

## 멀티패스 밀폐식 냉각탑의 성능특성에 대한 수치적 연구

김 은 필\*

(원고접수일 : 2007년 12월 17일, 심사완료일 : 2008년 5월 8일)

### A Numerical Study on Performance Characteristics of a Closed Circuit Cooling Tower with Multi Paths

Eun-Pil Kim\*

**Abstract :** A closed circuit cooling tower having high temperature of cooling water and small water flow rate is investigated. To study the characteristics of the heat transfer of heat exchanges in a cooling tower with multi paths a numerical method is used. The results show that the staggered tube arrangements in a bank show better performance than aligned ones for temperature variation with various outer diameters of tube bundles. In case of one pass, the 15.88 mm tube case shows about 9% better performance than the 25.4 mm tube case. In two paths, the tube outside diameter of 15.88 mm show about 14.4% better results than the 25.4 mm diameter case.

**Key words :** Multi path (멀티 패스), Closed circuit cooling tower (밀폐식 냉각탑), Heat flux (열유속)

#### 기호 설명

$C_D$  : 항력계수  
 $d_p$  : 입자 직경 [m]  
 $N$  : 전체 Tube의 열 수  
 $P$  : 기체의 정압 [Pa]  
 $q_i$  : Tube 열 수  $i$ 에 대한 열 유속 [ $W/m^2$ ]  
 $r_p$  : 입자의 궤도 [m]  
 $V_p$  : 입자의 순간속도 [m/s]  
 $V$  : 공기의 국소 순간속도 [m/s]

#### 1. 서 론

냉각수 계통에서 동력을 필요로 하는 설비는 냉각수를 냉각탑으로 공급해 주는 냉각수 순환펌프와 냉각탑 내부로 공기를 공급해 주는 팬이다. 냉각수 순환펌프는 냉각수 계통이 필요로 하는 전체 동력의 60~70%를 차지한다. 에너지 절감요구가 크게 부각되면서 펌프의 동력 소비를 줄이기 위한 여러 방안을 강구하여 시행하고 있으나 그 절감 효과가 미미한 편이다.

근래는 펌프의 에너지 절감효과를 극대화하기 위한 방법의 일환으로 냉각수량 자체를 최대한 줄여

† 교신저자(부경대학교 기계공학부, E-mail: ekim@pknu.ac.kr, Tel: 051)629-6128)

냉각수 계통을 설계하는 추세이다. 냉각수량을 줄임으로서 배관의 직경 또한 현저히 줄기 때문에 배관비용 절감효과도 크다. 산업 플랜트의 경우 배관이 차지하는 공간이 줄어 공장용지 효율화가 높으며, 특히 빌딩의 경우 냉각수 배관의 소구경화로 배관면적이 현저하게 줄어들어 빌딩의 공간 활용과 건설비 절감 효과가 크게 나타나고 있다.

냉동설비 및 산업설비의 열 부하량에는 변화가 없는 상태에서 냉각수량을 줄여 냉각수 계통을 설계함에 따라 냉각탑으로 돌아오는 냉각수의 입구온도는 냉각수량을 줄인 만큼의 비율로 상승하게 된다. 이로 인하여 일반적인 개방식 냉각탑으로는 유입되는 냉각수의 온도가 높아 충전재의 재질 상 문제로 냉각이 불가능하기 때문에 밀폐식 냉각탑을 사용하고 있다.

한편, 냉각수 순환수량이 적고 냉각 온도범위가 큰 냉각수 계통에 패스가 하나인 일반적인 밀폐식 냉각탑을 적용하였을 경우 냉각성능이 크게 미달되는 문제가 있다. 이는 필요한 요구 전열면적에 비하여 냉각수량이 적어 코일 내부 유체의 속도가 느려지기 때문으로 튜브 번들을 블록화하여 멀티패스(multi path)형으로 제작하여 코일 내부 유체의 속도를 높여 주어야 한다. 그러나 현재의 기술수준으로는 튜브 번들을 블록화 하였을 때 블록별 코일 내부 유체의 유동 및 냉각해석과 코일에 뿌려주는 분무수의 유동 및 냉각해석상의 한계로 외국 제품을 단순 모방하여 냉각탑을 제작하고 있는 실정인에서 냉각조건이 까다로운 현장에는 외국제품이 수입되고 있는 실정이다.

## 2. 이 론

냉각탑 작동에 관한 이론은 1923년 Walker에 의해 최초로 제안되었으나 실질적인 미분방정식을 이용한 해석은 1925년 Merkel에 의해서 시도되었다. 단순화된 Merkel의 엔탈피 이론은 냉각탑의 성능계산에 보편적으로 사용되어 왔으며, Lichtenstein<sup>(1)</sup>에 의해 도식적인 방법으로 Merkel방정식의 해를 구할 수 있게 되었다.

밀폐형 냉각탑에서 유체유동은 열과 물질 전달이

동시에 이루어지게 된다. Baker and Shryock<sup>(2)</sup>은 Merkel의 연구를 재검증하여 Merkel이 사용하는 가정으로부터 발생하는 오차를 최소한으로 줄이고자 하였다.

열과 물질 전달의 지배 미분 방정식들을 풀기 위해 Paker and Treybal<sup>(3)</sup>은 열교환기 영역에서 분무수 온도 변화에 대한 수치해석 기법을 제시하였고, G. Gan et al.<sup>(4)</sup>은 단상류 및 이상류에 있어서의 밀폐형 습식 냉각탑(CWCT)의 내부 압력강하 및 각 유체의 동특성에 대하여 CFD를 통해 해석하였다.

습식 운전에서 물방울 입자들의 유동은 이미 계산되어진 유체유동의 결과에서 해석한다. 물방울 입자의 궤적은 이산적인 접근법인 Lagrangian 법으로 계산되는데 이 방법으로 입자의 궤적과 속도를 계산하고, 입자에서의 힘 평형을 이용하면, 물방울의 이산적인 궤적을 예측할 수 있다. G. Gan et al.<sup>(4)</sup>은 이상(two phase)유동인 공기와 살수되는 물방울 사이에서 열전달이 이루어지는 밀폐형 습식 냉각탑의 성능을 평가하기 위한 수치해석 기법을 발표하였고, 구의 모습을 갖는 물방울에 대한 운동 방정식을 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{dr_p}{dt} = V_p \quad (1)$$

여기서,  $r_p$ 는 입자의 궤도이고  $V_p$ 는 입자의 순간속도 [m/s]이다. 입자속도는 입자의 힘 평형에서 얻어진다. 그리고 입자의 힘 평형은 입자의 작용하는 힘, 항력, 부력, 입자를 둘러싼 기체로부터의 압력차에 영향을 받는다.

입자속도  $V_p$ 는 다음과 같다.

$$\rho_p \frac{dV_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho C_d |V - V_H|}{d_p} (V - V_p) + g(\rho_p - \rho) + \frac{1}{2} \rho \frac{d}{dt} (V - V_p) + \frac{\partial P}{\partial r_p} \quad (2)$$

여기서  $V$ 는 공기의 국소 순간속도 [m/s],  $C_d$ 는 항력계수,  $d_p$ 는 입자 직경,  $\rho_p$ 는 입자밀도 [kg/m<sup>3</sup>],  $P$ 는 기체의 정압이다.  $C_d$ 는 다음과 같이 주어지는

레이놀즈수  $Re$ 에 대한 상대적인 함수이다.

$$C_D = a_1 + a_2/Re + a_3/Re^2 \quad (3)$$

여기서  $a_1$ ,  $a_2$  그리고  $a_3$ 은 상대적인 레이놀즈수  $Re$ 에 연관된 상수이다.  $Re$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho d_p |V - V_F|}{\mu} \quad (4)$$

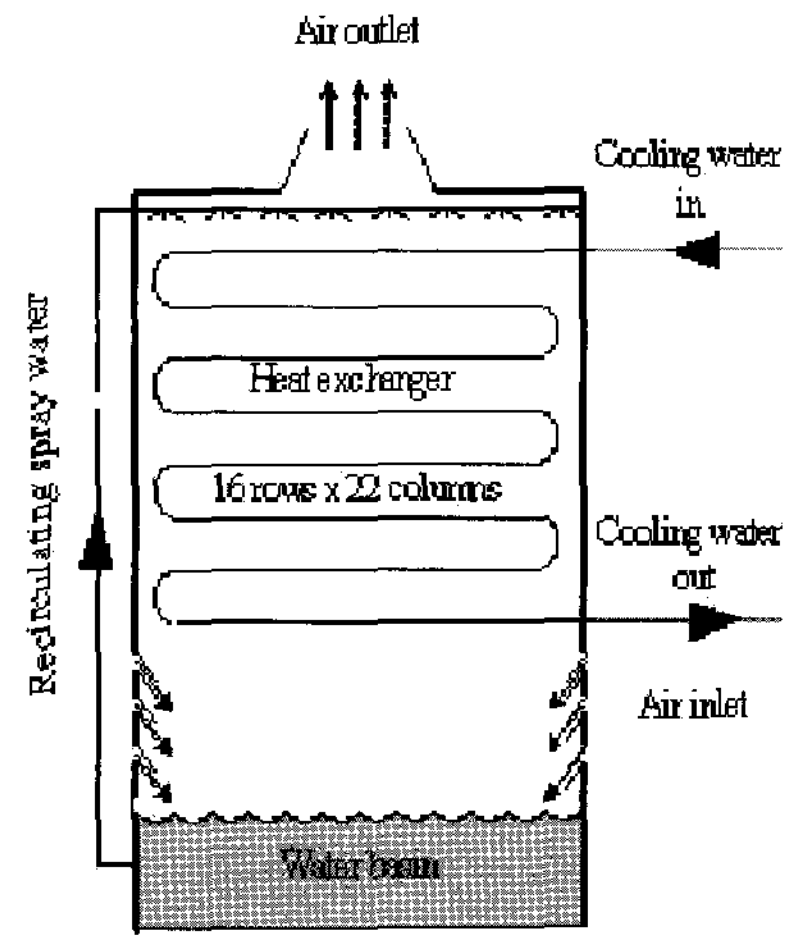
경계영역으로 물방울 입자가 들어갈 때에는 다음과 같은 조건을 사용한다.

첫째, 동관 표면에 닿는 물방울 입자들이 수직속도 및 법선속도는 변하게 되고 표면과 부딪치는 입사각에 비례하여 표면에서 튀어 오르게 된다. 둘째, 각 열의 동관들은 체적 열 발생율을 갖는 전도체이다. 셋째, 냉각탑의 내벽에서 물방울 입자는 완전히 반사된다. 위에서 사용한 경계조건은 냉각탑 내부에서 물방울 입자의 유동을 해석하는데 사용한 조건들이다.

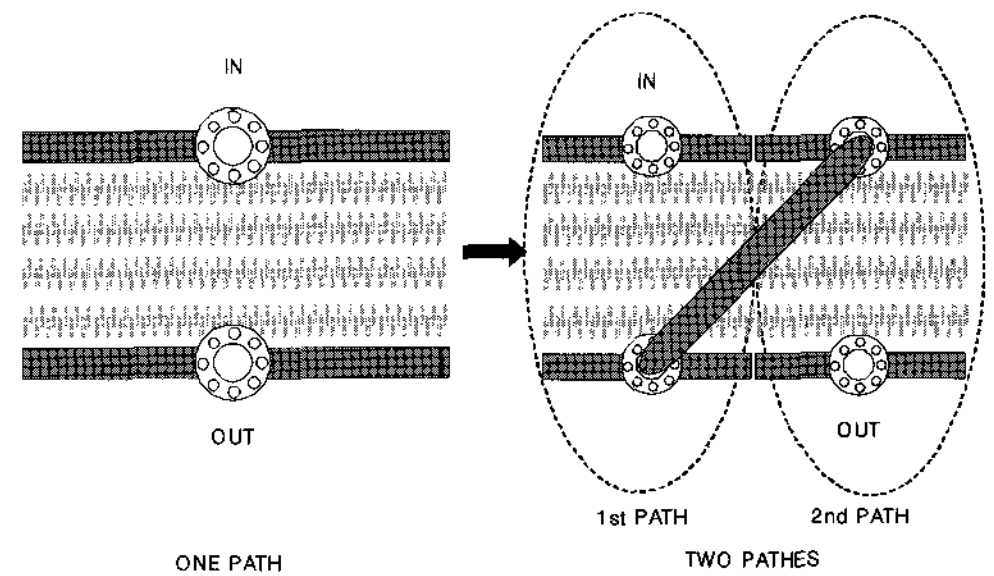
### 3. 수치해석의 조건 및 방법

멀티패스 밀폐식 냉각탑의 내부 유동 및 열전달 특성을 해석하기 위해서 상용 프로그램인 FLUENT<sup>(5)</sup>를 사용하였다. 냉각탑의 크기는 가로 670 mm, 세로 400 mm, 높이 2180 mm의 실험장치와 가장 유사하도록 설계되었고 냉각탑을 단면으로 잘라 2차원 유동으로 해석하였다. 이는 구하고자 하는 냉각탑의 길이가 너비에 비해 충분히 길기 때문에 냉각탑 내부에서의 유동을 2차원 유동으로 가정하였다. 멀티패스 밀폐식 냉각탑의 전체적인 개략도와 코일 번들 부분의 단일 패스와 멀티패스 모델에 대한 그림을 Fig. 1에 나타내었다.

수치해석의 결과를 논하기 전에 사용된 격자가 정확하게 생성되었는지에 대한 것은 중요한 부분이기 때문에 격자의 유효성 검사를 하였다. 격자의 유효성을 검사함에 있어서 실제 냉각탑의 형상은 격자의 복잡함 때문에 유효성을 판단하기 쉬운 2차원의 간단한 도형을 모델로 검사하였다. Fig. 2는 유효성 검사에 사용되어진 간단한 2차원 도형이다.

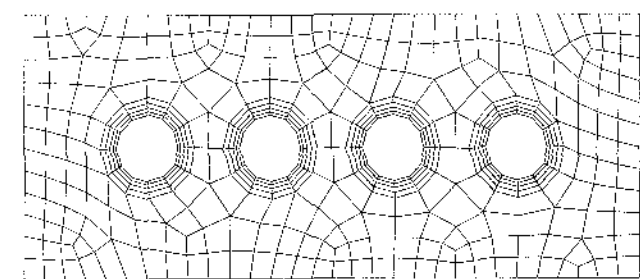


(a) schematic

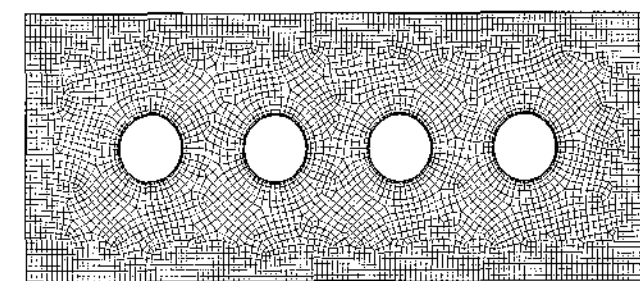


(b) coil blocks in multi pass

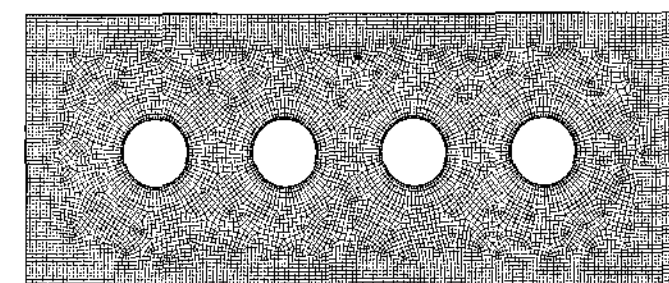
Fig. 1 Schematic of the closed circuit cooling tower



(a) Grid level 1



(b) Grid level 2



(c) Grid level 3

Fig. 2 Different numbers of grid levels

Fig. 2(a)는 격자수가 440개일 때의 형상이고, Fig. 2(b)와 2(c)는 격자수가 각각 4613, 10857개일 때의 형상이다.

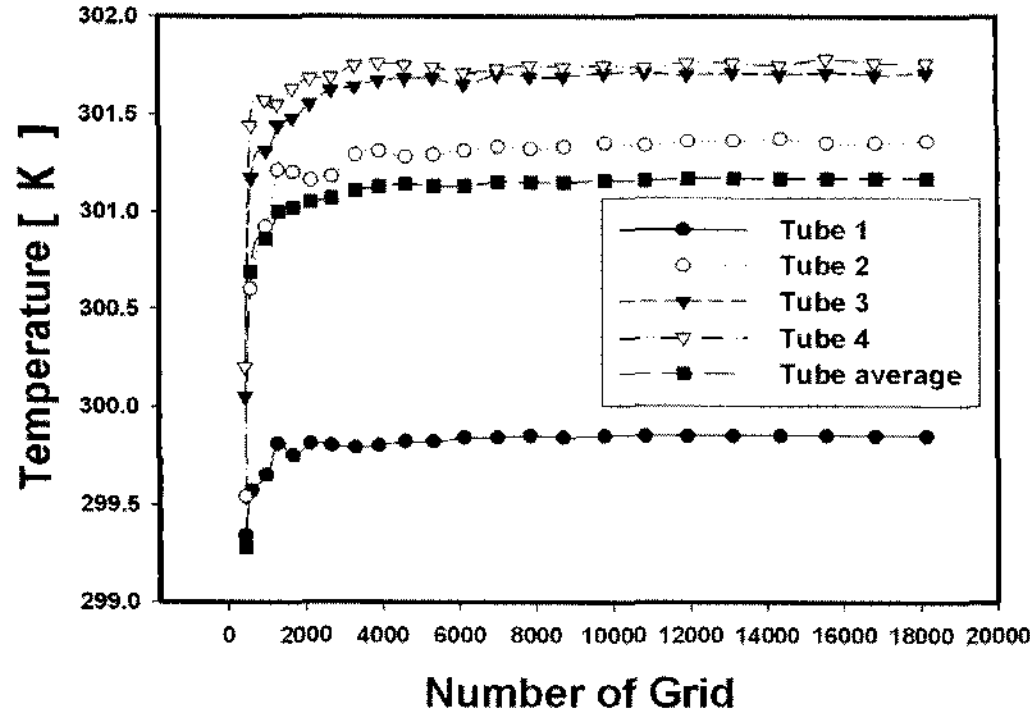


Fig. 3 Temperature distribution on number of grid

가로 10 cm, 세로 4 cm의 공기가 흐르는 실린더에 직경 1 cm의 4개의 관이 설치되어 30°C의 열을 발생하고, 10°C의 공기가 왼쪽에서 오른쪽으로 흐를 때, 각 관의 온도를 측정하고 평균값을 구하였다. Fig. 3은 격자수의 변화에 대한 각 관에서의 온도변화이고, Fig. 4는 각 관들의 온도값을 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 격자수가 약 4500개 이상을 넘어가게 되면 더 이상의 온도 변화가 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 격자수 4500개 이상의 격자에서 수치해석을 하여야 한다는 것을 의미하며, 더 큰 형상으로 수치해석할 경우 cm<sup>2</sup> 당 112.5개의 이상의 격자수가 형성되어야 한다는 결론을 내릴 수 있다. 본 연

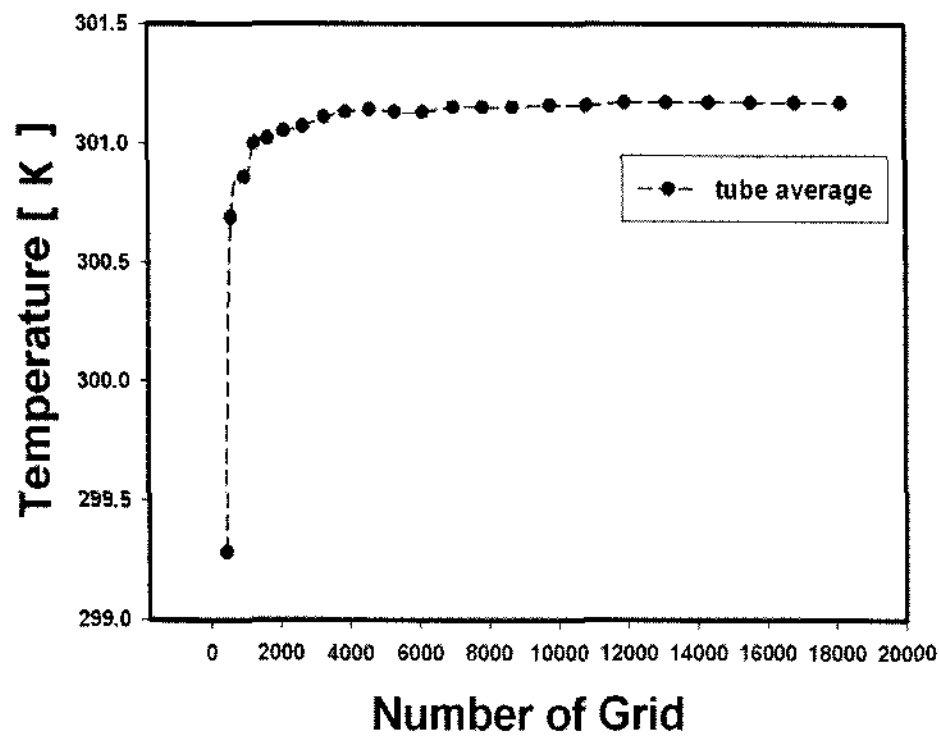


Fig. 4 Average temperature on number of grid

구에서 사용된 형상의 총 격자수는 725480개로서, cm<sup>2</sup> 당 약 131.9개의 격자수를 형성함으로써 격자유효성 검사를 만족하였다.

#### 4. 수치해석 결과 및 토의

3 kW급 멀티패스 냉각탑의 기본적인 조건으로 입구 공기속도 3 m/s, 공기온도 29 °C, 분무수의 온도 32 °C에서 관의 외경을 15.88, 19.05, 25.4 mm의 3가지 경우로 수치해석 하였다. 1패스와 2패스로 나누어 수치해석 하였으며 관 배열은 앞에서 말한 것과 같이 삼각배열로 하였고, 행과 열은 15.88 mm의 경우 10× 10, 19.05 mm의 경우 8× 12, 25.4 mm의 경우는 6× 14로 배치하였다. 밀폐식 냉각탑에서는 코일 높이에 따라 열 유속이 변화하게 되는데 이 변화는 Gan 등이 제시한 다음과 같이 정의된 식에서 구할 수 있다.

$$q_i = \frac{2}{3} \left( \frac{N+i-2}{N-1} \right) q_m \quad (5)$$

여기서  $q_i$ 는 관의 열 수  $i$ 에 대한 열 유속 (W/m<sup>2</sup>),  $q_m$ 은 열교환기의 열 유속 (W/m<sup>2</sup>),  $N$ 은 전체 관의 열 수이다. 이 식을 바탕으로 멀티패스 냉각탑의 각 관의 열마다 대입시킨 값이 Fig. 5와 Fig. 6에 잘 나타나 있다. 각 관의 열에 대입된 값으로부터 우리가 구하고자 하는 열교환기 입, 출구 온도를 측정할 수 있다. 기본적인 열교환기의

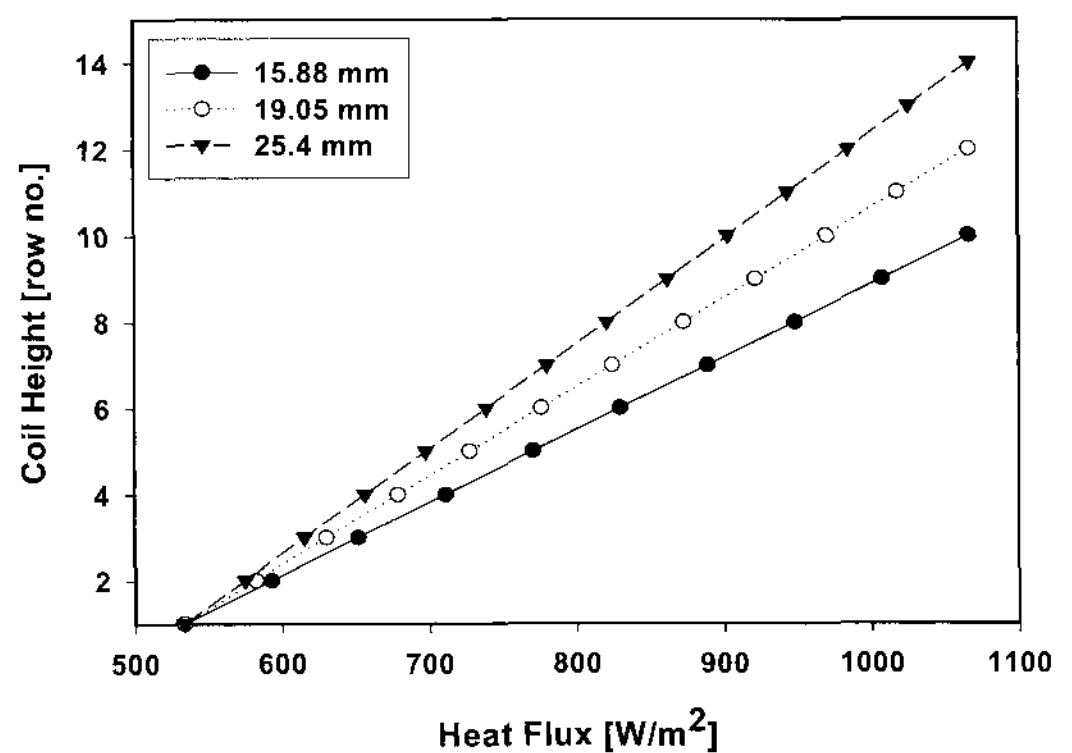


Fig. 5 Temperature distribution with arrangement of tube of one pass closed circuit cooling tower

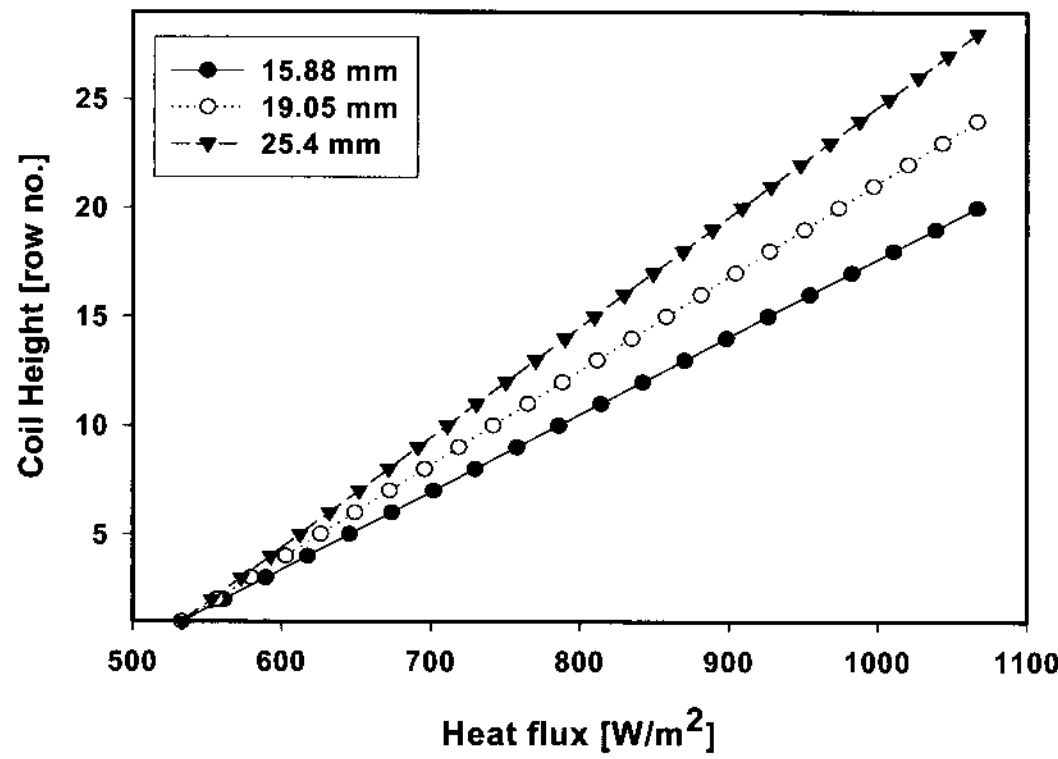


Fig. 6 Temperature distribution with arrangement of tube of two pass closed circuit cooling tower

열 유속 값은  $800 \text{ W/m}^2$ 을 사용하였고, 가장 위의 열에 약  $1066.7 \text{ W/m}^2$ , 가장 아래 열에 약  $533.3 \text{ W/m}^2$ 로  $533.4 \text{ W/m}^2$  정도의 차이를 보였다.

관의 배열은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 삼각배열과 사각배열 중 사각배열의 냉각능력이 삼각배열의 냉각능력보다 약 2배 정도 떨어지기 때문에 사각배열의 수치해석은 생략하였고 삼각배열의 경우만 수치해석 하였다.

Fig. 8는 같은 조건에서의 관경에 따른 코일 높이별 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 세 가지 관경의 조건에서 온도차는 15.88 mm의 경우  $4.4^\circ\text{C}$  정도로 25.4 mm의  $4.0^\circ\text{C}$ 보다 약간 더 큰 온도차를 보였다. 미약한 차이지만 냉각능력은 15.88 mm의 경우가 25.4 mm보다  $624 \text{ kcal/h}$ 만큼 더 좋은 냉각능력을 보였다.

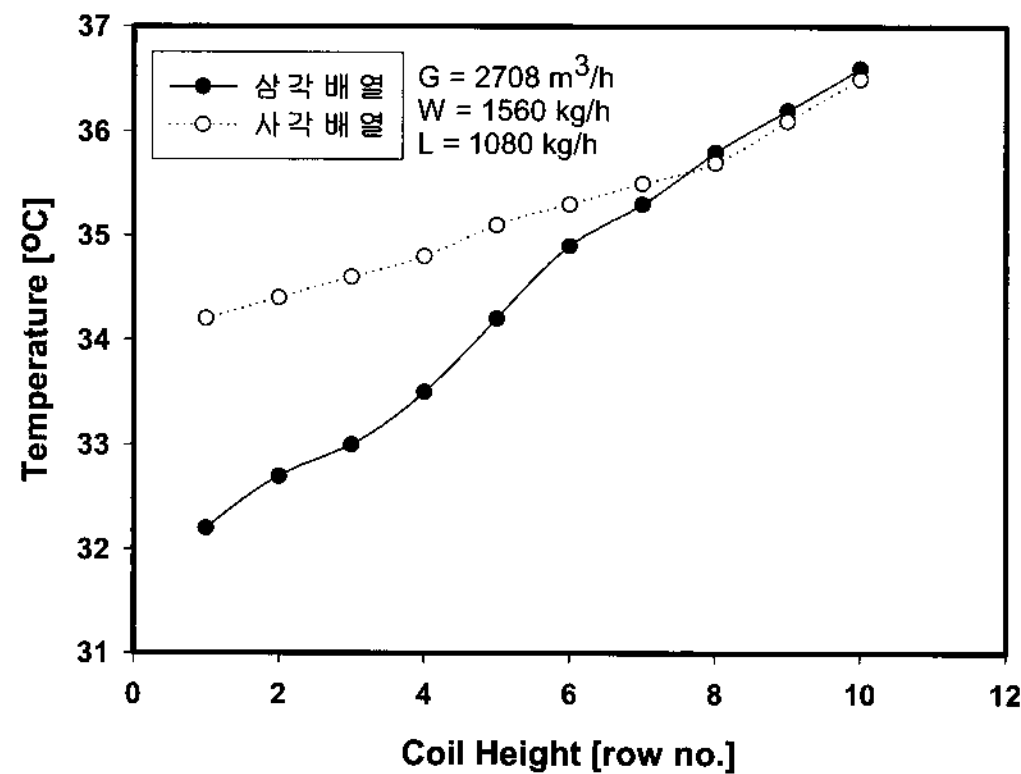


Fig. 7 Temperature distribution with arrangement of tube

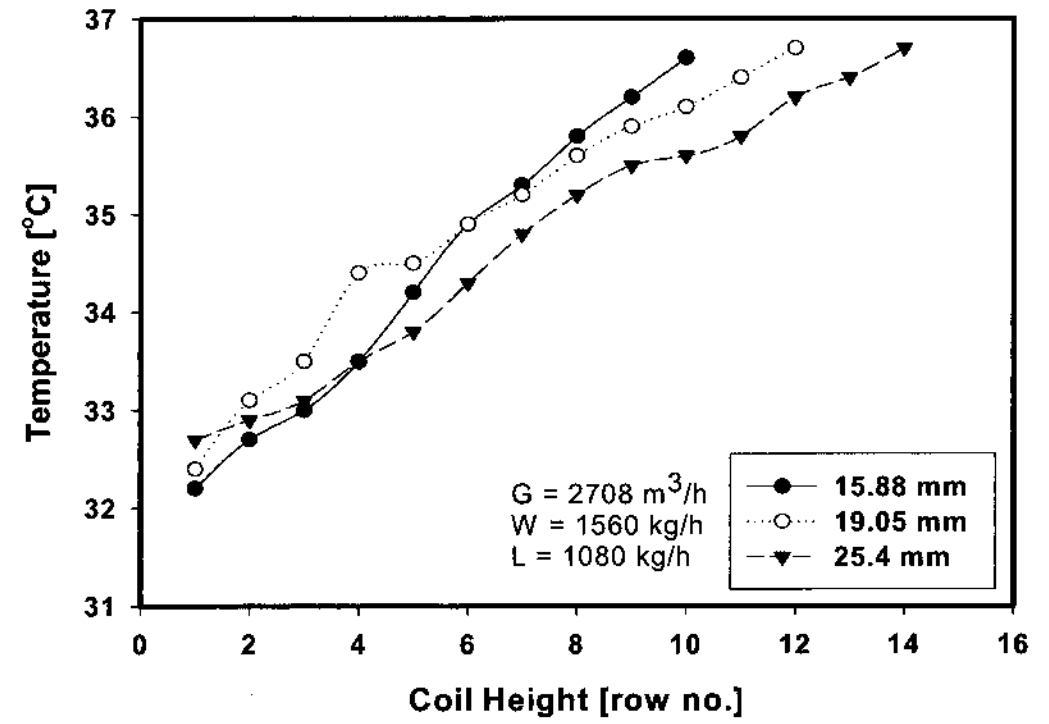


Fig. 8 Temperature distribution with coil height of one pass closed circuit cooling tower

Fig. 9는 Fig. 8의 조건과 동일한 2패스 냉각탑의 변화이다. 여기서는 온도차가 15.88 mm일 때  $5.5^\circ\text{C}$ 로서  $4.7^\circ\text{C}$ 의 변화가 측정된 25.4 mm의 경우보다  $0.8^\circ\text{C}$ 의 차이를 보이고, 냉각능력도  $1248 \text{ kcal/h}$ 만큼 더 좋게 나타났다. 이는 냉각수가 코일을 지나감에 따라 15.88 mm일 때가 냉각탑 내부의 공간을 효율적으로 사용하는 것을 알 수 있다. 1패스와 2패스 결과 모두 관 외경이 15.88 mm일 때 냉각능력이 가장 우수하게 나타났으며 이것은 관과 관 사이가 세밀하여 분무수의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 또한 Fig. 10에서 보는 것과 같이 냉각능력에 대해 1패스의 경우와 2패스의 경우를 살펴보면 15.88 mm일 때 냉각능력은 1패스의 경우  $6864 \text{ kcal/h}$ , 2패스의 경우  $8580 \text{ kcal/h}$ 로 2패스의 경우가 1패스의 경우보다  $1716 \text{ kcal/h}$  더 좋은 냉각능력을 보였으며, 19.05 mm

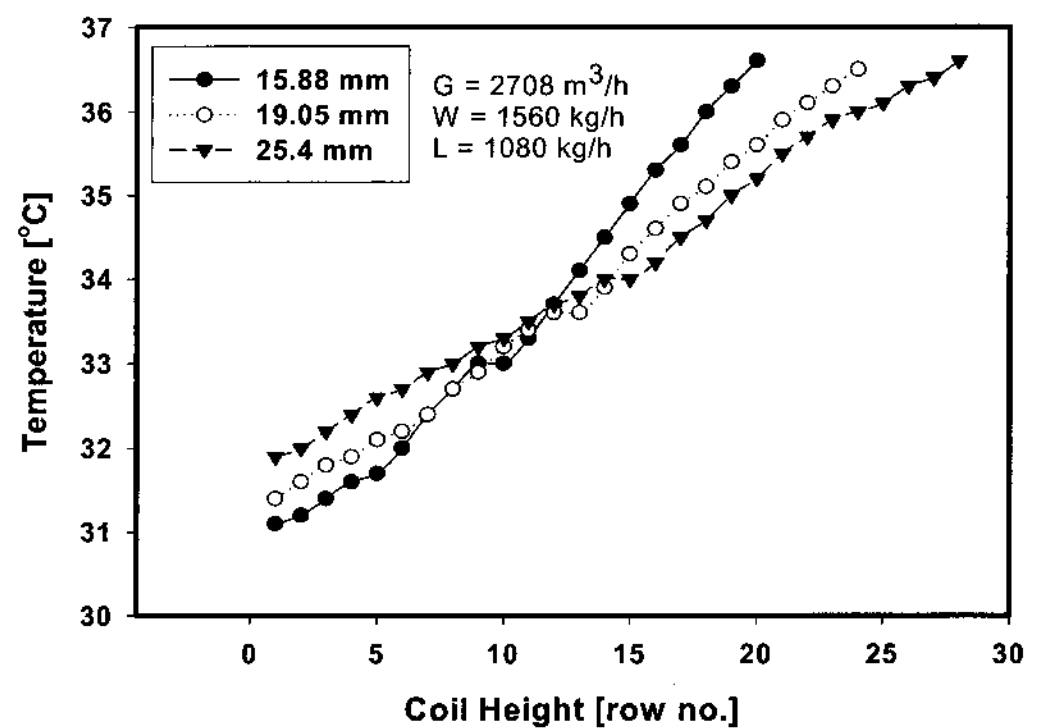


Fig. 9 Temperature distribution with coil height of two pass closed circuit cooling tower

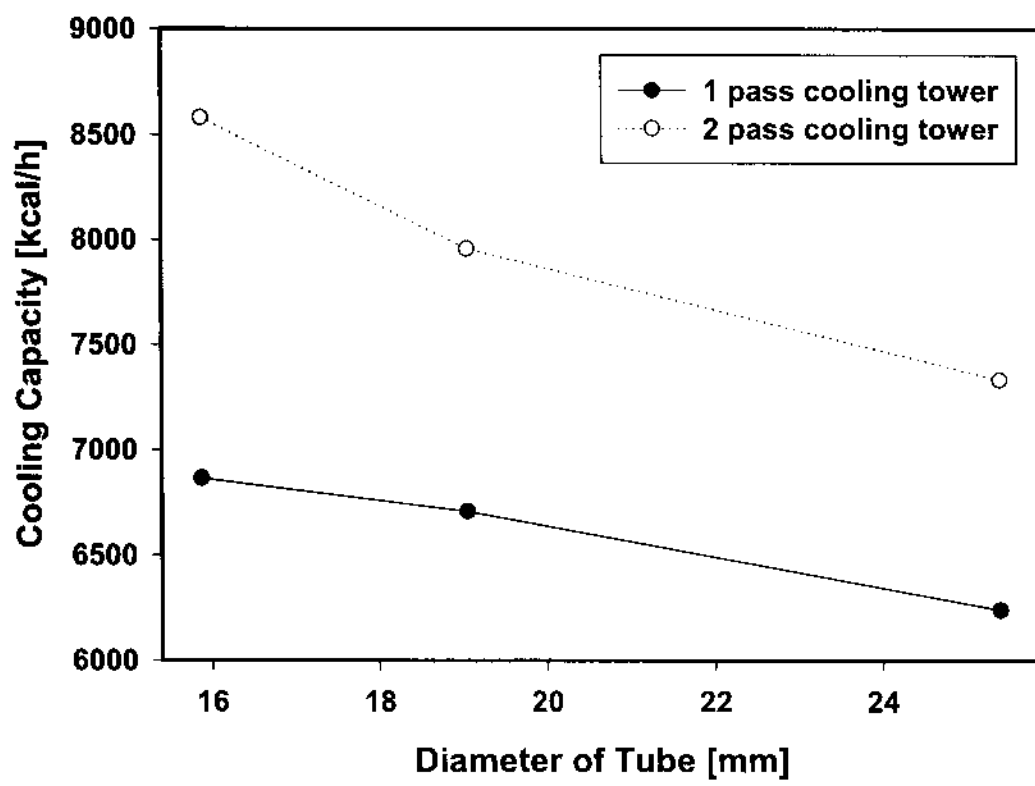


Fig. 10 Cooling capacity with diameter of tube of multi pass closed circuit cooling tower

와 20.4 mm의 경우도 2패스일 때가 1패스일 때 보다 각각 1248 kcal/h, 1092 kcal/h 정도로 냉각능력이 향상됨을 알 수 있다.

### 5. 결 론

멀티패스 밀폐식 냉각탑의 관의 배열과 관경에 따른 온도변화와 냉각능력에 대하여 연구하였다. 수치해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

관의 배열에 따른 냉각탑의 온도변화는 삼각배열 일 때가 사각배열 일 때보다 2배정도 좋은 성능을 나타내었다. 관의 관경에 따른 변화에서는 1패스에서 15.88 mm의 경우가 25.4 mm 경우보다 약 9%정도 더 좋은 냉각능력을 보였고, 2패스에서는 15.88 mm의 관경이 25.4 mm 보다 약 14.5% 정도 더 좋은 성능을 나타내었다. 같은 15.88 mm에서의 1패스와 2패스의 경우를 비교하였을 경우에는 2패스 일 때가 1패스보다 약 20%정도 더 우수한 냉각능력을 보이므로, 온도변화에 있어서 사각배열 보다는 삼각배열이, 1패스 보다는 2패스가 더 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

### 후 기

이 논문은 2005년도 부경대학교 연구년수 지원에 의하여 연구되었음

### 참고문헌

- [1] Lichtenstein, J., Performance and selection of mechanical draft cooling towers, Trans. ASME, Vol.65, pp. 779, 1943.
- [2] Baker, D. R. and Shryork, H. A, A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance, J. of Heat Transfer, pp. 339-350, 1961.
- [3] Parker R. O. & Treybal R. E., Chem. Eng. Progress Symp. Series, Vol. 57, No. 32, pp. 138, 1962
- [4] G. Gan, S. B. Riffat, L. Shao and P. Doherty, Application of CFD to closed-wet cooling towers, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 79-92, 2001
- [5] FLUENT 6.2.16, Fluent Incorporated, 1998

### 저 자 소 개



#### 김은필(金恩弼)

1962년생. 1987년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1991년 미국피츠버그대학교 기계공학과 졸업(공학석사). 1995년 미국피츠버그대학교 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 부경대학교 기계공학부 부교수