〈일반논문〉
Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 18, No. 2 (28~34), 2020
(Manuscript received : 2020.07.14./Revised : 2020.08.22./Accepted : 2020.08.26.)
DOI:http://dx.doi.org/10.5407/jksv.2020.18.2.028

ISSN 1598-8430 Print
ISSN 2093-808X Online

태양열 계간 축열조 내부 열성층화에 대한 탱크 종횡비 영향 연구

김성근* · 정성용†

Effect of an aspect ratio on thermal stratification in a solar seasonal thermal storage tank

Seong Keun Kim* and Sung Yong Jung†

Abstract In this study, we numerically investigated the thermal stratification in solar seasonal thermal storage tanks. The vertical in/out flows were unsuitable for the thermal stratification in a large scale. The effect of an aspect ratio (AR) on the thermal stratification was investigated. When AR was less than 2, water adheres and flows along the upper wall due to buoyance and the surface effect. Thereafter, hot water flows down and a large scale vortex occurs in entire tank. For high AR, jet flows ejected from the inlet pipe impinges to the opposite wall and splits. The divided flows create two vortex flows in the upper and lower regions. These different flows strongly influence temperature and thermal stratification. The thermal stratification was evaluated in terms of the thermocline thickness and degree of stratification. Compared to ARs, the maximum degree of stratification was obtained with AR of 5 having the minimum thermocline thickness.

Key Words : Solar water storage tank (태양열 축열조), Thermal stratification (성층화), Aspect ratio (종횡비)

1. 서 론

태양열 저장 탱크의 열 성층화는 태양열 온수 난방 시스템의 열 성능에 큰 영향을 미친다. 특히, 에너지 생산과 수요 사이의 불균형 및 불규칙한 가용 에너지원이 존재하는 상황에서 열 성층화를 안정적으로 유지하는 것은 열저장 장치의 효율성을 향상시키기 위해 필수적이다. 탱크 내부 열 성층화의 기본원리는 고온으로 들어오는 물과 저온의 저장된 물의 혼합을 열적 부력을 이용하여 적절하게 감소시켜 온도의 성층화를 유지하도록 한다.

온도 성층화가 잘 발달된 축열조는 완전 혼합형 축열조에 비하여 유효에너지 이용률이 10%이상 크다고 보고되고 있다.[1,2] 태양열 축열조 내부 열 성층화를 개선하여 열 저장 장치의 효율을 높이기 위하여 다양한 수치해석 연구가 수행되었다. Bonanos와 Votyakov는 열 저장 탱크 높이와 주입구의 재료 특성이 열 성층화에 영향이 있음을 발견하였다.[3] Erdemir와 Altuntop은 저장 탱크 내부에 장애물을 수직으로 설치하면 열 성층화의 개선에 도움이 되는 것을 확인하였다.[4] Gandhi et al.은 중앙 가열식 원통형 탱크의 유동 패턴과 온도를 평가하고 드래프트 튜브 핀의 크기 및 종횡비에

† Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Associate Professor
E-mail: syjung@chosun.ac.kr
* Department of Mechanical Engineering, Chosun University, M.S. Candidate

내부 유동의 혼합과 성층화가 크게 영향을 받는다고 보고하였다.[5] 또한, García-Marí et al.은 온수 유입구에 원추형 디퓨저를 사용하면 열 성층화를 촉진시킨다는 것을 보여주었다.[6] Sagh와 Lakzian는 엔트로피 생성 축소를 통해 슬로싱 현상에 사용되는 직사각형 저장 탱크를 최적화하였으며,[7] 최근 Ali el al.은 태양 에너지 응용 분야에서 열 유체의 효과와 열 에너지 저장 탱크 설계를 연구했다.[8]

앞에서 살펴본 바와 같이 다양한 연구들이 열 저장탱크의 효율을 높이기 위하여 수행되었다. 특히, 열 성층화는 탱크의 종횡비, 주변으로의 열 손실, 입구와 출구 유동에 의한 혼합 등과 같은 많은 요인에 의해 영향을 받는다는 것이 알려져 있다. 하지만 기존의 연구들은 대부분 소형의 축열조를 대상으로 성층화를 연구한 결과로 대한민국과 같이 계절에 따라 에너지 생산과 수요 사이의 격차가 큰 지역에서 사용되는 계간 축열조에 적용하기에는 한계가 있다.

본 연구에서는 계간 축열용 탱크의 효율성을 높이기 위하여 축열조 종횡비에 따른 열 성층화를 비교하였다. 축열조 내부 열 성층화 분석을 위하여 유동 해석 시뮬레이션을 수행하고 열 성층화도를 종횡비에 따라서 정량적으로 비교하였다.

2. 해석 방법

2.1 지배 방정식

열 저장탱크의 모델링 및 유동 해석은 Fluent (Ansys, Inc., USA)를 사용하였다. 형상변화에 의한 열 성층화 경향성 분석에는 2차원 유동 해석으로도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있어,[9] 본 연구에서는 계산 시간을 줄이기 위하여 2차원 해석을 수행하였다. 축열조 내부 유동 해석의 지배방정식은 아래의 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식이다.

연속방정식:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식 :

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

여기서, p는 정압이며, τ는 스트레스 텐서, 그리고 마지막 항은 중력에 의한 체적력을 나타낸다.

에너지 방정식:

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

C_p와 k는 각각 정압 비열 및 열전도도이다. 난류 모델은 Spalart-Allmaras 모델을 사용하였으며, Momentum과 Turbulent Viscosity 및 에너지 방정식은 2차 상향식을 사용하였다.

2.2 해석 모델

해석은 전남 농업기술원에 파일럿 테스트 중인 계간 축열용 탱크를 base model로 하여 종횡비를 변화시키며 열 성층화를 비교하였다. Base model은 Fig. 1과 같은 5860 mm의 종횡비 1을 가지는 구조이다. 유입구는 탱크 상단으로부터 0.15H거리에 위치하며, 높이는 50 mm이다. 출구는 유입구와 동일한 크기이며 바닥면으로부터 0.15H 거리에 위치하였다. 작동 유체는 물을 사용하였으며 입구 경계조건으로 유속 0.0503 m/s, 온도 343 K를 설정하였

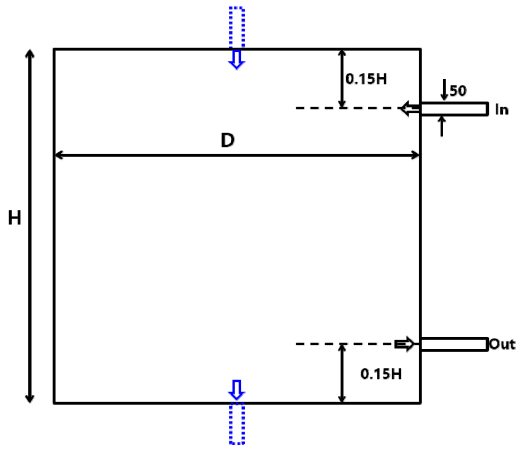

Fig. 1. The drawing of the simulated thermal storage tank

Table 1. Dimensions of the thermal storage tank

Aspect ratio	1	2	3	5
D(mm)	5860	4651.1	4063.1	3426.9
H(mm)	5860	9302.2	12189.3	17134.7
V_{in}*(m/s)*	0.0503			

다. 초기 조건은 온도 298 K으로 설정하고 출구 경계조건은 2.57868 kg/s 질량 유속과 대기압력 조건을 설정하였다. 종횡 비를 변경하면서 transient 해석을 진행하였으며 종횡 비 변화에 따른 탱크의 크기는 Table 1에 나타내었다. Base 모델과 부피가 같도록 하여 동일한 저장 용량을 가질 수 있도록 종횡비에 따른 저장 탱크의 폭과 높이를 결정하였다.

3. 해석 결과

입구와 출구 방향의 영향을 확인하기 위하여 Fig. 1에 파란 점선으로 표시된 탱크 상단과 하단의 가운데에 입구와 출구가 위치한 종횡 비 3을 가지는 탱크에 대하여 추가 해석을 진행하였다. Fig. 2는 수직 및 수평 방향으로 유입되는 경우의 축열조 내부 온도 분포를 비교한 결과이다.

Fig. 2에서 수직방향으로 물이 유입되면 강한 제트 유동의 영향으로 일정거리까지 뜨거운 유체가 전달되고 이로 인하여 성층화가 발생하지 않고 혼합형 축열조의 온도 분포를 가진다. 또한 jet유동이 한쪽 벽면으로 붙는 현상으로 인하여 좌우측 온도가 비대칭으로 형성되는 것으로 볼 수 있다. 반면 수평방향으로 유입되는 경우 뜨거운 유체가 유사한 높이에 위치하여 온도차에 의한 대류의 영향이 줄어들어 탱크 상단에서 온도 성층화가 형성된다. 기존 소형 축열조 탱크 연구에서는 중력방향으로 유체가 유입되는 형태의 탱크가 적용되기도 하지만 수평 방향으로 유체가 유입되도록 탱크를 제작하는 것이 중, 대형 축열조에서는 온도 성층화에 적합하다.

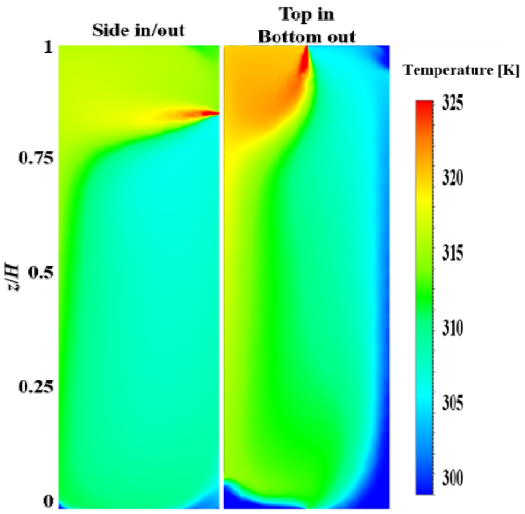

Fig. 2. Comparison of temperature fields when in/out fluids flow along horizontal (left) and vertical (right) directions (*H/D* = 3)

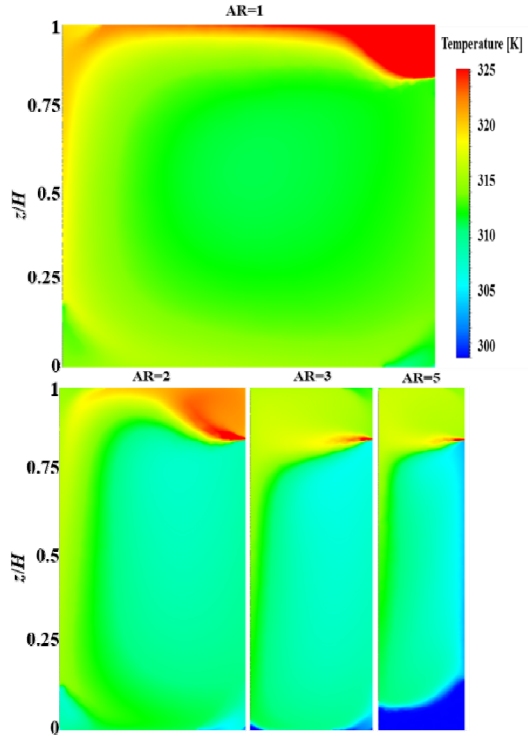

Fig. 3. Effect of aspect ratio on temperature contours

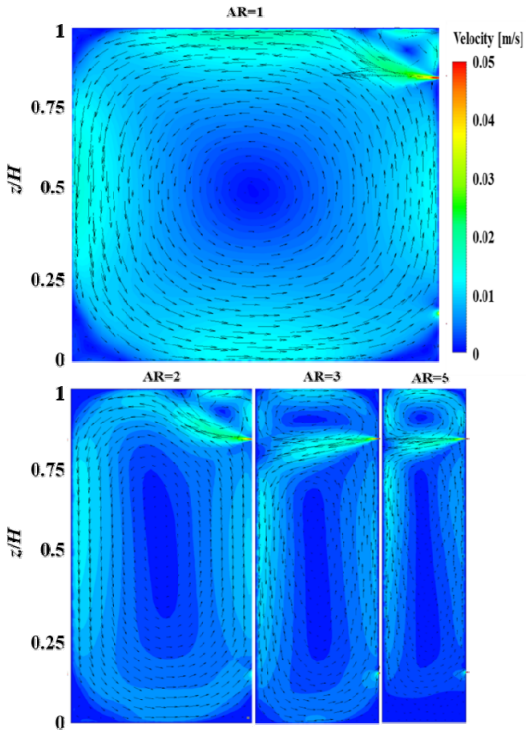

Fig. 4. Velocity contours and vectors with various aspect ratios

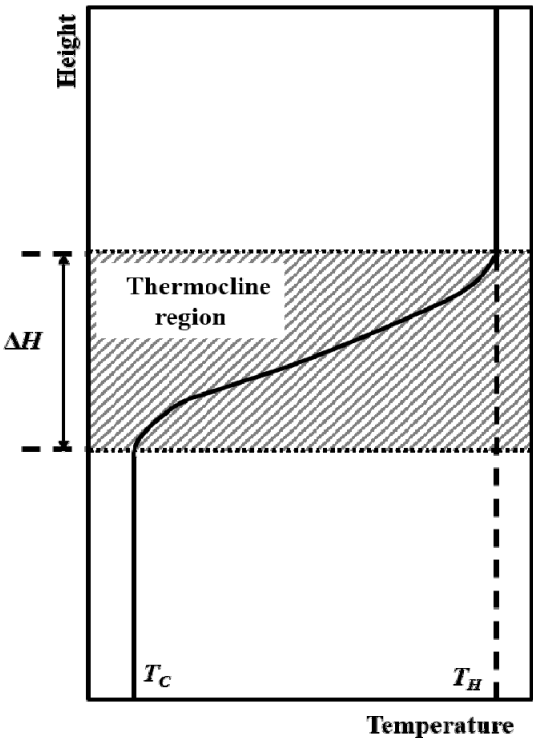

Fig. 5. Typical temperature profile in a stratified thermal storage tank

종횡비 변화에 의한 온도장 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 종횡비가 2보다 작을 때는 고온의 물이 탱크 윗면에 집중되어 있으며, 특히 고온의 물이 유입되는 입구 상단 모서리 부분의 온도가 높게 형성된다. 반면 종횡비가 3보다 큰 탱크에서는 입구 부근에서 유입수에 의해 고온이 유지되지만 탱크 전체적으로 유입구 높이를 기준으로 일정 영역에서 고온의 물이 층을 이루는 성층화가 나타난다.

온도장 분포의 형성을 이해하기 위하여 속도장 및 속도 벡터를 Fig. 4에 표시하였다. 탱크의 입구부에서 들어오는 높은 모멘텀 에너지를 가진 제트 유동은 탱크 내부에 mixing유동을 발생시킨다. 탱크의 폭이 큰 종횡비 1과 2에서는 입구에서 들어온 제트 유동이 부력과 Coanda 효과로 인하여 상부 벽면으로 향한다. 이 유동은 상부 벽면을 따라 이동 후 좌측면 벽을 따라 탱크 아래로 향하고 탱크 전체 영역에서 큰 와류를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이러한 유동으로 인하여 고온의 유입수가 탱크 상부에 밀집하며 탱크 중앙부의 온도가 가장 낮게 나타난다. 입구 상단 모서리 부근에서 정체된 유동을 유발하는 작은 와류가 형성되며 이 유동에 의하여 유입된 고온수가 입구 모서리 부근에 정체되어 온도가 높게 나타난다. 반면, 탱크의 폭이 좁은 종횡비 3과 5에서는 제트 유동이 상부 벽면으로 굽어지기 이전에 입구의 반대 벽에 충돌하고 이후 벽면을 따라 위와 아래로 유동이 나뉜다. 이렇게 분리된 유동에 의하여 입구에서 분사되는 제트 유동을 기준으로 탱크의 위와 아래에 큰 와류가 형성된다. 유입된 고온의 유체가 탱크 상부에 형성된 와류에 의하여 탱크의 상단부에 머물러 있게 되고 Fig. 3에서 확인되는 온도 성층화를 유발한다.

Fig. 5는 성층화가 발생한 축열조 탱크 내부 온도의 전형적인 분포를 나타낸다. 성층화로 인하여 탱크 내에 온수와 냉수의 서로 다른 온도 영역이 발생하며, 고온과 저온 영역의 사이에 중간 층인

천이 영역(thermocline)이 생긴다. 본 연구에서는 성층화 정도를 평가하기 위하여 일반적으로 성층화 정량화에 사용하는 두 가지 변수인 성층 두께와 성층도를 이용하였다. 무차원화 된 성층 두께(h^*)는 아래 식(4)을 사용하여 정량화 하였다.

$$h^* = \frac{\Delta H}{H} \tag{4}$$

여기서 H는 탱크의 전체 높이, ΔH는 성층 두께이다. 성층도는 아래의 식(5)를 사용하여 계산하였다.[10]

$$\Phi = \left(\frac{T_H - T_C}{\Delta H}\right) \Big/ \left(\frac{\Delta T_{ref}}{\Delta H_{ref}}\right) \tag{5}$$

T_H와 T_C는 각각 고온과 저온 영역의 온도를 나타나며, ΔT_{ref}는 해석에 사용된 입구온도와 초기온도 차로 구하였다. ΔH_{ref}는 입구와 출구의 높이차로 본 연구에서 ΔH_{ref} 는 $0.7H$이다.

측정점의 위치에 따라 온도 값이 다르기 때문에 측정점의 위치가 성층도 값의 차이를 유발 시킬 수 있지만, 일반적으로 평가에 사용되는 저장 탱크의 중앙부분 온도 분포를 이용하여 성층화를 비교 평가하였다. 탱크의 가운데 부분에서 높이에 따른 온도를 Fig. 6에 나타내었다. 높이와 온도는 무차원화하여 표시하였으며, 높이는 탱크의 전체 높이를 사용하여 무차원화 하였고 온도는 아래의 식(6)을 이용하여 무차원화하였다.

$$\theta = \frac{T - T_{ini}}{\Delta T_{ref}} \tag{6}$$

여기서 T_{ini}는 해석에 사용된 초기온도이다.

모든 종횡비 조건에서 탱크 상단부에 성층이 형성된다. 종횡비 1과 2에서는 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 탱크의 윗면에서부터 점차적으로 온도가 감소한다. 탱크 전체 영역에서 크게 형성되는 와류로 인하여 고온의 유체가 탱크 측면을 따라 바닥면으로 전달되어 높이가 낮아질수록 온도가 증가

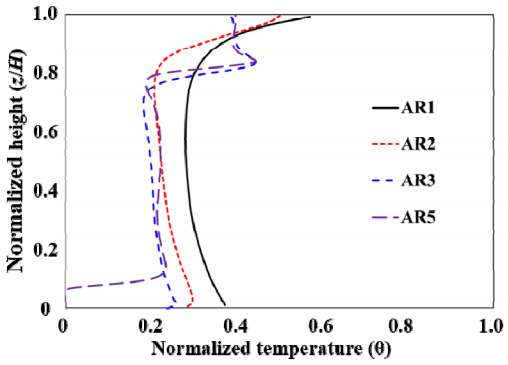

Fig. 6. Normalized temperature profiles along the tank centerline height

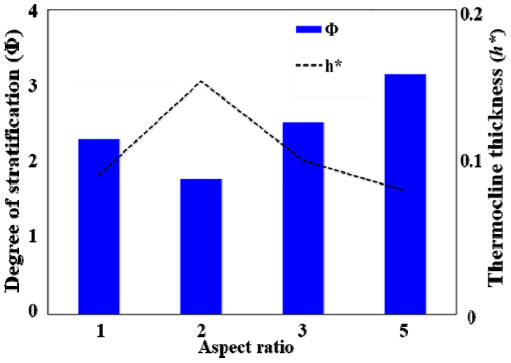

Fig. 7. Comparison of thermocline thickness and degree of stratification

하는 역온도 구배 영역이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 역온도 구배는 부력을 발생시켜 탱크 내부의 혼합을 증가시켜 성층화에 악영향을 미친다. 종횡비 3과 4에서는 유체 유입구 보다 높은 부분에서는 온도가 일정하며, 유입구에서부터 높이가 낮아질수록 온도가 감소하는 온도 성층이 발달한다. 낮은 종횡비에서와 달리 역온도 구배 영역이 관찰되지 않으며 온도 성층 영역 아래에서는 온도가 거의 일정하게 유지된다.

종횡비 변화에 따른 성층 두께와 성층도를 Fig. 7에 나타내었다. 종횡비 1과 2의 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 절대 수치로 유사한 거리에서 jet 유동이 상부 벽면으로 향하지만, 탱크의 폭이 좁은 종횡비 2에서는 jet유동의 전파거리가 탱크 중앙부에 해당한다. 이로 인하여 탱크 가운데 부분에서

종횡비 1에 비하여 종횡비 2에서 온도구배가 발생하는 구간인 성층 두께가 두꺼워지고 성층도는 감소한다. 종횡비가 1에서 2로 증가할 때 성층도가 감소한 후 종횡비가 증가할수록 점차 성층도가 증가하여 종횡비가 5일 때 최대 값 2.21을 가진다. 성층 두께는 성층도와 반대 경향성을 가지며, 종횡비 2에서 최대 두께 0.15를 나타내고 종횡비 5에서 최소 값 0.08을 보인다. 대형 탱크를 사용하는 계간 축열조는 온도 성층화에 의해서 이용가능한 유효 에너지를 크게 높일 수 있으며 Fig. 6과 Fig. 7의 결과로부터 역온도 구배가 발생하지 않도록 종횡비를 3보다 크게 설계하여야 하며, 본 연구에서 비교한 종횡비 범위에서는 종횡비 5에서 성층도를 최대로 만들 수 있다는 것을 알 수 있다. 다만, 종횡비가 커짐에 따라 축열조 설치에 들어가는 비용이 증가하기에 이에 대한 고려도 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 종횡비 영향을 알아보기 위하여 태양열 계간 축열조 내 열성층화에 대하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 소형 축열조와 달리 대형 축열조가 사용되는 계간 축열조에서는 수직방향 유/출입 유동은 성층화 형성에 적합하지 않음을 확인하였다. 낮은 종횡비와 높은 종횡비에서 탱크 내부의 전체 유동이 달라지며, 낮은 종횡비 탱크에서는 탱크 내부 전영역에서 와류가 발생하지만 높은 종횡비 탱크에서는 탱크 상부와 하부 각각에 와류가 발생되었다. 이러한 유동 구조의 차이로 인하여 종횡비에 따라서 온도 분포가 달라지며, 낮은 종횡비 조건에서는 바닥면에 역온도 구배가 발생하였다. 성층 두께와 성층도로부터 성층화를 정량적으로 비교하였으며, 성층 두께와 성층도는 종횡비의 영향을 크게 받는 것을 확인하였다. 성층도와 성층 두께는 종횡비에 따라 상반되는 경향성을 가지며, 종횡비가 5일 때 최대 성층도 값을 나타낸다.

본 연구에서 실질적인 설치비를 고려하여 종횡비를 5까지만 고려하였지만, 종횡비를 5보다 크게 증가시켜도 성층도는 계속 증가하지 않으며 추가 연구를 통하여 최대 성층도를 갖는 최적의 종횡비에 대한 검토가 필요하다. 또한 본 논문에서는 해석 시간을 고려하여 2차원 유동 해석을 수행하였지만 온도 분포와 성층화에 영향을 미치는 혼합이나 역류와 같은 자세한 유동 구조는 관찰이 어렵다는 한계가 있어 3차원 유동 해석이나 실험을 통한 보다 자세한 추후 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2020 년 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 mainfolds 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) Erdemir, D., Altuntop, N., 2016. Improved thermal stratification with obstacles placed inside the vertical mantled hot water tanks. Appl. Therm. Eng. 100, 20-29.
5) 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.
6) 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.
7) Saghi, H., Lakzian, E., 2017. Optimization of

the rectangular storage tanks for the sloshing phenomena based on the entropy generation minimization. Energy 128, 564-574.

8) Ali, T., Bakar, R.A., Sup, B.A., Zainudin, M.F., Ming, G.L., 2015. Study on thermal-fluid effect of thermal energy storage tank design in solar energy applications. Energy Proc. 68, 3-11.

9) 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.

10) Pak, E.T., Seong, S.W., Jung, W.C., 1990, The extraction efficiency of hot water storage by thermal stratification enhancement, Proceeding of the KSES 1990 Autumn Annual Conference, 32-37.