



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](#)

공학 석사 학위 논문

다양한 변수에 따른 하이브리드 쿨링  
시스템의 성능 특성



2017년 8월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

성 요 한

공학 석사 학위 논문

# 다양한 변수에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 성능 특성

지도교수 손 창 효

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2017년 8월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

성 요 한

성요한의 공학석사 학위논문을 인준함.

2017년 8월



주 심 공학박사 최 광 환 ㉠

위 원 공학박사 김 은 필 ㉠

위 원 공학박사 손 창 효 ㉠

# 목 차

Abstract .....	iii
List of figures and tables .....	v
Nomenclature .....	vii
I. 서론 .....	1
1. 연구 배경 및 목적 .....	1
2. 하이브리드 쿨링 시스템의 작동원리 .....	4
3. 종래 연구 .....	6
II. 실험 장치 및 방법 .....	10
1. 실험 장치 .....	10
2. 실험 방법 및 조건 .....	20
3. 데이터 해석 방법 .....	23
III. 실험 결과 및 고찰 .....	25
1. 패드 부착 유무에 따른 영향 .....	26
가. 증발부에서 패드 부착 유무에 따른 영향 .....	26
나. 응축부에서 패드 부착 유무에 따른 영향 .....	30
2. 풍속에 따른 영향 .....	34
3. 외부 기상 조건의 변화에 따른 영향 .....	38
가. 외기 온도 변화에 따른 영향 .....	38

나. 외기 습도 변화에 따른 영향 .....	42
4. 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 변화에 따른 영향 .....	45
IV. 결론 .....	49
참고문헌 .....	51



# Performance characteristics of hybrid cooling system with various parameters

Yo-han Sung

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering  
Graduate School, Pukyong National University

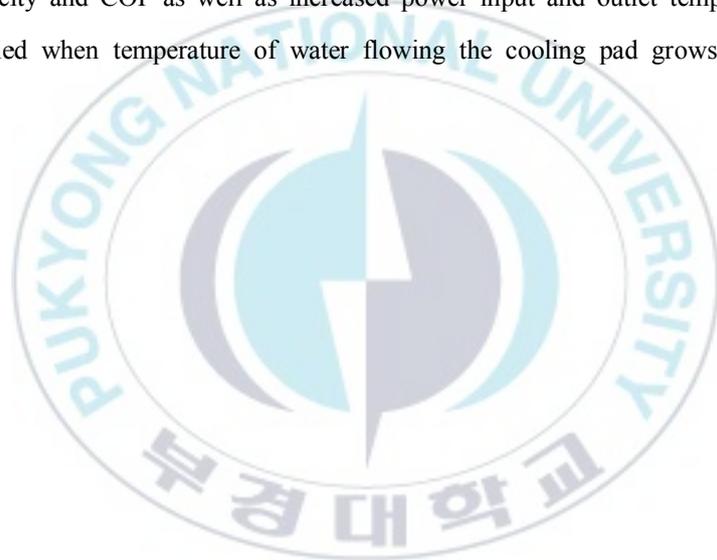
## Abstract

In South Korea, the average temperature in the summer season is higher than 30°C and it has large effect on various industries. Sweltering heat not only reduces the work efficiency of labors, but also causes the thermal illnesses such as heat stroke. Furthermore, most of domestic animals, like pigs and chickens, may be perished by diseases if they are exposed by the high temperature consistently. In order to save them from the heat wave, numerous efforts are carried out by installing a shading net, adjusting time of feeding, spraying mist and setting up a circulation fan. However, the methods haven't shown significant improvements even though they ease the damage.

The present study proposes a hybrid cooling system combining evaporative cooler and air-conditioner in order to resolve the conventional problems in the livestock industry by the high temperature. The hybrid cooling system replenish a lacking cooling capacity of the evaporative cooler by employing the conventional air-conditioner. The system inhales air by using a fan. After the induced air is cooled by the evaporation of water in the cooling pad, it is cooled again by an evaporator in the air-conditioner. Since the proposed system is very new concept in the relevant field, there are almost no literatures about it globally. Therefore, the present study focuses on presenting a basic design information of the hybrid cooling system for the future researches.

The experimental results are summarized as follows; The outlet temperature of air lowers and system coefficient of performance (COP) increases in case that the cooling pad is installed

in front of the evaporator. System power input and COP decreases and rises, respectively, when the cooling pad is located in front of a condenser. For an air velocity, the system COP shows minor changes even though the outlet temperature of air, system power input and cooling capacity grow with respect to it. The system cooling capacity and power input increase in case of surrounding temperature growth. In addition, the outlet temperature of air sharply rises and the system COP decreases. In case relative humidity grows, the system cooling capacity and COP declines even though the outlet temperature of air rises altogether. The system power input is almost steady with respect to the relative humidity, Decreases cooling capacity and COP as well as increased power input and outlet temperature of the air are verified when temperature of water flowing the cooling pad grows.



# LIST OF FIGURES, PHOTOGRAPHS AND TABLES

## FIGURES

- Fig. 1.1 Operating principle of cooling pad
- Fig. 1.2 Temperature of cooled air according to the outside air temperature and relative humidity
- Fig. 1.3 Schematic diagram of hybrid cooling system
- Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental equipment
- Fig. 2.2 Measurement position of Air velocity in square duct
- Fig. 3.1 Total cooling capacity and temperature of outlet air with respect to presence or absence of cooling pad in front of evaporator
- Fig. 3.2 Total COP and total power consumption with respect to presence or absence of cooling pad in front of evaporator
- Fig. 3.3 COP of refrigerator, Compressor power consumption and cooling capacity of evaporator with respect to presence or absence of cooling pad in front of condenser
- Fig. 3.4 COP, power consumption and cooling capacity of Hybrid Cooling System with respect to presence or absence of cooling pad in front of condenser
- Fig. 3.5 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different air velocity
- Fig. 3.6 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different air velocity
- Fig. 3.7 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different temperature of outdoor air
- Fig. 3.8 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different temperature of outdoor air

- Fig. 3.9 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different relative humidity of outdoor air
- Fig. 3.10 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different relative humidity of outdoor air
- Fig. 3.11 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different water temperature in cooling pad inlet
- Fig. 3.12 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different water temperature in cooling pad inlet

### PHOTOGRAPHS

- Photo. 2.1 Experimental equipment of hybrid cooling system
- Photo. 2.2 Evaporating part of hybrid cooling system
- Photo. 2.3 Condensing part of hybrid cooling system
- Photo. 2.4 Compressor
- Photo. 2.5 Expansion valve
- Photo. 2.6 Evaporator
- Photo. 2.7 Condenser
- Photo. 2.8 Fan
- Photo. 2.9 Cooling pad
- Photo. 2.10 Water pump
- Photo. 2.11 Heat pump

### TABLES

- Table 2.1 Experimental conditions of hybrid cooling system

# NOMENCLATURE

## SYMBOLS

COP	Coefficient of Performance	
G	Air volumetric flow rate	[m <sup>3</sup> /h]
h	Enthalpy	[kJ/kg]
m	Refrigerant mass flow rate	[kg/s]
Q	Cooling capacity	[kW]
T	Temperature	[°C]
W	Power consumption	[kW]

## SUBSCRIPTS

comp	compressor
CP	Cooling Pad
evap	evaporator
fan	fan
HCS	Hybrid Cooling System
in	inlet
out	outlet
OA	outlet air
ref	refrigerator
total	total
TCC	Total Cooling Capacity

# I. 서론

## 1. 연구 배경 및 목적

국내의 30°C가 넘는 한여름의 고온 다습한 날씨는 산업 및 축산업에 큰 영향을 끼친다. 폭염은 산업에 종사하는 근로자들의 작업 능력을 저하시키고 열사병과 같은 온열 질환을 발생시킨다. 그리고 닭, 돼지와 같은 가축들의 상한 임계 평균 온도는 대략 25~26°C이며, 그 이상의 온도에서는 가축이 체열을 신속하게 발산하지 못해 호흡과 심장박동이 빨라지며 발육 및 번식장애 등 질병이 발생할 확률이 높아지고 심할 경우 폐사로 연결된다. 국내의 6~8월까지의 평균 기온은 23~27°C이며, 일일 최고 기온은 28~34°C로 상한 임계 온도를 넘기 때문에 가축의 건강에 악영향을 끼친다.<sup>(1)</sup> 2016년 9월 9일자 농민신문에 따르면 폭염으로 폐사된 가축이 430만 마리가 넘는 것으로 나타났다. 위와 같은 여름철 더위 피해에 대한 대책이 필요한 실정이다.

이러한 더위에 대한 문제를 빠르고 쉽게 해결하는 방법으로는 에어컨을 사용하는 방법이 있다. 하지만 공장 및 축사는 냉각해야하는 공간이 매우 넓고 발열이 많기 때문에 에어컨이 감당해야하는 부하가 크고, 그에 따라 전기세를 감당하기 힘들다. 그 외에 이용되고 있는 대책으로 차광막 설치, 사료 급여 시간 조절, 안개 분무, 순환 팬 설치 등이 있다. 하지만 위의 방법들을 적용하여도 더위에 대한 피해를 막기에는 역부족이다.

외국에서는 더위에 대한 대책으로 증발식 냉풍기를 사용하고 있다. 증발식 냉풍기는 물의 증발을 이용하여 공기를 냉각시키는 에어 쿨러이며 쿨링 패드, Fan, 물펌프로 구성되어 있다. Fig. 1.1과 같이 물은 쿨링 패드의 상부에서 하부로 흐르고, 공기는 팬에 의해 물의 흐름과 수직되는 방향으로 쿨링 패드를 통과하게 된다.<sup>(2)</sup> 이 때, 물과 공기가 접촉하면서 물의 증발이 일어나게 된다. 물은 증발하기 위해 주변으로부터 열을 흡수하는데, 이 열을 쿨링 패드를 통과하는 공기로부터 흡수한다. 이와 같은 원리로 쿨링 패드를 통과하는 공기는 냉각이 된다. 그리고 증발에 의한 냉각 외에도 유입되는 공기보다 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 더 낮으면 현열교환이 일어나 공기가 냉각된다.

증발식 냉풍기의 구동원은 팬과 물 펌프이며, 이 장비들은 소요 동력이 증기 압축식 냉각 시스템보다 소비 전력이 작기 때문에 유지비용이 적다는 장점이 있다.

증발식 냉풍기에 대한 종래 연구는 다양하게 진행되어왔다. 연구 내용으로는 쿨링 패드의 각도와 형상에 따른 연구, 풍속에 따른 효율 분석, 증발식 냉풍기의 열 및 물질 전달에 대한 특성 연구, 쿨링 패드 재료에 따른 성능 분석 등이 있으며, 연구는 다양하게 수행되고 있다. 하지만 위의 연구들은 외국에서 진행되었으며 국내 연구는 전무한 실정이다.

외국에서 일반적으로 증발식 냉풍기에 대한 연구가 활발히 진행되고 많이 사용되고 있는 지역의 기후는 고온 건조하다. 그 이유는 물의 증발은 공기의 온도가 높고 습도가 낮을수록 잘 일어나고, 증발이 잘 일어날수록 쿨링 패드에서 공기를 냉각 시키는 효율이 상승하기 때문이다.

반면 국내의 여름철 기후는 고온 다습하기 때문에 증발식 냉풍기를 사용하는 외국에 비해 증발이 잘 일어나지 않는다. 그에 따라 쿨링 패드에서 냉각시키는 열량이 감소하여 효율이 떨어진다는 문제점이 있다.

Fig. 1.2는 쿨링 패드 입구의 공기 온도와 습도에 따른 취출 공기의 온도를 나타내는 그래프이다. 이 그래프에 의하면 국내 여름철 한 낮의 외기 조건인 건구온도 32℃, 상대 습도 65%인 공기가 쿨링 패드를 통과하면 약 27℃로 공기가 냉각되는 것을 알 수 있다. 이는 더위에 가장 취약한 닭과 돼지의 상한 임계 온도 보다 높은 온도이며, 더위에 대한 피해를 줄이기 위해서는 추가적인 냉각이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 위의 문제점들을 해결하기 위해 증발식 냉풍기와 에어컨을 결합한 하이브리드 쿨링 시스템을 제안하고 있다. 하이브리드 쿨링 시스템에 대한 연구는 국내외에 전무한 상황이므로 기초 연구가 필요한 실정이다. 연구 목표는 국내 기후에 적합한 하이브리드 쿨링 시스템에 대하여 공기 및 냉매 특성을 고찰하여 설계에 대한 기초 자료를 제공하는 것이다.

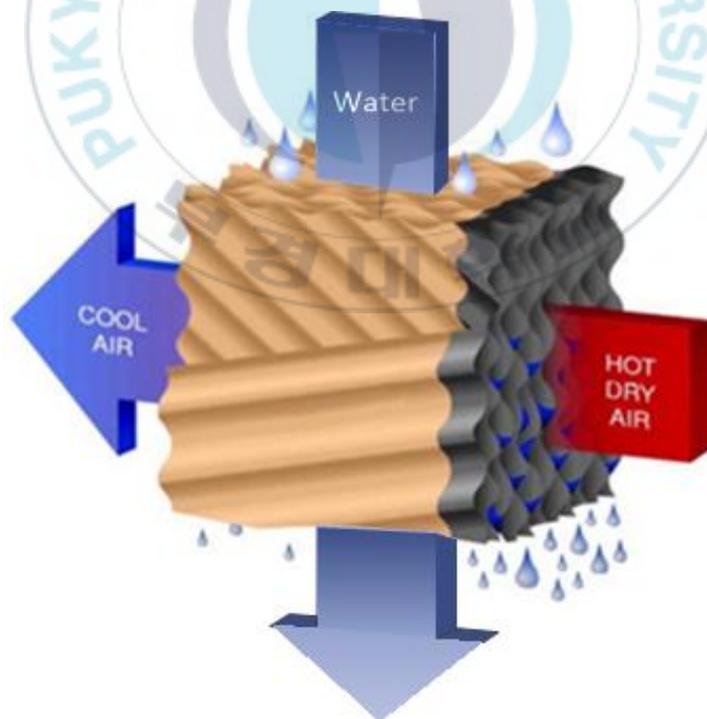


Fig. 1.1 Operating principle of cooling pad

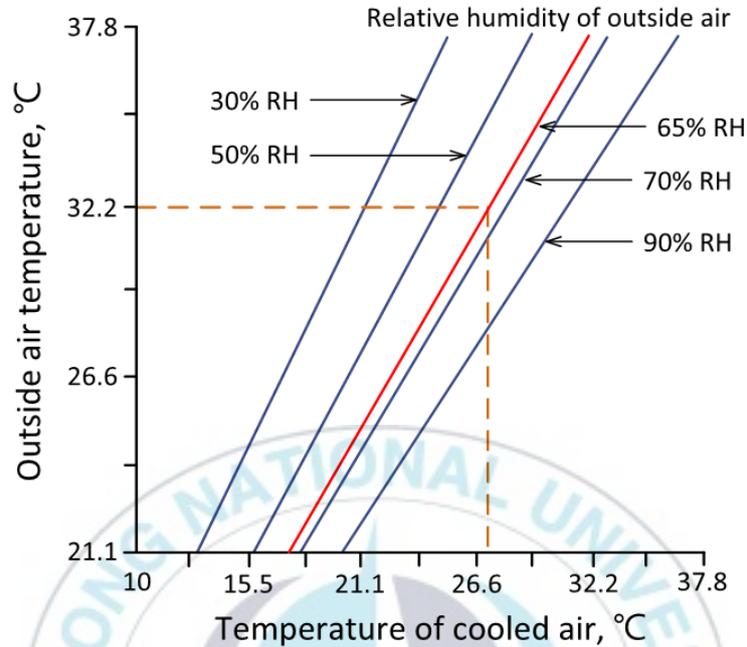


Fig. 1.2 Temperature of cooled air according to the outside air temperature and relative humidity

## 2. 하이브리드 쿨링 시스템의 작동 원리

하이브리드 쿨링 시스템이란 국내 기후에서 증발식 냉풍기의 부족한 냉각 열량을 보충하기 위해 에어컨의 증발기와 쿨링 패드를 결합한 냉방 장치이다. 장치의 개략도는 Fig. 1.3과 같다.

장치로 유입된 공기는 먼저 쿨링 패드를 지나면서 물의 의한 증발로 인해 1차 냉각된다. 이 과정에서 현열 교환, 증발 잠열 교환, 물질 교환이 일어난다. 현열 교환은 쿨링 패드에 흐르는 물과 공기의 건구 온도 차에 의해 발생하는 열 교환이며, 증발 잠열 교환은 물과 공기가 접촉할 때 물의

증발로 인해 공기에서 물로 열이 전달되는 교환이다. 그리고 물질 전달은 물의 증발에 의해서 물에서 공기로 물 분자가 이동하는 전달 현상이다. 쿨링 패드를 통과하는 공기는 현열 교환과 증발 잠열 교환에 의해 냉각되고 물질 전달 현상에 의해서 습도가 증가한다.

쿨링 패드를 통과한 공기는 증발기를 지나면서 2차 냉각된다. 쿨링 패드에서 공기가 예냉되기 때문에 증발기에서 감당하는 열 부하는 감소하게 되고 그에 따라 압축기 소요 동력이 감소한다.

그리고 응축기 앞에 쿨링 패드를 설치하여 응축기로 유입되는 공기의 온도를 감소시켜 응축온도를 낮춘다. 응축온도가 낮아짐에 따라 냉매 질량 유량이 감소하고 압축기 소요 동력이 감소한다.

하이브리드 쿨링 시스템의 장점은 동일 냉각능력의 에어컨 보다 소요 동력이 적다는 점이다. 그 이유는 쿨링 패드의 구동원은 압축기에 비해 소요 동력이 적게 들기 때문이다. 그리고 쿨링 패드가 응축 온도를 낮추기 때문에 압축기 소비 동력을 줄여 더욱 경제적으로 장치를 가동할 수 있다.

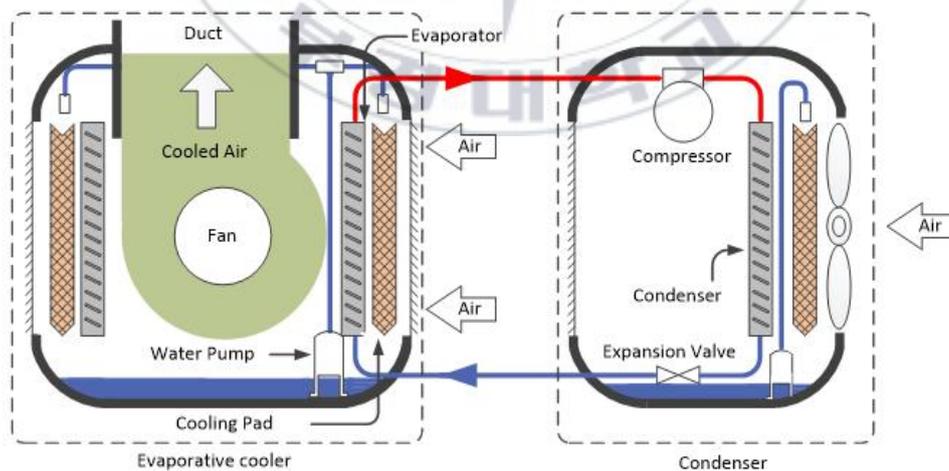


Fig. 1.3 Schematic diagram of hybrid cooling system

### 3. 종래 연구

하이브리드 쿨링 시스템에 대한 연구는 국내 및 국외에서 연구된 사례가 전무한 상태이다. 하지만, 이와 관련된 증발식 냉풍기에 대한 국외 연구는 다소 있다. 국내에서 증발식 냉풍기에 대한 연구는 앞에서 서술한 것과 같이 미비한 실정이다. 따라서 본 절에서는 연구와 관련된 외국의 증발식 냉풍기에 대한 종래 연구를 살펴보면 다음과 같다.

#### 가. 증발식 냉풍기 시스템에 관한 종래 연구

Wasim Saman 등<sup>(3)</sup>은 증발식 냉각기(Evaporative cooler)의 종류와 특징을 설명하였다. 증발식 냉풍기는 직접식, 간접식, 직간접식 3가지 종류로 나눈다. 증발식 냉풍기의 쿨링 패드를 통과하는 공기가 물의 증발 작용에 의해 냉각되는 원리이며, 물 분배기에서 배출된 물이 쿨링 패드의 상부에서 하부로 흐르는데 이 물과 Fan에 의해 유입된 공기가 서로 열교환한다. 물과 공기가 직접 접촉하기 때문에 패드를 통과한 공기의 습도는 상승한다. 간접식은 쿨링 패드가 아닌 열교환기에서 물과 유입되는 외부 공기가 서로 열교환 한다. 공기와 물이 직접 접촉하지 않기 때문에 입출구 공기의 습도는 일정하다. 직간접식은 직접식과 간접식 두 종류를 모두 사용하는 방법이다. 유입된 외부 공기는 간접식 열교환기를 통과하면서 1차 냉각되고 이후 직접식 쿨링 패드를 지나면서 다시 2차 냉각된다.

Ramin Faramarzi 등<sup>(4)</sup>은 공랭식 응축기와 증발식 응축기의 성능을 비교하였다. 그 결과, 증발식 응축기의 성능이 공랭식 응축기 보다 약 51% 더 높게 나타났다.

X. Cui 등<sup>(5)</sup>은 간접 증발식 냉풍기(Indirect Evaporative Cooler) 관련하

여 직교류 열교환기와 재생식 열교환기를 비교하였다. 그 결과 동일한 유량일 때, 직교류 열교환기에 비해 재생식 열교환기의 출구 공기 온도가 더 낮게 나타나고 장치의 COP는 높게 나타났다.

X. Cui 등<sup>(6)</sup>은 고온 다습한 기후의 조건에서 간접 증발식 냉풍기와 냉동기를 결합한 하이브리드 시스템을 실험하였다. 간접 증발식 냉풍기의 종류로는 대항류 타입과 재생식 타입을 사용하였다. 실험 조건은 흡입 온도는 30~37.5℃ 이고 흡입 공기의 상대습도는 70~90%이다. 실내에서 배출되는 공기는 건구 온도가 25℃, 상대습도가 50%이다. 실험 결과로는 재생식 타입을 예냉에 사용한 경우가 대항류 타입을 사용한 경우보다 예냉에 공급되는 공기의 온도와 상대습도가 낮게 나타났다. 그리고 간접 증발식 냉풍기를 냉동기에 공급되는 공기를 예냉하는데 사용하면 냉동기의 냉각 부하를 35~47% 감소시킨다.

Ghassem Heidarinejad 등<sup>(7)</sup>은 다양한 기후에서 간접 증발식 냉풍기와 직간접 증발식 냉풍기(Two-stage evaporative cooler)를 비교하였다. 그 결과 간접 증발식 냉풍기는 55~61%, 직간접 증발식 냉풍기는 108~111%의 효율을 보인다. 직간접 증발식 냉풍기는 에어컨 보다 소비동력을 약 33% 감소시킨다.

Ghassem Heidarinejad 등<sup>(8)</sup>은 지열을 이용하여 냉각한 물을 사용하는 하이브리드 시스템(Hybrid system(Ground heat exchanger & Direct evaporative cooler))과 직접 증발식 냉풍기(Direct evaporative cooler)를 비교하였다. 그 결과 하이브리드 시스템의 냉각 효과는 직접 증발식 냉풍기보다 100% 이상의 효율을 보인다.

지금까지 증발식 냉각기와 관련된 종래의 연구를 살펴보았다. 그 결과, 냉각 효율은 직접, 간접, 직간접 증발식 냉풍기 순으로 높게 나타난다. 증기 압축식 냉동장치의 예냉 장치로 증발식 냉풍기를 사용하면 냉각 부하를

감소시킬 수 있다. 증발식 냉풍기 관련 종래 연구들은 다양한 기후에서 진행되었으나 국내의 여름철 기후와 맞는 기후에서 진행된 연구가 부족한 실정이다.

#### 나. 쿨링 패드에 관한 종래 연구

J.M. Wu 등<sup>(9)</sup>은 직접 증발식 냉풍기에서 공기와 수막 사이에서의 열과 물질 전달에 대해 분석하였다. 그 결과로는 다음과 같다. 쿨링 패드로 유입되는 공기의 유속과 패드의 두께는 직접 증발식 냉풍기의 냉각효과에 큰 영향을 미친다. 이 실험에서 가장 최적의 공기 유속은 2.5 m/s이다. 공기 유속은 패드의 면적을 결정한다. 공기의 유속을 낮추려면 패드의 면적이 넓어야 한다.

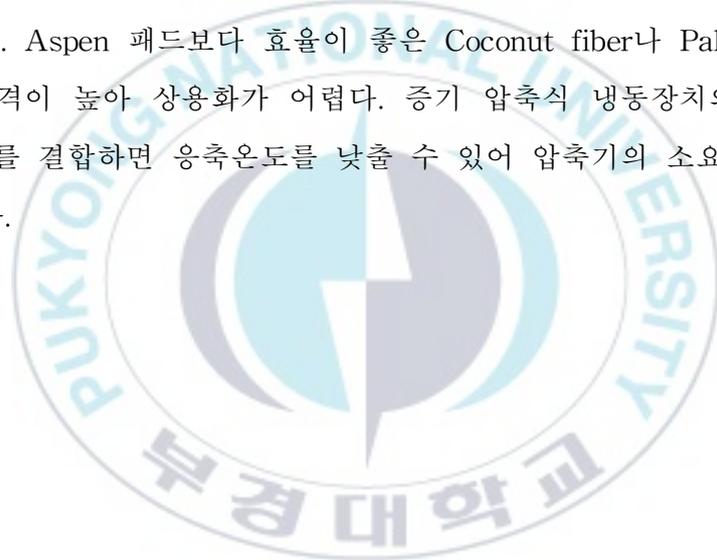
J.K. Jain 등<sup>(10)</sup>은 Aspen and khus 재질의 패드와 Coconut fibers and palash fiber 재질의 패드를 비교하였다. 그 결과 Palash fiber의 패드 효율이 Aspen과 khus 패드의 효율보다 13.2%와 26.31% 높게 나타났다. 쿨링 패드의 재료로 Aspen fibers를 사용하는 것보다 Palash fibers를 사용하는 경우가 효율이 좋다.

Abollah Malli 등<sup>(11)</sup>은 셀룰로오스 쿨링 패드(Cellulosic evaporative cooling pad)에 대해서 압력 강하, 습도 분포, 효율 등에 관하여 실험적 분석을 하였다. 셀룰로오스 쿨링 패드는 두가지 종류(5090과 7090)를 실험에 사용하였다. 패드의 면적은  $0.5 \times 0.5$  m<sup>2</sup>이고 두께는 75, 100, 150mm 이다. 그 결과 압력 강하와 증발되는 물의 양은 유속이 증가할수록, 쿨링 패드의 두께가 증가할수록 증가한다. 그 반면 효율과 습도는 유속이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

Xiaoli Hao 등<sup>(12)</sup>은 증발식 공기 냉각기(Evaporative air-cooled chiller)

시스템에서 패드의 최적의 두께를 실험을 통해서 분석하였다. 공기 냉각기 (Air-cooled chiller)의 응축부와 직접 증발식 냉풍기를 결합한 시스템으로 실험하였으며 결과는 다음과 같다. 패드의 두께가 커질수록, 공기 유속이 낮을수록 공기가 많이 냉각되어 응축 온도를 낮춘다. 응축 온도가 내려가면 압축 일량이 줄어들어 에너지를 절약할 수 있다.

지금까지 쿨링 패드와 관련된 종래의 연구를 살펴보았다. 그 결과, 쿨링 패드의 효율을 높이기 위해서는 패드 내부로 유입되는 공기의 유속이 낮아야 하며, 패드의 두께가 커야한다. 쿨링 패드에 많이 사용되고 있는 재질은 Aspen이다. Aspen 패드보다 효율이 좋은 Coconut fiber나 Palash fiber가 있지만 가격이 높아 상용화가 어렵다. 증기 압축식 냉동장치의 응축기와 쿨링 패드를 결합하면 응축온도를 낮출 수 있어 압축기의 소요 동력을 줄일 수 있다.



## Ⅱ. 실험 장치 및 방법

### 1. 실험 장치

하이브리드 쿨링 시스템 실험 장치(Photo. 2.1)는 쿨링 패드와 증발기에서 공기의 성능 특성 변화를 관측하여 더욱 성능이 좋고 경제적인 설계 조건을 찾기 위해 제작하였다. 실험 장치의 전체 개략도는 Fig. 2.1과 같고, Photo. 2.2와 2.3과 같이 장치는 크게 증발부와 응축부로 구성되어 있다. 증발부는 Fan, 쿨링 패드, 증발기, 온도식 팽창 밸브로 구성되어 유입되는 공기를 냉각한다. 증발부에서 쿨링 패드의 유무에 따른 성능을 분석하기 위해 쿨링 패드를 탈부착 할 수 있도록 제작하였다. 그리고 응축부는 압축기, 응축기, 수액기, 솔레노이드 밸브, 쿨링 패드 등으로 구성되어 열을 배출한다. 응축기의 전면에서의 쿨링 패드의 유무에 따른 성능을 분석하기 위해 증발부와 같이 쿨링 패드를 탈부착 할 수 있도록 제작하였다.

하이브리드 쿨링 시스템 실험 장치에는 냉매 순환 루프, 공기 순환 루프, 물 순환 루프가 있다. 먼저 냉매 순환 루프를 살펴보면 다음과 같다. 증발기에서 나온 냉매 증기는 플렉시블 동관을 통해 사이트 글라스를 지나게 된다. 사이트 글라스를 지난 저온 저압의 냉매 증기는 압축기로 유입된 후, 고온 고압의 상태로 토출된다. 압축기를 나온 냉매 증기는 응축기로 들어가게 된다. 응축기에서는 고온 고압의 냉매 증기와 외부 공기가 직교류로 간접 열교환을 하게 되고, 그 영향으로 냉매는 냉각되면서 응축기 출구에

서 액 상태로 나오게 된다. 응축기를 나온 냉매액은 수액기와 필터 드라이어를 통과하고, 그 후 솔레노이드 밸브를 지나 질량 유량계를 통과한다. 질량 유량계를 지난 냉매액은 온도식 팽창밸브를 지나면서 저온 저압의 냉매액이 된다. 이후 냉매액은 증발기로 유입되고 공기와 직교류로 간접 열교환을 한다. 이 때, 냉매가 증발하면서 장치로 유입된 공기는 열을 빼앗겨 냉각된다. 증발기를 지난 냉매는 저온 저압의 냉매 증기이며, 위의 경로대로 재순환하게 된다.

냉매 순환 루프에 사용된 장치 중 응축부의 콘덴서 유닛은 (주)중원냉열사의 Hi-030모델로 압축기, 응축기, 수액기, 솔레노이드밸브, 응축기 팬으로 구성되어있다. 압축기(Photo. 2.4)는 Copeland사의 스크롤 압축기이며, 압축기 모터는 단상 220V/60Hz 정격 운전에서 3kW의 전력을 소비한다. 팽창밸브(Photo. 2.5)는 ALCO사의 온도식 자동팽창밸브이며 증발기 출구에 부착된 감온통이 냉매의 과열도를 감지하여 냉매 유량을 조절한다. 증발기(Photo. 2.6)와 응축기(Photo. 2.7)는 공랭식 열교환기이며 동관을 이용하여 제작되었다. 동관의 외경은 10mm이며 88개의 관으로 제작되었다. 증발기는 4열 병렬로 관이 배치되고 응축기는 3열 병렬로 배치되어있다. 각 관의 길이는 0.65m이다.

온도 센서와 압력 센서는 증발기 입출구, 응축기 입출구에 각각 하나씩 설치하여 각 지점의 냉매 특성을 측정한다. 그리고 압축기에 파워미터를 연결하여 압축기 소요 동력을 측정한다. 질량유량계는 팽창밸브와 응축기 사이에 연결하여 액상태의 냉매 유량을 측정한다.

공기 순환 루프는 다음과 같다. 증발부의 Fan에 의해 외부 공기는 하이브리드 쿨링 시스템으로 유입된다. 유입된 공기는 먼저 쿨링 패드를 통과하면서 1차 냉각되고 이후 증발기를 통과하면서 냉매에 의해 2차 냉각된다.

공기 순환 루프의 구성요소인 Fan(Photo. 2.8)은 Taizhou Qidi Environmental Air Conditioner Technology사의 YK139-400-6 모델이며 220V/6극/단상 제품이다. 정격에서 작동했을 때, 0.4kW 전력을 소모한다. 쿨링 패드(Photo. 2.9) 제조 회사는 Fan 제조 회사와 동일하며 가로 0.9m, 세로 0.9m, 높이 0.1m로 부피는 0.081m<sup>3</sup>다. 그리고 쿨링 패드 종류는 5060 패드이다.

증발부에서 온도 센서는 쿨링 패드 입출구, 증발기 출구, 증발부 출구에 각 4포인트씩 부착하고, 습도 센서는 쿨링 패드와 증발기 사이, 증발기 출구에 각 하나씩 부착하여 실험한다. Fan의 소요 동력을 측정하기 위해서 파워미터를 연결하였으며 Fan의 회전수를 조절하기 위해 인버터를 연결한다.

물 순환 루프는 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 공기의 냉각에 영향을 주기 때문에 온도를 유지시키기 위해 고안되었다. 증발부와 응축부에 각각 수조가 설치가 되어있으며 수조 안의 물 온도를 유지시키기 위해 펌프(Photo. 2.10)를 이용하여 히트 펌프(Photo. 2.11)로 물을 순환시킨다. 수조 안 물의 온도가 유지되면 수조 내부에 있는 소형 펌프에 의해 쿨링 패드 상단에 물을 뿌리며, 쿨링 패드를 통과한 물은 다시 수조로 돌아온다.

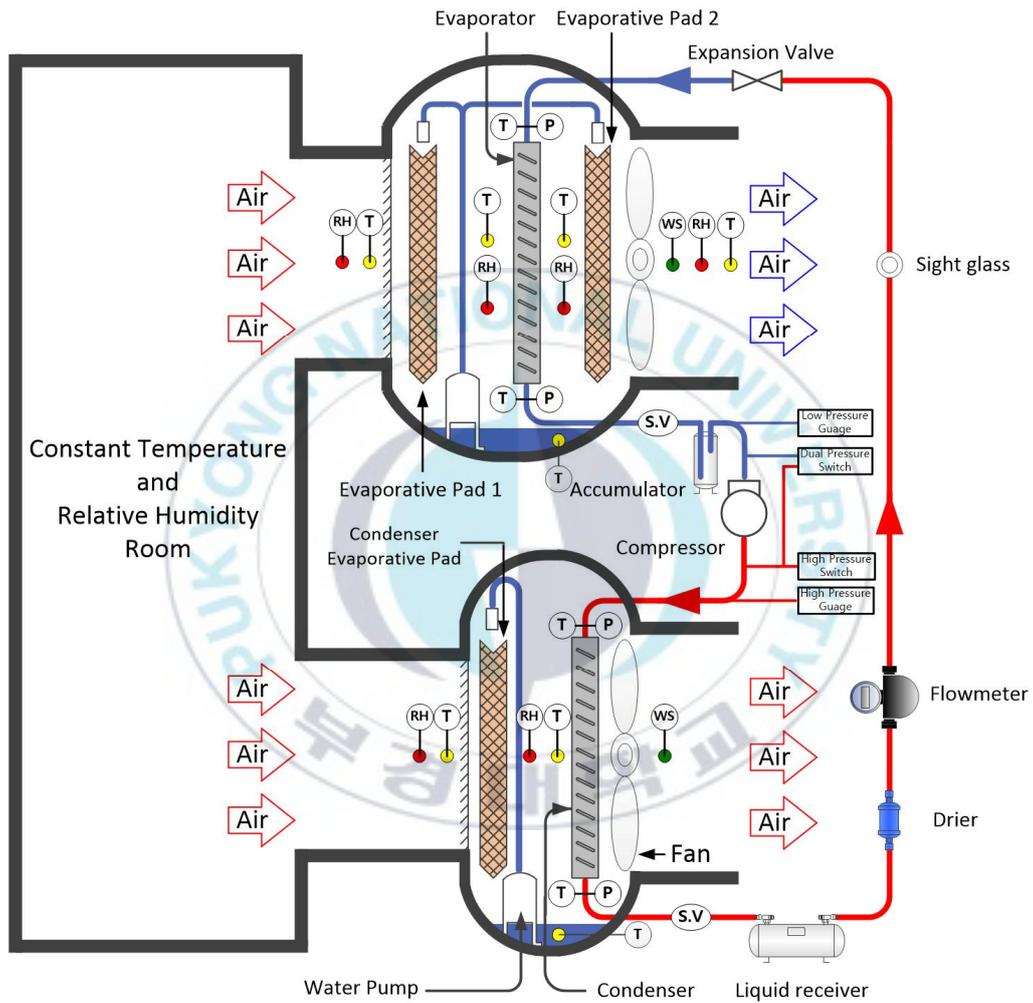


Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental equipment

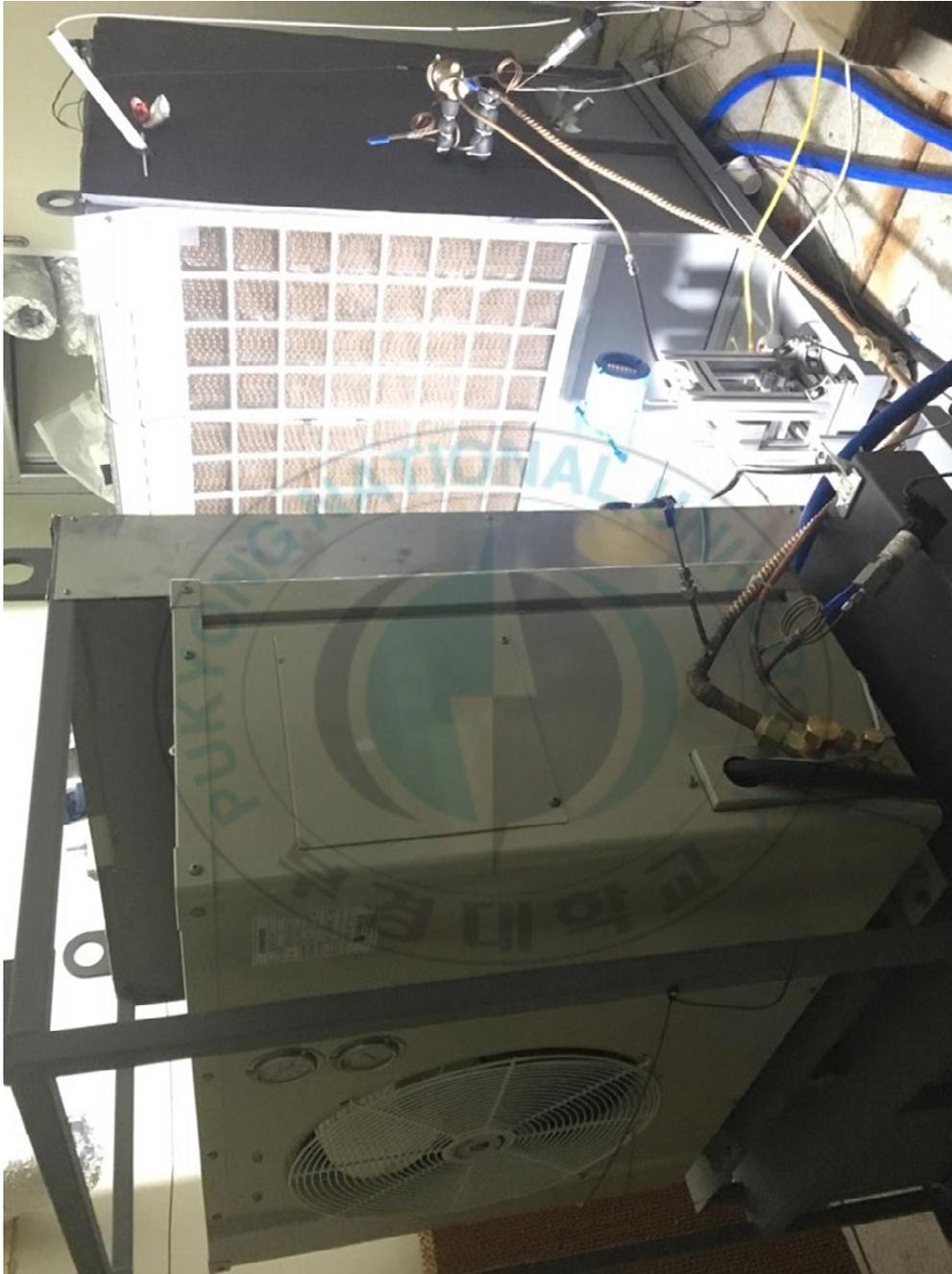


Photo. 2.1 Experimental equipment of hybrid cooling system



Photo. 2.2 Evaporating part of hybrid cooling system



Photo. 2.3 Condensing part of hybrid cooling system



Photo. 2.4 Compressor



Photo. 2.5 Expansion valve



Photo. 2.6 Evaporator



Photo. 2.7 Condenser



Photo. 2.8 Fan



Photo. 2.9 Cooling pad



Photo. 2.10 Water pump



Photo. 2.11 Heat pump

## 2. 실험 방법 및 조건

장치에 R22 냉매를 충전하기 전에 기밀성을 시험한다. 장치 내에 질소를 충전하여 하루 경과 후에 누설이 없을 경우 냉매 충전을 시작한다. 냉매 충전은 매니폴드 게이지와 진공 펌프를 이용한다. 매니폴드 게이지의 고압 호스와 장치의 고압측 서비스 밸브를 연결하고, 저압측 호스와 저압측 서비스 밸브를 연결한다. 그 후, 중간 호스를 진공 펌프에 연결하여 장치 내의 공기 혹은 질소를 모두 제거하여 장치 내부를 진공으로 만든다. 진공 펌프를 가동하기 전에 솔레노이드 밸브를 필히 분해하고 전자석을 올려 밸브가 개방되도록 한다. 진공 상태가 만들어지면 매니폴드 게이지의 고압 밸브와 저압 밸브를 잠근 뒤 진공 펌프를 분리하고 R22 냉매 가스통을 연결한다. 냉매 가스통을 살짝 열고 중간 호스의 상단부를 열어 호스 내부의 공기를 제거한다. 공기 제거가 완료되면 중간 호스를 다시 잠근 뒤 매니폴드 게이지의 고저압 밸브를 열어 냉매 주입을 시작한다. 냉매 주입이 완료되면 압축기를 일정 시간 가동한다. 그 후, 장치의 고압, 저압을 확인하여 적절한 양의 냉매를 주입했는지 확인한다.

냉매 주입이 완료되면 향온 향습기를 가동하여 향온 향습실 내의 온도와 습도를 실험 조건에 맞춘다. 온습도를 조절 하는 동시에 수조의 순환 펌프와 히트펌프를 가동하여 수조 물 온도를 실험 조건에 맞게 조정한다.

실험 조건이 만들어지면 압축기, 팬, 쿨링 패드 소형 펌프를 가동하여 장치들을 정상 상태로 만든다. 인버터를 이용하여 팬의 회전수를 조정하여 풍속을 조정한다. 풍속은 시스템의 공기 취출구(0.5m×0.5m)에 2m길이의 덕트를 연결하여 그 끝부분에서 측정한다. 측정 방법은 정방형 덕트 풍속 측정법을 이용하여 16개의 포인트에서 풍속을 측정한 뒤 평균을 한다. 16

개 포인트의 위치는 Fig. 2.2와 같다.

실험을 할 수 있는 준비가 완료되면 각 데이터 수집 장치들을 작동시켜 데이터 수집을 한다. 측정은 장치가 정상 상태일 때, 10분 이상 측정한다. 측정이 완료되면 실험 변수를 변경하여 데이터 수집을 반복 실시한다.

실험은 패드 부착 유무에 따른 성능을 알아보기 위해 실험 Case를 3가지로 나누어 실험하였으며, 그중 가장 성능이 좋은 Case로 외부 기상 조건의 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 성능을 실험하였다. 실험 조건들을 표로 정리하면 Table 2.1와 같다.

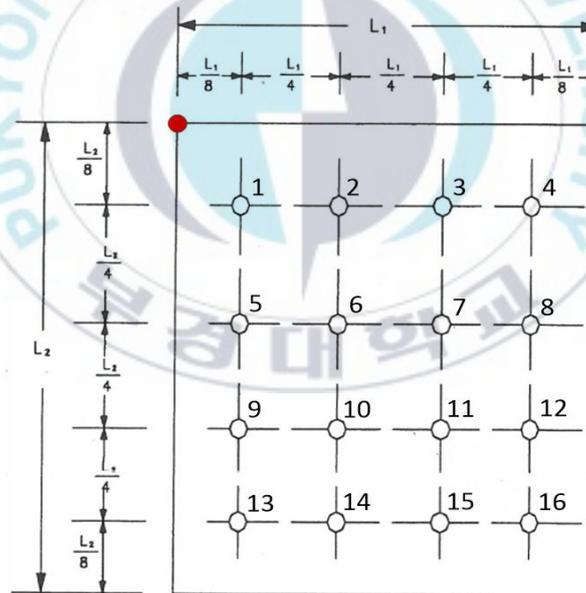


Fig. 2.2 Measurement position of Air velocity in square duct

Table 2.1 Experimental conditions of hybrid cooling system

Conditions	Value
Case	Case 1 : No cooling pad Case 2 : Cooling pad of evaporator Case 3* : Cooling pad of evaporator Cooling pad of condenser
Temperature of outdoor air [°C]	29, 30.5, 32*
Relative humidity of outdoor air [%]	62, 65*, 68
Air velocity [m/s]	2.1, 2.28, 2.42*
Water temperature of cooling pad inlet [°C]	20, 25*, 30
Evaporating temperature [°C]	10~14
Condensing temperature [°C]	41~48
Refrigerant	R22
Cooling pad volume [m <sup>3</sup> ]	0.081(0.9m×0.9m×0.1m)

\* : Standard conditon

### 3. 데이터 해석 방법

본 연구에서 사용된 냉매의 물성값 및 공기의 물성값은 EES (Engineering Equation Solver) 프로그램을 이용하였고, 실험을 분석하기 위해서 다음과 같은 식을 사용하였다. 먼저 쿨링 패드 부착 유무에 따른 하이브리드 쿨링 시스템과 일반 에어컨을 비교하기 위해 시스템 전체 냉각 열량( $Q_{TCC}$ ), 소비 전력( $W_{total}$ ), COP( $COP_{total}$ )의 수식은 다음과 같다.

$$Q_{TCC} = Q_{evap} + Q_{CP} = m \cdot (h_{evap,out} - h_{evap,in}) + G \cdot (h_{CP,in} - h_{CP,out}) \quad (2.1)$$

$$W_{total} = W_{comp} + W_{fan} \quad (2.2)$$

$$COP_{total} = \frac{Q_{TCC}}{W_{total}} \quad (2.3)$$

위 식에서  $Q_{evap}$ 와  $Q_{CP}$ 는 증발기와 쿨링 패드의 냉각 열량이고,  $m$ 과  $G$ 는 냉매의 질량 유량과 공기의 풍량을 나타낸다. 그리고  $h_{evap,in}$ 과  $h_{evap,out}$ 은 증발기 입구와 출구의 냉매 엔탈피를 나타내며,  $h_{CP,in}$ 과  $h_{CP,out}$ 은 쿨링 패드의 입구와 출구에서 공기의 엔탈피를 나타낸다.  $W_{comp}$ 와  $W_{fan}$ 은 압축기 소비 동력과 Fan의 소비 동력을 나타낸다.

그리고 냉동기의 COP는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

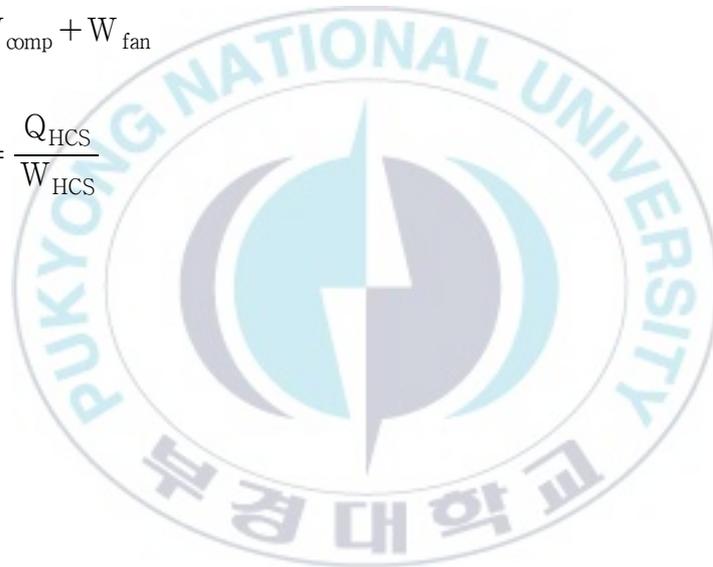
$$\text{COP}_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{W_{\text{comp}}} = \frac{m \cdot (h_{\text{evap,out}} - h_{\text{evap,in}})}{W_{\text{comp}}} \quad (2.4)$$

하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량( $Q_{\text{HCS}}$ ), 소비 동력( $W_{\text{HCS}}$ ), COP ( $\text{COP}_{\text{HCS}}$ )는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{\text{HCS}} &= Q_{\text{evap}} + Q_{\text{CP}} \\ &= m \cdot (h_{\text{evap,out}} - h_{\text{evap,in}}) + G \cdot (h_{\text{CP,in}} - h_{\text{CP,out}}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$W_{\text{HCS}} = W_{\text{comp}} + W_{\text{fan}} \quad (2.6)$$

$$\text{COP}_{\text{HCS}} = \frac{Q_{\text{HCS}}}{W_{\text{HCS}}} \quad (2.7)$$



### Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

하이브리드 쿨링 시스템은 쿨링 패드의 부착 유무, 풍속, 외기의 온도와 습도, 흐르는 물의 온도 등 기초 설계에 영향을 끼치는 요인은 다양하다.

먼저 증발부와 응축부에서 쿨링 패드의 부착 유무에 따른 성능 실험을 통해 가장 성능이 좋은 경우를 찾아내어 기본 설계 조건으로 정한다. 증발부에 쿨링 패드를 설치하면 에어컨 단독 작동에 비해 더 큰 냉각 열량을 얻을 수 있고, 응축부에 쿨링 패드를 설치하면 응축 온도가 낮아지면서 압축기의 소비 동력을 낮출 것으로 예상되기 때문에 실험을 통해 얼마나 개선되는지 알아본다. 그 후 팬의 회전수를 조절하여 풍속에 따른 시스템의 성능 분석한다.

그리고 외기의 조건에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 성능을 분석하기 위해 외기 온도, 습도, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도를 변화시키면서 성능 특성을 분석한다.

## 1. 패드 부착 유무에 따른 영향

### 가. 증발부에서 패드 부착 유무에 따른 영향

하이브리드 쿨링 시스템은 증발기 앞 쿨링 패드 부착 유무에 따라 증발기로 유입되는 공기의 온도와 습도가 달라진다. 그에 따라 증발기의 성능이 달라지고 시스템에 영향을 주게 된다. 하이브리드 쿨링 시스템의 성능을 입증하기 위해서 증발기 앞에 쿨링 패드를 부착하지 않은 경우(Case 1)와 쿨링 패드를 부착한 경우(Case 2)를 비교하면 다음과 같다.

Fig. 3.1은 일정한 외기 온도와 상대습도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 증발기 앞 쿨링 패드의 부착 유무에 따른 장치의 시스템 총 냉각 능력( $Q_{TCC}$ )과 취출되는 공기의 온도( $T_{OA}$ )를 나타낸다. 시스템 총 냉각 능력은 Case 2보다 Case 1이 높게 나타났다. Case 1의 시스템 총 냉각 능력은 증발기만의 냉각 열량이고, Case 2의 시스템 총 냉각 능력은 증발기의 냉각 열량과 쿨링 패드의 냉각 열량의 합이기 때문에 Case 2의 냉각 열량은 Case 1보다 쿨링 패드의 냉각 열량만큼 더 크게 나타난다. 취출되는 공기의 온도는 Case 2가 Case 1보다 낮게 나타나는데, 이는 Case 2의 시스템 총 냉각 능력이 더 크고 그에 따라 공기를 더 냉각시키기 때문이다.

Fig. 3.2는 일정한 외기 온도와 상대습도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 증발기 앞 쿨링 패드의 부착 유무에 따른 시스템의 성능계수( $COP_{total}$ )와 소비 동력( $W_{total}$ )을 나타낸다. 먼저 시스템의 총 소비 동력은 Case 2가 Case 1보다 작게 나타나지만 그 차이가 매우 작다. Case 2의 경우 시스템으로 유입된 공기가 쿨링 패드에서 예냉되고 그 후에 증발기로

유입되기 때문에 증발기의 냉각 열량이 줄어든다. 증발기의 냉각 열량이 줄어드는 만큼 과열도가 줄어들고 팽창밸브의 개도가 작아진다. 팽창밸브의 개도가 작아지면서 냉매의 질량 유량은 감소하고 압축기 소비 동력도 줄어들기 때문에 Case 2가 Case 1보다 시스템 총 소비 동력이 작다. 하지만 증발기 냉각 열량의 변화폭이 미세하고 그에 따라 압축기 소요 동력도 미세하게 감소하기 때문에 결과에 큰 영향을 끼치지 못한다. 시스템 전체 COP는 Case 2가 Case 1보다 크게 나타났다. 그 이유로는 시스템 전체 COP는 시스템 총 냉각 열량과 시스템 총 소비 동력의 비로 구할 수 있는데, 분모항에 들어가는 시스템 총 소비 동력은 거의 일정하나 Case 2의 시스템 총 냉각 능력이 크기 때문에 시스템 전체 COP도 크게 나타났다.



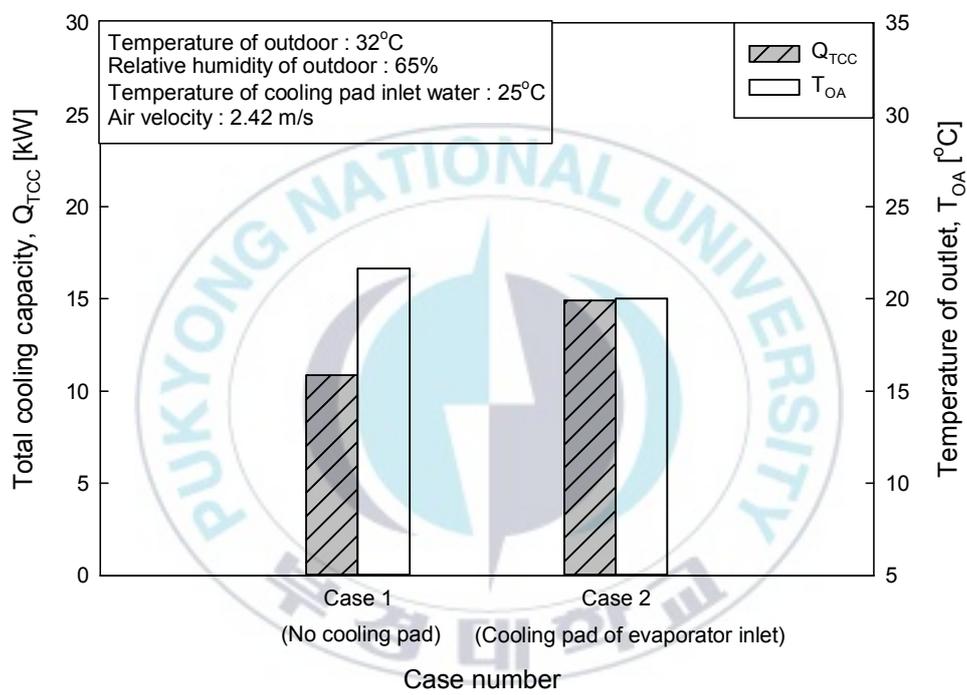


Fig. 3.1 Total cooling capacity and temperature of outlet air with respect to presence or absence of cooling pad in front of evaporator

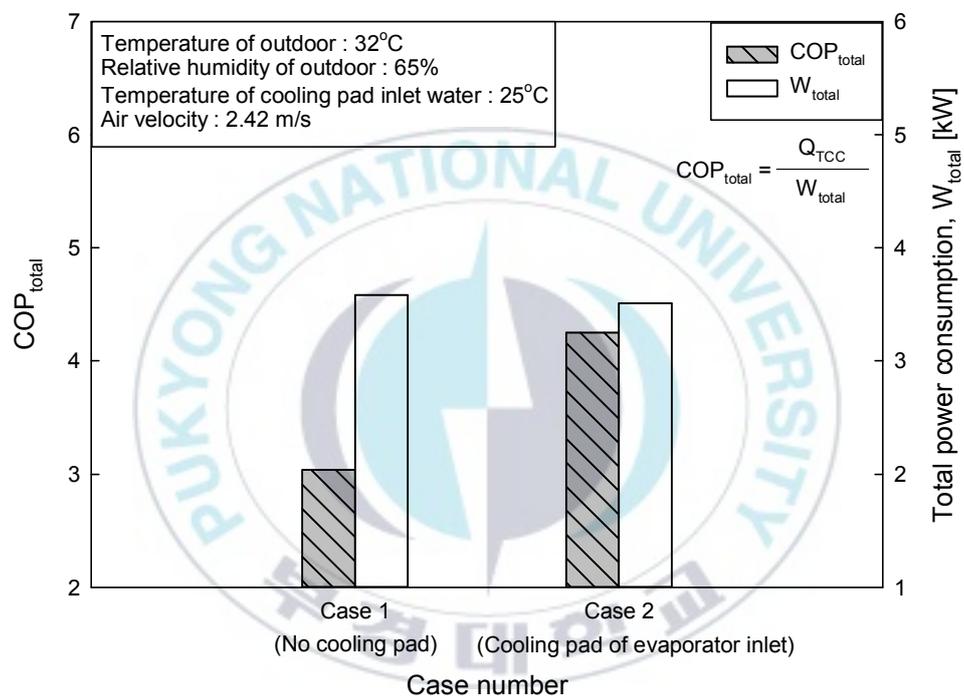


Fig. 3.2 Total COP and total power consumption with respect to presence or absence of cooling pad in front of evaporator

## 나. 응축부에서 패드 부착 유무에 따른 영향

응축기 전면에 쿨링 패드를 설치하면 응축기로 유입되는 공기의 온도는 낮아지고, 그 영향으로 응축 온도가 감소한다. 따라서 응축 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 성능을 분석이 필요하므로, 응축기 앞에 쿨링 패드를 부착하지 않은 경우(Case 2)와 부착한 경우(Case 3)를 비교한다. 그리고 증발기 앞에 쿨링 패드를 부착한 경우가 더 성능이 좋은 것으로 증명되었기에 Case 2와 Case 3 모두 증발기 앞에 쿨링 패드를 부착한 상태로 실험을 진행한다.

Fig. 3.3은 일정한 외기 온도와 상대습도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 응축기 앞 쿨링 패드의 부착 유무에 따른 냉동기 단독 COP( $COP_{ref}$ ), 압축기 소비 전력( $W_{comp}$ ), 증발기 냉각 열량( $Q_{evap}$ )을 나타낸다. 먼저 증발기 냉각 열량은 Case 2와 Case 3이 거의 일정하다. 두 경우 모두 쿨링 패드를 지나 증발기로 유입되는 공기의 온도와 습도는 거의 같기 때문에 증발기 열량은 큰 차이가 없다. Case 3의 경우 응축 온도가 내려가면서 증발 온도가 미세하게 감소하였지만 증발기의 냉각 열량의 변화에는 영향을 끼치지 못할 정도이다. 압축기 소비 전력은 Case 3이 Case 2보다 적게 나타났다. Case 3의 압축기 소비 전력이 적게 나온 이유는 다음과 같다. 쿨링 패드에 의해 응축 온도가 낮아지면 응축기 출구의 과냉도가 증가하게 되고 그에 따라 증발기 입출구 엔탈피 차는 커지게 된다. 증발기 냉각 열량은 식(3.1)과 같이 냉매의 질량 유량과 증발기 입출구 엔탈피 차의 곱으로 나타낼 수 있는데, 증발기 냉각 열량은 일정하고 엔탈피 차는 증가하기 때문에 냉매의 질량 유량은 감소하게 된다.

$$Q_{\text{evap}} = m \cdot (h_{\text{evap,out}} - h_{\text{evap,in}}) \quad (3.1)$$

따라서 냉매의 질량 유량 감소로 인해 압축기 소비 동력이 감소하게 된다. 냉동기 단독 COP는 Case 3이 Case 2보다 크게 나타났다. 냉동기 단독 COP는 증발기 냉각 열량과 압축기 소비 동력의 비로 나타낼 수 있는데, 증발기 냉각 열량은 거의 일정한 반면 Case 3의 압축기 소비 동력이 Case 2에 비해 작기 때문에 냉동기 단독 COP는 Case 3이 크다.

Fig. 3.4는 일정한 외기 온도와 상대습도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 응축기 앞 쿨링 패드의 부착 유무에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 COP( $COP_{\text{HCS}}$ ), 하이브리드 쿨링 시스템 소비 동력( $W_{\text{HCS}}$ ), 하이브리드 쿨링 시스템 냉각 열량( $Q_{\text{HCS}}$ )을 나타낸다. 먼저 하이브리드 쿨링 시스템 냉각 열량은 Case 2와 Case 3 모두 거의 일정하다. 하이브리드 쿨링 시스템에서 공기를 냉각 시키는 구성 요소는 쿨링 패드와 증발기로 두 경우가 같다. 하이브리드 쿨링 시스템 소비 동력은 Case 3이 Case 2보다 작게 나타났다. 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력은 압축기 소비 동력과 Fan의 소비 동력의 합이며, 풍속이 일정하기 때문에 두 경우의 Fan의 소비 동력은 같고 압축기 소비 동력이 Case 3이 Case 2에 비해 작기 때문에 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력도 작게 나타났다. 하이브리드 쿨링 시스템의 COP는 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 능력과 소비 동력의 비로 나타낼 수 있으며 냉각 열량은 일정하고 소비 동력이 Case 3이 작기 때문에 COP는 Case 3이 크게 나타났다.

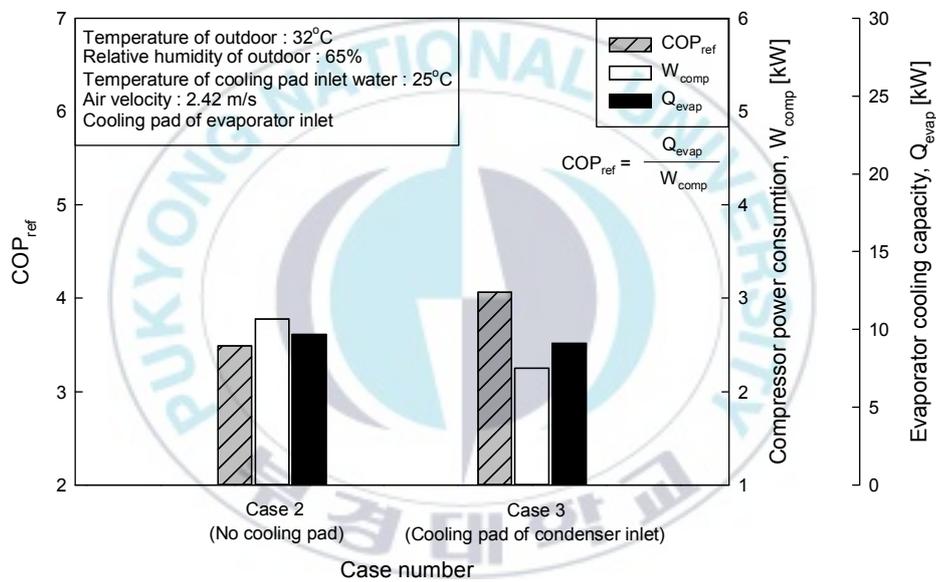


Fig. 3.3 COP of refrigerator, Compressor power consumption and cooling capacity of evaporator with respect to presence or absence of cooling pad in front of condenser

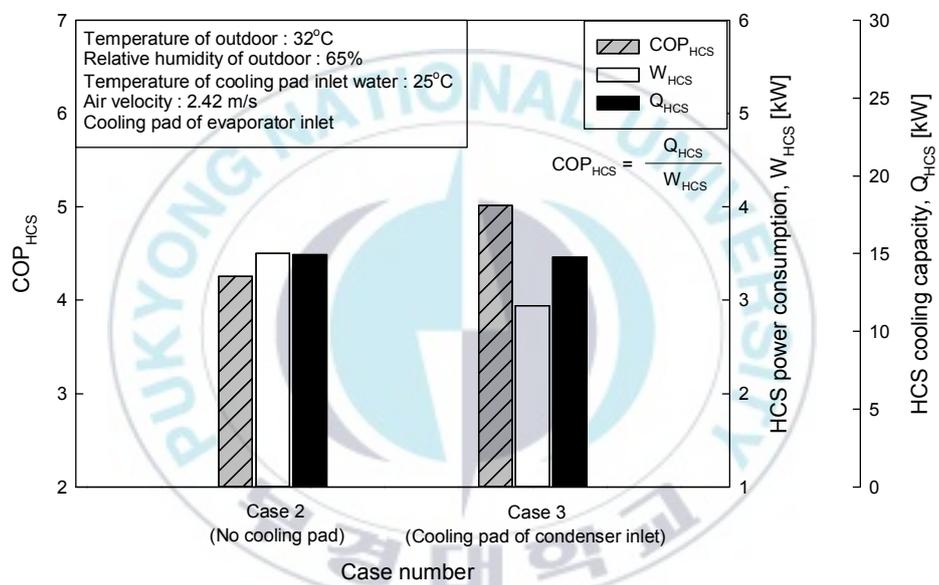


Fig. 3.4 COP, power consumption and cooling capacity of Hybrid Cooling System with respect to presence or absence of cooling pad in front of condenser

## 2. 풍속에 따른 영향

하이브리드 쿨링 시스템은 공기의 풍속에 따라서 쿨링 패드에 흐르는 물의 증발량과 증발기에서 공기와 냉매가 열교환 하는 시간이 다르며 그에 따른 성능 특성을 분석할 필요가 있다. 풍속 제어는 인버터를 이용하여 팬 모터의 회전수를 제어하였다.

Fig. 3.5는 Case 3의 조건과 일정한 외기 온도와 상대습도, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 풍속에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량( $Q_{HCS}$ )과 취출되는 공기의 온도( $T_{OA}$ )를 나타낸다. 풍속이 증가할수록 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량은 증가하는 경향을 보인다. 공기측 기준으로 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량은 식(3.2)와 같이 공기의 풍량과 공기의 입출구 엔탈피 차의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{HCS} = G \cdot (h_{HCS,in} - h_{HCS,out}) \quad (3.2)$$

따라서 풍속이 증가할수록 풍량이 증가하기 때문에 냉각 열량은 증가한다. 풍속이 증가할수록 취출되는 공기의 온도도 증가하는 경향을 보이는데, 이는 풍속이 증가하면 증발기에서 냉매와 공기가 열교환하는 시간이 짧아져 공기가 적게 냉각되기 때문이다.

Fig. 3.6은 Case 3의 조건과 일정한 외기 온도와 상대습도, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 풍속에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 COP( $COP_{HCS}$ )와 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 전력( $W_{HCS}$ )을 나타낸다. 풍속이 증가할수록 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 전력은 증가하는 경향을 보인다. 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 전력은 압축기의 소비 동력과 Fan의 소비 전력의 합이다. 압축기 소비 전력은 풍속의 변화에 대해 크게

영향을 받지 않는데 그 이유는 풍속 변화에 대해 증발기 냉각 열량이 크게 영향을 받지 않고 그에 따라 질량 유량의 변화도 크지 않기 때문이다. 풍속이 증가할수록 Fan 모터의 회전수가 증가하기 때문에 Fan의 소요 동력은 증가한다. 하지만 압축기 소요 동력에 비해 값이 작기 때문에 증가폭이 작게 나타난다. 하이브리드 쿨링 시스템의 COP는 풍속 변화에 대해서 크게 영향을 받지 않는다. 그 이유는 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량과 소비 동력 모두 미세하게 증가하기 때문에 거의 일정하게 나타났다.



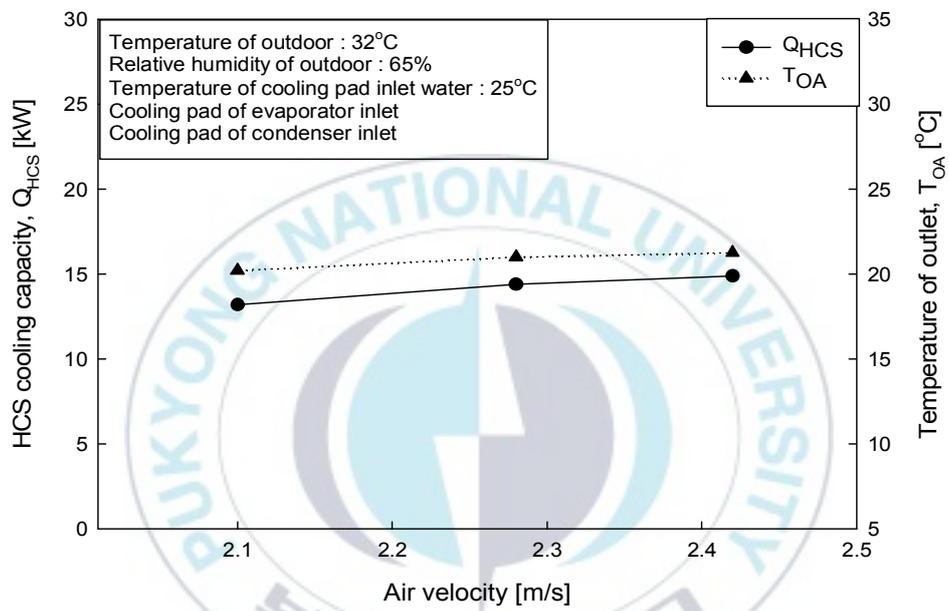


Fig. 3.5 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different air velocity

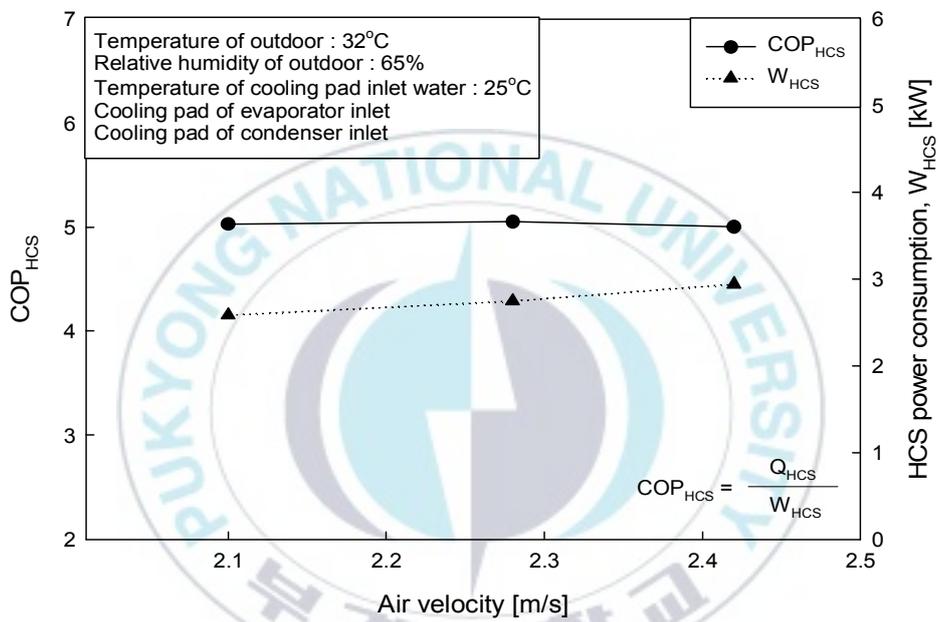


Fig. 3.6 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different air velocity

### 3. 외부 기상 조건 변화에 따른 영향

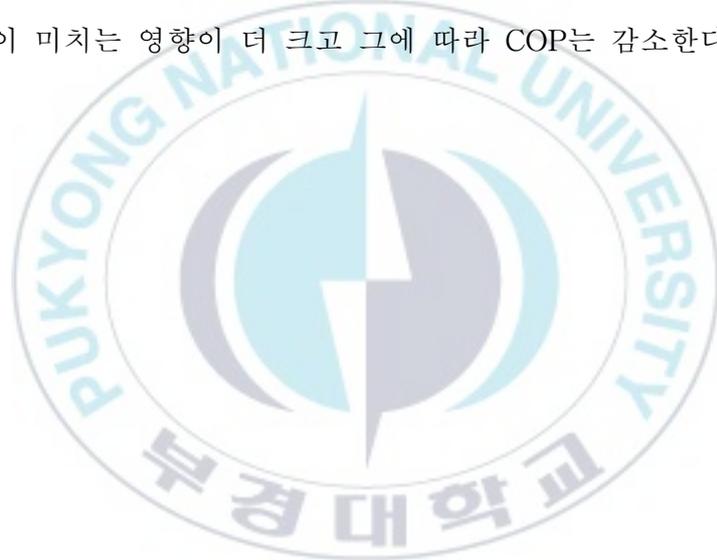
하이브리드 쿨링 시스템은 외부 기상 조건의 변화에 따라 성능에 영향을 받기 때문에 그에 따른 성능 특성을 파악할 필요성이 있다. 본 절에서는 외기의 온도 변화에 따른 성능과 외기의 습도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 특성에 대해 분석하였다.

#### 가. 외기 온도 변화에 따른 영향

Fig. 3.7은 Case 3의 조건과 일정한 외기 상대습도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 외기 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량( $Q_{HCS}$ )과 취출되는 공기의 온도( $T_{OA}$ )를 나타낸다. 외기 온도가 상승할수록 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량이 증가하는데 그 증가폭은 작은 것을 확인할 수 있다. 냉각 열량이 증가하는 이유는 외기 온도가 높을수록 쿨링 패드를 통과하여 증발기로 유입되는 공기의 온도가 상승하는데, 이 때 공기와 냉매간의 온도차가 커지기 때문이다. 증발기 냉각 열량은 두 물질의 온도 차와 관련 있는데 온도차가 클수록 열교환이 잘 일어난다. 따라서 외기 온도가 높아 증발기로 유입되는 공기의 온도가 상승하면 냉매와 공기의 온도 차가 증가하기 때문에 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량은 증가한다. 취출되는 공기의 온도는 외기 온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보인다. 하이브리드 쿨링 시스템을 설계함에 있어 냉각 용량이 정해져 있기 때문에 냉각할 수 있는 양이 정해져 있으며 그에 따라 취출 되는 공기의 온도도 상승하는 것으로 보인다.

Fig. 3.8은 Case 3의 조건과 일정한 외기 상대습도, 풍속, 쿨링 패드에

흐르는 물의 온도 조건에서 외기 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 COP( $COP_{HCS}$ )와 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 전력( $W_{HCS}$ )을 나타낸다. 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 전력은 외기 온도가 상승할수록 미약하게 증가하는 경향을 보인다. 이는 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량과 관계가 있으며 냉각 열량이 증가한 만큼 냉매의 질량 유량이 증가하고 압축기의 소비 전력이 증가하기 때문에 소비 전력이 증가하는 것으로 판단된다. 하이브리드 쿨링 시스템의 COP는 외기 온도가 상승할수록 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량보다 소비 전력이 미치는 영향이 더 크고 그에 따라 COP는 감소한다.



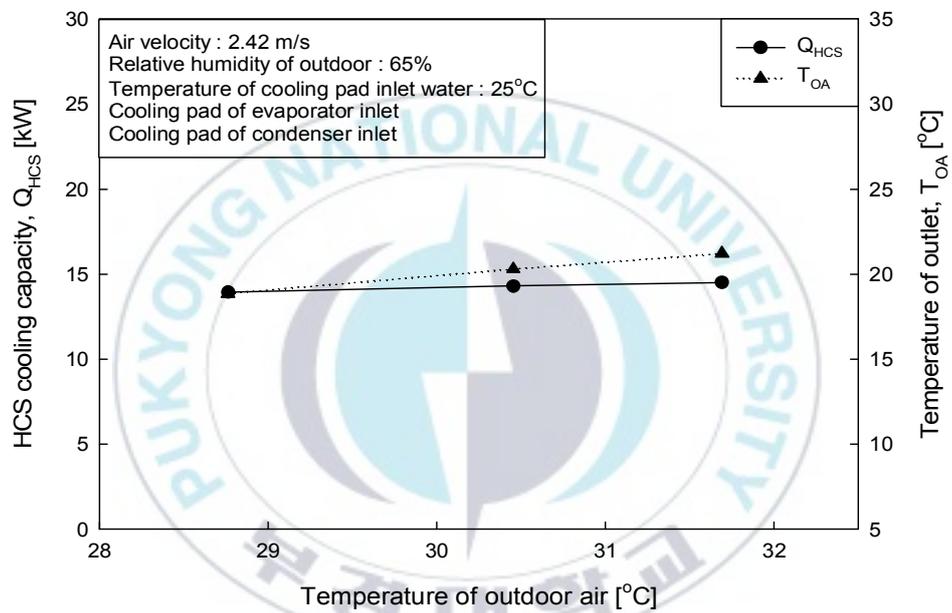


Fig. 3.7 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different temperature of outdoor air

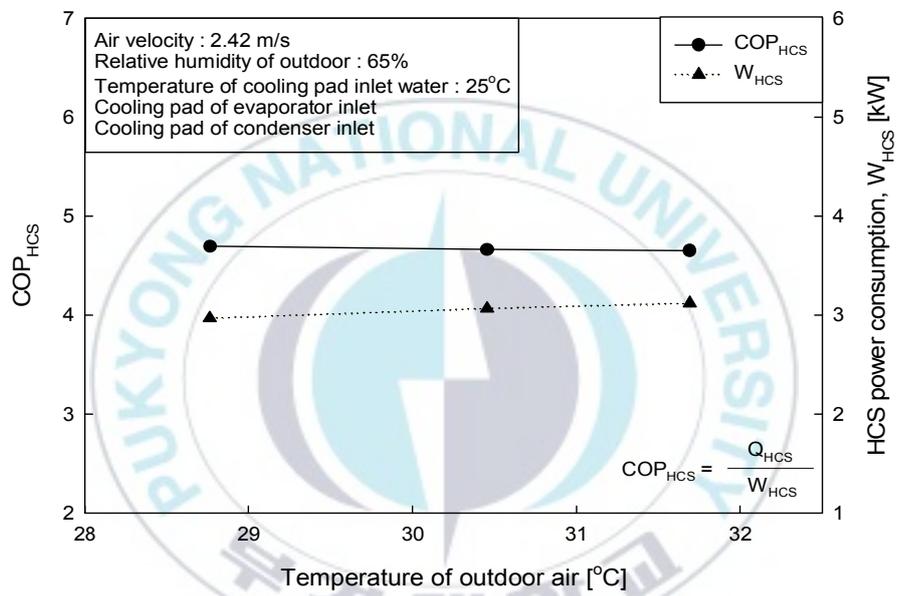


Fig. 3.8 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different temperature of outdoor air

#### 나. 외기 습도 변화에 따른 영향

Fig. 3.9는 Case 3의 조건과 일정한 외기 온도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 외기 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량( $Q_{HCS}$ )과 취출되는 공기의 온도( $T_{OA}$ )를 나타낸다. 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량은 외기 상대 습도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 외기 상대 습도가 증가할수록 쿨링 패드에서 물의 증발이 적게 발생하여 냉각 열량이 감소하기 때문이다. 증발은 외기 온도가 낮을수록, 상대 습도가 높을수록 잘 일어나지 않는다. 따라서 증발량의 감소로 쿨링 패드의 냉각 열량이 감소하고 그에 따라 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량도 감소한다. 취출되는 공기의 온도는 외기 상대 습도가 증가할수록 상승하는 경향을 보인다. 그 이유는 하이브리드 쿨링 시스템 냉각 열량의 설명과 같이 외기의 상대 습도가 높으면 냉각이 적게 되기 때문에 취출되는 공기의 온도는 상승하게 된다.

Fig. 3.10은 Case 3의 조건과 일정한 외기 온도, 풍속, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 조건에서 외기 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 COP( $COP_{HCS}$ )와 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력( $W_{HCS}$ )을 나타낸다. 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력은 거의 일정하다고 볼 수 있다. 이는 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량의 변화폭이 작고 냉매의 질량 유량 변화가 적어 압축기 소비 동력의 변화도 거의 없기 때문이다. 하이브리드 쿨링 시스템의 COP는 외기 상대 습도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력의 변화는 거의 일정하나 냉각 열량의 감소폭이 더 크기 때문에 COP도 감소하는 것으로 판단된다.

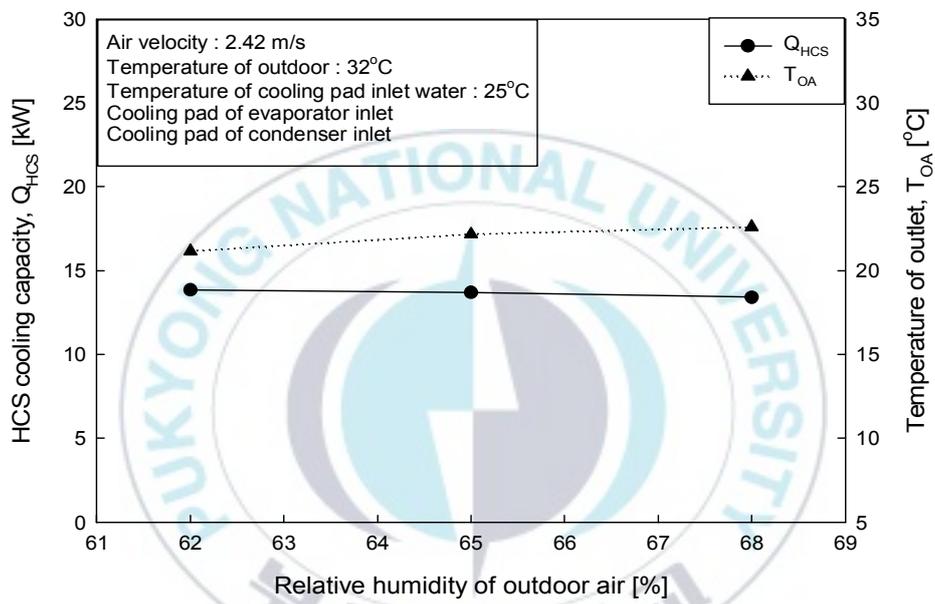


Fig. 3.9 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different relative humidity of outdoor air

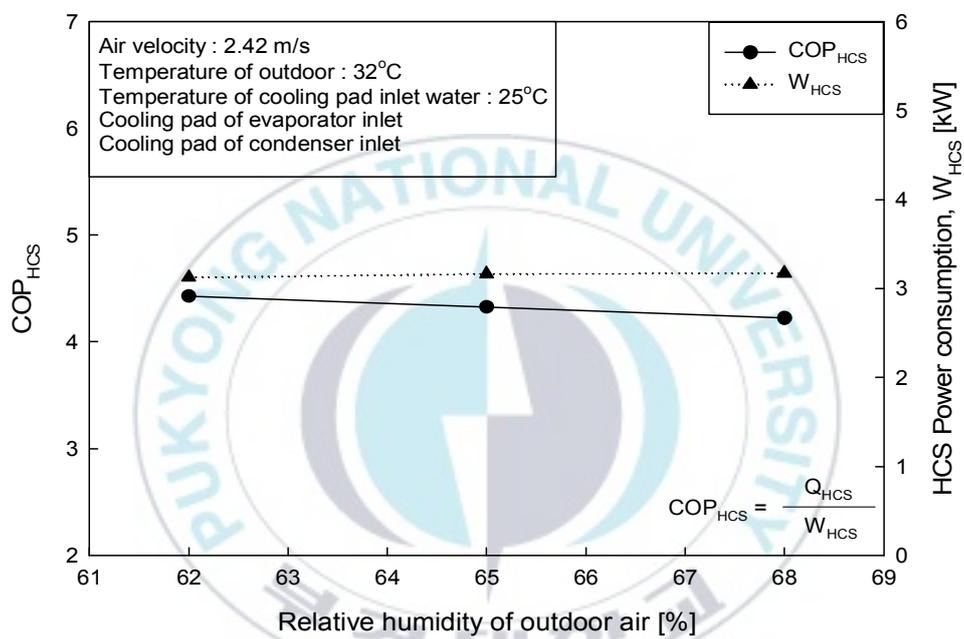


Fig. 3.10 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different relative humidity of outdoor air

#### 4. 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 변화에 따른 영향

쿨링 패드에 흐르는 물의 온도에 따라 쿨링 패드에서 공기를 냉각하는 열량이 달라질 것이고 그에 따라 하이브리드 쿨링 시스템에 영향을 준다. 따라서 본 절에서는 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 성능 특성을 분석한다.

Fig. 3.11은 Case 3의 조건과 일정한 외기 온도, 상대 습도, 풍속 조건에서 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량(QHCS)과 취출되는 공기의 온도(TOA)를 나타낸다. 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량은 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 상승할수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 높을수록 공기와 물의 온도차가 줄어들고 그에 따라 현열 교환량이 줄어들기 때문이다. 취출되는 공기의 온도는 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보인다. 그 이유는 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량 감소와 관련이 있으며 냉각 열량이 감소된 만큼 공기를 냉각하지 못하기 때문에 취출되는 공기의 온도는 상승한다.

Fig. 3.12는 Case 3의 조건과 일정한 외기 온도, 상대 습도, 풍속 조건에서 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 변화에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 COP(COPHCS)와 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력(WHCS)을 나타낸다. 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력은 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 상승할수록 증가하는 경향을 보인다. 물의 온도가 높을수록 쿨링 패드를 지나 증발기로 들어가는 공기의 온도는 높아지고 그에 따라 증발기에서 공기와 냉매간의 열 교환량이 증가한다. 증발기 냉각 열량 증가로 인해 냉매의 질량유량이 증가하면서 압축기 소비 동력도 증가한다. 따라서 압축

기 소요 동력 증가로 인해 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력은 증가하는 경향을 보인다. 하이브리드 쿨링 시스템의 COP는 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 COP를 구하는 수식에서 분모항인 하이브리드 쿨링 시스템의 소비 동력은 증가하고 분자항인 냉각 열량은 감소하기 때문에 COP는 감소하는 경향을 보인다.



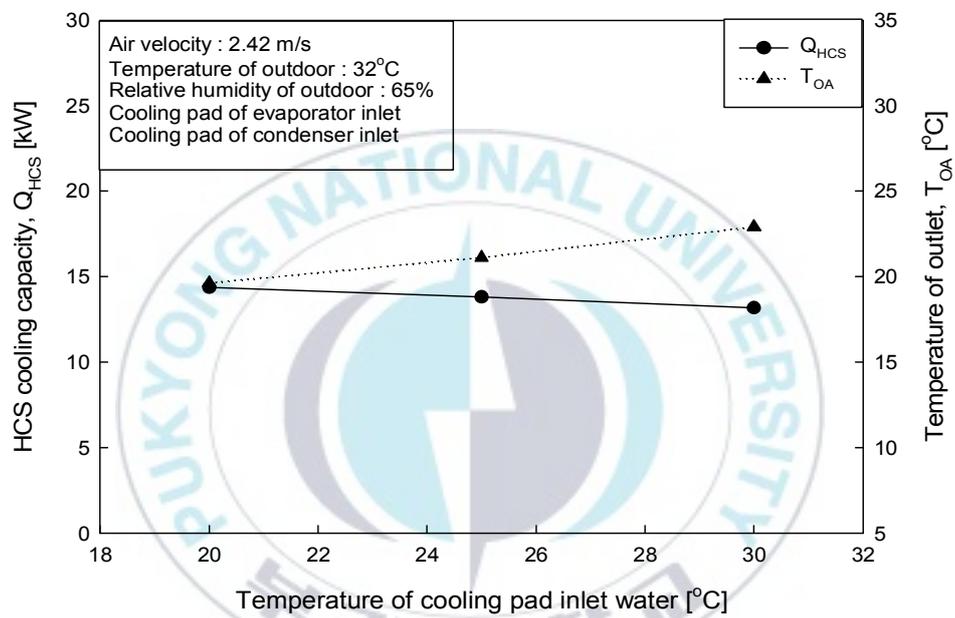


Fig. 3.11 Cooling capacity of Hybrid Cooling System and temperature of outlet air with respect to different water temperature in cooling pad inlet

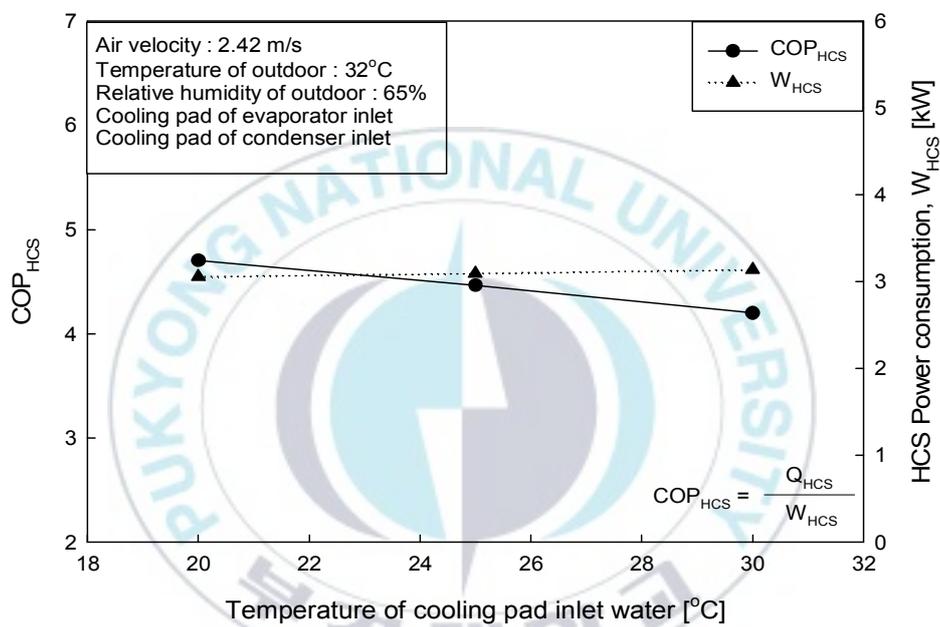


Fig. 3.12 COP and power consumption of Hybrid Cooling System with respect to different water temperature in cooling pad inlet

## IV. 결론

본 연구에서는 하이브리드 쿨링 시스템의 다양한 변수에 따른 성능 특성을 살펴보았다. 먼저 쿨링 패드의 부착 유무에 따른 하이브리드 쿨링 시스템의 우수성을 입증하였다. 그 후 풍속, 외기 온도 및 상대 습도, 쿨링 패드에 흐르는 물의 온도 변화에 따른 성능 특성을 분석하였으며 그에 따른 주요 결론은 다음과 같다.

증발기 앞에 쿨링 패드를 부착한 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 취출되는 공기의 온도는 낮으며 시스템 전체 COP는 높다. 응축기 앞에 쿨링 패드를 부착한 경우도 부착하지 않은 경우에 비해 소비 동력은 적으며 그에 따라 COP도 높게 나타났다. 따라서 증발기와 응축기 앞에 쿨링 패드를 부착한 하이브리드 쿨링 시스템은 일반 에어컨에 비해 낮은 소비 동력으로 더 많은 냉각 열량을 얻을 수 있었다.

하이브리드 쿨링 시스템의 풍속이 증가할수록 취출되는 공기의 온도, 소비 동력과 냉각 열량 모두 증가한다. COP는 풍속에 대해 큰 변화가 없다. 따라서 장치의 풍속은 COP는 크게 영향을 주지 않기 때문에 취출되는 공기의 온도 및 공기 순환량으로 정할 수 있다.

외기의 온도가 증가할수록 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량, 소비 동력은 미세하게 증가하고 취출되는 공기의 온도는 현저하게 상승한다. COP는 미세하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

하이브리드 쿨링 시스템에서 외기의 상대 습도가 증가할수록 냉각 열량은 감소하고 소비 동력은 거의 일정하게 나타났다. 그에 따라 COP는 감소

하는 경향을 보이고 있으며, 취출되는 공기의 온도는 증가하는 것을 알 수 있었다.

쿨링 패드에 흐르는 물의 온도가 높을수록 하이브리드 쿨링 시스템의 냉각 열량은 감소하고 소비 동력은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라서 COP는 감소하고, 취출되는 공기의 온도는 현저하게 상승하는 것을 알 수 있다.

본 논문을 통해 일반 에어컨 대비 하이브리드 쿨링 시스템의 우수성을 입증하였으며, 다양한 변수에 대한 하이브리드 쿨링 시스템의 성능 특성을 분석하였고 기초 설계 자료를 제공하였다.



## 참고문헌

- (1) 오성종(2016), 고온기 가축피해예방 및 축사환경관리 핵심기술, 농촌진흥청 국립축산과학원
- (2) SWEEP, New Evaporative Cooling Systems : An Emerging solution for homes in Hot Dry Climates with modest cooling loads
- (3) Wasim, S., Frank, B. and Steven, T.(2010), Technical research on evaporative air conditioners and feasibility of rating their energy performance, UniSA.
- (4) Ramin, F., John, L. and Sean, G.(2010), Performance comparison of evaporatively-cooled condenser versus air-cooled condenser air conditioners, ACEEE, Vol. 1, pp.117-127
- (5) X. Cui, M.R. Islam, B. Mohan and K.J. Chua(2016), Developing a performance correlation for counter-flow regenerative indirect evaporative heat exchangers with experimental validation, Applied Thermal Engineering, Vol. 108, pp.774-784
- (6) X. Cui, K.J. Chua, M.R. Islam and K.C. Ng(2015), Performance evaluation of an indirect pre-cooling evaporative heat exchanger operating in hot and humid climate, Energy Conversion and Management, Vol. 102, pp.140-150
- (7) Ghassem, H., Mojtaba, B., Shahram, D. and Jafa, E.(2008), Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative

- cooling system in various climatic conditions, *Building and environment*, Vol. 44, pp.2073-2079
- (8) Ghassem, H., Vahid, K. and Shahram, D.(2010), Performance analysis of a ground-assisted direct evaporative cooling, *Building and Environment*, Vol. 45, pp.2421-2429
- (9) J.M. Wu, X. Huang and H. Zhang(2005), Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler, *Applied Thermal engineering*, Vol. 29, pp.980-984
- (10) J.K. Jain and D.A. Hindoliya(2011), Experimental performance of new evaporative cooling pad materials, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 1, pp.252-256
- (11) Abdollah, M., Hamid, R.S., Mohammad, L., Seyedmehdi, S. and Hamid, B.(2011), Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp.2598-2603
- (12) Xiaoli, H., Cangzhou, Z., Yaolin, L., Haiqiao, W., Guoquang, Z. and Youming, C.(2013), Optimizing the pad thickness of evaporative air-cooled chiller for maximum energy saving, *Energy and Buildings*, Vol. 61, pp.146-152

## 감사의 글

졸업 논문을 마무리 하는 단계를 앞두고 지난 4년간의 실험실 생활이 참 빨리 지나간 것 같습니다. 긴 시간동안 부족한 저를 도와주고 함께 고생해 준 분들에게 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

먼저, 학생들과 벽 없이 늘 친근하게 대해 주시고 지속적인 지도를 해주신 손창호 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고 연구를 진행하는 동안 많은 가르침을 주신 윤정인 교수님께 감사드립니다. 열정적인 두 교수님 덕분에 난항을 겪던 연구와 졸업 논문도 무사히 마무리를 할 수 있었습니다. 그리고 졸업 발표 때 조언을 해주신 최광환 교수님, 금종수 교수님, 김종수 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 감사드립니다.

그리고 연구뿐만 아니라 미래에 대해서도 조언 해주신 ㈜정인하이테크 김영민 이사님, 바쁜 와중에도 자세하게 설명해주시고 가르침 주신 문춘근 박사님께 감사인사 드립니다.

실험실 생활하면서 많이 의지하고 힘이 되어 주셨던 실험실 엄마, 전민주 박사님 감사합니다. 실험실 생활을 시작할 수 있게 해주신 하수정 박사님과 최휘웅 선배에게 감사인사 드립니다. 그리고 같이 실험실에서 고생한 박성현, 최대호, 이현경 후배들에게도 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 특히 박성현 군과 최대호 군에게 늘 도움만 받은 것 같아 미안하고 고맙다고 전하고 싶습니다. 그리고 같이 졸업하는 문창욱 형님, 실험실 생활하면서 형님에게 알게 모르게 많이 의지되었습니다. 부족한 저를 많이 도와줘서 고맙습니다. 그리고 석사 기간 중 고민 많던 저에게 많은 힘을 준 허성관

형님께도 감사인사 드립니다. 졸업 논문을 작성하는데 도움을 준 노승주 군에게도 고맙다는 인사 전하고 싶습니다.

마지막으로 저에게 가장 중요한 우리 가족들에게 깊은 감사 인사 올리고 싶습니다. 저에게 물심양면 아끼지 않고 늘 사랑으로 응원해주신 부모님께 고개 숙여 감사드립니다. 일하느라 힘든 와중에도 늘 응원해준 누나에게도 고맙다는 인사를 전하고 싶습니다. 저는 성격이 무뎡뎡한 편이라 가족들에게 사랑한다는 말을 잘 못합니다. 감사의 글로 가족들에게 사랑한다고 전하고 싶습니다.

졸업하는데 까지 많은 어려움이 있었지만 많은 분들에게 도움 받아 무사히 마무리 할 수 있었습니다. 저도 앞으로 많은 도움을 줄 수 있는 사람이 되려고 노력을 하겠으며 실천하겠습니다. 다시 도움주신 분들에게 감사 인사드리며 감사의 글을 줄이겠습니다. 감사합니다.

