



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

용량가변형 압축기를 이용한 수냉각기의
정밀온도제어 특성



2010년 2월

부경대학교 산업대학원

냉동공조공학과

강 현 준

공 학 석 사 학 위 논 문

용량가변형 압축기를 이용한 수냉각기의
정밀온도제어 특성

지도교수 윤 정 인

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2010년 2월

부경대학교 산업대학원

냉동공조공학과

강 현 준

강현준의 공학석사 학위논문을 인준함

2010년 2월



주	심	공학박사	정 석 권	인
위	원	공학박사	김 은 필	인
위	원	공학박사	윤 정 인	인

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 실험장치 및 방법	3
2.1 실험장치	3
2.2 실험 방법 및 조건	12
2.2.1 압축기의 ON/OFF 제어	16
2.2.2 부하에 따른 PWM valve 제어	17
2.2.3 PWM valve 개폐 수동 주기제어에 의한 성능 특성 분석	19
제 3 장 실험결과 및 고찰	20
3.1 기존 ON/OFF 제어와 PWM valve 제어에 의한 냉각기의 운전 특성 비교	20
3.1.1 Heat balance	20
3.1.2 부하 변화에 따른 냉동능력과 소비전력 비교	22
3.1.3 부하 변화에 따른 COP 비교	24
3.1.4 부분 부하 80%일 때의 ON/OFF 제어와 PWM valve 제어의 냉수 출구 정밀도 비교	25
3.2 PWM valve 개폐 수동 주기제어에 의한 냉각기의 운전 특성	28
3.2.1 부하 변화 및 주기 변동 시 냉동능력 분석	28

3.2.2 부하 변화 및 주기 변동 시 순시전력과 적산전력	30
3.2.3 부하 변화 및 주기 변동 시 COP 분석	32
3.2.4 주기 20s일 때의 냉수 출구온도 분석	34
3.2.5 주기 60s일 때의 냉수 출구온도 분석	36
3.2.6 부분 부하 80%일 때의 시간별 순시전력 분석	38
3.2.7 실험 방법 별 최종 냉수 출구온도 정밀도 분석	40
 제 4 장 결론	 42
참고 문헌	43



Characteristic of Precision Temperature Control of Water Chiller Applied Variable Refrigerant Flow Type Compressor

Hyun-jun Kang

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering,

Graduate School of Industry,

Pukyong National University

Abstract

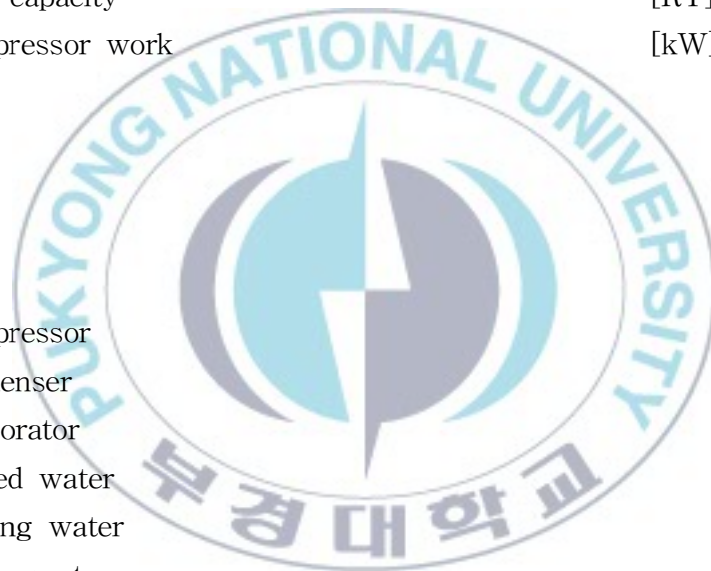
This paper presents the characteristics of temperature control on PWM(Pulse Width Modulation) valve period variation in water cooler. The water cooler was used to reduce thermal deformation and contraction due to high speed of machine tools. In this study, we suggest a high accuracy water cooling system using PWM valve control. In this system, we use a compressor which is able to be driven in condition of unloading to improve the efficiency of PWM valve control. By varying PWM valve period on identical operating conditions, we evaluated the efficiency and reliability of the new method. This study shows that the COP of this system decreased when load capacity of compressor was decreasing. And precision of this system using PWM valve was higher than ON/OFF type. This result will be used for a basis data of comparative experiment with inverter control and manufacture of high accuracy water cooling system.

NOMENCLATURE

PWM	: Pulse width modulation	[-]
COP	: Coefficient of performance	[-]
G	: Mass flow rate	[l/min]
T	: Temperature	[°C]
Q	: Heat capacity	[RT]
AW	: Compressor work	[kW]

Subscripts

comp	: Compressor
cond	: Condenser
eva	: Evaporator
chw	: Chilled water
cw	: Cooling water
ref	: Refrigerant
tank	: Extra tank
in	: Inlet
out	: Outlet



제 1 장 서 론

근래의 산업기계는 점차 고속화, 자동화, 정밀화를 추구하는 추세에 있다. 또한 최근 국제경쟁이 더욱 치열해짐으로써 산업기계에서 효율성, 생산성, 고품질은 필수요소가 되어 버렸다. 더불어 친환경을 추구하는 장비를 만들기 위해 다양한 기술개발이 요구되어지고 있으며, 산업기계의 초고속화 및 초정밀화로 인해 기계의 열변형 방지를 위한 정밀냉각기의 필요성이 요구되고 있다. 또한, 효율성이 중요 시됨에 따라 냉각기의 성능과 전력소비에 가장 큰 영향을 미치고 있는 압축기의 성능 개선을 위해 많은 노력을 하고 있다. 그에 따라 새로운 압축방식과 형태를 가진 압축기들이 소개되고 있다. 따라서 압축기의 효율향상이 꼭 필요하다고 할 수 있다.

하지만 기존의 산업용 냉각기에 적용되어 왔던 제어 방식은 ON/OFF 방식이었다. ON/OFF 방식은 압축기가 정속운전을 하다 부하 조절을 위해 압축기 자체가 ON/OFF되는 방식이다. 이런 방식은 현재의 산업기계처럼 급작스럽게 변하는 부하에 적절히 대응하지 못하여 고정도를 요구하기 힘들며 부수적으로 거대한 탱크를 요구하게 된다. 또한 압축기의 반복되는 시동 및 정지 운전으로 초기 시동소비전력의 증가로 운전비용을 증가시키는 단점이 있다. 소비전력 증가는 압축기의 종류에 따라 약간 차이가 있지만 모터 기동 시 토크는 운전시의 약 2~3배에 이르므로 시동 및 정지운전에 따른 소비전력 증가가 냉각기의 운전비용을 증대시키는 주원인이 된다고 보고되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 앞서 말한 바와 같이 새로운 압축방식과 새로운 형태를 가진 압축기들이 소개되고 있는데 바로 다양한 용량가변 방식이다. Rice and Fisher는 정속 압축기를 사용하는 것보다 용량 가변 압축기를 사용할 경우 전체적인 에너지 절약 효과가 약 26.7%에 이른다고 보고하였다.

용량가변 제어 방식은 우선 회전수에 의한 용량 제어 방식과 압축 행정거리에

따른 용량제어 방식으로 구분되어 진다. 세부적으로 회전수에 의한 용량제어 방식에는 주파수 변환방식과 극수 변환 방식의 두 가지가 있으며, 압축행정거리에 의한 용량제어 방식에는 다기통 방식과 바이패스 방식의 두 가지가 있다.

이 실험에서 사용한 디지털 스크롤 압축기도 새로운 용량제어 방식에 들어간다. 디지털 스크롤 압축기는 PWM(Pulse Width Modulation) valve를 이용하여 상부스크롤의 부하상태(Loaded state)/무부하상태(Unloaded state)의 시간을 조절하여 시스템의 능력을 변환하는 방식의 압축기로 PWM valve의 ON/OFF 제어 방식에 따르기 때문에 전력변환 과정이 없어 변환에 따른 전력소비를 줄일 수 있다. 또한, 부하변동에 따른 전력소비의 감소 및 부하변동에 따라 PWM valve의 제어로 다양한 범위의 용량가변이 가능하다. 그리고 부하가 작은 최소 운전 영역에서도 냉매 유속이 충분히 커서 오일 회수가 원활한 장점이 있다. 따라서, 본 실험을 통하여 PWM valve를 이용한 방식의 성능 특성을 분석 해보고자 한다.

본 연구의 목적은 공작기계용 수냉각기에 Digital scroll 압축기를 이용하여 PWM 밸브의 on/off 주기를 제어함으로써 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 의 온도 정밀도를 실현하는데 있다.

제 2 장 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

공작기계 분야에서는 고속가공에 의한 수축과 열변형을 최소화 하기위해 기존의 ON-OFF방식을 사용하고 있는 온도제어를 이용한 산업용 냉각기중 수냉각기에 PWM valve방식을 적용한 기초연구 장치 구성도로 Fig. 2.1에 나타낸 것이다.

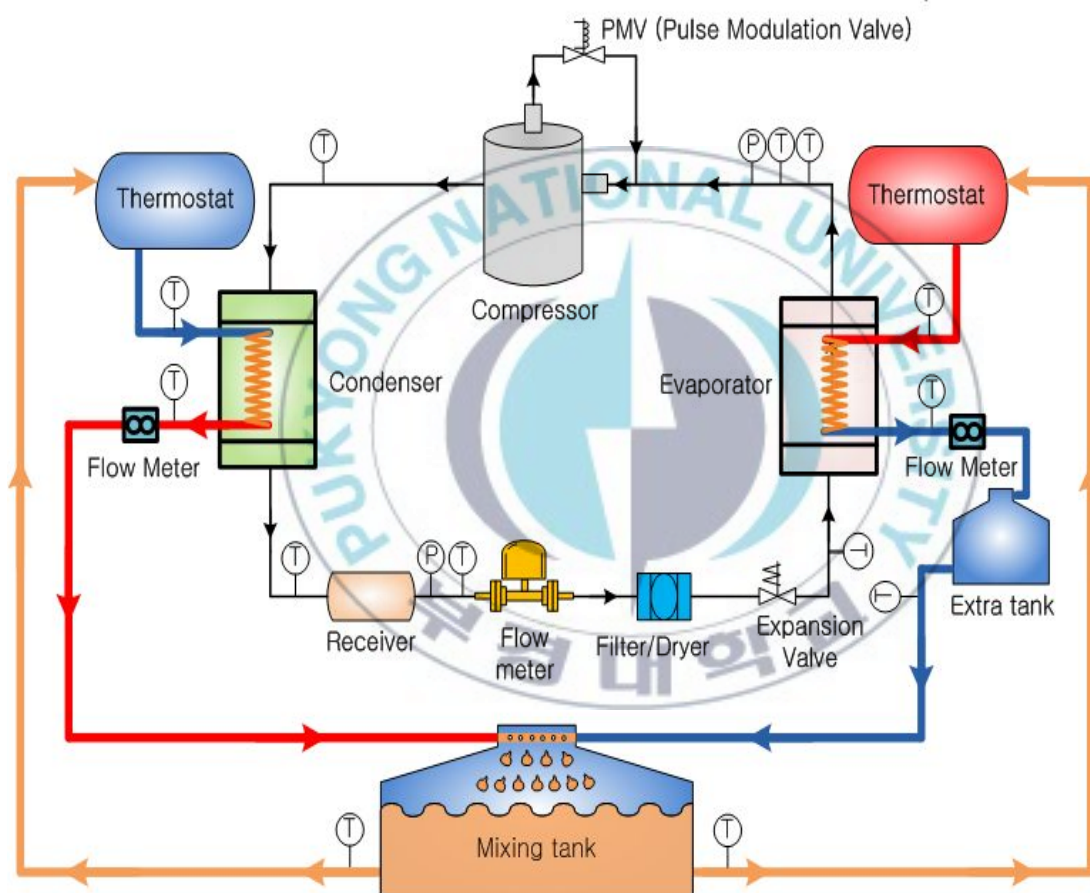


Fig. 2.1 Schematic diagram of the water cooler system using PWM valve

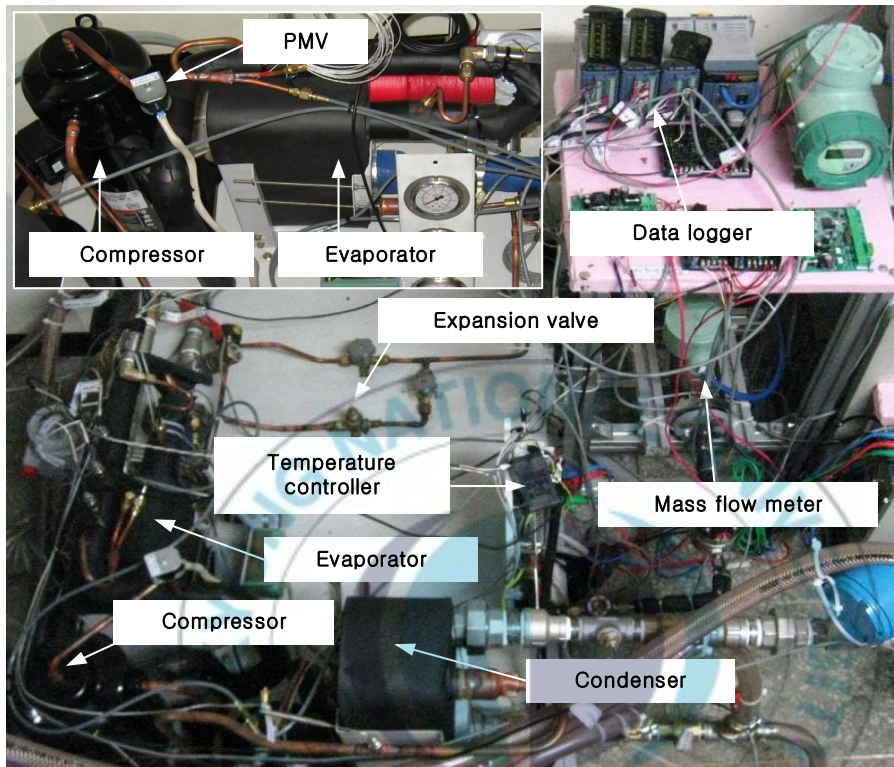


Fig. 2.2 Experimental apparatus

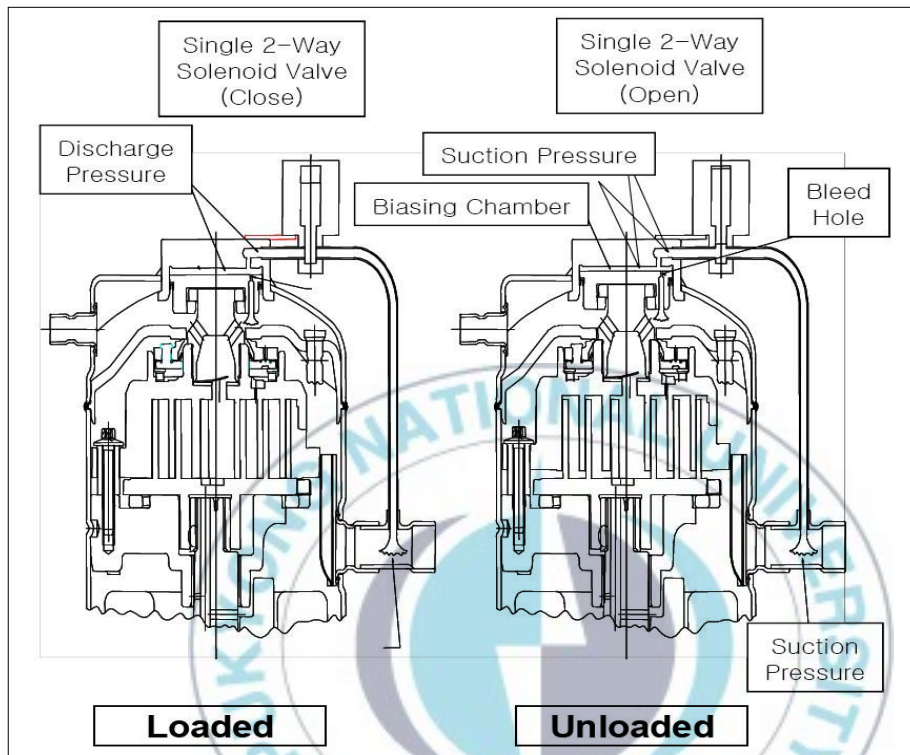


Fig. 2.3 Schematic diagram of digital scroll compressor

본 실험에 사용할 장치 구성도는 크게 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기와 주변 기기 등으로 기본적인 냉동장치를 구성하고 있으며 여기에 압축기 흡입 측으로 들어오는 증발기 출구 냉매증기를 압축하지 않고 다시 증발기 출구 측으로 바이패스 시키기 위한 PWM valve를 부착하였다. 수냉각기를 이용한 PWM valve방식의 장치구성은 4.5RT의 증발기와 7.5RT의 응축기의 부하를 적은 용량의 항온조로 컨트롤 할 수 있도록 하기 위하여 본 연구에서는 Mixing tank를 만들어 냉수와 냉각수를 혼합하여 서로의 부하를 상쇄시켰다. 즉, Mixing tank가 없을 시 증발기 측 항온조는 4.5RT의 부하를 감당해야 하고 응축기 측 항온조는 7.5RT의 부하를 감당해야 한다. 하지만 Mixing tank를 이용시 응축기와 증발기 부하의 차인 3RT만을 각각의 항온조가 감당해주면 되는 것이다. 냉매측과 수측 모두 각 구간마다 온도센서와 압력센서를 설치하였으며 냉매 응축기 출구 측에는 체적유량계와 질량유량계를 설치하여 보다 정확한 냉매의 유량을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 응축기를 통과한 냉매의 상태를 정확하게 확인하기 위해 Sight glass를 설치하였다. 수측에는 냉각수와 냉수측 모두 터빈식 유량계와 밸브를 설치하여 유량 제어를 쉽게 할 수 있도록 하였다. 또한 PWM valve의 작동 여부에 따라 장치의 소요동력이 수시로 변하므로 압축기에 전력계를 연결하여 소비전력까지 실시간으로 측정 할 수 있도록 하였다.

실험용 냉각기는 4HP급 Copland사의 Digital scroll 압축기를 이용하였고 응축기와 증발기 모두 판형 열교환기로 증발기 4.5RT, 응축기 7.5RT의 용량으로 설정하였다. 냉각기는 압축기와 응축기, 증발기, 팽창장치의 기본 4사이클을 가지며, 팽창장치는 EEV(전자팽창변)와 수동 팽창밸브 2개를 만들어 각각 실험을 할 수 있도록 구성하였다. 냉매 측의 온도와 압력을 측정하기 위해 관 내부에 K type 온도센서를 장착하였으며 고압과 저압측에 압력센서를 장착하였다. 또한 운전 중 장치 내 냉매유량을 파악하기 위해 체적유량계와 질량유량계를 병행으로 장착하여 기액에 상관없이 냉매유량을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 배관 중간 중간 Sight glass

를 설치하여 각 구간 별 냉매의 상을 시각적으로 확인 할 수 있도록 하였다. 비상시를 대비한 고저압 압력 스위치 등 안전장치들로 구성하였다. Fig. 2.2는 냉각기의 외관 및 내부를 나타낸다. 온도 제어 시스템은 압축기 ON/OFF, Temperature controller(온도 조절기)에 의한 PWM valve 작동방식, 타이머를 이용한 PWM valve 작동주기 수동조절 방식을 각각 실험하였다. 전원은 파워 컨트롤부를 통하여 공급되고, 온도 제어부는 냉각계통부에서 냉각유체의 온도를 감지하여 목표온도와 현재온도의 차이에 의해서 냉각계통부의 압축기 ON/OFF, PWM valve 작동신호를 조절할 수 있도록 하였다. 팽창 밸브는 과열도를 판단하여 자동으로 개도를 조절하는 EEV(전자팽창변)와 수동으로 조절할 수 있는 수동 팽창변을 병행으로 설치하여 EEV 컨트롤러 고장 시 대응 할 수 있도록 하였다.

PWM valve 주기 제어를 위해 copland사의 Digital Scroll 압축기를 이용 하였으며, 압축기 내부 구조는 Fig. 2.3과 같다. 압축기 상단의 바이패스용 밸브는 솔밸브를 사용하였다.

디지털 스크롤 압축기의 간단한 원리는 PWM valve에 전원이 인가되어 솔레노이드 밸브가 열리게 되면 압축기의 토출 배압이 해제되고 스크롤 아래위의 압력차에 의해 고정 스크롤이 축상으로 상승하게 된다. 이때를 무부하 상태(Unloaded state)라고 하며, 반대로 PWM valve의 전원 공급이 차단되면, 솔레노이드 밸브가 닫히게 되고 상부 스크롤에 배압이 부여됨으로써 고정스크롤이 축상으로 하강하게 된다. 이때를 부하상태(Loaded state)라고 한다. 무부하 상태일때는 증발기 쪽에서 압축기로 들어온 냉매증기(Vapor)가 PWM valve를 통해 다시 압축기 입구로 돌아오게 되며, 압축이 되지 않은 증기상태 그대로 밸브가 닫힐 때까지 순환하게 된다.

압축기 토출가스가 다시 압축기 입구로 들어오는 점에서는 핫가스 바이패스와 동일하지만 스크롤이 부상하면서 냉매를 압축하지 않고 무부하운전이 가능하다는 점이 다른 점이며 동시에 장점이라고 할 수 있겠다. 또한 PWM valve가 열리고 닫히는 주기 즉, 부하상태와 무부하 상태의 주기를 조절하여 냉매토출량을 제어함으로

써 압축기 용량을 10~100%의 다양한 범위에서의 능력변화가 가능하다고 보고되고 있다.

PWM valve시스템의 부하 조절을 위해 응축기용 항온조와 증발기용 항온조를 분리하였으며, 각기 부하를 상쇄시키기 위한 목적으로 냉각기를 빠져나온 냉수와 냉각수를 골고루 섞일 수 있도록 Mixing tank를 만들어 이용하였다. 본 연구의 신뢰성 확보를 위한 히트밸런스 계산을 위해 수측에도 PT100 온도센서를 관내에 장착하였으며 냉수와 냉각수 측 모두 터빈식 유량계를 설치하여 수 측에서의 응축기와 증발기의 열량계산을 할 수 있도록 하였다.





Fig. 2.4 Digital scroll compressor

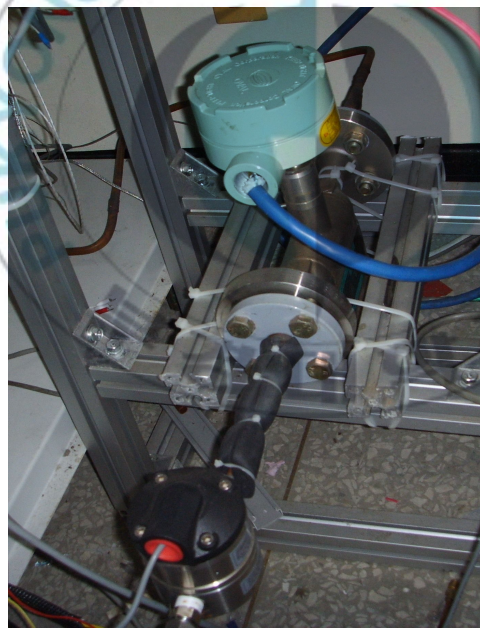


Fig. 2.5 Flowmeter



Fig. 2.6 Mx-100



Fig. 2.7 Power meter

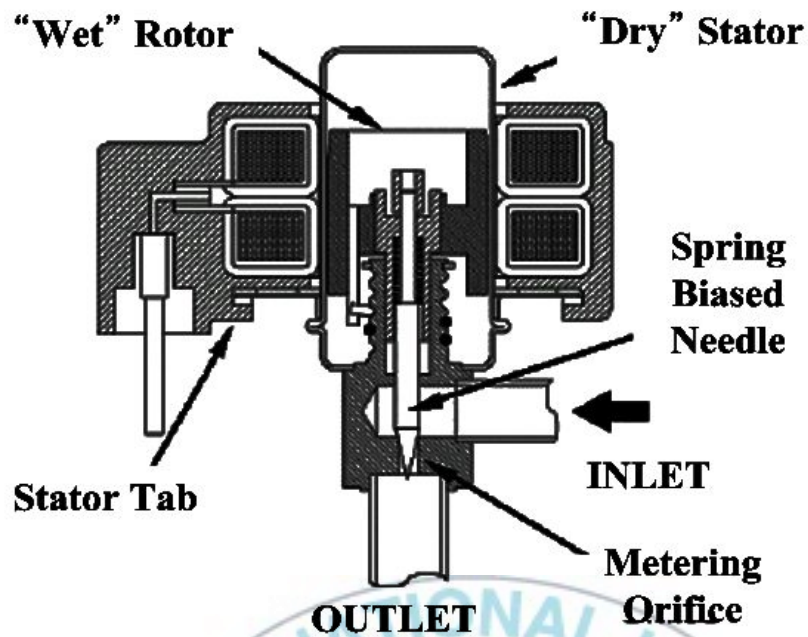


Fig. 2.8 Schematic diagram of electronic expansion valve

Fig. 2.8은 EEV의 세부 구조를 보여주고 있다. 고정자가 회전자를 시계 방향이나 반시계 방향으로 회전시키면 마찰이 작은 나사산을 갖는 니들이 직접 연결되어 있다. 회전자가 단계적으로 회전함으로써 니들의 거리가 조절되면서 EEV가 열고 닫힌다.

2.2 실험 방법 및 조건

실험장치에 부착된 각 센서의 연결부와 시스템 용접부 누설 여부를 판단하기 위해 고압 질소를 이용하여 냉매의 누설 여부를 확인 하였고 냉매 누설이 없으면 진공 펌프를 이용하여 시스템내의 공기와 수분등의 불응축가스를 완전히 제거하였으며 불응축가스가 완전히 제거된 진공상태에서 본 실험장치에 사용 할 R-22를 시스템에 충전하였다. 그리고 R-22를 충전 한 뒤 정밀 냉매 누설 탐지기를 통해 다시 한번 확인하였다. 냉매의 질량유량 측정은 회전하는 물체에 상대적으로 작용하는 코리올리(Coriolis)의 힘에 의해 발생하는 관의 진동과 굽힘 모멘트에 의한 변형량을 질량유량으로 변환시키는 Oval사의 질량유량계를 사용하였다. 이 제품은 작동유체의 점도나 밀도 등의 물정치에 영향을 받지 않는 질량유량계이다. 압축기에 소모되는 전력량의 측정은 칼로리미터에 부착된 Yokogawa사의 전력계를 통해 측정을 하였다. 이렇게 측정된 온도, 압력, 질량유량, 전력량은 Yokogawa사의 MX-100모델을 사용하여 PC에 저장하는 동시에 모니터에서 각 측정값을 확인할 수 있도록 하였다.

냉매측 열전달량 중 냉동능력 $Q_{eva.ref}$ 은 질량유량계를 통해 얻은 냉매 유량값($\dot{m}$)과 증발기 입구와 출구에서 측정된 온도와 저압값을 통해 알아낸 증발기 입·출구 엔탈피차($\Delta h_{(eva.outlet - eva.inlet)}$)를 이용하여 다음과 같이 계산 하였다.

$$Q_{eva.ref} = \dot{m} \cdot \Delta h_{(eva.outlet - eva.inlet)}$$

응축열량 $Q_{con.ref}$ 는 냉매유량값($\dot{m}$)과 응축기 입·출구 온도와 고압값을 통해 알아낸 응축기 입·출구 엔탈피차($\Delta h_{(con.inlet - con.outlet)}$)를 이용하여 다음과 같이 계산 하였다.

$$Q_{con.ref} = \dot{m} \cdot \Delta h_{(con.inlet - con.outlet)}$$

압축일량 AW_{ref} 는 앞서 구한 응축열량과 냉동능력의 차로 구하였다.

$$AW_{ref} = Q_{con.ref} - Q_{eva.ref}$$

물측 열전달량 $Q_{eva.wat}$ 은 냉각기의 입구와 출구에서 측정된 온도를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Q_{eva.wat} = G_{cw} c_p (T_{cw.outlet} - T_{cw.inlet})$$

압축기의 COP 는 다음과 같이 계산한다.

$$COP = \frac{Q_{eva.wat} [kcal/h]}{Q_{AW} [kw]}$$

여기서 압축기의 소모동력 Q_{AW} 는 전력계를 이용하여 소모동력을 구하였다.

Table 2.1에서 보듯이 본 연구에서는 실험을 크게 3분류로 나누어 하였다. 동일한 장치에 컨트롤러만을 교체하여 실험함으로써 서로간의 성능과 특성을 비교할 수 있도록 하였다. 첫 번째 실험은 기존 방식인 압축기 ON/OFF 때의 풀부하 때와 부분부하 때의 냉각특성과 성능을 분석하였으며, 두 번째 실험은 PWM valve의 작동을 냉수 출구에 연 결되어 있는 T/C(온도조절기)에서 나오는 신호로 제어 할 수 있도록 하였다. 세 번째 실험은 위의 실험을 기초로 하여 직접 PWM valve의 개폐 주기를 수동을 설정할 수 있도록 하여 주기 변화에 따라 냉각기의 성능 변화와 특성을 분석하였다.



Table 2.1. Case of experiments

실험 종류	제어 장치	특징
압축기 ON/OFF 제어	T/C (온도조절기)	온도조절기의 Setting 값에 따라 그 편차에 의해 ON/OFF 신호 출력 (압축기 OFF시 재기동까지 최소지연 시간 3분 부여)
부하에 따른 PWM valve 제어	T/C (온도조절기)	온도조절기의 Setting 값에 따라 그 편차에 의해 PWM valve ON/OFF 신호 출력
PWM valve 개폐 수동 주기제어에 의한 성능특성 분석	주기제어 타이머 컨트롤러	타이머에 설정한 값에 따라 PWM valve ON/OFF 주기 설정

2.2.1 압축기의 ON/OFF 제어

본 연구에서는 냉각기 성능과 전력소비에 가장 큰 영향을 미치는 압축기의 가변운전에 따른 냉각 성능 특성을 정확히 조사하기 위해 항온조를 설치하여 응축기와 증발기로 들어가는 냉각수와 냉수의 온도를 일정하게 유지하였으며, 정확한 냉매량과 냉(각)수량을 측정하기 위해 유량계를 각각 설치하였다. 또한 정확한 온도값을 측정하기 위해 냉매 측에는 K-type 온도센서, 물측에는 RTD 100 온도센서를 사용하였다. 응축기와 증발기는 모두 판형열교환기이며, 냉매는 R-22를 사용하였다. 2차 유체는 모두 물을 이용하여 응축부하와 냉각부하를 쉽게 비교할 수 있도록 하였다.

Table 2.2는 압축기 ON/OFF 제어 실험의 기본 실험 조건표이다.

Table 2.2. Operating conditions

$T_{\text{cooling water, in}} (^{\circ}\text{C})$	30	
$T_{\text{chilled water, out}} (^{\circ}\text{C})$	25	
$G_{\text{cooling water}} (\text{L/min})$	40	
$G_{\text{chilled water}} (\text{L/min})$	40	
Percentage of full-load capacity(%)	100	80
Delay time (min)	3	

2.2.2 부하에 따른 PWM valve 제어

이번 실험에서는 냉각기 성능과 전력소비에 가장 큰 영향을 미치는 압축기의 가변운전에 따른 냉각 성능 특성을 정확히 조사하기 위해 항온조를 설치하여 응축기와 증발기로 들어가는 냉각수와 냉수의 온도를 일정하게 유지하였으며, 정확한 냉매량과 냉(각)수량을 측정하기 위해 유량계를 각각 설치하였다. 또한 정확한 온도값을 측정하기 위해 냉매 측에는 K-type 온도센서, 물 측에는 RTD 100 온도센서를 사용하였다. 응축기와 증발기는 모두 판형열교환기이며, 냉매는 R-22를 사용하였다. 2차 유체는 모두 물을 이용하여 응축부하와 냉각부하를 쉽게 비교할 수 있도록 하였다.

이번 실험에서 압축기는 3.75kW의 디지털 스크롤 압축기를 사용하였고, 증발기와 응축기는 판형열교환기를 사용하여 압축기의 용량에 맞춰 제작하였다. 냉매 유량계는 수액기 출구에 체적유량계와 질량유량계를 각각 설치하여 PWM valve의 ON/OFF 변화 시 정확한 냉매유량을 알 수 있도록 하였다. 팽창밸브는 수동팽창밸브와 전자팽창밸브(EEV)를 설치하였으나, PWM valve와의 냉매량 제어 간섭 때문에 이번 실험에서는 수동 팽창밸브만을 사용하였다. Table 2.3은 본 실험의 운전조건을 나타낸다. 냉각수 입구의 온도는 고정조건으로써 30°C로 하였고, 부하는 100%~40%까지 변화시켰다. 냉수 출구 온도는 25°C로 고정하였다. 부하변화에도 냉수 출구 온도를 25°C로 고정 시키기 위해 증발기 냉수 출구 측에 T/C(Temperature controller)를 연결하여 온도 편차제어를 통한 PWM valve의 ON/OFF 주기를 조정하였다. 편차제어로 조정된 주기와 압축기의 순시전력을 연속적으로 측정함으로써 부하 상태와 무부하 상태의 소비전력차를 알 수 있도록 하였고, 각 구간의 압력센서와 온도센서로부터 얻은 데이터를 통해 부하 변동에 따른 냉각기의 성능 특성을 비교 해 볼 수 있도록 하였다.

Table 2.3. Operating conditions

$T_{\text{cooling water, in}} (^{\circ}\text{C})$	30			
$T_{\text{chilled water, out}} (^{\circ}\text{C})$	25			
$G_{\text{cooling water}} (\text{L/min})$	40			
$G_{\text{chilled water}} (\text{L/min})$	40			
Percentage of full-load capacity(%)	100	80	60	40

2.2.3 PWM valve 개폐 수동 주기제어에 의한 성능 특성 분석

Table 2.4는 본 실험의 운전 조건을 나타낸다. 2번째 실험과 동일하게 냉각수 입구의 온도는 고정조건으로써 30°C로 하였고, 냉(각)수 유량도 40L/min으로 동일하게 하였다. 부분 부하는 80%~20%까지 PWM valve의 개폐주기를 수동으로 조정하면서 조절하였다. 또한 PWM valve의 주기를 20s 와 60s 두 개로 나누어 실험하여 솔밸브의 수명과 냉수출구 고정도에 대한 분석도 하였다. 수동 주기 제어로 조정된 주기와 압축기의 순시전력을 연속적으로 측정함으로써 부하 상태와 무부하 상태의 소비전력차를 알 수 있도록 하였고, 각 구간의 압력센서와 온도센서로부터 얻은 데이터를 통해 부하 변동에 따른 냉각기의 성능 특성을 비교 해 볼 수 있도록 하였다.

Table 2.4. Operating conditions

$T_{\text{cooling water, in}} (^{\circ}\text{C})$	30							
$G_{\text{cooling water}} (\text{L/min})$	40							
$G_{\text{chilled water}} (\text{L/min})$	40							
Percentage of full-load capacity(%)	80		60		40		20	
Period of PWM valve (sec)	20	60	20	60	20	60	20	60

제 3 장 실험결과 및 고찰

3.1 기존 ON-OFF 제어와 PWM valve 제어에 의한 냉각기의 운전 특성 비교

3.1.1 Heat balance

Fig. 3.1은 이번 실험의 열평형을 나타내는 그래프이다. 이번 실험에서 열평형은 응축부하와 증발능력에 실제 측정한 압축기 소요전력을 더한 값을 서로 비교 하였다. 오차 범위는 $\pm 10\%$ 로 하여 이번 실험의 신뢰성을 높였다.

우선 Capacity 100%일 경우는 그래프에 나타난 것처럼 데이터 군이 높은 범위에 모여 있는 것을 알 수 있다. 이는 Capacity 100%일 때는 PWM valve가 작동하지 않고 압축기가 정속운전을 하기 때문에 부하변동이 없어 일정한 값이 얻어지는 것을 알 수 있다. 그에 비해 Capacity 80%~40%의 경우 부하감소에 따라 PWM valve가 작동함으로써 넓은 범위에 걸쳐 데이터 군이 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 부하가 줄어들수록 데이터 군 또한 낮은 범위로 형성이 되는 것을 알 수 있다.

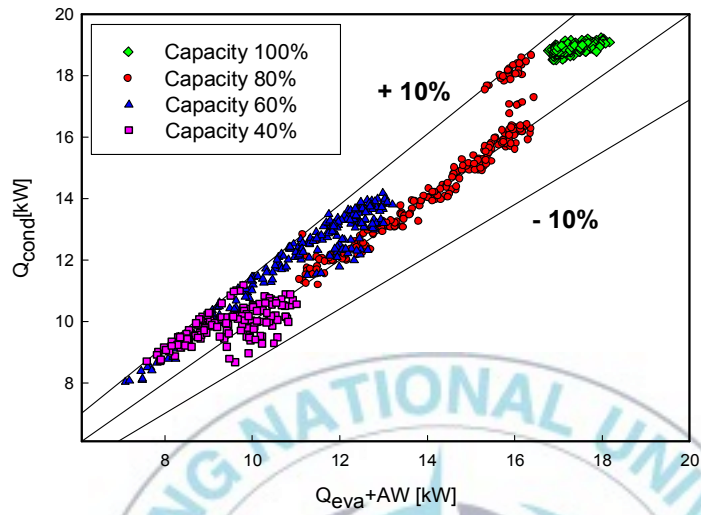


Fig. 3.1 Heat balance

3.1.2 부하 변화에 따른 냉동능력과 소비전력 비교

Fig. 3.2는 최대부하 능력비율에 대한 응축능력과 냉동능력, 압축기 소비전력을 나타낸 그래프이다. 전체적으로 최대부하 능력비율이 감소할수록 응축능력과 냉동능력, 소비전력이 모두 감소하는 경향을 보인다. 이는 최대부하 능력비율이 감소할수록 PWM valve의 Open 주기가 길어지게 된다. 즉, 냉매토출량이 점차 줄어들게 되므로 우선적으로 증발기의 냉동능력이 감소하게 되고 그에 따라 응축기의 응축능력도 냉동능력의 대략 1.3배의 비율로 감소하게 되는 것이다. 압축기의 소비전력 역시 감소하게 되는데, 이는 냉동능력과 동일한 이유로 PWM valve의 Open 주기가 길어질수록 스크롤이 부상하는 시간이 길어지게 된다. 즉, 무부하 시간이 길어져 압축기에 걸리는 부하가 줄어들기 때문이라고 볼 수 있다. 최대부하 능력비율이 100%에서 40%로 줄어들었을 때의 값을 비교해보면 응축능력과 냉동능력의 차이 역시 100%때의 차보다 40%의 비율로 줄어든 것을 알 수 있다. 소비전력은 100%일 때의 값에 비해 40%의 값이 25%만 감소된 것을 알 수 있다. 이는 압축기가 무부하 운전을 하더라도 압축기로 들어가는 전압은 일정하며, 냉매를 압축하지는 않지만 흡입증기를 다시 압축기 흡입 측으로 보내야 하기 때문에 일정한 최소 전력량을 유지하기 때문이라고 볼 수 있다.

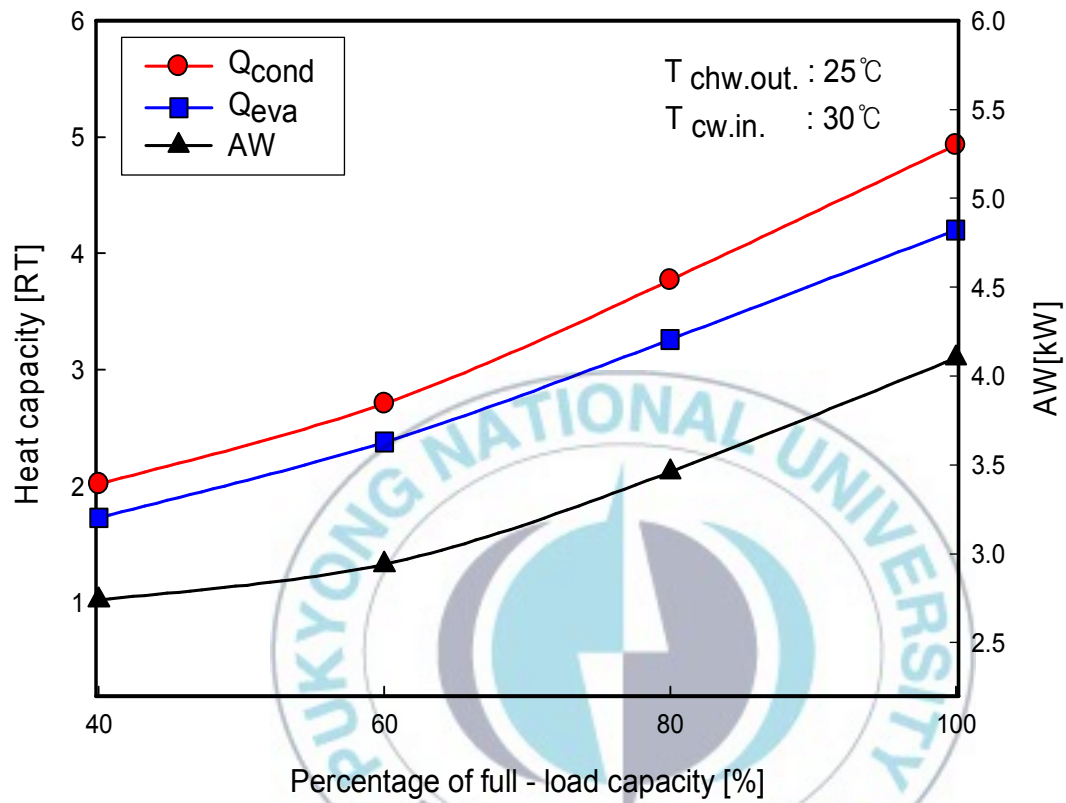


Fig. 3.2 Variation of $Q_{condenser}$, $Q_{evaporator}$ and compressor work with respect to percentage of full-load capacity

3.1.3 부하 변화에 따른 COP 비교

Fig. 3.3은 최대부하 능력비율에 대한 냉각기의 COP를 나타낸 그래프이다. 최대부하 능력비율이 감소함에 따라 COP 역시 감소하는 추세를 보여 주고 있다. 이 결과는 냉동능력은 100%일 때 4.2RT에서 40%일 때 1.7RT로 약 60% 줄어들었지만 소비전력은 100%일 때 4.1kW에서 40%일 때 2.7kW로 약 35%밖에 감소하지 않았기 때문에 부하가 줄어들수록 COP가 감소하는 추세를 보여 주는 것이다.

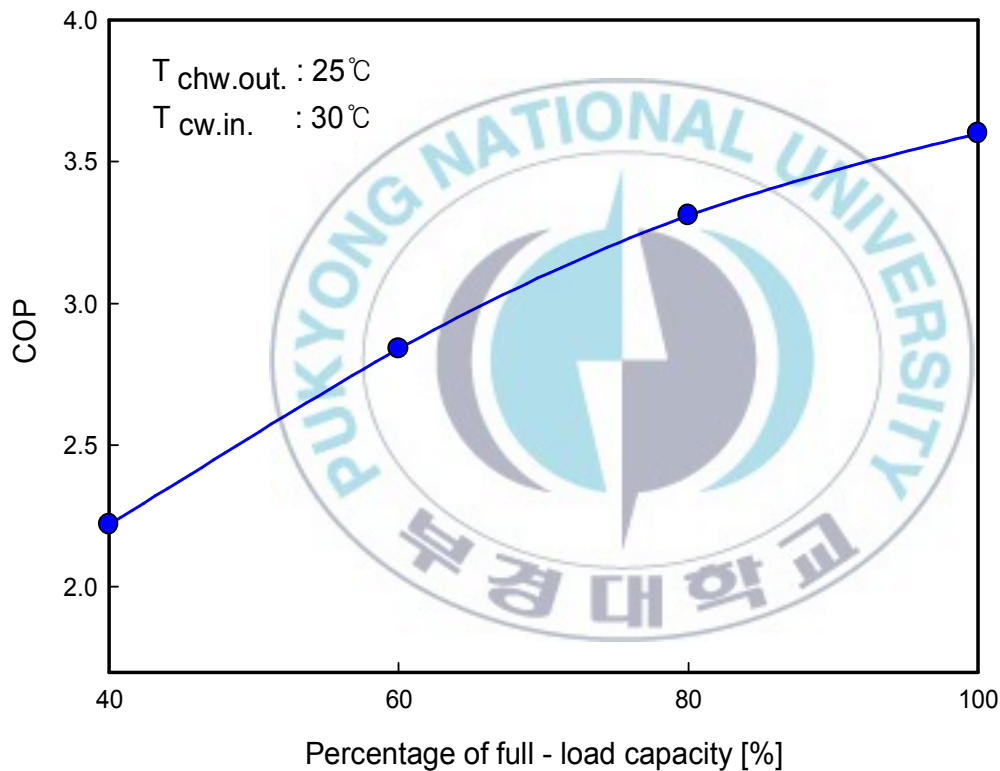
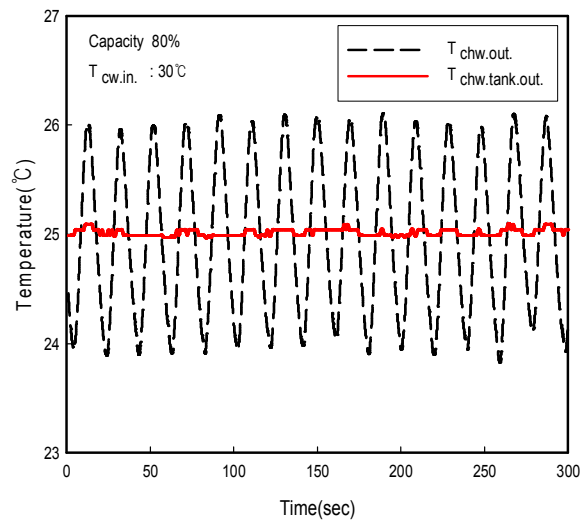


Fig. 3.3 Variation of COP with respect to percentage of full-load capacity

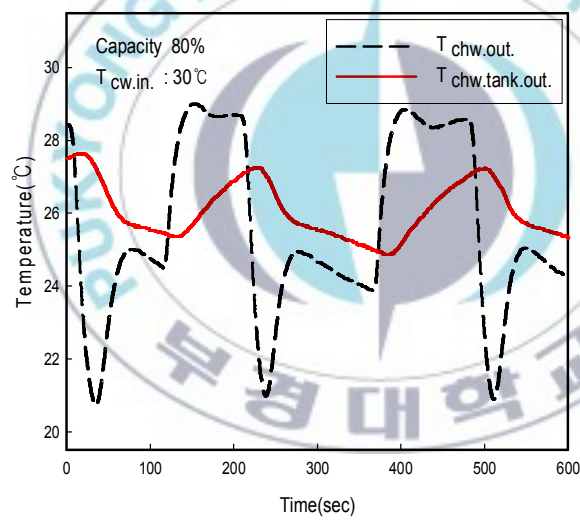
3.1.4 부분 부하 80%일 때의 ON/OFF 제어와 PWM valve 제어 냉수 출구 온도 정밀도 비교

Fig. 3.4는 PWM valve 제어와 ON/OFF 타입의 냉수출구온도와 보조탱크를 지난 냉수 출구 온도의 고정도를 나타낸 그래프이다. PWM valve 제어의 경우 T/C (온도조절기)를 이용하여 냉수 출구의 편차가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 제어 되는 것을 알 수 있다. 그리고 40L의 보조탱크를 냉수 출구 측에 설치하여 그 출구 온도를 측정한 결과 온도편차가 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 이내로 들어오는 것을 알 수 있었다. ON/OFF 타입의 경우 냉수출구의 온도가 편차 범위를 넘어서는 순간 압축기는 정지 하게 된다. 그리고 재가동까지 지연시간 3분이 적용되기 때문에 정확한 편차 제어를 하기 힘들게 된다. 그러기 때문에 (b)와 같이 냉수 출구의 온도 편차가 $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ 정도로 커지게 된다. 40L의 보조탱크의 출구온도 역시 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 편차를 보여 주며 지연시간 때문에 원하는 온도 기준보다 1°C 정도 높은 온도 26°C 를 기준으로 움직이는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.5는 PWM valve와 ON/OFF type의 40L 보조탱크 출구 온도만을 비교 해놓은 그래프이다. 기존의 ON/OFF type보다 PWM valve 제어가 더욱 고정도 하다는 것을 알 수 있다. 하지만 T/C (온도조절기)를 이용하여 PWM valve의 개폐를 제어하였기 때문에 개폐주기가 너무 짧다는 단점이 있다. 이것은 솔밸브의 정해진 제품수명과 깊은 관련이 있다. 즉, 제품의 너무 빠른 교체주기는 상품화 가치를 떨어뜨리는 결과를 가져올 수 있다. 이 단점을 보완하기 위해 다음 실험으로써 수동으로 PWM valve의 개폐주기를 조절하며 냉각기의 성능을 분석하였다.



(a) Using PWM valve



(b) ON/OFF type

Fig. 3.4 $T_{chw.out}$, $T_{chw.tank.out}$ comparison of PWM valve and ON/OFF type

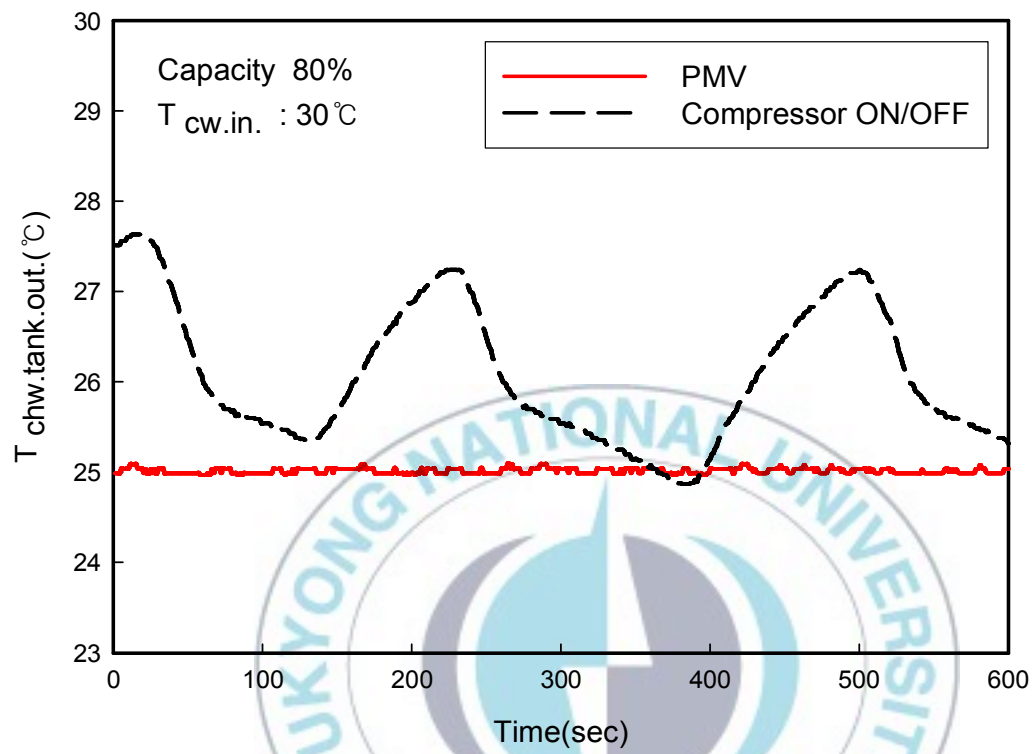


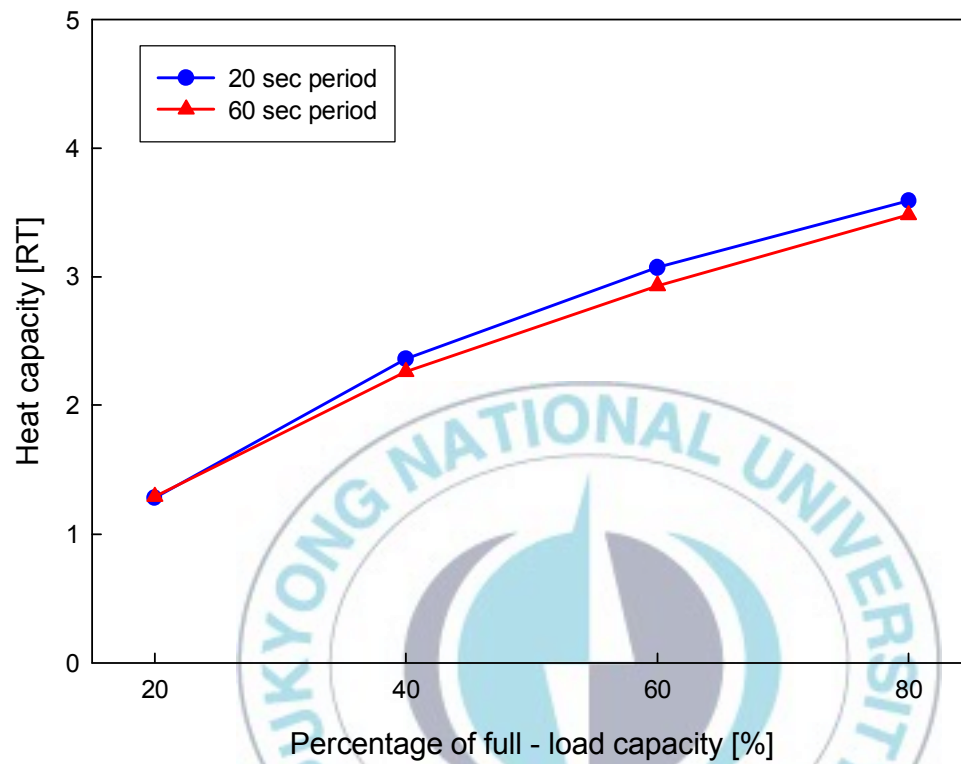
Fig. 3.5 $T_{chw.tank.out}$ comparison of PWM valve and ON/OFF type

3.2 PWM valve 개폐 수동 주기제어에 의한 냉각기의 운전 특성

3.2.1 부하 변화에 및 주기 변동 시 냉동능력 분석

Fig. 3.6은 냉동기의 부하율을 PWM valve의 개폐주기 조절로 제어하여 부하율 80%, 60%, 40%, 20% 때의 냉동능력을 그래프로 나타낸 것이다. 부하율이 줄어든다는 것은 PWM valve의 open 시간이 총주기(20s, 60s)내에서 길어진다는 것을 의미한다. 즉, 냉동기를 순환하는 냉매량을 줄임으로써 부분부하 운전이 가능하게 하는 것이다. 아래의 그래프를 보면 부분 부하율이 증가할수록 비례적으로 냉동능력이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 부분부하율이 감소하면 냉동능력도 감소하게 되는데 이는 PWM valve의 open 시간이 길어져 냉매순환량이 감소하기 때문이다. 총주기를 20s 와 60s로 했을때의 냉동능력 변화는 거의 동일한 추세를 보여주며 비슷한 값을 나타내고 있다. PWM valve의 개폐 총주기는 냉동능력에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

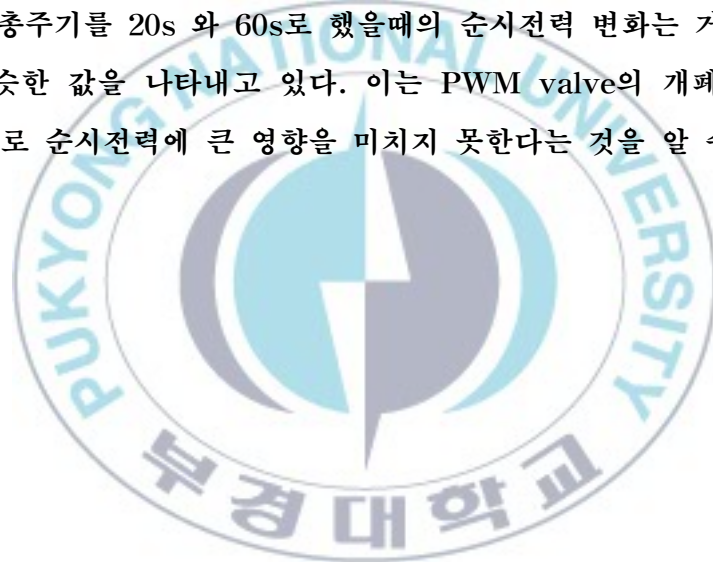


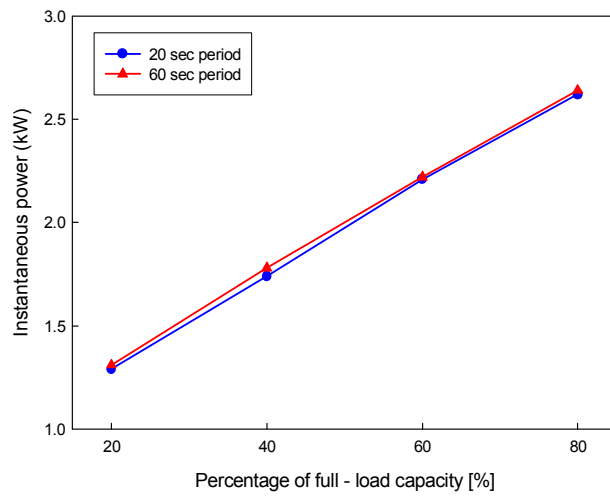


**Fig. 3.6 Variation of Heat capacity
with respect to percentage of full-load capacity**

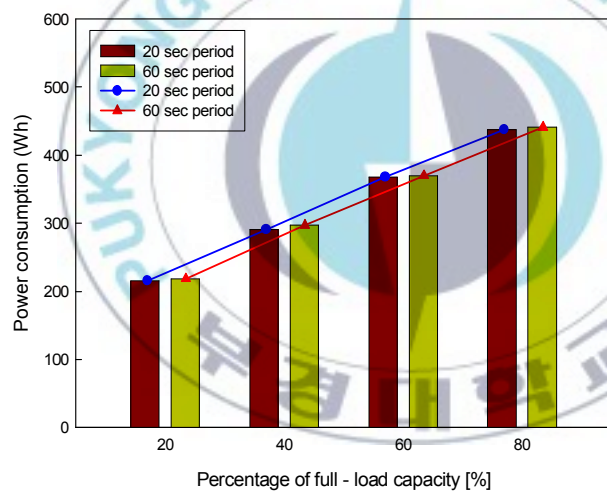
3.2.2 부하 변화 및 주기 변동 시 순시전력과 적산전력

Fig. 3.7 (a)는 냉동기의 부하율을 PWM valve의 개폐주기 조절로 제어하여 부하율 80%, 60%, 40%, 20% 때의 평균 순시전력을 그래프로 나타낸 것이고 (b)는 600s 동안의 적산전력을 나타낸 그래프이다. 부하율이 줄어든다는 것은 PWM valve의 open 시간이 총주기(20s, 60s)내에서 길어진다는 것을 의미한다. 즉, 냉동기를 순환하는 냉매량을 줄임으로써 부분부하 운전이 가능하게 하는 것이다. 아래의 그래프를 보면 부분 부하율이 증가할수록 비례적으로 순시전력이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 부분부하율이 감소하면 순시전력도 감소하게 되는데 이는 PWM valve의 open 시간이 길어져 냉매순환량이 감소하기 때문에 압축기의 소요동력이 줄어들기 때문이다. 총주기를 20s 와 60s로 했을때의 순시전력 변화는 거의 동일한 추세를 보여주며 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 PWM valve의 개폐 총주기는 냉동능력과 마찬가지로 순시전력에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.





(a) Instantaneous power



(b) power consumption

Fig. 3.7 Variation of Instantaneous power and power consumption with respect to percentage of full-load capacity

3.2.3 부하 변화 및 주기 변동 시 COP 분석

Fig. 3.8은 냉동기의 부하율을 PWM valve의 개폐주기 조절로 제어하여 부하율 80%, 60%, 40%, 20% 때의 COP를 그래프로 나타낸 것이다. 부하율이 줄어든다는 것은 PWM valve의 open 시간이 총주기(20s, 60s)내에서 길어진다는 것을 의미한다. 즉, 냉동기를 순환하는 냉매량을 줄임으로써 부분부하 운전이 가능하게 하는 것이다. 아래의 그래프를 보면 부하율 40%까지는 비슷한 COP를 나타내지만 20% 때 급격한 감소가 이루어지는 것을 알 수 있다. 이것은 20%때 PWM valve open 주기가 총주기의 80%로 길어져 냉매가 순환되는 시간이 급격히 감소하기 때문이다. PWM valve가 open 되어 있는 동안 냉매는 관내에 정체하게 되고 총주기 20%때 다시 냉매가 순환하기 시작하지만 그 시간이 너무 짧아 제 능력을 발휘하지 못하는 것으로 판단된다. 총주기를 20s 와 60s의 결과 값을 비교하면 총주기 20s때가 60s때보다 대체로 더 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 PWM valve의 개폐 총주기가 COP에 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 동일한 부분부하일 때 PWM valve가 open되는 시간 즉, 무부하 운전 시간이 짧을수록 COP가 높다는 것을 알 수 있다.

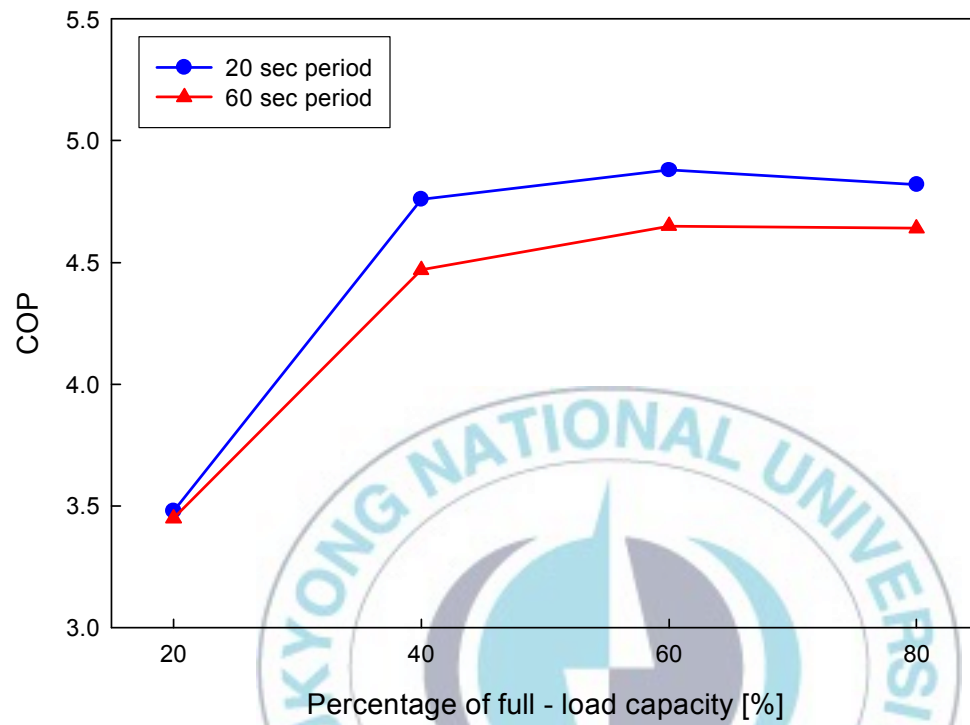


Fig. 3.8 Variation of COP
with respect to percentage of full-load capacity

3.2.4 주기 20s일 때의 냉수 출구온도 분석

Fig. 3.9는 PWM valve 개폐 총주기 20s일 때의 각 부하별 냉수 출구 온도의 고정도를 나타낸 그래프이다. 부하 80%일 때는 20s 총주기중 PWM valve가 4s동안 열리고 16초 동안 닫히게 된다. 부하 60%일 때는 8s open 12s close, 부하 40%일 때는 12s open 8s close, 부하 20% 일 때는 16s open 4s close 된다. 냉수 출구의 온도변화를 살펴보게 되면 PWM valve의 개폐 주기에 따라 일정한 파형을 보여준다. 부하 80%일 때는 24.7℃에서 26℃사이의 파형을 보이며 부하 60%일 때는 24.8℃ ~ 27.2℃, 40%일 때는 25.6℃ ~ 28.2℃, 20%일 때는 27.5℃ ~ 28.7℃ 사이의 온도변화를 보여준다. 40L의 보조탱크를 냉수출구 측에 설치하여 그 탱크 출구 측 수온을 측정해 보니 부하 80%때 25.3℃, 60%때 26℃, 40%때 26.8℃, 20%때 28.3℃를 나타내었으며 온도편차는 모두 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 이내였다. 부하가 줄어들수록 냉수 출구 측 온도가 올라가는 경향을 보인다. 부하가 줄어든다는 것은 PWM valve의 open 시간이 길어진다는 것을 의미한다. 즉, 냉매 순환량이 줄어들어 장치의 냉각능력이 떨어져 출구의 온도가 올라가는 것이다.

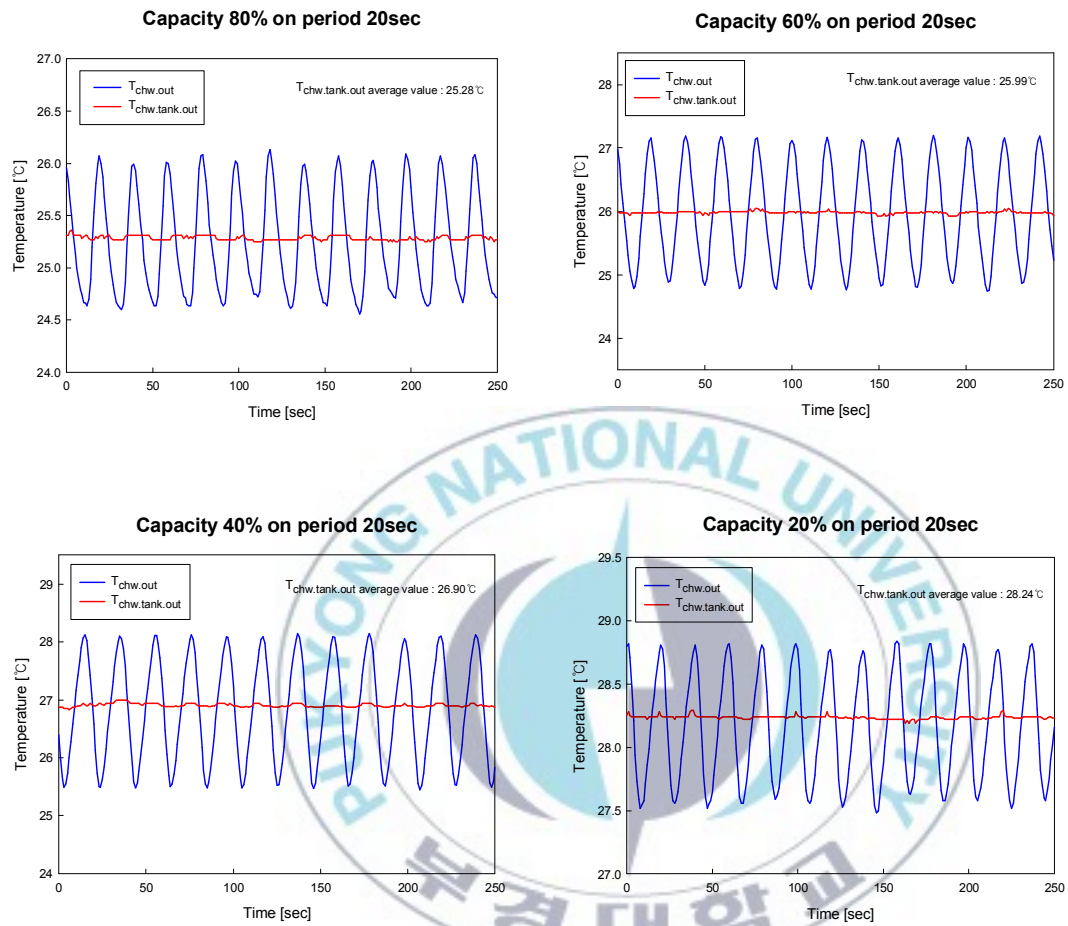


Fig. 3.9 $T_{chw.out}$, $T_{chw.tank.out}$ with respect to percentage of full-load capacity on period 20sec

3.2.5 주기 60s일 때의 냉수 출구온도 분석

Fig. 3.10은 PWM valve 개폐 총주기 60s일 때의 각 부하별 냉수 출구 온도의 고정도를 나타낸 그래프이다. 부하 80%일 때는 60s 총주기중 PWM valve가 12s 동안 열리고 48초 동안 닫히게 된다. 부하 60%일 때는 24s open 36s close, 부하 40%일 때는 36s open 24s close, 부하 20% 일 때는 48s open 12s close 된다. 냉수 출구의 온도변화를 살펴보게 되면 PWM valve의 개폐 주기에 따라 일정한 파형을 보여준다. 부하 80%일 때는 24.5℃에서 28.1℃사이의 파형을 보이며 부하 60%일 때는 24℃ ~ 29.3℃, 40%일 때는 23℃ ~ 30℃, 20%일 때는 24.7℃ ~ 29.7℃ 사이의 온도변화를 보여준다. 40L의 보조탱크를 냉수출구 측에 설치하여 그 탱크 출구 측 수온을 측정해 보니 부하 80%때 25.48℃, 60%때 26.2℃, 40%때 27.1℃, 20%때 28.3℃를 나타내었으며 온도편차는 모두 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 이내였다. 60s 주기 역시 20s 주기와 같이 부하가 줄어들수록 냉수 출구 측 온도가 올라가는 경향을 보인다. 부하가 줄어든다는 것은 PWM valve의 open 시간이 길어진다는 것을 의미한다. 즉, 냉매 순환량이 줄어들어 장치의 냉각능력이 떨어져 출구의 온도가 올라가는 것이다.

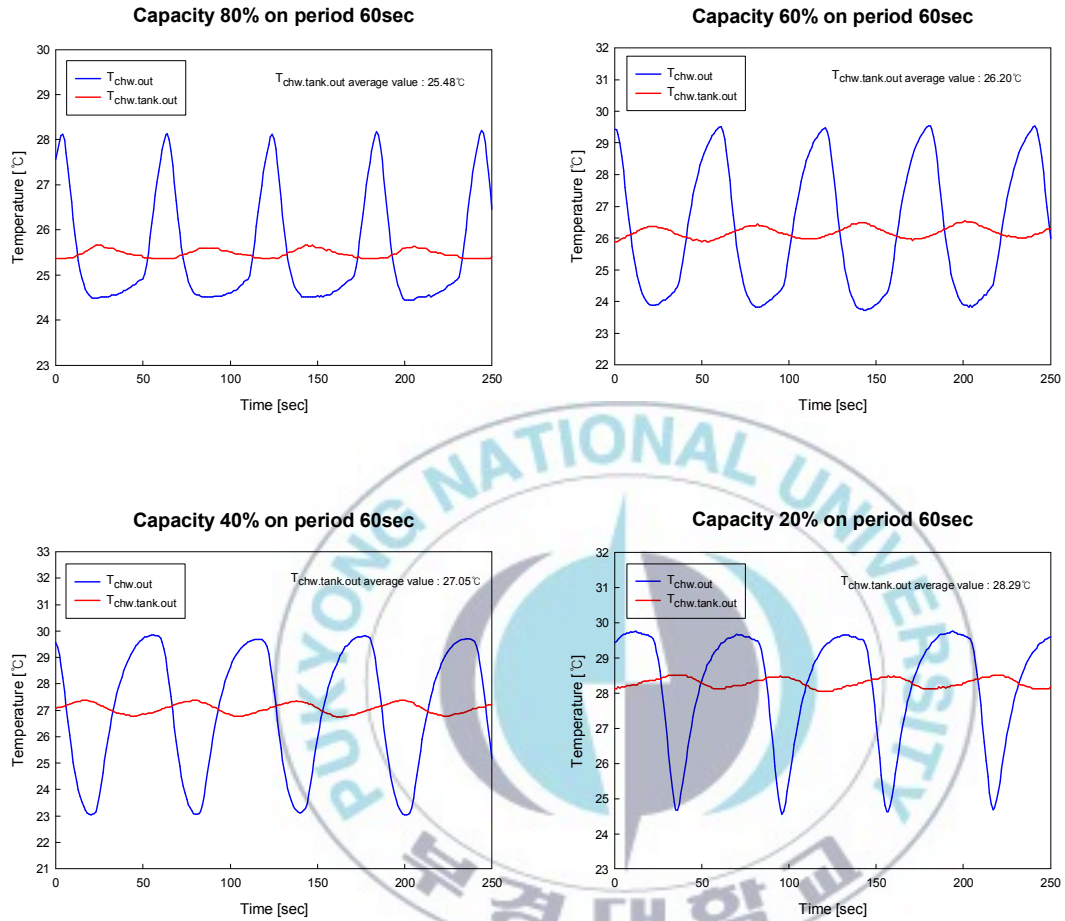


Fig. 3.10 $T_{chw.out}$, $T_{chw.tank.out}$ with respect to percentage of full-load capacity on period 60sec

3.2.6 부분 부하 80%일 때의 시간별 순시전력 분석

Fig. 3.11은 냉동기의 순시전력을 시간에 따라 그래프로 나타낸 것이다. PWM valve의 개폐주기에 따라 동일하게 파형이 반복된다. 20s 주기보다 60s 주기의 순시전력 피크치가 약간 높게 나왔지만 안정화되면 20s 주기보다 작은 값을 보여준다. 아래의 그래프를 보면 PWM valve가 open 되는 시간 즉, 압축기 무부하 상태가 되면 풀부하로 정상 가동했을 시 보다 1/10 정도로 순시전력이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 부하가 줄어들수록 소비전력을 더욱 줄일 수 있다는 것과 같다.



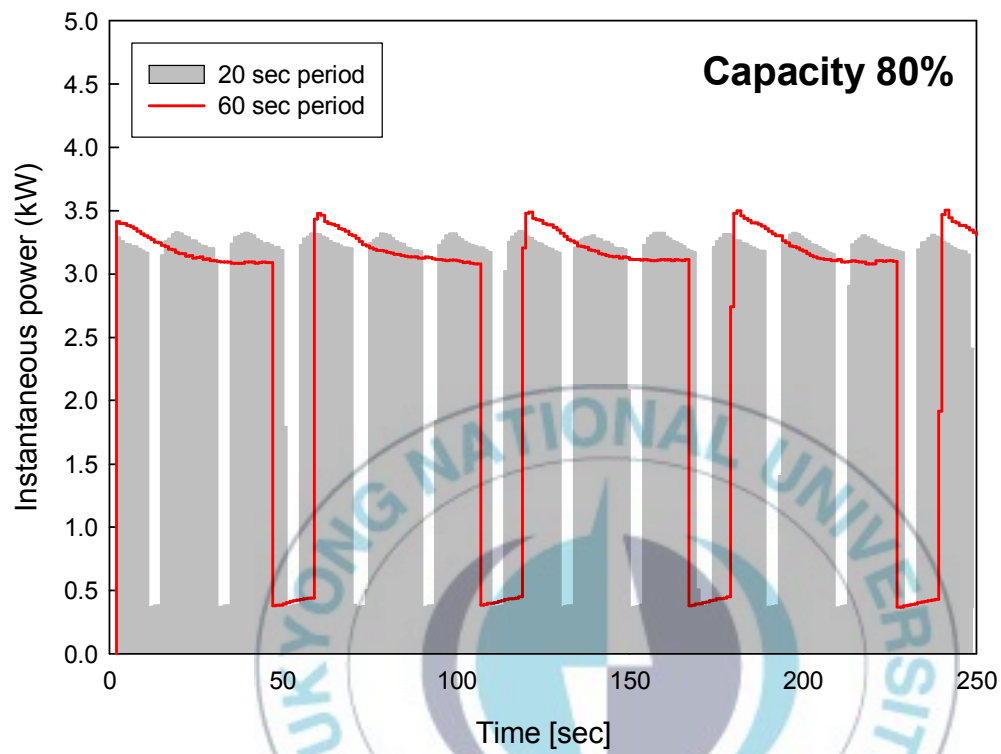


Fig. 3.11 Instantaneous power comparison of period 20sec and 60sec with capacity 80%

3.2.7 실험 방법 별 최종 냉수 출구온도 정밀도 분석

Fig. 3.12는 부분부하 80%일 때 압축기 ON/OFF 타입과 PWM valve 주기 20s, 60s 때의 냉수 보조 탱크의 출구 온도를 시간에 따라 나타낸 것이다. PWM valve 주기 20s 일 때의 출구 온도값이 가장 작은 편차를 보이며 고정도를 유지하는 것을 알 수 있다. 압축기 ON/OFF 타입의 경우 부하 조절을 위해 압축기가 정지되는 순간 소비전력은 0으로 Energy saving 측면에서는 뛰어 날 수 있으나 아래 그래프와 같이 출구 온도의 고정도는 보장받기 힘들다는 것을 알 수 있다. 이를 해결하기 위해 더욱 큰 용량의 보조탱크를 설치하는 방법도 있지만 많은 설치공간을 필요로 한다는 단점이 있다. 20s 주기의 경우 작은 PWM valve의 개폐로 인해 솔밸브의 수명이 짧아져 빠른 시간 내에 교체를 해야 하는 단점이 있다. 주기 60s의 경우 온도편차가 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 이며 수명 또한 이론적으로 20s 주기보다 3배 더 연장된다. PWM valve의 사용이 기존 압축기 ON/OFF 타입보다 냉수 출구 고정도와 보조 탱크 용적 측면에서 더 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

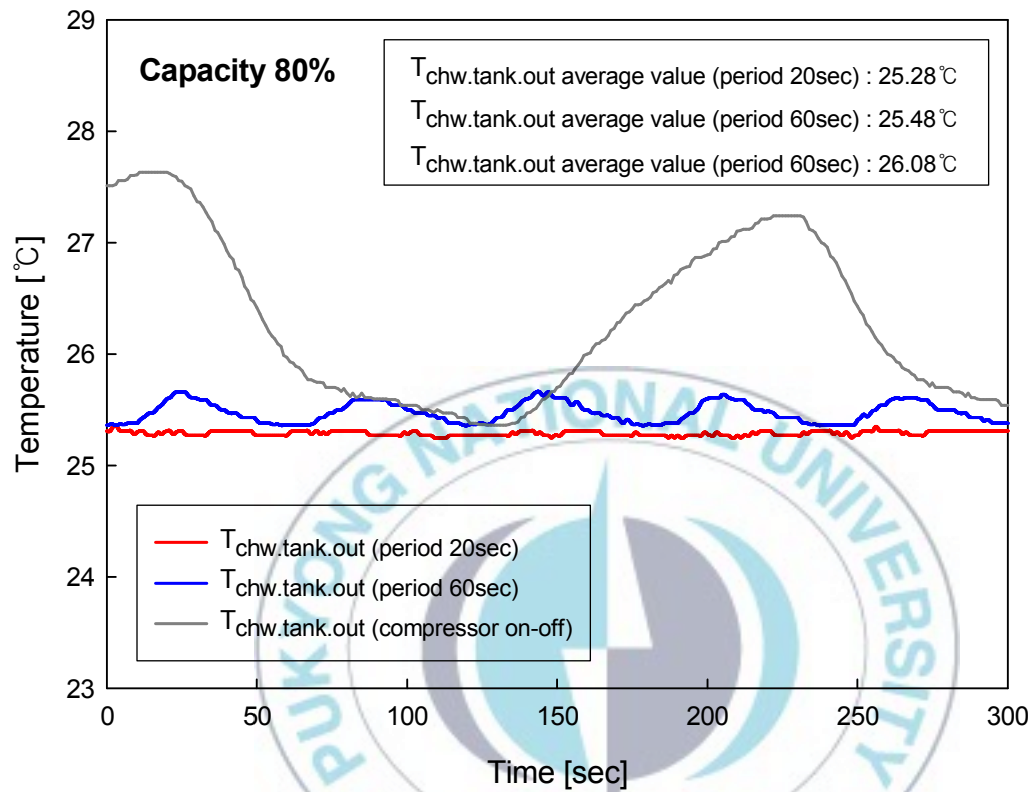


Fig. 3.12 $T_{chw.tank.out}$ comparison of ON/OFF type and PWM valve on period 20, 60sec

제 4 장 결 론

본 연구에서는 PWM(Pulse Width Modulation) valve를 통해 용량가변이 가능한 디지털 스크롤 압축기를 이용하여 냉각기의 부분부하에 대한 냉수 출구온도 정밀도 제어 성능 특성 연구를 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PWM valve를 이용하여 산업용 냉각기의 용량제어가 20~100% 범위에서 가능함을 확인할 수 있었다.

2) 최대 부하 능력 비율이 감소하면 냉매 순환량 감소로 인해 냉동능력과 압축 일량은 감소하며, COP 또한 감소한다.

3) PWM valve를 이용 시 부분 부하 때 소비동력이 정속운전에 비해 1/10까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

4) PWM valve 개폐 주기가 20sec일 때는 출구 온도를 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 까지 제어 가능했으며, 60sec일 때는 출구 온도를 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 까지 제어가 가능했다.

본 연구를 통해 부분 부하 시 PWM valve의 개폐 주기에 따른 장치의 냉수 출구온도 정밀도 제어 성능 특성분석을 해보았다. 기존의 용량가변방식인 압축기 ON/OFF 방식에 비해 온도를 고정도로 제어할 수 있었다. 또한 PWM valve의 개폐 주기를 수동으로 조절할 수 있기에 제품 판매 시 냉수 출구 온도의 정밀도와 PWM valve 장치의 수명 중 구매자의 요구에 맞게 조절하여 제작할 수 있는 장점도 있겠다.

참 고 문 헌

1. Kwon, Y. C. and Youn, B., 2006, "Correlation on Compressor Discharge Temperature of System A/C Applyng PWM Scroll Compressor in Cooling Mode", Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 154~159.
2. Rice, C. K., Fisher, S. K., 1985, "Comparative Analysis of Single and Continuously Variable-Capacity Heat Pump Concepts", Proc. of the DOE/ORNL Heat Pump Conference, pp. 57~65.
3. Seo, H. J., Kim, J. M., Lee, J. K., Oh, S. K. and Moon, J. M. 2001, "Characteristics of Oil Flow Pattern of DVM system (1)", Proc. of the SAREK, Vol. 3 pp. 1137~1141.
4. Hong, J. T., Jang, G.S., Kim, D. Y., Kim J. Y., Moon, J. M., Youn, B. and Shim, S. C., 2001, "An exprimental study on the heating capacity improvement at low temperature condition of system air-conditioner using the digital scroll compressor", Proc. of the SAREK, pp. 680~685.
5. M. Yaqub, S.M. Zubair, J.R. Khan, J., 2000, "Performance evaluation of hot-gas bypass capacity control scheme for refrigeration and air-conditioning systems", Energy, 25, pp. 543~561.

감 사 의 글

배움의 길은 항상 길고 어려움이 있지만 기대감과 열정으로 시작한 대학원 생활을 논문을 마무리하면서 안타깝고 부끄러운 일은 없었는지 돌이켜 생각해 보면 그 동안 따뜻한 관심과 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

먼저 회사생활을 하면서 배움을 가질 수 있는 기회를 주신 강환수 사장님께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 실험을 위해 배려를 해주신 김중호 이사님과 주원규 이사님, 김광진 팀장에게도 감사의 말을 드립니다.

또 저의 학위과정을 마치기까지 다양한 경험과 지식을 쌓게 해주시고 격려와 충고로써 끝까지 저를 이끌어 주신 존경하는 지도교수님 윤정인 교수님께 고개 숙여 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 논문지도와 수업을 통해 많은 가르침을 주신 정석권 교수님, 금종수 교수님께 감사드립니다. 또한 바쁘심에도 불구하고 본 논문의 완성에 조언을 아끼지 않으신 오후규 교수님, 김종수 교수님, 최광환 교수님, 김영수 교수님, 김은필 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

그리고 실험실 생활에 익숙해 질 수 있도록 저의 고충을 들어주고 조언을 많이 해주신 백승문 선배, 이호생 선배에게도 감사드립니다.

또한 논문을 준비하면서 여러모로 도움을 많이 준 심규진, 진병주, 오승택, 최준혁 군에게도 이 자리를 빌어 감사를 드립니다.

특히 같이 실험을 하면서 밤도 같이 새고, 난관에 봉착할 때마다 큰 힘이 되어준 최원재, 김현우 군께 진심으로 감사를 드립니다.

오늘 제가 있기까지 항상 뒷바라지 하여 주신 부모님께 머리 숙여 감사의 말씀을 올립니다. 또 장모님과 누님, 동생과 제수씨, 숙모님과 처형과 동서와 조카들, 그리고 사랑과 인내로 오랜 시간을 견디고 헌신적으로 도와준 아내 진영에게 그동안 못 다한 사랑을 배가하여 줄 것을 약속하며 고마움을 전합니다.

2009년 12월

강 현 준