

건식 열교환기를 이용한 백연방지 냉각탑 성능의 수치해석적 연구

김 병 조, 최 영 기[†]

중앙대학교 기계공학부

A Numerical Study on the Performance Analysis of Plume Abatement Cooling Tower with Dry Type Heat Exchanger

Byung Jo Kim, Young Ki Choi[†]

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received April 30, 2003; revision received October 17, 2003)

ABSTRACT: This study treats the analysis of the performance and the design of plume abatement wet/dry cooling tower with dry type heat exchanger using a numerical method. A two-dimensional analysis is performed using the finite volume method for mechanical draft counterflow and crossflow tower. For a coupling problem between water and air system, a turbulent two phase flow is considered. Effectiveness-NTU method is used for modeling of the dry type heat exchanger. The parameter change simulations of the outer wall shape, the relative flowrate of air, and attachment of an air mixer are performed to examine the effect on plume abatement. It is found that if the relative air flowrate ratio and the adequate air mixer type are chosen well in addition to the ratio of water to air flowrate, the loss of the cooling capacity and the additional cost are reduced and the plume is abated.

Key words: Cooling tower(냉각탑), Plume abatement(백연방지), Dry type heat exchanger(건식 열교환기), Effectiveness-NTU method(유효도-NTU법)

기 호 설 명

C : 열용량 [J/kg^oC]
 f : 공기 유동에 대한 저항 [N/m³]
 h : 공기 엔탈피 [J/kg]
 J : 좌표 변환의 Jacobian
 m : 수증기 또는 물의 질량 [kg]
 P : 압력 [Pa]

\dot{q} : 열전달률 [W]
 T : 공기의 온도 [°C]
 t : 물의 온도 [°C]
 U : 속도 [m/s], 총괄 열전달계수 [W/mK]
 x, y : Cartesian 좌표계의 수평 및 수직 방향
 x^i : 비직교 좌표계
 y^i : Cartesian 좌표계

그리스 문자

α : Contravariant 벡터의 Cartesian 성분
 Γ : 확산계수

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5281; fax: +82-2-826-2510

E-mail address: ykchoi@cau.ac.kr

δ : Kronecker 델타함수
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

상첨자

''' : 단위체적당

하첨자

AM : 공기 믹서
amb : 주변의
db : 건구
dry : 건조한 부분
eff : 유효
F : 물
G : 습공기
in : 입구
max : 최대값
min : 최소값
out : 출구
v : 기체

1. 서 론

산업용 공기조화 시스템과 열교환기 등에서 응축기 내의 냉매 냉각을 위한 열소산은 필수적이다. 이를 위해 때로는 자연대류, 강제대류에 의한 대기로의 직접적인 열전달이 가능하지만, 일반적으로 차가운 냉각수를 통한 열교환이 경제적이다. 대부분의 환경조건에서 냉각수를 순환시켜 재사용하는데 그중에서 주위 외기를 이용하여 냉각수와 외기의 직접 접촉을 통해 원하는 냉각효과를 얻을 수 있는 냉각탑의 설치가 일반적이다. 냉각탑은 경제적으로 폐열을 제거할 뿐 아니라 대기 및 수질오염을 감소시키는 오염방지장치의 성격도 띠고 있다. 최근 냉각탑은 석유화학, 제철, 식품제조, 냉동, 공기조화 등 광범위한 분야에서 사용되고 있으며 점점 그 적용범위가 넓어지며 수요가 늘고 있다. 따라서 냉각탑 설계에 대한 기술적측면과 정확한 성능예측이 필수적이라 하겠다.

한편, 최근 들어 환경오염 문제에 대한 사회적 인식변화와 관련 법규의 강화로 인해 대부분 산

업 분야에서 환경오염 문제가 설계에 우선적으로 고려되는데, 냉각탑의 경우 백연방지에 대부분의 관심이 집중되고 있다. 백연이란 냉각탑 출구에서 방출되는 포화습공기가 주위의 차가운 대기와 혼합되는 과정에서 수증기의 재응축에 의해 생성되는 과포화상태의 일종의 안개를 말하는 것으로 엄밀히는 오염원은 아니고 시각적 방해물일 뿐이다. 하지만 공항 근처 등 입지적 조건과 함께 일반인의 관념상 백연방지가 요구되고 있는 상황이다. Buss⁽¹⁾는 백연방지조건을 이론적으로 설명하였고, Campbell⁽²⁾은 핀 부착형 건식 열교환기가 설치된 냉각탑에 대해 습공기선도를 이용하여 도식적인 방법으로 백연방지조건을 계산하였다. 최근 들어 Miura et al.⁽³⁾은 새로운 습/건식 조합형 충전물을 제시하여 백연방지를 예측한 바 있다.

하지만 기존의 대부분 연구들은 물과 공기의 유동을 단순화한 Merkel 방정식⁽⁴⁾을 가지고 해석하여 그 실제적 응용에 한계가 있고, 백연발생 예측도 대부분 도식적인 방법에 의존하고 있는 상황이다. 본 연구에서는 수분손실과 물과 공기 간의 커플링이 고려된 2차원 난류 이상 유동방정식을 일반 비직교 경계 고정 좌표계에 적용하고 유한체적법을 사용하여 탑 내부의 유동장과 온도장을 해석하고자 한다. 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 채택하여 난류유동을 고려하기로 하며 증발에 의한 습도변화로 생기는 커플링 문제를 해결하기 위해 공기의 습도비 분율방정식과 엔탈피방정식을 운동량방정식과 동시에 해석한다. 건식 열교환기 부분은 유효도-NTU법을 사용하여 해석하였다. 먼저 해석결과의 타당성을 검토하기 위해 실험 및 상용 프로그램 결과와 비교하고, 주어진 운전조건에서 최소한의 추가비용으로 백연을 효과적으로 방지하는 방안을 고찰한다.

2. 이론적 해석

2차원 해석의 기본개념은 계산영역을 공기의 유동과 물의 유동으로 구분하고 각 유동장을 연속된 유동으로 가정하여 계산, 물과 공기 간의 열 및 물질전달을 고려하는 것이다. 두 유동장에 대해 일반 좌표계에 대한 시간 평균된 지배방정식을 세우고 물과 공기 간의 열 및 물질전달을 생성항 처리하여 계산하였다. 난류유동을 고려하기 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.1 지배방정식

2.1.1 공기의 지배방정식

- 질량 평형방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^j (\rho U_m)] = \dot{m}_v''' \quad (1)$$

- 운동량 평형방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^j (\rho U_m U_i - \tau_{mi} + P \delta_{mi})] = -f_i - (\rho - \rho_{amb}) g \delta_{1i} \quad (2)$$

- 엔탈피 평형방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} \left[J \alpha_m^j \left(\rho U_m h_G - \Gamma_{eff} \frac{\partial h_G}{\partial x^n} a_m^n \right) \right] = \dot{q}''' \quad (3)$$

- 수증기 분율 평형방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} \left[J \alpha_m^j \left(\rho U_m f_G - \Gamma_{eff} \frac{\partial f_G}{\partial x^n} a_m^n \right) \right] = \dot{m}_v''' \quad (4)$$

2.1.2 물의 평형방정식

- 질량 평형방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^1} [J \alpha_1^1 (\rho_F U_F)] = -\dot{m}_v''' \quad (5)$$

- 엔탈피 평형방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^1} [J \alpha_1^1 (\rho_F U_F h_F)] = -\dot{q}''' \quad (6)$$

식(1)~(6)에 대한 더욱 자세한 설명과 $k-\epsilon$ 난류 모델 상수 등은 참고문헌⁽⁵⁾에 나와 있다.

2.2 백연방지 원리

백연방지를 위해서는 방출되는 포화 습공기를 포화곡선 아래쪽 영역으로 끌어내려야 한다. 백연발생을 억제하기 위해 흔히 사용되는 건식 열교환기가 부착된 직교류형 냉각탑을 Fig. 1에 나타내었다. 건식부를 통과한 공기는 절대습도의 증

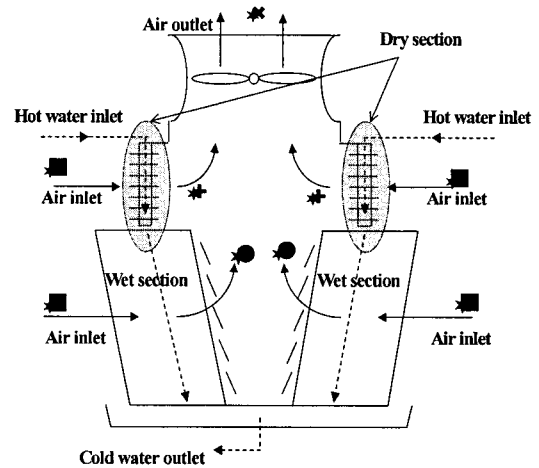


Fig. 1 Schematic diagram of conventional cross-flow wet/dry cooling tower.

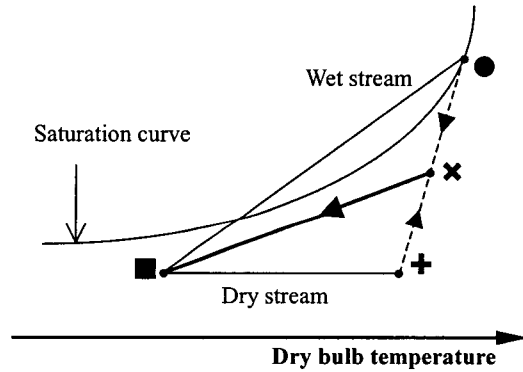


Fig. 2 A skill for plume abatement.

가 없이 가열되어 습식부 통과공기와 냉각탑 내부에서 서로 혼합, 불포화상태로 배출되므로 Fig. 2에서 보듯이 작동곡선이 포화곡선과 만나지 않는다. 따라서 백연발생 가능성은 낮아진다.

2.3 건식 열교환부의 해석

본 연구에서 사용한 건식 열교환기는 Fig. 1에서 보듯이 환형 핀이 부착된 냉각수 파이프 다발로 구성되어 있다. 두 유체가 진행되는 방향이 직교류형 이므로 직교류형 열교환기 해석에 널리 쓰이는 유효도-NTU법을 사용하여 열교환기 출구에서의 물과 공기, 두 유체 온도를 쉽게 계산할 수 있다.⁽⁶⁾

$$q_{max} = C_{min}(t_{in} - T_{db,in}) \quad (7)$$

$$NTU = UA_{dry}/C_{min} \quad (8)$$

유효도는 NTU와 열용량비의 함수로 표현 가능하며 실험적으로 제시되어져 있는 관계식을 사용하여 최종적으로 물과 공기의 온도, 공기의 엔탈피는 다음과 같고 이 값들은 수치해석상에서는 건식 열교환부에서의 초기조건으로 사용된다.

$$t_{out} = t_{in} - q_{dry}/C_{water} \quad (9)$$

$$T_{db,out} = T_{db,in} + q_{dry}/C_{air} \quad (10)$$

$$h_{out} = h_{amb} + q_{dry}/G \quad (11)$$

3. 수치해석

3.1 냉각탑 형상 및 격자계

본 연구에서 사용한 냉각탑의 형상은 대향류형의 경우 범양냉방의 BACT-TIF80을, 직교류형의 경우 참고문헌⁽⁷⁾을 기초로 건식 열교환부를 추가하였다. 각 냉각탑에 대한 대략적 형상과 구조를 각각 Fig. 3과 Fig. 1에 나타내었다. 자세한 형상 치수는 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용한 격자계는 2차원 비직교 좌표계로서 대향류형에 대해 x, y 방향으로 각각 138×55 , 직교류형에 대해 80×60 의 비균일 격자를 구성하였고 비엇갈림 격자계를 사용하였다. 압력장을 구하기 위해 SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked

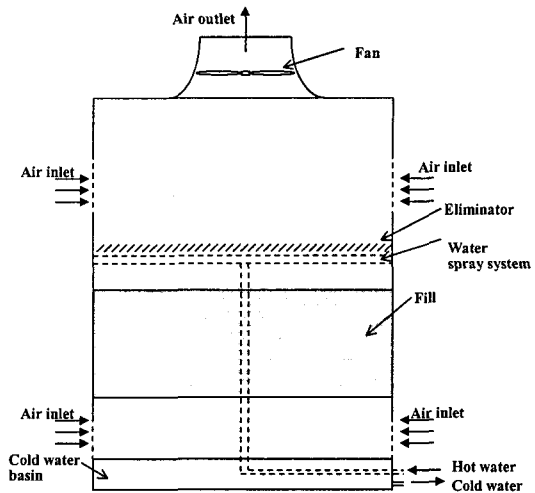


Fig. 3 Forced draft counterflow wet/dry tower.

Equation) 알고리즘을 사용하였다. 물과의 열전달로 인한 공기의 엔탈피 변화와 물질전달로 인한 공기의 습도비 분율변화는 각각 공기의 엔탈피 평형방정식, 습도비 분율방정식에 생성항 처리를 해주었다. 또한 물질전달에 따른 질량 평형을 고려하기 위해 질량 평형방정식이 포함된 압력방정식에 생성항 처리를 해주었다.

3.2 경계조건

입구 경계조건으로 습식공기는 주어진 외기의 상태조건에서 엔탈피와 수증기 분율을 계산하였고 건식 공기 및 물은 2.3절에서 구한 건식 열교환기 출구에서의 온도와 엔탈피, 수증기 분율을 냉각탑

Table 1 The specifications of the cooling tower

Counterflow tower		Crossflow tower	
Length at the base	3.10	Length at the base	9.70
Mean half width	2.66	Mean half width	10.97
Radius at the exit	0.90	Radius at the exit	3.35
Tower height	5.00	Tower height	16.98
Wet section inlet port height	0.67	Fill height	11.98
Distance between wet inlet and fill	0.11	Fill width	5.15
Fill height	0.78	Inclined angle of the inlet louver	8°
Spray height	0.37		
Distance between spray and dry inlet	0.30		
Dry section inlet height	0.50		

Unit except inclined angle : [m]

Table 2 Operating conditions for the present study

	Counterflow tower	Crossflow tower
Dry bulb temperature [°C]	18.00	15.00
Wet bulb temperature [°C]	17.50	14.00
Ambient pressure [kPa]	101.325	101.325
Inlet water temperature [°C]	37.00	37.40
Water mass flow rate [kg/s]	20.00	265.00
Air mass flow rate [kg/s]	8.00	375.67
Air mass flow rate with wet section inlet [kg/s]	6.40	252.536

내부계산을 위한 입력값으로 사용한다. 속도장의 경우는 균일유동으로 가정하였다. 출구 경계조건으로 계산영역 내의 전체적인 연속방정식을 만족시키기 위해 출구 경계에서의 질량유속이 입구에서의 질량과 증발에 의한 질량의 합과 대응되도록 처리하였다. 대칭 경계조건으로 대칭면에서 수직 한 방향으로 모든 종속변수의 구배가 없도록 하였고, 벽면 경계조건으로는 속도변수에 대해 점착조건을, 다른 스칼라 변수들은 단열 처리하였다.

4. 해석결과

4.1 프로그램 검증

해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 참고문헌⁽⁷⁾의 실험값 및 상용 프로그램 결과⁽⁸⁾와 비교하였다. 백연방지탑에 대한 실험결과를 구할 수 없어서 일반적 직교류형 습식 냉각탑에 대해 비교하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 해석결과

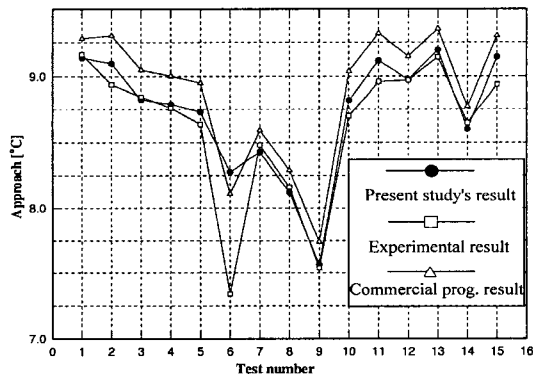


Fig. 4 Comparison of present result with experimental⁽⁷⁾ and commercial program result.⁽⁸⁾

와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 백연방지탑에 대해 다음과 같이 해석을 수행하였다.

4.2 강제 통풍식 대향류형 냉각탑에 대한 해석

해석에 사용된 형상 치수와 운전조건은 각각 Table 1과 Table 2와 같으며, 충전물은 물결모양 석면판을 사용하였다. 이 경우 물의 평균 출구온도, 냉각범위, 어프로치, 냉각탑 효율, 증발률을 구하였으며 Table 3에 정리하였다. Fig. 5는 유선의 분포를 나타내고 있다. 그림 상에서 x축은 탑의 높이를, y축은 폭을 미터단위로 나타낸다. 유선의 분포형태로 보아 탑 중앙으로 갈수록 밀도가 낮아짐을 예측할 수 있다. 습식 공기유입부와

Table 3 Calculation result for the counterflow tower

Average water outlet temperature [°C]	33.03
Range in dry heat exchanger [°C]	0.37
Range in wet section [°C]	3.60
Total range in tower [°C]	3.97
Approach [°C]	15.53
Evaporation rate [%]	0.31
Cooling tower effectiveness	0.20

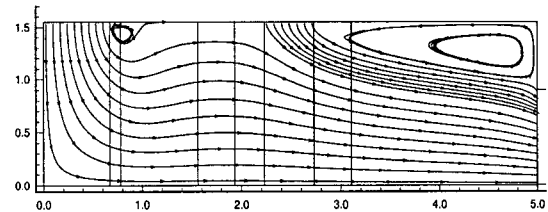


Fig. 5 Streamline of air.

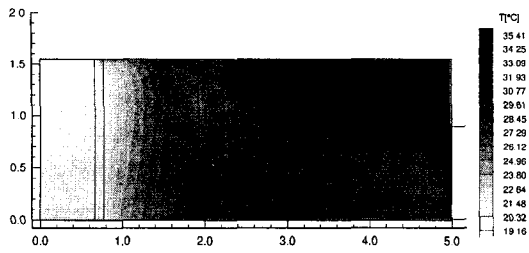


Fig. 6 Isothermal contour of air.

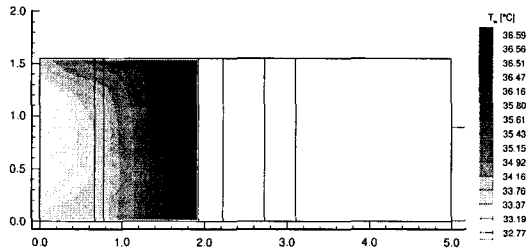


Fig. 7 Isothermal contour of water.

충전물 사이의 벽면 부근에서 순환현상이 나타나고 있다. 이것은 유입되는 외기의 방향과 탑 내의 주유동 방향과의 급격한 차이에 의한 것으로 인해 벽 표면의 부식을 야기하고 소음과 진동의 원인이 되며 특히 공기의 자연스런 흐름을 방해하여 냉각효과를 떨어뜨리는 역할을 한다. 또한 냉각탑 상부 플레넘 부분에서 발생하는 순환현상은 냉각능력 감소와는 무관하지만 역시 소음 진동의 원인이 된다. Fig.6은 공기의 온도장을 나타내고 있다. 습식 공기가 유입된 후 탑 중심방

향으로 온도가 서서히 상승하고 충전물을 통과하면서 열교환이 촉진, 주유동방향으로 온도가 급격히 상승하는 분포를 보이고 있다. 건식 공기의 유입 후 두 공기가 완전히 혼합되지 못하고 습식 공기는 탑의 중심부분으로, 건식 공기는 출구의 바깥쪽 부분으로 뚜렷한 온도층을 이루면서 배출되고 있다. Fig.7은 물의 온도장을 나타내고 있다. 분무된 냉각수가 충전물 영역에 도달하기 전에는 거의 변화가 없다가 충전물을 통과하면서 진행방향으로 급격히 감소함을 알 수 있다. Fig.8은 공기 출구에서의 물성치를 습공기 선도 상에 나타낸 것이다. 출구에서의 평균값을 기준으로 공기 작동선이 포화곡선과 교차하지 않으므로 백연은 발생하지 않는다. 그러나 출구의 중심부 쪽에서 배출되는 공기는 건식 공기의 유입에도 불구하고 거의 포화상태로 배출되고 있어서 그림에서 보듯이 백연이 발생하고 출구의 바깥쪽 부분에서는 백연이 발생되지 않는다. 앞서 언급한 계산조건에서 백연면적비(백연발생 면적과 출구 면적과의 비)가 30.44%로 나타났다. 이러한 부분 백연이 발생하는 것은 충전물을 통과한 습식 공기의 속도에 비해 건식 공기의 유입속도가 상당히 작아서 건식 공기가 탑 중심부까지 도달하지 못하고 두 공기가 혼합되지 않은 상태에서 두 개의 서로 다른 공기층을 형성하며 출구로 그대로 방출되기 때문이다. 상황에 따라서 이러한 부분 백연은 백연이 더 높은 곳까지 상승하게 되어 더 큰 문제를 일으키므로 공기가 잘 섞이게 하여 이러한 현상이 일어나지 않도록 해야 한다.⁽³⁾

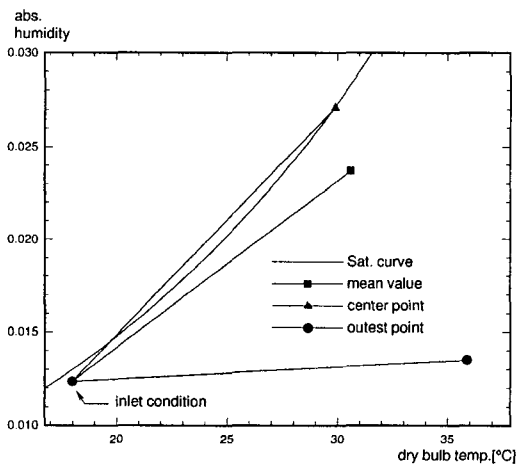


Fig. 8 Operating line on psychrometry chart.

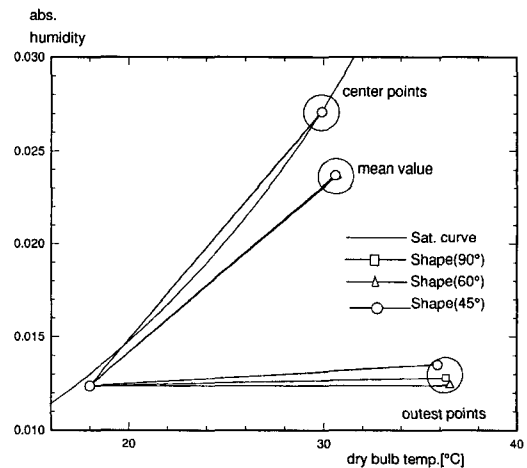


Fig. 9 Operating line with varying shape.

이를 위해 먼저 냉각탑 상부 구조물의 형상 변화에 따른 유동장 및 온도장의 변화를 살펴보기 위해 동일 운전조건에서 건식 공기의 유입방향과 외벽이 이루는 각이 각각 60°, 45°인 경우를 계산 90°인 경우와 비교하였다. Fig. 9에서 보듯이 3가지 경우 모두 출구의 평균값을 기본으로 하면 백연이 발생하지 않지만, 부분 백연은 일어나는 것을 알 수 있으며 백연 면적비는 45°와 60°일 때 각각 37.35%, 44.44%로 모두 90°인 경우의 30.44%보다 높게 나타났다. 이것은 외벽의 기울어짐에 따라 건식 공기의 유속이 증가하여 출구방향으로 외벽이 굴절되는 곳에서 박리가 발생, 이 부분의 압력이 최소가 되고 그로 인해 외벽과 더 가까운 쪽으로 습식 공기가 흘러가게 되므로 결과적으로 출구에서 습식 공기가 차지하는 비중이 증가하기 때문이다. 따라서 경사지지 않은 외벽 형상이 재순환으로 인한 소음 진동이 있지만 백연방지에는 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

부분 백연을 위한 또 다른 방법으로 습식 공기 유량비 조절이 있는데 이를 살펴보기 위해 동일조건 하에서 전체 공기유량 중 습식 공기의 유량이 각각 100%, 80%, 60%, 50%, 40%인 경우를 계산하였다. 상부 구조물은 외벽이 경사지지 않은 형태만 고려하였다. 먼저 백연발생을 살펴보면 Fig. 10에서 보듯이 출구의 평균값을 기준으로 하면 습식 공기유량이 전체 유량의 100%인 경우 백연이 발생하지만, 나머지 경우에는 공기 작동선이 포화곡선과 점점 멀어지므로 백연이 발생하지 않는다. 하지만 부분 백연발생은 역시 발생하며 그 값들을 Fig. 10에 나타내었다. 건식 공기

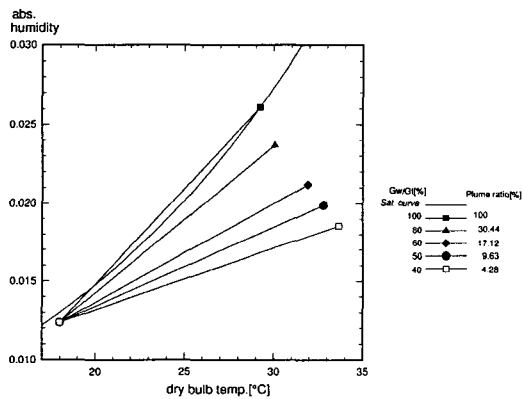


Fig. 10 Operating line with varying wet air flowrate.

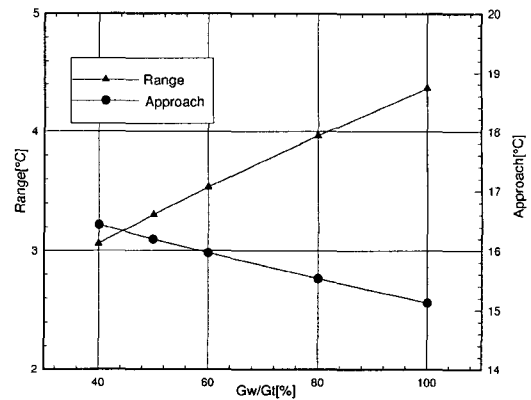


Fig. 11 The effect of wet air flowrate.

의 유량이 증가할수록 백연 감소의 효과는 상당하지만, Fig. 11에서 보듯 레인지 역시 많이 감소함을 알 수 있다. 즉, 백연방지를 위해 건식 공기의 유량을 증가시키는 경우 백연방지효과는 어느 정도 있지만, 냉각탑 본래의 목적인 냉각수에 대한 냉각효과가 너무 많이 감소하여 결국 설계용량을 만족시키려면 냉각탑의 외형을 크게 하거나 설치대수를 늘려야 하는 등 추가비용이 많이 증가하는 결과를 초래한다. 따라서 이 방법은 적용에 제한성이 있음을 알 수 있다.

냉각능력 손실 없이 약간의 추가비용만으로 백연을 제거하는 효과적인 방법으로 공기혼합기(Air

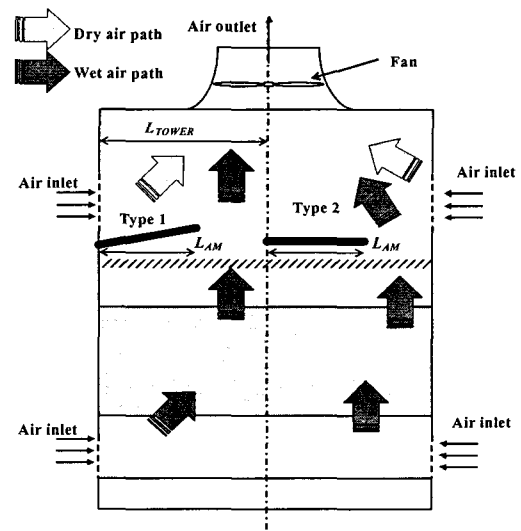


Fig. 12 Schematic diagram of air mixer type 1 and type 2.

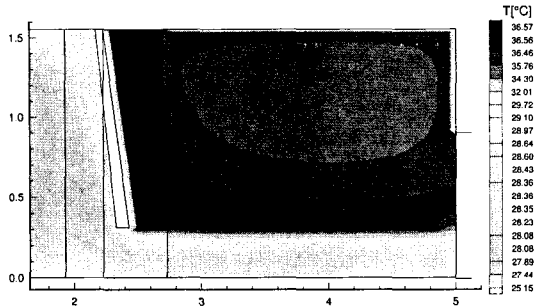


Fig. 13 Isothermal contour of air with Type 1 at $L_{AM}/L_{TOWER}=0.8$.

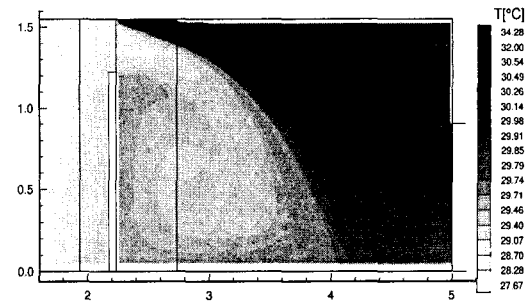


Fig. 14 Isothermal contour of air with Type 2 at $L_{AM}/L_{TOWER}=0.8$.

mixer) 설치가 제안된다. 현재 현장에서 사용되고 있는 공기혼합기는 Fig.12에서 보듯이 건식 공기유입부 밑 쪽에서 탑 출구 쪽으로 설치되는 형태다(Type 1). 본 연구에서는 혼합기의 길이와 탑의 반경방향 길이비(L_{AM}/L_{TOWER})가 0.2, 0.4, 0.6, 0.8인 경우에 대해 살펴보았다. 계산조건은 Table 2와 동일하다. 길이비가 0.2인 경우 혼합기 설치효과가 미미하지만 길이비가 0.4, 0.6, 0.8로 증가할수록 건식 공기의 탑 중심부로의 유입이 증대되어 백연발생비가 각각 20.66%, 18.37%, 5.97%로 감소한다. 그러나 길이비가 0.8인 경우라도 백연발생비는 작아도 부분 백연방지에는 실질적으로 효과적이지 못한다 그 이유는 Fig.13에서 보듯이 혼합기를 통과한 습식 공기의 빠른 유속에 의해 두 공기가 완전히 혼합되지 못하고 큰 온도차를 가지는 두 개의 공기층을 이룬 채로 방출되므로 백연의 발생면적은 작아진 반면 백연농도는 증가하여 더 높은 고도까지 짙은 백연이 생성되기 때문이다. 즉, 이와 같은 모양의 공기혼합기는 실제로 두 공기를 혼합시켜 준다기보다는 단지 건식 공기가 탑 중심부까지 유입되도록, 그리고 출구 쪽에서 많은 면적으로 배출되도록 해주는 안내 기의 역할만 한다는 것을 알 수 있다. 한편 혼합기의 길이변화에 따른 냉각능력의 변화는 혼합기가 없는 경우에 비해 거의 없지만, 혼합기에 의한 습식 공기의 전체적인 유동정체로 길이비가 증가할수록 충전물 영역에서의 압력강하는 약간 증가하였다.

두 공기의 혼합이 잘 이루어지도록 또 다른 형태의 혼합기를 설치할 수 있다(Type 2). 이 혼합기는 탑 외벽 쪽이 아닌, 중심부 쪽에 건식 공기의 유입부 바로 밑의 높이에 설치되는 형태이다.

역시 길이비가 0.2, 0.4, 0.6, 0.8인 경우에 대해 살펴보았다. 역시 계산조건은 Table 2와 동일하다. 길이비가 증가할수록 백연발생비가 19.75%, 16.01%, 11.11%, 0%로 감소하였다. 모든 길이비에 있어서 앞의 혼합기에 비해 백연방지효과가 좋은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 건식 공기의 일부분만 혼합되는 앞의 혼합기와 달리 습식 공기의 유동을 건식 공기의 유입부 쪽으로 유도하여 습식 공기의 빠른 유속에 건식 공기가 탑 내로 유입되자마자 바로 혼합되므로 출구에서 반경방향으로의 온도 및 습도비 분율의 구배가 거의 없는 상태로 배출되기 때문이다. 이것은 공기의 온도를 나타낸 Fig.14와 출구에서의 물성치를 나타낸 Fig.15에 잘 드러나 있다. 혼합기 설치

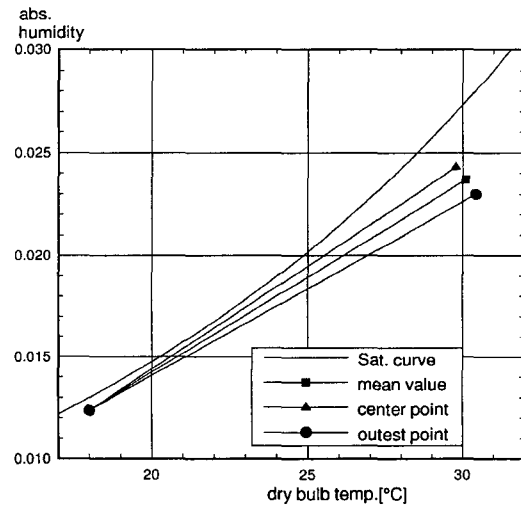


Fig. 15 Operating line for Type 2 at $L_{AM}/L_{TOWER}=0.8$.

여부와 길이비에 따른 냉각능력은 변화가 거의 없었으며, 따라서 현재 사용되고 있는 혼합기보다 이 형태의 혼합기를 설치하는 것이 백연, 특히 부분 백연방지에 유리함을 알 수 있다. 하지만 이러한 형태의 혼합기는 그 형태상 설치와 유지 보수, 청소 면에서는 앞의 것보다 불리하고, 탑의 외벽 근처에서의 빠른 유속으로 인해 벽면의 부식 및 소음, 진동을 유발하게 되는 단점이 있다.

따라서 건식 열교환기를 이용한 대향류형 백연방지 냉각탑의 설계 및 운전에 있어서 수공비 조절은 냉각성능에, 공기혼합기의 적절한 설치는 백연방지에 중요한 기준이 됨을 알 수 있다.

4.3 강제 통풍식 직교류형 냉각탑에 대한 해석

해석에 사용된 형상자료와 운전조건은 Table 1과 Table 2에 주어져 있다. 충전물은 썬기모양 플라스틱 날개형을 사용하였다. 이 경우 물의 평균 출구온도, 냉각범위, 어프로치, 냉각탑 효율, 증발률을 구하였으며 Table 4에 정리하였다. Fig. 16은 유선의 분포를 나타낸다. 습식 공기는 높은 유동저항에 의하여 충전물 영역을 거의 균일하게 통과한 후 엘리미네이터를 통과하면서, 건식 공기는 유입 직후 출구 쪽으로 가속되면서 급격한 유동방향 변화를 보이고 있다. Fig. 17은 공기와 물의 온도장을 나타내고 있다. 공기의 온도는 충전물 영역에서 동일한 고도일 때 탑 중심부 쪽일수록, 동일한 반경방향 위치일 때 분무장치 쪽일수록 더 높은 온도분포를 보이고 있다. 이것은 Fig. 6과 Fig. 7의 대향류형 온도장이 벽 근처를 제외하고는 충전물 내의 온도가 높이만의 함수, 즉 1차원적인 분포인 것과 달리 직교류형의 경우는 높이와 반경방향, 즉 2차원적으로 분포됨을 의미한다. 한편 상대적으로 고온인 건식 공기의 유입으로 인해 출구에서 반경방향으로 뚜렷한 온도

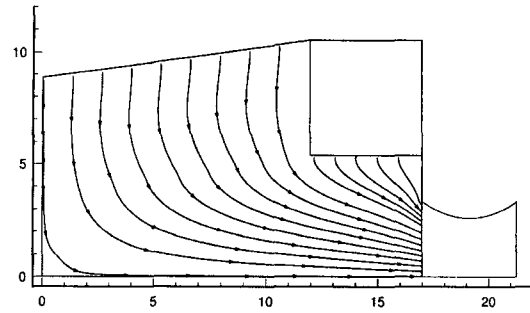


Fig. 16 Streamline of air.

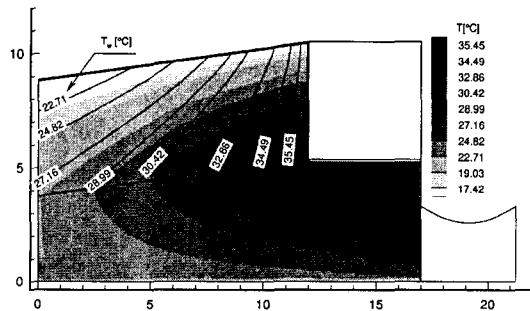


Fig. 17 Isothermal contour of air and water.

구배를 보이고 있다. 물의 온도장은 분무장치 근처에서는 완만한 기울기의 변화를 보이다가 점차 급한 경사를 보이고 있다. 백연발생 여부를 살펴보면 Fig. 18에서 보듯이 평균값 기준으로 백연발생이 억제되지만 19.78%의 비율로 부분 백연이 발생함을 알 수 있다. 부분 백연방지를 위해 대향류형과 마찬가지로 동일조건 하에서 습건식 공

Table 4 Calculation result for the crossflow tower

Average water outlet temperature [°C]	24.44
Range in dry heat exchanger [°C]	1.28
Range in wet section [°C]	11.68
Total range in tower [°C]	12.96
Approach [°C]	10.44
Evaporation rate [%]	1.03
Cooling tower effectiveness	0.56

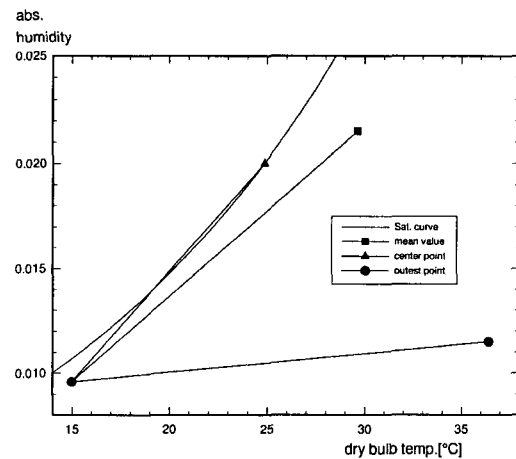


Fig. 18 Operating line on psychrometry chart.

기 유량비를 100%, 80%, 60%, 50%, 40%로 변화시키며 결과를 살펴보았다. 습식 공기유량이 전체 공기유량의 100%인 경우를 제외하고는 모두 평균값 기준으로 백연은 발생하지 않는다. 하지만 부분 백연은 모두 발생하며 유량비가 80%, 60%, 50%, 40%일 때 각각 19.78%, 5.01%, 2.79%, 1.22%로 계산되었다. 건식 공기유량이 증가할수록 백연이 큰 폭으로 감소하지만 대향류형과 마찬가지로 냉각성능 역시 낮아짐을 볼 수 있다. 따라서 백연방지 냉각탑의 설계시 원하는 냉각능력을 만족시키기 위해서 기존의 습식 냉각탑에 비해 보다 큰 규모로 냉각탑을 설치하여 평소에는 일반적 습식탑으로 운전하다 백연발생 기후조건이 되면 건식 공기를 유입, 습건식 탑으로 운전함으로써 냉각능력의 손실을 어느 정도 보상해 주면서 백연의 발생을 억제해야 함을 알 수 있다. 직교류형은 탑의 구조적 특징으로 외벽 형상 변화와 내부의 혼합기 설치가 어려워 이들에 의한 영향은 계산하지 않았다.

5. 결 론

건식 열교환기를 이용한 대향류형 그리고 직교류형 강제 통풍식 백연방지 습건식 냉각탑 내의 유동장 및 온도장 해석을 통하여 냉각탑 성능평가, 백연발생 여부를 판단할 수 있는 여러 자료를 얻을 수 있었고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공기와 물 사이의 열 및 물질전달의 커플링을 고려하고 $k-\epsilon$ 모델을 적용, 난류유동이 고려된 건식 열교환기를 사용한 백연방지 냉각탑 내의 2차원 이상유동을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

(2) 이를 통해 탑 형상 및 운전조건 그리고 공기혼합기 형상변화에 따른 탑 내의 유동장, 온도장, 냉각성능, 백연발생 여부 판단 및 그 특징을 평가할 수 있었다.

(3) 요구되는 냉각능력을 만족하고 추가비용을 최소화하면서 백연발생을 억제하기 위해서는 탑 외벽의 형상변화보다는 기상상태에 적합한 운전조건, 즉 공기유량 간의 상대적 비율조절과 적절한 공기혼합기의 설치가 중요하며 기존의 혼합기

보다 백연억제 성능이 뛰어난 혼합기의 형상을 찾아내었다.

후 기

본 연구는 2001년도 전력기술 기초연구(기계 : 01-050) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Buss, J.R., 1967, Control of fog from cooling towers, Cooling Tower Institute Annual Meeting, New York.
2. Campbell, J.C., 1976, The prevention of fog from cooling tower, Annual Meeting of the Cooling Tower Institute, Houston.
3. Miura, T. and Gotoh, O., 1998, The new wet/dry cooling tower without finned tube dry section (NWD), Cooling Tower Institute Annual Conference, Houston.
4. Merkel, F., 1923, Evaporative tooling, zeits, Verein Deutscher Ingenieure, Vol. 70, pp. 123-128.
5. Lee, S.Y., Lee, J.H., Choi, Y.K. and Ryou, H.S., 1998, Numerical study for performance analysis and design of a counterflow type cooling tower, SAREK, Vol. 10, No. 5, pp. 535-549.
6. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 1996, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley and Sons, 4th ed.
7. Majumdar, A.K., Singhal, A.K. and Spalding, D.B., 1983, Numerical modeling of wet cooling tower--Part 2, ASME J. Heat Transfer, Vol. 105, No. 4, pp. 736-743.
8. Majumdar, A.K., Singhal, A.K. and Spalding, D.B., 1983, Numerical modeling of wet cooling tower--Part 1, ASME J. Heat Transfer, Vol. 105, No. 4, pp. 728-735.