

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 15, No. 3, 1995

## 태양열 이용 축열식 직접접촉 열교환기의 열전달에 관한 연구

강용혁\* · 전명석\* · 윤환기\* · 천원기\*\*

\* 한국에너지기술연구소

\*\* 제주대학교 에너지공학과

## A Study on Heat Transfer of a Storage Type Direct Contact Heat Exchanger for Solar Energy Utilization

Kang, Yong-Heack\* · Jeon, Myung-Seok\* · Yoon, Hwan-Ki\*  
Chun, Won-Gee\*\*

\* *Korea Institute of Energy Research*

\*\* *Dept. of Nuclear and Energy Eng. Cheju National University*

### 요 약

태양열 이용 축열식 직접접촉 열교환기의 실제 적용을 위한 작동조건도출 및 열교환기내 열전달 특성 규명을 위하여 작동유체를 물보다 가벼운 경우(Texaterm)와 무거운 경우 두가지를 실제 태양열 집열회로상에서 실험하였다.

작동유체가 물보다 가벼운 경우와 무거운 경우에 대해 실제 태양열 집열회로상에서 작동하여 최적 열전달을 위한 작동유체드립형성과 유동을 도출하였고, 작동유체가 무거운 경우가 가벼운 경우보다 열손실계수가 높음을 알 수 있었다.

작동유체가 축열유체보다 가벼운 경우와 무거운 경우에 대해 실제 태양열 집열회로에서 실험한 결과, 작동유체가 가벼운 경우 체적 열전달계수는  $1.848 \times 10^{-3} \text{w/cm}^3\text{C}$ , 효율은 73%이고 무거운 경우는  $0.128 \times 10^{-2} \text{w/cm}^3\text{C}$ , 효율은 82%로 작동유체가 무거운 경우가 보다 좋은 것으로 나타났다.

## Abstract

The Direct Contact heat Exchanger(DCHX) has been widely studied in the chemical industry for many years due to its inherent simplicity as a counter-current device for heat and mass transfer.

In many solar systems, the DCHX unit can be combined with the thermal storage unit, or alternatively, it can be used separately from the storage unit, much like an external(to storage) closed heat exchanger system.

In the present work, the spray column type of direct contact heat exchangers are studied extensively to harness the solar energy for hot water and spaced heating.

Some of the major considerations that are involved in the design of heat exchangers in this study are that: working fluid is a hydrocarbon (such as Texaterm) or water which is either lighter or heavier than storage medium.

The experimental data have revealed some interesting characteristics concerning the application of DCHXs for solar energy utilization.

These experiments are carried out in the line of solar heating system, major results are as follows :

- 1) the flow and aspect of working fluid drop for maximum heat transfer
- 2) efficiency and volumetric heat transfer coefficient of D.C.H.X with a heavier working fluid are higher than those of D.C.H.X with a lighter working fluid.

## Nomenclatures

- A : 열교환기 벽체의 전열면적[m<sup>2</sup>]  
 C : 열교환기내 연속작동유체의 열용량 [Kcal/kg °C]  
 ρ : 연속작동유체의 밀도[kg/m<sup>3</sup>]  
 V : 열교환기내 유체의 부피[m<sup>3</sup>]  
 T : 열교환기내 유체의 온도[°C]  
 Ta : 열교환기 주위의 온도[°C]  
 t : 시간[min]  
 U<sub>H</sub> : 열교환기 벽체를 통한 열전달계수 [Kcal/m<sup>2</sup> °C]

## I. 서 론

최근에 전세계적으로 에너지와 환경에 대한 관심이 고조되고 있으며, 각국의 국가이익과 국민복지를 위한 연구와 투자가 증가하고 있다.

새로운 대체에너지원으로서의 태양열 이용은 공해방지 등의 환경문제와 연계되어 최근에 보다 부각되고 있으며 기존의 이용보다 다양하고 유효하게 이용하는 방안이 요구되고 있다.

많은 산업공정의 열이용기기는 물론 태양열 이용시스템에서 열교환기는 필수적 기계이며, 이 열교환기의 높은 경제성과 고효율화는 절실히 요구되는 분야이다.

태양열이나 지열, 폐열등과 같은 저온의 열을 유효하게 이용하는 열교환기는 최근 연구가 활발히 진행중인 직접접촉식 열교환기이다.

저열원용 직접접촉식 열교환기는 밀도가 다른 불용성(immiscible) 두 유체를 대향류로 유동시켜, 불용성 두 유체가 액체-액체 상태로 직접 접촉하여 열교환하는 원리로 작동된다.

1960년대 탈염(desalination) 시스템에서 직접접촉 열교환기 사용은 실제적용에 따른 작동에 필요한 연구를 불러 일으켰으며, 실제 적용과 설계를 위해 Jacobs와 Boehm<sup>1)</sup>은 저온의 지열 이용에 분사칼럼의 사용을 제안하였고, 최근까지 태양열, 폐열, 산업공정열등 저온 이용을 위한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 태양열 이용분야 중의 하나는 염분으로 층이 형성된 태양 연못(solar pond)으로 부터 열을 뽑아 전력생산을 위해 유기 Rankine cycle에 분사칼럼식 직접접촉 열교환기가 효과적으로 쓰여질 수 있다는 것이 증명되었다.<sup>2)</sup>

현재까지 직접접촉열교환기에 대한 수치해석적 연구<sup>3)</sup>보다는 대부분은 실험적 연구이며, 그 연구는 액체드립 직경 7.5mm 이내에 대해 수행되었고, 그 규모도 칼럼길이 2m이내의 실험실 규모의 크기에 국한되어 있으며, 열전달에 대한 실험은 직경이 1.0~4.0mm인 범위내에 액체드립들을 사용하여 수행되어져 왔다.<sup>4)5)6)</sup>

Letan의 뒤를 이어, Plass, Jacobs, Boehm 등<sup>7)</sup>은 두 유체의 온도차에 대한 열전달율인 체적열 전달계수,  $U_v$ 를 정확하게 구하기 위해 일련의 중요한 연구들을 수행하였다.

체적열전달계수(Volumetric Heat Transfer Coefficient)는

$$U_v = \frac{Q \cdot VOL}{LMTD}$$

로 정의되며,  $Q$ 는 단위시간당 전달된 총열량,  $VOL$ 은 칼럼체적 그리고  $LMTD$ 는 칼럼 입출구의 log mean temperature difference를 나타낸다.

Boehm, Jacobs<sup>8)</sup>등은 칼럼 내부의 실제 열전달 메커니즘을 보다 정확히 이해하기 위한 연구가 필요하며, 분사칼럼 열교환기는 세척점(flooding) 근처에서 작동되게 설계되었기 때문에 작동조건의 변화가 분사칼럼 성능에 어떻게 영향을 미치는가를 결정하는 것이 중요하다고 제안하였다.

직경이 3.0~3.5mm인 드립들에 대하여, Jacobs와 Golafshani<sup>9)</sup>는 실제의 국부적인 드립의 분포밀도가 사용되는 경우 열전달률은 실험식을 사용하여 잘 나타낼 수 있다는 것을 증명했다.

태양열과 같은 저온이용을 위한 직접 접촉 열교환기술중 가장 보편적이고 중요한 분야는 분사칼럼(Spray column)이며 설계 및 제작의 간편성으로 경제적 잇점이 뛰어나다. 태양열 시스템에서의 분사칼럼식 직접접촉 열교환기의 사용은 내부유동과 열전달 특성의 명확성 규명을 통해 실용화를 위한 최적설계와 작동조건이 결정되어야 한다.

그러므로 본 연구에서는 태양열 시스템 구성에 따른 작동방식과 작동유체를 결정하기 위해 물과 물보다 가벼운 유체(Texatherm)를 작동유체로 태양열 집열기를 순환할때의 각 경우의 유동특성과 열전달특성을 도출하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 1. 실험장치

본 연구에서는 실제 태양열시스템의 적용성을 보기 위해 실외에 집열기를 45°로 설치하여 작동유체에 따라 2가지 집열회로를 Fig.1과 같이 구성하였다.

직접접촉열교환기의 칼럼은 직경 40cm, 높이 140cm, 두께 5mm인 원통형 투명 아크릴을 이용하여 실제 사용중인 축열조에 가깝게 제작하였고, 칼럼내의 높이에 대한 온도를 측정하기 위해 열전대(K-type thermocouple)를 5-10cm 간격으로 설치하였다. 또한 유량에 따른 온도의 변화를 측정하기 위해 Flow cell사의 20-200l/h의 측정범위를 가지고 있는 유량제어식 유량계를 각 장치별로 설치해 작동유체의 유량을 변화시켜 보았다.

실험에 사용한 집열기는 실험실 외부의 태양이 잘드는 장소에 남향으로 설치를 하였고, 크기는 1.2×2.4m로 각각 1장씩을 장치에 연결하여 사용하였다.

작동유체로는 산업용 유류인 Texatherm을 사용하였는데, 파라핀 계통으로 물에 용해가 안되며 화학적으로 안정되고, 비열이 높으며 어는 점이 낮다.

작동유체 분사기는 직경 1.5cm, 길이 18cm의 파이프에 2cm 간격으로 직경 약 0.6-1.6mm의 구멍을 뚫어 분사기 뭉치에 4 방향으로 배치되도록 제작하여 드랍들이 끌고류 퍼져서 드랍들이 서로 뭉치는 것을 방지 하였다.

본 실험에서는 유량계로 로타메타를 사용하였다. 그러나 일반적으로 유량계는 물에 대해 사용하는 유량계로 이 실험에서 사용되는 유량계도 물에 대해 눈금이 새겨져 있으므로 물 이외의 유체에 사용할 경우 보정을 해야 된다. 텍사썸의 경우, 상온에서 물에 비해 상당히 점도가 크며 온도가 상승 됨에 따라 점도가 급격히 떨어져 물과 비슷해진다. 유량계

보정을 위해 텍사썸을 20, 38, 60°C에서 유량 보정 장치에서 실험하여 유량계를 보정하였다.

작동유체가 물보다 가벼운 경우의 실험장치 개략도는 Fig.1(a)와 같다. 펌프를 이용하여 열교환기의 상부에 모여진 작동유체를 집열기로 보내면 태양열에 의해 데워진 작동유체가 유량계를 거쳐 열교환기의 하단에 설치된 분사기에 의해 작은 드랍 형태로 물속에 분사가 된다.

이 드랍들이 상승하면 물로의 열교환이 이루어지며 열교환기의 상단에 모여 드랍들이 서로 결합되어 물과의 경계면을 이룬다. 작동유체의 출구는 경계면보다 높은 위치에 있어 물에 열을 빼앗긴 작동유체는 완전히 결합된 상태로 펌프를 통해 집열기로 공급되어 다시 가열이 된다.

Fig.1(b)는 작동유체가 무거운 경우의 실험

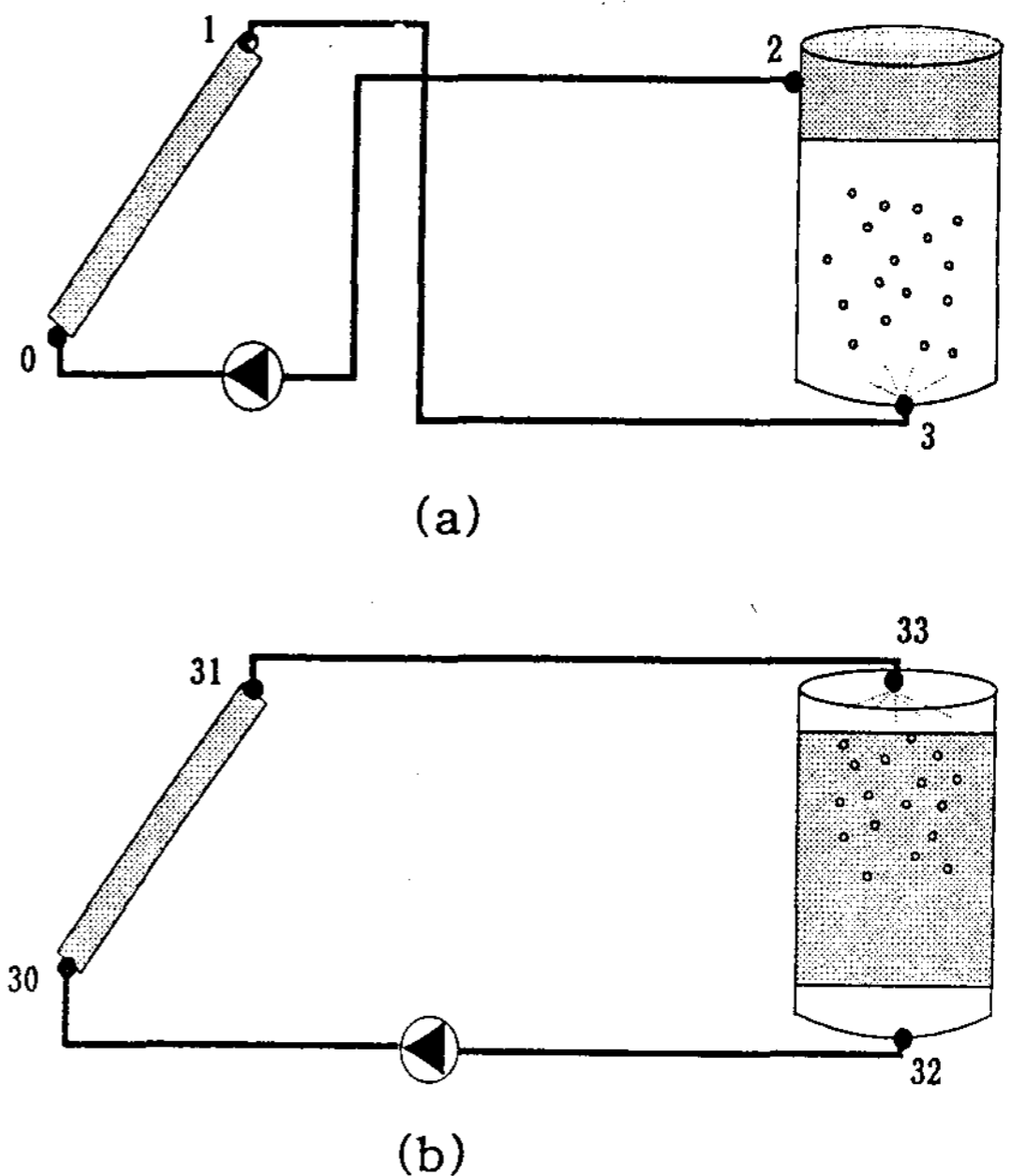


Fig. 1 실험장치의 개략도

장치를 보인 것으로 작동유체의 구입이 어려운 관계로 (a)의 경우와 반대로 물을 작동유체로 사용하고, Texatherm에 축열을 하였다. 펌프를 이용해 열교환기 하단에 모여있는 작동유체(물)를 집열기로 보내고 여기서 데워진 물을 유량계를 거쳐 열교환기의 위쪽에 있는 분사기에서 분사를 한다.

물이 Texatherm보다 무거우므로 분사된 작은 물방울들은 하강하면서 Texatherm을 통과하는 동안 열교환이 이루어지며, 열을 뺀 물방울은 경계면에서 서로 결합되어 열교환기의 하단으로 모이게 된다. 이와같은 동작을 되풀이하여 축열을 하게 된다.

## 2. 실험 방법

열전대를 집열기의 입, 출구, 열교환기의 작동유체, 입, 출구 및 칼럼의 내부(높이 5-10cm 간격으로 중심부에 위치)에 설치하였고, 열교환기가 설치된 실내의 온도, 그리고 일사량과 외기온을 측정하였다.

또한 유량 변화에 따른 획득 열량의 변화를 보기 위해 유량계에 부착된 밸브를 조정하여 90-150 l/h로 유량 조절을 하였다.

측정장치로는 데이터 로거인 Fluke사의 Helios I를 사용하였으며, 20초 마다 측정하여 5분 평균치를 컴퓨터에 기록하여 분석하였다.

오전 9시 부터 펌프를 작동시켜 집열기를 통해 데워진 작동 유체를 열교환기로 보내어 교환기 내에 열을 저장하도록 하였다.

오후 4시에는 펌프를 중지시키고, 밤사이에 실험실 내부로 열방사에 의해 열교환기 내의 온도가 감소함을 측정하여 열손실계수를 계산하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

### 1. 작동유체의 물리·화학적 특성

본 실험에 사용한 작동유체는 텍사썸 46으로서 광범위한 산업공정에 사용되는 열매체유이다. 이는 고온하에서도 훌륭한 열 및 산화 안정성과 우수한 열전달 특성을 갖고 있는 잘 정제된 파라핀계 오일이다. 또한 독성이 없으며 동이나 강철을 부식 시키지 않는다.

주요 용도는 열매체로 다음과 같은 장치에 사용되도록 추천되고 있다. 폐쇄회로(closed system)에서 오랜 수명을 유지시키기 위해 벌키오일의 온도는 315℃까지, 히터 표면에서 오일의 최대 유막 온도는 약 335℃까지로 제한 시켜야 하며, 개방회로(open system)에서 열매체가 공기중의 산소와 직접접촉하는 시스템에서 약 130℃로 제한 운전해야 한다.

텍사썸 46은 옅은 황색을 가진 액체로 물보다 비등점이 높고 빙점은 낮아 저온 유동 특성이 좋아 집열 시스템의 열매체로 적합하다. 비중 0.87(15℃)로 물과의 밀도차가 그리 크지 않으므로 드립의 상승속도는 비교적 완만하여 물과의 활발한 열교환이 가능하며 작동의 안정성은 물론 태양열 적용 범위에서 물리·화학적으로 적합하다. 특히 수용성이 거의 없고 가격도 저렴하므로 실용성이 있다. Table 1, Table 2는 텍사썸 46의 성질을 보여주고 있다.

Table 1. 물리적 특성치(텍사썸46)

구 분	텍사썸 46
비 중	15/15℃ 0.872
인 화 점	℃(F) 224(436)
유 동 점	℃(F) -12(10)
점 도	cSt@40℃ 43.3
	cSt@40℃ 6.8
점 도 지 수	cSt @100℃ 114
최 초 비 등 점	℃(F) 357(675)

Table 2. 물리 및 열에 관한 성상(텍사섬46)

온도 °C	비열 15/15°C	열전도도	밀도	증기압
	KCal / kg °C	KCal / m hr °C	kg / m <sup>3</sup>	mmHg
0	0.42	0.116	0.88	—
100	0.51	0.109	0.82	—
150	0.56	0.106	0.78	—
200	0.60	0.103	0.75	2.0
250	0.65	0.100	0.72	25
300	0.69	0.097	0.69	100
315	0.70	0.097	0.68	130

밀도 :  $\rho(T) = 0.88 - 0.00064 * T(\text{kg} / \text{m}^3)$

비열 :  $C_p(T) = 0.42 + 0.0009057 * T(\text{KCal} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C})$

열전도도 :  $k(T) = 0.1156 - 0.0000628 * T(\text{KCal} / \text{m hr})$

점도 :  $\mu(T) = 58.36 - 0.528 * T(\text{cP})$

Fig.2는 온도에 따른 물성치의 변화를 그린 것으로 온도에 따라 상당한 변화가 나타남을 알 수 있다.

위의 물성치를 온도에 대해 1차 선형 fitting하면 다음과 같이 표현된다.

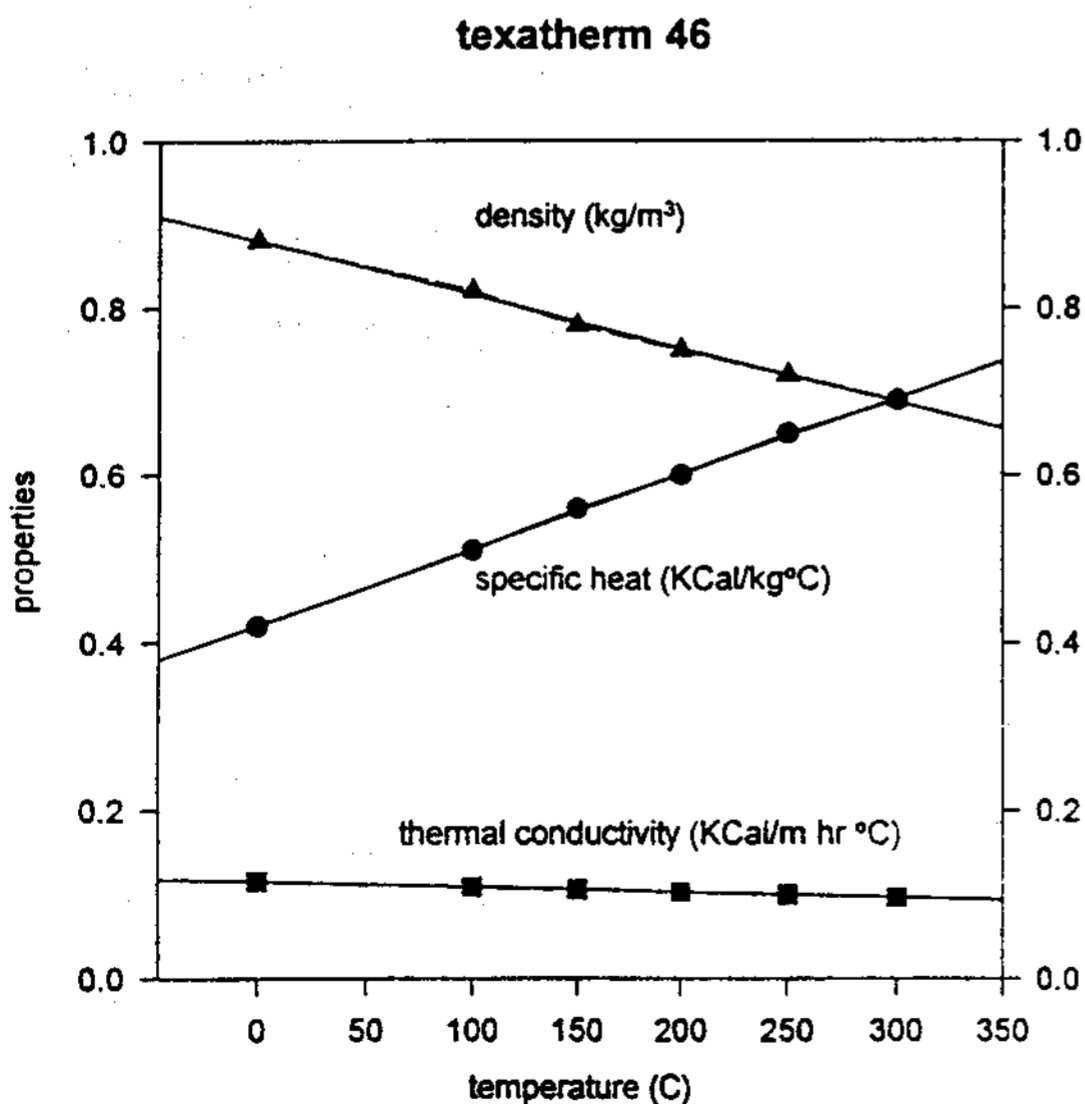


Fig. 2 텍사섬(texatherm) 46의 온도에 따른 비열, 밀도와 열전도도

## 2. 칼럼 벽면을 통한 열손실

Fig.3은 칼럼에 채워진 물과 전열유체의 벽면을 통한 열손실을 계산하기 위해 집열이 끝난후 펌프 가동을 중지시키고 유동이 없을 때 시간에 따른 수온의 변화를 나타낸 것이다.

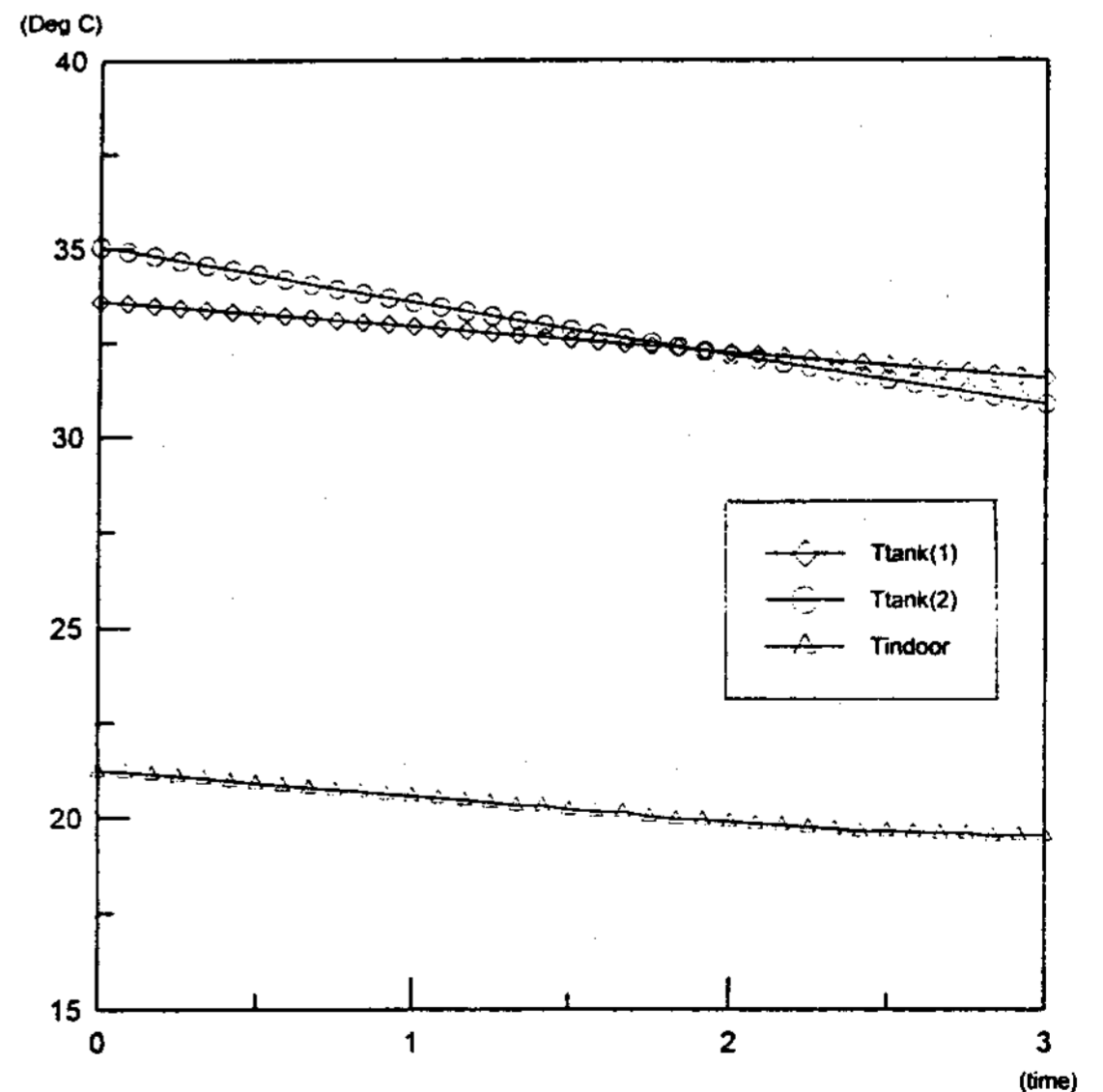


Fig. 3 칼럼내의 시간에 따른 온도 변화

그림에서와 같이 각 열전대의 시간에 따른 온도변화는 그 위치에 상관없이 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이 데이터를 사용하여 벽면을 통한 열손실 계수를 쉽게 계산할 수 있다. 즉 벽체를 통한 열손실 계수는 칼럼에 관하여 간단한 에너지 수지식으로부터 얻을 수 있다. 단위 시간 동안의 에너지 감소는 단위 시간 동안 열교환기로부터 외부로의 열전달을 의미한다.

이 데이터를 사용하여 벽면을 통한 열손실 계수는 식 (2)를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

$$-C\rho V \frac{dT}{dt} = U_H A (T - T_a) \quad (1)$$

$T_0$ 를 시간=0에서의 열교환기내의 온도라 하고 식(1)을 적분하면

$$\ln \frac{T - T_a}{(T - T_a)_0} = - \frac{U_H A t}{C\rho V} \quad (2)$$

Fig.4는 UHA의 계산을 위해 시간에 따른 온도변화를 그린 것이다. 식 (2)를 이용하기 위해 semi-log좌표에 그려서 그래프의 기울기

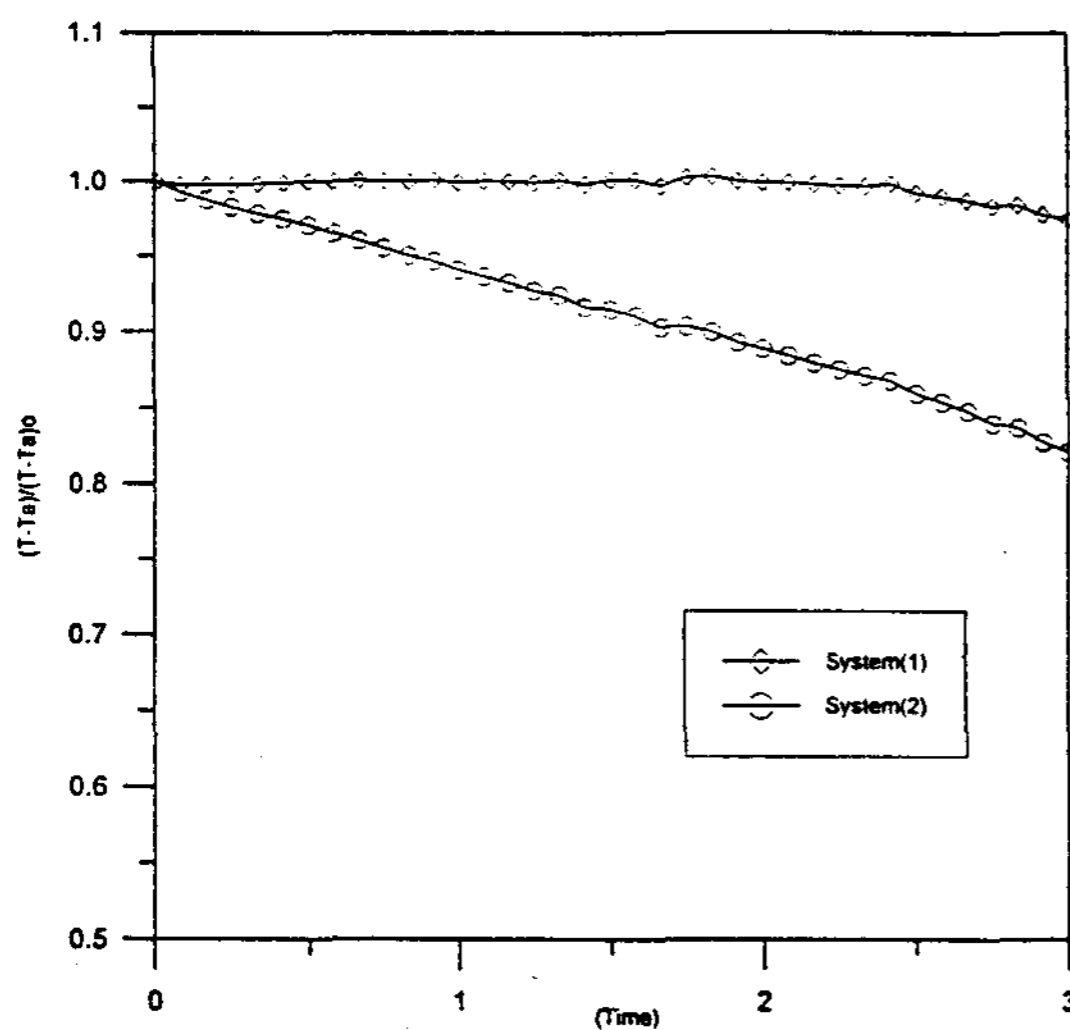


Fig. 4 시간에 따른 온도 변화율

로부터 칼럼의 UHA의 값을 구할 수 있다. 작동유체가 물보다 가벼운 경우와 무거운 경우의 UHA값은 다음과 같다.

$$UHA = 0.1321 \text{ KCal/min } ^\circ\text{C (Texatherm46)}$$

$$UHA = 0.126 \text{ KCal/min } ^\circ\text{C (Water)}$$

이같은 UHA값을 이용하면 열교환기에서 외기로의 열손실량을 구할 수 있다.

$$Q_{\text{loss}} = UHA(T - T_a) \quad (3)$$

$Q_{\text{loss}}$ : 열교환기에서 외기로 손실된 열량 [KCal/min]

### 3. 칼럼내 드랍의 형성 및 유동

작동유체가 물보다 가벼운 경우 사용된 분배관은 직경 1.6mm의 구멍이 중심으로부터 뻗어있는 4개의 분배관에 균일한 간격으로 8개씩 뚫려있어 합계 32개의 구멍이 있다. 작동유체의 유량이 2.5 l/min일때 드랍은 작동유체의 온도가 약 20°C일때 약간 타원형을 보여주고 있으며, 직경이 5-6mm 정도의 크기를 보여주고 있다. 그러나 온도가 약 35°C로 상승 됨에 따라 드랍의 직경이 약 4mm 정도로 작아지는 경향을 보여주고 있다. 이는 작동유체의 물성치(특히 점도)가 온도의 변화와 더불어 변화하기 때문이다.

유량이 증가 됨에 따라 드랍의 크기가 감소되는데 이는 드랍이 분배판에서 분리되는 시간이 유량의 증가와 더불어 짧아져서 드랍의 생성 시간도 더 짧아지기 때문이다.

분사기 입구에서 속도 0.4-0.7m/s로 분사되는 유체는 jetwise 분사 형태를 보이며 이때 실린더 형태의 길이는 약 10mm 정도 유지되고 드랍의 형태로 부서진다.

드랍의 유동은 작동영역(1.5-3.0 l/min)에서 연속적으로 드랍이 형성되어 순환이 일어

나지 않고 안정된 상승현상이 나타났다.

예비 실험에서 직경 1mm의 구멍 21개인 분배기를 사용하였으나 작동 영역 유속에서 순환 및 분무 현상이 나타나 위에서 언급한 바와 같은 1.6mm구멍 32개인 분배기를 사용하여 적당한 드랍을 형성 시킬 수 있다. 상승된 드랍은 경계면에 도달하여 드랍들끼리 융합이 잘 되어 안정된 경계면을 형성하였다.

작동유체가 무거운 경우 사용된 분배관은 직경 0.6m의 구멍을 중심으로부터 뿔어있는 4개의 분배관에 방사상으로 뚫어 균일하게 축열유체에 떨어지도록 하였다.

작동유체의 유량이 1.5 l/min일때 약 3cm의 공기층을 통과한 작동유체는 드랍 형태로 축열유체를 통과하며 직접접촉에 의해 열을 전달하게 된다.

분산유체의 형태는 축열유체가 불투명하여 잘 보이지 않지만 축열탱크 표면 가까이에서는 확인할 수 있는데 작은 드랍형태를 유지하며 하강하여 경계면에서 잘 분리되어 안정된 경계면을 형성하였다. 이때 사용되는 분산유체는 물로서 온도에 따라 물성치의 변화가 크지 않으므로 온도에 따라 변화되는 텍사썸과 달리 안정된 드랍을 형성한다.

여기서 적용된 두 경우의 작동영역은 태양열 집열기 1장(집열면적 2.88m<sup>2</sup>)과 약 130리터 축열조를 사용하였을 경우 적합한 각 작동유체의 순환유속으로 집열된 열을 원만하게 칼럼에 저장할 수 있는 유속으로 간주된다.

4. 칼럼내 온도분포 및 획득열량

Fig.5는 작동유체가 물보다 가벼운 경우 칼럼내 축열유체의 온도, 칼럼으로 들어오는 전열유체의 온도, 칼럼에서 나가는 전열매체의 온도, 일사량을 그린 것이다.

9시에 시스템 및 펌프를 가동하여 오후 4시

까지 집열되는 상태를 나타낸 것으로 물보다 가벼운 유체의 경우 물에 비해 비열(0.42KCal/kg °C)이 낮으므로 집열기로 부터 축열 탱크로 돌아오는 온도가 상당히 높게 나타나고 있으며 직접 접촉식 열교환기를 통과하여 열전달이 이루어진 후의 온도는 축열유체의 온도에 거의 1°C이내로 접근하고 있음을 알 수 있다.

본 시스템에서는 열유체 순환 펌프를 계속 작동한 관계로 14시 이후는 도리어 축열 탱크로 부터 열이 손실됨을 알 수 있다.

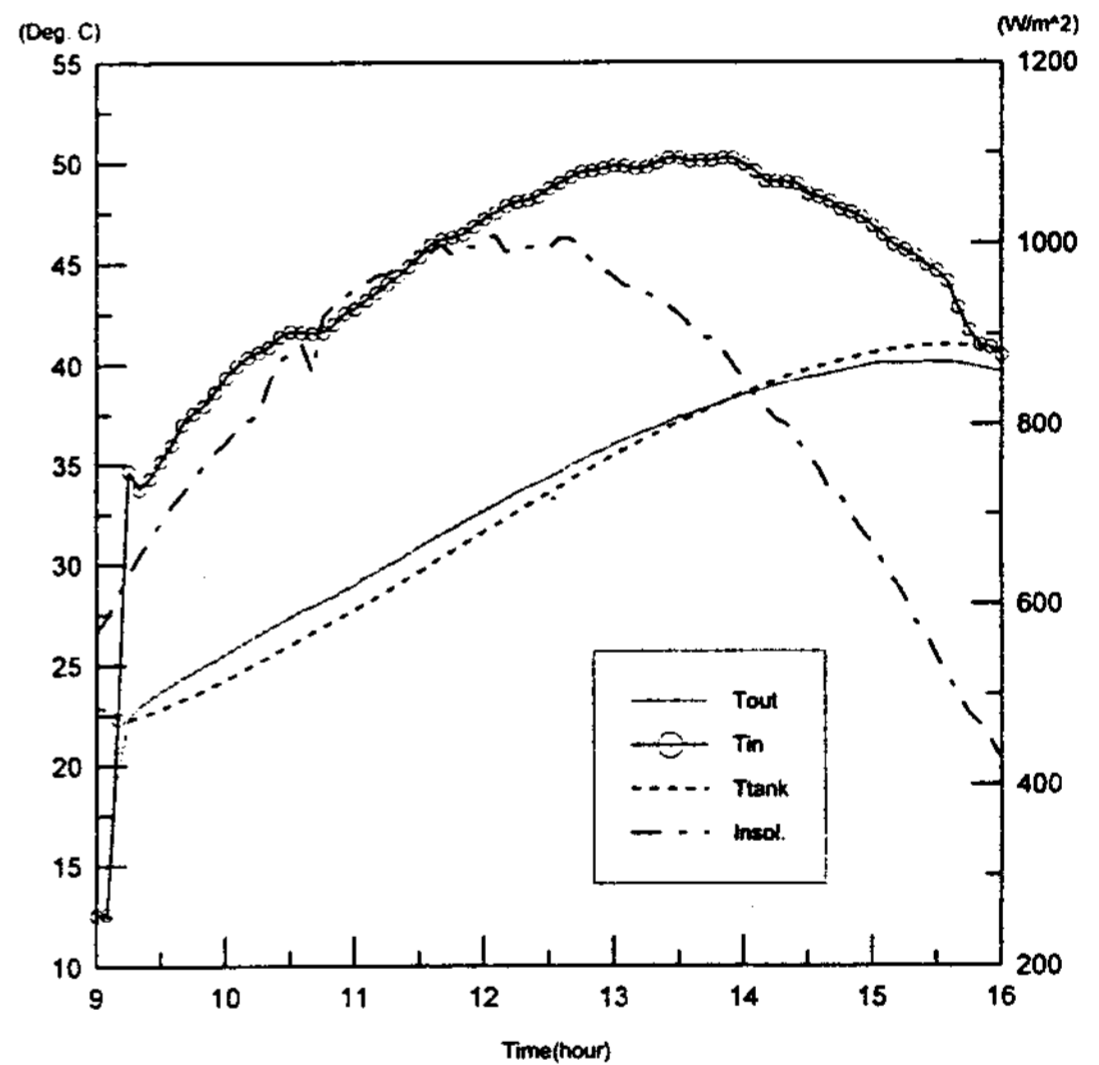


Fig. 5 작동유체가 물보다 가벼운 경우, 칼럼내 축열매체의 온도 변화

Fig.6은 매 시간후 칼럼내 각 위치의 물의 온도변화로 위치에 상관없이 거의 고르게 온도가 상승 함을 알 수 있는데 이는 작동유체(텍사썸46)가 칼럼내 대류를 유발하기 때문인 것으로 추측 된다.

Fig.7은 작동유체가 무거운 경우 칼럼내 축열유체의 온도변화를 나타낸 것으로, 작동 유체가 물보다 가벼운 경우와 거의 같은 형태를



보여주고 있으나 칼럼으로 들어오는 분산유체의 온도가 더 낮다. 그 이유는 비열이 훨씬 크므로 낮은 온도차로 더 많은 열을 운반하기 때문이다.

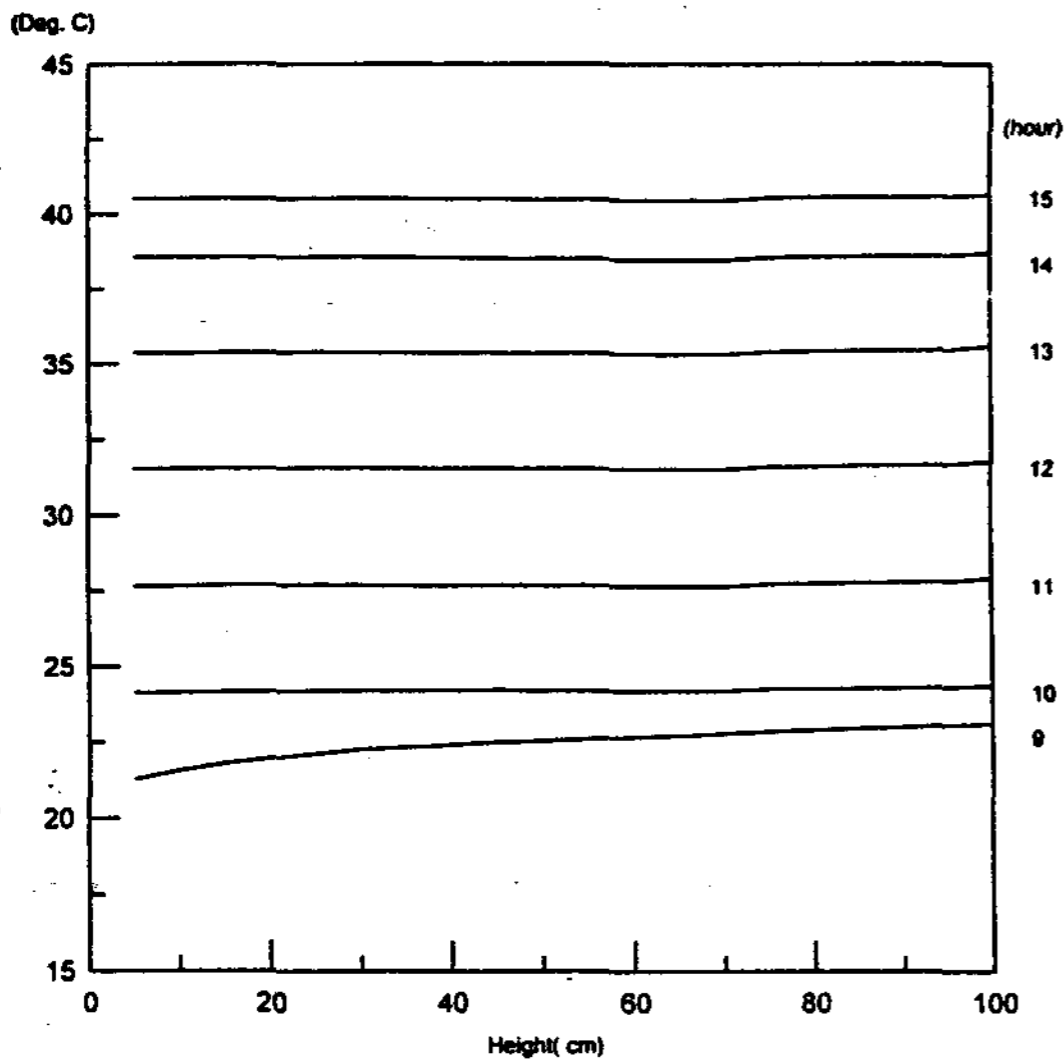


Fig. 6 작동유체가 물보다 가벼운 경우, 매 시간 칼럼내 높이에 따른 온도 분포

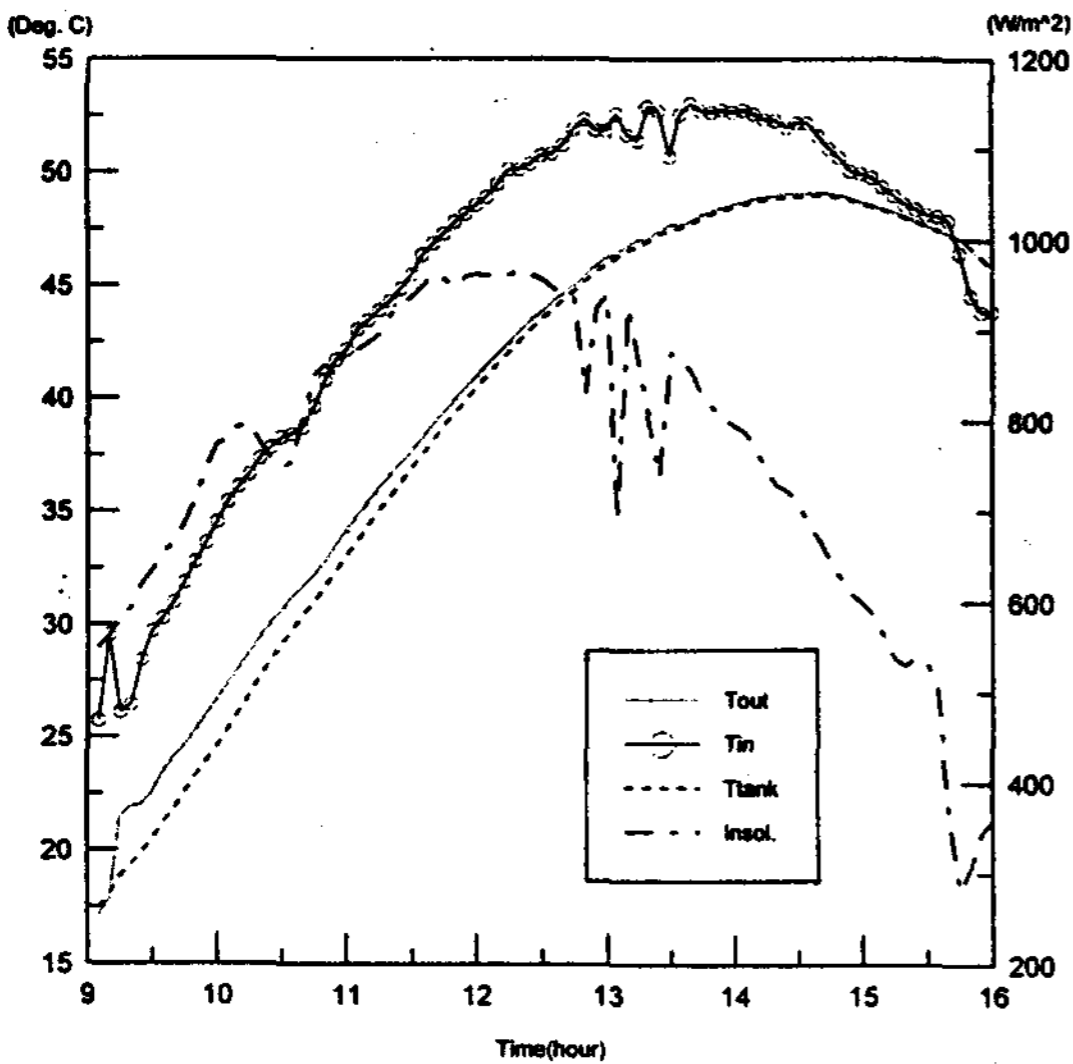


Fig. 7 작동유체가 더 무거운 경우, 칼럼내 축열매체의 온도 변화

한편 칼럼내 축열 유체의 온도는 가벼운 전열유체를 이용한 경우보다 빨리 올라간다. 직접접촉에 의해 전열이 이루어진 후의 온도차는 1°C이내로 접근하고 있다. 이 시스템도 펌프를 계속 작동하므로 14시 이후에는 열 손실이 발생된다.

Fig.8은 작동유체가 무거운 경우도 칼럼내 물의 온도변화는 열전대의 위치에 상관 없이 거의 고르게 온도가 상승 함을 알 수 있다.

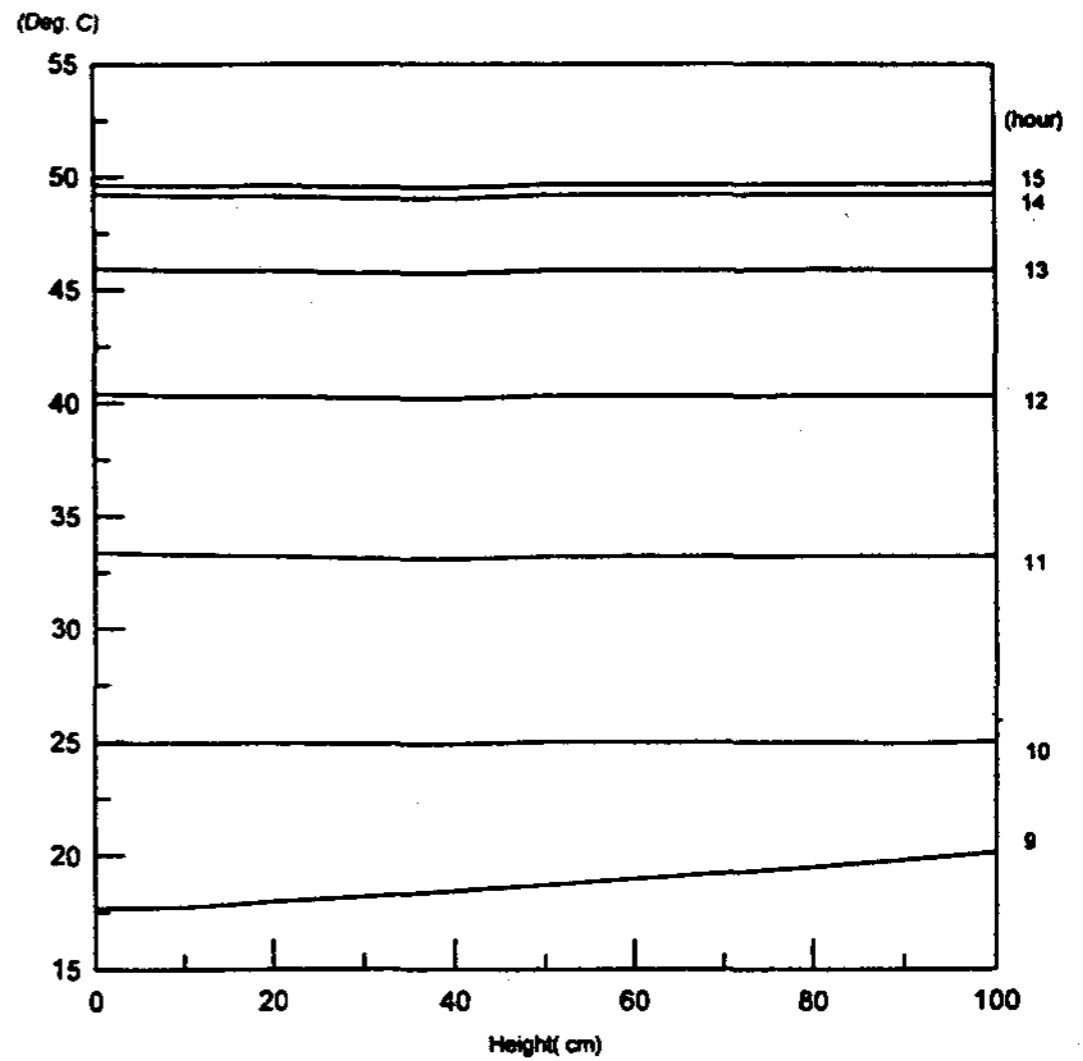


Fig. 8 작동유체가 더 무거운 경우, 매 시간 칼럼내 높이에 따른 온도 분포

획득된 열량( $Q_{total}$ )은 축열 칼럼이 획득한 열량( $Q_{tank}$ )과 외기로 손실된 열량( $Q_{loss}$ )의 합으로 생각할 수 있다. 실제 시스템에서는 단열이 잘된 상태에서 운영을 하므로 직접적 축열 열교환기의 실제 획득 열량은

$$Q_{total} = Q_{tank} + Q_{loss} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

매 5분마다 측정된 데이터로부터 획득된 열량은  $\Delta Q$ 라 하고 이 값의 누적치를 획득된

총열량이라고 하면, 쾌청한 날의 작동유체가 물보다 가벼운 경우의 결과는 Fig.9, Fig.10과 같다.

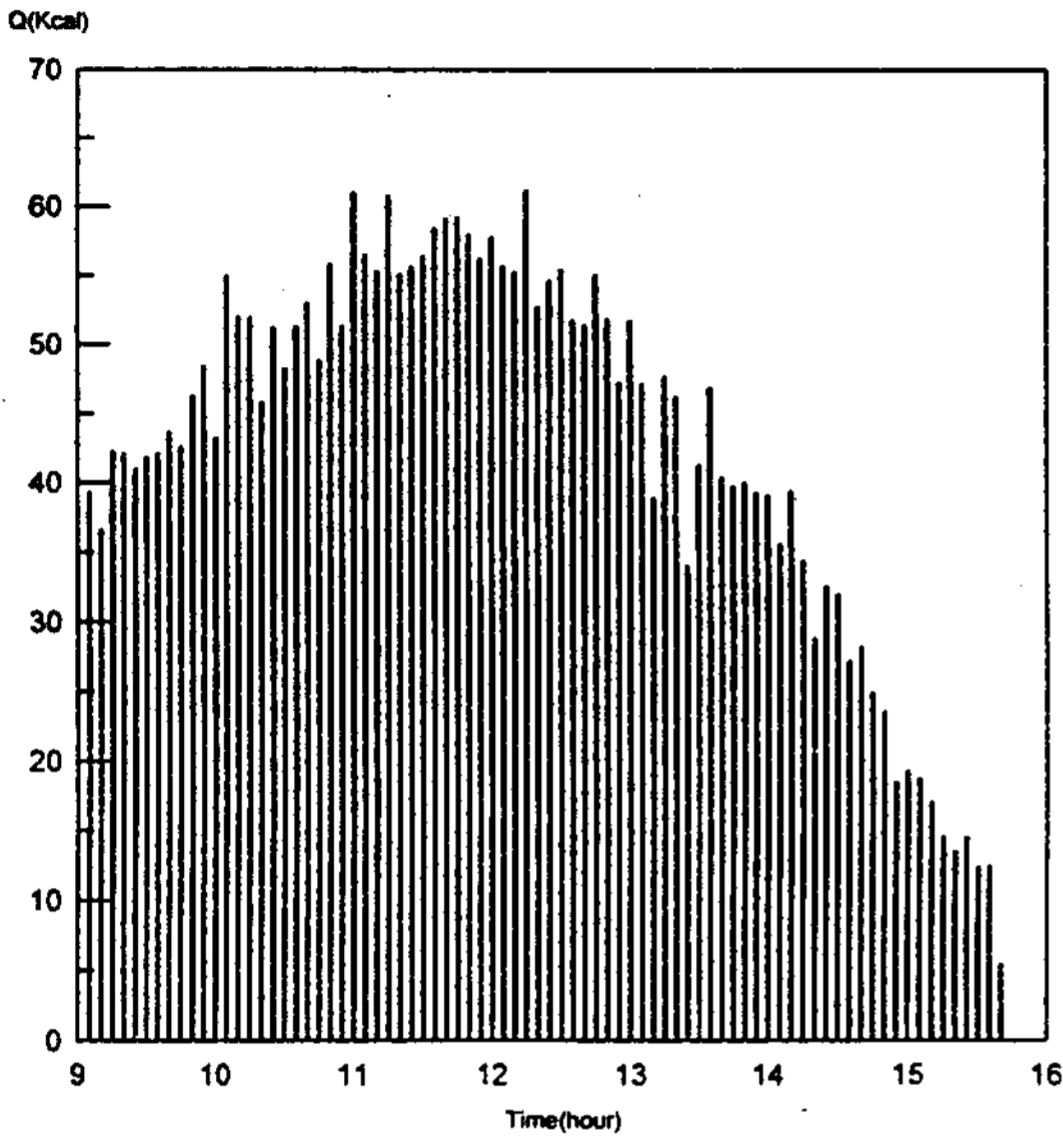


Fig. 9 작동 유체가 물보다 가벼운 경우 시간별 획득된 열량( $\Delta Q$ )

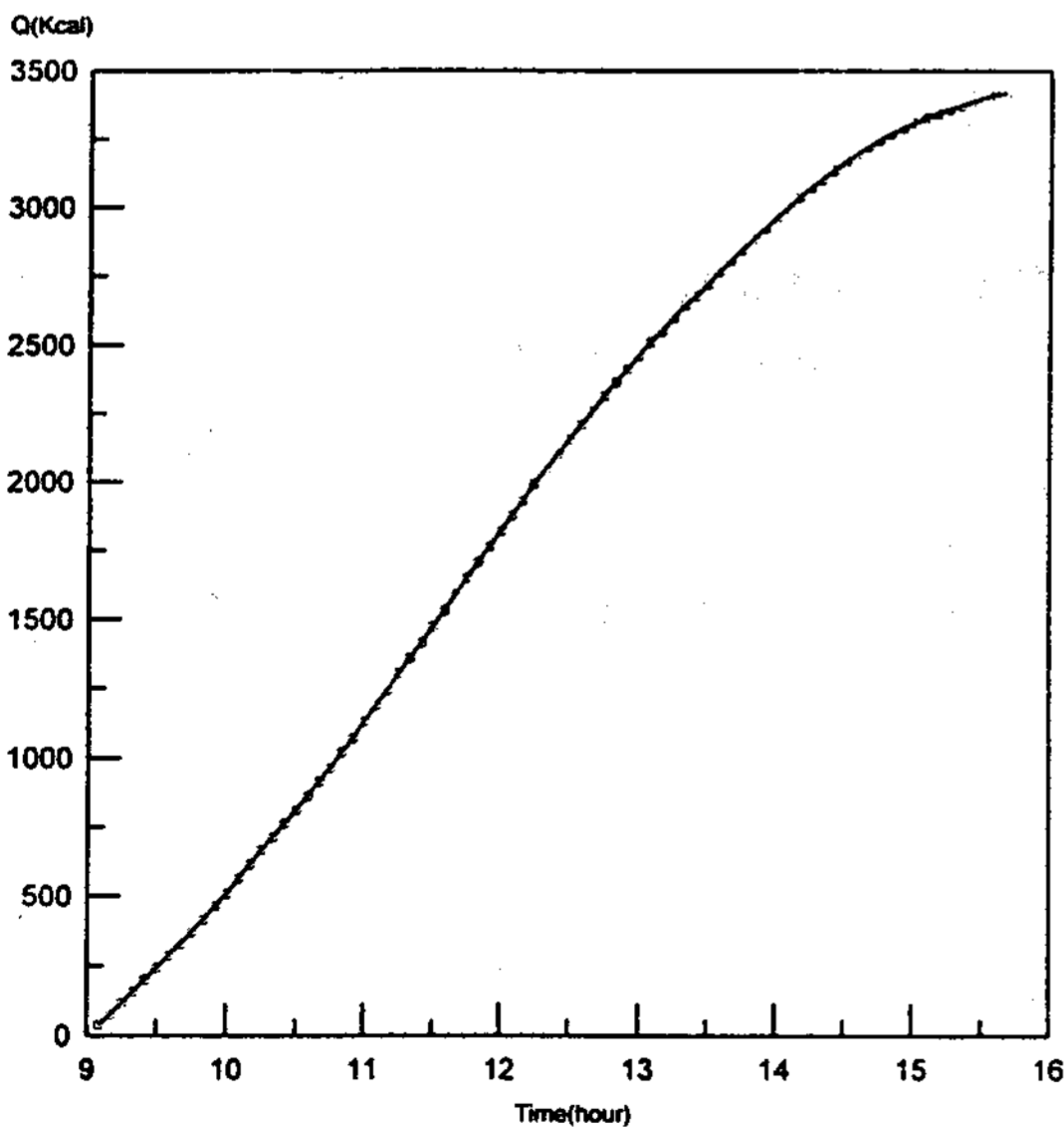


Fig. 10 작동 유체가 물보다 가벼운 경우, 획득된 열량 누적치(Q)

그리고, 작동유체가 무거운 경우의 결과는 Fig.11과 같다. 여기서 시간별 획득된 열량은 일사량 변화와 비슷하며 축열유체의 온도가 낮은 오전에 획득열량이 높음을 알 수 있다.

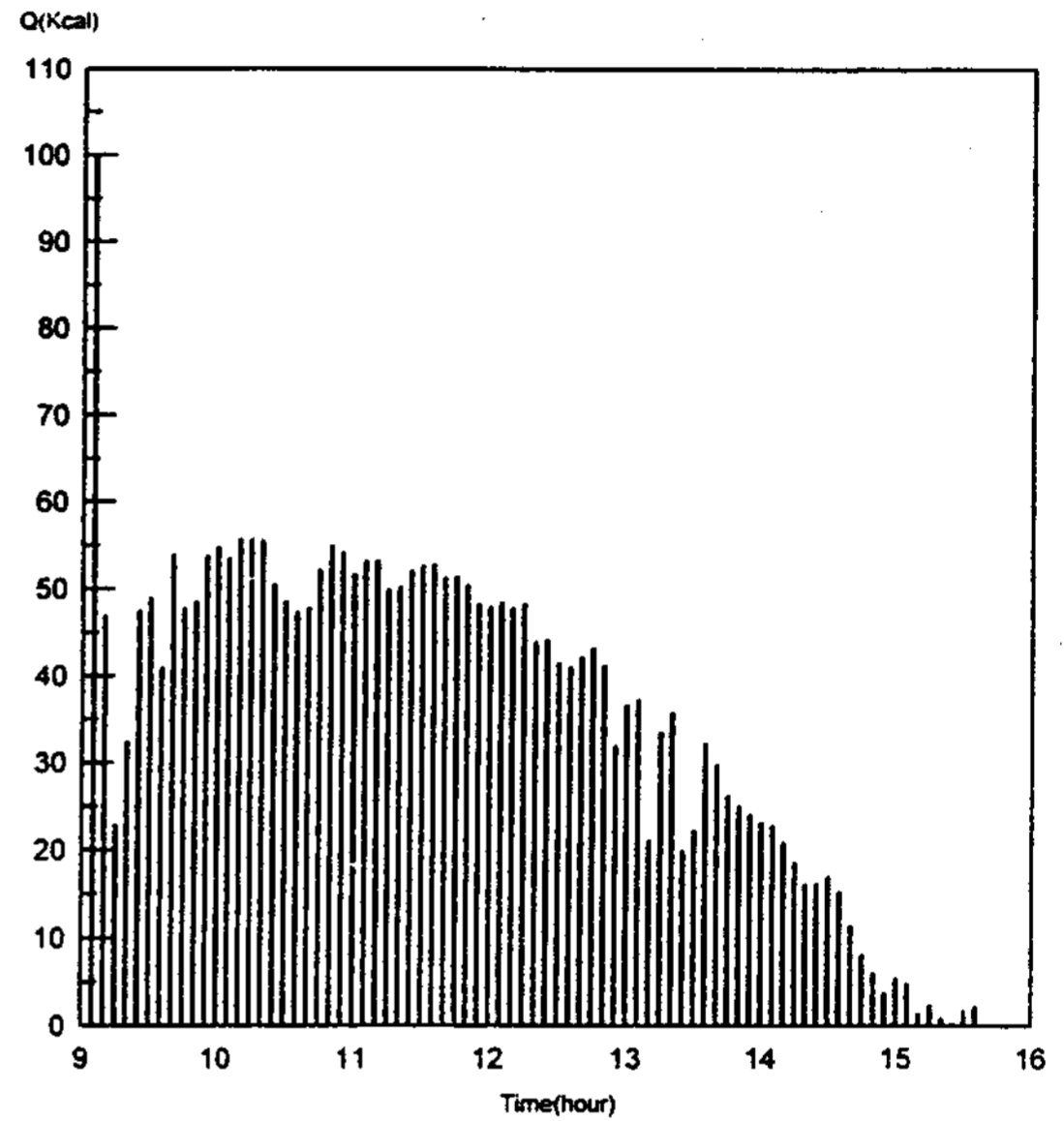


Fig. 11 작동 유체가 더 무거운 경우, 시간별 획득된 열량( $\Delta Q$ )

### 5. 체적열전달계수

실험 결과에 대해 체적 열전달 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{Q_{total}}{Volume} = U_v \times LMTD \quad (5)$$

$$U_v = \frac{Q_{total} / Volume}{LMTD} \quad (6)$$

$$LMTD = \frac{(T_{in} - T_1) - (T_{out} - T_2)}{\ln[(T_{in} - T_1) / (T_{out} - T_2)]}$$

작동유체가 물보다 가벼운 경우 유량 2.5ℓ/min, V = 0.1319m<sup>3</sup>인 시스템의 경우 맑은 날을 선택하여 11시 부터 13시까지의 측정 데

이타를 이용하여 체적열전달 계수를 계산한 결과는 다음과 같다.

$$U_v = 0.848 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$$

위의 결과를 실내에서 전기히터로 가열한 실험결과<sup>10)</sup>와 비교해 보면  $0.71 \cdot 10^{-2}$ 로 약한 order쯤 차이가 남을 알 수 있다. 이는 분배기의 설계시 시스템의 안전성을 위하고 상온에서 점도가 상당히 높아 부하가 많이 걸리므로 막힘을 방지하기 위해 여유 있게 크게 분배관의 구멍을 뚫었고, 그 결과 전열유체의 순환은 원활히 되었으나 드랍들의 크기가 상온에서는 5-6mm이고 35°C 이상일때 4mm 정도로 최적의 열전달 효율을 갖는 3mm 보다 크기 때문이다.

그러므로 실제 적용시는 실험실 규모의 실험과 달리 적용하는 온도의 범위가 10-50°C에 해당되며 이에 따른 물성치의 변화가 상당히 크고 집열기의 성능에 연계시켜 작동범위를 정해야 한다.

직접접촉식 열교환기의 효율은 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{효율} &= \frac{\text{칼럼의 축열체에 축열된 총열량}}{\text{전열 유체에 의해 칼럼으로}} \\ & \quad \text{유입된 총열량} \\ &= \frac{Q_{\text{total}}}{mC_p(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})} \quad (7) \end{aligned}$$

계산결과 물보다 가벼운 전열유체를 이용한 직접접촉식 열교환기의 효율은 0.73(73%)이다.

작동유체가 무거운 경우 실험 결과에 대해 식(6)을 이용하여 체적 열전달 계수를 구하면, 유량 1.5 l/min, V=0.1437m<sup>3</sup>인 시스템인 경우 맑은 날 11시부터 13시까지의 측정데이터를 이용하여 체적 열전달계수를 구한 결과는

다음과 같다.

$$U_v = 0.128 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$$

이 값은 작동유체가 물보다 가벼운 경우보다 크며, 효율은 식 (7)로부터 구하면 0.82(82%)이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 분사칼럼형 직접접촉 열교환기의 태양열 시스템 구성에 따른 작동방식과 작동유체를 결정하기 위해 물과 물보다 가벼운 유체(Texatherm)를 작동유체로 태양열 집열회로를 순환할때 각 경우의 유동특성과 열전달특성을 도출하였다.

작동매체가 축열매체보다 가벼운 경우와 무거운 경우에 대해 실제 태양열 직열회로에서 실험한 결과, 작동매체가 가벼운 경우 체적 열전달계수는  $1.848 \times 10^{-3} \text{ w/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ , 효율은 73%이고 무거운 경우는  $0.128 \times 10^{-2} \text{ w/cm}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ , 효율은 82%로 작동매체가 무거운 경우가 보다 좋은 것으로 나타났다. 그러나 실제 적용시 실험결과와 같은 1차측보다는 축열된 열을 사용되는 2차측의 사용형태, 즉 시간별 사용과 사용온도에 따라 선택되어질 수 있으며 위 실험결과는 이같은 선택의 기준을 제시하고 있다.

이상과 같이 직접접촉 열교환기의 태양열 이용에 적합한 작동조건과 열적특성을 도출하여 태양열 이용시설에 적용할 경우 최적설계를 통해 태양열의 최대이용을 도모할 수 있을 것이다.

#### References

1. H.R. Jacobs, R.F. Boehm, A.C.

- Hansen, "Application of Direct Contact Heat Exchangers to Geothermal Power Production Cycles", DOE/1549-8, 1977.
2. J.D. Wright, "Design of Direct Contact Preheater/Boilers for Solar Pond Power Plants", Direct Contact Heat Transfer, Hemisphere Publishing Co., pp.299-334, 1988.
3. 강용혁 등, "태양열 이용을 위한 분사칼럼식 열교환기의 유체유동 및 열적특성에 관한 연구", 대한기계학회 '92년도 추계학술대회논문집(2), pp.267-271, 1992.
4. S. Sideman, G. Hirsch, "Direct Contact Heat Transfer with Change of Phase", A.I.Ch.E. Journal, Vol.11, No.6, pp. 1019-1025, 1965.
5. S. Sideman, G. Hirsch, Y. Gat, "Direct Contact Heat Transfer with Change of Phase", A.I.Ch.E. Journal, Vol.11, No.6, pp.1081-1087, 1965.
6. R.Letan, "Design of a Particulate Direct Contact Heat Exchanger: Uniform, Countercurrent Flow", A.S.M.E. Journal, 75-HT-27, 1975.
7. Plass, S.B., H.R. Jacobs, R.F. Boehm, "Operational Characteristics of a Spray Column Type Direct Contact preheater", AIChE Symposium Series 198, pp.227-234, 1979.
8. H.R. Jacobs, "Direct-Contact Condensation", Direct Contact Heat Transfer, Hemisphere Publishing Co., pp.223-236, 1988.
9. H.R. Jacobs, M. Golafshani, "A Heuristic Evaluation of the Governing Mode of Heat Transfer in a Liquid-Liquid Spray Column", J. of Heat Transfer, Vol.111, pp.773-779, 1989.
10. 강용혁 등, "태양열 이용을 위한 직접접촉 열교환기 개발", 한국에너지기술연구소, KE92015S, 1993.

## A Study on Heat Transfer of a Storage Type Direct Contact Heat Exchanger for Solar Energy Utilization

Kang, Yong-Heack\* · Jeon, Myung-Seok\* · Yoon, Hwan-Ki\*  
Chun, Won-Gee\*\*

\* *Korea Institute of Energy Research*

\*\* *Dept. of Nuclear and Energy Eng. Cheju National University*

### Abstract

The Direct Contact heat Exchanger(DCHX) has been widely studied in the chemical industry for many years due to its inherent simplicity as a counter-current device for heat and mass transfer.

In many solar systems, the DCHX unit can be combined with the thermal storage unit, or alternatively, it can be used separately from the storage unit, much like an external(to storage) closed heat exchanger system.

In the present work, the spray column type of direct contact heat exchangers are studied extensively to harness the solar energy for hot water and spaced heating.

Some of the major considerations that are involved in the design of heat exchangers in this study are that: working fluid is a hydrocarbon (such as Texaterm) or water which is either lighter or heavier than storage medium.

The experimental data have revealed some interesting characteristics concerning the application of DCHXs for solar energy utilization.

These experiments are carried out in the line of solar heating system, major results are as follows :

- 1) the flow and aspect of working fluid drop for maximum heat transfer
- 2) efficiency and volumetric heat transfer coefficient of D.C.H.X with a heavier working fluid are higher than those of D.C.H.X with a lighter working fluid.