

소형 직교류형 냉각탑의 성능 특성에 관한 연구 Performance Characteristics of Small Sized Cross-flow Cooling Tower

M. M. A. Sarker · 김은필 · 김재돌 · 전철호 · 문춘근 · 윤정인
M. M. A. Sarker, E. P. Kim, J. D. Kim, C. H. Jun, C. G. Moon, J. I. Yoon

Key Words : Cooling tower(냉각탑), Fill packing(충진재), Packing characteristic(충진재특성), Pressure drop(압력강하)

Abstract : The performance of cooling tower is dependent on the thermal performance of the packings. It's assessed by heat transfer rate and fan power. In this study, new packing was developed for application in compact type cross-flow cooling tower. The packing characteristic curve and the pressure drop curve were obtained by measuring packing characteristic values and pressure drops of small sized filler in comparison to existing mid-large sized filler. The heat transfer characteristics on small sized filler are about 66% higher than existing mid-large sized filler. The pressure drop characteristics on small sized filler are about two times of the pressure drop characteristics on existing mid-large sized filler.

1. 서 론

냉각탑은 냉동공조기기 및 많은 산업공정에서 생성되는 폐열을 가장 경제적인 방법으로 제거하는 수단으로 사용되고 있다. 미국 냉동공조학회(ASHRAE)에서는 냉각탑 분과를 두어 기술 개발에 대한 정보를 정리, 교환하고 있으나^{1,2)} 국내에서는 이에 대한 설계 기술 및 자료는 매우 미약하여, 주로 선진외국의 기술지원 또는 설비를 모방 제작하는 수준에 있다. 또한 냉각탑이 전체 공조 시스템에서 차지하는 전력 소비량이 2%에 불과하여 그 중요성에 대한 인지가 낮은 실정이다.³⁾ 따라서 수요별 특성에 따른 냉각탑의 설계가 불충분하고, 가동 중인 냉각탑의 성능평가 및 적정 운전기법의 도입에 따른 효과를 기대하기 어려운 것이 현재의 실정이다.

냉각탑은 물과 공기의 현열교환과 물 자신의 증발잠열에 따른 물질전달의 두 가지 방법으로 냉각이 이루어지는데 주로 증발에 의한 방법이다. 물과 공기를 수직으로 교차시키는 직교류형(cross flow type)에 비해 물과 공기를 반대방향으로 교차시키는 대향류형(counter flow type)이 우수한 열효율로 인해 많이 사용되고 있으나⁴⁾ 직교류형은 유지보수가 용이한 장점을 가지고 있어 사용용도 및 운전조건

에 따라 그 선정이 이루어져야 한다.

냉각탑의 효율을 높이기 위해서는 물과 공기의 접촉면적 및 접촉시간의 최대화와 팬 동력의 최소화를 동시에 만족시켜야 하며 이는 충진재(fill packing)의 성능에 의존한다. 충진재의 성능은 물과 공기의 상대속도, 흐름방향(대향류, 병류, 직교류), 접촉시간, 접촉면적, 열 및 물질전달계수, 압력분포 등의 주요 파라미터⁵⁾를 통하여 구할 수 있으나 이들을 알아내는 것이 어려우므로 대부분 실험적인 방법으로 충진재의 성능을 구하고 있다.

냉각탑 작동에 관한 이론은 Walker 등⁶⁾에 의해 최초로 제안되었으나, 실질적 미분방정식을 이용한 해석은 Merkel⁷⁾에 의해 처음 시도되었다. Merkel은 공기·수증기 시스템에 대한 Lewis수를 1로 가정하여 냉각탑 내의 열전달율을 포화 상태 공기의 엔탈피와 국부 공기의 평균 엔탈피 차이에 비례하는 방정식으로 나타내었고 이는 냉각탑의 성능계산에 있어서 최근까지 보편적으로 사용되고 있다.

Lichtenstein⁸⁾은 Merkel의 방정식을 사용하여 도식적인 방법으로 해를 구하였다. 또한 Baker와 Shryrock⁹⁾은 Merkel의 연구를 재검증하여 Merkel이 사용한 가정으로부터 발생하는 오차를 최소한으로 줄이고자 하였다. 냉각탑의 열성능 특성을 파악하기 위해 기존의 실험들은 냉각수 유량과 공기의 속도 즉 풍량을 변화시키거나 레인지를 변수로 두어 김¹⁰⁾ 등은 냉각성능을 비교 검토하였다. 본 연구

접수일 : 2005년 2월 19일
윤정인(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : yoonji@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1506

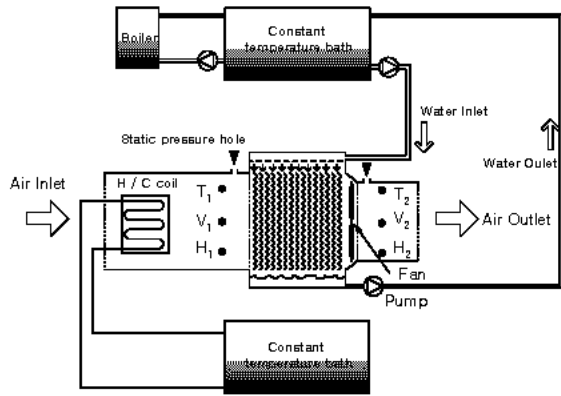


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

에서는 냉각탑의 소형화 및 고효율화를 위하여 새로운 충전재를 제안하여 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재를 채용한 직교류형 냉각탑을 대상으로 기존의 중대형 냉각탑용 충전재와 그 특성값과 압력강하량을 비교하여 제안된 충전재의 형상 특성을 알아내고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 직교류형 냉각탑 실험장치의 개략도를 나타낸다. 장치 주요 구성부로는 직교류형 소형 냉각탑, 냉각 및 가열코일과 기습장치가 내장된 공기조화기, 항온조, 전압조정장치 (voltage transformer), 온수보일러 및 측정장치로 구성되어 있다. 냉각탑은 1.5 RT급을 사용하였고, 냉각수는 냉각탑 상단의 다공판으로 이루어진 분배기를 통해 균일하게 충전재로 공급되며, 덕트를 통해 수직으로 유입되는 공기와 열교환을 하도록 되어 있다.

Fig. 2는 실험장치의 실제 사진을 나타내며, Fig. 3은 냉각탑 내에 내장된 기존 중대형 냉각탑용 충전재와 소형 콤팩트 냉각탑에 적용하기 위하여 고안된 충전재의 모습을 각각 나타낸다.



Fig. 2 Photo of experimental apparatus



(a) Existing mid-large sized filler (I Type)



(b) small sized filler (II Type)

Fig. 3 Photo of fill packings

Table 1 Specification of filler

Filler	Plate vs surface area increasing rate [%]	Pitch [mm]	Unit volume rate surface area [m ² /m ³]
I	40	30	93
II	43	8.8	325

충전재는 가정용 흡수식 냉온수기에 사용되는 소형 냉각탑용으로 고안되었고 주요 사양 및 규격을 Table 1에 나타내었다. 충전재의 단면은 563mm×600mm며 높이는 260mm로 가정용 흡수식 냉온수기의 크기에 맞도록 제작하였다. 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 충전재로 유입되는데 공기의 상태에 따라 유입되는 풍량은 팬 모터에 전압조정장치를 연결하여 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 일정하게 하기 위해 항온조와 보조보일러를 이용하였다. 물과 공기의 온도 측정에는 열전대를 사용하였고, 공기의 속도는 클라이모스터를 사용하여 측정하였다. 그리고 공기의 습도는 범 습도센서를 사용하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서 냉각탑 내 냉각수의 입구온도는 38℃, 유량은 32.5~46 l/min의 범위 내에서 각각의 수공기비에서의 외기 상대습도 및 건구온도와 물의 온도를 측정하고 아울러 충전재 전후의 압력강하량을 측정하였다. 냉각탑 팬에 공급되는 전압을 전압조정장치로 조정하여 팬의 회전속도에 의해 공기속도를

0.6~1.0 m/s로 변경하여 각각의 냉각수 유량에 대하여 실험하였다. 냉각수의 순환은 순환펌프를 이용하여 냉각탑의 하부수조의 물을 흡입하여 항온조로 보내고, 항온조(3HP)에서 히터(3kW)와 보조보일러(12,000kcal/h)를 통해 물은 일정 온도와 유량으로 유지되어 펌프에 의해 냉각탑 상부 분배기를 통해 충전재에 균일하게 물이 분사되도록 하였다. 충전재를 흘러내린 물은 냉각탑 하부의 수조에 다시 모여 펌프에 의해 항온조로 순환이 반복되도록 하였다. 그리고 정확한 풍량을 측정하기 위해 최대 풍량 10m³/min인 시로코팬의 전압을 슬라이더스(3kW)로 조정하여 컴퓨터로 읽어 들인 데이터들이 정상상태가 되었을 때 덕트 내부 풍속을 반복 측정하고 평균하여 풍량을 구하였다. 본 실험에서는 정상상태 운전을 15분간 유지하였으며 다습한 실내 공기가 유입 공기에 영향을 미치는 것을 최소화하기 위해 냉각탑의 배출공기는 외부로 배출하였고 냉각탑 입구 공기는 입구 덕트에 설치되어 있는 가습기와 가열, 냉각 코일로 온·습도를 조정하여 일정하게 유지하였다. 이때 공기의 온도는 0.3mm의 T type 열전대를 이용하였으며, 냉각수의 온도는 1.6mm의 K type 열전대를 이용하여 데이터로그(Yokogawa DR 230)로 2초에 1번씩 읽은 후 컴퓨터로 저장하였다. 각 측정장치들의 측정위치는 Fig. 1의 장치개략도에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충전재 특성 이론

가. 열평형식

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 공기와 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.

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

여기서, G는 유입 공기량(kg/h), h₁, h₂는 유입유출 공기의 엔탈피(kJ/kg)를 나타낸다. 또한, 물의 공기에 대한 열손실량은 다음과 같다.

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

여기서, L은 냉각수량(kg/s), c_{pw}는 물의 비열(kJ/kg°C), t₁, t₂는 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.

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

여기서, x₁, x₂는 유입 유출되는 공기의 수증기와 공기의 습도비(kg/kg)를 나타내며, t₂는 유출되는 물의 온도를 나타낸다. 따라서 증발을 통한 열손실을 감안하면 공기와 물 사이의 전체 열에너지 보존식은 다음과 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$Gdh = Lc_{pw}dt + Gdx c_{pw}t_2 \quad (4)$$

나. 충전재 열전달 특성

물과 공기의 직접접촉에 의한 총열전달율(Q, kJ/h)은 물의 온도에서의 포화공기엔탈피와 접촉공기의 엔탈피 차이에 비례한다.

$$Q = KS(h_w - h_a) \quad (5)$$

K는 물질전달계수(kg/m²h)를 나타내며, h_w와 h_a는 냉각수 온도 및 습구온도에서의 포화공기 엔탈피(kJ/kg)를 각각 나타낸다. S는 열전달면적(m²)으로 대부분의 충전재는 열전달 면적의 측정이 어려워 S 대신 aV를 사용한다. 여기서, a는 충전재의 단위체적당 열전달면적(m²/m³)이며 V는 충전재의 체적(m³)이다.

물과 공기 접촉면에서 열확산계수와 물질확산계수가 동일하다는 가정으로부터 에너지 평형은 다음과 같이 나타내어진다.

$$dq = K(h_w - h_a)dS = Gdh_a = Lc_{pw}dT_w \quad (6)$$

여기서, 증발에 의한 영향을 무시하면 L과 G가 상수이므로 다음과 같은 충전재 특성방정식이 유도된다.

$$\frac{KaV}{L} = \frac{G}{L} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh_a}{h_w - h_a} = c_{pw} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dT_w}{h_w - h_a} \quad (7)$$

식 (7)의 좌변은 충전재 특성값으로 충전재의 열 전달 특성을 나타내는 무차원수이다.

냉각탑의 열전달 특성은 수공기비(L/G)의 변화에 따른 충전재 특성값을 나타내어지는 냉각탑 특성곡선으로 표현된다. 이는 냉각탑의 수공기비를 변화시키면서 수막공기 입출구 엔탈피와 외부공기 입출구 엔탈피를 측정함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G} \right)^{-m} \quad (8)$$

여기서, c, m은 상수이다.

3.2 실험장치 신뢰성 검증

열전달 특성 실험의 신뢰성을 검증하기 위하여 에너지 균형 오차 ϵ 을 아래 식과 같이 정의한다.

$$\epsilon = \left| \frac{\Delta q_w - \Delta q_a}{\Delta q_w} \right| \quad (9)$$

여기서 Δq_w 는 물이 잃은 열량이고 Δq_a 는 공기가 얻은 열량이다. 실험 제작한 충전재에 대해 각각 15개의 수공기비에서 평균 에너지 균형오차 ϵ 를 계산한 결과는 12.8%이었다. 따라서 이 실험은 13%의 오차범위에서 실험의 타당성이 검증되었다.

3.3 충전재 특성곡선

본 연구에서는 소형 콤팩트 냉각탑에 적용하기 위해 새로운 충전재를 고안하여 기존 중대형 냉각탑용 충전재와 그 성능을 비교하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 기존 충전재와 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재에 대한 실험결과로부터 얻어진 충전재 특성곡선을 각각 나타내고 있다. 평균공기속도 u 의 변화가 특성곡선에 미치는 영향을 알아보기 위해 0.6 m/s, 0.8 m/s, 1.0 m/s인 3가지 평균공기속도에 대하여 충전재 특성곡선을 작성하였다. 그림에서 알 수 있듯이 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재의 특성값이 기존에 사용되고 있는 충전재에 비해 약 66%정도 높은 값을 보이고 있다. 이는 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재의 표면 구조가 기존 충전재와 비슷하나 피치간격이 좁고 단위 체적 당 표면적이 크기 때문이라고 생각된다. 또한 제안된 충전재의 경우, 기존 충전재에 비해 수공기비 증가에 따른 열성능 특성값 감소율이 큰 결과를 보이고 있는데 이는 좁은 피치 간격으로 인해 냉각수 유량이 많아질수록 공기 유로가 적어져 열교환 면적이 줄어들기 때문이라 사료된다.

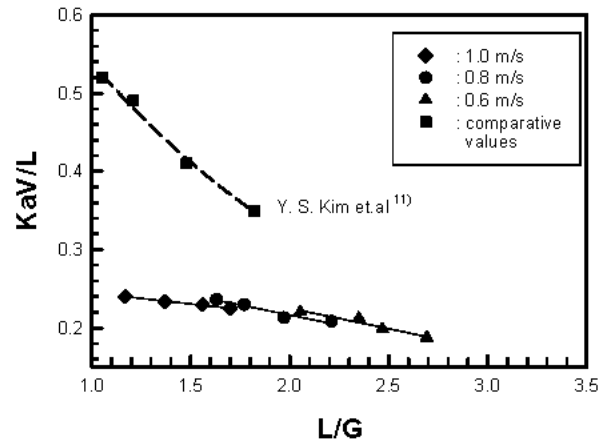


Fig. 4 Effect of heat transfer characteristics on existing filler

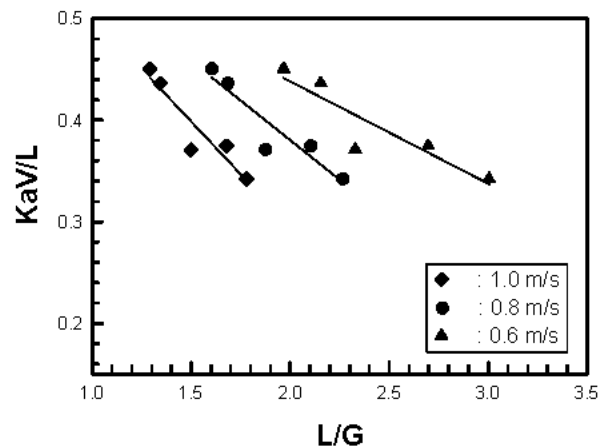


Fig. 5 Effect of heat transfer characteristics on small sized filler

Fig. 4는 기존의 필러를 이용한 열 성능을 나타낸 것으로 Y. S. Kim 등의 실험결과치¹¹⁾와 비교하였을 때 큰 차이를 보이고 있으나, Y. S. Kim 등의 실험에서는 기존 상용 냉각탑의 설계 조건인 공기의 풍속을 약 2.5m/s로 실험을 하였으나, 본 논문에서는 가정용 소형 냉동기를 위한 냉각탑의 열 성능 실험에 따라서 풍속을 0.8~1.0m/s로 설정하였기 때문이라 생각된다.

3.4 충전재 압력강하 특성

실험 대상 충전재에 대한 압력강하 특성을 공기 풍속 0.6 ~ 1.0 m/s에 대하여 냉각수 유량 32.5, 37, 46 l/min으로 변경하면서 냉각수 부하가 압력손실에 미치는 영향을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 냉각수량을 증가시킬수록 공기 속도에 따른 압력강하량의 증가율이 더 높게 나타났다.

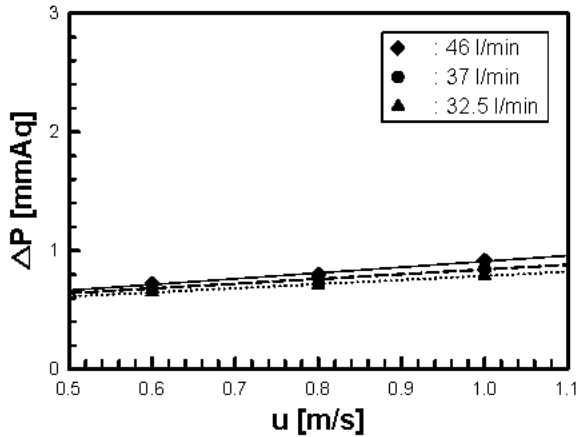


Fig. 6 Effect of pressure drop characteristics on existing filler

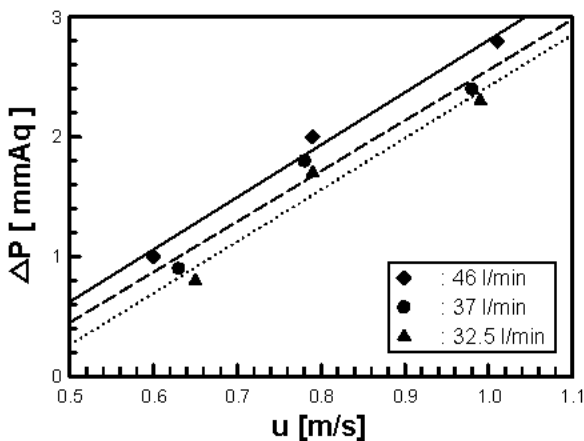


Fig. 7 Effect of pressure drop characteristics on small sized filler

기존 중대형 냉각탑용 충전재와 비해 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재의 압력강하는 약 200%정도 높은 경향을 나타내고 있다. 소형 충전재의 경우, 냉각수량의 증가와 공기 유속의 증가에 따라서 충전재 사이에서의 공기 유로 확보가 어려워 압력강하가 높은 결과를 보인 것으로 생각된다. 그러나 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재는 충전재 자체에 엘리미네이터가 장착되어 있어 이것이 압력강하 요인으로 작용하였고 열성능 향상을 위해 피치를 줄인 것도 요인이라 생각되며 기존 충전재 실험의 경우 엘리미네이터를 설치하지 않았고 충전재 자체에도 엘리미네이터가 부착되어 있지 않았으므로 엘리미네이터의 유무에 의한 압력강하의 요인을 제거한다면 압력강하비는 감소하리라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 열성능 향상 및 제품의 소형화를 통하여 설치공간의 축소 및 원가 절감을 꾀할 수 있는 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재의 특성 평가를 수행하였다. 소형 냉각탑용 충전재를 채용한 직교류형 냉각탑을 대상으로 외부조건변화에 따른 충전재 특성값 및 압력강하량을 기존 중대형 냉각탑용 충전재와 비교한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재의 특성값이 기존의 충전재와 비교하여 약 66%정도 높은 경향을 보였고 수공기비 증가에 따른 열성능 특성값 감소율이 큰 경향을 보였다.
- 2) 소형 콤팩트 냉각탑용 충전재의 평균압력강하는 기존 중대형 냉각탑용 충전재 평균압력강하의 약 200%를 나타내었다.
- 3) 설계시 소형 냉각탑용 충전재의 경우, 기존 충전재보다 높은 특성값을 통해 콤팩트화가 가능하다고 하겠으나 압력손실에 대한 사항을 고려하여 설계하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2003년 지역산업진흥사업의 지원을 받아서 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1996, HVAC System and Equipment Handbook, Atlanta, GA.
2. 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.
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1996, "Cooling Tower System and Equipment Handbook", Chapter 36.
4. 井上宇市, 1995, "空氣調和", 東明社, pp. 337-345.

5. 박승덕 외 4인, 1980, "냉각탑 설계 및 시험 기술기준", 공업진흥청, KSCP-B-1027.
6. Walker,W.H, Lewis,W.K, and McAdams,W.H., 1923, "Principles of Chemical Engineering", McGraw-Hill, New York.
7. Merker,F., 1926 "Evaporative Cooling", Zeits. Verein deutscher Ingenieure, Vol.70, pp. 13-128.
8. Lichtenstein,T, 1943, "Performance & Selection of Mechanical-Draft Cooling Tower", ASME Transactions, Vol.65, No7, pp.779-789.
9. Baker, D, R, and Shryock,H.A., 1961, "A Comprehensive Approach to the Analysis of Cooling Towe Performance", ASME J. Heat Transfer, Vol83, pp.339-349.
10. 김무환 외 2인, 1998, "냉각탑 열성능 특성의 실험적 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제 10권 제 1 호, pp. 88-94.
11. 김영수 외 2인, 1999, "NTU법을 이용한 대향류형 냉각탑의 성능해석에 관한 연구", 공기조화 냉동공학 논문집 제 11권 제5호, pp. 598-604.