

| |
|--------|
| 발간등록번호 |
|--------|

| |
|----------------------|
| 11-1543000-000801-01 |
|----------------------|

버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 고효율 근권
난방시스템 개발

(Development of high efficiency greenhouse heating system
using bubble jet type heat pipe)

부경대학교 산학협력단

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 고효율 근권 난방시스템 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2015년 03월 02일

주관연구기관명 : 부경대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 김종수

연 구 원 : 하수정

연 구 원 : 권용하

연 구 원 : 구연우

연 구 원 : 신종석

연 구 원 : 허준

연 구 원 : 김정웅

연 구 원 : 박상진

연 구 원 : 김준하

연 구 원 : 배재영

연 구 원 : 황언화

협동연구기관명 : 디에이치테크(주)

협동연구책임자 : 공상운

요 약 문

I. 제 목

버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 고효율 근권 난방시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 우리나라의 시설재배농가들은 농자재 가격상승 및 난방 유류비가 생산원가에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 겨울철 시설원예 난방에 큰 어려움을 겪고 있다. 이러한 에너지 문제를 해결함과 동시에 환경오염을 방지하고 시설원예농가의 생산성향상 및 경쟁력제고를 위해 기존의 난방 방식에서 탈피한 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예 근권 난방시스템의 개발이 필요하다. 또한 이 시스템을 시설원예농가에 저렴하게 보급함으로써, 시설원예농가의 생산비를 절감하여 농산물의 시장경쟁력을 높이고, 근권 난방을 통해 시설원예작물의 품질을 향상시켜 국제적 경쟁력을 갖추하고자 한다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에 앞서 버블젯 히트파이프에 대한 관련문헌 조사 및 운전 조건을 검토하였다. 버블젯 히트파이프의 고효율화 방안으로 증발부 간극(clearance) 변경 및 비등촉진 전열면 증발부를 사용하는 방법을 시도하여 변수에 따른 버블젯 히트파이프의 성능평가를 완료하였다. 버블젯 히트파이프의 작동 원리를 규명하기 위하여 내부유동 가시화 실험을 진행하였으며, 열원변경(온수) 실험 및 성능평가를 완료하였다. 버블젯 히트파이프를 실용화하기 위하여 기존의 단점을 보완하는 접이식 버블젯 히트파이프를 개발하였으며, 현장적용 실험을 통해 버블젯 히트파이프 시설원예용 근권 난방시스템의 상품화 가능성을 확인하였다.

IV. 연구개발결과

본 연구를 통해 시설원예용 근권 난방시스템에 적용 가능한 버블젯 히트파이프를 개발하였고 이를 고효율화, 실용화 할 수 있는 방법을 모색하였다. 또한 최종적으로 버블젯 히트파이프를 실제농가에 적용하여 에너지 소비량 및 작물 생육 측정 등을 통해 실제농가에 적용가능성을 제고하였다.

V. 연구성과 및 성과활용 계획

버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 고효율 근권 난방시스템으로 시설원예 작물(파프리카, 토마토, 딸기, 오이 등)에 뿌리난방을 하여, 농작물의 생장기간을 단축시키고 상품성을 향상시킬 수 있었다. 또한 기존의 근권 난방시스템과의 비교 시 70%이상의 에너지 절감이 가능하고 초기투자 비용 및 유지보수비용을 절감할 수 있었다. 현재 ‘접이식 버블젯 히트파이프’에 대한 특허출원을 완료하였으며, 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 근권 난방시스템에 관한 연구 논문을 국내외 학술지에 등재하여 지적재산권을 확보하였다. 또한 참여기업에 특허기술이전 계약을 완료하였고, 추후 상품화를 통해 실용화, 상업화를 진행할 계획이다.

SUMMARY

I . Title

Development of high efficiency greenhouse heating system using bubble jet type heat pipe

II . Necessity and purpose of research and development

Currently, farmers are having great difficulty farming because of the rise price in agricultural materials and oil. It is necessary to develop a horticulture root-zone heating system using a bubble-jet heat pipe in order to solve the energy problem and prevent pollution. The purpose of this study is to have a international competitiveness by improving the quality of the crop through the root zone heating.

IV. R & D results

Prior to this study, we surveyed the related study literature and investigated the operating conditions. The clearance change experiment and heat transfer enhancement heating surface experiment were conducted as high efficiency method. Internal flow visualization experiment was conducted to know the operating principle of the bubble jet heat pipe. Also heat sources change experiments and performance evaluation was completed. In order to put bubble jet heat pipe to practical use, the foldable bubble jet heat pipe was developed. Through the field test, we confirmed the commercialization possibility of bubble jet heat pipe.

V . Research result and utilization plan

It is possible to improve marketability and shorten the growth period of the crops(paprika, tomato, strawberry, cucumber etc) by using a bubble-jet heat pipe root-zone heating system. In addition, it is possible to reduce initial investment costs and maintenance costs in comparison with conventional heating systems.

CONTENTS

- Chapter 1 Overview of research and development projects
 - Section 2 Necessity and purpose of research and development
 - Section 3 Goal of research and development

- Chapter 2 Development situation at domestic and foreign
 - Section 1 Development situation in related business
 - Section 2 Technological level and competitiveness of research

- Chapter 3 Performance details and results of research and development
 - Section 1 A survey of the relevant literature
 - Section 2 A review of operating conditions
 - Section 3 High efficiency plan
 - Section 4 Analysis of operating characteristics
 - Section 5 Heat source change test
 - Section 6 Redesign for field application test
 - Section 7 Way to commercialization
 - Section 8 Field application test
 - Section 8 Summaries

- Chapter 4 Goal achievement and contribution of the related fields

- Chapter 5 R & D results and future plan
 - Section 1 R & D results
 - Section 2 Application plan and field

- Chapter 6 References

목 차

- 제 1 장 연구개발과제의 개요
 - 제 1 절 연구개발의 개요
 - 제 2 절 연구개발의 필요성, 목적
 - 제 3 절 연구개발 목표

- 제 2 장 국내외 기술개발 현황
 - 제 1 절 국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황
 - 제 2 절 연구결과의 기술수준 및 경쟁력

- 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과
 - 제 1 절 버블젯 히트파이프 관련문헌 조사
 - 제 2 절 버블젯 히트파이프 운전조건 검토
 - 제 3 절 버블젯 히트파이프 고효율화 방안
 - 제 4 절 버블젯 히트파이프 작동특성 분석
 - 제 5 절 버블젯 히트파이프 열원 변경 시험
 - 제 6 절 현장적용을 위한 버블젯 히트파이프 재설계
 - 제 7 절 버블젯 히트파이프 실용화 방안
 - 제 8 절 버블젯 히트파이프 현장적용 시험
 - 제 9 절 연구 요약

- 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

- 제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획
 - 제 1 절 연구개발의 성과
 - 제 2 절 활용방안 및 분야

- 제 6 장 참고문헌

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 개요

1. 히트파이프(heat pipe)는 상변화를 이용한 밀폐 루프구조의 초 열전도 소자로서 작은 온도차로 대량의 열수송이 가능하다. 미국 GM사의 R. S. Gaugler가 1942년에 특허 출원한 「Heat Transfer Device」가 시초였으며, 그 후 1963년 미국 Los Alamos 연구소의 G. M. Grover가 특허로 출원한 「Evaporation-Condensation Heat Transfer Device」로서 ‘히트파이프’(heat pipe)라는 명칭이 처음으로 사용되었다. 초기의 연구 개발은 대부분 우주선의 온도 제어나 우주선의 전원인 열전자 발전용 전열기기 등에 적용되었으나, 그 이후 지상에서의 이용, 즉 중력하에서 히트파이프 이용이 활발하게 진행되었다. 1970년대에는 산업 기기의 응용 개발이 시작되어, 현재는 전자·전력 기기의 방열, 폐열 회수용 열교환기, 금형 냉각, 용설, 태양열 집열기 등에 사용되고 있으며, 냉동·공조 분야에는 제빙, 현열 열교환기 등이 실용화되어 있다.

2. 기존 중력을 이용한 작동유체의 액순환 방식의 진동형 히트파이프(Pulsating heat pipe)는 내부의 워(wick), 그루브(groove)등이 필요치 않기 때문에 제작이 용이하고 그 적용성이 매우 뛰어나나 경사각도(기울기)에 의해 성능이 좌우되며 특히 수평의 경사각에서는 동작이 되지 않고 있어 히트파이프의 응용 범위가 한정 되어 있다. 부경대학교 김종수교수는 수평의 경사각에서도 히트파이프가 정상적인 동작을 할 수 있도록 히트파이프의 증발부측에 작동유체가 강제적으로 버블을 생성될 수 있도록 하고 버블의 순환작용을 통해 응축부측에 응축된 작동유체가 회수 될 수 있도록 일체화 시킨 버블젯 히트파이프(bubble jet heat pipe)를 개발하였다. 즉, 히트파이프를 통한 열전달과정이 가열된 작동 유체의 증기를 이용하는 버블젯 히트파이프를 통해 수평의 경사각에서도 열전달 속도 및 효율의 한계를 극복하고자 하였다. 이러한 버블젯 히트파이프의 개발을 통해 히트파이프 제작 및 설치의 용이성을 높이고 히트파이프 설치에 필요한 공간상 제약을 극복할 뿐만 아니라 나아가 히트파이프 제작 및 설치비용 절감을 통한 획기적인 시설 원예 난방시스템을 설계하고자 한다.

제 2 절 연구개발의 필요성, 목적

1. 우리나라의 겨울철 시설원예 난방은 온풍 난방기에 의하여 이루어지며 95%이상이 경유를 연료로 사용하고 있다. 동계생산을 위해서는 시설온도를 16~18℃이상 유지해야 하는데, 농자재 가격상승 및 난방 유류비가 생산원가에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 시설재배농가들이 큰 어려움을 겪고 있다. 선진국에서는 지열 Heat pump, 유리온실 등을 사용하고 있으나 초기 투자비가 과대하여 우리나라 대부분의 원예시설은 비닐하우스를 사용하고 있는 실정이며 근권 난방장치는 현실화 되고 있지 않은 실정이다.

2. 화석에너지(경유)의 과다 사용으로 인한 환경오염문제는 지구 환경 보존을 위한 국제적 관심이 고조되고 있는 현시점에서 모든 산업 분야에서 그 심각성이 가중되고 있다. 특히, 농업 분야에서 이러한 공해로부터 농작물의 재배 환경을 보존하는 것은 아주 중요한 과제이며, 에너

지 절약형 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예 근권 난방시스템개발은 시설농업용 화석 연료의 절감을 통한 에너지절약과 환경오염을 함께 해결할 수 있는 방법이다. 저탄소 친환경 설비의 이용은 단순 경제성측면의 이점뿐만 아니라 농업기술 차원에서도 경쟁력을 갖게 하여 선진화에 이바지 할 수 있다. 또한, 버블젯 히트파이프를 이용한 근권 난방을 통해 기존의 공간 난방방식 보다 월등하게 에너지를 절감할 수 있으며 작물의 품질도 향상 시킬 수 있다. 이를 통해 시설원예농가의 국제 경쟁력 강화를 이룰 수 있을 것이다.

3. 이와 같이 대량의 화석에너지 절감과 환경오염을 방지하고 시설원예농가의 생산성향상 및 경쟁력제고를 위해, 본 연구에서는 기존의 난방 방식에서 탈피하여, 구리의 약 2,000배에 달하는 높은 열전도도를 가진 ‘최첨단 우주선 기술인 버블젯 히트파이프’를 이용한 시설원예 근권 난방시스템을 개발하여, 이를 시설원예농가에 저렴하게 보급함으로써, 시설원예농가의 생산비를 절감하여 농산물의 시장 경쟁력을 높이고, 근권 난방을 통해 시설원예작물의 품질을 향상시켜 국제적 경쟁력을 갖추고자 한다.

제 3 절 연구개발 목표

1. 본 기술개발의 최종목표는 ‘버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 근권 난방시스템’의 개발이다. 이를 위해 시설원예용 근권 난방시스템의 고성능·고효율을 발휘할 수 있는 방안을 제시하고 근권 난방시스템의 설계, 구성, 제작하여 실험한 후 상품화를 위한 기술을 개발한다. 따라서 본 연구에서는 1차적으로 고성능 버블젯 히트파이프의 개발을 위한 최적의 작동유체 선정과 봉입율, 가열부 전열면적에 따른 제품 설계 및 난방 전열 성능 평가에 이어, 버블젯 히트파이프를 이용한 근권 난방시스템의 설계, 성능 평가, 현장 적용 시험을 통한 문제점을 도출 및 보완하고, 신뢰성 시험을 통해 중요 사항을 확정한다. 그리고 2차적으로 최종시제품에 대한 최적화, 표준화, 상품화 설계 기술 개발하는 것을 목표로 한다.

| 구분 | 연구개발의 목표 | 연구개발의 내용 |
|----|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차 | 시설원예용 근권 난방에 이용 가능한 버블젯 히트파이프 및 근권 난방시스템개발 | 버블젯 히트파이프 고효율화 방안제시 버블젯 히트파이프의 운전조건과 성능 변수 제시 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예 근권 난방시스템 개발 |
| 2차 | 버블젯 히트파이프를 적용한 시설원예용 고효율 근권 난방시스템의 대량생산을 위한 최적화, 표준화 설계 | 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 근권 난방시스템의 대량생산을 위한 최적화, 표준화, 상품화 설계 기술 개발 |

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내·외 관련분야에 대한 기술개발 현황

1. 국내의 경우, 중소 규모 기업에서 시설원예용 온수 난방기 제품을 생산하고 있는 수준이다. 관련 연구도 중소기업에서 이루어지고 있으나 기존의 가정용 난방 보일러와 유사한 제조 공정 수준으로 연구가 진행되고 있으며, 에너지 절약 측면에서의 연구는 많이 미흡한 실정이다. 해외 선진국의 경우에도 국내와 비슷하게 화석 연료를 이용한 보일러 방식을 채택하고 있으나, 이들 국가에서는 정부와 관련 업체들의 긴밀한 협조 하에 농가에서 저렴하게 연료를 공급받을 수 있도록 하고 있다. 따라서 생산비에서 차지하는 난방비의 비중이 낮은 편이다.
2. 대부분의 시설재배농가에서는 경유 보일러의 연소에 의한 열에너지를 시설원예난방에너지로 사용하는 온풍난방 방식을 취하고 있다. 농자재 가격상승 및 난방 유류비가 생산원가에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 경유 보일러는 시설원예농가의 큰 부담으로 작용하고 있다. 따라서 버블젯 히트파이프를 이용한 난방은 전무후무한 실정이다.

제 2 절 연구결과의 기술수준 및 경쟁력

1. 선행 실험을 통해 농업진흥청 통계자료를 이용하여 비닐하우스 면적 1,000m², 온실 평균온도 28℃에서 난방 시 에너지 소비량을 현재 우리나라의 시설 원예농업에서 사용 중인 난방방식과 비교하여 버블젯 히트파이프를 이용한 근권 난방시스템의 경우 경유 대비 75%이상의 에너지 소비 절감이라는 획기적인 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1 Comparison of monthly energy consumption

비닐하우스 면적: 1,000m², 온실 평균온도: 28℃, 뿌리난방 평균 온도 18℃ 기준

| | 경유 온수난방기 | 심야전기 온수 난방기 | 버블젯 히트파이프 근권난방 |
|--------|---------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 월사용량 | 7300 | 4673 | 1800 |
| 경유대비지수 | 100 | 64 | 25 |
| 장·단점 | -CO ₂ 배출 -에너지소모과다 | -초기투자 비용과다 -전문인력 필요 (75kW 이상) -장 수명 | -반영구적 -온도분포균일 -온도범위설정용이 -초기투자비용저렴 -환경친화적 |

※농촌 진흥청 2002.10. 시설원예 난방 에너지 절감대책

2. 버블젯 히트파이프에 대한 기술은 2009년 특허등록을 통해 특허권을 획득하였다.

버블젯을 이용한 루프형 히트파이프


IPC 코드: F28 15/02

출원번호: 1020090027323

공개번호: 1020100108978

등록번호: 101036685

공개특허 10-2010-0108978

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------|-----------------|
|  | (19) 대한민국특허청(KR) | (11) 공개번호 | 10-2010-0108978 |
| | (12) 공개특허공보(A) | (43) 공개일자 | 2010년10월08일 |
| (51) Int. Cl. | | (71) 출원인 | 공상운 |
| | F28D 15/02 (2006.01) F28D 17/02 (2006.01) | | |
| (21) 출원번호 | 10-2009-0027323 | | |
| (22) 출원일자 | 2009년03월31일 | 김중수 | |
| | 심사청구일자 2009년03월31일 | | |
| | | 공영주 | |
| | | (72) 발명자 | 공상운 |
| | | | 공영주 |
| | | | 김중수 |
| | | (74) 대리인 | 최한수 |

전체 청구항 수 : 총 5 항

(54) 버블젯을 이용한 루프형 히트파이프

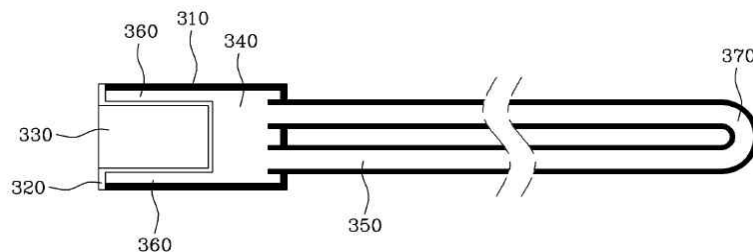
(57) 요약

수평가열 또는 하부가열로 열 수송량이 대폭 향상되고, 작동온도 범위의 확장이 가능하며, 구조가 간단하여 생산성이 높은 버블젯 진동형 루프 히트파이프를 제공한다.

이러한 버블젯 진동형 루프 히트파이프는 기포를 발생시켜 분출시키는 기포 발생부와, 분출된 기포와 작동액을 순환시키는 U 튜브(tube) 로 구성되며, 기포 발생부는 가열부로서 기능하고 U 튜브는 방열부로서 기능한다.

기포 발생부는 동심원의 이중 튜브 형태로 되어 있으며 구경이 작은 내부 원통에는 가열 히터가 삽입되고, 구경이 작은 내부 원통과 구경이 큰 외부 원통 사이에는 좁은 환상 틈이 형성되게 된다. 이 좁은 환상 공간 사이에서 작동액을 핵비동시켜 기포를 분출시킴으로써 작동액을 펌핑시키고, 루프형 히트파이프 내의 작동액의 펌핑 작용에 의해 작동액을 진동 및 순환시킨다.

대표도 - 도3



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 버블젯 히트파이프 관련문헌 조사

1. 버블젯 히트파이프의 구조 및 작동원리

버블젯 히트파이프는 히트파이프의 한 종류로 수평상태에서 성능이 불안정한 기존 히트파이프와 달리 수평상태에서 안정적으로 작동하도록 설계된 고성능 열전달 장치이다. Fig. 1은 버블젯 히트파이프의 기본 구조를 나타낸다. 버블젯 히트파이프의 구성은 열원(heater), 'U'자 루프 형태의 밀폐용기 및 작동유체로 구성되어있다. 구조적으로 열원을 통해 작동유체가 흡열하는 부분을 증발부(evaporating part), 고온의 작동유체가 밀폐용기 외부로 방열하는 긴 루프관이 있는 부분을 응축부(condensing part)라고 구분한다. 특히 증발부에는 열원 표면(heater's surface)과 외관(outer tube)사이의 좁은 환형 공간(clearance)이 있다. 기본적인 버블젯 히트파이프의 작동원리는 다음과 같다. 증발부가 가열되면 열원표면(heater's surface)과 외관 사이의 좁은 환형공간에서 핵비등(nucleate boiling)에 의한 다량의 기포가 발생한다. 이 기포가 빠르게 팽창하면서 압력 변화에 의해 증발부에서 응축부로 고온 기포가 이동하게 된다. 응축부로 이동한 고온 기체는 방열에 의해 액체로 응축되어 다시 증발부로 귀환하는 사이클을 이룬다. 이러한 과정 중 열은 열원에서 작동유체에 축적되고 응축부에서 방열하면서 상변화에 의한 잠열의 형태로 열전달이 발생한다. 버블젯 히트파이프의 증발부에서 응축부로 열을 전달하는 열전도 성능을 나타내는 유효열전도율 관계식은 식(1)과 같으며, 응축부에서 외부로의 열전달률을 계산하기 위한 응축열전달 계수 관계식은 식(2)와 같다.

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L_{eff}}{2A_c(T_{ep} - T_{cp})} \tag{1}$$

여기서 L_{eff} 는 유효 거리[m], $L_{eff} = \frac{L_{ep} + L_{cp}}{2}$ 이다.

$$\bar{h}_{cond.} = F \left[\frac{\rho_f (\rho_f - \rho_g) G h_{fg} k_f^3}{D \mu_f (T_g - T_w)} \right]^{0.25} \tag{2}$$

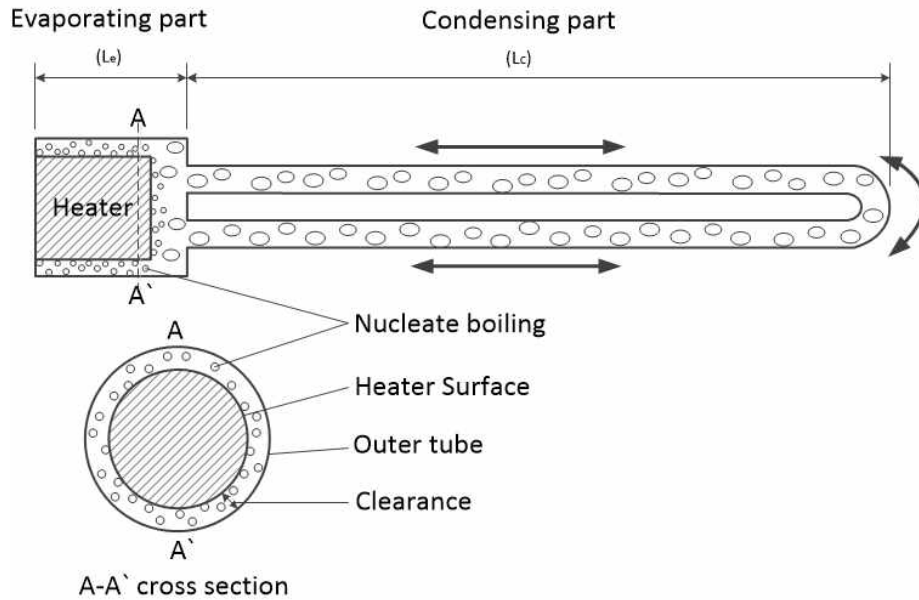


Fig. 1 Schematic diagram of BJLHP

제 2 절 버블젯 히트파이프 운전조건 검토

1. 작동유체 선정

히트파이프의 근본적인 작동 요소가 작동유체의 증발과 응축이기 때문에 적절한 작동유체의 선정은 히트파이프의 설계 및 제조에 있어 가장 중요한 요소이다. 작동유체의 선정 시 고려해야 될 사항에는 작동온도 범위, 증기압, 증발 잠열 및 점성 계수 등과 같은 작동유체의 열·물리적 물성과 관 재료와의 친화성, 안정성 및 독성 등이 있다. 또한 작동 유체의 온도 범위는 고체와 액체 그리고 기체가 공존하는 삼중점(triple point)과 임계점(critical point)사이이며, 기-액 상변화 선도의 포화곡선을 따라서 증발과 응축을 반복하므로 작동유체의 작동 온도에 따라 내부의 압력이 결정된다. Table 2는 작동 온도에 따른 대표적인 작동 유체의 종류를 극저온용(0 ~ 200 K), 저온용(200 ~ 550 K), 중온용(550 ~ 750 K), 고온용(750 ~ 3000 K)으로 분류하였고, 임계점의 온도와 압력을 나타내었다. 극저온용으로는 헬륨, 아르곤등이 대표적인 작동 유체이며, 저온용으로는 물과 프레온계 냉매를 비롯한 많은 종류의 작동유체가 있다. 또한, 고온용으로는 나트륨, 칼륨, 리튬 등과 같은 액체금속이 사용된다. 하지만 이러한 온도 범위는 매우 넓기 때문에 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서 이러한 작동 온도에 따른 열 수송 성능에 미치는 작동유체 열물성의 영향을 알 필요가 있다. 그러므로 히트파이프의 정확한 설계를 위해, 작동 유체의 열 물성을 통해서 열 수송 성능을 예측할 수 있는 평가지수인 Merit number를 이용하며, 일반적으로 Merit number의 값이 클수록 열 수송 성능이 우수하다고 알려져 있다. 히트 파이프의 경우는 아래 식과 같으며,

$$M_h = \frac{\rho_f \sigma_f h_{fg}}{\mu_f} \quad (3)$$

썬모사이폰의 경우는 아래식과 같다.

$$M_t = \left[\frac{(k_f)^3 (\rho_f)^3 h_{fg}}{\mu_f} \right]^{0.25} \quad (4)$$

여기서, $\rho_f, \sigma_f, \mu_f, k_f, h_{fg}$ 는 각각 작동유체의 밀도, 표면장력, 점성계수, 열전도율 및 증발잠열이다. 상관식에 나타난 바와 같이 작동유체의 열전도율, 밀도, 표면장력 및 증발잠열이 클수록, 점성계수가 작을수록 열역학적 특성이 우수하다. Fig. 2~3은 작동온도(240~360K)에서 워형 히트 파이프와 썬모사이폰에 사용되는 대표적인 작동 유체의 평가 지수를 나타낸 것이다. 기존의 Merit number는 워형 히트 파이프나 썬모사이폰의 경우에 적용이 가능하도록 각각 제시되어 있으며 버블젯 히트파이프에 적용할 수 있는 기준이 아직까지는 명확하게 정립되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 저온용(150~750K)으로 사용되는 작동유체 중에서 Merit number와 용기(Cu)와의 친화성을 고려하여 R-134a로 결정하였다.

Table 2 Working fluids and temperature ranges

| Logarithmic Temp. Scale | Working Fluids | Melting & Boiling Point, K at 1 atm | Critical Point, K & MPa(abs) | Useful Ranges, K |
|---------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------|
| Cryogenic Temperature (0~200 K) | Helium | 1.0 & 4.21 | 5.2 & 0.227 | 2 ~ 4 |
| | Hydrogen | 13.8 & 20.38 | 33.19 & 1.315 | 14 ~ 31 |
| | Neon | 24.4 & 27.09 | 44.5 & 0.018 | 27 ~ 37 |
| | Nitrogen | 63.1 & 77.35 | 126.19 & 3.397 | 73 ~ 103 |
| | Argon | 83.9 & 87.29 | 150.66 & 4.860 | 84 ~ 116 |
| | Oxygen | 54.7 & 90.18 | 154.58 & 5.043 | 73 ~ 119 |
| | Methane | 90.6 & 111.4 | 190.55 & 4.595 | 91 ~ 150 |
| | Ethane | 89.9 & 184.6 | 305.53 & 4.871 | 150 ~ 240 |
| Low Temperature (200~550 K) | R-11 | 162 & 297 | 470.96 & 4.407 | 233 ~ 393 |
| | R-22 | 113.1 & 232.2 | 369.17 & 4.990 | 193 ~ 297 |
| | R-134a | 169.70 & 246.3 | 374.03 & 4.056 | 213 ~ 300 |
| | R-141b | 253 ↓ & 302.0 | 423.0 ↑ & 1.81 ↑ | 253 ~ 420 |
| | R-142b | 223 ↓ & 263.3 | 398.0 ↑ & 3.37 ↑ | 223 ~ 373 |
| | R-290 | 123 ↓ & 231.1 | 369.70 & 4.248 | 200 ~ 330 |
| | Ammonia | 195.5 & 239.9 | 402.22 & 11.333 | 213 ~ 373 |
| | Ethanol | 158.7 & 351.5 | 513.9 & 6.14 | 273 ~ 403 |
| | Methanol | 175.1 & 337.8 | 512.6 & 8.09 | 283 ~ 403 |
| | Acetone | 180.0 & 329.4 | 508.1 & 4.70 | 273 ~ 393 |
| | Water | 273.1 & 373.1 | 646.99 & 22.064 | 323 ~ 473 |
| | Toluene | 178.1 & 383.7 | 591.8 & 4.10 | 323 ~ 473 |
| Naphthalene | 353.4 & 490 | 748.4 & 4.05 | 408 ~ 478 | |
| Medium Temperature (550~750 K) | Dowtherm | 285.1 & 527.0 | - | 423 ~ 668 |
| | Mercury | 234.2 & 630.1 | - | 523 ~ 923 |
| | Sulphur | 385.9 & 717.8 | - | 530 ~ 947 |
| High Temperature (750~3000 K) | Cesium | 301.6 & 943.0 | - | 723 ~ 1173 |
| | Sodium | 371.0 & 1151 | - | 873 ~ 1473 |
| | Lithium | 453.7 & 1615 | - | 1273 ~ 2073 |
| | Calcium | 1112 & 1762 | - | 1400 ~ 2100 |
| | Lead | 600.6 & 2013 | - | 1670 ~ 2200 |
| | Silver | 1234 & 2485 | - | 2073 ~ 2573 |

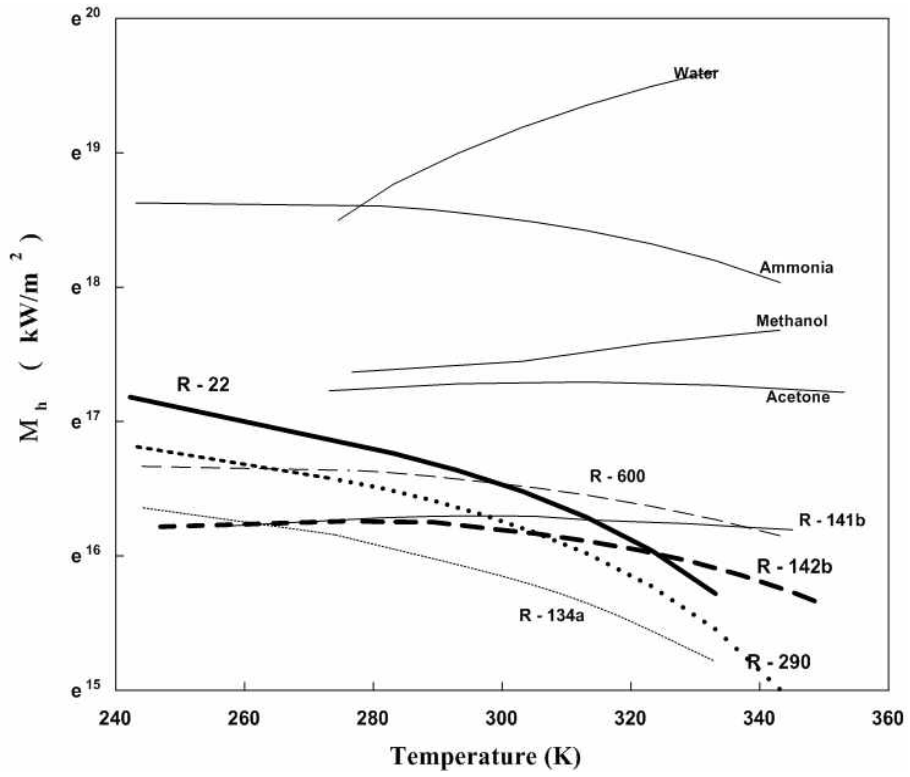


Fig. 2 Merit number of selected working fluids for heat pipe

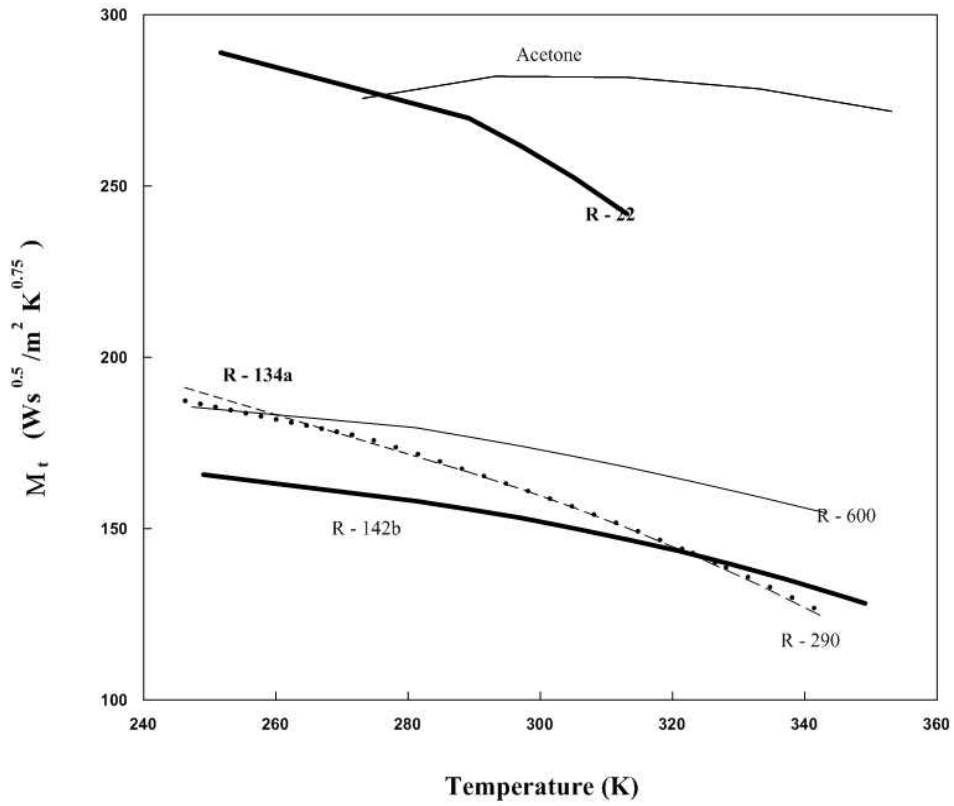


Fig. 3 Merit number of selected working fluids for thermosyphon

Table 3 Generalized results of experimental compatibility tests

| Working Fluids | Compatible Material | Incompatible Material |
|----------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Water | Stainless steel, Copper, Monel, Silica, Nickel, Titanium, | Aluminum, Inconel |
| Ammonia | Aluminum, Carbon steel, Stainless steel, Iron, Nickel, | Copper |
| Methanol | Stainless steel, Iron, Copper, Silica, Nickel, Brass | Aluminum |
| Acetone | Stainless steel, Aluminum, Copper, Brass, Silica, Nickel | |
| R-11 | Aluminum | |
| R-21 | Aluminum, Iron | |
| R-22 | Aluminum, Copper | |
| R-134a | Aluminum, Copper | |
| Heptane | Aluminum | |
| Dowtherm | Stainless steel, Copper, Silica | |
| Lithium | Tungsten, Tantalum, Molybdenum, Niobium | Stainless steel, Nickel, Inconel, Titanium |
| Sodium | Stainless steel, Nickel, Inconel, Niobium | Titanium |
| Cesium | Titanium, Niobium | |
| Mercury | Stainless steel | Molybdenum, Nickel, Inconel, Tantalum, Titanium, Niobium |
| Lead | Tantalum, Tungsten | Stainless steel, Nickel, Inconel, Titanium, Niobium |
| Silver | Tantalum, Tungsten | Rhenium |

제 3 절 버블젯 히트파이프 고효율화 방안

1. 증발부 간극(clearance) 변경

Nishikawa와 Fujita는 대기압에서 증류수는 3 mm또는 그 이상의 틈에서 비등하며, 그들의 직경은 평균 3 mm에서 3.5 mm로 Fig. 4는 전형적인 기포생성을 보여주고 있다. 수직의 좁은 공간에서의 비등은 그들의 비등양식의 차이에 따라 두 개의 비등영역으로 나누어진다. 하나는 isolated bubble region으로 작은 구모양의 많은 기포들이 가열면에서 생성되어 분리되고, 떠오른다. 다른 하나는 coalesced bubble region으로 적은 빈도지만 규칙적으로 큰 coalesced 기포들이 생성되어 좁은 공간을 채우고, 그 후 분리되어 떠오른다.

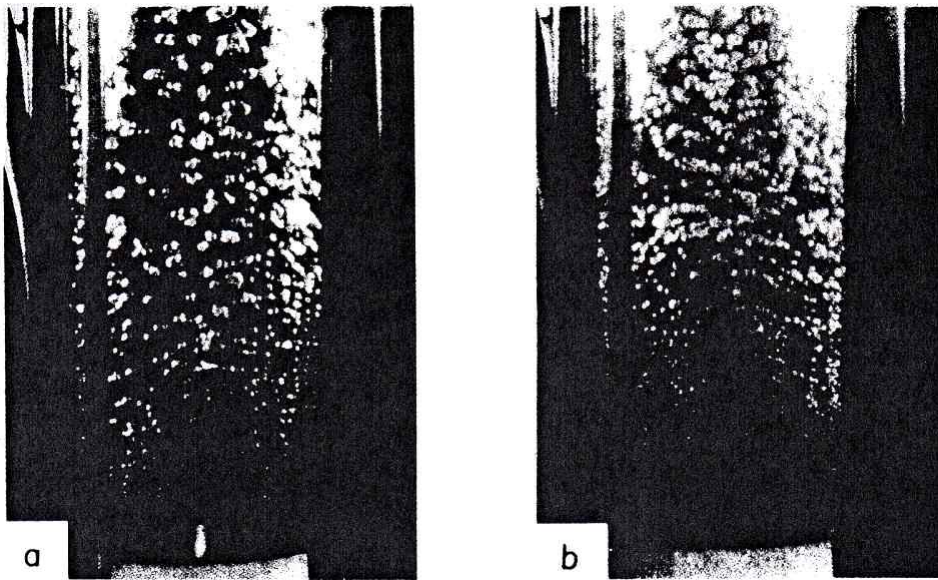


Fig. 4 Boiling behavior in narrow spaces (at atmospheric pressure within an isolated bubble region). (a) Clearance is 5.04 mm, liquid is distilled water, $q = 47500 \text{ W/m}^2$, $\alpha = 7090 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T = 6.70 \text{ K}$. (b) Clearance is 5.04 mm, liquid is 15 ppm sodium oleate aqueous solution, $q = 47500 \text{ W/m}^2$, $\alpha = 7940 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T = 5.99 \text{ K}$

틈이 3 mm보다 더 작아지는 경우에는, isolated 기포는 더 이상 관찰되지 않고, 그 공간은 Fig. 5와 같이 큰 coalesced 기포로 채워지며, 그 행동은 isolated bubble region과는 상이했다. 예를 들어, 틈이 0.97 mm의 경우, 이러한 coalesced 기포들이 그 높이가 30 mm까지 바로 확장하여 순간적으로 전체의 가열면을 덮기도 하였다. 하나의 coalesced 기포가 생성될 때, 기포에 의해 덮여진 얇은 액막이 관찰되었다.

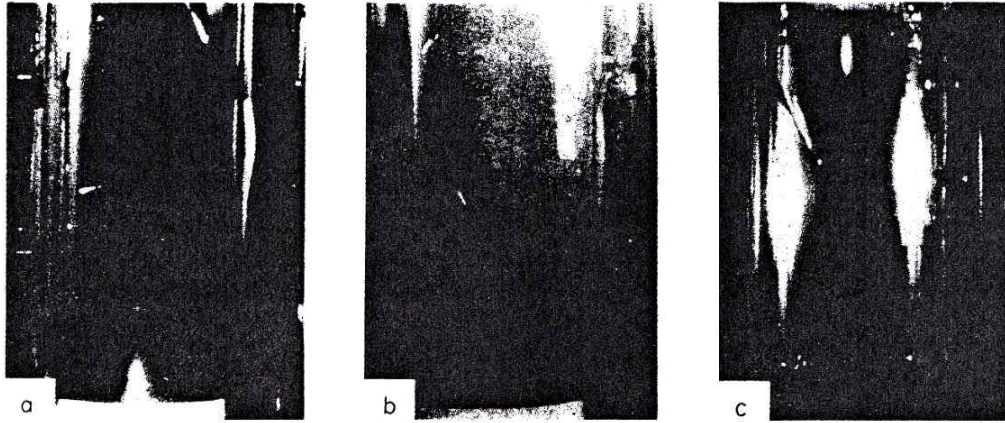


Fig. 5 Boiling behavior in narrow spaces (at atmospheric pressure, within a coalesced bubble region). (a) Clearance is 0.97 mm, liquid is distilled water, $q = 2950 \text{ W/m}^2$, $\alpha = 2750 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T = 1.08 \text{ K}$. (b) Clearance is 0.97 mm, liquid is 15 ppm sodium oleate aqueous solution, $q = 2900 \text{ W/m}^2$, $\alpha = 2640 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T = 1.10 \text{ K}$. (c) Clearance is 1.64 mm, liquid is distilled water, $q = 5310 \text{ W/m}^2$, $\alpha = 2820 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Delta T = 1.89 \text{ K}$.

$$\alpha \propto q^{2/3} \quad (5)$$

$$q \propto \Delta T^3 \quad (6)$$

식 (5)는 heat flux q 에 대한 heat transfer coefficient α 의 관계식을 나타낸 것이다. 또한 heat flux q 와 온도차 ΔT 의 관계식은 공통적으로 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 Fig. 6을 보면 알 수 있듯이, coalesced bubble region에서의 그래프로 틸이 더 작아질수록 α 가 커지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7은 coalesced bubble region 과 isolated bubble region에서의 heat transfer coefficient를 나타낸 것으로 isolated bubble region에 비해 coalesced bubble region의 heat transfer coefficient가 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

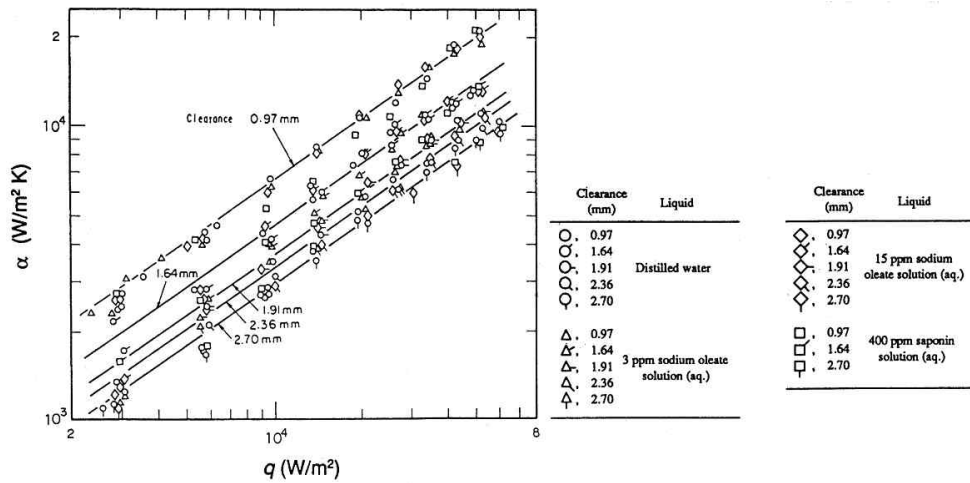


Fig. 6 Relationship among heat transfer coefficient, heat flux, and clearance (in mm), of boiling water, atmospheric pressure, coalesced bubble region)

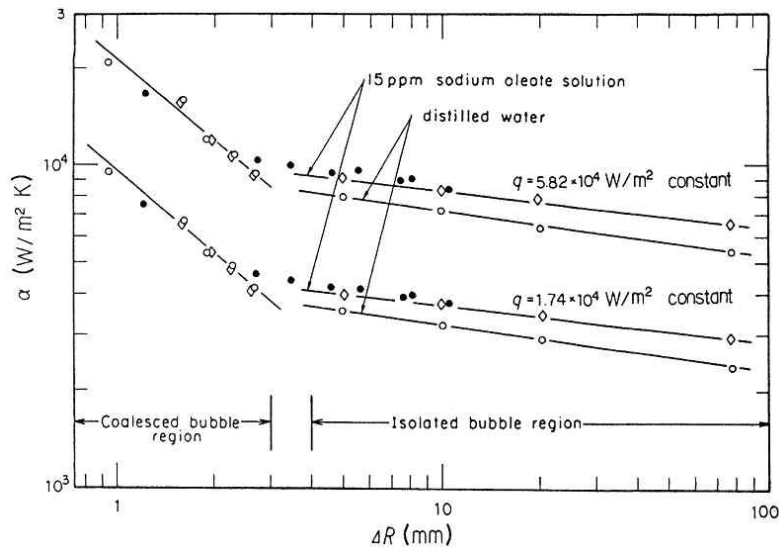


Fig. 7 Variation of heat transfer coefficient due to change in clearance of boiling space (atmospheric pressure, constant heat flux). Data for a vertical copper cylinder with 80 mm diameter and 304 mm height are shown for, distilled water (○) and 15 ppm sodium oleate aqueous solution (◇) (from Ishibashi and Nishikawa). Data for a vertical copper tube with 19.6 mm diameter and 479 mm height and also for a vertical steel tube 21.5 mm diameter and 479 mm height are shown for distilled water (●) (from Chernobyl'skii and Tananaiko).

Table 4 Heat flux in relation to different clearances and pressures^{a,b}

| Pressure | Clearance(mm) | | | | | | |
|----------|---------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.57 | 0.97 | 1.11 | 1.58 | 1.64 | 1.91 | 1.05 |
| 0.1 | 2870- | 23675- | 2840- | 4490- | 2790- | 2790- | 4690- |
| | 92575 | 57800 | 89120 | 75620 | 55240 | 57570 | 76580 |
| 0.2 | 4390- | | 6520- | 4745- | | | 4590- |
| | 74850 | | 89400 | 76060 | | | 70790 |
| 0.4 | 3010- | | 6370- | 4270- | | | |
| | 89030 | | 88810 | 78290 | | | |
| 1.1 | 4450- | | 11130- | | | | |
| | 92840 | | 73040 | | | | |

| Pressure | Clearance(mm) | | | | | |
|----------|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 2.36 | 2.70 | 5.04 | 10.20 | 20.31 | 83.5 |
| 0.1 | 7675- | 2440- | 10930- | 11400- | 10820- | 14190- |
| | 58030 | 66520 | 58150 | 65360 | 65830 | 57100 |
| 0.2 | | | | | | |
| 0.4 | | | | | | |
| 1.1 | | | | | | |

^a Heat flux in units of watts per square meters.

^b Portion above the solid line for the coalesced bubble region; below the solid line, the isolated bubble region.

Table 4는 압력과 클리어런스에 따른 최대 히트플럭스를 나타낸 표이다. 클리어런스와 압력이 변화함에 최대 히트플럭스 역시 변화하고 있으며, 그 경향성이 뚜렷하지 않은 것을 볼 수 있다. 버블젯 히트파이프 역시 이중관 형태를 가지며 클리어런스 변화에 따른 성능변화가 예상되어진다. 따라서 버블젯 히트파이프의 적정 클리어런스를 결정하기 위한 연구를 진행하였다.

(1) 증발부 간극(clearance) 변경에 따른 성능평가

증발부간극(clearance)은 증발부 내관과 외관 사이의 간극을 말하며 Fig. 8과 같다. 버블젯 히트파이프의 제원은 Table 5에 표시하였다. 작동유체는 선행연구를 통해 R-134a를 사용하였으며 냉매 차질률은 버블젯 히트파이프 내부체적의 50%로 하였다. 가열원으로는 카트리지 타입의 전기히터를 사용하였으며 실험장치의 개략도는 Fig. 9와 같다.

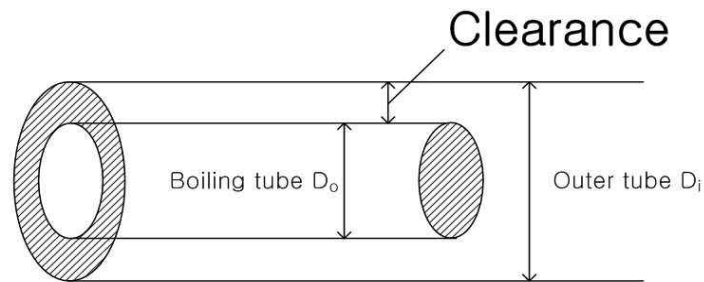


Fig. 8 The evaporating section of BJLHP

Table 5 Specification of BJLHP

| Parameter | | Specification | | |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------|-------|
| Heater | | 220V, 100W | | |
| B J L H P | Material | | Copper | |
| | Evapo- rating section | Outer tube (mm) | Length | 90.0 |
| | | | Pipe [I.D.] | |
| | | | case 1 (clearance 0.79) | 17.40 |
| | case 2 (clearance 2.17) | 20.22 | | |
| | case 3 (clearance 3.76) | 23.40 | | |
| | Boiling tube (mm) | Length | 50.00 | |
| | | Pipe [O.D.] | 15.88 | |
| Condensing section (mm) | | Length(loop) | 1,700.0 | |
| | | Pipe [O.D.] | 9.5 | |

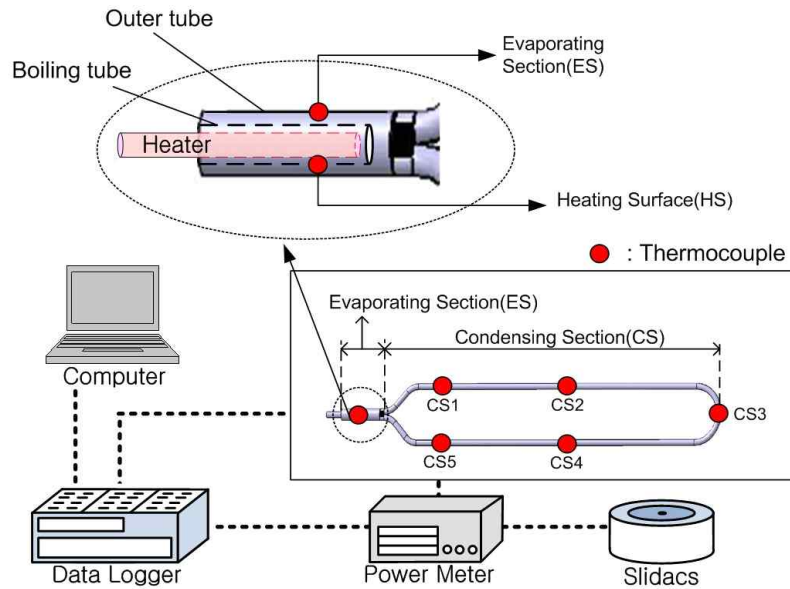


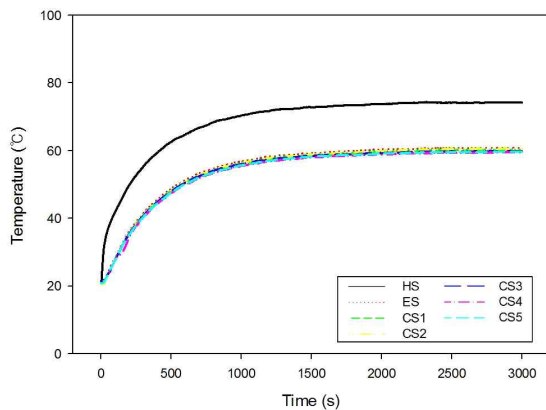
Fig. 9 Schematic of experimental equipment

(2) 실험방법

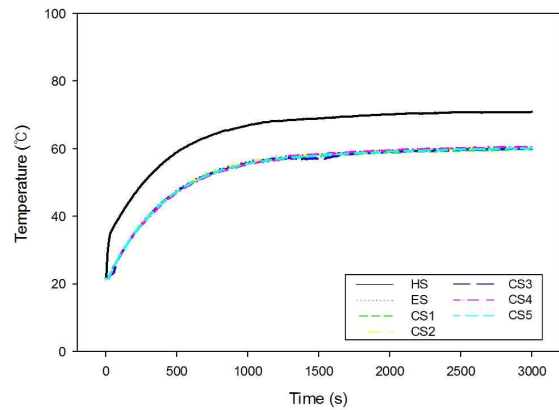
본 실험은 각각의 clearance에 대해 히터 입열량을 25W, 50W, 75W로 변화시켜 수행되었으며, 버블젯 히트파이프의 응축부는 자연대류로 냉각됐다(실내온도: 약 22°C). Fig. 9에서와 같이 증발부 2개 지점(HS, ES), 응축부 5개 지점(CS1-5)의 온도를 측정하였으며, 증발부 온도와 응축부 평균온도의 온도차를 계산하고 각 케이스별의 유효열전도율을 구하여 열적 성능을 비교 분석하였다.

(3) 실험결과

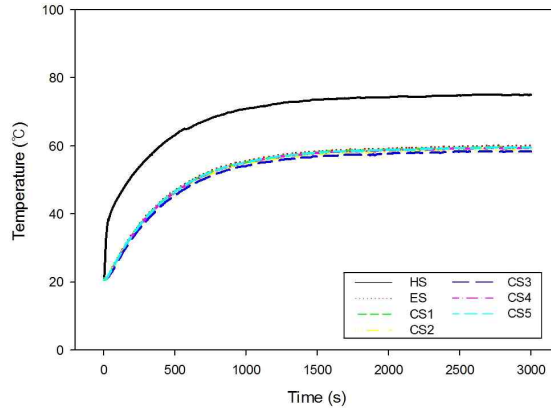
아래 그래프는 각 케이스별로 25W의 히터 입열량을 인가한 경우를 나타내었다.



(a) case1



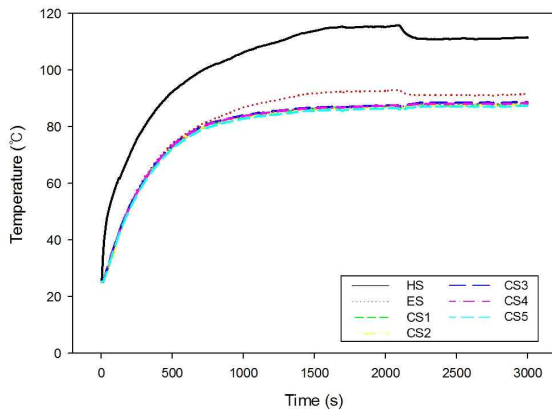
(b) case2



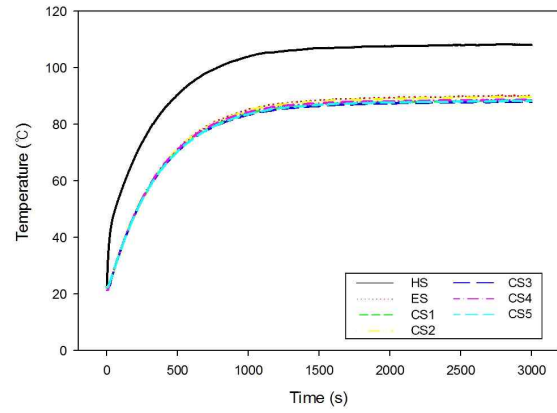
(c) case3

Fig. 10 Temperature profile of each case(25W)

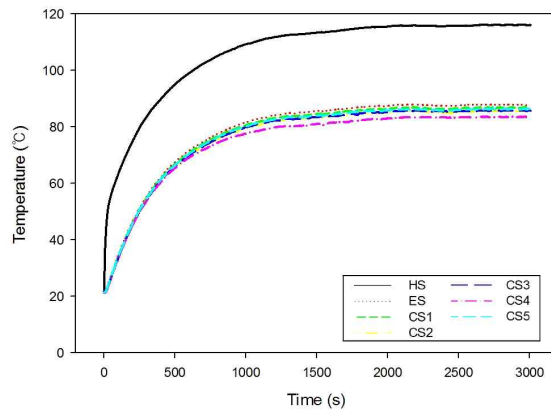
아래 그래프는 각 케이스별로 50W의 히터 입열량을 인가한 경우를 나타내었다.



(a) case1



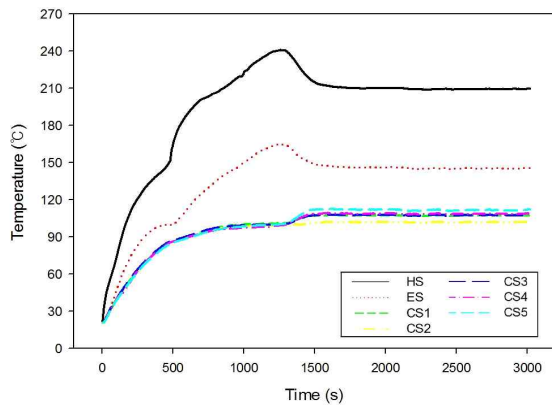
(b) case2



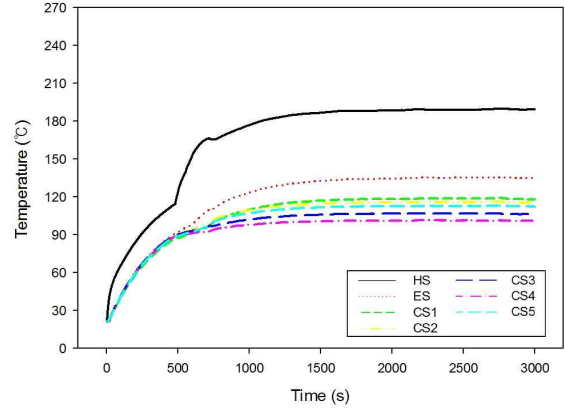
(c) case3

Fig. 11 Temperature profile of each case(50W)

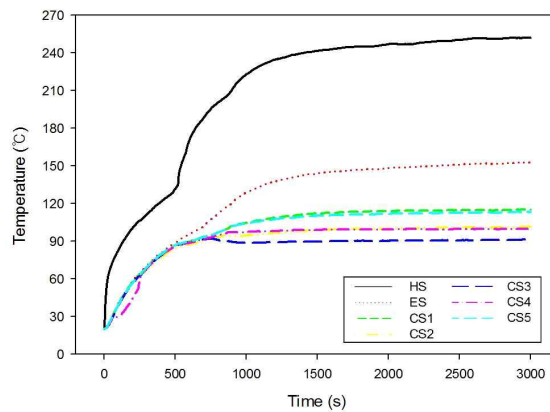
아래 그래프는 각 케이스별로 75W의 히터 입열량을 인가한 경우를 나타내었다.



(a) case1



(b) case2



(c) case3

Fig. 12 Temperature profile of each case(75W)

각부의 온도가 거의 일정하게 되는 열적 안정화 시간을 작동 1,800(s) 이후로 할 때, 증발부(ES)와 응축부(CS1-5의 평균값)의 안정화 온도 및 그 온도차는 Table 6과 같다. 증발부와 응축부 사이의 유효열전도율은 식(1)과 같이 계산되며 각 case별 유효열전도율 계산 결과 값은 Table 7과 같다.

Table 6 Final temperature

| | | ES(°C) | CS(°C) | ΔT (°C) |
|-----|-------|--------|--------|-----------------|
| 25W | case1 | 60.1 | 59.3 | 0.82 |
| | case2 | 60.1 | 59.6 | 0.45 |
| | case3 | 59.7 | 58.8 | 0.87 |
| 50W | case1 | 91.2 | 87.8 | 3.4 |
| | case2 | 89.7 | 88.3 | 1.47 |
| | case3 | 87.6 | 85.3 | 2.37 |
| 75W | case1 | 145.5 | 107.3 | 38.26 |
| | case2 | 135.1 | 110.9 | 24.19 |
| | case3 | 150.3 | 103.4 | 46.81 |

Table 7 Effective thermal conductivities

| | | 25W | 50W | 75W |
|----------------|-------|------|------|------|
| ke (kW/m·K) | case1 | 5.09 | 2.53 | 0.33 |
| | case2 | 9.29 | 5.69 | 0.52 |
| | case3 | 4.81 | 3.53 | 0.27 |

입열량 25W를 인가한 경우, 각 case가 거의 동일한 온도 변화를 보이며 안정화되는 것을 볼 수 있다. 입열량 50W를 인가한 경우 case2가 가장 고른 증발·응축부 온도 변화를 보이며 HS (가열면, boiling tube표면온도)온도가 가장 낮다. 이는 boiling tube 외표면 에서의 열전달이 다른 케이스에 비해 원활하게 이루어진 것으로 boiling tube 외표면이 작동유체액에 젖는 정도가 가장 안정적이기 때문이라 판단된다. 입열량 75W를 인가한 경우 전체적으로 HS온도가 5-600(s) 정도에서 급격히 상승하는 dry out이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이전 입열량 조건 들에서와 같이 case2가 가장 고른 증발·응축부 온도 변화를 보이며 HS온도가 가장 낮다. 이 역시, 3가지 case중 boiling tube 외표면이 젖는 정도가 다른 case에 비해 안정적이기 때문이라 판단된다. case3의 경우, 증발·응축부 온도차가 가장 크고 HS온도가 가장 높다. 이는 큰 clearance, 즉 큰 환상공간체적으로 인해 boiling tube 외표면이 작동유체액에 젖는 정도가 가장 작아 증발부 내 작동유체 증기의 과열 정도가 커진 것이 원인이라 판단된다. case1의 경우, dry out 이후 약 1200-1300(s) 정도에서 HS, 증발부 온도가 낮아지며 동시에 응축부 온도가 상승하는 것을 볼 수 있는데 이는 증발부 환상공간 내 작동유체 액의 비율이 커져 boiling tube 외표면이 다시 작동유체 액에 젖는 'rewetting'이 활발해지면서 HS, 증발부 온도는 낮아 지고, 응축부로 열전달이 활발해져 응축부 온도가 상승하는 것으로 판단된다. 이는 입열량 50W의 case2에서도 2100(s) 이후 소폭 발생하는 것을 살펴볼 수 있다.

(4) 결론

- ① 입열량 조건이 작을수록 버블젯 히트파이프의 응축부온도 분포가 균일하게 나타났으며, 증발부와 응축부 평균의 온도차가 작고 유효열전도율이 크게 나타났다.
- ② 75W의 입열량을 인가한 경우 모든 조건에서 히팅표면 온도가 급격히 증가하는 dry out이 발생한다는 것을 확인할 수 있었으며, 그에 따라 유효열전도율이 크게 감소하였다.
- ③ 좁은 환상공간을 가지는 case1(clearance 0.79mm)에 입열량 50W와 75W를 인가한 경우에 dry out이 발생한 이후 rewetting이 활발해지며 증발부 온도는 감소하고 응축부 온도는 증가하는 현상을 확인할 수 있었다.
- ④ 동일한 입열량 조건에서 case2(clearance 2.17mm)의 응축부표면 평균온도가 높게 나타났으며, 유효열전도율 또한 높게 나타났다.
- ⑤ 이상의 결과에서 최적 clearance는 2.17mm(case2)로 나타났고, 최적 입열량은 25W로 나타났다. 버블젯 히트파이프 열적성능에 관한 최적 clearance(2.17mm) 및 최적 입열량(25W)을 통해 시설원예용 근권 난방시스템의 최적화, 고효율화 할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 비등촉진 전열면 증발부 사용

Fig. 13는 다공질 표면 cavity에서 버블이 발생하는 원리를 나타낸 것이며 Cavity 내의 액체에 끓는점 이상의 열이 가해지면 비등하며 버블이 발생하게 된다. 비등촉진 전열면 증발부를 통해 전열면적의 확대와 동시에 공동(空洞, cavity)이 생성되어 핵비등이 더 잘 일어나게 된다. Fig. 14~15를 보면 다공질 표면을 가지는 비등촉진관을 사용했을 때와 기존의 나관을 사용했을 때를 비교한 그래프로 비등촉진관을 사용했을 때 낮은 과열도에서도 높은 열유속을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 열전달계수가 커지게 되고 다공성 표면이 열전달 성능을 향상시킨다는 알 수 있다. 이에 작동유체의 비등이 발생하는 증발부에 고성능 비등촉진 전열면을 채용하여 버블젯 히트파이프 열적성능에 대한 연구를 진행하였다.

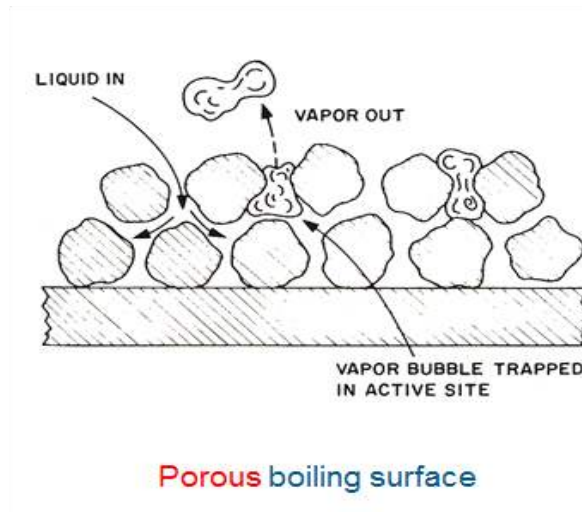


Fig. 13 Principle of boiling mechanism

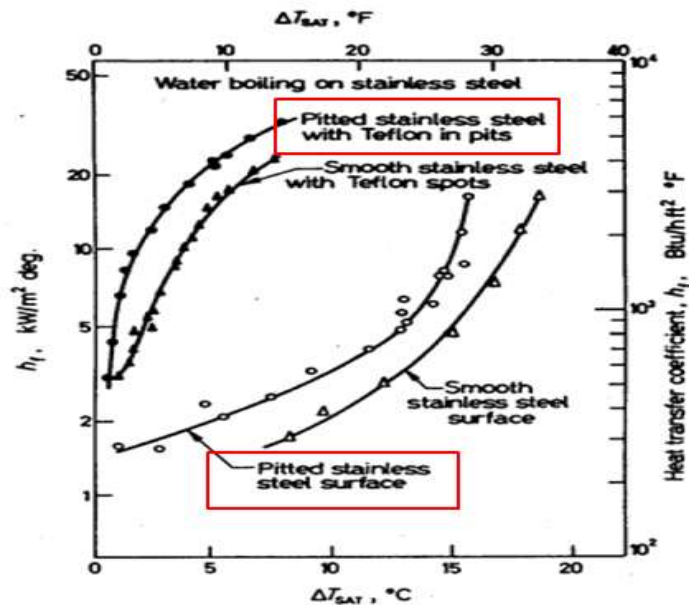


Fig. 14 Enhancement for water boiling at 101 kPa (1 atm) on a stainless steel surface having minute nonwetted spots (30-60 spots/cm², 0.25 mm diameter or less)

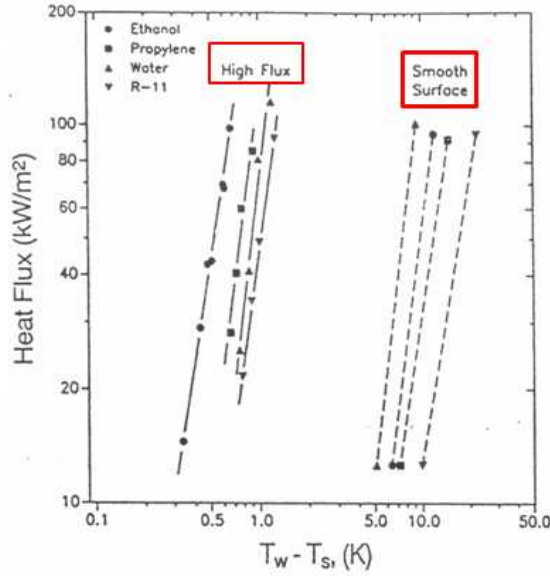


Fig. 15 Enhancement provided by porous High-Flux™ surface for three fluids boiling at 101kPa (1atm), as reported by Gottzmann et al. [1971,1973]

(1) 비등축진 전열면 증발부에 따른 성능평가

버블생성의 원인인 핵비등은 가열표면의 공동에서 발생한다. 따라서 고성능 열교환기에서는 공동을 가진 표면이나 거친 표면이 사용된다. 이에 본 연구에서는 작동유체의 비등이 발생하는 증발부에 고성능 비등축진 전열면을 채용하여, 증발부에 나관을 사용한 기존의 버블젯 히트파이프와 열적 성능을 비교, 평가하였다 증발관 중 비등축진 전열면을 가진 소결관과 비등축진관의 외표면 형상은 Fig. 16과 같다. 소결관과 비등축진관의 제원은 Table 8에 표기하였으며, Table 9는 본 연구에서 사용된 버블젯 히트파이프의 제원을 보여준다. 작동유체는 R-141b를 사용하였으며 냉매 차질률은 버블젯 히트파이프 내부체적의 50%로 하였다. 가열원으로는 카트리지 타입의 전기히터를 사용하였고 실험장치의 개략도는 Fig. 17과 같다.

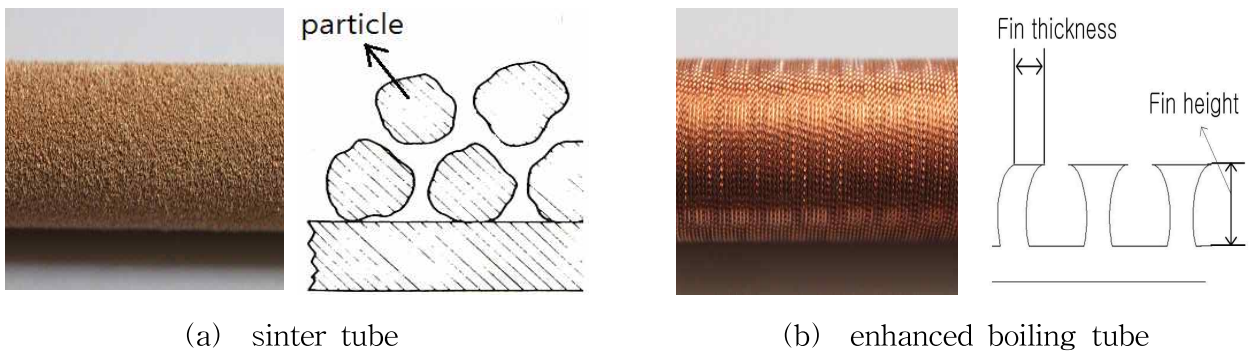


Fig. 16 Enhanced boiling surface

Table 8 Specification of sinter and enhanced boiling tube

| | | |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------------|
| Sinter tube | Powder | Sn (10%), P (0.35%), Cu (89.65%) |
| | Particle size (mm) | 0.18~0.25 |
| | Sintering temp. (°C) | 900 |
| Enhanced boiling tube | Fin thickness (mm) | 0.3 |
| | Fin height (mm) | 0.75 |
| | FPI (EA) | 40 |

Table 9 Specification of BJLHP

| Parameter | | Specification | | |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------|------------|------|
| Heater | | 220V, 100W | | |
| B J L H P | Material | | Copper | |
| | Evapo- rating section | Outer tube (mm) | Length | 90.0 |
| | | | Pipe [O.D] | 25.4 |
| | Boiling tube (mm) | Length | 50.0 | |
| | | Pipe [O.D] | | |
| | | ·Smooth tube | 19.0 | |
| ·Sinter tube | | 18.2 | | |
| ·Enhanced boiling tube | 19.0 | | | |
| Condensing section (mm) | | Length(loop) | 1,700.0 | |
| | | Pipe(O.D.) | 12.7 | |

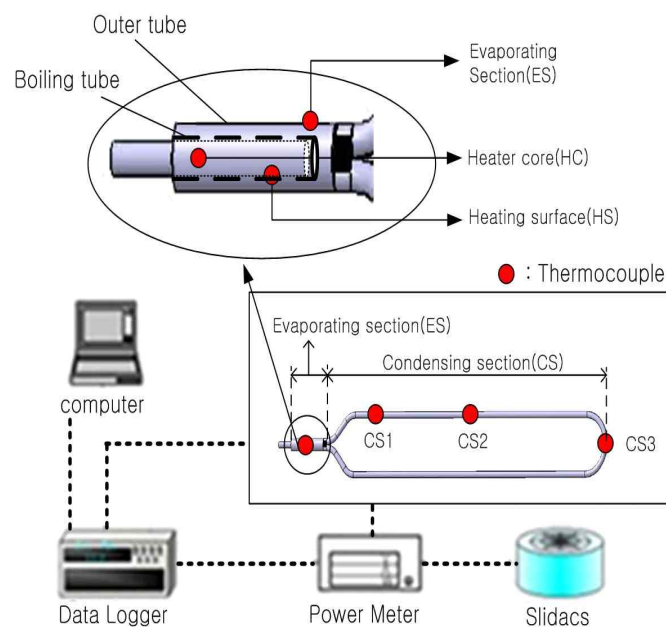


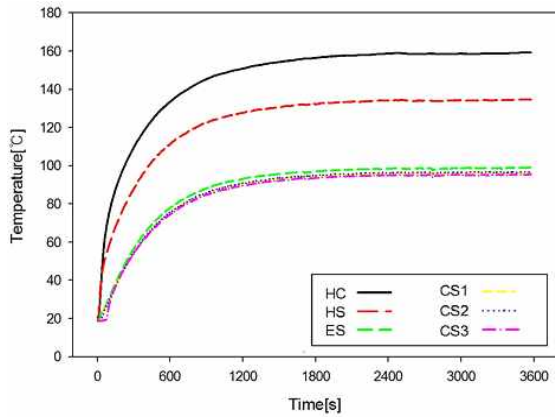
Fig. 17 Schematic of experimental equipment

(2) 실험방법

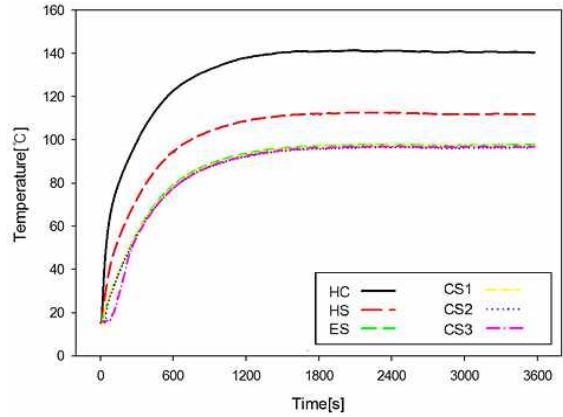
본 실험은 각각의 증발관에 대해 히터 입열량을 75W와 100W로 변화시켜 수행되었다. Fig. 17에서와 같이 6개 지점(HC, HS, ES, CS1~3)의 온도를 한 시간 동안 측정하였고 이를 통해 버블젯 히트파이프의 열적성능을 평가하였다.

(3) 실험결과

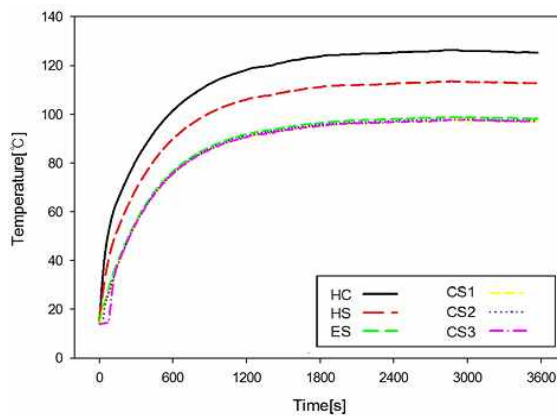
Fig. 18은 입열량 75W인 경우의 버블젯 히트파이프 각부 온도분포이고, Fig. 19에는 입열량 100W의 온도분포를 나타내었다. 각부의 온도가 거의 일정하게 되는 열적 안정화 시간을 작동 1,800 s 이후로 할 때, 증발부(ES)와 응축부(CS1, CS2, CS3의 평균값)의 안정화 온도 및 그 온도차는 Table 10과 같다. 열적 안정화 시간에 대해서는 시정수와 안정화 온도의 90% 도달 시간을 Table 11에 나타내었다. 증발부와 응축부 사이의 유효열전도율은 식(1)과 같이 계산된다. 증발관 형상별 유효열전도율 계산 결과값은 Table 12과 같다.



(a) smooth tube BJLHP

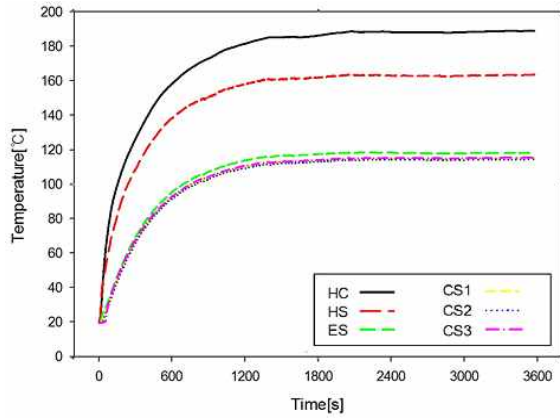


(b) sinter tube BJLHP

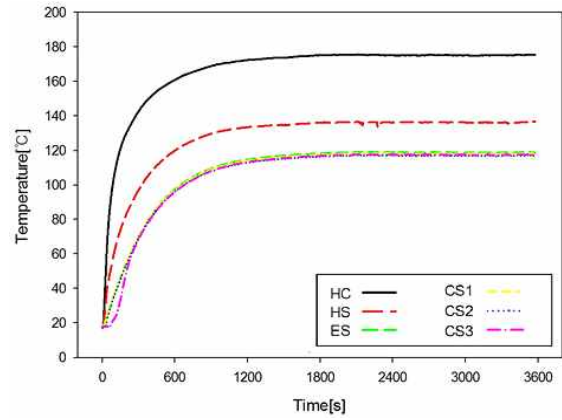


(c) enhanced boiling tube BJLHP

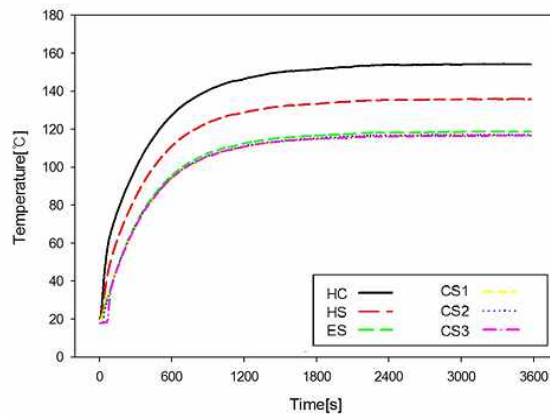
Fig. 18 Temperature profile of each case(75W)



(a) smooth tube B JLHP



(b) sinter tube B JLHP



(c) enhanced boiling tube B JLHP

Fig. 19 Temperature profile of each case(100W)

Table 10 Final temperature (1,800 s \sim)

| | | ES(°C) | CS(°C) | ΔT (°C) |
|------|-----------------------|--------|--------|-----------------|
| 75W | Smooth tube | 98.6 | 95.9 | 2.7 |
| | Sinter tube | 97.7 | 96.9 | 0.8 |
| | Enhanced boiling tube | 98.2 | 97.2 | 1.0 |
| 100W | Smooth tube | 118.1 | 114.7 | 3.4 |
| | Sinter tube | 118.8 | 117.5 | 1.3 |
| | Enhanced boiling tube | 118.4 | 116.5 | 1.9 |

Table 11 Thermal time constant and stable time

| | | 75W | 100W |
|-----------------------------------|-----------------------|-----|------|
| Thermal time constant (s) [63.2%] | Smooth tube | 350 | 350 |
| | Sinter tube | | |
| | Enhanced boiling tube | | |
| Stable Time (s) [90%] | Smooth tube | 950 | 950 |
| | Sinter tube | 850 | 800 |
| | Enhanced boiling tube | 900 | 900 |

Table 12 Effective thermal conductivities

| | | 75W | 100W |
|----------------|-----------------------|------|------|
| k_e (kW/m·K) | Smooth tube | 10.1 | 10.7 |
| | Enhanced boiling tube | 27.4 | 19.2 |
| | Sinter tube | 36.1 | 32.1 |

(4) 결 론

- ① 증발관으로 소결관을 사용한 버블젯 히트파이프와 비등축진관을 사용한 버블젯 히트파이프의 응축부 표면온도가 나관을 사용한 버블젯 히트파이프의 응축부 표면온도와 비교하여 1~3℃ 높게 나타났다.
- ② 소결관 버블젯 히트파이프에 히터 입열량 75W를 가했을 때 증발부와 응축부의 표면온도 차이가 0.8℃로 가장 균일한 온도 분포를 보였다.
- ③ 안정화 온도의 90%에 도달하는 시간은 소결관 버블젯 히트파이프에 히터 입열량 100W를 가했을 때 800 s로 이 경우의 열적응답속도가 가장 우수한 것으로 나타났다.
- ④ 소결관 버블젯 히트파이프에 히터 입열량 75W를 가했을 때 유효 열전도율이 36.1kW/m·K로 세 타입 중 가장 우수한 열전달 성능을 보였다.
- ⑤ 이상의 결과에서 소결관을 사용한 버블젯 히트파이프의 열적성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 때문에 소결관을 사용한 버블젯 히트파이프를 이용하여 시설원예용 근권 난방시스템을 고효율화 할 수 있을 것으로 판단된다.

제 4 절 버블젯 히트파이프 작동특성 분석

1. 버블젯 히트파이프 내부유동 가시화 및 특성분석

기존의 버블젯 히트파이프 연구에서는 증발부의 핵비동에 의한 기포생성 및 고온 고속의 증기 기류에 의하여 작동한다고 설명하고 있으나, 관내 유동에 대한 분석은 부족하여 정확한 작동원리 분석이 어려웠다. 때문에 버블젯 히트파이프의 내부 작동유체의 유동특성을 분석하기 위해 내부유동 가시화 실험을 진행하였다. Fig. 20은 가시화 실험을 위한 가시화용 버블젯 히트파이프의 사진이다. 본 연구의 버블젯 히트파이프는 작동유체의 관내유동을 확인 가능하도록 투명한 석영유리관으로 제작하였다. 가시화장치는 히터를 삽입 할 수 있도록 설계 된 증발부와 작동유체의 방열이 일어나는 두 개의 직관을 가진 응축부로 구성되어 있다. 증발부는 Fig. 21과 같이 카트리지 전기 히터를 삽입할 수 있도록 응축관과 평행 방향의 이중관 형태로 설계하였다. 이때 증발부 외관(outer tube)의 안쪽 면과 히터가 삽입되는 내관(inner tube)의 바깥 면의 사이의 간격을 나타내는 클리어런스(clearance)는 2.5mm이다. 응축부는 작동유체의 순환을 통해 증발부의 액귀환이 원활하도록 두 개의 직관의 끝부분을 'U'자 형상의 루프 형태로 연결하여 설계하였으며, 'U'자관 한 쪽 부분에 작동유체 주입관을 만들어 작동유체를 주입할 수 있도록 하였다. 이때 직관 사이의 간격은 약 20mm이다. 가시화용 버블젯 히트파이프 재료의 특성상 내압강도가 낮은 점을 고려하여 작동유체는 기존의 버블젯 히트파이프의 작동유체로 많이 사용되는 냉매 R-134a와 유동상태가 크게 다르지 않고, 동일 온도영역에서 압력이 상대적으로 낮은 동일 HFC계 냉매인 R-141b를 작동유체로 사용하였다. 가시화 장치에 대한 상세 제원은 Table 13에 나타내었다.

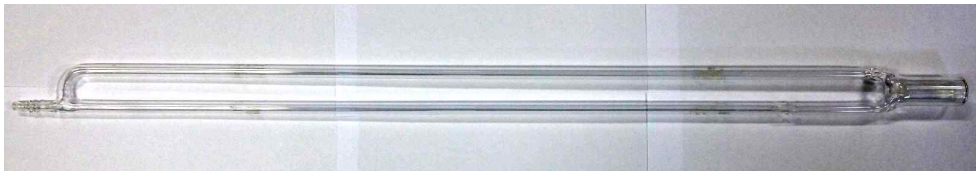


Fig. 20 Picture of transparent BJLHP

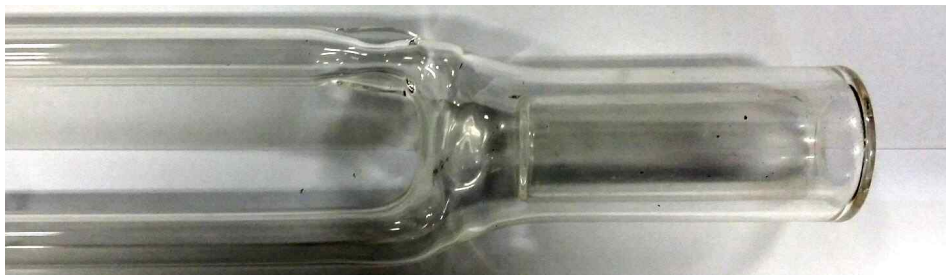


Fig. 21 Picture of the evaporating part of transparent BJLHP

Table 13 Specification of transparent BJLHP

| Parameter | | Specification | |
|------------------|------------|---------------|------------|
| Material | | Quartz glass | |
| Evaporating Part | Outer Tube | L [mm] | 70 |
| | | d_i [mm] | 23.5 |
| | Heater | L [mm] | 50 |
| | | d_o [mm] | 16.5 |
| Condensing Part | | L [mm] | 1400(Loop) |
| | | d_i [mm] | 9 |

2. 실험방법

버블젯 히트파이프 가시화 실험장치의 구성은 Fig. 22와 같다. 히터와 증발부의 접촉부에 써멀그리스(thermal grease)를 이용하여 히터 삽입관과 히터사이의 유격을 최소화 하여 전도 열저항을 최소화 하였다. 히터 인가 전력은 슬라이덱스(slidacs)와 파워 미터(power meter)로 전압을 조절하여 전기 히터에 60W의 열량을 증발부에 인가하였으며, 증발부와 응축부의 높이가 같은 수평상태에서 실험을 진행하였다. 또한 작동유체와 비중이 비슷한 적색 파우더를 작동유체에 첨가하여 작동유체의 액체의 중간 부분과 아래 부분의 유동을 확인 가능하게 했다. 실험은 공기유동이 일어나지 않는 밀폐된 상온(20℃)의 실내공간에서 실시하였다. 버블젯 히트파이프 각 부분에서의 관내 유동을 분석하기 위하여 증발부 부분을 'A', 응축부 중간부분을 'B', 응축부 말단부분을 'C'로 3구역으로 구분하였다. 작동유체의 관내 유동은 구역별로 초고속 비디오 카메라(1 J4, Nikon)를 사용하여 관의 측면을 400 fps로 동영상 촬영하였으며, 이를 영상 편집 프로그램(adobe premium pro)을 이용하여 0.01초 단위로 각 부분에서의 유동 상태를 사진으로 편집하여 관내 유동 양상을 확인하였다.

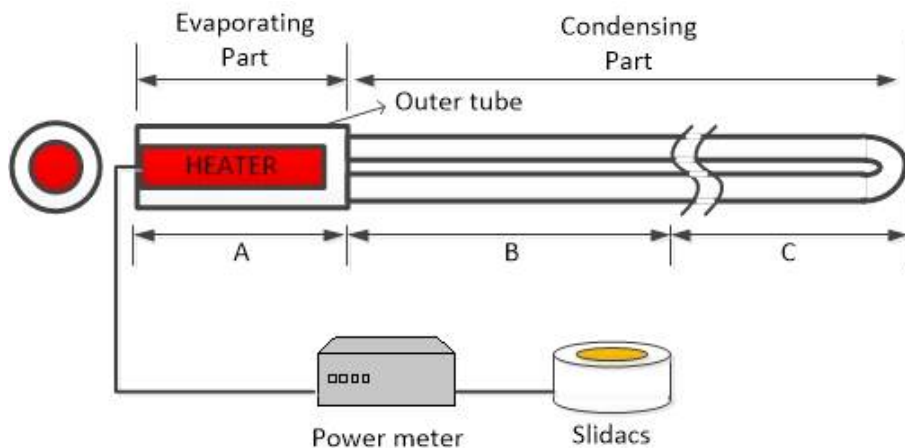


Fig. 22 Schematic diagram of the visualized BJLHP

3. 실험결과

Fig. 23은 전기히터 작동 시 증발부('A'부분)의 비등을 측면에서 촬영한 사진이며, Fig. 24는 'A'부분을 도식화한 것이다. 증발부의 아래쪽 면으로 액체 상태의 작동유체가 존재하며 히터 열원에 의해 핵비등이 발생한다. 기포의 크기는 히터 상단으로 올라갈수록 커지며, 응축관 쪽으로 이동하며 성장한다. 이러한 기포의 성장은 증발부의 압력을 증가시킨다. 기포의 생성량은 액체 상태의 작동유체가 유입되는 히터 앞(Fig. 23의 중간)에서는 적으며, 히터 뒤(Fig. 23의 오른쪽 끝)에서는 상대적으로 많다. 액체 상태의 작동유체는 관내의 위쪽과 아래쪽의 유동양상이 다르게 나타났다. 위쪽은 기체의 유동과 같은 방향으로 물결을 일으키며 유동했다. 하지만 아래쪽은 기체의 이동방향과 반대로 히터 쪽으로 이동하며 히터 가열면을 지속적으로 재적심(rewetting)시킨다. Fig. 25는 증발부와 응축관의 연결부에서 시간에 따른 내부 유동 변화를 0.01초 간격으로 측면 촬영한 사진이다. 증발부에서 생성된 기포는 응축부로 이동하며 합쳐지고, 응축관내의 상단에서 고속의 기체 유동을 일으킨다. 이러한 고속의 기체 유동은 응축관내 작동유체 액면에 응축부 말단 방향으로 파형류(wave flow)를 발생시킨다. 또한 일정한 주기로 액면의 진폭이 커지면서 액체 상태의 작동유체가 응축관 상단에 붙어 이동하는 슬러그 유동(slug flow)이 간헐적으로 발생한다. Fig. 26은 응축관 중간부분('B'부분)에서 시간에 따른 내부 유동 변화를 0.1초 간격으로 측면에서 촬영한 사진이며, Fig. 27은 이를 도식화하여 작동유체의 진행방향을 표시한 것이다. 이 부분에서도 'A'부분과 마찬가지로 파형류와 슬러그류의 유동이 나타났다. 파형류의 경우 'A'부분에 비해 진폭이 작아져 기체의 속도가 상대적으로 느려진 것을 확인 할 수 있었다. 슬러그류의 경우, 유동속도가 'A'에 비해 느리며, 증발부에서 응축부 말단으로 이동하면서 그 크기가 커진다. Fig. 28은 응축부 말단('C'부분)에서의 내부 유동을 0.2초 간격으로 측면에서 촬영한 사진이다. 응축부 말단에서의 내부 유동은 기체와 액체가 모두 느린 속도로 수평관을 흐를 때 나타나는 성층류(stratified flow)와 잔잔한 파형류로 나타난다. 증발부에서 생성된 작동유체 액면의 파동은 U자관을 지나 순환한다. 서로 다른 방향의 액면의 파동이 만났을 때 파동이 소멸하지 않고 Fig. 29와 같이 파동의 독립성에 의해 운동에너지를 보존하며 관내를 순환한다. 따라서 버블젯 히트파이프는 증발부에서 생성된 다량의 기포에 의해 응축관내에 파형류 및 슬러그류와 같은 이상 유동을 발생시킨다. 이로 인해 고온의 작동유체는 응축부 말단으로 이동하게 되며 잠열의 형태로 다량을 열을 전달한다. 작동유체의 파동이 서로 충돌할 때 소멸하지 않고, 파동의 독립성에 의해 운동에너지가 보존되기 때문에 루프(loop)형태의 관을 순환하여 다시 증발부로 돌아오는 원리로 버블젯 히트파이프가 작동한다.

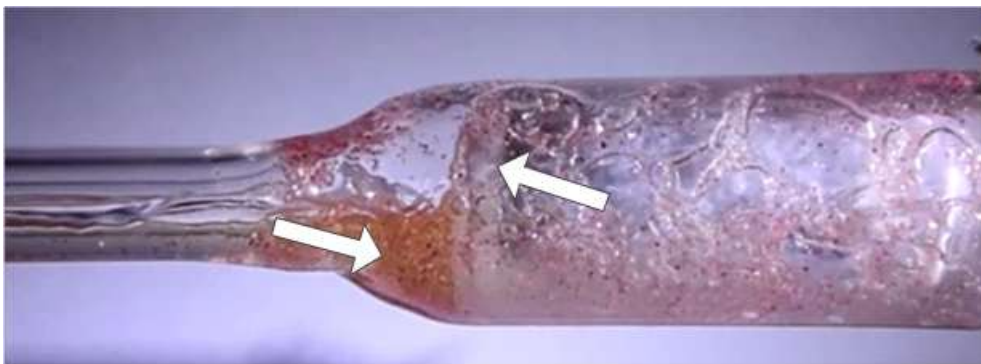


Fig. 23 Nucleate boiling at evaporating part

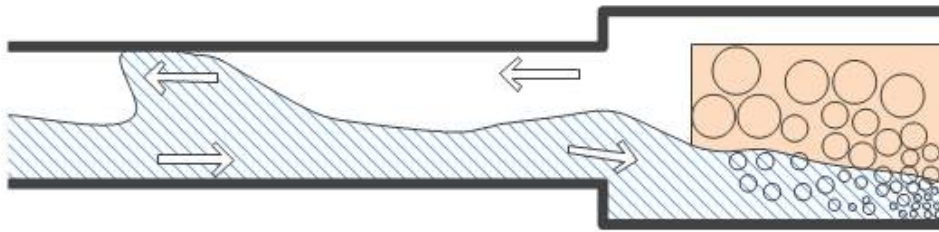


Fig. 24 Schematic diagram of Part 'A'

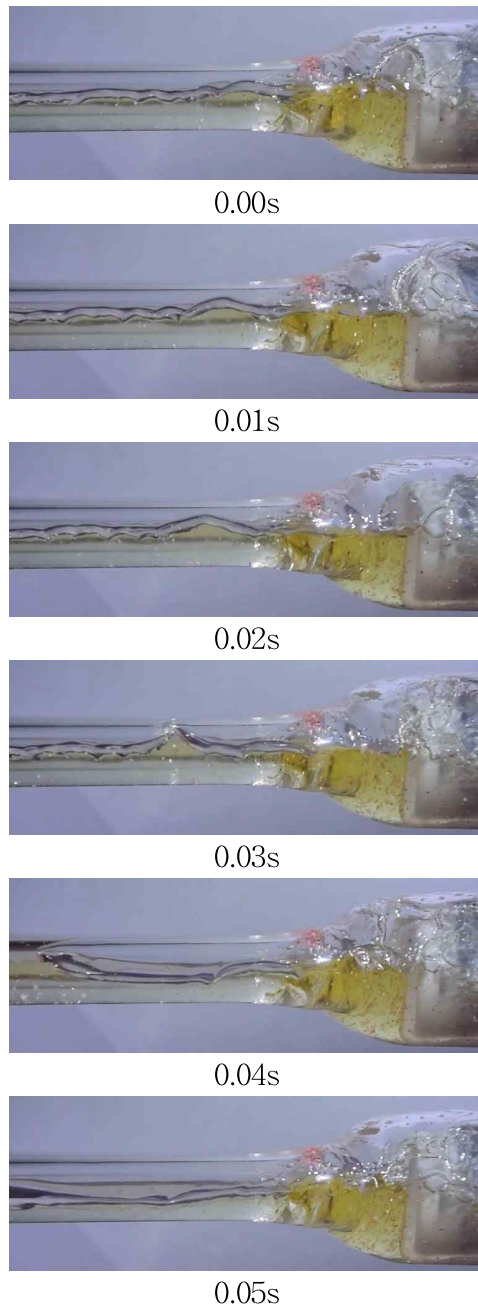


Fig. 25 Flow visualization at part 'A'

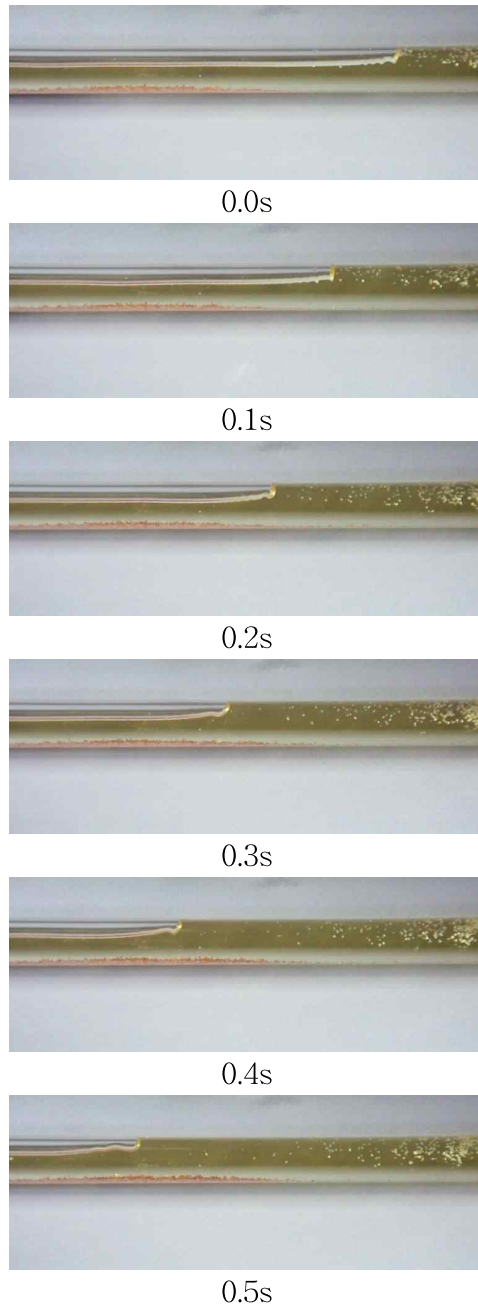


Fig. 26 Flow visualization at part 'B'

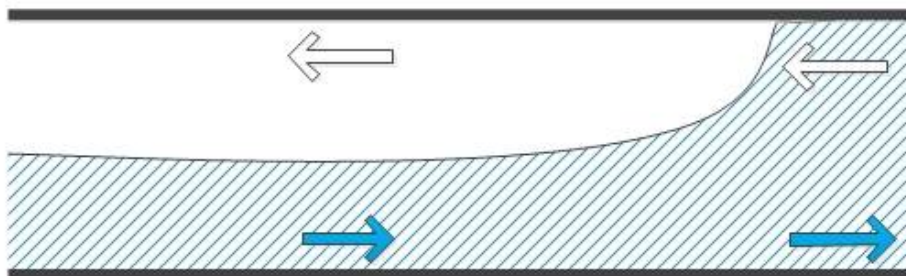


Fig. 27 Schematic diagram of Part 'B'

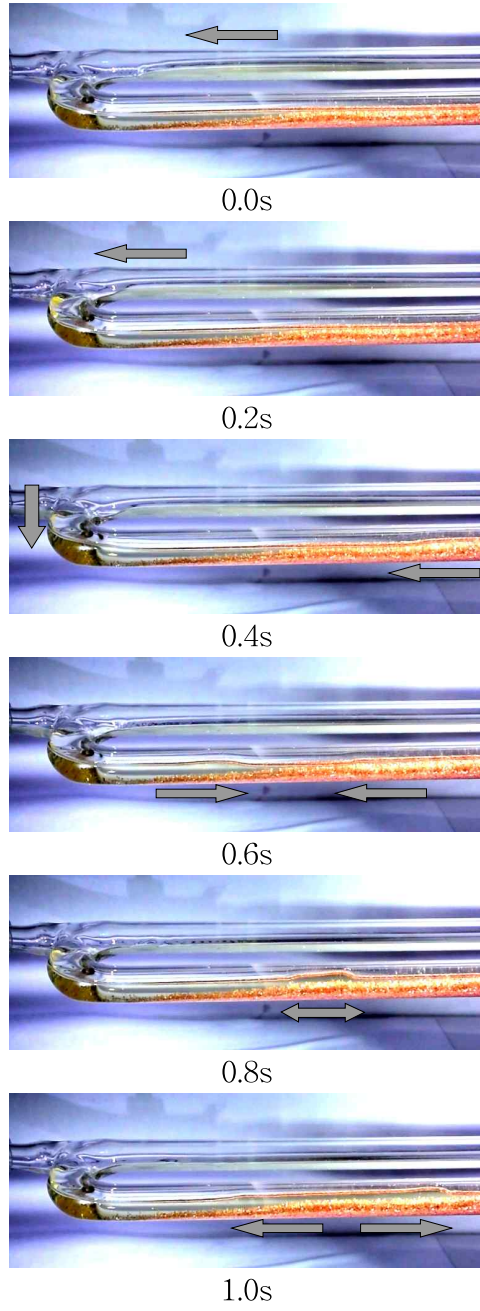


Fig. 28 Flow visualization at part 'C'

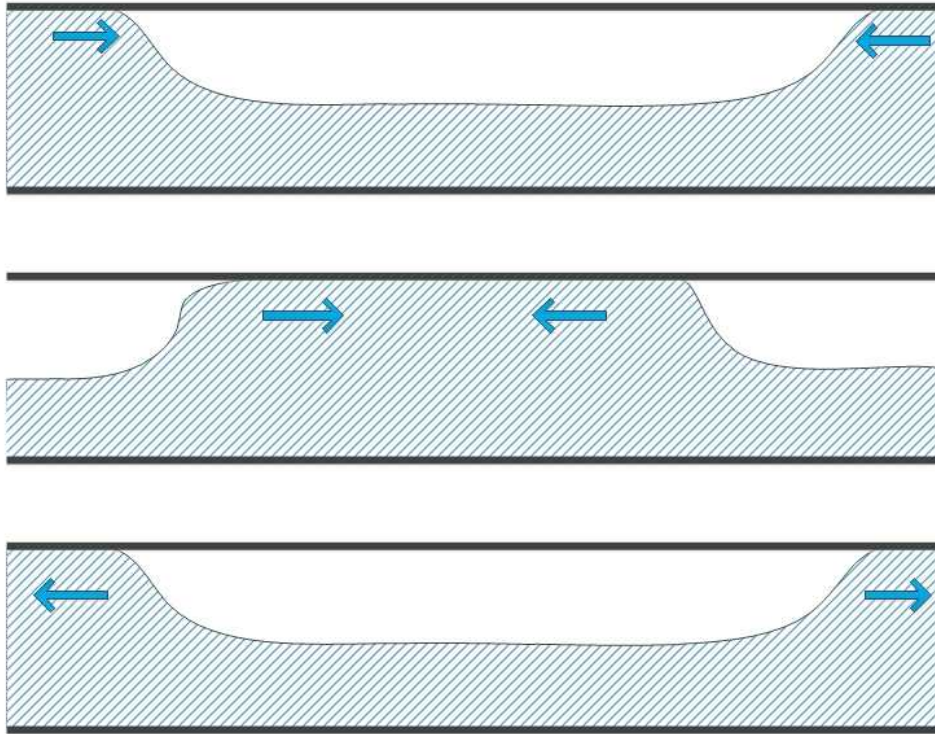


Fig. 29 Schematic diagram of Part 'C'

4. 결론

- (1) 버블젯 히트파이프의 작동유체는 증발부에서 핵비등에 의한 압력 증가로 인해 증발부에서 응축부로 이동한다.
- (2) 이때 응축관내 작동유체의 유동은 파형류, 슬러그류, 성층류와 같은 이상유동의 양식으로 나타난다.
- (3) 증발부에서 응축부 말단으로 이동한 파동은 충돌 이후 소멸하지 않고 루프관(U자관)을 통해 순환하며 증발부로 귀환한다.
- (4) 버블젯 히트파이프의 작동원리 및 특성 분석을 통해 시설원예용 근권 난방시스템의 최적화 및 실용화 연구에 도움이 될 것이라고 사료된다.

제 5 절 버블젯 히트파이프 열원변경 시험

1. 열원으로 온수를 적용하기 위한 증발부 형상변경 및 성능평가

본 연구에서는 버블젯 히트파이프의 열원으로 온수가 흐를 수 있도록 증발부 형상을 변화시켰고, 히터를 이용하여 1차 실험을 진행하였다. Fig. 30과 Table 14은 각각 실험에 사용된 버블젯 히트파이프의 형상 및 제원을 나타낸 것이다. 버블젯 히트파이프의 증발부는 히터가 2개 삽입되는 동심 이중관 형태로 제작하였다. 응축부는 U자 형태로 제작하였으며 증발부 외관과 연결되어 작동유체가 응축부로 이동 할 수 있도록 구성하였다. 버블젯 히트파이프의 작동유체를 선정하기 위하여 R-141b와 R-134a를 내부체적의 50%로 충전하여 응축부 온도 분포를 확인하였다. Table 15~16은 가열표면온도를 50℃와 60℃로 설정하였을 때 최종 온도분포를 나타낸 것이다.

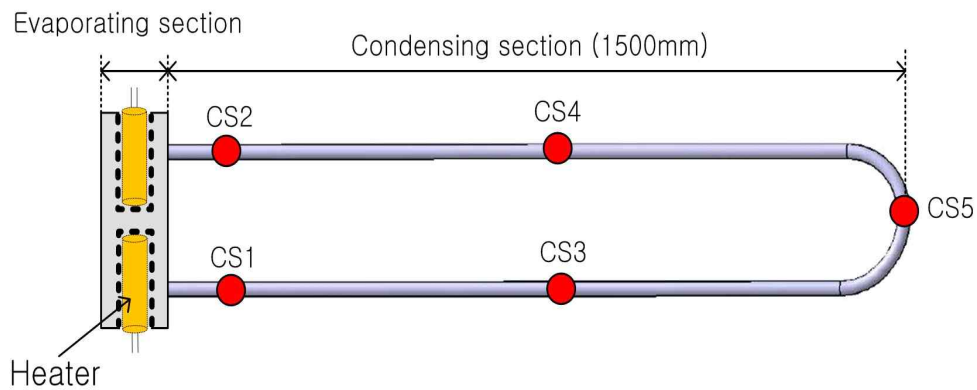


Fig. 30 New type of BJLHP

Table 14 Specification of BJLHP

| Material | | Copper | |
|------------------|------------|------------|-------|
| Evaporating part | Outer tube | L(mm) | 350 |
| | | d_i (mm) | 23.8 |
| | Inner tube | L(mm) | 350 |
| | | d_o (mm) | 19.05 |
| Condensing part | | L(mm) | 1500 |
| | | D_i (mm) | 11 |

Table 15 Final temperature of each point(R-141b)

(a) 50℃

| | |
|-------|-------|
| 히팅표면 | 50.0℃ |
| 증발부 | 45.2℃ |
| 응축부1 | 44.4℃ |
| 응축부2 | 42.3℃ |
| 응축부3 | 32.8℃ |
| 응축부4 | 45.4℃ |
| 응축부5 | 35.0℃ |
| 응축부평균 | 39.9℃ |
| 온도차 | 5.2℃ |

(b) 60℃

| | |
|-------|-------|
| 히팅표면 | 60.4℃ |
| 증발부 | 53.2℃ |
| 응축부1 | 52.4℃ |
| 응축부2 | 49.4℃ |
| 응축부3 | 35.7℃ |
| 응축부4 | 53.3℃ |
| 응축부5 | 40.7℃ |
| 응축부평균 | 46.3℃ |
| 온도차 | 6.9℃ |

Table 16 Final temperature of each point(R-134a)

(a) 50℃

| | |
|---------|-------|
| 히팅표면 | 50.5℃ |
| 증발부 | 43.5℃ |
| 응축부1 | 42.1℃ |
| 응축부2 | 43.0℃ |
| 응축부3 | 41.8℃ |
| 응축부4 | 43.2℃ |
| 응축부5 | 42.4℃ |
| 응축부평균 | 42.5℃ |
| 증·응 온도차 | 1.0℃ |

(b) 60℃

| | |
|---------|-------|
| 히팅표면 | 60.5℃ |
| 증발부 | 51.1℃ |
| 응축부1 | 49.4℃ |
| 응축부2 | 50.6℃ |
| 응축부3 | 48.8℃ |
| 응축부4 | 50.7℃ |
| 응축부5 | 49.7℃ |
| 응축부평균 | 49.8℃ |
| 증·응 온도차 | 1.2℃ |

실험 결과 R-134a를 사용할 경우에 버블젯 히트파이프 응축부의 좌우 온도분포가 균일하였고 이를 바탕으로 작동유체를 R-134a로 선정하였다.

2. 실험방법

1차 실험을 바탕으로 작동유체 선정을 하고, 실제 증발부 열원으로 온수를 적용하여 2차 실험을 진행하였다. Fig. 31은 실험에 사용된 버블젯 히트파이프의 형상을 나타낸 것이다. 실험장치는 온수 가열형 버블젯히트파이프, 온수 순환펌프, 유량조절밸브, 유량계 및 항온조로 구성하였다. 온도측정을 위해 T-type 열전대를 이용하였으며 증발부 2개소, 응축부 5개소, 온수 입출구 지점 각각 1개소의 버블젯 히트파이프 표면 상단부에 열전대를 부착하여 실험을 진행하였다. 난방용 온수의 온도는 50~60℃이므로 버블젯 히트파이프에 공급하는 온수 온도를 50℃와 60℃로 설정하고, 각각의 경우에 유량을 0.5, 1.0, 1.5kg/min으로 변경하면서 실험을 진행하였다. 버블젯 히트파이프에 공급하는 온수의 온도는 항온조를 이용하여 일정하게 유지시켰고, 유량은 유량계와 유량조절 밸브로 조절하였다.

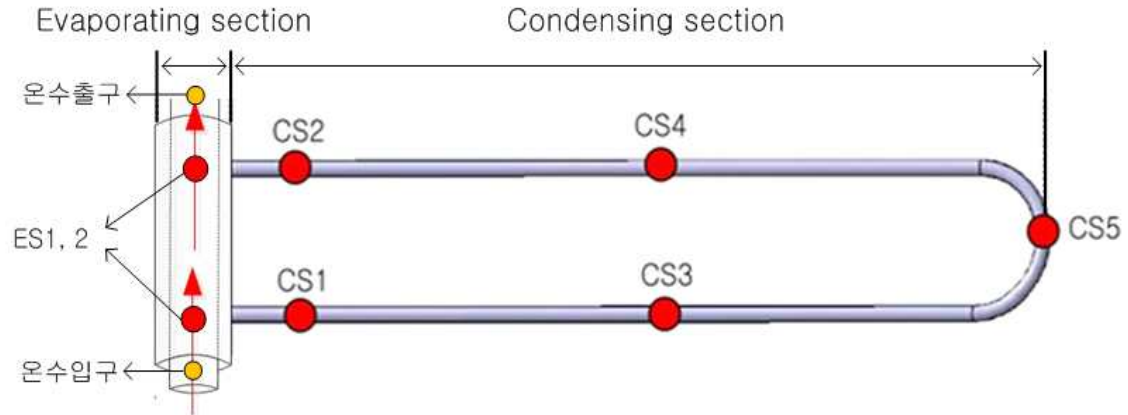
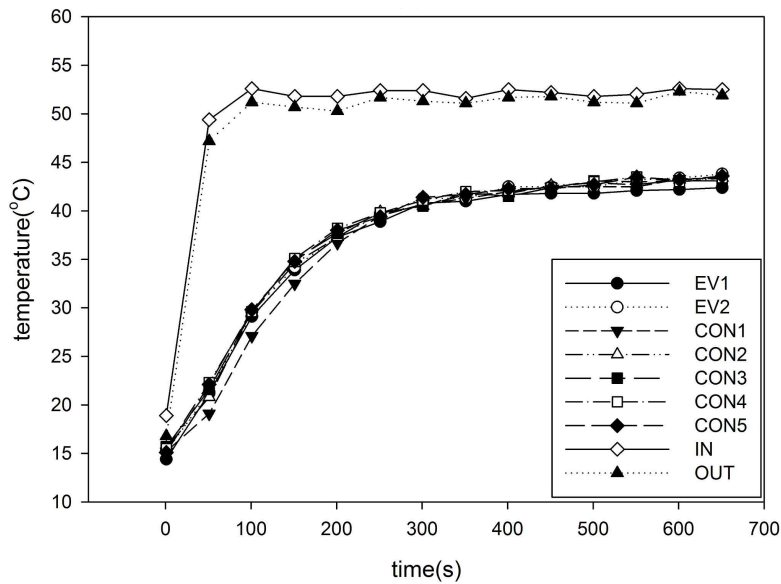


Fig. 31 Hot water type of BJT LHP

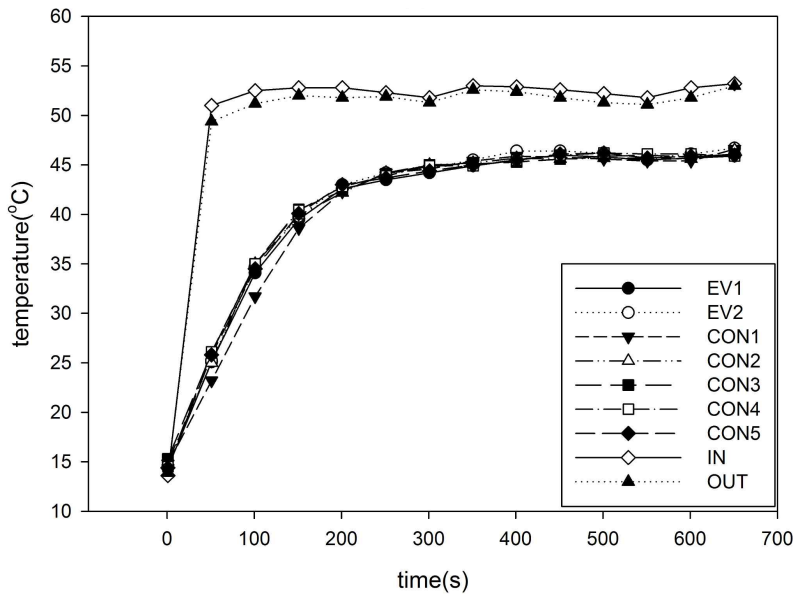
3. 실험결과

(1) 버블젯 히트파이프 온도분포

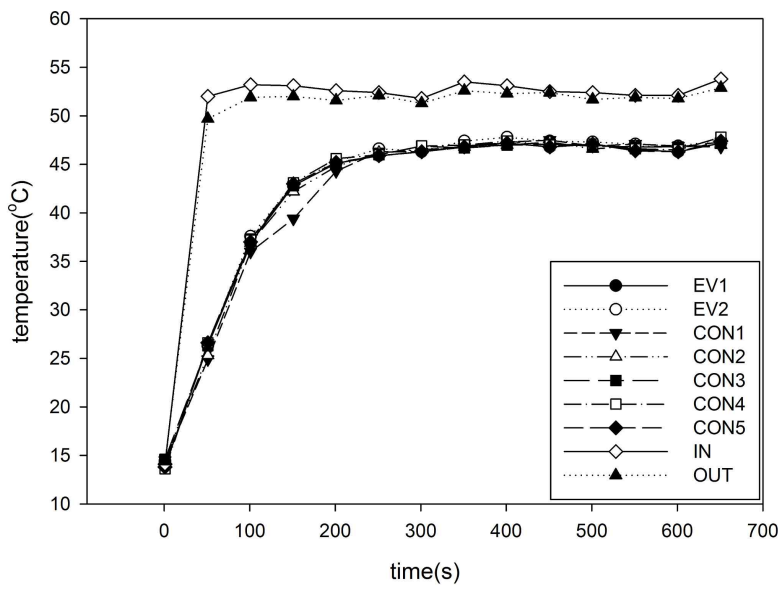
Fig. 32~33은 온수온도와 유량 변화에 따른 버블젯히트파이프의 증발부와 응축부의 표면온도를 그래프로 나타낸 것이다. 버블젯 히트파이프 증발부와 응축부의 온도차가 1°C이하로 작고, 응축부의 좌우 온도분포가 고르기 때문에 균일하게 난방이 가능할 것이라 예상된다.



(a) Hot water temperature: 50°C, Flow rate: 0.5kg/min

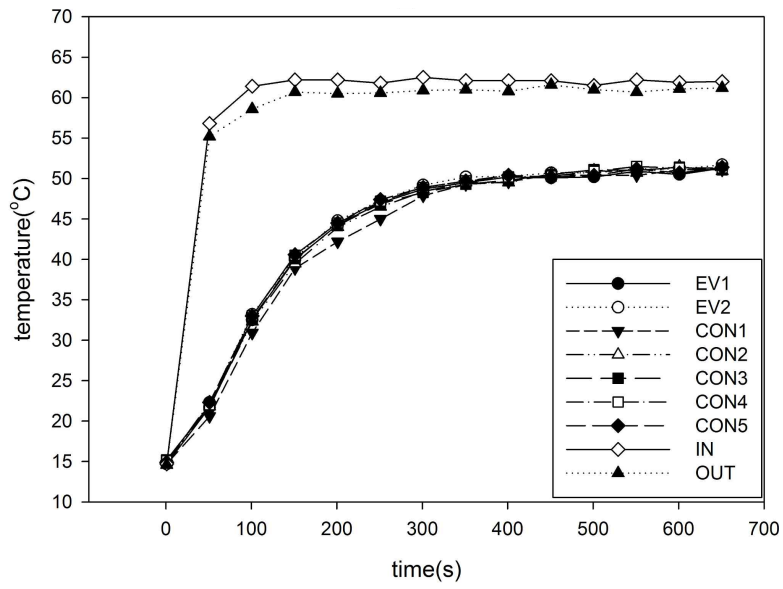


(b) Hot water temperature: 50°C, Flow rate: 1.0kg/min

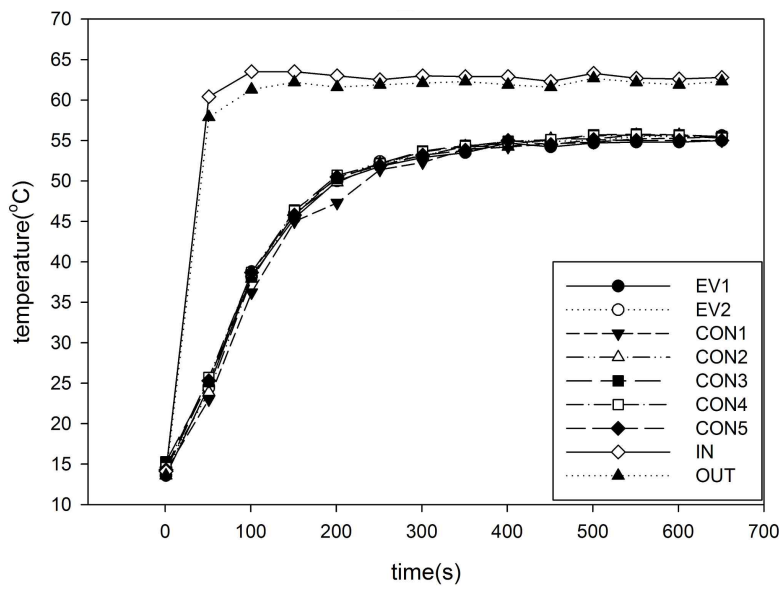


(c) Hot water temperature: 50°C, Flow rate: 1.5kg/min

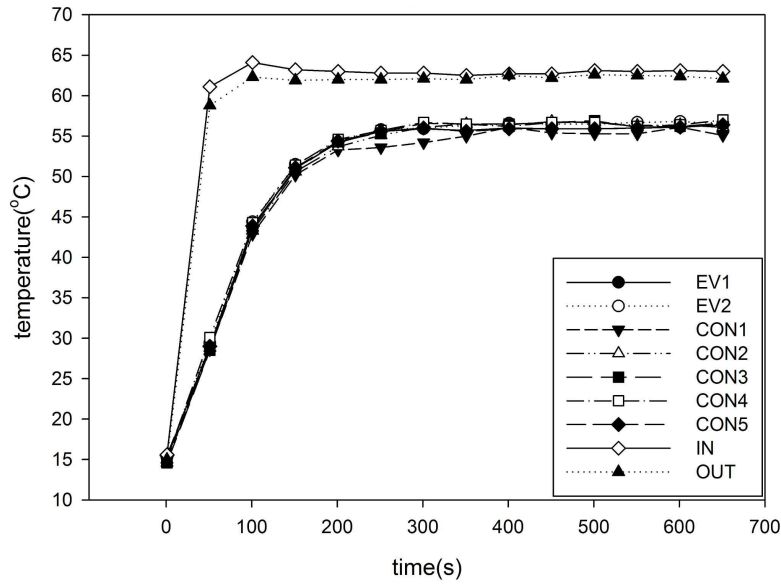
Fig. 32 Temperature distribution profiles of BJLHP(50°C)



(a) Hot water temperature: 60°C, Flow rate: 0.5kg/min



(b) Hot water temperature: 60°C, Flow rate: 1.0kg/min



(c) Hot water temperature: 60°C, Flow rate: 1.5kg/min
 Fig. 33 Temperature distribution profiles of BJLHP(60°C)

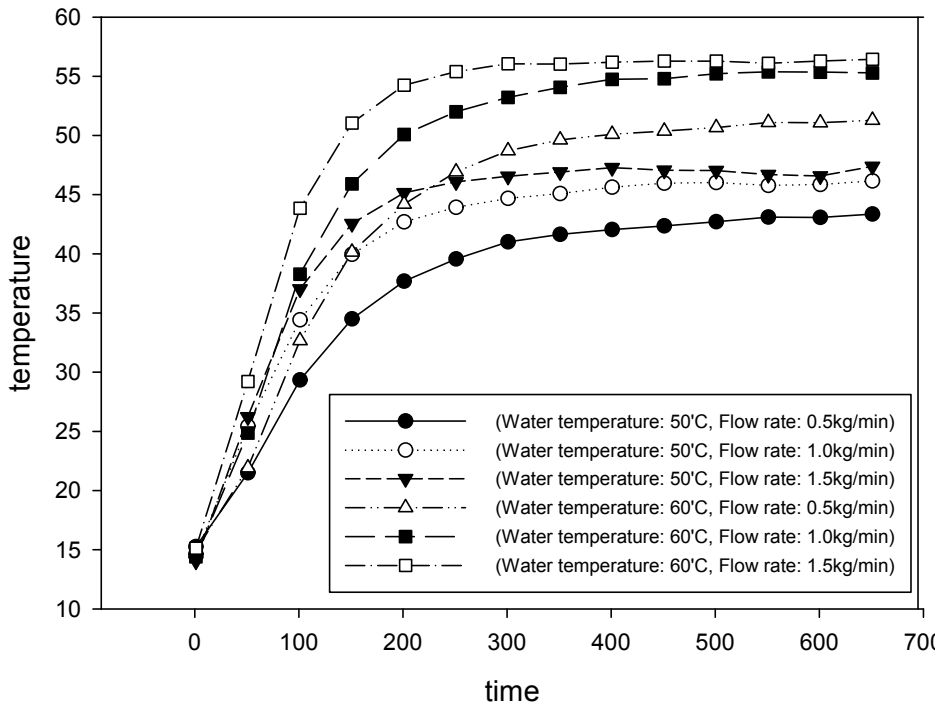


Fig. 34 Temperature profiles of average temperature of BJLHP

(2) 유효열전도도 및 방열열유속 계산

Table 17 Heat flux and effective thermal conductivity of each experimental condition

| Water temperature(°C) | Flow rate(kg/min) | q“(W/m ²) | k _e (W/m°C) |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| 50 | 0.5 | 16.2 | 505.5 |
| | 1 | 53.5 | 1013.1 |
| | 1.5 | 69.0 | 1668.6 |
| 60 | 0.5 | 31.2 | 540.7 |
| | 1 | 52.4 | 1009.1 |
| | 1.5 | 73.0 | 1489.5 |

Table 17는 온수 가열형 버블젯 히트파이프의 성능을 평가하기 위하여 방열 열유속 및 유효열전도도를 계산한 값이고 (7),(8)의 계산식을 사용하였다.

$$q'' = \frac{mC_p(T_i - T_o)}{A_f} \quad (7)$$

$$k_e = \frac{\dot{m}C_p(T_i - T_o)(L_e + L_c)}{A_c \Delta T} \quad (8)$$

q'': 방열열유속 (W/m²)

k_e: 유효열전도도 (W/m°C)

m: 온수 질량 유량 (kg/min)

C_p: 비열 (J/kg°C)

T_i: 온수 입구 온도 (°C)

T_o: 온수 출구 온도 (°C)

A_f: 난방 바닥 면적 (m²)

L_c: 히트파이프 응축부 튜브 길이 (m)

L_e: 히트파이프 증발부 튜브 길이 (m)

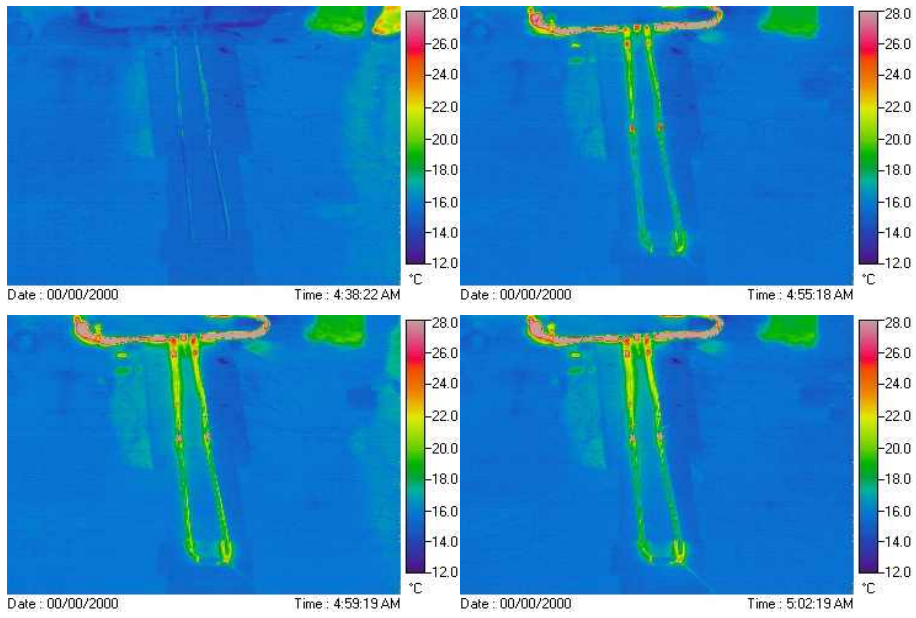
A_c: 응축관 단면적 (m²)

ΔT: BJLHP 증발부와 응축부의 평균온도 차 (°C)

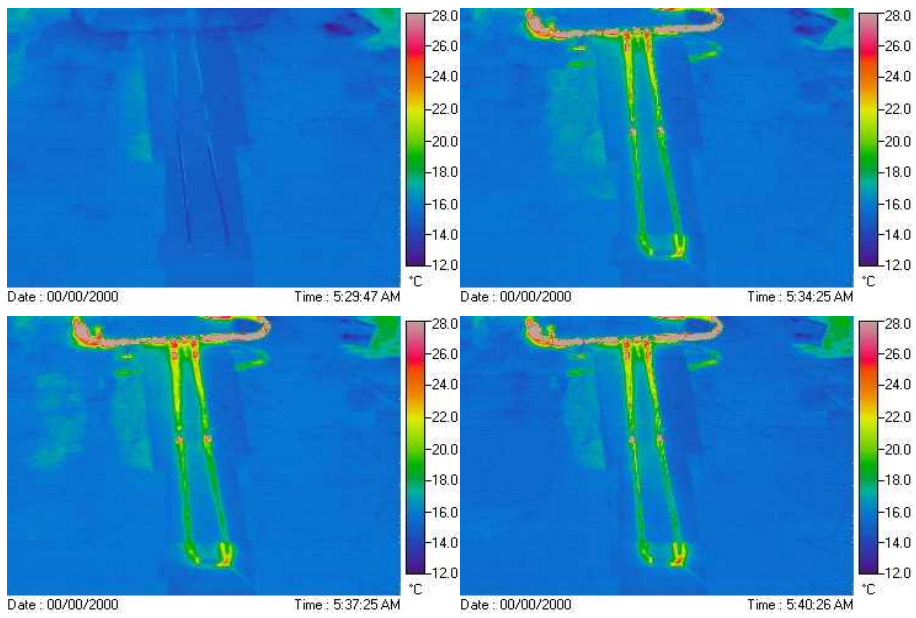
계산식으로부터 방열열유속과 유효열전도도를 계산해본 결과 유량의 증가에 따라 방열열유속 및 유효열전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 산출결과 온수온도 50°C, 유량 1.5kg/min 에서 유효열전도도가 가장 큰 것을 알 수 있었다.

(3) 열화상 카메라 촬영

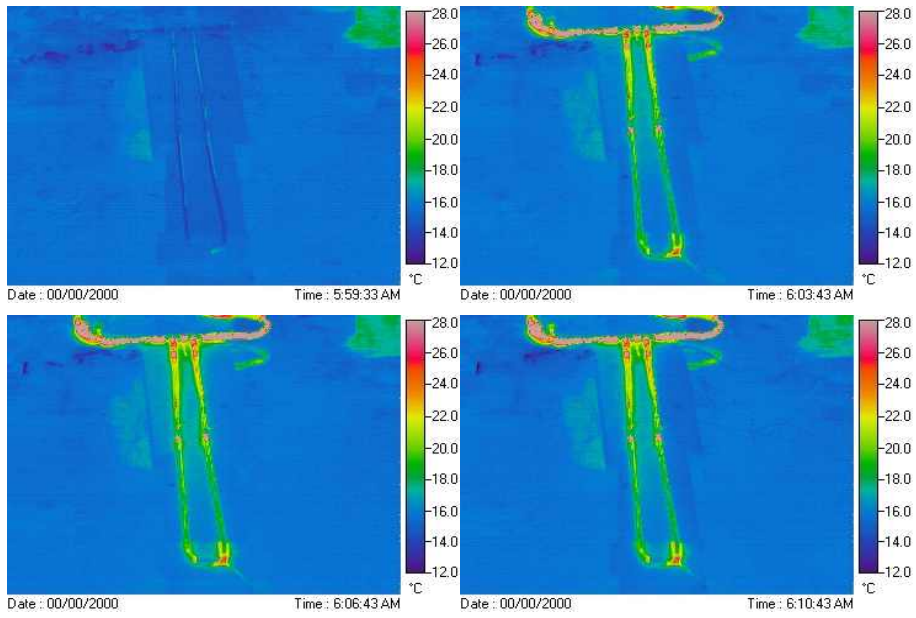
온수 가열형 버블젯 히트파이프의 열성능을 평가하기 위하여 열화상 카메라를 이용하여 성능을 분석하였다. 열화상 카메라로 온수형 버블젯 히트파이프를 촬영한 결과 버블젯 히트파이프의 온도분포가 고르게 나타나 균일한 온도로 난방이 가능할 것이라고 생각된다.



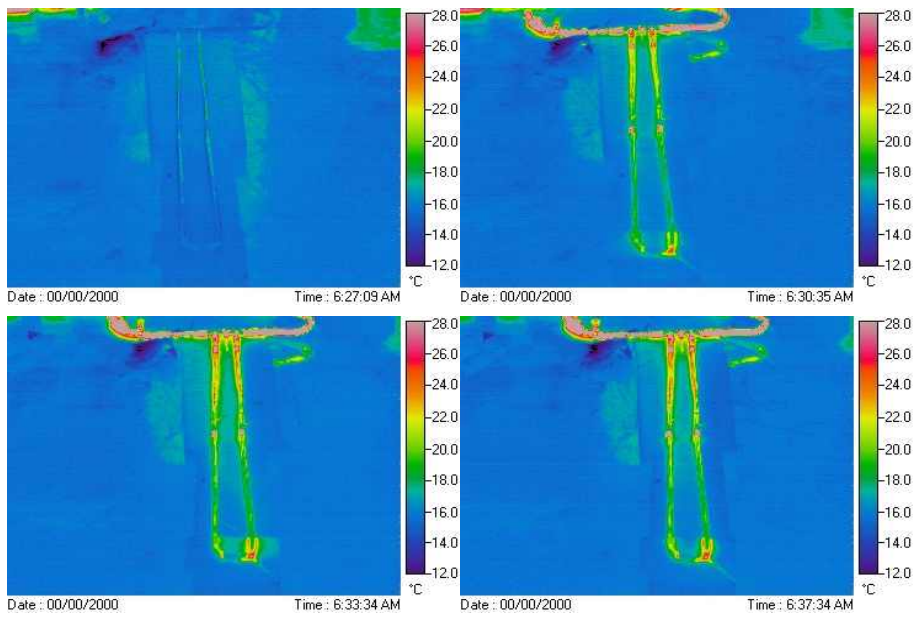
(a) Hot water temperature: 50°C, Flow rate: 0.5kg/min



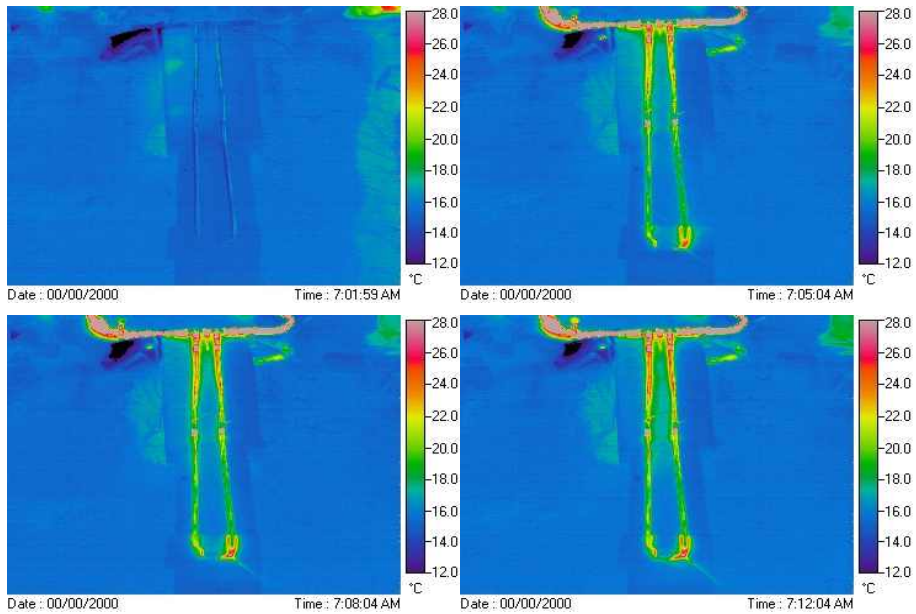
(b) Hot water temperature: 50°C, Flow rate: 1.0kg/min



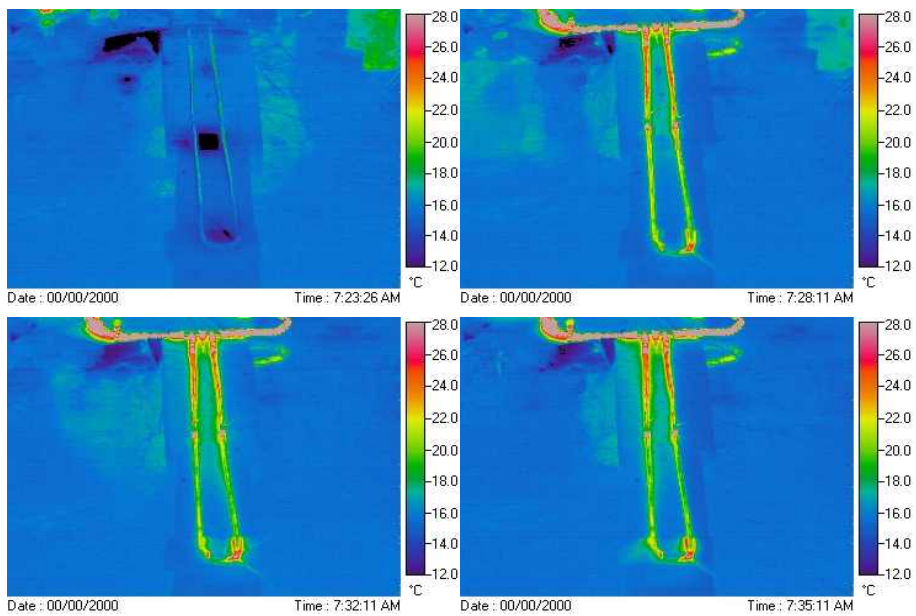
(c) Hot water temperature: 50°C, Flow rate: 1.5kg/min
 Fig. 35 Thermo-graphic picture of BJTLP(50°C)



(a) Hot water temperature: 60°C, Flow rate: 0.5kg/min



(b) Hot water temperature: 60°C, Flow rate: 1.0kg/min



(c) Hot water temperature: 60°C, Flow rate: 1.5kg/min

Fig. 36 Thermo-graphic picture of BJTHP(60°C)

4. 결론

- (1) 열원으로 온수를 적용한 버블젯 히트파이프의 성능분석 및 열화상 카메라 촬영결과 증발부와 응축부의 평균 표면온도차가 1°C이하로 작기 때문에 균일한 온도로 난방이 가능하다고 판단된다.
- (2) 온수 유량이 증가할수록 버블젯 히트파이프의 유효열전도도가 더 증가는 것을 확인하였다.
- (2) 온수 가열형 버블젯 히트파이프는 높은 열유속과 유효열전도도를 가지는 것을 확인하였다.
- (3) 온수 가열형의 버블젯 히트파이프의 시설원예용 근권 난방시스템으로의 가능성을 확인하였다.

제 6 절 현장적용을 위한 버블젯 히트파이프의 재설계

현장 적용을 위하여 농장 배드의 규격에 맞춰 버블젯 히트파이프를 재설계 하였으며, 재설계된 버블젯 히트파이프 성능테스트를 히터 입열량을 변화시키면서 진행하였다. 재설계된 버블젯 히트파이프의 형상 및 규격은 Table 18과 같다. 재설계한 버블젯 히트파이프의 성능분석 결과 모든 입열량 조건에서 정상 작동하였으며 증발부-응축부 온도차가 1℃이하로 작고 유효 열전도도도 높게 산출되어 현장적용에 이상이 없을 것으로 판단하였다. 또한 신뢰성 평가를 위해 공인 인증기관(부산테크노파크)의 시험 성적서를 획득하였다.

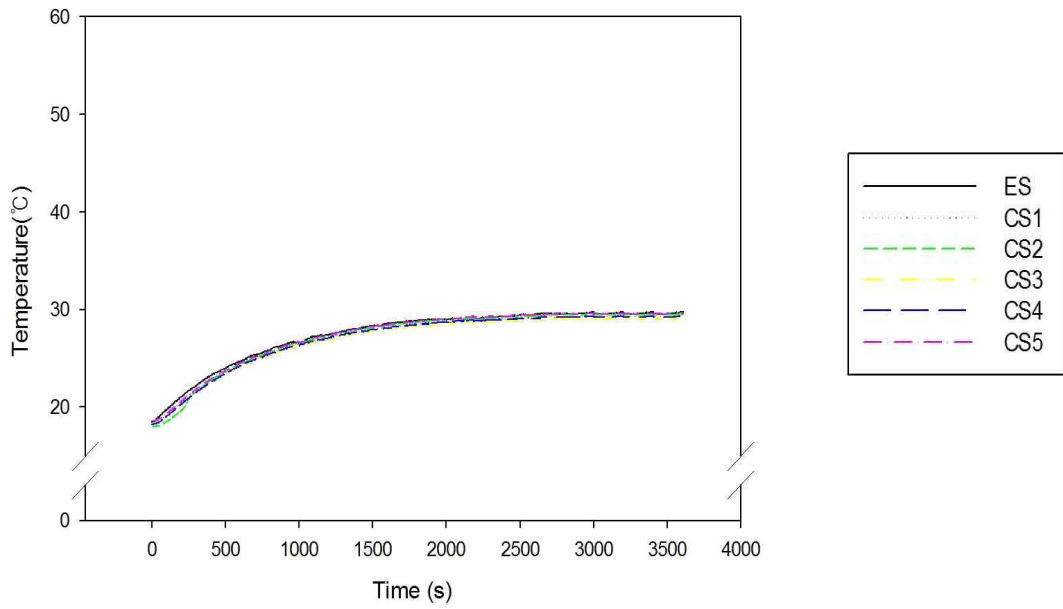


Fig. 37 Picture of redesigned BJLHP

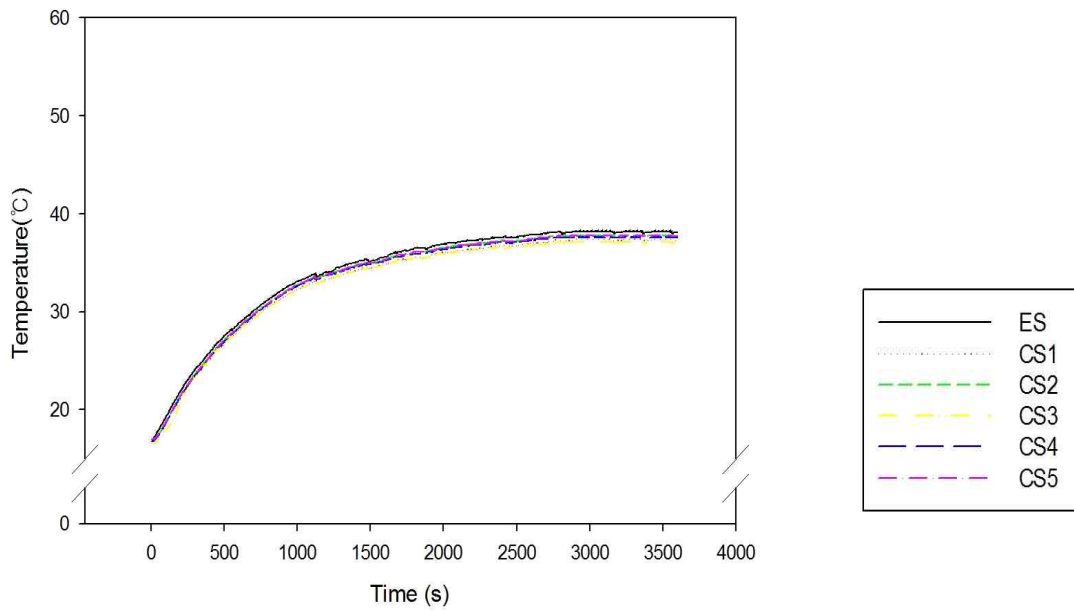
Table 18 Specification of BJLHP

| Parameter | | Specification | |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| B J L H P | Material | Copper | |
| | Working fluid | R-134a | |
| | Charging ratio (%) | 50% of inner volume | |
| | Evapo- rating section | Outer tube(mm) | Length 200.0 Pipe [O.D] 28.0 |
| | | Heater | Capacity 220V-100W Length 150.0 Pipe [O.D] 22.0 |
| | Condensing section (mm) | | Length(loop) 8,000.0 Pipe(O.D.) 12.7 U band width 55.0 |

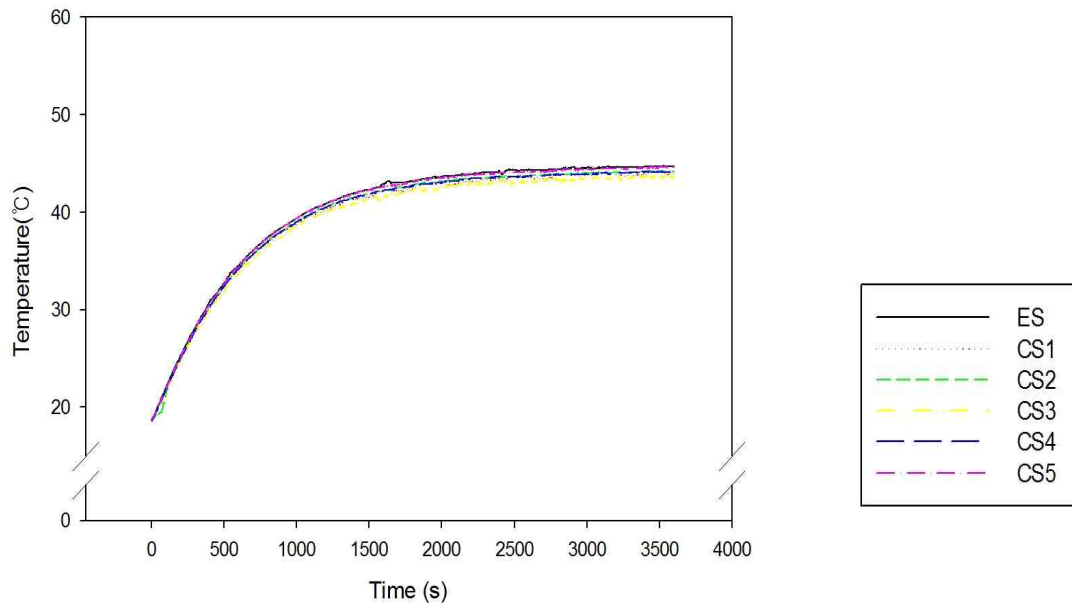
(1) 히터 입열량 변화(25~100W)에 따른 버블젯 히트파이프 성능분석



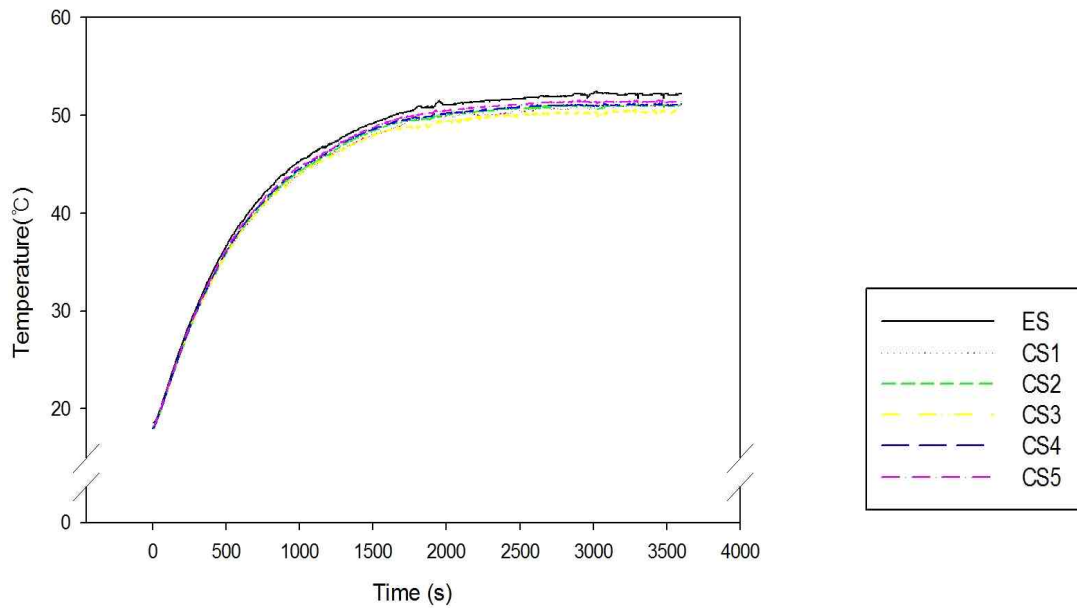
(a) 25W



(b) 50W



(c) 75W



(d) 100W

Fig. 38 Temperature profile of BJLHP

Table 19 The data value of BJLHP
(a) 25W

| | Data value |
|----------------------------------|------------|
| Evar temp. | 29.7 |
| Cond Temp.(Average CS1-5) | 29.4 |
| Eva-Cond $\Delta T(^{\circ}C)$ | 0.3 |
| Thermal time constant(s) [63.2%] | 55 |
| Stable Time(s) [90%] | 1000 |
| $k_e(kW/m \cdot K)$ | 2154.9 |

(b) 50W

| | Data value |
|----------------------------------|------------|
| Evar temp. | 38.1 |
| Cond Temp.(Average CS1-5) | 37.5 |
| Eva-Cond $\Delta T(^{\circ}C)$ | 0.6 |
| Thermal time constant(s) [63.2%] | 300 |
| Stable Time(s) [90%] | 1100 |
| $k_e(kW/m \cdot K)$ | 2154.9 |


(c) 75W

| | Data value |
|----------------------------------|------------|
| Evar temp. | 44.8 |
| Cond Temp.(Average CS1-5) | 44.0 |
| Eva-Cond $\Delta T(^{\circ}C)$ | 0.8 |
| Thermal time constant(s) [63.2%] | 300 |
| Stable Time(s) [90%] | 1100 |
| $k_e(kW/m \cdot K)$ | 2424.3 |

(d) 100W

| | Data value |
|---------------------------------------|------------|
| Eva temp. | 52.1 |
| Cond Temp.(Average CS1-5) | 51.1 |
| Eva-Cond $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ | 1.0 |
| Thermal time constant(s) [63.2%] | 350 |
| Stable Time(s) [90%] | 1100 |
| $k_e(\text{kW/m}\cdot\text{K})$ | 2721.9 |

시 험 성 적 서

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|  재단법인 부산테크노파크 부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31 Tel : 051-974-9091 Fax : 051-974-9099 | 성적서번호: BTP-2013-0489 페이지(1)/(총 3) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|

1. 의뢰자
 - 기관명 : 부경대학교
 - 주소 : 부산광역시 남구 용당동 산100 부경대학교(용당) 2공학관 317호
 - 의뢰일자 : 2013년 11월 26일

2. 시험성적서의 용도 : 성능확인용

3. 시험대상품목 또는 물질, 시료명 : 히트파이프 (모델명: 버블젯 히트파이프)

4. 시험기간 : 2013년 11월 26일

5. 시험방법 : 자체규격 (7 Point 온도 측정)

6. 시험환경: 온도 : (14.7 ± 3.0) ℃ , 습도 : (36 ± 10) % R.H.

7. 시험결과


| | 1 지점 | 2 지점 | 3 지점 | 4 지점 | 5 지점 | 6 지점 | 7 지점 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| 온도 (℃) | 55.5 | 54.2 | 52.8 | 52.2 | 53.6 | 53.6 | 52.8 |
| 소비전력 (W) | 101 | | | | | | |

 - * 이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 - * 본 성적서의 용도 이외의 사용을 금합니다.

| | | |
|------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 확 인 | 작성자 성 명 : 전 병 현 (서명) | 기술책임자 성 명 : 김 종 원 (서명) |
|------------|------------------------------------|--------------------------------------|

2013. 11. 26.

재단법인 부산테크노파크 원장 (인)



BTP-QP-22-02-1/2 (1)

제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2012.07.17)

시험 성적서

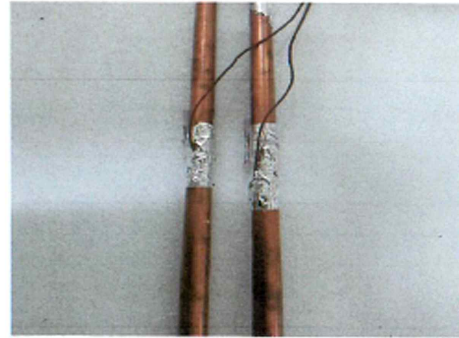
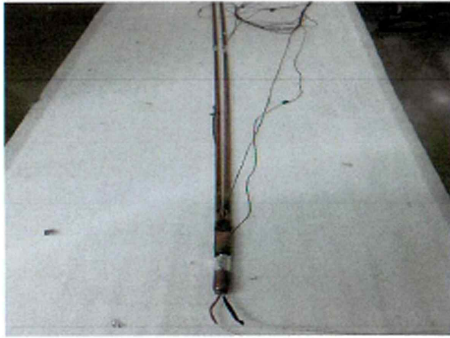


재단법인 부산테크노파크
부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31
Tel : 051-974-9091
Fax : 051-974-9099

성적서번호: BTP-2013-0489
페이지(2)/(총 3)

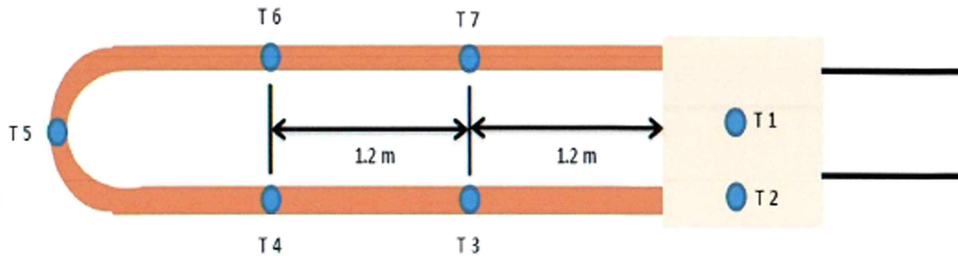
1. 일반사항

1-1 제품사진



1-2 측정방법

1) 측정 위치



2) 측정 결과

- 안정온도 도달 후 최종 10분 평균값 측정

3) 측정 시험실 온도

- $(18.0 \pm 1.5) \text{ } ^\circ\text{C}$

BTP-QP-22-02-1/2 (1)

제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2012.07.17)

시험 성적서

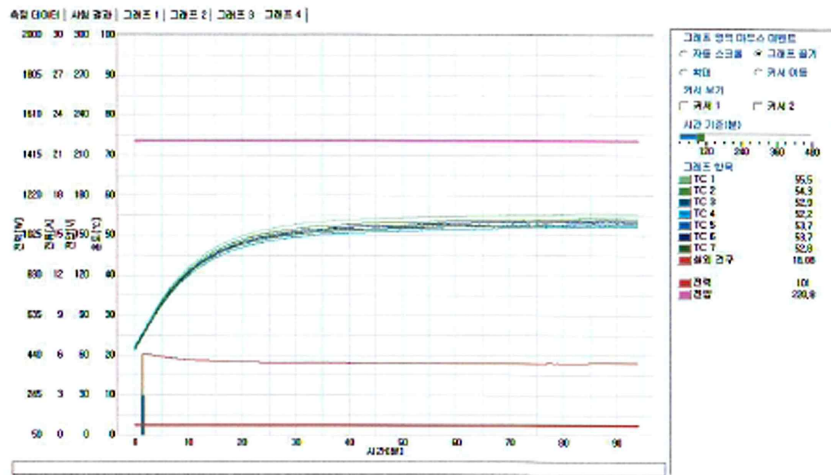


재단법인 부산테크노파크
 부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31
 Tel : 051-974-9091
 Fax : 051-974-9099

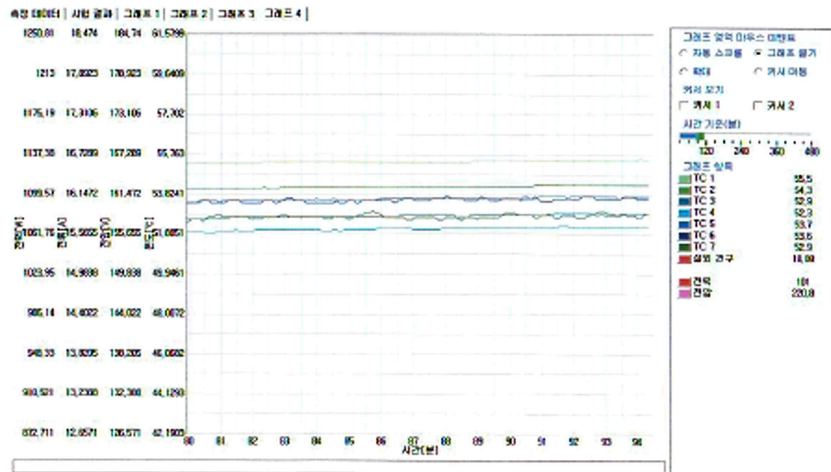
성적서번호: BTP-2013-0489
 페이지(3) / (총 3)

1-3 시험결과

1) 시험데이터



2) 안정온도



BTP-QP-22-02-1/2 (1)

제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2012.07.17)

제 7 절 버블젯 히트파이프 실용화 방안

1. 접이식 버블젯 히트파이프

기존의 버블젯 히트파이프의 경우 장치의 길이가 길어 차량 적재가 어려워 운반의 문제가 있으며, 설치 장소의 높낮이 균형이 고르지 못하거나 하중에 의한 응축관의 처짐으로 액체상태의 작동유체가 특정부분에 고여 작동이 원활하지 않는 문제가 있다. 또한 기존의 버블젯 히트파이프는 직관으로 제작되어 설치 환경이 직선이 아닌 경우에는 설치가 어려웠다. 때문에 설치 시 증발부로의 액귀환을 원활하게하기 위해 일정 구배를 주어야 하는 상황이 일부 발생했다. 만약 구부릴 수 있는 버블젯 히트파이프가 제작된다면 운반의 편의성이 높아지고, 응축부 일부에만 구배를 주어 증발부쪽으로 작동유체가 쏠리게 함으로써 액면의 높이를 높일 수 있도록 하여 작은 구배에서 설치환경 제약을 극복 하여 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 고효율 근권 난방시스템 개발의 실용화에 도움이 될 것이다. 따라서 버블젯 히트파이프를 구부릴 수 있는 구조로 설계하여 기존의 단점을 보완하고 응축부 경사각에 따른 열적 성능 변화에 대해 연구하였다.

2. 응축부 각도 변경에 따른 성능평가

버블젯 히트파이프는 작동유체의 순환으로 작동하기 때문에 설치 환경의 각도에 따라 성능이 달라질 수 있다. 수평상태에서는 액체가 중력의 영향 없이 정상적으로 작동할 수 있으나 증발부의 위치가 응축부보다 높은 역구배시 응축액이 응축부에 고이며 액귀환이 원활하지 않아 증발부에서의 과열 및 작동 불능이 일어날 수 있다. 반대로 응축부가 증발부보다 높게 위치하는 순구배의 경우 버블젯 히트파이프에 대한 연구 결과가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 증발부와 응축부의 높이가 같은 수평상태 및 응축부 높이가 증발부에 비해 높은 위치에 있는 순구배 상태에서 응축부의 각도 변화(응축부 중간-응축부 말단)에 따른 버블젯 히트파이프 열적 성능 변화 알아보기 위한 연구를 진행하였다. Fig. 39는 접이식 버블젯 히트파이프의 개략도를 나타낸다. 버블젯 히트파이프는 구리관으로 제작되었으며, 증발부와 루프 응축관으로 구성되어 있다. 응축부의 길이는 5m이며, 운반 효율을 최대로 할 수 있는 응축부 중간 지점(Fig. 40)은 길이 1m, 관경 12.7mm 플렉시블(flexible) 주름관을 사용하여 버블젯 히트파이프 설치 시 각도 조절이 용이하고 운반 시 접을 수 있도록 설계하였다. 서로 구경이 다른 카트리지 전기 히터와 증발외관은 Fig. 41과 같이 용접 접합하여 환형 공간(clearance)이 존재하도록 하였으며 그 크기는 선행연구 결과를 토대로 2.19mm로 하였다. 증발부와 응축부의 연결은 Fig. 42와 같이 응축관 2개를 증발외관(outer tube)에 끼워 용접결합 하였으며, 응축관 사이에 작동유체 주입관 두었다. 응축부 말단은 Fig. 43와 같이 'U'자 용접 소켓으로 용접 접합하여 작동유체가 'U'자관을 통해 순환 할 수 있도록 제작하였다. 버블젯 히트파이프의 작동유체는 증발부와 응축부 말단 사이의 간격이 커 압력이 낮은 작동유체를 이용 시 원활한 작동이 되지 않는다는 선행연구 결과를 토대로 40℃ ~ 60℃ 온도영역에서 높은 포화 압력을 가진 R-134a를 사용하였으며, 버블젯 히트파이프 내부체적의 50%의 양으로 작동유체를 주입 후 밀봉하였다. 실험 장치에 대한 자세한 제원은 Table 20에 나타내었다.

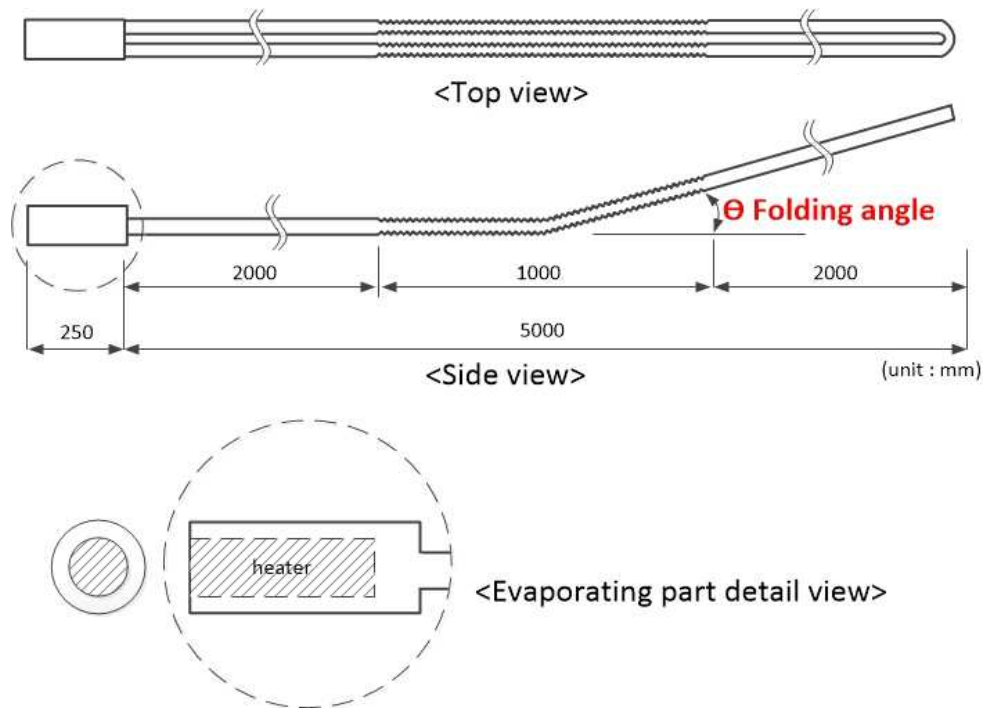


Fig. 39 Schematic diagram of the foldable BJLHP

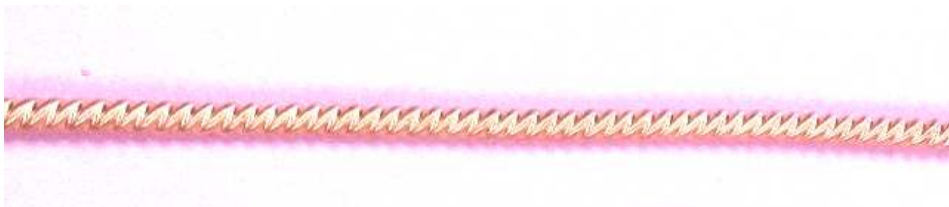


Fig. 40 Picture of the corrugated pipes.

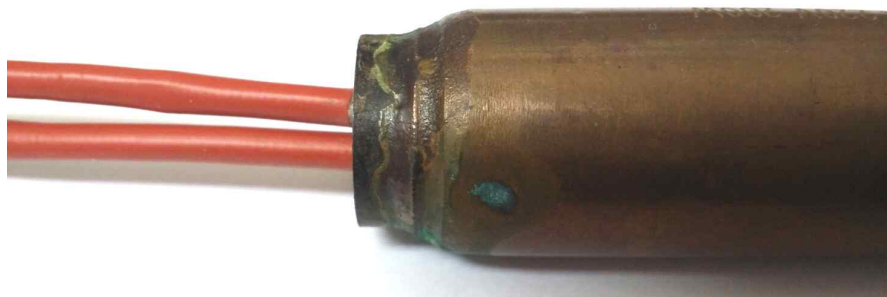


Fig. 41 Picture of the welded heater at evaporating part



Fig. 42 Picture of the evaporating part



Fig. 43 Picture of the end of condensing part

Table 20 Specification of BJLHP

| Parameter | | Specification | |
|------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------|
| Material | | Copper | |
| Working fluid | | R-134a | |
| Charging ratio | | 50% of inner volume [liquid, 20°C] | |
| Evaporating part | Outer tube | L (mm) | 250 |
| | | d _o (mm) | 28.58 |
| | Heater | Capacity | 220V-200W |
| | | L (mm) | 150 |
| | | d _o (mm) | 22 |
| Condensing part | L (m) | 10(Loop) | |
| | d _o (mm) | 12.7 | |
| | U band width (mm) | 55 | |

3. 실험방법

버블젯 히트파이프 각도에 따른 성능 분석 실험 장치는 Fig. 44와 같이 히터 인가 전력을 조정하는 제어부와 버블젯 히트파이프 온도 측정을 위한 계측부로 구분한다. 제어부의 장비는 증발부의 히터 열량 제어를 위하여 파워미터와 슬라이닥스를 이용하였고 계측부의 장비는 온도 측정을 위하여 T-type 열전대와 데이터 로거를 설치하였다. 실험 환경은 공기 순환이 일어나지 않는 밀폐된 기온 19 ± 1.5 °C의 실내 공간에서 1시간 동안 진행하였다. 히터의 인가 전력은 파워미터와 슬라이닥스로 전압을 조절하여 100 W(증발부 입열유속 9.646 kW/m^2)로 고정하였다. 또한 버블젯 히트파이프의 유효열전도율 분석을 위한 버블젯 히트파이프의 표면온도 측정점은 증발부 1개소, 응축부 5개소(증발-응축 연결부 2개, 응축부 중간지점 2개, 응축부 말단지점 1개)이며 각 지점의 버블젯 히트파이프 표면 상부에 설치하였다. 각도 변경 조건은 운반 시 장치 길이를 최소화할 수 있는 지점인 응축부 중간 지점(버블젯 히트파이프의 응축부 말단에서 2.5m 지점)을 접이각도의 원점으로 하고, 접이 각도는 $0^\circ \sim 5^\circ$ 까지 0.5° 간격으로 변경하였다. 각 조건에서의 증발부와 응축부의 온도차에 따른 유효전도율을 식(1)을 이용하여 계산 후 값을 각각 비교하였다.

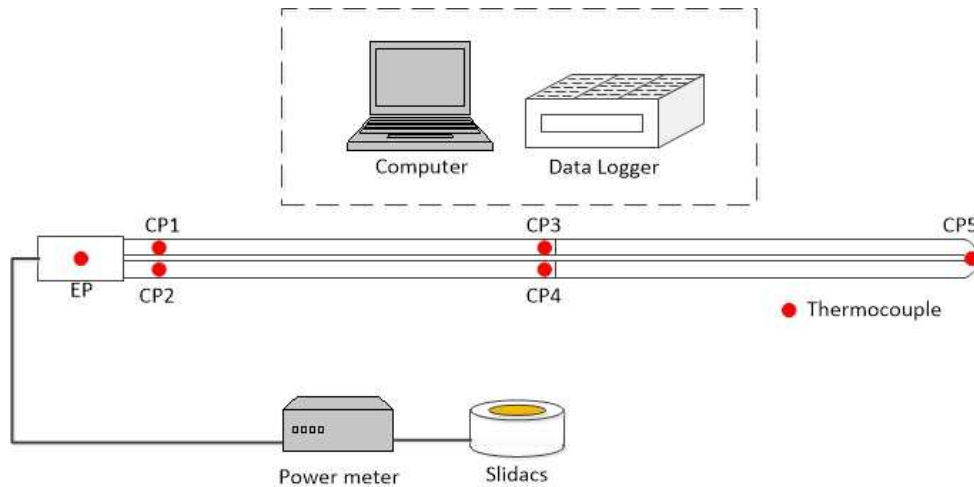
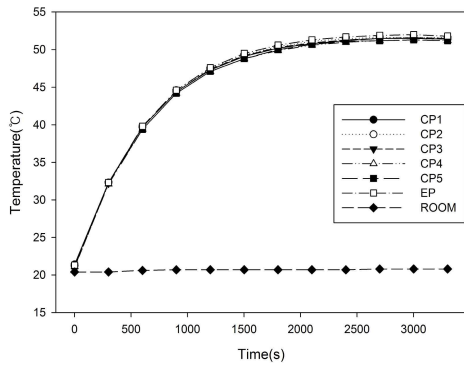


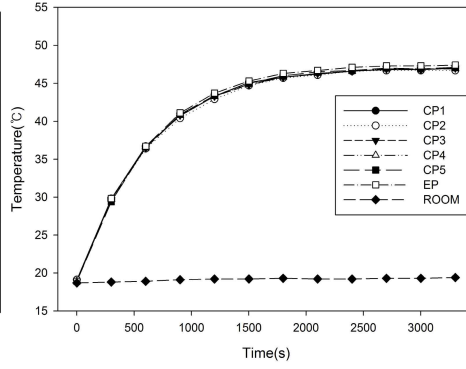
Fig. 44 Schematic diagram of experimental equipment

4. 실험결과

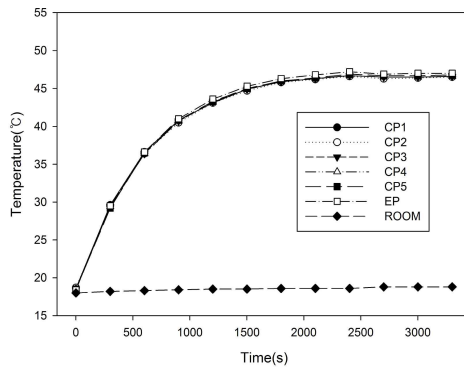
버블젯 히트파이프의 응축부 접이 각도에 따른 성능을 분석하기 위하여 버블젯 히트파이프의 온도 변화를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. Table 21은 $0.0^{\circ}\sim 5.0^{\circ}$ 의 범위의 각도변경에 대한 버블젯 히트파이프의 표면온도 그래프이며, Fig. 46는 각도에 따른 유효열전도율을 나타낸 그래프이다. 수평상태에서의 온도 시정수는 평균 약 600 초이며, 유효열전도도는 약 $1995\text{kW/m}^{\circ}\text{C}$ 로 매우 높은 열전도도를 나타냈다. 실험 전체에서의 증발부와 응축부 온도차 최대값이 1°C 미만으로 버블젯 히트파이프를 난방 장치로 적용할 경우, 균일한 온도로 난방 가능함을 알 수 있다. 유효열전도율은 각도 증가에 따라 변화하였다. $0^{\circ}\sim 2.5^{\circ}$ 의 각도 구간에서는 유효열전도율이 소폭 상승하는 경향이 나타난다. 증발부에서 비등열전달에 과정에서 발생한 작동유체 유동의 운동에너지가 구배에 의한 응축부 위치에너지보다 크기 때문에 구배를 극복하고 응축부 말단으로 작동유체를 공급시킬 수 있으며, 적정 순구배에 의해 응축부에서 응축된 작동유체가 중력 방향으로 유동하면서 액귀환이 원활해져 유효열전도율이 소폭 상승하는 것으로 판단된다. 그러나 3° 이상의 각도에서는 유효열전도도가 0° 에 비하여 감소하는 경향이 나타난다. $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 구간에서는 증발부에서 발생한 작동유체의 운동에너지가 응축부 말단까지의 위치에너지에 비해 작아 응축부 말단으로 갈수록 응축관내 액체 상태의 작동유체의 질량유량 감소로 인해 전체적인 응축부 온도가 감소한다. 이러한 이유로 작동유체의 원활한 순환이 이루어지지 않음에 따라 유효열전도도가 급격히 감소하는 것으로 나타난다. 접이각도 증가에 따라 유효열전도율의 최저값(접이각도 약 4°)에 도달 이후 일정하게 유지되는 것으로 나타난다. 따라서 전반적으로 수평에서 순구배 상태에서는 버블젯 히트파이프가 안정적으로 작동하지만, 각도의 증가에 따라 버블젯 히트파이프의 유효열전도율은 일정한 값까지 소폭 감소하며, 유효열전도율이 일정값 이하로 감소하지 않는 점으로 보아 해당 냉매량에서 유효열전도율의 최소값이 존재하는 것으로 판단된다. 이때 감소폭은 수평상태에 비하여 약 18% 감소한다. 즉, 경사증가에 따라 버블젯 히트파이프의 열전달 성능이 감소하는 경향은 있지만, 기존의 버블젯 히트파이프에서 발생하던 작동불능 현상은 일어나지 않아 접이식 버블젯 히트파이프를 시설원예용 근권 난방시스템으로 적용 시 안정적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.



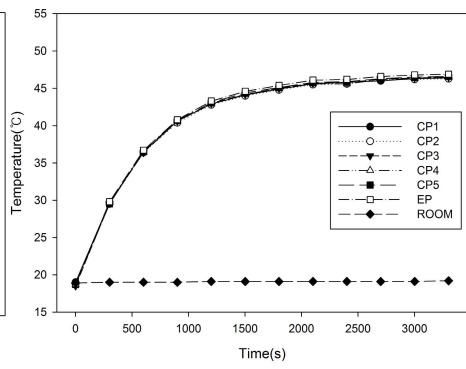
(a) 0.0°



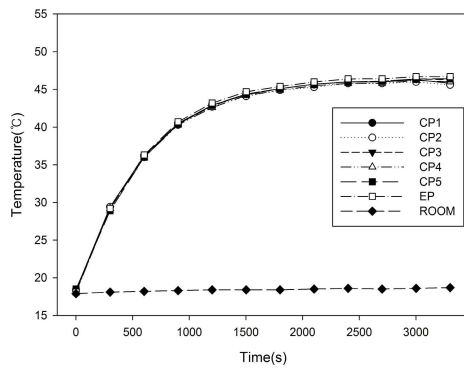
(b) 0.5°



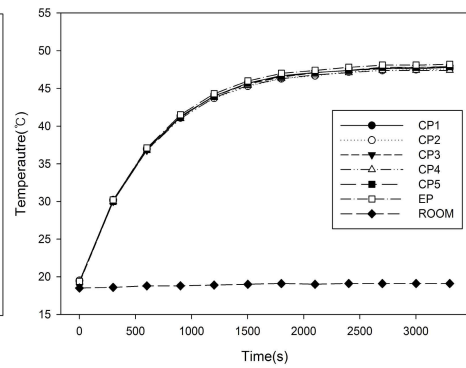
(c) 1.0°



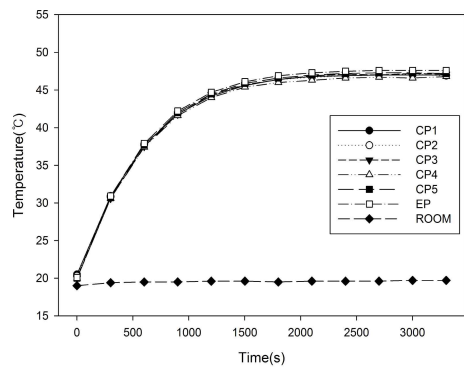
(d) 1.5°



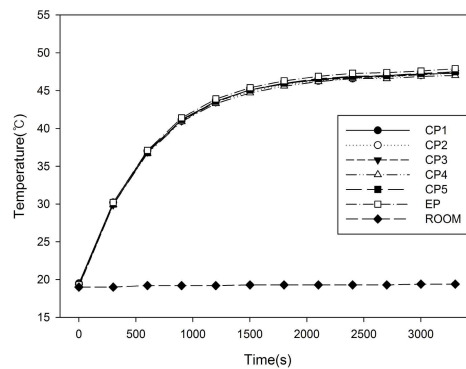
(e) 2.0°



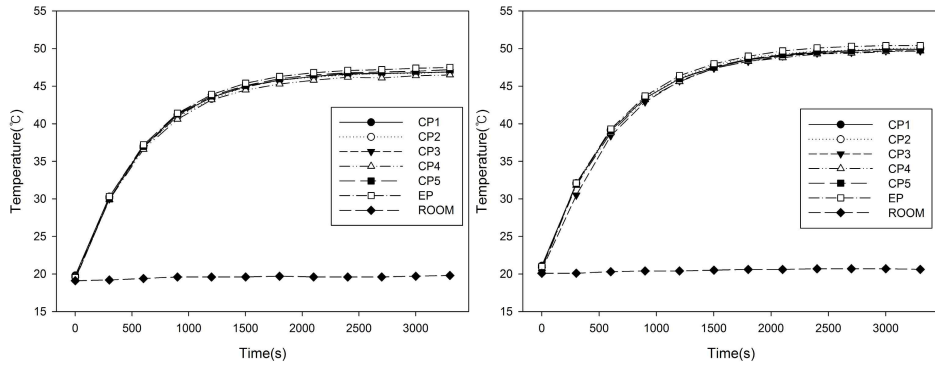
(f) 2.5°



(g) 3.5°

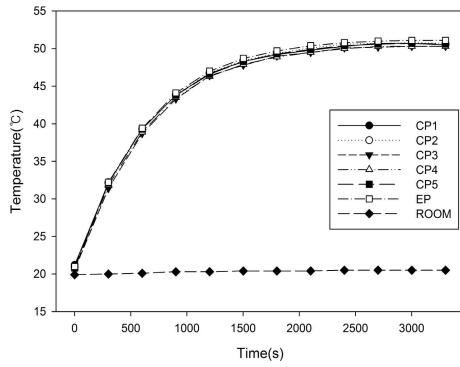


(h) 4.0°



(i) 4.0°

(j) 4.5°



(k) 5.0°

Fig. 45 Temperature profiles according to an angle

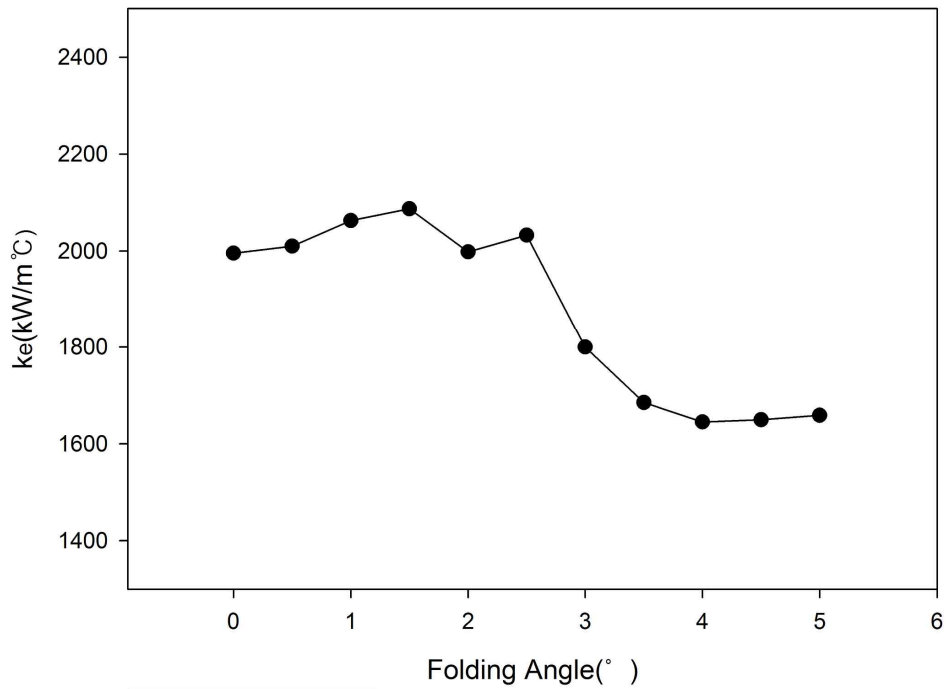









Fig. 46 Effect of folding angle on effective thermal conductivity

5. 결론

- (1) 접이식 버블젯 히트파이프의 응축부 접이 각도(folding angle)가 0~2.5° 경우에는 유효열전도율이 소폭 상승하는 경향이 나타난다.
- (2) 그러나 3°이상의 경우 유효열전도율이 급격히 감소하며, 최소값 도달 이후 일정하게 유지된다.
- (3) 이때의 감소폭은 수평상태에 비하여 약 18% 감소한다.
- (4) 접이식 버블젯 히트파이프는 기존의 전기히터를 삽입하는 방식의 버블젯 히트파이프에 비해 제작공정이 간편하고 히터와 작동유체가 바로 접촉하여 비등 열전달 효율이 더 높다.
- (5) 접이식 버블젯 히트파이프는 기존의 버블젯 히트파이프 보다 열적성능이 우수하고 운반 및 설치의 편의성을 높였으므로 시설원예용 근권 난방시스템의 실용화에 도움이 될 것이라고 판단된다.


시험 성적서

| | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|  | 재단법인 부산테크노파크 부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31 Tel : 051-974-9091 Fax : 051-974-9099 | 성적서번호: BTP-2014-0542 페이지(1)/(총 3) | | | |
| | <p>1. 의뢰자</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기관명 : 부경대학교 ○ 주소 : 부산광역시 남구 용당동 부경대학교 용당캠퍼스 2공학관 317호 ○ 의뢰일자 : 2014년 10월 30일 <p>2. 시험성적서의 용도 : 성능확인용</p> <p>3. 시험대상품목, 시료명 : 시설원예용 근권 난방장치</p> <p>4. 시험기간 : 2014년 10월 30일</p> <p>5. 시험방법 : 부경대학교 자체규격</p> <p>6. 시험환경: 온도 : (21.6 ± 3.0) °C , 습도 : (57 ± 10) % R.H.</p> <p>7. 시험결과 : 2 ~ 3 페이지 참조</p> <p>* 이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. * 본 성적서의 용도 이외의 사용을 금합니다.</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;"> 확인 성명 : </td> <td style="width: 40%;"> 강영모  </td> <td style="width: 15%;"> 기술책임자 성명 : </td> <td style="width: 30%;"> 김종원  </td> </tr> </table> <p style="text-align: right;">2014. 10. 31.</p> <p style="text-align: center;"> 재단법인 부산테크노파크 원장 (인)  </p> | | 확인 성명 : | 강영모  | 기술책임자 성명 : |
| 확인 성명 : | 강영모  | 기술책임자 성명 : | 김종원  | | |

BTP-QP-22-02-1/2 (1)

제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2012.07.17)

시험 성적서

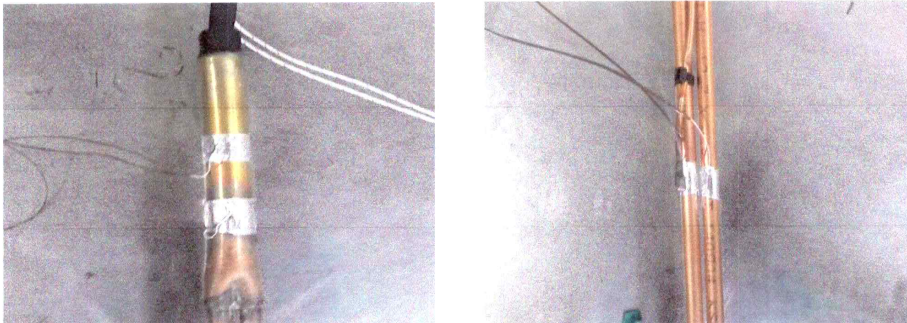
| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|  | 재단법인 부산테크노파크 부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31 Tel : 051-974-9091 Fax : 051-974-9099 | 성적서번호: BTP-2014-0542 페이지(2)/(총 3) |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|

1. 시험결과

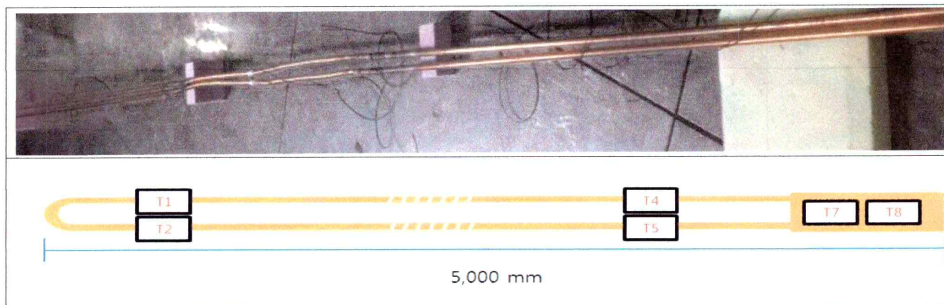
| | 1지점 | 2지점 | 4지점 | 5지점 | 7지점 | 8지점 |
|----------|---------|------|------|------|------|------|
| 온도 (℃) | 47.1 | 48.8 | 48.8 | 48.4 | 49.3 | 48.4 |
| 시간 (min) | 13 ~ 83 | | | | | |
| 소비전력 (W) | 102 | | | | | |

2. 일반사항

2-1 제품사진



2-2 시료 설치사진



BTP-QP-22-02-1/2 (1)

제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2012.07.17)

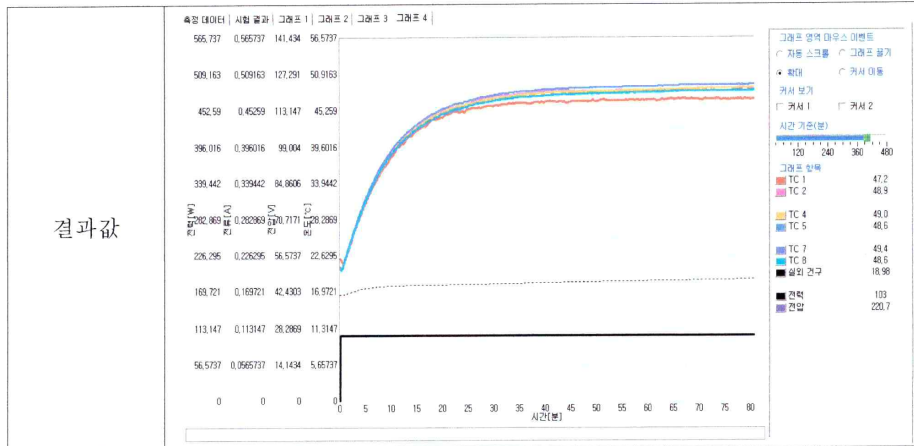
시험 성적서



재단법인 부산테크노파크
 부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31
 Tel : 051-974-9091
 Fax : 051-974-9099

성적서번호: BTP-2014-0542
 페이지 (3) / (총 3)

2-3 시험 데이터



끝.

제 8 절 버블젯 히트파이프 현장적용

1. 현장적용

시험장소: 경상남도 김해시 시산리

시험품종: 산타딸기

경종개요: 정식(08.30), 수확(11.30~06.30)

재배방식: 고설재배

재식밀도: 7주/m²



Fig. 47 Picture of strawberry farm

2. 시험방법

현장적용을 위해 적용농가의 환경에 맞추어 버블젯 히트파이프의 길이 및 관경을 재설계하였고, 재설계한 버블젯 히트파이프의 성능분석을 완료한 뒤 현장에 적용하였다. 딸기 재배 시 토양의 최적온도는 18℃이다. 이러한 조건을 맞추기 위해 딸기 배드 사이에 버블젯 히트파이프를 설치한 뒤 온도조절기를 통해 일정한 온도로 조절하였다. 토양 온도 측정지점은 아래 그림에 표시한 바와 같이 버블젯 히트파이프 매설부 아래 5cm 지점과 10cm 지점이며 각 2개의 sheathed type 열전대를 설치하여 총 4지점의 온도를 측정하였다.

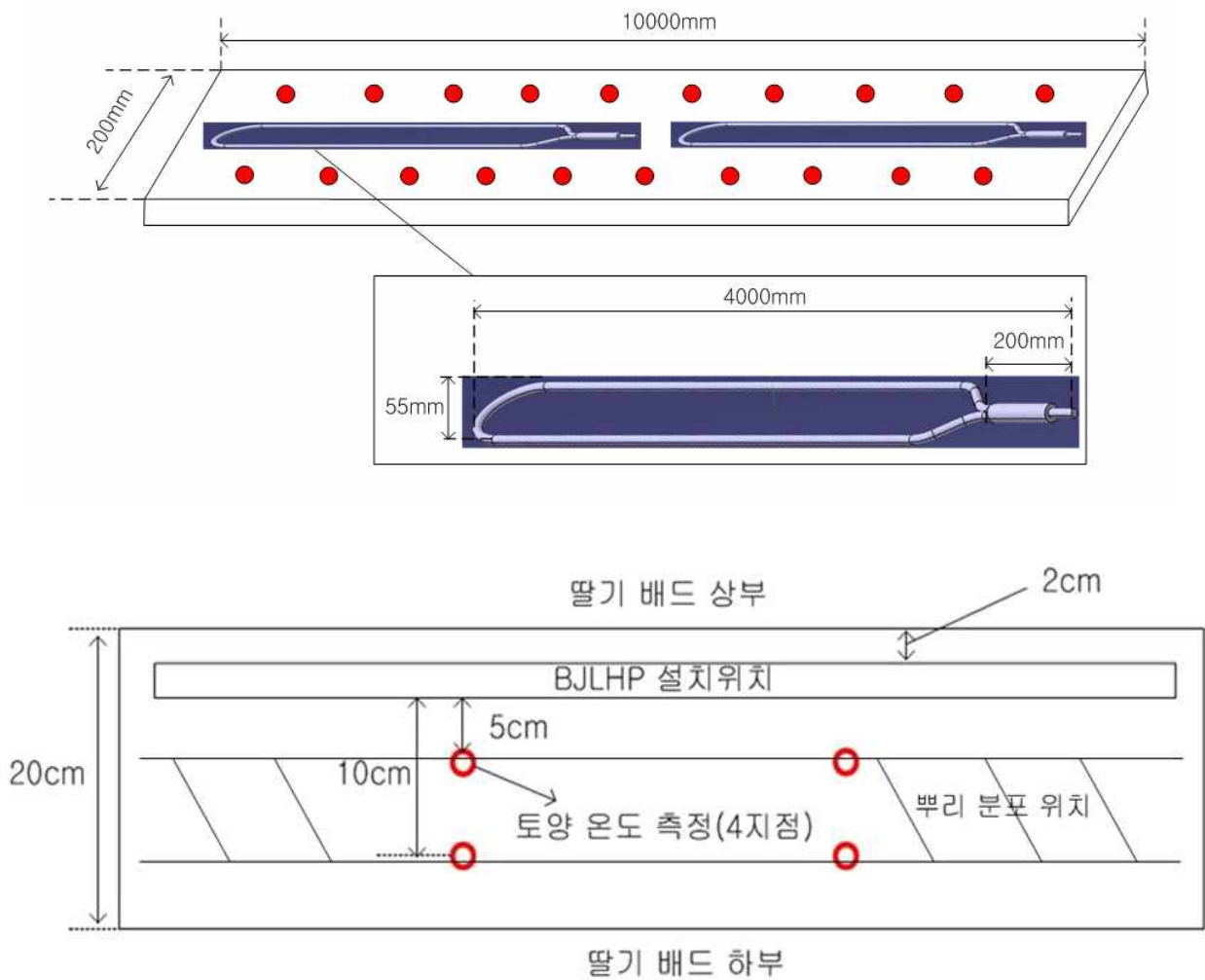


Fig. 48 Schematic of installation position



Fig. 49 Picture of experimental equipment (thermostat and watt-hour meter)



Fig. 50 Picture of experiment

3. 시험결과

(1) 토양 온도분포

버블젯 히트파이프의 정상 작동시와 미작동시로 구분하여 토양의 온도변화를 측정하였다. 측정 시간은 시작 17시, 측정종료 익일 17시로 약 24시간이다. 아래 그래프는 버블젯 히트파이프 작동시와 미작동시로 구분하여 시간에 따른 비닐하우스 실내온도, 토양온도의 변화를 나타낸 것이다. 토양온도는 5cm, 10cm 두 측정지점의 평균값을 사용하였다. 아래 사진은 버블젯 히트파이프 정상 작동시와 미작동시에 열화상카메라로 버블젯 히트파이프와 토양을 촬영한 것이다. 토양온도 분포 확인결과, 버블젯 히트파이프 작동시 토양온도는 17~20℃내외로 비교적 일정하게 유지되었으며 버블젯 히트파이프 미작동시 토양온도는 외기의 영향을 받아 10~18℃로 변동폭이 큰 것을 확인하였다. 열화상 카메라 촬영결과 버블젯 히트파이프 작동시와 미작동시 온도 분포가 확연히 상이한 것을 확인 할 수 있었다.

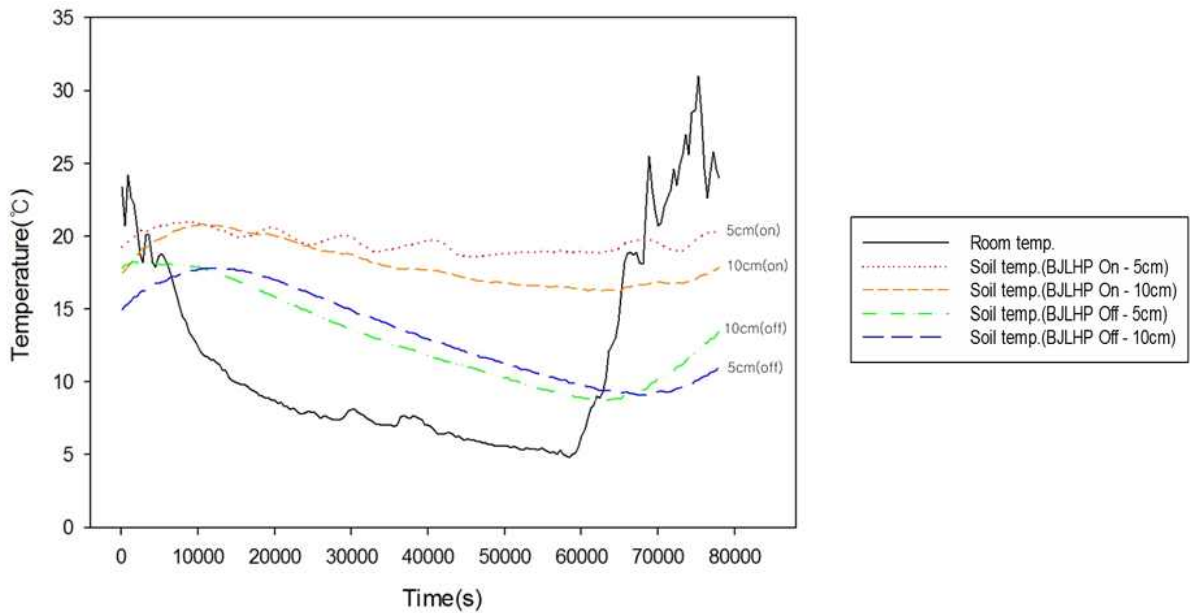
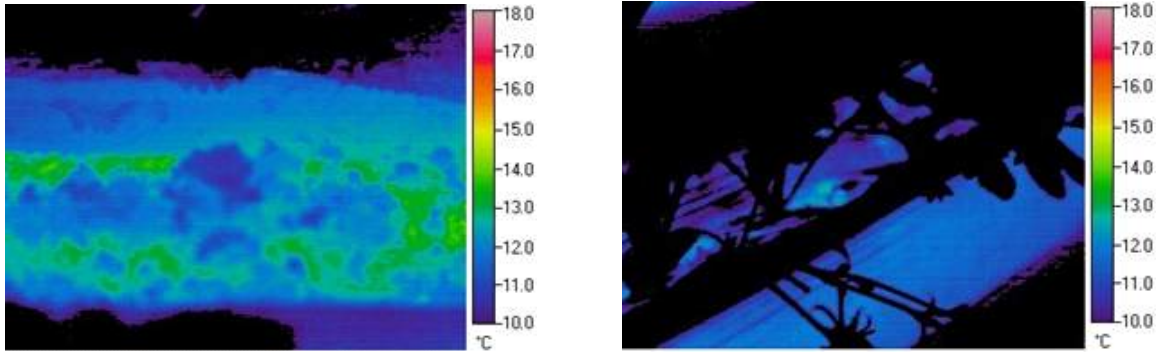


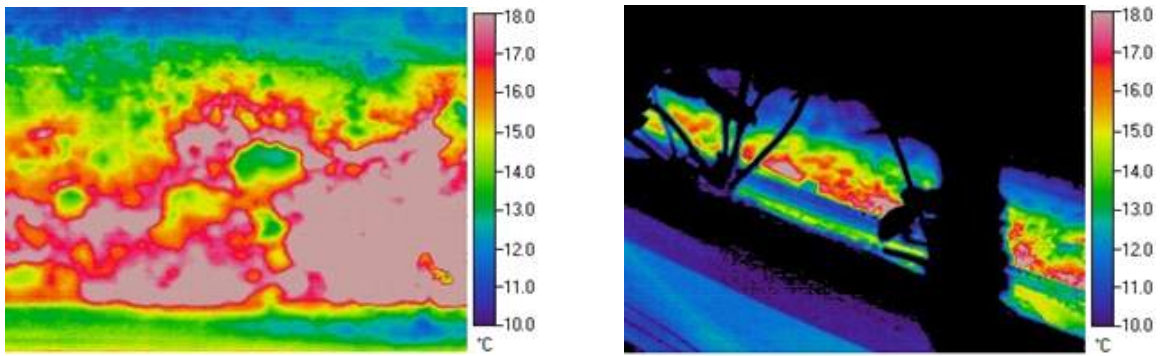
Fig. 51 Temperature profile of soil in strawberry bed

Table 22 The data value of Soil temperature

| | Average | Maximum | Minimum |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Soil temp.(ON-5cm) | 19.5 | 20.9 | 18.8 |
| Soil temp.(ON-10cm) | 18.1 | 20.6 | 16.2 |
| Soil temp.(Off-5cm) | 13.0 | 18.3 | 8.6 |
| Soil temp.(Off-10cm) | 13.3 | 17.8 | 9.1 |



(a) BJTLP off



(b) BJTLP on

Fig. 52 Thermo-graphic picture of soil

(2) 생육조사

Table 23 Comparison of growth

(a) 수확량(g)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 적용 | 미적용 |
|------------|--------------|--------|
| 2014.03.17 | 435.75 | 410.08 |
| 2014.03.21 | 334.33 | 302.58 |
| 2014.03.27 | 438.05 | 407.61 |
| 평균 | 402.71 | 373.42 |

(b) 중량(g)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 적용 | 미적용 |
|------------|--------------|-------|
| 2014.03.17 | 23.23 | 17.20 |
| 2014.03.21 | 23.21 | 16.21 |
| 2014.03.27 | 19.24 | 17.08 |
| 평균 | 21.56 | 16.83 |

Table 23은 날짜별 수확량 및 열매무게를 나타낸 것이다. 수확량은 12m 배드에서 수확한 딸기의 총무게를 1m 배드 기준으로 환산한 수치이며, 열매무게는 상품(上品) 딸기 50개를 추출하여 평균값을 사용하였다. 버블젯 히트파이프를 적용하여 근권난방을 실시한 배드와 미적용한 배드의 생육데이터를 측정 및 비교한 결과, 버블젯 히트파이프 근권난방의 경우에 수확량은 1m 배드당 약 7% 더 많이 수확되었고, 열매의 무게는 평균 28% 더 크게 측정되었다. 버블젯 히트파이프를 이용한 근권난방을 통해 과육상태가 우수한 딸기를 7% 더 많이 수확할 수 있을 것으로 예상되나 데이터 표본이 더 많이 필요할 것으로 생각된다.



(3) 에너지 소비량 비교

임대 시설에 설치한 버블젯 히트파이프의 1일 소모 전력량을 측정하여 10a 1개월 사용량으로 환산하여 월 전력 소모량을 추정하였으며, 농촌 진흥청 시험 결과를 참고하여 경유 온수 난방기를 사용한 전력 소모량과 비교하였다.

Table 24 Amount of electricity used of BJLHP and electric boiler

| | 버블젯 히트파이프 | 경유 온수 난방기 |
|-------|---------------------|------------------------------|
| 월 사용량 | 1,752kW/month | 7,300kW/month |
| 대비지수 | 24 | 100 |
| 장·단점 | CO2 배출 에너지 소모 과다 | 환경친화 균일한 온도분포 초기투자비 저렴 |

※농촌 진흥청 2002.10. 시설원예 난방 에너지 절감대책

추정 결과 버블젯 히트파이프는 경유온수 난방기 대비 약 76% 전력량을 절약 하는 것으로 나타났다.

4. 현장적용

시험장소: 경상남도 김해시 시산리

시험품종: 티아니티 대추토마토

경종개요: 정식(12.10), 수확(03.10~06.10)/ 정식(07.03), 수확(09.03~11.30)

재배방식: 고설재배

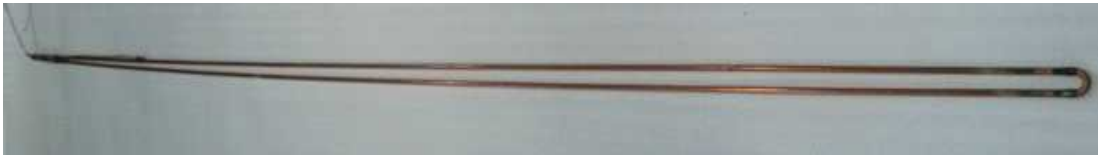
재식밀도: 2주/m²



Fig. 53 Picture of experiment

5. 버블젯 히트파이프 소재 및 형상 변경

시제품 제작을 위한 투자비 절감을 위해 버블젯 히트파이프의 소재 및 형상변경 연구를 진행하였다. 구리에 비해 상대적으로 단가가 낮은 스테인리스를 재료로 하여 버블젯 히트파이프를 제작하였으며 현장 적용을 통해 성능을 비교 분석하였다.



(a) Copper B JLHP

구리 : (열전도율: 401W/mK , 40A 기준 m당 가격: 3700원)



(b) Stainless steel B JLHP

스테인리스 : (열전도율: 16W/mK , 40A 기준 m당 가격: 1800원)

Fig. 54 Picture of B JLHP

6. 시험방법

동관을 사용한 버블젯 히트파이프와 스테인리스관을 사용한 버블젯 히트파이프를 현장에 적용하여 이 두 모델의 경우에 대한 성능을 비교 분석하였다. 또한 이 두 가지 경우와 기존의 온수를 이용한 XL파이프 근권난방(전기 보일러)을 비교하여 버블젯 히트파이프를 이용한 근권 난방과 기존의 XL파이프 근권난방의 차이점을 분석하였다. 이를 위해 각 경우에 토마토를 근권 난방 하였을 때 작물의 생육과 에너지소비량을 비교하는 연구를 진행 하였다. Fig. 55는 버블젯 히트파이프 설치 사진이다.



Fig. 55 Installation of BJTHP(stainless steel)

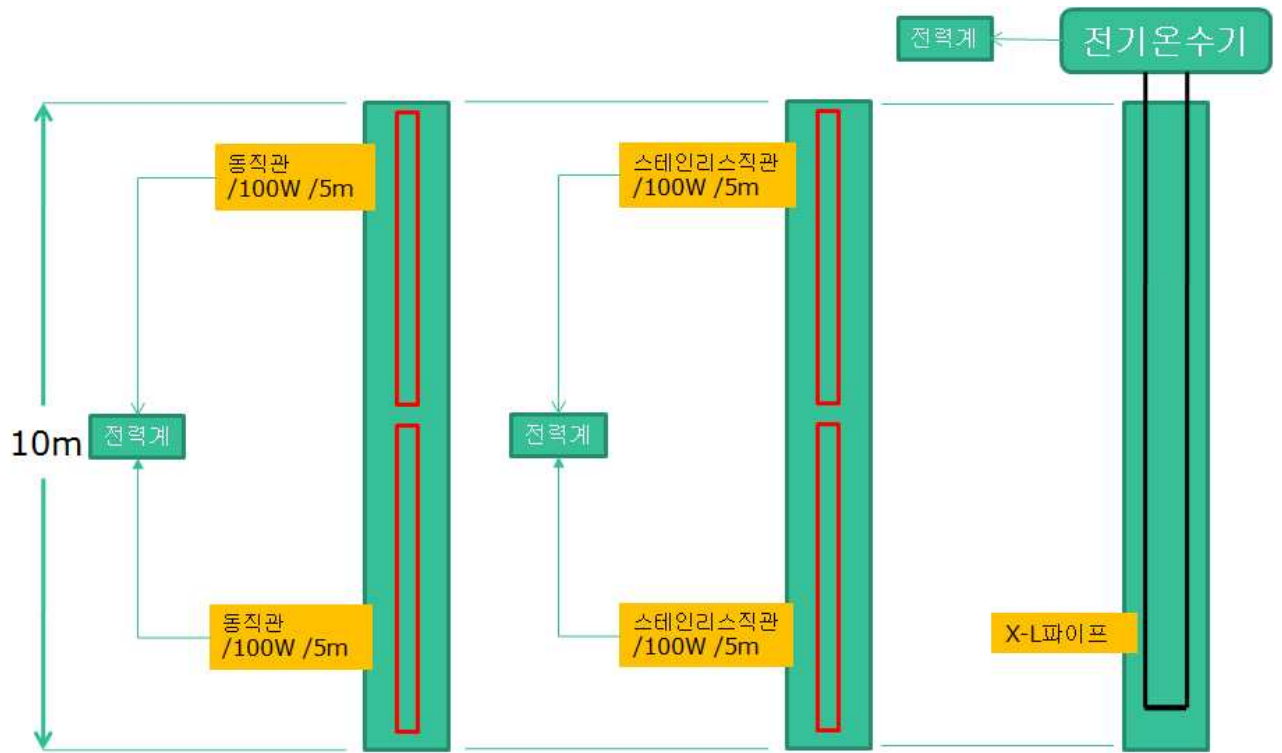


Fig. 56 Schematic diagram of experimental set up

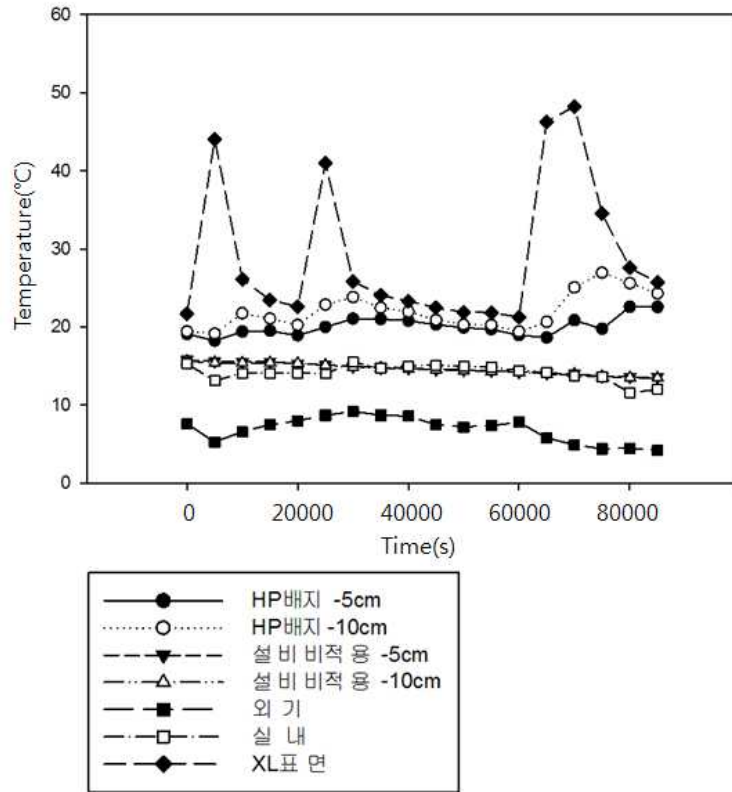


○ 토양온도 측정지점

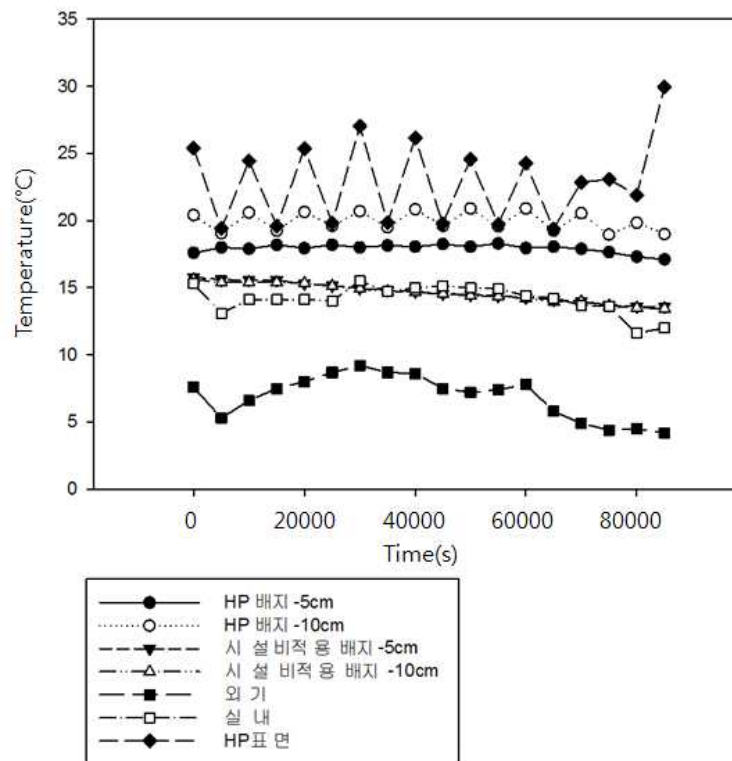
Fig. 57 Soil temperature measurement point

7. 시험결과

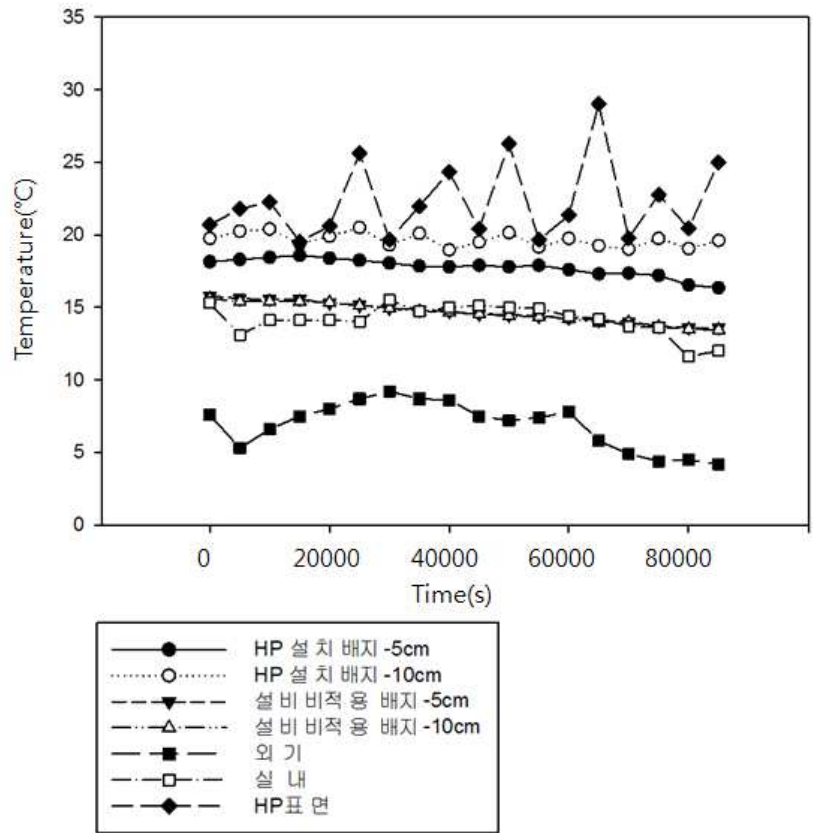
(1) 토양 온도분포



(a) XL pipe



(b) copper B JLHP



(c) stainless steel BJLHP

Fig. 58 Temperature profiles of soil

버블젯 히트파이프(스테인리스 스틸), 버블젯 히트파이프(구리), XL 파이프를 설치하였을 때 토양의 온도분포는 각 경우에서 20℃ 전후의 온도를 나타내며 비교적 일정한 온도를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 스테인리스관을 사용한 버블젯 히트파이프가 동관을 사용한 버블젯 히트파이프와 비교하여 성능이 떨어지지 않는다는 것을 확인할 수 있었고, 구리에서 스테인리스로의 소재변경을 통해 재료비에 있어서 버블젯 히트파이프(5m) 1개당 19,000원의 원가절감 효과가 있을 것으로 예상된다.

(2) 생육조사

Table 25 Comparison of growth

(a) 초장(cm)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프(구리) | 버블젯 히트파이프(스테인리스) | XL파이프 |
|------------|---------------|------------------|-------|
| 2014.03.13 | 39.4 | 36.9 | 38.9 |
| 2014.03.27 | 61.8 | 65.4 | 56.0 |
| 2014.04.15 | 111.8 | 111.8 | 108.5 |
| 평균 | 71.0 | 71.4 | 67.8 |

(b) 수확량(개)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프(구리) | 버블젯 히트파이프(스테인리스) | XL파이프 |
|------------|---------------|------------------|-------|
| 2014.03.13 | 4.6 | 5.1 | 2.7 |
| 2014.03.27 | 10.7 | 11.1 | 8.8 |
| 2014.04.15 | 33.9 | 35.3 | 34.5 |
| 평균 | 16.4 | 17.2 | 15.3 |

Table 25은 토마토에 버블젯 히트파이프(구리), 버블젯 히트파이프(스테인리스), XL 파이프를 이용한 근권 난방을 하고 생육데이터를 측정 비교한 결과이다. 두 종류의 버블젯 히트파이프 사이에는 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 XL파이프와 비교했을 시 초장에서는 약 5%, 수확량에서는 약 7% 높은 수치를 나타내었다. 그러나 생육 초기와 후기를 비교해 보면 생육 초기 시 그 차이가 뚜렷하나 후기가 될수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인 할 수 있는데 이를 통해 버블젯 히트파이프를 이용하여 근권난방하면 XL파이프 근권난방에 비해 초기 성장을 촉진 할 수 있을 것이라 생각된다.

(3) 에너지 소비량 비교



| | 02월 28일 | 03월 03일 | 03월 05일 | 03월 10일 | 03월 13일 | 03월 21일 | 03월 27일 | 04월 03일 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 버블젯 히트파이프(스테인리스) | 0 | 4.8 | 7.1 | 11.8 | 13.8 | 18.1 | 20.7 | 22.4 |
| 버블젯 히트파이프(구리) | 0 | 6.7 | 9.9 | 15.7 | 17.9 | 22.3 | 24.8 | 26 |
| XL파이프 | 0 | 29.6 | 48.7 | 68.16 | 76.76 | 84.62 | 89.36 | 95.96 |

Fig. 59 Comparison of electric consumption by date

3월 한달동안 소비전력량을 측정한 결과 버블젯 히트파이프(스테인리스), 버블젯 히트파이프(구리), XL 파이프는 각각 22.4kWh, 26kWh, 95.96kWh의 전력을 소비하였고, 이와 같은 순서로 소비전력량이 작게 나타났다. 이를 통해 버블젯 히트파이프를 이용한 근권난방 방식은 기존의 온수를 이용한 근권난방 방식에 비해 약 73% 에너지를 절약 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

8. 현장적용

시험장소: 경상북도 상주시 흥각동

시험품종: 오이

경종개요: 정식(09.03), 수확(11.25~06.10)

재배방식: 축성재배

재식밀도: 3주/m²



Fig. 60 Picture of experiment

9. 시험방법

현장적용을 위하여 버블젯 히트파이프를 지중 20cm 지점에 매설하였고, 누전을 방지하기 위하여 히터 용접부에 고무패킹 처리 및 절연테이프로 마감을 하였다. 매설된 버블젯 히트파이프의 정상작동을 확인하기 위하여 증발부 1개소, 응축부 5개소의 히트파이프 표면에 T-type 열전대를 부착하였고, 토양 온도 측정을 위해 지중 10cm 지점 2개소에 sheathed-type 열전대를 설치하였다. 비교를 위한 대조군으로 미처리 된 지점의 토양에도 동일한 위치에 열전대를 설치하였다.

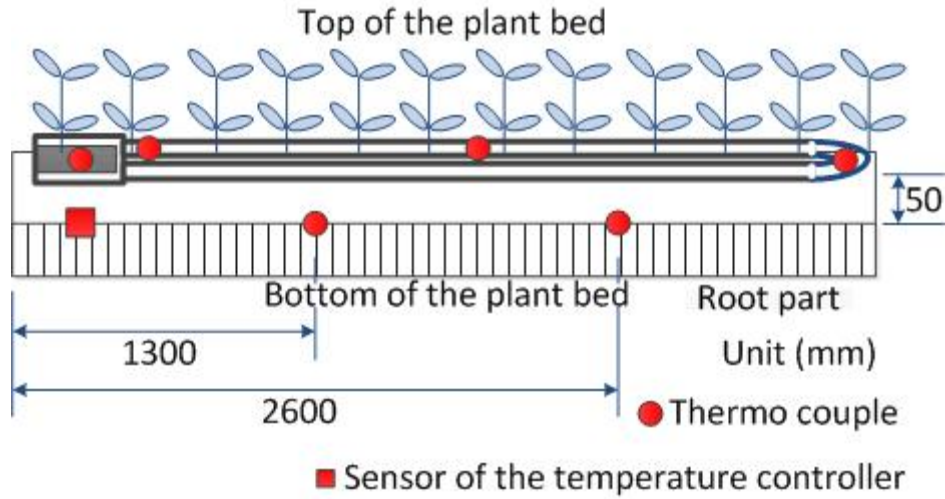


Fig. 61 Temperature measurement point

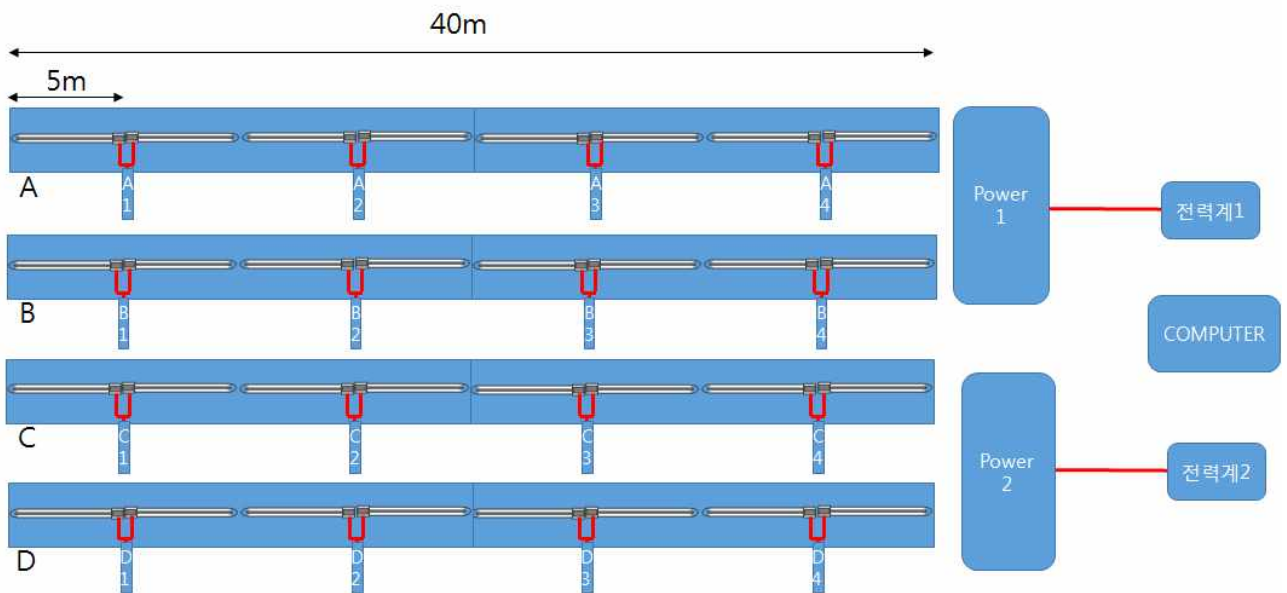


Fig. 62 Schematic diagram of experimental set up

10. 시험결과

(1) 토양 온도분포

매설된 버블젯 히트파이프를 작동 시키고 히트파이프의 표면 온도를 측정하였다. 측정시간은 13시에 시작하여 익일 13시 종료하였으며, 약 24시간 동안 데이터를 기록하였다. 측정결과 응축부(CON1~CON5)와 증발부(EV) 온도차는 1°C 이내로 정상적인 작동을 하였다. 토양온도를 측정한 결과, 버블젯 히트파이프를 매설한 곳의 토양 온도 분포는 19°C 내외로 오이생육에 적당한 온도를 유지하는 것을 확일 할 수 있었다. 반면 미처리한 곳의 토양 온도는 14~16°C로 근권난방시 토양의 온도에 비해 낮은 온도를 나타냈으며 비교적 변동폭이 크게 나타났다.

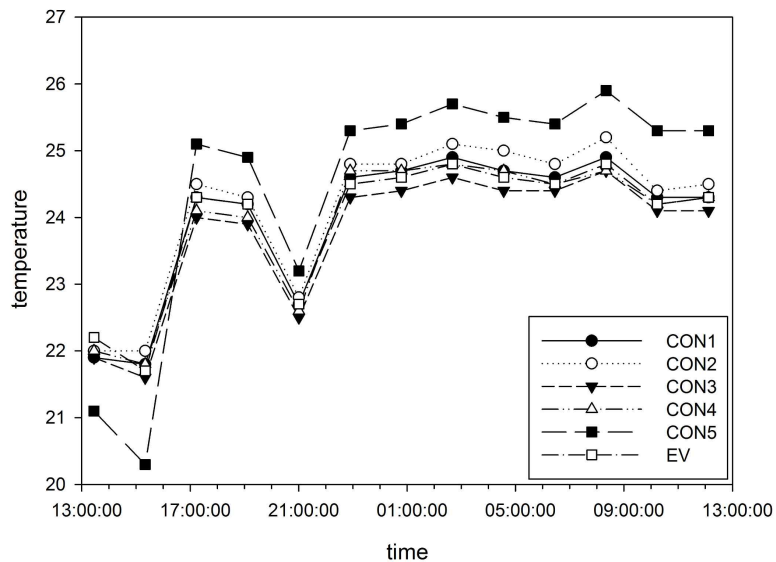


Fig. 63 Temperature profile of BJLHP

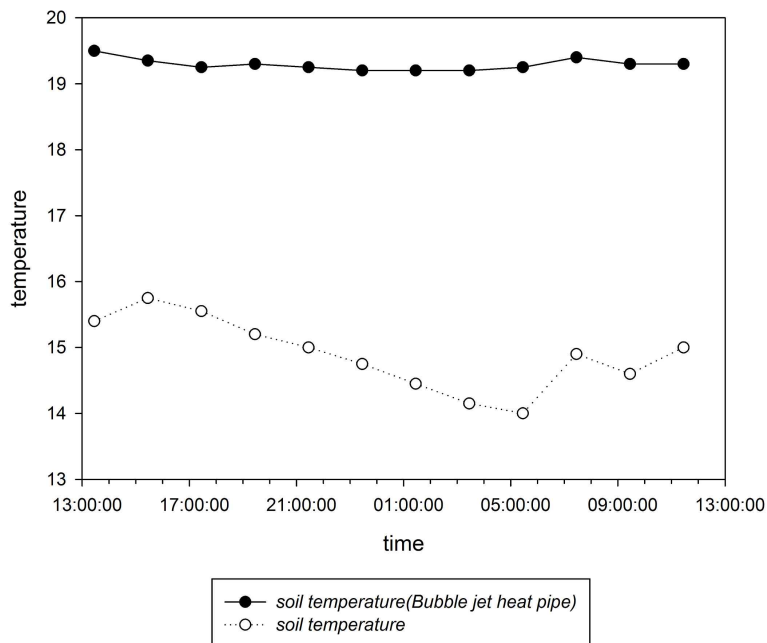


Fig. 64 Temperature profile of soil

(2) 생육조사

Table 26 Comparison of growth

(a) 수확량(개)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 | 미처리 |
|------------|--------------|------|
| 2014.12.20 | 0.67 | 0.48 |
| 2014.12.21 | 0.65 | 0.64 |
| 2014.12.22 | 0.61 | 0.80 |
| 2014.12.23 | 0.71 | 0.99 |
| 2014.12.24 | 0.51 | 0.69 |
| 2014.12.25 | 0.39 | 0.59 |
| 2014.12.26 | 0.64 | 0.75 |
| 2014.12.27 | 0.53 | 0.69 |
| 2014.12.28 | 0.51 | 0.67 |
| 2014.12.29 | 0.84 | 0.81 |
| 2015.12.30 | 0.71 | 0.53 |
| 2015.12.31 | 0.73 | 0.56 |
| 2015.01.01 | 0.71 | 0.61 |
| 2015.01.02 | 0.77 | 0.67 |
| 2015.01.03 | 0.84 | 0.61 |
| 2015.01.04 | 0.89 | 0.69 |
| 2015.01.05 | 0.85 | 0.64 |
| 2015.01.06 | 0.83 | 0.61 |
| 2015.01.07 | 0.72 | 0.56 |
| 2015.01.08 | 0.77 | 0.43 |
| 2015.01.09 | 0.65 | 0.32 |
| 2015.01.10 | 0.57 | 0.32 |
| 2015.01.11 | 0.45 | 0.35 |
| 2015.01.12 | 0.45 | 0.27 |
| 2015.01.13 | 0.40 | 0.24 |
| 2015.01.14 | 0.39 | 0.21 |
| 2015.01.15 | 0.35 | 0.19 |
| 2015.01.16 | 0.41 | 0.21 |
| 2015.01.17 | 0.64 | 0.35 |
| 2015.01.18 | 0.69 | 0.40 |
| 2015.01.19 | 0.77 | 0.48 |
| 평균 | 0.63 | 0.53 |

(b) 초장(cm)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 | 미처리 |
|------------|--------------|-------|
| 2014.11.07 | 157.0 | 151.0 |
| 2014.12.11 | 254.3 | 238.3 |
| 2014.12.29 | 295.4 | 285.7 |
| 평균 | 235.6 | 225.0 |

(c) 엽수(개)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 | 미처리 |
|------------|--------------|------|
| 2014.11.07 | 12.6 | 12.5 |
| 2014.12.11 | 19.3 | 19.1 |
| 2014.12.29 | 29.0 | 28.6 |
| 평균 | 20.3 | 20.1 |

다음은 날짜별 오이의 수확량, 초장 및 엽수를 나타낸 것이다. 초장 및 엽수는 오이나무 30그루를 표본으로 하여 평균값을 나타내었고, 수확량은 오이나무 75그루에서 수확한 오이의 총 개수를 한 나무 기준으로 환산하였다. 버블젯 히트파이프로 근권 난방을 한 곳과 기존의 온풍난방기만 사용한 곳에서 오이의 생육 및 수확량을 측정 비교한 결과 생육에 있어서는 그 차이가 5% 이내로 미미하였고, 수확량은 근권 난방을 한 곳의 오이가 약 19% 높은 수치를 나타냈다.



(a) Untreated (b) B JLHP root zone heating
Fig. 65 Comparison of growth

(3) 에너지 소비량 비교

시설원예에서 겨울철 근권 난방만으로는 작물재배가 불가능하여 열공급 정도가 근권 난방만 가능한 수준일 경우 공간난방을 위해서 또 다른 난방기가 필요하게 되므로 이중으로 난방비가 들어가게 된다. 따라서 본 연구에서는 공간난방만 하는 기존의 경우와 복합난방(근권 난방 + 공간난방)을 할 경우에 에너지 소비량을 비교하는 실험을 진행하였다. 기존의 공간난방만 할 경우(미처리)와 비교를 위해 버블젯 히트파이프가 설치된 곳에 온풍기를 추가로 설치하고 온풍기의 사용을 최소로 하여 복합난방을 실시하였다.

Table 27 Comparison of energy consumption

(a) Oil consumption(L/10a)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 | 미처리 |
|------------|--------------|-------|
| 2014.12.21 | 100.8 | 121.0 |
| 2014.12.22 | 100.8 | 121.0 |
| 2014.12.23 | 106.9 | 100.8 |
| 2014.12.24 | 90.7 | 80.6 |
| 2014.12.25 | 76.6 | 72.6 |
| 2014.12.26 | 80.6 | 121.0 |
| 2014.12.27 | 100.8 | 141.1 |
| 2014.12.28 | 100.8 | 141.1 |
| 2014.12.29 | 70.6 | 80.6 |
| 2015.12.30 | 131.0 | 161.3 |
| 2015.12.31 | 131.0 | 161.3 |
| 2015.01.01 | 110.9 | 141.1 |
| 2015.01.02 | 70.6 | 80.6 |
| 2015.01.03 | 100.8 | 121.0 |
| 2015.01.04 | 121.0 | 141.1 |
| 2015.01.05 | 131.0 | 153.2 |
| 2015.01.06 | 141.1 | 161.3 |
| 2015.01.07 | 141.1 | 161.3 |
| 2015.01.08 | 151.2 | 201.6 |
| 2015.01.09 | 131.0 | 161.3 |
| 2015.01.10 | 141.1 | 181.5 |
| 2015.01.11 | 131.0 | 161.3 |
| 2015.01.12 | 141.1 | 181.5 |
| 2015.01.13 | 151.2 | 202.6 |
| 2015.01.14 | 171.4 | 242.9 |
| 2015.01.15 | 131.0 | 161.3 |
| 2015.01.16 | 141.1 | 181.5 |
| 2015.01.17 | 141.1 | 161.3 |
| 2015.01.18 | 100.8 | 121.0 |
| 2015.01.19 | 80.6 | 100.8 |
| 평균 | 117.3 | 144.0 |

(b) Electric consumption(kW/10a)

| 날짜 | 버블젯 히트파이프 |
|---------------|--------------|
| 2014.12.19 | 1750 |
| 2014.12.29 | 3014 |
| 10일간 전력사용량 | 1264 |

Table 27의 (a)는 날짜별 경유 사용량 및 경유 사용량의 평균을 나타낸 것이다. 경유 사용량은 버블젯 히트파이프가 설치된 곳(약75평≒248m²)의 경유 온풍기에서 소모하는 경유의 양을 기준으로 10a(1,000m²)당 소모하는 경유의 양으로 환산하였다. (b)는 날짜별 적산전력 및 10일동안 전력 사용량을 나타낸 것이다. 전력 사용량은 버블젯 히트파이프가 설치된 곳(약75평≒248m²)의 버블젯 히트파이프에서 소모하는 전력량을 기준으로 10a(1,000m²)당 소모하는 전력량으로 환산하였다. 실험데이터는 12월 20일경부터의 실험데이터를 사용 하였으며, 이는 그전 시점까지는 지온이 내려가지 않아 버블젯 히트파이프 작동이 간헐적으로 이루어졌기 때문에 항상 작동하는 그 이후 시점부터의 데이터를 사용하였다.

Table 28 Comparison of energy consumption

| | 공간난방 | 복합난방(공간난방 + 근권난방) |
|----------|---------------|-------------------|
| 월 전력사용량 | | 3918.8kW/month |
| 월 경유 사용량 | 4462.5L/month | 3637.5L/month |
| 연료비 환산 | 4,016,250원 | 3,438,860원 |

기준:

비닐하우스 면적: 10a(1,000m²), 뿌리난방 시 토양의 평균 온도 19℃,

공간난방시 평균 온실 온도: 16℃, 복합난방시 평균 온실 온도: 14℃ (24시간 기준)

면세유 가격: 900원/L

농사용 전력 가격: 기본요금 1,150원/kW, 전력요금: 39.20원/kW

Table 28은 공간난방과 복합난방의 월 전력사용량과 월 경유사용량을 바탕으로 연료비를 환산한 결과이다. 공간난방과 복합난방의 연료비 환산결과 10a당 월 577,390원의 연료비 절감효과를 얻을 수 있었다.

18. 경제성 분석

Table 29 Economic analysis

| 버블젯 히트파이프를 이용한 근권난방 시스템 이용 시 연간 발생이익(원/year) | | | | |
|----------------------------------------------|------------|------------------|------------------|-------------|
| 소요기간 | 초기투자비 | 수확량 증가를 통한 연간 수익 | 연료비 절감을 통한 연간 수익 | 투자회수액 |
| 초기 | -7,758,530 | | | |
| 1년 | | 4,556,260 | 1,732,150 | -1,170,120 |
| 2년 | | 4,556,260 | 1,732,150 | +4,818,290 |
| 3년 | | 4,556,260 | 1,732,150 | +11,106,700 |

기준:

비닐하우스 면적: 10a(1,000m²),

버블젯 히트파이프 161.3개/10a 소요

면세유 가격: 900원/L

농사용 전력 가격: 기본요금 1,150원/kW, 전력요금: 39.20원/kW

오이 1개 가격: 610원(2015.01.20.일 기준)

오이 나무 개수: 756그루/10a

스테인리스 스틸 버블젯 히트파이프 가격: 48,100원/개

버블젯 히트파이프 사용기간: 3개월/년

경제성 분석을 위해 회수기간법을 사용하여 투자안에 대한 초기투자액을 회수하는 데 걸리는 연수를 산출하였다. 경제성 분석결과 1.25년 경과 후 초기투자액을 회수할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 결과는 국제유가 및 국내 전기요금의 영향을 많이 받으므로 장기적으로 국제유가 상승 시 고부가가치 사업이 될 것으로 기대된다. 또한 대량생산으로 인한 제작단가 절감 시 회수기간은 더 짧아질 것으로 예상된다. 또한 아직까지 오이 수확 종료시점까지 수확량의 변동과 오이의 상태 변화가 발생할 수 있기 때문에 추후 데이터를 관찰을 통해 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

19. 기준 제품과 경제성 분석 대조

전기 온수보일러 근권난방

Table 30 Economic analysis

| 전기 온수보일러를 이용한 근권난방 이용 시 연간 발생이익(원/year) | | | | |
|-----------------------------------------|------------|------------------|------------------|-----------|
| 소요기간 | 초기투자비 | 수확량 증가를 통한 연간 수익 | 연료비 절감을 통한 연간 수익 | 투자회수액 |
| 초기 | -5,700,000 | | | |
| 1년 | | +4,556,260 | +246,120 | -897,620 |
| 2년 | | +4,556,260 | +246,120 | 3,904,760 |
| 3년 | | +4,556,260 | +246,120 | 8,707,140 |

기준:

비닐하우스 면적: 10a(1,000m²),

전기 온수보일러 1대/10a

면세유 가격: 900원/L

농사용 전력 가격: 기본요금 1,150원/kW, 전력요금: 39.20원/kW

오이 1개 가격: 610원(2015.01.20.일 기준)

오이 나무 개수: 756그루/10a

전기 온수보일러 가격: 5,700,000원/대

전기 온수보일러 사용기간: 3개월/년

버블젯 히트파이프 근권난방과 전기 온수보일러 근권난방의 경제성을 비교한 결과 초기투자비의 경우 전기온수 보일러가 약 200만원 더 저렴했다. 근권난방으로 수확량 증가를 통한 연간 수익이 같다고 가정하면, 연료비 절감을 통한 연간 수익에서 차이가 나는데 이는 연간 약 150만원의 차이이다. 회수기간법으로 투자하는데 걸리는 연수를 산출한 결과 약 1.18년 경과 후 초기투자액을 회수 할 수 있을 것이라고 산출되었다. 즉 전기 온수보일러 근권난방은 버블젯 히트파이프 근권난방에 비해 투자회수 소요기간이 더 짧았다. 하지만 버블젯 히트파이프 근권난방의 투자회수액이 많았으며, 전기 온수보일러 근권난방은 입출구 온도차가 크기 때문에 버블젯 히트파이프 근권난방과 작물의 생육 및 생산량에 차이가 날 것이라고 사료된다. 때문에 기간이 늘어날수록 버블젯 히트파이프 근권난방과 차이는 더 두드러질 것으로 판단된다.

제 9 절 연구요약

| 버블젯 히트파이프 시험 | |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구사항 | 연구내용 |
| 증발부 간극(clearance) 변경 | <ul style="list-style-type: none"> - 증발부 간극(clearance)이 0.79mm, 2.17mm, 3.76mm일 때, 히터 입열량을 25W, 50W, 75W로 변경해 가며 실험 - 최적 clearance는 2.17mm, 최적 입열량은 25W로 나타남 - 최적 clearance와 최적 입열량을 통해 버블젯 히트파이프 근권 난방시스템을 최적화 |
| 비등축진 전열면 증발부 사용 | <ul style="list-style-type: none"> - 증발부가 나관, 소결관, 비등축진관 일 때, 히터 입열량을 75W, 100W로 변경하며 실험 - 증발부가 소결관 일 때 75W 입력 시 유효 열전도율이 가장 높음 - 증발부가 소결관 일 때 100W 입력시 열적 응답속도가 가장 빠름 - 증발부를 소결관을 사용하여 버블젯 히트파이프 근권 난방시스템을 고효율화 |
| 내부유동 가시화 | <ul style="list-style-type: none"> - 히터에 60W 열량을 인가하여 실험 - 버블젯 히트파이프의 작동유체는 증발부에서 핵비등에 의한 압력 증가로 인해 증발부에서 응축부로 이동함 - 응축관내 작동유체의 유동은 파형류, 슬러그류, 성층류과 같은 이상유동양식으로 나타남 - 증발부에서 응축부 말단으로 이동한 파동은 충돌 후 소멸하지 않고 루프관을 통해 순환하며 증발부로 귀환함 - 작동원리 및 특성 분석을 통해 실용화 연구에 도움 |
| 열원 변경 | <ul style="list-style-type: none"> - 공급 온수 온도가 50℃, 60℃일 때, 유량을 0.5kg/min, 1.0kg/min, 1.5kg/min로 변경하며 실험 - 공급 온수 온도 50℃, 유량 1.5kg/min일 때 유효 열전도율이 가장 높음 - 유량이 증가할수록 유효 열전도율이 높아짐 - 온수 가열형 버블젯 히트파이프의 적용가능성 확인 |
| 현장적용을 위한 재설계 | <ul style="list-style-type: none"> - 응축부 길이가 4m일 때, 히터 입열량을 25W, 50W, 75W, 100W로 변경하며 실험 - 모든 입열량 조건에서 높은 유효열전도율을 보임 - 히터입열량 100W 입력시 열적 성능이 가장 좋음 - 공인인증기관 시험 성적서 획득 - 현장적용이 이상이 없을 것으로 판단 |
| 접이식 버블젯 히트파이프 개발 | <ul style="list-style-type: none"> - 접이식 버블젯 히트파이프 개발, 응축부 접이 각도를 0~5.0°까지 0.5°간격으로 변경하며 실험 - 응축부 접이 각도를 0~2.5°일 때 유효 열전도율이 소폭상승 - 응축부 접이 각도가 3°이상일 때 유효 열전도율이 감소, 최소값 도달 후 일정하게 유지 - 히터 삽입방식을 변경하여 제작공정을 단순화, 비등 열전달 효과를 높임 - 접이식 버블젯 히트파이프로 운반 및 설치의 편의성을 높임 - 접이식 버블젯 히트파이프로 버블젯 히트파이프 근권 난방시스템을 실용화 - 공인인증기관 시험 성적서 획득 - 특허출원 완료 |

| 현장적용 시험 | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구사항 | 연구내용 |
| 딸기 농장 | <ul style="list-style-type: none"> - 연구기간: 2013.11.28.~2014.03.27 - 위치: 경남 김해시 시산리 소재 딸기농장 - 적용작물: 딸기 - 토양온도분포: 버블젯 히트파이프 근권난방 작동시 토양의 온도는 17~20℃내외로 균일한 온도 분포를 나타냄, 반면 미처리한 곳의 토양의 온도는 10~18℃로 온도가 낮고 변동폭이 큼 - 수확량: 버블젯 히트파이프 근권난방시 수확량은 미처리에 비해 약7% 많이 산출됨 - 생육: 버블젯 히트파이프 근권난방시 열매무게는 미처리에 비해 약28% 크게 측정됨 - 전력 소비량: 버블젯 히트파이프를 이용한 근권난방 방식은 경유(전기) 보일러를 이용한 근권난방에 비해 약 92% 에너지 절약이 가능함 |
| 토마토 농장 | <ul style="list-style-type: none"> - 연구기간: 2014.02.28~2014.04.15 - 위치: 경남 김해시 시산리 소재 방울토마토 농장 - 적용작물: 방울토마토 - 소재변경 및 형상변경: 버블젯 히트파이프 재료를 구리에서 스테인리스 스틸로 변경 시 버블젯 히트파이프(5m) 1개당 19,000원의 원가절감 - 토양온도분포: BJLHP(스테인리스 스틸), BJLHP(구리), XL파이프 근권난방시 토양의 온도분포는 모두 19℃내외로 균일한 온도분포를 나타냄 - 생육: BJLHP(스테인리스 스틸)와 BJLHP(구리) 근권난방시 생육은 거의 동일 하였으며 XL파이프 근권난방에 비해 약5% 높은 수치를 나타냄 - 수확량: BJLHP(스테인리스 스틸), BJLHP(구리), XL파이프 근권난방 순으로 수확량이 많았으며 각각 7%, 5% 높게 나타남 - 전력소비량: 버블젯 히트파이프를 이용한 근권난방 방식은 온수를 이용한 XL파이프 근권난방에 비해 약 73% 에너지 절약이 가능함 |
| 오이 농장 | <ul style="list-style-type: none"> - 연구기간: 2014.9.27.~2015.01.20. - 위치: 경상북도 상주시 흥각동 소재 오이농장 - 적용작물: 오이 - 토양온도분포: 버블젯 히트파이프 근권난방시 토양의 온도는 19℃내외로 균일한 온도 분포를 나타냄, 반면 미처리한 곳의 토양의 온도는 14~16℃로 온도가 낮고 변동폭이 큼 - 수확량: 버블젯 히트파이프 근권난방시 수확량은 미처리에 비해 약19% 많이 산출됨 - 연료비: 복합난방(공간난방+근권난방)시 연료비는 공간난방에 비해 약 18% 적게 소비됨 - 경제성분석: 연료비 절감과 수확량 증가에 따른 농가소득 증대에 따른 산출결과 2년 내로 초기투자비를 회수할 수 있음 |

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

| 구분 (연도) | 세부과제명 | 세부연구목표 | 달성도 (%) | 연구개발 수행내용 |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차 년도 (2013) | 시설원예용 난방시스템에 적용 가능한 버블젯 히트파이프 및 근권 난방 시스템 개발 | 기초자료 조사 및 버블젯 히트파이프 고효율화 방안모색 | 100% | -비등이 발생하는 증발부 형상에 따라 성능차이가 발생할 것으로 예측 -이중관을 이루는 증발부의 외관과 내관 사이의 클리어런스에 따른 BJLHP의 성능평가 완료 -과열도를 낮추어주어 효율을 향상시키기 위하여 증발표면에 공동을 형성하여 BJLHP 성능평가 완료 |
| | | 기초 설계, 운전조건, 성능변수 검토 | 100% | -열원으로 전기히터를 사용하는 경우와 온수를 사용하는 경우로 분리하여 증발부 형상을 2타입으로 설계 -이중관을 이루는 증발부 내관으로 온수가 흐르는 형상을 설계하여 50, 60℃ 온도에서 유량을 0.5, 1, 1.5L/min로 변화시켜 가며 실험 완료 |
| | | 성능실험 및 제작 | 100% | -농장에 적용하기 위하여 최적 설계 진행 -실제 적용의 편의성을 위하여 응축부 길이를 4m로 증가시켜 장치를 제작 및 성능실험 완료 |
| | | 실제 버블젯 히트파이프 장치 농장적용(1) | 30% | -경남 김해시에 위치한 엘림농장(딸기)을 적용농가로 선정하여 BJLHP 설치완료 |

| 구분 (연도) | 세부과제명 | 세부연구목표 | 달성도 (%) | 연구개발 수행내용 |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2차 년도 (2014) | 버블젯 히트파이프를 적용한 시설원예용 고효율 근권 난방시스템의 대량생산을 위한 최적화, 표준화 설계 | 실제 BJLHP장치 농장적용(1) | 70% (100%) | -BJLHP사용에 따른 토양 온도 분포 파악 및 농촌 진흥청 시험 결과를 참고하여 경유(전기) 보 일러를 사용한 전력 소모량과 비교 완료 |
| | | 버블젯 히트파이프 개선 및 실용화 방안모색 | 100% | -기존의 버블젯 히트파이프의 운반, 설치 및 작동특성의 문제 를 개선하기 위한 방안으로 구 부릴 수 있는 BJLHP 개발 -수평상태 및 응축부 높이가 증 발부에 비해 높은 위치에 있는 상태에서 응축부의 각도 변화에 따른 BJLHP의 성능평가 완료 -구체적인 신뢰성 평가를 위해 공인 인증기관(부산테크노파크) 의 시험 성적서 획득 |
| | | 버블젯 히트파이프의 소재 및 형상변경 | 100% | - 버블젯 히트파이프의 재질 변경(스테인리스 스틸) 및 길이 증가(5m)를 통해 초기 투자비 와 시설비를 절감 예측 |
| | | 실제 버블젯 히트파이프 장치 농장적용(2) | 100% | -적용작물을 방울토마토로 변 경하여 현장적용 실시 -스테인리스 스틸 재질의 버블 젯 히트파이프와 구리재질의 버블젯 히트파이프를 설치하여 성능비교 완료 -XL파이프 근권 난방방식과 버블젯 히트파이프 근권 난방 방식의 전력 소모량 및 작물 생육 비교 완료 |
| | | 실제 버블젯 히트파이프 장치 농장적용(3) | 100% | -경북 상주시에 위치한 오이농 장을 적용 농가로 선정하여 BJLHP를 설치완료 -BJLHP사용에 따른 토양 온도 분포를 파악 -동계 시 BJLHP 사용에 따른 작물의 수확량 확인 -운전조건(공간난방, 복합난방) 에 따른 에너지 소비량 비교 -경제성 분석 완료 |

제 5 장 연구개발 성과 및 성과 활용 계획

제 1 절 연구개발의 성과

1. 특허성과

본 연구 과제를 진행하면서 실용화 방안으로 개발한 ‘접이식 버블젯 루프 히트파이프’에 대한 특허출원을 완료하였다.

접이식 버블젯 루프 히트파이프

출원번호: 10-2015-001007

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: right; font-size: small;">2015-01-23</p> <p style="text-align: center;">【발명의 설명】</p> <p>【발명의 명칭】</p> <p>접이식 버블젯 루프 히트파이프(Folded Bubble Jet Loop Heat Pipe)</p> <p>【기술분야】</p> <p>【0001】 본 발명은 접이식 버블젯 루프 히트파이프에 관한 것으로, 좀 더 구체적으로는 제작 공정상의 어려움을 해결하기 위하여 히터와 베이스 튜브의 하부단을 용접 결합하였으며, 열매체가 베이스 튜브의 내부공간에 수용되어 히터와 직접적으로 접촉을 하고, 내주면과 히터의 사이에 형성된 환형공간에서 핵비동이 발생되어 에너지 소비 효율 및 비등열전달 효율을 향상시킬 수 있으며, 전열용 튜브의 벤딩부는 주름이 형성된 주름관 유닛을 이용하여 설정한 각도만큼 기울여 설치할 수 있고, 접어서 이동이 가능하도록 설계가 되어있기 때문에 운반 및 설치의 용이성이 향상될 수 있으며, 전열용 튜브의 말단을 약간 들어올림으로써 열매체의 귀환을 원활하도록 하여 작동성능이 향상되는 한편 히터 전열면의 드라이 아웃(dry-out)에 의한 작동오류도 방지될 수 있는 접이식 버블젯 루프 히트파이프에 관한 것이다.</p> <p>【발명의 배경이 되는 기술】</p> <p>【0002】 히트파이프는 일반적으로 열매체를 통해 열을 전달하는 방식으로 통상적인 열 전달 장비에 비해 열 전달성이 높은 무동력 열전도 장비이고, 이를 이용</p> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">22-4</p> | <p style="text-align: right; font-size: small;">2015-01-23</p> <p>【도 5】</p> <p>【도 6】</p> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">22-22</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

2. 논문성과

본 연구와 관련하여 학술대회 참가발표 및 국내외 학술지 논문등재를 통해 지적재산권을 확보하였다.

- (1) 신중석, 김종수, 권용하, 2013, Development of high performance Bubble Jet Loop Heat Pipe using enhanced boiling surface in evaporating section, The 11th International Heat Pipe Symposium 180-183
- (2) 신중석, 김종수, 권용하, 2013, 증발부 형상에 따른 BJLHP 성능에 관한 연구, 2013년도 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집 21-25
- (3) 김정웅, 김종수, 권용하, 2014, 버블젯 루프 히트파이프를 이용한 시설원예용 근권난방, 2014년 하계학술발표대회 논문집 22-25
- (4) 황언화, 김종수, 권용하, 김준하, 배재영, 2014, Bubble Driven Loop Heat Pipe 내부 유동 가시화, 2014년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집 145
- (5) 황언화, 김종수, 권용하, 김준하, 배재영, Flow Visualization of Bubble Driven Loop Heat Pipe, 2014, 2015 International Ocean Energy Symposium & 13th Joint Young Researcher Forum 11-14

3. 기술이전

참여기업(디에이치테크 주식회사)에 버블젯 히트파이프를 이용한 시설원예용 고효율 근권 난방 시스템 개발에 관한 기술지도를 하였으며, 참여기업 대표와 향후 연구개발결과의 참여의사를 확인하고 기업화등에 대한 협의를 완료하였다. 또한 ‘접이식 버블젯 루프 히트파이프’ 특허에 대한 기술이전 계약을 완료하였다. 추후 고설재배용 고정식 난방시스템(버블젯 히트파이프 근권 난방시스템 일체형 베드) 개발 등을 통해 상품화하여 연구결과를 실용화, 상업화 할 계획이다.

| 기술이전(실시권)계약서 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------|--|-------|-----------------------------|-------|--------|-------------------|--|-------|----------------------|-------|------------|---------------|--|-----------|--|-------|-------------|-------|--|---------|--|-------|--------|-------|--|---------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p style="text-align: center;">“부경대”(기술보유자)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">성 명 :</td> <td>부경대학교 산학협력단</td> </tr> <tr> <td>단 장 노 의 철</td> <td></td> </tr> <tr> <td>주 소 :</td> <td>부산광역시 남구 신선로 365 부경대학교 내</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">“디에이치테크”(실시기업)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">성 명 :</td> <td>디에이치테크</td> </tr> <tr> <td>대 표 이 사 황 소 용 (인)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>주 소 :</td> <td>부산광역시 강서구 화전산단 6로</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">“기술이전책임자”</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">성 명 :</td> <td>부경대학교 공과대학</td> </tr> <tr> <td>냉 동 공 조 공 학 과</td> <td></td> </tr> <tr> <td>김 중 수 교 수</td> <td></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">담당자</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">성 명 :</td> <td>부경대학교 산학협력단</td> </tr> <tr> <td>김 재 현</td> <td></td> </tr> <tr> <td>연 락 처 :</td> <td></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">담당자</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">성 명 :</td> <td>디에이치테크</td> </tr> <tr> <td>이 성 우</td> <td></td> </tr> <tr> <td>연 락 처 :</td> <td></td> </tr> </table> <p style="text-align: right;">2015년 1월 9일</p> | 성 명 : | 부경대학교 산학협력단 | 단 장 노 의 철 | | 주 소 : | 부산광역시 남구 신선로 365 부경대학교 내 | 성 명 : | 디에이치테크 | 대 표 이 사 황 소 용 (인) | | 주 소 : | 부산광역시 강서구 화전산단 6로 | 성 명 : | 부경대학교 공과대학 | 냉 동 공 조 공 학 과 | | 김 중 수 교 수 | | 성 명 : | 부경대학교 산학협력단 | 김 재 현 | | 연 락 처 : | | 성 명 : | 디에이치테크 | 이 성 우 | | 연 락 처 : | | <p>에이치테크가 본 기술의 국외실시를 원하는 경우에는 별도로 “부경대”와 국외실시에 관한 실시계약을 체결하여야 한다.</p> <p>제 10 조 (기술의 실시 등)</p> <p>① “부경대”는 “디에이치테크”에게 본 기술을 실시할 수 있는 통상실시권을 허여하며, 본 기술을 이용한 제품의 시장 적합성과 경제성 및 판로시장 개척 또는 영업에 대하여 “부경대”는 책임지지 아니한다.</p> <p>② “부경대”는 “디에이치테크”가 기술의 실시 등에 있어서 기술적인 지원을 요청할 경우 이에 성실히 지원하여야 하며, 그 비용은 “디에이치테크”가 부담한다.</p> <p>③ 시제품 생산은 계약 후 2년 이내에 하여야 하며, “디에이치테크”는 본 기술을 이용한 제품의 상품 생산 개시일을 “부경대”에게 서면 통지하여야 한다. 다만 생산 개시일은 양 당사자의 합의하에 연기할 수 있다.</p> <p>④ “디에이치테크”는 실시사업과 같이 이전하는 경우 또는 상속 기타 일반승계의 경우를 포함하여 “부경대”의 사전 서면 동의없이 제3자에게 통 실시권을 제공하거나 양도할 수 없다.</p> <p>제 11 조 (기술료 등)</p> <p>① “디에이치테크”는 본 계약조건에 따른 기술이전에 대한 대가로서 “부경대”에게 기술료를 지급하고, <u>제약, 종료일</u>까지 본 기술에 대한 산업재산권 취득 및 유지비용 또한 “디에이치테크”의 부담으로 한다.</p> <p>② “디에이치테크”는 기술료로 금5,000,000원정을 계약체결일로부터 60일 이내에 “부경대”에게 현금으로 지급한다(부가세 별도).</p> <p>③ 본 계약에 의한 기술료의 입금은 “부경대”가 지정하는 다음의 은행계좌로 입금한다.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 은행 명 : 수협 ○ 계좌번호 : ○ 예 금 주 : 부경대산학협력단 <p>④ “디에이치테크”가 제2항의 지급일을 정당한 사유 없이 지키지 않을 경우, “부경대”는 지급 당시의 주거래 은행의 연체이자율을 적용하여 연체이자를 지급토록 할 수 있다.</p> <p>⑤ 제4항은 손해배상 청구에 영향을 미치지 아니한다.</p> <p>제 12 조 (기술전수 기간)</p> <p>본 계약의 기술전수 기간은 계약체결일로부터 3개월로 한다. 다만, “부경대”는 “디에이치테크”의 기술전수 수용능력을 고려하여 기술전수 기간을 연장할 수 있으며,</p> |
| 성 명 : | 부경대학교 산학협력단 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 단 장 노 의 철 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 주 소 : | 부산광역시 남구 신선로 365 부경대학교 내 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 성 명 : | 디에이치테크 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 대 표 이 사 황 소 용 (인) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 주 소 : | 부산광역시 강서구 화전산단 6로 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 성 명 : | 부경대학교 공과대학 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 냉 동 공 조 공 학 과 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 김 중 수 교 수 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 성 명 : | 부경대학교 산학협력단 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 김 재 현 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 연 락 처 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 성 명 : | 디에이치테크 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 이 성 우 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 연 락 처 : | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4. 기타성과

(1) 인력지원

학위취득, 석사:4, 학사:5, 공학석사 학위논문: 2014, Bubble Jet Loop Heat Pipe의 증발부 형상에 따른 근권난방 시스템의 성능특성에 관한연구, 2015, 접이식 버블젯 루프 히트파이프의 열 전달 특성에 관한 연구

(2) 수상실적

배재영, 오인택, 2014, 버블젯 히트파이프를 이용한 온수난방, 대한설비공학회, 장려상

(3) 전시회 참여

2014 연구개발 특구 창조 특허 기술박람회, 버블젯을 이용한 루프형 히트파이프

제 2 절 활용방안 및 분야

1. 활용방안

- (1) 생장기간 단축 및 상품성 향상을 통한 시설원예농가의 경쟁력 강화
시설원예 작물(파프리카, 토마토, 딸기, 오이 등) 뿌리난방을 통한 농장물의 생장기간 단축 및 상품성 향상
- (2) 기존 난방시스템의 대체를 통한 에너지 절약 및 제반 비용 절감
기존의 근권 난방시스템과의 비교시 70%이상의 에너지 절감, 초기투자 비용 절감 및 유지보수 비용 절감

2. 활용분야

- (1) 종묘장의 온도제어
종묘장의 난방시에도 균일한 온도 조절과 아울러 에너지 절약 가능
- (2) 축사 난방 에너지 절감 및 사육환경개선
버블젯 히트파이프를 통한 난방을 통해 축사의 사육환경 개선과 연료비 절감을 통한 농가의 소득 증대 경쟁력 강화
- (3) 딸기, 토마토, 블루베리, 고추 등 작물 훈숙
훈숙에 사용되는 에너지 절약 효과
- (4) 양채류(상추, 양상치, 양배추 등) 수경재배
수경재배시 물의 온도 제어를 통한 생장기간 단축, 상품성 향상 에너지 절약
- (5) 양어(양식)장 온도
양어 및 양식 시 종류에 따른 최적의 수온 조절 통한 생장 조건 형성 통해 농가 소득 향상
- (6) 고온건조 식품
대추, 마늘, 녹차류 등의 건조시 건조 시간단축 및 에너지 절감
- (7) 이외에도 건축, 기계, 의료 등의 다양한 분야에 적용 가능
 - ① 건축분야 : 아파트 발코니 확장구역의 바닥 및 벽체에 난방적용
아파트, 사무실 등 재실자의 온열 환경개선을 통한 주거문화 선진화와 에너지절약
 - ② 산업분야 : 냉동, 히트펌프 등의 제상장치
전자기기의 방열, 폐열 회수용 열교환기, 융설, 태양열 집열기 등 고성능 열교환기 및 열교환기의 콤팩트화
 - ③ 의료분야 : 온열 마사지기, 의료용 침대 등에 적용
유해 전자파 발생하지 않아 환자의 건강 증진 도모 정밀 의료기기의 오작동 방지
부위별 정밀 온도 조절이 가능하므로 이를 통한 환자의 육창 방지 및 쾌적한 환경제공을 통한 건강 증진도모

제 6 장 참고문헌

1. 변종립(2014), “2014 에너지통계 핸드북”, 에너지관리공단.
2. 정현석(2008), “루프타입 진동형 히트 파이프의 열전달 성능에 미치는 유동채널 수 및 가열 모드의 영향”, 부경대학교 대학원
3. 최우석(2008), “진동형 히트파이프를 이용한 히트싱크의 냉각 성능에 관한 연구”, 부경대학교 대학원
4. 정현석, Ngoc Hung Bui, 김정훈, 김종수(2001), “루프타입 진동형 히트파이프의 기초연구”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.169~173.
5. D. A. Reay and P. A. Kew(2005), Heat pipes, Butterworth-Heinemann, 5th ed.
6. 이상일(2013), “진동형 히트파이프의 증발관 형상에 따른 이중 진공관 태양열 집열기의 성능 특성에 대한 연구”, 부경대학교 대학원.
7. 日本ヒートパイプ協會(2001), 實用ヒートパイプ, 日刊工業新聞社.
8. 신중석(2014), “Bubble Jet Loop Heat Pipe의 증발부 형상에 따른 근권 난방시스템의 성능 특성에 관한 연구”, 부경대학교 대학원.
9. 김태훈, 김종수, 하수정, 임용빈(2004), “진동세관형 히트파이프를 이용한 태양열 집열기 개발에 관한 기초연구”, 대한기계학회 2004년도 춘계학술대회, pp.1394-1399.
10. 이육현(2000), “진동 세관형 히트 파이프의 열전달 및 유동 특성에 관한 연구”, 부경대학교 대학원.
11. Dong-chuan MO, Guan-sheng ZOU, Shu-shen LU(2011), “Visual Research on the Heat and Mass Transfer in a Flat Loop Heat Pipe”, Proceedings of the 10th International heat pipe symposium, pp.121~125.
12. Kiyoshi Tanaka, Masafumi Katsuta and Yuichi Ishii(2011), “Thermal Performance of the LHP(Loop Heat Pipe) with the Flat Plate Evaporator”, Proceedings of the 10th International heat pipe symposium, pp.138~142.
13. 김무환(1993), 이상유동 열전달(Two-Phase flow heat transfer), 대영사.
14. 김종수(2011), 열교환기 설계 및 연습, 고려동.

15. Lee, H. J., 2009, "Flow Visualization of Bubble Jet Loop Heat Pipe", Pukyong National University.
16. Hwang, J. H., 2011, "Study for defrost of evaporator using bubble jet loop heat pipe as a defrost device", Graduate school, Pukyong National University.
17. Jung, D. G., Woo, J. H., Kim, J. S., 2011, "A study on heat transfer and flow characteristics of bubble jet loop heat pipe", Proceeding of the KSME conference, pp. 175-180.
18. Yeo, J. W., 2012, "Development of cooling system for automobile LED headlamp using heat pipe with crevice type vapor chamber", Pukyong National University. pp. 15-24.
19. KANEYASA NISHIKAWA and YASUNOBU FUSJTA, Nucleate Boiling Heat Transfer and Its Augmentation, Advances in heat transfer, Vol. 20, pp. 36-55.
20. Kang, M. G., 1999, "Effects of tube diameter on nucleate pool boiling heat transfer" Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B pp. 930-937.
21. Kim, G. B., 2004 "Analysis of hat transport characteristics for the sintered metal wick heat pipe" The Korean Society of propulsion engineers pp. 16-25.
22. Lee, W. H., 2004, "Study on a operating Characteristics of loop heat pipe using a brass sintered metal wick-water." Proceeding of the KSME conference, pp. 1528-1533.
23. Kim, N. H., 2001, "The effect of pore size on the forced convective boiling in a bundle of enhanced tubes." Proceeding of the KSME conference, pp. 181-193.
24. Shin, J. S., 2013, Performance evaluation of high performance Bubble Jet Loop Heat Pipe using enhanced boiling surface in evaporating section, Proceeding of the KSME conference, pp. 236-239.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농생명산업기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농생명산업기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.