

냉각탑 열성능 특성의 실험적 연구

Experimental study on the thermal performance of a cooling tower

이 한 촌*, 방 광 현**, 김 무 환***
H. C. Lee, K. H. Bang, M. H. Kim

Key words : Cooling tower(냉각탑), Thermal performance(열성능), Wet-bulb temperature(습구온도), Relative humidity(상대습도)

Abstract

The thermal performance of cooling towers is affected mainly by the velocity, temperature and humidity of the entering air. In this paper, the effects of these variables are experimentally investigated for both counter-flow and cross-flow cooling towers. The cooling performance is reduced by up to 50% as the relative humidity of the entering air is increased from 40% to 80%. The higher air velocity and lower coolant flow show better cooling performance. The coolant loss rates in the present experimental conditions are in the range of 0.4 to 1.7%

기 호 설 명

a_m : 단위체적당 물질전달면적, m^2/m^3
 C_p : 비열, J/kgK
DT : 물의 입구온도와 출구온도와의 차이(range), $^{\circ}C$
G : 공기의 질량유량, kg/s
h : 엔탈피, J/kg
L : 물의 질량유량, kg/s
RH : 흡입되는 공기의 상대습도, %
T : 온도, K 또는 $^{\circ}C$
U : 총합물질전달계수(overall mass transfer coefficient), kg/sm^2
V : 냉각탑 체적, m^3

V_{air} : 흡입되는 공기의 평균속도, m/s

하첨자

a : 공기
bw, w : 물(bulk water)
in : 입구(inlet)
out : 출구(outlet)

1. 서 론

냉각탑이란 물의 증발열을 이용하여 냉각수를 냉각, 공급하는 장치로서, 냉동·공조기기 및 많은 산업공정에서 생성되는 열을 제거하는 데 긴요하게 사용되고 있다. 이러한 냉각탑은 지난 50여년 동안 꾸준히 발전돼 오면서 Wet/Dry형 등의 개량형

* 포항공과대학원

** 한국해양대학교

*** 포항공과대학교

이 개발되었다.^(1~3) 미국의 냉동공조학회(ASHRAE)에서는 냉각탑에 대한 분과(Section 8.6)를⁽⁴⁾ 두고 지속적인 기술개발에 대한 정보를 정리 교환하고 있다.

그러나, 국내에서는 최근 산업공조 등에서 냉각탑의 수요가 급증하고 있음에도 불구하고 이에 대한 설계 기술의 자립은 매우 미약하며, 주로 선진 외국의 기술 지원 또는 외국의 설계를 도입하는 수준에 있다고 볼 수 있다. 따라서, 각 수요별 특성에 따른 냉각탑의 설계 능력이 불충분하고, 또한 가동중인 냉각탑의 성능 평가 및 적정 운전 기법의 도입에 따른 효과를 기대하기 어려운 실정이다.

최근 환경 및 에너지 보존에 따른 국제동향에 미루어 에너지 설비의 효율 향상 및 이를 위한 기술 개발은 매우 중요하다. 제철소와 같은 고온의 생산 공정에서 필요한 다량의 냉각수를 공급하는 냉각탑의 최적 설계 및 운전기술 확립은 매우 필요하고 시급하다고 볼 수 있다. 또한 냉각탑의 단위부피당 냉각능력의 향상 및 냉각수 온도 제어 기술은 최근 흡수식 열펌프의 소형화에 있어서 매우 필요한 기술 중의 하나이다.

냉각탑 설계 및 운전상의 일반적인 문제점으로 냉각수의 과냉각 또는 과부하를 들 수 있는데, 이는 최근 추진하고 있는 정밀 생산 공정에 의한 품질향상 측면에서 냉각수 온도를 정밀 제어할 수 있도록 반드시 개선되어야 할 점이며, 또한 과도한 수직 발생 등 환경 장애 요인도 최적 운전 또는 설비 개선으로 해결되어야 할 것이다.

냉각탑에서 유입되는 고온의 물이 흡입된 공기와 열을 교환하는 원리는 크게 두가지로 분류된다. 첫 번째는 공기와 물의 온도차이에 의한 물의 냉각(sensible cooling)이고, 두 번째는 물의 증발시의 증발잠열에 의한 냉각(latent cooling)이다. 따라서 흡입되는 공기와 유입되는 물의 상태에 따라 냉각정도, 즉 레인지(range)가 크게 좌우된다. 냉각탑의 성능을 나타내는 인자로서, 냉각수의 냉각정도, 냉각수 출구온도의 공기 습구온도에의 접근도(approach) 및 냉각수의 손실을 등을 들 수 있다.⁽³⁾ 이러한 냉각탑의 열적 성능에 중요한 변수로는 흡입되는 공기의 온도, 습도 및 속도와 물의 유량 등이다.

냉각탑은 물과 공기가 직접 접촉하여 열을 교환하는 직접 접촉식 열교환기(direct heat exchanger)의 일종이다. 직접 접촉 열교환시에 중요한 열교환 기구로는 온도차에 의한 열교환과 잠열에 의한 열교환이 있다. Fig.1은 물과 공기의 계면에서 열전달현상을 개념적으로 보여주고 있다. 물에서 공기로의 열전달을 물질전달계수와 열전달계수의 상사(analogy)를 이용하여 식을 세우면 열전달을 일으키는 구동력(driving force)을 물과 공기의 엔탈피차이로 하는 식이 다음의 식(1)과 같이 나오게 된다.⁽¹⁾

$$Ua_m dV(h_{bw} - h_a) = LC_m dT_w = Gdh_a \tag{1}$$

식(1)은 물과 공기의 엔탈피 차이에 의한 구동력에 의해서 전달된 열량이 공기가 얻은 열량과 같고 또 물이 잃은 열량과 같음을 나타내는 식이다. 식(1)의 해를 구하는데는 일반적으로 다음과 같은 가정을 기초로 한다.

- i) 물에서 공기로의 물질전달에 대한 저항을 무시한다.

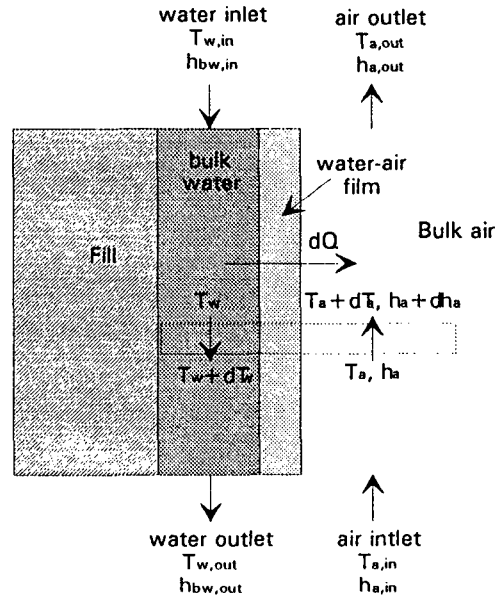


Fig.1 Heat and mass transfer relationships between water, interfacial film, and air

ii) 물과 물-공기계면사이에 온도차이를 무시한다.

iii) 냉각수의 질량유량과 공기의 질량유량에 미치는 물의 증발은 무시할 수 있다.

증발에 의한 영향을 무시하면 L과 G가 상수이므로 식(1)을 적분을 하면 식(2)와 (3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{Ua_m V}{L} = \int \frac{C_{pw}}{h_{bw} - h_a} dT_w \quad (2)$$

$$\frac{Ua_m V}{G} = \int \frac{1}{h_{bw} - h_a} dh_a \quad (3)$$

여기서 식(2)는 공기의 유동방향을 따라 가면서 물의 온도변화에 따라 물의 엔탈피값과 공기온도 변화에 따라 공기의 엔탈피값이 변하기 때문에 직접 적분을 할 수가 없다. 이는 단계적으로 수치적분을 수행함으로써 가능하다.^(1,2)

본 연구에서는 냉각탑의 운전조건에 따른 열적성능의 특성을 분석하기 위하여 냉각탑 성능실험을 수행하였다. 부피 12리터의 모의 냉각탑을 사용하여 대향류 및 직교류에 대해 냉각탑의 주요 운전 변수에 따른 냉각능력 및 냉각수의 손실 정도를 측정하여 비교, 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

냉각탑 열성능에 대한 주요 변수에 따른 레인지의 변화를 분석할 수 있는 실험장치를 설계 제작하

였다. 본 실험장치의 개략도는 Fig.2에 나타난 바와 같다. 실험장치의 주요 구성부로는 모의냉각탑, 부하용 온수보일러, 흡입공기 온·습도 조절을 위한 증기발생기, 열교환기 및 항온조 등이다.

모의냉각탑은 아크릴을 가공하여 제작하였으며, W150×D200×H400mm 크기의 사각 채널로, 내부에는 Fig.3와 같은 충전재(fill)가 삽입되어 있다. 사용된 충전재는 현재 상용 냉각탑에 주로 사용되는 플라스틱 재질의 충전재를 사용하였으며, Fig.3에서 보듯이 빗살무늬의 작은 요철과 원통형의 큰 요철을 가지고 있는 충전재이다. 모의냉각탑의 실험부에 크기가 W150×H400mm인 충전재에 원통형 요철의 높이가 20mm인 충전재를 10개를 채워넣었다. 또한 직교류형(cross flow)과 대향류형(counter flow)을 모두 모사하기 위하여 실험부 앞뒤에 슬롯(slot)을 만들어서 아크릴판을 착탈 가능하도록 설계하여 공기유동의 방향을 변경할 수 있도록 하였다. 실험부에 물을 공급하는 기구는 양 끝단이 막힌 2개의 원통형파이프에 일정 간격의 4mm 크기 드릴링을 하여 사용하였다.

냉각탑으로 유입되는 공기는 흡입식 냉각탑(induced draft cooling tower)을 모사하기 위해서 고압송풍기를 공기의 출구에 설치하였으며, 인버터를 이용하여 유입공기의 유량을 조절하였다. 유입공기의 온도 조절을 위해 5단으로 된 핀-튜브형 열교환기를 공기 흡입구에 설치하고 이 열교환기에 일정 온도의 물을 항온조를 사용하여 순환시켰다. 이렇게 온도가 조절된 공기의 습도를 높일 경우 증기

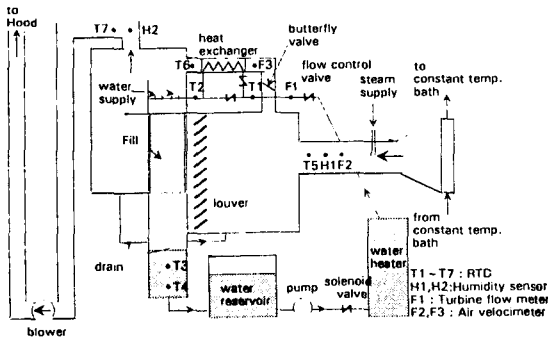


Fig.2 Schematic of experimental apparatus

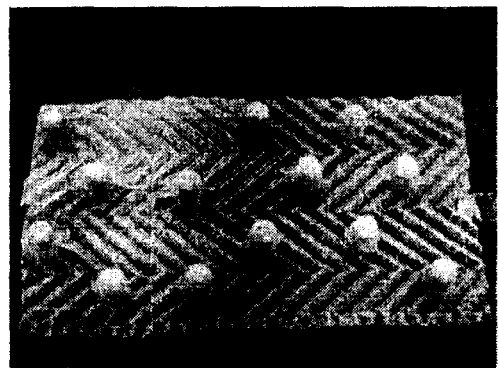


Fig.3 Photographic view of fill

발생기에서 공급하는 수증기를 혼합시켰으며, 후단에 설치된 습도계의 수치에 따라 수동밸브의 작동으로 증기 공급량을 조절하였다.

실험부로 유입되는 물의 온도를 일정하게 유지시켜 주기 위하여 온도 조절이 가능한 9.4kW 용량의 전기온수기를 설치하였다. 물의 유량 조절을 위하여 온수기와 실험부 사이에 수동밸브를 설치하였다. 그리고 일정 시간 동안 운전했을 때 실험부에서 증발과 액적이탈(entrainment)로 인한 물의 손실량을 측정하기 위하여 눈금이 그려진 저수조를 실험부와 온수기 사이에 설치하였다.

Wet-Dry형의 냉각탑을 모사하기 위하여 유입되는 공기의 일부를 출구로 우회시키는 유로가 설치되었으며, 우회 공기와 실험부로 공급되는 고온의 물과 1차적으로 열교환을 시키기 위하여 동관으로 된 코일형 열교환기를 설치하였다. 여기서 승온된 일부의 공기는 냉각탑을 통과한 다습한 공기와 냉각탑 출구 부분에서 혼합되어 방출되는 공기의 상대습도를 감소시켜 주는 역할을 한다.

물의 유량은 로터미터를 이용하여 측정하였고, 물의 온도와 공기의 온도 측정에는 백금측온저항체(RTD)를 사용하였다. 백금측온저항체의 정확도는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이다. 그리고 공기의 속도를 측정하기 위하여 정확도가 $\pm 1.5\%$ 인 열선유속계를 사용하였다. 공기의 습도는 습도측정센서(humidity sensor)를 사용하여 $\pm 2\%$ 의 정확도로 측정하였다. Fig.2의 실험장치 개략도에 각 측정장치들의 위치가 나타나 있다. 각 센서들의 측정값은 데이터입출력장치(data acquisition system)인 Keithley 500A와 데이터처리 프로그램인 VIEWDAC을 이용하여 PC에서 표시 및 저장하였다.

2.2 실험방법

본 실험의 주요 순서로는 흡입공기의 유량, 온도 및 습도 조절과 공급 냉각수의 유량 및 온도 조절로 정상상태를 달성하고 일정 시간 운전후 냉각수 손실량을 측정하는 것이다.

우선 최대풍량 $10.8\text{m}^3/\text{min}$ 의 송풍기와 인버터를 사용하여 공기의 설정 유량을 유지하였으며, 다습한 배출 공기는 후드를 통해서 밖으로 배출하여 실내 환경의 변화를 최소화하였다. 공기 흡입구에

서 온도 및 습도를 측정하고 조절함으로써 실험조건에 부합하는 공기의 열역학적 상태를 만들어 주었다.

물의 순환은 순환펌프를 이용하여 저수조의 물을 흡입하여 온수기로 보내고, 온수기에서 물은 일정 온도로 유지되면서 펌프의 압력에 의하여 실험부로 밀려 올라가서 물 공급 파이프를 통하여 충전재 위로 공급된다. 충전재를 지난 물은 다시 슬레노이드 밸브를 지나 다시 저수조로 되돌아온다.

물의 손실량을 측정하기 위하여 모든 조건들이 정상 상태에 도달하였을때 냉각수 순환펌프의 작동을 일시 멈추고 이때 저수조에 부착되어 있는 눈금을 기록하여 실험전의 수위와 실험후의 수위를 비교하여 물의 손실량을 측정하였다. 본 실험에서는 물의 손실량 측정을 위해 각 설정 조건에서의 정상 상태 운전을 30분간 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

대향류형과 직교류형 각각에 대해서 각 실험변수들을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 물의 공급온도를 37°C 로 고정하고 공기의 유량, 온도 및 습도의 변화에 따른 냉각수의 냉각정도 및 냉각수의 손실률을 주로 측정, 비교하였다. 냉각탑에서 냉각수의 냉각정도는 레인지로 표시되는데 그래프에서 y축의 DT가 레인지를 의미한다.

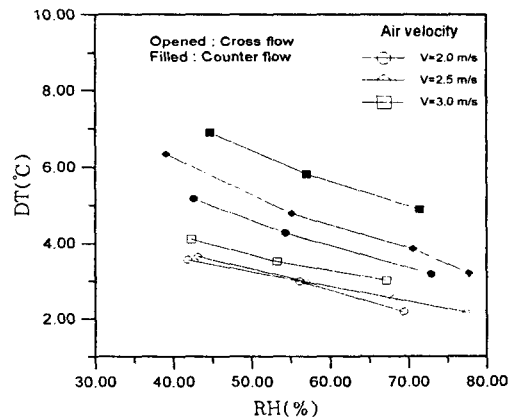


Fig.4 Effect of air velocity and relative humidity on range ($T_{\text{air, in}} = 35^{\circ}\text{C}$, $m_w = 6\text{lpm}$)

흡입공기의 온도가 35°C이고, 물유량이 6lpm로 일정한 경우에 흡입공기의 속도 및 습도에 따른 레인지의 변화를 Fig.4에 보여주고 있다. 여기서 공기 속도 측정부의 단면적이 0.03m²이므로 공기의 체적유량은 속도에 이 면적을 곱하면 된다. 그림에서 보듯이 상대습도가 증가하면 레인지가 감소하는데 이는 다습한 공기일수록 수분을 함유할 수 있는 능력이 감소하므로 물의 증발량이 감소하게 된다. 또한 공기의 속도가 증가함에 따라 레인지가 증가하는데 이는 열전달계수의 증가에 기인한다. 한편, 동일한 냉각탑 체적내에서 모든 조건이 같을 경우 대향류가 직교류보다 일반적으로 레인지가 최소

30%에서 최대 80%까지 증가함을 볼 수 있다.

Fig.5와 Fig.6은 흡입공기의 온도가 각각 35°C와 30°C이고, 공기의 속도가 2.5m/s인 경우에 물의 유량에 따른 레인지의 변화를 보여주고 있다. 물의 유량이 증가함에 따라 레인지는 감소하고 있는데, 이는 물의 유량이 증가하더라도 충전재의 표면을 따라 물이 흐를 때 액막이 두꺼워지고 전체 전열면적은 비례적으로 증가하지 않기 때문이다.

Fig.7과 Fig.8은 각각 직교류형과 대향류형에 있어서 공기의 건구온도가 30°C인 경우와 35°C인 경우 레인지의 변화를 상대습도 대신 습구온도에 대해 비교해 놓은 것이다. 습구온도가 증가할수록

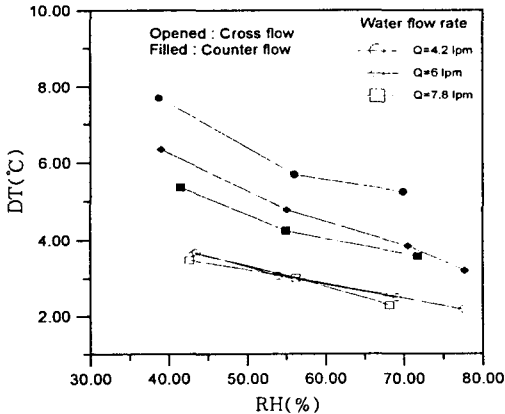


Fig.5 Effect of water flow rate and relative humidity on range ($T_{air,in}=35^{\circ}C$, $V_{air}=2.5m/s$)

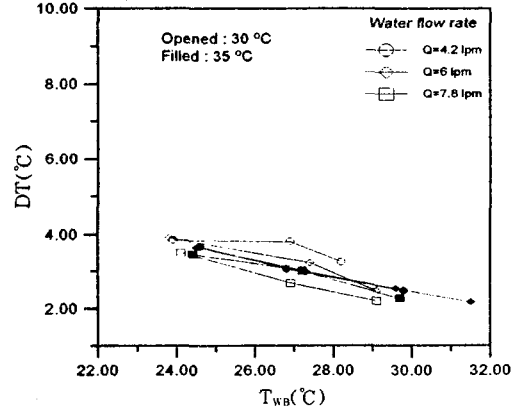


Fig.7 Effect of wet-bulb temperature on range (Cross-flow type)

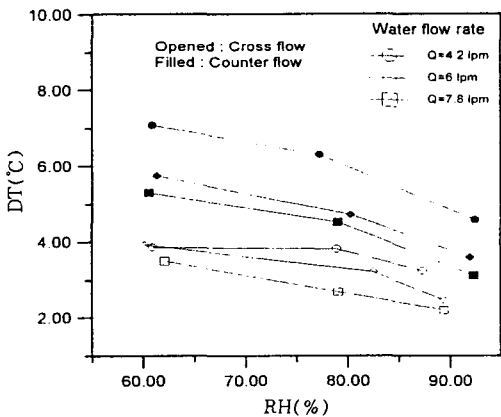


Fig.6 Effect of water flow rate and relative humidity on range ($T_{air,in}=30^{\circ}C$, $V_{air}=2.5m/s$)

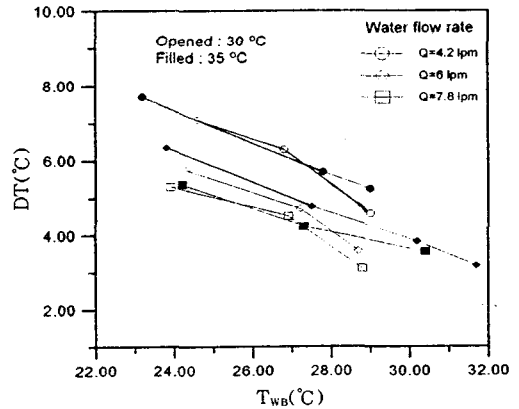


Fig.8 Effect of wet-bulb temperature on range (Counter-flow type)

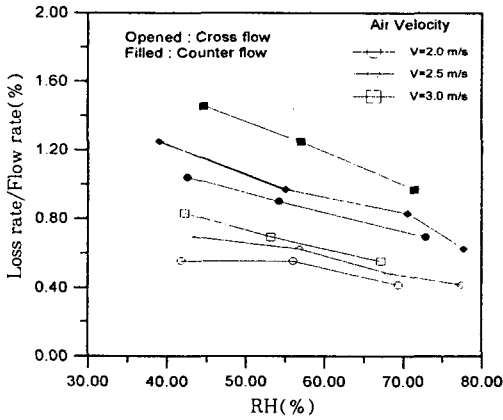


Fig.9 Effect of air velocity and coolant loss rate($T_{air, in} = 35^{\circ}C$, $m_w = 6lpm$)

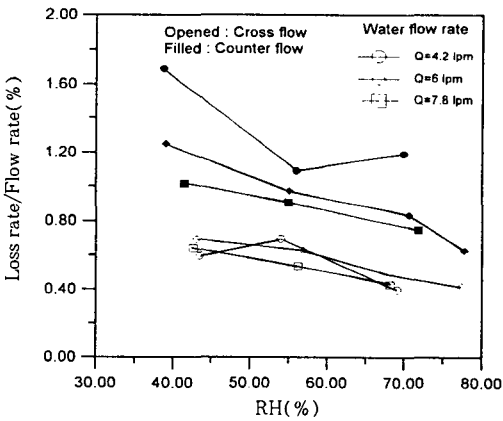


Fig.10 Effect of water flow rate on coolant loss rate($T_{air, in} = 35^{\circ}C$, $V_{air} = 2.5m/s$)

레인지가 감소한다. 그러나 건구온도가 $30^{\circ}C$ 인 경우와 $35^{\circ}C$ 인 경우에는 레인지에 약간의 차이가 있지만 그 차이가 크지 않음을 나타내고 있다. 이는 냉각탑의 레인지가 공기의 건구온도보다는 습구온도에 의해 주로 영향을 받음을 보여주고 있다. 따라서 냉각탑의 설계시에 설치장소의 건구온도보다는 습구온도에 따라 설계가 이루어져야 한다.

Fig.9과 Fig.10은 냉각수 손실률을 나타내는 그림인데, 여기서 손실률은 일정시간 동안의 냉각수 손실량을 냉각수 총순환량으로 나눈 값을 백분율로 표시한 것이다. Fig.9는 물의 유량이 6lpm이고,

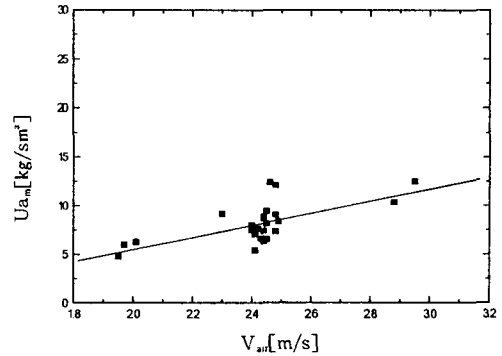


Fig.11 Total mass transfer coefficient vs. air velocity(counter flow)

흡입공기의 온도가 $35^{\circ}C$ 인 경우인데, 상대습도가 증가함에 따라 손실비가 감소함을 보이고 있다. 이는 상대습도가 높아지면 공기가 수분을 함유할 수 있는 능력이 감소하여 물의 증발이 감소하기 때문이다. 이로 인하여 레인지도 감소된다. 그리고 공기의 속도가 증가하면 손실비가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 공기의 속도가 증가하게 되면 물과의 접촉면에서 전단력(shear stress)이 커져서 물방울이 공기 유동속으로 유입되는 액적이탈이 더 많이 생기기 때문이다. 따라서 물의 손실량이 커진다.

Fig.10는 공기의 온도가 $35^{\circ}C$ 일 때에 물의 유량 변화에 따른 물의 손실비의 변화를 나타내고 있다. 일정한 공기속도하에서 물의 유량이 증가함에 따라 손실비가 감소함을 보이고 있다. 이는 물의 절대 손실량은 다소 증가하는 경우이지만 손실비는 감소하고 있다. 이는 물의 유량이 증가해도 공기와 물이 접촉하여 증발이나 액적이탈이 일어나는 면적이 비례적으로 증가하지 않기 때문이다. 본 실험조건에서 냉각수 손실률의 범위는 0.4~1.7%인데 이는 냉각탑의 일반적인 손실률 1%⁽³⁾의 전후 값을 볼 수 있다.

본 실험에서 얻은 냉각탑 열성능의 공기 속도에 대한 특성을 분석하기 위해 실험데이터를 이용하여 식(2)를 수치적으로 풀어 총물질전달계수를 구하였다. Fig.11은 대향류형의 경우 총물질전달계수의 공기속도에 대한 변화를 보여주고 있다. 여기서 총물질전달계수는 Fig.11의 Ua_m 으로 총합물질전

달계수(U)에 단위체적당 물질전달면적(a_m)을 곱한 값이다. 이는 시간당 단위체적당 물질전달량을 의미하게 된다. 본 연구의 실험범위 내에서 공기속도가 50% 증가할 경우 총물질전달계수가 100% 정도 증가함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉각탑의 열적 성능의 특성을 고찰하기 위하여 냉각탑 성능실험을 수행하였다. 동일체적내에서의 대향류형 및 직교류형에 대해 공기의 유속, 온도 및 습도에 따른 냉각수 냉각온도 및 냉각수 손실률을 측정하였으며, 이들 각 조건들이 실제 레인지에 미치는 영향들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 유입되는 공기의 상대습도가 40%에서 80%까지 증가할 경우 레인지는 30%~50% 정도 감소하였다. 또한 공기 속도의 증가와 냉각수량의 감소는 레인지를 증가시켰으며, 동일 체적 및 유량의 경우 레인지에 있어서 대향류형이 직교류형보다 최소 40%에서 최대 80%까지 증가함을 보였다.

(2) 냉각탑의 레인지는 공기의 건구온도보다는 습구온도에 주로 영향을 받는다.

(3) 본 실험 조건에서 냉각수 손실률은 0.4~1.7% 이내였으며, 유입되는 공기의 속도가 증가하면 물의 손실률은 증가하였으며, 냉각수량의 증가는 손실물의 감소를 보였다.

본 연구 결과는 대기 조건의 변화에 따른 냉각탑

의 성능변화를 예측 할 때 기초자료로 활용될 수 있으며, 냉각탑 설계 또는 성능개선을 위한 기초자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 포항제철(주)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. Mohiuddin, A. K. M., Kant, K., 1996, "Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part I : Selection and tower characteristics", Int. J. of Refrig., Vol. 19, No. 1, pp. 43~51.
3. Elliot, T.C., 1988, Standard Handbook of Powerplant Engineering McGraw-Hill.
4. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1988, ASHRAE Equipment Handbook, Atlanta, GA.
5. 박승덕 외 4인, 1980, "냉각탑 설계 및 시험 기술기준", 공업진흥청, KSCP-B-1027.