



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

외기온도에 따른 프리쿨링 시스템의 성능 특성 및 경제성평가



2016년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

김 희 민

공 학 석 사 학 위 논 문

외기온도에 따른 프리쿨링 시스템의 성능 특성 및 경제성평가

지도교수 윤 정 인

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2016년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

김 희 민

김희민의 공학석사 학위논문을 인준함

2016년 2월 26일



위원장 공학박사 손창효 (인)

위원 공학박사 최광환 (인)

위원 공학박사 윤정인 (인)



목 차

Abstract	iii
List of figures	v
List of table	vii
Nomenclature	viii
제 1 장 서론	
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 종래연구	3
제 2 장 이론적 고찰	
2.1 프리쿨링 시스템의 개요	4
2.2 열역학 모델식	6
제 3 장 프리쿨링 시스템의 성능분석	
3.1 시뮬레이션 조건	7
3.2 프리쿨링 시스템의 성능분석	
3.2.1 프리쿨링 시스템의 작동범위	10
3.2.2 외기온도에 따른 압축일량	12
3.2.3 요구냉수온도에 따른 성능분석	14
3.3 일정 조건에서의 실험	

3.3.1 실험장치도	16
3.3.2 실험조건 및 방법	17
3.3.3 실험결과	19
3.4 실제 데이터와 시뮬레이션 데이터의 비교	23
 제 4 장 프리쿨링 시스템의 경제성평가	
4.1 경제성 평가 방법 및 조건	26
4.2 연간 에너지 사용량 분석	28
4.2.1 데이터센터	29
4.2.2 산업공정	31
4.3 경제성 평가 및 민감도 분석	33
4.3.1 데이터센터	34
4.3.2 산업공정	39
 제 5 장 결론	44
 참고문헌	46

A study on Performance Characteristic and Energy Saving of Free Cooling System according to outdoor temperature.

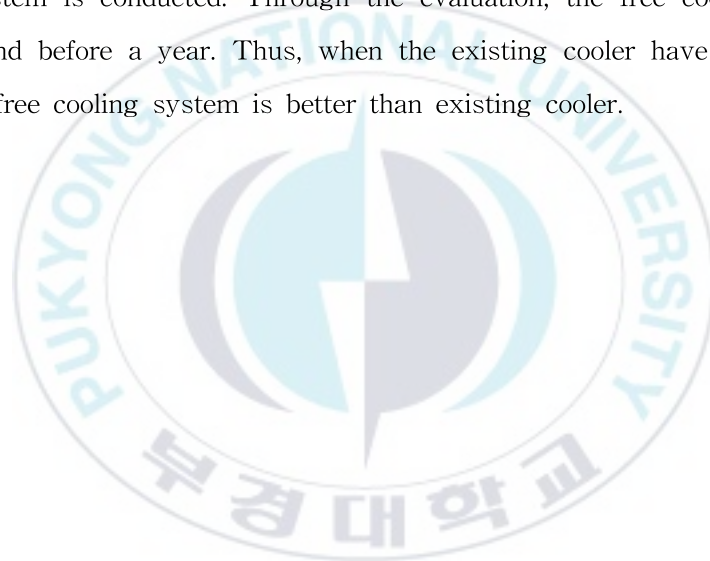
Hee Min Kim

*Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering,
The Graduate school,
Pukyong National University*

Abstract

With growing the industry, the case that requires the cooling load in winter is increasing. therefore, the demand for energy is rapidly increased in the winter as well as summer. To solve the this problem the free cooling system is develop. The free cooling system use the cooled outdoor temperature to cool the water. Usually it uses the cooling tower in order to cool the water. But the cooling tower has problems that are installation for cooling tower, freeze and burst. In order to solve the problem, the free cooling system with dry-cooler is suggested. In case of the foreign country the study for the free cooling system with dry-cooler is active but in case of the domesticity the study for it is deficient. Thus, in this study the free cooling system with dry-cooler is analyzed. Also, the national adaptability for the free cooling system is examined using economic analysis base on the outdoor temperature in the domesticity.

The free cooling system has the three cases which are explained in the body of the study. Through the experiment, the electric power, outlet water temperature and cooling load are measured with the tree cases. In the result of the experiment, the measuring efficiency is about 10 percent between experiment data and simulation data. Through the experiment, the credibility of simulation is checked. When the free cooling system is used for the data center and industrial process, the energy saving rate is approximately 38 percents. Using the previous result, the economic evaluation based on free cooling system is conducted. Through the evaluation, the free cooling system has a refund before a year. Thus, when the existing cooler have used for 10 years, the free cooling system is better than existing cooler.



List of Figures

Figure 2.1 Free cooling system with cooling tower

Figure 2.2 Free cooling system with dry cooler

Figure 3.1 Free cooling system in HYSYS

Figure 3.2 Drycooler capacity according to outdoor temperature

Figure 3.3 Compressor work according to outdoor temperature

Figure 3.4 Drycooler capacity according to outdoor temperature
and cooled water temperature

Figure 3.5 Schematic of the experimental equipment

Figure 3.6 Situation of the test

Figure 3.7 Total power according to time and outdoor temperature

Figure 3.8 Outlet water temperature according to time and
outdoor temperature

Figure 3.9 Cooling capacity according to time and outdoor
temperature

Figure 4.1 Energy consumption according to month ($T_{cw}=8$)

Figure 4.2 Energy consumption according to month (Tcw=13)

Figure 4.3 Energy consumption according to month (Tcw=18)

Figure 4.4 Energy consumption according to month (Tcw=23)

Figure 4.5 NPV according to year (Tcw=8)

Figure 4.6 NPV according to year (Tcw=13)

Figure 4.7 NPV according to year and real discount rate (Tcw=8)

Figure 4.8 NPV according to year and real discount rate
(Tcw=13)

Figure 4.9 NPV according to year (Tcw=18)

Figure 4.10 NPV according to year (Tcw=23)

Figure 4.11 NPV according to year and real discount rate
(Tcw=18)

Figure 4.12 NPV according to year and real discount rate
(Tcw=23)

List of Tables

Table 3.1 Simulation condition in HYSYS

Table 3.2 Condition of the free cooling system test

Table 3.3 Comparison simulation with test result in -2°C

Table 3.4 Comparison simulation with test result in 2°C

Table 3.5 Comparison simulation with test result in 35°C

Table 4.1 Real rate of interest during 7 years

Table 4.2 Economic evaluation of free cooling system for industrial process

Table 4.3 Economic evaluation of free cooling system for data center

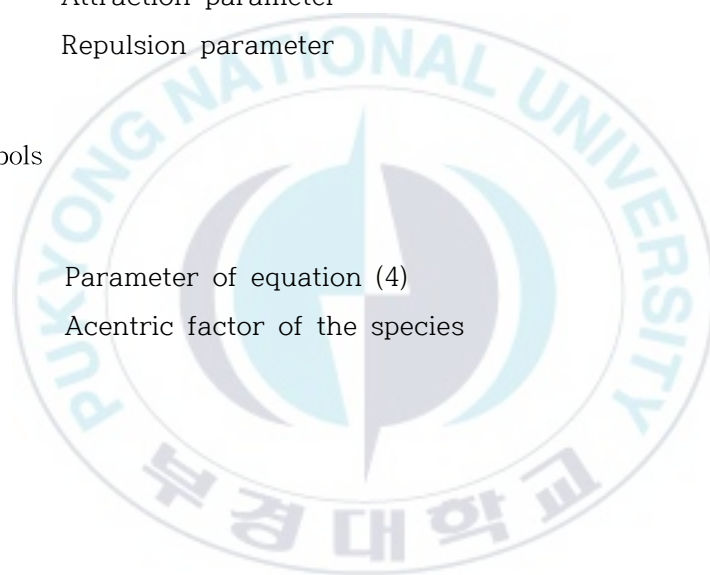
Nomenclature

SYMBOLS

P	Pressure	[kPa]
R	Universal gas constant	
T	Absolute temperature	[K]
a	Attraction parameter	
b	Repulsion parameter	

Greek symbols

α	Parameter of equation (4)
w	Acentric factor of the species



제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

전 세계적으로 인간의 편의를 위하여 자동화기기, 전산기기 등이 발전해 왔으며 그 수요는 더욱 증가하고 있다. 이와 동시에 산업공정의 자동화시스템과 전산처리를 위한 데이터센터의 용량과 수가 증가하였고 비례적으로 기기에서 발생하는 발열로 인하여 냉방부하가 증가하고 있다. 산업공정의 경우 제품의 생산프로세스에서 발생하는 열을 냉각하기 위하여 냉수를 필요로 하며, 연중 가동하기 때문에 에너지사용량 또한 높다. 데이터센터의 경우 전산장비의 발열로 인하여 일정온도의 냉방을 필요로 하며, 특히 전산장비의 특성상 습도의 영향을 많이 받기 때문에 냉수를 이용하여 간접적으로 냉방을 한다. 이처럼 산업공정이나 데이터센터는 외기온도가 낮은 동계에도 냉방부하를 필요로 하며, 냉각을 위하여 전력을 사용한다. 이러한 에너지 문제를 해결하기 위하여 프리쿨링 시스템이 도입되었다. 프리쿨링 시스템은 동계의 차가운 외기를 이용하여 냉각하는 시스템으로 외기를 이용하여 냉수를 냉각함으로써 에너지 절감효과를 기대할 수 있다. 일반적으로 프리쿨링 시스템은 냉각탑을 이용하여 냉수를 냉각하지만 동계 운전 시 냉수배관의 동파와 냉각수를 위한 별도의 배관 및 냉각탑 설치를 위한 별도의 공간이 필요하다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Dry-cooler를 적용한 프리쿨링 시스템을 제안하였다. Dry-cooler는 공랭식 열교환기로 냉각탑과 배관을 위한 별도의 공간이 불필요하며 냉각수로 인한 동파나 부식의 위험에서도 멀어질 수 있다. 해외의 경우에는 프리쿨링

시스템에 연구가 활발하고, 산업분야에 걸쳐 많이 보급되고 있는 상황이다. 국내의 경우에는 냉각탑을 이용한 프리쿨링 시스템의 적용사례나 연구는 있으나 Dry-cooler를 적용한 프리쿨링 시스템에 대한 연구는 부족하다.[1,3] 따라서, 본 연구에서는 시뮬레이션과 실험을 통한 Dry-cooler의 성능을 확인하고, 국내의 기상데이터를 바탕으로 연간 에너지 절감분석과 더불어 경제성평가를 진행하고자 한다.



1.2 종래연구

종래연구로는 Bean J[10]와 2명은 “Economizer modes of data center cooling system”을 통해 냉각기와 프리쿨링 시스템의 혼합운전을 제시하였으며, 시카고와 애틀란타의 기상데이터를 바탕으로 작동기간을 측정함으로써 에너지 절감효과를 확인하였다. Potts Z[4]는 “Free cooling technologies in data center application”을 통하여 규모에 따른 프리쿨링 시스템의 적용방법을 제시하고, 국외에 적용된 프리쿨링 시스템에 대해 언급하였다. Acul[7]은 이스탄불의 옷걸이 제조 공정에 프리쿨링 시스템을 설치하여, 냉각열량 180kW, 요구냉수온도 28℃, 24h 운전 조건일 때 연간 63.72%의 에너지 절감효과를 보였다. 윤[2] 외 3명은 국내의 기상데이터를 바탕으로 프리쿨링 시스템과 일반 냉각기의 에너지 사용량을 비교하였으며, 특히 “지역별 프리쿨링 시스템의 에너지 절감 분석”을 통하여 외기가 낮은 중부 지방에서 큰 에너지절감효과를 확인하였다.[6]

제 2 장 이론적 고찰

2.1 프리쿨링 시스템의 개요

프리쿨링 시스템은 하계를 제외한 타 계절에 일정 온도 이하의 외기를 이용하여 냉방을 하는 시스템이다. 이 시스템은 냉동기를 사용하지 않고 냉각탑이나 Dry-cooler를 이용하여 냉방부하를 해결하기 때문에 프리쿨링이라고 부른다. 외기가 낮을 경우에는 Dry-cooler를 이용하여 냉수를 냉각할 수 있지만, 외기가 증가할 경우 냉수가 가열되는 역효과가 있기 때문에 냉각기를 사용한다. 이처럼, 외기가 낮을 때는 프리쿨링을 하고, 외기가 높을 때는 냉각기를 사용하는 시스템 전체를 프리쿨링 시스템이라고 한다. 기존의 프리쿨링 시스템은 주로 냉각탑을 이용하고 있으며, Figure 2.1은 냉각탑을 이용할 경우 프리쿨링 시스템의 모사도를 나타낸 그림이다. 일정 외기온도 이하에서는 냉수가 냉각탑을 지나면서 냉각되며, 생산된 냉수는 부하에 사용된다. 외기가 증가하여 프리쿨링이 되지 않을 경우에는 냉각기가 작동하여 냉수를 생산한다. 또 하나의 프리쿨링 방법으로 드라이쿨러를 적용한 프리쿨링 시스템이 있다. Figure 2.2는 드라이쿨러를 적용한 프리쿨링 시스템의 모사도이다. 냉각탑과 똑같은 원리로 작동되며, 냉각탑과 냉각수배관을 위한 별도의 공간이 필요없다는 장점이 있다. 프리쿨링 시스템은 주로 요구냉수온도와 열교환기 효율에 의해서 결정된다. 그 중 요구냉수온도에 의해서 많은 영향을 받는데, 요구냉수온도란 부하 측에 사용하는 냉수의 온도를 의미하며, 요구냉수온도에 따라 이용 가능한 외기의 온도가 달라진다. 따라서, 요구냉수온도에 따라 프리쿨링 시스템의 적용범위도 달

라지면 에너지절감효과도 달라진다. [1,8]

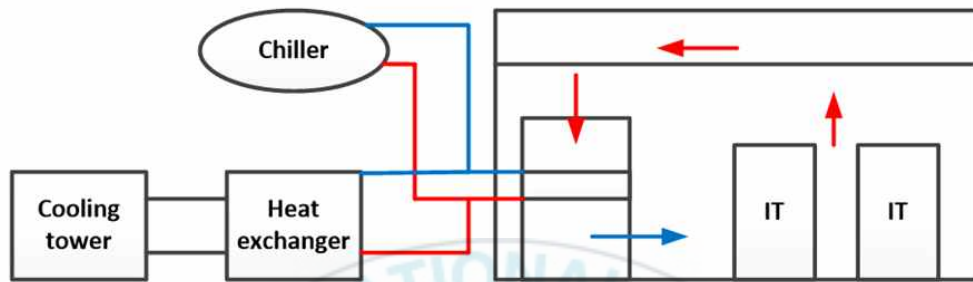


Figure 2.1 Free cooling system with cooling tower

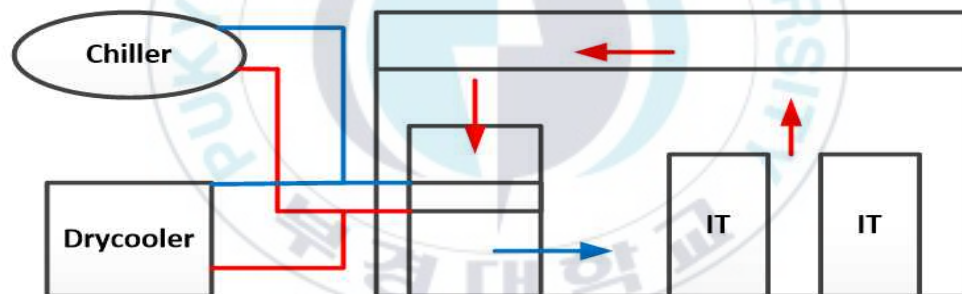


Figure 2.2 Free cooling system with dry cooler

2.2 열역학 모델식

본 연구는 상용프로그램 HYSYS v8.6를 이용하여 데이터를 측정하였으며, 실제 상태와 유사한 데이터를 얻기 위해 적용한 방정식은 Peng-Robinson 상태방정식을 이용하였다. Peng-Robinson 상태방정식은 Soave-Redlich-Kwong 상태방정식의 값이 실제 실험값보다 큰 오차가 발생하여, Peng-Robinson이 변형한 방정식이다. 그 식은 아래와 같다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a \cdot \alpha}{V(V+b) + b(V-b)} \quad (1)$$

여기서

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

$$\alpha = [1 + (0.37464 + 1.54226w - 0.26992w^2)(1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (4)$$

이다.

본 연구에서는 상용프로그램 HYSYS의 시뮬레이션을 통하여 프리쿨링 시스템의 성능을 확인하였으며, 작동유체의 혼합물에 대한 상평형을 계산하기 위하여 각 유체간의 상호작용에 대한 관계가 포함되어 있는 Peng-Robinson 식을 권장하고 있다.

제 3 장 프리쿨링 시스템의 성능분석

3.1 시뮬레이션 조건

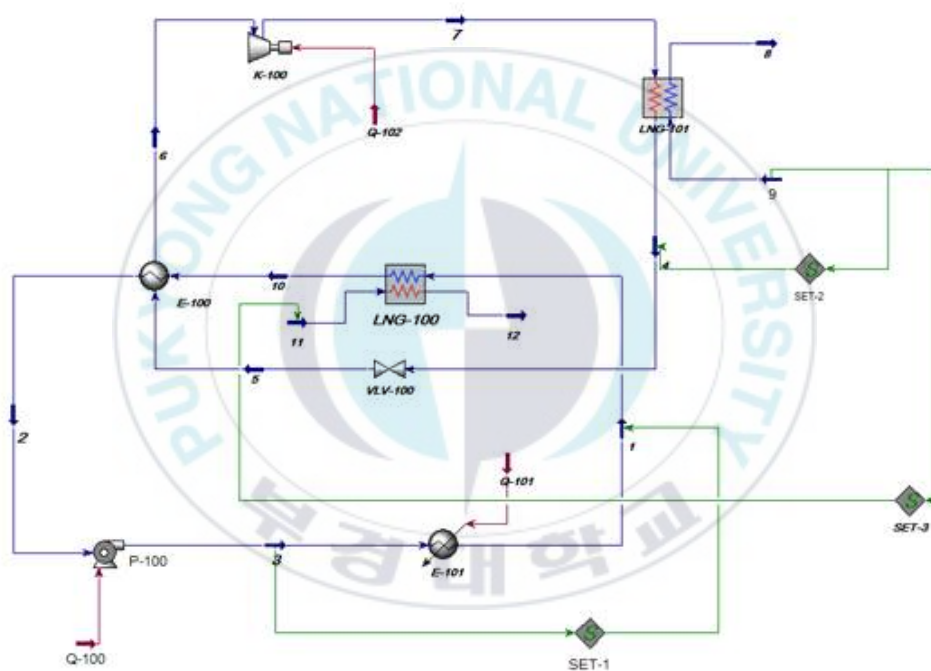


Figure 3.1 Free cooling system in HYSYS

본 연구에서 적용한 프리쿨링 시스템은 냉각탑을 대신하여 Dry-cooler를 적용하였으며, 상용프로그램 HYSYS[9]를 이용하여 프리쿨링 시스템의 성능을 분석하였다. Figure 3.1은 상용프로그램 HYSYS 내의 프리쿨링 시스

템 모사도이다. Figure 3.1에서 표현한 프리쿨링시스템은 크게 Dry-cooler를 이용하여 냉수를 냉각하는 시스템과 냉각시스템을 이용하여 냉수를 냉각하는 시스템 두 가지로 나뉜다. 먼저, Dry-cooler가 적용된 시스템은 크게 Dry-cooler, 냉수펌프, 삼방밸브 등으로 구성되어 있으며, 냉각시스템은 압축기, 증발기, 응축기, 팽창밸브 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 적용한 프리쿨링 시스템의 특징은 Dry-cooler와 냉동기의 구성요소인 응축기가 팬을 공유하는 것에 있으며, 이는 시스템의 콤팩트화를 가능하게 하였다. 시뮬레이션에 적용한 압축기는 스크류 압축기이며, 증발기에 적용한 열교환기는 셀-튜브 타입 열교환기로 설정하였다.

본 연구에서 증발기의 열교환기 타입을 셀-튜브 타입으로 선정한 이유는 가장 널리 사용되고 있는 열교환기이며, 적용범위가 넓기 때문에 프리쿨링 시스템의 부하변동, 요구냉수온도의 변화에 적용하기 적합하다고 판단하였다. 또한 압축기는 스크류 압축기를 적용하였는데, 이는 연속적인 압축으로 인한 높은 효율과 저 진동, 저 소음 등의 장점을 지니고 있으며, 부하변동에도 효율적으로 사용될 수 있어 프리쿨링 시스템에 적합하다고 판단하였다. 특히 본 연구의 특징인 Dry-cooler와 응축기가 공유되는 부분에서 냉각기의 부분부하운전이 가능해야하기 때문에 스크류압축기가 가장 적절하다고 판단되었다. 응축기와 Dry-cooler는 핀 튜브 타입의 공랭식 열교환기로 상부에 설치된 팬이 외기를 흡입하여 냉수와 작동유체를 냉각한다.

냉각시스템의 작동유체 순환은 다음과 같다. 증발기로 유입된 작동유체는 냉수와 열 교환하면서 증발되며, 압축기로 유입되어 고온 고압의 증기 상태로 배출된다. 배출된 증기는 응축기에서 외기와 열교환을 통하여 액화되며, 팽창밸브를 통해 단열 팽창한다. 팽창된 유체는 다시 증발기로 유입되어 냉수를 냉각하는 과정을 반복한다.

부하에 사용된 냉수는 고온상태로 배출되고, 외기온도에 따라 삼방밸브

에서의 제어에 의해 Dry-cooler로 유입되거나 증발기로 유입된다. 외기온도가 높을 경우에는 Dry-cooler로 유입할 때 물의 온도가 상승하는 역효과가 발생하기 때문에 증발기로 유입되어 작동유체와의 열교환을 통해 냉수로 냉각된다. 외기온도가 낮을 경우에는 Dry-cooler를 통하여 냉각되며, 냉각열량이 부족할 경우에는 냉각기와의 혼합운전을 통하여 냉각된다.

본 연구에서는 외기온도와 요구냉소온도의 변화에 따른 프리쿨링 시스템의 성능을 분석하였으며, 분석조건은 Table 3.1에 나타냈다.

Table 3.1 Simulation condition in HYSYS

Variable	Value
Working fluid	R407C
Refrigeration load (kW)	81
Required cooling water (°C)	8
Outlet cooling water temperature (°C)	12
Air volume flow of dry cooler (m^3/h)	40.800
Compressor efficiency (%)	75

3.2 프리쿨링 시스템의 성능분석

3.2.1 프리쿨링 시스템의 작동범위

프리쿨링 시스템은 외기온도에 따른 작동범위가 생긴다. 본 연구는 요구냉수온도 8℃를 기본으로 설정하여 진행하였으며, LMTD는 8℃로 설정하였다. 이때 드라이쿨러의 작동은 외기온도에 의해 결정되는데 외기온도가 0℃이하에서는 100% 단독운전하며, 외기온도가 증가하여 0~5℃사이에서는 드라이쿨러의 냉각능력이 나오지 않기 때문에 냉각기와 혼합운전한다. 외기온도가 5℃ 이상에서는 냉각기가 단독운전하는 시스템이다. Figure 3.2는 시뮬레이션 조건에서의 프리쿨링 시스템의 동작범위를 나타낸 그림이다.

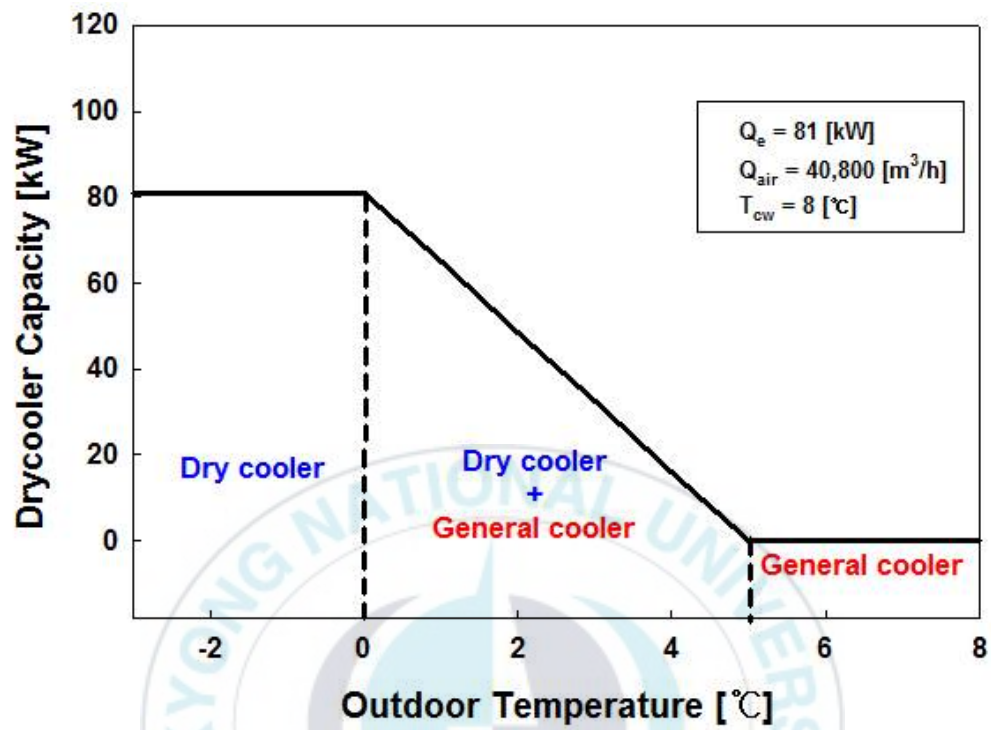


Figure 3.2 Drycooler capacity according to outdoor temperature

3.2.2 외기온도에 따른 압축일량

냉동기의 압축일은 증발온도와 냉방부하가 일정하다면 외기온도가 상승함에 따라 증가한다. 하지만 프리쿨링 시스템의 경우에는 일정온도 이하에서는 냉동기가 작동하지 않기 때문에 기존의 냉각기의 압축일과는 다른 양상을 보인다. Figure 3.3는 외기온도에 따른 프리쿨링 시스템과 기존 냉동 시스템과의 압축일을 비교한 것이다.

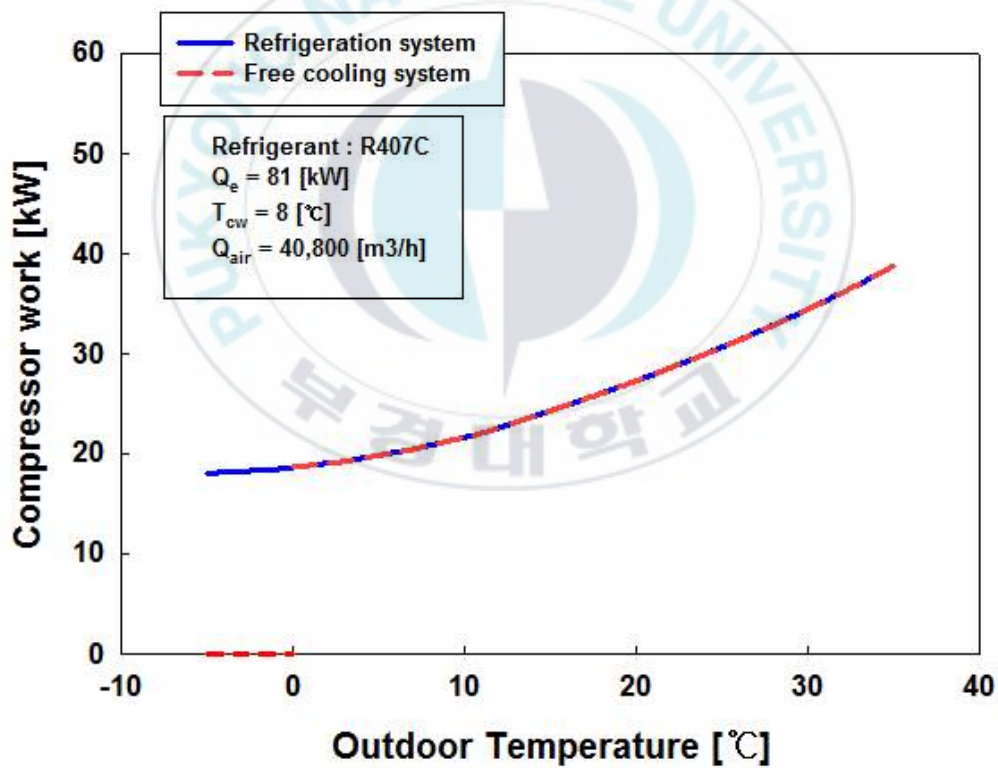


Figure 3.3 Compressor work according to outdoor temperature

Figure 3.3에서 나타낸 압축일은 작동유체를 R407C로 설정하였으며, 요구냉수온도 8℃, 냉방부하가 81kW(20RT)인 경우이다. 기존의 냉각 시스템의 경우, 모든 외기온도 범위에서 압축일량이 발생하지만 프리쿨링 시스템의 경우에는 일정외기온도 이하에서는 압축일량이 발생하지 않는다. 요구냉수온도가 8℃일 때, 드라이쿨러는 0℃이하에서 작동하며 압축일량이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 상에서는 증발온도는 일정하게 유지될 때 외기온도에 따라 응축온도가 상승하여 압축일이 증가하지만, 실제 압축기의 경우 외기온도의 증가나 감소로 인하여 증발온도 또한 변화가 있으며, 압축기의 최소 동력이 존재하는 것을 확인하였다. 따라서 압축기의 성능표를 기반으로 최소 압축일을 설정하였으며, 그때의 압축일이 약 19kW이다. 본 연구에서는 위의 압축일을 기반으로 에너지절감분석을 진행하였다.

3.2.3 요구냉수온도에 따른 성능분석

프리쿨링 시스템은 드라이쿨러의 성능이나 외기온도에 따라 냉각능력이 결정되며, 그 중에서도 요구냉수온도가 프리쿨링 시스템의 작동범위를 결정짓는 가장 큰 요인으로 분석된다. 본 연구에서는 공조용 프리쿨링 시스템 적용을 위하여 요구냉수온도를 8℃로 설정하여 성능을 평가하였으나, 실질적으로 산업용공조에서는 이보다 높은 온도의 냉수를 요구하고 있다. 한 예로 플라스틱 공정에 사용되는 요구냉수온도는 25℃로서 건물공조에 사용되는 냉수온도보다 높다. 따라서, 요구냉수온도는 프리쿨링 시스템에서 에너지 절감효과에 기인하는 중요한 요소이며, 냉수온도가 높을수록 드라이쿨러가 작동하는 온도의 범위가 증가하기 때문에 에너지 절감효과도 크다.

Figure 3.4는 요구냉수온도와 외기온도에 따른 드라이쿨러의 냉각능력을 나타낸 그림이다.

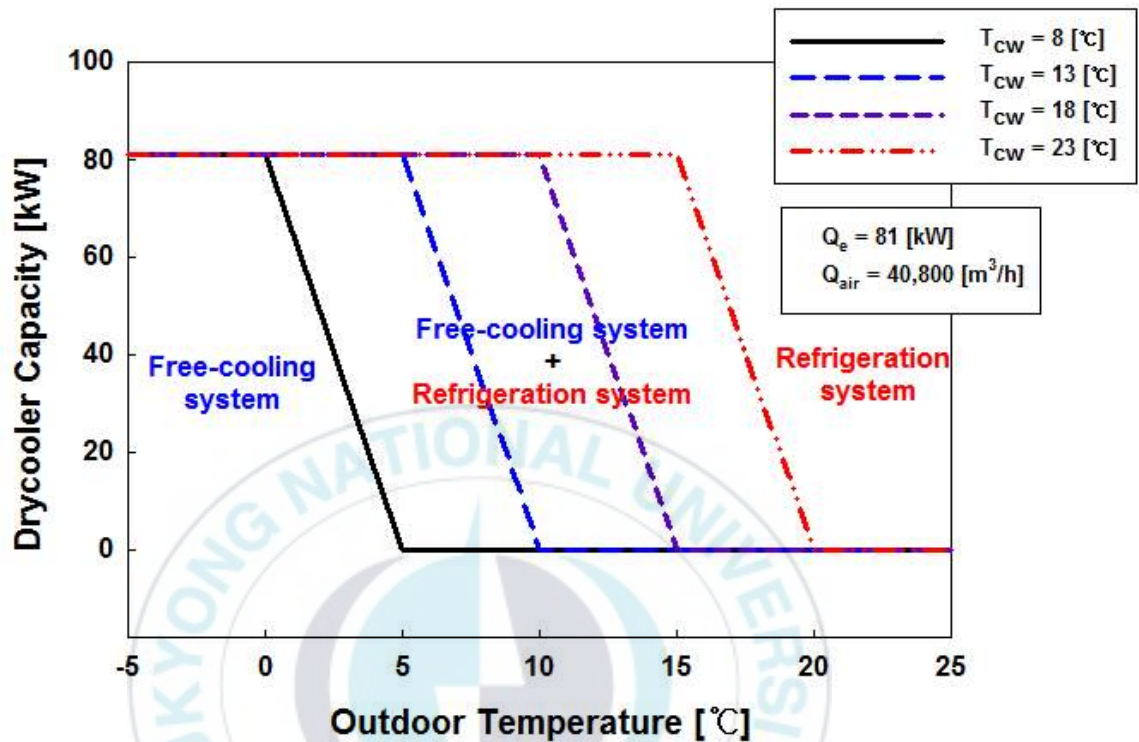


Figure 3.4 Drycooler capacity according to outdoor temperature and cooled water temperature

Figure 3.4는 동일한 성능의 드라이쿨러로 적용하여 요구냉수온도에 따른 드라이쿨러의 작동범위를 나타낸 그림이다. 요구냉수온도는 8~23°C까지 5°C 간격으로 적용하였으며, 요구냉수온도가 증가할수록 드라이쿨러의 작동범위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 요구냉수온도가 8°C일 때, 이용할 수 있는 최대 외기온도가 0°C이지만 요구냉수온도가 23°C일 때, 약 15°C까지 이용할 수 있다고 판단된다. 또한, 국내의 중간기 평균 기온데이터가 15°C임을 감안할 때, 에너지 절감효과 또한 뛰어나다고 판단된다.

3.3 일정 조건에서의 실험

3.3.1 실험장치도

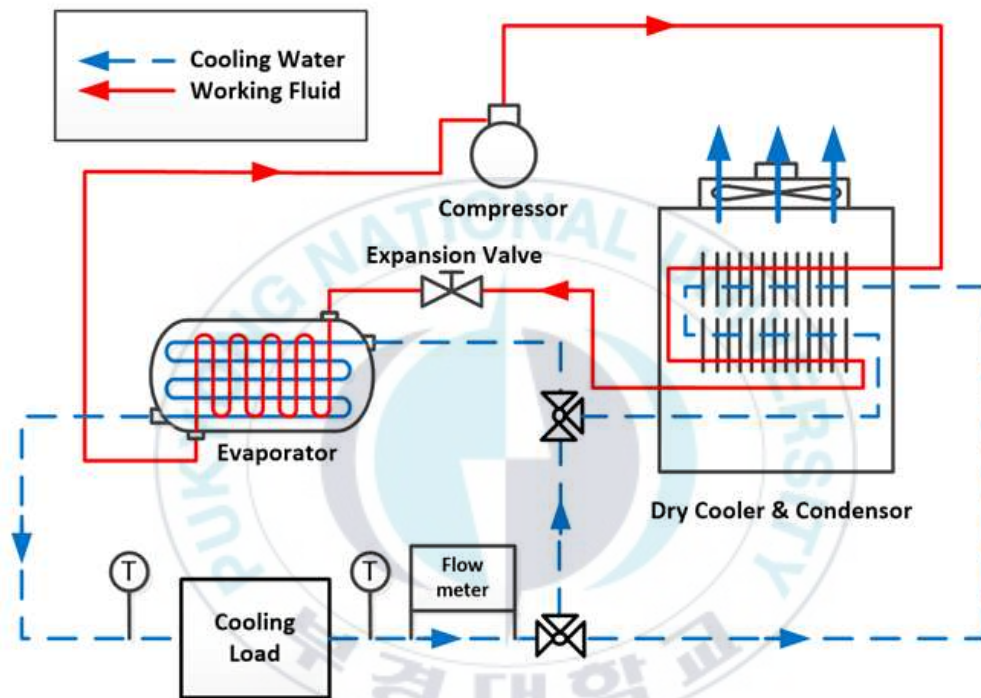


Figure 3.5 Schematic of the experimental equipment

본 실험은 프리쿨링 시스템의 성능을 확인하기 위하여 실험을 진행하였으며, Figure 3.5는 본 실험장치의 장치도이다. 시뮬레이션과 동일하게 응축기와 드라이쿨러는 팬을 공유하는 방식으로 제작되었으며, 냉수는 외기 온도에 따라 삼방밸브를 통하여 이동하게 된다. 냉수의 냉각여부를 확인하기 위하여 부하처의 입출구에 온도센서를 설치하였고, 냉수의 유량을 측정하기 위하여 유량계를 설치하였다.

3.3.2 실험 조건 및 방법

Table 3.2 Condition of the free cooling system test

Variable	Value
Working fluid	R407C
Outdoor temperature (°C)	-2, 2, 35
Outlet cooling water temperature (°C)	12
Water flowrate (kg/s)	4.87

본 실험은 시뮬레이션과의 데이터를 비교함에 목적이 있으며, 실험조건은 Table 3.2와 같다. 시뮬레이션과 동일하게 작동유체는 R407C를 사용하였으며, 부하처에서 나오는 물의 온도는 12°C이며 시스템을 통해 냉각된 냉수의 온도는 8°C로 설정하였다. 냉각열량 81kW를 맞추기 위하여 냉수의 유량은 4.87 kg/s를 적용하였다. 적용외기온도는 프리쿨링 시스템의 운전방식에 따라 설정하였으며, 드라이쿨러 단독운전, 혼합운전, 냉각시스템 단독운전의 범위에 맞게 -2, 2, 35°C로 설정하였다.

본 실험은 한국공조인증센터에서 진행하였으며, 실험방법은 챔버내부에 프리쿨링 시스템을 구비하여 가동한다. 실험조건에 따라 외기온도를 설정하고 외기온도가 안정 상태에 도달했을 때 측정을 시작한다. 측정된 데이터는 모니터에 기록되며, 오차를 줄이기 위하여 2~3번 반복 실험한다. 측정되는 값은 전력량, 입출구온도, 냉각열량이며, 이를 결과를 바탕으로 프리쿨링 시스템의 성능을 확인한다. Figure 3.6 (a)는 실험 중인 장치의 사진

이며, (b)는 기록중인 모니터의 화면을 나타냈다.



Figure 3.6 Situation of the test

3.3.3 실험 결과

실험을 통하여 전력량, 냉수출구온도, 냉각열량을 측정할 수 있었으며, 실험결과는 아래와 같다.

Figure 3.7은 설정 외기온도가 -2, 2, 35℃일 때, 실험장치에 사용된 전력량을 나타낸 그래프이다. 사용된 냉매는 R407C이며, 냉수의 유량은 4.87 kg/s로 동일하게 적용하였다. 먼저, 외기온도가 -2℃일때는 드라이쿨러만 작동하기 때문에 전력량의 변화가 낮게 나타났으며, 평균 3.9kW의 전력량을 사용하였다. 이는 대부분 팬의 구동에 사용되었으며, 일부 컨트롤판넬에 사용되었다. 따라서 장치에 사용되는 최소 구동전력이 약 4.1 kW로 판단된다. 상용프로그램 HYSYS에는 팬의 구동전력을 넣지않기 때문에 4.1 kW의 전력을 부가하여 적용하였다. 외기온도가 2℃일 때에는 혼합운전하는 경우로 약 29kW의 전력을 소모하였으며, 이는 팬 구동부하와 압축기의 압축일량을 포함한 전력량이다. 외기온도가 35℃일 때에는 냉각기만 작동하며, 압축일량은 약 41 kW로 나타났다.

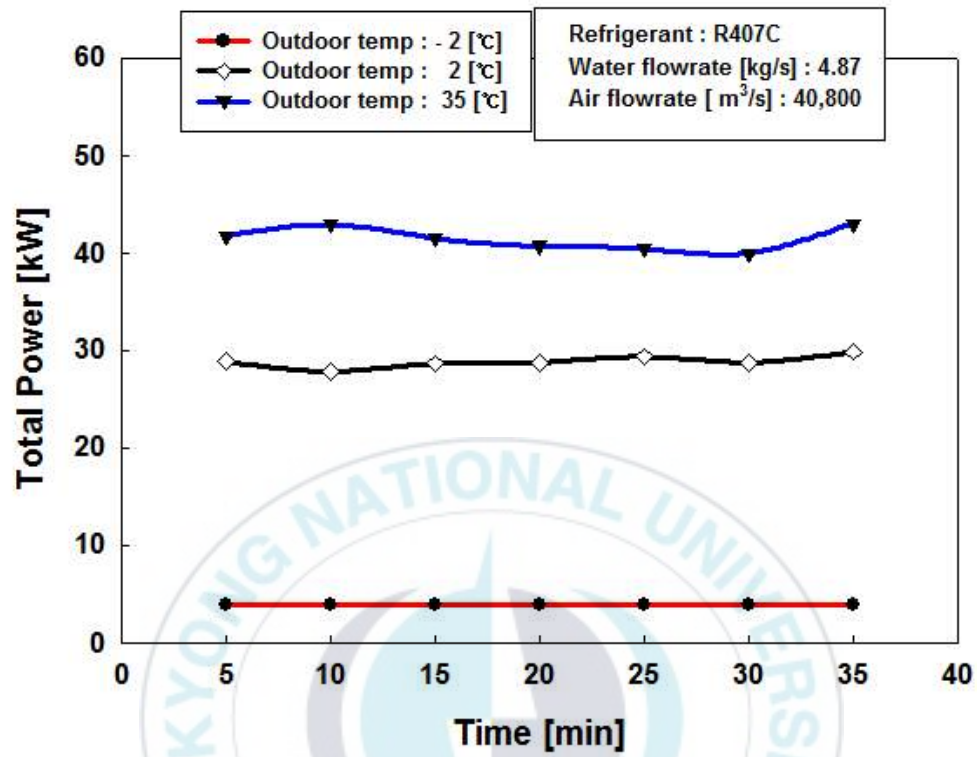


Figure 3.7 Total power according to time and outdoor temperature

Figure 3.8은 외기온도가 -2, 2, 35℃일 때 냉수의 출구온도를 나타낸 그림이다. 시뮬레이션에서 출구온도는 8℃로 설정하였고, 실험에서도 약 8℃ 근처의 값을 나타냈다. 외기온도가 -2℃ 일 때는 드라이쿨러가 단독 운전하는 구간으로 외기만으로 냉각하는 것을 확인하였다. 외기온도가 2℃ 일 때에는 혼합 운전구간으로 마찬가지로 약 8℃의 냉수출구온도를 나타냈다. 외기온도가 35℃, 냉각기가 단독 운전할 경우에도 마찬가지로 약 8℃의 출구온도를 나타냈다. 이는 모든 구간에서 요구냉수온도를 충족하는 것을 의미하며, 각 조건에서 프리쿨링 시스템의 성능을 확인하였다.

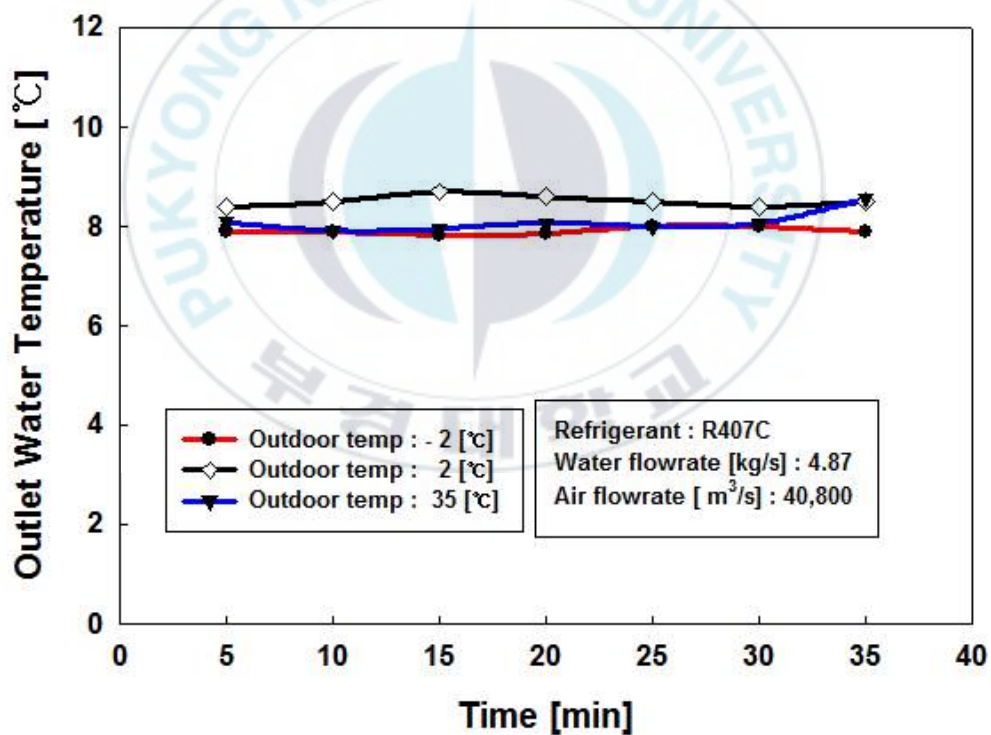


Figure 3.8 Outlet water temperature according to time and outdoor temperature

Figure 3.9는 외기온도가 -2, 2, 35℃일 때 시스템의 냉각능력을 나타낸 그림이다. 전술한 바와 같이 세 구간에서 목표 냉각열량인 81kW의 값에 근사한 것을 확인하였으며, 이는 또한 프리쿨링 시스템의 성능을 의미한다.

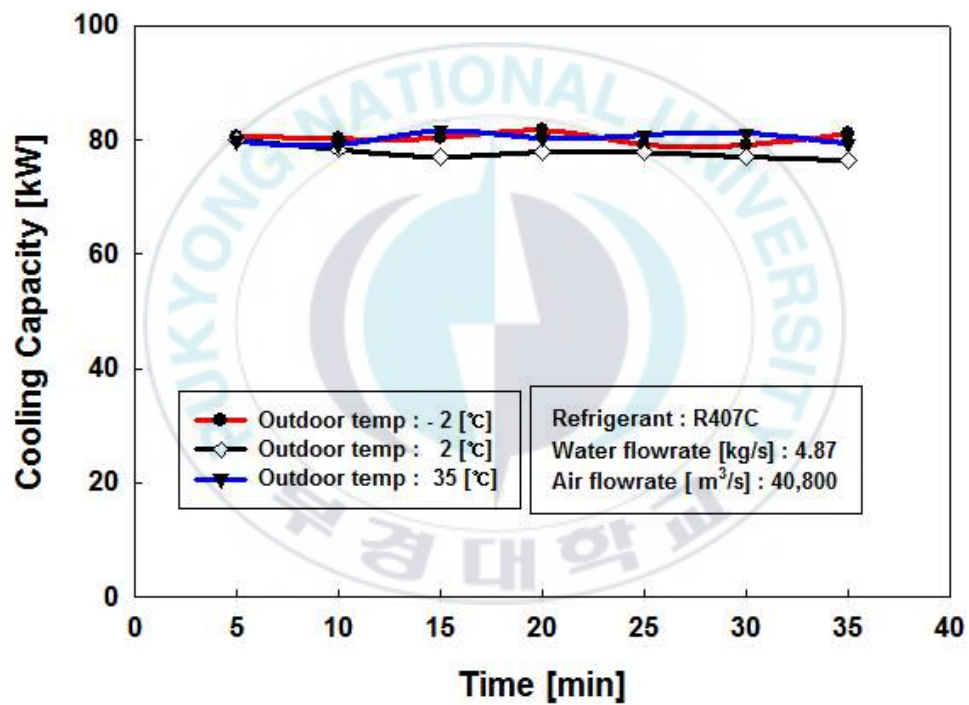


Figure 3.9 Cooling capacity according to time and outdoor temperature

3.4 실제 데이터와 시뮬레이션 데이터의 비교

본 연구는 모든 온도범위에서의 에너지사용량을 측정할 수 없어 시뮬레이션을 통하여 에너지 절감분석을 진행하였다. 따라서 실제 데이터와 시뮬레이션의 데이터를 비교하여 시뮬레이션 데이터의 신빙성을 판단하고자 한다.

실험은 총 3가지 조건에서 진행하였으며 Table 3.3은 외기온도가 -2°C 일 때, 시뮬레이션 데이터와 실험 데이터를 비교한 표이다. 드라이쿨러만 단독 운전할 경우에 냉각열량과 출구온도 모두 만족하였으며, 사용 전력량도 크게 차이나지 않았다.

Table 3.3 Comparison simulation with test result in -2°C

Variable	Simulation	Test
Inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	12	11.85
Outlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	8	7.91
ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	4	3.94
Total power (kW)	3	3.9
Cooling capacity (kW)	81.81	80.58

외기온도가 2℃ 일 경우에는 혼합운전의 경우로 Tabel 3.4는 외기 온도가 2℃ 일 때 시뮬레이션과 실험데이터를 비교한 표이다. 시뮬레이션과의 오차는 발생하지만 유사한 데이터를 확인하였다. 따라서 혼합운전 중에도 성능과 데이터의 신빙성을 확인하였다.

Table 3.4 Comparison simulation with test result in 2℃

Variable	Simulation	Test
Inlet temperature (℃)	12	12.28
Outlet temperature (℃)	8	8.5
ΔT (℃)	4	3.78
Total power (kW)	25.4	29.9
Cooling capacity (kW)	81.81	77.32

외기온도가 35℃일 경우에는 냉각기가 단독운전 하는 경우로 Table 3.5는 시뮬레이션 데이터와 실제 실험데이터를 비교한 표이다. 시뮬레이션과 실제 데이터를 비교해보았을 때 대체적으로 유사한 값을 보이며, 전력사용량에서 실제데이터가 약 3.97 kW 더 많이 사용된 것으로 측정됐다. 이는 냉매량이 시뮬레이션값보다 과 충전되었을 것으로 판단된다.

Table 3.5 Comparison simulation with test result in 35℃

Variable	Simulation	Test
Inlet temperature (℃)	12	11.98
Outlet temperature (℃)	8	8.09
ΔT	4	3.89
Total power	37.83	41.8
Cooling capacity	81.81	79.4

제 4 장 프리쿨링 시스템의 경제성평가

4.1 경제성 평가 방법 및 조건

프리쿨링 시스템을 국내에 도입할 경우에 경제적인 가치를 확인할 필요가 있으며, 경제성평가를 위하여 NPV법을 이용하여 경제성평가를 진행하였다. 본 연구에서 적용한 현재가치법 (NPV)란 경제성평가방법 중 하나로, 제품의 미래가치를 현재가치로 변환하여 비교하는 방법이다. NPV법은 $NPV > 0$ 이 되는 시점 이후에 가치가 있다고 판단되며, 그 시점을 통해 제품의 회수년도를 근사적으로 확인할 수 있다. NPV를 구하는 식은 아래와 같다.

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+p)^t}$$

(C_0 : 초기비용, n : 회수기간, p : 할인율)

일반적으로 C_0 는 제품의 초기투자비용을 뜻하며, F_t 는 그 시점에서의 편익을 뜻한다. 본 연구에 사용된 C_0 는 두 제품의 초기투자비용 차이를, F_t 는 프리쿨링시스템을 사용할 경우 절감되는 에너지양을 나타낸다. p 는 할인율로 최근 7년간 국내의 실질할인율의 평균값을 적용하였다. Table 4.1은 국내의 물가상승률을 반영한 실질할인율을 타나낸 표이다. 전술한 바와 같이 장치실험을 일부 온도조건에서 진행하였기 때문에, 모든 온도조건에서 소요 동력을 확인할 수 없다. 따라서 상용프로그램 HYSYS를 이용하여 에너지사용량을 도출하였으며, 경제성평가에 사용하였다.

경제성 평가는 데이터센터용, 산업공조용 2가지의 경우로 적용하여 진행하였으며, 데이터센터의 경우 8℃, 13℃의 요구냉수온도와 24h 운전하는 조건을 적용하였다. 산업공정의 경우 요구냉수온도가 높기 때문에 18℃, 23℃의 온도를 주었으며, 주로 주간시간에 작동하기 때문에 일일 12h로 설정하였다.

Table 4.1 Real rate of interest during 7 years

Year	Deposit rate	Electricity charge	
		Price index volatility	Real rate of interest
2008	5.9	0	5.9
2009	3.8	0	3.8
2010	3.5	0.8	2.7
2011	3.9	2	1.9
2012	3.4	2.1	1.3
2013	2.8	3.8	-0.9
2014	2.4	2.2	0.2
Ave	3.9	1.1	2.8

4.2 연간 에너지 사용량 분석

경제성평가에서 필요한 항목인 Ft, 즉 에너지절감으로 취한 이윤을 확인하기 위하여 상용프로그램 HYSYS를 이용하여 연간 에너지사용량을 확인하였다. 시뮬레이션은 총 데이터센터와 산업공정용으로 나누어 진행하였으며, 실험조건은 전술한 바와 같다.



4.2.1 데이터 센터

데이터센터용으로 적용하기 위하여 시뮬레이션 조건은 요구냉수온도 8℃, 작동시간은 일일 24h로 적용하였으며, 울산지역을 대상으로 연간사용량을 계산하였다.

Figure 4.1은 시뮬레이션을 통하여 산출한 월별 에너지사용량을 나타낸 그림이다. 드라이쿨러의 작동으로 인하여 외기온도가 낮은 동계의 경우 에너지 절감효과가 크게 나타났으며, 약 12%의 에너지 절감효과를 확인하였다.

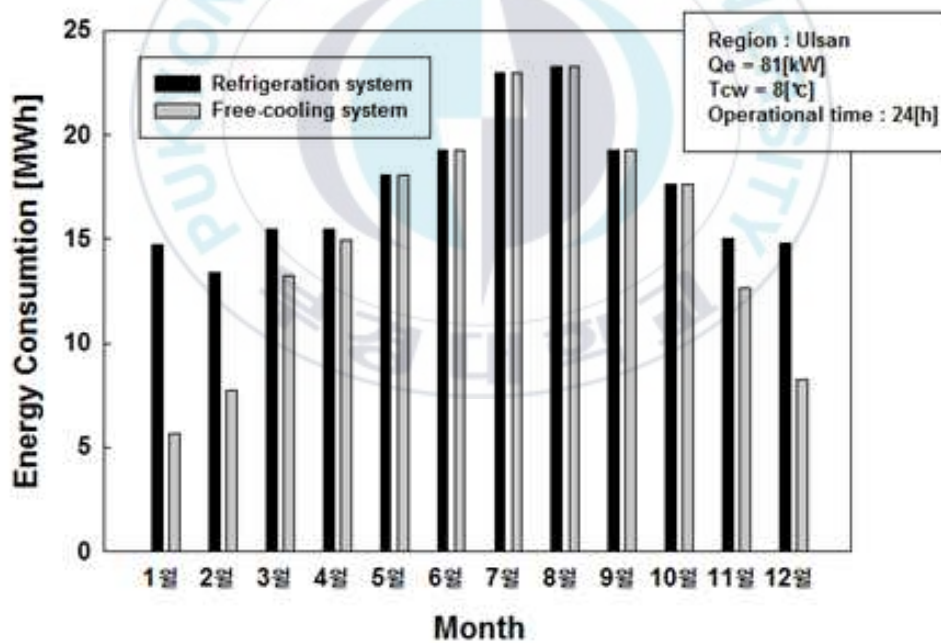


Figure 4.1 Energy consumption according to month (Tcw=8)

Figure 4.2는 요구냉수온도가 13℃, 일일 24h 운전할 경우 프리쿨링 시스템과 일반 냉각시스템의 연간 에너지사용량을 나타낸 그림이다. 요구냉수온도가 증가하였기 때문에 똑같은 외기조건에서 작동하는 범위가 증가하였으며, 특히 동계에는 눈에 띄는 차이를 보였다.

연간 약 21%의 절감효과를 확인하였으며, 요구냉수온도가 8℃때와 마찬가지로 동계에는 드라이쿨러가 작동하지 않기 때문에 일반 냉각시스템과 동일한 소비량을 나타냈다.

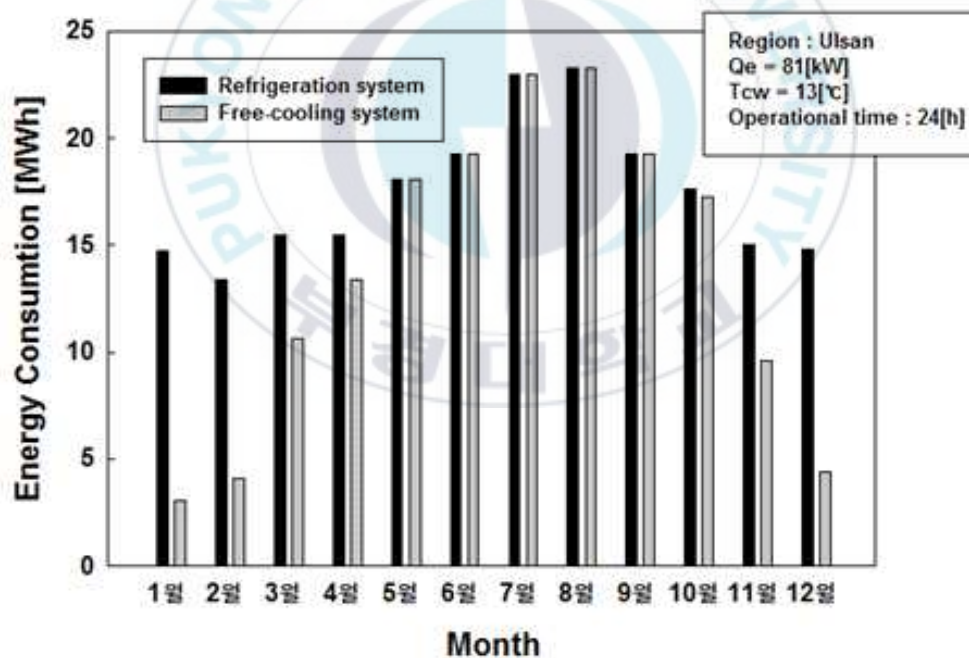


Figure 4.2 Energy consumption according to month ($T_{cw}=13$)

4.2.2 산업공정

Figure 4.3은 요구냉수온도가 18℃, 일일 12h 운전할 경우 프리쿨링 시스템과 일반 냉각시스템의 연간 에너지사용량을 나타낸 그림이다. 전술한 바와 같이 울산지역을 대상으로 진행하였으며, 상용프로그램 HYSYS를 이용하여 에너지사용량을 산출하였다.

연간 약 23%의 에너지절감효과를 확인하였으며 이용 가능한 외기의 온도가 높아졌기 때문에 에너지 절감효과를 확인할 수 있다.

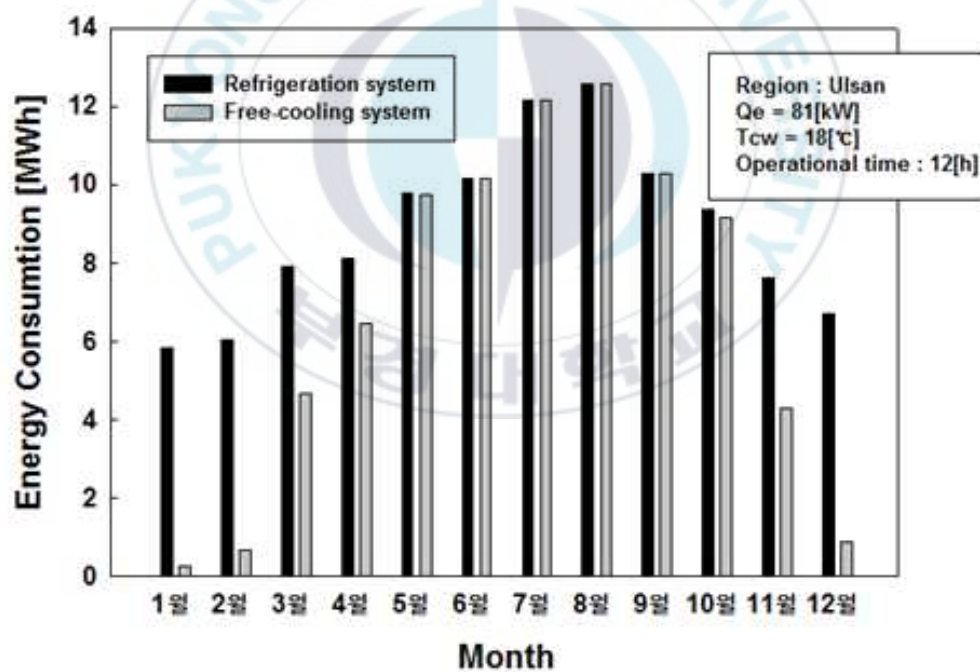


Figure 4.3 Energy consumption according to month (Tcw=18)

Figure 4.4는 요구냉수온도가 23℃이고, 일일 12h 운전하였을 때 월별 에너지사용량을 나타낸 그림이다. 전술한 바와 마찬가지로 울산지역을 대상으로 진행하였고, 요구냉수온도 18℃일 때와 비교해볼 때 동계를 비롯한 중간기에 많은 에너지절감효과를 볼 수 있다.

연간 약 36%의 에너지절감효과를 확인하였으며, 요구냉수온도를 상승시킬수록 절감효과가 클 것으로 판단된다.

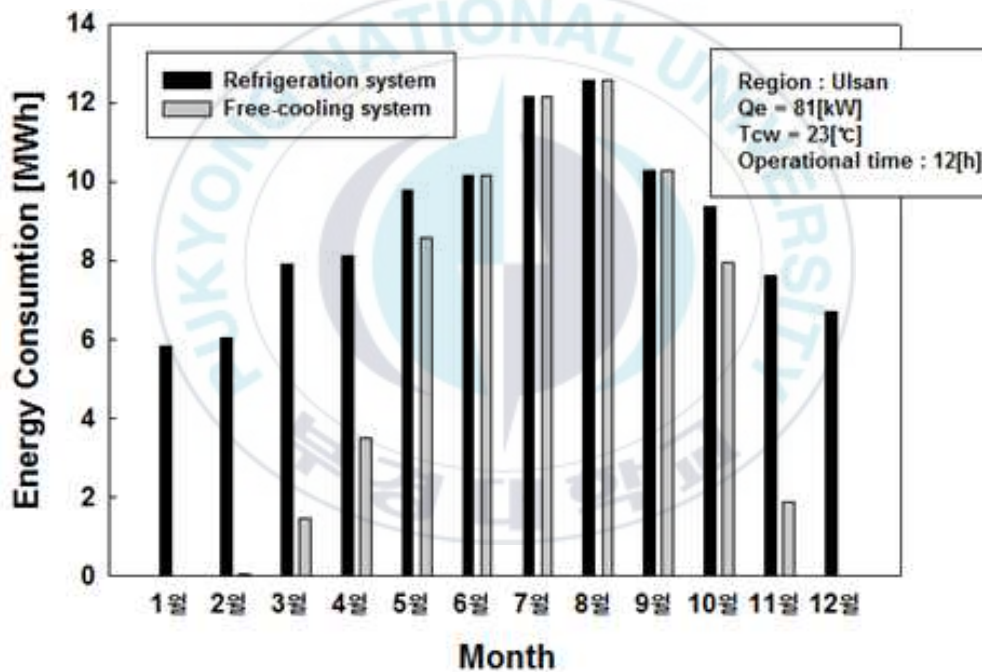
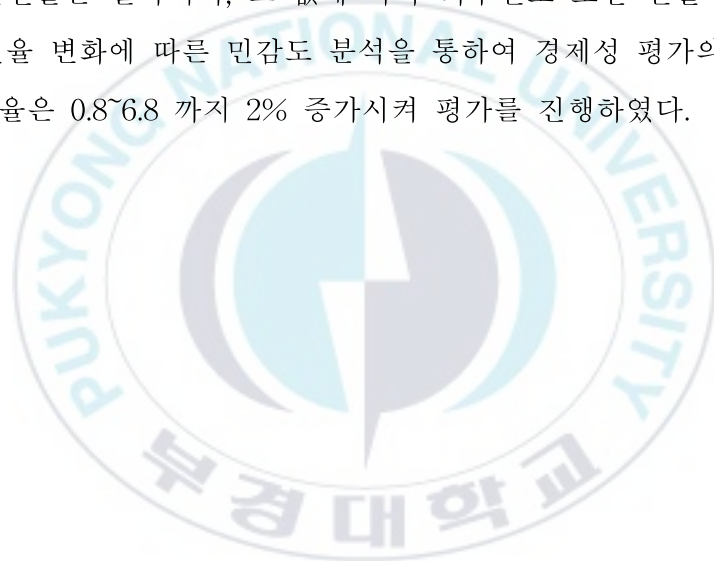


Figure 4.4 Energy consumption according to month (Tcw=23)

4.3 경제성 평가 및 민감도 분석

경제성 평가를 위하여 시뮬레이션을 통하여 국내의 기상데이터를 조건으로 프리쿨링 시스템과 일반 냉각시스템의 에너지사용량을 비교하였으며, NPV법을 이용하여 근사적인 회수년도를 확인하고, 국내 적용시 어느정도의 가치가 있는지 평가하고자 한다. 전술한 바와 같이 데이터센터와 산업 공정용으로 나누어 진행하였다. 국내의 물가상승률에 따라 국내의 전기료에 대한 할인율은 달라지며, 그 값에 따라 회수년도 또한 변할 수 있다. 따라서 할인율 변화에 따른 민감도 분석을 통하여 경제성 평가의 오차를 줄였다. 할인율은 0.8~6.8 까지 2% 증가시켜 평가를 진행하였다.



4.3.1 데이터 센터

Table 4.2 Economic evaluation of free cooling system for industrial process

(unit: ten thousand one)

	C_0	Annual energy consumption				Real discount rate (%)
		8°C	Ft	13°C	Ft	
General Cooler	400	1,884	238	1,884	398	2.8
Drycooler		1,646		1,486		

Table 4.1은 데이터센터용으로 프리쿨링 시스템을 사용할 경우 즉, 요구 냉수온도가 8°C, 13°C일 때 일반쿨러와의 에너지사용량과 편차를 나타냈으며, 할인율은 2.8%로 적용하였다. 전술한 바와 같이 일일 24h 사용하였을 경우로 설정하였으며, 초기투자비용은 두 시스템의 초기투자비용의 차이를 나타냈으며, 약 400만원의 초기투자비용이 예상된다. 요구냉수온도가 8°C일 때 약 연간 238만원의 절약효과를 보였으며, 요구냉수온도가 13°C일 경우 약 400만원의 절약효과를 보였다.

Table 4.1의 조건을 바탕으로 경제성 평가를 진행하였으며, Figure 4.5는 회수년도에 따른 NPV를 나타낸 그래프이다. 요구냉수온도가 8℃일 때 약 2년의 회수년도를 나타냈으며 공조기기의 수명이 약 10년이라고 생각할 때 프리쿨링 시스템의 가치가 있다고 판단된다.

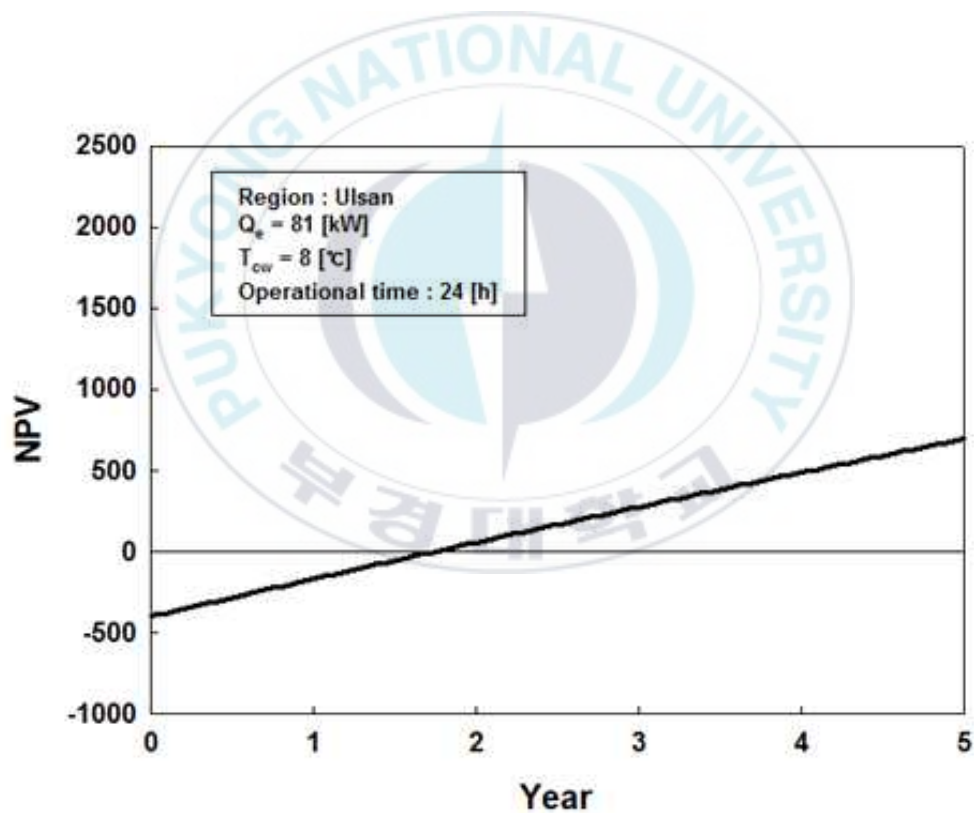


Figure 4.5 NPV according to year ($T_{cw}=8$)

요구냉수온도가 8℃일 때와 동일하게 Table 4.1을 바탕으로 경제성평가를 진행하였으며, Figure 4.6은 회수년도에 따른 NPV를 나타낸 그림이다. 요구냉수온도가 13℃일 때 약 1년의 회수년도를 보였으며, 시스템적으로 충분한 가치가 있다고 판단된다. 또한 통신장비의 발전으로 데이터센터 부하가 증가함에 따라 프리쿨링 시스템의 가치는 더욱 증가할 것으로 판단된다.

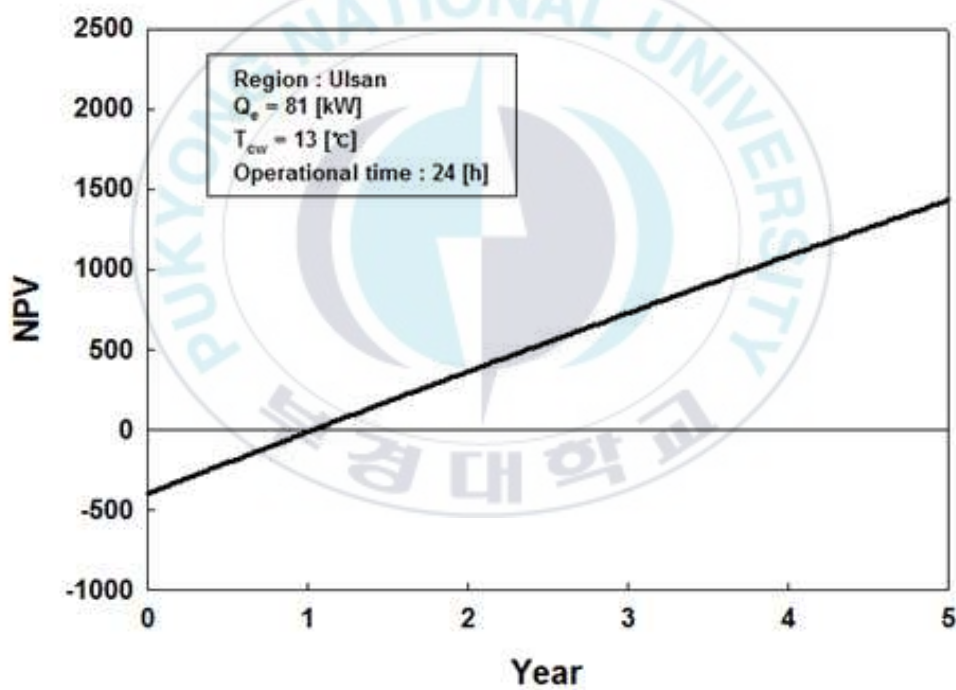


Figure 4.6 NPV according to year ($T_{cw}=13$)

Figure 4.7은 할인율 변화에 따른 NPV를 나타낸 그림이다. 조건은 요구 냉수온도를 8℃, 일일 운전시간을 24h으로 적용하였으며, 할인율 변화에 따라 큰 차이가 없이 약 2년의 회수년도를 나타냈다. 이는 회수년도가 짧기 때문에 할인율변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않았으며, 마찬가지로 경제적으로 가치가 있다고 판단된다.

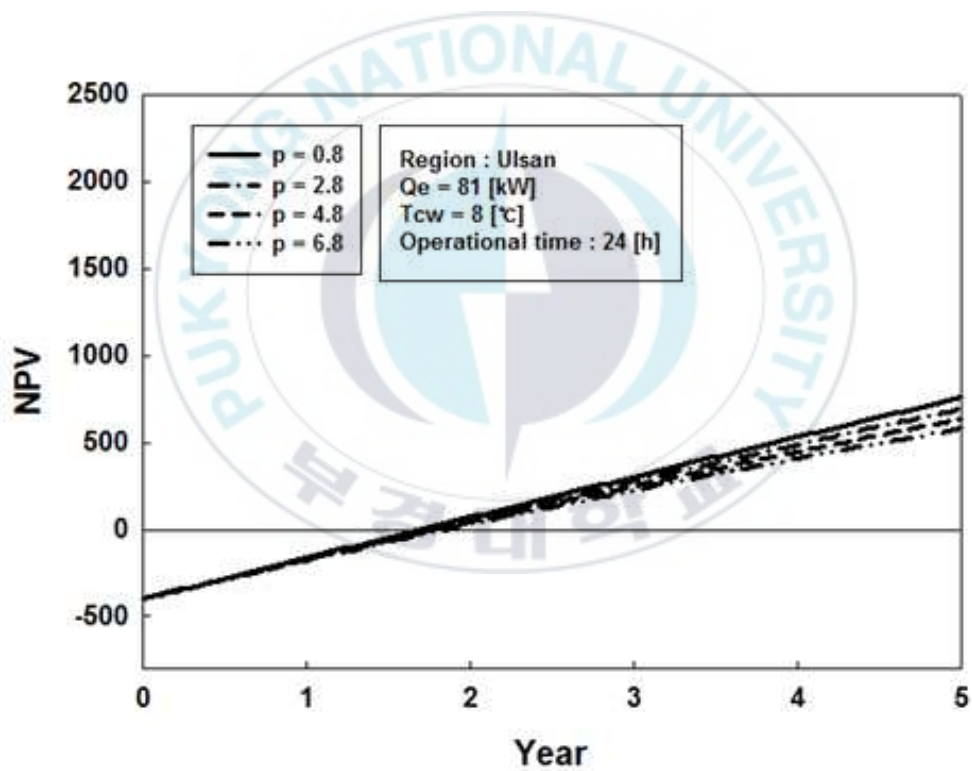


Figure 4.7 NPV according to year and real discount rate (Tcw=8)

Figure 4.8은 요구냉수온도가 13℃, 일일 24h 운전하였을 때 할인율 변화에 따른 NPV의 값을 나타낸 그림이다. 요구냉수온도가 8℃일 때와 마찬가지로 할인율 변화에 따른 회수년도의 차이는 크게 나타나지 않았으며, 물가상승률의 변화에도 큰 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.

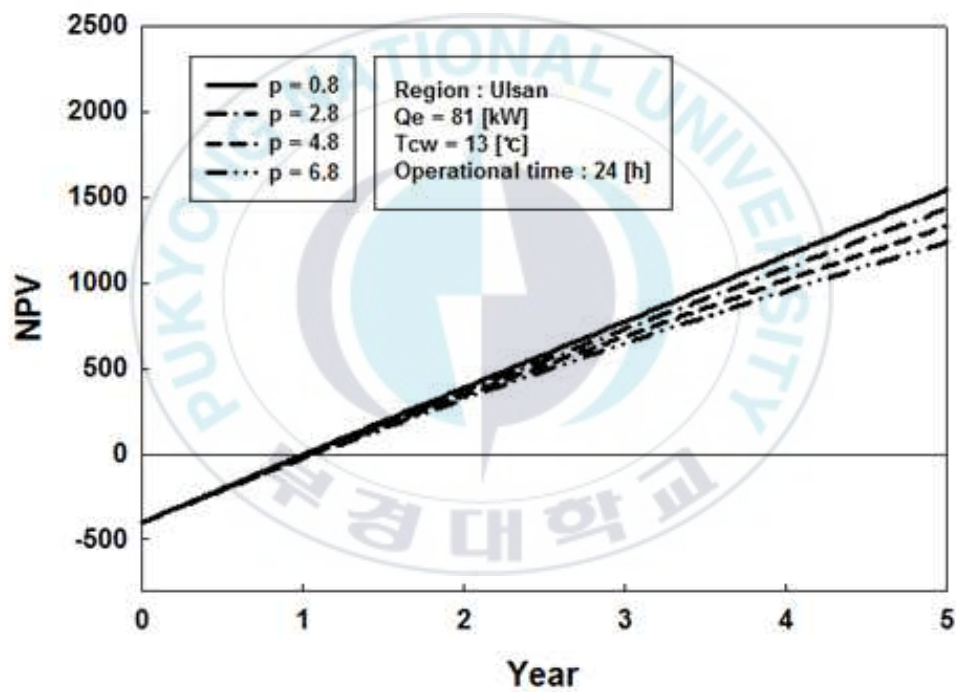


Figure 4.8 NPV according to year and real discount rate
($T_{cw}=13$)

4.3.2 산업공정

Table 4.3 Economic evaluation of free cooling system for data center

(unit: ten thousand one)

	C_0	Annual energy consumption				Real discount rate (%)
		18°C	Ft	23°C	Ft	
General Cooler	400	960	228	960	343	2.8
Drycooler		732		617		

Table 4.2는 산업공정용으로 프리쿨링 시스템을 사용할 경우 즉, 요구냉수온도가 18°C, 23°C일 때 일반 냉각시스템과 프리쿨링 시스템의 에너지사용량과 편차를 나타냈으며, 할인율은 2.8%로 적용하였다. 전술한 바와 같이 일일 12h 사용하였을 경우로 설정하였으며, 초기투자비용은 두 시스템의 초기투자비용의 차이를 나타냈으며, 약 400만원의 초기투자비용이 예상된다. 요구냉수온도가 18°C일 때 약 연간 228만원의 절약효과를 보였으며, 요구냉수온도가 23°C일 경우 약 343만원의 절약효과를 보였다.

Table 4.2의 조건을 바탕으로 경제성 평가를 진행하였으며, Figure 4.9는 요구냉수온도가 18℃일 때 회수년도에 따른 NPV를 나타낸 그래프이다. 요구냉수온도가 18℃일 때 약 1.8년의 회수년도를 나타냈으며, 공조기기의 수명이 약 10년이라고 생각할 때 프리쿨링 시스템의 가치가 있다고 판단된다.

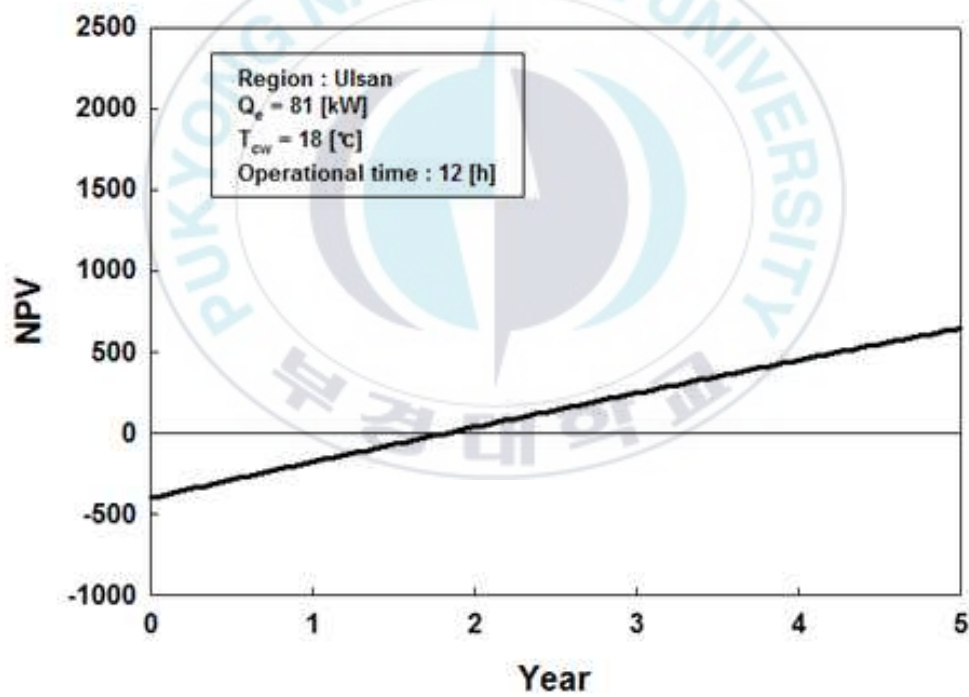


Figure 4.9 NPV according to year (Tcw=18)

요구냉수온도가 18℃일 때와 동일하게 Table 4.2을 바탕으로 경제성평가를 진행하였으며, Figure 4.10은 요구냉수온도가 23℃일 때 회수년도에 따른 NPV를 나타낸 그림이다. 요구냉수온도가 23℃일 때 약 1년의 회수년도를 보였으며, 시스템적으로 충분한 가치가 있다고 판단된다. 데이터센터용으로 사용할 경우와 유사한 값을 나타냈으며, 산업공정용의 냉수온도가 주로 높기 때문에 에너지절감효과가 더 클 것으로 예상된다.

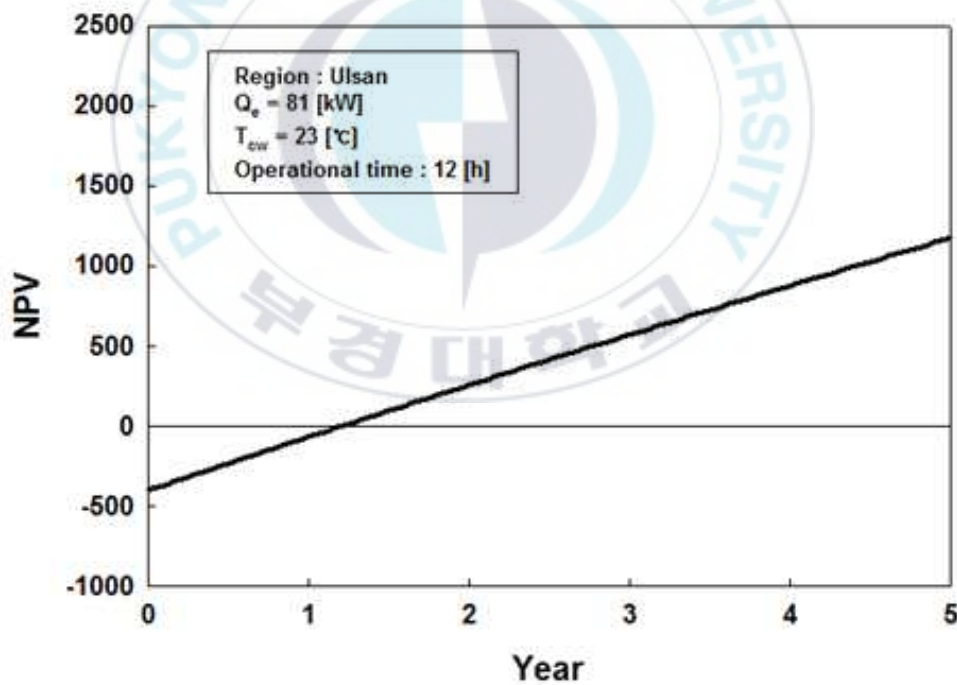


Figure 4.10 NPV according to year (Tcw=23)

Figure 4.11은 요구냉수온도가 18℃일 때, 할인율 변화에 따른 NPV를 나타낸 그림이다. 조건은 전술한 바와 같이 동일하게 적용하였으며, 할인율 변화에 따라 큰 차이가 없이 약 2년의 회수년도를 나타냈다. 데이터센터용과 마찬가지로 회수년도가 짧기 때문에 할인율변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다.

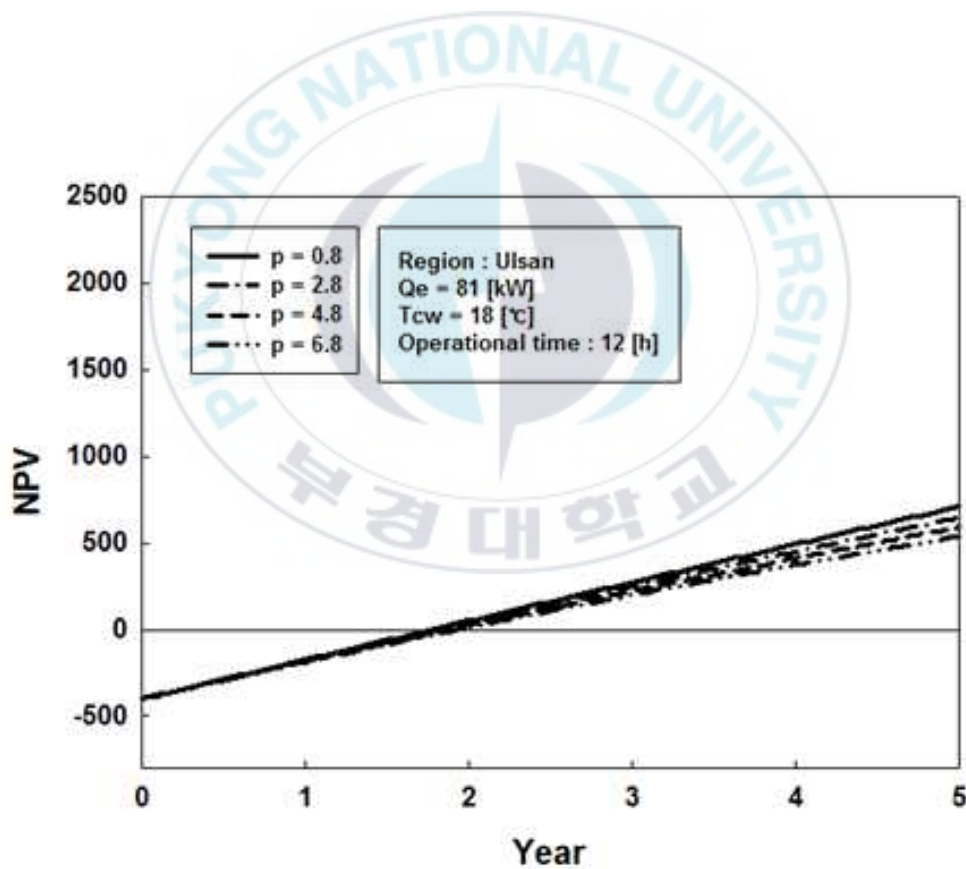


Figure 4.11 NPV according to year and real discount rate ($T_{cw}=18$)

Figure 4.12는 요구냉수온도가 23℃일 때, 할인율 변화에 따른 NPV를 나타낸 그림이다. 조건은 전술한 바와 같이 동일하게 적용하였으며, 할인율 변화에 따라 큰 차이가 없이 약 2년의 회수년도를 나타냈다. 데이터센터용과 마찬가지로 회수년도가 짧기 때문에 할인율변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다.

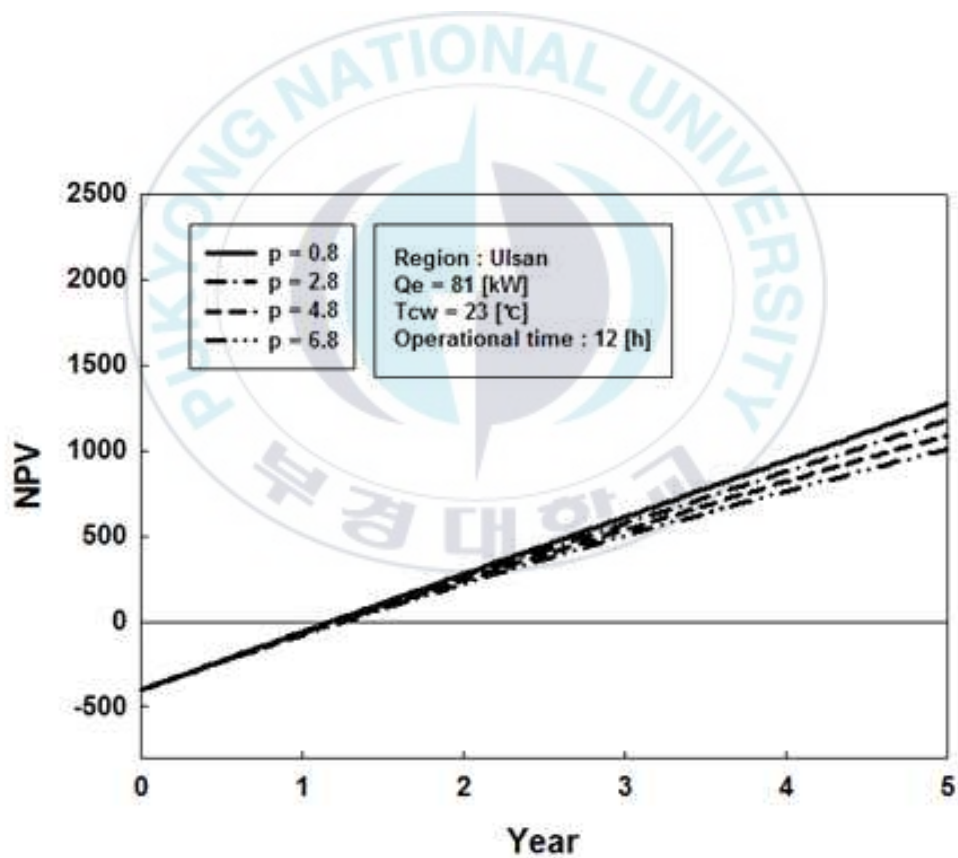


Figure 4.12 NPV according to year and real discount rate (Tcw=23)

제 5 장 결 론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 프리쿨링 시스템은 드라이쿨러와 일반 냉각기로 구성되며, 외기온도 조건에 따라 작동범위가 달라진다. 본 연구에서는 요구냉수온도를 8℃로 설정하였고, 0℃ 이하에서는 드라이쿨러가 단독운전하며 0~5℃ 사이에서는 드라이쿨러와 냉각기가 혼용되며, 5℃ 이상에서는 냉각기만 단독운전 한다.

(2) 프리쿨링 시스템은 드라이쿨러의 성능뿐 만 아니라 요구냉수온도에 의해서 성능이 결정된다. 요구냉수온도가 증가할수록 드라이쿨러의 작동범위는 증가하며, 에너지절감효과도 크다. 산업공정용으로 사용할 경우 요구냉수온도가 20~25℃ 것으로 가정할 때 에너지절감효과를 기대할 수 있다.

(3) 에너지절감 분석을 위하여 시뮬레이션 데이터와 실험데이터를 비교하였으며, 전력량, 출구온도, 냉각열량 부분에서 10% 이내의 오차율을 나타냈다. 시뮬레이션 데이터의 신빙성을 확인하였다.

(4) 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 데이터센터용과 산업공정용 프리쿨링 시스템의 에너지절감분석을 하였다. 분석결과 데이터센터용과 산업공정용으로 사용할 때 최대 38%의 에너지 절감효과를 확인하였다.

(5) 에너지절감량을 바탕으로 프리쿨링 시스템의 경제성평가를 진행하였

으며, 최대 1년 이내의 회수년도를 나타냈다. 기존의 공조용냉동기의 수명이 10년으로 가정할 때 가치가 있다고 판단된다.



참고문헌

- [1] 김세훈, 원종연, 이연구 (2004), “건물의 에너지 절약을 위한 외기냉수 냉방 시스템에 관한 연구” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp. 246-749
- [2] 윤정인, 손창효, 허정호, 김영민 (2014), “데이터 센터의 외기냉수냉방 시스템에 대한 에너지 절감효과 분석” 대한동력기계공학회지, pp. 73-78
- [3] 김범수, 김영일, 권용일, 최종연, 손명규 (2010), “외기냉수냉방의 운전 사례 및 에너지 절감량 분석” 대한설비공학회 학술발표대회, pp. 1088-1093
- [4] Potts Z (2010), “Free cooling technologies in data center applications”, pp.1-10
- [5] Zhang. H, Shao. S, Xu. H, Zou. H, Tian. C (2014), “Free cooling of data centers: A review” Renewable and sustainable energy reviews, pp. 171-182
- [6] 윤정인, 손창효, 최광환, 백승문, 허정호, 김영민 (2014) “지역별 프리쿨링 시스템의 에너지 절감 분석”, 한국태양에너지학회, pp. 82-88
- [7] Acul. H (2008), “Dry cooler free cooling applications in cold water air conditioning and process cooling system”

[8] 이승연, 김민호, 이성구, 연창근 (2011) “데이터 센터의 냉방에너지 절감을 위한 Free Cooling 시스템 개선에 대한 연구”, 대한설비공학회 하계 학술발표대회 논문집, pp. 810-814

[9] HYSYS v8.6 Aspentech. Inc.

[10] Bean J, Niemann. J, Avelar V, “ Economizer Modes of Data Center Cooling Systems”, pp.1-19



감사의 글

하나라도 더 배우겠다는 생각 하나로 대학원에 들어오게 되었고, 어느 덧 시간이 흘러 대학원 생활을 마무리하는 시점이 되었습니다. 아직도 배워야 할 것이 많지만, 대학원 생활을 마무리하게 되어 아쉽습니다.

대학원 생활동안 제 부족한 점을 채워주신 감사한 분들이 많습니다. 먼저 저의 지도 교수이신 윤정인 교수님, 예리한 지적으로 부족한 점을 많이 가르쳐 주시고, 과제 외의 세계 관심을 가져주시고 조언해 주셔서 감사합니다. 그리고 연구의 발전을 위해서 항상 조언을 해주신 손창호 교수님, 참고문헌을 통하여 많은 정보를 제공해 주신 금종수 교수님, 다양한 관점에서 질문을 통하여 새로운 관점을 일깨워 주신 김종수 교수님, 항상 카리스마 있으신 모습으로 자신감을 주신 최광환 교수님, 다소 약한 전기분야에 대하여 많은 조언을 해주신 정석권 교수님, 공학의 기초에 대해 많은 것을 가르쳐주신 김은필 교수님, 그리고 전공분야 외의 타 분야에 대한 생각과 조언을 아낌없이 해주신 오후규 교수님 등 모든 분들께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

또한, 저와 연구를 함께 진행하면서 많은 것을 조언해 주시고 깨우치게 해주신 김영민 기술이사님, 부족한 제게 너무 많은 것을 주셔서 항상 감사하게 느끼고 있습니다.

처음 실험실에 들어왔을 때부터 조언과 관심을 아낌없이 주셨던 백승문

박사님, 지난 시간동안 이끌어주셔서 감사합니다. 한자리에서 묵묵히 동생을 이끌어준 현욱 형, 나의 영원한 사수로 과제를 같이 진행하면서 많은 것을 가르쳐주고 지금도 조언해 주는 정호 형, 장난치는 동생들 받아주고 실험실 이끌어가느라 고생하는 성훈 형, 고등학교 선배로 실험실로 입문시켜준 병효 형, 항상 효율적으로 잘 살아가고 계신 동일 형, 고성에서 외로움을 달래고 계실 정현 형, 저를 지지해준 모든 형들께 항상 감사했지만 표현을 못했다고 전하고 싶습니다. 또한, 소울풀한 노래로 즐거움을 선사한 창민, 하는 듯 안하는 듯 알아서 일을 잘 하는 청래, 타 학교에서 왔음에도 불구하고 열심히 적응하고 잘 해내고 있는 인호, 내 친구들 고맙다고 전하고 싶습니다. 그리고 실험실 막내 준봉, 병화, 형민, 항상 막내로 못난 형들 따라온다고 고생했고, 앞으로 잘되길 기원합니다. 마지막으로 묵묵히 아들을 믿고 지원해 주신 부모님, 항상 감사하며 평생 갚으며 살겠습니다.

모든 분의 도움으로 이 논문을 마무리하게 되었습니다. 감사합니다.