

〈論 文〉

원통형 축냉조내 구형캡슐들의 축냉에 관한 실험 연구

조금남* · 정갑용**

(1995년 2월 14일 접수)

Experimental Study on the Cold Storage of Spherical Capsules in the Cylindrical Tank

Keumnam Cho and Gab Yong Jung

Key Words : Cold Storage(축냉), Spherical Capsule(구형캡슐), n-Tetradecane, Supercooling (과냉각)

Abstract

The present work was performed to axially and radially investigate the local cold storage performance in the cylindrical tank with the spherical capsules inserted n-Tetradecane as a new cold storage material. The local cold storage performance of the capsules in the tank was experimentally investigated for the inlet temperature of -7 , -5 , -3 , 0 °C, for the flow rate of 0.95, 1.89, 2.84, 6.00 l/min, and for the diameter ratio of 4.9, 9.0, 13.1. The local cold storage performance in the case of using water applied for the commercial ice-ball system was axially investigated by changing the flow rate only with the inlet temperature of -7 °C and the diameter ratio of 9.0 in order to compare with the performance in the case of using n-Tetradecane. For the case of using n-Tetradecane, the difference of cold storage period between the first and the seventh story was increased as the inlet temperature was increased and the flow rate was decreased. The capsules at the center of the tank showed the supercooling and the increased cold storage period compared with the capsules at the wall of the tank due to the small porosity and insufficient cold storage performance at the center of the tank as the diameter ratio is increased. The case using water showed worse cold storage performance due to comparatively large supercooling than the case using n-Tetradecane.

기 호 설 명

A : 축냉조 단면적 [m^2]

D_c : 캡슐직경 [m]

Q : 유입유동률 [l/min]

R : 축냉조반경 [m]

R^+ : 무차원반경 (r/R) [-]

r : 반경방향으로의 거리 [m]

Re : 레이놀드수 ($QD_c/A\nu$) [-]

T_B : 항온조 설정온도 [°C]

T_{fi} : 냉각유체 유입온도 [°C]

ν : 동점성계수 [m^2/s]

1. 서 론

*정회원, 성균관대학교 기계공학과
**대우전자(주) 냉장고연구소

축냉시스템은 여름철 주야간 전력수요의 불균형을 감소시켜 에너지를 효율적으로 이용하는데 기여

하고 있다. 축냉시스템의 열저장방법에는 현열저장과 잠열저장이 있으나 잠열저장은 현열저장에 비해 열저장 밀도가 크므로 축냉시스템의 설치면적을 줄일 수 있고 상변화 온도에서 일정한 온도로 방냉을 할 수 있으므로 최근 상변화 물질을 이용한 축냉시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

상변화 물질의 용융잠열을 이용하는 축냉시스템들을 제빙·해빙 방식에 따라 분류하면 정적방식으로 관외 착빙형, 관내 착빙형, 캡슐형(ice-ball, ice-lens), 동적방식으로 빙박리형, 슬러리형 등이 있다. 이 중 구형캡슐(ice-ball) 축냉시스템은 전열면적이 크고 설치가 용이한 장점이 있으며 구형캡슐 시스템에 대한 연구자들 중 Saitoh⁽¹⁾는 잠열 축열조내에서 상변화 물질로 n-Heptadecane(C₁₇H₃₆)을 이용하여 구형, 평판형, 원통형, 코일형 등의 축열형상을 비교한 결과 구형캡슐의 열저장 성능이 가장 우수함을 보고하였다.

구형캡슐 축냉시스템에 대한 기존의 연구들로는 Kamiya 등⁽²⁾과 최용문 등⁽³⁾에 의해 수행된 냉각유체 유입구, 유출구 온도차에 의한 전체적인 축냉성능 연구가 있고 국부축냉률에 대한 연구들로는 Chen and Yue^(4,5)와 Saitoh and Hirose⁽⁶⁾의 축방향 일차원 모델연구가 있다. 그러나 상변화가 일어나지 않는 rockbeds 축열시스템에서 Benenati and Brosilow⁽⁷⁾의 반경방향 다공도 분포에 관한 연구결과에 의하면 구형 암석(rock)의 직경에 대한 축열조 직경의 직경비가 일정한 경우 다공도 분포가 축열조 벽으로부터 구형 암석 직경의 $4\frac{1}{2}$ ~5배까지 변동되다 축열조 중심부로 갈수록 변동 폭이 감소함을 알 수 있었고 뜨거운 공기가 유입되는 직경비가 10인 축열조에서 반경방향 속도와 온도 분포를 Lerou 와 Froment⁽⁸⁾가 실험적으로 조사한 결과 축열조 중심부 쪽에 비해 다공도의 변동 폭이 큰 축열조 벽쪽에서 국부적인 속도와 열전달이 더 크게 나타남을 알아냈다. Rockbeds 축열시스템에서는 축열과정중 상변화가 일어나지 않고 냉각유체도 공기를 사용하므로 상변화 용융잠열을 이용하는 구형캡슐 축냉시스템과는 실험조건이 동일하지 않으나 구형캡슐 축냉시스템에서도 축냉조 벽과 중심부에서의 다공도가 변함에 따라 국부 축냉특성이 달라질 것이므로 구형캡슐 축냉시스템의 성능을 효율적으로 예측하기 위해서는 축방향뿐만 아니라 반경방향에 대한 연구가 필요하다.

또한 상용 축냉시스템들에서 축냉재로 널리 사용

되고 있는 물은 고체에서 액체로의 상변화시 잠열량은 큰 편이나 빙점이 0℃로 낮고 축냉이 진행될수록 얼음의 열저항이 증가하며 상변화 온도가 이하에서도 물로서 존재하는 과냉각 현상이 발생하기 쉽다. 과냉각현상은 순수한 물에서 뿐만아니라 조해제로 무기물이 첨가된 물에서도 발생하며 Arnold⁽⁹⁾는 무기물이 첨가된 물을 삼입한 직경 77 mm인 구형캡슐내에서 과냉각이 발생됨을 조사하였다. 이러한 축냉재로서의 물의 단점들은 냉동기의 증발기 온도를 0℃이하로 낮게 설정하도록하며 냉동기 성능을 저하시키는 요인이 되고 있다. 따라서 물보다 상변화 온도가 높아서 냉동기 성능을 향상시킬 수 있으며 물과 비슷한 정도의 잠열량을 갖는 축냉재에 대한 연구들이 5~15℃에서 상변화 하는 냉매의 포점화합물에 대해 수행되고 있다. 윤재호 등⁽¹⁰⁾은 평판형 용기내에서 THF 포점화합물의 성능에 미치는 인자들을 조사하였으며 정인성 등⁽¹¹⁾과 김양규 등⁽¹²⁾은 R-141b의 포점화합물을 이용한 슬러리 시스템에서 축냉과 축냉재 특성에 영향을 미치는 관련 인자들에 대한 연구를 수행하였다. 이들 냉매를 사용한 시스템들은 냉매의 사용규제에 대한 제한을 받고있으며 냉매를 사용하지 않은 포점화합물에 대해서 민정기 등⁽¹³⁾은 제3아민 일종의 TMA 포점화합물을 이용한 슬러리 시스템에서의 축냉 및 방냉 특성에 대한 연구를 수행한 바 있으나 최대 잠열량이 TMA의 농도가 25%일때 181.44 kJ/kg으로 다른 축냉재에 비해 잠열량이 떨어지는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 냉매를 이용한 포점화합물과는 다르며 물보다 상변화 온도가 높아 냉동기의 운전 성능을 향상시키며 잠열량이 큰 새로운 축냉재를 선정하여 구형캡슐내 축냉성능을 조사하고 캡슐주위의 유체 유동에 따른 국부 축냉특성을 실험적으로 조사하고자 한다. 축냉재들로는 0℃이상에서 상변화하며 조해제 없이도 결정핵 생성이 가능한 파라핀 계열의 n-Tetradecane과 조해제로 무기물이 첨가된 물을 선정하였으며 축냉재들의 물성치와 상변화 과정을 비교 조사하였다. 축냉조내 국부 축냉특성은 각각의 축냉재를 주입한 구형캡슐들을 축냉조내에 설치하고 관련 실험변수들로 냉각유체의 유입온도, 유입유동률과 캡슐직경에 대한 축냉조 직경의 직경비를 선정하여 축냉조내 축방향 및 반경방향으로 위치한 캡슐내 축냉과정을 실험변수에 따라 측정함으로써 조사되었다.

2. 실험

2.1 축냉재

본 연구에 사용된 축냉재들은 무기물이 첨가된 물과 파라핀 계열의 n-Tetradecane(C₁₄H₃₀)이었다. 무기물이 첨가된 물은 직경 103 mm의 상용 ice-ball 내부에 담긴 것을 꺼내 이용하였으며 무기물은 과냉각을 방지하기 위한 조해제로 사용된다. 무기물이 첨가된 물의 어는점과 잠열량은 제작사인 프랑스 Cryogel사에서 제시한 값에 의하면 어는점은 0 °C, 잠열량은 334.66 kJ/kg이었으나 DSC(differential scanning calorimeter : Dupont사 Model 9900)를 사용하여 물의 온도를 -50 °C 이하로 낮춘 후 서서히 온도를 상승시켜가며 상변화시 열음이 흡수하는 열량과 최대 열량흡수지점을 측정하여 물의 잠열량과 어는점을 재조사하였다. DSC 측정오차를 고려하여 여러번 잠열량과 어는점을 측정하였으며 평균값은 Fig. 1에 보여졌다. Fig. 1에 나타냈듯이 상변화 온도는 0.4 °C 잠열량은 359.0 kJ/kg으로 제작사에서 제시한 값과 약간의 차이를 보였다.

물보다 상변화 온도가 높은 축냉재로 사용된 n-Tetradecane(C₁₄H₃₀)은 독성이 없고, 화학적으로 안정되어 있으며 자체적으로 결정핵을 가지고 있어 과냉각이 상대적으로 적으며 상변화시 체적변화가 아주 작은 장점들이 있다. N-Tetradecane의 물성치는 Choi 등^(14,15)이 순도가 99.99%인 실험실용 물질과 상대적으로 순도가 떨어지는 상업용 물

질에 대해 DSC를 사용하여 조사하여 실험실용 물질은 상변화 온도 5.4 °C, 잠열량 234 kJ/kg, 상업용 물질인 경우는 상변화 온도 1.7 °C, 잠열량 206 kJ/kg의 결과를 보고하였다. 그러나 상업용 물질의 상변화 온도와 잠열량은 불순물의 조성비에 따라 달라질 수 있으므로 본 연구에서 사용한 순도 97%인 상업용 n-Tetradecane(미국 Humphrey Chemical Co.제작)의 상변화 온도와 잠열량은 DSC를 이용하여 물의 잠열량과 어는점을 측정할때와 동일한 방법으로 여러번 측정하였다. 평균 측정결과는 Fig. 2에서의 같이 상변화 온도 4.1 °C, 잠열량 210 kJ/kg으로 조사되었다.

2.2 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 3

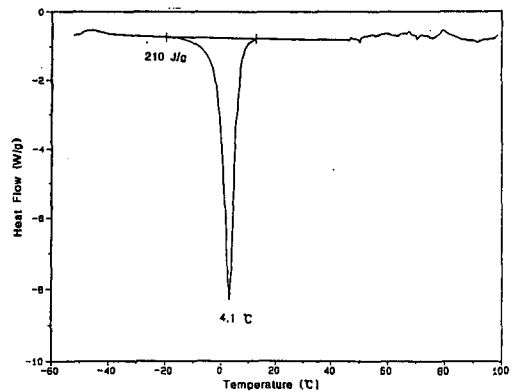


Fig. 2 Freezing temperature and latent heat of the n-Tetradecane measured by DSC

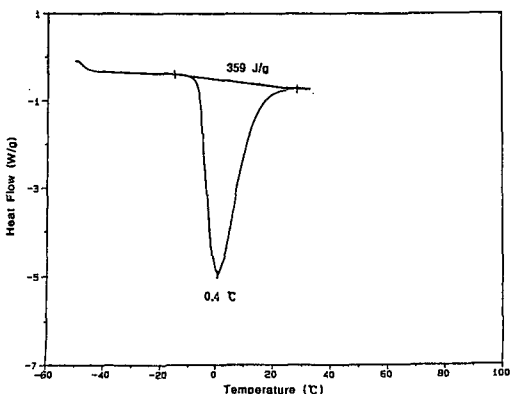
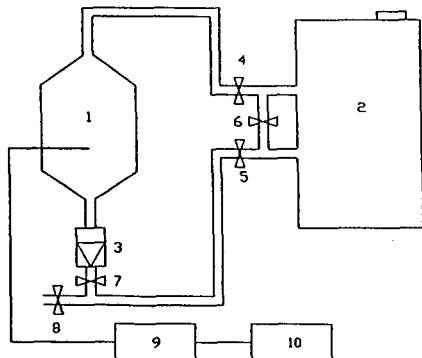


Fig. 1 Freezing temperature and latent heat of the water with inorganic material measured by DSC



- 1. Test section
- 2. Const. temp. bath
- 3. Flowmeter
- 4~7. Flow control valve
- 8. Drain valve
- 9. Data acq. system
- 10. PC

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

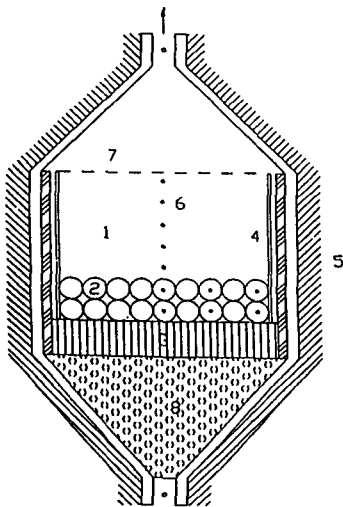
에 나타나 있으며 실험장치의 시험부(Fig. 3의 부품번호 1번)는 Fig. 4에 상세히 나타나 있다. 실험장치의 구성요소들 중 축냉조는 캡슐의 직경에 대한 축냉조의 직경의 직경비에 따른 반경방향으로의 국부 축냉특성을 조사하기 위해서 4.9, 9.0, 13.1의 직경비를 갖는 세개의 수직원통형 아크릴조로 제작하였다. 벽두께는 모두 10 mm이며 내경은 각각 120, 220, 320 mm이다. 수직원통형 축냉조의 높이는 모두 173 mm였고 내부에는 캡슐들(Fig. 4의 부품번호 2번)을 7단 높이로 쌓았다. 축냉조내부를 캡슐들로 채우고 축냉조 전체 체적에서 캡슐이 차지하는 체적을 제한 냉각유체가 차지하는 체적을 전체 체적으로 나누어 계산한 평균 다공도는 직경비 4.9, 9.0, 13.1인 축냉조에서 0.48, 0.47, 0.49였다. 축냉조 내부는 두께 5 mm의 고무(Fig. 4의 부품번호 4)로 단열시켰고 외부는 두께 25 mm의 글라스울(Fig. 4의 부품번호 5)로 단열시켜 외부로부터 축냉조의 열 침투를 방지시켰으며 고무부분 내부측에 두께 0.6 mm 등판을 부착시켜 축냉시 냉각유체 온도와 축냉조 벽간의 온도 차이를 감소시키도록 축냉조를 제작하였다. 축냉조 각각의 유입구와 유출구는 깔때기 모양으로 두께 1 mm의 스테인레스 강을 사용해 제작되었으며 유입각은 63.7°, 유출각은 92.5°였다. 유입구 내부에는 유

입유체를 균일하게 혼합시키기 위해서 수세미(Fig. 4의 부품번호 8)를 채웠다. 수세미를 통과한 후 유입유체가 축냉조 내부로 균일하게 유입되도록 5.1 cm 길이를 갖는 벌집구조(Fig. 4의 부품번호 3)를 설치하였으며 벌집구조를 빠져나온 직후 축냉조내에서의 냉각유체가 균일하게 유동함을 실험을 시작하기 전 확인했다. 유출입구 외부도 축냉조에서와 마찬가지로 외부로부터의 열 침투를 방지하기 위해 두께 25 mm의 글라스울로 단열했다. 상변화 물질을 삽입시킨 구형캡슐의 재질은 상용 ice-ball과 동일한 HDPE(high density polyethylene)이었고 크기는 상용 ice-ball의 직경 103 mm 보다 작은 평균 직경 24.51 mm, 두께 0.8 mm인 구형캡슐(미국 Precision Plastic Ball Co.사 제작)을 사용하였다. 구형캡슐의 내부에는 상변화 과정시 일어나는 축냉재의 체적변화를 고려한 양의 축냉재가 주입되었으며 무기물이 첨가된 물의 경우 주입량의 평균치는 5.30 g, n-Tetradecane의 경우는 4.35 g이었으며 주입량은 $\pm 0.5\%$ 이내의 편차로 조절되었다. 축냉조 내부의 초기온도와 냉각유체 유입온도는 $-20 \sim 130$ °C 범위 내에서 온도조절이 가능한 항온조(Fig. 3의 부품번호 2, 한국 Koma사 Model KR-30)에 의해 조절되었으며 항온조의 용량은 60 l였다. 축냉조 내부로의 냉각유체 유입유동율은 유량계(Fig. 3의 부품번호 3)와 유량조절 밸브들(Fig. 3의 부품번호 4~7)에 의해 조절되었으며 유량계로 사용된 로터미터는 작동온도 범위내에서 $\pm 2\%$ 의 측정정밀도 이내로 보정된 후 사용되었다. 축냉조내 위치된 캡슐들과 냉각유체에 대한 온도는 열전대(Fig. 4의 부품번호 6)을 이용해 측정되었다. T형 열전대(외경 0.005 inch, 미국 Omega사 제작)가 사용되었으며 표준 백금저항온도계를 사용하여 작동 온도범위를 포함하는 $-12 \sim 24$ °C 범위내에서 열전대들을 $\pm 0.1\%$ 의 측정정밀도이내로 보정했다.

온도측정자료는 컴퓨터(Fig. 3의 부품번호 10)에 연결된 자료측정장치(Fig. 3의 부품번호 9, 미국 Microstar사 Model 2400e/5)에 의해 처리되었다. 자료처리장치는 12 bit A/D 분해능과 16 bit D/A 분해능을 갖고 있으며 일정한 시간간격으로 수초내 전체 채널을 측정할 수 있었다.

2.3 실험변수 및 실험방법

축냉조내 구형캡슐들의 축냉실험에 영향을 주는 실험변수들로는 냉각유체의 유입온도, 유입유동율



1. Cold storage tank
2. Spherical capsule
3. Honeycomb
4. Inner insulator
5. Outer insulator
6. Thermocouples
7. Metal screen
8. Steel scrubber

Fig. 4 Schematic diagram of the test section

및 캡슐직경에 대한 축냉조직경의 직경비가 선정되었다. 상용 구형캡슐 축냉시스템에 대해 적용되는 축냉온도 범위가 $-4.5 \sim -5.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 점을 고려하여 냉각유체의 유입온도 범위로 $-7 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 취했다. 축냉조로 연결된 항온조의 펌핑용량을 고려하여 축냉조내 유입유동율의 범위로 $0.95 \sim 6 \text{ l/min}$ 을 취했다. 축냉조내에 채워지는 구형캡슐들의 개수를 고려하여 축냉조내 반경방향으로의 국부 축냉특성 변화를 조사하기 위한 직경비로 4.9, 9.0, 13.1을 취했다.

실험변수들에 의한 축냉조내 구형캡슐들의 국부 축냉에 대한 영향을 조사하기 전 무기물이 첨가된 물과 n-Tetradecane이 각각 삽입된 구형캡슐 하나씩에 대해 한 캡슐내 축냉과정을 균일한 냉각조건 하에서 조사하기 위해 일정한 온도로 설정된 항온조내에서 실험이 수행되었다. 축냉조내 축냉실험시작 직전까지 축냉조 내부 전체를 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지시켰고 실험을 시작하면서 유량조절밸브를 작동시켜 냉각 유입유체를 항온조로부터 축냉조로 일정한 유입 유동율로 유입시켜 축냉실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 항온조내 캡슐들의 축냉특성

새로운 축냉제인 n-Tetradecane이 주입된 구형캡슐 하나를 항온조내에 위치시켰을 때 항온조의 설정온도(T_B)에 따른 구형캡슐 중심부의 온도변화를 측정된 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에 나타나 있듯이 항온조내의 축냉과정시 n-Tetradecane이 담긴 구형캡슐은 과냉각이 전혀 발생되지 않았고 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 부근에서 상변화가 진행되었다. Grodzka⁽¹⁶⁾에

의하면 축냉시 결정핵이 생성되어 상변화 과정이 시작되면 열제거율과 응고 잠열량이 평형을 이루어 과냉각 상태에서도 다시 상변화 온도로 상승되어 안정화 되지만 응고가 느리게 진행되며 응고잠열량이 작고 열제거율이 클 경우는 상변화 온도보다 낮은 온도에서 상변화가 진행된다. 항온조내 축냉과정에서도 항온조 온도가 낮아 구형캡슐로부터의 열제거율이 큰 경우에는 상변화시 발생하는 응고잠열량의 차이가 발생하여 상변화 온도보다 더 낮은 온도에서 상변화가 진행되어 항온조의 온도가 $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우에 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우보다 상변화가 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도 낮은 온도에서 진행되었다. 캡슐내 n-Tetradecane 상변화 기간은 항온조의 설정온도가 낮을수록 짧고 상변화가 끝나는 지점이 명확했으나 항온조 설정온도가 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우에는 상변화 기간이 길고 고체 현열구간에서 시간에 따른 온도변화율이 작기 때문에 상변화과정이 끝난 시점이 명확하게 나타나지 않았다.

새로운 축냉제인 n-Tetradecane이 주입된 구형캡슐에 대한 결과와 비교하기 위해서 상용 ice-ball에 사용되는 물질인 무기물이 첨가된 물이 주입된 구형캡슐 하나를 항온조 내에 위치시킨 경우 항온조의 설정온도(T_B)에 따른 구형캡슐 중심부의 온도변화를 측정된 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 5와 Fig. 6에서 항온조 온도가 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 물과 n-Tetradecane의 상변화 기간만을 비교해 보면 물을 삽입한 캡슐은 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 1300초, $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 1110초이며 n-Tetradecane을 삽입한 캡슐은 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 960초, $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우 680초 정도로 측정되었다. 캡슐 1개에 저장되는 잠열량은 물이 1902.7 J 이고 n-Tetradecane은 913.5 J 이므로 상변화시 단

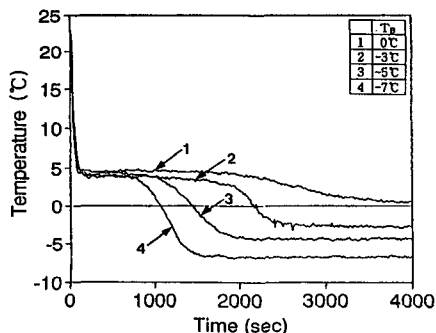


Fig. 5 Temperature variation at the center of a capsule with n-Tetradecane with respect to the bath temperature

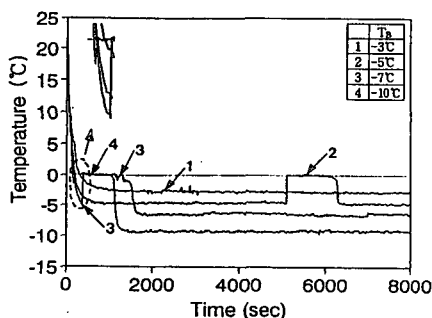


Fig. 6 Temperature variation at the center of a capsule with water and inorganic material with respect to the bath temperature

위시간당 캡슐내 저장되는 잠열량인 잠열저장률은 항온조 온도가 -5°C 일때 물이 n-Tetradecane에 비해 1.5배, -7°C 일때 1.3배 정도 빠르게 진행되었으나 Fig. 6에 나타나 있듯이 물이 담긴 구형캡슐은 과냉각이 오래 지속되어 전체 축냉성능이 저하됨을 알 수 있다. 물을 삽입한 캡슐은 물의 최대 밀도점인 4°C 부근에서는 캡슐내 온도감소 기율이 작아짐을 볼 수 있는데 이는 캡슐 내 자연대류가 감소하여 열전달률이 감소되기 때문으로 사료된다. 캡슐내 무기물이 첨가된 물은 n-Tetradecane과는 달리 항온조의 설정온도가 $-10\sim-3^{\circ}\text{C}$ 인 모든 경우에 과냉각이 발생되었다. 항온조의 온도가 -3°C 인 경우는 측정기간 동안 과냉각이 지속되어 상변화가 발생되지 않았으며 항온조 설정온도가 -5°C 인 경우는 과냉각이 1시간 반 이상 지속되다 상변화가 발생하였다. 항온조 온도가 -7°C 인 경우에는 최대 과냉도가 5.2°C 까지 일어났으나 빠른 결정핵의 생성으로 과냉기간은 감소되었으며 항온조 온도가 -10°C 로 설정된 경우는 과냉도가 2°C 정도로 감소되었고 과냉기간도 크게 감소되었다. 따라서 항온조의 설정온도를 낮추면 구형캡슐 내에서 과냉기간은 감소되었고 과냉도는 온도가 낮아질수록 증가되었으나 과냉도 크기가 최대가 되는 임의의 항온조 설정온도 이하에서는 과냉도 크기가 다시 줄어들음을 보였다. 물의 축냉시 과냉각 발생과 너무 낮지 않는 항온조 설정온도를 고려하여 축냉조내 무기물이 첨가된 물이 담긴 캡슐들의 축냉특성 조사는 과냉각이 오래 지속되지 않는 -7°C 의 유입온도에 대해서만 수행되었다.

3.2 축냉조내 n-Tetradecane이 담긴 캡슐들의 축냉특성

3.2.1 냉각유체 유입온도에 따른 축냉특성

직경비가 다른 세개의 축냉조들 중 직경비가 9.0인 축냉조에서 냉각유체 유입유량을 2.84 l/min 로 고정시키고 냉각유체 유입온도를 0, -3 , -5 , -7°C 로 변화시킨 경우 유입온도 변화에 따른 국부 축냉특성을 축냉이 가장 빨리 진행되는 축냉조의 최하단인 1단 중심부와 가장 늦게 진행되는 최상단인 7단 중심부 캡슐에 대해 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 나타나있듯이 유입온도가 가장 낮게 설정된 -7°C 인 경우에는 1단과 7단에서 모두 과냉각이 발생되지는 않았으나 1단에 비해 7단에서의 축냉기간은 500초 이상 길어졌다. 냉각유체 유입온

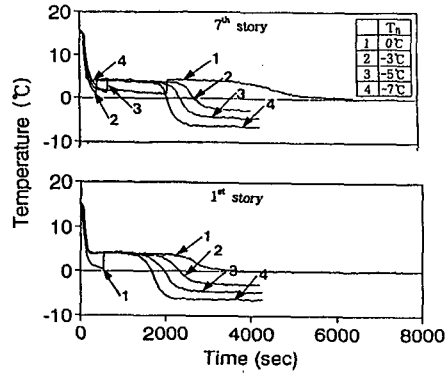


Fig. 7 Temperature variation at the center of the capsules with n-Tetradecane with respect to the inlet temperature of the tank ($Q=2.84\text{ l/min}$)

도가 -5°C , -3°C 인 경우에 7단에서 과냉각이 발생되어 1단과의 축냉기간차이는 각각 550초, 700초 정도로 -7°C 인 경우에 비해 증가되었으며 유입온도가 0°C 인 경우에는 과냉각이 가장 크게 나타나 1단에서는 과냉각이 500초, 7단에서는 과냉각이 2100초 정도 지속되었고 1단과 7단의 축냉기간 차이도 2000초 이상 크게 증가되었다. 과냉각이 발생된 경우들에서 과냉도는 모두 3.5°C 정도로 동일하게 나타났으나 유입온도가 높을수록 과냉기간과 캡슐 단수에 따른 축냉기간 차이가 증가하였다. 본 연구에서는 캡슐을 7단까지 쌓아 국부 축냉특성을 조사하였으나 캡슐 단수가 증가하게 되면 축냉향으로 높이가 커짐에 따라 축냉기간과 과냉기간이 증가하여 축냉향으로의 축냉률 차이가 더욱 증가할 것으로 사료된다.

3.2.2 유입유동률에 따른 축냉특성

직경비가 다른 세개의 축냉조들 중 직경비가 9.0인 축냉조에서 냉각유체 유입온도를 -7°C 로 고정시키고 냉각유체 유입유동률을 0.95, 1.89, 2.84, 6.00 l/min 로 변화시킨 경우 유입유동률 변화에 따른 국부 축냉특성을 축냉이 가장 빨리 진행되는 축냉조의 최하단인 1단 중심부와 가장 늦게 진행되는 최상단인 7단 중심부 캡슐에 대해 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타나 있듯이 냉각유체가 바로 유입되는 1단에서는 유입온도가 일정하면 유입유동률에 따른 축냉률의 변화가 거의 나타나지 않고 일정하게 축냉이 진행되었으나 7단에서는 유입유동률이 작을수록 냉각유체가 흘러가는데 시간이

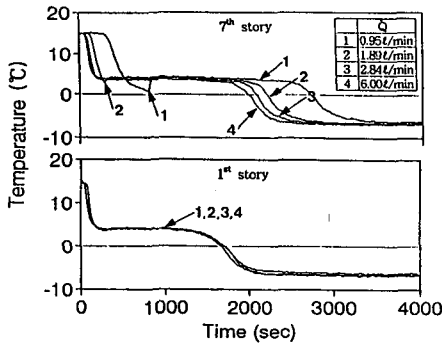


Fig. 8 Temperature variation at the center of the capsules with n-Tetradecane with respect to the flow rate of the tank ($T_n = -7^\circ\text{C}$)

오래 걸리고 유속이 느려서 캡슐내 상변화 물질의 냉각율이 감소되어 과냉각이 발생되었고 축냉이 느리게 진행되었다. 7단에서의 전체 축냉기간은 유입 유동률이 0.95 l/min에서 2700초, 1.89 l/min에서 2230초, 2.84 l/min에서 1920초, 6.00 l/min에서 1860초로 측정되어 유입유동률이 0.95에서 6.00 l/min으로 6.3배 증가할때 축냉기간은 약 840초, 최대 과냉도는 0.95 l/min인 경우 약 3°C, 1.89 l/min인 경우 약 1°C정도 나타났으며 2.84, 6.00 l/min에서는 과냉각이 관측되지 않았다. 축냉조내의 동일한 캡슐단에서 반경방향으로의 캡슐내 축냉특성은 거의 동일하게 나타났다.

3.2.3 직경비에 따른 축냉특성

축냉조의 직경비가 4.9, 9.0, 13.1로 다른 세 축냉조에 대해 유입온도를 -7°C 로 고정시키고 축냉조내로 유입되는 냉각유체는 유입유동률 대신 축냉조의 단면적으로 나누어 계산한 평균속도와 캡슐직경을 이용해 계산된 레이놀드 수를 세 축냉조에 대해 3.63으로 동일하게 하여 유입시켰다. 직경비 변화에 따른 국부 축냉특성은 축냉이 가장 빨리 진행되는 축냉조의 최하단 1단 캡슐들과 가장 늦게 진행되는 최상단 7단 캡슐들에 대해 동일한 무차원 반경(R^+)에서 Fig. 9(a), 9(b), 9(c)에 나타내었다. 무차원 반경은 축냉조의 반경에 대한 축냉조 중심에서 축냉방향으로의 거리에 대한 비율로 계산되었다. Fig. 9(a)에 나타낸 결과는 직경비가 4.9인 경우로 축냉기간이 1단에 비해 7단에서 600초 이상 증가되었다. 냉각유체의 유입온도는 -7°C 로 유입

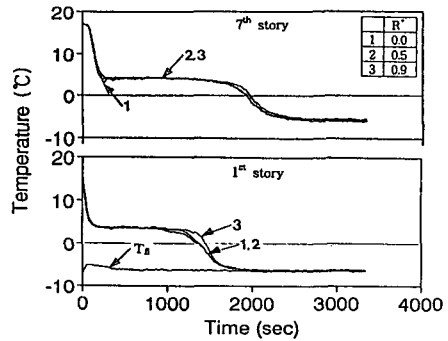


Fig. 9(a) Temperature variation at the center of the capsules with n-Tetradecane for the tank with the diameter ratio of 4.9 ($T_n = -7^\circ\text{C}$, $Re = 3.63$)

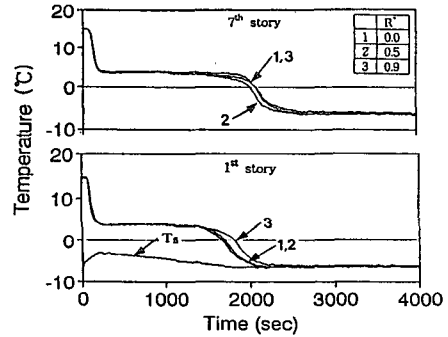


Fig. 9(b) Temperature variation at the center of the capsules with n-Tetradecane for the tank with the diameter ratio of 9.0 ($T_n = -7^\circ\text{C}$, $Re = 3.63$)

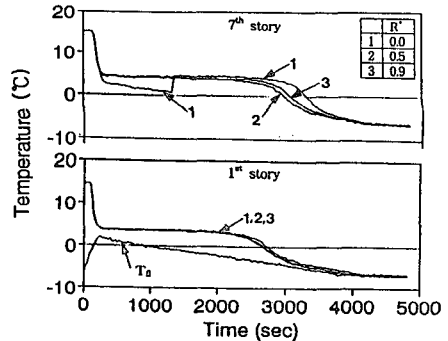


Fig. 9(c) Temperature variation at the center of the capsules with n-Tetradecane for the tank with the diameter ratio of 13.1 ($T_n = -7^\circ\text{C}$, $Re = 3.63$)

된 후 실험 전 15°C 로 조절된 축냉조내를 순환하면서 온도차를 나타내는 유체들이 혼합하면서 온도가 유입온도에 대해 최고 2.2°C 정도까지 상승되

었으나 350초 후에는 다시 유입온도 -7°C 에 도달하였다. Fig. 9(b)에 나타난 결과는 직경비가 9.0인 경우로 축냉기간이 1단에 비해 7단에서 400초 정도 증가되었다. 냉각유체의 유입온도는 Fig. 9(a)에서와 동일한 이유로 유입온도에 대해 최고 3.5°C 정도까지 상승되었으나 다시 유입온도인 -7°C 에 도달하는 데는 축냉조내 유체양이 더 적은 Fig. 9(a)경우에 비해 더 긴 1700초 정도 소요되었다. Fig. 9(c)에 나타난 결과는 직경비가 13.1인 경우로 직경비가 4.9, 9.0인 축냉조들에 비해 작동유체의 양이 많고 유체 순환량도 크므로 냉각유체의 유입온도가 유입온도에 대해 최고 8.7°C 정도까지 상승되었고 다시 유입온도인 -7°C 에 도달하는 데는 Figs. 9(a), 9(b)경우에 비해 더 긴 4000초 정도 소요되었다. Figs. 9(a), 9(b), 9(c)에 나타나 있듯이 벽에 근접된 부분에서는 축냉조가 단열재로 둘러싸였어도 외부로부터 침투되는 열전달의 영향을 받아 축냉이 느리게 진행되었다. 1단에서의 과냉각은 세 축냉조 모두에서 발생되지 않았고 7단에서도 직경비가 4.9와 9.0경우에는 과냉각이 거의 발생하지 않았으나 직경비가 13.1인 축냉조에서는 중심부에서 최고 3°C 정도의 과냉도가 1000초 정도 발생하였다. 이는 직경비가 증가될수록 캡슐들이 불규칙하게 배열되어 Benenati and Brosilow⁽⁷⁾에 의해 제시됐듯이 벽과 중심부간의 다공도 차이가 커져서 다공도가 크고 냉각유체 유동이 잘 진행되는 벽부근과 다공도가 작아 냉각유체 유동이 원활하지 못한 중심부간의 열전달률 차이가 더욱 커지기 때문인 것으로 사료된다. 그 차이는 캡슐의 단수가 증가할수록 누적되어 반경방향에서의 온도차가 증가되고 중심부에서의 과냉각도 증가되리라 사료된다. Figs. 9(a), 9(b), 9(c)에 나타나 있듯이 반경방향으로의 축냉률의 차이는 액체현열구간에서는 거의 없었으나 상변화 구간이 끝난 고체현열구간에서는 정상상태 도달까지의 시간이 액체현열구간에서보다 길고 벽면 근처의 캡슐들에 대한 외부 열 침투의 영향에 의해 약간의 차이가 나타났다.

3.3 축냉조내 물과 무기물이 담긴 캡슐들의 축냉특성

축냉조내 무기물이 첨가된 물이 담긴 캡슐들의 축냉 특성은 n-Tetradecane이 담긴 캡슐들의 축냉 특성과 비교하기 위해 수행되었다. 직경비가 다른 세개의 축냉조들 중 직경비가 9.0인 축냉조에서 냉

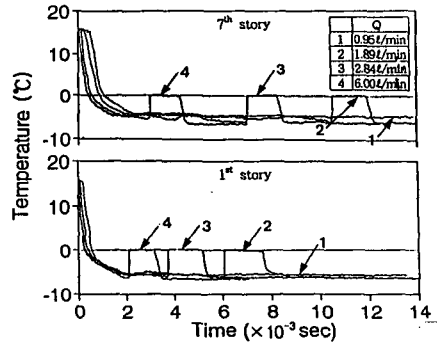


Fig. 10 Temperature variation at the center of the capsules with water and inorganic material with respect to the flow rate of the tank ($T_n = -7^{\circ}\text{C}$)

각유체 유입온도를 -7°C 로 고정시키고 냉각유체 유입유동률을 0.95, 1.89, 2.84, 6.00 l/min으로 변화시킨 경우 축냉이 가장 빨리 진행되는 축냉조의 최하단인 1단 중심부와 가장 늦게 진행되는 최상단인 7단 중심부 캡슐에서의 국부 축냉특성을 유입유동률에 따라 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10에 나타나 있듯이 축냉조내 위치한 캡슐들내부의 과냉각은 Fig. 6에 나타낸 항온조내 위치한 캡슐내부에서의 과냉각보다 훨씬 컸다. 이는 항온조 내에서는 하나의 캡슐에 대한 축냉과정을 조사하여 캡슐들간의 상호영향도 없었고 캡슐주위 유체의 온도도 항온조 설정 온도로 쉽게 도달되었으나 축냉조내에서는 캡슐들간의 상호영향과 축냉조로 유입되는 유체의 온도가 설정온도에 도달하는데 시간이 소요되기 때문으로 사료된다. Fig. 10에 나타나 있듯이 캡슐내 과냉도는 작동유입유동률 범위 전체에 대해 냉각유체 유입온도와와의 차이인 7°C 까지 일어났고 과냉기간도 오래 지속되어 캡슐내 담긴 물과 냉각유체간의 열전달이 저하되어 축냉기간이 증가되었고 특히 0.95 l/min인 경우에는 과냉각이 약 4시간 정도까지 지속되었기 때문에 캡슐내 담긴 물의 응고가 발생되지 않았다. 유입유동률이 증가될수록 물이 담긴 캡슐내 과냉기간은 감소되었으나 Fig. 8에 나타난 바와 같이 동일 조건하의 n-Tetradecane이 담긴 캡슐의 경우에 비해서 과냉이 심하게 일어나 축냉성능이 저하됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 n-Tetradecane을 새로운 축냉재

로 선정하여 물성치를 조사한 후 이를 주입한 캡슐들을 삽입한 축냉조 내 국부 축냉특성을 관련 변수들에 따라 실험적으로 측정하였고 빙축열 시스템에서 축냉재로 사용되고 있는 조핵제로 무기물이 첨가된 물을 주입한 캡슐들에 대한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 새로운 축냉재로 사용한 순도 97%의 n-Tetradecane을 DSC로 측정한 결과 어는점은 4.3 °C이며 잠열량은 210 kJ/kg였다.

(2) 항온조 내에서 n-Tetradecane을 삽입한 캡슐은 과냉각이 발생하지 않았으나 조핵제로 첨가된 무기물을 포함한 물을 삽입한 캡슐은 과냉각이 오래 지속되었고 과냉기간은 항온조 설정온도가 낮을수록 감소하였다.

(3) 고체에서 액체로의 상변화 구간에서 물의 잠열 저장율은 n-Tetradecane에 비해 항온조 설정온도가 -5 °C일때 1.5배, -7 °C일때 1.3배 크게 나타났으나 물을 삽입한 캡슐에서는 과냉각이 오래 지속되어서 전체 축냉성능은 저하되었다.

(4) 직경비가 9인 축냉조내 n-Tetradecane이 담긴 캡슐들을 삽입한 경우 1단과 7단에서의 축냉기간 차이는 유입온도가 -7 °C인 경우에는 과냉각이 발생하지 않아 500초 정도였으나 -5 °C에서는 550초, -3 °C에서는 700초, 0 °C에서는 2000초로 유입온도가 높을수록 윗단과 아랫단의 축냉기간 차이가 증가하였다. 이는 유입온도가 높을수록 과냉각이 증가하고 특히 캡슐단수가 증가할수록 과냉각이 오래 지속되기 때문이다.

(5) 직경비가 9인 축냉조내 n-Tetradecane이 담긴 캡슐들을 삽입한 경우 유입온도를 일정하게하고 유입유동율을 변화시킨 경우 1단에서는 축냉기간의 차이가 거의 없고 과냉각도 발생하지 않았으나 7단에서는 유입유동율이 작을때 과냉각이 발생하였다. 유입유동율이 0.95 l/min에서 6.00 l/min으로 6.3배 증가할때 축냉기간은 1/3정도 감소하여 유입유동율 변화에 비해 축냉기간의 변화율은 훨씬 작게 나타났다.

(6) 축냉조내 n-Tetradecane이 담긴 캡슐들을 삽입한 경우 레이놀드수를 일정하게하고 직경비를 변화시킨경우 직경비가 클수록 축냉조 중심부는 벽에 비해 캡슐들이 조밀하게 배열되어 냉각유체 유동이 원활하지 못해 과냉각이 발생하고 축냉기간이 증가하였으며 벽부근의 캡슐들은 냉각유체 유동이 원활하나 외부 열침투의 영향으로 축냉이 느리게

진행됨을 알 수 있다.

(7) 새로운 축냉재인 n-Tetradecane과 비교하기 위해 사용된 상용 빙축열시스템에 적용되는 무기물이 첨가된 물을 삽입한 캡슐들은 축냉조내에서 과냉각이 오래 지속되어 과냉기간이 증가하였다. 이러한 과냉각을 감소시키기위해 냉동기의 증발온도를 낮추거나 유입유동율을 증가시킬 수 있으나 냉동기 성능이 감소하고 펌프 용량의 증대되는 단점이 있다.

후 기

본 연구는 교육부 기계공학 학술연구조성비(과제번호 : ME 94-F-04)의 지원을 받아 수행하였으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Saitoh, T., 1983, "On the Optimum Design for Latent Heat Thermal Energy Storage Reservoir," *Refrigeration*, Vol. 58, No. 670, pp. 749~756.
- (2) Kamiya, Y. et al, 1993, "High Density Heat Storage Tank Using Spherical Capsule Type Latent Heat Accumulators," 日本 空氣調和・衛生工學會 學術講演會 講演論文集, pp. 425~428.
- (3) 최용문, 백종승, 최해만, 김석현, 1994, 빙축열 시스템성능평가 방법에 대한 연구, 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 강연 및 논문집, pp. 201~206.
- (4) Chen, S. L. and Yue, J. S., 1991, "A Simplified Analysis for Cold Storage in Porous Capsules With Solidification," *J. of Energy Resources Tech., Trans. of the ASME*, Vol. 113, pp. 108~116.
- (5) Chen, S. L. and Yue, J. S., 1991, "Thermal Performance of Cool Storage in Packed Capsule for Air Conditioning," *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 11, No. 6, pp. 551~561.
- (6) Saitoh, T. and Hirose, K., 1986, "High-Performance Phase-Change Thermal Energy Storage Using Spherical Capsules," *Chem. Eng. Comm.*, Vol. 41, pp. 39~58.
- (7) Benenati, R. F. and Brosilow, C. B., 1962,

- "Void Fraction Distribution in Beds of Spheres," *AIChE Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 359~361.
- (8) Lerou, J. J. and Froment, G. F., 1977, "Velocity, Temperature and Conversion Profiles in Fixed Bed Catalytic Reactors," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 32, pp. 853~861.
- (9) D. Arnold, 1991, "Laboratory Performance of an Encapsulated-ice Store," *ASHRAE Trans.*, pp. 1170~1178.
- (10) 윤제호, 유제인, 박승상, 윤성렬, 강한기, 박봉태, 김경호, 1993, 냉열 축열용 Clathrate의 성능 특성에 관한 실험적 연구, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 강연 및 논문집, pp. 82~87.
- (11) 정인성 등, 1993, "HCFC-141b 포점화합물을 이용한 축냉시스템의 성능에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 295~298.
- (12) 김양규 등, 1993, "HCFC-141b 포점화합물을 이용한 축냉시스템에서 첨가제가 과냉각 효과에 미치는 영향," 공기조화·냉동공학 동계학술발표회 강연 및 논문집, pp. 36~39.
- (13) 민정기, 유성일, 최형식, 김석현, 1994, "TMA을 이용한 축냉조의 열성능에 관한 실험 연구," 공기조화 냉동공학회 동계학술발표 논문집, pp. 53~57.
- (14) Choi, E., Cho, Y. I. and Lorsch, H. G., 1992, "Thermal Analysis of the Mixture of Laboratory and Commercial Grades Hexadecane and Tetradecane," *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 1~15.
- (15) Choi, E., Cho, Y. I. and Lorsch, H. G., 1993, "Enhancement of Convective Heat Transfer with Phase Change Particles," *The 6th Int. Sym. on Transport Phenomena in Thermal Eng.*, Seoul, Korea, pp. 341~346.
- (16) Grodzka, P. G., 1980, "Solar Energy Technology Handbook, part A: *Engineering Fundamentals*," Marcel Dekker, Inc.