

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 18, No. 3, 1998

Myristic acid를 사용한 축열장판의 열성능 연구

곽희열*, 강용혁*, 전명석*, 이태규*, 이동규**, 한귀영***

* 한국에너지기술연구소

** 제주대학교 대학원

*** 성균관대학교 화학공학과

Thermal Performance of a Heating Board with a Microencapsulated Myristic Acid

H.Y.Kwak*, Y.H.Kang*, M.S.Jeon*, T.K.Lee*, D.G.Lee**, G.Y.Han***

* *Korea Institute of Energy Research*

** *Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University*

*** *Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University*

요 약

본 논문은 미세캡슐을 함유한 축열장판의 열성능에 관해서 조사하였고 기존 시판되고 있는 장판과 비교를 하였다. 상변화물질로는 Myristic Acid($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$)를 사용했고 이 물질을 PMMA와 왁스로 3중 코팅을 하였고 1~1.5mm인 캡슐로 제조를 하였다. ANSI/ASHRAE를 토대로 하여 열전달 매체로 공기를 사용한 밀폐형 실험장치를 구성하였으며, 공기유량은 오리피스를 통해서 측정된다. 실험에 사용된 두 개의 서로다른 장판(미세캡슐 함유율 중량비 10% 장판, 0% 장판)의 열성능을 평가하기 위해서 서로다른 공기유량에 대해서 방열시 열전달 특성에 관한 실험을 수행하였다.

실험결과를 보면 방열과정시 미세캡슐 함유율이 10%인 장판의 표면온도는 미세캡슐을 함유하지 않은 장판보다 더 높은 온도를 유지했다. 그리고 장판표면에서의 열전달계수는 미세캡슐을 함유하지 않은 장판과 비교해 볼 때 미세캡슐을 함유한 장판에서 더 높게 나타났다.

Absracts

The thermal performance of a heating board with microencapsulated PCM was investigated and compared to conventional heating board. The employed PCM was the myristic acid $\langle \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH} \rangle$ and was encapsulated by the multiple layers of PMMA and paraffin wax. The size of encapsulated PCM was 1~1.5mm.

Accoring to ANSI/ASHRAE test procedure, the close-loop test configuration was installed. Air was used as the heat transfer fluid and a calibrated orifice was employed for the measurement of air flow rates. The thermal performance test of two different heating boards (with 10 wt% PCM and without PCM) was conducted for different air flow rates and the heat transfer characteristics during cooling was compared.

The test results showed that the surface temperature of heating board with 10 wt% PCM maintained higher during the cooling process than that of the heating board without PCM and experimentally determined heat transfer coefficient in heating board with PCM showed higher value compared to heating board without PCM.

1. 서 론

열, 전기 또는 기계적인 형태로 발생하는 에너지는 발생형태 그대로 또는 다른형태의 에너지로 변환되어 공급되며, 사용처의 용도에 맞도록 적당한 형태나 에너지 수준으로 바뀌어 사용된다. 이러한 에너지 발생 - 에너지 수송 - 에너지 사용의 과정에서 에너지의 공급측과 수요측간에 시간적, 질적, 양적으로 불일치가 발생하여 많은 에너지가 비효율적으로 낭비된다.

또한, 새로운 대체에너지원으로서 개발되고 있는 태양열, 풍력, 지열 등의 자연에너지의 이용이나 다량으로 배출되고 있는 폐열의 유효 이용면에 있어서, 이들 에너지는 질적, 양적으로 시간에 따라 변화하기 때문에 이러한 에너지를 균일하고 안정한 에너지로서 이용하기 위해서는 에너지의 발생원과 에너지의 사용처 사이에 에너지 저장 시스템을 사용하여 일단 에너지를 적당한 형태로 저장하는 것이 필요하게 된다.

이러한 에너지의 저장방법에는 운동에너지 및

위치에너지로서 저장하는 기계적 저장방법, 화학 반응을 이용하여 화학적 물질로 에너지를 저장하는 화학적 저장방법, 전기장 또는 유도 에너지장을 이용하여 축전기에 전기에너지를 저장하는 전기적 저장, 그리고 열에너지를 형태 변화없이 그대로 저장하는 방법으로 크게 현열(sensible heat) 및 잠열(latent heat)을 이용한 저장으로 나눌 수 있다. 이들 저장방법 중 물질의 상(phase)이 변화할 때 등온에서 흡수 또는 방출하는 열, 즉 잠열을 이용한 축열방법이 축열밀도가 크기 때문에 최근에 많이 연구되고 있다. 그 중 무기염이나 여러 유기물이 잠열 저장물질로서 널리 연구되어 왔다. 특히 무기염 수화물은 같은 용융온도 범위에서 유기물에 비해 많은 장점을 갖고 있다. 즉 PCM(phase change material) 중 무기염 수화물은 여러 장점을 갖고 있으나, 그 중에서도 높은 열저장 밀도 및 낮은 증기압에 의한 연소 위험성이 없는 장점을 갖고 있다. 현재 7~120°C에 걸친 용융점을 갖는 무기염 수화물 형태의 PCM이 상업적으로 개발되어 있으나 대부분 이

들 물질은 바람직하지 못한 상분리(phase separation) 및 심각한 과냉각(supercooling)의 문제점을 갖고 있다. 일반적으로 축열재의 상분리 현상을 피할 수 없기 때문에 축열재에 적당한 중점제(thickener)를 첨가하여 용융시 생성된 무수염을 균일하게 분산시킴으로서 물과 무수염이 재수화할 수 있도록 접촉기회를 향상시켜 안정화시킬 필요성이 있다. 또한 과냉각 현상은 결정과정시 결정핵 역할을 하는 조핵제(nucleating agent)의 사용을 통하여 과냉각온도의 폭을 줄일 수 있다.

따라서, 최적의 PCM 혼합 조성을 결정한 후 노즐을 이용하여 용융 PCM을 연속적으로 구형의 PCM으로 제조할 수 있는 장치를 제작하였고, 제작변수로서 노즐의 반경 및 용융 PCM 방출속도를 변화 시킴으로서 다양한 입경의 구형 PCM을 생산하고, 스프레이 공법에 의하여 폴리머(polymer), 왁스(wax)와 폴리머(polymer) 3중 코팅에 의하여 미세캡슐이 제조된다.

이렇게 제조된 미세캡슐 축열재(microencapsulated PCM)를 이용한 열저장 시스템은 기존의 bulk PCM을 이용한 열저장 시스템에서 문제점으로 지적된 축열용기의 부식문제, 그리고 상분리 현상을 억제할 수 있는 새로운 축열방식으로 대두되고 있다.

이러한 미세캡슐 축열기술의 장점은

1. 잠열물질인 무기수화물의 결정수 이탈 방지 : ΔH_m 과 T_m 의 변화
2. 열전도도와 열응답성 향상
3. 사용이 편리(Equipment design, 가공)
4. 무독성 등이 있다.

현재 상변화를 이용한 축열물질로는 크게 1) 무기수화염, 2) 왁스, 3) 지방산 등이 고려되고 있다.

본 연구에서는 미세캡슐 축열식 장판의 응용기술분야로서 상변화시 무기수화염에서 나타나는 과냉각 현상과 상분리현상이 나타나지 않기 때문

에 오랫동안 사용해도 잠열손실이 없고, 또한 부식성이 작은 지방산의 일종인 myristic acid $\langle \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH} \rangle$ 를 사용하였다. 단점으로는 가격이 다소 비싸고, 단위체적당 축열량이 무기수화염에 비해서 떨어진다는 점이다.

Table 1은 myristic acid의 물리적인 물성치값을 나타낸 것이다.

Table 1. Physical Property of Myristic Acid

Items	Physical Property
Melting Point	57 °C
Latent Heat	198 J/g
Specific Heat	1.59 J/g °C (solid), 2.259 J/g °C (liquid)
Density	0.99 g/cc (solid), 0.86 g/cc (liquid)

2. 실험장치

미세캡슐 축열장판의 방열성능 실험을 위하여 ANSI/ASHRAE 94.1-1985(RA91)를 토대로 하여 열전달 매체로 공기를 사용한 밀폐형 실험장치를 구성하였으며, 실험장치의 주요 구성요소는 test section(미세캡슐 축열장판, 동판, 판형히터와 단열재), 송풍기(Inverter blower), Chiller (3RT), 열교환기, 유량계(오리피스, $\beta = 0.5, 0.35$), 피토투브 등으로 구성되어 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 test section을 나타내고 있으며, test section의 크기는 $W \times L \times H = 240 \times 800 \times 60$ 이다. 공기의 흐름을 1차원 유동으로 가정하기 위하여 덕트의 넓이에 대한 높이의 크기를 최소화하였으며, 또한 입구에서 공기유동의 안정화를 위하여 관다발형 구조물(straightner)과 screen mesh를 설치하였다.

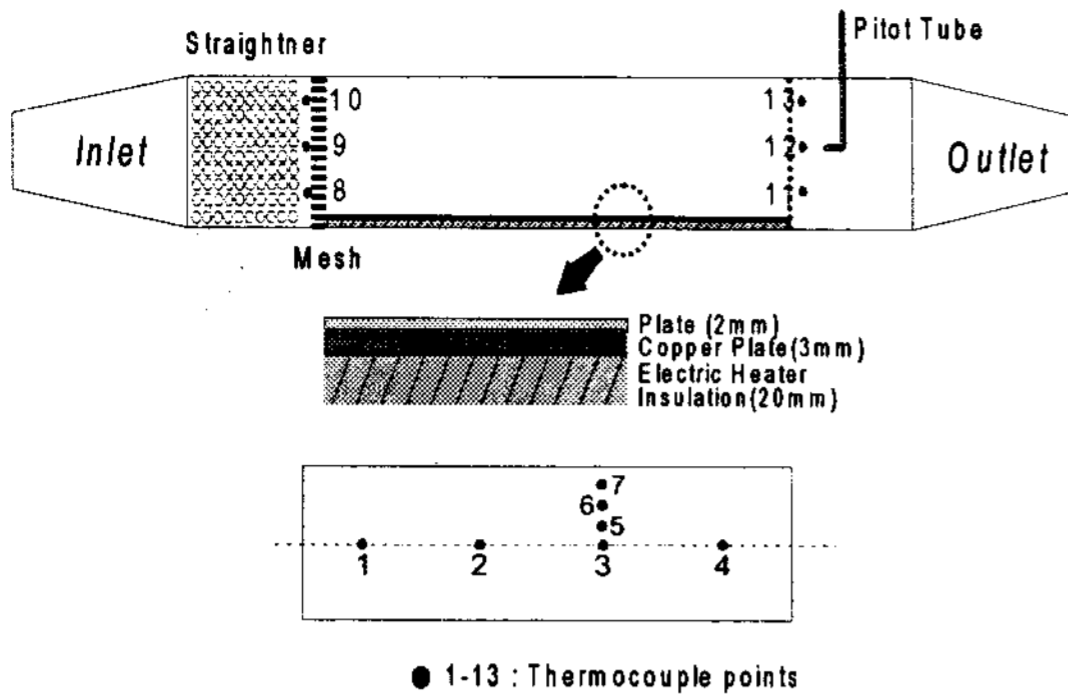


Fig. 1. Test section schematic and thermocouple positions

공기 유동에 따른 방열실험에서 나타나는 열경계층(thermal boundary layer)의 영향을 고려하여 입·출구에 각각 3개씩의 온도 측정점(T-type)을 두었다. 또한 축열장판의 길이방향과 폭방향의 온도구배에 따른 방열특성을 살펴보기 위하여 온도 측정점들을 두었다. 축열장판은 균일한 열유속(uniform heat flux)을 위하여 단열재(ceramic-wool, $t=20\text{mm}$), 판형 전기 히터와 동판($t=3\text{mm}$) 위에 축열장판을 부착하였다.

본 연구에서 공기 유동은 수축부, 세관(capillary tube) 및 곡관부 등으로 구성된 유량 센서를 통해 유체가 흐르게 되면 그 센서의 상·하류측에 유량과 함수관계를 갖는 압력차가 유발되며, 이 압력차를 측정함으로써 유체의 유동률(flowrate) 알 수 있게 된다. 와같은 원리를 이용하는 차압유량계를 대표하는 오리피스(orifice, $\beta=0.5, 0.346$)를 사용하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용되는 오리피스 유량계의 유량보정 곡선을 나타낸 것이다. 공기유동 밀폐형 실험장치의 에너지 방정식을 위하여 열교환기(tube/fin)와 냉각기(chiller, 3RT)를 사용하였으며, 유체 유동은 송풍기(5Hp, 3.75Kw, 220V, 13.8A)에 inverter를 부착하여 공기량을 조절하였다.

또한 오리피스를 흐르는 공기량을 보정하고, 특

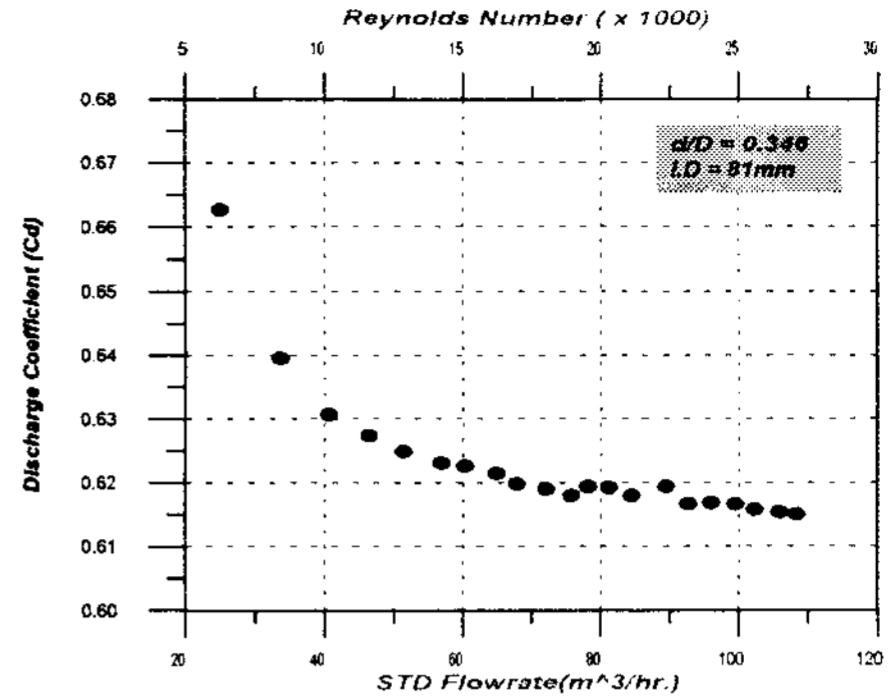


Fig. 2. Orifice Flowmeter Test Result

정지점의 공기유속을 측정하기 위하여 pitot tube를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

잠열축열재로 지방산의 일종인 myristic acid를 사용하여 미세캡슐 축열 장판(미세캡슐 함유율 중량비 10%)을 제조하였고, 기존 장판과 비교 실험을 통하여 미세캡슐 축열장판의 방열성능 시험을 수행한 결과들은 다음과 같다.

3.1 축열장판의 온도분포

축열장판의 방열성능을 위하여 제작된 Test section부($W \times L \times H = 240 \times 800 \times 60$)를 지나는 공기유량을 균일한 1차원 유동으로 만들어 주기 위하여 덕트의 W (넓이)/ H (높이)비 = 4를 사용하였다.

Fig. 3은 공기유량이 $63.5\text{m}^3/\text{hr}$ 이고, 공기온도가 16°C 인 경우, 미세캡슐이 중량비로 10% 함유된 축열장판의 입·출구 온도분포를 나타낸 것이다. 축열장판에서 공기유동에 따른 열경계층(thermal boundary layer)의 영향을 고려하여 덕트에 높이 방향으로 각각 3지점($H=5, 30, 55\text{mm}$)에 온도 측정점을 두었다. 입구에서 평균온도에 대한 출구에서의 온도 분포는 덕트내의 속도 경

계층과 열경계층의 영향으로 $h=30\text{mm}$ 인 지점이 가장 낮게 나타났고, 축열장판과 가까운 $h=5\text{mm}$ 지점의 온도가 높게 나타났다.

또한, Fig. 4~5는 Fig. 3과 동일한 실험조건에서 길이방향과 폭방향에서의 축열장판의 표면온도 분포를 나타냈다.

Fig. 4는 축열장판의 중심에서 시간에 따른 축열장판의 유동방향 즉 길이방향의 각 지점의 표면온도 변화를 보여주고 있다. 방열 초기에는 입구에서 출구쪽으로 열전달이 시간이 경과함에 따라 이동하는 현상이 나타나고 있다.

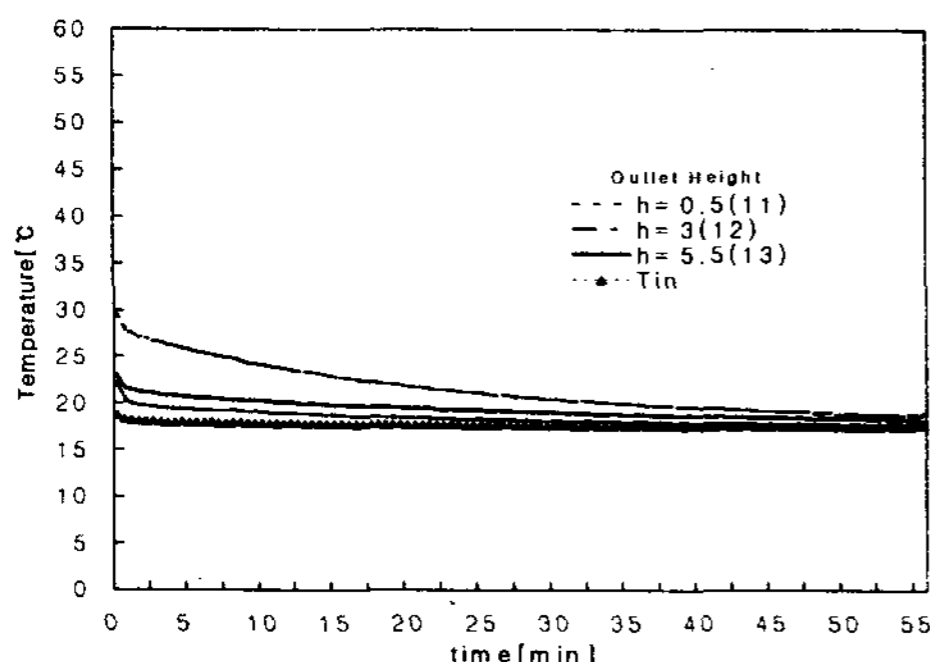


Fig. 3. Average inlet temperature and outlet temperature variation with height of duct.

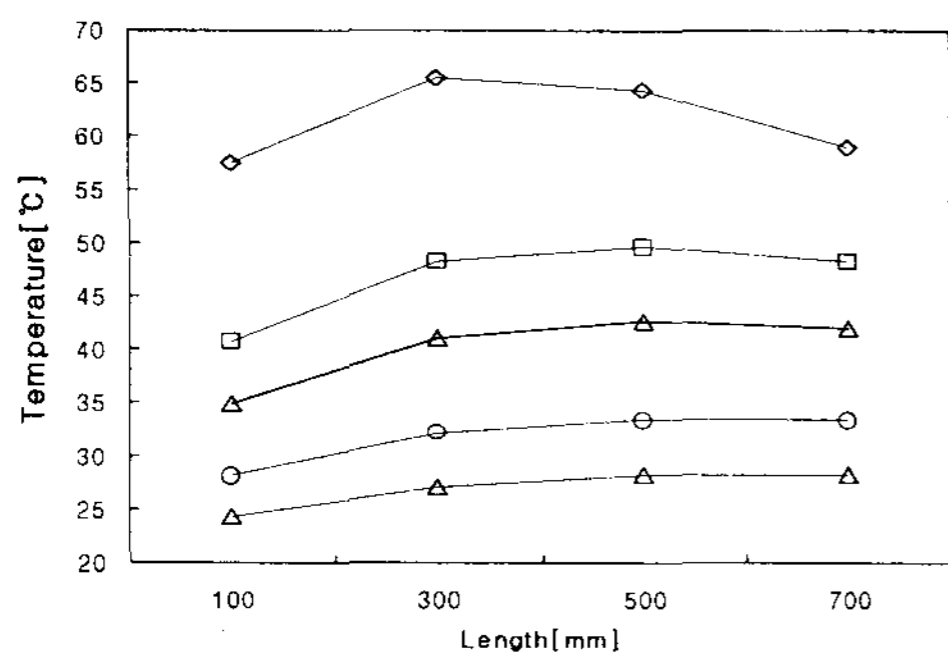


Fig. 4. Temperature variation with length of surface on heating board. (Chiller Temp.=16°C, Flowrate=63.5m³/hr)

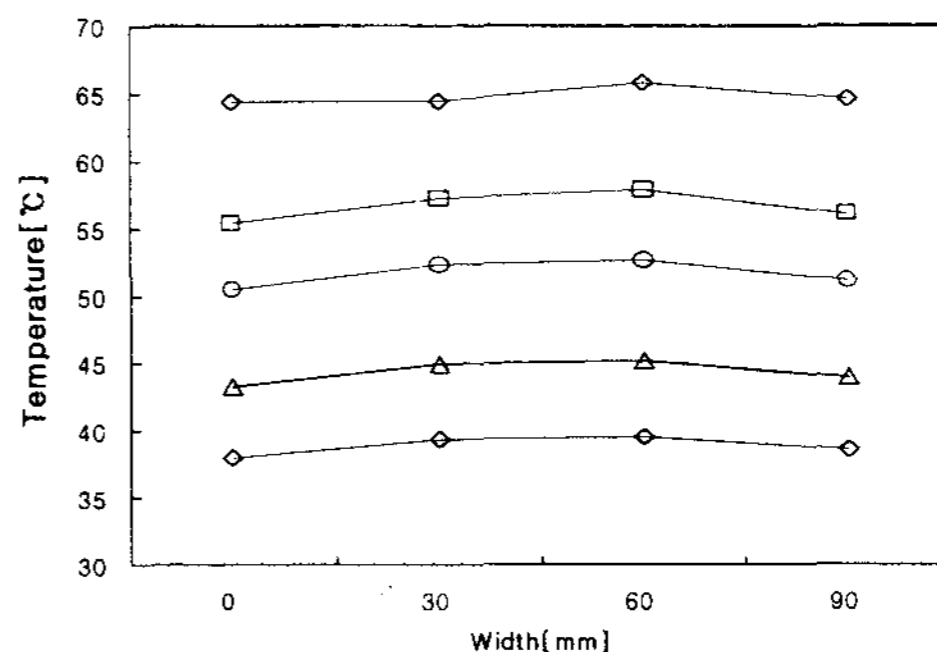


Fig. 5. Temperature variation with width of surface on heating board.(Chiller Temp.=16°C, Flowrate=63.5m³/hr)

Fig. 5는 축열장판의 중심으로부터 폭방향으로의 각 지점의 표면온도 분포를 나타내고 있다. 시간에 따라 균일한 온도 분포를 나타내고 있으나, 덕트 중심에서 속도구배에 따라 다소 열전달이 촉진되는 현상이 나타났다. Fig. 4~5의 결과에서 알 수 있듯이 미세캡슐 축열장판이 기존의 bulk형태 축열에 비해 온도분포가 균일하고, 열응답성이 빠르게 나타나고 있다.

3.2 축열장판의 방열 특성

Fig. 6은 미세캡슐 함유비율(wt 0%, 10%)과 공기유량에 따른 입·출구 온도차(T_o-T_i)를 나타내고 있다. 미세캡슐이 함유되지 않은 기존 축열장판의 경우와 비교해 볼 때 미세캡슐이 함유된 축열장판의 방열성능이 시간에 따라 균일한 온도차를 나타내고 있고, 잠열 축열효과가 뚜렷하게 나타났다. 그리고 공기유량이 증가함에 따라 열회수 시간이 빠르게 나타났다.

Fig. 7은 유량이 146.1m³/hr.이고, 냉각온도가 16°C인 경우 미세캡슐 함유량에 따른 방열 에너지의 변화를 나타내고 있다. 방열량은 유량과 입·출구 온도차(T_o-T_i)의 함수로 나타났고, 유량 변화에 매우 민감하게 나타났다. 또한 시간에 따른 방열량의 변화가 균일하고 열응답성이 빠르게

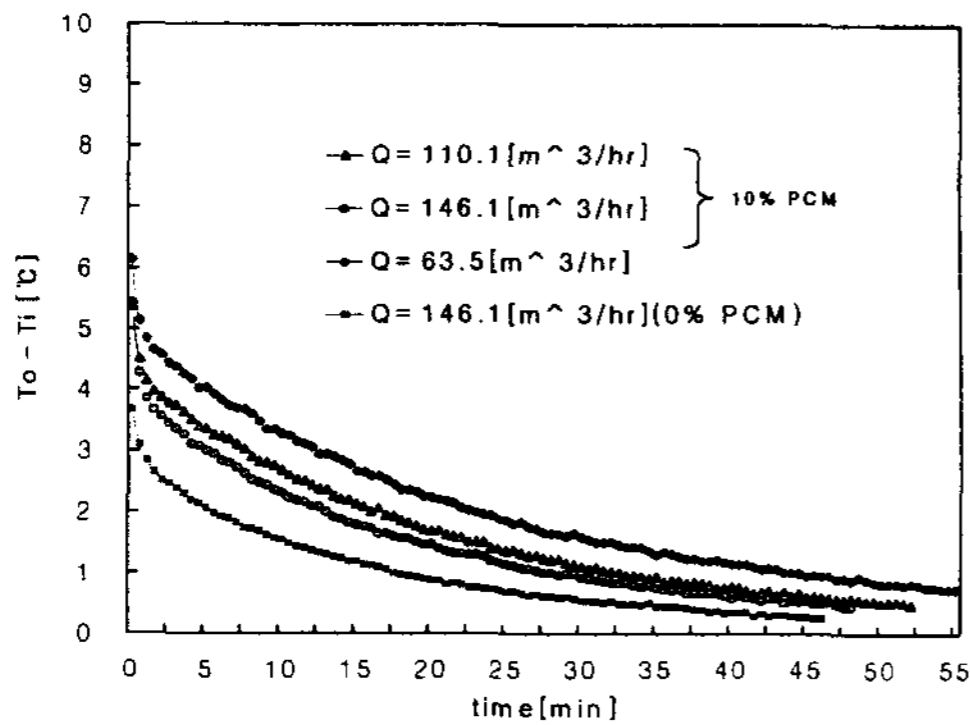


Fig. 6. Temperature difference between inlet and outlet according to the flowrates.

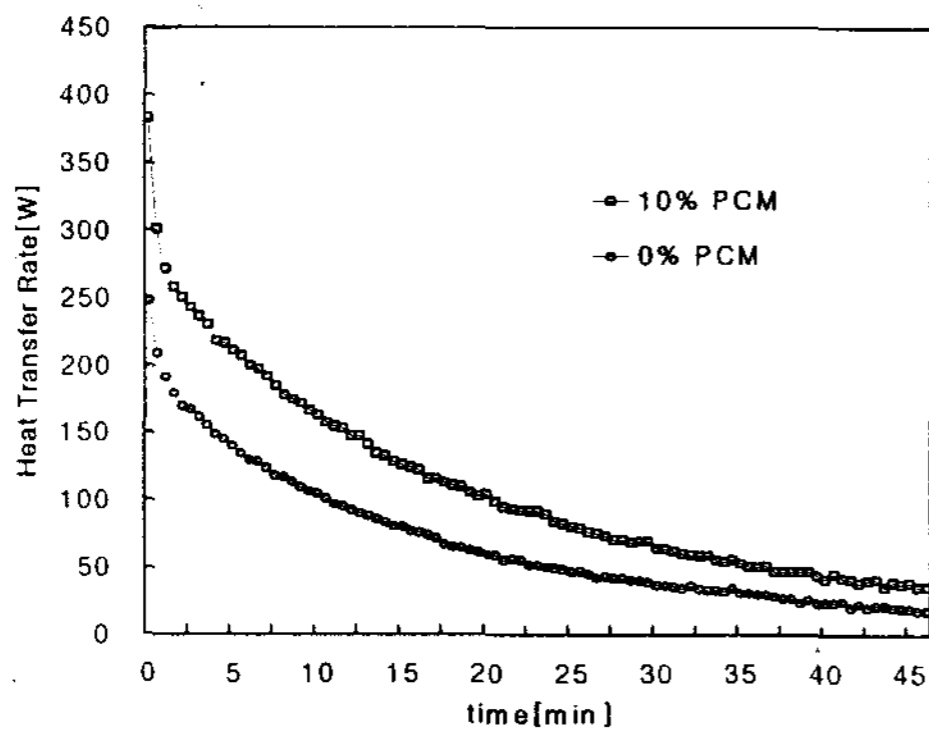


Fig. 7. Heat transfer rate in heating board (Chiller Temp.=16°C, Flowrate=146.1 m³/hr)

나타난 것은 myristic acid가 과냉각현상이 없는 물질이고, 미세캡슐 기술 때문으로 사료된다.

3.3 열전달 계수

미세캡슐 축열장판의 열전달계수(U)값을 계산하기 위하여 덕트 입구, 출구에 대한 에너지 수지식(1)과 장판표면과 공기와의 대류열전달 방정식(2)를 사용하였다.

$$dq = m \times C_p \times dT_a$$

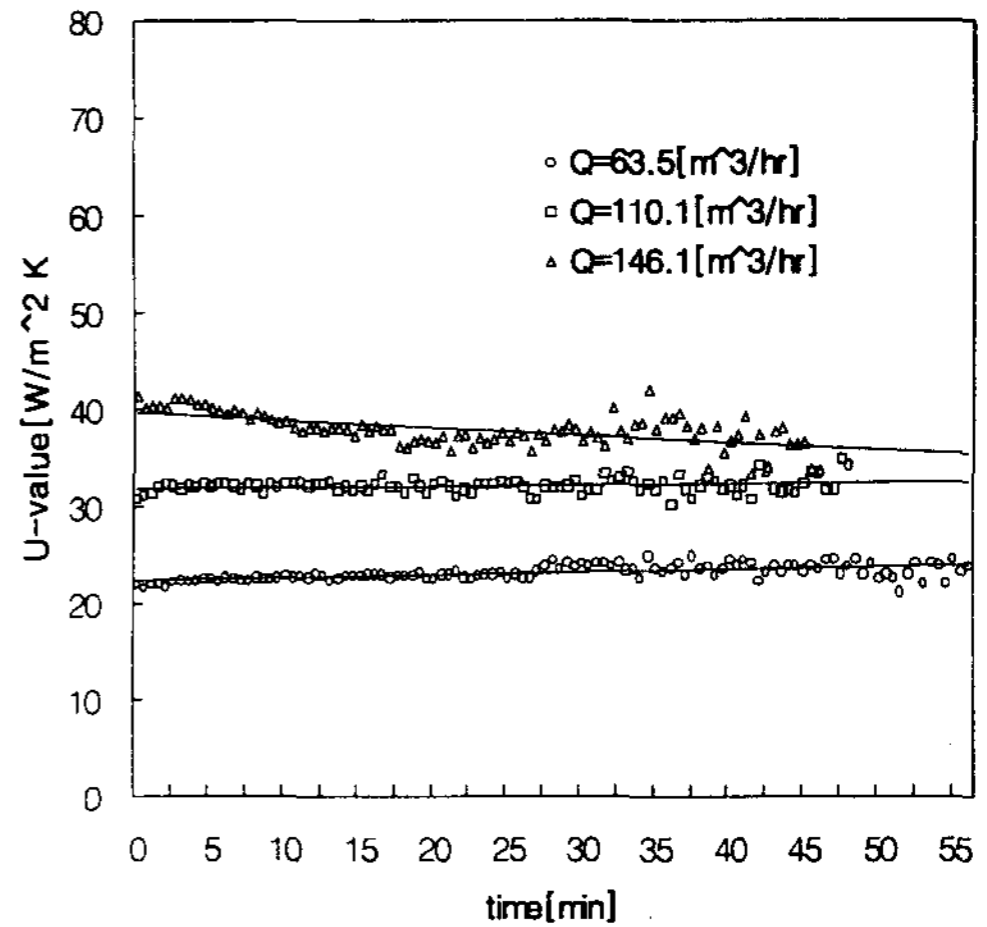


Fig. 8. Heat transfer coefficient (U) from surface on the heating board. (Chiller Temp.=16°C, 0% PCM)

$$dq = U \times w \times d\ell \times (T_{sur} - T_a)$$

Fig. 8은 미세캡슐을 함유하지 않은 기존장판 (wt 0%) 표면으로부터의 열전달계수(U)를 나타내고 있다. 시간에 따라 열전달계수가 거의 일정하게 나타났고, 유량이 증가할수록 시간이 경과할수록 열전달계수 (U)가 fluctuating 현상이 나타나고 있고, 이는 장판으로부터 방출하는 열량이 균일하지 못한 것으로 사료되었다.

또한 Fig. 9는 미세캡슐 축열장판(wt 10%)의 경우, 공기유량에 대한 축열장판의 열전달계수(U)를 나타낸 것인데 유량이 63.5m³/hr인 경우에 시간에 따라 균일한 열량을 방출하는 것으로 나타났고, 유량이 증가할수록 시간에 따라 fluctuating이 나타났다. 미세캡슐이 함유된 장판이 기존 장판에 비해 myristic acid의 상변화 과정에서 나오는 잠열의 영향에 의해서 열전달계수(U)가 증가 하였다.

Fig. 10은 미세캡슐 함유율(wt 0%, 10%)과 공기유량(m=0.03,0.05, 0.07kg/sec.)에 따른 장판표면으로부터의 열전달계수(U)를 나타내고 있다.

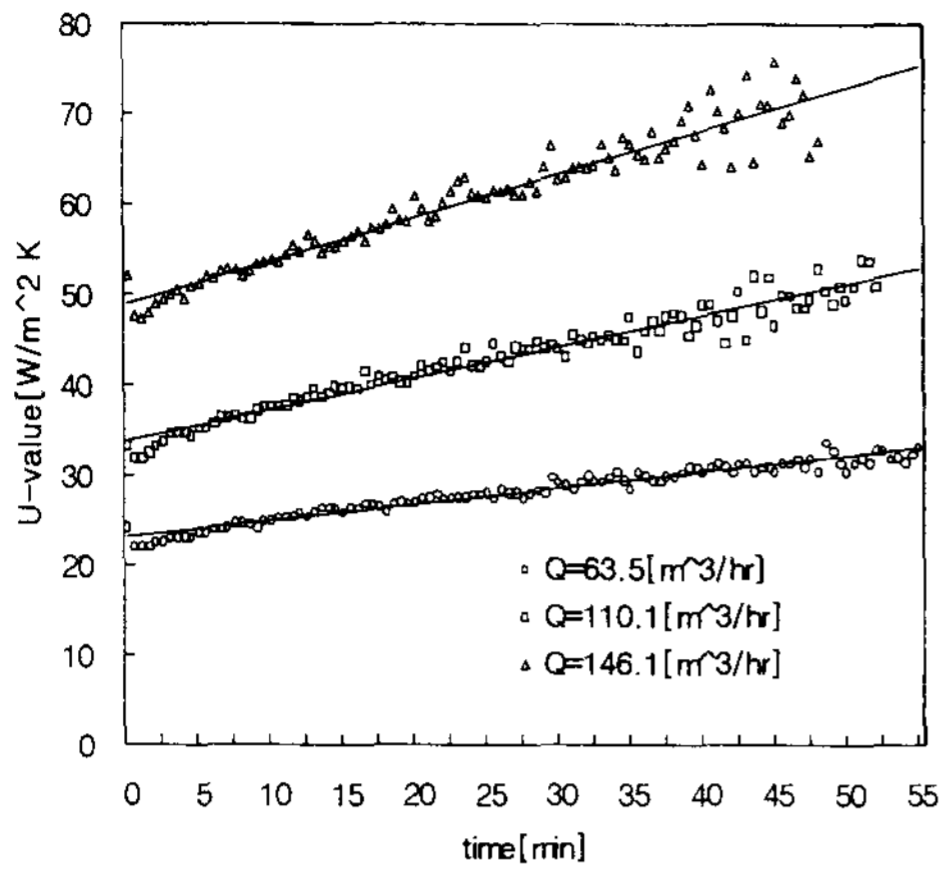


Fig. 9. Heat transfer coefficient (U) on the heating board surface (Chiller Setting Temp.=16°C, 10% PCM)

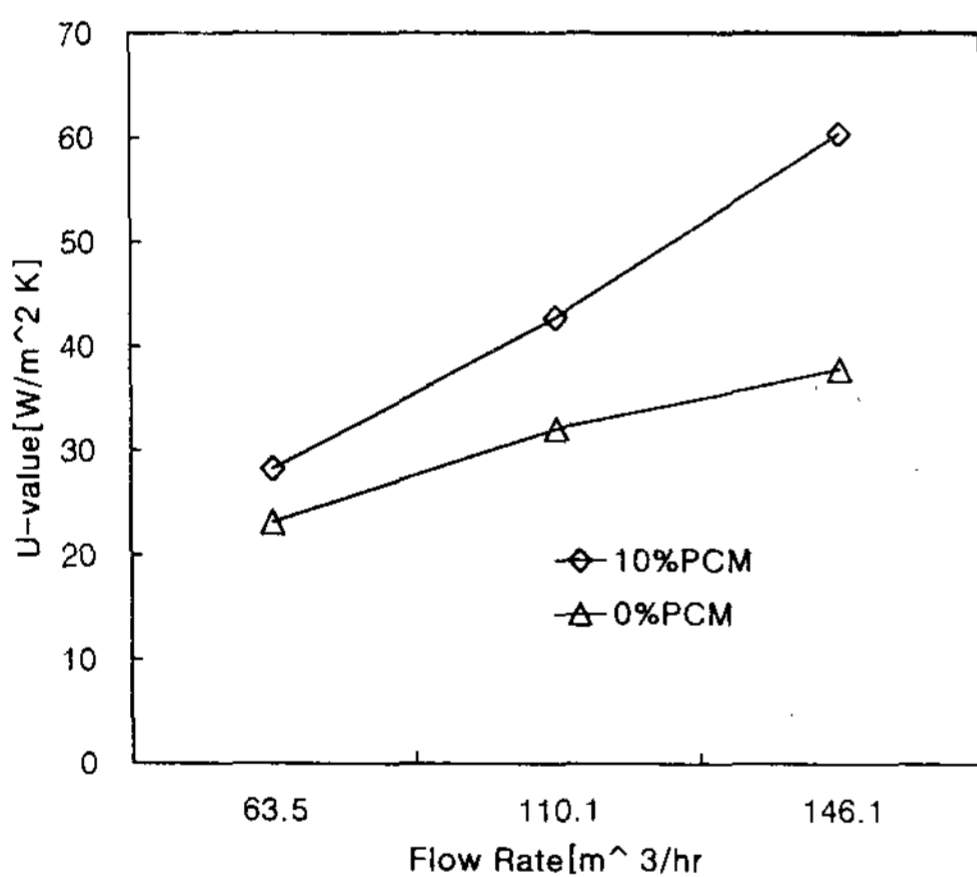


Fig. 10. Heat transfer coefficient (U) with flowrate (Chiller Temp.=16°C)

미세캡슐이 함유된 장판이 기존 장판에 비해 myristic acid의 상변화 과정에서 나오는 잠열의 영향에 의해서 열전달계수(U)가 증가 하였고, 유량의 증가에 따라서 열전달계수(U) 또한 증가하였다.

4. 결 론

지방산과같은 유기물인 myristic acid는 조화용 융점을 갖고 있으며, 과냉각현상이 없으므로 반복 되는 축열, 방열에도 축열기능은 거의 감소하지 않는 장점을 지니고 있다. 따라서 미세캡슐의 응용기술분야로서 축열장판을 위한 축열재로 myristic acid를 구형으로 제조하여 미세 캡슐을 함유한 축열장판(wt 10%)에 대한 열성능 시험 결과는 다음과 같다.

- i) 미세캡슐 축열장판의 축열효과가 기존 장판에 비해 뚜렷하게 나타났다.
- ii) 미세캡슐 축열장판이 방열성능에서 열응답성이 빠르게 나타나고 있다.
- iii) 미세캡슐 축열장판에서 유량이 0.03kg/sec 인 경우 축열장판 표면으로부터 시간에 따라 균일한 열량을 방출하는 것으로 나타났다.
- iv) 시간에 따른 열전달계수(U)는 유량 증가 (0.03, 0.05, 0.07 kg/sec)에 따라 30~60(W/m²K)으로 증가하였다.

참 고 문 헌

1. George A. Lane, "Solar Heat Storage : Latent Heat Materials", CRC press, 1986
2. "열저장시스템의 개발에 관한 연구", 한국과학기술원, 1987
3. "Method of testing active latent-heat storage devices based on thermal performance", ANSI/ASHRAE 94.1-1985
4. "유체유량", KRIS-91-164-ET, 한국표준과학연구원, 1991

Thermal Performance of a Heating Board with a Microencapsulated Myristic Acid

H.Y.Kwak^{*}, Y.H.Kang^{*}, M.S.Jeon^{*}, T.K.Lee^{*}, D.G.Lee^{**}, G.Y.Han^{***}

^{*} *Korea Institute of Energy Research*

^{**} *Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University*

^{***} *Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University*

Absracts

The thermal performance of a heating board with microencapsualted PCM was investigated and compared to conventional heating board. The employed PCM was the myristic acid $\langle \text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH} \rangle$ and was encapsulated by the multiple layers of PMMA and paraffin wax. The size of encapsulated PCM was 1~1.5mm.

Accoring to ANSI/ASHRAE test procedure, the close-loop test configuration was installed. Air was used as the heat transfer fluid and a calibrated orifice was employed for the measurement of air flow rates. The thermal performance test of two different heating boards (with 10 wt% PCM and without PCM) was conducted for different air flow rates and the heat transfer characteristics during cooling was compared.

The test results showed that the surface temperature of heating board with 10 wt% PCM maintained higher during the cooling process than that of the heating board without PCM and experimentally determined heat transfer coefficient in heating board with PCM showed higher value compared to heating board without PCM.