

봉과 링 조합형 아이스캡슐을 적용한 축열시스템의 열전달 해석

김명수* · 최형권** · 변성광†

(원고접수일 : 2008년 1월 4일, 심사완료일 : 2008년 2월 27일)

Heat Transfer Analysis of a Thermal Storage System using the Ice Capsule of Bar and Ring Module

Myoung-Su Kim* · Hyoung-Gwon Choi** · Sung-Kwang Byon†

Abstract : The shape and array of ice capsules are very important factors in ice thermal storage system because the heat transfer rate of the system strongly depends upon them. In this paper, a new type of ice capsule composed of bar and ring module is proposed to increase the efficiency of the ice thermal storage system. To investigate the heat transfer rate of the proposed ice capsule, numerical analysis of the incompressible Navier-Stokes equations is performed to compare the proposed bar and ring system with the conventional ice capsules. It is shown that the ice capsule composed of bar and ring has a higher heat transfer rate and a low outlet temperature than the conventional ice capsules for various packing ratios and entrance velocities. Furthermore, it is found that the optimal entrance velocity exists between 0.005 m/s and 0.007 m/s from the present numerical analysis.

Key words : Heat transfer rate(열전달율), Ice packing ratio(빙충전율), Ice thermal storage(빙축열), Entrance velocity(입구속도), Bar and Ring module(봉과 링 조합형)

기호설명

C_p : 비열 [kJ/kg °C]	v : 부동액 입구 속도 [m/s]
p : 압력 [N/m ²]	α : 열 확산율 [m ² /s]
\dot{Q} : 열전달율 [W]	μ : 점성계수 [kg/ms]
T : 온도 [K]	ρ : 밀도 [kg/m ³]
T_{in} : 축열조입구 평균온도 [K]	
T_{out} : 축열조출구 평균온도 [K]	
u, v : x, y 방향 속도 성분 [m/s]	

1. 서론

현재 거의 모든 에너지를 수입에 의존하고 있는 국내에서 국제 유가의 꾸준한 상승은 우리나라의

† 교신저자(동양공업전문대학 기계자동차공학부), E-mail : skbyon@dongyang.ac.kr, Tel : 02)2610-1905

* 서울산업대학교 에너지환경대학원

** 서울산업대학교 기계공학과 교수

산업기반에 지대적인 영향을 미치기 때문에 심각한 문제로 제기되며, 냉난방 시스템의 공조산업에서도 다양한 기술개발과 연구로 정부 정책과 함께 많은 방안을 수립하고 실행하고 있다. 따라서, 1991년부터 보급 시행된 빙축열시스템의 경우 최근의 고유가 추세로 인하여 향후 지속적인 공급이 이루어질 것으로 예상된다.

빙축열시스템은 값 싼 심야 전력을 이용하는 장점을 가지고 있는데 저렴한 운전비에 대한 계산 및 최적운전방법에 대해서는 Choi^[1]와 Kim^[2]에 의해 많이 진행되어 왔다. 기술개발 측면에서도 초기에는 심야에 얼음을 얼려 주간 시간대에 냉방을 한다는 자체가 기술이었지만 캡슐형의 시스템에서는 이미 국산 기술에 의해 개발이 되었고, 관외차빙형도 축열조의 국산화가 완료 되었으며 슬러리 시스템에서도 장비의 일부는 국내에서 제작하여 보급 중이다. 또한 시스템의 고 효율화를 위하여 빙충전율(Ice Packing Factor)을 향상시키거나 축열조의 설치면적을 축소하는 방법 및 캡슐형상의 설계 등이 에너지 절감의 차원에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

Yoo와 Kang^[3]은 빙충전율을 높이기 위하여 구형 캡슐의 경우에 대하여 기하학적인 접근 방식을 통하여 연구하였는데 큰 구형캡슐 사이의 공극을 작은 캡슐로서 채우는 방법으로 빙충전율을 50%에서 60%로 향상시키는 연구를 제시하였다.

Song^[4], Moon^[5] 등은 구형이 서로 면을 맞대고 있는 FCC(Face-Centered Cubic)방법으로 충전시 구형이 중앙에 위치하는 BCC(Body-Centered Cubic)방법보다 최대 74%의 충전율을 향상시킬 수 있기 때문에 캡슐의 적층방법을 달리하여 축열조의 크기를 줄이는 연구를 제시하였다.

또한 Kang^[6]은 부동액유체(브라인)가 균등하게 흐를 수 있도록 디퓨저 구멍(hole)의 크기를 다르게 설계하였고 결빙이 완료된 캡슐이 부력에 의해서 떠오르는 것을 방지하는 다공판(Grating)을 도입하였다. 이에 따라 대형 개방형 축열조의 경우 축열조 내부에 사(Dead)공간을 줄여 축열조 면적을 최소화하였다.

Cho^[7]와 Kim^[8] 등은 축열시스템에서 열매체인

부동액 유체 유동의 원활함이 축열조 열교환 효율에 큰 영향을 미치기 때문에 축열조가 효과적으로 냉 온수를 저장하고 방출하는 저장조로서의 역할을 수행하도록 디퓨저 형상의 변화를 통하여 축열조의 성층화를 촉진시키기 위한 방안을 연구하였다.

일반적으로 빙축열시스템의 효율을 증대시키기 위해서는 빙충전율을 향상시키고 얼음의 표면적을 크게 하여 열전달 면적을 증가시켜야 한다. 이의 중요한 인자로서 특히 캡슐형 빙축열시스템에서는 축열 매개체 용기의 형상, 축열조 내의 축열 매개체 용기들의 배열구조 및 형상 그리고 열매체인 부동액 유체의 원활한 유동의 확보 등이 있다.

현재 빙축열장치에서 많이 사용되고 있는 축열 매개체인 아이스캡슐의 형상으로 구(Ball)형 및 나선구조의 원통형 봉구조(Bar)를 Fig. 1의 (a), (b)에 나타내었다. 그러나 실제 빙축열 시공 시 일반적으로 수십 만 개의 아이스캡슐을 적층식으로 시공하고 있어 위 두 가지형태는 설치 시 적층의 어려움 및 운전 중 열부하에 의한 아이스캡슐의 파손, 교체 등 사후관리 관점에서 문제점이 발생하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 축열 매개체의 형상과 배열구조의 중요성을 바탕으로 Fig. 2와 같은 나선형의 봉에 링(Ring)을 삽입한 조합형 아이스캡슐을 제안하고자 한다. 제안된 모델의 장점은 모듈식으로 설치하기 때문에 위에서 언급한 시공이나 사후관리의 용이성이 있고 또한 형태적으로도 열전달 측면에서 많은 이점이 발생하리라 예상된다.

따라서 본 연구에서는 제안된 조합형(Bar & Ring) 아이스 캡슐과 기존의 아이스 캡슐들을 CFD(전산유체역학)를 이용한 수치해석을 하여 열전달 효율을 비교 분석하여 본 연구에서 제안한 조합형 아이스 캡슐의 실무 적용 가능성을 고찰하고자 한다

이의 연구방법으로 각 형상별로 축열 매개체인 캡슐의 체적을 달리 하여 두 종류의 충전율을 설정하여 각기 다른 형상의 배열구조에 의한 열전달의 특성을 연구하고 또한 빙축조 상부 입구에서 유입되는 브라인, 즉 부동액 유체의 속도를 변화시켜 최적의 부동액 유체 유속범위를 구하고자 한다

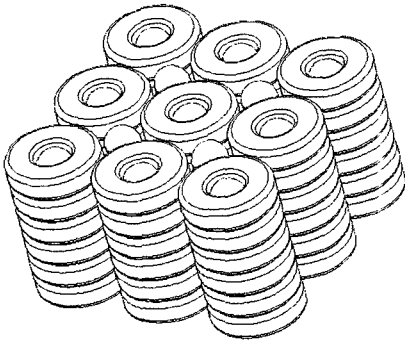
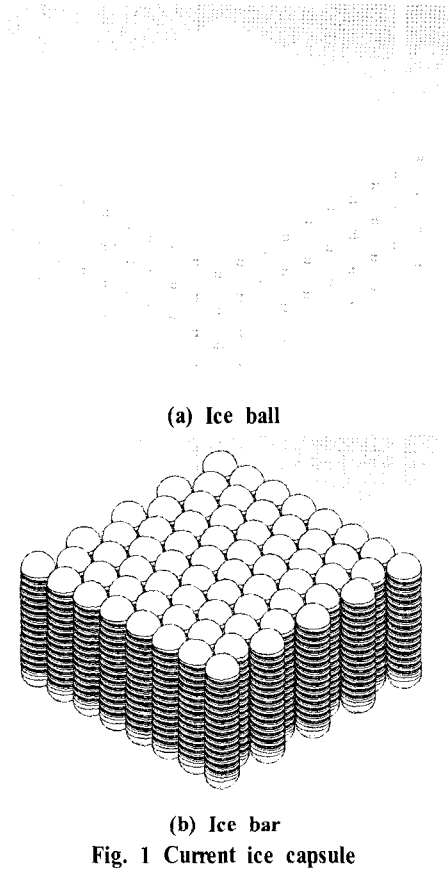


Fig. 2 Proposed ice capsule module(Bar & Ring)

2. 지배방정식 및 수치해석 기법

2.1 지배방정식 및 수치법

지배방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식

과 열전달 방정식이다. 지배 방정식은 아래와 같이 표시되며 강제 대류에 의한 열전달 양에 비해서 자연 대류에 의한 열전달 양은 매우 작으므로 무시한다.

연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \tag{2}$$

에너지 방정식

$$\rho \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T \tag{3}$$

위의 정상상태 강제 대류 열전달 방정식은 SIMPLE 알고리즘을 이용하여 해석한다. 수치해석 코드는 상용코드인 Fluent를 사용하였고 유동장은 층류이므로 난류모델은 고려하지 않았다. 또한, 본 연구에서 축열매개체인 아이스 캡슐의 상변화는 고려하지 않는다.

2.2 격자계 및 경계조건

축열 매개체인 아이스 캡슐의 전체 열전달 표면 부피는 각 형상별로 오차 범위를 3% 이내에서 유지하도록 Solid - Works로 모델링을 하였다.

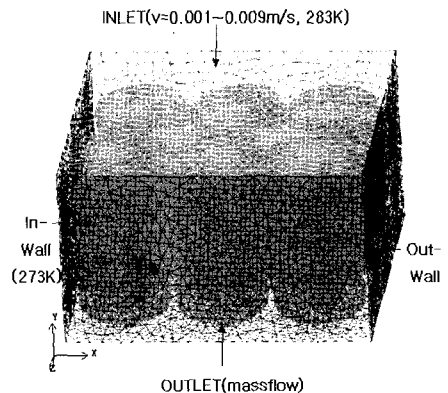


Fig. 3 Boundary condition

또한 계산영역을 축소하기 위하여 수치해석을 위한 축열조의 크기는 $W \times D \times H = 800 \times 800 \times 450\text{mm}$ 로 설정하였다.

Mesh는 ICEM-CFD를 이용하여 사면체 격자계(Tetra)로 생성하였고 최대 element수는 약 148만개, 최대 node수는 약 26만개 정도로 본 연구에서 생성한 격자의 일부분과 경계조건을 그림 Fig. 3에 예시하였다.

경계조건은 내벽 즉 축열 매개체의 온도를 273K로 설정하고, 상부 입구에서 온도가 283K인 부동액 유체가 유속 0.001m/s 에서 0.009m/s 사이로 유입 되며 하부 출구는 무 응력(traction free) 경계조건으로 설정하였다.

외벽은 단열조건이고 축열조 내에서의 유동은 Reynolds 수가 약 450정도로 매우 느리기 때문에 층류로 가정하고 계산하였다.

열교환 효율을 알아보기 위하여 축열조의 입구와 출구의 평균온도의 차이를 변수로 하여 입구 부동액 속도에 따른 각 축열매개체 형상별 열전달을 계산 하였다.

$$\dot{Q} = \rho A v C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

여기에서, \dot{Q} 는 열전달율, v 는 부동액 유체의 입구속도이고, T_{in} , T_{out} 은 축열조 입구와 출구의 평균온도이다.

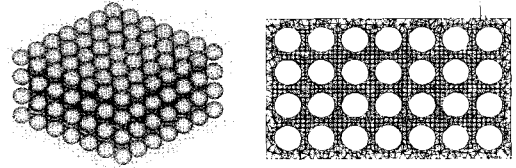
계산에 사용된 열전달을 위한 부동액 유체는 기존 빙축열시스템에서 많이 이용되고 있는 에틸렌글리콜 30% 수용액으로 0℃기준 비열 3.383(kJ/kg℃), 밀도 1.045 (kg/m³)값을 사용하였다.

2.3 수치해석을 위한 모델

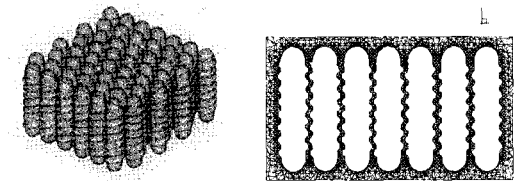
본 연구에서는 제안된 조합형(Bar & Ring) 아이스 캡슐의 열전달 효율을 고찰하기 위하여 기존의 Ice Bar와 Ice Ball을 포함한 3가지 형상에 대하여 Table 1과 같이 동일부피(0.20849 m³)에 대하여 표면적을 100%로 기준한 충전율이 낮은 경우(Low Packing)와 110%로 충전율이 높은 경우(High Packing)로 분류하여 입구 부동액 유체 속도의 변화에 따른 열전달을 비교하였다.

Table 1 The cases of the simulation

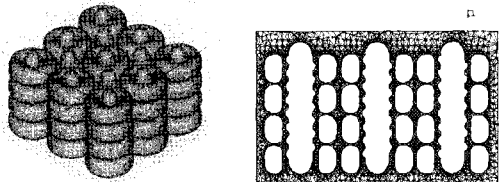
Case	Type	Ice Packing Factor	Element No. (X10 ³)	Node No. (X10 ³)
1	Ball-1	Low Packing	595	104
2	Ball-2	High Packing	1,482	260
3	Bar-1	Low Packing	1,397	249
4	Bar-2	High Packing	1,455	252
5	Bar&Ring-1	Low Packing	1,332	238
6	Bar&Ring-2	High Packing	1,394	248



(a) Low packing ball type(case 1)



(b) Low packing bar type(case 3)



(c) Low packing bar&ring type(case 5)

Fig. 4 The shapes of numerical analysis model

형상 및 격자 형태는 6개 모두를 예시하여야 하나 지면 관계상 Bar, Ball, Bar & Ring의 대표 형상에 대하여 충전율이 낮은 경우만 Fig. 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열전달율

Fig. 5와 Fig. 6은 각 형상에 대하여 축열 매개체들의 충전율이 낮은 경우와 높은 경우 각각 입구 유체 속도에 따른 열전달율을 비교한 것이다. 두 경우 모두 Bar & Ring, Bar, Ball 순으로 열전달율이 높은 것으로 나타났으며 속도에 대해서는 전체적으로는 속도가 빠를수록 열 전달률이 높았다.

Ball의 경우 축열 매개체의 형상이 구형이므로 상대적으로 열전달 표면적이 작으며, 특히, 실제 현장시공에서는 Ball을 규칙적으로 배열하기가 어렵기 때문에 열전달 효율도 수치해석결과 보다 더욱 낮을 것으로 예상된다.

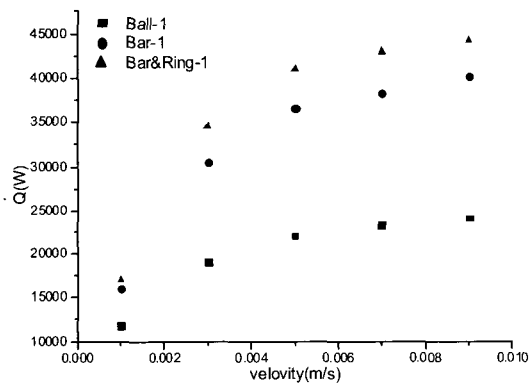


Fig. 5 Comparison of heat transfer rate with velocity at low packing factor cases

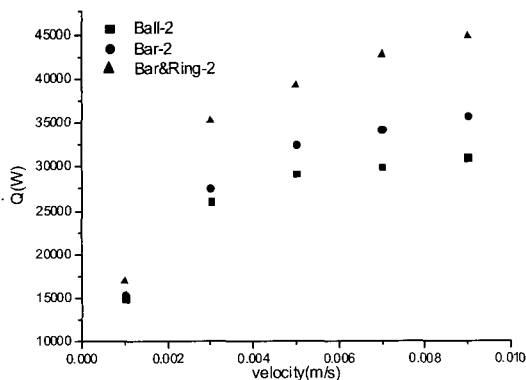


Fig. 6 Comparison of heat transfer rate with velocity at high packing factor cases

Ball보다는 Bar의 경우가 열전달율이 높지만 Bar 형태는 충전율이 너무 높은 경우 충전율이 작은 경우 보다 열전달율이 낮은 결과를 보여주었다. 이것은 Bar의 구조적 특성상 상하 방향인 한 방향으로 유로가 형성되어 충전율이 높아 축열 매개체의 개수가 너무 많으면 유로가 너무 작기 때문에 상대적으로 열전달율이 떨어지는 것으로 판단된다.

Bar & Ring과 Bar 형태의 축열 매개체는 두 형상 모두 일정한 배열을 할 수 있는 구조이다. 그러나, 기하학적 형상 면에서 Ring 구조를 Bar에 삽입하는 Bar & Ring 형상이 Bar 보다 열전달 표면적이 넓고, 또한 축열조 내의 유체의 흐름이 상하 방향 뿐 아니라 좌우 방향에서도 원활하기 때문에 열전달율이 높은 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 각 Case별로 입구 속도에 따른 열전달율을 나타낸 그림으로 속도가 커짐에 따라 열전달율이 증가하나 속도가 0.007m/s 이상부터는 속도의 증가에 따른 열전달율의 증가가 매우 적음을 알 수 있다. 빙축열시스템에서 너무 빠른 부동액 유체의 속도는 실제 축열시스템의 열교환 효율을 떨어뜨리는 요소로 작용하기 때문에 실무에서 축열조 내의 유속은 매우 중요하며 일반적으로 시공 시 빙축열 핸드북^[9]에서는 경험적인 값으로 입구속도 0.003 m/s에서 0.009 m/s 사이로 설계하고 있다. 따라서, 본 연구의 수치해석 결과 빙축열 시공 시 최적의 입구유속은 0.005m/s 에서 0.007m/s 사이로 판단된다.

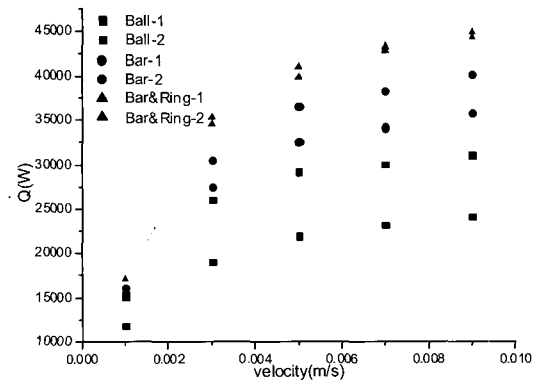


Fig. 7 Comparison of heat transfer rate with velocity at all cases

특히, 제안된 Bar & Ring 형상이 기존의 Ball, Bar형상보다 전체적으로 열전달 효율이 높은 것을 볼 수 있었으나 다른 두 형태와는 달리 충전율의 차이가 열전달효율에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

3.2 온도분포

이 절에서는 입구 속도에 따른 축열조 하부에서 유출되는 유체의 온도를 비교 검토한다. 하부에서의 토출되는 유체의 온도가 낮다는 것은 입구와 출구의 온도차가크기 때문에 열전달 효율이 좋은 것을 의미한다.

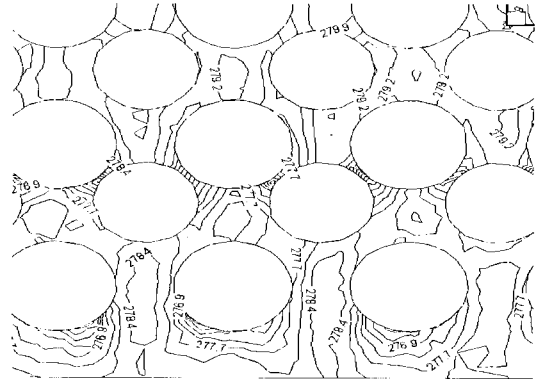
Fig. 8은 수치해석의 결과 도출된 최적 유속 범위인 0.005m/s인 속도에서 낮은 충전율을 가지는 3가지 형상에 대한 수직단면에 대한 온도 분포 값을 나타낸 그림이다. Fig. 8 (a)의 Ball 형상에서는 하부 출구 온도가 277.7K로 나타났고, (b)의 Bar 형상은 276.2K이며 (c)의 Bar & Ring 형상에서는 출구 온도 값이 274.5K로 가장 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Ball 형상의 경우 형상도 원형으로 표면적이 가장 작고 구가 상하방향이나 좌우방향으로 사이간격 없이 일정하게 배열되어 있어 부동액 유체의 흐름을 방해하는 구조로 되어 있으며 Bar 형상 경우도 축열매개체 형상은 나선형으로 표면적도 넓은 편이고 유체의 흐름을 원활하게 할 수 있지만 배열 구조를 보면 유체가 좌우 방향으로 흐르지 못하며 하부 방향으로만 흐를 수 있도록 되어있는 구조이다.

그러나 Bar & Ring 형상의 경우 Bar에 Ring이 삽입 되어있는 형상이기 때문에 상대적인 열전달 표면적이 넓고 일정하게 배열할 수가 있기 때문에 유체가 상하, 좌우로 고르게 흐를 수가 있어 다른 두 형상보다 상대적으로 열전달 효율이 높은 경향을 가지는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 축열조의 크기를 $W \times D \times H = 800 \times 800 \times 450\text{mm}$ 로 작게 설정하여 계산하여 각 형상별 입출구의 온도 값들이 큰 차이를 나타내어 주지는 않았지만 일반적으로 축열 매개체 캡슐의 갯수가 축열조의 경우 많게는 60만개 이상이 사용되는 점을 고려할 때 전체적인 열교환 정도는 비례

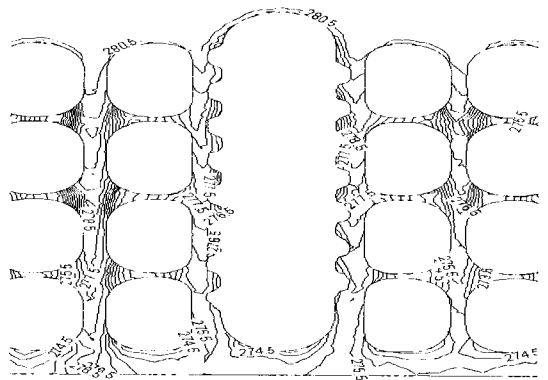
적으로 증가하여 효율이 많이 상승될 것으로 판단 된다.



(a) Temperature contours of the ball(case 1)



(b) Temperature contours of the bar(case 3)



(c) Temperature contours of the bar & ring (case 5)

Fig. 8 Vertical temperature contours at $V=0.005\text{m/s}$

Fig. 9는 높이에 따라 세 가지 경우의 수직분포

에 따른 온도 값을 도시한 그림으로 Ball 형상의 경우 다른 두 경우보다 떨어지는 온도 곡선이 완만하며 150mm 정도부터 하부의 출구까지 온도변화가 거의 없다. 이는 유속은 느리지만 유체가 흐르면서 구형 형상 때문에 약간의 박리와 후류가 발생되고 유체의 흐름이 균등하지 않아 상부에서부터 열교환 성능이 떨어지며 하부에서도 온도분포가 일정하지 않은 것으로 보인다.

반면에 Bar 형상과 Bar & Ring 형상은 유체가 고르게 흘러 온도가 순차적으로 떨어지며 특히, Bar & Ring 형상의 경우 Bar 형상보다 좌우의 흐름이 원활하여 하부로 갈수록 열교환에 의해 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

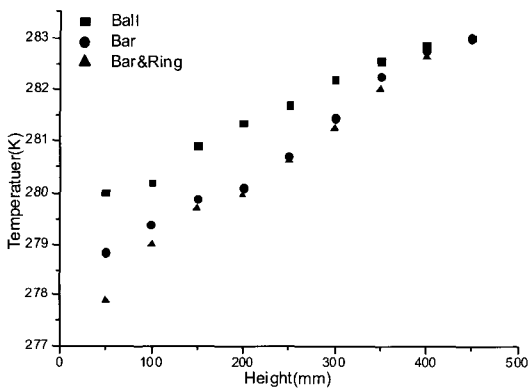


Fig. 9 Comparison of Cases with Vertical Height at V=0.005m/s

4. 결 론

- (1) 본 연구에서 제안한 조합형(Bar & Ring) 아이스캡슐이 기존 형상인 Ball과 Bar 형상을 단독으로 사용하는 경우에 비하여 상대적으로 열교환 성능이 높은 경향을 보이는 것을 수치 해석 결과를 통하여 확인하였다. 특히, 축열매개체들의 기하학적인 형상과 함께 열매체인 부동액 유체가 원활하게 흐를 수 있는 규칙적이고 일정한 배열구조가 열교환 효율에 중요한 인자가 됨을 알 수 있었다.
- (2) 부동액 유체의 입구 속도에 따른 열전달율은 Ball과 Bar, Bar & Ring 형상 각각 입구

- 블라인 속도가 빠를수록 증가하였으며 특히, Bar & Ring 형상은 축열매개체가 낮은 충진율과 높은 충진율 두 경우 모두 Ball과 Bar 형상보다 열전달율이 높은 것을 볼 수 있었다.
- (3) 부동액 유체의 입구 속도를 0.001 m/s에서 0.010 m/s 까지 변화시켰을 때 이에 따른 열전달율은 입구속도가 증가함에 따라 각 형상 모두 열전달율이 증가하는 경향을 보였으나 속도가 0.007m/s 이상부터는 속도의 증가에 따른 열전달율의 증가가 매우 미미함을 볼 수 있었다. 따라서, 빙축열시스템의 설계 시 부동액 유체의 입구유속은 0.005 m/s ~ 0.007 m/s 사이가 최적의 입구 속도임을 알 수 있었다.
 - (4) 본 연구에서 제안된 조합형(Bar&Ring) 아이스캡슐은 현재 사용되고 있는 Ball과 Bar 형상 축열매개체보다 수치해석 결과 우수한 열전달율과 교환율을 나타내어 빙축열현장에 상업적으로 활용 가능성을 보였으며 이의 적용 시 축열조 크기를 줄이면서도 냉방효율을 상승시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Choi, B. Y., et al., A Study on Development and Standardization for Optimal Controller of Ice Storage System, Ministry of Commerce Industry and Energy, pp. 5-20, 2000.
- [2] Kim, H. y., et al., Audit of efficiency Optimization with the Operation of Ice Cool Thermal Storage System, KEMCO, pp. 9-12, 2002.
- [3] Yoo, J. I., Kang, H. G., Strategy of Ice Packing Factor Improvement for TES Installation, Proceeding of the SAREK, '99 Summer Annual Conference, pp. 764-769, 1999.
- [4] Song, G. N., Lee, M. H., Kim, J. H., Demand-side management and The distribution of Thermal storage type

cooling System, Proceeding of the SAREK, '2004 Summer Annual Conference, pp. 436-441, 2004.

- [5] Moon, G. S., Lee, J. I., Ha, O. N., A Study on the Energy Consumption of Ice-Thermal Storage System, Proceeding of the SAREK, '2003 Summer Annual Conference, pp. 1279-1284, 2003.
- [6] Kang, H. G., Kim, H. C., and Pack, C. H., Uniform Flow Technology for High Efficiency of Ice Storage System, Proceeding of the SAREK, '2002 Summer Annual Conference, pp. 919-924, 2002.
- [7] Cho, S. H., Tae, C. S., Jang, C. Y., Lee, C. K., Yang, S. H., and Kang, H. G., Experimental Study on Stratification according to Diffuser Shape in the Rectangular Thermal Storage Tank, Proceeding of the SAREK, '2003, Summer Annual Conference, pp. 20-24, 2003.
- [8] Kim, H. Y., et al., Audit of efficiency Optimization with the Operation of Ice Cool Thermal Storage System. KEMCO, pp. 9-12, 2002.
- [9] 빙축열시스템 실무 핸드북, 한국설비기술협회, 2001.

저 자 소 개



김명수(金明秀)

1970년 3월생. 2005년 서울산업대학교 기계공학과(학사), 2007년 서울 산업대학교 대학원 기계공학과(석사), 현재 서울 산업대학교 에너지환경대학원 박사과정



최형권(崔亨權)

1966년 3월생. 1989년 서울대학교 기계공학과(학사), 1991년 서울대학교 대학원 기계공학과(석사), 1996년 서울대학교 대학원 기계공학과(박사), 현재 서울 산업대학교 기계공학과 조교수



변성광(卞成光)

1963년 10월생. 1986년 서울대학교 기계설계학과(학사), 1988년 KAIST 생산공학과(석사), 1994년 KAIST 기계공학과(박사), 현재 동양공업전문대학 기계자동화공학부 부교수