

## 밀폐형 냉각탑용 열교환기에서의 물질전달

유성연\*, 김진혁\*\*, 한규현\*, 김주상\*, 유해성\*\*\*, 박형준\*\*\*  
 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단\*, 한국과학기술원 기계공학과\*\*, (주)장한기술\*\*\*

### Mass Transfer from Heat Exchanger for Closed Wet Cooling Tower

Seong-Yeon Yoo\*, Jin-Hyuck Kim\*\*, Kyu-Hyun Han\*, Joo-Sang Kim\*  
 Hae-Sung Ryu\*\*\*, Hyoung Joon Park\*\*\*

*Bk21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea\**  
*Mechanical Engineering Department, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
 Daejeon 305-764, Korea\*\**  
*Jang-han Engineers. Inc. #408-12 Hanjin-ri Songak-myeon  
 Dangjin-gun Chungcheongnam-do Korea\*\*\**

**ABSTRACT:** The use of cooling towers in the air conditioning systems of buildings is increasing. In closed wet cooling towers, the heat transfer between the air and surface tubes can be composed of the sensible heat transfer and the latent heat transfer. The latent heat transfer is affected by the air and spray water. This study provides a designing methodology of heat exchanger for closed wet cooling tower. The correlation equation was derived to interpret the mass transfer coefficient based on the analogy of the heat and mass transfer and the experimental results. The results from this correlation equation showed fairly good agreement with experimental data.

**Key words:** Closed wet cooling tower (밀폐형 냉각탑), Design method (설계방법), Heat exchanger (열교환기), Mass transfer coefficient (물질전달계수)

### 1. 서론

냉각탑은 순환 냉각수와 공기와의 접촉에 의하여 대기로 열을 방출하는 장치로서 물의 증발 및 열전달에 의하여 에너지가 전달된다. 이러한 냉각탑은 공기를 공급하는 방식에 따라 구분하며, 냉각탑 하부에 팬을 설치하여 공기를 하단부에 불어 넣어 상부로 토출시키는 방식의 냉각탑을 압입송풍 냉각탑이라 말한다. 압입송풍형 냉

각탑은 순환수가 대기와 직접 접촉하는 개방형(Open type)과 열교환기를 통하여 간접 접촉하는 밀폐형(Closed type)으로 구분된다.

밀폐형 냉각탑은 개방형과 비교하여 순환 냉각수가 열교환기 코일 내부에서 흐르기 때문에 외부와의 접촉으로 인해 냉각수가 오염될 염려가 없다. 또한 냉각수의 비산으로 인한 보충이 적고 분무수의 증발현상을 이용함으로써 열효율이 높으며, 오염 및 소음이 적고 결빙의 위험이 적어 빌딩이나 병원, 학교에서 4계절 연속운전이 가능하다.

밀폐형 냉각탑용 열교환기의 성능을 나타내는 가장 중요한 인자는 열교환기 관 외부의 증발에 의한 열전달 현상을 표현할 수 있는 물질전달계수이며, 실험과 해석적 방법을 통해 물질전달계

† Corresponding author

Tel.: +82-42-350-3242; fax: +82-42-350-3210

E-mail address: jhkim05@kaist.ac.kr

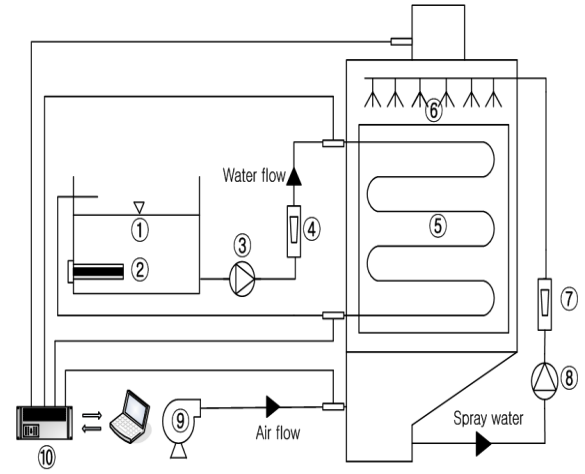
수를 제시한 연구들이 진행되었다. Praker and Treybal<sup>(1)</sup>은 증발식 냉방기용 열교환기에 대한 해석모델을 제안한 초기의 연구를 진행하였으며, 열교환기의 관외 열전달 현상을 나타내기 위하여 관표면과 분무수 사이의 열전달계수와 분무수와 대기 사이의 물질전달 계수를 제시하였다. Mizushina et al<sup>(2)</sup>은 서로 다른 직경을 가진 세가지 열교환기의 성능시험을 통해 물질전달계수를 공기와 분무수의 Reynolds 수의 함수로 표현하였다. Niisu et al.<sup>(3)</sup>은 열교환기 관다발에 대한 성능시험을 수행하여 관의 직경과 공기의 질량속도를 통해 물질전달계수를 표현하는 상관식을 제시하였으며, 현재 그들의 연구 결과로부터 얻은 상관식은 밀폐형 냉각탑용 열교환기 및 증발식 냉방기용 열교환기의 성능해석에 가장 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 두 가지 서로 다른 크기와 배열을 가진 열교환기를 사용한 밀폐형 냉각탑의 성능시험을 수행 하였으며, 이로부터 냉각탑용 열교환기의 설계방안을 제시하고자 하였다. 즉, 냉각탑용 열교환기 관 외부의 열전달을 현열전달과 잠열전달로 구분하였으며, 열전달과 물질전달의 상사성과 함께 밀폐형 냉각탑 성능시험 결과를 바탕으로 잠열전달을 예측할 수 있도록 대류 물질전달계수의 상관식을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다.

## 2. 성능시험장치

본 연구에서 사용한 밀폐형 냉각탑 성능시험 장치는 Fig. 1과 같으며, 냉각탑의 크기는 W750×D210×H1300이다. 열교환기는 구리로 제작되었으며, 크기와 배열이 다른 2가지로 구성된다. 열교환기 1은 외경이 9.52 mm이며, 22열 11행으로 구성되고 관 사이의 간격은 17 mm이다. 열교환기 2는 외경이 25.4 mm이며, 8열 5행으로 구성되고 관 사이의 간격은 40 mm이며 두가지 열교환기 모두 정렬배열(In-Line)으로 배치하였고 열교환기의 길이는 490 mm 이다.

냉각수와 공기의 온도를 일정하게 유지하고, 공기의 속도와 분무수 유량을 변화시켜 가며 성능시험을 수행하였으며, 열교환기의 입구와 출구에 설치된 센서로부터 온도와 습도를 측정하였다.



①constant temperature bath ②heater ③cooling water circulation pump ④cooling water flow meter ⑤heat exchanger ⑥spray nozzle ⑦spray water flow meter ⑧spray water circulation pump ⑨fan ⑩date acquisition

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

## 3. 관외부에서의 물질전달

밀폐형 냉각탑의 열교환기에서는 관 내부에서는 냉각수의 열전달만 고려하면 되지만, 관 외부에서는 공기와 분무수의 열전달과 물질전달을 동시에 고려하여 열전달량을 구해야 된다. 그러나 열전달과 물질전달에 영향을 미치는 인자가 너무 많기 때문에 일반적인 실험 상관식을 얻기가 매우 어렵다.

본 연구에서는 관 외부에서의 열전달을 관 표면과 공기와의 온도차에 의한 현열 열전달( $\dot{Q}_s$ )과 분무된 물이 관 표면에서 공기 중으로 증발하면서 발생하는 잠열 열전달( $\dot{Q}_l$ )로 나누어서 식 (1)과 같이 계산하는 것을 제안하였다.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_l \quad (1)$$

여기서 현열 열전달( $\dot{Q}_s$ )은 아래와 같은 식(2)를 사용하여 계산하되, 여기서 대수평균온도차는 뜨거운 유체 온도( $T_h$ )대신 열교환기 관 외부 표면온도( $T_s$ )를 사용하여 계산한다.

$$\dot{Q}_s = h_o A F \Delta T_{lm} \quad (2)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{so} - T_{ai}) - (T_{si} - T_{ao})}{\ln((T_{so} - T_{ai}) / (T_{si} - T_{ao}))} \quad (3)$$

잠열 열전달( $\dot{Q}_l$ )은 분무수의 물질전달에 의한 증발량( $\dot{m}_e$ )에 증발잠열( $h_{fg}$ )을 곱하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_e h_{fg} \quad (4)$$

$$\dot{m}_e = h_m A F \Delta \rho_{LMTD, CF} \quad (5)$$

$$\Delta \rho_{lm} = \frac{(\rho_{sat, T_{so}} - \rho_{ai}) - (\rho_{sat, T_{si}} - \rho_{ao})}{\ln((\rho_{sat, T_{so}} - \rho_{ai}) / (\rho_{sat, T_{si}} - \rho_{ao}))} \quad (6)$$

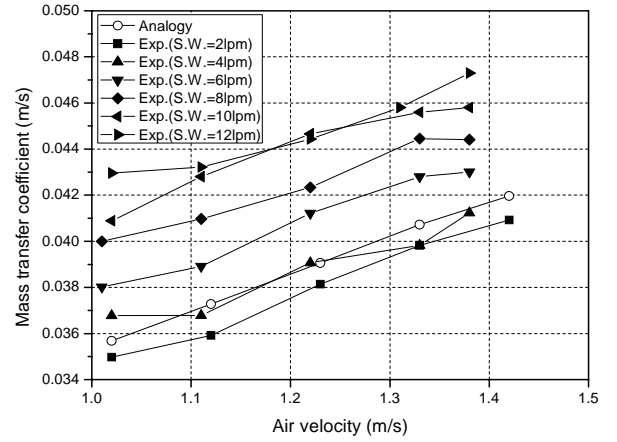
식(4)에서 증발량은 물질전달계수를 사용하여 식 (5)와 같이 구하고, 대수평균밀도차( $\Delta \rho_{lm}$ )는 식(3)의 대수평균온도차( $\Delta T_{lm}$ )와 같은 개념으로 식 (6)과 같이 계산하며, 물질전달계수( $h_m$ )는 식(7)의 열전달과 물질전달의 유사성(Analogy)을 이용하여 구한다.

$$Sh/Nu = \frac{(h_m D / D_{iff})}{(h D / k)} = (Sc/Pr)^n \quad (7)$$

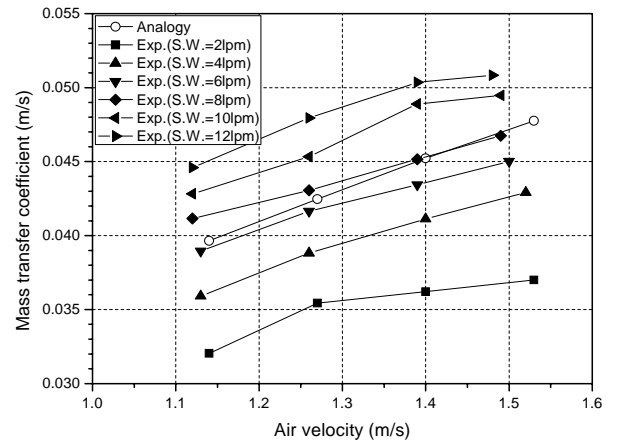
여기서,  $\Delta \rho_{lm}$ 는 대수평균밀도차,  $\rho_{sat, T_{so}}$ 는 열교환기 물 출구의 관 외부표면온도,  $\rho_{ai}$ 는 입구 공기의 밀도,  $\rho_{sat, T_{si}}$ 는 열교환기 물 입구의 관 외부 표면온도에서의 공기의 포화 밀도,  $\rho_{ao}$ 는 출구 공기의 밀도를 나타내며,  $Sh$ 는 Sherwood 수,  $Nu$ 는 Nusselt 수,  $D$ 는 특성길이를 나타낸다. 확산계수( $D_{iff}$ ), 열전도계수( $k$ ), Schmidt 수 ( $Sc$ ), Prandtl 수( $Pr$ )는 물성치이며, 열전달계수 ( $h$ )를 알면 물질전달계수( $h_m$ )을 구할 수 있다.

원관 군에서 관외 열전달계수는 Reynolds 수의 범위에 따라서 아래와 같이 표현된다.

$$Nu = 0.52 Re^{0.5} Pr^{0.36} \quad (8) \quad (100 < Re \leq 1000)$$



(a) heat exchanger 1 (D=9.52 mm)



(b) heat exchanger 2 (D=25.4 mm)

Fig. 2 Mass transfer coefficient with various velocities and spray water flow rate.

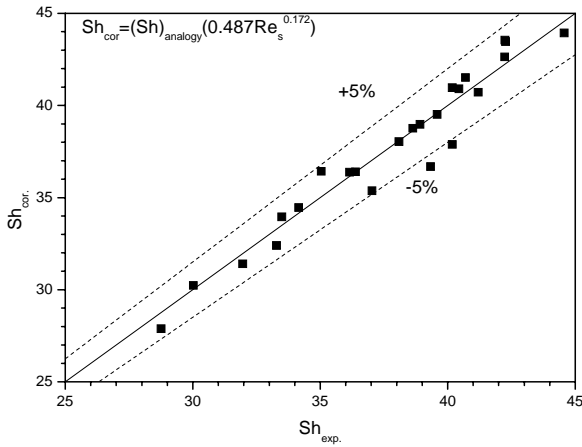
$$Nu = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36} \quad (9) \quad (1000 < Re \leq 2 \times 10^5)$$

식 (7)에 나타난 유사성을 이용하여 관 외부에서의 물질전달계수를 구하는 실험식을 다음과 같이 가정할 수 있다.

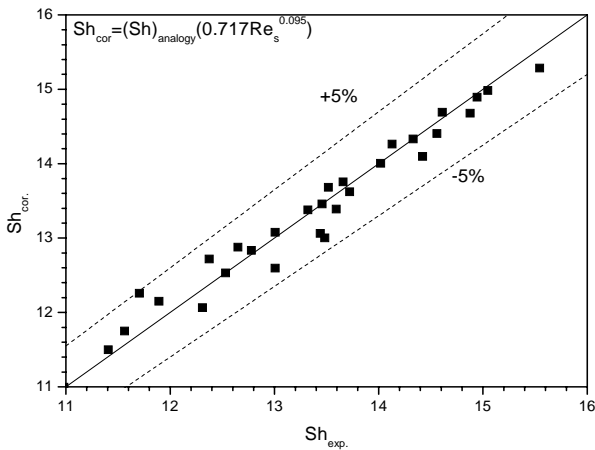
$$Sh_{analogy} = 0.52 Re^{0.5} Sc^{0.36} \quad (10) \quad (100 < Re \leq 1000)$$

$$Sh_{analogy} = 0.27 Re^{0.63} Sc^{0.36} \quad (11) \quad (1000 < Re \leq 2 \times 10^5)$$

상사성(Analogy)을 이용하여 구한 물질전달계수( $h_m$ )를 실험값과 비교한 그림을 Fig. 2에 나타냈다. 속도의 증가에 따라서 열전달이 증가하면



(a) heat exchanger 1 (D=9.52 mm)



(b) heat exchanger 2 (D=25.4 mm)

Fig. 3 Comparison of Sherwood number between experiment and correlation.

서 물질전달도 증가하며, 상사성에 의하여 구한 값이 실험값에 비해 높은 것을 알 수 있다. 그러나 분무수 유량이 증가하면서 점차 그 차이가 줄어들어 드는 것을 볼 수 있다. 상사성에서는 관이 분무된 물에 충분히 젖어 있는 상태를 가정하여 해석하지만 분무수 유량이 적을 때에는 충분히 젖은 상태가 되지 않기 때문에 상사성으로 구한 값이 실험값에 비해 큰 것이다.

냉각탑에서 물질전달량은 분무수 유량에 따라 달라지지만 상사성 해석에서는 이러한 변수가 고려되지 않았기 때문에, 분무수 유량을 고려하여 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$Sh_{cor} = Sh_{analogy} (0.487 Re_s^{0.172}) \quad (12)$$

(Heat exchanger 1, D=9.52 mm)

$$Sh_{cor} = Sh_{analogy} (0.717 Re_s^{0.095}) \quad (13)$$

(Heat exchanger 2, D=25.4 mm)

여기서  $Re_s$ 는 분무수의 Reynolds 수로 공기의 Reynolds 수와 같은 방법으로 정의하고, 상수와 지수는 관의 배열, 분무특성 등에 따라 달라지며 실험에 의해 결정한다. Fig. 3은 두 가지 열교환기에 대해서 위의 상관식으로 구한 Sherwood 수를 실험값과 비교한 결과이며, 두 가지 열교환기 모두  $\pm 5\%$  범위에서 매우 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

밀폐형 냉각탑용 열교환기의 관의 열전달은 현열전달과 잠열전달로 구분할 수 있다. 현열전달은 공기속도에 따른 열전달계수를 통해 얻을 수 있으며, 잠열전달계수는 공기의 속도 및 분무수 유량에 따라 달라지고, 열전달과 물질전달의 상사성 및 성능시험을 통해 상관식을 도출할 수 있다. 이렇게 얻어진 상관식으로 구한 물질전달계수는 실험과 매우 잘 일치하였다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부의 지혁혁신인력양성사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Parker, R. O. and Treybal, R. E., 1962, The Heat Mass Transfer Characteristics of Evaporative Coolers, Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol. 57, No. 32, 138-149.
2. Mizushina, T. and Ito, R. and Miyashita, H., 1967, Experimental Study of an Evaporative Cooler, International Chemical Engineering, Vol. 7, No. 4, 727-732.
3. Niitsu, Y., Naito, K. and Anzai, T., 1969, Studies on Characteristics and Design Procedure of Evaporative Coolers, Journal of SHASE, Japan Vol. 43, No. 7.