

파라핀 축열재를 사용한 구형캡슐 시스템의 전열성능 Thermal performance of the spherical capsule system using paraffin as the thermal storage material

조 금 남*, 최 승 학**
K. N. Cho, S. H. Choi

Key words : Thermal storage material(축열재), Spherical capsule system(구형캡슐 시스템), Paraffin(파라핀), Charging and discharging time(충방냉시간), Average heat transfer coefficient(평균 열전달계수)

Abstract

The purpose of the present work is to show the best thermal storage material and the sensitivity of the parameters on the thermal performance by experimentally investigating the effects of the parameters on the thermal performance of the spherical capsule system using paraffins superior to the commercial one. The paraffins were n-Tetradecane and the mixture of n-Tetradecane 40% and n-Hexadecane 60%. The experimental parameters were the Reynolds number of 8, 12, and 16 and the inlet temperature of -7, -4, -1, and 2°C.

The charging and the discharging time, the dimensionless thermal storage amount, and the average heat transfer coefficient in the tank were obtained by utilizing the local temperature variation in the tank. The local charging and discharging time in the tank was axially and radially different a lot. The effects of the inlet temperature on the charging and the discharging time were larger during the charging process than during the discharging process, but the effects of the Reynolds number on the charging and the discharging time were in reverse order. The paraffins were better by 11~72% than the water with the inorganic material in the charging time aspect, but no difference in the discharging time aspect.

The effects of the Reynolds number on the dimensionless thermal storage amount were smaller than the effects of the inlet temperature during the charging process, but in reverse order during the discharging process within the working range of the experimental parameters. The effects of the inlet temperature and the Reynolds number on the average heat transfer coefficient were larger during the discharging process than during the charging process. The average heat transfer coefficient for the paraffins was larger by 40% maximum than that for the commercial material during the charging and the discharging process.

* 정회원, 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 기계공학부

기 호 설 명

- A : 구형캡슐의 표면적, m^2
- D : 축냉조 직경, m
- D^+ : 직경비 ($=D/d$)
- d : 캡슐 직경, m
- h_o : 캡슐표면과 작동유체간 평균 열전달 계수, W/m^2K
- k_f : 작동유체의 열전도계수, W/mK
- Nu : 누셀트 수 ($=h_o d/k_f$)
- n : 구형캡슐의 총 갯수
- Q : 저장열전달량, kJ
- Q^+ : 무차원 저장열전달량 ($=Q/Q_{tot}$)
- Q_{tot} : 총 저장열전달량, kJ
- q : 열전달율, W
- R : 축냉조 반경, m
- R^+ : 무차원 반경 ($=r/R$)
- Re : 레이놀드 수 ($=\rho Vd/[(1-\epsilon)/\mu]$)
- r : 축냉조 반경방향 좌표, m
- T_f : 작동유체 온도, $^{\circ}C$
- T_{in} : 작동유체 유입온도, $^{\circ}C$
- T_m : 상변화온도, $^{\circ}C$
- T_s : 캡슐표면 온도, $^{\circ}C$
- t : 시간, sec
- V : 작동유체 평균유속, m/s

그리스 문자

- ϵ : 다공도
- μ : 작동유체 점도, $kg/(m \cdot s)$
- ρ : 작동유체 밀도, kg/m^3

1. 서 론

잠열 축열시스템은 정적방식과 동적방식으로 나눌 수 있다. 정적방식으로는 관외 착빙형, 관내 착빙형, 캡슐형 등이 있고 동적 방식으로는 빙박리형, 슬러리형 등이 있다. 정적방식 중 캡슐형은 전열면적이 크고 설치가 용이한 장점이 있다. 캡슐형에 관한 연구로 서성세 등⁽¹⁾은 원통형 캡슐내 초기

과냉각 현상이 용해과정에 미치는 영향을 조사하였고 Ryu 등⁽²⁾은 수직 및 수평 원통형 관내에서 상변화기간동안 열전달율, 성능계수, 과냉각 등을 조사하였다. Saitoh⁽³⁾는 구형캡슐이 평판형, 켈리컬 코일형, 원통형 등 다른 축열형상보다 열 저장 성능이 우수함을 조사하였다. Arnold⁽⁴⁾는 물과 약간의 무기물이 삽입된 구형캡슐의 직경변화에 따른 열전달 특성과 과냉각을 조사하였다. 구형캡슐 시스템의 전체 평균적인 전열성능 연구는 Kamiya⁽⁵⁾와 최용문 등⁽⁶⁾에 의해, 국부적인 전열성능에 관한 연구로는 Chen and Yue⁽⁷⁾와 Saitoh and Hirose⁽⁸⁾의 축방향 일차원 모델연구가 있다. 구형캡슐 시스템에서는 축열조의 벽과 중심부에서 다공도 차이로 인해 국부적인 전열성능이 달라질 것이므로 구형캡슐 시스템의 전열성능을 효율적으로 예측하기 위해서는 축열조의 축방향뿐만아니라 반경방향에서의 전열성능에 대한 연구가 필요하다.

또한 상용 구형캡슐 시스템에서 축열재로 널리 사용되고 있는 물은 축냉시 잠열량이 큰 편이나 용융점이 $0^{\circ}C$ 로 낮고 축냉이 진행될수록 얼음의 열저항이 증가하며 용융점이하에서도 물로서 존재하는 과냉각 현상이 발생하기 쉽다. 이러한 단점들은 냉동기의 증발 온도를 $0^{\circ}C$ 로 낮게 설정하도록 하며 냉동기 성능을 저하시키는 요인이 되고 있다. 물보다 용융점이 높아서 냉동기 성능을 향상시킬 수 있으며 물과 비슷한 정도의 잠열량을 갖고 있는 축열재들로 무기수화염, 포집화합물, 파라핀 물질들이 있다. 무기수화염은 상분리와 큰 과냉각을 나타내고 포집화합물은 고압용기가 필요한 단점이 있다. 파라핀 계열의 물질은 탄소수가 증가함에 따라 용융점이 증가하고 사용 온도범위에 따라 그 선택의 폭이 넓으며 과냉각현상과 상분리현상이 거의 나타나지 않는 장점이 있다. 임장순 등⁽⁹⁾과 김준근⁽¹⁰⁾은 난방용 파라핀 계열 물질들을 이용해 축열재별 전열성능을 비교하였다.

따라서 본 연구에서는 상용 축열재인 무기물이 첨가된 물보다 용융점이 높은 파라핀물질들 중 냉방용으로 적합한 용융점을 갖고 잠열량도 비교적 큰 파라핀 축열재를 사용한 구형캡슐 시스템의 전열성능을 실험적으로 조사함으로써 최적의 축열재와 구형캡슐시스템의 전열성능에 미치는 변수들의

영향을 제시하고자 했다.

2. 실험내용 및 실험방법

2.1 파라핀 축열재

파라핀 축열제로 용융점이 3~7°C 범위에 있는 공업용 n-Tetradecane, 40% n-Tetradecane과 60% n-Hexadecane의 혼합물이 선정되었고, 상용 축열재인 무기물이 첨가된 물도 사용되었다. 축열재들의 용융점과 용융잠열량은 differential scanning calorimeter(DSC)로 반복 측정된 경우, 증류수의 어는점 0°C와 증류수에 대해 DSC로 측정된 0.81°C 차이를 보상하면 n-Tetradecane의 경우 3.64°C와 172.1(kJ/kg), 혼합물의 경우 6.71°C와 110(kJ/kg), 무기물이 첨가된 물의 경우 1.1°C와 301.7(kJ/kg)이었다. 파라핀 물질들을 삽입한 구형캡슐을 항온조내에 위치시킨 후 측정할 용융점은 n-Tetradecane의 경우 3.66°C, 혼합물의 경우 6.0~7.4°C 온도범위로 나타나서 DSC로 측정한 결과와 유사한 값을 보였다.

2.2 실험변수 및 실험방법

구형캡슐시스템의 전열성능에 영향을 미치는 실험변수들로 레이놀드 수와 작동유체의 유입온도를 선정하였다. 축열조로 연결된 항온조의 펌핑용량을 고려하여 캡슐직경과 다공도를 이용한 레이놀드 수를 8, 12, 16, 상용 구형캡슐시스템의 유입온도와 축열재의 용융점을 고려하여 축냉실험시는 유입온도가 -7, -4, -1, 2°C였고 방냉실험시는 유입온도가 10°C였다. 직경비는 8.8로 고정하였다. 축·방냉 사이클의 영향을 조사하기 위해서 축열조 내부초기온도가 축냉시에는 10°C로, 방냉시에는 축냉과정시의 유입온도로 유지되었다.

2.3 실험장치

구형캡슐 시스템의 전열성능을 조사하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig.1에 나타나 있다.

축열재가 삽입된 구형캡슐의 재질은 상용 구형캡슐과 동일한 고밀도 폴리에틸렌이었고 크기는 모델 실험을 위해 상용 구형캡슐보다 작은 24.5mm의 외경이었다. 수직원통형 아크릴 축열조내 구형캡슐들

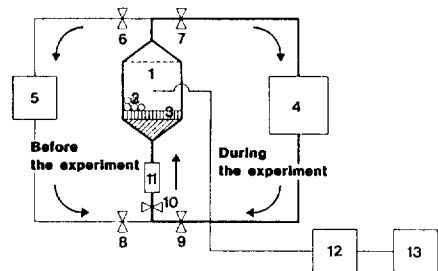
이 7단 높이로 쌓였다. 축열조 주위는 단열되었고 시험부 입구에는 작동유체가 균일하게 유입되도록 벌집구조가 설치되었다. 작동유체의 유입온도는 에틸렌글리콜 수용액을 사용한 항온조에 의해 조절되었다. 축열조내로의 유입유동율은 ±1%의 측정정밀도로 보정된 유량계에 의해 측정되었고 구형캡슐 중앙부, 캡슐표면 및 작동유체 온도는 ±0.15°C의 측정정밀도로 보정된 열전대로 측정되어 60채널의 자료를 0.5초내로 처리가 가능한 자료처리장치에 의해 기록되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 축열조내 국부 온도변화 및 축·방냉시간

축열조내 축방향 및 반경방향으로의 국부 온도변화는 축열조의 1단과 7단 중심부와 가장자리에 위치한 캡슐 중심부에서의 온도변화로 나타낼 수 있다. 사용한 축열재들에 대한 축열조내 국부 온도변화는 실험변수 범위에서 유사한 경향을 보이고 있으므로 대표적으로 n-Tetradecane의 경우 유입온도 -4°C, 레이놀드 수 16일 때 캡슐 중앙부의 온도와 축열조의 1단 및 7단에서의 작동유체 평균온도를 Fig.2에 나타내었다.

축방냉시 액체현열구간의 온도구배는 고체현열구간의 온도구배에 비해 크게 나타났다. 이는 실험



1. Test section 2. Spherical capsule 3. Honeycomb
4~5. Bath 6~10. Flow control valves
11. Flow meter 12. Data acquisition system 13. PC

Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

조건하에서 액상의 열화산율이 고상의 열화산율보다 26% 정도 크므로 고체 상태일 때 시간변화에 따른 열전달률의 변화가 액체 상태일 때보다 작기 때문이다. 상변화온도는 DSC로 측정된 상변화온도와 유사하나 일정하지 않고 약간의 온도구배를 나타냈다. 이는 Grodzka⁽¹¹⁾에 의해 제시된 바와 같이, 응고잠열량에 비해 상변화 과정시 열제거율이 크면 상변화시 온도구배가 있고 물질의 순도가 낮아질수록 상변화시 온도구배가 커지기 때문이다. 즉, 축방냉시 구형캡슐로부터의 열제거율이 잠열량에 비해 크고 n-Tetradecane의 순도도 94%인 공업용이 사용되었기 때문에 상변화과정시 온도구배가 나타났다.

축·방냉시간은 실험시작부터 상변화과정 후 얻어진 현열구간에서 수렴하는 온도와 0.2°C만큼 차이가 나는 온도에 도달하는 시간으로 정의하였다. 이는 온도 측정시 사용한 열전대의 측정 정밀도가 ±0.15°C인 점을 고려한 것이다. 축냉시간은 1단

중양부와 가장자리에서 53분, 7단 중양부와 가장자리에서 70분으로 나타나서 7단이 1단보다 17분 만큼 컸다. 방냉시간은 1단에서 중양부 53분, 가장자리 39분, 7단에서 중양부 64분, 가장자리 51분으로 나타나서 7단이 1단보다 11~12분 만큼 컸고 가장자리가 중양부보다 13~14분 정도 작았다. 축·방냉과정은 축열조 1단이 7단에 비해 빨랐고 축열조 가장자리는 중심부에 비해 다공도가 크기 때문에 빨랐다. 1단과 7단간 축냉시간 차는 방냉시간 차보다 컸고 중심부와 가장자리에 대한 축냉시간차는 방냉시간 차보다 작았다. 축방냉시간에 대한 축열조 1단과 7단에서 작동유체 평균온도차는 축냉시 2.3°C, 방냉시 0.9°C로 나타나서 방냉시가 축냉시에 비해 작았다. 축열조 변경방향으로의 축방냉시간차이가 발생하는 이유는 Benenati and Brosilow⁽¹²⁾에 의해서 제시됐듯이 원통형 축열조의 중심부에 비하여 가장자리에서 다공도가 크므로 작동유체 유동이 잘 진행되는 축열조 가장자리와

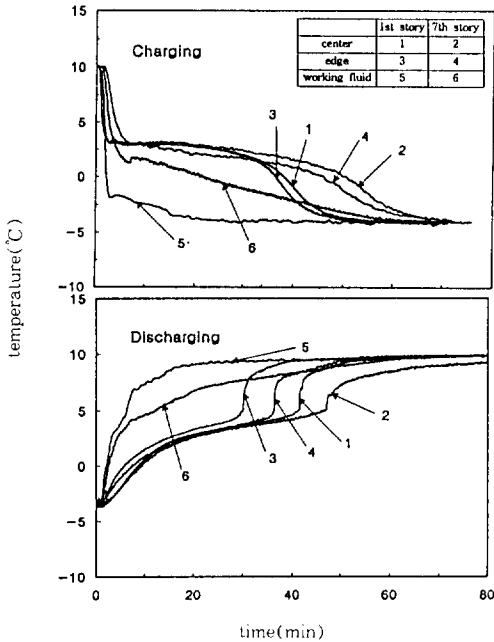


Fig.2 Temperature variation at the center of a capsule with n-Tetradecane and of the working fluid around the capsule ($T_{in} = -4^{\circ}C$, $Re = 16$)

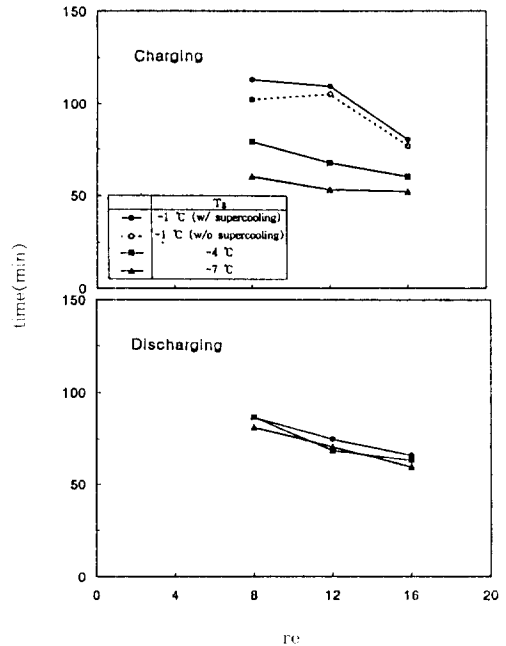


Fig.3 Charging and discharging time at a center of a capsule with n-Tetradecane at the center of the 4th story of the tank w. r. t. the experimental parameters

다공도가 작아 작동유체 유동이 원활하지 못한 축열조 중심부간 열전달율 차이가 생기기 때문이다.

축열조내 축·방냉시간에 미치는 유입온도와 레이놀드 수의 영향은 대표적으로 n-Tetradecane의 경우 축열조 4단 중앙부에 대해 Fig.3에 나타나있다.

축·방냉시간은 레이놀드 수가 증가함에 따라 감소했으며 유입온도가 증가함에 따라 증가됐다. 유입온도가 -7°C에서 -1°C로 증가될 때, 레이놀드 수가 8인 경우는 축냉시간이 88%, 방냉시간이 7%, 레이놀드 수가 16인 경우는 축냉시간이 53%, 방냉시간이 11% 증가되어 방냉시간 차가 축냉시간 차보다 작게 나타났다. 특히 축냉시 과냉각이 나타난 유입온도가 -1°C인 경우는 다른 유입온도 조건에 비해 축냉시간이 크게 나타났고 유입온도가 -1°C인 경우 측정된 과냉시간만큼 제외했을 때의 축냉시간을 점선으로 표시하였으나 이 경우도 축냉시간이 다른 경우들에 비해 컸다. 이 경우에 대한 과냉시간은 레이놀드 수가 8과 16일 때 11분과 4분이었다. 레이놀드 수가 8에서 16으로 증가될 때, 유입온도가 -7°C인 경우는 축냉시간이 13%, 방냉시간이 27%, 유입온도가 -1°C인 경우는 축방냉시간이 18% 만큼 감소되어 축냉시간 차가 방냉시간 차보다 대체로 작게 나타났다.

축열조내 축·방냉시간에 미치는 축열재의 영향은 축열재의 상변화온도가 다르기 때문에 대표적으로 축냉시 유입온도와 축열재 상변화온도간의 차이가 8°C 정도일 때 축열조 4단 중앙부에 대해 Fig.4에 나타나있다.

축열재가 무기물이 첨가된 물의 경우 레이놀드 수 8일 때 과냉시간이 76분 정도이어서 축냉시간이 파라핀 축냉재들에 비해 약 두 배 정도 크게 나타났다으며 Fig.3에서와 같이 과냉각 시간을 제외시켰을 때 무기물이 첨가된 물의 축냉시간을 점선으로 표시하였다. 무기물이 첨가된 물은 레이놀드 수가 8에서 16으로 두 배만큼 증가했을 때 과냉각을 고려하면 축냉시간이 51% 정도 감소됐고, 파라핀 혼합물에 비해 레이놀드 수 범위에서 축냉시간이 16~72% 만큼 컸다. n-Tetradecane은 파라핀 혼합물보다 5% 정도 컸다. 이는 파라핀 축열재들이 상용 축열재보다 11~72% 정도 축냉시간 측면에서 우수함을 나타낸다. 과열현상이 나타나지 않는

방냉시는 축열재에 따른 방냉시간의 차이가 14~31% 정도로 축냉시보다는 상대적으로 작았고 레이놀드 수 변화에 따른 방냉시간 변화 폭은 상용 축냉재와 n-Tetradecane이 유사하게 나타났다.

3.2 축열조내 무차원 저장열전달량

축열조내 무차원 저장열전달량은 축열조의 평균 축·방냉성능을 나타낸다. 축열조내 총 저장열전달량은 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{tot} = \int_0^{t_1} q dt + \int_{t_1}^{t_2} q dt + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} q dt \quad (1)$$

식 (1)의 q는 임의의 시간에서의 축열조내 열전달률을 나타내고, 시간 t_n 은 총 저장열전달량을 구하기 위해 취하는 적분시간을 나타낸다.

축열조내 총 저장열전달량은 축열재와 실험변수에 따라 다르기 때문에 다음 식 (2)와 같이 저장

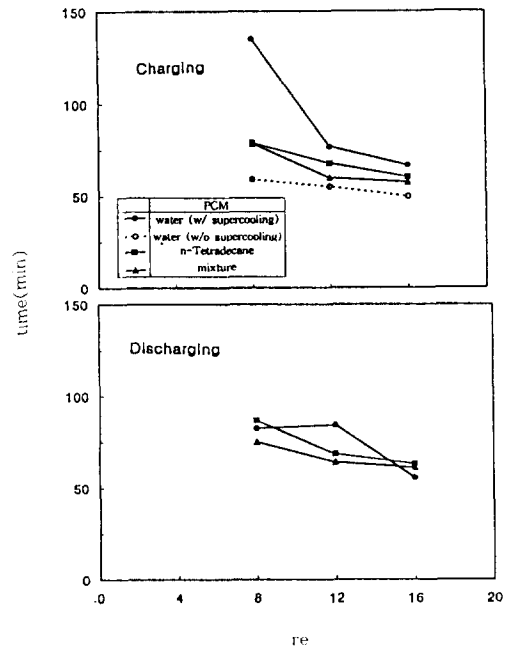


Fig.4 Charging and discharging time at a center of a capsule at the center of the 4th story of the tank w. r. t. the thermal storage material($T_m - T_i = 8^\circ\text{C}$)

열전달량과 총 저장열전달량의 비인 무차원 저장열 전달량을 사용한다.

$$Q^+ = \frac{\int_0^t qdt}{Q_{tot}} \quad (2)$$

무차원 저장열전달량은 실험변수들과 축열재의 영향을 받는다. 무차원 저장열전달량에 미치는 유입온도와 레이놀드 수의 영향을 대표적으로 n-Tetradecane의 경우에 대해 Fig.5에 나타내었다.

레이놀드 수가 16일 때 유입온도를 -1°C 와 -7°C 로 선정하여 유입온도의 영향을 나타냈고 유입온도가 -4°C 일 때 레이놀드 수를 8과 16으로 선정하여 레이놀드 수의 영향을 나타냈다. 무차원 저장열전달량에 미치는 유입온도의 영향은 유입온도가 -1°C 일때보다 -7°C 일 때, 축냉시는 캡슐 외부에서의 강제대류 열전달율이 더 크기 때문에 무차원 저장열전달량이 1에 도달하는 시간이 47%

정도 작았다. 방냉시는 캡슐표면온도가 축열재 온도보다 높기 때문에 캡슐내부에서의 자연대류 영향이 추가되어 시간차이가 거의 없었다. 즉, 유입온도의 영향이 축냉시는 컷으나 방냉시는 거의 없었다. 무차원 열저장열전달량에 미치는 레이놀드 수의 영향은 레이놀드 수가 8일 때보다 16일 때 축방냉시 모두에 대해 무차원 저장열전달량이 1에 도달하는 시간이 30% 정도 작았다. 즉, 유입온도와 레이놀드 수 작동범위에서 유입온도 영향보다 레이놀드 수 영향이 축냉시는 작았고 방냉시는 컷나. 이는 방냉시 캡슐내부에서의 자연대류 열전달이 레이놀드 수의 변화보다 유입온도의 변화에 더 민감하기 때문이다.

무차원 저장열전달량에 미치는 축열재들의 영향을 대표적으로 축냉시 유입온도와 축열재의 상변화 온도간의 차이가 8°C 정도, 레이놀드 수가 16일 때 Fig.6에 나타내었다.

무차원 저장열전달량은 축냉시 n-Tetradecane

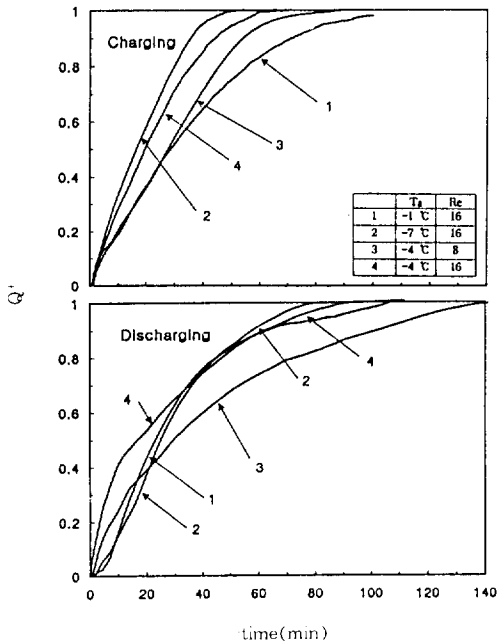


Fig.5 Dimensionless thermal storage amount for the capsules with n-Tetradecane in the tank w. r. t. the experimental parameters

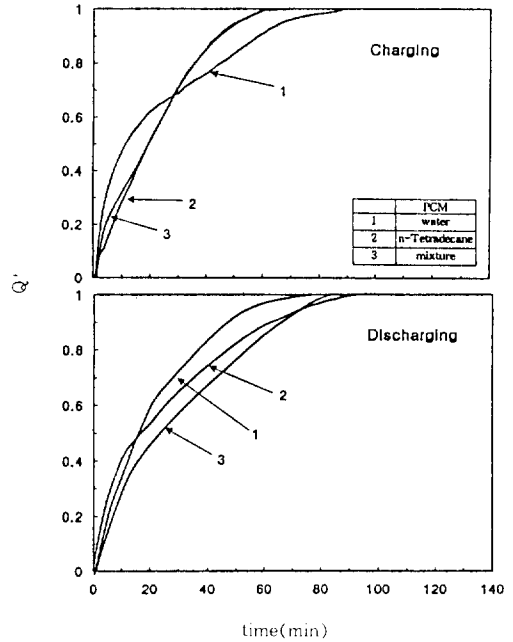


Fig.6 Dimensionless thermal storage amount for the capsules in the tank w. r. t. the thermal storage material ($T_m - T_{if} = 8^{\circ}\text{C}$, $Re = 16$)

과 파라핀 혼합물의 경우는 거의 동일하게 나타났다. 축냉초기에 5~25분 정도의 과냉시간을 나타낸 무기물이 첨가된 물은 과냉시 액체현열구간에서와 동일한 온도구배를 갖기 때문에 무차원 저장 열전달량이 축냉초기에 크게 상승하나 상변화과정이 시작하면서 열전달율이 감소하여 n-Tetradecane 과 혼합물에 비해 총 저장열전달량에 도달하는 시간이 50% 정도 증가되었다. 이는 파라핀 축열재들이 상용 축열재에 비해 축냉시 우수함을 나타내는 것이다. 방냉시 총 저장열전달량에 도달하는 시간은 축열재간 차이가 거의 없었으나 무차원 저장 열전달량의 시간변화율은 방냉초기에 파라핀 축열재들이 상용 축열재보다 작게 나타났다.

3.3 축열조내 캡슐표면과 작동유체간 평균 열전달계수

축열조내 국부 전열성능은 구형캡슐 주위에서의 국부 열전달계수로 나타낼 수 있으나 캡슐전후 작동유체 온도차가 열전대의 측정오차범위인 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 와 유사한 크기를 나타냈기 때문에 국부 열전달계수를 제시하기가 용이하지 않았다. 이에 따라 축열조내 캡슐표면과 작동유체간 평균 열전달계수를 다음 식 (3)과 같이 조사했다.

$$h_0 = \frac{q}{nA \cdot (\Delta T)} \quad (3)$$

온도차 ΔT 는 축열조 1단과 7단에 위치한 캡슐들의 표면 평균온도와 작동유체 평균 온도차이고 q는 축열조 1단과 7단 작동유체 평균온도차와 유입유동율을 이용해 구한 작동유체와 구형캡슐간의 열전달율이다. 평균 열전달계수는 현열구간에서 시간에 따라 일정하지 않은 값으로 나타났고 축·방냉이 완료되는 시점부근에서는 캡슐표면과 작동유체간의 온도차가 상당히 작게 되어 정확하지 않은 값을 얻었으므로 상변화구간에서 얻은 거의 일정한 평균 열전달계수의 평균값을 제시한다. 평균 열전달계수에 미치는 유입온도와 레이놀드 수의 영향을 대표적으로 n-Tetradecane의 경우에 대해 Fig.7에 나타내었다.

축방냉시 레이놀드 수가 증가하고 유입온도가 낮

아짐에 따라 평균 열전달계수는 증가하였다. 평균 열전달계수에 미치는 유입온도의 영향은 유입온도가 -1°C 에서 -7°C 로 감소됨에 따라 축냉시 레이놀드 수 8과 16일 때 10%, 레이놀드 수 12일 때 25%정도 증가됐고 방냉시 레이놀드 수 8일 때 220%, 레이놀드 수 12일 때 80%, 레이놀드 수가 16일 때 60%정도 증가됐다. 평균 열전달계수에 미치는 레이놀드 수의 영향은 레이놀드 수가 8에서 16으로 증가됨에 따라 축냉시 모든 유입온도에서 30%정도 증가하였고 방냉시 유입온도 -7°C 에서 70%, 유입온도 -4°C 에서 110%, 유입온도 -1°C 에서 250%정도 증가하였다. 평균 열전달계수에 미치는 유입온도와 레이놀드 수의 영향이 방냉시가 축냉시보다 크게 나타난 것은 방냉시 캡슐 표면온도가 축열재온도보다 높기 때문에 축냉시와는 달리 캡슐내 자연대류 영향이 추가되기 때문이므로 방냉시 레이놀드 수와 유입온도 설정을 적절히 할 필요가 있다.

평균 열전달계수에 미치는 축열재들의 영향을 대표적으로 축냉시 유입온도와 축열재의 상변화온도

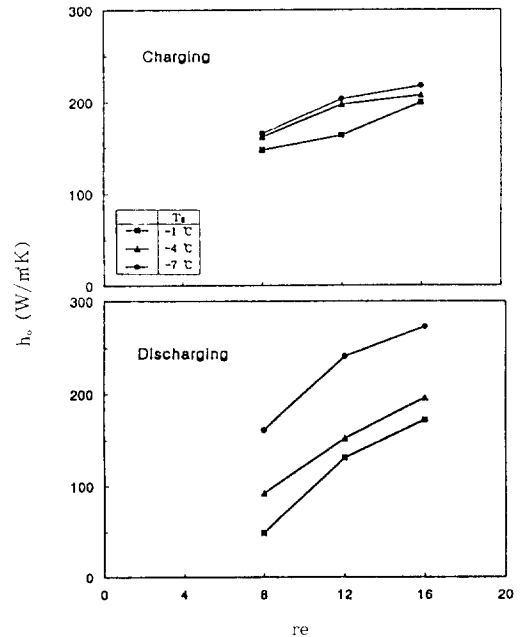


Fig.7 Average heat transfer coefficient for the capsules with n-Tetradecane

차이가 8°C 정도, 레이놀드 수 16일 때 Fig.8에 나타내었다.

평균 열전달계수는 축냉시 n-Tetradecane, 혼합물, 무기물이 첨가된 물의 순서로 컸고, 방냉시 혼합물, n-Tetradecane, 무기물이 첨가된 물의 순서로 컸다. 평균 열전달계수는 축냉시 상용 축냉제보다 n-Tetradecane이 레이놀드 수 8일 때 30%, 레이놀드 수 16일 때 40% 정도 컸고 혼합물은 레이놀드 수 8에서는 차이가 없었으나 레이놀드 수 16일 때 37% 정도 컸다. 방냉시 평균 열전달계수는 레이놀드 수 8일 때 상용 축냉제보다 n-Tetradecane이 작게 나타났으나 레이놀드 수 12일 때 20%, 레이놀드 수 16일 때 30% 정도 컸고 혼합물은 레이놀드 수 8에서 6%, 레이놀드 수 12와 16에서 40% 정도 컸다. 즉, 축방냉과정시 상용 축열제보다 파라핀 축열제들에 대한 평균 열전달계수가 대부분 컸으므로 파라핀 축열제들이 상용 축열제보다 더 우수함을 알 수 있었다. 파라핀 축열제들의 비교로는 축냉시 n-Tetradecane이, 방냉시 혼합

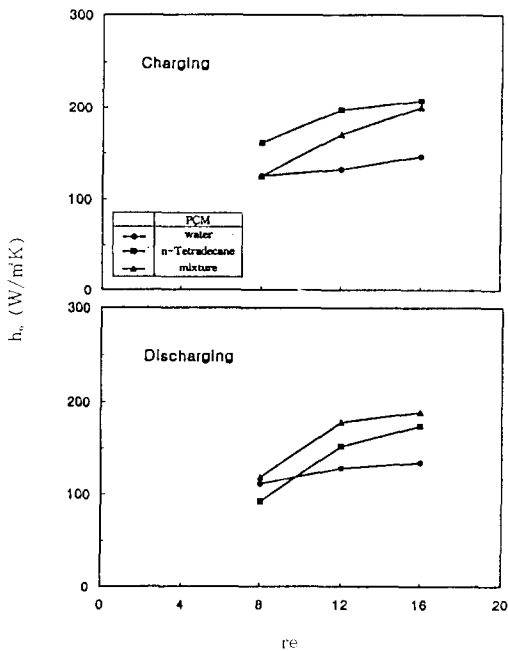


Fig.8 Average heat transfer coefficient for the capsules w.r.t. the thermal storage material ($T_m - T_b = 8^\circ\text{C}$, $Re = 16$)

물이 더 우수함을 나타냈다.

구형캡슐 시스템의 전열성능 실험결과를 타문헌과 다음과 같이 개략적으로 비교하였다. Chen and Yue⁽⁷⁾는 본 연구에서 사용한 24.5mm보다 큰 34mm 외경의 구형캡슐을 사용하였고, 축열조내 다공도 변화를 임의로 주기 위해 구형캡슐들이 서로 떨어져 있어서 열전달율이 본 연구결과보다 컸고, 수평형 축열조에 축냉과정만 조사했고, 유입 온도가 20°C까지 설정된 점등에서 본 연구와 차이가 있으나 본 연구결과와 비교할 수 있는 가장 근접한 결과라 할 수 있다. 본 연구와 Chen and Yue⁽⁷⁾연구는 무기물이 첨가된 물을 사용하였다. 본 연구에서 무기물이 첨가된 물의 경우 유입온도가 -7°C일 때 얻은 결과와 Chen and Yue⁽⁷⁾가 유입온도 -20°C일 때 얻은 결과비교가 축냉과정시에 대해 Fig.9에 나타나 있다.

구형캡슐내에서 상변화가 일어나지 않는 경우 구형캡슐들 주위에 흐르는 유체의 레이놀드 수 범위가 $3.5 \sim 8 \times 10^4$, 프렌탈 수 범위가 0.7~380일 때 열전달을 나타내는 Whitaker⁽¹³⁾의 상관식을 이용한 결과는 상변화 열전달을 나타내는 본 연구 및 Chen and Yue⁽⁷⁾의 결과와 상대적인 비교를 하기 위해 제시되었다. Chen and Yue⁽⁷⁾의 레이놀드 수 범위는 본 연구의 레이놀드 수 범위보다 훨씬 큰 320~1,050이었다. Whitaker⁽¹³⁾ 식에 의한 누셀트 수는 본 연구 결과보다 50% 정도 작게, Chen and Yue⁽⁷⁾의 결과보다 75% 정도 작게 나타났는데

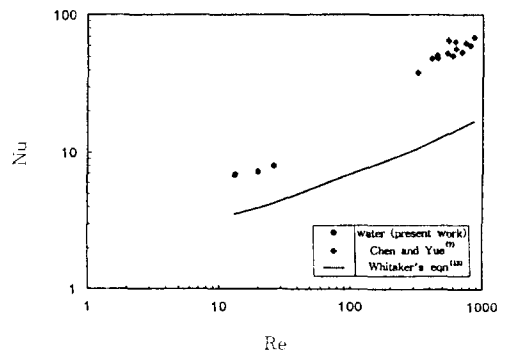


Fig.9 Rough comparison of the present work and the literatures during charging time

이는 상변화를 수반하지 않는 열전달에 대해 적용되기 때문이다. 또한 Whitaker⁽¹³⁾ 식에 의해 구한 뉴셀트 수와 Chen and Yue⁽⁷⁾에 의한 뉴셀트 수 차이가 본 연구에서 얻은 뉴셀트 수 차이보다 더 크게 나타났것은 Chen and Yue⁽⁷⁾의 경우 구형캡슐들이 서로 떨어져 있고, 레이놀드 수가 더 크고, 유입온도가 더 낮은 경우에 대해 얻었기 때문으로 판단된다. 이런 점을 고려해볼 때 본 연구에서 얻은 결과는 비교적 타 연구결과와 정성적인 경향에서 일치한다고 할 수 있다.

4. 결 론

1) 축열조내 국부 축방냉시간은 축방향뿐만 아니라 반경방향으로도 차이가 크게 나타났다. 국부 축방냉시간은 반경방향으로의 다공도 차이 때문에 축열조의 중앙부보다 가장자리에서 작았다. 축방냉시간에 미치는 유입온도의 영향은 방냉시가 축냉시보다 작게, 레이놀드 수의 영향은 축냉시가 방냉시보다 대체로 작게 나타났다.

2) 상용 축열재는 파라핀 축열재들에 비해 과냉각이 심하게 일어났으며 파라핀 축열재들은 무기물이 첨가된 물보다 축냉시간 측면에서 11~72% 정도 우수했고, 방냉시간 측면에서 축열재들간 차이는 거의 없었다.

3) 유입온도와 레이놀드 수 작동범위에서 무차원 저장열전달량에 미치는 유입온도의 영향보다 레이놀드 수 영향이 축냉시는 작았고 방냉시는 컸다.

4) 방냉시 캡슐내 자연대류 열전달의 영향이 추가되기 때문에 축열조내 평균 열전달계수에 미치는 유입온도와 레이놀드의 영향은 방냉시가 축냉시보다 컸다.

5) 축열조내 평균 열전달계수는 축냉시 n-Tetradecane, 혼합물, 무기물이 첨가된 물의 순서로 컸고, 방냉시 혼합물, n-Tetradecane, 무기물이 첨가된 물의 순서로 컸다. 파라핀 축열재의 평균 열전달계수는 상용 축열재보다 축방냉과정시 최대 40% 정도까지 더 컸다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 전력기술기초연구비(과제관리번호: 95-54) 지원을 받아 수행되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 서정세, 김찬중, 유제인, 노승탁, 1993, "수평 원관내에서 과냉각 및 자연대류가 용해과정에 미치는 영향", 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 8, pp. 2079~2087.
2. Ryu, H., Hong, S., Shin, B., and Kim, S., 1991, "Heat transfer characteristics of cool-thermal storage systems", Energy, Vol. 16, No. 4, pp. 727~737.
3. Saitoh, T., 1983, "On the optimum design for latent heat thermal energy storage reservoir", Refrigeration, Vol. 58, No. 670, pp. 749~756.
4. Arnold, D., 1991, "Laboratory performance of an encapsulated-ice store", ASHRAE Trans., pp. 1170~1178.
5. Kamiya, Y., 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會文集, pp. 425~428.
6. 최용문, 백종승, 최해만, 김석현, 1994, "빙축열 시스템 성능평가 방법에 대한 연구", 공기조화 냉동공학회 하계 학술발표회 강연 및 논문집, pp. 201~206.
7. 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.
8. Saitoh, T., and Hirose, K., 1986, "High-performance phase-change thermal energy storage using spherical capsules", Chem. En. Comm., Vol. 41, pp. 39~58.

9. 임장순, 노승탁, 이채문, 이준식, 김준근, 서정세, 김영기, 조상호, 1991, "상변화물질을 이용한 잠열 축열조에 관한 기초연구(II)", 동력자원부, 최종보고서.
10. 김준근, 1995, "상변화 물질을 이용하는 열저장장치의 성능에 관한 연구", 박사학위논문, 인하대학교, 인천.
11. Grodzka, P. G., 1980, "Solar Energy Technology Handbook, Part A : Engineering Fundamentals", Marcel Dekker, Inc.
12. Benenati, R. F., and Brosilow, C. B., 1962, "Void fraction distribution in beds of spheres", *AIChE J.*, Vol. 8, No. 3, pp. 359 ~ 361.
13. Whitaker, S., 1972, "Forced convection heat-transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and flow in packed beds and tube bundles", *AIChE J.*, Vol. 18, p. 361.