

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.9.605>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

다양한 아이스 볼 형상에 대한 복합열전달의 수치해석

박서원* · 김명수** · 전병진*** · 최형권****†

* 서울과학기술대학교 일반대학원 기계공학과, ** 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과,
*** 연세대학교 의과대학 삼장융합영상연구센터, **** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

Numerical Analysis of Conjugate Heat Transfer for Various Ice-Ball Shapes

Seo Won Park*, Myoung Soo Kim**, Byoung Jin Jeon*** and Hyoung Gwon Choi****†

* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

** Dept. of Energy System, Graduate School of Energy and Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

*** Integrative Cardiovascular Imaging Research Center, Yonsei Cardiovascular Center, College of Medicine, Yonsei Univ.

**** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

(Received April 20, 2016 ; Revised June 12, 2016 ; Accepted June 13, 2016)

Key Words: Ice-Ball Shape(아이스볼 형상), Ice Thermal-Storage System(빙축열 시스템), Conjugate Heat Transfer(복합열전달), Natural Convection(자연대류)

초록: 본 연구에서는 캡슐형 빙축열시스템에 적용되는 다양한 형상들을 가지는 아이스 볼에 대한 복합열 전달 해석들을 수행하였다. 형상은 구 형상과 열전달 표면적을 넓힐 수 있도록 설계한 3가지 다른 형상을 포함하여 총 4가지 형상을 고려하였다. 볼 주위의 유동은 레이놀즈 수 300의 층류 유동으로, 볼 외부와 내부의 강제대류 및 자연대류를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 상용해석 코드인 ANSYS- FLUENT를 사용하여 비정상 열유동 해석을 수행하였다. 볼의 형상이 열전달에 미치는 영향을 고찰하여, Bone, Dimple, Hole, Sphere 형태 순으로 열전달 효율이 좋음을 확인하였다. 전체해석 기간 동안에 캡슐 내부 유체의 평균온도 차이는 최대 0.9℃ 정도였다. 대용량 시스템의 경우 축열조 내에 30만개 이상의 캡슐이 들어가므로 캡슐 형상이 시스템 효율에 미치는 영향이 중요함을 확인하였다.

Abstract: In this study, numerical simulations were conducted for conjugate heat transfer around ice balls in an encapsulated ice thermal storage system. Four shapes of ice balls were modeled; the default one was a sphere, and the other three shapes were designed to enhance convective heat transfer through the ball surface. The flow around the ball was laminar, for which the Reynolds number was 300, and both forced and natural convections inside and outside the balls were considered. The simulations revealed that the magnitude of convective heat transfer for the different shapes decreased in the following order: bone, dimple, hole, and sphere. For the entire simulation, the maximum difference in the average temperatures of water inside the capsules was found to be 0.9°C. Therefore, it can be said that the effect of ice-ball shape on the performance of the ice thermal storage system is significant, considering that more than 0.3 million balls are used in this system.

1. 서 론

심야의 잉여전력을 이용하여 여름철 피크전력 부하를 효율적으로 감소시키는 중앙집중식 축열

냉방시스템 중 빙축열시스템은 에너지 합리화 시스템으로서 1990년대 초반부터 보급되어 왔으며 지금까지 시스템 효율의 증대와 운전 시뮬레이션을 통하여 에너지 비용을 분석⁽¹⁾하고 최적운전기법⁽²⁾을 이용한 비용절감에 대한 연구 등을 수행해왔다. 빙축열시스템에서 가장 핵심은 빙축열조 내

† Corresponding Author, hgchoi@seoultech.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

에서 얼음과 물의 전체 용적에 대한 최대 얼음량으로 정의되는 빙충전율(Ice Packing Factor)의 향상과 축열조의 축열량에 대한 방열량으로 해빙능력과 축열조 단열성능의 정량적 값인 방냉효율의 향상이다. 이를 위한 연구 또한 꾸준히 진행되어 왔다.

구(sphere)형 캡슐(capsule)인 아이스 볼(ball) 시스템에서 Lee 등⁽³⁾은 실험을 통해 축열조로 유입되는 유량인 유입수와 축열조 내의 저장수와외 기준 온도차 그리고 아이스 볼의 크기를 달리 하면서 축열조 내의 온도분포와 무차원 출구 온도를 통해 열저장율을 비교하였다. Park 등⁽⁴⁾은 냉각유체인 브라인(brine)과 캡슐의 열전도에 대한 전열량을 비교하였는데, 그 결과 유입수가 저온일수록, 유량이 작을수록 축열 효율이 증가하며 또한 캡슐의 크기가 작을수록 급격한 해빙이 진행되어 방열효율이 감소함을 알았다. Heo 등⁽⁵⁾은 축열조 내에서 작동유체인 브라인의 유동형태와 방향에 중점을 두어 축열 시에는 빙충전율을 향상시킬 수 있는 Perforator의 Upward 방식이 좋으며, 방열 시에는 성층도에서 앞서는 Distributor의 Downward방식이 이상적인 것을 확인하였다. 더 나아가 Jang 등⁽⁶⁾은 축열조 형상과 연계하여 사각형보다는 원통형 축열조가 더 안정적이고, 높이는 높을수록 그리고 저온의 유입수가 Upward 방식일 때 빙충전율이 높다고 제시하였다.

캡슐형 시스템은 기하학적 형상이 구형뿐만 아니라 여러 가지 형상이 있다. Choi⁽⁷⁾는 축열조 내에 벽돌같이 쌓을 수 있는 아이스렌즈(ice Lens)형상의 시스템에 대해서 장단점 및 특성을 소개하였고, Kim⁽⁸⁾은 캡슐의 형상이 스크류형인 밀폐식 시스템에 대하여 한전에서 제시한 기준에 따라 성능시험⁽⁹⁾을 하여 축열밀도, 방냉효율 그리고 총괄에너지 이용효율 등을 연구하였다. Kim 등⁽¹⁰⁾

은 효율을 위한 주요 인자로 캡슐의 용기 형상, 용기들의 배열구조, 브라인의 원활한 유동 확보에 착안하여 스크류형 캡슐에 도넛형 링 캡슐을 삽입하는 모듈형을 개발하여 수치해석을 통해 단일캡슐들 보다 열전달 효율이 높다는 것을 증명하였다. 또한 Yoo 등^(11,12)은 큰 구형 캡슐 사이의 공극을 작은 캡슐로 채우는 방법으로 빙충전율 향상을 제시하였고 축열밀도의 향상으로 축열조의 크기를 줄일 수 있었으며 방열 성능도 향상시키는 결과를 확인하였다.

본 연구의 해석 대상인 캡슐은 전체적으로 기본 형상이 구형으로 되어있기 때문에 주위 유동도 중요하다. 3차원 형상인 구형은 간단한 형상임에도 불구하고 후류에서 두 개의 서로 반대방향으로 회전하는 와류(vortex)가 흐르는 실린더와는 달리 오직 하나의 와류 고리(loop)가 주기적으로 흐른다. 또한 낮은 레이놀즈 수에서는 레이놀즈 수가 바뀔에 따라 다양한 유동구조를 가지는데 Jeon 등⁽¹³⁾은 레이놀즈 수가 증가하면서 변하는 유동구조 중 항력과 양력의 섭동이 존재하는 비정상 면대칭, 비정상 비대칭 유동에서 선형비례제어방법이라는 제어방식을 적용하였다. 그 결과 섭동을 크게 감소시킬 수 있고, 이 섭동의 감소는 양력의 방향과 밀접한 관계가 있는 와류진동의 감소로 얻어짐을 확인하였다. Kwag⁽¹⁴⁾은 수중에서 한 개 및 두 개의 구를 유동방향으로 직렬로 나열하여 구 주위의 층류유동을 3차원으로 수치해석 하였다. 구 사이의 간격이 같더라도 레이놀즈 수에 따라 유동장은 다르며, 구 한 개의 유동보다 간격이 작은 두 개의 구 유동에서 오히려 안정된 현상을 보여 주었으며, 구 사이의 간격이 멀어질수록 앞의 구에서 생기는 와류의 영향이 커져 불안정한 유동을 보임을 알 수 있었다.

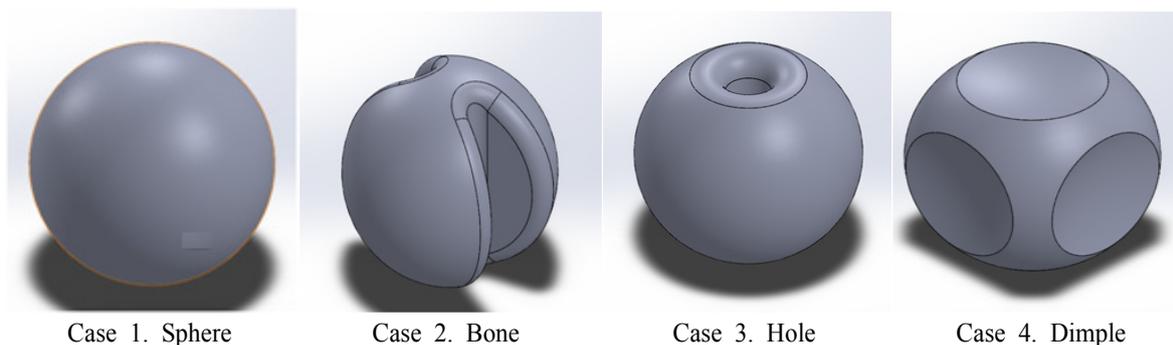


Fig. 1 Shapes of ice capsule for simulation

본 연구는 축열 매개체인 아이스 캡슐에 대해서 내부에 자연대류를 고려했을 때의 복합열전달 해석을 수행할 것이다. 4가지 기하학적 형상이 다른 캡슐의 온도분포를 비교하여 가장 열전달 효율이 좋은 형상에 대해서 연구하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 모델링

Fig. 1은 Solid-works 프로그램을 이용하여 3차원으로 모델링한 4가지의 기하학적으로 다른 형상의 캡슐이다. Case 1은 정수압을 받는 완전 구형 형상이고, Case 2, 3, 4는 열전달 표면적을 크게 하기 위한 형상으로 Case 2는 함몰 구조이며, Case 3은 구를 축 방향으로 구멍을 뚫은 형상 그리고 Case 4는 구 표면에 육면체 방식의 딥플(dimple)을 형성하였다. 모든 Case의 Shell 두께와 내부 용적은 동일하게 설계하여 열전달 성능을 비교하였다. Table 1은 캡슐의 모델링 사양이고, Table 2는 브라인과 캡슐의 물성치를 나타내었다.

2.2 가정

실제 캡슐형 빙축열 시스템의 축열조 내에서는

캡슐의 배치가 무작위(random)로 존재하지만 해석을 위해서 Fig. 2에 나타난 것처럼 캡슐들이 상대적으로 움직이지 않고 일렬로 정렬되어 있다고 가정하였다. 캡슐사이를 흐르는 브라인의 유동은 상부 디퓨저에 의하여 중력방향으로 유동단면에 고르게 형성되는 것으로 가정하였고 또한 하나의 열에 수직으로 나열되어 있는 캡슐로 흘러내리는 브라인의 유동형태는 각 형상별로 동일하다고 가정하고 계산은 중간에 위치한 하나의 캡슐에 대해서만 수행한다.

2.3 지배방정식

입구에서의 브라인의 유입 유량과 출구의 유출 유량은 동일하기 때문에 연속방정식을 적용하였다. 또한 뉴턴유체, 비압축성 유동으로 가정하여 운동량 방정식을 적용하였고, 자연대류를 고려한 복합열전달 해석을 위해서 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 적용하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Table 1 Description of the capsule modeling

	Case1	Case2	Case3	Case4
Diameter [mm]	98	106	101	111
Surface Area $\times 10^{-3} [m^2]$	30.1	40.2	36.1	37.0
Fillet radius [mm]	-	7	10	10
Volume $\times 10^{-4} [m^3]$	2.772	2.772	2.772	2.772
Thickness [mm]	2	2	2	2

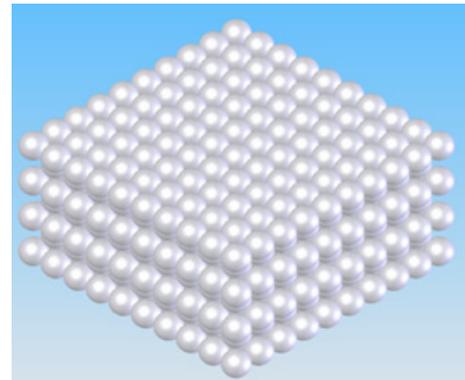


Fig. 2 Array of ice ball inside the thermal storage tank

Table 2 Materials of ice capsule & brine

	Thermal Conductivity $k [W/m K]$	Density $\rho [kg/m^3]$	Specific Heat $c_p [J/kg K]$	Viscosity $\mu [kg/m s]$	Thermal Diffusion Coefficient $\alpha [m^2/s]$
BRINE	0.491	1042.0	3920		1.2×10^{-7}
HDPE	0.33	960	2090	-	1.6×10^{-7}
Distilled Water	0.568	1000	4203	14.5×10^{-4}	1.35×10^{-7}

운동량 방정식

x 방향:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

y 방향 :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + (\rho - \rho_\infty)g$$

z 방향 :

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

에너지 방정식

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

on Water and Brine

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{on Ice Capsule}$$

지배방정식의 해법을 위해서 ANSYS-FLUENT에서 제공하는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 시간 이산화는 2차 정확도 내재적 방법을 사용하였고, 대류항 공간 차분은 2차 정확도의 상류도식(Second Order Upwind)을 사용하였다.

수렴판정 조건은 운동량 및 연속방정식의 residual은 10^{-5} , 에너지방정식은 10^{-8} 이하일 때로 지정하였고, 연속적이고 규칙적으로 배열되어 있기 때문에 좌우 방향으로 대칭 경계조건(Symmetry Boundary Condition)을 설정하였다.

수직으로 흐르는 브라인의 유동형태는 동일하다고 가정하였으므로 상하에는 캡슐을 하나씩 더 배치하여 동일한 유동형태가 되도록 하였으며, 상부 입구에서는 브라인 유속조건, 하부 출구는 대기압 조건으로 계산하였다.

축열조 내부에서 중력방향의 유속은 0.003m/s 이고, 캡슐의 평균 직경이 100mm 이므로 구형상의 캡슐 주위를 흐르는 Re 수는 300으로 층류 유동이며, 입구에서 브라인의 온도는 10°C , 캡슐의 온도는 0°C 로 잠열은 고려하지 않고 현열조건에서만 해석을 수행하였다. 자연대류를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 시간에 따른 온도변화가 다르기 때문에 모든 Case에 대해서 자연대류를 고려하였다.

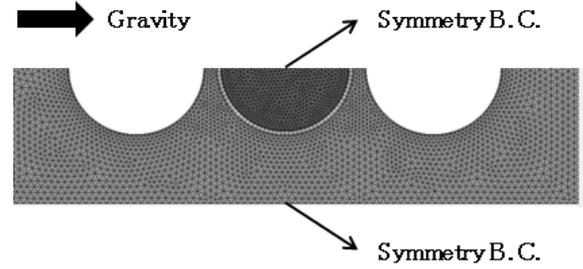


Fig. 3 Boundary condition & grid system

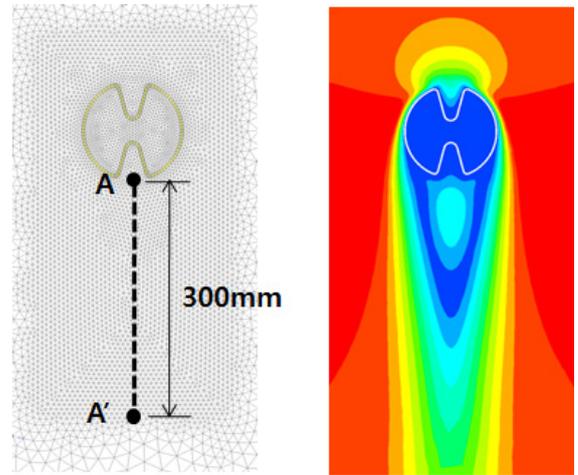


Fig. 4 Comparison point for the grid test

2.4 격자 계 및 Grid Test

본 연구에서 사용된 3차원 격자는 사면체(Tetra) 격자로서, 격자 생성 전용 프로그램인 ICEM-CFD 13.0 프로그램을 이용하여 생성하였다. 수치해석에 사용될 격자계를 결정하기 위하여, 캡슐 구의 직경(D)을 기준으로 기준 셀의 크기가 D/20, D/30, D/40의 세 가지 격자계를 사용하여 그 결과 값을 상호 비교하였다. D/20의 격자수는 456,218개, D/30의 격자수는 530,353개, D/40의 격자수는 665,706개였다.

Fig. 4에서 나타낸 것처럼 함몰구조 형상의 캡슐 하단에서부터 수직방향으로 길이가 300mm 인 지점까지 속도분포를 비교하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 가장 조밀한 격자계인 D/40과 D/30의 격자계 실험 결과치가 유사하나, D/20의 격자계에서는 차이가 생기기 시작하므로 본 연구에서는 모든 수치해석에 대하여 최대격자 크기 D/30의 비 균일 격자 계를 사용한다.

Fig. 6은 시간간격을 1 sec, 5 sec, 10 sec의 다양한 시간간격으로 수치 해석을 수행한 후 캡슐 내부의 평균 온도를 시간에 따라 산출하여 각각 비

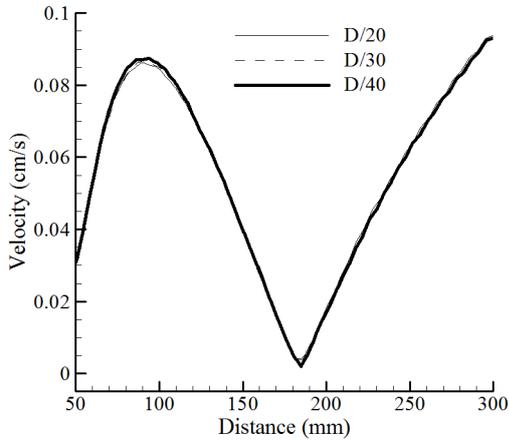


Fig. 5 Comparison of the speed for various grid size

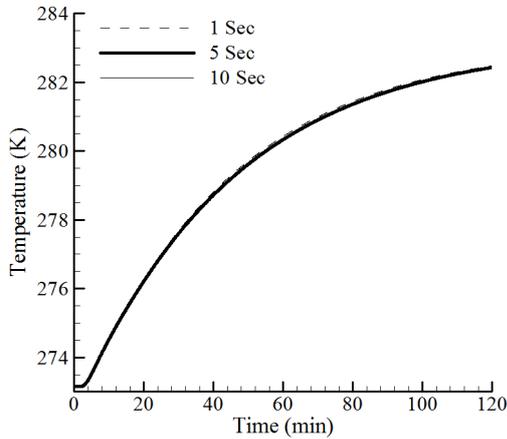


Fig. 6 Average temperature histories inside the capsule for the various time-step size

교하였다. 시간간격 시험 결과에서는 온도차가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 다만 3분 정도의 시간이 지날 때 10 sec의 결과가 1 sec와 5 sec에 비해서 온도차이가 발생하므로 본 연구에서는 모든 수치해석에 대하여 5 sec 시간간격을 적용하여 해석하였다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 자연대류를 고려하기 위한 모델 적용

캡슐 내부에는 물이 들어 있으며 온도차에 의한 자연대류가 발생한다. 자연대류를 고려할 때 Boussinesq 모델을 사용하면 온도가 상승하면서 상승기류만을 형성하지만 물은 온도에 따라 다른 형태의 기류를 형성한다.

물의 경우는 0°C에서 4°C까지 밀도가 커지므로 온도가 상승하면 하강기류를 형성하다가 4°C

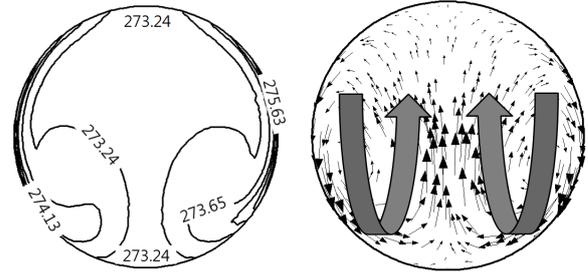


Fig. 7 Internal natural convection at both sides of 2.5°C temperature

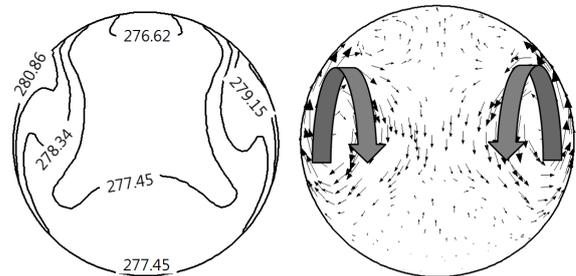


Fig. 8 Internal natural convection at both sides of 6.7°C temperature

이상이 되면 밀도의 감소로 다시 기류가 상승한다. 이는 캡슐 내부의 자연대류를 고려한 유동에 영향을 미치므로 모든 Case에서 Boussinesq 모델이 아니라 밀도가 온도에 따라 변하는 식을 적용하여 부력항을 처리하였다. 밀도는 온도에 대한 함수로 표현되며, 참고문헌 (15)에 온도에 따른 밀도 변화 데이터를 최소자승법으로 2차보간하여 다항식 (1)을 적용하였다.

$$\rho = -0.0079 T^2 + 4.3860 T + 391.2437 \quad (1)$$

ρ : density(kg/m³)

T : temperature(K)

Fig. 7과 Fig. 8은 물의 특성으로 인한 캡슐 내부의 자연대류 현상을 관찰하기 위하여 4가지 형상의 캡슐 중 Case 1의 캡슐 내부의 온도분포와 속도장을 보여준다. Fig. 7은 양 옆의 온도가 2.5°C이고 캡슐 가운데 온도가 0°C일 때의 내부 자연대류의 기류를 나타내었다. 양 옆에서는 온도가 올라가지만 물의 밀도는 점점 커지므로 하강기류를 형성하고 아래 부분에서 만나서 캡슐 가운데 부분의 낮은 온도 방향으로 기류가 상승하고 있다. Fig. 8은 양 옆의 온도가 6.7°C일 때 내부 기류의 모습이다. 물의 밀도가 가장 큰 4°C를 지나서 온도가 상승하기 때문에 양 옆에서는 밀도가

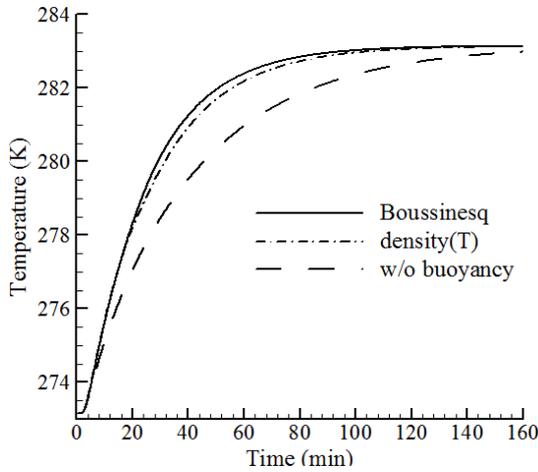


Fig. 9 Comparison of the evolutions of the average temperature inside capsules

낮아져서 상승기류를 형성하다가 다시 상대적으로 온도가 낮아 밀도가 큰 가운데 부분으로 하강하고 있다. 즉 물의 특성에 맞게 정반대의 기류가 형성된다.

Fig. 9에서는 자연대류를 고려했을 때의 캡슐 내부 유체의 평균온도변화의 기울기가 고려하지 않았을 때보다 급격하다는 것을 알 수 있다. 또한 자연대류를 고려했을 때를 비교하면 Boussinesq 모델을 적용한 기울기가 약간 더 급격하고 밀도가 온도에 따라 변하는 다항식의 결과와는 30분이 경과된 지점에서 온도 차가 최대 0.4℃ 정도 되는 것을 알 수 있다.

3.2 캡슐 내부의 Case별 온도분포

Fig. 10은 30분이 경과된 후에 열전달 성능을 알아보기 위하여 캡슐 내부의 온도분포를 나타내었고 Fig. 11에서는 같은 시간대에 캡슐 내부의 자연대류에 의한 기류와 속도를 벡터로 나타내었다. Sphere는 순차적으로 열전달은 일어나지만 30분이 경과되어 열전달이 상당히 진행되었음에도 불구하고 하부에서는 과냉 구역이 존재한다. 즉 해빙 속도가 느리며, 이 시간대에 상, 하부 온도차가 크다는 것은 열전달 성능이 떨어진다는 것을 알 수 있다.

Bone의 경우에는 등온선이 일정하고 고른 형상을 보이며 온도분포도 순차적으로 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 함몰 구조의 영향으로 캡슐 가운데 부분에서도 빠른 해빙과정을 보이면서 과냉 구역이 전혀 존재하지 않고 상, 하부 온도차가

Table 3 Surface heat transfer coefficient & ratio of area in each case

	Heat Transfer Coefficient of Integral Surface Value [W/m ² K]	Ratio of the Surface Area [A/A _{basic} × 100]
Bone	9.2463	133.56
Dimple	10.0378	122.92
Hole	9.8393	119.93
Sphere	11.4385	100.00

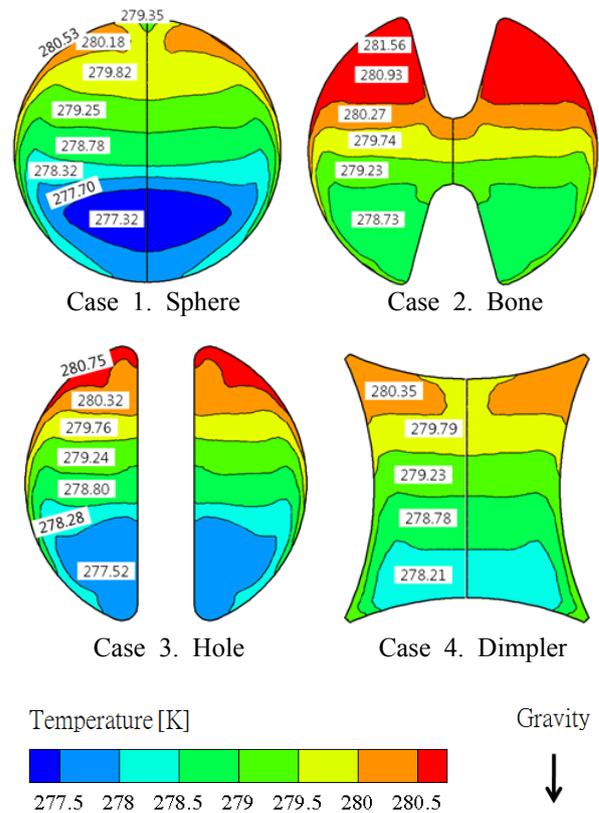


Fig. 10 Temperature contours & isotherms at the each simulation case

크지 않으므로 내부 열전달이 우수하다.

다음으로 Hole의 경우에는 Bone과 같은 형태로 순차적인 열전달 진행 모습을 보이고 있다. 그러나 Bone에 비해서 전체적인 열전달 성능은 떨어지며 하부에 Sphere의 과냉 정도는 아니지만 온도가 낮은 부분이 상당 부분 존재한다. 또한 Sphere 다음으로 상, 하부 온도차가 크다.

Dimple의 경우에는 입구 측 온도가 Bone보다는 낮은 온도로 유입되면서 전체적으로 내부 온도분포는 일정하나 캡슐 내부 가운데 부분에서 등온

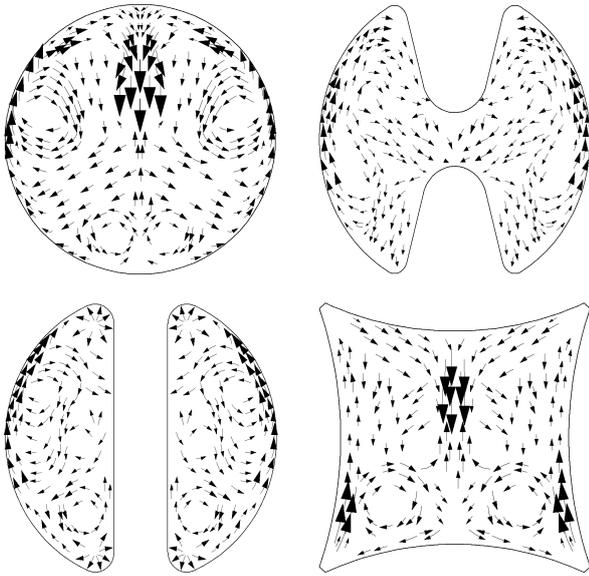


Fig. 11 Vector of the internal velocity at the four simulation cases

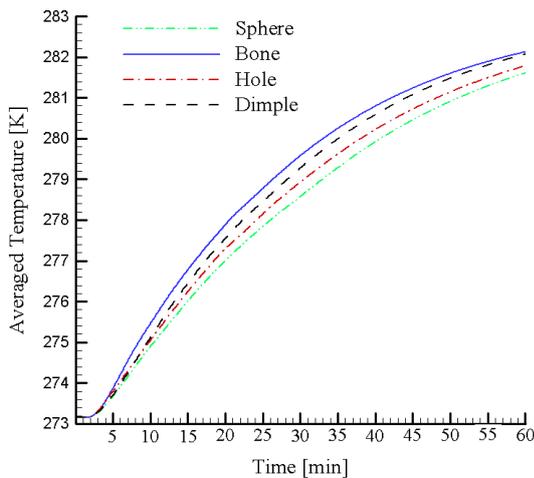


Fig. 12 Comparison of the evolutions of the average temperature inside capsules

선 간격이 크다. 즉 Bone보다는 열전달이 늦게 진행되지만 상, 하부 온도차도 작고, 과냉 구역도 존재하지 않는다. 따라서 비교적 열전달 성능이 뛰어난 형상으로 30분이 지난 시간대에서 Bone 다음으로 빠른 해빙 속도를 보인다. 이는 Fig. 12에서도 잘 나타나 있다.

캡슐마다 상부와 하부에서 온도가 다른 이유는 캡슐이 수직으로 일정하게 나열되어 있다고 가정하였기 때문에 각각 다른 형상에 따른 구 주위의 유동형태가 원인으로 보인다.

형상에 따른 열전달 성능에 대해서는 Bone이

가장 뛰어나고 그 다음으로는 Dimple형상이며, Hole, Sphere순으로 열전달 성능이 낮게 나타났다. Fig. 12에 각 형상에 대한 열전달 성능을 도시하였다. 30분이 지난 특정 시간대에서 열전달 성능이 가장 좋은 Bone과 가장 좋지 않은 Sphere의 온도 차가 수치해석 결과 0.9℃임을 알 수 있고 이는 캡슐 한 개에 대한 온도 차이이다.

Table 3에서는 각 형상별 단위면적당 표면의 열전달계수를 적분한 값과 Sphere형상의 표면적을 기준으로 다른 형상들과의 면적비를 나타내었다. 단위면적당 열전달계수는 Sphere, Dimple, Hole, Bone 순으로 크며, 표면적은 Sphere가 가장 작고 Hole, Dimple, Bone 순으로 넓다. 열전달 효율의 객관성을 위해서 캡슐 내부의 체적이 일정한 조건에서 해석한 결과 면적비는 Bone이 가장 크고 Dimple, Hole, Sphere 순이며 이 값과 같은 순서대로 열전달 성능이 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 캡슐형 빙축열시스템에서 4가지 다른 형상의 캡슐에 대하여 복합열전달 성능문제를 수치해석 하였다. 축열조 내의 유속은 매우 작기 때문에 구 주위의 유동을 층류로 가정하고 해석한 결과 다음의 결론들을 도출하였다.

(1) 캡슐 내부의 자연대류 해석은 모델에 따라서 온도 기울기 차이가 크고, 30분이 경과된 후에는 최대 0.4℃ 정도 온도차가 발생하므로 Boussinesq 가정이 아니라 밀도의 온도에 따른 변화를 나타내는 다항식을 적용하였다.

(2) 물은 4℃에서 밀도가 가장 크기 때문에 캡슐 내부의 자연대류에서 4℃까지는 온도가 증가함에 따라 하강기류를 형성하고 4℃ 후에는 정반대의 상승기류를 형성함을 알 수 있다.

(3) 30분이 경과된 지점에서 볼 내부의 온도분포를 확인한 결과 캡슐의 기하학적 형상에 대해서는 Bone, Dimple, Hole, Sphere 순으로 열전달 효율이 뛰어나다. 이는 면적비의 순서와 일치하며, 표면적이 큰 Bone의 단위면적당 열전달계수는 가장 작지만 열전달 효율은 가장 큼을 확인하였다.

(4) 열전달 효율이 가장 좋은 Bone과 가장 좋지 않은 Sphere의 온도차는 30분이 지난 특정 시간대에 0.9℃이다. 이는 캡슐 한 개의 온도 차이

며, 대용량 시스템의 경우 축열조 내에 30만개 이상의 캡슐이 존재하므로 시스템 효율에 캡슐의 형상이 매우 중요한 인자임을 확인하였다.

참고문헌

(References)

- (1) Lee, K. H., Joo, Y. J., Choi, B. Y. and Kim, S. J., 1999, "Simulation and Energy Cost Calculation of Encapsulated Ice Storage System," *Journal of the Korean Solar Energy Society.*, Vol. 19, No. 3, pp. 63~73.
- (2) Lee, K. H., Lee, S. R. and Choi, B. Y., 2000, "Laboratory Test of Optimal Control Algorithm for Ice Storage System," *Proceedings of the SAREK 2000 Winter Annual Conference*, pp. 451~455.
- (3) Lee, W. S. and Park, E. T., 1996, "A Study on Effect of Ice Ball Size on Heat Flow Characteristics and Ice Thermal Storage in Ice Storage Tank," *Proceedings of The SAREK 1996 Winter Annual Conference.*, pp. 82~88.
- (4) Park, K. W., Park, E. T., Hwang, Y. G. and Kim, Y. J., 1996, "An Experimental Study on Thermal Characteristics between Cooling Fluid and Ice Ball during Charging and Discharging Processes," *Proceedings of the KOSSE 1996 Fall Annual Conference*, pp. 193~205.
- (5) Heo, E., Park, E. T., Kim, C. J. and Cho, K. N., 1995, "Characteristics of Charging and Discharging due to the Brine Flow Direction in the Ice Storage Tank with Ice Ball," *Proceedings of The SAREK 1995 Winter Annual Conference.*, pp. 392~398.
- (6) Jang, Y. G., Lee, W. S. and Park, J. W., 1998, "An Experimental Study on Characteristics of Heat Flow in the Cylindrical Storage Tank with Ice Ball," *Journal of the Korea Solar Energy Society.*, Vol. 18 No. 1 pp. 99~109.
- (7) Choi, D. Y., 1999, "Introduction of Ice Lens," *Proceedings of the SAREK 1999 Summer Annual Conference.*, pp. 740~749.
- (8) Kim, K. H., 2006, "Study on the Performance Testing of the Closed Ice Thermal Energy Storage System using Screw Capsules," *Journal of the Korean Solar Energy Society.*, Vol. 26, No. 4, pp. 39~45.
- (9) Choi, Y. M. and Baek, J. S., 1994, "A Performance Evaluation of the Ice Ball Type Storage System," *Publication of The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea.*, pp. 17~31.
- (10) Kim, M. S., Choi, H. G. and Byon, S. K., 2008, "Heat Transfer Analysis of a Thermal Storage System using the Ice Capsule of Bar and Ring Module," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering.*, Vol. 32, No. 2, pp. 268~275.
- (11) Yoo, J. I. and Kang, H. G., 1999, "Strategy of Ice Packing Factor Improvement for TES Installation," *Proceedings of the SAREK 1999 Summer Annual Conference*, pp. 764~799.
- (12) Kang, H. K. and Kim, H. C., 2003, "The Improvement Case of Capsule Type System," *Proceedings of the SAREK 2003 Annual Conference*, pp. 18~23.
- (13) Jeon, S. and Choi, H. C., 2007, "Linear Proportional Control of Flow Over a Sphere," *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Conference*, pp. 1323~1326.
- (14) Kawg, S. H., 2010, "Analysis of Laminar Flows Around Submerged Spheres," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 34, No. 8, pp. 1094~1099.
- (15) Incropera F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Introduction to Heat Transfer*, 6th Ed., Wiley, p. 1091.