

〈論 文〉

태양열 이용을 위한 직접접촉식 액-액 열교환기 특성

강인석* · 김종보** · 천원기*** · 강용혁**** · 곽희열****

(1994년 2월 3일 접수)

Characteristics of Liquid-Liquid Direct Contact Heat Exchanger for a Solar System

I. S. Kang, C. B. Kim, W. G. Chun, Y. H. Kang and H. Y. Kwak

Key Words: Spray Column(분사칼럼), Liquid-Liquid Heat Exchanger(액-액 열교환기), Solar System(태양열 시스템)

Abstract

In most direct contact liquid-liquid heat exchangers, oil or hydrocarbon with a density less than water is normally used as dispersed working fluid. The main difficulty that arises with this arrangement lies in the control of the interface at the top of the column. When it is connected with a solar collector which uses water as its working fluid, the main difficulties arise from the fact that the water can be frozen during winter time. In order to solve these problems and to demonstrate the technical feasibility of a direct contact liquid-liquid heat exchanger, liquids heavier than water with low freezing temperature has been utilized as dispersed phase liquids in a small laboratory scale model made of pyrex glass. In the present investigation, dimethyl phthalate($C_6H_4(COOCH_3)_2$) and diethyl phthalate($C_6H_4(CO_2C_2H_5)_2$) are utilized as heavy dispersed phase working fluids. The results of the present investigation the technical in the utilization of heavier dispersed working liquid in the spray column liquid-liquid heat exchanger for a solar system. The overall average temperature difference along the column is found to be almost half of the initial temperature difference between the dispersed and the continuous phase. Despite the fact that the two phthalates tested in the experiment differ significantly in some of their physical properties, the volumetric heat transfer coefficients in terms of dispersed fluid superficial velocities were found to be similar for both phthalates tested.

기 호 설 명

a	: 분산작동유체와 연속작동유체 사이의 단위 체적당 내부 접촉면적 [cm^{-1}]	F/S	: 분산작동 유체의 피상속도 [cm/sec]
A	: 분산작동유체와 연속작동유체 사이의 총 접촉면적 [cm^2]	h_c	: 연속작동유체의 열전달계수 [$J/(sec\ cm^2\ ^\circ C)$]
		h_a	: 분산작동유체의 열전달계수 [$J/(sec\ cm^2\ ^\circ C)$]
		k	: 열전도도 [$W\ cm/^\circ K$]
		H	: 분산작동유체가 연속작동유체 내에 차지하는 체적비(holdup) [무차원]
		L	: 열교환기의 연속작동유체의 수직높이 [cm]

*정회원, 금성사(주) 생활시스템연구소

**정회원, 인하대학교 기계공학과

***정회원, 제주대학교 에너지공학과

****정회원, 한국에너지기술연구소

- N_N : Nusselt 수 ($h d/k$) [무차원]
 N_P : Prandtl 수 ($c \mu/k$) [무차원]
 N_{Pe} : Peclet 수 ($c \rho V d/k, N_P N_R$) [무차원]
 N_R : Reynolds 수 ($d V \rho/\mu$) [무차원]
 N_S : Stanton 수 ($\frac{U}{C_d \rho d F/S}$) [무차원]
 Q : 열전달률 [J/sec = W]
 S : 열교환기의 횡단면적 [cm^2]
 ΔT_1 : 실험초기 분산작동유체와 연속작동유체의 초기 온도차
 $T_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ and } 7)$
 : 열교환 칼럼내의 온도 측정 열전대 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_c : 연속작동유체의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_d : 분산작동유체의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_{co} : 열교환 칼럼의 하단부에 유착된 분산작동유체의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 U : 열전달계수 [J/(sec cm^2 $^{\circ}\text{C}$)]
 U_v : 체적 열전달계수 [J/(sec cm^3 $^{\circ}\text{C}$)]
 V : 열교환 칼럼내의 연속작동유체의 체적 [cm^3]
 y : 전열벽 두께 [cm]
 μ_c : 연속작동유체의 점도 [poise]
 μ_d : 분산작동유체의 점도 [poise]

1. 서 론

태양열 이용장치로서 태양열 집열기와 연계한 난방시스템은 태양열 집열기내의 작동유체로서 물을 사용하는 경우 겨울철 야간에 물이 어는 위험을 피하기 위해 밤마다 물을 배수해야 하는 불편함이 생기며, 기존의 방법인 부동액 에틸렌글리콜(ethylene glycol)을 사용하는 경우에는 축열조 내에서 간접 열교환을 수행해야 하므로 열교환 효율이 떨어질 뿐만 아니라, 부동액이 누출되었을 때 에틸렌글리콜의 독성 또한 문제로 대두되고 있다.

이 문제를 해결하기 위하여 직접접촉 열교환 방법을 고려할 수 있는데, 직접접촉 액-액 열교환기를 사용하는 경우, 분산작동유체로서 물보다 밀도가 작은 탄화수소(hydrocarbon)나 기름(oil)을 보통 사용하여 열교환기 내에서 상향분사를 시켜주어, 이때 상단부로 유입되는 물은 물-분산작동유체 경계면 아래로 즉시 유입되도록 경계면을 일정하게 유지시켜야 하는 어려움이 있을 뿐만 아니라, 이 경계면의 조정을 위하여 열교환기 내부를 가압해야 하는 불편함이 따른다. 또 다른 문제점은 칼럼

(column) 상단부에 형성되는 경계면의 위치에 영향을 주는 드랍 유착률(coalescence rate)에 있으며, 이 드랍(drop) 유착률은 요구되는 경계면 위치에 벌집모양의 별도의 구조물을 설치하여 조절이 가능하며, 선행되어야 할 점은 이 구조물이 분산작동유체에 의해 미리 충분히 적셔져 있어야 한다는 것이다.⁽¹⁾ 그러므로, 직접접촉 액-액 열교환기를 태양열 집열기와 연계하는 경우 빙점이 낮고, 비등점이 높으면서, 부식성이 없고 물보다 밀도가 큰 불용성의 유체를 태양열 집열기내의 열매체 유체로 써, 동시에 열교환기내의 분산작동유체로 사용하고, 열교환기 칼럼 자체를 축열조로 사용해 축열과 열교환의 이중 역할을 수행하게 하면, 기존의 시스템에서의 태양열 집열기 회로와 축열 탱크 사이의 열교환기, 축열탱크 사이의 범프를 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 기기 내부 설치물과 패킹 등을 제거하여 열효율을 크게 높일 수 있다. 뿐만 아니라, 겨울철의 동파 및 부식문제 또한 동시에 해결할 수 있다. 또한, 물보다 무거운 작동유체를 사용할 경우는 직접접촉 열교환기에서 물보다 가벼운 분산유체를 사용하는 경우에 발생하는 문제점을 해결할 수 있으므로 가격과 설계에 있어서 현저한 잇점을 가져올 수 있고, 직접접촉 열교환을 통하여 적은 온도차에 대하여 효과적인 열전달을 얻을 수 있으므로 저열원을 이용하기 위한 목적으로서는 가장 효과적인 열전달 방법이라고 할 수 있다.

직접접촉 열교환기내의 분산작동유체의 드랍과 연속작동유체 사이의 열교환 해석은 매우 복잡하다. 그것은 각 유체의 열적 특성뿐만 아니라 분산작동유체 드랍의 동적특성에 크게 의존하기 때문이다. 지금까지의 대부분의 연구는 직경이 7.5 mm보다 작은 드랍들에 대한 실험이 대부분이었고, 특히, 1.0 mm에서 2.0 mm사이의 드랍직경을 갖는 드랍들이 형성되는 실험이 주류를 이루고 있다. 분산작동유체 드랍이 낮은 열전도도를 갖는 경우, 특히 탄화수소(liquid hydrocarbon)계의 경우 열전달의 주요 저항이 분산작동유체 드랍내부에 있다고 할 수 있다.

Jacobs와 Golafshani^(2,3)는 열전달에 있어서 드랍내부에 열전달 저항이 없다고 가정할 경우와 열전달이 드랍내의 확산에 의해 이루어진다고 가정한 경우에 대해 연구했는데 후자의 경우가 온도 성향이 실제 실험결과와 거의 일치한다는 것을 보였으며, 특히, 드랍의 직경 크기가 성장하는 경우에는

더욱 일치함을 보였다.

Stamps, Barr와 Valenzuela 등⁽⁴⁾은 1차원 분산 모델을 적용한 분사칼럼식 직접접촉 액-액 열전달에 대해 연구하였다. 여기서, 드랍크기와 웨이크(wake) 체적은 일정하다고 가정하였고, 드랍의 가로 방향의 온도는 균일하며, 각각의 상향으로 움직이는 분산드랍과 하향으로 움직이는 연속작동유체 사이에 형성되는 웨이크 사이의 열전달계수는 이미 알고 있는 것으로 가정하였다. 그들은 이 연구에서 분사칼럼식 직접접촉 열전달 실험을 통해 알려져 있는 실험적 온도 경향과 일치하는 드랍 체적과 열전달계수를 비롯한 웨이크 체적을 선정할 수 있었다.

Moresco와 Marschall⁽⁵⁾은 연속작동유체가 물인 경우에, 분산작동유체로서 오일(oil)에 대하여 전체 열전달계수는 드랍의 외부 표면 열전달계수에 주로 영향을 받기 때문에 대부분의 열전달 저항이 분산작동유체의 드랍표면 내부에 있다고 결론지었다. 또한 액-액 분사칼럼에서 동일한 여러개의 분사 노즐(nozzle)을 통해 형성되는 드랍들은 일정하지 않으며, 개개의 드랍직경 크기와 분산 폭 등은 드랍 형성방법에 따라 다양해 질 수 있음을 보였다.

Steiner와 Hartland⁽⁶⁾은 노즐에서의 분산작동유체의 분사속도에 따른 드랍 형성을 관찰하여 다음과 같이 분류하였다. 낮은 노즐 분사속도에서는 단일 드랍형성을 보여주며, 균일한 큰 드랍들을 형성하며, 노즐분사 속도가 더 증가되면 점차 드랍들이 제팅 브레이크업(jetting break-up) 형태의 드랍형성을 보이게 되면, 높은 노즐 분사 속도에 도달하면 모든 드랍들이 제팅 브레이크업 형태의 드랍형성을 보여 주면서 드랍들이 작고 균일해진다는 것을 밝혔다.

Ward, Loss와 Lof 등⁽¹⁾은 태양열 냉난방 시스템과 연계된 직접접촉 액-액 열교환기의 기술적 가능성과 경제적 이점을 증명하기 위해 그에 관한 실험을 최초로 실시 했다. 이 실험에서 Ward 등은 분산작동유체로서 디에틸프탈레이트(diethyl phthalate)와 디메틸프탈레이트(dimethyl phthalate), 부틸벤질프탈레이트(buthyl benzyl phthalate)등을 사용하여, 직접접촉 열교환기가 간접접촉 열교환기를 대체할 수 있는 가능성에 대하여 관찰하였다.

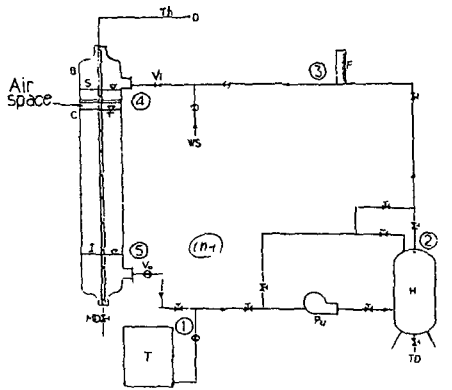
본 연구에서는 Ward의 연구에 이어 그 우수성이 증명된 두 개의 분산작동유체로서 물보다 무거

운 디에틸프탈레이트(diethyl phthalate, 85°C에서 밀도는 1.059 g/cm³이다.)와 디메틸프탈레이트(dimethyl phthalate, 85°C에서 밀도는 1.130 g/cm³이다.)를 사용하여 직접접촉 열교환기에 적용할 경우의 분산작동유체의 드랍형성 특성과 열전달을 향상에 미치는 영향을 관찰하여 실제 시스템에 이용할 수 있도록 실험데이터를 분석하였다. 사용된, 두 작동유체 중 디에틸프탈레이트(어느 점은 -40°C이고, 끓는점은 298°C이다.)는 낮은 어느 점을 갖고 있기 때문에 겨울철의 어느 문제를 피할 수 있으나, 디메틸프탈레이트(어느점은 0°C이고, 끓는점은 282°C이다.)는 어느 점이 물과 같기 때문에 어느 문제를 피할 수 없다. 그러나, 본 실험에서는 열역학적 특성을 비교하기 위해 두 유체가 모두 고려되었다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 작동유체인 프탈레이트를 1/18마력의 온수 순환 펌프에 의해 프탈레이트 탱크로부터 전기히터탱크로 채워진 후(①→②), 원하는 온도로 가열되면, 유량계를 거쳐(②→③) 칼럼상단에 설치된 분배관을 통하여 물속으로 분산된 후(③→④→⑤), 칼럼 하단부에 모여 유출구를 통해 다시 순환 된다.(⑤→①) 순환에 필요한 유량에 일단 도달하면, 프탈레이트탱크의 밸브를 닫고, 자체 유량만으로 정해진 유입유량에 따라 계속 순환시킨다.

칼럼의 재질은 내열 유리파이프로 제작되었고, 외경은 12 cm이고, 총 길이는 138.3 cm, 두께는 0.3 cm로 되어 있다. 히터는 온도조절기(온도조절 범위: -99~199°C, 오차: 약 ±5%)를 사용해 일정온도를 유지하도록 하였다. 분배관은 두께 3 mm의 동판으로 44개의 노즐구멍이 있다. 각 노즐구멍의 직경은 1 mm이고, 각 노즐간의 간격은 1.5 cm로 2.25 cm² 면적당 1개의 노즐구멍이 있게 했다. 유량계는 미소 유량 제어식 유량계로 유량계의 눈금 조정은 실험 조건일 때의 유체에 대해 유량계의 각 지시점에서 30초간 유량을 직접 측정하여 보정하여 주었다. 열전대는 구리-콘스탄탄전선이며, 열전대 온도 T_s 는 프탈레이트 유입온도를 측정하며, 분배관의 약 5 mm상단 부분에 위치한다. 그 이외의 열전대는 외경 12 mm의 청동 파이프내에 설치되며 칼럼의 중앙에 위치한다. 각 열전대의 위치는



- B : Brass Pipe to keep thermocouples centered
- C : Column
- D : Data logger
- F : Flowmeter
- I : Interface between water and Phthalate
- S : Free phthalate surface
- H : Heater tank
- T : Phthalate tank
- WS : Water supply
- ⊙ : Ball valve
- Pu : Pump(1/18 PS)
- Th : Thermocouples
- V_i : Inlet valve
- V_o : Outlet valve
- TD : Heater tank drain
- MD : Main drain
- : Thermocouple
- ☞ : Glove valve

Fig. 1 Experimental set-ups

Fig. 2에 보였다.

칼럼 상단부에 설치되어 있는 분배판은 가열되어 유입된 분산작동유체를 분배판의 작은 구멍을 통하여 물의 수평 표면에 분산시켜 준다. 분산된 유체는 물과의 단위 체적당 접촉 열전달 면적을 크게 하기 위하여 거의 구형의 작은 드랍들로 만들어진다. 이들 드랍들은 물내에서 하강하면서, 물과 열전달을 마친 후 하단부 유체 웅덩이에 유착된다. 분배판을 통하여 하강된 최초의 작동유체 드랍들이 하단부 유체 웅덩이에 도착하면 작동 유체 탱크 밸브는 닫고, 칼럼 유출밸브를 열어준다. 이때, 분산작동유체의 유입유량은 물과 분산작동유체의 경계면이 일정하게 유지되도록 지속적으로 조정해주어, 유입되는 유량과 유출되는 유량을 같게 한다. 온도와 홀드업(holdup) 측정과 사진촬영을 실시하면서, 연속유체의 온도와 하단부에 분리수거된 분산유체의 온도가 같게 되면 실험을 종결한다.

분산작동유체의 칼럼 유입온도를 약 85°C로 유지하고, 유입유량은 디에틸프탈레이트(85°C에서 점성은 0.024 g/(cm sec), 비열은 1.57 J/(g°C), 열전도도는 1295 J/(secm°C)이다.)와 디에틸프탈레이트(85°C에서 점성은 0.024 g/(cm sec), 비열은 1.55 J/(g°C), 열전도도는 1344 J/(secm°C)이다.) 공히 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm³/sec로 변화시킨다. 실험시각 유량에 따라 분배판 하단 공기층 간격을 4 cm와 공기층 간격이 미치는 영향을 살펴 보기 위해 일정 간격을 더 둔 8 cm인 두 경우에

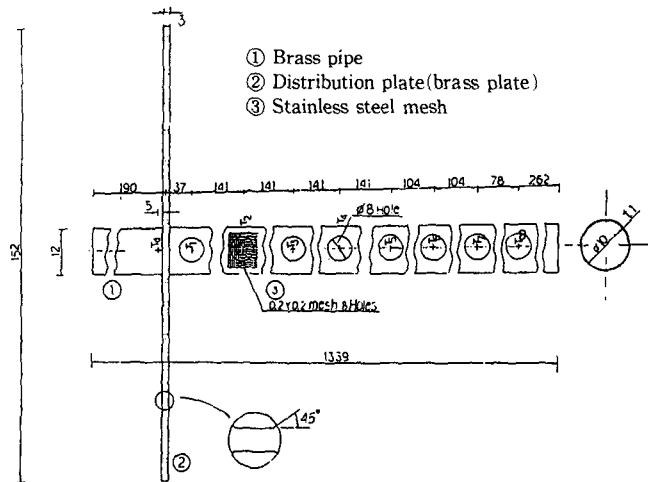


Fig. 2 Distributionplateandlocationsofthermocouples

대해 실험한다. 각 경우, 서로 비교하기 위하여 연속작동유체인 물의 용량은 일정하게 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분산작동유체 드랍형성 및 크기와 분포

분산작동유체의 드랍형성 메카니즘은 형성되는 분산작동유체의 드랍크기를 결정하게 되고, 측정된 드랍크기는 연속유체와 분산작동유체와의 전체 접촉 표면적의 값을 결정하는데 중요한 값이 된다.

공기층 간격이 드랍형성에 미치는 영향을 보기

위해 칼럼 상단부의 물-공기 경계면을 분배판 하단 약 4 cm와 8 cm 지점에 위치하게 한 후 실험하였으며, 가열탱크에서 가열된 프탈레이트는 분배판에서 떨어져 물과 충돌되어 물 표면에 스며든 후 작은 구형의 드랍들로 만들어져 칼럼내를 하강한다.

분배판에서 분산되는 프탈레이트 드랍들이 형성되는 데에는 두 개의 구별되는 특성을 갖는데, 유입 온도가 약 85°C일 때 유량이 10 cm³/sec이하에서는 대체로 구형형태(dropwise)를 보여주고, 유량이 그 이상이 되었을때부터 서서히 제트류 형태(jetwise)로 분산된 뒤, 드랍으로 형성되는 것을



(a) Far distance

(b) Close distance

Fig. 3 Photograph of dimethyl phthalate droplet formations for 4 cm air space and 15 cm³/sec flowrate



Fig. 4 Photograph of diethyl phthalate droplet formations for 4 cm air space and 25 cm³/sec flowrate

볼 수 있다. 이는 Garwin과 Smith⁽⁷⁾의 실험과 유사하게 관찰되었다. 드랍크기 측정은 각 실험 조건 하에서 작동유체의 드랍들을 촬영하였고, 칼럼의 벽면은 곡선이기 때문에 왜곡효과가 있게 되므로, 단지 드랍의 수직적인 크기만 측정하였다. Fig. 3과 4는 실험 수행동안의 전형적인 드랍형성을 보여 준다. 실험 된 두 유체 모두, 공기층 간격이 4 cm 인 경우 적은 유량에서는 크고 균일한 드랍들이 형성되며 유량이 증가할수록 드랍직경은 점점 작아진다. 특히 유량이 25 cm³/sec 이상에서는 작고 균일한 드랍이 조밀하게 칼럼 전체를 채운다. Fig. 5는 유입되는 분산작동유체 유량을 칼럼 단면적으로 나눈 피상속도(F/S)에 대해 관찰된, 분산작동유체

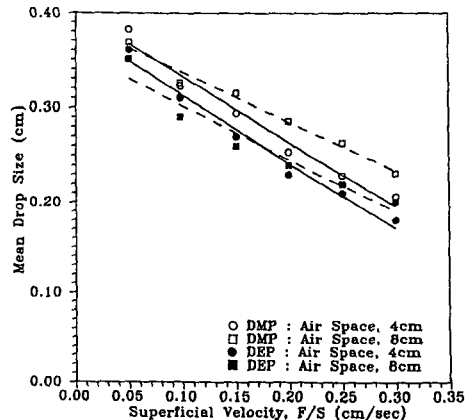


Fig. 5 Mean drop sizes of dimethyl phthalates and diethyl phthalates

드랍 평균직경 d 와 관계이다. 유량이 $10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 이하에서는 $3\sim 5 \text{ mm}$ 의 크고 작은 드랍이 형성되고, $10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 이상에서는 $1.5\sim 3 \text{ mm}$ 의 작은 드랍들이 형성된다. 하지만, 공기층 간격이 8 cm 인 경우는 유량이 많아질수록 대체로 형성되는 드랍크기가 공기층 간격이 4 cm 인 경우와 비슷하지만 드랍크기가 균일하지 않은 드랍들도 다소 형성된다.

3.2 분산작동유체의 홀드업 값 측정

홀드업은 연속작동유체와 분산작동유체와의 전체 접촉 표면적의 값과 연속유체와 분산작동유체 드랍 간의 상대속도를 결정하는데 중요한 값이 되는데, 본 실험에서는 연속작동유체의 유동속도는 없기 때문에 연속작동유체 내에서의 분산작동유체 드랍의 하강속도를 결정하게 된다. 분산작동유체의 홀드업 값의 측정은 칼럼의 유출구와 유입구쪽 밸브를 동시에 닫고, 펌프의 가동을 정지시킴으로써 칼럼내의 유체의 들어오고 나감을 막아 부가되는 유체의 양이 없도록 한다. 그 시점까지 유입된 분산작동유체가 칼럼 하단부에 모두 모이면, 물과 유체의 경계면 변화에서 밸브를 닫을시의 분배판 위의 분산작동유체 높이값을 제한 값에 칼럼의 횡단면적을 곱한 것이 홀드업의 체적이다. 그러므로, 홀드업 체적을 실질적인 칼럼 체적으로 나눈 비율 값이 홀드업 값이 된다.

Fig. 6은 피상속도와 홀드업 값(열교환기의 연속작동유체내에 포함된 분산유체의 체적비, H)과의 관계를 보여주며, 유량이 증가할수록 홀드업 값의 증가가 급격히 이루어지는데, 이는 유량의 증가와 더불어 드랍의 크기가 작아져 연속유체내의 드랍 하강속도가 줄어 정체되는 드랍의 양이 많아지기 때문인 것으로 보인다.

3.3 온도분포

본 실험의 경우, 물과 접촉되어 있는 모든 열전대는 실험의 최종 상태에 도달하면 모두 동일한 온도를 보여준다. 프탈레이트 드랍의 온도는 직접 측정할 수 없었지만, 칼럼 하단부의 드랍 온도는 하단부의 프탈레이트 웅덩이에 유착되는 지점에서 물의 온도와 같다. 또한, 칼럼내의 온도성층현상은 실험 개시 후 빠른 시간내에 사라지며 일반적인 크기의 축열탱크에서는 열교환시 단위 체적 당 요구되는 유량은 매우 크기 때문에 몇 시간동안 사용되지 않은 상태에서 생긴 온도성층현상 또한 펌프가

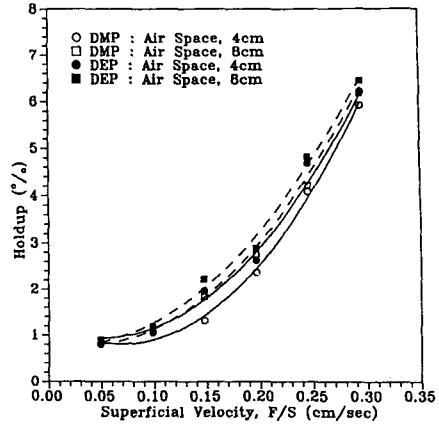


Fig. 6 Holdup values with various flowrates

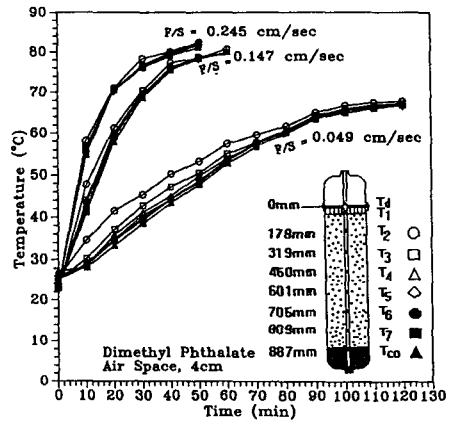


Fig. 7 Temperature measurements with dimethyl phthalate for 4 cm air space

가동되자마자 빠르게 사라진다. 그렇기 때문에 직접 접촉 액-액 열교환기와 일반적인 축열탱크와 비교해 불태 온도 성층면에서 보면 동일한 효과를 보여주며, 이러한 온도성층현상이 없다는 것은 이점으로 작용한다.

각 유량에 따라 열교환 종결 소요시간 및 열교환의 종결시 연속작동유체의 최종 온도는 축열조 기능에 있어서의 효율을 나타내는 중요한 관점이 된다. Fig. 7은 유량이 $5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 이고, 공기층이 4 cm 인 경우의 온도분포인데 시간이 경과하면서 각 열전대의 온도변화는 실험개시 후 약 20분간에는 평균 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 정도의 온도증가를 보였고 20분에서 80분까지는 평균 $0.4^\circ\text{C}/\text{min}$ 정도의 온도를 보였지만 80분 이후부터는 $0.15^\circ\text{C}/\text{min}$ 정도로 온도 변화는 완만한 경향을 나타내는데, 이는 시간이 경

과 하면서 연속작동유체인 물의 온도가 증가하면서 분산작동유체와의 온도차를 줄이기 때문에 전달되는 열량이 적어지기 때문이다. 물의 최상부의 온도는 다른부분의 온도에 비해 실험개시 후 약 80분까지는 평균 4.4°C 정도가 높는데, 80분 이후부터는 평균 1°C 정도로 각 열전대 온도가 거의 동일해져 온도층이 존재하지 않게 되었다.

Fig. 8은 유량이 25 cm³/sec, 공기층 4 cm인 경우로 실험초기 10분동안 각 열전대의 온도증가가 평균 3.2°C/min 정도로 유량이 5 cm³/sec 경우보다도 급격히 이루어지며, 10분에서 30분까지는 1.03°C/min 정도의 온도증가를 보였고 30분 이후는 0.27°C/min 정도로 거의 온도증가가 없었다. 또한 실험 전 기간에 걸쳐 열전대간의 온도차가 평균 1°C 정도로 거의 없는 것으로 나타난다. 이것은 유량이 증가한 경우, 전달열량의 증가로 연속작동유체내의 온도성층효과를 빠르게 없애기 때문이다.

Figs. 9, 10은 공기층 간격이 8 cm인 경우로 유량에 따른 온도분포는 공기층 간격이 4 cm인 경우와 거의 동일하지만, 유량이 5 cm³/sec일 경우, 실험 조작기간중 전반 부분에서 공기층 간격이 4 cm인 경우보다 연속유체(물)에 잠겨져 있는 열전대중 최상단에 위치한 T₂의 온도가 다른 열전대의 온도에 비해 평균 8°C 정도가 높는데, 이는 공기층 간격이 8 cm인 경우, 열전대 T₂의 온도가 공기층 간격이 4 cm인 경우보다 물의 최상단 부분의 온도를 나타내주기 때문이다. 공기층 간격이 4 cm인 경우, 유량이 5 cm³/sec인 경우에는 열교환 중결이 연속작동유체(물)의 온도가 약 67°C 정도에서 이루어

지는데 약 120분간의 시간이 소요되었지만, 유량이 25 cm³/sec인 경우는 열교환 중결이 약 81°C 정도에서 이루어 지면서 소요시간은 약 50분 정도 밖에

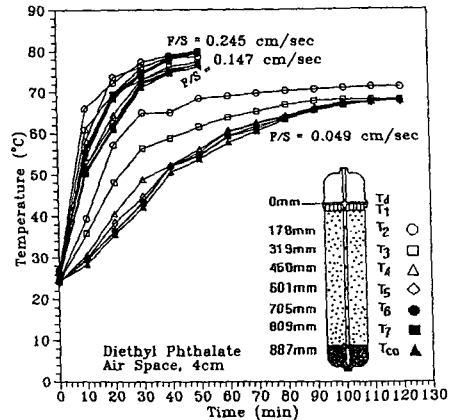


Fig. 9 Temperature measurements with diethyl phthalates for 4 cm air space

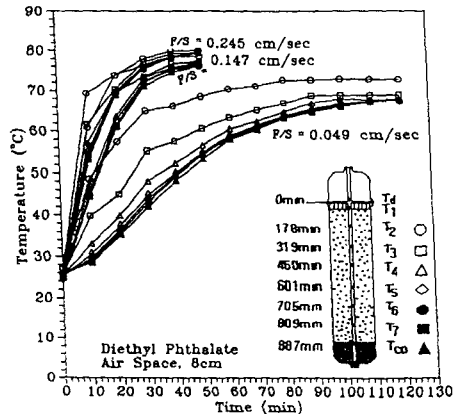


Fig. 10 Temperature measurements with diethyl phthalates for 8 cm air space

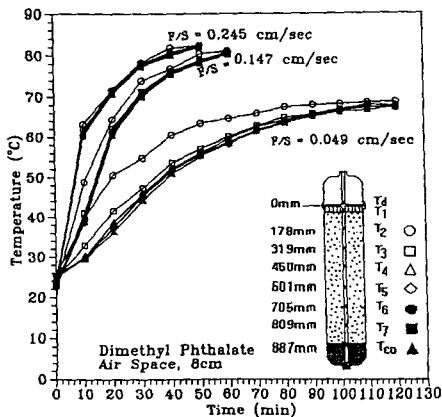


Fig. 8 Temperature measurements with dimethyl phthalates for 8 cm air space

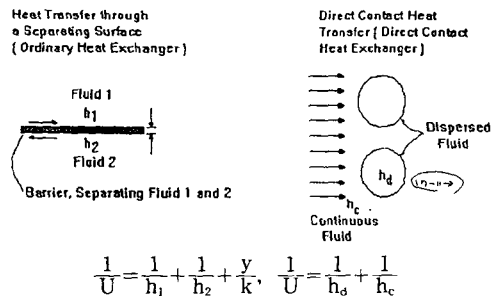


Fig. 11 Heat transfer modes for indirect and direct contact heat exchangers

소요되지 않았는데, 이는 유량이 증가할 수록 열교환 종결 소요시간은 단축되고, 연속작동유체의 최종 온도는 높아짐을 알 수 있다. 이 결과는 공기층 간격이 8 cm인 경우에서도 거의 유사함을 알 수 있다.

3.4 열전달 결과

간접접촉 열교환기와 직접접촉 열교환기의 특성은 Fig. 11과 같이 설명할 수 있고, Table 1 및 Table 2는 디메틸프탈레이트와 디에틸프탈레이트의 열전달에 대한 계산 값을 보여준다. 또한, 열전달의 주요 저항이 분산작동유체 드랍내부에 있는 경우 ($h_c \gg h_d$), Handlos와 Baron⁽⁸⁾이 제시한 실험 식인 식(1)에 의해 드랍내부의 열전달계수, h_d 를 구할 수 있고,

$$N_N = h_d d / k = \frac{0.00375}{1 + (\mu_d / \mu_c)} N_{Pe} \quad (1)$$

있고, Table 1 및 Table 2의 계산결과를 보면 전체 열전달계수, U 는 드랍내부 열전달계수, h_d 값과 거의 유사한 값을 보이는데 이는 열전달의 저항이 분산작동유체 드랍 내부에 있음을 보여주는 것이 된다. 그러므로, 전체 열전달계수, U 는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$U \cong h_d \text{ for } h_c \gg h_d \quad (2)$$

Table 1과 2에서 6항과 7항은 동일한 값을 보여주고 있다.

$$a N_s = 2/L \quad (3)$$

그리고, Stanton수(N_s)는 식 (2)에 의해 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$N_s = h_d / (C_d \rho_d F/S) \cong U / (C_d \rho_d F/S) \quad (4)$$

여기서, a 는 단위 체적당 접촉 표면적이고, L 은 칼럼내 연속유체의 높이, U 는 전체 열전달계수

Table 1 Heat transfer results for dimethyl phthalate

Air Space cm	F cm ³ /sec (1)	ΔT °C (2)	U J/cm ² sec°C (3)	h_d J/cm ² sec°C (4)	U_v J/cm ³ sec°C (5)	N_N (6)	N_{Pe} (7)	aN_s cm ⁻¹ (8)	2/L cm ⁻¹ (9)
4	25	6.3	0.01083	0.00447	0.01125	1.86	1837.9	0.0263	0.02
	15	11.3	0.02321	0.00740	0.00675	5.16	3937.5	0.0263	0.027
	5	18.6	0.01599	0.00417	0.00225	4.36	2712.6	0.0263	0.027
8	25	5.4	0.01141	0.00414	0.01125	2.23	1936.1	0.0263	0.027
	15	11.3	0.02009	0.00610	0.00675	4.69	3407.3	0.0263	0.027
	5	17.5	0.01442	0.00377	0.00225	3.91	2446.0	0.0263	0.027

Table 2 Heat transfer results for diethyl phthalate

Air Space cm	F cm ³ /sec (1)	ΔT °C (2)	U J/cm ² sec°C (3)	h_d J/cm ² sec°C (4)	U_v J/cm ³ sec°C (5)	N_N (6)	N_{Pe} (7)	aN_s cm ⁻¹ (8)	2/L cm ⁻¹ (9)
4	25	5.3	0.00840	0.00365	0.01703	1.29	1424.7	0.0263	0.02
	15	8.2	0.01631	0.00530	0.00644	3.35	2768.1	0.0263	0.027
	5	17.5	0.01553	0.00404	0.00215	3.99	2635.5	0.0263	0.027
8	25	5.5	0.00853	0.00343	0.01703	1.41	1448.1	0.0263	0.027
	15	8.3	0.01461	0.00470	0.00644	3.02	2478.8	0.0263	0.027
	5	17.5	0.01395	0.00376	0.00215	3.45	2367.0	0.0263	0.027

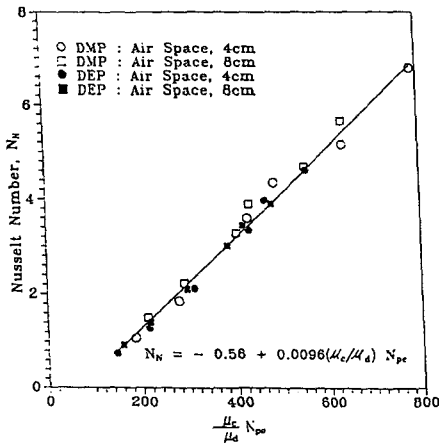


Fig. 12 Heat transfer results for the direct contact liquid-liquid heat exchanger

(overall heat transfer coefficient), C_a 는 분산작동유체의 비열, ρ_d 는 분산작동유체의 밀도이다.

위의 식(3)에 식(4)을 대입하면, 체적 열전달계수, U_v (volumetric heat transfer coefficient)는

$$U_v = U a = (2/L) c_a \rho_d (F/S) \quad (5)$$

와 같이 표시된다. 여기서, 체적 열전달계수, U_v 는 전체 열전달계수, U 와 분산작동유체와 연속작동유체 사이의 단위 체적당 내부 접촉면적, a 와의 곱이다.

또한, 열교환기가 열적평형에 도달했을때 직접접촉식 액-액 열교환기를 나가는 분산작동유체의 온도가 연속작동유체의 온도와 거의 같기 때문에 대수 평균 온도차를 초기 온도차(ΔT_i)의 반이라고 가정할 수 있고, 다음 관계식이 성립한다.

$$Q = UA\Delta T_1/2 = UaV\Delta T_i/2 \\ = UaSL\Delta T_1/2 = c_a \rho_d (F/S) S\Delta T_1 \quad (6)$$

여기서, S 는 칼럼 단면적이고, 식(6)을 체적 열전달계수에 대하여 다시 정리하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_v = (2/L) c_a \rho_d (F/S) \quad (7)$$

그러므로, 식(5)와 식(7)은 같게 된다. 이것은 대수 평균 온도차가 초기 온도차의 반($\Delta T_i/2$)이라고 가정한 것이 타당하다는 것을 의미한다.

열전달 실험결과에 대한 Nusselt수, N_N 은 일반적으로 N_{Pe} 의 함수로 나타낼 수 있으나, Ward와 Loss⁽¹⁾ 및 Handlos와 Baron 등⁽⁸⁾은 실험을 통해

μ_c 와 μ_d 의 영향을 무시할 수 없음을 보였고, 본 실험에서도 열전달결과를 $(\mu_c/\mu_d) N_{Pe}$ 의 함수로써 나타내었는데, 공기층 간격이 4 cm나 8 cm에서나 거의 유사한 값을 보여주고 있으며, 그 실험식은 Fig. 12와 같이 하나의 직선의 함수로 나타낼 수 있다.

$$N_N = -0.56 + 0.0096(\mu_c/\mu_d) N_{Pe} \\ 140 \leq (\mu_c/\mu_d) N_{Pe} \leq 780 \quad (8)$$

4. 결 론

(1) 프탈레이트와 같은 물보다 무거운 분산작동유체를 직접접촉 열교환기의 분산작동유체로 사용한 경우, 물보다 가벼운 유체를 사용한 경우와 비교하여 열 불매, 물과의 열교환기 상단 내부 경계면이 다른 조절장치 및 구조물없이 조작 중 거의 안정적으로 형성되는 것을 알 수 있다.

(2) 본 직접접촉식 액-액 열교환기에서, 작동 중 열적평형에 도달했을때, 분산작동유체와 연속유체 사이의 평균 온도차는 유입되는 분산작동유체와 연속유체사이의 온도차의 반이며, 열적평형에 도달하기 위한 소요시간은 유량이 증가할수록 감소한다.

(3) 실험 된 두 프탈레이트는 연속작동유체인 물 내에서 작은 구형의 드랍들로 만들어지므로써 연속작동유체와 분산작동유체 사이의 큰 접촉 면적을 제공한다. 이는 직접접촉 액-액 열교환기의 열효율을 크게 증대시키는 주요 원인이 되고 있다.

(4) 제시된 직접접촉 열교환기의 열전달률은 기존의 관 및 판형 열교환기에 비해 매우 뛰어나며, 태양열 집열기의 부식문제와 동파문제를 손쉽게 해결할 수 있음을 보이고 있다.

(5) 실험된 두 프탈레이트의 열적특성은 거의 유사하며, 디메틸프탈레이트는 낮은 어느 점을 갖고 있으므로 디메틸프탈레이트 보다 분산작동유체로서 더 유용하다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Ward, J. C., Loss, W. M. and George, O. G. 1977, "Direct Contact Liquid-Liquid Heat Exchanger for Solar Heated and Cooled Building," *Solar Energy Application Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.*

- (2) Jacobs, H. R. and Golafshani, M. 1985, "A Heuristic Evaluation of the Governing Mode of Heat Transfer in a Liquid-Liquid Spray Column," *ASME Paper 85-HT-50, ASME/AIChE National Heat Transfer Conference*, Denver.
- (3) Golafshani, M. and Jacobs, H. R. 1985, "Stability of a Direct Contact Spray Column Heat Exchanger," *ASME Paper 85-HT-51 ASME/AIChE National Heat Transfer Conference*, Denver.
- (4) Stamps, D. W., Barr, D. and Valenzuela, J. A. 1986, "A Model of Heat Transfer in a Liquid-Liquid Spray Column," *Journal of Heat Transfer, Trans. ASME*, Vol. 108, pp. 488~489.
- (5) Moresco, L. L. and Marschall, E., 1980, "Liquid-Liquid Direct Contact Heat Transfer in a Spray Column," *Transaction of the ASME* Vol. 102, pp. 684~686.
- (6) Steiner, L. and Hartland, S., 1983, *Hydrodynamics of Liquid-Liquid Spray Columns*, in *Handbook of Fluid in Motion*. N. P. Cheremisinoff and R. Gupta (Eds.), Ann Arbor Science Publishers, Michigan. pp. 1049~1092.
- (7) Garwin, L. and Smith, B. D., 1953, "Liquid-Liquid Spray Tower Operation in Heat Transfer," *Chem. Eng. Progr.*, No. 49, pp. 591~602.
- (8) Handlos, A. E. and Baron, T., 1957, "Mass and Heat Transfer from Drops in Liquid-Liquid Extraction," *A.I. Ch. E. Journal*, 3, (1), pp. 127~136.