 과도한 단열로 인해 동결시간이 최대 체류시간을 초과하여 일정 수준의 수온을 가진 물이 잔류할 경우, 원활한 물의 순환이 이루어지지 못해 수질오염이 발생할 가능성이 있다. 따라서, 효과적인 단열재 배치 방식을 선정하기 위해서는 물의 최소·최대 체류시간 범위 내 동결시간 조건을 만족해야 한다.

Table 5 및 Fig. 10과 같이 열손실에 취약한 물탱크 하면 ‘ㄷ’자 형강 지지부는 추가 단열재를 배치하지 않



**Fig. 10.** Comparison of total freezing times between cases



아 9시간의 동결시간을 갖는 Bare를 제외하고 모든 Case에서 물의 동결시간이 물탱크 최소 체류시간인 12시간을 만족한다. 단열재 두께별 Case 1은 12~14시간, Case 2는 19~25시간으로 나타났으며, 설계기준에서 제시하는 물의 최소·최대 체류시간에 대한 범위 내 동결시간 조건을 만족하였다. 그러나 Case 3는 최소 단열재 두께인 30 mm 단열재 적용 시, 37시간의 동결시간을 가지며, 이는 최대 체류시간을 초과하므로 이는 과도한 단열재를 적용한 것으로 판단된다. 따라서 동결시간 조건을 만족하는 Case 1과 Case 2는 열손실 취약부인 STS 물탱크 하단 지지부에 적용이 가능한 효과적인 단열재 배치방식으로 판단된다.

## 6. 결론

이 연구에서는 동절기 대용량 STS 물탱크의 단열재 설계에 따른 물의 동결 특성 분석을 목표로 단열재 두께 및 배치에 따른 열전달 특성을 분석하였다. 48시간 외기온도를 적용한 STS 물탱크를 2D 대칭 모델로 구성하여 단열재 두께에 따른 물의 온도 변화율 및 상변화 시간을 통해 열전달 특성을 분석하고 열손실 취약부를 확인하였다. 나아가, 열손실 취약부에 대해 단열재 배치에 따른 열전달 특성 변화를 정립하고, 물의 체류시간을 기준으로 동결시간을 비교하여 효과적인 단열재 설계방안을 제안하였다.

- (1) 물의 체류시간 및 상변화를 고려한 STS 물탱크 해석 모델의 해석적 방법은 Chen and Lee<sup>[19]</sup>의 동결 실험 결과와 비교 시, 초기 0 °C 도달 시간 및 해석 종료 시점 온도가 각각 98 %, 92.4 %의 높은 정확도를 보이므로 물의 동결과정을 충분히 모사하고 있다고 판단된다.
- (2) STS 물탱크 해석 모델의 중앙 외측부는 단열재 두께가 50 mm에서 30 mm로 감소함에 따라 물의 온도 변화율이 최대 약 45.7 % 증가하고 초기 0 °C 도달 시간은 최대 5시간 감소한 것으로 나타났다. 외측부 구성요소 및 물의 체류시간 내 상변화 지속 시간을 고려할 때, 동결의 영향이 미미한 것으로 판단된다.
- (3) STS 물탱크 해석 모델의 하단 지지부는 단열재

두께와 관계없이 물의 온도 변화율과 초기 0 °C 도달 시간이 모두 동일하며, 중앙 외측부에 비해 온도 변화율이 최대 54.6 % 증가하고, 초기 0 °C 도달 시간이 최대 6시간 감소하여 열손실에 더 취약한 것으로 나타났다.

- (4) 해석 모델 하단 지지부에서 물의 상변화 지속 시간은 열손실에 취약한 ‘c’ 자 형강으로 인해 단열재 두께와 관계없이 4시간으로 동일하며, 상변화 이후 물의 온도가 영하로 감소하여 최소 체류시간인 12시간을 만족하지 못하고, 완전 동결 상태에 있는 것으로 나타났다.
- (5) 단열재 두께의 영향이 미미했던 STS 물탱크 하단 지지부는 배치에 따라 Bare 모델의 온도 변화율 대비 Case 1, Case 2, Case 3 모델이 각각 최대 29 %, 55 %, 70.5 % 감소하고, 상변화 시간은 각각 최대 3시간, 10시간, 20시간 증가하여 ‘c’자 형강의 단열재 배치가 온도 감소 지연에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (6) 설계기준에서 제시하는 물의 최소·최대 체류시간을 기준으로 물탱크 하단의 단열재 두께별 배치에 따른 동결시간을 비교하였을 때, Bare 모델은 모든 단열재 두께에서 최소 체류시간을 만족하지 못하고, Case 1 및 Case 2 모델은 각각 최대 14시간, 25시간으로 물의 체류시간 범위 내 조건을 만족하였으며, Case 3 모델은 과도한 단열재 적용으로 모든 단열재 두께에서 최대 체류시간을 초과한 것으로 나타났다.
- (7) 이 연구에서는 단열재 두께 및 배치에 따라 동절기 만수 조건인 STS 물탱크 내 물의 동결 특성을 분석하고, 설계기준에서 제시한 물의 체류시간을 충족하는 효과적인 설계방안으로 Case 1 및 Case 2 모델을 제안하였으나, 향후 다양한 지역별 외기온도와 물탱크 내부 물의 수위 조건을 변수로 추가 연구를 수행함으로써 물탱크 하단 지지부의 동결방지를 위한 상세 설계방안이 정립될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)포스코와 정부(과학기술통신부)의 재원

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(N0. 2022R1F1A1074002).

## 참고문헌(References)

- [1] Heo, S.J., Yoh, K.Y., and Kim, J.K. (2022) Design of Large Capacity Water Tank with Stainless Corrugated Panel Wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.1, pp.55-66 (in Korean).
- [2] Heo, S.J., Yoh, K.Y., and Kim, J.K. (2023) Analysis of Behavior Characteristics according to Structural Details of Circular Water Tank with Double Panel Wall, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.2, pp.59-69 (in Korean).
- [3] Kim, D.-W., Yoh, K.-Y., Song, S.-H., and Kim, J.-K. (2024) Development of STS Lining Support Frame Capable of Absorbing Deformation Errors, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.1, pp.25-34 (in Korean).
- [4] Ministry of Environment (2022) *Drainage Facility Design Standard*, KDS 57 65 00 : 2022, ME (in Korean).
- [5] Jeong, B., Kim, K., Seo, J., and Koo, J. (2019) Development of Prediction Models of Chlorine Bulk Decay Coefficient by Rechlorination in Water Distribution Network, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol.33, No.1, pp.17-29 (in Korean).
- [6] Korea Tank industry Cooperative (2019) *Stainless Steel Panel Type Water Tank*, SPS KTIC B 1001-0435:2019, Korean Standards Association (in Korean).
- [7] Lee, C.-Y., Kang, S.-M., and Kim, J.-K. (2023) Experimental and Analytical Study on Heat Transfer of Double-Layer Steel Plates with an Air Layer, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.385-396 (in Korean).
- [8] European Committee for Standardization (2003) *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, EN 1993-1-2:2003, CEN, Belgium.
- [9] Wang, S., Wang, X., Mao, M., Wang, Y., Liu, S., Luo, B., and Li, T. (2023) The Influence of Storage Tank Volume on the Nighttime Heat Dissipation and Freezing Process of All-Glass Vacuum Tube Solar Water Heaters, *Energies*, MDPI, Vol.16, No.12, 4781.
- [10] Zhou, F., Ji, J., Yuan, W., Modjinou, M., Zhao, X., and Huang, S. (2019) Experimental Study and Performance Prediction of the PCM-Antifreeze Solar Thermal System under Cold Weather Conditions, *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, Vol.146, pp.526-539.
- [11] Nam, K.-Y., Ha, J.-S., Lee, D.-H., Park, T.-W., and Won, J.-Y. (2016) Concrete Temperature History and Micropore by Using Insulation Gang-Form in -20°C Cold Weather Conditions, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.32, No.1, pp.55-62 (in Korean).
- [12] Wang, F.F. (2004) Electronics Packaging Simplified Radiation Heat Transfer Analysis Method, *Proceedings of the 9th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, IEEE, USA, pp.613-617.
- [13] Kang, S.-M., and Kim, J.-K. (2023) Prediction of the Moment Capacity of FRP-Strengthened RC Beams Exposed to Fire Using ANNs, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer, Vol.27, No.8, pp.3471-3483.
- [14] Hu, J., Li, J., Huang, Z., Cheng, K., and Xia, H. (2024) Experimental Study on the Freezing Process of Water Droplets for Ice Air Jet Technology, *Scientific Reports*, Vol.14, 3259.
- [15] Çengel, Y.A., and Boles, M.A. (2011) *Thermodynamics: An Engineering Approach* (7th Ed.), McGraw-Hill, USA.
- [16] Ansys (2021) *Ansys Fluent User's Guide*, Ansys, USA.
- [17] Ramesh, V., Terala, S., Mazumder, S., Matharu, G., Vaishnav, D., and Ali, S. (2021) Development and Validation of a Model for Efficient Simulation of Freezing of Water in Large Tanks, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, The American Society of Mechanical Engineers, Vol.13, No.1, 011008.
- [18] Heo, S.J., Yoh, K.Y., Moon, S.I., and Kim, J.K. (2023) Analysis of Fluid Flow Characteristics of Circular Water Tank with Double Panel Wall Using CFD, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.4, pp.219-227 (in Korean).
- [19] Chen, S.-L., and Lee, T.-S. (1998) A Study of Supercooling Phenomenon and Freezing Probability of Water Inside Horizontal Cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, Vol.41, No.4-5, pp.769-783.
- [20] Sohn, J.G. (2019) A Study on Performance of Solar Thermal System for Domestic Hot Water according to the Weather Conditions and Feedwater Temperatures at

Different Locations in Korea, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, KSES, Vol.39, No.6, pp.41-54 (in Korean).

[21] Liu, W.W., Feng, Q., Wang, C., Lu, C., Xu, Z., and Li, W. (2019) Analytical Solution for Three-Dimensional Radial Heat Transfer in a Cold-Region Tunnel, *Cold*

*Regions Science and Technology*, Elsevier, Vol.164, 102787.

[22] Li, X., Li, J., Zhou, G., and Lv L. (2020) Quantitative Analysis of Passive Seasonal Cold Storage with a Two-Phase Closed Thermosyphon, *Applied Energy*, Elsevier, Vol.260, 114250.

---

**요약**: 이 연구는 배수지용 STS 물탱크가 동절기 외기온도에 노출되는 조건에서 물의 동결 특성을 분석하는 것을 목표로 한다. 대용량 STS 물탱크 내 열전달 특성 분석을 위해 열전달 해석 모델을 2D 대칭 모델로 구성하고, 48시간의 동절기 외기 온도를 적용하여 단열재 두께에 따른 열전달 해석을 수행하였다. 물의 온도 변화율 및 상변화 시간을 비교하였을 때, STS 물탱크 중앙 외측부의 경우 동결의 영향이 미미했으나, 하단 지지부의 경우 단열재 두께와 관계없이 물탱크 내부 물에 동결이 발생하면서 중앙 외측부에 비해 열손실에 더 취약한 것으로 나타났다. 나아가, 열손실 취약부인 하단 지지부에 대해 단열재 배치방식을 변수로 매개변수해석을 수행하여 단열재 배치에 따른 열전달 특성 변화로 물의 동결 특성을 정립하였다. 이후, 물의 최소·최대 체류시간을 기준으로 동결시간을 비교하여 효과적인 단열재 설계방안을 제안하였다.

**핵심용어**: 스테인리스강 물탱크, 물 동결, 상변화, 열전달, 단열재

---