

멀티패스 밀폐식 냉각탑의 환경변화 특성

심 규 진^{*†}, 이 호 생^{**}, 김 은 필^{**}, 윤 정 인^{**}, 권 오 익^{***}
 부경대학교 대학원 냉동공조공학과^{*}, 부경대학교 기계공학부^{**}, (주)대일아쿠아^{***}

Characteristics of Closed Circuit Cooling Tower with Variation of Tube Diameter

Gyu-Jin Shim^{*†}, Ho-Saeng Lee^{*}, Eun-Pil Kim^{**}, Jung-In Yoon^{**}, O-Ick Kwon^{***}

^{*}Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Graduate School
 Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

^{**}College of Engineering, School of Mechanical Engineering, Pukyong National University,
 Pusan 608-739, Korea

^{***}Daeil Aqua Co.,Ltd., Kimhae 621-811, Korea

ABSTRACT: This paper presents experimental result of characteristics about Closed circuit Cooling Tower having a rated 2RT. The experimental apparatus has been set-up with a conventional type system. The test section is heat exchangers of cooling tower that consist of different vertical tubes, 15.88mm with 10 rows and columns and 19.05 mm with 8 rows and 12 columns.

The main results were summarized as follows : The values of heat and mass transfer coefficients of cooling tower operating with two paths are higher than these with one path. Cooling capacity per unit volume using 15.88mm tubes are higher than 19.05mm tubes.

Key words : Closed cooling tower(밀폐식 냉각탑), Spray water(분무수), Heat transfer coefficient(열전달계수), Mass transfer coefficient(물질전달계수)

기 호 설 명

- A : Area, [m²]
- D : Tube diameter, [m]
- G : Air velocity, [m/s]
- h : Heat transfer coefficient, [W/m²·K]
- i : Enthalpy, [kJ/kg]
- k : Mass transfer coefficient, [kg/m²·s]
- L : Spray water flow rate, [kg/s]
- m : Mass flow rate, [kg/s]
- q : Rate of hear transfer, [W]

- x : Absolute humidity, [kg/kg_{DA}]
- W : Cooling water flow rate, [kg/s]

그리스 문자

- Γ : Flow rate of spray water per unit breadth, [kg/m·s]

상첨자

- ' : Saturated condition

하첨자

- a : Air

† Corresponding author

Tel.: +82-51-629-6180; fax: +82-51-629-6180

E-mail address: gyujins@pknu.ac.kr

- i* : Inside
- o* : Outside
- s* : Spray water
- w* : Cooling water
- 1 : Inlet
- 2 : Outlet
- 3 : Interface(spray water film/air)

1. 서론

냉각탑은 물의 증발열을 이용하여 산업공정과 냉동 공조 기기 등에서 생성되는 되는 열을 시스템의 보다 효율적인 작동을 위해 제거하는 장치로 수요는 계속 증가하고 있으며, 중요성은 날로 더해지고 있다. 냉각탑은 개방식과 밀폐식 냉각탑으로 나눌 수 있으며, 밀폐식 냉각탑은 냉각탑 내부에 있는 튜브를 통해 냉각수를 흐르게 하고 튜브 외부에 대기의 공기를 통과시켜 냉각수와 공기가 비접촉으로 냉각수의 열을 제거하는 방식이다. 일 년 내내 운전되는 산업용 냉각탑에서 겨울철 냉각수의 결빙문제와 환경적인 문제를 고려하여 근래 개방식 냉각탑에서 급속하게 대체되고 있는 추세를 보이고 있다.

최초 냉각탑 작동에 관한 이론은 1923년 Walker¹⁾에 의해 제안하였으며, Parker and Treybal²⁾은 19mm 관, Mizushina 등³⁾은 12.7, 19.05, 40mm 관, Nitsu 등⁴⁾은 16mm 관을 이용, 관경에 따른 열·물질 전달계수에 관한 상관식등을 열적 특성 및 온도의 영향에 대하여 제시하였으며, Jorge Facao⁵⁾은 건물내 천장냉방에 적용한 밀폐식 냉각탑에 각 유체의 질량유량 및 공기 입구 습구온도 따른 냉각탑의 온도효율, 분무수의 특성을 밝혔고, M. M. Sarker⁶⁾은 하이브리드 밀폐식 냉각탑에서 입구 공기 속도 및 습구온도 등의 변화에 따른 압력강화 및 냉각 능력 등의 특성에 대해 실험하였다.

일반적으로 밀폐식 냉각탑에서 냉각수는 열교환기에서 One path로 흐르며, 냉각수 순환펌프 동력은 전체동력의 60~70%를 차지한다. 동력 절감을 위해 냉각수량을 최대한 줄여 설계하면, 열교환기부의 튜브 내부 유체의 속도가 느려져 냉각성능 미달의 문제가 있다. 위와 같은 문제를 해결하기 위해 튜브의 번들을 블록화를 통해 튜브 내부의 유체속도를 높여주는 방법을 모색하였다.

현재 튜브 번들의 블록화와 동시에 관경의 변화를 주었을 때, 블록별 튜브 내부 유체의 유동 및 냉각해석과 분무수의 유동 및 냉각해석의 멀티패스 밀폐식 냉각탑에 대한 이론적 해석이 시급하기에, 본 연구에서는 밀폐식 냉각탑의 열교환기에 멀티패스 변화와 관경 변화에 따른 열·물질 전달계수와 냉각성능에 대한 실험적 연구를 통해 기초 설계 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 멀티패스 밀폐형 냉각탑의 실험장치 개략도이다.

실험장치는 냉각수, 분무수 및 공기 순환부와, 시험부인 열교환기부, 열교환기 튜브의 블록화를 위한 멀티패스 분지관, 데이터 측정부로 구성되어 있다. 열교환기부가 있는 장치 케이스는 두께 10mm의 아크릴로 제작하여 각 유체의 유동을 관측할 수 있도록 하였다. 15.88mm(10×10단)과 19.05mm(8×12단) 관경을 이용, 열교환기를 배치하여 Table 1에 나와 있는 조건들로 냉각수의 패스변화와 함께 냉각수, 분무수 및 공기를 변화시켜 분무수의 온도 및 유량을 일정하게 유지시킨 후 정상화된 상태의 데이터를 취득하였다.

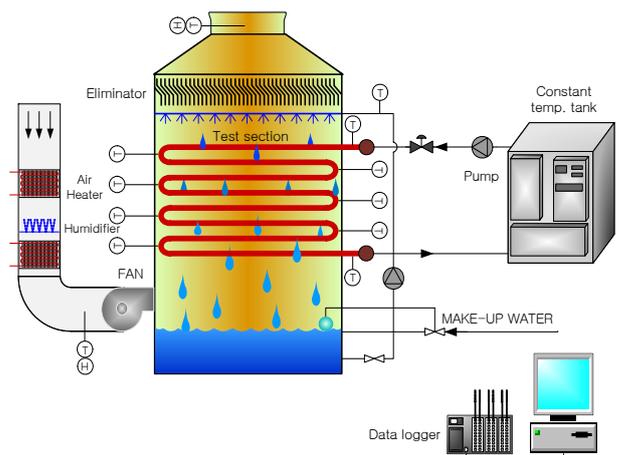


Fig. 1 The schematic diagram of experimental apparatus

항온조에서 나온 냉각수는 펌프를 통해 열교환기 분지관을 통해 One path와 Two paths 나누어

Table 1 Experimental conditions

Heat exchanger			
Tube diameter	15.88	19.05	[mm]
Transversal pitch	31.8	38.1	[mm]
Row pitch	39	46	[mm]
Dimension	W0.318·L0.6 ·H0.336	W0.305·L0.6 ·H0.525	[m]
Cooling water	Flow rate	[kg/h]	1560
	Inlet temperature	[°C]	32~50
Spray water	Flow rate	[kg/h]	1080
	Velocity	[m/s]	1.0~3.5
Air	Inlet wet-bulb temp.	[°C]	24~29

저 냉각탑 안에서 분무수, 공기와 열교환을 한 뒤, 다시 항온조로 들어가며, 분무수는 냉각탑 하부의 수조에서 순환펌프에 의해 반복적으로 열교환기 상부로 흐른다. 냉각탑 입구공기는 에어히터와 가습기를 공기의 상태를 조절하여 송풍기를 통해 냉각탑 안으로 들어간다.

3. 실험이론

냉각탑에서 냉각수에서 분무수로 열이 전해지며, 다시 공기로 이동된다.

냉각수가 손실한 열량과 공기가 취득한 열량은

$$dq_w = m_w c_{pw} dt_w \quad (1)$$

$$dq_a = m_a di_a \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있으며, 물질전달계수 k 를 계산하기 위해 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$m_a(x_{a,2} - x_{a,1}) = kA dx_{LM} \quad (3)$$

$$dx_{LM} = \frac{x_{a,2} - x_{a,1}}{\ln \frac{x_3 - x_{a,1}}{x_3 - x_{a,2}}} \quad (4)$$

관의 표면과 분무수와의 열전달계수 h_f 는

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_{id}} \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{D_o}{2\lambda} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) + \frac{1}{h_f} \quad (5)$$

를 이용하여 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 식(1)과 (2)에 나타낸 열평형식을 이용하여 실험장치의 신뢰성을 검정하였다. Q_w 는 냉각수 손실열량, Q_a 는 공기의 취득열량을 뜻한다. 그래프에서와 같이 $\pm 15\%$ 내에서 열평형이 이루어지는 것을 알 수 있다.

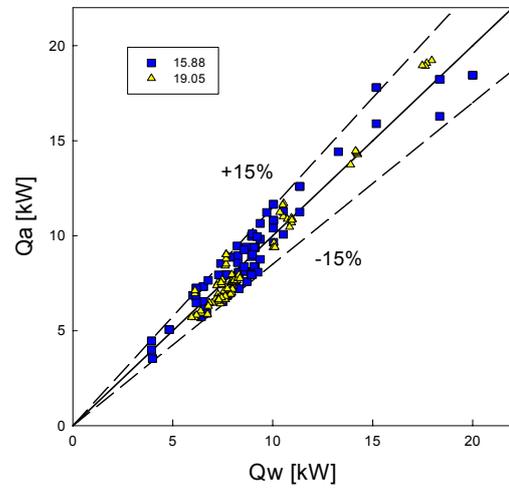


Fig. 2 Heat balance

Fig. 3은 15.88mm 관경에 대해 액막유량 Γ 에 따른 관외벽과 분무수간의 열전달계수 h_f 값을 Parker and Treybal²⁾과 Nitsu 등⁴⁾이 제시한 상관식들과 비교하여 나타내었다. One path, Two paths의 값들이 Nitsu 등⁴⁾의 값들과 거의 일치하여, 실험의 신뢰성이 높다는 것을 알 수 있다. 액막유량이 증가할수록 열전달계수값도 증가하여, 액막유량이 열전달계수값에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 실험 기준조건에서 One path보다 Two path일 경우 약 17.5%정도 높은 값을 보였으며, 이는 실험시 분무수의 온도 증가라는 결과로 인해 관외벽에서 분무수로의 많은 열전달량이 원인으로 생각되어 진다.

Fig. 4는 19.05mm 관경에서의 냉각탑 입구 공기 Re_a 에 따른 물질전달계수 k 값을 상관식들과 비교하여 나타내었다. 입구 공기 풍속이 증가할수록 값들도 역시 증가하기에 공기 풍속이 물질전달계수값에 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. One

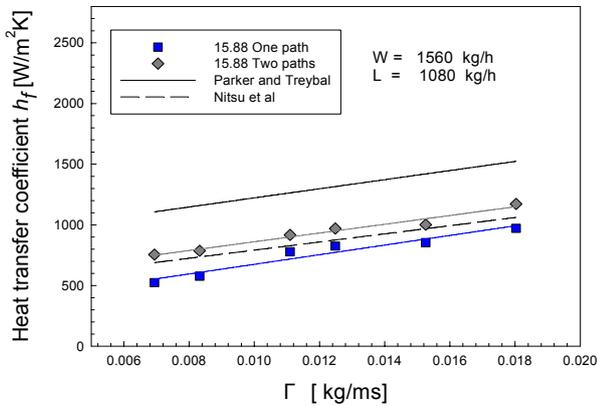


Fig. 3 Heat transfer coefficient h_f as a function of flow rate of spray water per unit breadth

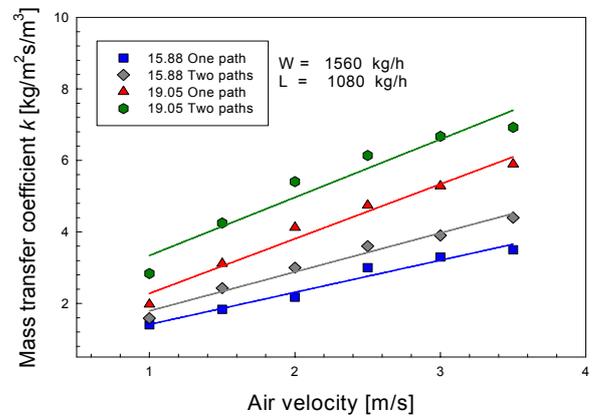


Fig. 5 Mass transfer coefficient k per unit volume as a function of air velocity

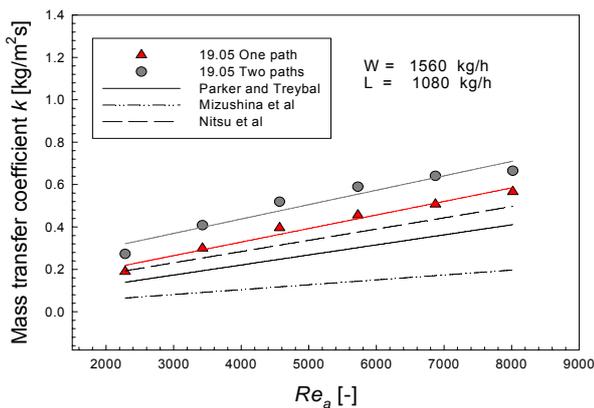


Fig. 4 Mass transfer coefficient k as a function of Reynolds number

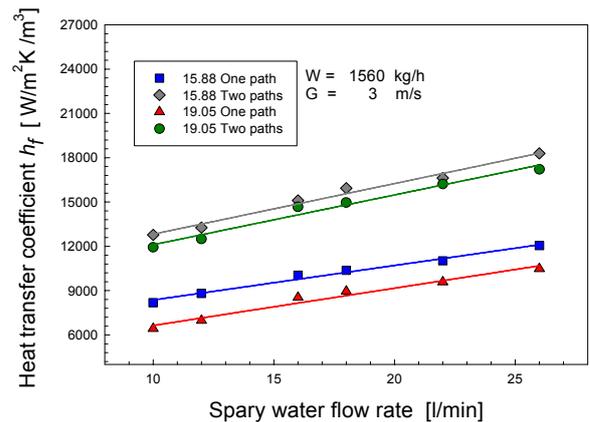


Fig. 6 Heat transfer coefficient h_f per unit volume as a function of spray water flow rate

path, Two paths의 값들이 Nitsu 등⁴⁾의 상관식과 비교적 일치하는 경향을 나타내고 있다.

One path보다 Two paths일 경우 물질전달계수 k 값이 큰 값을 보였으며, 이는 실험시 분무수의 온도가 One path일 경우보다 상승하여 냉각탑 출구 측의 공기의 절대습도의 증가로 인한 것으로 생각되어 진다. 기준조건 Re_a 가 약 6800일 경우 Two paths일 경우 One path보다 약 18%정도 높은 값을 보였다.

Fig. 5는 15.88, 19.05mm 관경의 열교환기의 부피를 고려하여 공기 입구 풍속에 따른 단위 체적당 물질전달계수 k 값을 나타내고 있다. 19.05mm

관경의 열교환기의 높이가 상대적으로 커서 냉각탑 출구의 공기의 절대습도 값들이 15.88mm 관경의 경우보다 높고 나와 물질전달계수 k 값이 증가된 것이라 생각되어 진다. 기준조건 3m/s 일 경우 19.05mm 관경의 Two paths와 One path는 15.88mm의 Two paths와 One path보다 약 71.1%, 60.2% 높은 값을 보였다.

Fig. 6은 분무수 변화에 따른 단위체적당 관외벽과 분무수와 열전달계수 h_f 값을 나타내었다. 15.88mm 관경 Two paths값이 가장 높은 값을 나타내었으며, 이는 분무수가 실험시 높은 온도를 보여 관외벽에서 분무수로의 많은 열전달량이

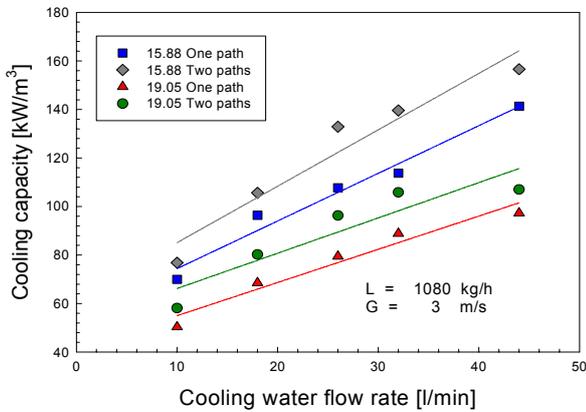


Fig. 7 Cooling capacity per unit volume as a function of cooling water flow rate

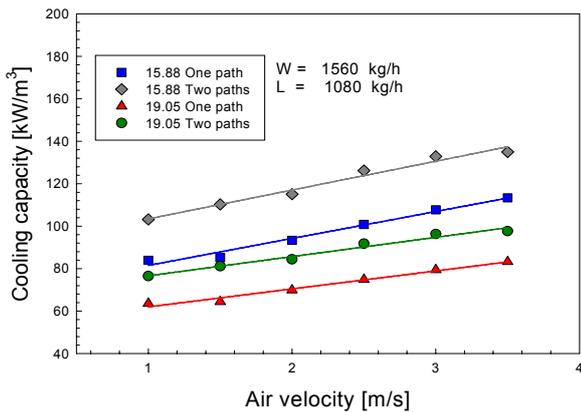


Fig. 8 Cooling capacity per unit volume as a function of air velocity

원인으로 기인한다. 15.88mm 관경의 Two paths와 One path는 19.05mm의 Two paths와 One path보다 약 6.5%, 15.8% 높은 값을 보였다.

Fig. 7과 8은 냉각수량과 풍속변화에 따른 단위체적당 냉각능력을 나타내고 있다. 두 그래프 모두 각 관경의 Two paths의 단위체적당 냉각능력이 One path보다 높은 값을 가졌다. 15.88mm 관경의 Two paths일 경우가 가장 높은 단위체적당 냉각능력을 보였는데, 이는 19.05mm 관경의 단위체적당 물질전달계수값 k 값이 15.88mm보다 높게 나왔으며, 관외벽과 분무수와의 열전달계수 h_f 도 거의 비슷한 값을 가졌음에도 불구하고도 단위체적당 열교환기의 전열면적이 15.88mm 관경이 크게 나온 것이 냉각능력 증가의 원인이라 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 밀폐식 냉각탑에서 멀티패스와 환경변화에 따른 특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 액막유량 Γ 의 증가로 인해 관외벽과 분무수와의 열전달계수 h_f 가 선형적으로 증가함과 Nitsu 등⁴⁾의 상관식과 거의 일치함을 볼 수 있다. 15.88mm 관경의 경우, 기준조건에서 Two paths의 열전달계수 h_f 가 One path보다 약 17.5% 높은 값을 보였다.
- 2) 공기의 Re_a 이 증가할수록 물질전달계수 k 값이 증가함을 알 수 있다. Nitsu 등⁴⁾의 상관식과 좋은 일치를 보였으며, 기준조건에서 Two paths의 물질전달계수 k 는 One path보다 약 18% 높은 값을 보였다.
- 3) 입구 공기 풍속에 따른 단위 체적당 열전달계수 h_f 는 상대적으로 높은 열교환기를 가진 19.05mm 관경의 열전달계수가 15.88mm 관경보다 Two paths와 One path에서 각각 약 71.1%, 60.2% 높은 값을 보였다.
- 4) 분무수에 따른 단위 체적당 물질전달계수 k 를 15.88mm 관경의 Two paths 그리고 One path의 계수값이 19.05mm 관경보다 근소하게 약 6.5%, 15.8%로 높은 값을 보였다.
- 5) 15.88mm 관경의 Two paths를 이용하였을 경우 19.05mm 관경의 냉각탑안의 열교환기의 단위체적당 전열면적의 증가로 인해 가장 좋은 냉각성능을 보여 주었다.

후 기

본 논문은 지역산업공통기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 장치 설계에 많은 도움을 주신 주관기관 (주)대일아쿠아의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Walker WH, Lewis WK, McAdams WH, Gilliland ER. 1923. Principles of chemical engineering. 3rd ed. McGraw-Hill Inc.
- 2) Parker, R.O., and R. E. Treybal, 1961, The heat, mass transfer Characteristics of Evaporative coolers, Chemical Engineering Progress Symposium Series, 57-32:138-149
- 3) T. Mizushina, R ito, H. Miyashita, 1968, Characteristics and methods of thermal design of evaporative cooler, International Chemical Engineering Vol 8, No. 3
- 4) Nitsu, Y., K. Naito, and T. Anzai, 1969, Studies on Characteristics and Design Procedure of Evaporative Coolers, Journal of the society of Heating Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan, Vol 41.No.12, No.13, and Vol 43, No7
- 5) Jorge Facao, Armando Oliveira, 2004, Heat and mass transfer correlations for the design of small indirecr contacr cooling towers, Applied Thermal Engineering Vol 24, issues 14-15, pp1969-1978
- 6) M.M.A.Sarker, E.P Kim, C.G. Moon and J.I. Yoon, "Performance characteristics of the hybrid closed circuit cooling tower", Energy and Buildings, Volume 40, Issue 8, 2008.
- 7) Ala Hasan, Kai Siren, 2002, Theoretical and computational analysis of closed wet cooling towers and its applications in cooling of buildings, Energy and buildings, Vol 34, issue 5