

태양열 축열조의 종횡비에 따른 열성층화 수치해석 연구

주홍진*, 김정배**, 곽희열***

*인하대학교 대학원(joo@inhaian.net)

충주대학교 에너지시스템공학과(jeongbae-kim@cjnu.ac.kr), *한국에너지기술연구원(mcjoo@kier.re.kr)

Numerical Study on Thermal Stratification of the Aspect ratio of Solar Thermal Storage Tank

Joo, Hong-Jin*, Kim, Jung-Bae**, Kwak, Hee-Youl***

*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

**Department of Energy system engineering, Chungju University(jeongbae-kim@cjnu.ac.kr)

***Korea Institute of Energy Research(hvkwak@kier.re.kr)

Abstract

The purpose of this study is to compare the effect on the thermal stratification under various aspect ratios in the solar storage tank using FLUENT. Numerical calculations of three designs with different aspect ratio were carried out to show the behaviour of stratification in a solar storage tank. The calculation results show that the thermal stratification of the 2.5 : 1 aspect ratio solar storage tank can be 6.22% higher than that of the 1.5 : 1 aspect ratio solar storage tank and 2.68% higher than that of the 2 : 1 aspect ratio solar storage tank.

Keywords : 성층화(Stratification), 축열조(Solar thermal storage tank), 수치해석(Numerical calculation)

기 호 설 명

T_i	: 유입수온도 (K)	d	: 축열조 지름 (mm)
T_s	: 초기온도 (K)	h	: 축열조 높이 (mm)
Re	: Reynolds 수	d_f	: 디퓨저 지름 (mm)
v	: 유입수 유속 (m/s)	d_i	: 입구 지름 (mm)
		h_f	: 디퓨저 두께 (mm)
		Fr	: Froude 수

1. 서 론

태양열 시스템에서 축열조 내의 열성층화 현상이 전체 태양열 시스템의 열성능에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 축열조의 열성층화 현상이 낮을 경우 축열조 내의 온도가 혼합되어 축열조 내의 상부 및 하단부의 온도차가 크지 않으며, 이에 따라 태양열 집열기에 공급되는 온도가 높아 집열기의 집열 효율이 감소하게 되며, 전체적인 태양열 시스템의 성능이 저하된다.

축열조 내의 열성층화 현상은 입구유속, 디퓨저 형상, 밀도, 중력, 부력, Thermocline, 축열조 형상 등과 같이 많은 인자들과 매우 밀접하고 복잡한 관계를 유지하고 있다.

Louise Jivan Shah¹⁾ 등은 축열조의 입구 형상을 세 가지로 제작 하여 유속에 따른 축열조 내의 열성층화 연구를 수행하였으며, 축열조 내의 입구 노즐과 입구 형상이 중요한 변수임을 강조 하였다. 이상남²⁾ 등은 축열조 성능에 영향을 끼치는 주요변수로서 온수의 공급속도, 디퓨저의 형상 및 크기, 슬롯 간격 등이 축열조의 성층화에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였으며, 축열조의 성층도를 높이기 위해서 디퓨저 직경은 축열조 직경의 25%를 사용하고 평판형 디퓨저의 경우 분사속도는 $0.05\text{m/s}(\text{Fr}=1.5)$ 이하로 유지하는 것이 성층화에 유리하다고 제시하였다.

정제동³⁾ 등은 종횡비의 제한이 있는 지하 축열조에서 기존의 원통형 축열조 방식과는 다른 사각형 축열조를 사용 시 디퓨저 형상이 축열조 내의 열성층화 현상에 미치는 영향을 수치해석을 통한 연구를 수행하였으며, Fr수는 낮을수록 좋은 성능을 보이고, Re수

는 크거나 작을 경우 성능이 떨어지고 최적의 값이 존재한다고 제시하였다.

그러나 축열조의 설계에 있어서 가장 먼저 설계 되어야 하는 것은 축열조의 용량을 결정 하는 것이며 그에 따른 축열조의 높이 및 지름 비율을 결정해야 하는 것이다.

일반적으로 축열조의 효과적인 열성층을 위해서는 종횡비의 비율이 높을수록 열성층화 현상이 높게 유지된다고 알려져 있다. 그러나 가정용 태양열 시스템의 경우 일반주택에 설치되어야 하기 때문에 설치면적 및 운반의 제한으로 인해 종횡비의 비율을 무한정 높일 수 없으므로 종횡비에 따른 열성층 현상을 규명하고자 한다.

따라서, 본 연구에서는 가정용 태양열 온수 및 난방 시스템에 사용되는 1톤 미만의 축열조에서 축열조의 종횡비에 따른 열성층 현상을 상용코드인 FLUENT를 이용하여 정량적으로 비교 분석 하였다.

2. 수치해석 조건

상용코드인 Fluent를 이용하여 축열조 내의 성층화를 알아보기 위해 각각 높이 및 지름의 비율이 1.5 : 1, 2 : 1, 2.5 : 1의 축열조 모델링을 수행하였다.

축열조의 성층화를 해석하기 위하여 축열조 외벽에서의 열전달은 고려하지 않고 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 풀게 되는데, 3차원으로 그림 1 그리고 그림 2와 같은 해석 영역을 설정하였다. 해석 영역의 Grid는 10mm 간격의 노드를 가지는 사각형 격자를 이용하여 설정하였고, 노드의 수는 1.5 : 1의 경우 275,624개, 2 : 1의 경우 286,420개, 2.5 : 1의 경우 279,242개이었다.

해석은 3차원 Unsteady 상태로 가정하고 시간에 따른 성층화 현상을 비교하였다. 운동량 방정식을 풀기 위해 Re수를 고려하여 층류유동 모델을 적용하였다. 입구 속도는 유량에 해당하는 속도로 균일 속도장으로 고

1) Louise Jivan Shah, Simon Furbo, Entrance effects in solar storage tanks, Solar Energy, Volume 75, Issue 4, October 2003, Pages 337-348

2) 이상남, 한국전산유체공학회, 한국전산유체공학회 학술대회논문집 2002년도 추계, 2002. 10, pp. 127 ~ 132

3) Jae Dong Chung, Sung Hwan Cho, Choon Seob Tae, Hoseon Yoo, The effect of diffuser configuration on thermal stratification in a rectangular storage tank, Renewable Energy, Volume 33, Issue 10, October 2008, Pages 2236-2245

려하였다. 입구 경계조건은 각각의 유량에 해당하는 속도로, 출구 경계조건은 압력출구 (Pressure outlet) 조건으로 지정하였고, 각각의 입구 조건은 모두 동일하게 0.03710781 m/s의 유속으로 계산을 수행하였다. 유동장의 지배방정식은 Second Order Upwind법을 이용하여 공간차분을 사용하고, 성층화 현상은 부력과 중력에 영향을 받음으로 중력과 부력을 위한 Boussinesq parameter를 사용하였다. Velocity-Pressure coupling은 PISO를 사용 하였다.

시간에 따른 성층화 현상을 알아보기 위하여 시간간격(Time step)은 1초로 계산하였으며, 탱크로 부터의 열손실은 없다고 가정하였다. 표 1 과 2는 축열조 모델링 및 경계조건을 나타낸 표이다.

표 1. 축열조 모델링 및 경계조건

종횡비	1.5 : 1	2 : 1	2.5 : 1
d	897.1 mm	815 mm	756.6 mm
h	1346 mm	1630 mm	1892 mm
Volume	850 ℓ	850 ℓ	850 ℓ
d _f	300 mm	300 mm	300 mm
d _i	27 mm	27 mm	27 mm
h _f	10 mm	10 mm	10 mm
v	0.03710781 m/s	0.03710781 m/s	0.03710781 m/s
Re	1013	1013	1013
T _s	318 K	318 K	318 K
T _i	283 K	283 K	283 K

표 2. CFD 모델에서 cell의 수

종횡비율	Cells
1.5 : 1	275,624
2 : 1	286,420
2.5 : 1	279,242

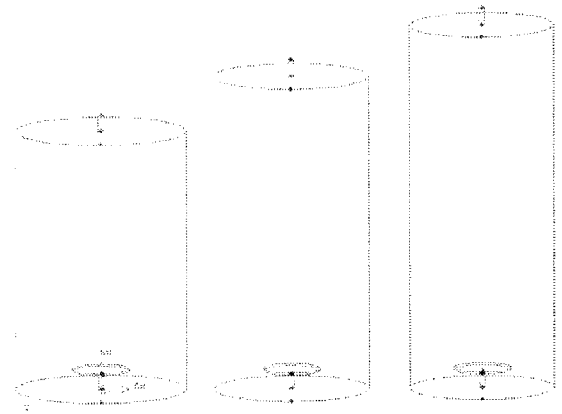


그림 1. 종횡비에 따른 축열조 형상

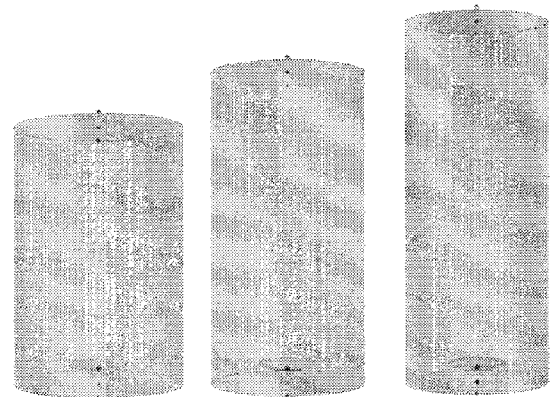


그림 2. 종횡비에 따른 축열조 Mesh

3. 수치해석 결과

1톤 미만의 가정용 태양열 축열조의 종횡비에 따른 성층화 특성의 해석을 위하여 본 연구에서는 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하였다.

그림 3부터 그림 8은 축열조 초기 저장수의 온도가 318K일 때 유입수 온도 283K를 0.03710781m/s로 유입 후 5분 후의 온도 분포를 각각 나타낸 것이다. 축열조의 온도 측정 포인트는 축열조 하단 15cm부터 축열조 상단 끝까지, 축열조 정 가운데의 온도를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 각각 세 가지 형태의 종횡비에 따라 축열조내 온도는 다르게

형성 되는 것으로 나타났으며, 축열조 상부의 온도와 축열조 하부의 온도가 만나는 범위인 thermocline 영역이 종횡비율에 따라 점차 높아지는 것을 알 수 있다.

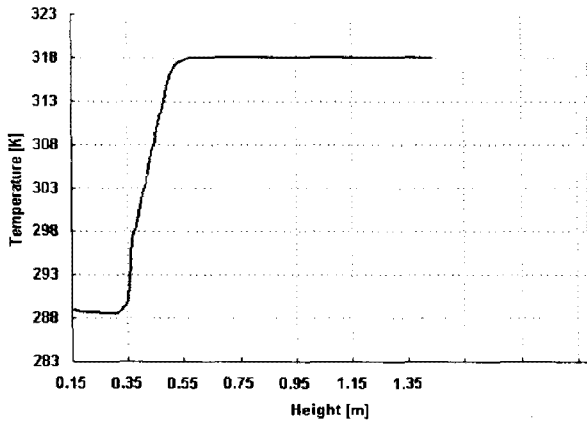


그림 3. 종횡비 1.5 : 1의 축열조 온도

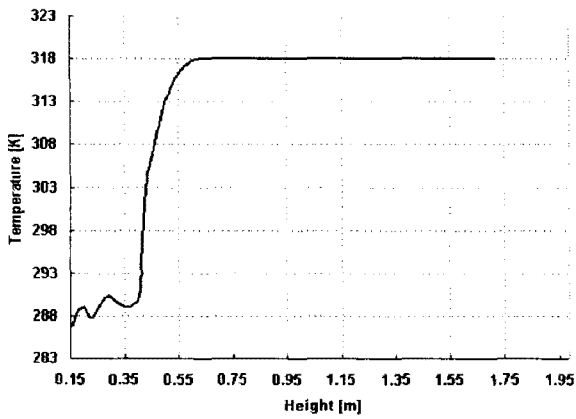


그림 4. 종횡비 2 : 1의 축열조 온도

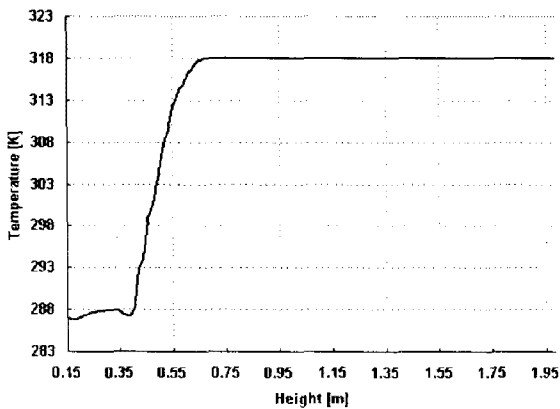


그림 5. 종횡비 2.5 : 1의 축열조 온도

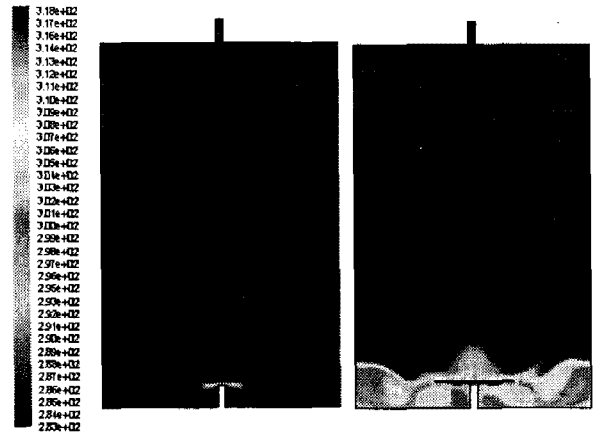


그림 6. 종횡비 1.5 : 1의 초기온도(좌) 및 1분 후 온도분포(우)

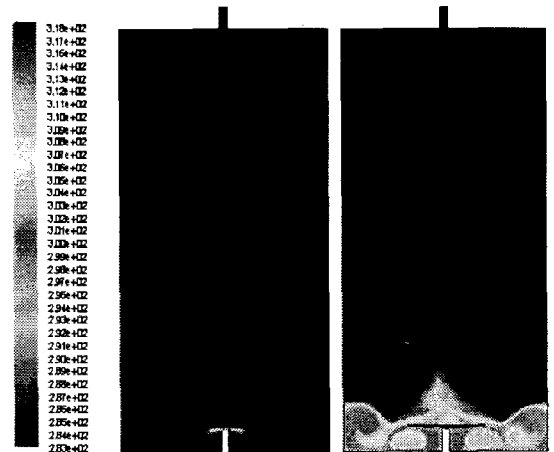


그림 7. 종횡비 2.0 : 1의 초기온도(좌) 및 1분 후 온도분포(우)

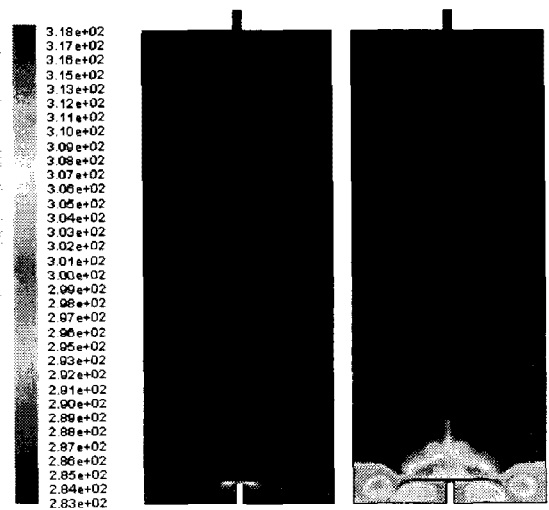


그림 8. 종횡비 2.5 : 1의 초기온도(좌) 및 1분 후 온도분포(우)

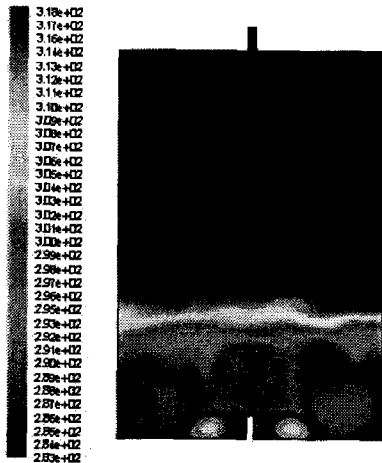


그림 9. 종횡비 1.5 : 1의 5분 후 온도분포

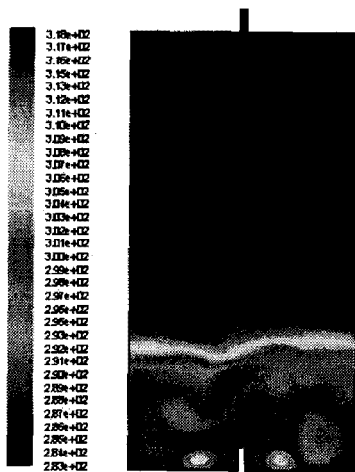


그림 10. 종횡비 2.0 : 1의 5분 후 온도분포

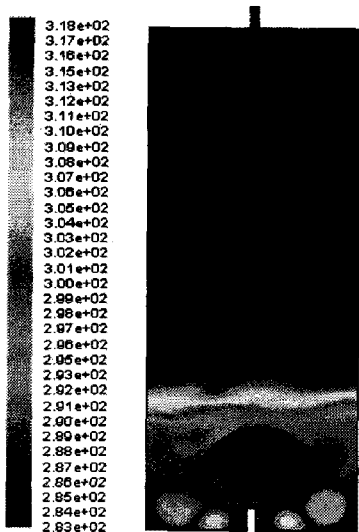


그림 11. 종횡비 2.5 : 1의 5분 후 온도분포

그림 6부터 그림 11까지는 종횡비율에 따른 축열조 초기 온도 및 1분, 5분 후의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 축열조 종횡 비율에 따라 온도분포가 다르게 나타는 것을 알 수 있다. 또한 디퓨저에 의해 온도가 혼합되지 않는 Dead Zone이 발생하는 것을 알 수 있다.

종횡비 1.5 : 1의 경우 유입수 유입 후 5분 후 314.5K부터 318K의 온도 영역이 전체 볼륨의 약 64.88%를 차지하고 있는 것으로 계산되어졌다.

종횡비 2 : 1의 경우 유입수 유입 후 5분 후 314.5K부터 318K의 온도 영역이 전체 볼륨의 약 68.42%로 나타났으며 이는 1.5 : 1과 비교하여 3.52%가 증가한 수치이다.

종횡비 2.5 : 1의 경우 유입수 유입 후 5분 후 314.5K부터 318K의 온도 영역은 전체 볼륨의 71.10%를 차지하는 것으로 나타났으며 이는 1.5 : 1과 비교하여 6.22%가 높으며, 2 : 1과 비교하여 2.68%가 높은 것으로 나타났다.

표 3은 종횡비에 따라 유입수 유입 후 5분 후의 축열조의 온도 분포를 영역별로 나타낸 것이다.

표 3. 유입수 유입 후 5분 후의 축열조 온도 영역

온도 영역 (K)	종횡비		
	1.5 : 1	2 : 1	2.5 : 1
283 - 286.5	4.80%	4.08%	4.37%
286.5 - 290	13.13%	12.06%	11.50%
290 - 293.5	6.69%	6.55%	4.61%
293.2 - 297	2.01%	1.89%	2.18%
297 - 300.5	1.93%	1.24%	1.18%
300.5 - 304	1.49%	1.22%	1.04%
304 - 307.5	1.48%	1.27%	1.09%
307.5 - 311	1.56%	1.43%	1.27%
311 - 314.5	2.03%	1.83%	1.66%
314.5 - 318	64.88%	68.42%	71.10%

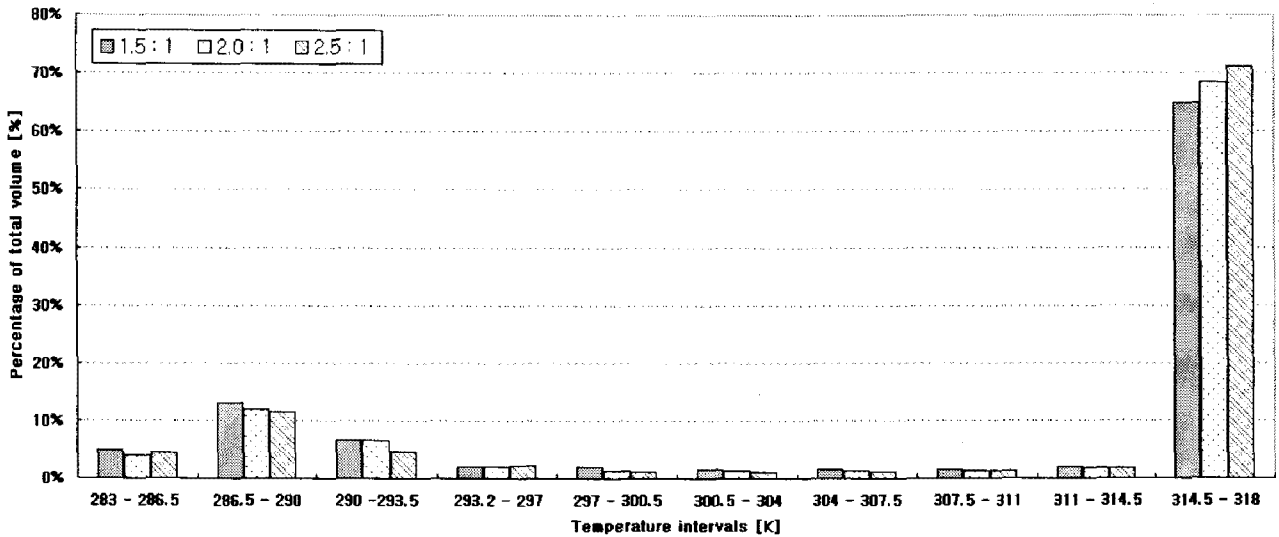


그림 13. 유입수 유입 후 5분 후의 축열조 온도 영역 분포도

그림 13은 유입수 유입 후 5분 후의 각각의 축열조 비율에 따른 온도 분포를 영역별로 나타낸 것이다. 축열조내의 온도 분포는 종횡비율이 높을수록 낮은 영역 283K-290K의 영역대의 볼륨이 적은 것으로 계산되어졌으며, 축열조 상층부 온도 영역대인 314K-318K의 영역은 축열조의 종횡비율이 높을수록 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

가정용 태양열 온수 급탕 및 난방 시스템을 위한 1톤 미만의 축열조 설계 시 종횡비율에 따른 열 성층화 현상을 알아보기 위해 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 각각 세 가지 타입의 종횡비율(1.5 : 1, 2 : 1, 2.5 : 1)로 계산하고 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1) 축열조의 형상은 종횡비율이 높을수록 열성층화에 유리한 것으로 계산되어졌다. 이러한 이론적인 온도분포는 기존의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

2) 종횡비별 유입수 유입 후 5분 후의 314K-318K의 분포의 경우 종횡비 1.5 : 1은 64.88%, 2 : 1은 68.42%, 2.5 : 1은 71.10%로 계산되어졌다.

3) 축열조의 종횡비율이 열성층화 현상에

미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며, 따라서 태양열 축열조 설계 시 종횡비율은 2 : 1 이상으로 설계 하는 것이 열성층화 현상에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1) Louise Jivan Shah, Simon Furbo, Entrance effects in solar storage tanks, Solar Energy, Volume 75, Issue 4, October 2003, Pages 337-348

2) 이상남, 한국전산유체공학회, 한국전산유체공학회 학술대회논문집 2002년도 추계, 2002. 10, pp. 127 ~ 132

3) Jae Dong Chung, Sung Hwan Cho, Choon Seob Tae, Hoseon Yoo, The effect of diffuser configuration on thermal stratification in a rectangular storage tank, Renewable Energy, Volume 33, Issue 10, October 2008, Pages 2236-2245

4) Ulrike Jordan, Simon Furbo, Thermal stratification in small solar domestic storage tanks caused by draw-offs

Solar Energy, Volume 78, Issue 2, February 2005, Pages 291-300