

# 디퓨저 타입 계간 축열조 내부 열성층화에 대한 입구 유속 및 탱크 종횡비 영향 연구

김성근\* · 정성용†

## Effects of the aspect ratio and inlet velocity on the thermal stratification in a diffuser type seasonal thermal storage tank

Seong Keun Kim\* and Sung Yong Jung†

**Abstract** In this study, the thermal stratification in solar seasonal thermal storage tanks was numerically simulated. The effects of the aspect ratio (AR) and inlet velocity on the thermal stratification in the diffuser type heat storage tank were investigated. The temperature distributions inside the tank were similar with velocity fields. Jet flows from opposite diffusers encountered each other at the tank center region. Thereafter, the downward flows occurred, and this flows strongly affected the thermal stratification. When AR was smaller than 2, these downward flows influenced a further distance and enhanced mixing inside the tank. Thermal stratification was evaluated by thermocline thickness and degree of stratification, and AR of 3 had the highest degree of stratification. The inlet velocity effect was expressed with the ratio ( $Re/Ri$ ) of Reynolds and Richardson numbers. The second-order approximation was found for the relationship between the thermocline thickness and  $\log Re/Ri$ .

**Key Words** : Seasonal thermal storage tank (계간 축열조), Thermal stratification (성층화), Aspect ratio (종횡비), Inlet velocity(입구 유속)

### 1. 서론

태양열 축열조는 에너지의 생산과 수요가 불규칙한 시스템에 필수적인 설비로 효과적인 열 에너지 활용을 위해서는 열 저장 효율의 향상이 요구된다. 태양열 축열조에서는 탱크 내부 열 성층화를 통해 열 성능을 향상시킬 수 있으며, 따라서 태양열

축열조 내부의 열 성층화를 안정적으로 유지시키는 것이 중요하다. 탱크 내부 열 성층화의 기본 원리는 저온의 물이 저장된 탱크에 고온의 물이 들어와 혼합이 될 때 열적 부력을 이용하여 물의 혼합도를 감소시켜 온도의 성층화를 유지하는 것이다.

혼합형 축열조와 비교하여 온도 성층화가 잘 발달된 축열조의 유효에너지 이용률이 10%이상 크다고 보고되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 태양열 축열조 내부의 열 성층화를 개선시켜 열 저장 효율을 높이기 위한 다양한 연구가 수행되었다. Bonanos 와 Votyakov 는 열 저장 탱크 높이와 주입구의 재료 특성이 열 성층화에 영향이 있음을 발견하였다<sup>(3)</sup>. Jordan 과

† Department of Mechanical Engineering,  
Chosun University, Associate professor  
E-mail: syjung@chosun.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering,  
Chosun University, Ph.D Student

Furbo 는 가정용 소형 태양열 저장 탱크에 대한 모델링을 통해 냉/온수 유입구의 위치가 열 성층화에 영향을 있음을 보고하였다<sup>4)</sup>. Knudsen 은 소형 태양열 저장 탱크의 하단에서 혼합이 발생할 경우 가용 열 에너지가 감소하는 것을 확인하였다<sup>5)</sup>. Gandhi et al.은 탱크 내부에 열전달을 향상시키기 위한 핀을 사용하면 혼합 시간을 감소시킬 수 있으며, 핀의 크기 및 탱크 종횡비에 축열조 내부 성층화가 영향을 받는다고 보고하였다<sup>6)</sup>. García-Mari et al.은 축열조 내부의 온수 유입 유로에 유속을 낮춰주는 원추형 디퓨저를 설치하면 축열조 내부의 열 성층화가 촉진됨을 보여주었다<sup>7)</sup>. Kong 과 Ning 은 축열조 탱크 내부 유입구에 다공성 실린더를 설치할 경우 실린더가 디퓨저의 역할을 하여 탱크 내부의 열 성층화가 향상됨을 보였다<sup>8)</sup>. Yee et al.은 탱크 내부에 다공성 매니폴드를 설치하면 매니폴드가 디퓨저 역할을 하여 열 성층화가 향상된다고 보고하였다<sup>9)</sup>.

앞에서 살펴본 바와 같이 축열조 내부의 열 성층화는 일반적으로 탱크의 종횡비 유입과 유출에 의한 유동 혼합, 탱크 재료에 따른 열 손실 등과 같은 많은 요인들의 영향을 받는다는 것이 알려져 있으며, 디퓨저와 같이 유동을 제어할 수 있는 구조가 성층화 개선에 도움이 되는 것을 알 수 있다. 하지만 기존의 연구들은 가정용 저장 탱크와 같이 소형 축열조를 대상으로 연구가 진행되어 대한민국과 같이 계절에 따라 에너지 생산과 수요의 격차가 큰 지역에서 사용하는 계간 축열조에 동일하게 적용하기에는 한계가 있다

본 연구에서는 계간 축열용 탱크의 효율성을 높이기 위하여 축열조 종횡비 및 입구 유속 조건에 따른 축열조 내부 유동 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 축열조 내부 온도 분포로부터 축열조 내부의 열 성층화를 분석하고 성층화도를 정량적으로 비교하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 지배 방정식

축열조의 모델링 및 유동 해석은 Fluent (Ansys, Inc., USA)를 사용하였다. 이전 연구에서는 축열조

의 열 성층화 분석에는 2 차원 유동 해석으로도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다<sup>10)</sup>. 따라서 본 연구에서는 다양한 변수들의 영향을 효과적으로 검토하기 위하여 유동 해석의 계산 시간을 줄이기 위하여 2 차원 유동 해석을 진행하였다. 아래의 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식은 축열조 내부 유동 해석에 사용되는 지배방정식이다.

연속방정식:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \rho \beta (T - T_{ref}) \mathbf{g} \quad (2)$$

여기서,  $p$  는 정압이며,  $\boldsymbol{\tau}$  는 스트레스 텐서,  $\beta$  는 열 팽창 계수, 그리고 마지막 항은 중력에 의한 체적력을 나타낸다.

에너지 방정식:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

$C_p$  와  $k$  는 각각 정압 비열 및 열전도도이다. 해석에 사용된 메쉬 수는 139,222 개이며, 이전 벽면 유동에 의한 온도 구배를 확인한 연구에서 사용된 벽면 경계층 해석에 효과적이라고 알려진 Spalart-Allmaras 난류 모델을 사용하였다<sup>11)</sup>. Momentum 과 Turbulent Viscosity 및 에너지 방정식은 2 차 상향식을 사용하였다.

### 2.2 해석 모델

유동 해석에 사용된 계간 축열용 탱크 모델은 전남 농업기술원에 파일럿 테스트중인 축열용 탱크를 기본형 모델로 선정하였으며 온도와 입구 유속 조건은 시운전 조건을 참고하였다. 탱크 종횡비 및 입구 유속을 변화시키며 축열조 내부 열성층화를 비교하였다. 기본형 모델은 Fig. 1 에 나타낸 것과 같이 종횡비 1 을 가지는 구조이며 폭과 높이는 각각 5860 mm 를 가진다. 축열조 내부에 디퓨저

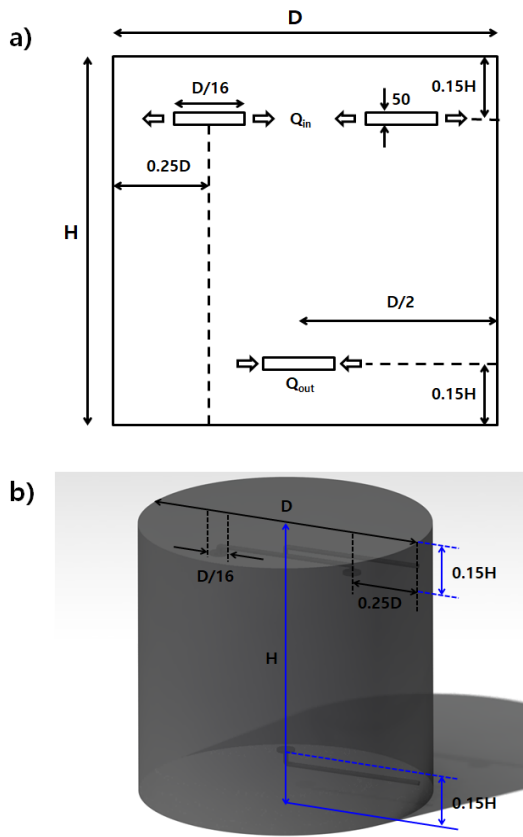


Fig. 1. a) The drawing of the simulated thermal storage tank. b) 3D schematic of thermal storage tank.

형상을 모사하기 위해 유입구와 유출구는 탱크 내부에 위치한다. 탱크의 유입구는 벽면으로부터  $0.25D$ , 상단으로부터  $0.15H$ 에 위치하며  $0.0625D$ 의 길이를 가진다. 작동 유체는 물을 사용하였으며 Fig. 1에 표시된 바와 같이 4개의 방향에서 유속 및 343K 온도의 입구 경계 조건으로 유입이 되도록 설정하였다. 초기 탱크 내부 물의 온도 조건은 298K로 설정하였으며 출구 경계 조건은 질량 유량과 대기압 조건에서 2개의 방향으로 배출이 되도록 설정하였다. 유동 해석은 입구 유속  $0.0126 \text{ m/s}$  조건에서 탱크의 종횡비를 변경하면서 transient 해석을 진행하고, 우수한 성능을 나타내는 종횡비 3의 형상조건에서 입구 유속을 변화시키며 입구 유속에 의한 성층화를 비교하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 종횡비에 따른 크기와 입구 유속 조건을 나타낸다. 기본 모델과 탱크의 부피를 동일

하게 선정하여 동일한 저장 용량을 가질 수 있도록 폭과 높이를 결정하였다. 입구 유속의 영향은 아래 식 (4)와 (5)의 점성력과 관성력의 비를 나타내는 Reynolds 수 (Re)와 자연대류와 강제대류 효과 비를 나타내는 Richardson 수(Ri)를 사용하여 나타낼 수 있으며 본 연구에서 사용된 입구 유속에 대응하는 Re와 Ri는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Simulated tank dimensions and inlet velocity condition with corresponding Re and Ri

Aspect ratio	D(mm)	H(mm)	$V_{in}(m/s)$	Re	Ri
1	5860	5860	0.012575	0.481	2494.3
2	4651.1	9302.2	0.012575	0.481	2494.3
3	4063.1	12189.3	0.012575	0.481	2494.3
			0.025150	0.962	623.6
			0.062875	2.405	99.8
			0.125750	4.811	24.9
5	3426.9	17134.7	0.251500	9621	6.2
			0.012575	0.481	2494.3

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (4)$$

$$Ri = \frac{g \beta \Delta T h}{v^2} \quad (5)$$

여기서,  $d$ 는 입구의 높이,  $v$ 는 입구 유속, 점도  $\Delta T$ 는 초기 온도와 입구 온도 차, 특성길이  $h$ 는 입구와 출구의 높이차로 계산하였다.

### 3. 해석 결과

축열조 내부 유동 구조와 그에 따른 내부 온도 분포를 이해하기 위하여 속도장과 온도장 결과를 각각 Fig. 2와 3에 표시하였다. 속도장과 온도장은 매우 유사한 형태의 분포를 띠는 것을 볼 수 있다. 유입구를 통해 내부에 들어오는 유체는 높은 모멘텀 에너지를 가지고 있어 탱크 내부에서 혼합 유동을 발생시킨다. 입구에서 벽면 방향으로 들어온 제트 유동은 좌우 벽면에 충돌하여 상부로 흐르는 유동과 출구 방향으로 흐르는 유동으로 나누어진다. 종횡비 1과 2에서는 상부로 흐르는 유동은 부력과 Coanda 효과로 인해 탱크 상부 벽면을 따라 상부에서 와류를 형성하는 것을 확인할 수 있다.

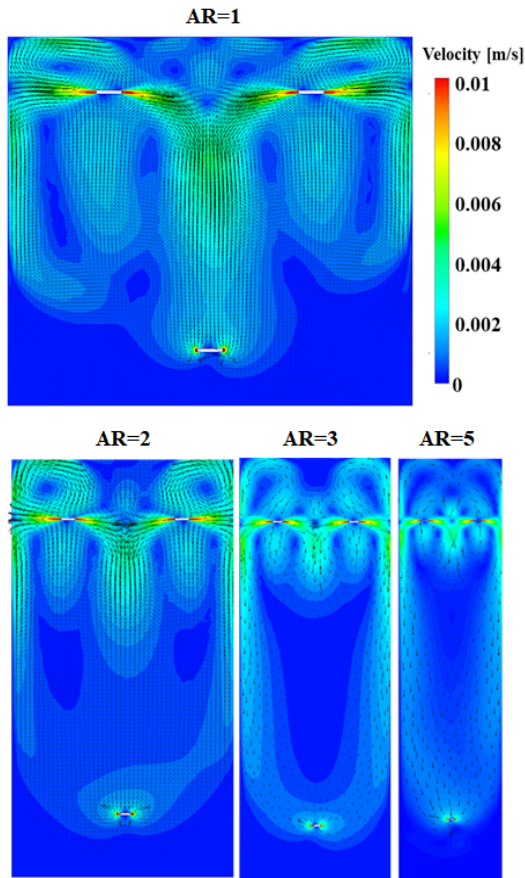


Fig. 2. Velocity contours and vectors with various aspect ratios with an inlet velocity of 0.012575 m/s.

중심 방향으로 들어오는 유동은 jet 유동이 서로 충돌하여 일부는 상부 벽면 유동과 혼합되어 와류를 형성하고 일부는 출구까지 강한 하강류를 형성한다. 이러한 유동은 입구로 들어온 고온의 물을 탱크의 상부와 하부로 빠르게 전달하고 Fig. 3과 같은 온도의 혼합을 유발한다. 반면, 종횡비 3과 5의 경우 중심 방향으로 유입되어 충돌하는 제트 유동에 의한 하강류가 일정 거리까지만 전달되고 이후 탱크 중심부 영역에서 낮은 속도의 유동을 형성하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 유동은 고온의 물의 혼합을 감소시키고 Fig. 3와 같이 탱크 중심에서 온도 성층화를 유발하게 된다.

Fig. 4(a)는 축열조 내부 성층화가 발생할 때의 전형적인 온도 분포를 나타낸다. 탱크 내부에 성층화가 발생하면 고온수와 저온수의 서로 다른 온도

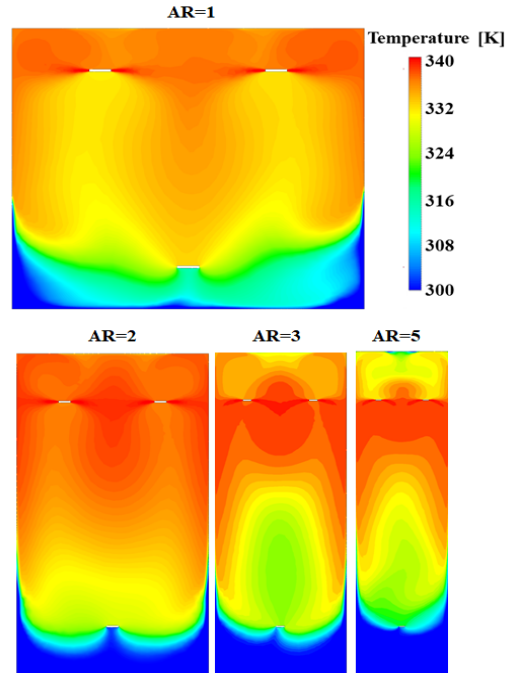


Fig. 3. Effect of tank aspect ratio on temperature distributions

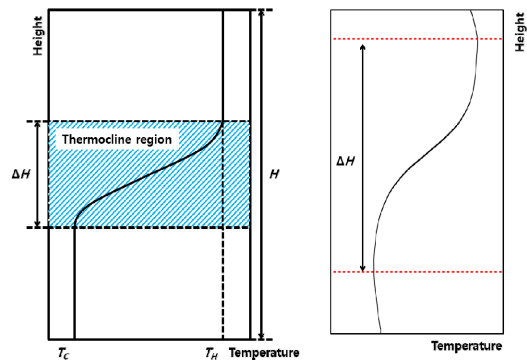


Fig. 4. (a) Typical temperature profile in a stratified thermal storage tank, and (b) thermocline region in practical temperature profile

층이 발생하며 고온층과 저온층 사이에 중간층인 천이 영역(thermocline)이 발생한다. 본 연구에서는 탱크 내부의 성층화 정도를 정량화 하기 위하여 성층화 정량화에 일반적으로 사용되는 성층화 두께와 성층도를 이용하여 성층화를 비교하였다. Fig. 4(b)와 같이 실제 온도 분포는 이상적인 경우와 차이가 존재하기 때문에 성층 두께는 탱크 입

구와 출구 사이에서 온도 구배의 경향성이 변화하는 상단과 하단 지점의 높이 차로 정의 하였다. 성층화 두께( $h^*$ )는 무차원화 된 값으로 아래 식(6)을 사용하여 정량화 하였다.

$$h^* = \frac{\Delta H}{H} \quad (6)$$

여기서  $H$ 는 탱크 전체의 높이이며,  $\Delta H$ 는 성층화 두께이다. 성층도는 아래의 식(7)을 사용하여 계산 하였다.

$$\Phi = \left( \frac{T_H - T_c}{\Delta H} \right) / \left( \frac{\Delta T_{ref}}{\Delta H_{ref}} \right) \quad (7)$$

$T_H$ 와  $T_c$ 는 각각 고온 영역과 저온 영역의 온도를 나타내며,  $\Delta T_{ref}$ 는 입구 경계조건 온도와 초기 온도차를 이용하였으며,  $\Delta H_{ref}$ 는 입구와 출구의 높이 차로 본 연구에서 적용된  $\Delta H_{ref}$ 는  $0.7H$ 이다.

탱크 내부 온도는 측정점의 위치에 따라 온도 값이 다르기 때문에 측정점의 위치가 성층도 값의 차이를 유발시킨다. 따라서 일반적으로 축열조 탱크의 온도 측정 시 탱크의 중앙 부분을 온도 측정점으로 선정하여 성층화를 평가한다. 본 연구에서도 탱크의 중앙부분 온도 분포를 이용하여 탱크의 성층화를 비교 및 평가하였다. Fig. 5는 탱크 중앙 부분에서 높이에 따른 온도를 나타낸다. 높이는 탱크의 전체 높이를 사용하여 무차원화 하였으며 온도는 아래의 식(8)을 사용하여 무차원화 하였다.

$$\theta = \frac{T - T_{ini}}{\Delta T_{ref}} \quad (8)$$

여기서  $T_{ini}$ 는 해석에 사용된 초기 온도이다. 종횡비 1과 2에서는 탱크 상단부에 형성되는 와류 및 강한 하강류로 인하여 온도 구배가 상대적으로 작게 발생하며, 특히 종횡비 1의 경우 완전 혼합이 일어나는 것을 볼 수 있다. 종횡비 3과 5의 경우에는 중심부에서의 하강 유동이 미치는 영역이 감소함에 따라 입구에서 출구까지 온도 구배가 상대적으로 크게 나타난다.

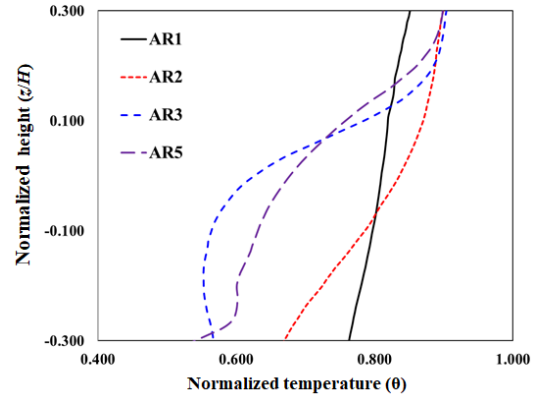


Fig. 5. Comparison of normalized temperature profiles along the tank centerline height with various aspect ratio

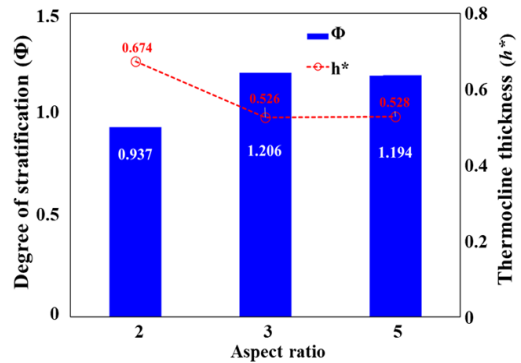


Fig. 6. Comparison of degree of stratification and thermocline thickness.

종횡비 1의 경우 Fig. 3과 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 유입구에서부터 출구까지의 온도차가 작으며 성층화가 아주 미약하여 종횡비 2, 3 그리고 5에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 종횡비 2의 경우 Fig.3에서 보는 바와 같이 상부 혼합 유동과 상대적으로 강한 하강류의 영향으로 종횡비 3과 5에 비하여 낮은 성층도 0.937을 가진다. 유입구에서 출구에 이르기까지 넓은 범위에 걸쳐 성층화가 발생하므로 성층 두께는 0.674로 가장 두꺼운 두께를 가진다. 종횡비가 2보다 크면 성층도가 증가하지만 종횡비 5에 비하여 종횡비 3에서 성층도가 더 높으며, 본 연구에서 사용된 종횡비 중에서 가장 높은 값인 1.206을 가진다. 종횡비 5에서는 벽면을 따라 흐르던 유동이 출구 부근에서 중앙으로

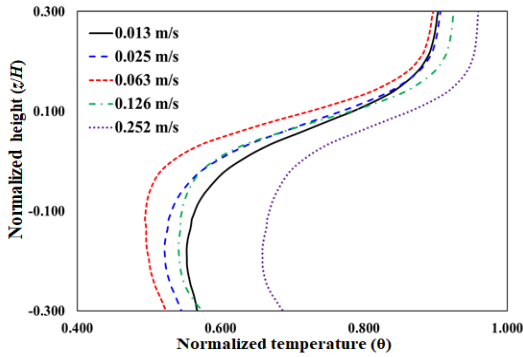


Fig. 7. Comparison of normalized temperature profiles along the tank centerline height with various inlet velocities

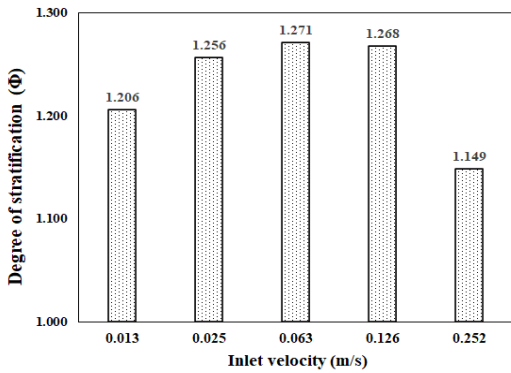


Fig. 8. Degree of stratification with various inlet velocities

향하면서 혼합이 일어나는 영역이 종횡비 3보다 크게 나타나는 것을 Fig. 3에서 확인할 수 있으며 이러한 혼합이 종횡비 3에서 상대적으로 더 높은 성층도를 유발한다. 본 연구에서 기본 모델론 선정한 계간 축열조와 같이 부피가 큰 대형 탱크의 경우 온도 성층화에 의해 이용 가능한 유효에너지를 크게 높일 수 있다. 따라서 Fig. 5와 6의 결과로부터 고온수가 탱크 상부에 머무르지 않고 유입구 방향으로 회귀하여 탱크 상부에 고온 성층을 형성하고, 하강류에 의한 혼합을 최소화할 수 있도록 종횡비로 설계하는 것이 중요함을 알 수 있다. 본 연구에서 비교한 종횡비 범위에서는 종횡비 3에서 성층도를 최대로 만들 수 있는 최적의 종횡비임을 알 수 있다.

본 연구에서는 최대 성층도를 가지는 종횡비 3의

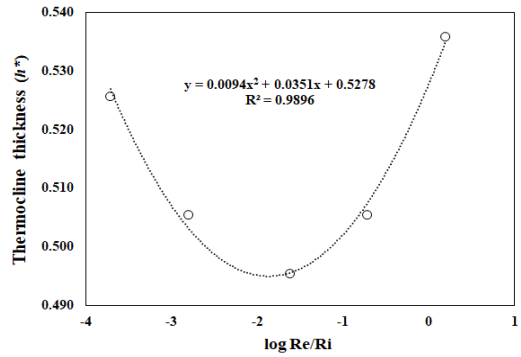


Fig. 9. Variation of the thermocline thickness with log Re/Ri. The curve represents a second-order approximation, with  $R^2 = 0.9896$

형상을 이용하여 입구 유속에 의한 성층도를 비교하기 위하여 Table 1과 같이 입구 유속을 변화시키며 성층화를 비교하였다. 입구 유속에 따른 온도 분포를 Fig. 7에 나타내었으며, 성층도를 Fig. 8에 비교하였다. 동일한 탱크 형상일 때 온도 분포의 경향성은 입구 유속에 상관없이 유사하게 나타나지만, 성층도와 성층 두께는 달라진다. 입구 유속이 증가할 때, 성층도는 점차 증가하여 입구 유속 0.063 m/s에서 최대 값 1.271을 가지며 그 보다 높은 유속에서는 성층도가 감소한다. Nelson et al.은 점성력, 관성력, 자연 대류, 강제 대류효과를 같이 나타내는 혼합 계수  $Re/Ri$ 가 성층 붕괴와 관련이 있음을 발견했다<sup>(12)</sup>. 성층도는 성층 두께와 밀접한 연관성을 가지고 있으며, 축열조 내부 성층화에 대한 입구 유속의 영향을 보다 일반화하기 위하여  $Re/Ri$ 값에 따른 성층 두께를 Fig. 9에 나타내었다. 입구 유속과 성층 두께의 관계를 명확하게 보이기 위하여  $Re/Ri$ 의 log값을 이용하여 x축을 표시하였다. 성층 두께와  $\log Re/Ri$ 는 2차 함수 형태로 표현이 되며 성층 두께가 최소가 될 때 가장 성층도가 가장 우수하다. 성층 두께는  $\log Re/Ri$ 가 -1.867일 때 최소 값을 가지며, 이 조건에서 가장 높은 축열조 내부 성층화를 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 태양열 계간 축열조 탱크의 종횡비와 입구 유속의 영향을 알아보기 위하여 탱크

내부의 열 성층화에 대해 수치해석적 연구를 수행하였다. 탱크의 유입구와 유출구는 계간 축열조의 성층화를 향상시키기 위해 디퓨저를 적용하여 탱크 내부에 위치하도록 설계하였다. 탱크 내부 유동에 의한 혼합이 온도 분포를 형성하는 주요 요인으로 속도장과 온도장은 유사한 분포 특성을 가진다. 마주보는 입구 디퓨저에서 토출된 jet 유동은 탱크 중앙 부분에서 충돌하고 강한 하강류를 형성하며, 이러한 하강류에 의한 혼합의 차이에 의하여 종횡비에 따른 성층화 특성은 크게 달라진다. 종횡비가 2보다 작은 경우 하강류가 입구로부터 먼 영역까지 영향을 미치며, 이에 따라 종횡비가 2보다 작은 경우 성층도가 낮음을 확인하였다. 성층 두께와 성층도로부터 종횡비가 3인 조건에서 최대 성층도 값을 가지는 것을 확인하였다. 종횡비 3의 형상 조건에서 입구 유속을 변화시키며 성층도를 비교하였다.  $Re/Ri$  값을 이용하여 입구 유속의 영향을 일반화하여 나타내고 성층 두께와  $\log Re/Ri$ 가 2차 함수 형태로 표현이 되는 것을 확인하였다. 본 연구에서 고려한 속도 범위에서는  $\log Re/Ri$ 가 -1.867 일 때 최적의 성층도를 나타내는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 해석 시간을 고려하여 2차원 유동 해석을 수행하였으나 축열조 내부에 발생할 수 있는 역류와 온도 분포에 의한 혼합을 관찰하기 어려운 한계가 있어 3차원 유동 해석이나 실험을 통해 보다 자세한 추후 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (NRF-2020R1C1C1004344).

## REFERENCE

- 1) Loehrke, R.I., Holzer, J.C., Gari, H.N., Sharp, M.K., 1979, Stratification enhancement in liquid thermal storage tanks. *J. of Energy*, 3, 129-130.
- 2) Pak, E.T., Hwang, S.I., Choi, Y.I., 1989, Experimental study on the thermal storage efficiency through variable porous manifolds in a

- test storage tank. *Solar energy*, 9, 37-43.
- 3) Bonanos, A., Votyakov, E., 2016. Sensitivity analysis for thermocline thermal storage tank design. *Renew. Energy* 99, 764-771.
- 4) Jordan U., Furbo, S., 2005. Thermal stratification in small solar domestic storage tanks caused by draw-offs, *Solar Energy* 78, 291-300.
- 5) Knudsen, S., 2002. Consumers' influence on the thermal performance of small SDHW systems—Theoretical investigations. *Solar Energy* 73, 33-42.
- 6) Gandhi, M.S., Joshi, J.B., Nayak, A.K., Vijayan, P.K., 2013. Reduction in thermal stratification in two phase natural convection in rectangular tanks: CFD simulations and PIV measurements. *Chem. Eng. Sci.* 100, 300-325.
- 7) García-Marí, E., Gasque, M., Gutiérrez-Colomer, R.P., Ibáñez, F., González-Altozano, P., 2013. A new inlet device that enhances thermal stratification during charging in a hot water storage tank. *Appl. Therm. Eng.* 61, 663-669.
- 8) Kong, L., Ning, Z., 2016. CFD simulations of thermal stratification heat storage water tank with an inside cylinder with openings. *Procedia Engineering* 146, 394-399.
- 9) Yee, C. K., Lai, F. C., 2001. Effects of a porous manifold on thermal stratification in a liquid storage tank. *Solar Energy* 71, 241-254.
- 10) Bouhal, T., Fertahi, S., Agrouaz, Y., El Rhafiki, T., Kousksou, T., Jamil, A. 2017. Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study. *Solar Energy* 157, 441-455.
- 11) Kim, S. K., Jugn, S. Y., 2020, "Effect of an aspect ratio on thermal stratification in a solar seasonal thermal storage tank," *Journal of the Korean Society of Visualization* 18, 28-34.
- 12) Nelson, J. E. B., Balakrishnan, A. R., Murthy, S. S., 1999 Experiments on stratified chilled-water tanks: Expériences menées avec des réservoirs d'accumulation d'eau glacée à stratification. *International Journal of Refrigeration* 22, 216-234.