



# 계간 축열조에서 매립방식과 이중외벽의 영향을 고려한 열손실 비교

김수환<sup>1)</sup> · 이현진<sup>1)\*</sup> · 이경호<sup>2)</sup> · 허재혁<sup>2)</sup> · 이동원<sup>2)</sup>

## Comparison of Heat Losses in Seasonal Thermal Energy Storage Considering Burial Types and a Secondary Outer Wall

Soo-Hwan Kim<sup>1)</sup> · Hyun-Jin Lee<sup>1)\*</sup> · Kyoung-Ho Lee<sup>2)</sup> · Jae-Hyeok Heo<sup>2)</sup> · Dong-Won Lee<sup>2)</sup>

Received 19 February 2018 Revised 14 April 2018 Accepted 15 May 2018

**ABSTRACT** The integration of renewable energy systems is important for mitigating the weaknesses of individual energy sources and simultaneously fortifying their strengths. In the city of Jincheon, an eco-friendly town utilizes various renewable heat sources, such as solar thermal and geothermal energies, for block heating. Seasonal thermal energy storage (STES) plays a key role in integrating the heat sources. STES is charged mainly with the excess solar heat in summer and discharged in winter. Because STES uses the sensible heat of water with a long lifetime, it is critical to minimize the heat loss from STES. In this study, the heat loss was investigated numerically with a focus on the burial types of STES with and without an additional, surrounding concrete wall. The monthly steady-state heat losses were calculated using commercial software while considering the temperature-dependent and water-content-dependent thermal conductivity of the insulator and the thermal stratification of water inside the STES. The secondary outer wall did not necessarily improve the thermal insulation and a water content of 9% in the insulator could increase heat loss almost two fold.

**Key words** Seasonal thermal energy storage(계간 축열조), Heat loss(열손실), Thermal insulation(단열), Water content(수분함유)

### Nomenclature

FB : full burial

FE : full exposure

FEW : full exposure with outer wall

HB : half burial

HBW : half burial with outer wall

SFB : sloped full burial

STES : seasonal thermal energy storage

### 1. 서론

태양열 기술의 보급을 확대하기 위해서는 태양에너지의 수요와 열에너지 요구 시간 사이의 불일치를 해결해야 한다. 낮과 밤의 단기간 불일치는 물의 현열을 사용하는 소용량 축열조로 주로 해결해 왔다. 최근에는 여름철과 겨울철 사이

1) School of Mechanical Engineering, Kookmin University

2) Solar Thermal Convergence Lab, Korea Institute of Energy Research

\*Corresponding author: hyunjinlee@kookmin.ac.kr  
Tel: +82-2-910-5466 Fax: +82-2-910-4839

의 장기간 불일치를 해결하기 위해 계간 축열조(seasonal thermal energy storage, STES)를 이용하는 대용량 태양열 시스템이 주목받고 있다.<sup>[1,2]</sup> 계간 축열조는 여름철 남는 열로 겨울철 부족한 열원을 보완해 준다는 장점이 있지만, 대용량이므로 초기 설치비용이 높은 단점이 있다. 또한, 장기간 많은 양의 열에너지를 저장하기 때문에, 외부로 열손실 불가피하고 이를 줄이기 위한 노력이 필요하다.

해외에서는 유럽과 캐나다를 중심으로 계간 축열조 기반의 태양열 난방 시스템이 건설되어 운영되고 있다.<sup>[3-5]</sup> 최근 국내에서도 정부 주도로 계간 축열조와 태양열 집열기를 기반으로 신재생열 에너지를 공급하는 친환경에너지타운 시범사업이 진천에서 진행되고 있다.<sup>[2]</sup> Fig. 1에서 보듯이 연료전지, 태양열, 하수열/지열 히트펌프로 공공건물에 난방 및 급탕용 열에너지를 공급함으로써 지역단위로 신재생에너지를 이용한 에너지 자립을 실현하는 것을 목표로 한다. 계간 축열조 방식 중에서 땅 속에 묻는 탱크 축열 방식을 적용함으로써 설치비용이 상대적으로 높은 단점이 있음에도 불구하고 축열조 부피와 열손실 최소화를 도모하였다.

높은 초기 투자비와 장기간 사용을 고려하면서 설계해야 하는 계간 축열조 시스템에서 축열조의 열손실을 평가하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 다음과 같은 사항에 초점을 맞추면서, 물의 현열을 사용하는 탱크 계간 축열조의 연간 열손실을 수치적으로 해석하였다. 기본적으로 축열조의 매립 방식과 축열조를 둘러싼 이중외벽의 존재 여부에 따라 열손실 변화를 검토하였다. 그 과정에서 계절에 따른 축열조 내부의 성층화 온도와 대기 온도 변화를 월별 대푯값을 이용하였다. 또한, 단열재의 열전도도는 상수로 가



Fig. 1. Renewable heat supply based on seasonal thermal energy storage

정하지 않고 수분 함유량과 온도의 함수로 표현하여 보다 실질적인 열손실 예측이 되도록 하였다.

## 2. 연구방법

진천 친환경에너지타운 사업이 본 연구의 동기를 부여하였지만, 해석에서는 실제 적용된 축열조를 간략화하여 사용하였다. 결과적으로 축열조 실제 형상 및 치수에서 다소 차이가 있다. 축열조 열손실 해석은 월 단위로 정상상태를 가정하여 COMSOL Multiphysics 프로그램을 이용하여 진행하였다.<sup>[6]</sup>

계간 축열조의 열손실을 최소화하기 위해서는 지중에 매립을 해야 한다. 하지만 축열조의 크기가 커지면서 땅을 파는 비용도 증가하게 된다. 그래서 축열조 매립 깊이를 줄이는 것을 검토하기 위해 매립 방식에 따른 열손실 변화를 조사하였다. Fig. 2에서 보듯이 매립 방식에 따라 4가지 경우 - 완전매립(FB), 경사매립(SFB), 절반매립(HB), 완전노출(FE)로 분류하였다. 또한 열손실 극소화와 시스템 관리의 편의성을 위해 계간 축열조를 건물 안에 설치하는 것을 고려하여, 축열조가 건물 외벽에 추가적으로 둘러싸인 2가지 경우 - 절반매립외벽(HBW), 완전노출외벽(FEW)을 추

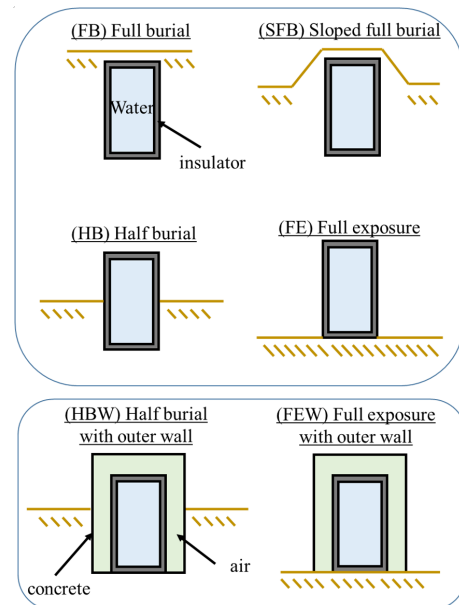


Fig. 2. Installation cases for a seasonable storage

가하였다. 실제 진천에 설치된 시스템은 건물 내에 축열조가 위치한다는 점에서 HBW와 유사하다.

외기 온도의 변화는 축열조 열손실에 중요한 변수이다. 연중 외기 온도는 기상청에서 제공하는 1991년부터 2010년까지 20년간 데이터를 바탕으로 청주 지역의 표준기상데이터를 제작하여 적용하였다.<sup>[7]</sup> 시간별 표준기상데이터를 바탕으로 월평균 외기 온도를 계산하였고 Fig. 3에 도시하였다. 8월에 평균적으로 26.1°C로 가장 높고, 1월에 -3.0°C로 가장 낮다. 외기와 대류 열전달계수를 계산하기 위해서는 풍속이 필요하다. 표준기상데이터에 풍속 데이터도 포함되어 있지만, 월별 계산을 위해 월평균 값을 사용할 수는 없다. 따라서 대류 열전달계수는 월별 변화를 무시하고 연중 동일한 값 30W/m<sup>2</sup>·K를 사용하였다.

지중에 매립된 계간 축열조 벽의 일반적인 구조를 살펴보면 Fig. 4와 같다.<sup>[8]</sup> 벽체의 형상을 유지하는 콘크리트 벽과 열손실을 막아주는 단열재를 중심으로 지중 토양과 가열된 물 사이에 여러 층이 존재한다. 콘크리트 벽은 물이 통과할 수 있기 때문에 벽체 가장 안쪽에 스테인레스 철판이 있고, 다음에 고밀도 콘크리트 벽이 온다. 단열재는 여러 가지 소재가 가능한데, 현재 계간 축열조에서 주로 사용

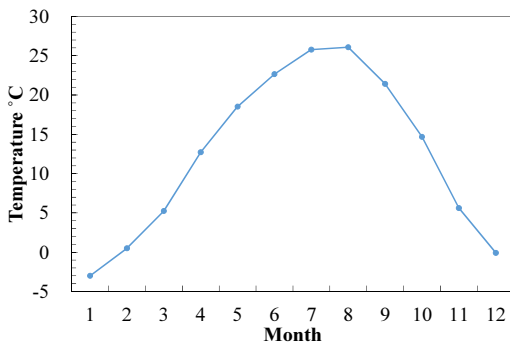


Fig. 3. Monthly mean temperature of the ambient air

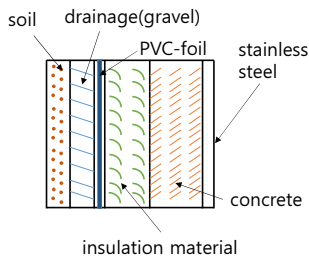


Fig. 4. Sketch of storage wall structure

하는 단열 소재는 재활용 유리(약 98%)와 무기소재로 구성된 expanded glass와 foam glass와 같은 재료를 많이 사용한다. 수분의 침투를 막기 위해, 폴리염화비닐(PVC) 같은 플라스틱 재질의 얇은 보호막이 단열재나 콘크리트 벽 사이에 위치한다. 마지막으로 자갈 위주로 제작된 배수구가 있어서 계간 축열조 주변의 빗물이 쉽게 흘러내리게 만든다.

계간 축열조 탱크 벽체를 구성하는 다양한 층이 있지만, 열전달 해석에 있어서 모든 층이 영향을 주는 것은 아니다. 1차원 벽체로 가정하고, 각 층의 두께( $t$ )와 열전도도( $k$ )를 통해 열저항( $t/k$ )을 분석하였다. 두께는 일반적인 대포값을 감안해보면, 스테인레스 철판, 플라스틱 필름 등 방수를 위해 적용된 얇은 층은 열저항 값의 범위가 콘크리트 벽, 단열재에 비해 현저히 작다. 특히 단열재 열저항이 전체 열손실을 좌우한다. 따라서 축열조 열손실 해석에서 콘크리트 벽과 단열재만을 고려하였다.

계간 축열조에서 주로 사용하는 단열재의 열전도도 대포값은 건조 상태에서 20°C 내외에서 측정된다. 하지만 계간 축열조의 연중 평균온도는 50~60°C에 가깝고, 특히 수분 침투로 인해 건조 상태 유지가 어렵다. 비록 라이너와 포일 등을 사용하여 수증기 침투나 확산을 방지하고 있지만, 실제 축열조에서 단열재의 수증기 함유는 성능을 저하시키는 큰 원인이 되고 있다. 라이너 소재의 온도에 따른 수분 확산의 대포값도 20°C 내외에서 측정된 값으로 주어지기 때문에, 실제 계간 축열조의 운전 온도를 보면 수분 확산값은 예상과 달리 몇 십 배 이상 커질 수 있다. 계간 축열조의 열손실 예측 정확성을 높이기 위해서는 단열재의 온도 및 수분 함유에 따른 열전도도 증가를 고려할 필요가 있다.

선행연구 조사를 통해 발포 유리(expanded glass)에 대해 수분과 온도에 따른 열전도도 데이터를 확보하였다.<sup>[9]</sup> Fig. 5는 수분 함유율과 온도에 따라 변하는 발포 유리 단열재의 열전도도 변화를 보여준다. 수분 함유율은 수분이 들어갈 수 있는 공극 대비 실제 수분의 부피를 의미한다. 수분 함유율이 0%일 때는 상온에서 측정한 0.06W/m·K 값이 온도에 따라 크게 변하지 않는다. 하지만, 상온일지라도 수분 함유량이 증가하면서 열전도도는 크게 증가하고, 온도가 상승하면서 증가 폭은 더 커진다. 예를 들어, 수분 함유량이 50% 정도에 온도가 80°C로 증가하면, 열전도도

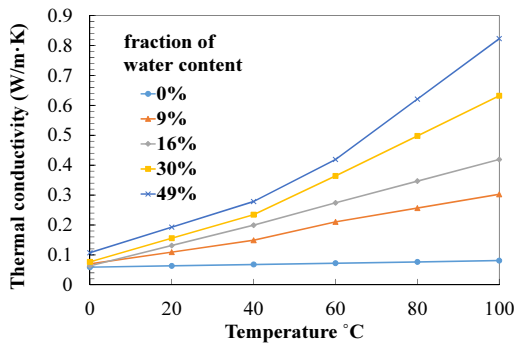


Fig. 5. Effects of water content and temperature on thermal conductivity of the insulator

는 0.62W/m·K로 10배 이상 증가한다. 계간 축열조가 20년 이상 장기간 사용되므로 단열재에 수분 침투가 발생할 것으로 추측하였다. 실제 시스템에서 수분 함유량 측정이 어렵기 때문에 본 연구에서는 9% 수분 함유율을 참조 케이스로 삼았다. 다음 장에서 서술된 것처럼, Fig. 8 관련한 해석 결과와 보고된 축열조의 열손실을 바탕으로 판단하면 9%는 수분 함유율의 대략적인 상한값에 해당한다. COMSOL을 이용한 수치 해석에서는 주어진 수분 함유율에서 Fig. 5를 바탕으로 열전도도가 온도에 따라 변화하도록 하였다.

진천에 설치된 실제 축열조 형상은 직육면체이다. 하지만 해외에서 기존에 설치된 축열조는 원통형이 일반적이므로 본 연구에서는 원통형 축열조를 가정하였다. 계간 축열조에서 물의 부피는 지름 10m, 높이 25m로 간주하였다. 축열조를 아래쪽에서 둘러싼 토양의 계산 영역은 축열조와 마찬가지로 원통형 형상으로 정하였다. 원통은 지름 100m, 높이 100m로 설정하였다. 계산 시 경계 조건으로는 100m 아래 흙 바닥면 온도는 10°C로, 원통 옆면은 단열로 가정하였다. COMSOL 계산에서 대략 60,000 개 메시를 사용하였는데, 축열조와 원통형 토양은 크기 차이를 반영해서 축열조에 보다 조밀한 메시를 적용하였다(축열조는 56.3개/m<sup>3</sup>, 토양은 0.19개/m<sup>3</sup>). 단열재와 콘크리트 외벽 사이 공기층은 자연대류만 발생하는 것으로 가정하였다. 열전달 해석에서 얻은 벽면과 공기층 온도를 기준으로 상관식을 통해 대류열전달계수를 계산하였다. 월별 변화가 크지 않아서 대략적인 평균값 2.5W/m<sup>2</sup>·K를 상수로 입력하였다. Table 1에 계산에 사용한 기본 입력값을 정리하였다.

고온의 물은 상부에 저온의 물은 하부에 저장하는 성층

Table 1. Parameters for numerical simulation

Category		Value
Water (in storage)	height [m]	10
	diameter [m]	25
	volume [m <sup>3</sup> ]	4908.7
Soil (surrounding storage)	height [m]	100
	diameter [m]	100
	bottom temperature [°C]	10
	thermal conductivity [W/m·K]	0.5
Concrete wall	thickness [m]	0.4
	thermal conductivity [W/m·K]	1.8
Insulator	thickness [m]	0.4
	thermal conductivity (9% water content) [W/m·K]	Fig. 5
Ambient air	temperature [°C]	Fig. 3
	Convection heat transfer coefficient [W/m <sup>2</sup> ·K]	30
Air layer	thickness [m]	1.6
	Convection heat transfer coefficient [W/m <sup>2</sup> ·K]	2.5

화(stratification)는 태양열 시스템에서 태양열 집열기의 효율을 높이고 축열조의 열을 효과적으로 사용하는 방법이다.<sup>[10]</sup> 대용량 계간 축열조에서 상부 온도는 90°C 이상, 하부 온도는 30~40°C가 가능하다. 본 연구에서는 Fig. 2에 제시된 바와 같이 매립 깊이의 영향을 조사하고 있기 때문에, 계간 축열조 상하부간 온도차를 무시할 수 없다. 따라서 축열조의 성층화에 따른 높이별 물의 온도 차이를 감안하기 위해 별도로 TRNSYS 프로그램을 이용하여 예측하였다.<sup>[11]</sup>

### 3. 결과 및 해석

위에서 언급한 바와 같이, 축열조의 성층화 온도를 구하기 위해 TRNSYS를 이용한 시스템 시뮬레이션을 별도로 진행하였다. TRNSYS 시뮬레이션 결과는 계간 축열조를 중심으로 태양열 집열기, 히트펌프, 열수요 전체를 포괄하는 시스템 전체의 에너지 평형 해석으로부터 얻어진다. 태양열 집열기에서 얻어진 고온수는 축열조 상부로 들어오고, 난방을 위한 열은 축열조 상부와 하부에서 상황에 맞게 추출된다. 따라서, 구성 요소의 모델링 방법과 특성 값뿐만

아니라 구성 요소를 운전하는 제어 방법에도 시뮬레이션 결과가 달라진다. 본 연구에서는 대표적인 값과 방법을 바탕으로 설계 단계에서 추정된 성층화 온도 분포를 이용하였다.<sup>[12,13]</sup> TRNSYS 시뮬레이션의 상세한 내용은 별도의 논문을 통해 제시할 계획이다.

Fig. 6은 TRNSYS 시뮬레이션을 통해 얻은 축열조 상부와 하부의 온도 변화를 보여준다. 시뮬레이션 결과에서 축열조의 성층화 온도를 기준으로 가장 높은 부위의 온도와 낮은 부위의 온도를 월별로 평균하였다. 본 연구에서는 Fig. 6에 제시된 최상층과 최하층 온도 사이에 10개의 층으로 균일하게 온도 구간을 나누고, 각층에서 평균 온도를 사용함으로써 축열조의 성층화도가 열손실 예측에 반영이 되도록 하였다. Fig. 6을 제외한 나머지 모든 결과는 COMSOL 프로그램을 이용하여 얻었다.

Fig. 7은 모든 형상에 대한 계간 축열조 월별 열손실 계산 결과이다. 우선 콘크리트 이중외벽이 없는 경우를 먼저 살펴보자. 월별 열손실 변화는 Fig. 6에 나타난 축열조 온도분포와 유사하다. 외기 온도는 10월에 최소가 아니지만,

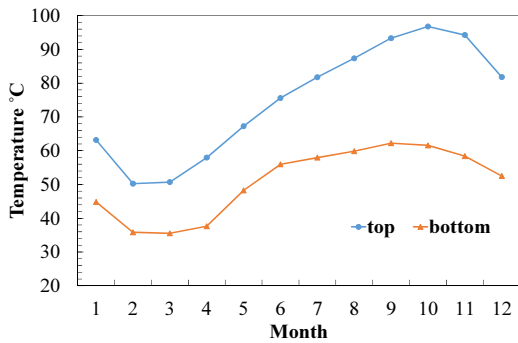


Fig. 6. Monthly mean temperatures of top and bottom of stratified storage

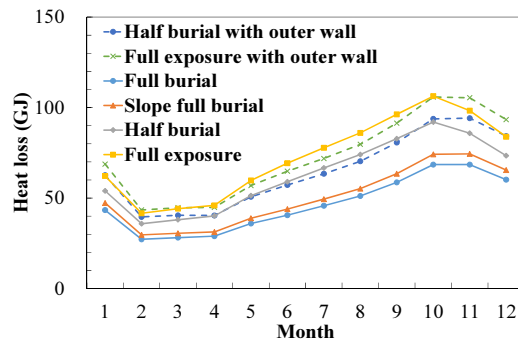


Fig. 7. Monthly heat losses of the storage

열손실은 10월에 최대이다. 축열조 상부 온도가 10월에 최대이므로 Fig. 5에서 보듯이 열전도도도 온도에 따라 커진다. 따라서 외기 온도 보다는 축열조 최대 온도의 영향을 더 많이 받는다. 2월에 열손실이 최소가 되는데, 4가지 모든 경우에서 10월 최대 열손실은 2월 최소 열손실의 약 2.5배가 된다. 모든 월에서 FB, SFB, HB, FE 순으로 열손실이 증가하고 있다. Table 2는 월별 열손실을 더한 연간 열손실을 보여준다. FB을 기준으로 연간 열손실은 SFB, HB, FE이 될 때, 8.4%, 35.2%, 56.5% 증가한다. SFB의 열손실 증가는 크지 않지만, FE이 되면 상당한 양의 열손실 증가가 발생한다.

Fig. 7에서 콘크리트 이중외벽이 존재하는 경우(HBW과 FEW)를 살펴보자. 1차원 열저항 관점으로 해석하면, 이중외벽이 추가되면서 열저항(총괄열전달계수)이 25%정도 증가하므로 단열에 긍정적이다. 하지만, 이중외벽과 공기층으로 인해 외벽의 면적이 26%정도 증가하여 단열에 부정적이다. 결과적으로 두 가지 상충하는 효과로 인해 이중외벽이 존재하는 HBW과 FEW의 경우가 존재하지 않는 HB와 FE의 경우에 비해 열손실 변화가 크지 않다. 월별 열손실은 최대 16%정도이고 대부분의 경우에 10%이하이다. 연간 열손실은, 축열조가 완전노출이 되었을 때, 이중외벽에 따른 변화는 거의 없다. 절반매립 HB에서 이중외벽을 적용한 HBW이 되면, 연간 열손실은 3%정도(753.4 → 777.8 GJ) 증가한다.

계간 축열조의 열손실 평가에서 단열재의 수분 함유량을 무시하는 것은 흔한 가정이다. 하지만, 위에서 언급한 바와 같이 장기간 운영을 고려하여 수분 함유율을 9%로 가정하고 계산을 수행하였다. 수분 함유량의 영향을 검토하기 위해 SFB과 HBW의 경우에 대해 수분 함유량을 무시한 결과를 Fig. 8에 비교하였다. 수분 함유량을 무시하면, Fig. 5에

Table 2. Annual heat losses of the storage

Case		Value [GJ]
Without outer wall	Full burial (FB)	557.2
	Slope full burial (SFB)	604.0
	Half burial (HB)	753.4
	Full exposure (FE)	871.8
With outer wall	Half burial (HBW)	777.8
	Full exposure (FEW)	871.4

서 보듯이 온도에 따른 열전도의 변화를 고려하더라도 그 변화가 매우 작아서 상온 열전도도 값 0.06W/m·K에서 거의 변하지 않는다. 반면에 9% 수분 함유율에서 열전도도는 상온에서도 0.10W/m·K으로 크다. 또한, 온도가 증가함에 따라 수분 함유량을 무시한 열전도도와 차이가 더욱더 커져, 60°C가 넘으면서부터는 약 3배 이상 증가한다. 결과적으로 SFB의 경우에 수분 함유량을 무시하면 연간 열손실이 313.4 GJ로 Table 2의 604.0 GJ 대비 52%로 작게 예측한다. 바꾸어 말하면, 수분 함유율이 낮은 운전 초기에 대비해서 운전 시간이 늘어나면 열손실이 배 이상 증가할 수도 있다. 실제로도 참고문헌에 따르면 실제 운전 중인 축열조에서 열손실은 설계값보다 30-50% 큰 것으로 보고되고 있다.<sup>[9]</sup>

유사하게 이중외벽이 있는 HBW의 경우에도 수분 함유량을 무시하면 열손실 예측 값이 53.4%로 줄어든다. 결과적으로 9% 수분 함유량은 열손실을 약 2배가량 증가시킨다. 또한, 이중외벽의 영향보다는 수분 함유량의 영향이 열손실 변화에 더 큰 것을 확인할 수 있다.

계간 축열조 열손실 계산에 있어서 성층화의 영향을 검토하기 위해, 성층화를 무시한 완전혼합 축열조를 가정하여 열손실 차이를 비교하여 Fig. 9에 도시하였다. 완전혼합의 경우 축열조 온도는 Fig. 6에 제시된 상부와 하부온도를 평균하여 사용하였다. 성층화를 무시하고 완전혼합이라고 가정하면, 모든 경우에 있어서 열손실 값이 작게 계산되었다. 성층화 축열조에는 상부고온으로 인해 Fig. 5처럼 열전도도가 증가하여 열손실이 크게 증가하는데, 완전혼합이 되면 상대적으로 고온부 온도가 하락하여 열손실이 감소한다. 이는 Fig. 9에서 상부 온도 증가에 따라 월별 열손실 차이가 커지는 것을 통해 확인 가능하다. 성층화와 완전

혼합 사이의 연간 열손실 차이는 FB 경우에 -18.4%로 최대이고, FEW 경우에 -6.8%로 최소가 된다.

계산된 열손실 결과가 어느 정도의 수준인지 검토하기 위해 논문에서 보고된 기존 계간 축열조에서 측정된 열손실 데이터와 비교하였다.<sup>[3]</sup> 비교 대상으로 선택한 계간 축열조의 부피가 동일하지 않기 때문에 의미 있는 비교가 되도록 단위 부피당 열손실을 SFB와 HBW의 경우에 대해 Fig. 10에 제시하였다. SFB의 경우, 연간 열 손실량은 123.0MJ/m<sup>3</sup>로 독일의 Freidrischafen과 스웨덴의 Ingledstad보다 크게 나타났지만, 스웨덴의 Lombohov 보다는 작게 나타났다. 만약 수분 함유를 무시한 결과를 이용하면(Fig. 8 참조), 열손실이 63.8MJ/m<sup>3</sup>이 되어 가장 작은 Freidrischafen의 78.6MJ/m<sup>3</sup>보다도 작아진다. 따라서 수분 함유율 9%를 이용한 본 연구의 해석 결과가 실제 운영 중인 축열조에서 측정된 열손실과 유사한 범위라 판단된다. 한편, 진천에 설치된 축열조와 유사한 HBW의 경우는 158.5MJ/m<sup>3</sup>으로 Lombohov와 유사한 수준으로 예상된다.

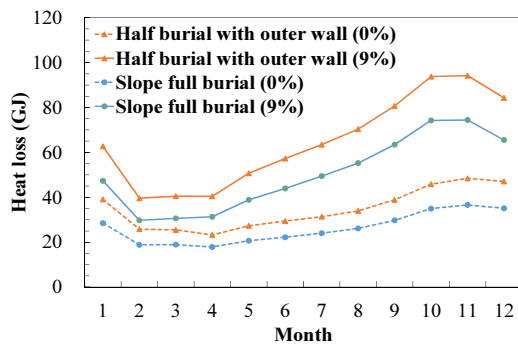


Fig. 8. Effects of water content in the insulator

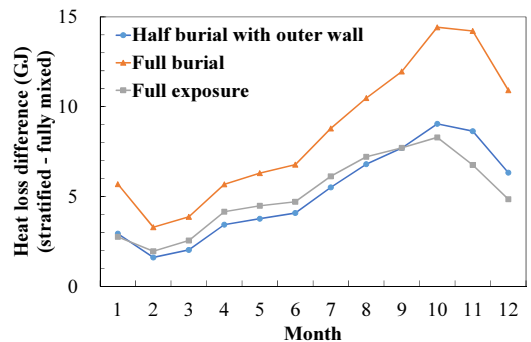


Fig. 9. Heat loss differences between stratified and fully-mixed storages

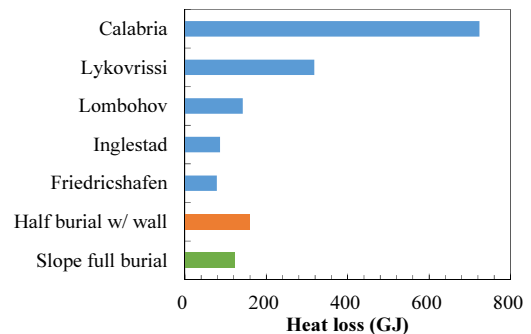


Fig. 10. Heat loss comparison with measurement data of other storages

## 4. 결론

본 연구에서는 물의 현열을 이용하는 탱크 계간 축열조의 열손실을 매립 방식, 이중외벽, 단열재 수분 함유, 성층화에 초점을 맞추어 평가하였고 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 이중외벽이 없을 때, 완전매립대비 절반매립, 완전노출의 경우 연간 열손실이 35.2%, 56.5% 각각 증가한다.
- 2) 이중외벽으로 인해 열저항은 증가하지만, 표면적도 증가한다. 상층하는 두 가지 효과로 인해 단열효과가 크지 않다.
- 3) 단열재 수분 함유율이 9%이면, 수분 함유가 없는 초기 상태에 비해 연간 열손실이 2배가량 증가한다.

진천 실제 시스템에서는 본 연구에서 상정한 내용과 달리 다른 단열소재로 더 두껍게 하여 보다 향상된 단열방법이 적용되었다. 따라서 매립방식과 이중외벽의 영향이 본 연구에서 제시한 것보다는 작을 것으로 예상된다. 하지만, 사용기간에 따라 증가하는 단열재 수분 함유량과 온도와 수분 함유에 따른 단열재 열전도도 변화는 정확하게 추정하는 것이 어렵다. 향후 실측된 열손실 값을 바탕으로 본 논문에서 제시된 해석 방법을 이용하면, 타축열조와 정량적인 비교 및 축열조 사용기간에 따른 열손실 예측 등에서 활용이 가능할 것이다.

참고로 본 논문은 기존에 발표되었던 내용을 수정 보완하여 작성하였음을 밝힙니다.<sup>[14]</sup>

## 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단(NRF-2015M3D2A1032828) 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

## References

[1] Lee, D.W., 2016, “계간 축열시스템”, Magazine of the SAREK, 45(9), 14-21.

[2] Lee, D.W., 2017, “신재생 열원 복합 계간 축열식 블록 히팅 시스템 기술”, Magazine of the SAREK, 46(8), 50-57.

[3] Novo, A.V., Bayon, J.R., Castro-Fresno, D., Rodriguez-Hernandez, J., 2010, “Review of seasonal heat storage in large basins: water tanks and gravel-water pits”, Appl. Energ., 87(2), 390-397.

[4] Pinel, P., Cruickshank, C.A., Beausoleil-Morrison, I., Wills, A., 2011, “A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications”, Renew. and Sust. Energ. Rev., 15(7), 3341-3359.

[5] Xu, J., Wang, R., Li, Y., 2014, “A review of available technologies for seasonal thermal energy storage”, Sol. Energ., 103, 610-638.

[6] COMSOL Multiphysics, <https://www.comsol.com>.

[7] Lee, H.J., Kim, S.Y., Yun, C.Y., 2017, “Generation of typical meteorological year data suitable for solar energy systems and analysis of solar irradiance data”, New & Renew. Energ., 13(3), 24-33.

[8] Schmidt, T., Mangold, D., Muller-Steinhagen, H., 2003, “Seasonal thermal energy storage in Germany”, ISES solar world congress.

[9] Ochs, F., Heidemann, W., Muller-Steinhagen, H., 2008, “Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature”, Int. J. Heat Mass Tran., 51(3), 539-552.

[10] Rosen, M.A., Tang, R., Dincer, I., 2004, “Effect of stratification on energy and exergy capacities in thermal storage systems”, Int. J. Energ. Res., 28(2), 177-193.

[11] TRNSYS, <http://www.trnsys.com>.

[12] Heo, J.H., H., Lee, D.W., Lee., K.H., Shin, U.C., 2016, “Basic design of solar thermal based seasonal thermal energy storage system for block heating”, KSME 2011 Spring Thermo Engineering Division Conference, pp. 1-2.

[13] Chemilo, R.M., Lee, H.J., Lee., K.H., Heo, J.H., Lee, D.W., 2017, “Numerical study of a solar district heating system with seasonal thermal energy storage”, Asia-Pacific Forum on Renewable Energy, p. 111.

[14] Kim, S.H., Lee, H.J., Lee., K.H., Heo, J.H., Lee, D.W., 2017, “Comparison of heat loss in a seasonal thermal energy storage considering shape change and burial depth”, KSES Spring Annual Conference, p. 86.