creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

博士學位論文

제주지역에서의 지중공기열을 이용한 지열시스템 실증 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科

金 成 萬

2014年 2月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주지역에서의 지중공기열을 이용한 지열시스템 실증 연구

指導敎授　玄　明　擇

金 成 萬

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함

2013年 12月

金成萬의 工學博士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委　　員 _____ 印

委　　員 _____ 印

委　　員 _____ 印

委　　員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2013年 12月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

An Empirical Study on Geothermal System by Underground Air Heat in Jeju Region

Sung-Man Kim
(Supervised by Professor Myung-Taek Hyun)

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Doctor of Engineering

Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Jeju National University

2014. 2.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Summary

Jeju region formed due to volcanic activity and developed unique geological layer of underground compared to other regions in South Korea. The performance of underground energy heat source system depend on the thermodynamics properties of rocks, geological layer and kind of rocks. So for feasibility and verification of technique, the system composed of heat pump, heat exchanger, fan coil unit, pump, thermal storage tank, fan, etc. were installed and measured various parameters at mandarin orange farm, Wimi-ri, Namwon-eup in Jeju. The test period was February ~ April in 2009.

The quantity of daily average heat acquisition was around 43.35kW (37,274kcal/h) and entrance temperature of evaporator was minimum 7.9℃ during the test period.

Thus the operation of heat pump system is very stable and efficient, regardless of outside temperature all around year.

The COP(Coefficient Of Performance) of heat pump was maximum, 5.2 on 26th March, 2009. Otherwise, the lowest was 3.8 on 21st March, 2009. Average COP was 4.3 and amount of pressure power was 15.1kW.

The result of this study can be used for the heating/cooling system of a building in volcanic region with underground air to acquire geothermal energy. This process of pumping air and using heat exchange for the acquisition of geothermal energy can be applied in volcanic regions.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

List of Figures ····· i
List of Tables ····· vi
Nomenclature ····· viii

제Ⅰ장 서론 ····· 1
1.1 제주 지역의 지형 및 지질 특성 ····· 1
1.2 지열 이용 시스템의 종류 ····· 3
1.3 지중공기에 의한 지열의 이용 ····· 5
1.3.1 지중공기의 순환 원리 ····· 5
1.3.2 지중공기의 이용 방법 ····· 6

제Ⅱ장 지중공기열을 이용한 지열시스템 ····· 8
2.1 지중공기 열원 히트펌프 시스템 원리 ····· 8
2.2 지중공기 열원 히트펌프 시스템 설치 ····· 8

제Ⅲ장 실증 실험 결과 ····· 14
3.1 기초조사 ····· 14
3.1.1 지중 지온 특성 ····· 14
3.1.2 지중공기의 열유체 특성 ····· 15
3.1.3 지중공기의 환경 특성 ····· 19
3.2 실증 실험 ····· 20
3.2.1 현장 개요 ····· 20
3.2.2. 실험 내용 및 방법 ····· 20
3.2.3 히트펌프 시스템의 온도 분포 ····· 21
3.2.4 히트펌프 열원측 열 회수량 ····· 38
3.2.5 히트펌프 부하측 열 공급량 ····· 54

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2.6 시스템 소비동력 ····· 70
3.3 히트펌프 유닛 성능 평가 ····· 75
3.4 지중공기 열원 히트펌프시스템 성능 평가 ····· 77

제Ⅳ장 결론 ····· 81

참고문헌 ····· 84

부록 A : 지중공기열을 이용한 건축물 공조시스템 적용에 관한 연구 ····· 86
제1장 개요 ····· 86
제2장 실험 시설 ····· 87
제3장 연구 결과 ····· 93
3.1 화산지질층 지중 열유체 특성 ····· 93
3.2 시추 암석 공극율에 관한 해석 ····· 94
3.3 시스템 성능계수 평가 ····· 99
제4장 결론 ····· 101

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Figures

Fig. 1 The Underground air heat source heat pump system(Left: Closed vertical type. Right: Closed horizontal type) ····· 3
Fig. 2 The slinky type heat exchanger ····· 4
Fig. 3 The underground air formation by rocks and scoria layer in Jeju region ····· 5
Fig. 4 The direct use method (a) Conceptual diagram of underground use (b) Equipments ····· 7
Fig. 5 The Underground air heat source heat pump (a) Flow chart (b) Schematic diagram of system ····· 9
Fig. 6 The design of heat pump system ····· 9
Fig. 7 The boring and underground heat exchanger installation ····· 10
Fig. 8 The thermal storage tank of heat pump system ····· 12
Fig. 9 The greenhouse heating/cooling system ····· 12
Fig. 10 The flowmeter ····· 13
Fig. 11 The watt-hour meter ····· 13
Fig. 12 The geological columnar section(Left) & Temperature of underground distribution map(Right) ····· 16
Fig. 13 The daily underground temperature of depth ····· 17
Fig. 14 The seasonal properties of underground air at Euigui-ri(Left), Gimnyeong-ri(Right) ····· 17
Fig. 15 The on-site of Wimi-ri ····· 21
Fig. 16 The location of data measurement ····· 22
Fig. 17 Temperature variations at surroundings (Mar. 17th, 2009) ····· 25
Fig. 18 Temperature variations at surroundings (Mar. 18th, 2009) ····· 25
Fig. 19 Temperature variations at surroundings (Mar. 19th, 2009) ····· 26
Fig. 20 Temperature variations at surroundings (Mar. 20th, 2009) ····· 26
Fig. 21 Temperature variations at surroundings (Mar. 21st, 2009) ····· 27

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 22 Temperature variations at surroundings (Mar. 22nd, 2009)····· 27
Fig. 23 Temperature variations at surroundings (Mar. 23rd, 2009)····· 28
Fig. 24 Temperature variations at surroundings (Mar. 24th, 2009)····· 28
Fig. 25 Temperature variations at surroundings (Mar. 25th, 2009)····· 29
Fig. 26 Temperature variations at surroundings (Mar. 26th, 2009)····· 29
Fig. 27 Temperature variations at surroundings (Mar. 27th, 2009)····· 30
Fig. 28 Temperature variations at surroundings (Mar. 28th, 2009)····· 30
Fig. 29 Temperature variations at surroundings (Mar. 29th, 2009)····· 31
Fig. 30 Temperature variations at surroundings (Apr. 6th, 2009)····· 31
Fig. 31 Temperature variations at surroundings (Apr. 7th, 2009)····· 32
Fig. 32 Temperature variations at surroundings (Apr. 8th, 2009)····· 32
Fig. 33 Temperature variations at surroundings (Apr. 9th, 2009)····· 33
Fig. 34 Temperature variations at surroundings (Apr. 10th, 2009)····· 33
Fig. 35 Temperature variations at surroundings (Apr. 11th, 2009)····· 34
Fig. 36 Temperature variations at surroundings (Apr. 12th, 2009)····· 34
Fig. 37 Temperature variations at surroundings (Apr. 13th, 2009)····· 35
Fig. 38 Temperature variations at surroundings (Apr. 14th, 2009)····· 35
Fig. 39 Temperature variations at surroundings (Apr. 15th, 2009)····· 36
Fig. 40 Temperature variations at surroundings (Apr. 16th, 2009)····· 36
Fig. 41 Temperature variations at surroundings (Apr. 17th, 2009)····· 37
Fig. 42 Temperature variations at surroundings (Apr. 18th, 2009)····· 37
Fig. 43 Temperature variations at evaporator (Mar. 17th, 2009)····· 41
Fig. 44 Temperature variations at evaporator (Mar. 18th, 2009)····· 41
Fig. 45 Temperature variations at evaporator (Mar. 19th, 2009)····· 42
Fig. 46 Temperature variations at evaporator (Mar. 20th, 2009)····· 42
Fig. 47 Temperature variations at evaporator (Mar. 21st, 2009)····· 43
Fig. 48 Temperature variations at evaporator (Mar. 22nd, 2009)····· 43
Fig. 49 Temperature variations at evaporator (Mar. 23rd, 2009)····· 44
Fig. 50 Temperature variations at evaporator (Mar. 24th, 2009)····· 44

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 51 Temperature variations at evaporator (Mar. 25th, 2009)····· 45
Fig. 52 Temperature variations at evaporator (Mar. 26th, 2009)····· 45
Fig. 53 Temperature variations at evaporator (Mar. 27th, 2009)····· 46
Fig. 54 Temperature variations at evaporator (Mar. 28th, 2009)····· 46
Fig. 55 Temperature variations at evaporator (Mar. 29th, 2009)····· 47
Fig. 56 Temperature variations at evaporator (Apr. 6th, 2009)····· 47
Fig. 57 Temperature variations at evaporator (Apr. 7th, 2009)····· 48
Fig. 58 Temperature variations at evaporator (Apr. 8th, 2009)····· 48
Fig. 59 Temperature variations at evaporator (Apr. 9th, 2009)····· 49
Fig. 60 Temperature variations at evaporator (Apr. 10th, 2009)····· 49
Fig. 61 Temperature variations at evaporator (Apr. 11th, 2009)····· 50
Fig. 62 Temperature variations at evaporator (Apr. 12th, 2009)····· 50
Fig. 63 Temperature variations at evaporator (Apr. 13th, 2009)····· 51
Fig. 64 Temperature variations at evaporator (Apr. 14th, 2009)····· 51
Fig. 65 Temperature variations at evaporator (Apr. 15th, 2009)····· 52
Fig. 66 Temperature variations at evaporator (Apr. 16th, 2009)····· 52
Fig. 67 Temperature variations at evaporator (Apr. 17th, 2009)····· 53
Fig. 68 Temperature variations at evaporator (Apr. 18th, 2009)····· 53
Fig. 69 Temperature variations at condenser (Mar. 17th, 2009)····· 57
Fig. 70 Temperature variations at condenser (Mar. 18th, 2009)····· 57
Fig. 71 Temperature variations at condenser (Mar. 19th, 2009)····· 58
Fig. 72 Temperature variations at condenser (Mar. 20th, 2009)····· 58
Fig. 73 Temperature variations at condenser (Mar. 21st, 2009)····· 59
Fig. 74 Temperature variations at condenser (Mar. 22nd, 2009)····· 59
Fig. 75 Temperature variations at condenser (Mar. 23rd, 2009)····· 60
Fig. 76 Temperature variations at condenser (Mar. 24th, 2009)····· 60
Fig. 77 Temperature variations at condenser (Mar. 25th, 2009)····· 61
Fig. 78 Temperature variations at condenser (Mar. 26th, 2009)····· 61
Fig. 79 Temperature variations at condenser (Mar. 27th, 2009)····· 62

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 80 Temperature variations at condenser (Mar. 28th, 2009)····· 62
Fig. 81 Temperature variations at condenser (Mar. 29th, 2009)····· 63
Fig. 82 Temperature variations at condenser (Apr. 6th, 2009)····· 63
Fig. 83 Temperature variations at condenser (Apr. 7th, 2009)····· 64
Fig. 84 Temperature variations at condenser (Apr. 8th, 2009)····· 64
Fig. 85 Temperature variations at condenser (Apr. 9th, 2009)····· 65
Fig. 86 Temperature variations at condenser (Apr. 10th, 2009)····· 65
Fig. 87 Temperature variations at condenser (Apr. 11th, 2009)····· 66
Fig. 88 Temperature variations at condenser (Apr. 12th, 2009)····· 66
Fig. 89 Temperature variations at condenser (Apr. 13th, 2009)····· 67
Fig. 90 Temperature variations at condenser (Apr. 14th, 2009)····· 67
Fig. 91 Temperature variations at condenser (Apr. 15th, 2009)····· 68
Fig. 92 Temperature variations at condenser (Apr. 16th, 2009)····· 68
Fig. 93 Temperature variations at condenser (Apr. 17th, 2009)····· 69
Fig. 94 Temperature variations at condenser (Apr. 18th, 2009)····· 69
Fig. 95 The power consumption of heat pump components(Mar. 26th, 2009)·· 74
Fig. 96 The daily power consumption of heat pump system (2009)····· 74
Fig. 97 The daily average COP of heat pump (2009)····· 76
Fig. 98 The daily average COP of heat pump system (2009)····· 78
Fig. A1 The boring····· 89
Fig. A2 The grouting····· 89
Fig. A3 The geothermal heat exchanger····· 90
Fig. A4 The heat pump····· 90
Fig. A5 The air-conditioning machine installation (a) Office building
(b) Industrial building····· 91
Fig. A6 The system monitoring program····· 92
Fig. A7 The temperature distribution of depth····· 96
Fig. A8 The hourly air velocity variations (Aug. 4th, 2012)····· 96
Fig. A9 The hourly air pressure variations (Aug. 4th, 2012)····· 97

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. A10 The example of porosity relation ····· 97
Fig. A11 The boring rocks distribution (a) 0~9m, (b) 9~16m, (c)17~25m, (d) 26~37m, (e) 38~47m, (f) 48~55m ····· 98
Fig. A12 The hourly COP of heat pump (Jan. 14th, 2013) ····· 100

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Tables

Table 1 The underground air inhale & specification of heat exchanger installation ····· 11
Table 2 The specificaion of heat pump components ····· 11
Table 3 The specification of flow meter ····· 11
Table 4 The specification of watt-hour meter ····· 11
Table 5 The properties of underground ····· 18
Table 6 The environmental assessment of underground air ····· 19
Table 7 The specification of system at Wimi-ri ····· 21
Table 8 The hourly temperature of heat pump components(Mar. 26th, 2009) 23
Table 9 The temperature measurement data (Mar. 17th ~ Apr. 18th, 2009) ····· 24
Table 10 The heat recovery of heat source at heat pump system (Mar. 26th, 2009) ····· 39
Table 11 The daily heat recovery of heat source at heat pump system (Before) ····· 40
Table 12 The daily heat recovery of heat source at heat pump system (After) ····· 40
Table 13 The hourly parts temperature and heat recovery (Mar. 26th, 2009) · 55
Table 14 The daily heat supply of heat condenser at heat pump system (Before) ····· 56
Table 15 The daily heat supply of heat condenser at heat pump system (After) ····· 56
Table 16 The data acquisition section according to experimental date(2009) ·· 71
Table 17 The hourly power consumption of heat pump components (Mar. 26th, 2009) ····· 72
Table 18 The power consumption of heat pump components (Before) ····· 73
Table 19 The power consumption of heat pump components (After) ····· 73
Table 20 The hourly COP of heat pump (Mar. 26th, 2009) ····· 76

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 21 The daily average COP of heat pump (2009)·····77
Table 22 The hourly COP of heat pump system (Mar. 26th, 2009)····· 79
Table 23 The daily average COP of heat pump system (2009)····· 80
Table A1 The properties of heating/cooling system····· 88
Table A2 The pore volume of depth·····95

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Nomenclature

COP_{HP} : Coefficient of performance for heating of heat pump

COP_{SYS} : Coefficient of performance for heating of underground air heat source heat pump system

C_p : Specific heat of constant pressure (kJ/kg ℃)

I : Current(A)

$\dot{m}_w$: Mass flow rate of water (m^3/h)

n : Porosity (%)

$\dot{Q}_l$: Heat supply quantity of condenser(kW)

$\dot{Q}_s$: Heat supply quantity of heat source (kW)

T_{c-in} : Inlet temperature of condenser (℃)

T_{c-out} : Outlet temperature of condenser (℃)

T_{e-in} : Inlet temperature of evaporator (℃)

T_{e-out} : Outlet temperature of evaporator (℃)

△T : Temperature differences (℃)

V : Voltage(V)

V_v : Volume of pore (m^3)

V_t : Total volume of soil or rocks (m^3)

$\dot{W}_c$: Power consumption of pressure (kW)

$\dot{W}_f$: Power consumption of fan (kW)

$\dot{W}_{p-l}$: Power consumption of condenser at pump (kW)

$\dot{W}_{p-s}$: Power consumption of heat source at pump (kW)

$\dot{W}_{tot}$: Power consumption of system (kW)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제 Ⅰ 장 서 론

1.1 제주 지역의 지형 및 지질 특성

제주 지역의 지형은 장축이 약 74㎞, 단축이 약 32㎞이며 면적이 1,825㎢이며 1,950m인 한라산을 중심으로 층상화산(Shield volcano)의 구조로 된 화산섬으로 일부 해안지역의 퇴적암류를 제외하고는 섬 전체가 화산암류로 구성되어 있다. 섬 중앙부의 한라산을 중심으로 급격한 경사를 이루고 있는 반면 한라산채를 벗어난 지역은 전체적으로 5°이내로 완만한 경사를 이루고 있으며 스코리아로 구성된 기생화산과 여러 군데의 분석구(Cinder cone)가 발달되어 있다.[1)]

제주지역의 지질은 초기 지하수 개발과 관련하여 조사활동이 이루어졌고 그에 따른 지질도가 1968년에 최초로 완성되었다. 그 후 지질구상도의 축적과 조사연구 활동을 통해 2004년 새로운 지질조사가 완성되어 현재 이용되고 있다. 제주지역의 지질은 용암의 점성에 크게 좌우되는데 제주도에서 '빌레'라 하는 암석은 광활한 지역을 덮을 수 있는 Pahoehoe성 용암에 의해 형성된 암석이고 '곶자왈'이라 불리는 암석은 점성이 높고 낮은 온도의 용암에 의해 형성된 암석이다.[2)]

지표에 분포한 암석은 최소한 41회의 용암분출에 의해 형성되었으며 분출지역은 분출시기마다 분출위치가 다르며 분출지역에는 대부분이 분석구가 위치하고 있다. 지표에 분포한 분석구는 대략 350개 정도인데 이들 분석구는 대부분이 낮은 온도의 용암이 분출할 때 만들어진 것이며 분포 암석은 구성광물의 함량과 종류에 따라서 크게 6종으로 구분된다. [3),4)]

침상현무암(A)은 주로 제주지역 동측과 서측에 분포하며 높은 온도와 낮은 점성을 갖는 Pahoehoe성 용암에서 형성된 암석으로 다량의 기공을 갖고 있으며 표면이 매끄러운 특징이 있다. 2mm 크기의 장석이 침상으로 나타나며 장석은 조면 구조를 보이는 것이 이 암석의 특징이다. 일반적으로 두께는 1m 내외이나 고지형의 계곡을 채운 경우에는 두께가 수십 m가 이르기도 한다. 제주지역 형성기간에 5회에 걸쳐 분출하였다.

감람석현무암(W)은 제주지역의 동측과 서측에 분포하며 Pahoehoe성과 Aa성의

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

중간 성격을 갖는 용암에서 형성된 암석으로 근원지 부근에서는 표면이 매끄러우나 멀리 흘러가면서 낮은 온도의 용암으로 바뀌어 많은 양의 크링커를 형성한다. 구성광물은 1㎜크기의 감람석이 선점하는 특징이 있으며 기공은 2㎝크기로 다소 길게 신장된 양상으로 나타난다. 부분적으로는 Pahoehoe성 용암에서 형성된 침상현무암과 구분이 어려운 부분도 있다. 이 암석은 5회의 분출기로 구분된다.

장석-휘석 조면현무암(D)은 대표적인 산출지는 주상절리가 잘 발달된 대포동 지역의 암석이 이에 해당된다. 제주시와 서귀포시 지역에 분포하며 낮은 온도 용암에 의해 형성된 암석이다. 이 암석의 표면에는 두꺼운 크링커가 형성되어 있는데 이런 표면을 갖는 암석이 분포한 지역이 곶자왈에 해당된다. 구성광물은 다량의 장석과 휘석이 반정으로 산점하며 장석과 휘석의 함량은 25~30% 정도이다. 이 암석은 5번의 분출기를 거치면서 형성되었다.

휘석-장석 조면현무암(M)은 제주도 지표에서 가장 흔히 분포하는 암석으로 주로 제주도 동부에 분포하지만 서측에도 일부 분포한다. 낮은 온도 용암에 의해 형성된 암석으로 두꺼운 크링커를 형성한 것이 특징이다. 이 암석은 7 mm 크기의 타형 모양을 갖는 투명한 사장석과 10 mm 크기의 휘석이 1% 정도 산점하는 것이 특징이다. 이 암석은 15번 분출시기를 달리하면서 형성되었다.

휘석-장석 조면현무암(S)은 제주지역 중앙부에서 서귀포 쪽으로 넓게 분포한 암석으로 낮은 온도 용암에 의해 형성된 암석이다. 이 암석에는 자형의 사장석이 반정으로 25% 정도 함유되어 있는 것이 특징이며 휘석은 1~2% 정도 함유되어 있다. 분출시기를 달리하는 6번의 분출활동에 의해 형성되었다.

조면암질암(T)은 한라산 조면암, 산방산 조면암 등이 이에 속한다. 회색 내지는 담회색의 암석으로 치밀하고 쪼개짐이 발달한 것이 특징이다. 점성이 매우 높은 용암에서 형성된 것으로 한라산에서 제주와 서귀포 쪽으로 넓게 분포한다. 시기를 달리하는 4번의 분출에 의해 형성되었다.

그 이외에 퇴적층은 41번의 분출기 기간 동안에 낮은 지형을 충진하여 쌓이기도 했는데 이 퇴적층은 그 당시의 좁고 긴 계곡에 국한되어 수평적인 연장성은 제한적이다. 퇴적층은 대부분이 미세한 스코리아로 구성되어 있으며 지표에 장기간 노출된 경우는 적황색의 점토로 변하기도 하였다. 퇴적층 위에 용암이 덮은

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부분은 용암의 높은 열에 의해 구어지기도 하여 더 짙은 담황색으로 변해 있기도 하다. 그 이외 성산, 조천 일대에는 조개껍질로 구성된 풍성사구가 분포한다.[3),4)]

1.2 지열 이용 시스템의 종류

지열 이용 히트펌프 시스템은 Fig. 1과 같이 지중 열교환기의 형상에 따라 수직형과 수평형으로 구분된다. 폐회로 수직형 지중열교환기는 지중 열교환기를 매설할 수 있는 공간이 제한적인 경우에 많이 사용되며 땅속에 수직으로 매설된다. 이 시스템은 지중 열교환기를 냉·난방 용량에 따라 다양한 깊이로 매설할 수 있으며, 전체 지중 열원 히트펌프 시스템 중 배관 및 부동액 이송동력이 적게 소요되기 때문에 가장 효율이 높은 시스템이다.[5)~7)] 일반적으로 직경 150mm에 깊이 100m~200m의 보어홀을 지면에서 천공한 후, 30mm~40mm의 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 U자 관으로 삽입하고, 이 파이프와 보어홀 사이의 빈 공간을 그라우트재로 채움으로써 완성된다. 본 시스템은 사계절이 뚜렷하여 냉난방이 모두 필요하고 연중 일정한 온도의 열원을 공급받을 수 있는 우리나라와 같은 지역에 적합한 설비이나 초기투자비가 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. [8)~11)]

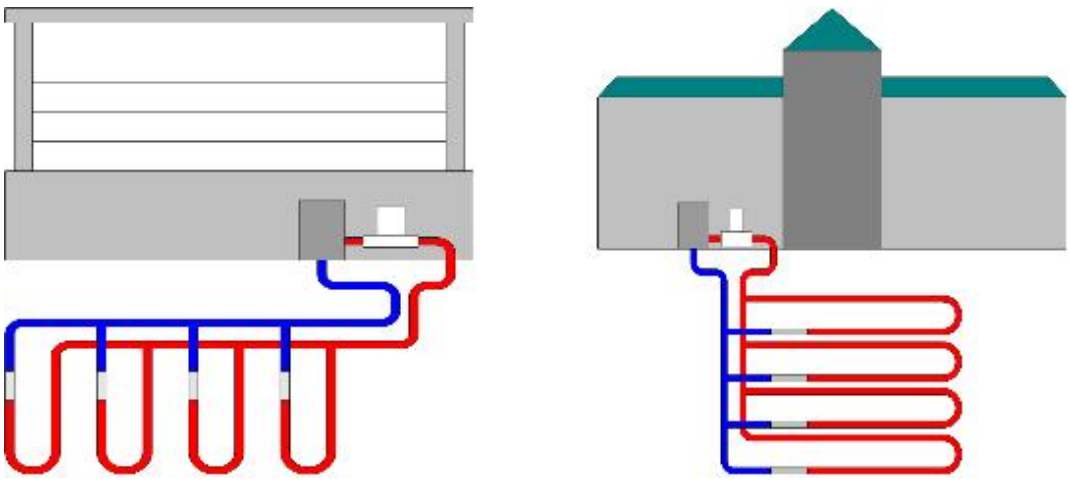


Fig. 1 The Underground air heat source heat pump system
(Left: Closed vertical type. Right: Closed horizontal type)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

폐회로 수평형 지중열교환기는 지중 열교환기를 매설할 수 있는 공간이 충분한 경우에 많이 사용되며 땅속에 수평으로 매설되기 때문에 천공비용이 적게 소요된다.[11),12)] 따라서 이러한 시스템은 학교 또는 공공기관 등이나, 운동장, 주차장과 같이 지중 열교환기 파이프를 매설할 수 있는 부지가 충분할 경우에 경제적인 시스템이다. 반면에 지중 열교환기 파이프가 지면에서 0.5m~2.0m의 깊이로 굴착된 트렌치에 매설되기 때문에 효율은 수직형 지열원 히트펌프 시스템에 비해 비교적 낮게 나타난다.[13)~15)] 이는 수평형 지중 열교환기 파이프가 매설되는 위치에서 지중온도 및 지중 열 물성치 등은 계절 및 연간 강우 등에 의해 영향을 받기 때문이다.[16)~23)]

Fig. 2는 슬링키(Slinky)형 지중 열교환기 설치 모습이다. 슬링키형은 수평형 지중열교환기의 한 형태로 제한된 공간에 많은 열교환기를 슬링키 형태로 매설하는 방식이다. 이러한 열교환기 매설 방법은 트렌치의 길이가 줄어들고 제작 및 시공이 간편하며, 설치 면적은 수평형 시스템보다 상대적으로 적게 소요되는 반면 지중 열교환기의 파이프 길이가 길어지는 단점이 있다.[24)]

제주도의 경우 천공지역의 지질 주상도 특성을 살펴보면 화산활동으로 암층과 쇄석층이 반복되어 나타나고 있어서 기존의 으며 지역에 따라 암종이나 암층의 두께의 차이를 보이고 있으나 기본적인 지질 특성은 동일하게 나타나고 있다.

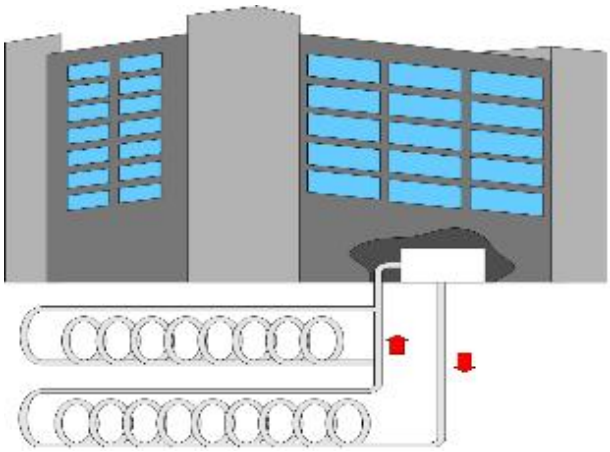


Fig. 2 The slinky type heat exchanger

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1.3 지중공기에 의한 지열의 이용

1.3.1 지중공기의 순환 원리

전술한 바와 같이 제주지역의 지질은 암반과 용암쇄설층이 반복적으로 구성된 특성을 가진다. 또한 다수 지역에서 용암 분출로 인해 광범위한 암반 형성보다 소규모의 암반이 장시간에 걸쳐서 쌓여 형성되었다. 따라서 지표의 공기나 물의 지하로 유입되기 쉬운 구조를 형성하고 있으며 지하의 용암쇄설층과 화산활동에 의해 생성된 지하공동에는 많은 공기층이 있을 뿐만 아니라 공기나 물의 유동이 상대적으로 자유롭다.

따라서 제주도의 경우 많은 공기가 지하에 내재되어 있기 때문에 지열시스템의 열교환기와 땅과의 열전도가 거의 이루어지지 않아 전술한 일반적인 지열이용 방법은 매우 부적절하다.

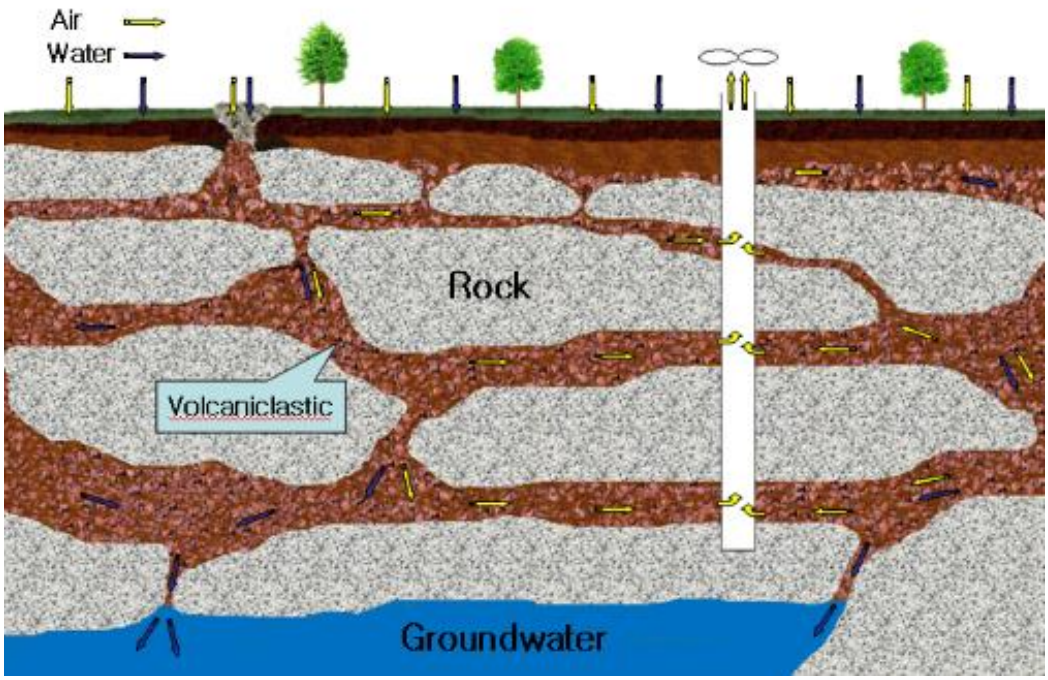


Fig. 3 The underground air formation by rocks and scoria layer in Jeju region

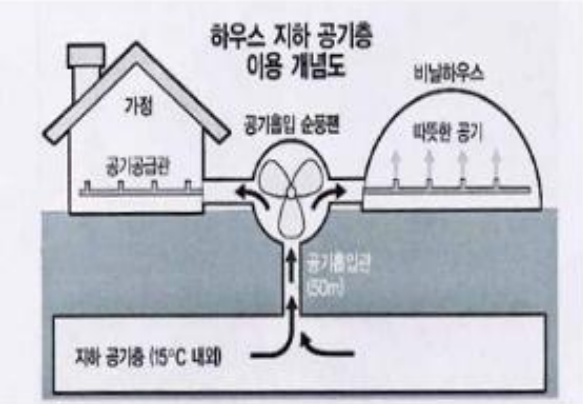
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

그러나 Fig. 3에서와 같이 지하를 천공하고 강제로 공기를 흡입할 시 지하의 잔존했던 공기가 지하공기구를 통해 지표 외부로 유출되고, 지표로 배출된 공기에 해당되는 양만큼의 공기가 지표로부터 지중으로(지표공기 → 지중 암반 및 설층 → 천공부) 유입되어 순환되며 이때 공기가 지하의 암반과 용암쇄설층 등을 통과하는 과정에서 지열을 흡수(혹은 방출)하게 되며 이런 일련의 과정을 통해 지열을 얻을 수 있다. 또한 지하의 암반 혹은 용암쇄설층에는 지하수 유입과정중의 물이 존재하게 되며 이곳을 공기가 유동하게 되면 포화과정과 유사한 과정을 거치게 되어 최종적으로 지표 외부로 배출될 때에는 100%에 근접하는 습도를 가지게 된다.

1.3.2 지중공기의 이용 방법

지중공기를 토출하여 직접 이용하는 방법은 Fig. 4(a)와 같이 지하공기층에 수십 미터(30~60m)를 천공한 후 공기(15~18℃)를 흡입하여 시설재배 시설(감귤류, 채소류, 버섯 등)에 냉·난방을 가하는 시스템이다. 시스템은 Fig. 4(b)처럼 크게 지하 천공부, 송풍기 및 제어장치, 냉·난방 덕트로 구성된다. 지하 천공부는 설치고도, 지질적 특성 등에 따라 30~80m의 깊이와 20~50cm의 직경을 갖는 수직 지하공이다. 송풍기 및 제어장치에서 송풍기 장치는 지하 천공부의 공기를 흡입하기 위한 것으로 송풍량이 상대적으로 큰 터보형 팬과 모터로 구성되었으며, 제어장치는 시설의 냉·난방 요구에 따라 시간제어와 온도제어를 겸하고 있다. 냉·난방 덕트는 흡입된 공기를 시설 전체에 빠르게 분포하도록 하기 위한 것이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a) Conceptual diagram of underground use

(b) Equipments

Fig. 4 The direct use method

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제 Ⅱ 장 지중공기열을 이용한 지열시스템

2.1 지중공기 열원 히트펌프 시스템 원리

지중공기 열원 히트펌프 시스템은 히트펌프의 열원을 땅속에 존재하는 공기열로부터 획득하는 시스템으로 제주지역 특성에 적합한 형태의 냉난방 시스템이다.

본 시스템의 작동원리는 땅속의 공기가 송풍기에 의해 외부로 강제 배출될 때 지하의 많은 공기층에 의해 외부공기가 땅속으로 유입되면서 지반과의 열교환을 통해 일정한 온도의 지중공기 열원을 형성하고, Fig. 5(a)에서와 같이 땅속에 매설된 지중열교환기가 이렇게 형성된 지중공기 열원과 열교환을 함으로써 냉온수가 형성된다. 이를 지속적으로 공급하기 위해 일반적으로 축열조에 저장하여 시설재배 단지에 공급하면서 대상지의 냉난방에 활용하게 된다.

본 시스템의 구성은 Fig. 5(b)에서 처럼 크게 지중공기 열을 회수하기 위한 열교환기와 냉온수를 생산하기 위한 히트펌프, 냉온수 저장을 위한 축열조 그리고 건물의 냉난방을 위한 팬코일 유닛으로 구성된다.

2.2 지중공기 열원 히트펌프 시스템 설치

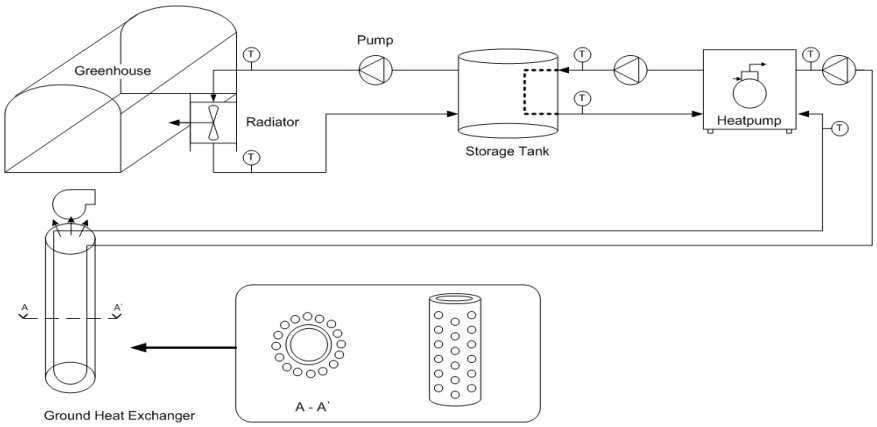
전술한 지하공기 열원 히트펌프 시스템의 설계도는 Fig. 6과 같다. 크게 지중공기 흡입 및 1차 열교환을 위한 설비, 히트펌프 시스템, 축열조, 하우스 내부의 열교환 장치 등으로 구성된다.

실증 연구를 위해 서귀포시 남원읍 위미리 약 1,580m^2 면적의 감귤농가에 지중공기 열원 지열이용 시스템을 설치하였다. 천공부는 깊이 85m, 지름 300mm로 하였으며, 여기에 사용된 지중공기 흡입 및 열교환기 사양은 <Table 1>과 같으며 시공사진은 Fig. 7에 제시하였다.

이 지하공기열을 이용하기 위한 히트펌프 시스템의 주요 사양은 <Table 2>에

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(a) Flow chart



(b) Schematic diagram of system

Fig. 5 The underground air heat source heat pump

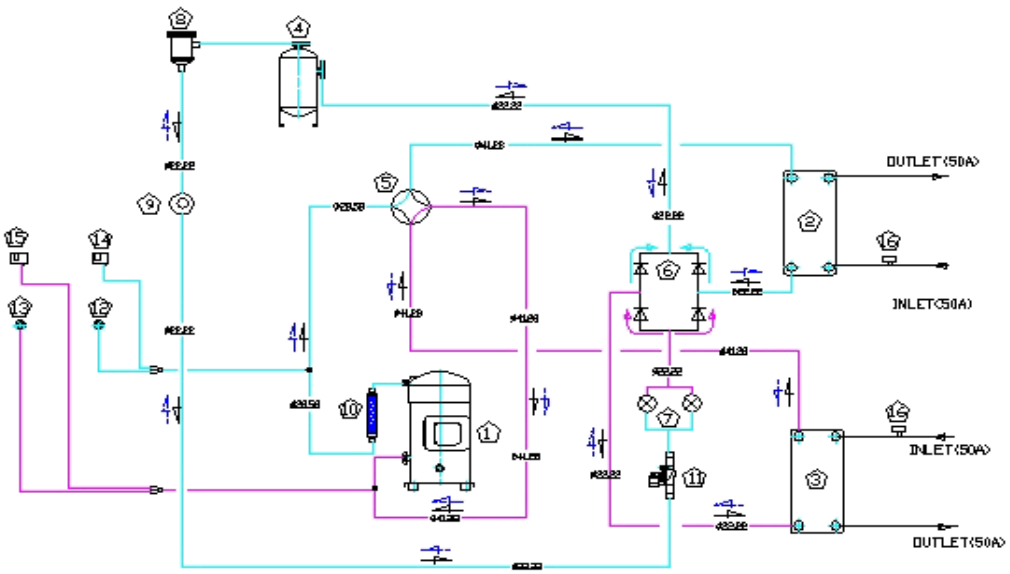


Fig. 6 The heat pump system design

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

주어져 있다. 압축기의 용량이 28kW이며, 냉매는 R-22를 사용하으며, 응축기와 증발기는 각각 699x307x298의 같은 크기로 제작하였다. 또한 축열조는 Fig. 8에서처럼 30톤 용량을 사용하였으며, 온실 냉난방시스템은 Fig. 9와 같이 팬코일 온수 순환 및 비닐 덕트 방식을 사용하였다.

기타 장치로는 온도계(축열조, 지중열교환기 입출구, 지중공기 토출구, 외기온도 측정), 유량계(축열조 및 지열교환기 입출구 유량 측정), 전력량계(압축기, 지열교환기 펌프, 축열조 펌프, 지중공기 흡입 송풍기 전력량 측정)가 사용되었다.

유량계와 전력량계의 사양은 <Table 3>과 <Table 4>에, 설치된 모습은 Figs. 10과 11에 각각 제시하였다.

Fig. 7 The boring and underground heat exchanger installation

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 1> The underground air inhale & specification of heat exchanger installation

On-site	Borehole		Heat exchanger			Fan capacity (kW)	Sub heat exchanger (kcal)
	Diameter (mm)	Depth (m)	Material	Diameter (mm)	Length (m)		
Wimi-ri	300	85	PE	20	1,360	3.5	12,000

<Table 2> The specification of heat pump components

Product	Model	Manufacturer	Capacity
Compressor	SY-300	DENFOSS	28kW
Condenser	ZL190-100	BURG	699*307*298
Evaporator	ZL190-100	BURG	699*307*298
Expansion valve	TDEBX-30	DENFOSS	30HP
Refrigerant	R22	-	-

<Table 3> The specification of flow meter

Manufacturer	Model	Type	Deviation (%)	Max. flow rate (m^3)
한국유량계공업(주)	KTM-800	Electromagnetic	±0.24	0~30

<Table 4> The specification of watt-hour meter

	Manufacturer	Model	Range (A)
Monitoring inspection system	(주)한석테크	TMS-3000	20, 50, 80, 120

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 8 The thermal storage tank of heat pump system

Fig. 9 The greenhouse heating/cooling system

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 10 The flowmeter

Fig. 11 The watt-hour meter

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제 Ⅲ 장 실증 실험 결과

3.1 기초조사

3.1.1 지중 지온 특성

일반적으로 지열에너지의 특성은 암상의 종류와 암상의 온도에 의해 달라지며 지열에너지량은 지온 및 암상의 열용량에 지배된다. 따라서 암석 및 지질 구성 특성과 지온 변화는 지열에너지를 이용하는데 가장 기초적인 자료가 된다.

기초조사를 위해 서귀포시 혁신도시 한 지역에 깊이 50m, 지름 300mm의 천공을 실시하여 지속적인 데이터를 분석하였다. Fig. 12는 천공지에서 관찰된 심도에 따른 지질 구조와 그에 따른 지온분포를 보여주고 있다. 지질 주상도를 살펴보면 암반층과 용암쇄석층이 반복되어 나타나며 이는 화산활동에 의해 생성된 제주 지역에서 나타나는 보편적 지질학적 특성을 보이고 있다. 또한 천공지의 심도별 지온 분포를 살펴보면 5m 부근까지 급격한 지온 변화를 보이는 반면 그 이후의 경우 지온 변화는 매우 미미하다는 것을 알 수 있다. 또한 20m, 30m, 40m의 지점들에서 일반적인 지온 구배와 달리 온도 변곡점들이 나타난다. 이는 지질 주상도상에 용암쇄석층에 해당하는 영역으로 암석의 열전도에 의한 온도구배와는 전혀 다른 특성을 보인다. 이러한 현상은 용암쇄석층에 존재하는 공기 및 지하 대수층에 의한 것으로 이러한 물과 공기가 정체된 것이 아니라 유동에 따른 것으로 사료된다.

Fig. 13은 심도별 일일 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 일일 온도변화는 지중 1m 약 5℃, 2m 약 4℃ 그리고 5m 1.5℃ 정도로 나타나고 있다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 10m 이상에서는 15±1℃이내의 매우 낮은 온도 변화를 보이고 있으며 50m에서는 일일 온도변화가 거의 일어나고 있지 않음을 잘 알 수 있다.

따라서 제주 지역의 지열 특성을 살펴보면 깊이 약 10m정도에서 15℃부근으로

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

빠르게 수렴하고 있을 뿐만 아니라 일간 온도변화가 타 지역과 달리 깊은 영역에서도 다소 영향을 받고 있어 지표 온도가 빠르게 지하 내부로 영향을 미치고 있음을 추정할 수 있다. 지중의 온도 변화 특성과 지질 구조 특성 그리고 지하수 유입속도(제주도의 지하수 유입속도는 타 지역에 비해 수~수십 배 빠름)등을 고려해 볼 때 지표와 지중간에 공기 순환이 이루어지고 있는 것으로 사료된다.

3.1.2 지중공기의 열유체 특성

제주도내 전 지역에 걸쳐 지중공기를 이용하는 다수 지역의 기본적 열유체학적 특성을 조사하여 <Table 6>에 나타내었다. 지하공기의 온도는 대략 18℃ 부근으로 나타나며 흡입공기량은 송풍기 용량에 영향을 받으며 몇몇 지역을 제외하고 1.3~2.1㎥/sec로 나타나고 있으며 지중공기의 습도는 대략 80~90%로 나타나고 있다.

또한 <Table 6>의 지역 중 대표적으로 의귀리(시귀포 지역)와 김녕리(제주시 지역) 2지역의 지하공기의 계절적 특성 변화를 조사하여 Fig. 14에 제시하였다. 2007년 1월부터 7월까지 주별 온도변화 및 풍량변화를 살펴보면, 온도의 경우 1~2월경 최소 온도를 보인 후 지속적인 완만한 상승하나 온도 변화는 1.5℃내외로 변화가 적고 고도가 낮은 지역인 경우 변화 폭은 큼을 알 수 있다. 풍량은 그 변화는 거의 없어 풍량의 경우 송풍기 및 지질 특성에 의한 영향을 재확인할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

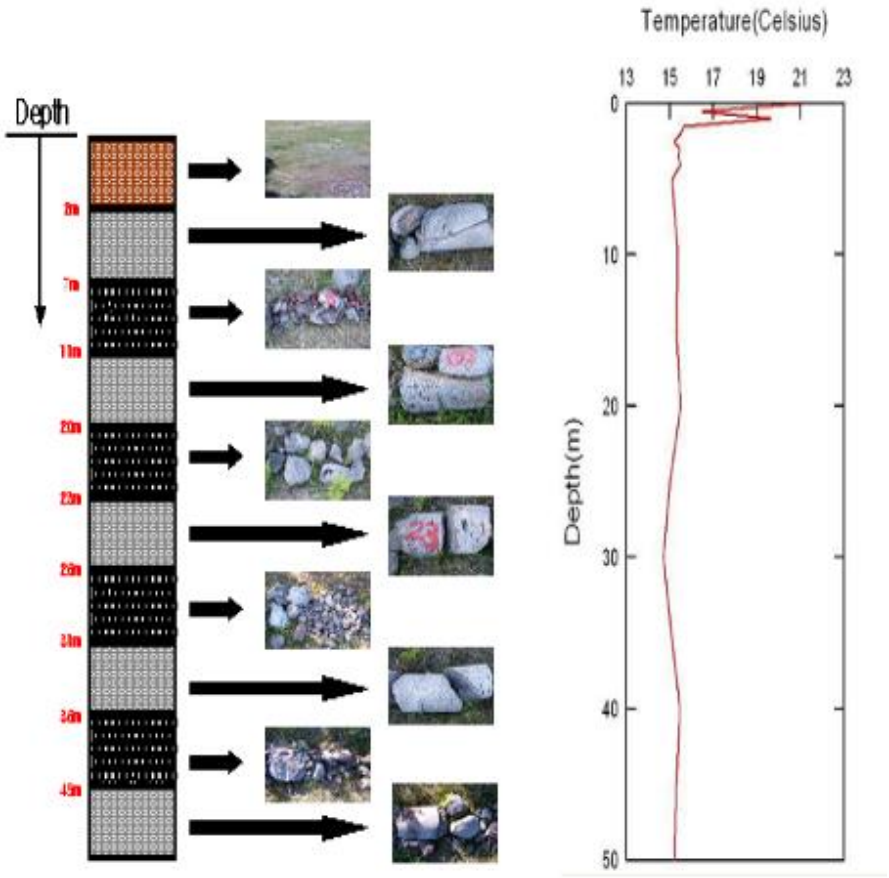


Fig. 12 The geological columnar section(Left) & Temperature of underground distribution map(Right)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

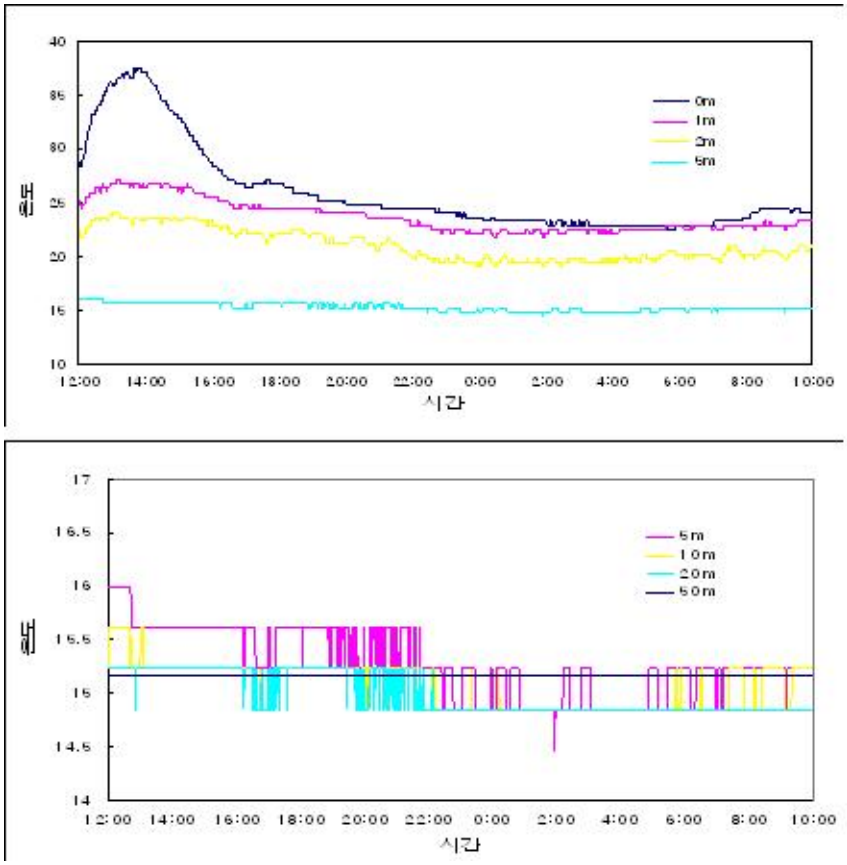


Fig. 13 The daily underground temperature of depth

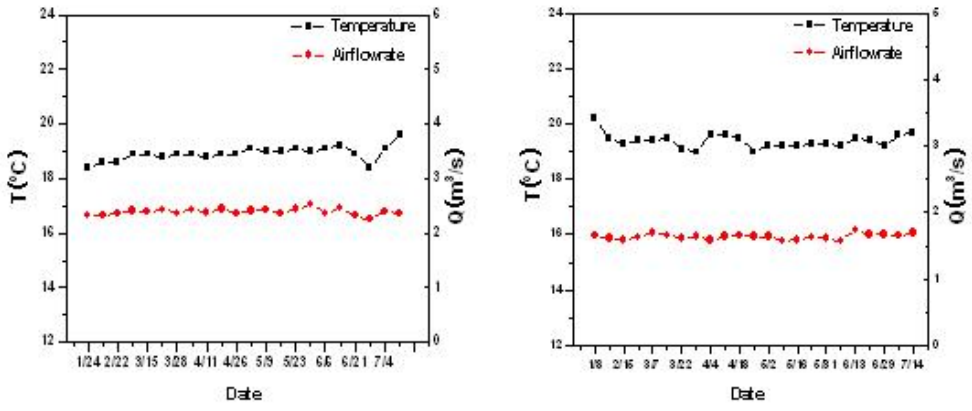


Fig. 14 The seasonal properties of underground air at Euigui-ri(Left), Kimnyeong-ri(Right)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 5> The properties of underground

Location		Altitude (m)	Depth (m)	Properties of underground		Product
Area	GPS(X, Y)			Air flow (㎥/s)	Temperature (℃)	
Odeung-dong	156177.196 46762.163	117	40	1.90	18.7	Mandarin Orange
Sangga-ri	141680.586 44720.176	136	48	1.46	17.9	Mandarin Orange
Sogil-ri	141683.698 44722.314	122	62	2.11	16.8	Mandarin Orange
Sangmyeong-ri	132209.976 34494.852	144	45	1.96	18.3	Mandarin Orange
Jongdal-ri	188801.014 49051.156	53	40	2.12	18.9	Vegetable
Cheongsu-ri	129909.581 28070.827	86	51	1.32	19.5	Mandarin Orange
Wasan-ri	170614.331 50410.687	119	49	1.53	18.5	Mandarin Orange
Sangmyeong-ri	131384.667 35076.763	129	56	1.61	18.2	Mandarin Orange
Gimnyeong-ri	174894.058 55124.927	60	42	1.53	19.5	Garden products
Seongeup-ri	180931.058 38075.028	137	45	0.68	20.2	Mandarin Orange
Sehwa-ri	180929.738 38060.860	99	45	2.32	18.4	Mandarin Orange
Nakcheon-ri	128198.514 29558.395	70	52	1.51	18.2	Garden products
Seokwang-ri	135520.179 26432.479	155	40	1.91	19.1	Mandarin Orange
Euikwi-ri	174209.336 29233.972	85	51	1.85	18.7	Mandarin Orange
Hannam-ri	171548.582 28930.263	139	68	1.52	18.5	Mandarin Orange
Sanghyo-dong	162473.585 26757.843	174	45	2.22	18.0	Mandarin Orange
Yongkang-dong	161520.806 45807.495	367	55	1.31	16.0	Garden products

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.1.3 지중공기의 환경 특성

유출되는 지중공기의 환경오염 정도를 조사하기 위해 유출 공기질을 조사하였다. 제주 지역의 동부지역(가시리)과 서부지역(금릉리)에 대하여 지중공기를 토출하면서 각 화학물질에 대해 1시간 동안 측정하였다. <Table 7>에서 살펴보면 주요 환경오염 원인물질의 농도는 국가 및 제주도의 환경기준치 이하일 뿐 아니라 제주도 도심지 지역보다도 적게 나타나고 있다. 대기 환경학적으로 보았을 때 지하공기 이용에 따른 환경 오염요소는 없다고 볼 수 있다.

<Table 6> The environmental assessment of underground air

(unit : ppm)

	CO_2	SO_2	NO_2	O_3	Note
Environmental standard (National)	~ 25	~ 0.15	~ 0.15	~ 0.10	
Environmental standard (Jeju)	~ 15	~ 0.10	~ 0.10	~ 0.10	
Jeju (Urban)	0.400~ 0.500	0.002~ 0.003	0.009~ 0.023	0.020~ 0.032	2000.1~2003.12 Summer data at I do-dong
Jeju (Forest)	0.100~ 0.200	0.001	0.002~ 0.003	0.030~ 0.040	2001.1~2003.12 Summer data at Cheon ah orem
Geumreung-ri	0.035	0.000	0.002	0.003	1 hour data
Gasi-ri	0.053	0.000	0.002	0.002	1 hour data

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2 실증 실험

3.2.1 현장 개요

서귀포시 남원읍 위미리 감귤 농가(Fig. 15)를 대상으로 지중공기 열원을 활용한 히트펌프시스템을 설치하여 지열원 회수량 및 성능 평가를 수행하였다. 이때 적용된 시스템 사양은 <Table 7>과 같으며, 지중공기 열원 히트펌프시스템 설치를 위하여 깊이 85m, 지름 300mm의 지하공을 뚫고 관경 20mm의 지중열교환기 1,360m를 매설하였다. 또한 지중공기 흡입을 위해 3.5kW급의 송풍기를 지하공 상부에 설치하여 시스템을 구성하였다. 만일의 사태를 대비하여 보조 열원으로 12,000kcal의 경유 난방기를 구비하였다. 실증 현장은 약 1,580m^2 면적의 시설원예 과수농가이며, 실내에는 난방에 사용되고 있는 팬코일 유닛이 설치가 되어있으며, 안정적인 열원 공급을 위하여 약 30톤급의 축열조를 설치하였다.

3.2.2 실험 내용 및 방법

실증 현장 실험은 지중공기 열원 및 송풍기 온도, 외기온도에 대한 데이터 수집과 히트펌프 열원측 입출구 온도 및 유량 데이터, 부하측 입출구 온도 및 유량 데이터를 수집하며, 온도 측정은 RTD 센서, 유량은 4~20mA의 전류 출력 유량계를 사용하였다. 지중열교환기의 작동유체는 물을 사용하였으며, 실내 최고 요구온도는 20℃로 설정하였다. Fig. 16에는 지중공기 열원 히트펌프시스템 성능 평가를 위한 온도 및 유량 측정 위치를 도식적으로 보여주고 있다. 실험 결과는 실내외 온도 및 송풍기 출구 온도 선도와 열원측 실험 데이터, 부하측 실험 데이터로 나눠서 분석하였으며, 히트펌프 유닛 및 통합시스템의 성능 평가를 정량적으로 분석하였다.

실험은 2009년 3월 17일부터 4월 18일까지 약 1개월간 수행하였으며, 히트펌프가 정상적으로 작동되었을 경우를 기준으로 매시간별로 데이터를 정리하여 분석

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

하였다. 단 3월 30일부터 4월 5일까지는 배관변경 작업으로 인하여 실험이 일시 중단되었다.

3.2.3 히트펌프 시스템의 온도 분포

실험기간 동안의 시스템 환경에 영향을 줄 수 있는 온도별 분포도를 측정하였다. 측정변수로는 외기온도와 시설원예 내부온도, 그리고 지중에서 외부로 유출될 때의 송풍기 출구 공기온도를 측정하였으며, 측정시간은 히트펌프가 가동되었을 때를 기준으로 한 시간단위로 평균하여 분석하였다.

<Table 8>은 실험기간 중 대표적으로 2009년 3월 26일에 히트펌프시스템이 가동되었을 때의 온도분포도를 보여주고 있다. 3월 26일은 실험기간 동안에 외기

<Table 7> The specification of system at Wimi-ri

Product	Area (㎡)	heat pump capacity (RT)	Thermal storage tank (ton)	Heating system	Max. demand temperature (℃)
Mandarin Orange	1,580	30	30	Fan coil unit, Hot water circulation	20

Fig. 15 The on-site of Wimi-ri

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

온도가 가장 낮았던 날로써 본 지중공기 열원 히트펌프시스템의 성능을 평가 분석하기에 최적의 조건으로 판단되는 날이다. 시간대 별로 살펴보면 오전 06:00~07:00에서 외기온도가 -0.3℃까지 내려갔었고, 12:00~13:00사이에는 15.0℃까지 온도가 올라감으로써 일교차가 약 15℃이상 나타났음을 알 수 있었다. 그러나 송풍기 출구를 통해 지중에서부터 유출되는 지중공기의 온도는 약 11.3℃~12.2℃로 1℃의 온도변화도 일어나지 않았음을 알 수 있다. 이는 지중공기 열원 히트펌프시스템은 일반적인 공기열원 히트펌프시스템과는 달리 외기온도 영향을 거의 받고 있지 않음을 보여주고 있으며, 외기와 상관없이 거의 일정한 열원을 공급받음으로 지열시스템과 거의 유사한 성능을 보여줄 수 있음을 보여주는 것이다.

<Table 9>는 실험기간 동안의 일일 평균온도 분포도를 보여주고 있으며, Figs. 17~42는 일일 평균온도 분포도를 그래프로 보여주고 있다.

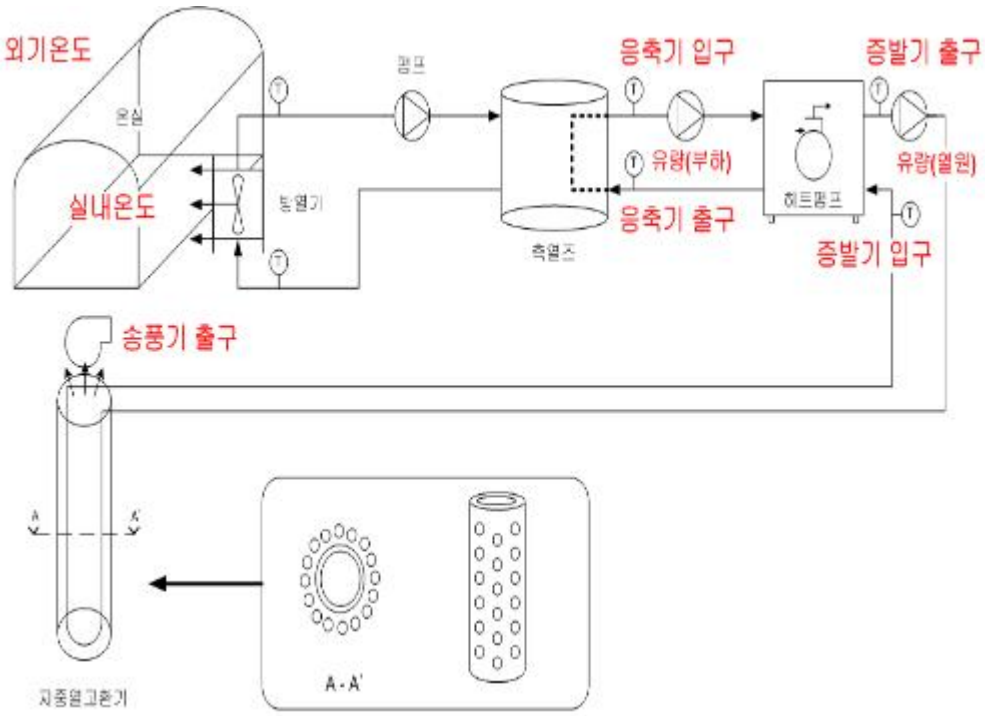


Fig. 16 The location of data measurement

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 8> The hourly temperature of heat pump components(Mar. 26th, 2009)

Time	Outlet temperature of fan[℃]	Outside temperature [℃]	Indoor temperature [℃]
00:00~01:00	11.9	2.4	14.3
01:00~02:00	11.8	2.3	14.1
02:00~03:00	11.7	1.2	13.8
03:00~04:00	11.6	0.7	13.6
04:00~05:00	11.5	0.3	13.5
05:00~06:00	11.4	0.0	13.3
06:00~07:00	11.3	-0.3	13.2
07:00~08:00	11.3	3.2	13.3
08:00~09:00	11.4	9.0	13.9
09:00~10:00	11.4	12.4	14.4
10:00~11:00	11.6	13.8	14.8
11:00~12:00	11.9	14.6	15.3
12:00~13:00	12.0	15.0	15.5
13:00~14:00	12.0	14.6	15.4
14:00~15:00	12.1	15.3	15.4
15:00~16:00	12.2	14.8	15.5
16:00~17:00	12.2	14.4	15.5
Average	**11.7**	**7.8**	**14.4**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 9> The temperature measurement data (Mar. 17th, 2009 ~ Apr. 18th, 2009)

Date	Outlet temperature of fan[℃]	Outside average temperature [℃]	Indoor average temperature [℃]
Mar. 17th	14.1	14.0	17.1
Mar. 18th	17.3	17.7	20.6
Mar. 19th	17.2	17.7	21.1
Mar. 20th	16.8	15.0	19.7
Mar. 21st	12.8	12.5	16.1
Mar. 22nd	16.4	16.2	19.7
Mar. 23rd	12.3	12.0	15.5
Mar. 24th	12.8	13.2	16.2
Mar. 25th	12.6	8.6	15.7
Mar. 26th	11.8	7.5	14.6
Mar. 27th	11.5	10.4	14.4
Mar. 28th	11.5	12.4	14.9
Mar. 29th	10.8	9.2	14.0
Apr. 6th	12.2	17.2	16.3
Apr. 7th	11.6	16.5	15.2
Apr. 8th	13.8	17.9	18.8
Apr. 9th	12.4	17.5	17.4
Apr. 10th	10.6	14.8	14.9
Apr. 11th	12.8	17.7	18.3
Apr. 12th	13.3	16.6	18.2
Apr. 13th	15.4	17.9	21.4
Apr. 14th	16.1	17.0	20.1
Apr. 15th	14.8	16.0	19.3
Apr. 16th	15.3	14.8	19.6
Apr. 17th	13.2	17.2	17.9
Apr. 18th	10.2	11.3	14.1
Average	**13.5**	**14.6**	**17.4**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

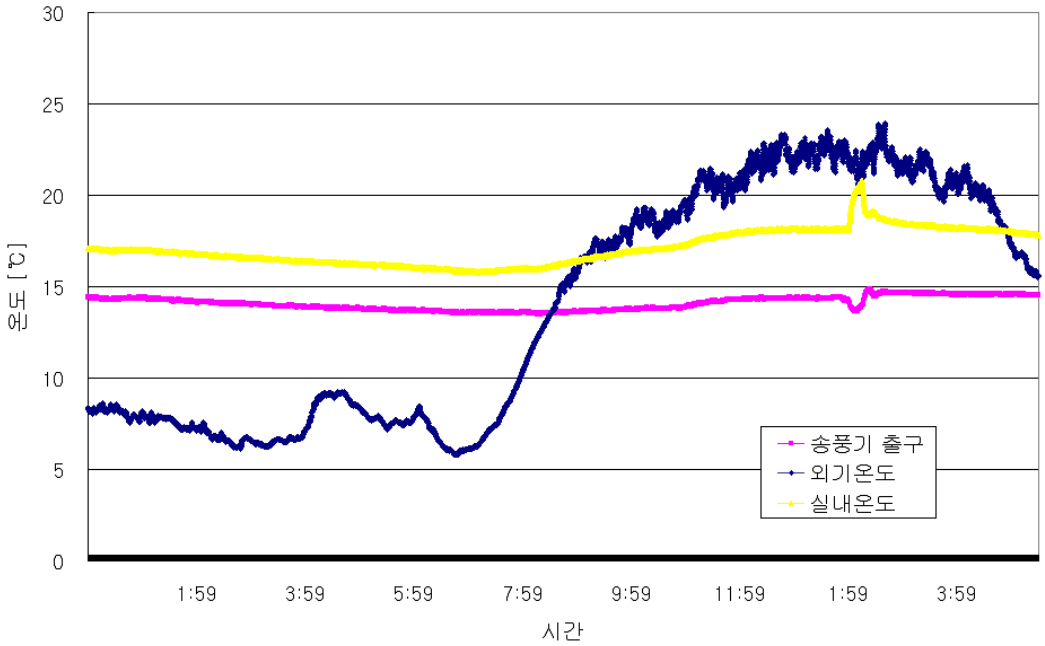


Fig. 17 Temperature variations at surroundings (Mar. 17th, 2009)

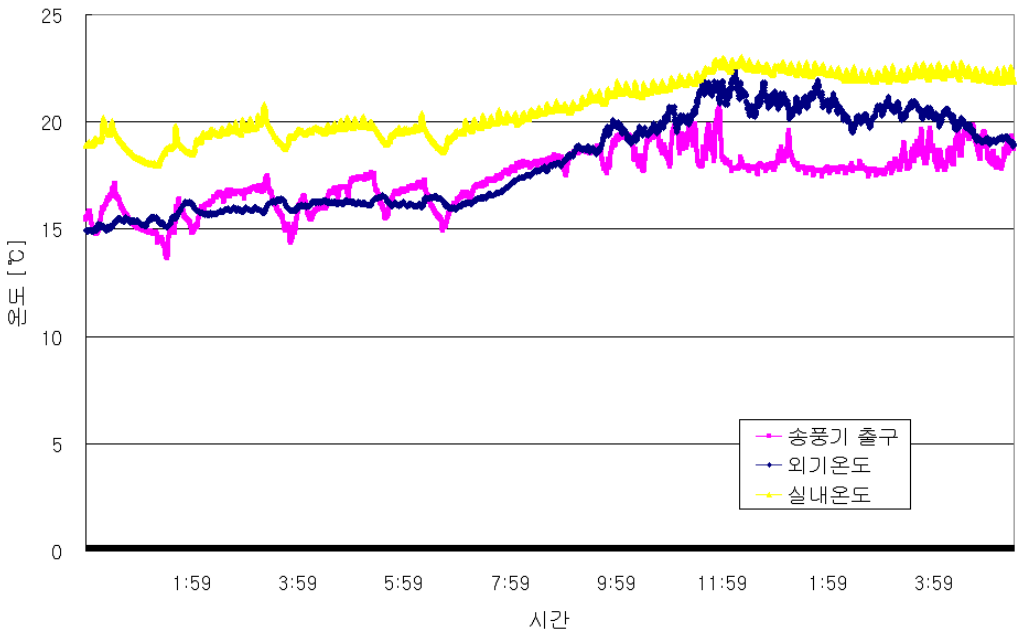


Fig. 18 Temperature variations at surroundings (Mar. 18th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

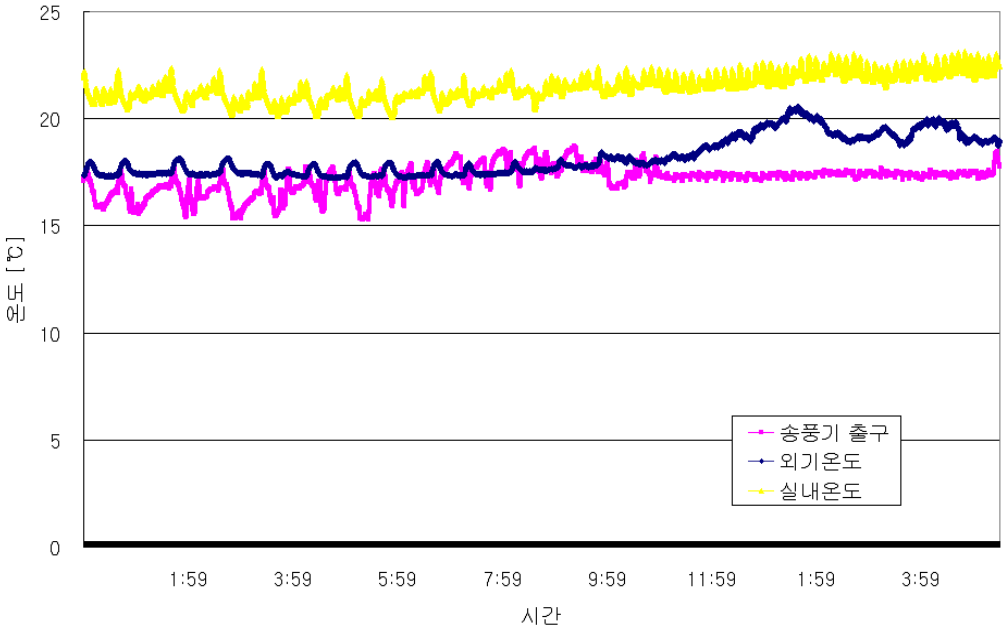


Fig. 19 Temperature variations at surroundings (Mar. 19th, 2009)

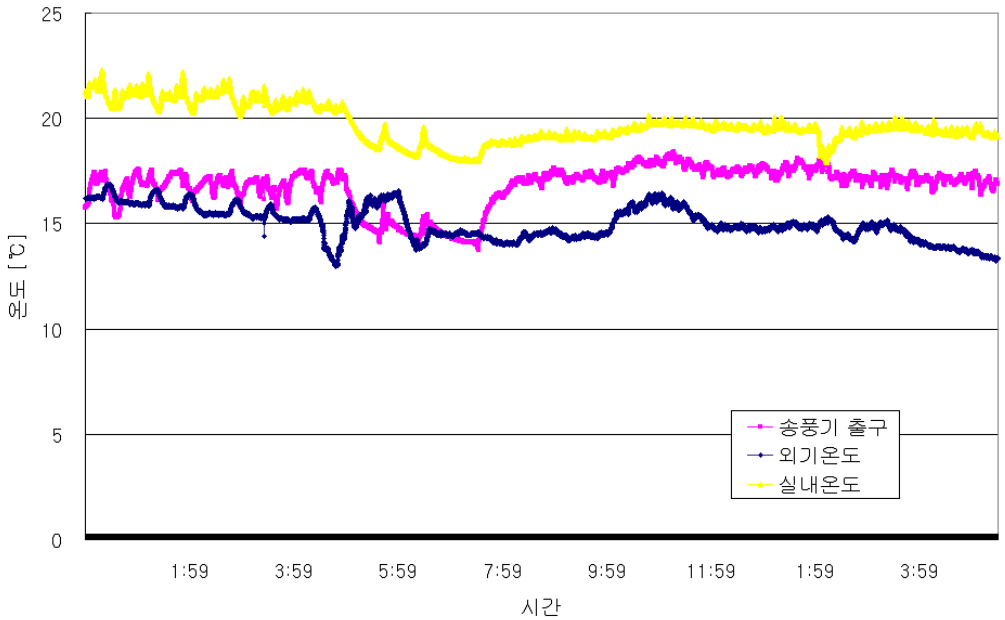


Fig. 20 Temperature variations at surroundings (Mar. 20th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

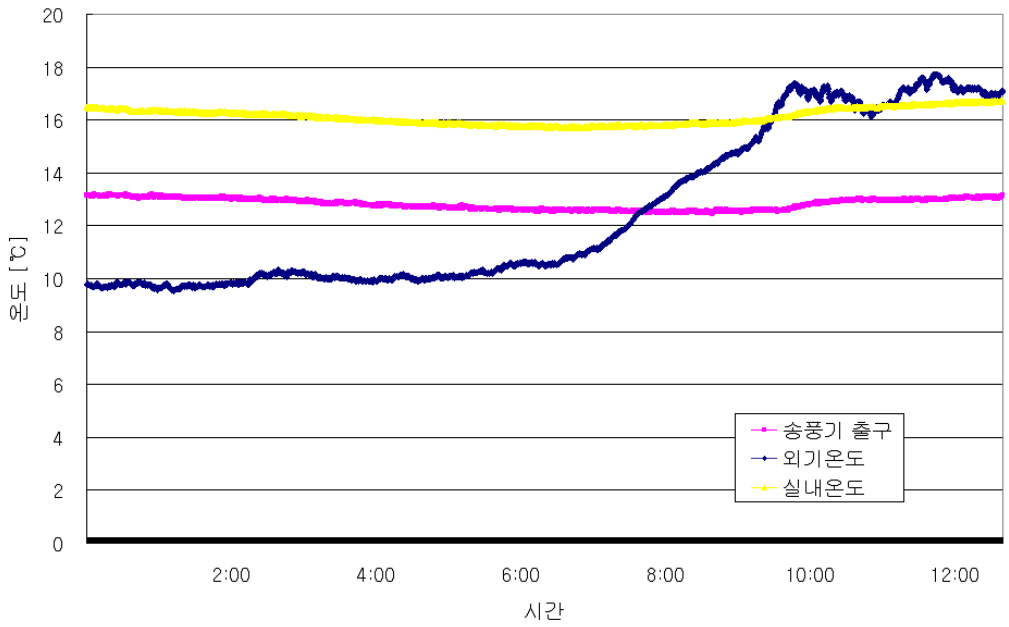


Fig. 21 Temperature variations at surroundings (Mar. 21st, 2009)

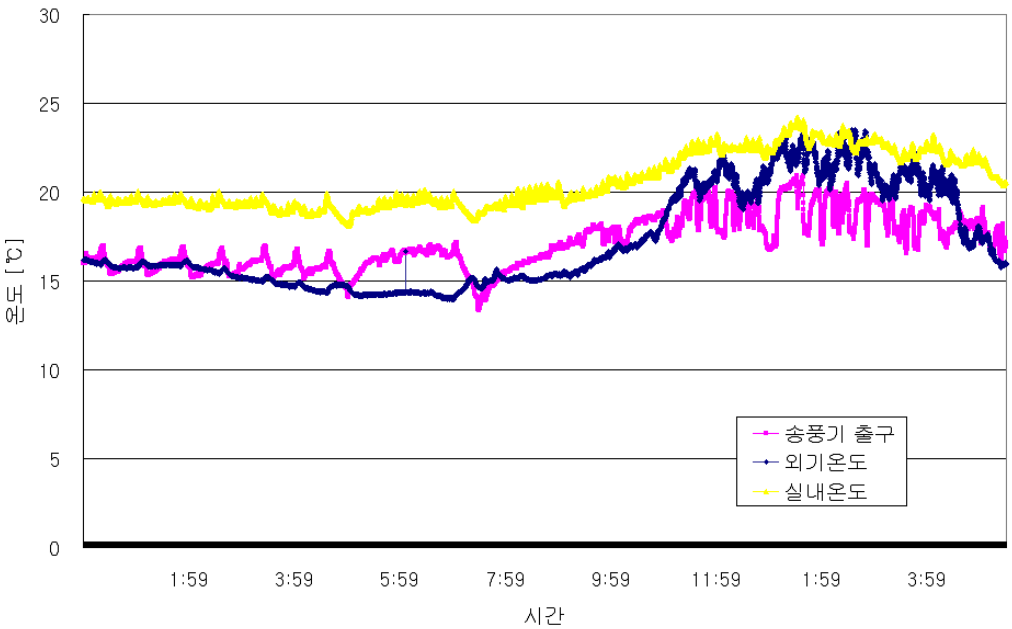


Fig. 22 Temperature variations at surroundings (Mar. 22nd, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

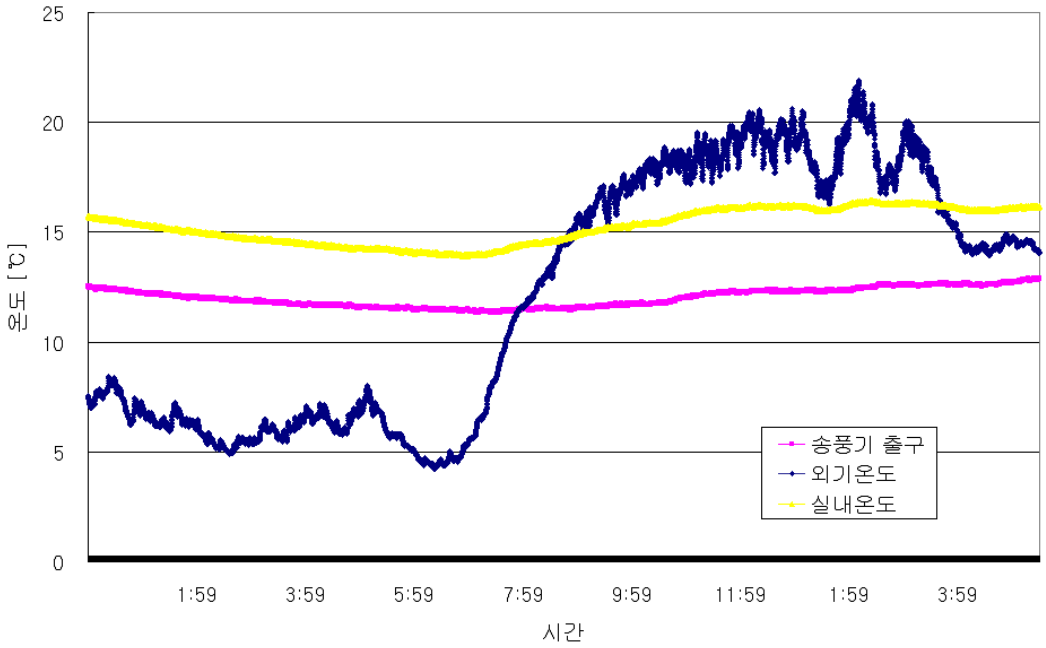


Fig. 23 Temperature variations at surroundings (Mar. 23rd, 2009)

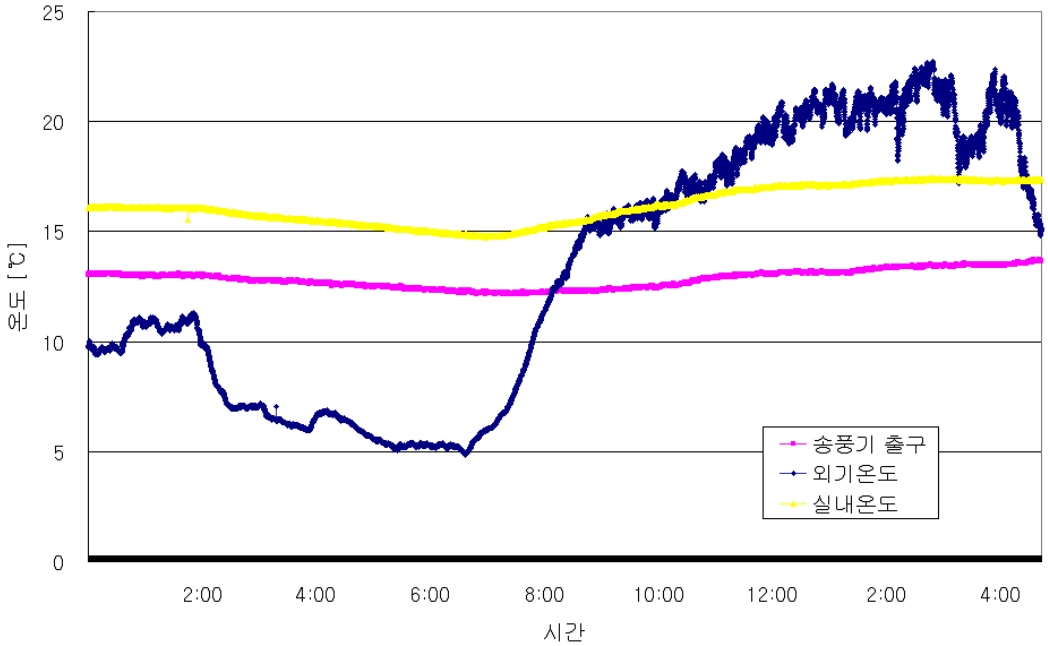


Fig. 24 Temperature variations at surroundings (Mar. 24th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

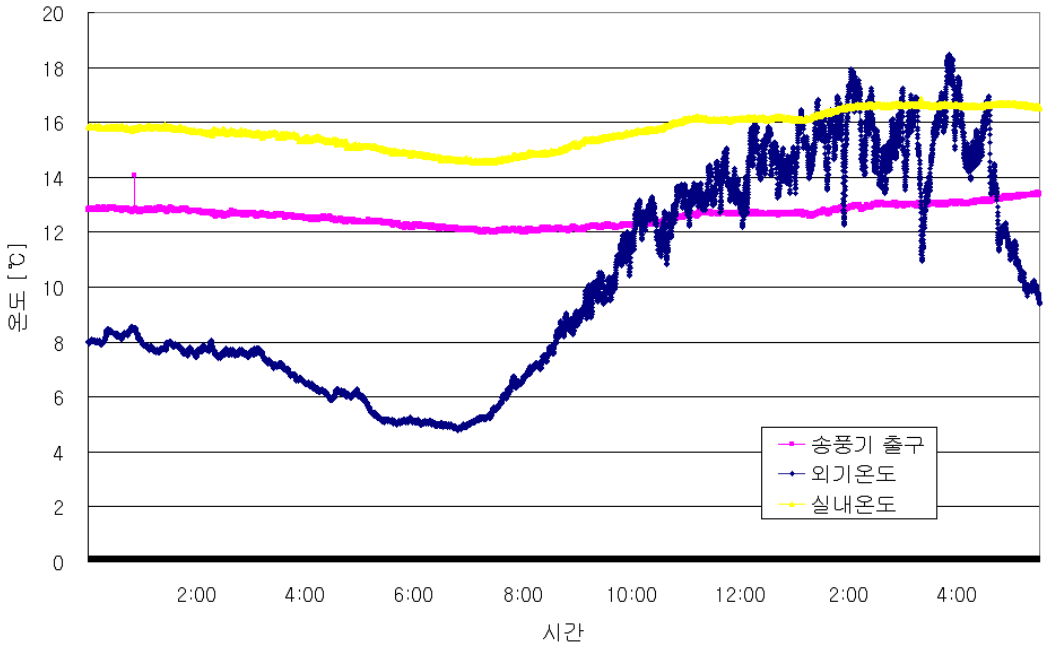


Fig. 25 Temperature variations at surroundings (Mar. 25th, 2009)

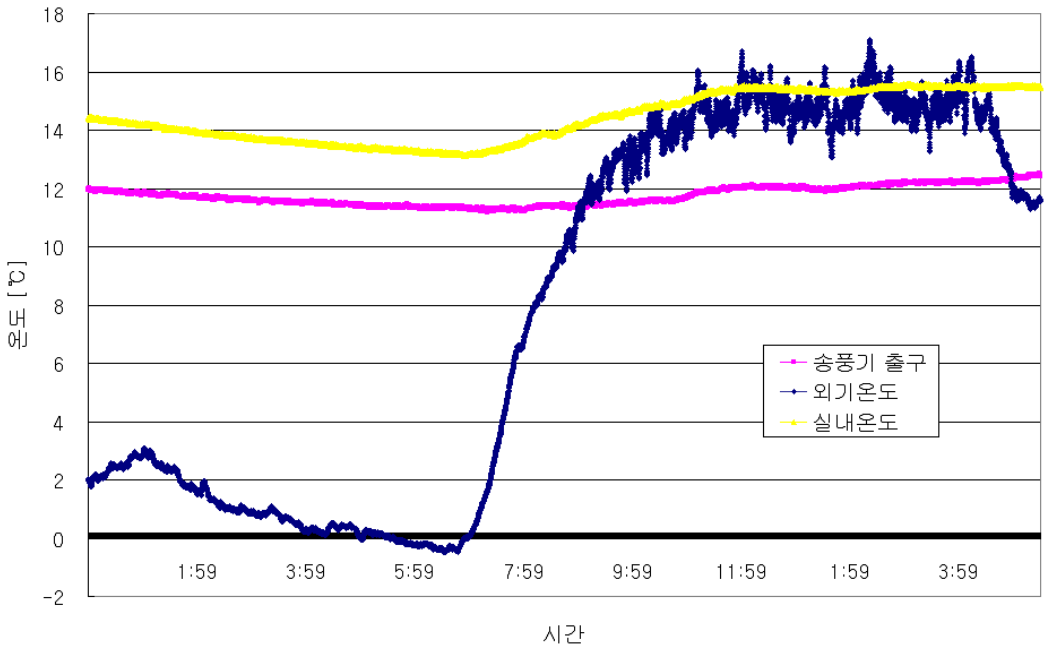


Fig. 26 Temperature variations at surroundings (Mar. 26th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

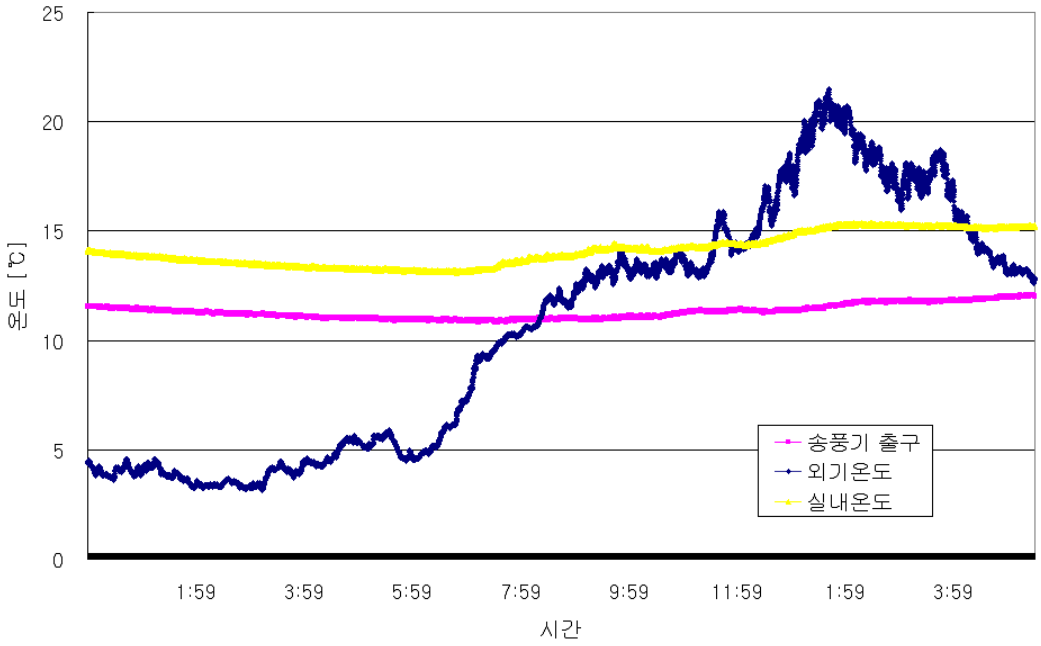


Fig. 27 Temperature variations at surroundings (Mar. 27th, 2009)

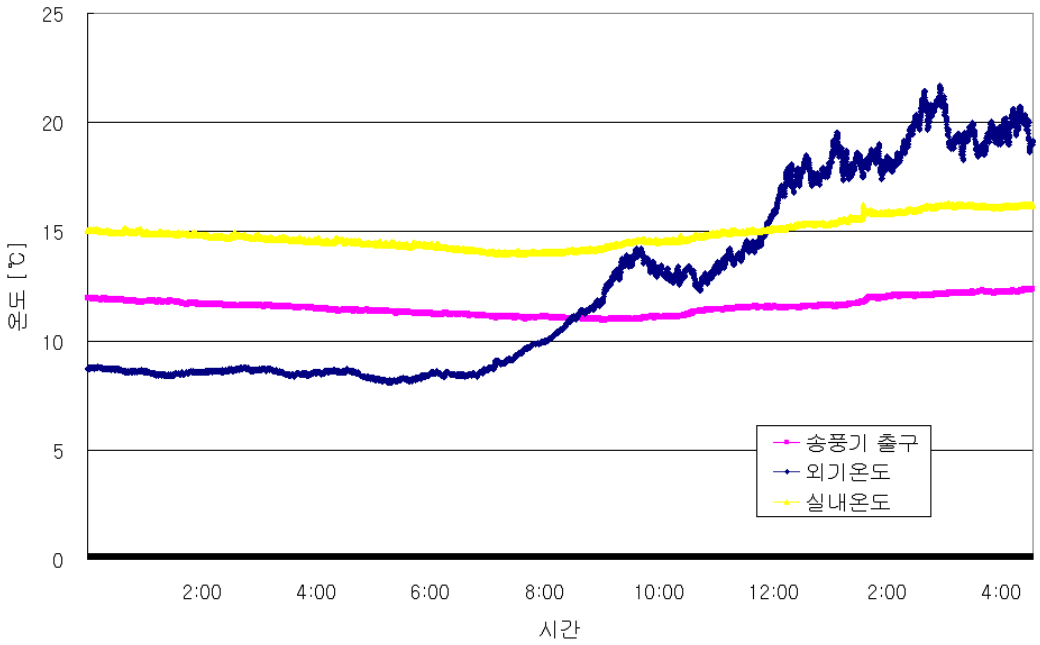


Fig. 28 Temperature variations at surroundings (Mar. 28th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

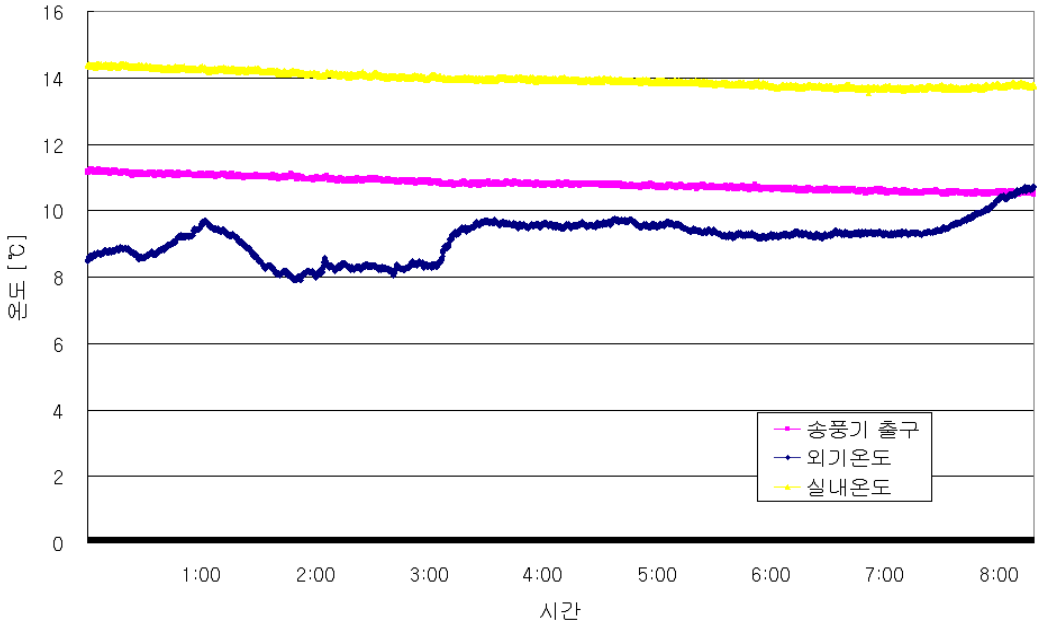


Fig. 29 Temperature variations at surroundings (Mar. 29th, 2009)

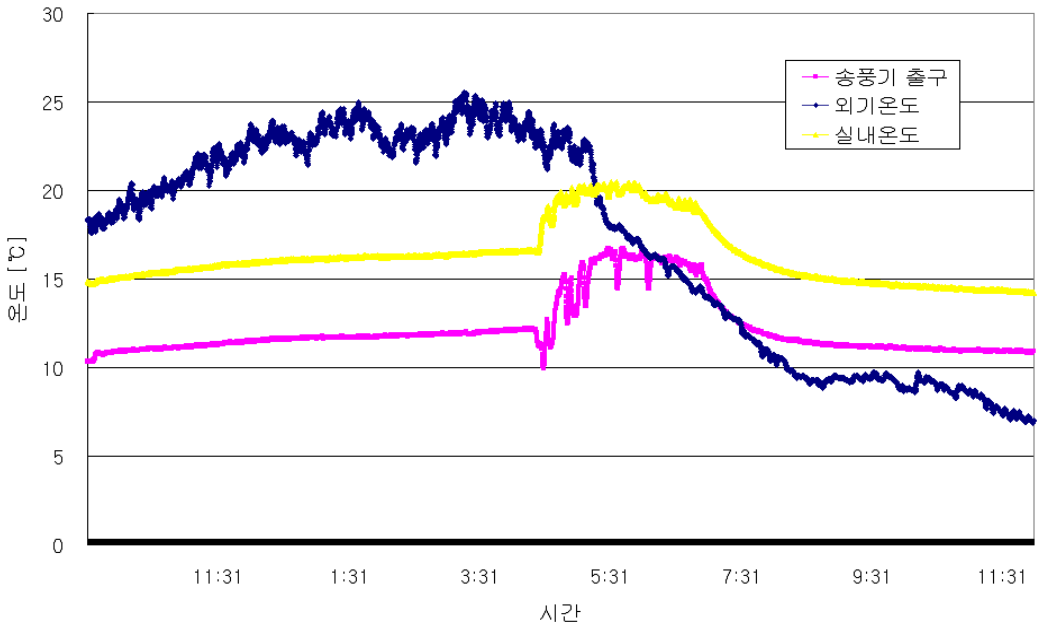


Fig. 30 Temperature variations at surroundings (Apr. 6th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

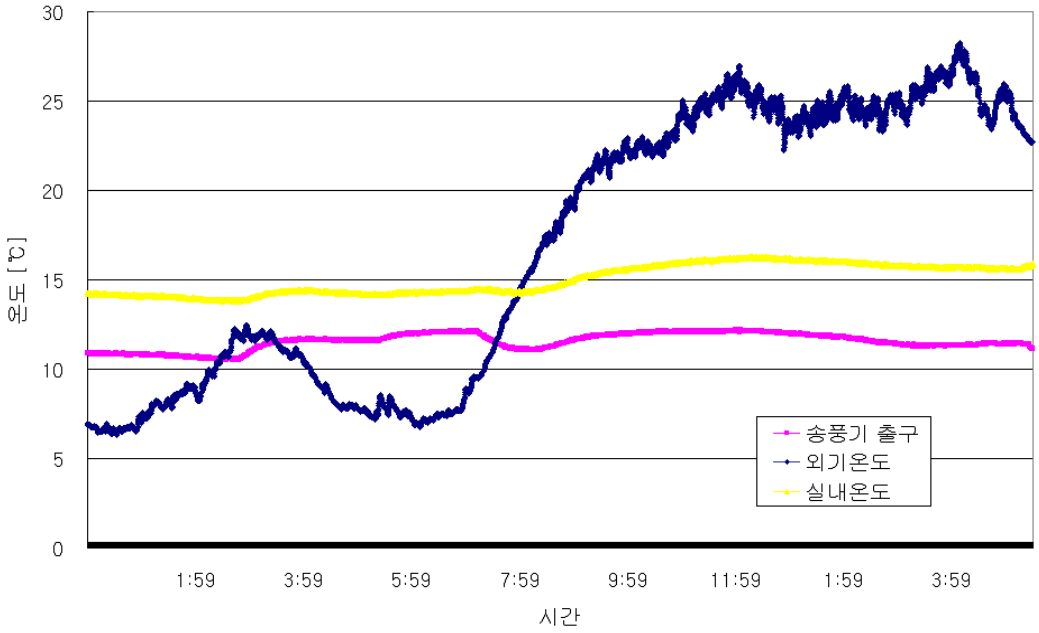


Fig. 31 Temperature variations at surroundings (Apr. 7th, 2009)

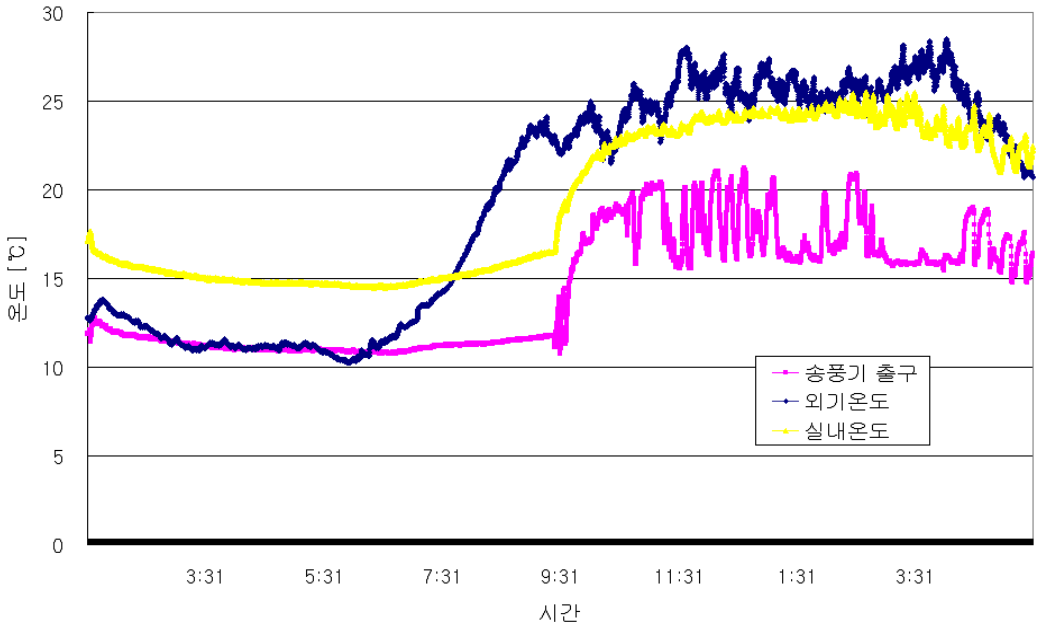


Fig. 32 Temperature variations at surroundings (Apr. 8th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

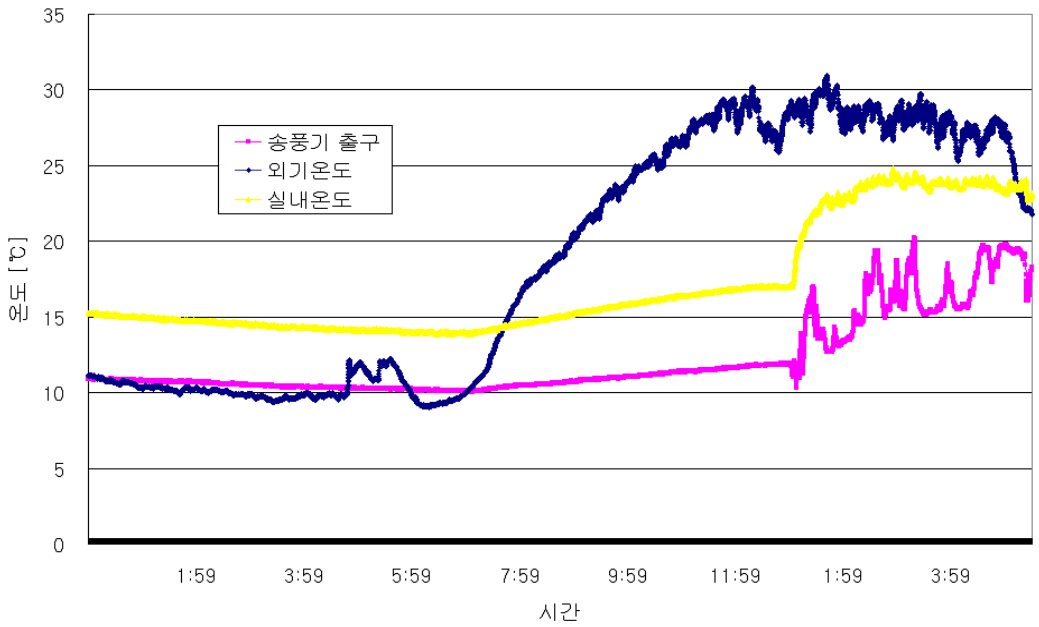


Fig. 33 Temperature variations at surroundings (Apr. 9th, 2009)

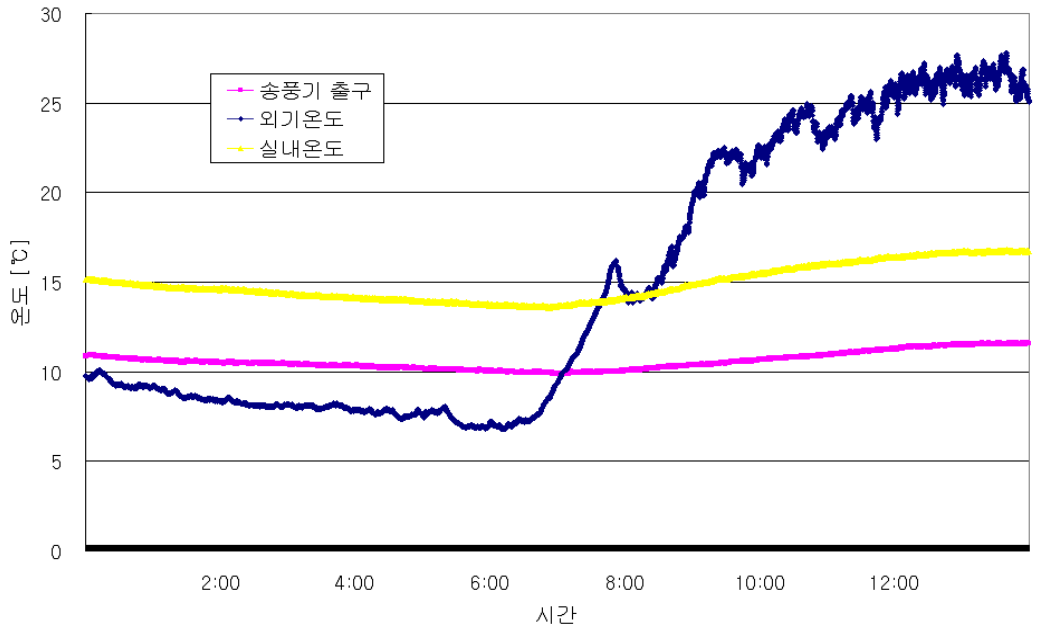


Fig. 34 Temperature variations at surroundings (Apr. 10th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

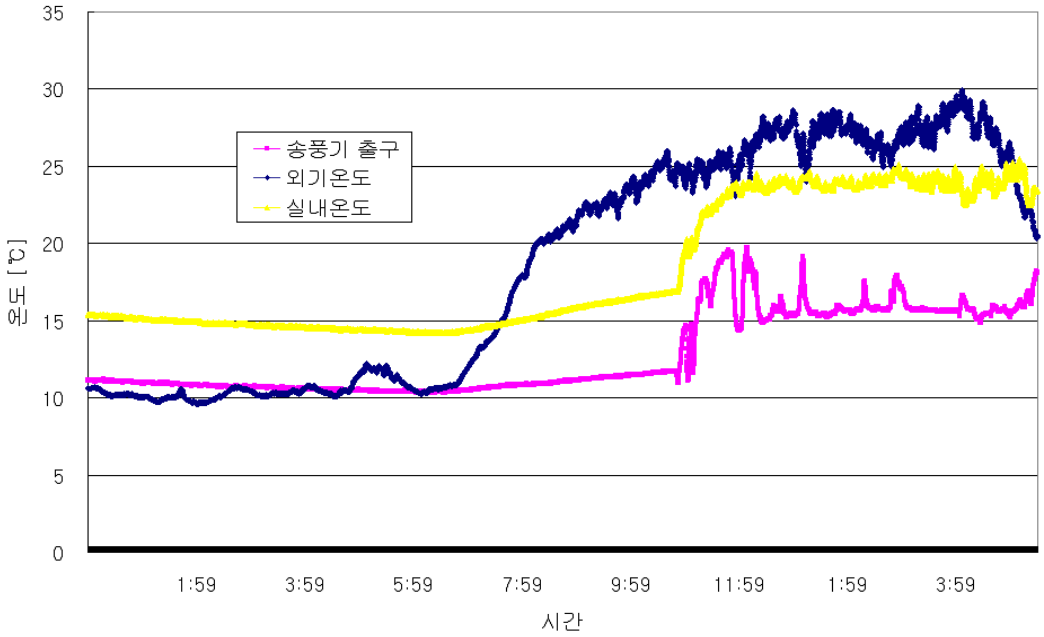


Fig. 35 Temperature variations at surroundings (Apr. 11th, 2009)

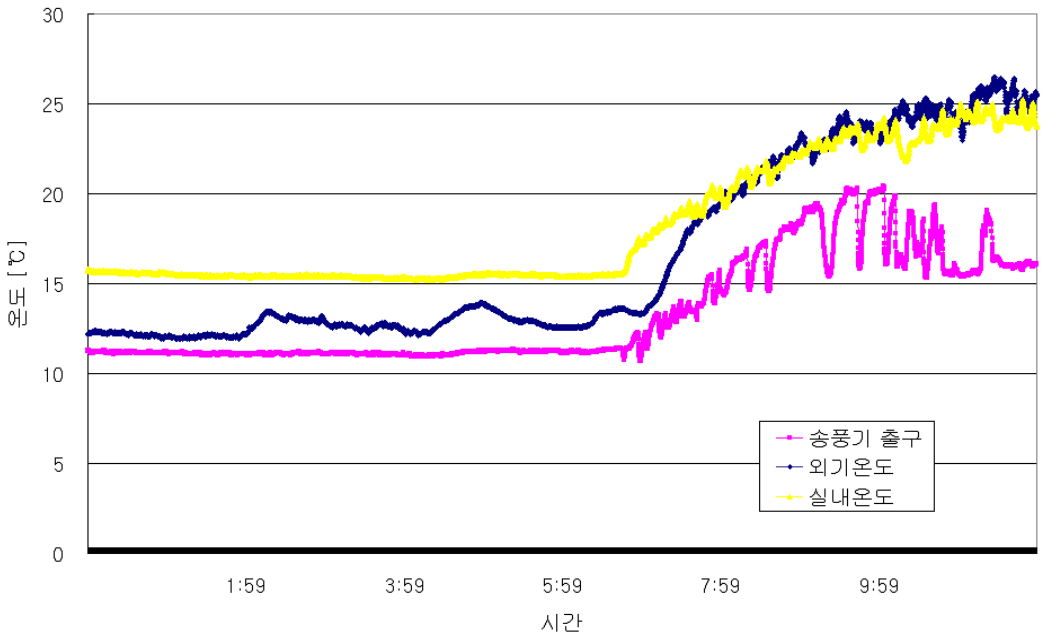


Fig. 36 Temperature variations at surroundings (Apr. 12th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

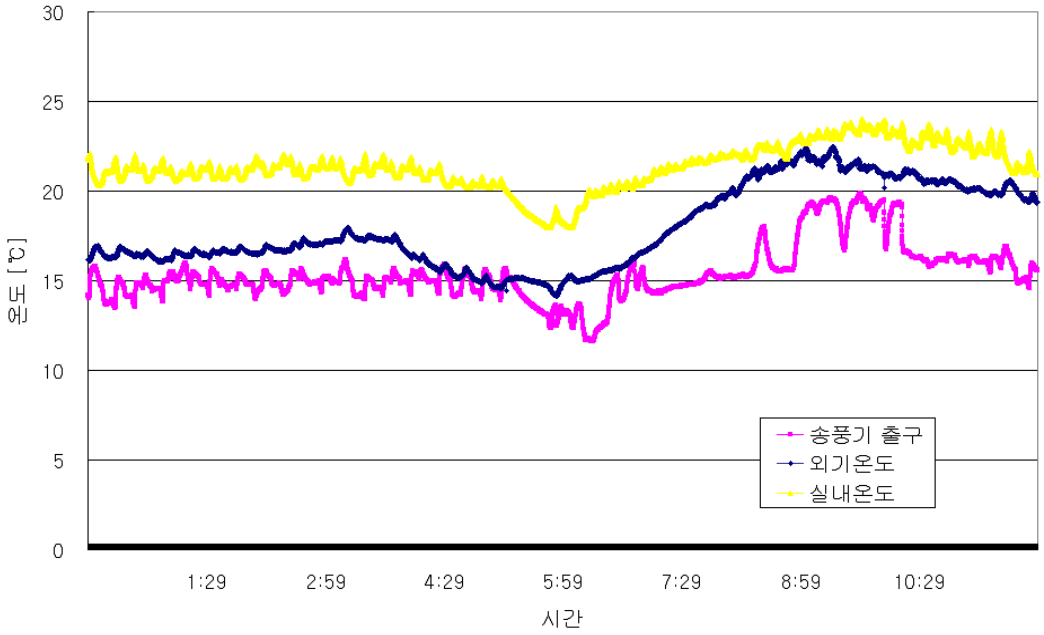


Fig. 37 Temperature variations at surroundings (Apr. 13th, 2009)

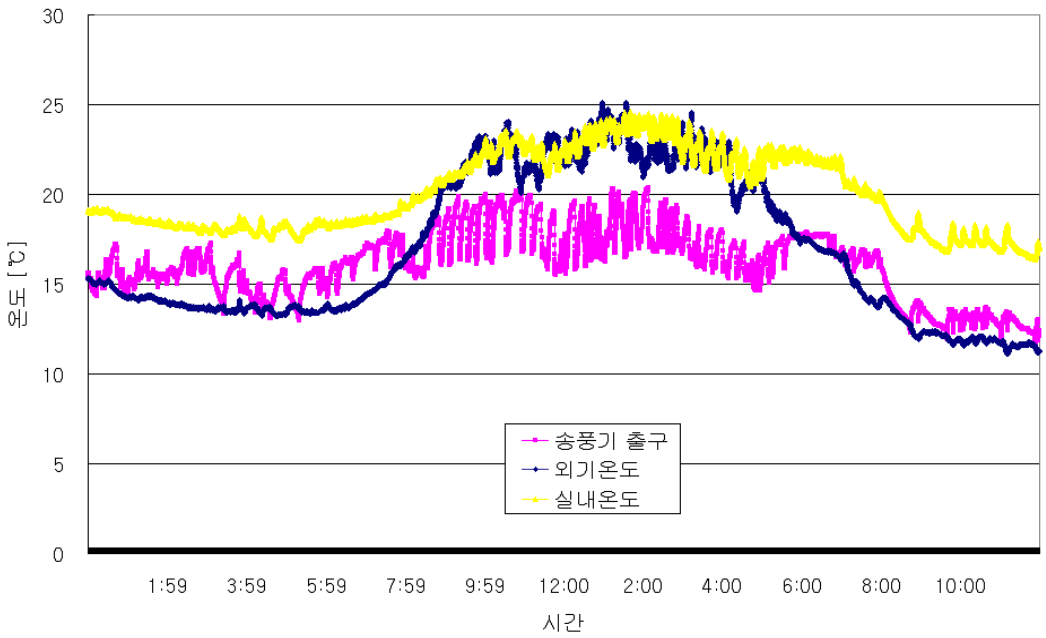


Fig. 38 Temperature variations at surroundings (Apr. 14th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

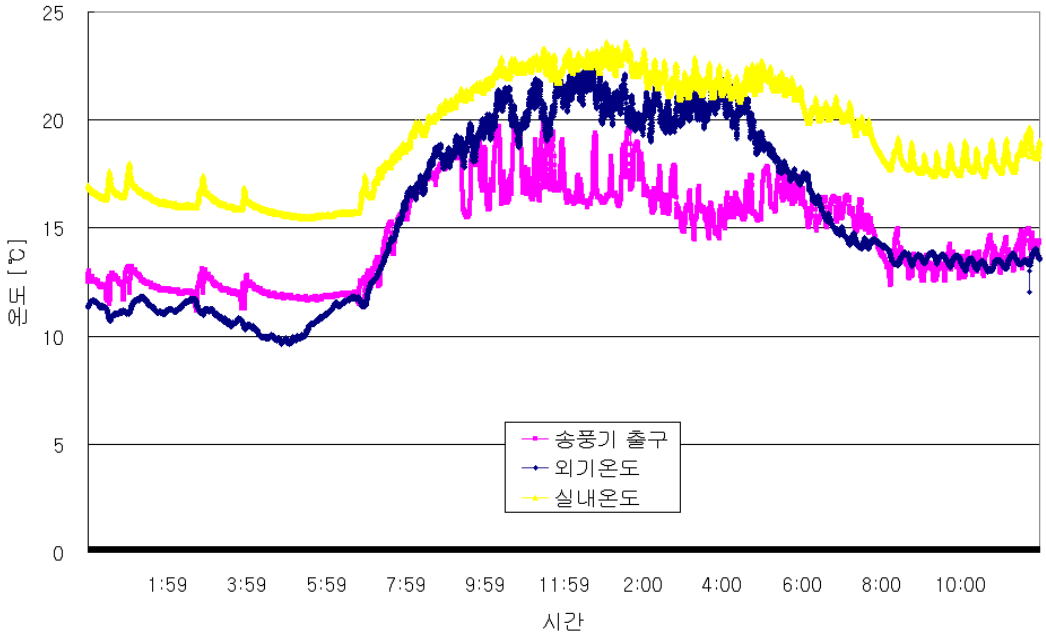


Fig. 39 Temperature variations at surroundings (Apr. 15th, 2009)

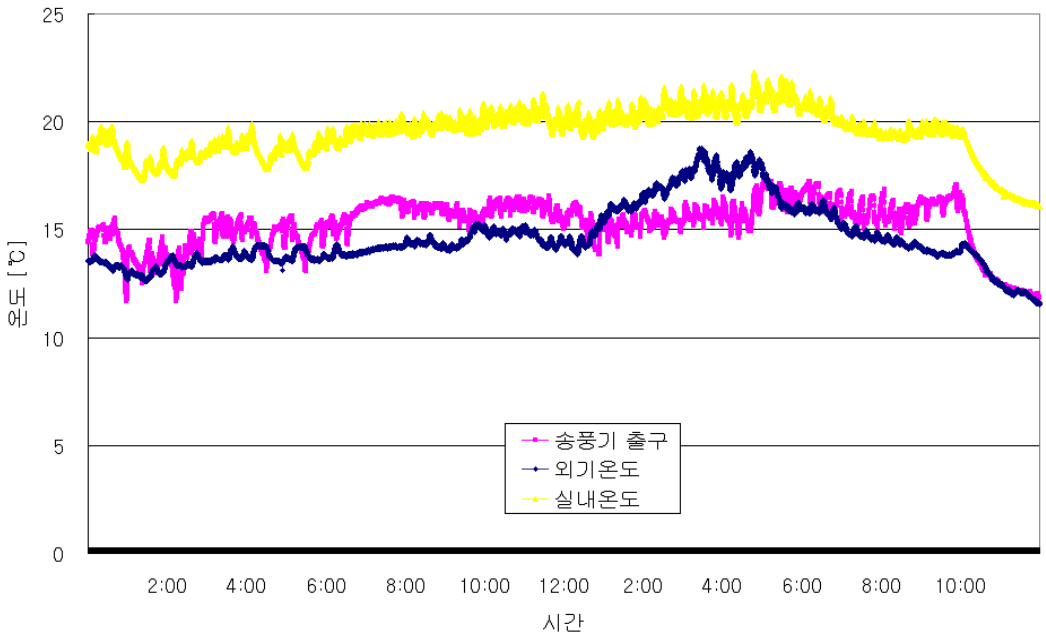


Fig. 40 Temperature variations at surroundings (Apr. 16th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

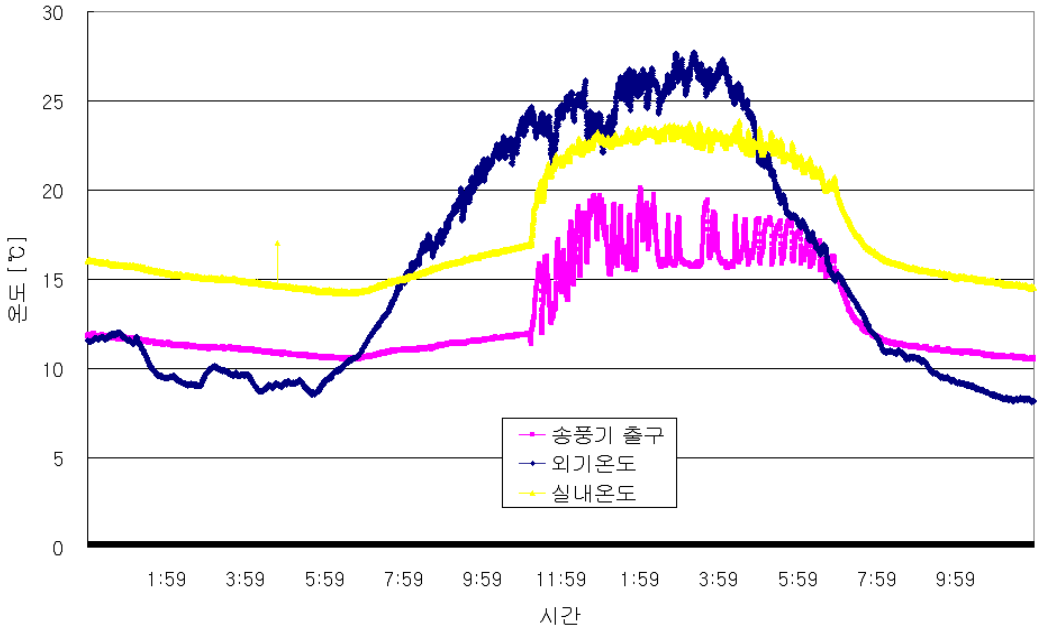


Fig. 41 Temperature variations at surroundings (Apr. 17th, 2009)

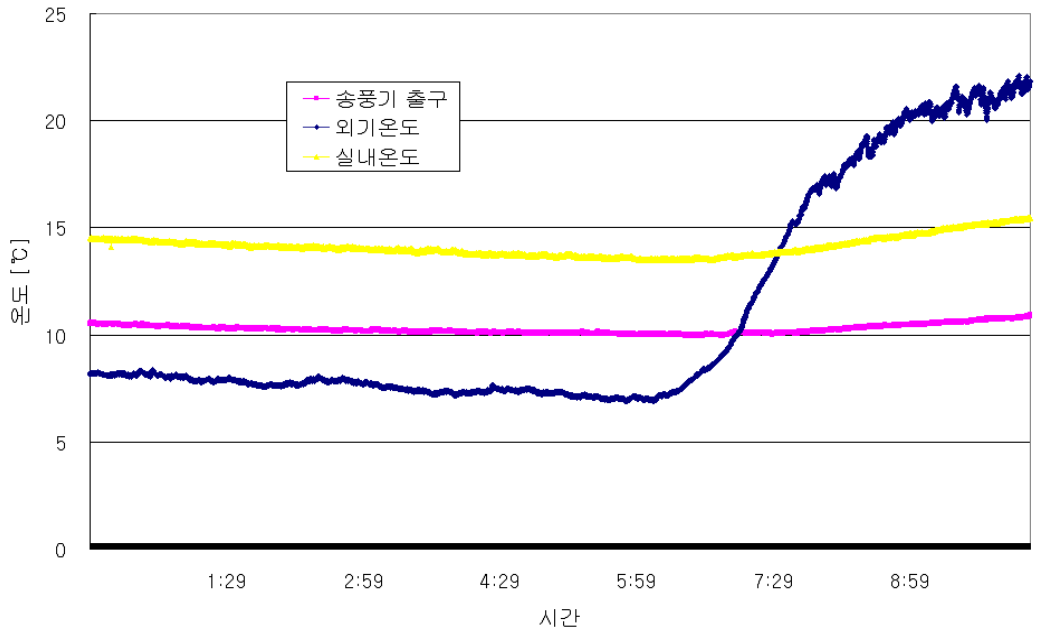


Fig. 42 Temperature variations at surroundings (Apr. 18th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2.4 히트펌프 열원측 열 회수량

히트펌프시스템의 열원을 확보하기 위하여 전술한 바와 같이 지하공에 지름 300mm의 메인관을 매설하였고 직경 20mm의 지중열교환기를 메인관 내표면으로 둘러쌓듯이 설치하였다. 아울러 지하공 외부에는 송풍기를 설치하여, 히트펌프 구동시 송풍기가 작동될 수 있도록 설계하였다. 히트펌프 열원측 열회수량을 평가하기 위하여 증발기 입출구 온도 및 열원측 작동유량을 측정하였으며, 측정시간은 히트펌프가 가동되었을 때를 기준으로 한 시간단위로 평균하여 분석하였다. 히트펌프 열원측 열 회수량은 식(1)에 의해 구하였다.

$$\dot{Q_s} = \dot{m_w} \times C_p \times (T_{e-out} - T_{e-in}) \quad (1)$$

여기서 $\dot{Q_s}$ = 열원측 열 회수량 (kW)

$\dot{m_w}$ = 물의 질량 유량 (m^3/h)

T_{e-in}, T_{e-out} = 증발기 입구, 출구 온도 (℃)

<Table 10>은 실험 기간 중 대표적으로 2009년 3월 26일에 히트펌프시스템이 가동되었을 때의 히트펌프 증발기 입출구 온도분포 및 작동유량 데이터를 보여주고 있다. 증발기 입출구의 온도분포는 시간에 상관없이 변화폭이 미세하게 나타나며, 증발기 출구 평균온도는 7.3℃, 입구 평균온도는 9.3℃로 입출구 온도차는 약 2.0℃로 나타났다. 이 때의 작동 유량은 평균 21.0m^3/h로 시간에 관계없이 거의 일정한 분포를 보여주고 있으며, 이날의 일일 평균 열회수량은 49.8kW로 나타났다.

<Table 11>은 실험기간 동안에 부하측 유량배관 변경전의 지중공기 열원 히트펌프시스템의 열원측 일별 열회수량을 보여주고 있으며, <Table 12>는 유량배관 변경이 완료된 후에 지중공기 열원 히트펌프시스템의 열원측 일별 열회수량을 보여주고 있다. 유량배관은 기존에 부하측 유량값 평균 9.6m^3/h에서 19.5m^3/h로 약 두 배 정도 용량을 키웠으며, 평균 증발기 입출구 온도차는 약

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1.8℃로 유량배관 변경에 관계없이 거의 일정한 값을 보였다. 그러나 시스템 변경에 따른 히트펌프시스템의 증발기 입구 온도는 기존 평균 10.0℃에서 8.9℃로 약 1.1℃ 정도 떨어졌음을 알 수 있고, 지중공기 열원으로부터의 열회수량은 45.7kW에서 41.0kW로 약 4.7kW가 낮게 회수됨을 알 수 있다.

Figs. 43~55는 실험기간 동안에 부하측 유량배관 변경 전, 그리고 Figs. 56~68은 실험기간 동안에 부하측 유량배관 변경 후, 히트펌프시스템 열원측 일별 증발기 입출구 온도 및 유량 분포도를 그래프로 보여주고 있다.

<Table 10> The heat recovery of heat source at heat pump system (Mar. 26th, 2009)

Time	Evaporator outlet temperature [℃]	Evaporator inlet temperature [℃]	Flow rate [m^3/h]	Heat supply quantity [kW]
00:00~01:00	7.5	9.5	21.0	48.5
01:00~02:00	7.3	9.3	21.0	49.2
02:00~03:00	7.1	9.1	21.0	49.7
03:00~04:00	6.9	9.0	21.0	50.1
04:00~05:00	6.8	8.8	21.0	50.5
05:00~06:00	6.7	8.7	21.0	50.8
06:00~07:00	6.6	8.6	21.0	51.0
07:00~08:00	6.5	8.6	21.0	51.6
08:00~09:00	6.7	8.8	21.1	52.2
09:00~10:00	6.8	9.0	21.0	53.2
10:00~11:00	7.0	9.2	21.0	53.7
11:00~12:00	7.5	9.6	21.1	50.9
12:00~13:00	7.7	9.7	21.1	51.0
13:00~14:00	7.7	9.7	21.1	49.3
14:00~15:00	8.1	10.0	21.1	46.3
15:00~16:00	8.3	10.1	21.1	45.4
16:00~17:00	8.4	10.2	21.1	44.2
Average	**7.3**	**9.3**	**21.0**	**49.8**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 11> The daily heat recovery of heat source at heat pump system (Before)

Date	Evaporator outlet temperature [℃]	Evaporator inlet temperature [℃]	Flow rate [m^3/h]	Heat supply quantity [kW]
Mar. 17th	10.5	12.3	20.2	44.3
Mar. 21st	9.3	11.0	21.1	41.7
Mar. 23rd	7.8	9.8	21.0	48.8
Mar. 24th	9.1	10.9	21.1	44.2
Mar. 25th	8.6	10.5	21.1	46.6
Mar. 26th	7.3	9.3	21.0	49.8
Mar. 27th	6.7	8.7	21.0	48.8
Mar. 28th	7.7	9.4	21.1	41.7
Mar. 29th	6.6	8.4	21.0	45.3
Average	**8.2**	**10.0**	**21.0**	**45.7**

<Table 12> The daily heat recovery of heat source at heat pump system (After)

Date	Evaporator outlet temperature [℃]	Evaporator inlet temperature [℃]	Flow rate [m^3/h]	Heat supply quantity [kW]
Apr. 6th	7.2	9.3	15.9	38.8
Apr. 7th	7.0	9.1	15.9	38.8
Apr. 8th	7.2	9.0	18.6	38.9
Apr. 9th	6.5	8.5	18.5	43.0
Apr. 10th	6.7	8.5	21.0	44.0
Apr. 11th	7.2	8.9	21.0	41.5
Apr. 12th	7.8	9.4	20.5	38.1
Apr. 17th	7.5	9.2	21.1	41.7
Apr. 18th	6.1	7.9	21.1	44.2
Average	**7.0**	**8.9**	**19.3**	**41.0**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

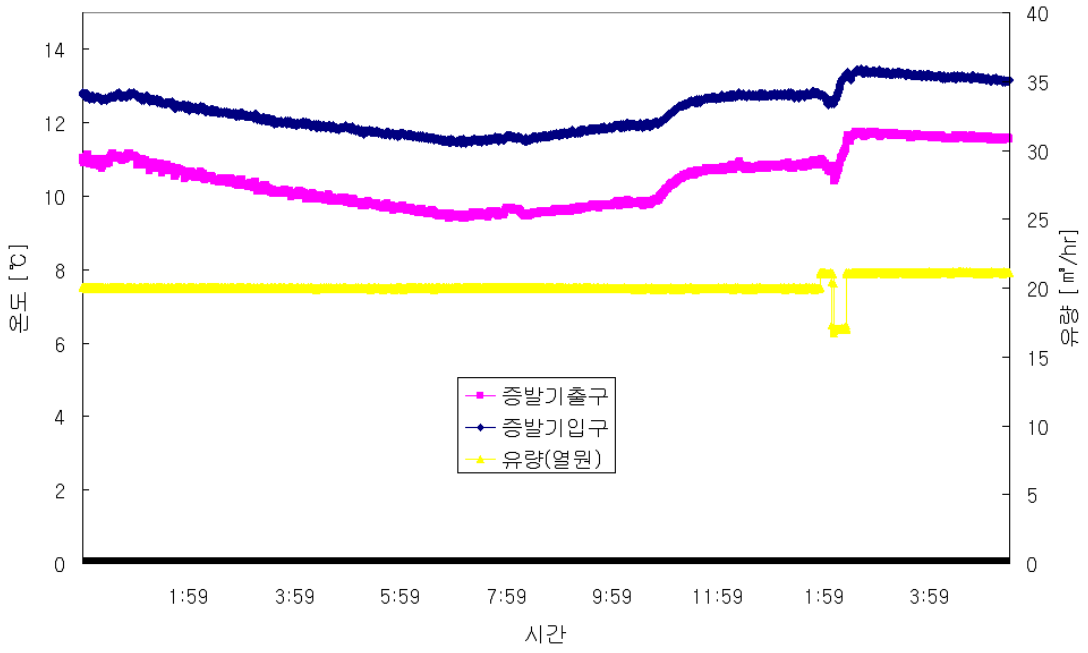


Fig. 43 Temperature variations at evaporator (Mar. 17th, 2009)

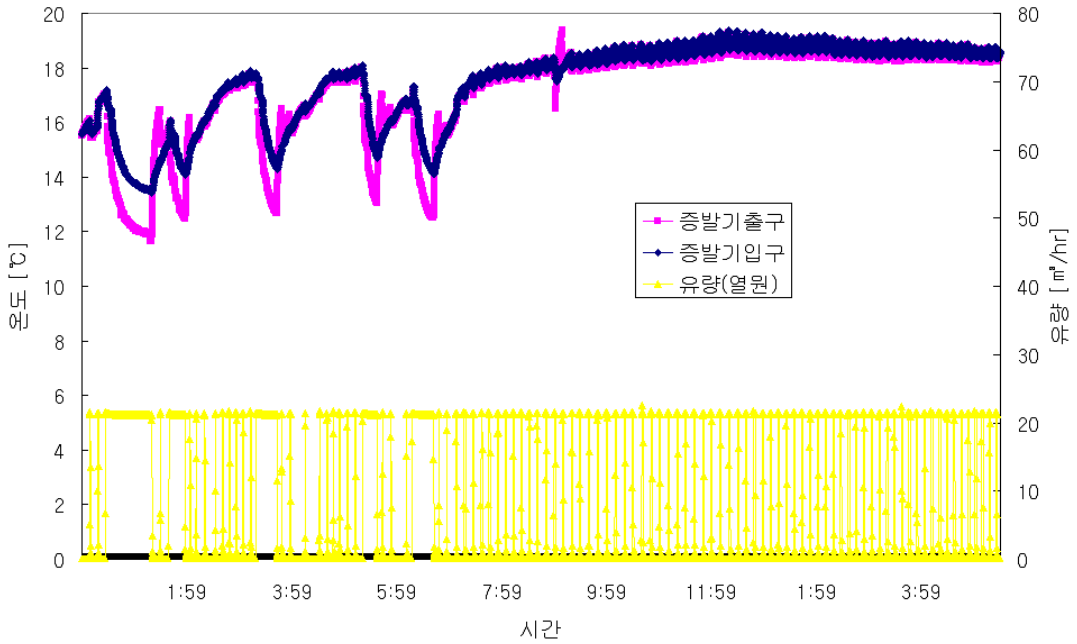


Fig. 44 Temperature variations at evaporator (Mar. 18th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

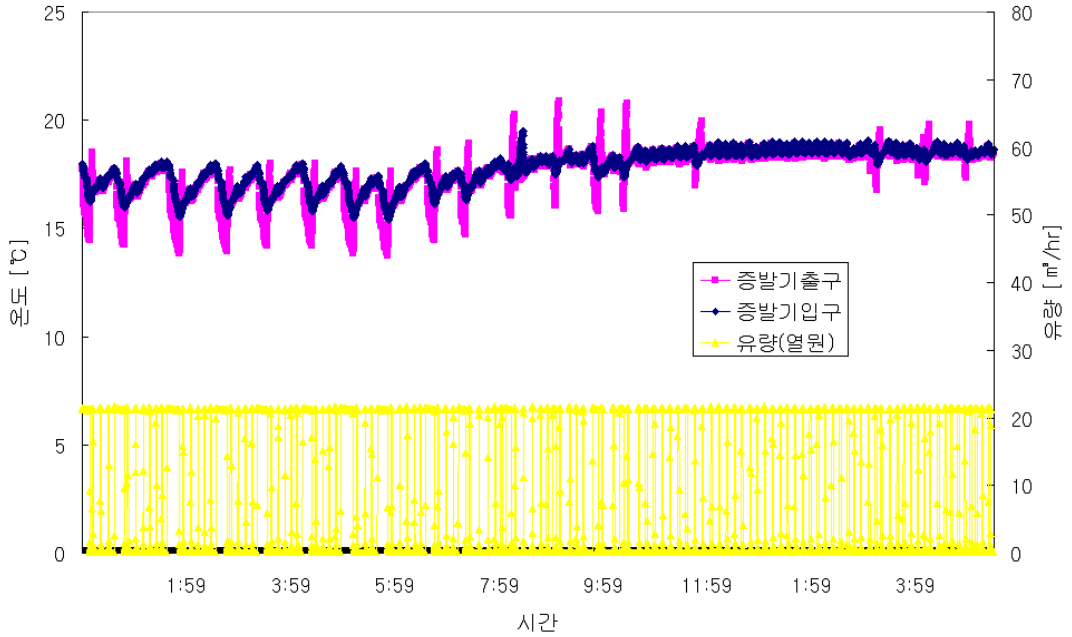


Fig. 45 Temperature variations at evaporator (Mar. 19th, 2009)

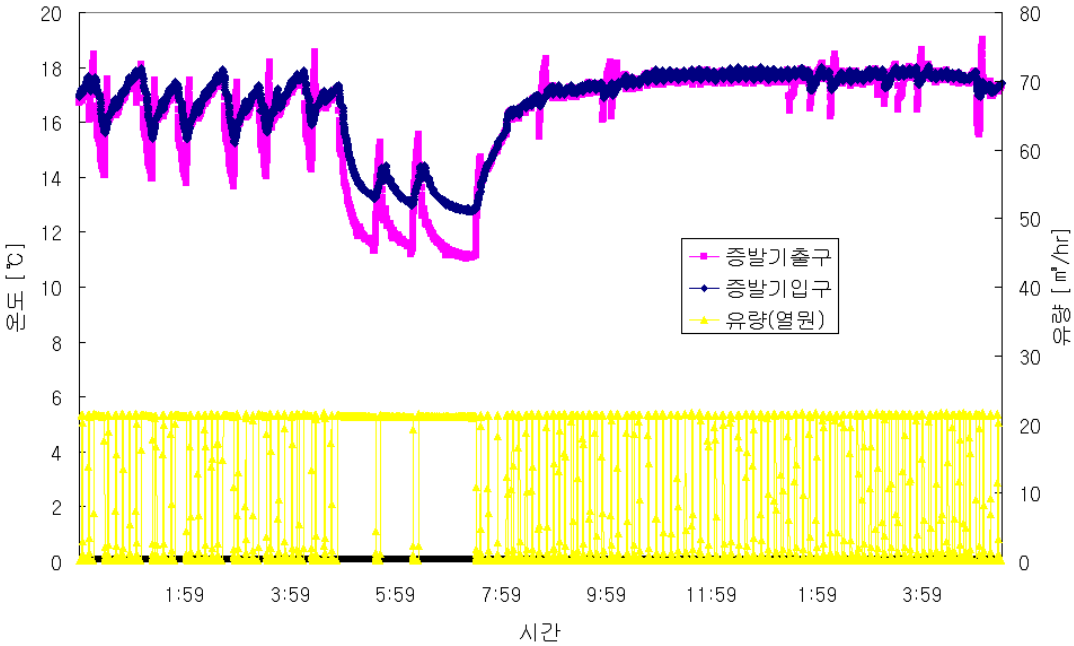


Fig. 46 Temperature variations at evaporator (Mar. 20th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

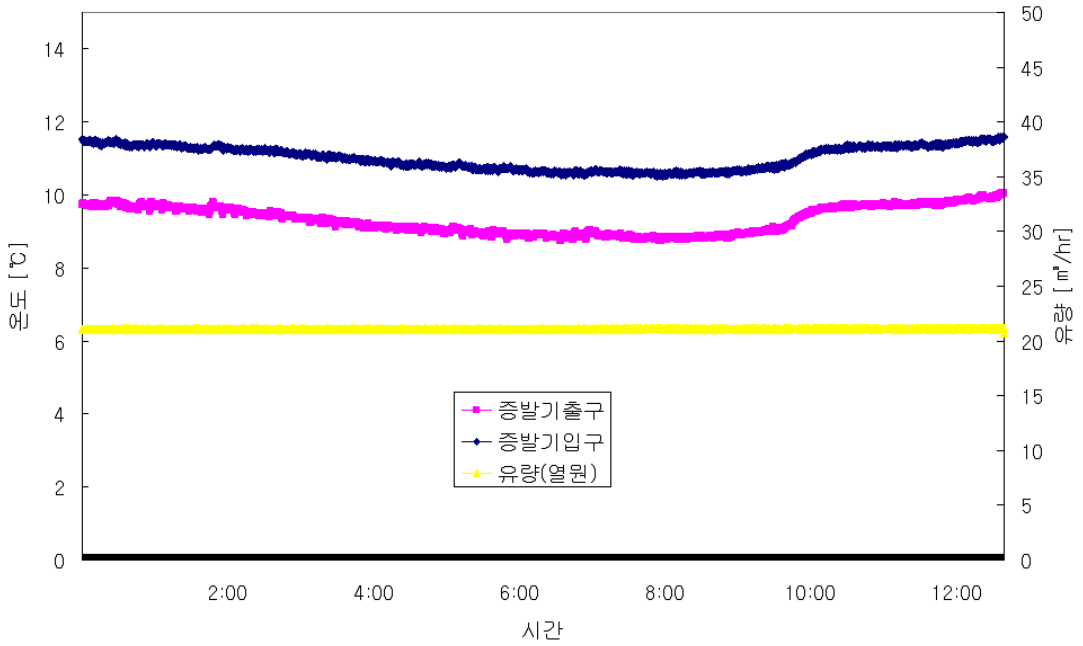


Fig. 47 Temperature variations at evaporator (Mar. 21st, 2009)

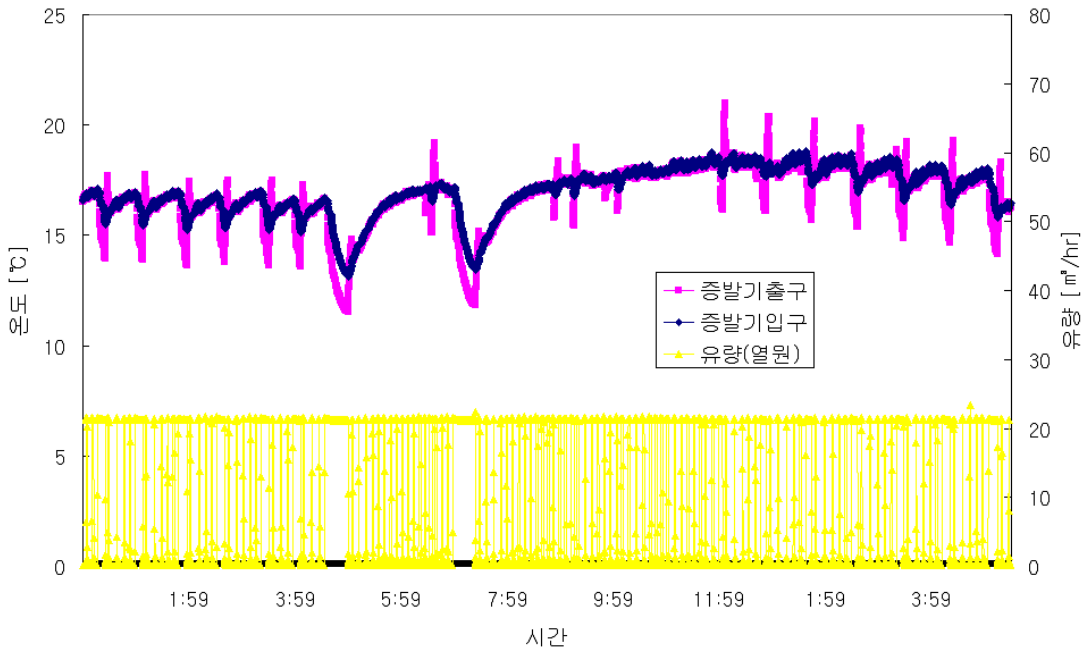


Fig. 48 Temperature variations at evaporator (Mar. 22nd, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

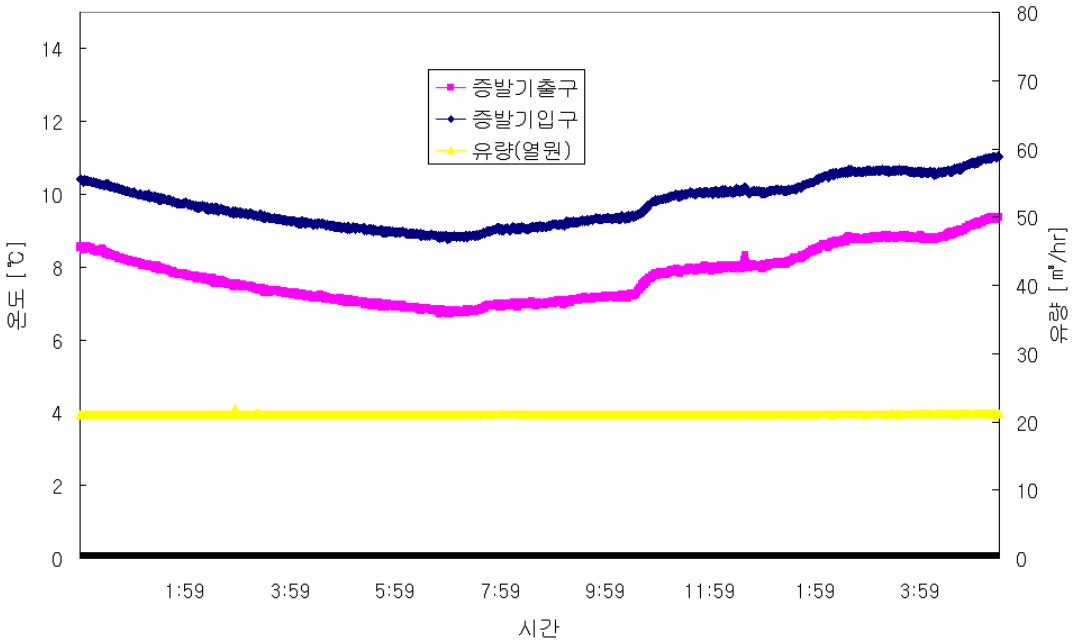


Fig. 49 Temperature variations at evaporator (Mar. 23rd, 2009)

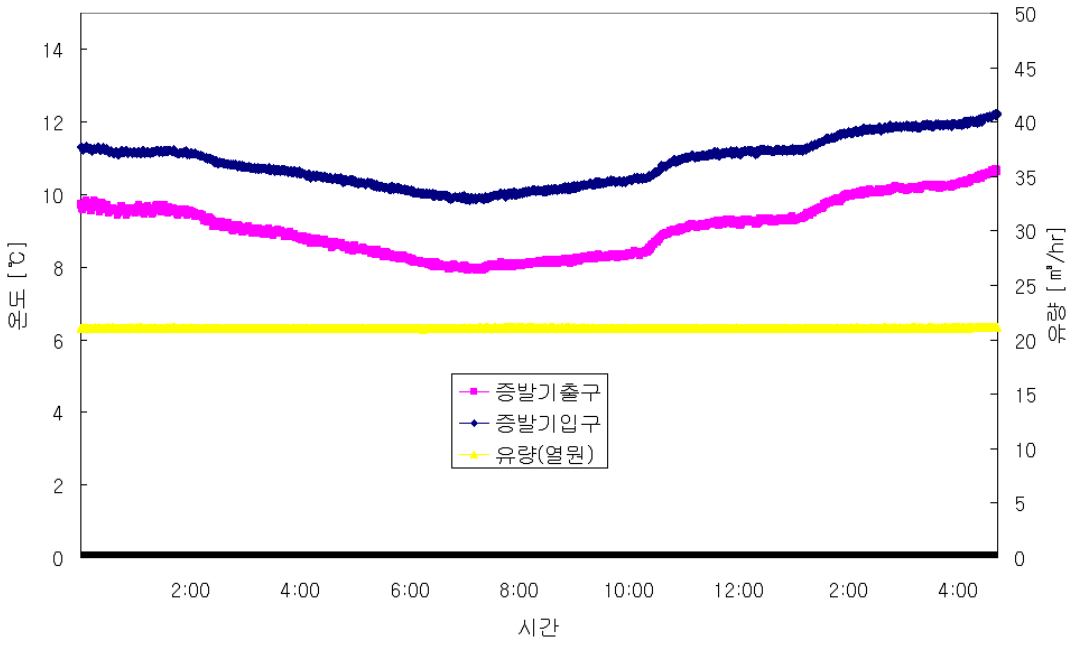


Fig. 50 Temperature variations at evaporator (Mar. 24th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

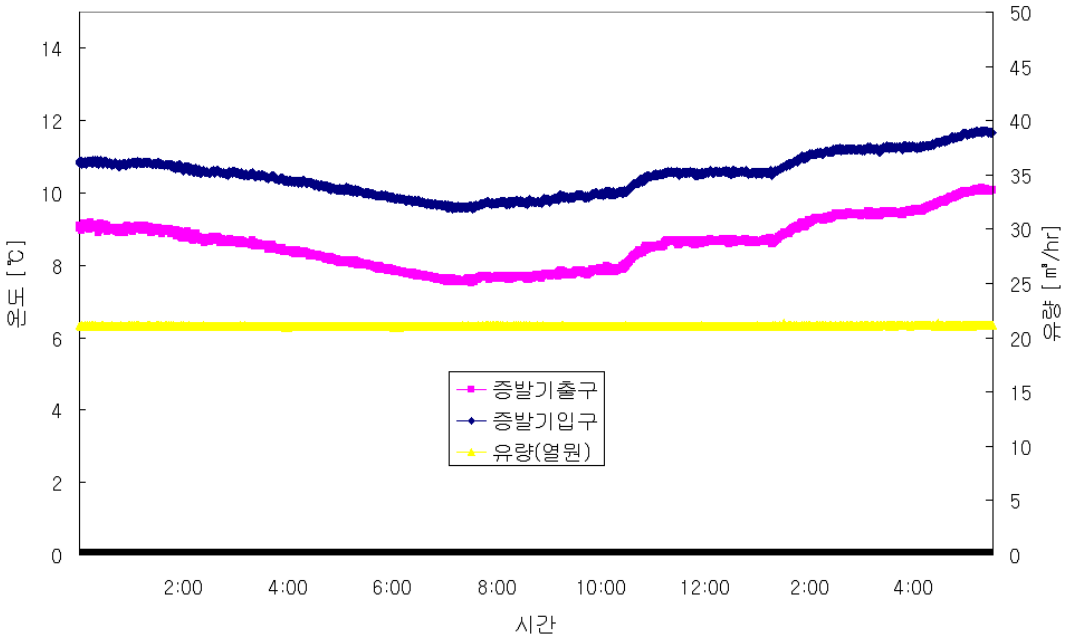


Fig. 51 Temperature variations at evaporator (Mar. 25th, 2009)

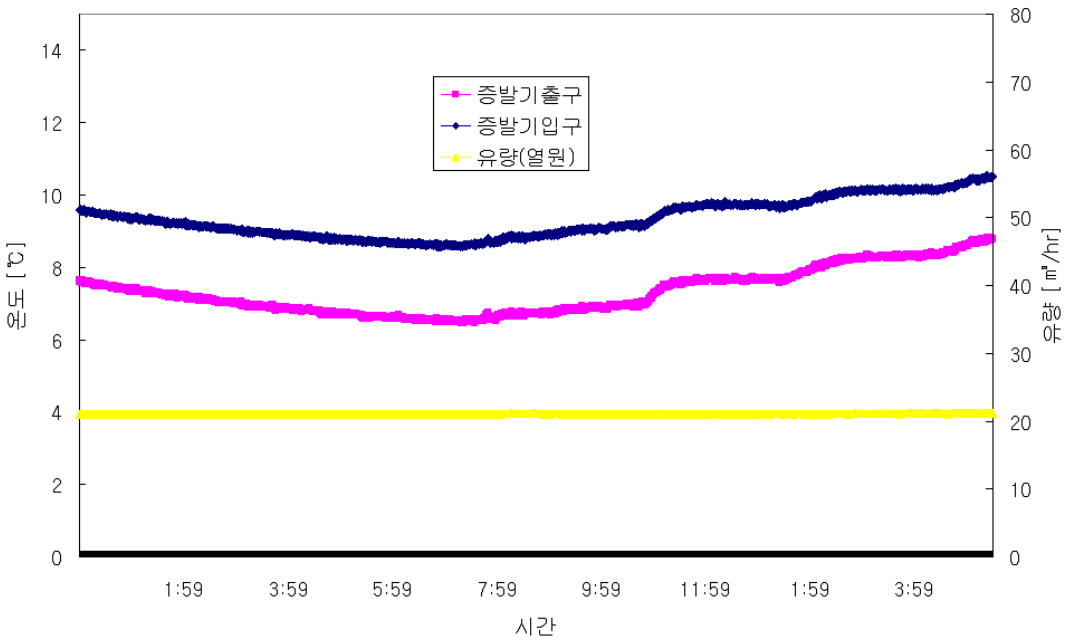


Fig. 52 Temperature variations at evaporator (Mar. 26th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

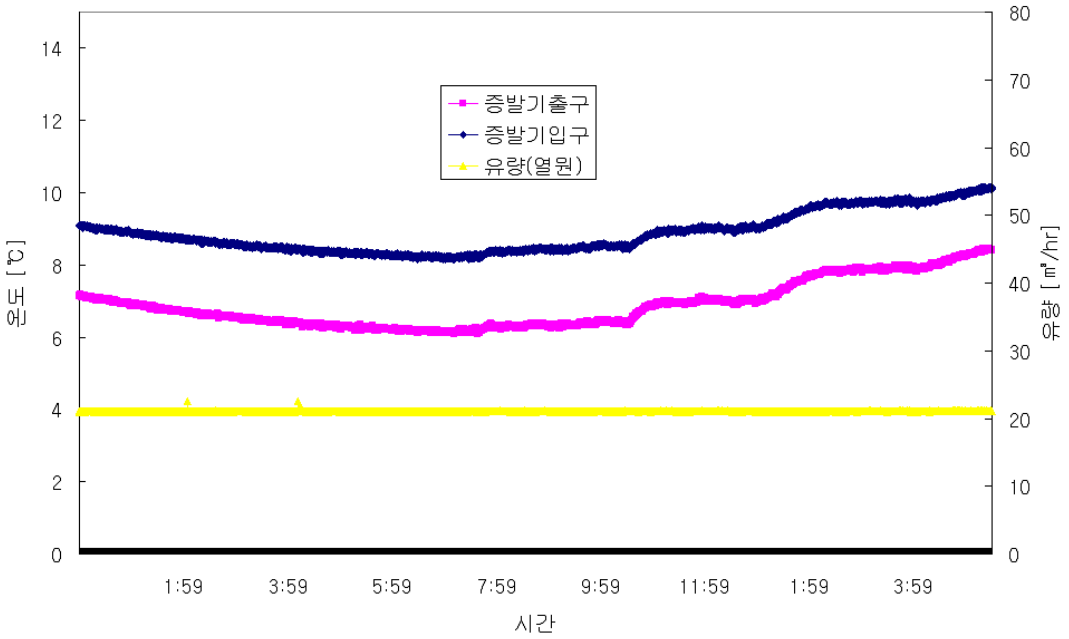


Fig. 53 Temperature variations at evaporator (Mar. 27th, 2009)

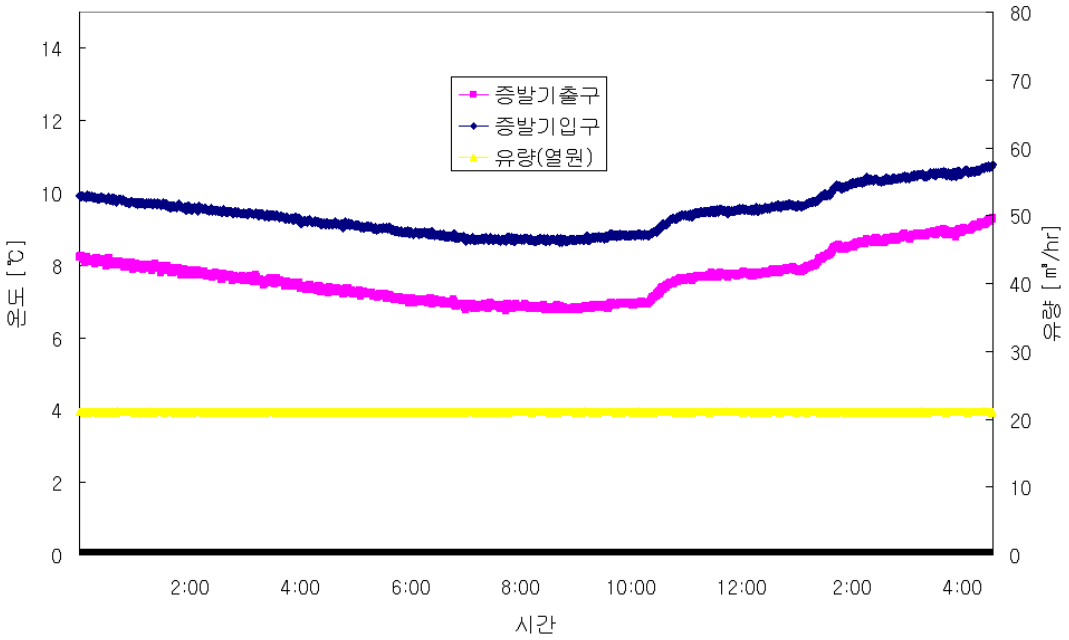


Fig. 54 Temperature variations at evaporator (Mar. 28th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

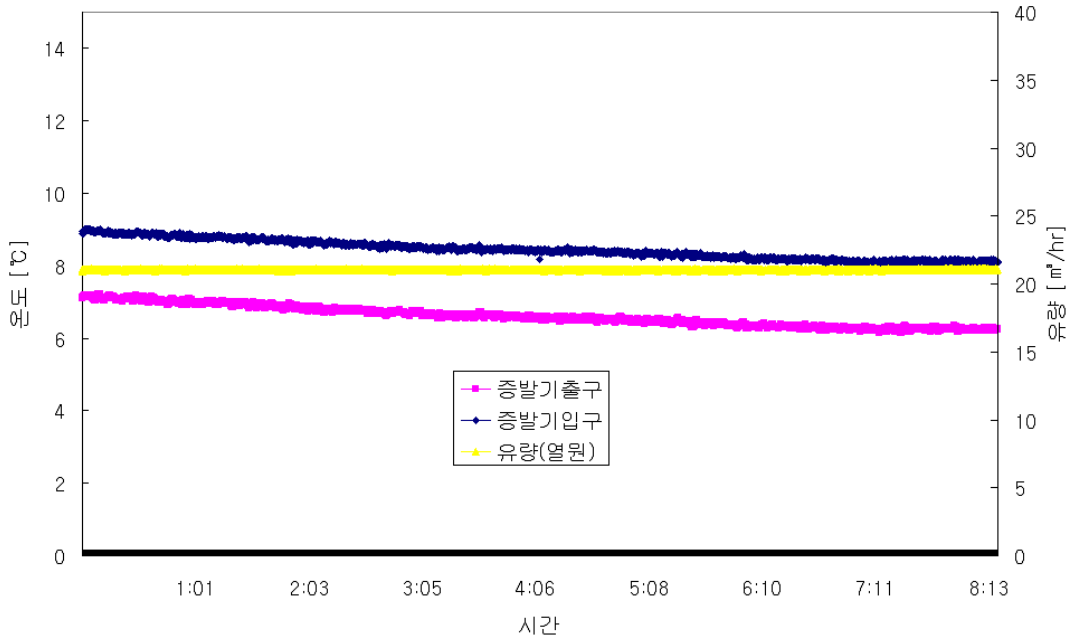


Fig. 55 Temperature variations at evaporator (Mar. 29th, 2009)

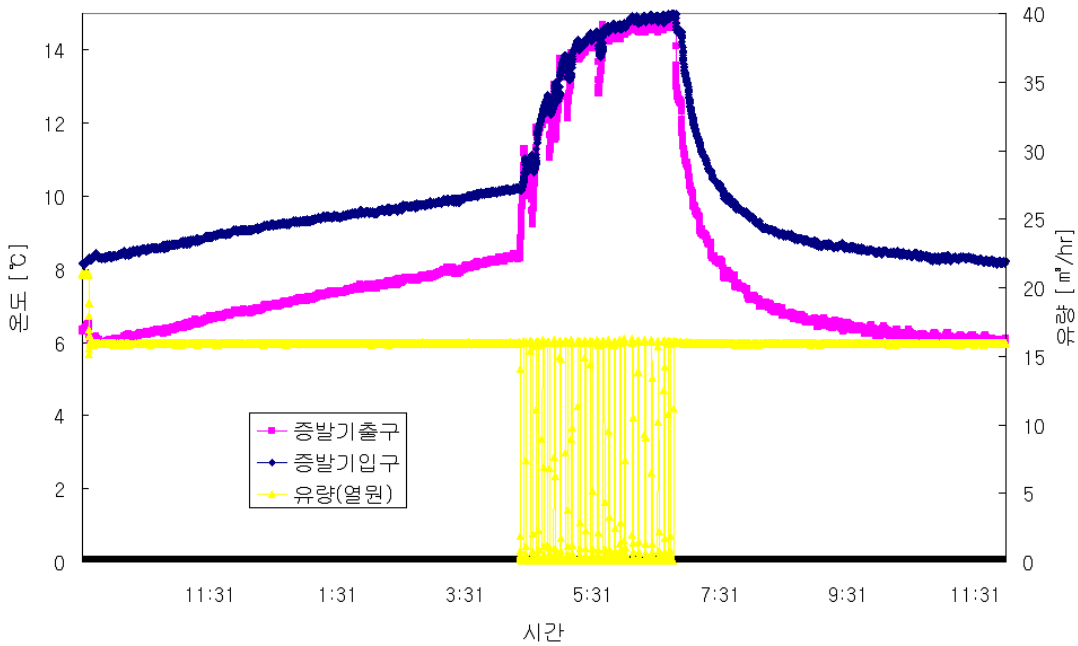


Fig. 56 Temperature variations at evaporator (Apr. 6th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

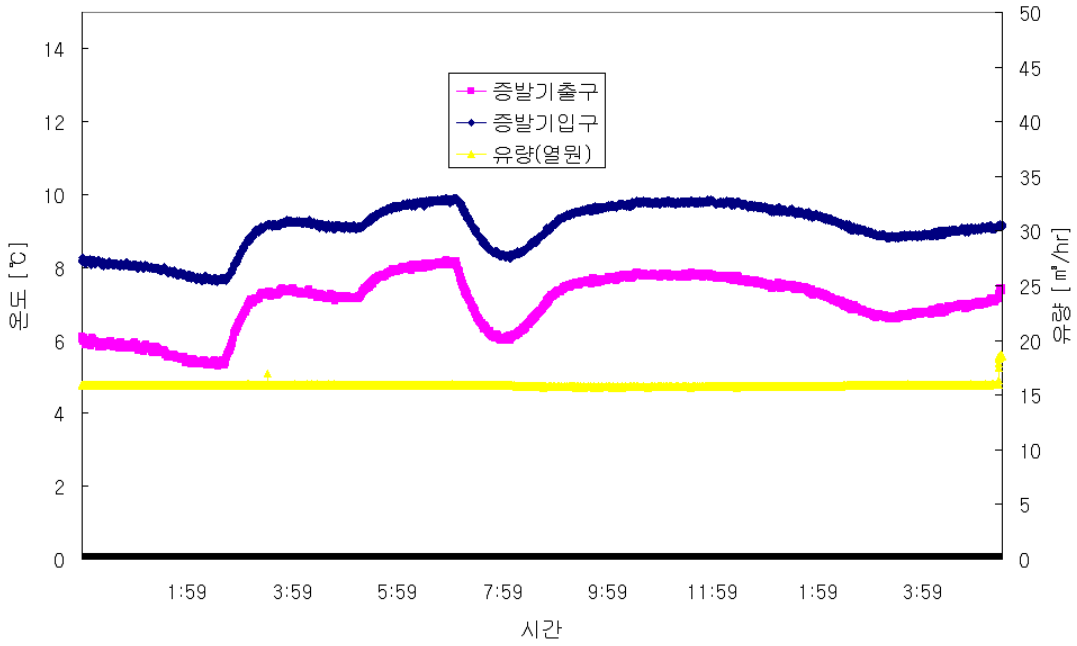


Fig. 57 Temperature variations at evaporator (Apr. 7th, 2009)

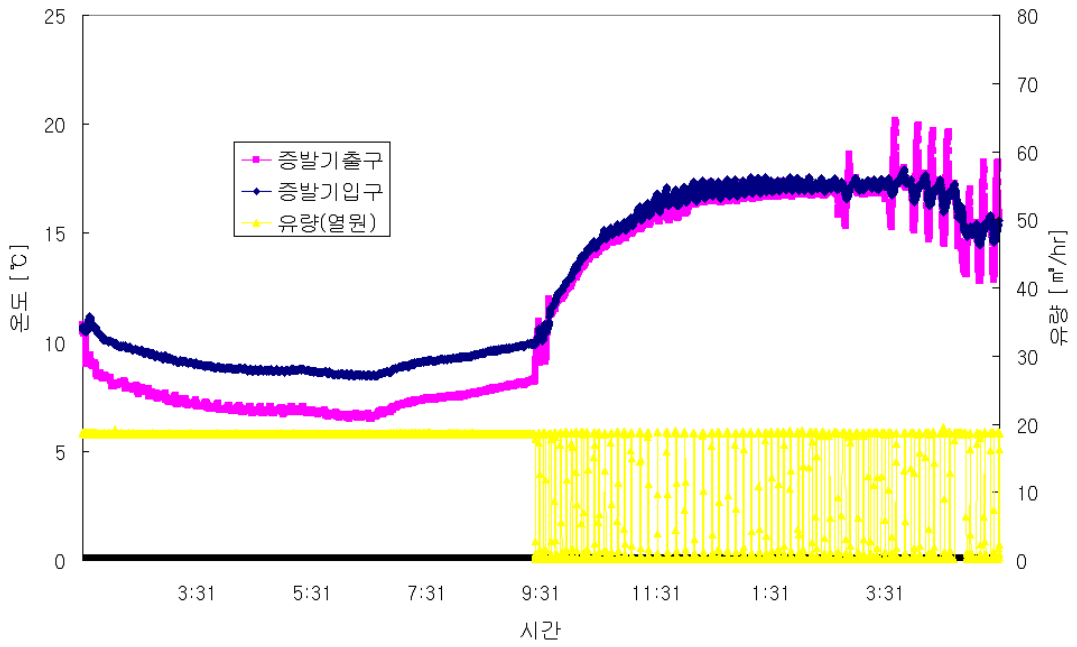


Fig. 58 Temperature variations at evaporator (Apr. 8th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

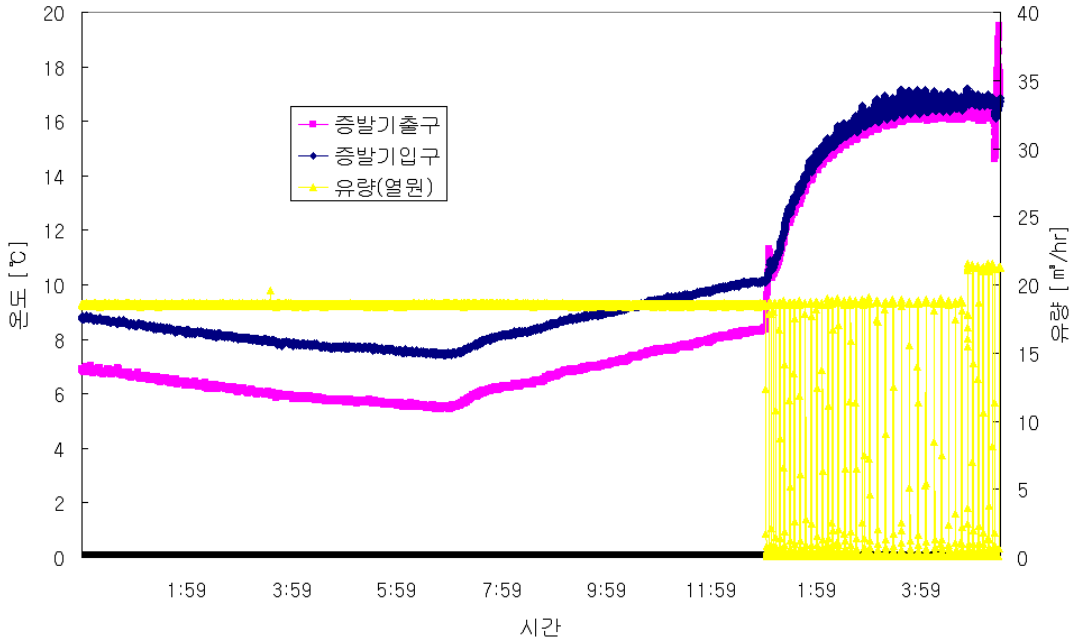


Fig. 59 Temperature variations at evaporator (Apr. 9th, 2009)

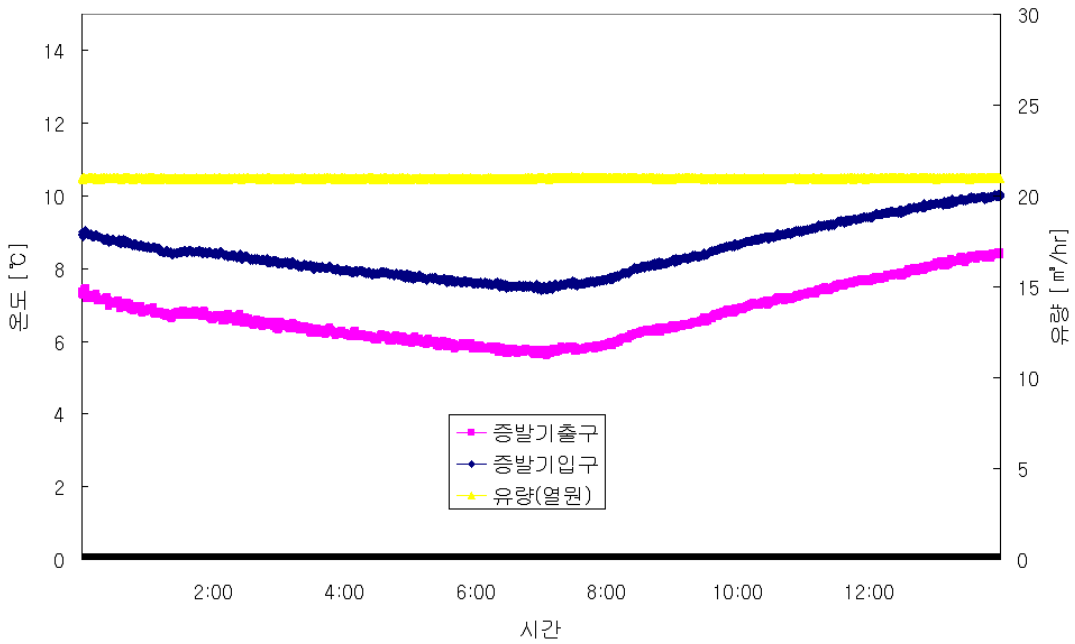


Fig. 60 Temperature variations at evaporator (Apr. 10th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

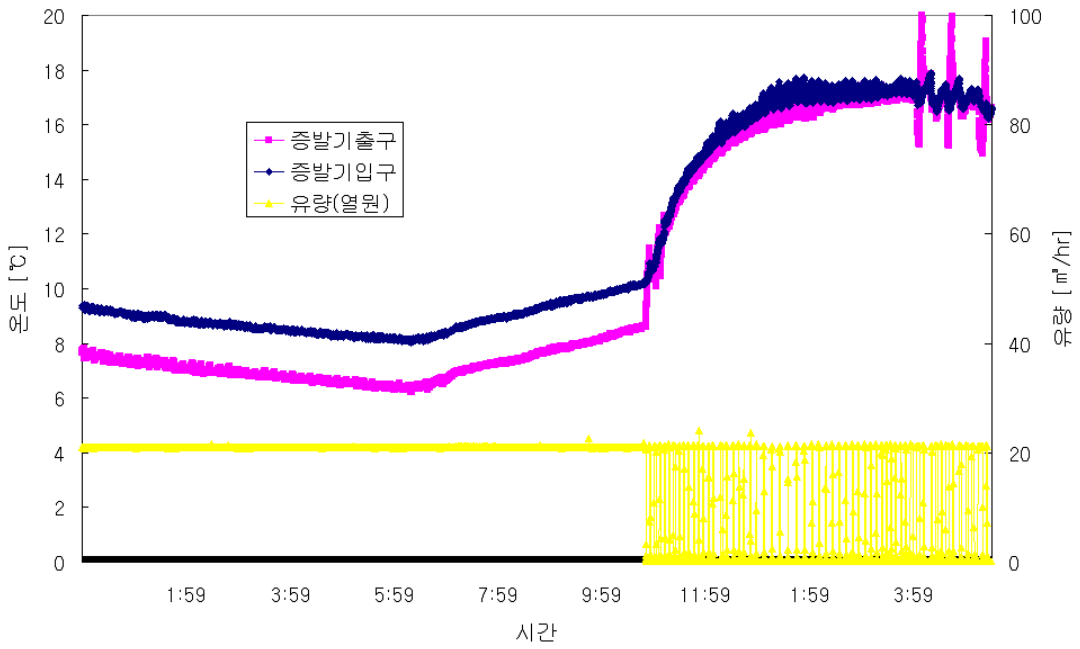


Fig. 61 Temperature variations at evaporator (Apr. 11th, 2009)

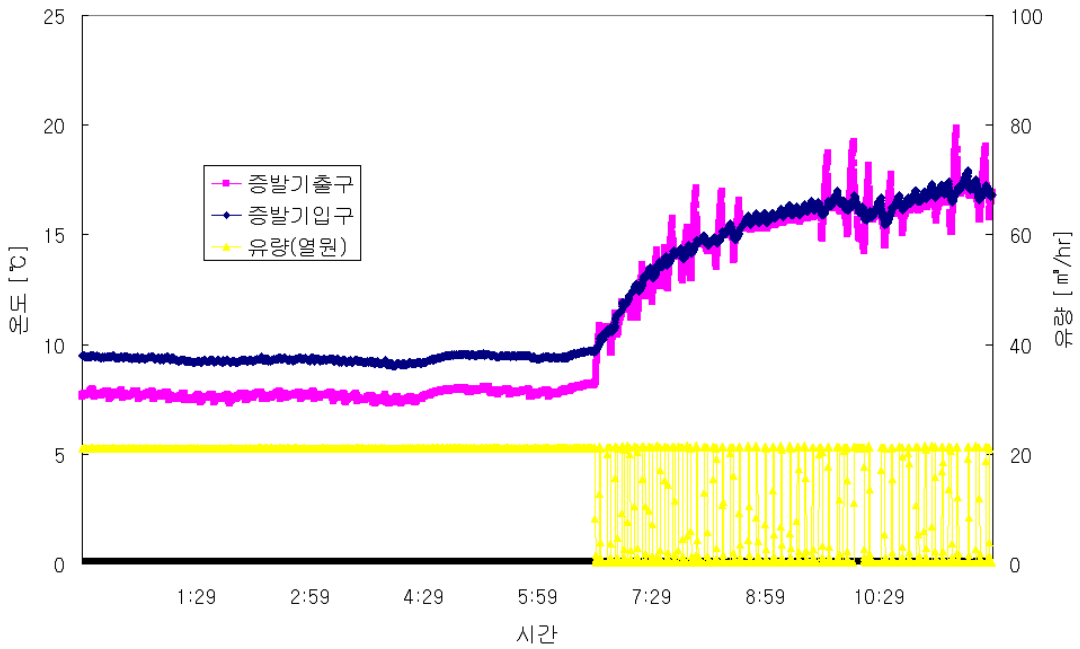


Fig. 62 Temperature variations at evaporator (Apr. 12th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

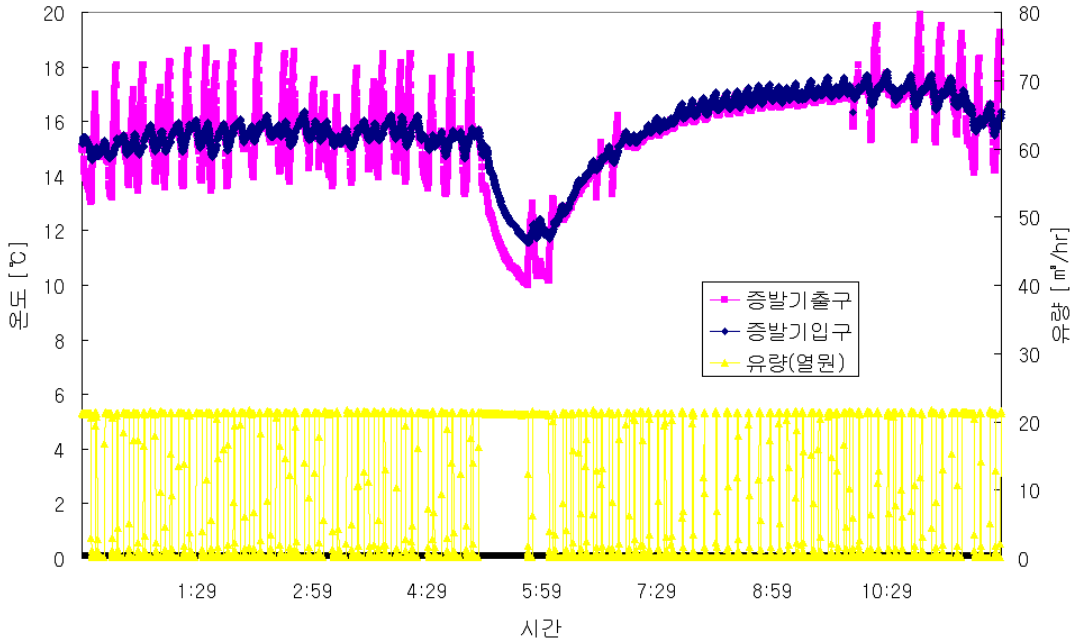


Fig. 63 Temperature variations at evaporator (Apr. 13th, 2009)

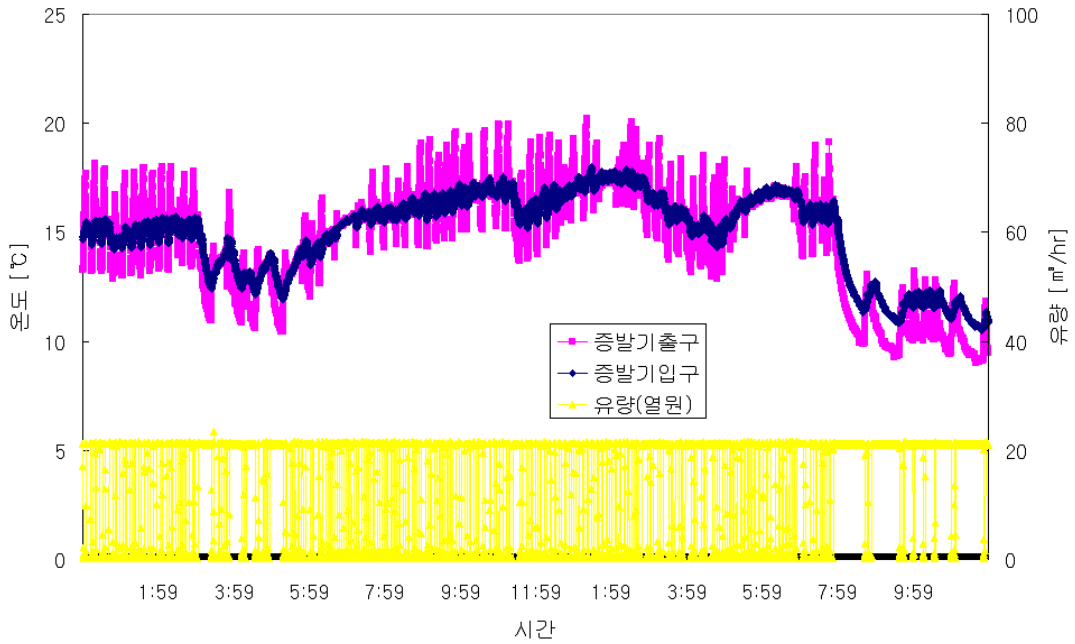


Fig. 64 Temperature variations at evaporator (Apr. 14th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

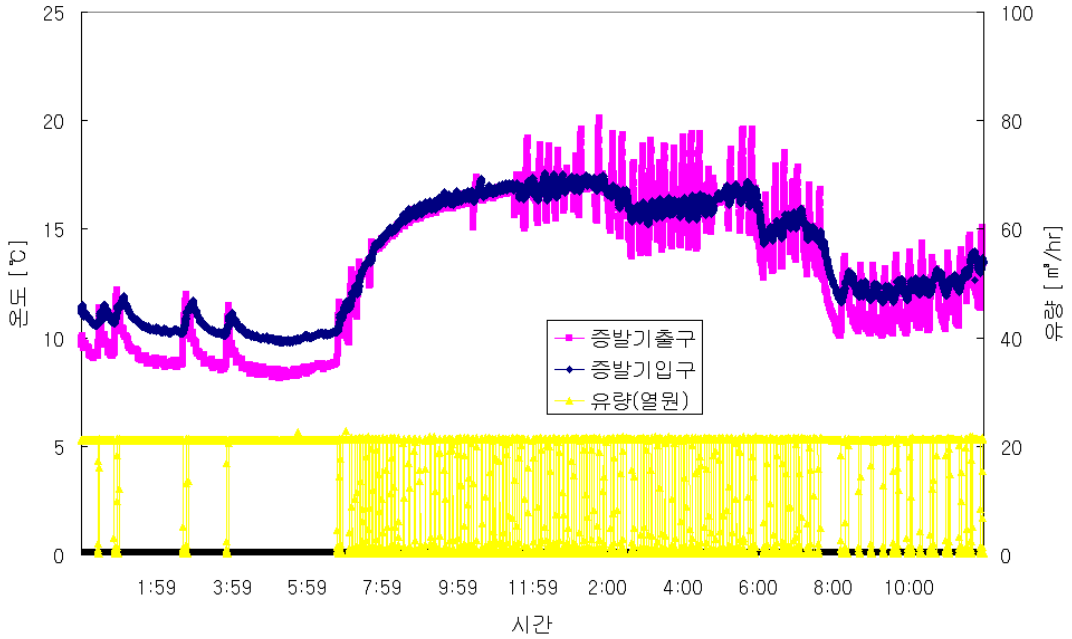


Fig. 65 Temperature variations at evaporator (Apr. 15th, 2009)

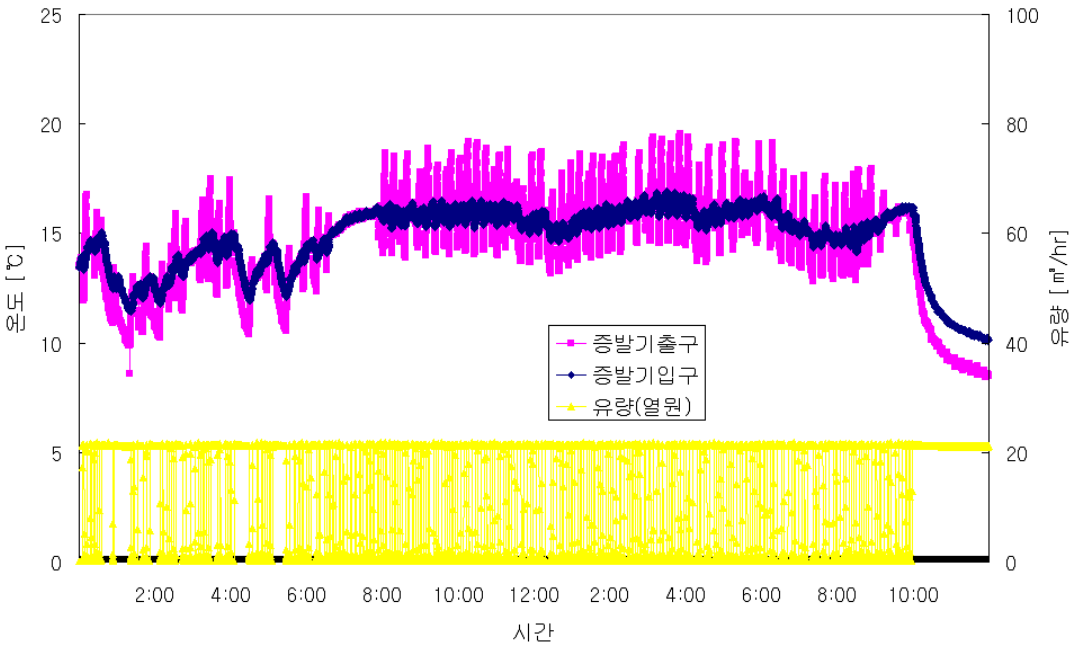


Fig. 66 Temperature variations at evaporator (Apr. 16th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

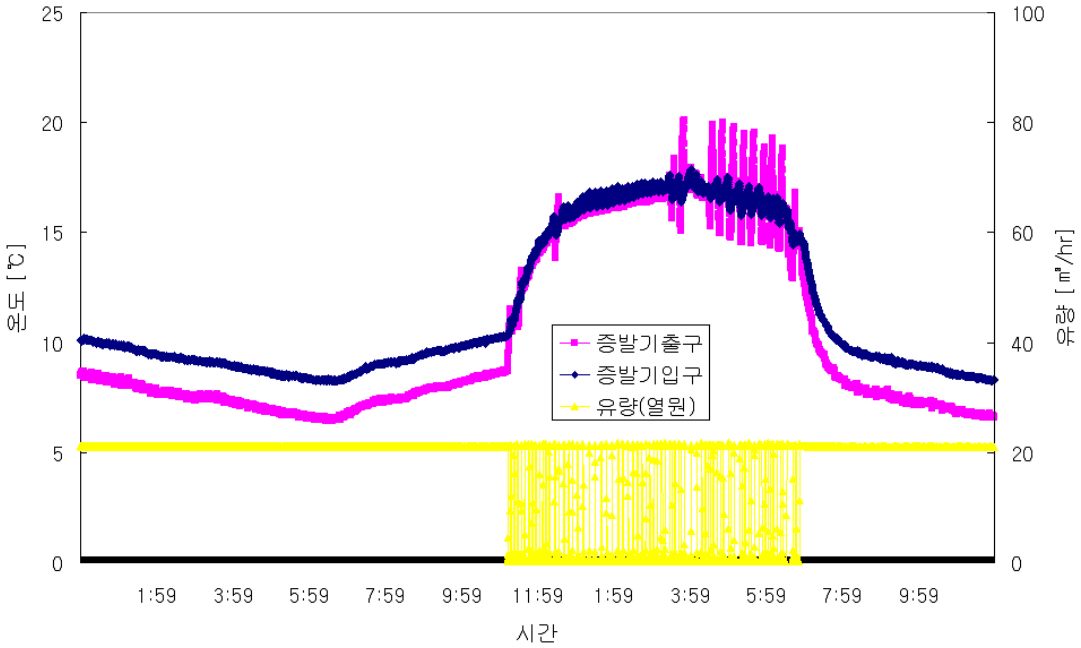


Fig. 67 Temperature variations at evaporator (Apr. 17th, 2009)

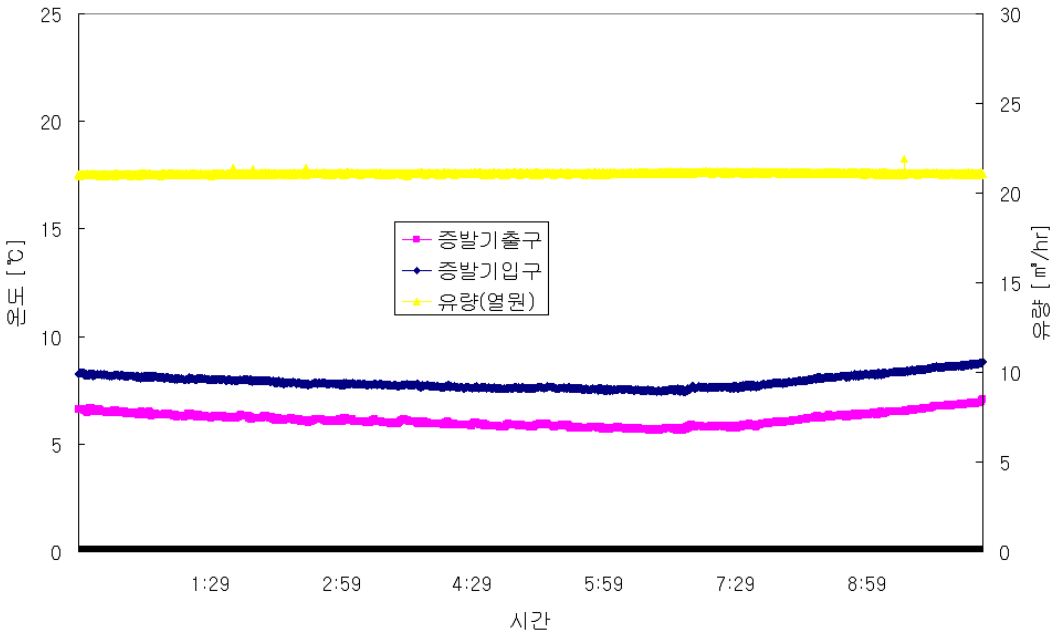


Fig. 68 Temperature variations at evaporator (Apr. 18th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2.5 히트펌프 부하측 열 공급량

히트펌프시스템의 응축기에서는 축열조로 열을 공급하기 위한 열교환기가 설치되었으며, 축열조 온도(설정온도 40~50℃)에 따라 히트펌프시스템이 가동되도록 설계하였다. 히트펌프시스템의 부하측 열공급량을 평가하기 위하여 응축기 입출구 온도 및 부하측 작동유량을 측정하였으며, 측정시간은 히트펌프가 가동되었을 때를 기준으로 한 시간단위로 평균하여 분석하였다. 히트펌프 부하측 열 공급량은 식(2)에 의해 구하였다.

$$\dot{Q_l} = \dot{m_w} \times C_p \times (T_{c-out} - T_{c-in}) \quad (2)$$

여기서 $\dot{Q_l}$ = 부하측 열 공급량 (kW)

$\dot{m_w}$ = 물의 질량 유량 (m^3/h)

T_{c-in}, T_{c-out} = 응축기 입구, 출구온도 (℃)

대표적으로 <Table 13>에는 2009년 3월 26일에 히트펌프시스템이 가동되었을 때의 히트펌프 응축기 입출구 온도분포 및 작동유량 데이터를 보여주고 있다. 응축기 온도가 가장 낮은 시간은 해가 뜨기 바로 전인 오전 07:00~08:00사이로 응축기 입구온도는 21.7℃, 출구온도는 27.4℃로 입출구 온도차가 약 5.7℃로 나타났다. 이때의 작동 유량은 10.0m^3/h를 보였으며, 일일 평균 열회수량은 65.5kW이다.

<Table 14>는 실험기간 동안의 부하측 유량배관 변경전의 지중공기 열원 히트펌프시스템의 부하측 일별 열공급량을 보여주고 있으며, <Table 15>는 유량배관 변경이 완료된 후에 지중공기 열원 히트펌프시스템의 부하측 일별 열공급량을 보여주고 있다. 부하측 유량은 배관 변경 전에 평균 9.6m^3/h이었으며, 배관 변경 후 19.5m^3/h로 약 두 배 정도 증가시켰다. 배관 변경 전의 응축기 입출구 온도차는 약 5.9℃로 변경 후의 응축기 입출구 온도차(3℃)보다 약 1/2배가량 줄어들었으나 열 공급량은 65.1kW에서 67.7kW로 약 2.6kW 높게 나타났다. Figs. 69

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

~81에는 배관 변경 전 그리고 Figs. 82~94에는 배관 변경 후 히트펌프시스템 부하측 일별 응축기 입출구 온도 및 유량 분포도를 그래프로 보여주고 있다. 실험기간 동안의 응축기 출구 평균온도는 전체 약 40.1℃, 입구 평균온도는 35.7℃로 입출구 온도차는 약 1.9℃로 나타났으며, 작동 유량은 평균 14.6m^3/h, 평균 열공급량은 66.4kW로 나타났다.

<Table 13> The hourly parts temperature and heat supply quantity (Mar. 26th, 2009)

Time	Condenser outlet temperature [℃]	Condenser inlet temperature [℃]	Flow rate [m^3/h]	Heat suppply quantity [kW]
00:00~01:00	27.7	33.5	9.9	66.4
01:00~02:00	26.3	32.1	9.9	65.7
02:00~03:00	25.1	30.9	9.9	65.7
03:00~04:00	24.1	29.9	9.9	65.9
04:00~05:00	23.2	29.0	9.9	65.8
05:00~06:00	22.5	28.2	9.9	65.8
06:00~07:00	21.8	27.5	9.9	65.6
07:00~08:00	21.7	27.4	10.0	65.6
08:00~09:00	22.6	28.3	9.9	65.8
09:00~10:00	22.6	28.3	9.9	65.3
10:00~11:00	23.3	29.0	9.9	64.7
11:00~12:00	28.3	34.1	9.9	65.1
12:00~13:00	28.6	34.3	9.9	65.0
13:00~14:00	29.5	35.3	9.8	65.3
14:00~15:00	33.2	39.0	9.8	65.3
15:00~16:00	34.0	39.8	9.8	65.6
16:00~17:00	35.0	40.8	9.8	65.4
Average	**26.4**	**32.2**	**9.9**	**65.5**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 14> The daily heat supply of heat condenser at heat pump system (Before)

Date	Condenser outlet temperature [℃]	Condenser nlet temperature [℃]	Flow rate [m^3/h]	Heat supply quantity [kW]
Mar. 17th	37.8	44.8	8.3	66.5
Mar. 21st	39.8	45.6	9.5	64.1
Mar. 23rd	30.4	36.1	9.8	65.0
Mar. 24th	36.9	42.6	9.8	65.0
Mar. 25th	33.5	39.1	9.9	64.5
Mar. 26th	26.4	32.2	9.9	65.5
Mar. 27th	25.5	31.3	9.9	66.8
Mar. 28th	36.1	41.7	9.8	63.8
Mar. 29th	32.6	38.3	9.8	65.0
Average	**33.2**	**39.1**	**9.6**	**65.1**

<Table 15> The daily heat supply of heat condenser at heat pump system (After)

Date	Condenser outlet temperature [℃]	Condenser inlet temperature [℃]	Flow rate [m^3/h]	Heat supply quantity [kW]
Apr. 6th	39.6	42.6	19.3	67.3
Apr. 7th	32.0	34.7	19.4	60.9
Apr. 8th	40.9	44.0	19.5	70.3
Apr. 9th	37.9	40.9	19.5	68.0
Apr. 10th	37.5	40.5	19.5	68.0
Apr. 11th	39.7	42.8	19.5	70.3
Apr. 12th	42.1	45.1	19.2	67.0
Apr. 17th	39.8	42.8	19.7	68.7
Apr. 18th	33.8	36.8	19.7	68.7
Average	**38.1**	**41.1**	**19.5**	**67.7**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

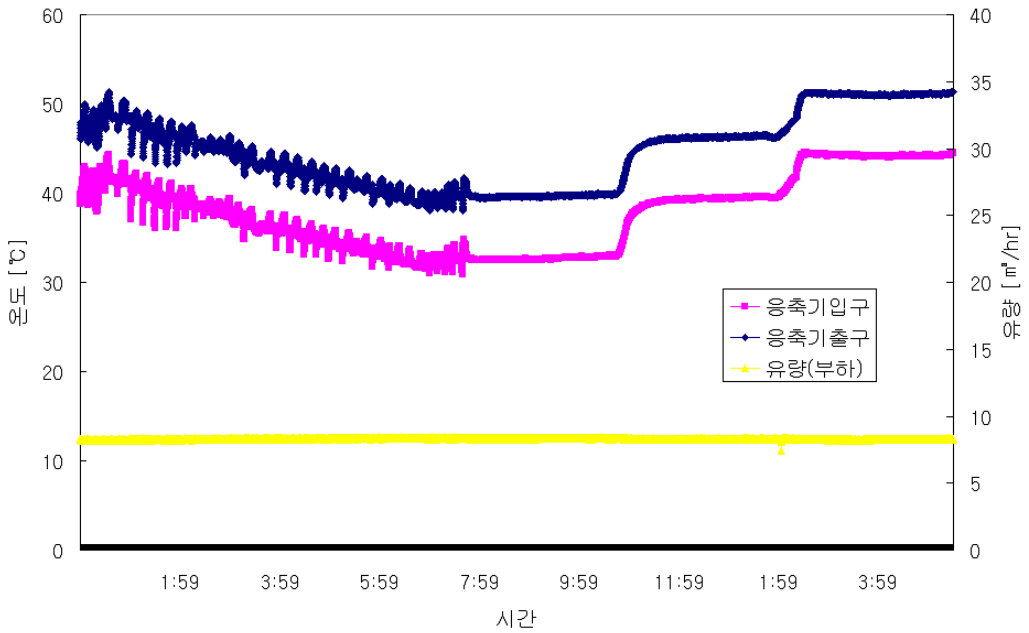


Fig. 69 Temperature variations at condenser (Mar. 17th, 2009)

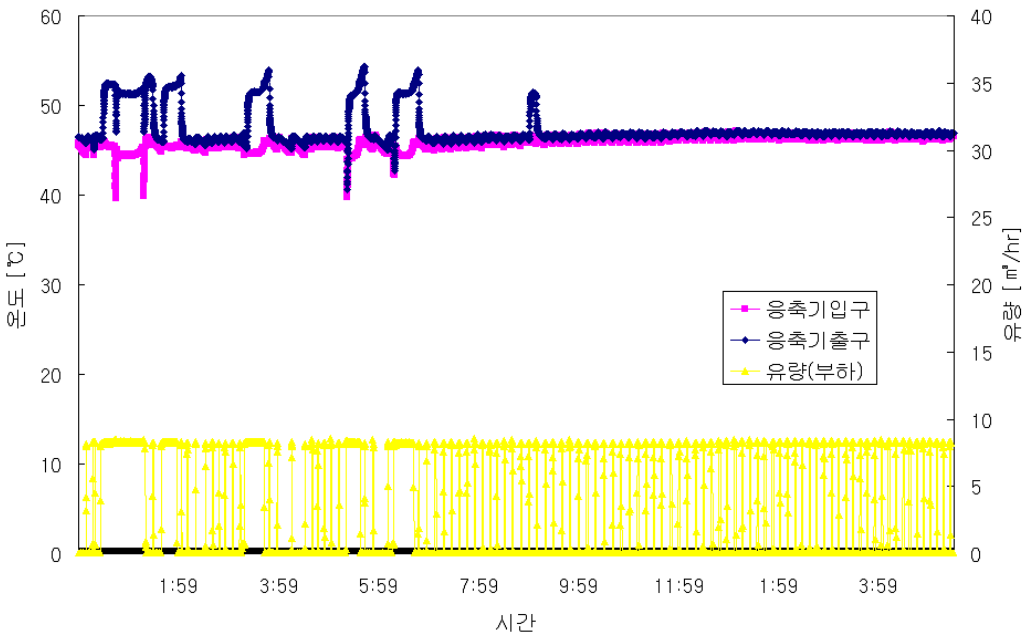


Fig. 70 Temperature variations at condenser (Mar. 18th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

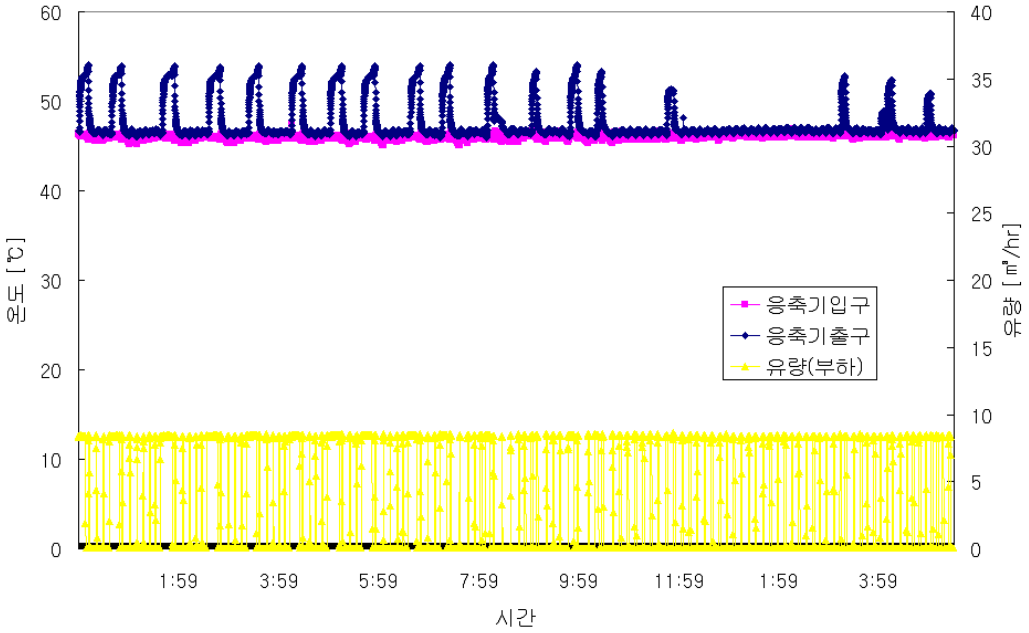


Fig. 71 Temperature variations at condenser (Mar. 19th, 2009)

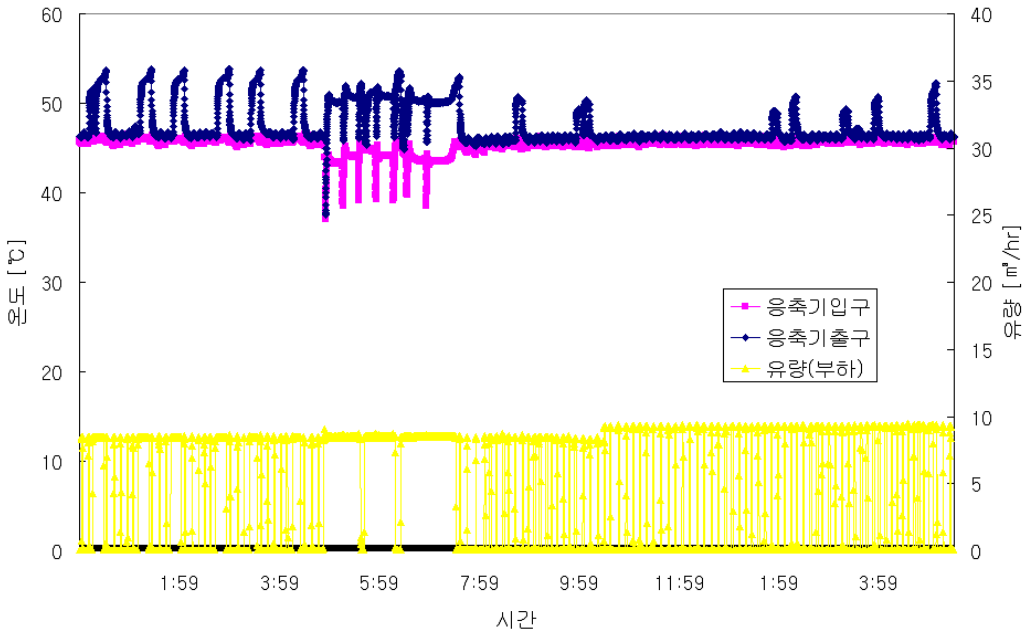


Fig. 72 Temperature variations at condenser (Mar. 20th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

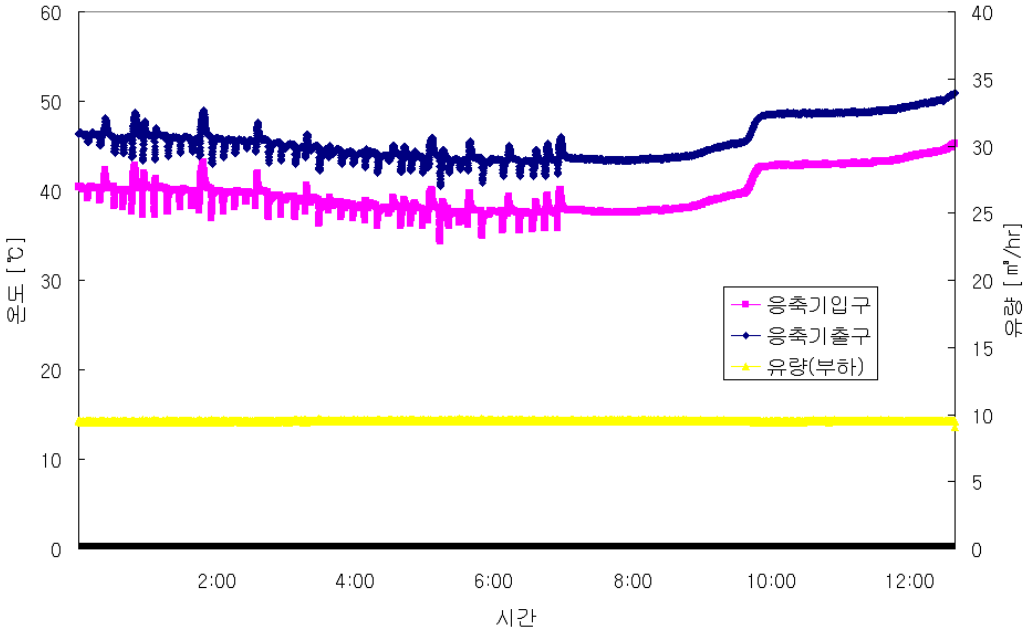


Fig. 73 Temperature variations at condenser (Mar. 21st, 2009)

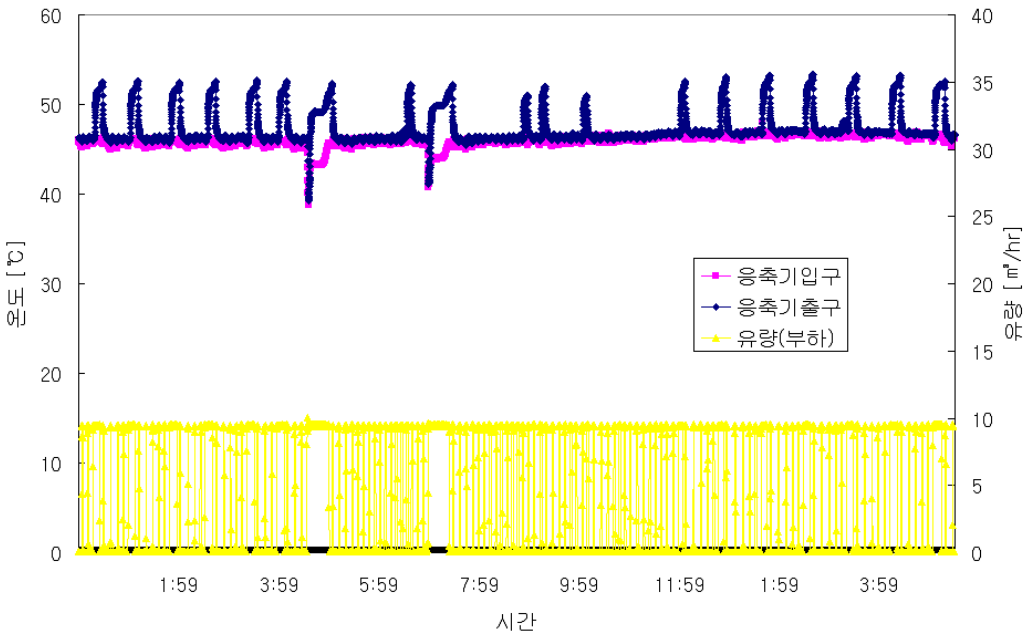


Fig. 74 Temperature variations at condenser (Mar. 22nd, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

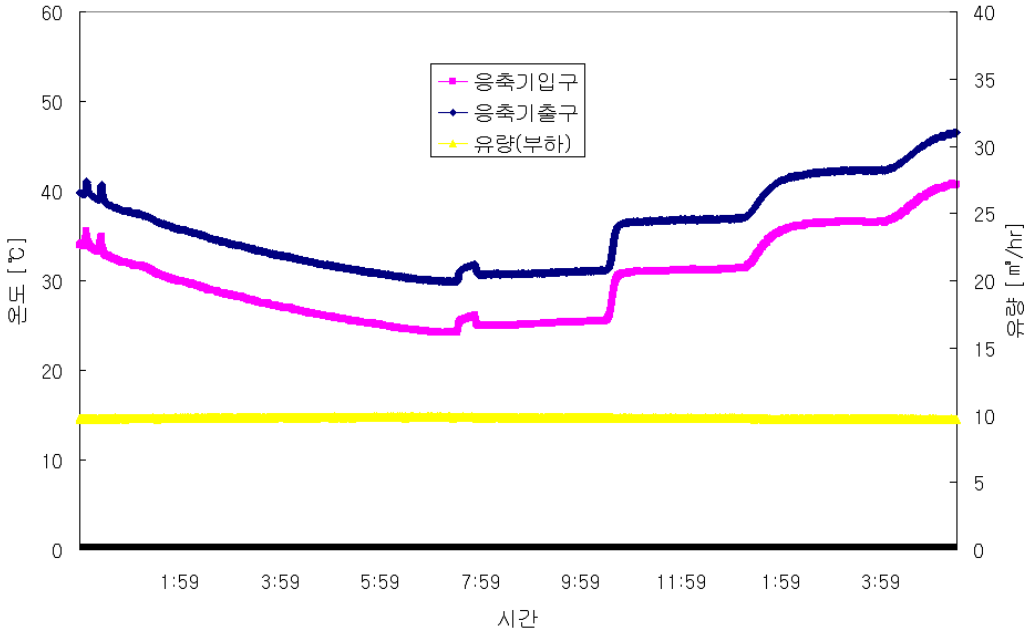


Fig. 75 Temperature variations at condenser (Mar. 23rd, 2009)

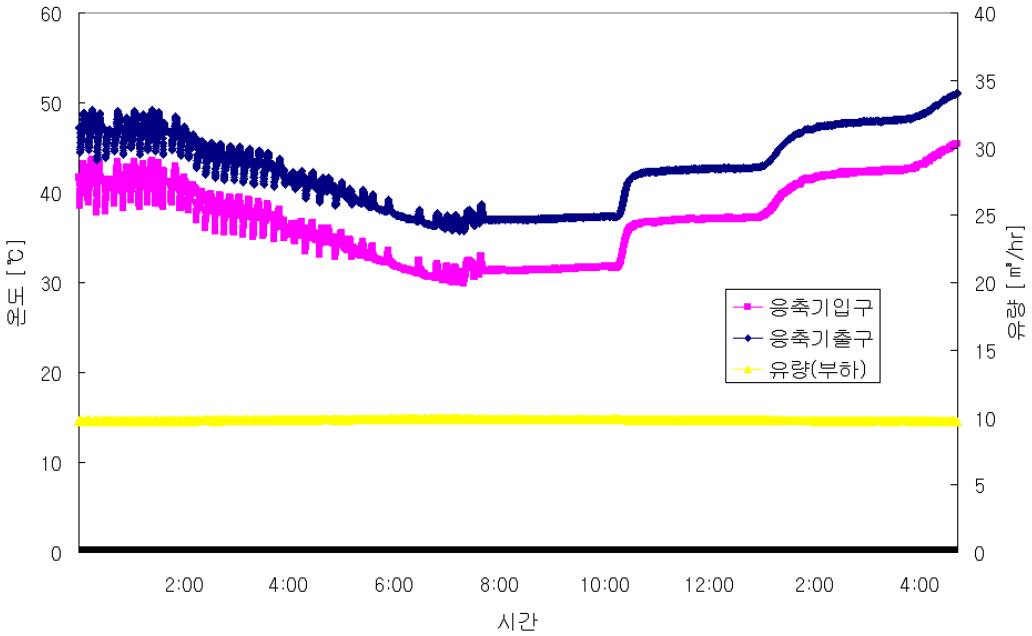


Fig. 76 Temperature variations at condenser (Mar. 24th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

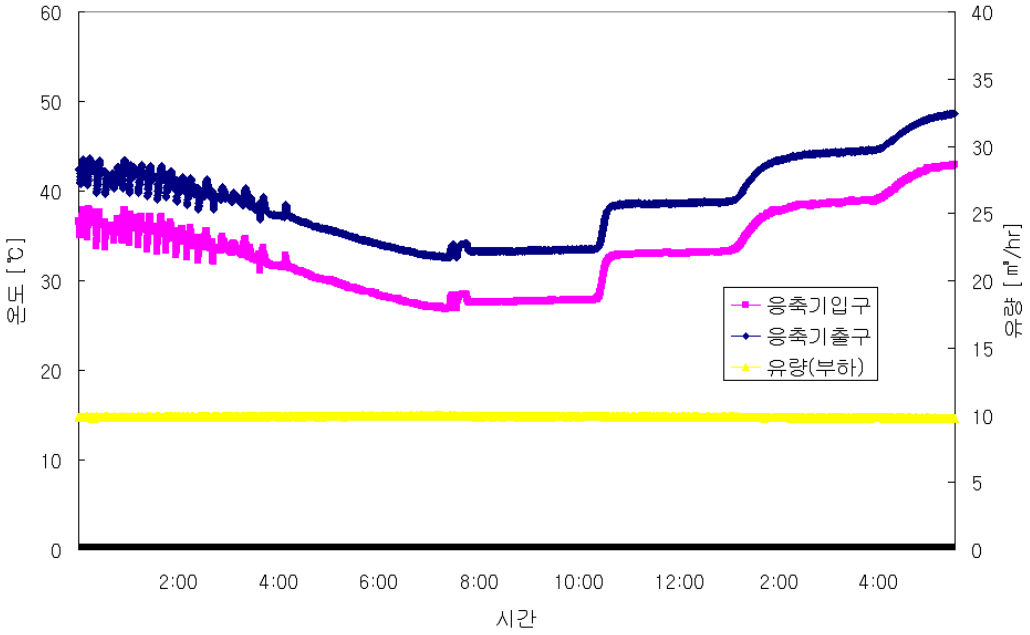


Fig. 77 Temperature variations at condenser (Mar. 25th, 2009)

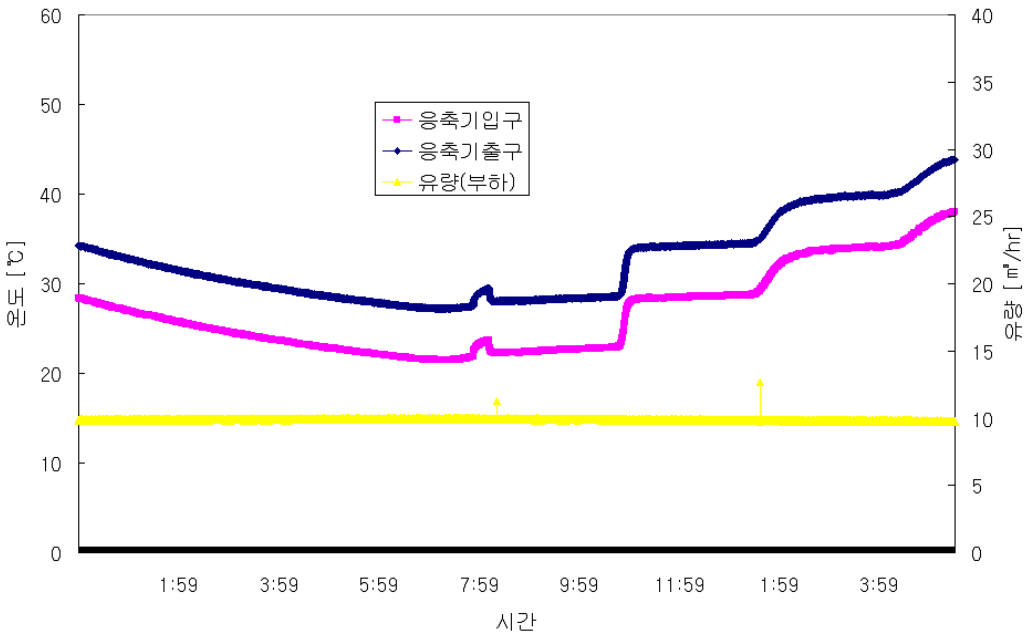


Fig. 78 Temperature variations at condenser (Mar. 26th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

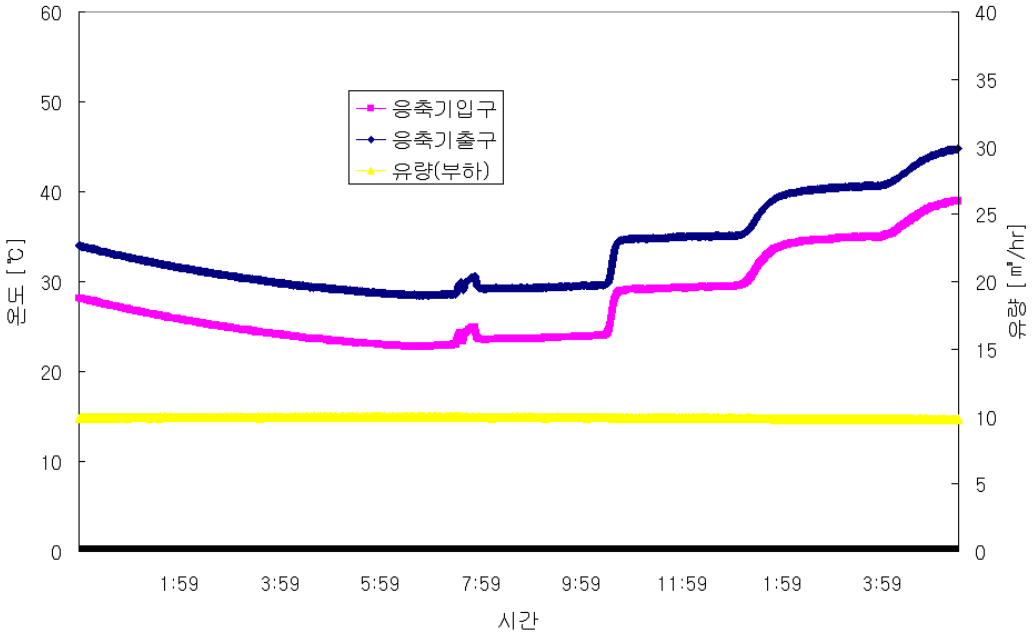


Fig. 79 Temperature variations at condenser (Mar. 27th, 2009)

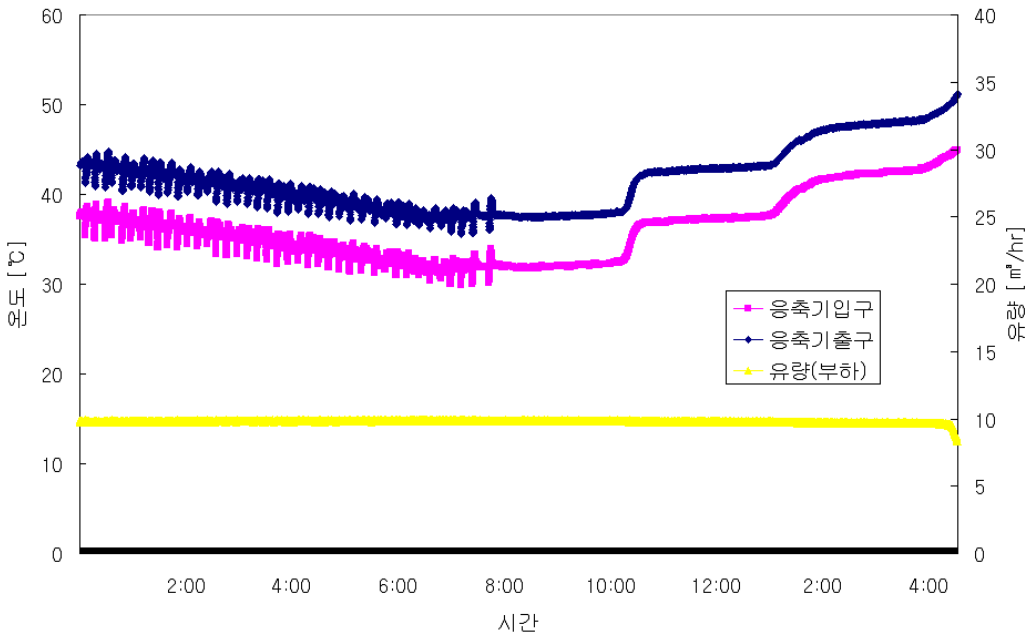


Fig. 80 Temperature variations at condenser (Mar. 28th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

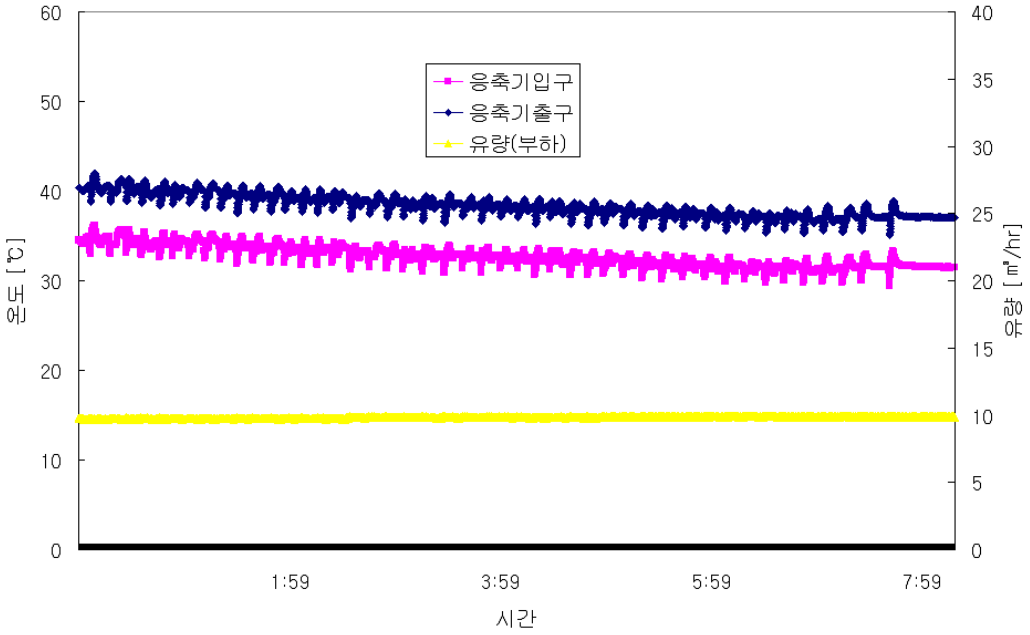


Fig. 81 Temperature variations at condenser (Mar. 29th, 2009)

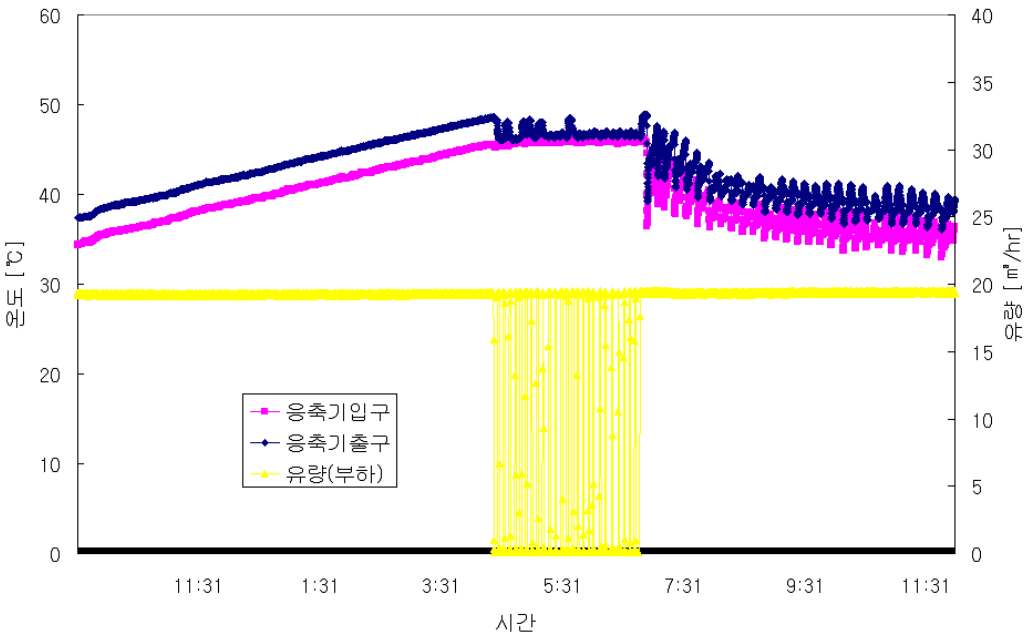


Fig. 82 Temperature variations at condenser (Apr. 6th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

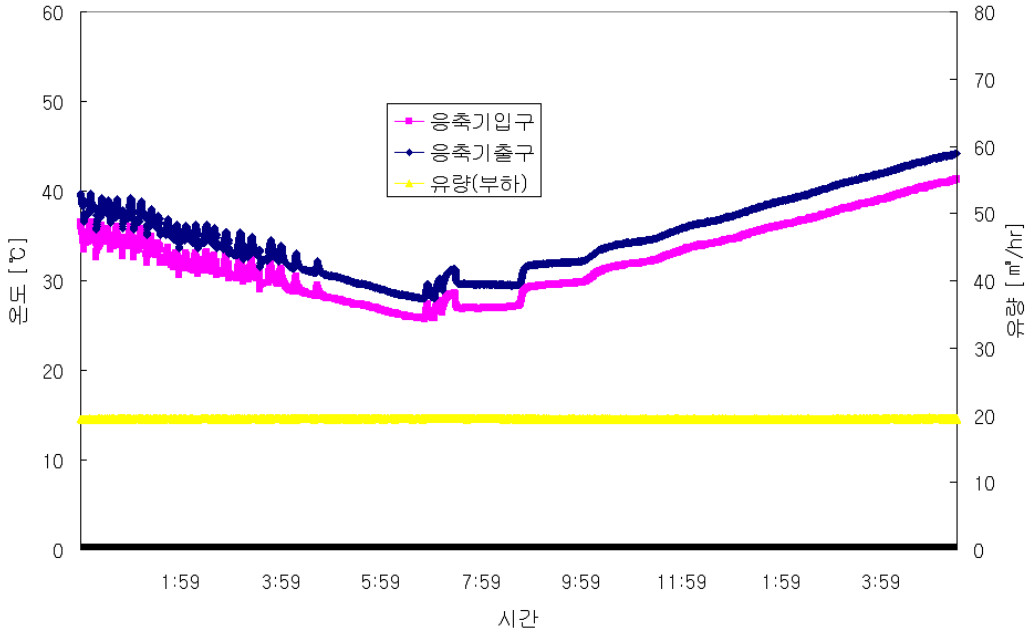


Fig. 83 Temperature variations at condenser (Apr. 7th, 2009)

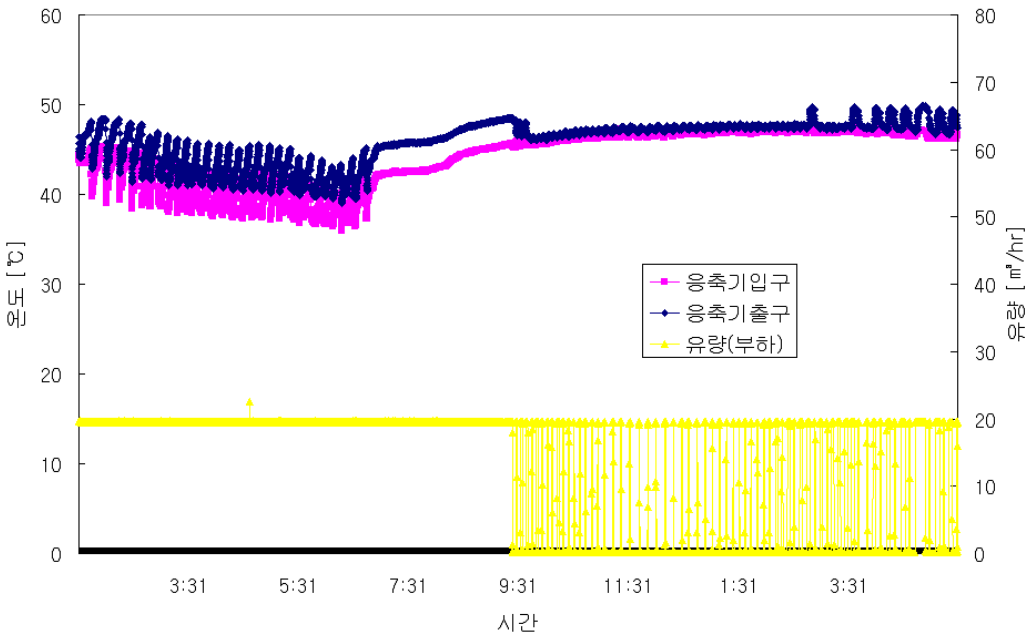


Fig. 84 Temperature variations at condenser (Apr. 8th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

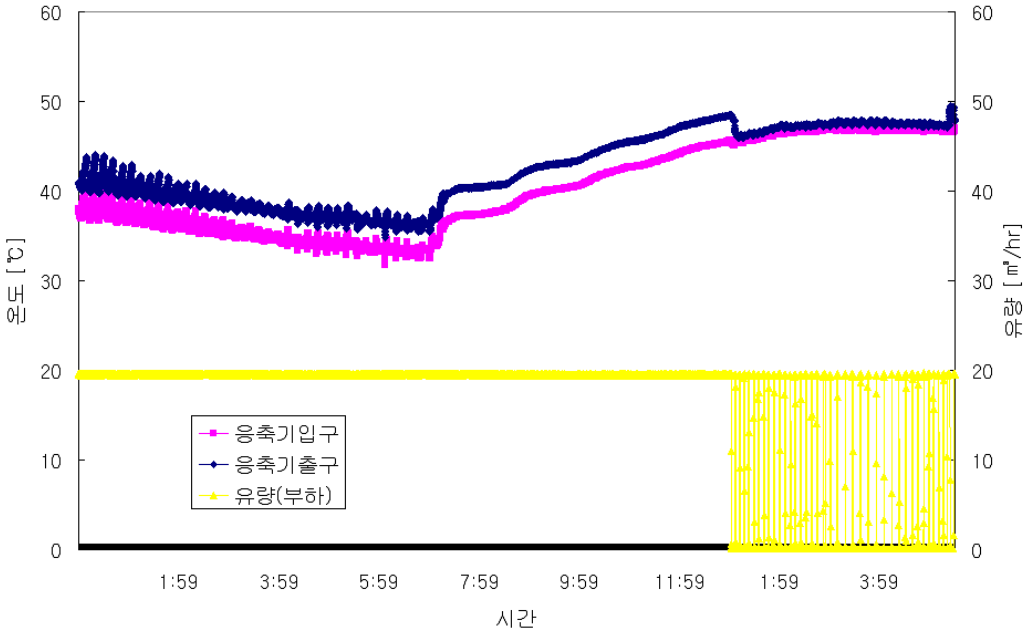


Fig. 85 Temperature variations at condenser (Apr. 9th, 2009)

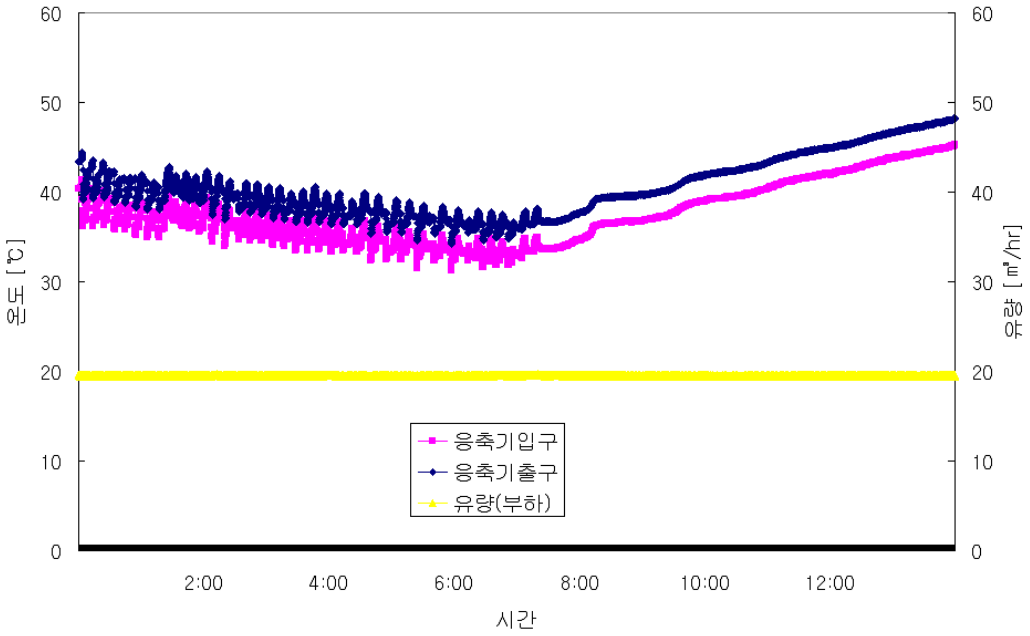


Fig. 86 Temperature variations at condenser (Apr. 10th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

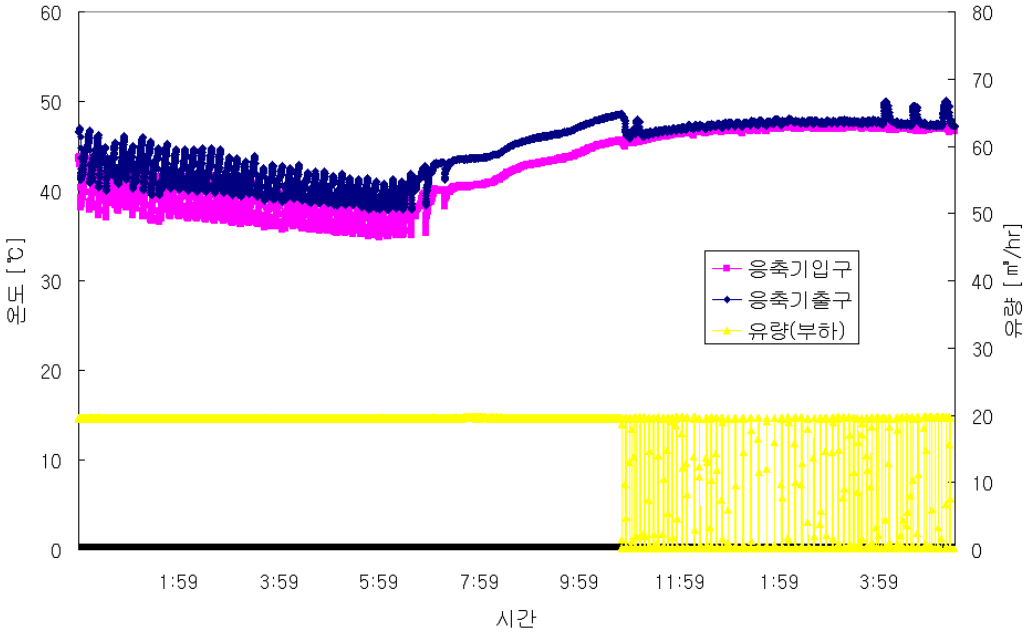


Fig. 87 Temperature variations at condenser (Apr. 11th, 2009)

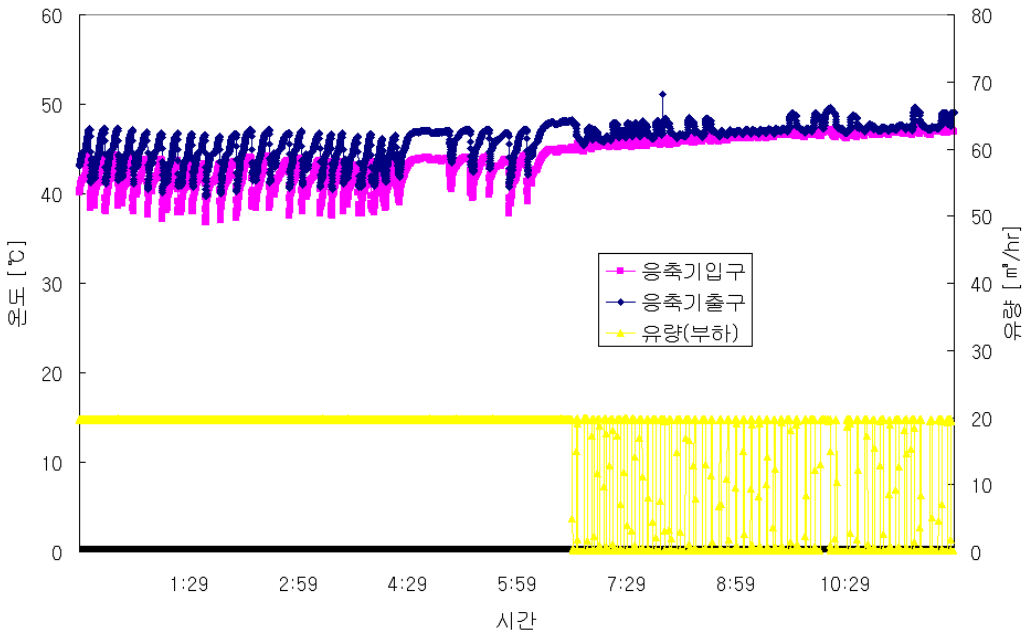


Fig. 88 Temperature variations at condenser (Apr. 12th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

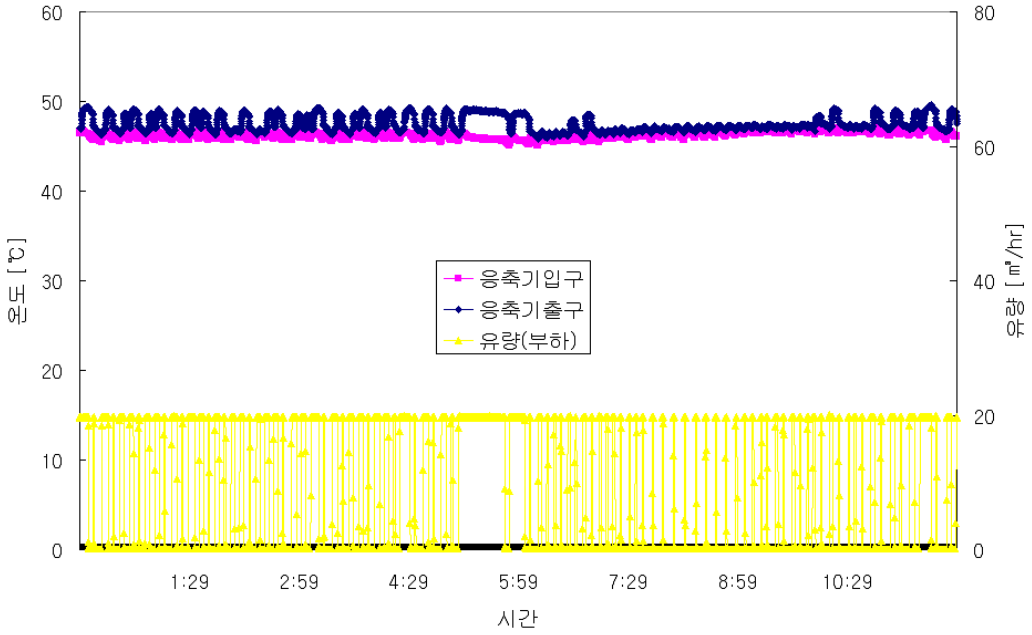


Fig. 89 Temperature variations at condenser (Apr. 13th, 2009)

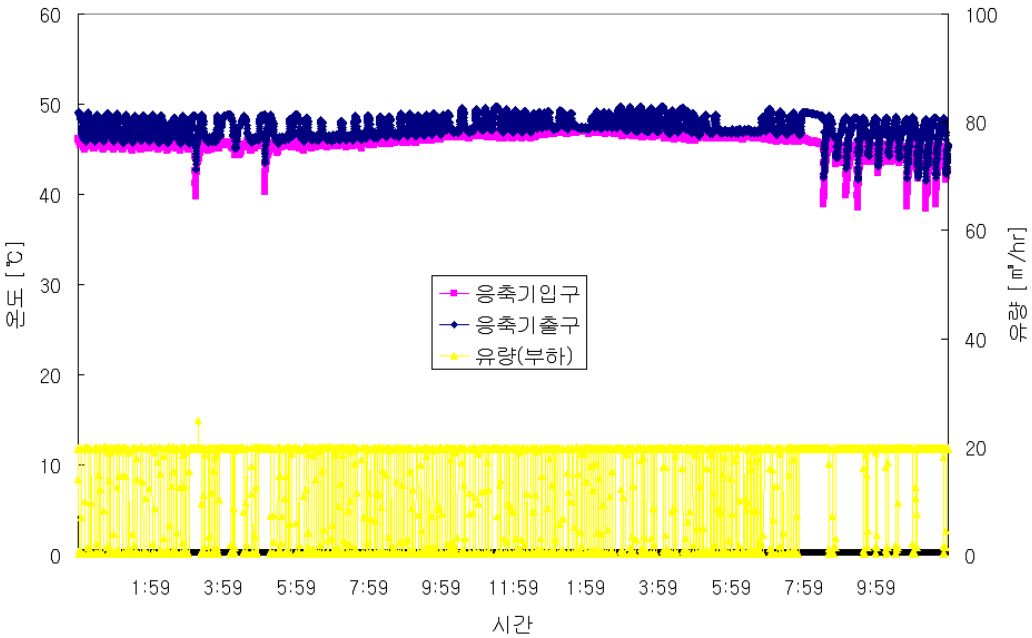


Fig. 90 Temperature variations at condenser (Apr. 14th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

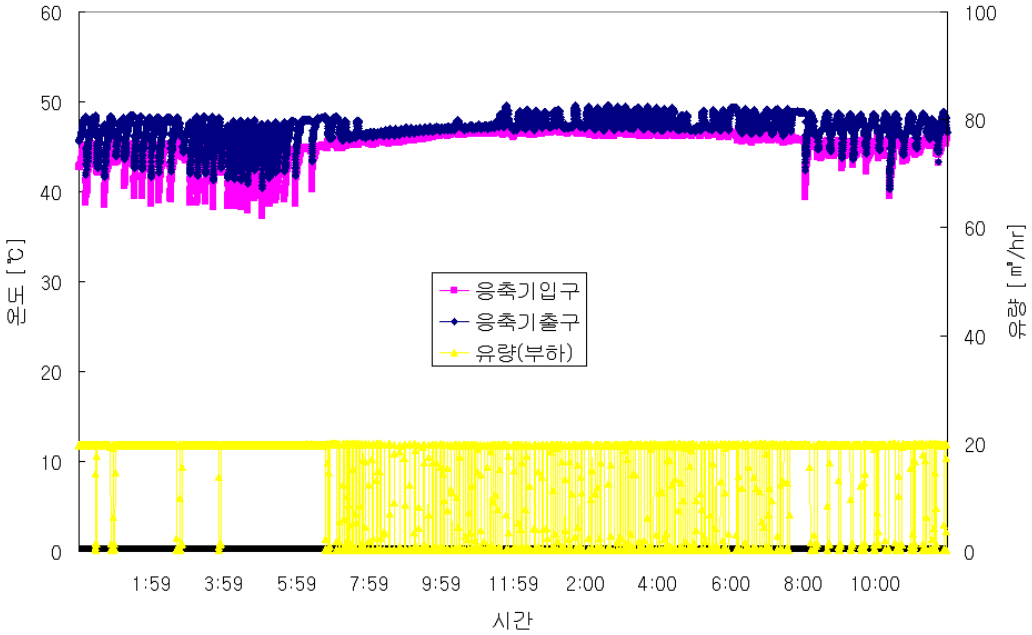


Fig. 91 Temperature variations at condenser (Apr. 15th, 2009)

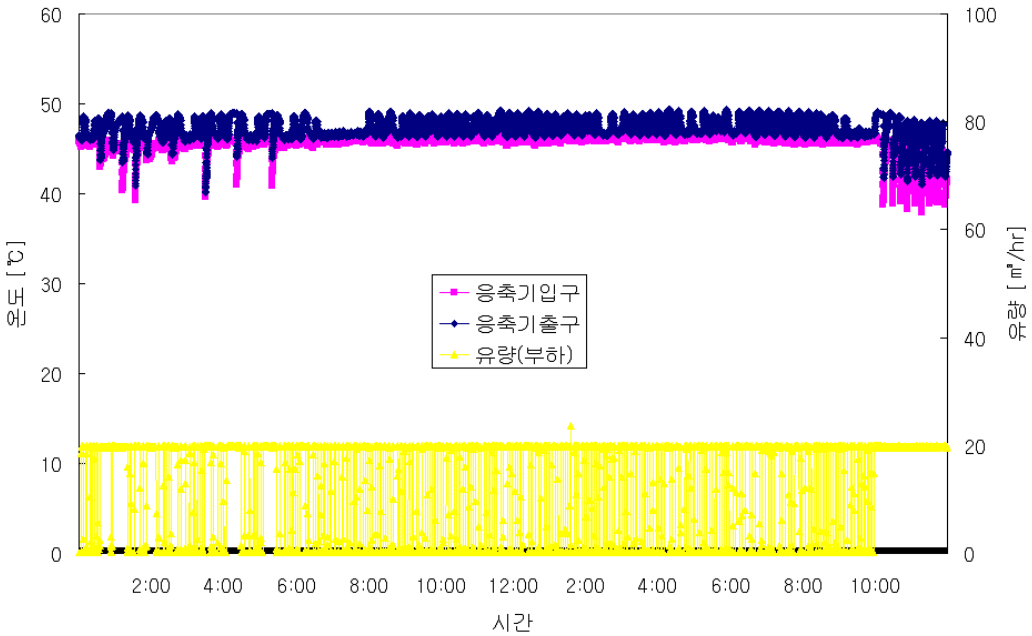


Fig. 92 Temperature variations at condenser (Apr. 16th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

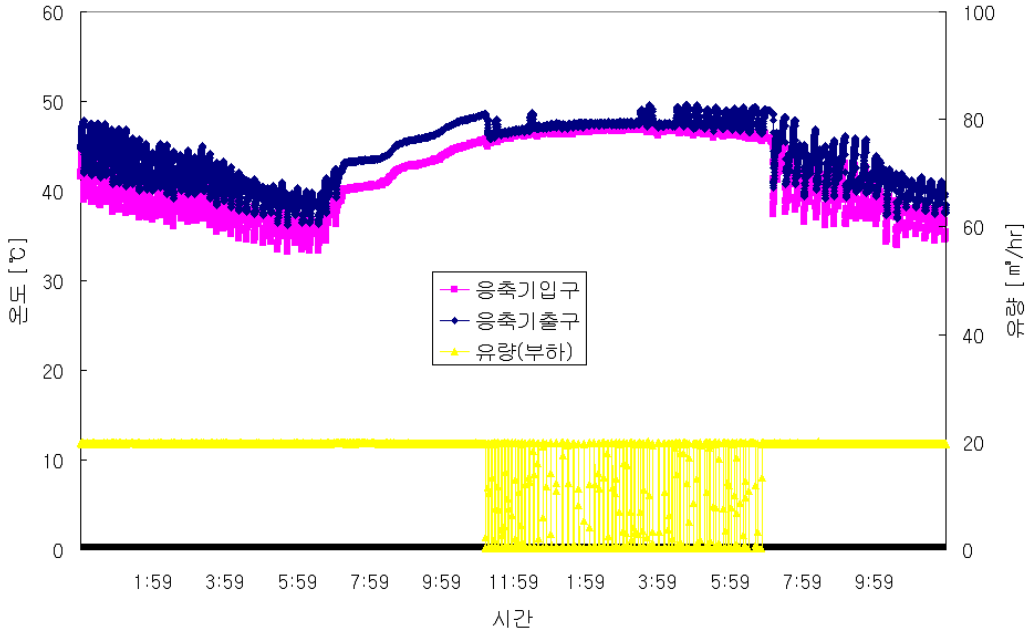


Fig. 93 Temperature variations at condenser (Apr. 17th, 2009)

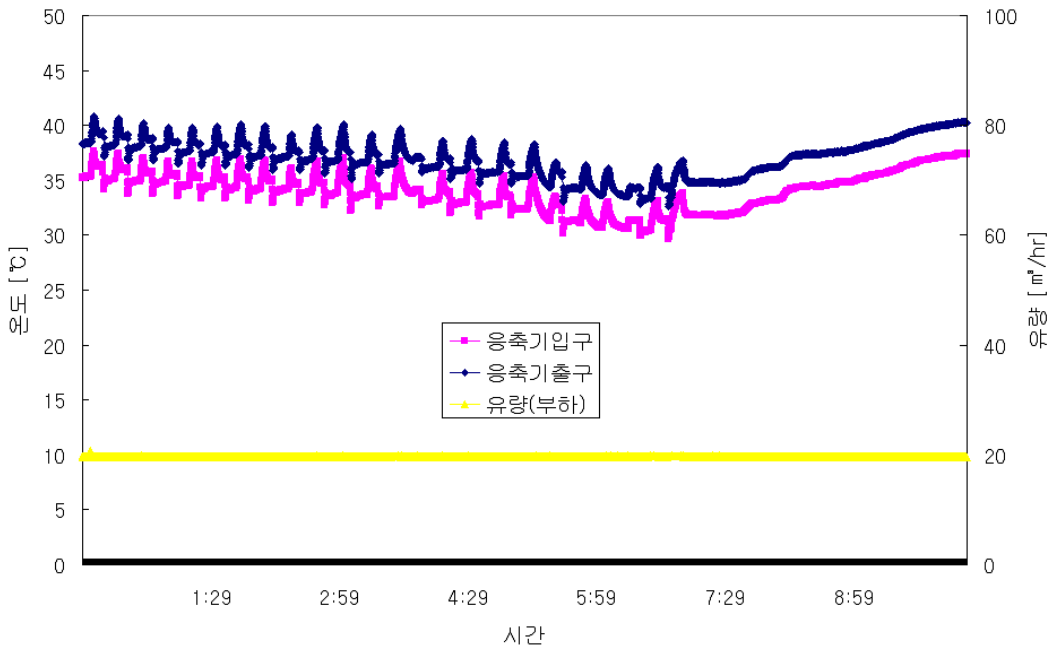


Fig. 94 Temperature variations at condenser (Apr. 18th, 2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2.6 시스템 소비동력

지중공기 열원 히트펌프시스템의 성능 평가를 위해 사용되는 소비동력은 식(3)과 같이 히트펌프 압축기 소비동력, 부하측 펌프 소비동력, 열원측 펌프 소비동력, 송풍기 소비동력이 있다. 시스템 가동에 필요한 모든 소비동력의 합산값을 지중공기 열원 히트펌프시스템의 소비동력으로 평가하였으며, 실험기간 동안에 히트펌프시스템이 가동되었던 성능평가 구간은 <Table 16>과 같다.

$$\dot{W}_{tot} = \dot{W}_c + \dot{W}_{p-s} + \dot{W}_{p-l} + \dot{W}_f \quad (3)$$

여기서 $\dot{W}_{tot}$ = 시스템 소비동력 (kW)

$\dot{W}_c$ = 압축기 소비동력 (kW)

$\dot{W}_{p-s}$ = 열원측 펌프 소비동력 (kW)

$\dot{W}_{p-l}$ = 부하측 펌프 소비동력 (kW)

$\dot{W}_f$ = 송풍기 소비동력 (kW)

대표적으로 <Table 17>에는 2009년 3월 26일에 지중공기 열원 히트펌프시스템이 가동되었을 때의 시스템 소비동력을 요소별로 측정한 값을 보여주고 있다. 압축기 소비동력은 평균 12.6kW로 시간에 따라 소비동력 값이 조금씩 변하였지만, 부하측과 열원측의 펌프 소비동력은 각각 평균 2.2kW, 2.5kW로 일정하게 나타났으며, 송풍기에 소비되는 동력도 3.1kW로 일정한 값을 보였다. 지중공기 열원 히트펌프시스템의 전체 소비동력은 평균 20.3kW로 나타났으며, Fig. 95는 시스템의 요소별 소비동력 값을 그래프에 나타내어 보여주고 있다.

<Table 18>은 유량배관 변경전의 지중공기 열원 히트펌프시스템의 요소별 소비동력을 일별로 보여주고 있으며, <Table 19>은 유량배관 변경이 완료된 후에 지중공기 열원 히트펌프시스템의 요소별 소비동력을 나타내고 있다. 배관 변경으로 인하여 압축기 소비동력은 평균 14.7kW에서 15.5kW로 0.8kW가 증가하였으

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

며, 부하측 펌프 소비동력도 기존 2.1kW에서 2.6kW로 약 0.5kW가 증가하였다. 열원측 펌프와 송풍기의 소비동력은 배관 변경과 관계없이 변화가 없었으며, 전체 시스템 소비동력이 약 1.2kW가 증가되었다. 이러한 결과를 Fig. 96에 히트펌프시스템 소비동력을 일별로 나타내었다.

<Table 16> The data acquisition section according to experimental date (2009)

Date	Time for data
Mar. 17th	00:00 ~ 18:00
Mar. 21st	00:00 ~ 12:00
Mar. 23rd	00:00 ~ 18:00
Mar. 24th	00:00 ~ 17:00
Mar. 25th	00:00 ~ 18:00
Mar. 26th	00:00 ~ 17:00
Mar. 27th	00:00 ~ 17:00
Mar. 28th	00:00 ~ 14:00
Mar. 29th	00:00 ~ 9:00
Apr. 6th	11:00 ~ 16:00, 19:00 ~ 23:00
Apr. 7th	00:00 ~ 17:00
Apr. 8th	02:00 ~ 09:00
Apr. 9th	00:00 ~ 13:00
Apr. 10th	00:00 ~ 13:00
Apr. 11th	00:00 ~ 11:00
Apr. 12th	00:00 ~ 07:00
Apr. 17th	00:00 ~ 11:00
Apr. 18th	01:00 ~ 10:00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 17> The hourly power consumption of heat pump components (Mar. 26th, 2009)

Time	Compressor [kW]	Pump at condenser [kW]	Pump at heat source [kW]	Fan [kW]	System [kW]
00:00 ~ 01:00	13.0	2.2	2.5	3.1	20.7
01:00 ~ 02:00	12.5	2.2	2.4	3.1	20.2
02:00 ~ 03:00	12.2	2.2	2.5	3.1	19.9
03:00 ~ 04:00	11.9	2.2	2.4	3.1	19.6
04:00 ~ 05:00	11.8	2.2	2.5	3.1	19.5
05:00 ~ 06:00	11.5	2.2	2.5	3.1	19.2
06:00 ~ 07:00	11.4	2.2	2.5	3.1	19.1
07:00 ~ 08:00	11.3	2.2	2.5	3.1	19.0
08:00 ~ 09:00	11.6	2.2	2.5	3.1	19.4
09:00 ~ 10:00	11.5	2.2	2.4	3.1	19.2
10:00 ~ 11:00	11.6	2.2	2.5	3.1	19.3
11:00 ~ 12:00	13.0	2.2	2.5	3.1	20.7
12:00 ~ 13:00	13.1	2.2	2.5	3.1	20.9
13:00 ~ 14:00	13.4	2.2	2.4	3.1	21.1
14:00 ~ 15:00	14.5	2.2	2.5	3.1	22.2
15:00 ~ 16:00	14.9	2.2	2.5	3.1	22.6
16:00 ~ 17:00	15.2	2.2	2.5	3.1	22.9
Average	**12.6**	**2.2**	**2.5**	**3.1**	**20.3**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 18> The power consumption of heat pump components (Before)

Date	Compressor [kW]	Pump at condenser [kW]	Pump at heat source [kW]	Fan [kW]	System [kW]
Mar. 17th	16.2	2.0	2.4	3.0	23.6
Mar. 21st	16.6	2.1	2.4	3.0	24.0
Mar. 23rd	13.8	2.2	2.5	3.1	21.5
Mar. 24th	15.7	2.1	2.4	3.0	23.2
Mar. 25th	14.8	2.2	2.4	3.1	22.5
Mar. 26th	12.6	2.2	2.4	3.1	20.3
Mar. 27th	12.8	2.2	2.5	3.1	20.6
Mar. 28th	15.4	2.1	2.4	3.0	22.8
Mar. 29th	14.3	2.1	2.5	3.1	22.0
Average	**14.7**	**2.1**	**2.4**	**3.1**	**22.3**

<Table 19> The power consumption of heat pump components (After)

Date	Compressor [kW]	Pump at condenser [kW]	Pump at heat source [kW]	Fan [kW]	System [kW]
Apr. 6th	16.0	2.6	2.3	3.1	24.0
Apr. 7th	13.3	2.6	2.3	3.1	21.2
Apr. 8th	16.5	2.6	2.3	3.0	24.4
Apr. 9th	15.6	2.6	2.3	3.0	23.4
Apr. 10th	15.4	2.6	2.4	3.1	23.6
Apr. 11th	16.0	2.6	2.4	3.0	24.0
Apr. 12th	16.5	2.5	2.4	3.0	24.3
Apr. 17th	16.3	2.6	2.4	3.1	24.4
Apr. 18th	14.2	2.6	2.4	3.1	22.3
Average	**15.5**	**2.6**	**2.4**	**3.1**	**23.5**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

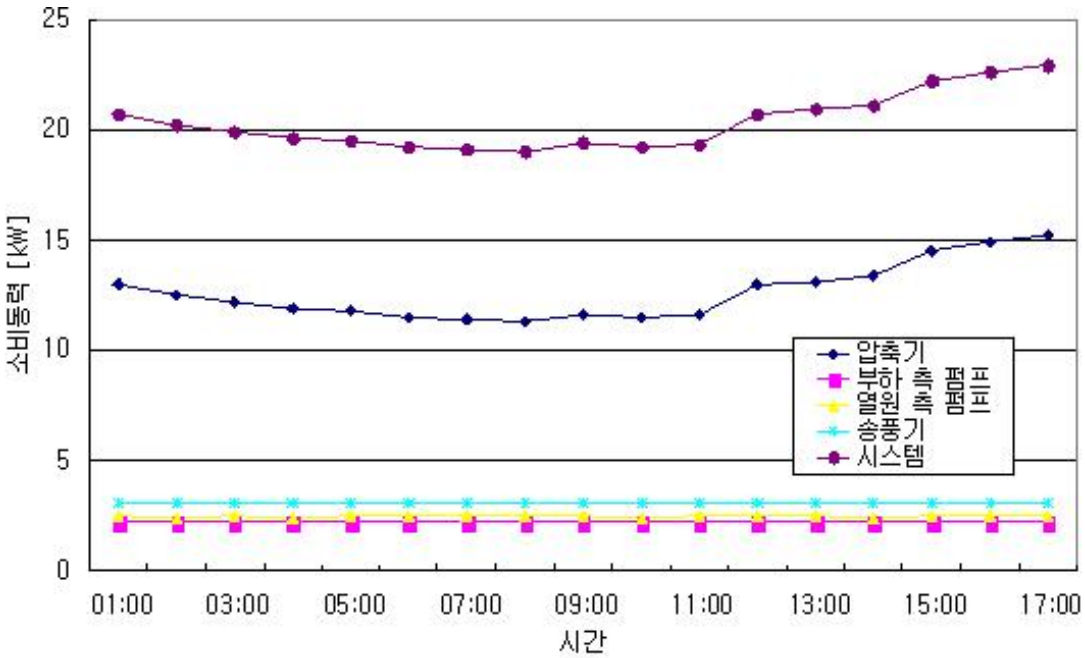


Fig. 95 The power consumption of heat pump components (Mar. 26th, 2009)

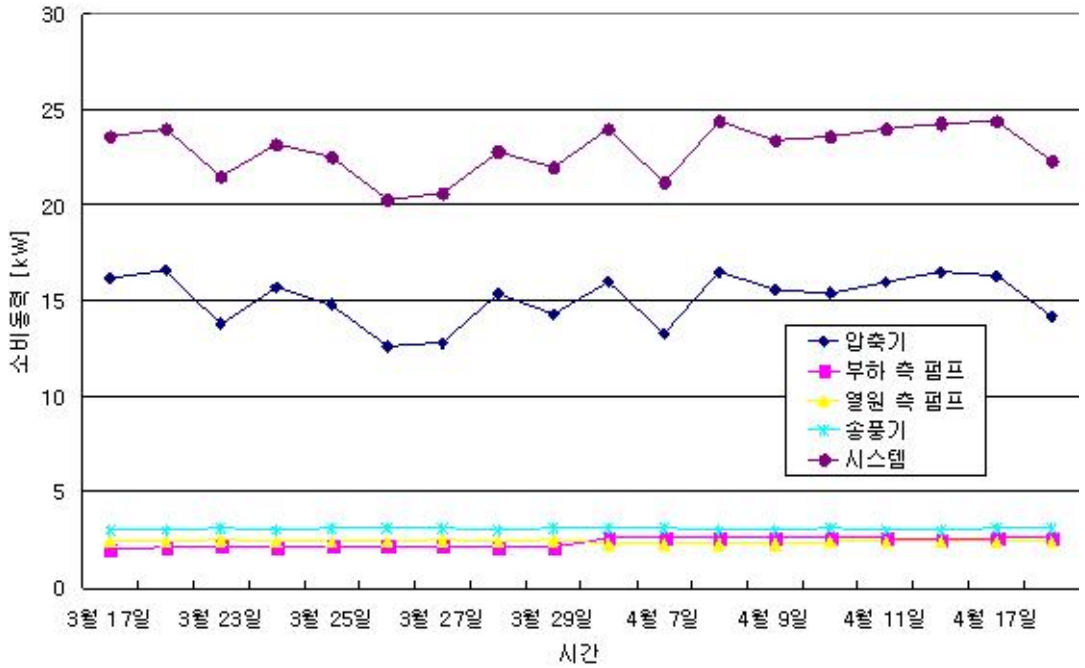


Fig. 96 The daily power consumption of heat pump system (2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.3 히트펌프 유닛 성능 평가

히트펌프 유닛의 성능은 히트펌프 압축기 소비동력 대비 응축기에서의 열공급 능력으로 평가되며, 계산식은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{W}_c} \quad (4)$$

여기서 COP_{HP} = 히트펌프 유닛의 난방성적계수

$\dot{Q}_l$ = 부하측 열공급량(kW)

$\dot{W}_c$ = 압축기 소비동력(kW)

실험 기간 중 대표적으로 2009년 3월 26일에 히트펌프시스템이 가동되었을 때의 히트펌프 성적계수(COP_{HP})를 시간별로 구분하여 <Table 20>에 제시하였다. 일일동안의 평균 압축기 소비동력은 12.6kW이며, 부하측 열공급량은 65.7kW로 히트펌프 유닛의 성적계수는 평균 5.2로 나타났다.

<Table 21>은 실험기간 동안의 히트펌프 유닛의 성적계수를 보여주고 있으며, 3월 26일에는 COP_{HP}가 5.2로 가장 높았고, 3월 21일에는 COP_{HP}가 3.8로 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 실험기간 동안의 히트펌프 유닛의 성적계수는 4.3을 보였으며, 이때의 압축기 소비동력은 평균 15.1kW로 나타났다. Fig. 97에 히트펌프 유닛의 일별 COP_{HP}를 그래프 상에 표현하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

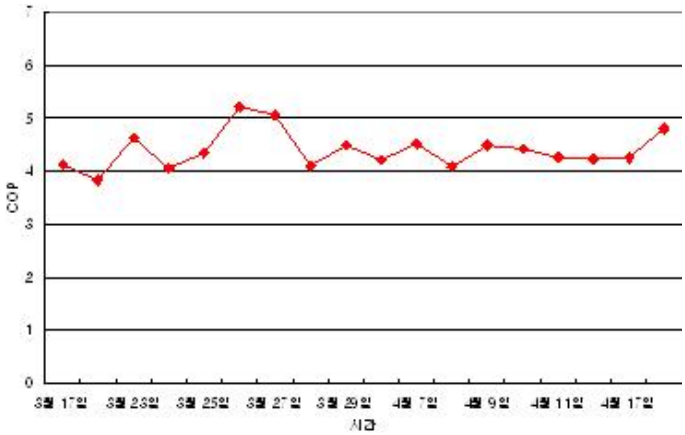


Fig. 97 The daily average COP of heat pump (2009)

<Table 20> The hourly COP of heat pump (Mar. 26th, 2009)

Time	Power consumption [kW]	Heat supply quantity [kW]	COP_{HP}
00:00 ~ 01:00	13.0	66.4	5.1
01:00 ~ 02:00	12.5	65.7	5.3
02:00 ~ 03:00	12.2	65.7	5.4
03:00 ~ 04:00	11.9	65.9	5.5
04:00 ~ 05:00	11.8	65.8	5.6
05:00 ~ 06:00	11.5	65.8	5.7
06:00 ~ 07:00	11.4	65.6	5.8
07:00 ~ 08:00	11.3	65.6	5.8
08:00 ~ 09:00	11.6	65.8	5.7
09:00 ~ 10:00	11.5	65.3	5.7
10:00 ~ 11:00	11.6	64.7	5.6
11:00 ~ 12:00	13.0	65.1	5.0
12:00 ~ 13:00	13.1	65.0	5.0
13:00 ~ 14:00	13.4	65.3	4.9
14:00 ~ 15:00	14.5	65.3	4.5
15:00 ~ 16:00	14.9	65.6	4.4
16:00 ~ 17:00	15.2	65.4	4.3
Average	**12.6**	**65.7**	**5.2**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 21> The daily average COP of heat pump (2009)

Date	Power consumption [kW]	Heat supply quantity [kW]	COP_{HP}
Mar. 17th	16.2	66.6	4.1
Mar. 18th	16.6	63.6	3.8
Mar. 19th	13.8	63.9	4.6
Mar. 20th	15.7	63.6	4.1
Mar. 21st	14.8	64.3	4.3
Mar. 22nd	12.6	65.7	5.2
Mar. 23rd	12.8	64.7	5.1
Mar. 24th	15.4	63.2	4.1
Mar. 25th	14.3	64.0	4.5
Mar. 26th	16.0	67.3	4.2
Mar. 27th	13.3	60.0	4.5
Mar. 28th	16.5	67.3	4.1
Mar. 29th	15.6	69.9	4.5
Apr. 6th	15.4	68.0	4.4
Apr. 7th	16.0	68.1	4.3
Apr. 8th	16.5	69.6	4.2
Apr. 9th	16.3	69.3	4.3
Apr. 10th	14.2	68.1	4.8
Average	**15.1**	**66.0**	**4.3**

3.4 지중공기 열원 히트펌프시스템 성능 평가

지중공기 열원 히트펌프시스템의 성능은 시스템 전체 소비동력 대비 부하측의 열공급 능력으로 평가되며, 계산식은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$COP_{SYS} = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{W}_{tot}} \quad (5)$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 COP_{SYS} = 지중공기 열원 히트펌프시스템의 난방성적계수

$\dot{Q}_l$ = 부하측 열공급량(kW)

$\dot{W}_{tot}$ = 시스템 소비동력(kW)

<Table 22>는 2009년 3월 26일에 지중공기 열원 히트펌프 시스템이 가동되었을 때의 성적계수(COP_{SYS})를 시간별로 구분하여 분석한 것이다. 일일동안의 평균 시스템 소비동력은 20.3kW이며, 부하측 열공급량은 65.7kW로 지중공기 열원 히트펌프 시스템의 성적계수는 평균 3.2로 나타났다.

<Table 23>은 실험기간 동안의 지중공기 열원 히트펌프 시스템의 난방성적계수를 보여주고 있으며, 3월 26일에는 COP_{SYS}가 3.2로 가장 높았고, 3월 21일과 24일에는 COP_{SYS}가 2.7로 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 실험기간 동안의 히트펌프 유닛의 성적계수는 2.9를 보였으며, 이때 지중공기 열원 히트펌프 시스템의 소비동력은 평균 22.9kW로 나타났다. Fig. 98은 지중공기 열원 히트펌프 시스템의 일일 평균 성적계수를 나타낸 그래프이다.

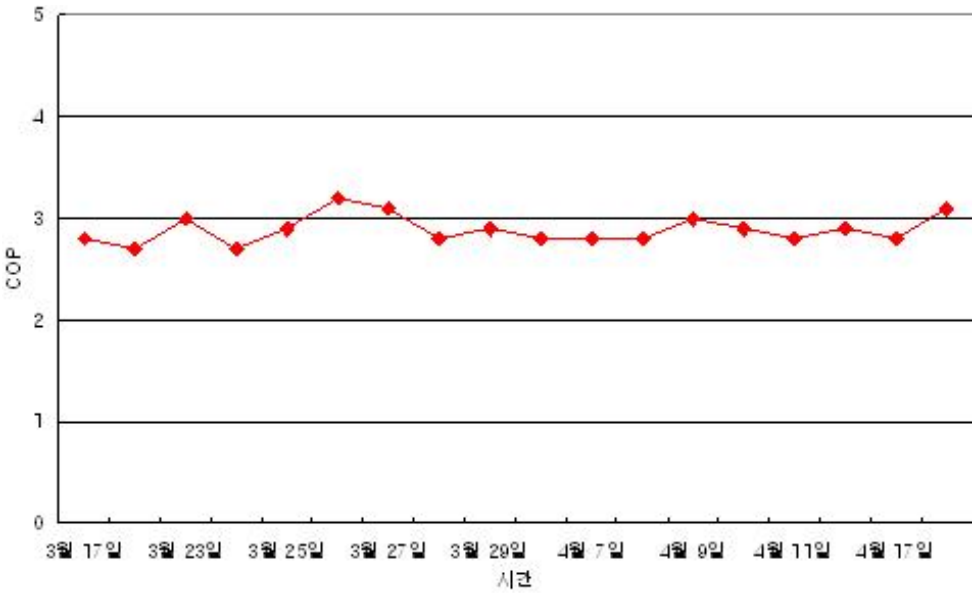


Fig. 98 The daily average COP of heat pump system (2009)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 22> The hourly COP of heat pump system (Mar. 26th, 2009)

Time	Power consumption [kW]	Heat supply quantity [kW]	COP sys
00:00 ~ 01:00	20.7	66.4	3.2
01:00 ~ 02:00	20.2	65.7	3.3
02:00 ~ 03:00	19.9	65.7	3.3
03:00 ~ 04:00	19.6	65.9	3.4
04:00 ~ 05:00	19.5	65.8	3.4
05:00 ~ 06:00	19.2	65.8	3.4
06:00 ~ 07:00	19.1	65.6	3.4
07:00 ~ 08:00	19.0	65.6	3.5
08:00 ~ 09:00	19.4	65.8	3.4
09:00 ~ 10:00	19.2	65.3	3.4
10:00 ~ 11:00	19.3	64.7	3.4
11:00 ~ 12:00	20.7	65.1	3.1
12:00 ~ 13:00	20.9	65.0	3.1
13:00 ~ 14:00	21.1	65.3	3.1
14:00 ~ 15:00	22.2	65.3	2.9
15:00 ~ 16:00	22.6	65.6	2.9
16:00 ~ 17:00	22.9	65.4	2.9
Average	**20.3**	**65.7**	**3.2**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table 23> The daily average COP of heat pump system (2009)

Date	Power consumption [kW]	Heat supply quantity [kW]	COP sys
Mar. 17th	23.6	66.6	2.8
Mar. 21st	24.0	63.6	2.7
Mar. 23rd	21.5	63.9	3.0
Mar. 24th	23.2	63.6	2.7
Mar. 25th	22.5	64.3	2.9
Mar. 26th	20.3	65.7	3.2
Mar. 27th	20.6	64.7	3.1
Mar. 28th	22.8	63.2	2.8
Mar. 29th	22.0	64.0	2.9
Apr. 6th	24.0	67.3	2.8
Apr. 7th	21.2	60.0	2.8
Apr. 8th	24.4	67.3	2.8
Apr. 9th	23.4	69.9	3.0
Apr. 10th	23.6	68.0	2.9
Apr. 11th	24.0	68.1	2.8
Apr. 12th	24.3	69.6	2.9
Apr. 17th	24.4	69.3	2.8
Apr. 18th	22.3	68.1	3.1
Average	**22.9**	**66.0**	**2.9**

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제Ⅳ장 결론

우리나라는 1990년대 중반부터 지열에너지에 관심을 보여 왔으며, 요소기술에 대한 연구 개발이 일부 이루어지기 시작하였지만 2001년 이전에는 보급량이 미비하였고, 최근에 와서야 지열히트펌프를 이용한 냉난방 시스템 보급이 확산되면서 이에 대한 기술수요가 급증하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 제주지역에서의 지역 특성에 맞는 지열에너지 이용 방안에 대한 대안과 실증 현장을 토대로 성능을 검증해 보았다. 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

o 제주지역은 독특한 화산활동에 의해 형성된 도서지역으로 타 지역의 지질구조나 구성 암석 형태에 있어 많은 차이를 보이기 때문에 지질구조 암상의 특성에 의해 많은 영향을 받으므로 일반적인 지중열교환기를 이용하기에는 다소 무리가 따르며, 지역의 특색에 맞는 활용방안이 요구된다.

o 본 연구에서 제시한 지중공기 열원 히트펌프시스템은 제주특색에 적합한 지열에너지 활용 기술로써 연중 온도차가 크게 발생하지 않는 지중공기 열원을 이용하여 히트펌프시스템을 가동시키는 기술이다. 시스템 구성은 기존의 지열 히트펌프시스템의 구성 요소인 히트펌프, 지중열교환기, 축열조, 팬코일 유닛, 펌프 외에 추가로 지중공기를 뽑아 쓰기 위한 송풍팬으로 이루어진다.

o 본 기술의 작동원리는 지중의 공기가 송풍기에 의해 외부로 강제 배출될 때, 지하의 많은 공동층**에** 외부공기가 유입되면서 지반과의 열교환을 통해 일정한 온도의 지중공기 열원을 형성하고 지중에 매설된 지중열교환기가 이렇게 형성된 지중공기 열원과 열교환을 함으로써 히트펌프의 성능을 향상시킨다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

o 본 기술의 적용 타당성을 위하여 제주도 서귀포시 남원읍 위미리의 한 감귤농가를 선정하여 지중공기 열원을 활용한 히트펌프시스템을 설치하여 지열원 회수량 및 히트펌프시스템 성능 평가를 수행하였다. 시험기간은 2009년 2월부터 4월까지이다.

o 실험기간 동안의 온도분포데이터를 살펴보면 지중공기 열원 히트펌프시스템은 일반적인 공기열원 히트펌프시스템과는 달리 외기온도 영향을 거의 받고 있지 않음을 보여주고 있으며, 외기와 상관없이 거의 일정한 열원을 공급받음으로 지열 히트펌프시스템과 유사한 성능을 보여주었다.

o 위미지역 지중 공기열원의 열 회수량은 일일 평균 약 43.35kW(37,274kcal/h) 정도로 증발기 입구온도는 최소 7.9℃ 이상을 유지하였으며, 외기온도에 관계없이 연중 효율적이고 안정적인 열원을 공급 받을 수 있어 히트펌프시스템을 운용하기에는 아주 적절한 열원임을 실험을 통하여 알 수 있었다.

o 실험기간 동안 히트펌프 유닛의 성적계수는 3월 26일에 COP_{HP}가 5.2로 가장 높았고, 3월 21일에는 COP_{HP}가 3.8로 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 실험기간 동안의 히트펌프 유닛의 성적계수는 4.3을 보였으며, 이때의 압축기 소비동력은 평균 15.1kW로 나타났다.

o 그리고 지중공기 열원 히트펌프 시스템의 난방성적계수는 3월 26일에 COP_{SYS}가 3.2로 가장 높았고, 3월 21일과 24일에는 COP_{SYS}가 2.7로 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 실험기간 동안의 히트펌프 유닛의 성적계수는 2.9를 보였으며, 이때 지중공기 열원 히트펌프 시스템의 소비동력은 평균 22.9kW로 나타났다. 시스템 소비동력이 이와 같이 높게 나타난 것은 지중공기를 외부로 유출시키기 위한 송풍기 동력이 포함되었기 때문이며, 송풍기 동력이 상대적으로 높기 때문에 전체 시스템의 COP_{SYS}는 다소 낮아질 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

본 연구에서 제시된 지중공기열을 이용한 지열시스템에 대한 성능 평가를 수행한 결과 기존 지열시스템과 같이 외기온도에 상관없이 연중 일정한 온도의 열원을 공급받는다는 결과를 도출하였으며, 히트펌프시스템과 연계하여 사용하였을 경우에도 기존 지열시스템과 유사한 성능의 성적계수를 보인다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 지열시스템에 대한 수요가 증가하고 있는 제주지역에서 지중공기 열원 히트펌프시스템 기술은 기존 지열시스템을 대체할 수 있는 새로운 개념의 지열에너지 활용 대안 기술로써, 신재생에너지자원으로의 분류가 고려되어야 할 것으로 사료된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참고문헌

1. 제주도 지질 주상도 자료집, 제주도광역수자원관리본부, 2001
2. 미래 제주도 청정 지하수 공급 시스템 구축 사업, 한국지질자원연구원, 2004
3. 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(Ⅰ), 상공자원부, 1994
4. 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(Ⅲ), 통상산업부, 1996
5. 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구, 과학기술부, 2005
6. 김미성, 김형찬, 국내지열분포현황, 지열에너지저널, 제1권, P. 33~38, 2006
7. 조정식, 지열에너지 이용 냉난방시스템 성능분석 연구, 한국건설기술연구원, 2004
8. 신현준, 지열이용열펌프시스템의 성능평가기법 및 기술기준(안)구축, 한국건설기술연구원, 2005
9. 지열냉난방시스템 실증연구, 산업자원부, 2005
10. 손병후, 지열 열펌프 시스템의 경제성 분석, 에너지관리공단 신재생에너지 센터, 2006
11. 황광일, 김중헌, 지열에너지 이용 및 적용기술, 대한설비공학회 설비저널, 제35권, P. 38-45, 2006
12. 지열냉난방시스템 실증연구, 산업자원부, 2005
13. 고유가 극복을 위한 시설원예 에너지절감 가이드북, 농진청 농업공학연구소, 2006
14. Bose, J. E., M.D. Smith, J.D. Spitler, “Advances in Ground Source Heat Pump Systems, An International Overview”, 7th International Energy Agency Heat Pump Conference, Beijing, 2002
15. Rybach, L., “Status and Prospects of Geothermal Heat Pumps (GHP) in Europe and Worldwide; Sustainability Aspects of GHPs”, Institute of Geophysics ETH, Zurich, Switzerland P. 85-100, 2000
16. Chiasson, A.D., J.D. Spitler, S.J. Rees, M.D. Smith, “A Model for

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Simulating the Performance of a Pavement Heating System as a Supplemental Heat Rejecter With Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems", ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 122, P. 183-191, November 2000

17. DOE, Ground-Source Heat Pumps Applied to Federal Facilities-second edition, Federal Energy Management Program, DOE/EE-0245(PNNL-13534), US Department of Energy, 2001
18. Eckhart, F., Grouting Pocedures for Ground Source Heat Pump Systems, Oklahoma State University and International Ground Source Heat Pump Association, 1991
19. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K, "Ground-Source Heat Pumps: Design of Geo-Thermal Systems for Commercial and Institutional Buildings", ASHRAE, Atlanta, 1997
20. 우정선, 김대기, 이세균, "지중열원 열펌프 시스템의 난방성능 해석", 대한설비공학회논문집, 제20권, 제2호, P. 135-152, 2004
21. 이의준, "지열에너지 자원활용 기술 및 GSHP 국내외 이용 현황", 신재생에너지 workshop 기술강좌, P. 66-87, 2005
22. 이기우, "지열이용 히트펌프기술", 공기조화 냉동공학회, 제21권, 제4호, P. 306-315, 1992
23. 신현준, 안철홍, 조정식, "지열에너지의 유효이용을 위한 고찰", 공기조화 냉동공학회, 제24권, 제4호, P. 409-419, 1995
24. 이용범, 조성인, "지열을 이용한 온실의 냉난방 시스템 개발", 한국설비기술협회, 2005년 7월호, P. 51-64, 2005

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부록 A : 지중공기열을 이용한 건축물 공조시스템 적용에 관한 연구

제1장 개요

제주도내에서는 화산 활동으로 형성된 제주도의 현무암층에 형성된 공기를 순환작용을 일으킬 수 있다는 특성을 이용하여 이러한 공기를 강제 순환시키고(이하 지중공기) 이를 매체로 지열을 얻을 수 있는 기술을 개발하여 시설 농업용으로 보급하고 있다. 이를 위해 지하 공기열을 토출시켜 직접 이용하는 방법이 가장 간단하고 설비비도 적게 드는 장점이 있으나, 지하공기가 고습이고 매년 일정한 온도(18℃ 내외)로 유지되기 때문에 더 이상의 가온 혹은 토출공기 이하 온도로의 냉방이 불가능한 문제점이 있다.

이를 해결하기 위해 최근에는 지하공기열을 열원으로 활용하고 열교환시킨 히트펌프를 이용한 기술이 개발되어 주로 시설재배 농가, 양돈장 등에 보급되어 활용되고 있으며 본 연구도 그에 대한 실험적 해석을 위한 것이다. 그러나 아직까지 지중에서 지층 간 순환하는 공기열을 활용하여 건축물의 냉난방에 아직까지 이용되지는 못하고 있는 실정이어서 이에 대한 연구가 절실하다.

이러한 기술개발은 최근 급등하고 있는 석유에 대처하고 냉난방비로 많은 애로를 겪고 있는 펜션 등은 물론이고 주거 및 사무용 건축물을 위한 냉난방 시스템에 활발히 활용될 수 있을 것이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제2장 실험 시설

다양한 건축물 적용 가능 여부를 파악하기 위해 실제 운영되고 있는 건물에 시추를 하여 시스템을 설치하였고, 사무용 건물, 기숙사 건물, 풍력발전기 조립라인과 같은 산업용 건물에 실제로 적용하여 실험해 보았다. <Table A1>은 설치되어진 시스템의 특성을 정리한 것이다.

지하 공기열을 이용하기 위해 천공을 해야 하는데, 시추공 및 외부공조기 등이 설치되어질 위치를 선정 후 시추장비를 이용하여 시추를 실시한다. 이때 시추 깊이는 지하수층 이전까지 하게 된다.

본 연구를 위한 지중시추 총 깊이는 55m로 20m까지 Ø400mm 너비로 Fig. A1과 같이 시추한 후 지질층 붕괴방지를 위한 그라우팅(Fig. A2)을 실시한다. 이를 위해 약 48시간(2일) 지나 콘크리트가 굳은 후 Ø380mm 너비로 55m 깊이까지 재시추가 이루어진다. 제주지역은 암반층과 쇄설층이 반복적으로 형성되어 있기 때문에 지중특성상 암반을 파쇄하며 천공하는 타지방 방식과 달리 공업용 다이아몬드가 박힌 코어를 회전시키며 천공하는 코어방식이 이용된다.

건축물의 냉난방 조건에 맞춘 성능 시스템에 맞추기 위해 지중공기와 지중 열교환기 사이의 공기 대 물 열교환 방식(Fig. A3)과 열교환기와 히트펌프의 냉매 사이의 물 대 물 열교환 방식으로 지중열원을 취득하였다. 지중공기열원을 취득하기 위해 5kW 용량의 고용량 터보 송풍팬을 설치하는 한편 열부하에 안정적으로 대응하기 위해 축열조(400톤)를 설치하였다. 전체적인 히트펌프 설치 전경은 Fig. A4와 같다.

적용 건물은 실제 이용되고 있는 사무용(Fig. A5(a)), 기숙사, 산업용 건물(Fig. A5(b))로서 총면적은 491.8m²(약 150평)이나, 본 연구 과제를 수행하는 도중 설치한 시스템 용량(15RT)으로는 난방설계면적에 대한 부하대응이 어렵고, 산업용 건물은 별도로 분류되지 않고 다른 건물과 연결, 개방되어 있어 실제 난방면적은 2,000m² (600평 이상) 이상이었다. 이를 해소하기 위해 산업용 건물을 제외한 사무용, 기숙사 건물에만 적용하여 실험하였으며, 이때 건물 총 면적은 약 294m²(89평) 이고, 기계실을 포함하면 약 330m²(100평) 정도이다. 난

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

방 축열온도는 48℃, 냉방 축냉온도는 12℃로 설정하였고, 실내온도는 22℃로 설정하였다.

모니터링 및 제어를 위해 중앙 제어방식인 모니터링 및 제어 시스템을 적용하였고, Fig. A6과 같이 펌프, 히트펌프, 공조기 등 각 부분별 실시간 이상 유무파악 및 수동 제어가능 시스템 개발하여 웹을 통한 시스템 모니터링 및 제어가 가능하도록 하였다.

<Table A1> The properties of heating/cooling system

		unit	contents
Installation location		-	Gemreung -ri, Hanrim-eup, Jeju
System capacity		RT	15
Heating/ Cooling Area		m²	약 4,950
Purpose		-	Building Heating / Cooling
Depth		m	55
Exchange type		-	Air to Water Water to Water
Building		-	Industrial and Office, Residential building
Running time	Industrial building	Time	09:00 - 18:00
	Office building		09:00 - 18:00
	Residential building		18:00 - 09:00
Setting temperature	Heating	℃	22
	Cooling		22
Thermal storage temperature	Heating	℃	48
	Cooling		12

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. A1 The boring

Fig. A2 The grouting

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. A3 The geothermal heat exchanger

Fig. A4 The heat pump

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(a) Office building

(b) Industrial building

Fig. A5 The air-conditioning machine installation

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

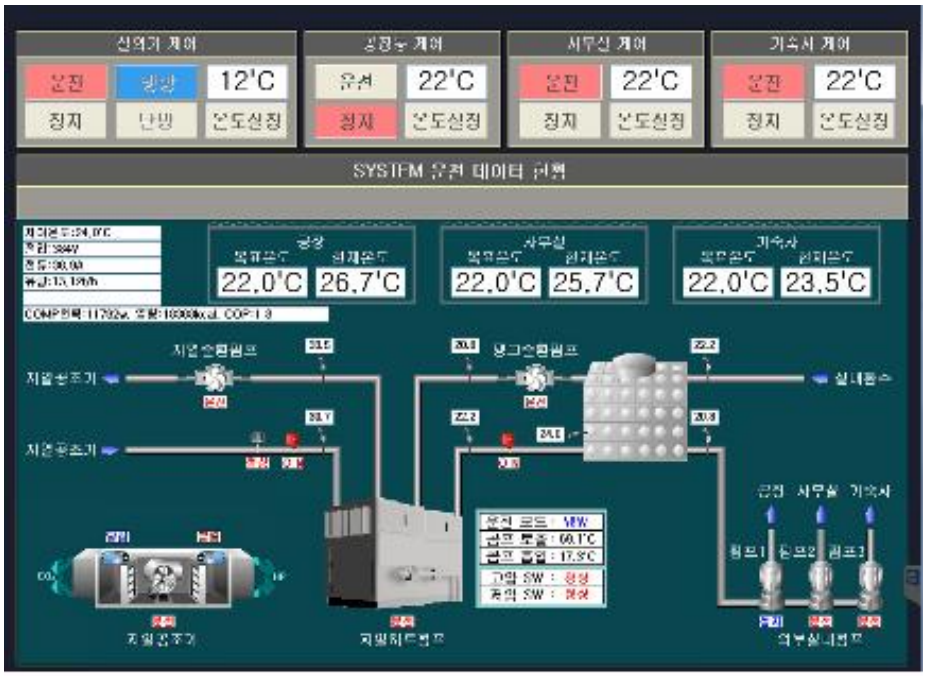


Fig. A6 The system monitoring program

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제3장 연구결과

3.1 화산지질층 지중 열유체 특성

시추완료 후 화산지질층의 특성을 파악하기 위해 Figs. A7~A9과 같이 지중온도, 습도, 공기유속, 공기유동 등을 측정하였다. 지중온도와 습도는 5m 간격으로 와이어에 센서를 부착시킨 후 시추공에 직접 삽입하여 측정하였는데, 지중온도 변화는 일반적인 지중의 온도변화처럼 깊이가 깊을수록 온도변화 구배가 적고 안정적이다.

그러나 Fig. A7에서 보여주듯 일정 시간대에서 대부분의 깊이별 온도변화가 커지고, 일정한 변화경향을 보인다. 이는 시추공 내에서 공기유동이 발생됨을 추측할 수 있다. 또한 50m 이상 구간의 온도가 일정하게 나타남을 미루어 볼 때 지하수층임을 추측할 수 있다.

실제로 시추공 입구에서 공기의 유속(Fig. A8)과 압력(Fig. A9)를 살펴보면 시간에 따라 공기유속과 압력의 변화가 심하게 일어남을 알 수 있다. 특히 압력의 경우 부압이 발생하는 것을 미루어 볼 때 시추공 내 공기가 시추공 입구를 기준으로 흡기와 배기를 한다는 것을 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2 시추 암석 공극율에 관한 해석

시추공 토양 및 암석의 공극율과 쇄설층 범위 여부에 따라 시추 깊이 및 지중의 열용량 취득량이 좌우된다. 이에 다음과 같이 이론적 접근과 실험을 통해 시추공의 공극율을 개략적으로 조사하였다.

토양이나 암석의 전체 부피에 대한 공극의 부피의 비율을 공극율(porosity)이라 하고, 다음의 식(A1)로 표현할 수 있다.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \qquad \text{(A1)}$$

여기서, n은 공극율, V_t는 토양이나 암석의 전체 부피, V_v는 공극의 부피이고 위의 식에 100을 곱하여 주면 공극율은 퍼센티지(%)의 형태가 된다.

Fig. A10은 측정하고자 하는 토양 및 암석의 공극율을 구하는 예시이다. 토양은 자연계에서 가장 공극이 많은 물질 중에 하나로서 토양 입자들은 느슨하게 뭉쳐 있으며, 식물이나 벌레 등에 의해 공동이 많이 있다. 비고결 퇴적층의 공극율은 입자크기의 분급과 입자의 모양에 의해 결정되며, 입자의 크기는 관계가 없다. 입자가 작은 물질은 분급이 잘 되므로 공극율도 커진다.

Fig. A11은 시추 깊이별 암석층을 정렬시킨 것으로 완전한 일체형태의 원통모양을 갖는 암반층(Bedrock layer)과 다양한 크기의 암석으로 이루어진 쇄설층이 반복적으로 나타남을 확인할 수 있다. 이렇게 시추된 쇄설층의 공극율을 조사하기 위해 쇄설층에 해당하는 구간 중 암반층과 쇄설층의 경계가 가장 명확한 깊이 2-3m, 10-12m, 39-41m 구간 세 곳을 측정하였다. 측정방법은 Fig. A10과 같이 지름 300mm를 갖는 20L 용량의 물통에 해당 구간의 암석을 물통 입구 경계면 높이까지 넣고, 물을 물통 입구 경계면까지 부어준다. 여기서 물통 용량(20L)에 넣어준 물의 총량을 빼 준 나머지의 총량이 쇄설층 암석의 총 체적이 되고, 측정 깊이의 체적에서 쇄설층 내 암석의 총체적을 뺀 후, 측정 깊이의 체적으로 다시 나눠준 값이 공극률이 된다. 시추된 암석에 대한 실험 데이터 및 공극 체적율에 대한 결과는 <Table A2>와 같다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

<Table A2> The pore volume of depth

Measurement Section	Volume (L)	Pore volume (L)	Pore volume rate (%)
2-3m	about 113.4	about 34.0	70
10-12m	about 227.0	about 36.0	84
39-41m	about 227.0	about 52.0	77
Average	-	about 40.7	77

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

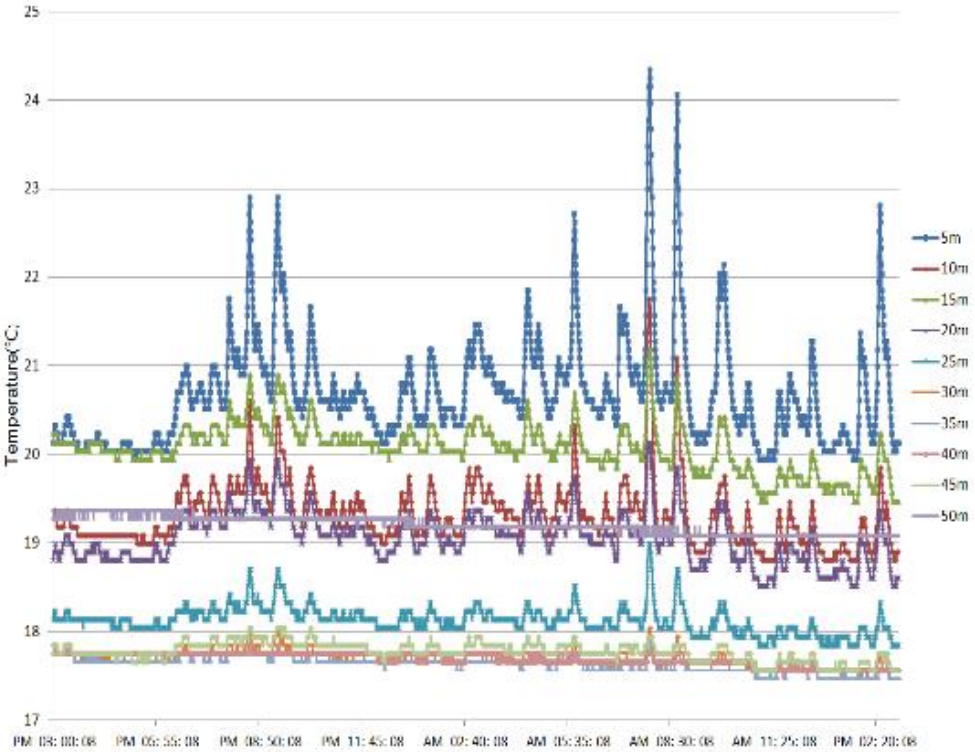


Fig. A7 The temperature distribution of depth

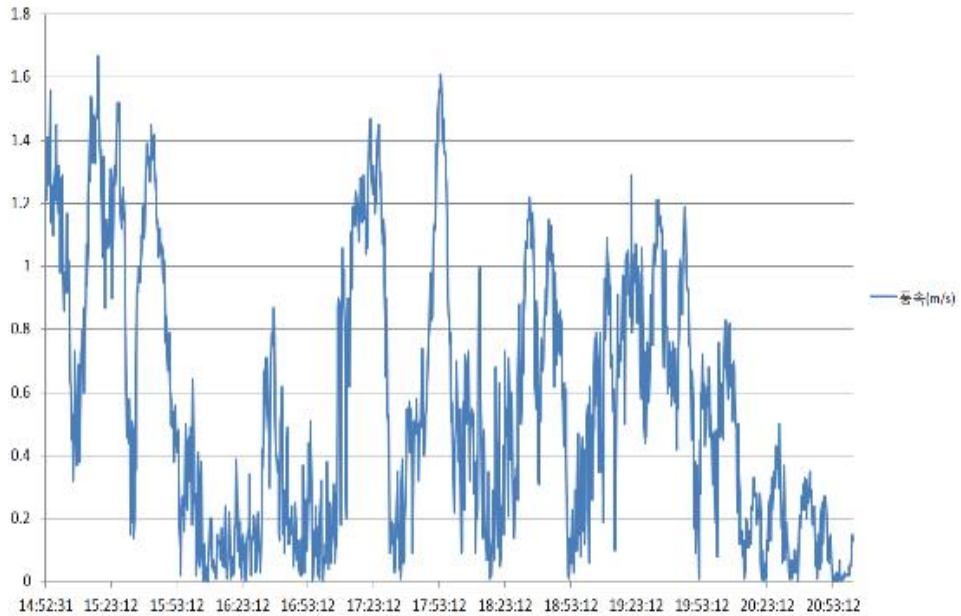
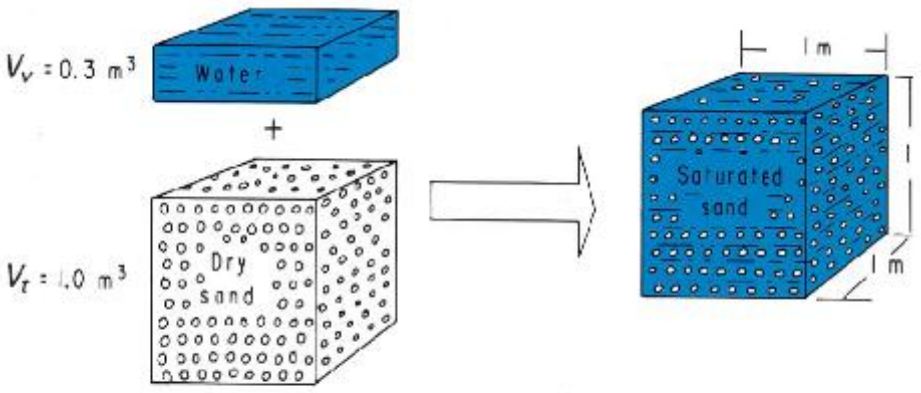


Fig. A8 The hourly air velocity variations (Aug. 4th, 2012)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. A9 The hourly air pressure variations (Aug. 4th, 2012)



$$\text{Porosity } (n) = \frac{\text{Volume of voids } (V_v)}{\text{Total volume } (V_t)} = \frac{0.3\ \text{m}^3}{1.0\ \text{m}^3} = 0.30$$

Fig. A10 The example of porosity relation

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(a) 0~9m

(b) 9~16m

(c) 17~25m

(d) 26~37m

(e) 38~47m

(f) 48~55m

Fig. A11 The boring rocks distribution

(a) 0~9m, (b) 9~16m, (c)17~25m, (d) 26~37m, (e) 38~47m, (f) 48~55m

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.3 시스템 성능계수 평가

히트펌프의 성적계수(Coefficient Of Performance)는 냉동기 능률의 양호 또는 불량 정도를 표시하는 계수로서 식(A2)로 표현될 수 있다.

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{W}_c} \qquad \text{(A2)}$$

또한 식(A2)와 같이 3상 전원의 압축기 소비전력량에 대한 취득 열량을 구하여 식(A3)과 같이 성능계수를 산출할 수 있다.

$$COP_{HP} = \frac{C_P \dot{m}_w \triangle T}{860\sqrt{3}\,k\,VI} \qquad \text{(A3)}$$

식(A3)을 이용하여 2013년 1월 14일의 초당 성능계수를 Fig. A12에 나타내었으며, 평균 성능계수가 약 4.3임을 알 수 있다. 전체 실험기간 동안(2012년 10월~2013년 3월) 시스템 평균 성능계수는 보수 및 수리기간을 제외하면 평균 3.8 이상으로 조사되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

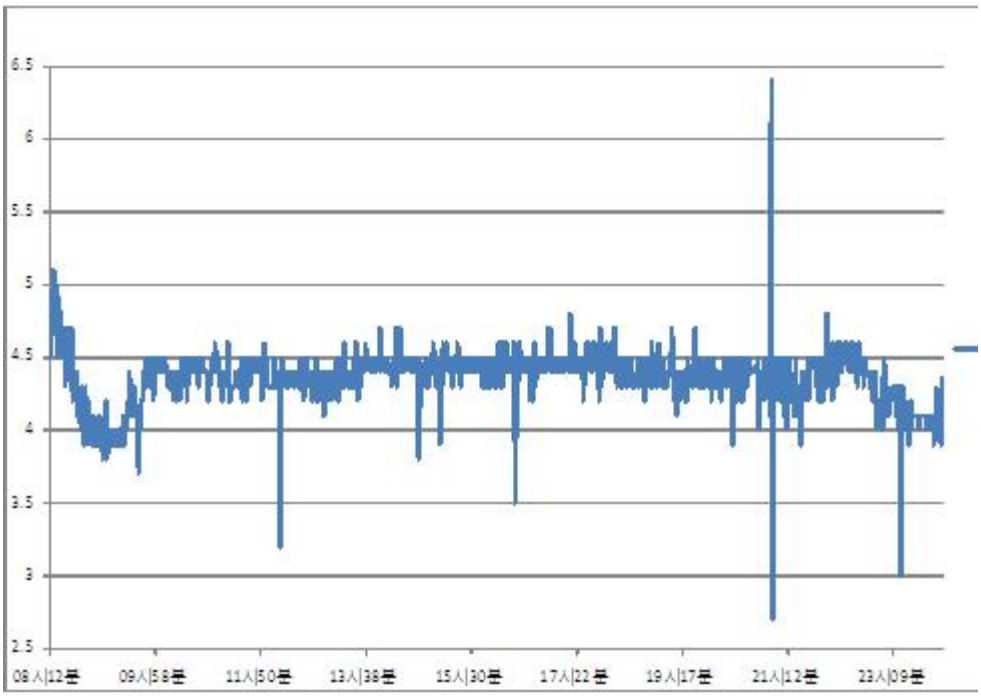


Fig. A12 The hourly COP of heat pump (Jan. 14th, 2013)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제4장 결론

제주도의 경우 일사량의 한계로 태양광, 태양열이 비경제적이고, 지열에너지의 경우에도 지하에 공기층의 존재로 전열효율이 떨어져 비효율적이다. 공공 건축물의 에너지 사용에 대해 신재생에너지의 사용 의무 부가(건축법) 등 실제적 조치로 인해 태양열, 태양광, 지열 등 신재생에너지의 보급이 급격히 이루어지고 있으나, 제주도의 경우 의무부가로 비효율적이지만 대부분 태양광시설을 하고 있는 실정이다.

제주에서 지하공기열을 이용한 지열기술의 효용성은 이미 시설재배 단지, 양돈장 보급으로 그 효용성이 입증되고 있으나, 지하공기를 이용한 지열시스템을 건축물의 신재생에너지원으로 보급하기에는 기술에 대한 표준화, 규격화 등 선결과제가 많아 이에 대한 기술 개발과 신뢰성 확보를 위한 검증이 필요한 실정이다. 본 연구는 이러한 필요성에서 비롯되었으며 본 연구의 결과 지중공기의 특성에 맞는 지열원 히트펌프 시스템의 설계·시공, 건축물의 공조시스템과 연계한 냉난방, 모니터링 및 제어시스템 그리고 운영 기술이 적용되었다.

본 연구에서 적용된 시스템에서 특정된 1일(2013년 1월 14일)의 동안의 평균 약 4.3의 성능계수를 나타났다. 전체 실험기간 동안(2012년 10월~2013년 3월) 시스템 평균 성능계수는 보수 및 수리기간을 제외하면 평균 3.8 이상으로 조사되어 지하공기열을 이용한 지열시스템이 건축물에 적용 가능함을 알 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

감사의 글

교직생활을 좀 더 새롭게 생각하고 배워가면서 가르치겠다는 일념으로 선택한 만학의 길이 15년 동안이라는 긴 여정 끝에 얻은 성취의 기쁨보다는 오히려 뭔가에 부족함이 많고, 무엇보다 논문작성 과정에서 병마와 시름하며 흔들릴 때 견디어낼 수 있도록 희망과 기회로 큰 힘이 돼 주신 분들에게 충심으로 감사의 말씀을 드리겠습니다.

노년의 새 삶을 준비해야하는 정년퇴임을 앞둔 시점까지 저에게 그 동안 논문의 결실을 맺을 수 있도록 깊은 배려와 심도 있는 지도를 아끼지 않으신 현명택 교수님께 먼저 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 바쁘신 학사일정 가운데에서도 논문심사를 맡아주시고 세심한 조언을 해주신 권기린 교수님, 정동원 교수님, 강창남 교수님과 원광대학교 모정하 교수님께도 감사를 드립니다. 더구나 박사과정을 통해 여러 가지로 미흡한 저에게 많은 관심과 남다른 배려를 이끼지 않으셨던 기계공학과 김귀식 교수님, 허종철 교수님, 임종환 교수님, 박윤철 교수님께도 감사를 드립니다. 특히 직장 일이 바쁨에도 마다하지 않고 다양한 정보로 실험실증에 크게 도움을 준 이동원 박사님, 김용환연구원, 기쁨과 어려움을 나누었던 홍남호 선생님, 양종훈 선생님, 김석우군, 양원호군, 강은철연구원, 고동관군을 비롯한 열전달 실험실 여러 선후배님들에게 이 글을 빌어 고마움을 전하며 항상 건강과 행복이 가득하시길 기원하겠습니다.

끝으로 오늘이 있기까지 늘 묵묵하게 바른길로 이끌어주시고 지켜봐주셨던 유명을 달리하신 부모님께 삼가 머리 숙여 고하며, 곁에서 사랑으로 열심히 기도해준 아내를 비롯한 형님내외, 고생하고 있는 동생들에게 고마운 마음을 또다시 되새깁니다. 앞으로도 계속 행복하고 은혜로운 마음으로 매사를 함께하면서 정진해나가도록 노력하겠습니다.

감사합니다.

2013년 12월 김 성 만

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY