

## 열환경 제시를 위한 공조 시스템의 개발

김영일, 장영수, 정구현, 이기섭  
 한국과학기술연구원 기전연구부  
 서울시 성북구 하월곡동 39-1 (우) 136-791  
 yikim@kistmail.kist.re.kr, sinai@kistmail.kist.re.kr,  
 khjeong@kistmail.kist.re.kr, kislee@kistmail.kist.re.kr

## Air-conditioning System for Thermal Presentation

Youngil Kim, Youngsoo Chang, Kooheon Jeong, Kiseop Lee  
 Div. of Mechanical/Control Systems, KIST  
 39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea  
 yikim@kistmail.kist.re.kr, sinai@kistmail.kist.re.kr,  
 khjeong@kistmail.kist.re.kr, kislee@kistmail.kist.re.kr

### 요약

인간의 감성에 영향을 미치는 요인은 다양하나 이 중에서도 열환경은 인간에게 미치는 정도가 어떠한 요인보다도 큰 것으로 알려져 있다. 열환경이라 함은 온도, 습도, 기류, 복사열을 말하며 이 요소들과 인간의 감성과는 밀접한 관련을 지닌다. 열환경과 관련된 인간의 감성을 측정, 평가하기 위해서는 주위의 열환경이 정밀하게 제어되는 공간에서 작업이 이루어져야 한다. 실내 공간의 열환경을 임의로 제어하기 위해서는 급기되는 공기의 조건과 벽체의 온도가 정밀하게 제어되어야 한다. 공기와 벽체 조건은 가열, 냉각, 가습 또는 제습에 의하여 정밀하게 제어되며 이를 실현하기 위하여 공조 시스템이 사용된다. 열환경을 제어하기 위한 공조 시스템은 일반적인 시스템과는 달리 특수한 조건이 요구된다. 공조 시스템의 각 구성요소가 컴퓨터에 의해 개별적으로 제어될 수 있어야 하며 특수 조건에 따른 유연성이 뛰어나야 한다. 본 연구에서는 열환경 제시에 적합한 공조 시스템을 개발한다.

### 기호 설명

AHU air handling unit  
 C/C 냉각용 열교환기 (cooling coil)

FS full scale  
 PC personal computer  
 RH 상대습도 (relative humidity)  
 T 온도 [°C]  
 R 덕트 반경 [m]

### 서론

온도, 습도, 기류, 복사온도 등의 열환경 요소에 대한 인간의 감성을 평가하기 위해서는 이러한 열환경 변수들이 정밀하게 제어되는 열환경챔버와 이를 구현하는 공기조화기 및 열원기기가 필요하며 이러한 기기와 관련된 여러 기술들이 복합적으로 잘 조화되어야 한다<sup>(1,2,3,4)</sup>. 특히 열환경 제사용 공기조화 장치는 조건 변화에 따른 대응 특성이 우수해야 하므로 넓은 범위에 걸쳐 모든 조건을 가변시킬 수 있는 hardware와 이를 제어하는 software의 개발이 필요하다. 모든 기기는 personal computer(PC)에서 측정 및 제어가 가능하도록 구성되는 것이 요구된다. 또한 예견하지 못한 조건을 구현할 필요가 종종 발생하므로 전문 지식이 없는 사용자에게 의해서도 수정이 용이하도록 구성되어야 한다.

실내의 온도와 기류 분포는 급기 공기의 온도 및 풍량, 급기 및 배기 방식, 부하의 종류 및 위치, 벽체 온도, 외기 침입 등 여러

요인의 영향을 받는다. 특히 급기 공기의 조건(온도, 습도, 풍량, 분출각, 난류 강도)은 실내의 열환경과 밀접한 관계를 가지며 본 연구에서는 공기의 조건을 원하는 목표값으로 구현하는 공조 시스템을 개발하였으며 이 장치에 대하여 기술한다.

실내의 열환경을 조절하는 공조 장치는 크게 실외와 실내 장치로 분류된다. 실외 장치로는 공기조화기(air handling unit), 각종 열원기기인 냉동기, 가열기, 가습기 및 제습기가 있다. 열매체로는 공기 또는 물이 사용되며 수송은 덕트 또는 수배관에 의해 이루어진다. 실내에는 공기를 실내로 급기하는 급기구, 외부로 배출시키는 배기구와 각종 열교환기가 설치된다. 필요에 따라 국부적인 부하 처리를 담당하고 실내 열환경을 불균일하게 유지할 필요가 있는데 이를 위하여 도달거리와 풍량 각도를 조절할 수 있는 특수한 급기구가 사용되기도 한다.

기기가 설치되면 이를 운영하는 제어기법이 필요하다. 제어기법에 따라 결과는 상이하게 다를 수 있으므로 목표한 바를 효율적이고 신속하게 도달시키는 feedback 제어 논리의 개발이 필요하다. 제어 논리의 개발에는 열유체 시스템 모델링, 부하 및 열유동 예측 기술이 필요하게 된다. 특히 다른 장치와의 간섭으로 급기구 및 배기구의 설치가 방해받을 시 열유동 해석기술은 중요한 역할을 하게 된다.

## 공기조화기

공기조화기는 공기의 온도, 습도 및 풍량을 목표치로 제어하는 장치로 냉각과 제습을 위한 냉동기, 가열을 위한 히터, 가습기, 공기를 순환시키는 송풍기로 구성되어 있다. 설정된 공기의 풍량, 온도, 습도를 유지하기 위하여 송풍기, 냉동기, 히터, 가습기를 제어하게 되며, 이들 기기들의 운전조합에 의하여 원하는 공기 조건을 얻을 수 있다. 각 기기의 사양은 Table 1에, 구성도는 Figure 1과 같으며 상세 내용은 다음과 같다. 공기조화기 내부에는 냉각을 위한 cooling coil, 가열을 위한 전기히터 그리고 송풍기로 구성되어 있다. 곳곳에 설치된 센서는 온도, 습도, 풍속을 측정하여 제어 프로그램의 입력

값으로 사용된다.

## 풍량

공기의 풍량은 송풍기의 회전수를 가변시키거나 공기조화기의 입출구 사이에 설치된 바이패스 댐퍼의 개도를 조절하는 방법으로 조절한다. 송풍기의 상사 법칙에 의하면 풍량은 회전수에 비례하고, 압력은 회전수의 제곱, 동력은 세제곱에 비례한다. 송풍기의 회전수는 모터에 공급되는 입력전력의 주파수를 바꾸어 주는 인버터로, 바이패스 댐퍼는 전압 입력에 비례하여 개도가 제어된다.

바이패스 덕트는 필요 공기 풍량이 소량일 경우, 공기조화기의 열전달 성능저하를 피하기 위하여 많은 풍량을 순환시키는 용도로 사용한다. 공기와 열교환기 사이의 열교환은 열전달계수에 의존하는데 이 값은 풍속에 비례한다.

Table 1 Specifications of an air-conditioning system

component	specifications
supply fan	22m <sup>3</sup> /min, 30mmAq motor power: 0.36kW type: sirocco
refrigerator	capacity: 8550kcal/h compressor power: 2.4kW
heater	capacity: 16kW
humidifier	capacity: 5kg/h heater power: 10kW

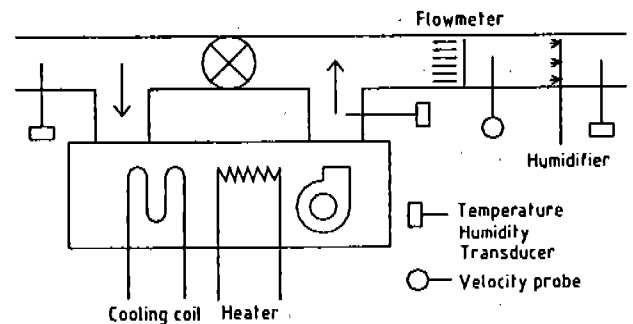


Figure 1 Schematic diagram of an AHU

## 가열

공기의 온도를 높이거나, 제습 후 냉각된

공기를 재가열하기 위하여, 제어 및 응답성이 우수한 전기식 가열기가 설치되었다. 용량 4kW의 히터가 4개 설치되어 총 용량은 16kW가 된다. 각각의 히터에 SSR(solid state relay)을 설치하여, SSR에 입력되는 디지털신호 펄스의 high와 low 시간비를 조절하여 히터의 용량을 연속적으로 제어한다. 펄스는 PC에 설치된 timer card에서 출력된다. 전기식 가열기는 사용이 간편하고, 제어 성능이 우수하나, 필요한 가열 용량이 커질 경우 많은 전력 공급을 필요로 한다. 이 경우에 대한 대안으로서 가스보일러를 설치하여 사용한다. 가스보일러는 가스유량과 연소에 필요한 공기량을 제어하여 보일러 출구 온도를 제어한다. 최적의 공기량은 실험을 통하여 미리 구하거나 배기측에 O<sub>2</sub> 농도를 측정하여 조절한다. 공기의 풍량은 송풍팬의 회전수 제어에 의하여 조절될 수 있다.

## 냉각 및 제습

공기 온도와 습도를 낮추는 방법으로 증기압축식 냉동기가 사용된다. 냉동기는 직접팽창식으로 냉매가 공기조화기 내의 냉각 열교환기에서 증발하는데 2차유체를 순환시키는 간접식에 비하여 제어 특성이 우수하다. 냉방부하는 공기의 온도를 감소시키는 현열부하와 수분의 양을 감소시키는 잠열부하의 합으로 이루어진다. 냉동기의 냉방용량을 냉방부하에 맞추기 위하여 일반적으로 냉매의 순환유량을 변화시켜 조절하게 되는데, 대표적으로 몇 가지 방법을 소개하면 다음과 같다.

- (1) 작동중 압축기를 필요에 따라 멈추거나 가동시킨다 (on/off).
- (2) 교축작용을 이용하여 흡입관의 압력을 제어한다.
- (3) 배출가스를 흡입관으로 되돌려 보내는 방법으로 비효율적이고 압축기를 과열시킨다.
- (4) 흡입밸브를 열린 상태로 유지하여 부분 부하 운전을 수행한다.
- (5) 압축기의 회전수를 제어한다.

위의 방법 중 소형시스템에서 흔히 사용되는 압축기의 on/off 제어법은 공기의 열용량이 크지 않음을 고려할 때, 공기의 온도변화폭이 커지므로, 공급공기를 제어하기 위해서는 적절한 방법이 아니다. (2)~(4)의 다른 방법들도 냉동기의 효율적인 제어 방법은 되지 못한다. 따라서 압축기의 회전수를 연속적으로 변화시켜주는 방법이 다른 제어방법에 비하여 부분부하에서 효율적인 운전이 가능하고 제어성도 우수하다. 본 연구에서는 밀폐형 압축기를 사용하였고 압축기의 회전수를 변화시키기 위해 인버터를 사용하였다. 인버터는 PC에서 발생하는 DC 0~10V 전압에 의해 주파수의 설정이 가능하도록 구성하였다.

실외에 설치하여 열을 공기로 방출시키는 응축기는 응축기 내의 압력에 따라 압력 스위치에 의하여 실외기의 팬이 운전 또는 정지되는데, 이 경우 응축압력이 주기적으로 변동하게 됨에 따라 일정한 압축기 회전속도에서도 냉동기의 주기적인 상태 변동이 발생한다. 정밀한 온도의 제어를 위해서는 압축기의 회전수뿐만 아니라 응축압력을 일정하게 유지할 필요성이 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 응축기에 압력센서를 설치하고, 이 값을 컴퓨터로 입력받아, 일정한 압력이 유지되도록 응축기 팬의 회전수를 인버터로 제어한다. 냉동기의 제어시스템을 Figure 2에 나타내었다.

압축기 회전수 증가에 따라 냉동용량이 증가하게 되면 현열용량과 잠열용량이 같이 증가하게 된다. 전체 냉방용량이 일정한 상태에서 풍량을 증가시키면 현열용량은 증가하고, 잠열용량이 감소하는 현상을 보이게 되므로, 냉방용량과 풍량의 조절을 통해 냉각과 제습의 제어가 가능하나<sup>(5)</sup>, 본 연구에서는 풍량 자체도 제어 대상이므로, 냉동기만으로는 온도와 습도를 동시에 제어하기 어렵다. 따라서 약간의 과냉과 과제습을 시키고, 후단의 히터와 가습기에서 이를 보충하는 제어방법을 사용한다. 일반적으로 가열하고 가습하는 것이 그 반대의 과정보다 용이하다.

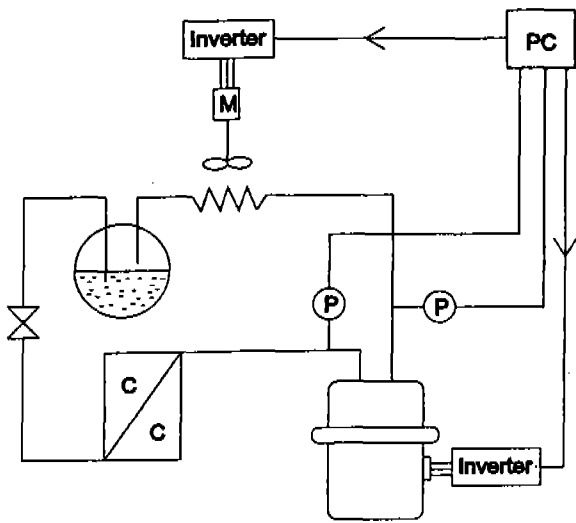


Figure 2 Refrigeration system

조건에 따라 다르기는 하지만 일반적으로 냉각식 제습으로는 노점온도 5℃ 이하로 낮추기 어렵다. 이것은 온도 25℃인 경우 상대습도 28%에 해당하는 것으로 많은 실험 조건이 이 범위 내에 존재한다. 그러나 실험 조건상 저습의 공기가 필요한 경우 흡착식 또는 흡수식 제습 방식이 권장된다.

## 가습

가습방식으로는 증발식, 수분무식, 증기 분사식 등이 있으나, 본 연구에서는 제어 특성이 우수한 증기분사식을 채용하여, 일정 압력의 증기를 공조기 출구쪽의 덕트에 일정량을 분사하여 원하는 습도로 제어한다. 가습기는 일정한 압력의 증기를 발생시키는 전기 가열식 증기보일러, 덕트의 공기 유동 중에 증기를 분사하는 분사기, 가습량을 제어하는 밸브, 습도 측정부로 구성되고, Figure 3에 개략도를 나타내었다.

전기 증기보일러는 일정한 압력의 증기를 발생시키기 위해 압력용기 내에 열전대를 설치하여, 용기 내 증기의 온도가 일정하게 유지되도록 전기히터를 SSR를 사용하여 PID 제어하였다. 작동 중에 탱크 내의 수위 스위치에 의하여 일정한 수위를 유지하도록 보충수가 펌프로 공급되는데, 한번에 너무 많은 양이 공급될 경우 압력탱크 내의 물의 온도가 크게 떨어지므로, 한번에 공급되는

보충수의 양을 최소화할 수 있도록 수위스위치 전극봉의 간격을 조절하였다.

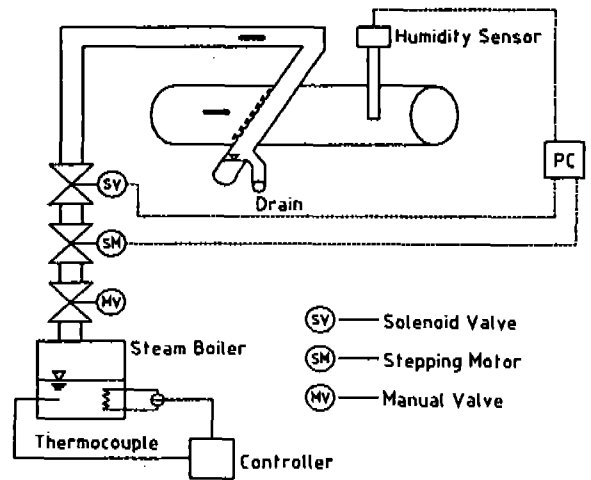


Figure 3 Humidifier system

가습량의 조절은 솔레노이드밸브와 스테핑 모터로 개폐정도가 제어되는 metering valve를 사용하였다. 전체 증기 공급량은 스테핑 모터 구동밸브로 조절하고, 솔레노이드밸브의 on/off 되는 시간비를 PID 제어하여, 분사되는 스팀의 양을 조절한다. 솔레노이드밸브의 on/off 되는 주기는 밸브의 작동 특성을 고려하여 5초로 정하였다.

분사기는 직접 공기 중에 증기를 분사하는 부분으로, 분사압력이 높을 경우 분사시 소음이 발생하므로, 분사구를 크게 하여 스팀의 분사압력을 낮추었고 균일한 양을 분출할 수 있도록 각각의 크기를 조절하였다. 분사시 증기보일러에서 증기에 섞여서 오는 물과 배관과 분사구에서 발생하는 응축수를 제거하기 위하여 분사기를 약 45도 가량 기울여 설치하고, 응축수 배수구를 분사구 아래쪽 출구부분에 설치하였다.

기존에 설치된 가습기와 달리 직접 증기를 공기중에 분사하므로 응답성이 빠르나, 과다하게 분사될 위험성을 줄이기 위하여 가습기 후단에 센서를 설치하여 이를 감시하였으며, 가습된 공기가 덕트에 응축되지 않도록 덕트를 단열하였다.

## 측정 및 제어시스템

공조시스템의 제어를 위해 덕트에서의

온도, 습도, 유량과 냉동기 주요부의 온도, 압력을 측정한다. 각 측정장치의 규격과 측정오차를 Table 2에 나타내었다.

공급공기의 제어를 위해 Figure 1에 표시된 바와 같이 온습도센서를 설치하였으며, 유량을 측정하였다. 냉동기의 제어를 위해 냉동사이클의 주요부에 T형 열전대를 설치하였고, 응축과 증발압력을 측정하기 위해 strain gauge형 압력센서를 각각 설치하였다. 공조시스템의 각 측정값은 data logger에서 수집되어 GPIB통신을 통해 PC에 전달된다.

Table 2 Measuring instruments

sensor	specification
velocity probe	range: 0.1~50m/s accuracy: ±0.15m/s (0.1~4.99m/s) ±0.3m/s (5.0~9.99m/s) ±0.75m/s (10.0~24.9m/s) ±0.6m/s (25.0~50.0m/s)
thermocouple	acc.: ±(0.05%+0.5℃)
temperature & humidity transducer	temperature range: -20~80℃ accuracy: ±0.3℃ humidity range: 0~100% RH acc.: ±2%(0~90% RH) ±3%(90~100% RH)
pressure transducer	range: 500, 300 psia accuracy: ±0.1%FS

본 실험에서는 풍량을 측정하기 위해 덕트 단면의 5 지점의 유속을 측정하고 이를 유량으로 환산하였다. 이에 앞서 orifice, nozzle 등 직접 유량을 측정할 수 있는 방법이 고려되었으나, orifice는 압력강하가 크고 nozzle은 측정 범위가 협소하여 적용되지 못했다.

유량계는 KS B 6311<sup>(6)</sup>의 규격에 따라 정류격자와 mesh를 지나 속도가 발달된 직경 244mm 단면의 5 지점 (덕트 중심에서 0.316R, 0.548R, 0.707R, 0.837R, 0.949R)에서 풍속측정센서를 이용해 측정하도록 제작되었고, 이 값들의 평균값에 단면적을 곱하여 풍량으로 환산하였다. 유량계의 보정을 위하

여 직경을 100mm로 감소한 보정기를 앞의 유량계와 같은 규격으로 제작하여 5~35℃의 온도범위에서 보정을 실시하였다. 보정기는 유량계의 출구에 직접 연결하고, 유속의 측정은 pitot tube를 사용하였다.

본 연구에서는 히터, 냉동기, 가습기의 제어는 열유체 제어에 많이 사용되는 PID (proportional, integral, differential) 제어 논리를 사용한다. PID 상수값은 시스템의 각 요소의 특성과 제어 목표에 의해 결정되며 여러 가지 방법에 의해 그 최적값이 정해진다. 실제 현장에서는 수동으로 상수값을 결정하는 방법이 가장 많이 사용된다. 자동조율(autotuning) 기법을 사용하여 PID 상수값을 찾는 방법도 있는데 이는 최적의 값을 찾는다는 의미보다는 최소한의 제어가 가능하도록 값을 정하는 의미가 더 크다. 한편, 본 연구에서는 공조시스템의 각 요소를 모델링하여 해석적으로 PID 상수값을 결정할 수 있는 연구를 수행하고 있다.

PC를 이용한 기기의 제어를 위하여, 각 요소기기들의 on/off, 기기의 회전수 제어를 위한 인버터의 주파수 설정, 히터와 밸브의 제어를 위한 출력신호 등을 PC에 장착된 DA(digital/analog), timer board를 통해 발생시킨다. 측정 및 제어의 편의성을 위하여 2대의 PC를 사용하여 각각 측정과 제어를 수행하고, PC간의 자료교환은 LAN을 이용한 TCP/IP방식을 이용한다. 이 방식은 원거리에서 측정과 제어가 가능한 편리한 방식이다.

제어와 측정값의 모니터링을 위하여 윈도우95에서 운영되는 National Instruments사에서 개발된 LabVIEW 4.0을 사용한다. 이 프로그램은 그래픽 기반의 프로그래밍을 지원하며, 다양한 하드웨어 라이브러리와 손쉬운 사용자 인터페이스 그리고 여러 시스템에서의 프로그래밍 호환성을 제공한다.

Figure 4와 5는 온도와 습도 제어의 한 결과를 나타낸 것이다. 습도 제어는 온도에 따라 값이 변하는 상대습도보다는 절대습도가 제어 대상이 된다. 정상적으로 운전되는 시점으로부터 약 4분이 경과한 후에 교란을 주기 위해 냉동기를 운전하여, 각각 냉방부하와 제습과정에 따른 제어반응을 살펴보았

다. 냉동기를 운전할 경우 공기의 온도가 하강하며 수분 일부가 열교환기 표면에 응축되어 제습 효과가 나타난다. 이때 냉동기의 압축기 회전수는 60Hz, 응축압력은 1800kPa가 되도록 제어되었다.

공조기의 입구조건은 13.6℃, 상대습도는 77%, 풍량은 800cmh이다. 온도의 경우 냉방부하로 온도가 낮아지게 되면, 가열량이 증가하여, 온도의 하강을 보상한다. 약 5분 후에 설정값으로 회복되었으며, 다시 설정값을 20℃에서 25℃로 변경하였을 때도 좋은 반응 결과를 보였다. 이때 PID 제어의 상수값은 P = 15%, I = 0.8 min, D = 1.5 min로 하였다. 습도의 경우는 온도에 비하여 반응속도가 빨랐으며, 제습과정으로 습도가 낮아졌다가 곧 설정값을 회복하였다. 습도제어는 PI 제어로 하였으며, 상수값은 P = 30%, I = 0.1 min로 하였다.

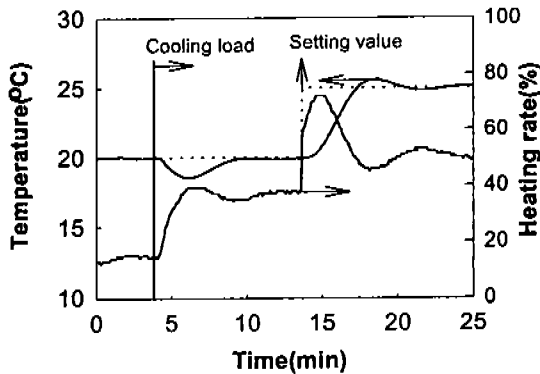


Figure 4 Response of temperature control

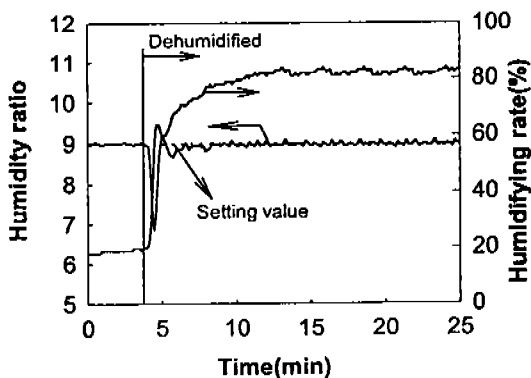


Fig. 5 Response of humidity control

## 결론

기류의 온도, 습도, 복사온도 등의 열환경이 인간의 감성에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험조건을 구현하기 위해서는 목표하는 온도와 습도를 가지는 공기를 필요한 양만큼 공급해 줄 수 있는 공기조화장치가 필요하다. 열환경 제시용 공기조화기는 조건 변화에 따른 대응 특성이 뛰어나야 하며 넓은 범위에 걸쳐 모든 조건을 구현할 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 요구 조건을 만족시킬 수 있는 유연성이 높은 공조 시스템을 개발하였다.

공기조화기는 공기의 냉각과 제습을 위한 냉동기, 가열을 위한 히터, 가습을 위한 가습기, 공기를 순환시키는 송풍기로 구성되어 있으며 각각의 기기는 PC에서 제어 프로그램에 의해 구동된다. 성능시험 결과, 온도는  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 상대습도는  $\pm 1\%$ 의 제어성능을 보인다.

## 참고문헌

- [1] Clifford, G., 1990, Modern Heating, Ventilating, and Air Conditioning, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [2] ASHRAE, 1993, ASHRAE Handbook, Fundamental, Georgia, USA.
- [3] ASHRAE, 1991, ASHRAE Handbook, Application, Georgia, USA.
- [4] Stoecker, W. F., Jones, J. W., 1982, Refrigeration and Air conditioning, McGraw-hill.
- [5] Krakow, K. I., Lin, S., Zeng, Z.-S., 1995, "Temperature and Humidity Control during Cooling and Dehumidifying by Compressor and Evaporator Fan Speed
- [6] 한국공업표준협회, 1982, 송풍기의 시험 및 검사 방법, 한국공업규격 KS B 6311, 한국공업표준협회.