

겔 상태의 미세 잡열 축열재 혼합수의 기액직접접촉식 열교환법에 의한 방열 특성

김 명 준†

(원고접수일 : 2003년 11월 20일, 심사완료일 : 2004년 3월 9일)

A Study on the Heat Release Characteristics of Gel Type Micro Size Latent Heat Storage Material Slurry with Direct Contact Heat Exchange Method

Myoung-Jun Kim†

Abstract : This paper has dealt with the heat storage characteristics of gel type micro size latent heat storage material slurry. The heat release operation to the gel type micro size latent heat storage material slurry was carried out using hot air bubbles by direct contact heat exchange. This experiment was carried out using phase change material of n-paraffin so the heat release amount is higher than cold water system. The parameters of this experiment were concentration of latent heat phase change material, height of heat release bath and inlet velocity of hot air. The main results obtained are as follows : (1) The effect of concentration of latent heat phase change material dispersed with water is very affective to the direct contact heat exchange between hot air and gel type micro size latent heat storage material slurry. (2) It is clarified that the most effective concentration of latent heat phase change material dispersed with water exists around 20mass% at this type of direct heat exchange model experiment.

Key words : Gel Type Micro Size Latent Heat Storage Material Slurry, n-Paraffin, Hot Air Bubbles, Direct Contact Heat Exchange Method

기호설명

C	: 잡열 축열재 혼합수의 농도[mass%]	Q_{lat}	: 잡열 축열량의 시간 적산치 [kJ]
C_p	: 비열 [kJ/(kgK)]	Q_{loss}	: 손실열량의 시간 적산치 [kJ]
d_{su}	: 미세 상변화 물질의 입자경 [mm]	Q_{sen}	: 현열 축열량의 시간 적산치 [kJ]
H_a	: 공기의 엔탈피 [kJ]	RH_{in}	: 입구 공기 상대습도 [%]
m_a	: 공기의 질량 유량 [kg/s]	RH_{out}	: 출구 공기 상대습도 [%]
		r	: 물의 증발 잡열 [kJ/kg]
		T_a	: 공기의 온도 [K]

† 책임저자(군산대학교 동력기계시스템공학전공) E-mail:mj.kim@kunsan.ac.kr, T:063)469-1849

T_c	: 잠열 축열재 혼합수의 온도 [K]
T_m	: 평균 출구 공기 온도 [K]
t	: 시간 [s]
t_f	: 잠열 방열 완료 시간 [s]
V	: 공기의 유속 [m/s]
X_a	: 공기의 절대 습도 [kg/kg']
Z_i	: 초기 축열재 혼합수층의 높이 [m]

첨 자

α	: 공기
c	: 축열재 혼합수
in	: 입구
out	: 출구

1. 서 론

최근에 들어 산업의 발달과 생활수준의 향상에 따른 주야간의 전력수요 격차를 해소하기 위해서 전력 평준화를 목적으로 한 축열기술의 개발이 진행되고 있다⁽¹⁾.

종래의 이러한 축열장치들은 값이 싼 야간 전력을 열에너지로 변환 및 저장하는 시스템으로서, 환경적면이나 경제적면에서 뛰어난 물을 사용한 혼열축열이 주류를 이루었다. 그러나 최근에 보다 고밀도의 열에너지 저장 및 고효율의 에너지 유송을 꾀하기 위한 상변화를 이용한 잠열축열시스템에 대한 기대가 높아지고 있으며 이와 관련한 다양한 연구가 현재 진행되어 오고 있다⁽²⁾⁻⁽⁴⁾.

상변화물질을 이용한 잠열축열은 상변화물질의 용해 및 응고시, 즉 고-액 상변화의 열교환에 의한 일정온도에서의 열의 이용이 가능하기 때문에 안전하며 효율적인 축열 방법이라 할 수 있을 뿐 아니라 온도의 변화가 적기 때문에 산업기기 등에 있어서의 열응력이 작아져 기기의 수명연장 등의 장점을 가지고 있다⁽⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 고-액 상변화 과정인 용해 및 응고 현상을 이용하는 잠열 축열 물질을 물과 같은 안정된 유체에 분산, 혼합시켜 고효율의 열저장 및 유송에 대한 기능을 가진 유체를 만들

고 그 방열 특성에 관한 검토를 행하고자 한다. 이러한 기능성 유체로는 잠열체인 상변화물질의 용해, 응고현상을 반복해서 이용할 수 있는 에멀젼이나 마이크로캡슐이 주류를 이루고 있다⁽⁶⁾. 그러나 이러한 에멀젼이나 마이크로캡슐은 제조상의 생산 단가가 높아 본 연구에서는 보다 경제적으로 사용이 가능한 겔 상태의 잠열 축열재에 착목하였다. 겔 상태의 미세 잠열 축열재는 흡수되어 있는 파라핀의 종류에 따라 용점을 자유롭게 선택할 수 있기 때문에 축열 시스템의 사용목적에 따른 잠열 이용 영역을 폭넓게 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 파라핀계 상변화 물질을 사용하여 만든 겔 상태의 잠열축열재 혼합수가 공기와의 직접 접촉에 의하여 열교환 되는 경우, 축열재 혼합수의 충진높이와 잠열체 함유 비율이 잠열재의 채냉 열 특성에 미치는 영향을 실험적인 방법으로 검토하고 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용한 잠열체는 포화탄화수소인 펜타데칸 C₁₅H₃₂(용점 281.3K, 용해잠열 120.3 kJ/kg)으로 구성성분은 n-파라핀 83.3mass%, 고흡유성 알크릴 수지 16.7mass%로 구성되어 있고 정지상태에서 물과 분리되기 때문에 분리 방지제로서 계면 활성제 1.0mass%, 기포발생을 억제시키기 위한 소포제 0.5mass%를 첨가했다. 축열재 입자는 거의 구형(평균직경 $dsu=0.552$ mm)이고 액상영역에서는 백색투명, 고상영역에서는 백탁색을 띠고 있다.

본 실험에서는 열교환방식으로 공기의 기액직접접촉식을 선택하고 있다. 이러한 방법은 복잡한 전열면을 가지고 있지 않기 때문에 높은 전열 효율과 장치의 축소화 및 간소화가 가능하게 된다.

실험장치는 크게 시험부와 공기 공급계로 구성되어 있으며 Fig.1에는 그 개략적인 그림을 나타내고 있다.

시험부는 내부 단면 100mm의 정사각형 밀판에 높이 500mm의 옆면을 부착시킨 입방구형 덕

트로서 기액 직접접촉식 열전달거동 등을 관찰하기 위해 두께 10mm의 아크릴 판으로 되어 있다. 시험부 하부에는 두께 10mm의 아크릴 판에 직경 1mm의 노즐구멍을 10mm 간격으로 바둑판 형상으로 배치시켜 유입공기를 미소한 기포로 분산시켜 시험부내에 충진시킨 시료와 골고루 열교환이 일어나도록 하였다. 또한 열손실을 막기 위해 두께 100mm의 단열재를 도포하였다. 공급되는 공기계통에는 콤프레샤로부터 압송되는 공기를 베퍼탱크 내에서 안정화시킨 후 공기 유량계를 거쳐 기포 가열기로 유입시킨다. 기포 가열기는 소정의 온도 및 포화 습공기를 얻을 수 있는 장치이다.

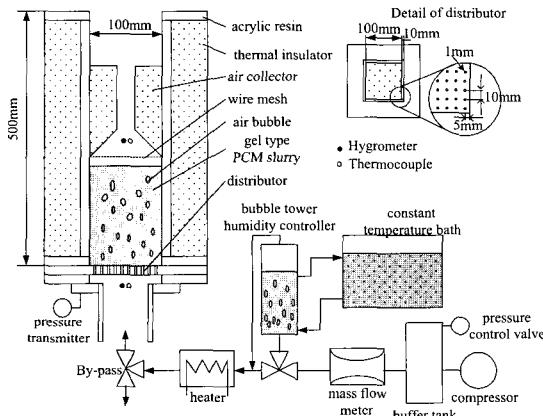


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

다음으로 전기 히터에서 소정의 입구 공기온도 (T_{ain})와 상대습도 (RH_{in})로 조절된 후 시험부로 공기가 유입되는 형태로 구성되어 있다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 시료는 실험개시 전에 냉수용기에 의해 냉각되고 축열재가 응집되지 않도록 교반시키면서 충분히 냉각 시킨 후 시험부인 구형용기에 충진 시켰다. 소정의 실험조건으로 조절된 공기를 시료부에 유입시켜 출구온도 (T_{aout}), 출구상대습도 (RH_{out}), 축열재 증내 온도 (T_c) 및 시험부벽면의 온도 등을 시간의 경과에 따라 측정을 하였다.

수집된 온도정보 및 입구와 출구에 있어서의 상

대습도를 이용하여 입·출구 공기의 엔탈피를 계산하였다. 또한, 이러한 입·출구에 있어서의 엔탈피의 차 (ΔH_a)는 다음의 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta H_a &= H_{ain} - H_{aout} \\ &= \{ [Cp_a \cdot T_{ain} + (r + Cp_s \cdot T_{ain}) \cdot X_{ain}] \\ &\quad - [Cp_a \cdot T_{aout} + (r + Cp_s \cdot T_{aout}) \cdot X_{aout}] \} \cdot m_a \end{aligned} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 겔 상태의 축열재 혼합수 농도 $C = 50.0\text{mass\%}$ 에 대한 입·출구 공기 온도, 상대습도 및 충진시료온도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 충진시료 온도는 실험개시 직후의 현열에 의한 열의 방출이 이루어진다. 즉, 입구 공기온도와의 온도차가 크기 때문에 교환열량이 많아 급격한 온도 상승을 나타내지만, 축열재 용점 근방(281.3K)에서는 온도의 증가 비율이 저하하고 겔 상태의 상변화 물질인 n-파라핀의 고-액 상변화에 의한 출열열교환이 시작된다.

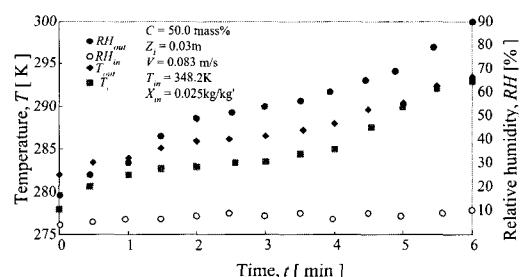


Fig. 2 The variation of T_c , T_{aout} and RH_{in} , RH_{out} according to t at $C=50\text{mass\%}$

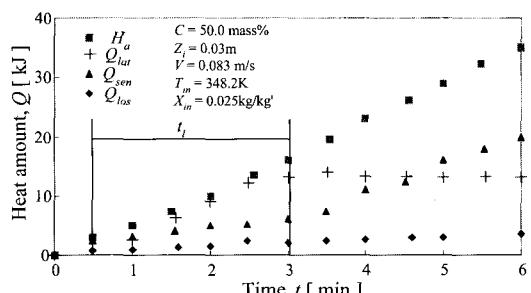


Fig. 3 The variation of Q and H according to t

이러한 상변화 열교환 영역의 뒤를 이어 다시 현열 열교환 영역이 도래하고 온도는 재차 상승하게 된다. 또한, 그림으로부터 본 실험 범위 ($C=50.0\text{mass\%}$, $Z=0.03\text{m}$, $V_{ain}=0.083\text{m/s}$, $T_{ain}=348.2\text{K}$, $X_{ain}=0.025\text{kg/kg}$)에 있어서는 출구공기 온도와 충진시료 온도와의 사이에 큰 온도차가 있는 것으로부터 충분한 열교환이 이루어지지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 후술하는 Fig.4와 같은 실험의 조건 ($C=30.0\text{mass\%}$, $Z=0.03\text{m}$, $V_{ain}=0.083\text{m/s}$, $T_{ain}=348.2\text{K}$, $X_{ain}=0.025\text{kg/kg}$)에 있어서는 충분한 열교환이 이루어져 출구공기 온도와 충진시료온도와의 온도차가 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 출구 공기의 상대습도는 시간에 따라 증가하며 출구에서는 포화 습공기로 됨을 알 수 있다.

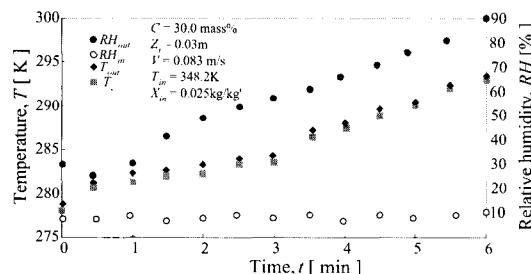


Fig. 4 The variation of T_c , T_{mean} and RH_{in} , RH_{out} according to t at $C=30\text{mass\%}$

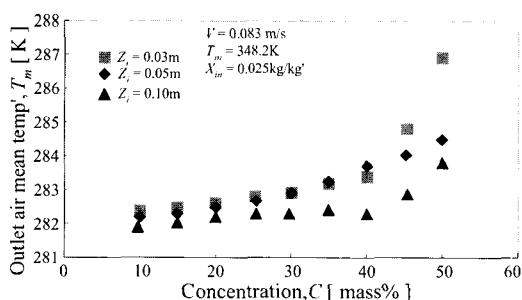


Fig. 5 The variation of outlet air mean temperature according to concentration

Fig.3은 공기와의 교환열량과 축열재 혼합수의 방냉열량의 시간에 대한 변화를 나타낸 것으로 입·출구 공기 엔탈피차의 적산치(H_i)는 시간의

경과와 함께 비례하여 증가한다. 또한, 현열량 적산치(Q_{sen})는 입·출구 공기 엔탈피차의 적산치와 함께 변화하고 있지만 축열조내의 온도가 축열재 용접에 가깝게 접근할수록 현열량적산치의 증가량은 감소하고 잡열량 적산치(Q_{lat})는 일정하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 전술한 Fig.2의 온도변화에 대한 실험결과에 의해 계산된 값으로 Fig.3에서 보는 바와 같은 결과가 됨을 알 수 있다. 즉, 겔 상태의 상변화 물질의 고-액 상변화 과정(잡열 방냉열의 원료)에서는 현열량 적산치는 입·출구 공기 엔탈피차의 적산치와 함께 증가하지만 잡열량 적산치는 거의 일정하게 되기 때문이다. 여기서 잡열의 이동에 의한 방열 원료시간(t_1)은 파라핀이 완전히 용해할 때 까지의 시간으로 하고 있다.

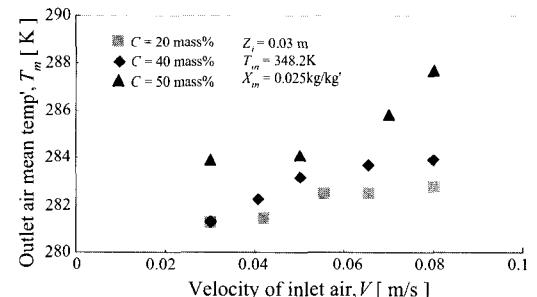


Fig. 6 The variation of outlet air mean temperature according to inlet air velocity

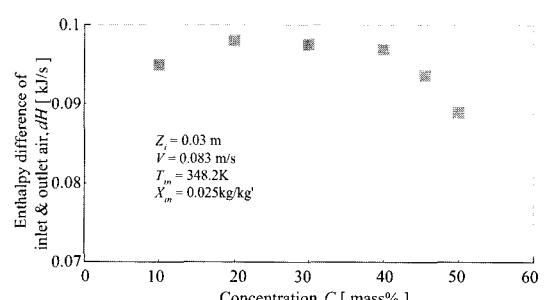


Fig. 7 Enthalpy difference of inlet and outlet air according to concentration

Fig.4는 축열재 혼합수 농도 $C=30.0\text{mass\%}$ 일때의 입·출구 공기 온도, 상대습도 및 충진시

료 온도의 시간에 대한 변화를 나타낸것으로 출구 공기 온도는 충진시료 온도에 가까운 값으로 접근하고 있는 것으로 보아 열교환이 충분히 이루어지고 있다는 것을 보여주고 있다.

이러한 결과들로부터 축열재의 방냉열 과정에 있어서 출구공기 온도는 공기와의 열교환량을 검토하는데 있어 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 잡열에 의한 열교환 시간에 있어서 평균 출구공기 온도(T_m)를 기준으로 각 파라메타가 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

먼저 축열재 혼합수 농도(C)가 평균 출구 공기 온도에 미치는 영향이 크다고 생각되어 농도를 변화시켜가며 실험을 행하고 그 결과를 Fig.5에 나타내었다. 그럼으로부터 축열재 혼합수 농도가 증가함에 따라 평균 출구공기 온도가 증가하고 있다. 이것은 축열재 혼합수 농도가 증가할수록 축열재 혼합수의 점도가 증가하기 때문에 축열조내에 생기는 공기의 기포가 크게 됨과 동시에 잘 혼합되지 못하고 마치 터널을 통과하는 것과 같은 현상이 발생하여 열교환이 제대로 이루어 지지 못하기 때문이다. 즉, 농도의 증가에 따라 시험부의 하부에서 상부로 상승하는 기포는 같은 유로를 계속해서 통과하는 가스 홀드업(Gas hold-up)현상에 의해 시험부내에서 축열재인 겔 상태의 상변화 물질 혼합수와 기포와의 충분한 교반이 이루어지지 않기 때문이다.

또한 초기 축열재 혼합수의 충진 높이(Z_i)가 높아짐에 따라 평균 출구공기 온도가 감소하고 있다. 이것은 초기 축열재 혼합수의 충진 높이가 높을수록 공기의 체류시간, 즉 전열면인 기포면과 축열재 혼합수와의 접촉시간이 길어져 충분한 열교환에 의해 평균 출구공기 온도가 저하되기 때문이다.

Fig.6은 공기의 유속(V)과 평균 출구공기 온도의 관계를 나타낸 그래프이다. 그럼으로부터 알 수 있는 바와 같이 공기의 유속이 증가함에 따른 평균 출구공기 온도가 높아지고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 유속의 증가에 따라 공기기포의 축열조내의 체류시간이 짧아지는 것과 공기기포의 합체에 의한 전열면적의 감소가 영향을 미치

는 것으로 생각되어 진다.

Fig.7은 축열재 혼합수 농도와 단위시간당 입·출구 공기 엔탈피차의 관계를 나타낸 것으로 농도에 따라 엔탈피차가 최대가 되는 점이 존재함을 알 수 있다. 최대점 이하 농도에서는 농도가 낮아짐에 따라 축열재가 가지고 있는 잡열량이 작아져 교환열량이 줄어들기 때문이며 최대점 이상 농도 영역에서는 Fig.5에서 설명한 바와 같이 농도가 증가함에 따라 평균 출구공기 온도가 높아지는 때문이다. 이러한 상호 관계들로부터 입·출구 공기의 엔탈피차는 축열재 혼합수의 농도가 20~40mass%정도 일 때 본 실험의 범위 내에서 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 냉방용 공기 열매체의 감온열원으로서 파라핀계 상변화 물질을 사용하여 만든 겔 상태의 잡열 축열재 혼합수가 기액직접접촉 방식에 의하여 열교환되는 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 축열재 혼합수의 고효율 열전달이 일어나는 고-액 상변화 영역의 존재를 온도의 변화 분포로부터 확인하였으며 그 열전달 거동 특성을 분명히 하였다.
- (2) 겔 상태의 잡열 축열재 혼합수의 농도에 대한 영향을 파악한 결과 농도가 증가함에 따른 잡열 축열재 혼합수의 점도가 증가해 공기의 기포가 같은 유로를 통과하는 가스 홀드업(Gas hold-up)현상에 의해 열교환이 충분히 일어나지 않음을 알았다.
- (3) 유입공기의 유속에 대한 영향을 파악한 결과 유속의 증가에 따른 공기기포의 체류시간의 단축과 기포합체에 의한 충분한 열교환이 이루어지지 않는다는 것을 알았다.
- (4) 열교환에 대한 최상의 효과를 유도할 수 있는 최적의 겔 상태 잡열축열재 혼합수의 농도를 입·출구 공기의 엔탈피를 산출 함으로서 유도하였다.

후 기

본 연구는 2004년도 군산대학교 수산과학연구소 연구지원비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 稲葉英男, 機能性熱流體の現状と將來性, 日本機械学会誌, 98-925(1995), pp. 999-1000
- [2] C. Cleary와 8명, Hydraulic characteristics of ice slurry and chilled water flow, Advanced Energy Transmission Fluids-Final Report of Research, (1990)
- [3] P.J. Winters, Phase two laboratory testing of direct freeze ice slurry district cooling, Project final report, U.S. Department of Energy, (1991)
- [4] K.E. Kasza와 1명, Improvement of the performance of solar energy or waste heat utilization systems by using phase-change slurry as an enhanced heat-transfer storage fluid, J. Solar Energy Engineering, 107, (1985), pp. 229-236
- [5] E.S. Choi와 2명, Forced convection heat transfer with phase-change-material slurries : turbulent flow in a circular tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 73, 2, (1994), pp. 207-215
- [6] 김명준, マイクロカプセル潜熱蓄熱材混合水の水平傳熱円管内強制對流下における蓄熱・放熱特性に關する研究, Ph.D. Thesis, (2002), National University of Okayama, Japan

저 자 소 개



김명준 (金明俊)

1971년3월18일, 1994년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업(공학사). 1998년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사). 2002년 일본 오카야마대학 대학원 자연과학연구과 졸업(공학박사). 2002년~2003년 일본 오카야마대학 기계공학부 외국인 객원연구원. 2003.9~현재 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템 공학부 전임강사