

구 캡슐을 충전한 잠열 에너지 저장시스템의 실험적 연구
Experimental Study of Latent Heat Thermal Energy Storage
System Unit Packed with Spherical Capsule

문종훈 (건축설비과)

Jong-Hoon Moon (Dept.of Architectural Equipment)

Key Words : Latent Heat Thermal Energy Storage(잠열 에너지 저장), Phase Change Materials(상변화 물질), Spherical Capsule(구 캡슐), Charging and Discharging(충열과 방열)

ABSTRACT : An experimental on the transient thermal performance of latent heat thermal energy storage(LHTES) unit employing spherical capsules was carried out. The LHTES system has been considered to be very promising in improving the coefficient of performance(COP) of energy systems because various heat sources including solar thermal, wind, sky radiation cooling, underground thermal and waste energies can be efficiently stored with them. The present paper mainly reports the results of experiments on the charging(melting) thermal performance of the LHTES unit packed with spherical capsules containing n-octadecane up as the phase change materials(PCM). The overall response of this LHTES unit was examined while varying the capsule diameter, the flow rate of the heat transfer fluid, the inlet temperature, and the size of the storage unit. Furthermore, a comparison of the thermal performance between the charging and discharging(solidification) process has been made. The spherical capsule type LHTES unit has several advantage e.g. high transfer rate and ease of installing into existing reservoirs. The present data can be rigorously utilized for designing the efficient LHTES systems. The experimental results will also compared with theory.

기호

- A_r : Archimedes수
 C_{pf} : 물의정압비열
 C_{pi} : 상변화 물질의 액체의 정압비열
 C_{ps} : 상변화 물질의 고체의 정압비열
 a : 구 캡슐의 직경
 D : 축열조 직경
 D_s : 축열조 기준 직경
 H : 축열조 높이
 H_s : 축열조 기준높이
 L : 잠열
 \dot{m} : 열매체 유량
 M_f : 물의 질량

- M_f : 상변화 물질의 질량
 Q : 축열량
 Q_c : 구 캡슐 및 축열조의 현열
 Q_{in} : 이론 축열량
 Q_{tot} : 총축열량
 s : 실시간
 Ste : Stefan수
 t : 시간
 t^* : 무차원시간
 t_1 : 완전 축열시간
 T : 온도
 T_{in} : 유입온도
 T_0 : 초기온도
 T_{out} : 출구온도
 ΔT : 온도차

그리이스 문자

- β : 체적팽창계수
 θ : 무차원온도
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도
 τ^* : 무차원시간

첨자

- c : 캡슐
 j : 동작유체(열매체)
 i : 상변화 물질의 액상
 s : 상변화 물질의 고상

1. 서론

최근 자연에너지와 심야전력등을 유효하게 이용할 목적으로 상변화 물질을 이용한 잠열에너지 저장시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 종래의 잠열에너지 저장시스템의 용해와 응고에 대한 연구들은 주로 원통 및 구형을 포함한 여러 가지 형상에 대해서 연구하였는데, 이런 용해와 응고를 가지는 열전달은 수많은 자연현상과 산업현장에서도 실제적으로도 매우 중요하다. Saitoh⁽¹⁾⁻⁽²⁾는 Rayleigh수가 비교적 큰 경우 상변화 물질로 해서 n-octadecane 및 물을 사용해서 수평 원관내의 자연대류 용해 열전달을 수치해석적으로 연구하였으며,

Moallemi and Viskanta⁽³⁾⁻⁽⁴⁾는 원통상의 열원이 상변화물질 중에 수평으로 설치되어 주위의 상변화물질을 용해하면서 침강하는 계를 대상으로 실험과 유효이론을 적용해 근사식을 유도하였다. Bareiss and Beer⁽⁵⁾는 접촉용해영역의 열전달 기구로해서 열전도만을 고려해 흐름에 의한 열이동을 무시한 수학적 해를 구하였다. 구 캡슐에 관한 용해문제에 대해서 예를 들면, Emerman and Turcotte⁽⁶⁾는 가열구를 상변화 물질중에 이동시켜 용해과정동안의 근사해를 구하였으며, Moore and Bayazitoglu⁽⁷⁾는 고상의 캡슐이 하부에 침강하는 경우, 열전도만을 고려해 수치해석을 하고 실험과 비교하였다. 또한, Roy and Sengupta⁽⁸⁾는 구 캡슐 상부의 자연대류를 고려해 수치해석을 하였다. 한편, Bahrami and Wang⁽⁹⁾는 유효이론을 이용해 접촉용해부에서의 열전도만을 가정한 근사해석을 하였다. 최근, 공조에의 응용을 목적으로한 여러 가지의 캡슐을 충전한 잠열축열조의 용해 및 응고과정을 포함한 잠열에너지 저장 특성에 관하여 많은 연구가 보고되고 있다. Green and Vliet⁽¹⁰⁾는 여러 가지 캡슐형의 잠열 에너지 저장시스템에 대해서 상변화물질로 해서 carbo wax을 이용해 용해과정에 대해서 이론해석을 하였다. 伊藤 등⁽¹¹⁾은 원통캡슐 속에 상변화 물질로 해서 염화칼슘 6수염을 충전한 축열조의 성능을 검토하였다. 이상의 연구들은 축열조내의 용해와 응고만을 고려한 것이다. 따라서 본 연구에서는 잠열에너지 저장시스템의 기초적인 온도응답 특성을 상세히 하기 위하여 상변화 물질로 해서 n-octadecane를 넣은, 구 캡슐 잠열 에너지 저장시스템의 실험 및 해석을 행하였다. 구 캡슐을 충전한 축열조에 있어서 유입온도, 구 캡슐의 직경, 유량 및 축열조 용량을 파라메타로 해서 변화 시켜서 축열 방열 특성을 상세히 하여 실용시스템의 설계를 위한 기초적 데이터를 제공한다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타낸다. 실험장치는 구 캡슐을 충전한 잠열 열저장 탱크, 유리섬유로 단열된 2개의 항온수조, 히터, 유량계 및 순환펌프로 구성되어 있다. 실험에서는 직경이 30mm와 20mm, 두께가 각각 1.8mm와 1.2mm의 폴리프로필렌(polypropylene) 재료의 구 캡슐을 이용하였다. 각 캡슐 내에는 처음에는 용점온도보다 높은 온도로 용해한 상변화물질을 주사기를 이용해서 구 캡슐 전체체적의 80%정도 붓입하였다. 또한, 구 캡슐의 중심부, 접촉용해부 및 캡슐의 외부의 열매체 온도를 측정하기 위하여 Cu-Co 열전대선을 부착하였다. 열전대선을 부착한 구 캡슐은 흡수단에 설치하였다. Fig.2는 실험에 이용한 구 캡슐 축열조의 상세도를 나타낸다. 탱크는 원통형상인데 내경은 240mm(또는 162mm), 높이는 500mm이고 두께는 5mm의 투명 아크릴로 만들었다. 그림에서 알 수 있듯이 상하부에 Plenum실을 설치하여 축열 탱크내의 흐름이 일정하게 되도록 하였다. 또한, 유입 유출수온은 Plenum실에 열전대선을 설치하여 측정 하였다. 축열조 상부에는 플랜지 구성으로 해서 금속망을 설치하고 그 위에 구 캡슐을 넣은 후 볼트를 이용해서 밀봉하였다. 축열조 탱크의 용량은 약 22.6 l 인데 열손실을 막기 위하여 두께가 40mm의 유리 섬유로 단열 하였다. 다시, 축열 탱크를 포함한 실험계를 작은 항온실에 넣어서 열 손실을 최소화하였다. 구 캡슐의 배열 방식으로는 Fig.3에서와 같이 구 캡슐의 직경이 20mm인 경우는 1단에 120개를 깔고 20단으로해서 총 2400개, 구 직경이 30mm인 경우는 1단에 52개로 해서 13단에 총 676개를 각 단에 조밀하게 쌓았다. 항온수조의 물은 펌프를 이용해서 순환시켜 유량조절 밸브로 유량을 조절하였다. 유량은

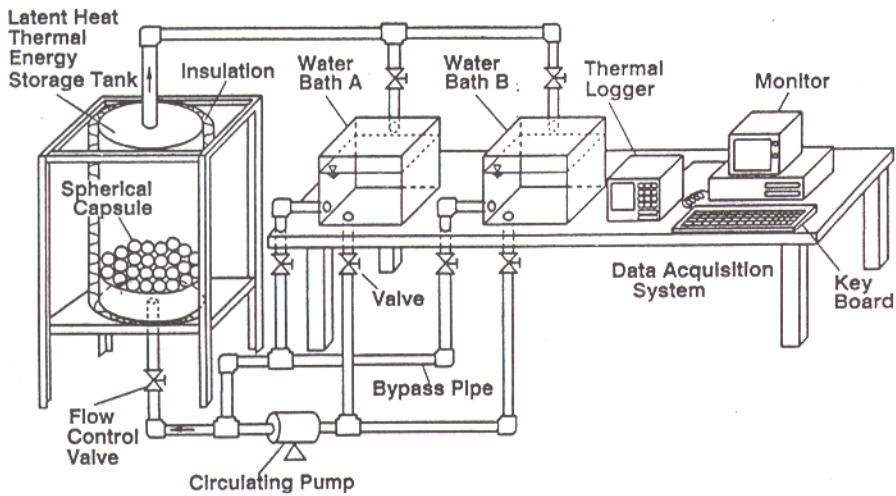


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

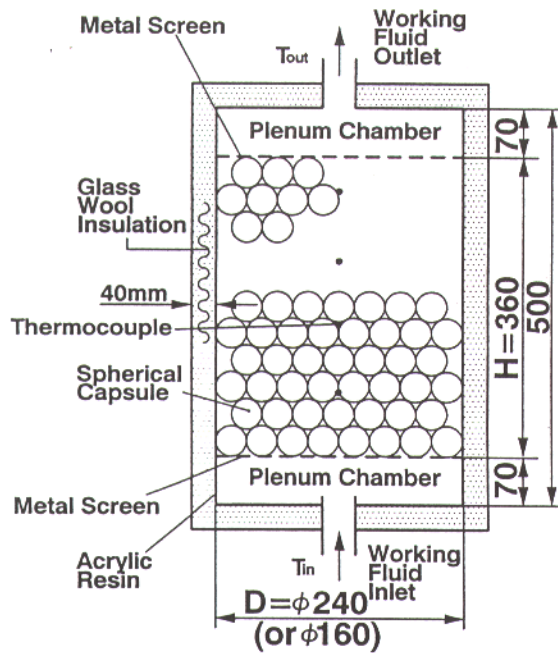


Fig.2 Tank of a latent heat thermal energy storage

오리피형의 유량계를 이용해서 측정하였다. 또한, 축열조의 유량을 안정화시킬 목적에서 펌프로 부터 직접 항온수조에 되돌아오는 바이패스 수로를 설치하였다. 상변화 물질로 해서 n-octadecane을 이용했는데 주된 이유는 그 물질은 융점이 실온에 가깝고, 잠열이 비교적 크고, 다른 상변화 물질과 비교했을 때 물성치를 잘 알고 있기 때문에 실험에 이용하였다. 주된 물성치를 Table 1에 나타내었다.

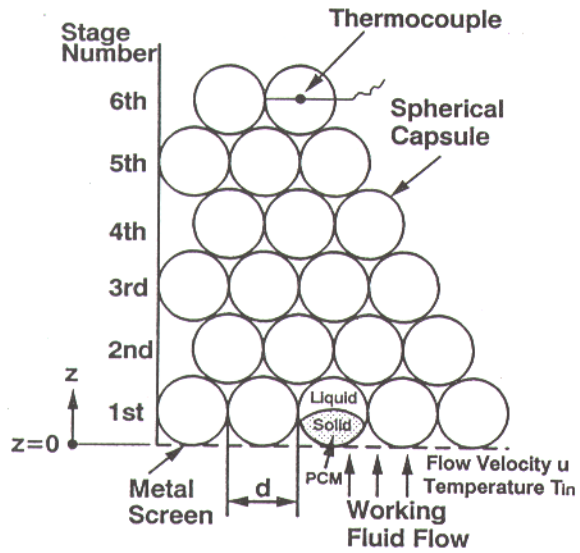


Fig.3 Spherical capsule bed configuration

Table 1 Physical property of n-octadecane

Property	Symbol	Unit	Value
Thermal diffusivity	α	m^2/s	8.877×10^{-8}
Specific heat	c_{pl}	$kJ/(kg \cdot K)$	2.197
Latent heat	L	kJ/kg	243.5
Melting point	T_m	$^{\circ}C$	28.0
Volumetric expansion coefficient	β	$1/K$	0.0008
Thermal conductivity of liquid	λ_l	$W/(m \cdot K)$	0.150
Thermal conductivity of solid	λ_s	$W/(m \cdot K)$	0.210
Kinematic viscosity	ν	m^2/s	4.663×10^{-6}
Density of liquid	ρ_l	kg/m^3	773
Density of solid	ρ_s	kg/m^3	814

3. 실험방법

Fig.1에 나타낸 것처럼 A, B 2개의 항온조를 이용해서 항온수조 B는 상변화물질의 용점보다 1°C 혹은 2°C 낮은 온도로 설정해서 탱크내의 캡슐의 온도가 내부까지 일정하게 될 때까지 물을 순환시켰다. 그 때 항온수조 A의 온도는 실험종료 온도로 설정해 놓는다. 각 위치의 열전대에 의해 전체가 일정한 온도로 된 것을 확인한 후에 항온수조 B의 밸브를 닫고 항온수조 A의 밸브를 열어 실험을 시작하였다. 탱크의 유입온도와 출구온도 및 구 캡슐의 중심 온도가 항온수조 A와 똑같이 되었을 경우에 실험을 종료하였다. 다음 응고 실험의 경

우에는 항온수조 B의 온도를 처음에는 25℃에 설정해 놓고 용해 실험이 끝나고 난 후 잠시 기다린 다음 그 물을 그대로 순환시켜 A의 밸브를 닫고 항온수조 B의 밸브를 열어 25℃의 물을 순환시켜서 용해실험을 시작하였다. 용해실험과 똑같이 유입온도와 출구온도 그리고 구 캡슐의 중심온도가 항온수조의 온도와 같게 되었을 때 실험을 종료하였다. 이상의 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions

Working fluid temperature (°C)	Flow rate (ℓ/min)	Spherical capsule diameter (mm)	Spherical capsule thickness (mm)
35, 40, 45, 50	0.3, 0.7, 1.0, 1.2	20, 30	1.2 (d=20) 1.5 (d=30)

4. 실험 결과 및 검토

여기서는 구 캡슐을 충전한 잠열 열저장 시스템 성능의 실험결과를 나타낸다. Fig.4와 Fig.5는 초기온도 27℃, 유입온도 40℃, 구 캡슐의 직경이 20mm와 30mm, 유량이 0.7 ℓ/min

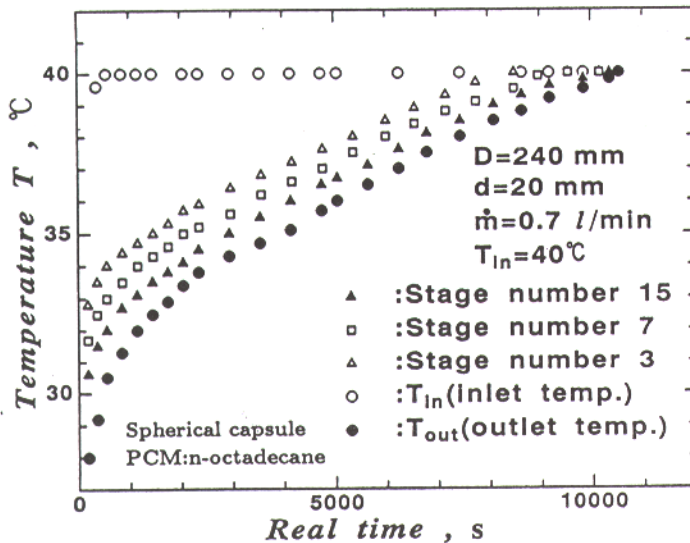


Fig.4 Real time variation of outer wall temperature of spherical capsule

인 경우 축열 과정에 있어서 열매체온도의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 직경이 20mm인 경우 축열조의 각각 3, 7 및 15단 매에, 직경이 30mm인 경우 각각 3, 7 및 11단 매에 구 캡슐 주위의 열매체 온도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 상단으로 갈수록 유입온도에 수렴하는 것이 늦다는 것을 알 수 있다. 또한, 똑같은 축열조에서는 직경이 작은쪽이 수렴하는

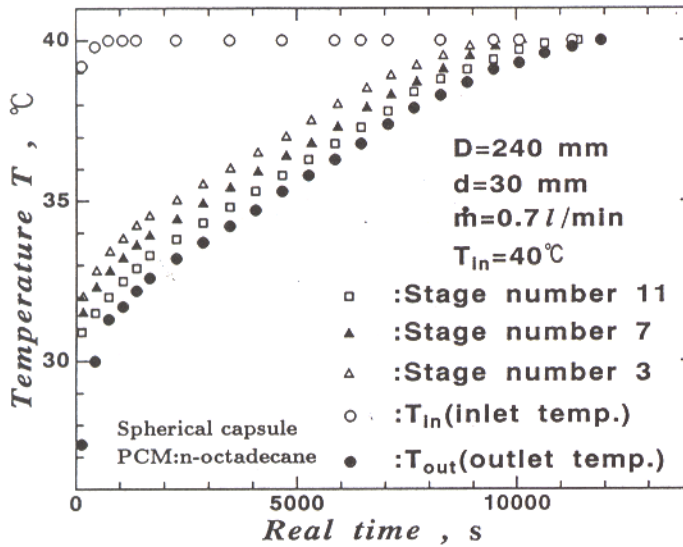


Fig.5 Real time variation of outer wall temperature of spherical capsule

속도가 빠름을 알 수 있다. 또한, 유입온도가 처음부터 40°C가 되지 않는 것은 순환 펌프중에 남아 있는 물의 영향이라고 생각된다. Fig.6은 초기온도 27°C, 유입온도 35°C, 유량이 0.3 l/min와 0.7 l/min 및 1.2 l/min인 경우 축열과정에 있어서 구 캡슐의 출구온도의 시간변화를 유량의 함수로 해서 나타내었다. 유량이 많은 쪽이 유입온도에 빨리 수렴하는 것을 알 수 있

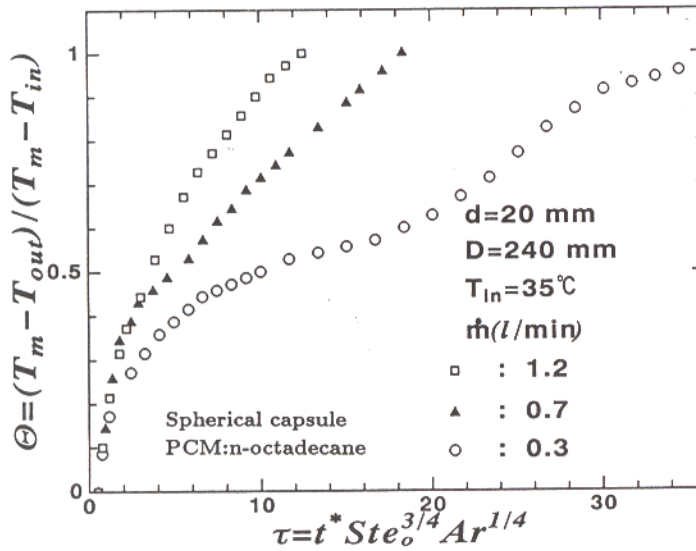


Fig.6 Dimensionless temperature versus dimensionless time

다. Fig.7은 유량이 0.3 l/min, 0.8 l/min 및 1.2 l/min인 경우 축열과정에 있어서 구 캡슐의 축열량을 비교하였다. 유량의 증가에 따라 축열에 요하는 시간은 짧게 되는 것을 알았다. 축열량은 다음 식으로 계산하였다.

$$Q = \int_0^{t_1} C_{pf} \dot{m} (T - T_m) \quad (1)$$

총 축열량의 이론값은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$Q_{th} = M_p \{L + C_{ps}(T_m - T_0) + C_{pl}(T_{in} - T_m)\} + M_f C_{pf}(T_{in} - T_0) + Q_c \quad (2)$$

총 축열량은 상변화 물질의 축열과 현열, 축열조내의 물의 현열, 구 캡슐 및 축열조의 현열의

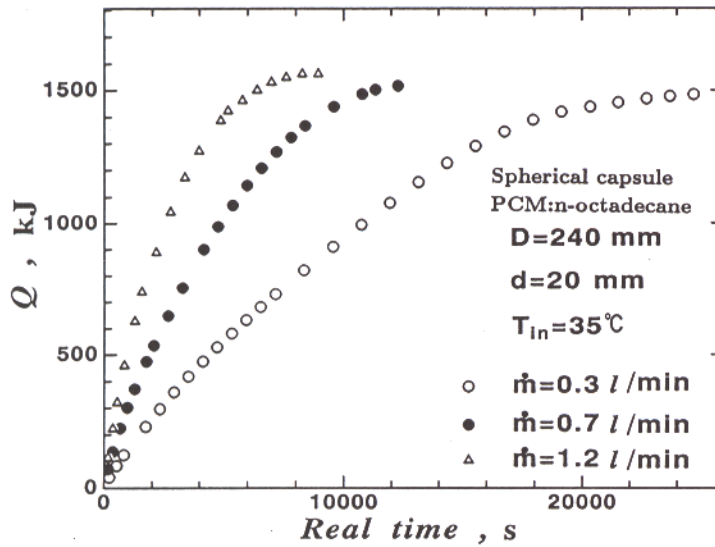


Fig.7 Time variation of stored heat with varying flow rate

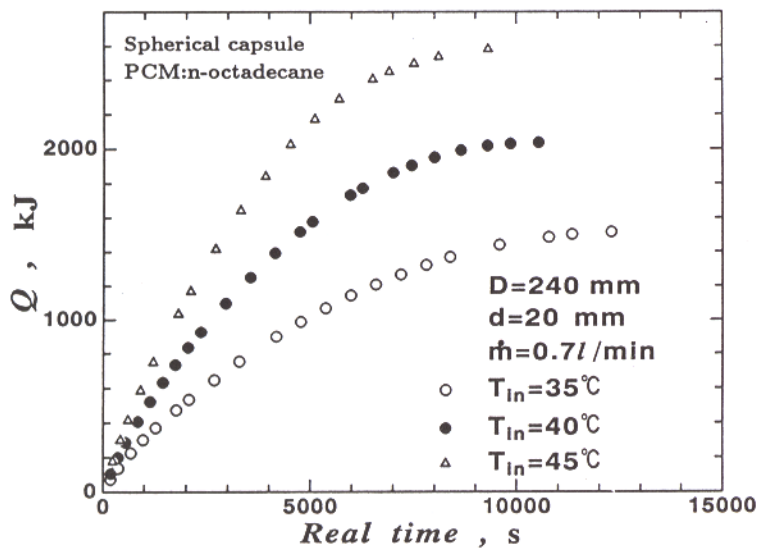


Fig.8 Time variation of stored heat with varying inlet temperature

총화이다. 이 계산에 의하면 구 캡슐의 직경이 20mm 및 유량이 0.7 l/min의 경우에 있어서 계산한 결과, 상변화물질의 잠열량은 1085.7kJ, 상변화 물질의 현열량은 85.8kJ, 그 밖의 현열량은 416.4kJ, 전부 합쳐서 $Q_{tot}=1587\text{kJ}$ 이다. 한편 실험치에서 계산한 축열량은 1517kJ로 되어 실험값과 이론값이 거의 일치하는 것을 알았다. 또한, 이 조건에 있어서 이론식으로 부터 구한값은 유량이 0.3 l/min일 경우 $Q=1495\text{kJ}$, 유량이 0.7 l/min일 경우 $Q=1517\text{kJ}$, 유량이 1.2 l/min일 경우 $Q=1562\text{kJ}$ 로 되었다. 이것을 보면 유량이 변해도 총축열량은 거의 일치하는 것을 알았다. 유량 $m=0.7\text{ l/min}$ 의 경우 완전용해할 때에 있어서 상변화 물질의 현열은 85.8kJ(5.4%), 불과 구 캡슐과 축열 탱크의 현열은 414.6kJ(26.2%)인데 대하여 나머지 68.4%는 잠열로 해서 축열되었다. Fig.8은 유량을 0.7 l/min로 고정하고 유입온도를 35℃, 40℃ 및 45℃로 변화시켜 실시간에 대한 축열량을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 유입온도가 높을수록 축열량이 증가하는 것을 알았다. 이것은 축열종료시의 온도가 높기 때문에 현열량의 기여가 증가하기 때문이라고 생각된다. Fig.9는 Fig.8과 같은 조건에 대해서 구 캡슐의 직경을 변화시켰을 경우의 실시간에 대한 축열량을 정리한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Fig.8과 같은 경향이다. 또한 구 캡슐의 직경이 큰쪽이 축열량이 많다. 이것은 직경이 30mm

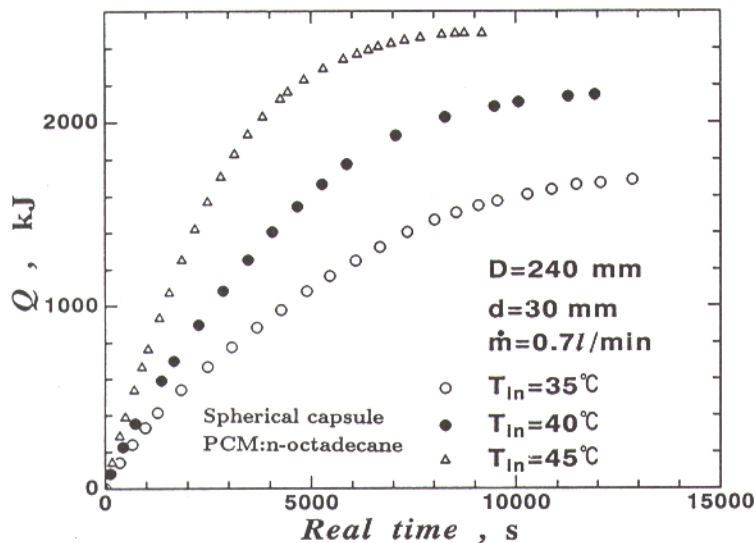


Fig.9 Time variation of stored heat with varying inlet temperature

가 20mm 보다 전체의 축열량이 크기 때문이다. 식(2)로 부터 계산한 결과 직경이 30mm인 경우 총축열량은 1690kJ, 직경이 20mm인 경우의 총축열량은 1587kJ이다. Fig.10은 유량을 1.0 l/min, 유입온도를 45℃에 고정하고 축열조 용량을 변화 시켰을 경우의 실시간에 대한 축열량을 비교한 것이다. 축열조가 작은 경우 빨리 축열이 종료하지만 총축열량은 축열조가 큰 쪽이 많다. 이것은 축열조가 클수록 총축열량이 크기 때문이다. Fig.11은 Fig.10에서 직경을 기준으로한 무차원 시간에 대한 무차원 축열량을 표시한 것이다. 그림으로 알 수 있듯이 축열조 용량이 변해도 축열 완료점은 일치한다. 이것으로 이와 같은 무차원 표기는 축열조 용량이 변해도 일반의 에너지저장 시스템의 최적설계에 유용하다고 생각된다. Fig.12는 초기온도 40℃, 유입온도 25℃, 유량0.7 l/min인 경우의 방열과정에 있어서 구 캡슐의 주위온도의 시간변화를 나타낸다. 쌓아둔 구 캡슐의 밑에서부터 3, 7 및 15단 매의 주위온도를 나타낸다. 그림에서와 같이 초기온도로 부터 강하해서 유입온도로 가까이 갈수록 주

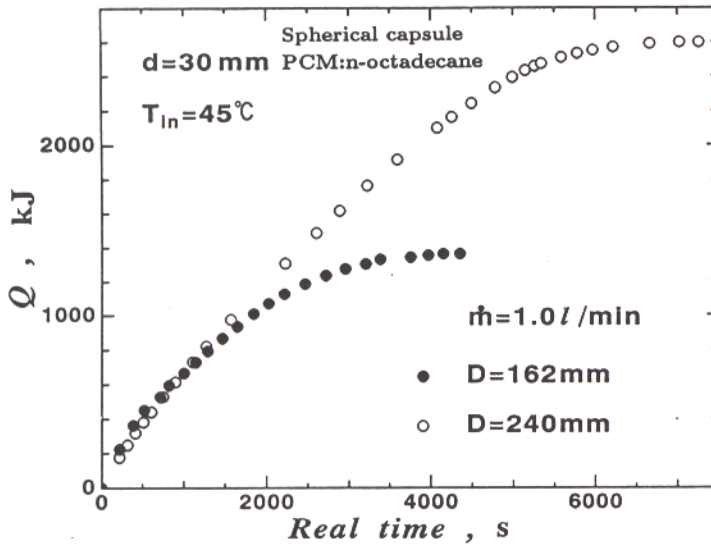


Fig.10 Time variation of stored heat with varying storage tank dimension

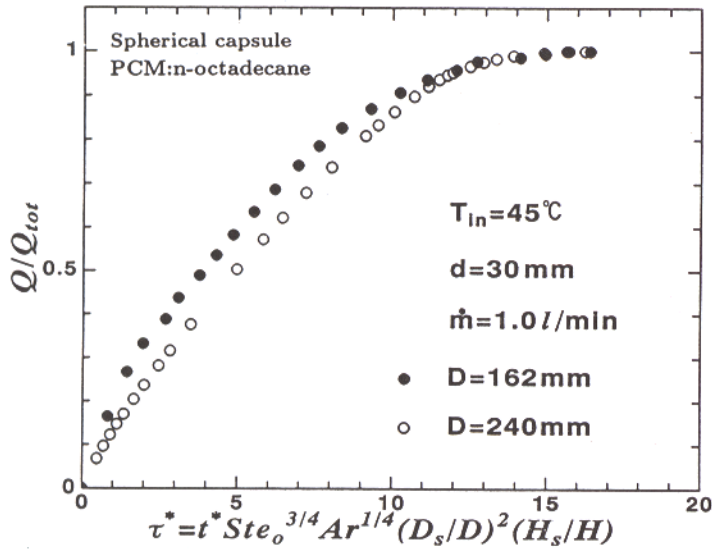


Fig.11 Dimensionless stored heat versus dimensionless time with varying storage tank

위온도와 구캡슐의 온도차가 작게 되기 때문에 완만하게 된다. 유입온도는 실험중에는 거의 일정하게 유지하였다. Fig.13은 Fig.12와 같은 조건에서 구 캡슐의 중심온도 변화를 나타낸다. 구 캡슐의 중심온도는 초기온도로 부터 하강하여 장시간 상변화 물질의 융점에 머물러 있다. 이것은 이 융점온도에서 응고에 의한 잠열발생이 있기 때문이다. 그 후 다시 하강하여 초기온도로 된다.

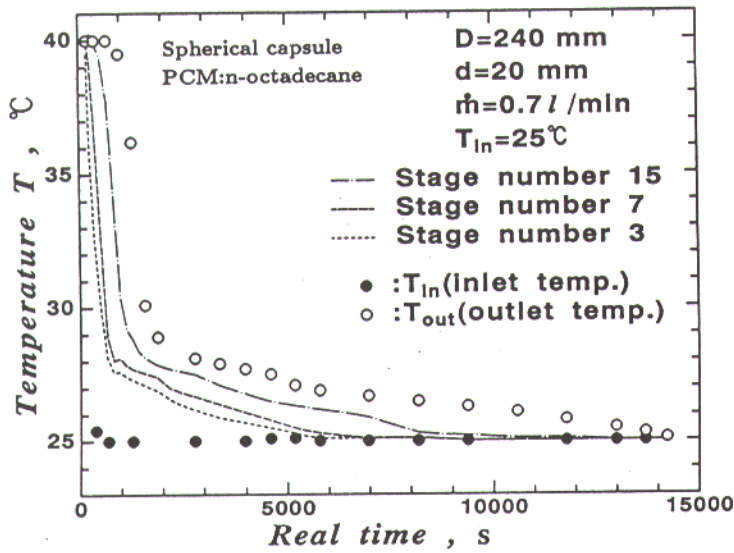


Fig.12 Time variation of temperature of working fluid for discharging process

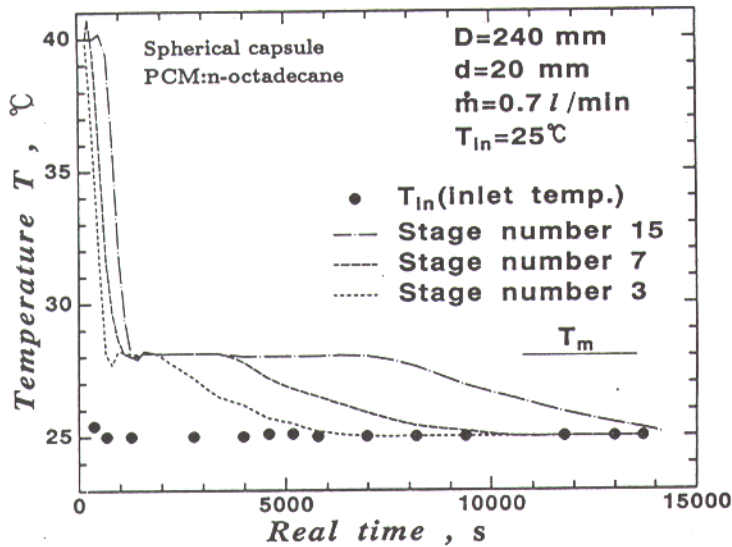


Fig.13 Time variation of central temperature of spherical capsule for discharging process

5.결론

본 연구는 구 캡슐형 잠열 에너지 저장 시스템의 축열 및 방열과정에 있어서 축열조의 영향, 유입온도 및 캡슐의 직경의 영향에 대하여 검토하였다. 얻어진 결론은 구캡슐의 직경이 적고, 순환되는 작동유체의 온도가 높을수록, 또한 유량이 많을수록 상변화 물질의 완전용해 시간이 짧게 되는 것을 알았다. 유량을 증가시켰을 경우 그것에 비례해 축열속도의 증가는

작게됨을 알았다. 실험에 의한 총축열량은 이론에 의해 구한것과 일치한다.

참고문헌

- (1) Saitoh, T.S. and Hirose, K., 1982, "High-Rayleigh Number Solutions to Problems of Latent Heat Thermal Energy Storage In a Horizontal Cylinder Capsule", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.104, pp.545~553.
- (2) Saitoh, T.S., Kato, H. and Maruhara, K., "Numerical Computation on Combined Natural Convection and Close-Contact Melting in a Cylindrical Energy Storage Capsule", *Proc. 93' TPTE*, pp.1625~1630.
- (3) Moallemi, M.K. and Viskanta, R., 1985, "Melting Around a Migrating heat Sources", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.107, pp.451~458.
- (4) Moallemi, M.K. and Viskanta, R., 1986, "Analysis of Melting Around a Moving Heat Sources", *J. of Heat Mass Transfer*, 29-8, pp.1271~1282.
- (5) Bareiss, M. and Beer, H., 1984, "An Analytical Solution of the Heat Transfer Process during Melting of an Unfixed Solid Phase Change Material Inside a Horizontal Tube", *J. of Heat Mass Transfer*, 27-5, pp.739~746.
- (6) Emerman, S.H. and Turcotte, D.L., 1983, "Stokes Problem with Melting", *J. of Heat Mass Transfer*, 26, pp.1625~1630.
- (7) Moore, F.E. and Bayazitoglu, Y., 1982, "Melting within a Spherical Enclosure", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.104, pp.19~23.
- (8) Roy, S.K. and Sengupta, S., 1987, "The Melting Process Within Spherical Enclosures", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.109, pp.460~462.
- (9) Bahrami, P.A. and Wang, T.G., 1987, "Analysis of Gravity and Conduction-Driven Melting in a Sphere", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.109, pp.806~809.
- (10) Green, T.F. and Vliet, G.C., 1982, "Transient Response of a Latent Heat Storage Unit: An Analytical and Experimental Investigation", *ASME J. of Solar Energy Eng.*, Vol.103, pp.275~280.
- (11) 伊藤定佑 외 3人., 1980, "Capsule型潛熱蓄熱의實驗的研究", 第17回 日本 伝熱 Symposium 講演論文集, pp.502~504.