

# 태양열 온수 시스템에 적용한 기포펌프의 동작특성에 관한 연구 A Study of Bubble Pump that is applied Solar Heating Water System

박기태 · 이설송 · 심규진 · 정효민 · 정한식

G. T. Park, L. Song, K. J. Shim, H. M. Jeong and H. S. Chung

**Key Words** : Bubble Pump(기포펌프), Solar Collector(태양열집열기), Heat Exchanger(열교환기), Solar Heating System(태양열온수시스템)

**Abstract** : Regarding the need of energy in advance and the depletion of fossil fuel energy, all researches around the world now are trying to extract energy from many alternative sources especially the renewable one. Solar, ocean tidal, wind and geothermal energy are renewable energy fields which many researches are focused on. This paper explains about effort to replace electric pump used in solar water heating system by bubble pump. The utilization of bubble pump in this system is very efficient since it needs heat energy for its operation that can be obtained easily. In addition, it can also simplify the construction of the system. Bubble pump also functions as a controller to circulate water inside the system. Before the installation of bubble pump, the special quality and performance of bubble pump should be analyzed. The result got from the analysis could show the fluctuation of water flow rate occurred because it sensitively reacts to the heat quantity. Here the heat quantity is taken from the solar that, as we know, is not stable in a whole day. Problems often occurred are the flow rate in this system is very low moreover it could be stop if the pressure exceeds the limit.

## 기호 설명

- $\chi$  : Dryness fraction
- $\rho$  : Density
- $\mu$  : Viscosity coefficient
- Exc\_inlet : Heat exchanger inlet
- Exc\_outlet : Heat exchanger outlet
- Col\_inlet : Solar collector inlet

## 1. 서 론

에너지에 대한 세계의 지대한 관심은 어제 오늘 일이 아니다. 에너지 대란이라는 위기에 관련하여 많은 보고서가 올라오고 있다. 그 중 경제협력개발기구(OECD)산하 세계에너지기구(IEA)는 '2006 세계에너지 전망'보고서를 통해 세계 에너지 수요는

2030년에는 지금보다 53% 늘어날 것이라고 전망했다. 이에 IEA는 이러한 위기를 극복하기 위해 '대안 정책 시나리오'를 제시하였다. 또한 IEA는 각국이 당장 화석연료 의존도를 낮추고 신재생에너지의 사용을 늘려야 한다고 촉구하였고, 기후변화 및 에너지 위기를 타개하기 위해서는 각국 정부가 향후 25년간 에너지 기반 시설에 20조달러를 투자하여야 한다고 권고하였다. 또한 바이오 연료, 재생에너지 사용등 친환경 정책의 시행의 중요성을 강조하였다.

이러한 세계적 흐름 속에서 에너지 절약과 대체 에너지의 개발이라는 과제를 항상 지니고 있다. 재생에너지 중 대표적인 것들이 풍력, 수소, 태양에너지이다. 우리는 이러한 재생에너지를 활용하는 수많은 시스템 중에서 태양열을 이용한 온수 시스템에 초점을 맞춰 연구해 보려한다. 우선 연구를 위해 우리는 가장 간단한 형태의 태양열 온수 시스템을 구성하였다. 이 태양열 온수 시스템의 구성은 집열부, 축열부, 이용부로 되어있다. 이러한 시스템에서 집열부에서 얻어진 열을 축열부로 이송 시켜주는 장치로는 현재 열매체 순환펌프가 이용되고 있다. 순환펌프가 시스템에서 제대로 동작하기 위해서는 별

---

접수일 : 2007년 5월 28일, 채택확정 : 2007년 9월 12일  
 정효민(책임저자) : 경상대학교 정밀기계공학과, 해양산업연구소  
 E-mail: hmjeong@gnu.ac.kr  
 이설송, 심규진 : 경상대학교 대학원 정밀기계공학과  
 정한식 : 경상대학교 정밀기계공학과, 해양산업연구소

도의 컨트롤러가 필요로 하는데 이러한 컨트롤러를 설치하기 위해서는 부가적인 장치가 붙게 되고 시스템이 복잡해진다. 때문에 에너지의 절약과 장치의 단순화 등의 목적으로써 기포펌프를 적용하여 보고자한다. 그래서 펌프의 적용 가능성에 대한 기초자료의 하나로써 기포펌프의 운전특성에 대해 파악하여 보고자 한다.

## 2. Bubble Pump

### 2.1 2상유동 및 유동양식

기포펌프가 동작을 하기 위해서는 2상유동양식 중에서 두 가지 양식이 필요한데 그것은 각각 슬러그류와 천류라고 불린다. Fig. 1은 2상유동양식을 나타내고 있다.(1) 여기서 볼 수 있듯이 슬러그류 유동은 기포가 관 내부를 꽉 채운 상태에서의 흐르는 것으로써 발생 과정은 다음과 같다.

먼저 액체상의 유체가 에너지를 얻어 비등을 하게 되면 기포가 발생한다. 이러한 기포는 초기에 아주 미세한 크기를 가지지만 시간이 지남에 따라 열량이 많아지므로 기포수가 많아지게 된다. 기포의 수가 많아지면서 유속 또한 증가를 하게 되는데 관 내에서 기포가 서로 부딪히며 일부는 터져나가고 일부는 합쳐져 기포의 크기에 변화가 생긴다.

열량이 충분하다면 기포가 점점 커져 관의 내경과 거의 같은 크기가 되고 이때의 기포를 테일러 기포라고 부른다. 그리고 이러한 테일러 기포를 가지는 유동패턴을 슬러그류 라고 하는 것이다.

슬러그류의 특징은 테일러기포라고 불리는 커다란 기포가 관내부를 꽉 채운채 유동을 하기 때문에 기포와 기포사이의 공간에 액체상의 유체를 담고 움직인다는 것이다. 이렇게 기포가 피스톤과 같은

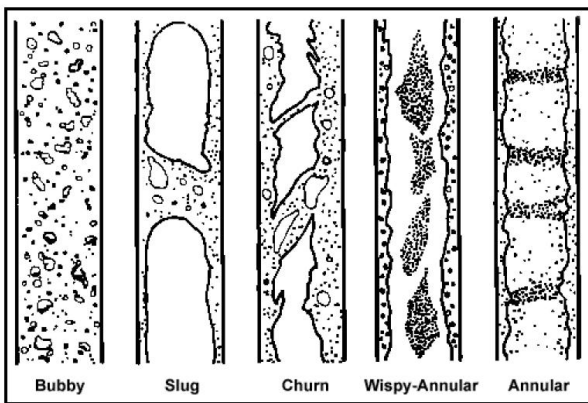


Fig. 1 Two-phase flow pattern in vertical up flow

역할을 하기 때문에 기포펌프의 성능을 향상시켜 주기 위해서는 슬러그류라는 유동양식을 오랜 시간 유지시켜 줄 필요가 있는 것이다. 하지만 2상유동양식이 정확하게 구분되는 것이 아니기 때문에 이를 조정한다는 것은 상당히 어렵다. 단지, 몇 가지의 경우로 나누어서 주요한 지배변수의 조합으로 도표를 작성할 수 있으며 이러한 도표들로서 대략적인 변화를 알 수 있다.

대표적인 것으로는 Baker 도표, Taitel과 Dukler 도표, Hewitt와 Robert 도표, Fair 도표 등이 있다.(2)

Fig. 2는 수직관 유동의 대표적인 도표들 중에서 Fair 도표를 나타낸 것이다. 이를 통해서 완벽하지는 않더라도 유속과 x-axis의 식으로서 대략의 변동조건을 알 수 있다.(1) 다음으로 천류는 슬러그류에서 천이를 한 유동패턴으로 슬러그류 상태에서 더 많은 열량을 얻어 유동이 격해지고 불안정해진 유동양식이다.

천류에서도 슬러그류와 비슷하게 기포가 관내경과 거의 같은 크기를 가지지만 유동이 매우 격렬하고, 기포의 양이 많기 때문에 서로 부딪쳐 깨지게 된다. 때문에 유속이 빠르더라도 양수의 측면에서 보면 그 효율은 슬러그류 상태에서보다 떨어지는 것이다. 하지만 어느 정도는 양수가 가능하기 때문에 기포펌프에서 천류유동양식 또한 활용이 가능하다. 천류와 슬러그류의 경계가 매우 모호하기 때문에 어떠한 조건에서 천류로 천이를 하는지 구분하기는 매우 어렵다.(5), (6)

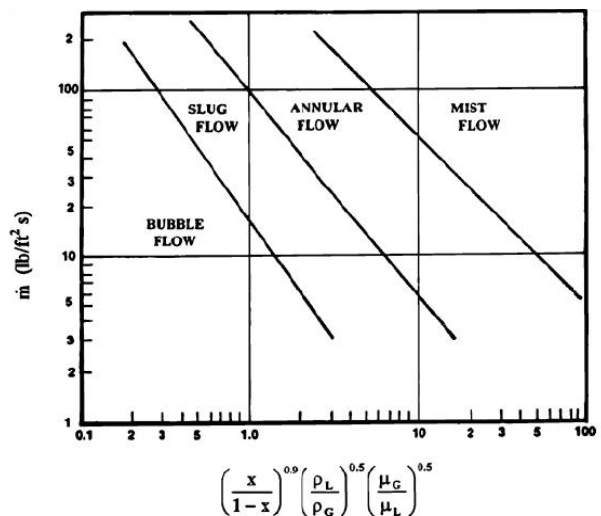


Fig. 2 Two-phase flow pattern map of Fair for vertical tube

## 2.2 기포펌프의 구조 및 작동원리

Fig. 3는 기포펌프의 개략도이다. 기포펌프의 구조를 살펴보면 하나의 둥근 원통이 상·하 두 부분으로 분리되어 있는 구조이다. 이렇게 분리된 공간을 이후 상부를 'Separator'라 칭하고 하부를 'Condenser'라 부르기로 한다. 상·하부의 파트는 직경 4 mm의 ⑤번 파이프로 연결되고, 집열기의 출구와 연결되는 12 mm ①번 파이프가 'Condenser'를 가로질러 'Separator'로 바로 연결된다. 그리고 'Separator'의 바닥과 연결된 8 mm ②번 파이프는 열교환기의 입구와 연결된다. 열교환기의 출구와 연결되는 8 mm ③번 파이프는 하부 'Condenser'와 연결되어 있으며, 이 'Condenser'에는 8 mm ④번 파이프가 있어 집열기의 입구측과 Bubble Pump가 연결되도록 하고 있다. 이렇게 Bubble Pump의 구조는 5개의 파이프와 상·하부가 분리된 원통이 연결되는 구조로서 매우 간단하다. Bubble Pump의 작동원리는 집열기로부터 충분한 열량을 얻은 열매체가 비등을 시작하면, 이 때 발생한 기포가 열매체와 함께 흐르는데 그 유동의 형태는 2상유동으로서 기포류의 형태를 띠다가 Dryness fraction 값이 일정 한도를 넘어서면 슬러그류의 형태로 바뀐다.

열매체의 유동이 슬러그류를 형성하게 되면 기포는 관 내에서 막을 형성하여 일종의 피스톤과 같은 역할을 하게 되고 이렇게 막과 막 사이에 열매체를 가둬 같이 상승하면서 시스템 내에 열매체를 이송시킨다. ①번 파이프를 통해서 액상과 기상이 공존하는 2상의 열매체가 'Separator'로 들어가게 되면 ⑤번의 가느다란 파이프를 통해서 기상의 열매체는 응축하게 되고 액상의 열매체는 'Separator' 바닥에 설치된 ②번 파이프를 통해서 열교환기로 흘러들어

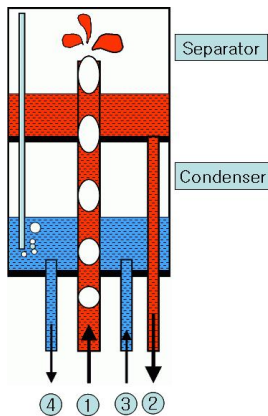


Fig. 3 Diagram of Bubble Pump

가게 된다. 이렇게 유입된 열매체는 열교환기를 통해서 축열조로 열을 공급하게 되고, 열교환을 마친 열매체는 ③번 파이프를 타고 다시금 Bubble Pump의 'Condenser'로 유입되어 ④번 파이프를 따라 태양열 집열기로 돌아간다. 이상으로 Bubble Pump와 태양열 집열기간의 열매체 순환회로는 폐순환 회로를 이루어 계속적으로 축열조에 열을 공급하게 된다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

Fig. 4는 실험장치의 구성도이다. 태양열 온수 시스템은 집열기, 열교환기, 축열조, 순환기 등의 주요기로 구성되어 있다. 본 실험에서는 집열기인 튜브형 2중관 집열기를 사용하였고, 2대의 집열기 사이에 Bubble Pump를 장착하였다. 또한 집열기 내를 통과하여 순환펌프인 Bubble Pump 내를 흐르는 열매체로는 일반 수도물을 사용하였고, 태양복사에너지를 측정하기 위해서 전천일사계를 사용하였다.

온도와 압력의 실험 데이터를 획득하기 위해 2개의 압력센서와 6개의 온도 센서를 사용하였으며, 그 측정 지점은 Fig. 3에 도시하였다.

①번과 ③번은 압력센서로서 사용한 모델의 모델명은 PSH0760HAAJ이며 측정범위 값은 0-760 mmhg 이다. 또한 ②, ④번 센서는 RTD Type의 온도센서이며, 나머지 ⑤, ⑥, ⑦번은 K-Type 온도센서를 사용하였다. 그리고 온도 센서의 설치 위치는 각각 Bubble Pump의 'Separator'와 'Condenser', 열교환기 입구와 출구 및 집열기 입구이다. 그리고

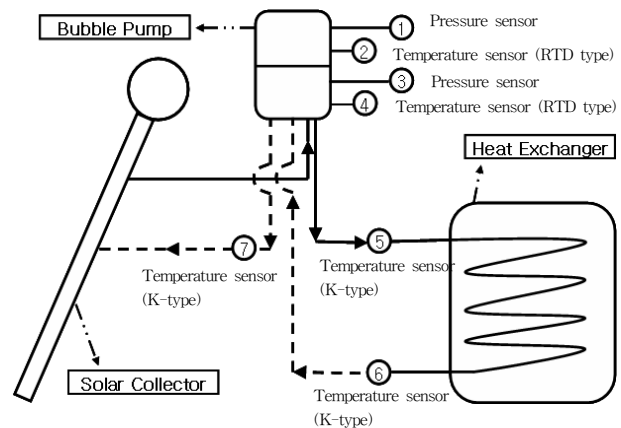


Fig. 4 Diagram of Solar Heating System

압력센서는 ‘Separator’와 ‘Condenser’에 하나씩 설치하였다.

- 1) 태양열을 흡수한 집열기는 날씨에 따라 다르지만 일반적으로 일출시를 기점으로 2 시간에서 3 시간 사이에 관내에 흐르는 열매체의 온도는 60-80 °C까지 상승한다.
- 2) Bubble Pump를 시스템에 장착하고 핸드펌프를 사용하여 내부에 진공압을 걸어주게 되면 이후 시스템 내에 흐르는 열매체는 60-70 °C정도의 온도에서 비등을 시작하여 Pump내의 압력차가 27 kPa 정도에 이르면 Pumping을 시작한다.
- 3) Fig. 3에서 표시한 ①번 파이프를 양액관이라 칭하고 이 양액관을 따라서 Pumping된 열매체는 각각의 관을 따라 이송되어 열교환기를 거쳐 축열조에 열을 공급한 후 다시 집열기로 되돌아가는 폐회로를 구성하면서 시스템 내를 순환하게 된다.

### 3.2 실험방법

실험의 진행은 일출시를 기점으로 시작하게 되며 일몰시에 종료한다. 데이터의 취득은 각 센서를 데이터 로거에 연결하여 자동으로 컴퓨터로 저장되도록 하였고, 각각의 데이터는 10 초 단위로 기록되도록 설정하였다.

실험결과 기포펌프가 동작을 하기 위해서는 27 kPa 정도의 압력차가 발생하여야 함을 알 수 있었고, 기포가 발생하기 시작한 온도는 약 85 °C 정도였다. 열매체로서 물을 사용하였지만 기포펌프 내부를 진공상태로 만들었기 때문에 물의 비등점보다 낮은 온도에서도 비등이 가능하였다.

Table. 1은 데이터를 취득한 날의 날씨 정보를 정리한 것이다. 표에서 사용한 운량이라는 값은 기상예보에 쓰이는 용어를 그대로 적용하였다. 이는 0-10까지의 레벨로 구분하며 구름이 전혀 없을 때를 0으로 한다.

운량에 대한 하늘의 상태를 표현하자면 0-2의 운량 값은 맑음, 운량 3-5는 대체로 맑음 또는 구름 조금으로 표현하며, 6-8은 대체로 흐림 또는 구름

많으므로, 9-10은 흐림으로 일기예보에서 표현하고 있다.

기상청에서 얻은 데이터를 바탕으로 Table 1 을 정리하였다.

## 4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 각각의 실험에 대한 압력의 차를 도시한 것이다. 데이터를 보면 대체적으로 운량 값이 작은, 즉 맑은 날일수록 압력이 높음을 볼 수 있다. 이는 펌프 내 압력이 태양복사열과 밀접한 관계가 있음을 말해준다. 이 이유는 증발의 속도와 관계가 있다. 비등이 일어날 수 있는 조건에 얼마나 빨리 도달하고, 얼마나 오래 지속되는지에 따라서 펌프 내 압력이 올라갈 수도 있고 내려갈 수도 있는 것이다.

전체적인 압력을 보면 많은 변동이 일어나고 있는데, 이유로는 여러 가지가 있겠지만 가장 크게 작용하는 것은 아무래도 열량일 것이다. 그 이유는 펌프의 동작 특성상 발생기포가 많아짐에 따라 빨라지는 펌핑되는 열매체의 유속보다 펌프에서 나가는 열매체의 유동 속도가 느리기 때문으로 이때 펌프의 내압이 조금씩 상승하게 된다. 또한 실험을 통해 압력이 38-40 kPa에 근접하게 되면 펌프가 동작을 멈추는 현상이 발생하여 압력이 급격하게 떨어지는 양상을 보였다. 여기에는 관 내부의 마찰도 이유가 될 수 있고, 관의 길이도 이유가 될 수 있다고 생각된다. 즉 유동양식이 천이할 때 열유속과 질량유속에 영향을 많이 받기 때문이다.

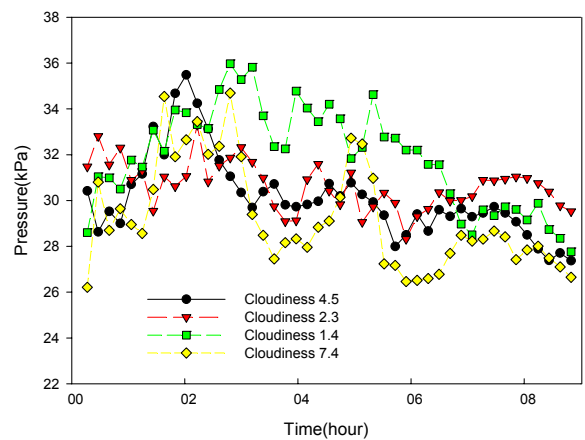
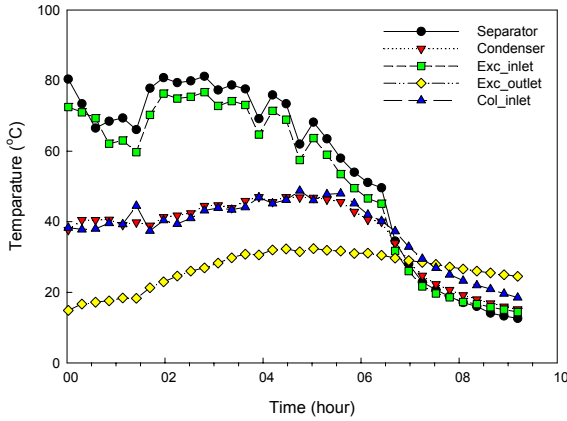


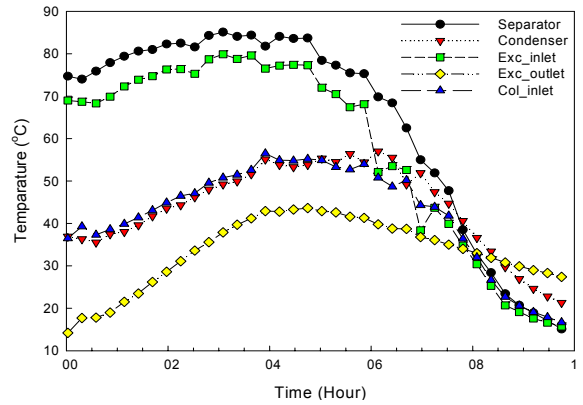
Fig. 5 Pressure distributions for various wether conditions(Cloudiness value)

Table 1 Weather data(Tongyeong)

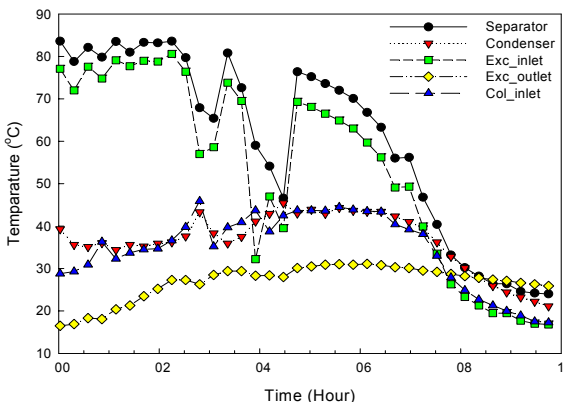
	최고기온	최저기온	평균기온	운량
1	17	7.5	12.5	4.5
2	18.2	9.3	14.4	2.3
3	17.8	8.1	13.3	1.4
4	19.2	12.1	16.6	7.4



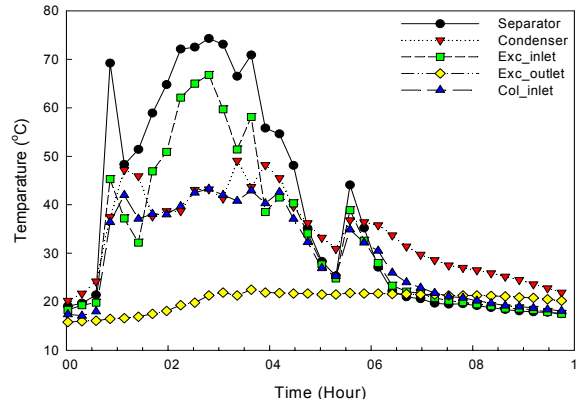
(a) Cloudiness 4.5



(a) Cloudiness 1.4



(b) Cloudiness 2.3



(b) Cloudiness 7.4

Fig. 6 Temperature distribution in bubble pump

그리고 이는 관 표면에서의 열교환도 유동양식의 변화에 많은 영향을 끼치므로 고려해야 할 변수가 다양하다. 그러나 본 실험에서는 관의 단열만을 신경 썼을 뿐 이러한 것에 대해서는 제대로 고려를 해주지 못하였다.

Fig. 6 (a)는 운량이 4.5에서의 실험도표로 실험 장치의 최고온도는 83 °C로서 그리 높지 않았으며 기포펌프가 원만하게 작동을 한 시간도 4시간 정도 밖에 되지 않았다. Fig. 4에서 운량이 4.5인 압력곡선을 보면 펌프가 구동을 하고나서 2 시간이 경과한 지점에서 급격히 하강하는 것을 볼 수 있다. 이는 태양복사에너지의 부족으로 기포가 형성되지 않아서 펌프 내의 압력이 초기화되기 때문으로 판단된다. 그리고 Fig. 6 (a)를 보면 4 시간 후부터 급격히 하강한다.

압력과 온도의 그래프를 비교하면서 보면 실제 복사열은 2 시간 이후부터 급격히 줄어들었음을 알 수 있고, 압력은 이에 영향을 받아 급격히 하강하나 펌프내의 온도는 단열이 되어있기 때문에 천천히

Fig. 7 Temperature distribution in bubble pump

떨어짐을 알 수 있다. 그리고 열교환기 출구측의 온도를 보면 아주 완만하게 하강하는 것을 볼 수 있다. ‘Separator’에서 열교환기로 들어가는 열매체의 온도를 살펴보면 약 7 °C정도의 손실을 보이는데 이는 시창구를 통해 열이 손실되기 때문이다. 하지만 이것은 설계에서부터 고려를 했었던 사항이기에 문제 될 것은 없다고 본다.

슬러그류 유동의 특성상 펌프의 펌핑 양상이 맥동을 보임을 시창구를 통해 확인 할 수 있었고, 태양복사에너지 등 여러 요인에 의해서 그 주기가 일정치 않음을 확인하였다. 또한 Fig. 6의 (b)는 운량이 2.3으로 4.5의 그래프보다 전체적으로 높은 온도를 보여야 하겠지만 그렇지 못함을 볼 수 있다. 역시나 여러 요인이 존재하겠지만 그래프가 안정화되지 못하고 변동 폭이 큰 것은 복사에너지를 받는 시간과 관계가 깊다고 할 수 있을 것이다. 반면 2.3에서와는 달리 Fig. 7의 (a), 운량 1.4의 결과를 보면 확실히 높은 온도를 보임을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 7의 (b)는 선도가 매우 안정적이지 못하지만

Separator의 온도가 75 °C를 넘어서는 구간이 있고, Fig. 5의 압력선도에서 확인할 수 있듯 압력이 30 kPa을 넘어섬으로써 Fig. 6의 (b)에서도 볼 수 있듯 열교환기 출구측 온도가 20 °C이하로써 매우 낮음에도 약간 상승하는 곡선이 있다는 것은 펌프가 작동을 하였다는 것을 나타낸다.

## 5. 결 론

실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실험의 결과 집열기로부터 얻은 열량으로 인해 작동매체인 물이 80 °C이상만 된다면 시스템이 작동을 함을 알 수 있었다.
- 2) 또한 압력이 27 kPa을 넘어서지 않으면 시스템이 동작하지 않았고, 38-40 kPa 정도로 압력이 커지게 되면 시스템이 멈추는 현상이 나타났다.
- 3) 각 온도곡선을 보면 급격한 온도 변화가 생기게 되며 이것은 열교환기 측으로 유동이 생성되어 재가열 시간이 필요한 것을 알 수 있었다.
- 4) 태양복사에너지가 부족한 시간 때에는 열매체의 유동이 정체됨을 볼 수 있었고, 유동 양상은 맥동류를 보였다. 그리고 그 주기는 일정치 않다는 특징이 있다.

## 후 기

본 연구는 2단계 BK21사업 및 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구 결과로서 한국열유체기술사에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Engineering Data BookIII, "Chapter 12 Two-Phase Flow Patterns", Wolverine Tube, Inc.
2. Sang Young Lee 1990, "The Summary of the Two-Phase Flow", KSME.
3. Hoffman EW, 1985, "The Bubble Action Pump Solar Heating System", Montreal, Canada.
4. Tae Woo Lim, "Flow Pattern and Drop of Pure Refrigerants and Their Mixture in Horizontal Tube", KSME Int. J. Vol. 19. No. 12. pp. 2289~2295
5. Wallis G B, 1969, "One Dimensional Two-Phase Flow", McGraw Hill, New York.
6. Hoffman EW, 1985, "The Bubble Action Pump Solar Heating System", Montreal, Canada.
7. Weather data in Korea Meteorological Administration.(<http://www.kma.go.kr>)