

## 가정용 흡수식 냉온수기용 냉각탑의 성능특성

M.M.A. Sarker\* · 윤정인† · 김은필\*\* · 정석권\*\* · 민경현\* · 김재돌\*\*\*

(원고접수일 : 2004년 3월 22일, 심사완료일 : 2004년 10월 11일)

### Performance Characteristics of Cooling Tower on Small Absorption Chiller

M.M.A. Sarker\* · Jung-In Yoon† · Eun-Pil Kim\*\* · Seok-Kwon Jeong\*\* · Kyung-Hyun Min\* · Jae-Dol Kim\*\*\*

**Abstract** : The experiment of thermal performance about cross flow type cooling tower was conducted in this study. Generally the ambient air condition can affect the thermal performance of cooling tower to improve or not. However it is hard to control the cooling water temperature that we want under bad air condition or during rainy season. In this paper, the effect of variables, which the ambient air have, especially wet-bulb temperature, are experimentally investigated for controlling the cooling water temperature more successfully. The result is that there is appropriate air flow rate in respective air condition to preserve the cooling performance in the cooling tower and the maximum air flow rate can't overcome the approach under bad air condition.

**Key words** : Cooling tower(냉각탑), Cooling water(냉각수), Thermal performance(열성능), Cooling performance(냉각성능), Web-bulb temperature(습구온도)

#### 1. 서 론

최근 환경 및 에너지 보존에 따른 국제동향에 미루어 에너지설비의 효율 향상 및 이를 위한 기술 개발은 매우 중요하다. 따라서 각종 산업 공정이나 공기조화 및 냉동 시스템에서 생성되는 열을 효과적으로 제거하기 위해서 필요한 양의 냉각수를 공급하는 냉각탑의 최적 설계 및 운전 기술의 확립은 매우 필요하고 시급하다. 또한 경제성 및 에너지절약 측면에서 운전 전력의 최소화를 도모

하여야 할 필요성이 있다.

냉각탑은 물의 증발열을 이용하여 냉각수를 냉각, 공급하는 장치로서, 냉동공조기기 및 많은 산업공정에서 생성되는 열을 제거하는 데 긴요하게 사용되고 있다. 냉각탑에서의 냉각작용은 물과 공기의 온도차에 의한 현열과 물 자신의 증발을 이용하여 물질전달에 의한 잠열의 두 가지 방법으로 이루어지는데 냉각효과가 큰 것은 물의 증발에 의한 방법이다.

냉각탑을 공기와 물의 상호 유동 형태에 따라

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, T : 051)620-1506

\* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

\*\* 부경대학교 기계공학부

\*\*\* 동명대학 냉동공조학과

분류하면 물과 공기가 수직으로 교차하며 흐르는 직교류형(cross flow type)과 물과 공기가 서로 반대방향으로 흐르는 대향류형(counter flow type)이 있는데, 대향류형은 직교류형에 비해 열효율이 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 직교류형은 물 공급부가 개방되어 있기 때문에 유지보수가 용이한 장점을 가지고 있어 사용용도 및 운전조건에 따라 서로의 장단점을 가지고 있다.

직교류형 냉각탑에서는 공기가 수평으로 흐르고, 물은 냉각탑 상단부의 물 공급부에서 노즐을 통하여 수직방향으로 떨어지는데, 이러한 물의 수직방향 유동은 충전재(fill packings)를 따라 흐른다. 냉각탑에서 물의 증발을 쉽게 하려면 물과 공기의 상대속도, 흐름방향(대향류, 병류, 직교류), 접촉면적 및 접촉시간 등이 주요 파라미터가 된다.<sup>(2)</sup>

냉각탑의 열효율에 관한 이론해석은 Walker 등<sup>(3)</sup>에 의해 최초로 제안되었으나, 실질적 미분방정식을 이용한 해석은 Merkel<sup>(4)</sup>에 의해 처음 시도되었다.

Merkel은 공기·수증기 시스템에 대한 Lewis 수를 1로 가정하여 냉각탑 내의 열전달률을 포화상태 공기의 엔탈피와 국부 공기의 평균 엔탈피 차이에 비례하는 방정식으로 나타내었고 이는 냉각탑의 성능계산에 있어서 최근까지 보편적으로 사용되고 있다.

Lichtenstein<sup>(5)</sup>은 Merkel의 방정식을 사용하여 도식적인 방법으로 해를 구하였다. 또한 Baker와 Shryrock<sup>(6)</sup>은 Merkel의 연구를 재검증하여 Merkel이 사용한 가정으로부터 발생하는 오차를 최소한으로 줄이고자 하였다. 김<sup>(7)</sup> 등이 수행한 기존의 실험들은 냉각탑의 열특성을 냉각수의 유량과 공기의 속도 즉, 풍량을 변화시키거나 레인지를 변수로 두어 냉각성을 비교 검토하였다.

오늘날 냉각탑은 지난 50여 년 동안 꾸준히 발전돼 오면서 Wet/Dry형 등의 개량형이 개발되었다. 미국의 냉동공조학회(ASHRAE)에서는 냉각탑에 대한 분과를 두고 지속적인 기술 개발의 정보를 정리, 교환하고 있으나<sup>(8-9)</sup> 국내에서는 냉각탑의 수요가 급증하고 있음에도 불구하고, 이에 대한 설계 기술 및 자료는 매우 미약하여, 주로 선

진 외국의 기술지원 또는 설비를 모방 제작하는 수준에 있다. 따라서 수요별 특성에 따른 냉각탑의 설계가 불충분하고, 가동 중인 냉각탑의 성능평가 및 적정 운전기법의 도입에 따른 효과를 기대하기 어려운 것이 현재의 실정이다.

본 연구에서는 최근 연구 중인 소형 가정용 흡수식 냉온수기에 사용될 냉각탑을 대상으로 외부조건 변화에 따른 열적 특성과 적정 운전 기법을 구하고자 하였다. 따라서 냉동기 운전에 필요한 일정조건의 냉각수를 공급할 수 있도록, 외기의 온·습도 조건변화에 따른 냉각탑의 운전 특성을 검토하였으며, 습도가 높아 냉각수 온도 제어가 힘든 장마철 외기조건을 대상으로 냉각탑의 성능 실험을 수행하였다.

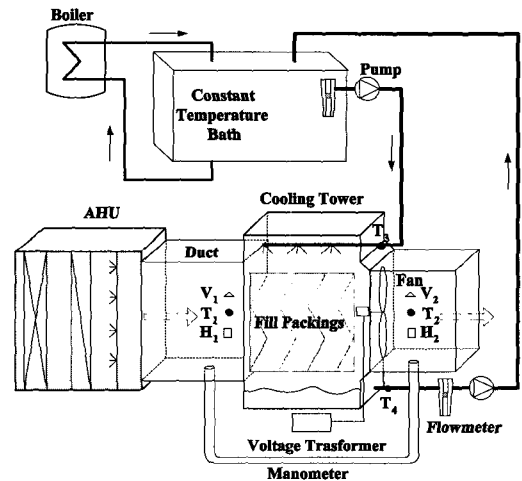


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 직교류형 냉각탑 실험장치의 개략도를 나타낸다.

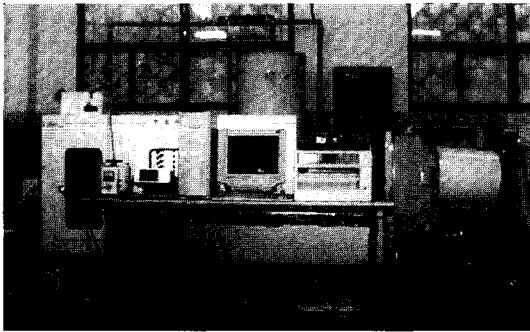
장치의 주요 구성부로는 직교류형 소형 냉각탑, 냉각 및 가열코일과 가습장치가 내장된 공기조화기, 항온조, 전압조정장치(voltage transformer), 온수보일러 및 측정 장치로 구성되어 있다. 냉각

탑은 1.5RT급을 사용하였으며, 냉각수는 냉각탑 상단의 다공판으로 이루어진 분배기를 통해 균일하게 충전제로 공급되며, 덕트를 통해 수직으로 유입되는 공기와 열교환을 할 수 있도록 하였다.

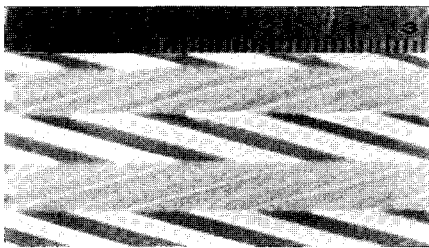
Fig. 2는 실험장치의 사진을 나타내며, Fig. 3은 냉각탑 내에 내장된 충전제의 모습을 각각 나타낸다. 충전제는 가정용 흡수식 냉온수기에 사용되는 소형 냉각탑용으로 고안되었고 주요 사양 및 규격은 Table 1과 같다.

**Table 1 Specification of filler**

Plate vs surface area increasing rate [%]	43
Pitch [mm]	8.8
Unit volume rate surface area [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	325



**Fig. 2 Photo of experimental apparatus.**



**Fig. 3 Photo of fill packings.**

냉각탑에 공급되는 공기의 상태를 조정하기 위해 공기조화기를 냉각탑의 덕트 전면에 설치하여 건구온도 및 상대습도를 변화시킬 수 있도록 하였다. 또한 공기는 냉각탑 후면의 축류형 프로펠러 팬에 의해 충전제로 유입되는데 공기의 상태에 따라 유입되는 풍량은 팬 모터에 전압조정장치를 연

결하여 전압을 변화시켜 회전수 조절에 의해 풍량을 조절할 수 있도록 하였으며, 파워미터에 의해 공급 전력을 측정할 수 있도록 하였다.

냉각탑에 공급되는 냉각수의 유량은 체적식 유량계를 사용하여 측정하였으며, 냉각탑에 유입되는 냉각수의 온도를 일정하기 위해 항온조와 보조 보일러를 이용하였다. 물과 공기의 온도 측정에는 열전대를 사용하였고, 공기의 속도는 클라이모마스터를 사용하여 측정하였다. 그리고 공기의 습도는 빔 습도센서를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서 냉각탑의 냉각수는 입구온도 38℃, 출구온도 32℃, 유량을 25.5 l/min으로 어떠한 외부조건 변화에도 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 따라서 유입공기의 건구온도 및 상대습도의 변화에 따라 냉각수가 주어진 조건으로 일정하게 유지되도록 냉각탑 팬의 전압을 전압조정장치로 조정하여 조건변화에 따른 냉각탑의 열적성능을 파악하였다.

먼저 공기 조건 변화에 있어 상대습도는 50% 이상 유지하여 편차 5%를 두고 95%까지 측정하였으며, 건구온도는 32℃이하로 1℃ 편차를 두어 26℃까지 측정하였다.

냉각수의 순환은 순환펌프를 이용하여 냉각탑 하부수조의 물을 흡입하여 항온조로 보내고, 항온조에서 히터와 보조보일러를 통해 물은 일정 온도와 유량으로 유지되어 펌프에 의해 냉각탑 상부 분배기를 통해 충전제에 균일하게 물이 분사되도록 하였다. 충전제를 흘러내린 물은 냉각탑 하부의 수조에 다시 모여 펌프에 의해 항온조로 순환이 반복되도록 하였다. 그리고 정확한 풍량을 측정하기 위해 팬의 전압을 조정하여 모든 조건들이 정상상태가 되면 그때의 덕트 내부 풍속을 반복 측정하고 평균하여 풍량을 구하였다. 본 실험에서는 정상상태 운전을 15분간 유지하였으며, 다습한 실내 공기가 유입공기에 영향을 미치는 것을 최소화하기 위해 냉각탑의 배출공기는 외부로 배출하였다.

각 계측 장치들의 측정위치는 Fig. 1의 장치 개

락도에 나타내었으며, 센서들의 출력은 HR-2500E와 PC를 이용하여 계속 기록하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열적성능 이론 계산

냉각탑은 공기와 물인 두 유체가 직접 접촉에 의해 현열과 잠열을 동시에 교환하는 특별한 경우의 열교환기이다. 팬(fan)에 의해 유입된 저온저습한 공기가 노즐로부터 분무형태로 뿌려져 따뜻한 물과 접촉하면서 열교환이 이루어지는 데 냉각탑의 벽을 통해서 외부 공기와의 온도 차이에 의한 열손실을 무시하면, 공기가 얻는 열량은 에너지 평형에 의해 물이 잃는 열량과 같아야 한다. 따라서 공기가 물로부터 얻는 에너지량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{air} = G(h_2 - h_1) \tag{1}$$

여기서, G는 유입 공기량(kg/h),  $h_1$ ,  $h_2$ 는 유입 유출 공기의 엔탈피(kcal/kg)를 나타낸다. 또한, 물의 공기에 대한 열손실량은 다음과 같다.

$$Q_{water} = Lc_{pw}(t_1 - t_2) \tag{2}$$

여기서, L은 냉각수량(kg/s),  $c_{pw}$ 는 물의 비열(kJ/kg°C),  $t_1$ ,  $t_2$ 는 유입 유출 냉각수의 온도(°C)를 각각 나타낸다.

냉각탑 내에서는 증발이 일어나기 때문에 유출되는 물의 질량이 유입되는 물의 질량보다 적다. 이러한 증발로 인한 질량변화는 열평형에서 고려되어야 한다. 증발량은 공기의 절대습도 변화율과 같아야 하므로 습도의 차이로 표현된 열손실량은 다음과 같이 습도차로 표시할 수 있다.

$$Q_{evaporation} = G(x_2 - x_1)c_{pw}t_2 \tag{3}$$

여기서,  $x_1$ ,  $x_2$ 는 유입·유출되는 공기의 수증기와 공기의 습도비(kg/kg)를 나타내며,  $t_2$ 는 유출되는 물의 온도를 나타낸다. 따라서 증발을 통한 열손실을 감안하면 공기와 물 사이의 전체 열에너지 보존식은 다음과 같은 미분방정식으로 나타낼

수 있다.

$$G dh = Lc_{pw} dt + Gdx \tag{4}$$

#### 3.2 소요동력 변화

Fig. 4는 유입공기의 건구온도를 26°C에서 29°C까지 변화시키고, 상대습도를 70%에서 90%까지 변화한 경우 팬의 소요동력 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 이 경우 냉각수의 유량을 25.5 l/min, 유입·유출온도를 각각 38°C와 32°C로 일정하게 유지하기 위해서는 상대습도가 높을수록 건구온도가 높을수록 많은 동력이 소비되는 것으로 나타났으며, 상대습도의 영향이 건구온도의 영향보다 더 크게 나타났다. 이것은 일정한 냉각수 온도조건 하에서 건구온도와 상대습도가 높아질 경우, 냉각수와 공기와의 열교환량이 감소하고, 이로 인하여 동일한 열교환량을 얻기 위해서는 더 많은 공기풍량이 요구되고, 이에 따른 팬의 회전수 증가에 따라 소요동력이 증가하였다.

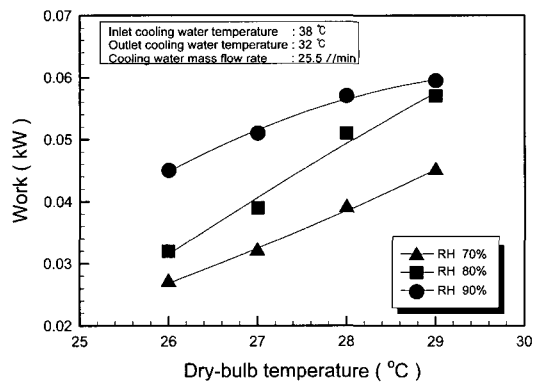


Fig. 4 Effect of dry-bulb temperature and relative humidity on work.

#### 3.3 풍량 변화

Fig. 5는 동일한 조건에서 유입공기의 건구온도 및 상대습도의 변화에 따른 팬의 풍량변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 냉동기에서 요구하는 일정 조건의 냉각수 조건을 얻기 위해서는 유입공기의 건구온도 및 상대습도가 증가할 경우 많은

풍량이 필요함을 알 수 있다. 이것은 공기의 상대 습도 및 건구온도가 증가함에 따라 공기가 수분을 함유할 수 있는 능력이 감소하고, 이로 인해 증발이 원활히 이루어지지 않아서 증발에 의한 냉각 성능이 줄어들기 때문이다. 따라서 유입공기의 속도를 증가시켜 대류열전달계수를 증가시켜 얻고자 하는 냉각수 조건을 얻어야 할 것으로 생각된다. 또한 동일 상대습도에서 건구온도에 따른 풍량 변화율은 평균 19.2%를 나타낸 반면, 동일 건구온도에서의 상대습도에 따른 풍량 변화율은 평균 24.1%를 나타냄으로서 건구온도에 비해 습구온도 즉 동일 건구온도에서 상대습도에 따라 냉각 성능이 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

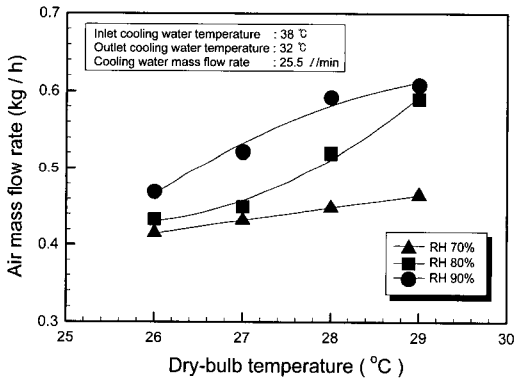


Fig. 5 Effect of dry-bulb temperature and relative humidity on mass flow rate.

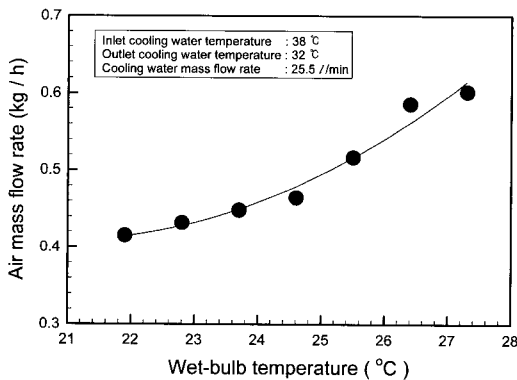


Fig. 6 Effect of wet-bulb temperature on air mass flow rate.

Fig. 6은 앞에서와 동일한 냉각수 조건을 얻기 위하여 습구온도 변화에 따른 팬의 풍량변화를 나타낸 것이다. 공기의 습구온도는 건구온도와 상대 습도에 관계함으로 그림에서와 같이 습구온도가 증가할수록 풍량은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 풍량의 증가는 냉각탑의 능력저하를 의미하므로 장마철에서 생길 수 있는 냉각탑의 문제점에 기인할 수 있다. 즉, 장마철의 경우 건구온도와 습도가 높아 습구온도가 높아져 제어가 어렵고 과부하의 요인으로 작용하여 냉각탑의 성능 저하를 가져올 수 있으므로 설계값 선정시 이를 고려해야 할 것으로 판단된다.

냉각탑에서 유입되는 공기의 습구온도와 배출되는 냉각수의 온도차를 어프로치(approach)라 하는데 냉각탑의 설계시에는 이 값을 일반적으로 5°C로 정도로 설계하고 있다. 본 연구에서는 습구온도가 27°C 이하에서 냉각수온도가 32°C로 유지될 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 실험결과 어프로치가 약 4°C 정도까지 냉각성능을 유지할 수 있었고 그 이하가 되면 풍량을 최대로 해도 요구하는 냉각수 조건을 얻을 수 없다는 것을 알 수 있었다.

### 3.4 압력손실 변화

Fig. 7은 풍속변화에 따라 냉각탑으로 유입되어 충전재를 거쳐 배출되는 공기의 압력강하 특성을 나타낸 것이다. 제안된 충전재의 경우, 소형 냉각탑용으로 고안되어 단위체적당 표면적은 기존 중대형 냉각탑용 충전재보다 약 2.8배 증가하였으나 피치와 충전재 사이간격이 좁아 압력강하가 크다고 하겠다. 그림에서 팬의 회전수 증가에 따라 풍속이 증가할수록 충전재 입출구의 압력손실은 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 충전재를 지나가는 공기가 속도가 증가함에 따라 흘러내리는 냉각수와 충전재와의 마찰손실에 의해 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 외부의 조건이 변화하고, 주어진 조건의 냉각수를 얻기 위해 풍량변화에 의한 냉각탑의 성능을 향상시키기 위해서는 압력손실에 대한 고려가 필요하다.

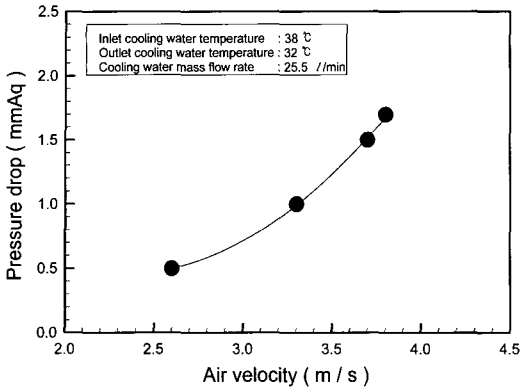


Fig. 7 Effect of ambient air velocity on pressure drop.

#### 4. 결 론

본 실험에서는 소형 가정용 흡수식 냉온수기에 사용될 소형 냉각탑을 대상으로 냉각수 유량과 레인지는 고정하고, 냉각성능 유지를 목적으로 다양한 공기조건에 따라 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유입되는 공기의 건구온도보다는 습구온도가 냉각성능에 더 큰 영향을 미쳤으며, 동일한 건구온도에서는 상대습도가 높을수록 더 큰 영향을 미쳤다.

(2) 동일한 건구온도에서 상대습도 90%와 70%를 비교해 볼 때 냉각성능을 유지시키기 위해서는 유입하는 공기의 풍량을 최대 1.3배정도로 증가시켜야 하므로 유입되는 공기의 속도가 증가할수록 냉각성능은 증가한다는 것을 알 수 있었다. 그러나 풍속 증가에 따른 압력손실의 영향도 설계시 고려해야함을 알 수 있었다.

(3) 냉각탑은 유입되는 공기의 습구온도가 에프 로치의 기준에서 그 이상이 되면 냉각탑은 냉각성능을 유지하기 어렵다. 따라서 장마철과 같이 외기의 상대습도와 건구온도가 높은 경우에는 제어가 어렵고 과부하를 일으킬 수가 있어 시스템의 성능에 저하를 가져올 수가 있으므로 설계값 선정시 주의해야 함을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 부경대학교 기성회 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] 井上宇市, 1995, "空氣調和", 東明社, pp. 337-345.
- [2] 박승덕 외 4인, 1980, "냉각탑 설계 및 시험 기술기준", 공업진흥청, KSCP-B-1027.
- [3] Walker, W.H., Lewis, W.K., and McAdams, W.H., "Principles of Chemical Engineering", McGraw-Hill, New York, 1923.
- [4] Merker, F., "Evaporative Cooling", Zeits. Verein deutscher Ingenieure, Vol.70, pp13-128, 1926.
- [5] Lichtenstein, T., "Performance & Selection of Mechanical-Draft Cooling Tower", ASME Transactions, Vol.65, No7, pp.779-789, 1943.
- [6] Baker, D.R., and Shryock, H.A., "A Comprehensive Approach to the Analysis of Cooling Tower Performance", ASME J. Heat Transfer, Vol.83, pp.339-349, 1961.
- [7] 김무환 외 2인, 1998, "냉각탑 열성능 특성의 실험적 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제 10권 제 1 호, pp. 88-94.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1996, HVAC System and Equipment Handbook, Atlanta, GA.
- [9] Baker, D. R. and Shryock, H. A., 1961, "A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance", J. of Heat Transfer, pp. 339-350.

## 저 자 소 개



### M. M. A. Sarker

1967년생, 1994년 University of Dhaka, Bangladesh 졸업, 1998년 Katholieke Universiteit Leuven, Belgium 졸업(공학석사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 박사과정



### 윤정인 (尹政仁)

1962년생, 1988년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1990년 부산수산대학교 대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 1995년 동경농공대 대학원 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부 냉동공조에너지전공 부교수.



### 김은필 (金恩弼)

1962년생, 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1991년 피츠버그대학 기계공학과 졸업(공학석사), 1995년 피츠버그대학 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학과 조교수



### 정석권 (鄭碩權)

1961년생, 1983년 부산수산대학 기관학과 졸업, 1995년 일본 요코하마국립대학 대학원 전자정보공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 기계공학부(냉동공조에너지시스템전공) 부교수.



### 민경현 (閔慶顯)

1978년생, 2003년도 부경대학교 냉동공조공학과 졸업, 현 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 석사과정.



### 김재돌 (金在堃)

1967년생, 1991년 부산수산대학교 냉동공학과 졸업, 1993년 부산수산대학교 대학원 냉동공조학과 졸업(공학석사), 1996년 동대학원 졸업(공학박사), 현재 동명대학건축기계설비시스템과 조교수.