

지하철 지하정거장의 수냉각탑 백연감소를 위한 기술검토

A study on the fog abatement of cooling tower in subway station

이 예 행
Y. H. Lee
(주) 에너지2000



- 1947년생
- HVAC의 설계 및 T.A.B에 관한 기술개발에 관심을 가지고 있다.

김 용 구
Y. K. Kim
(주) 에너지2000



- 1955년생
- HVAC의 System 및 유량조절밸브에 관한 기술개발에 관심을 가지고 있다.

기 호 설 명

ADP : 장치노점온도 (apparatus dew point)
AHU : 공기조화기(air handling unit)
CT : 냉각탑(cooling tower)
D : 건조공기(dry air)
db : 건구(dry bulb)
EX : 배기공기(exhaust air)
G : 냉각공기 유량
GL : 지표높이(ground level)
 ΔG : 냉각공기 유량차이
I : 엔탈피(enthalpy)
 Δi : 엔탈피 차
L : 냉각수 유량
N : 수-공기비
OL : 조작선(operating line)
R : 냉각공기량에 대한 가열 공기량의 비율
rh : 상대습도(relative humidity)

SHL : 현열가열선(sensible heating line)
t : 건구온도(dry bulb temperature)
 Δt : 건구온도차
URST : 미국냉동톤
wb : 습구(wet bulb)
x : 비습도(humidity ratio)
 θ : 조작선 구배(taper of operating line)

하첨자

at : 건물측
c : 냉각탑측
st : 제조회사표준
1,2,3...: 초기, 차기, 3기 ...

1. 머리 말

수냉각탑(水冷却塔)에서 발생되고 있는 백연

(白煙)은 냉각탑 내부를 냉각공기가 냉각수와 접촉하면서 통과하는 과정에서 냉각수의 작은 물방울이 포화된 냉각공기중에 혼입되었을 때 증발하지 못하고 안개상의 물방울로 남아 있는 상태로 대기중에 방출된 후 대기와 냉각공기가 혼합하면서 물방울이 증발하거나 농도가 떨어져 안개상태가 사라질 때까지 대기중에 체류하는 안개를 말한다.

백연은 인근주민이나 통행인에게 투시장애와 시각에 영향을 주는 불편이 있으므로 백연현상이 발생하였을 때에는 백연을 감소시키거나 방지할 필요가 있다.

백연을 감소하거나 방지하기 위한 노력은 지하철의 지하정거장에 설비되는 냉각탑에 있어서 냉동기의 응축열을 흡수한 냉각수를 냉각탑 배기구에 설비한 가열코일을 통과시키면서 냉각탑 출구공기를 가열하도록 한후 냉각탑에 공급하는 방법 즉 “응축열 가열방식”을 적용하여온 것이다. 이 “응축열 가열방식”은 ASHRAE¹⁾에서 소개하고 있는 “출구공기가열(adiabatically-saturated air-cooled heat exchanger)방식”과 흡사하지만 가열유체를 별도의 가열원을 채용하는 ASHRAE 방식 대신에 냉동기 응축열을 가열유체로 사용하는 점이 다르다.

ASHRAE에서는 “출구공기 가열방식”외에 수냉각탑 출구공기와 냉동기 응축열로 가열한 외기공기를 혼합하여 배출하는 “건습혼합냉각(combination wet-dry tower)방식”을 소개하고 있

다. 기타 백연의 감소가 가능할 것으로 예상되는 방식은 냉각탑의 공급 풍량을 증가시켜 조작선(operating line)의 구배를 적게 하여 백연을 감소시킬 수 있는 “냉각풍량 추가방식”과 지하철 또는 지하상가와 같은 건물에서 공기조화시 필연적으로 발생하는 배기공기와 냉각탑 출구공기를 혼합 배출하여 백연을 감소시킬수 있는 “배기혼합방식”이 있다.

전술한 “① 응축열 가열방식”, “② 출구공기 가열방식”, “③ 건습혼합 냉각방식”, “④ 냉각풍량 추가방식 및 ⑤ 배기혼합 방식”에 대하여 냉각공기의 변화과정과 상태를 백연방식이 가장 많이 적용되고 있는 최근의 지하철 정거장을 기준으로 하여 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수냉각탑의 백연발생

ASHRAE에 의한 수냉각탑을 통과한 냉각공기의 백연 발생 상태는 그림 1과 같이 습공기 선도(t-x)상에 나타낼 수 있다.

지하철의 지하냉각탑은 경인기계²⁾에 의하면 대향류(counter flow)이므로 ASHRAE와 서정윤³⁾에 따른 그림 1의 백연발생 상태는 습공기 선도(t-i)상에 조작선으로 도시하면 그림 2와 같다.

그림 2를 살펴보면 대향류형 냉각탑에 있어서 조작선(operating line)의 구배는 수 공기비에 따라 달라지며 빗금친 부분에서 백연이 발생됨을 나

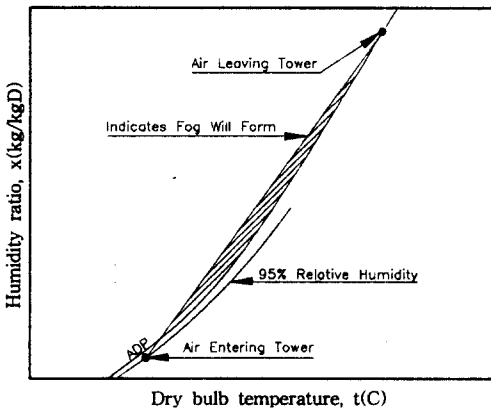


그림 1 습공기 선도(t-x)상의 백연발생

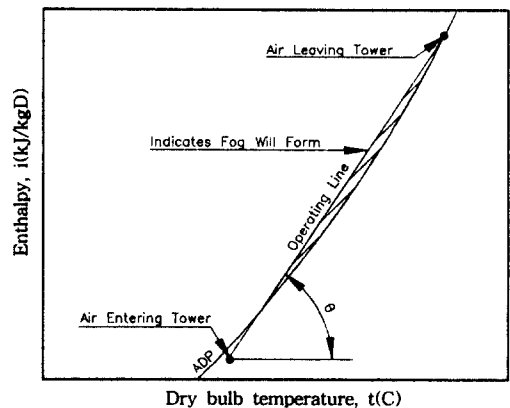


그림 2 습공기 선도 (t-i)상의 백연발생

표 1 서울지하철 정거장내·외 건구온도차 조사표

노선명	정거장 명	승강장형식	승강장건구온도(℃)	외기건구온도(℃)	온도차*(℃)	비 고
1호선	시 청 역	섬 식	26.2	22.1	4.1	
2호선	잠 실 역	상대식	24.6	23.1	1.5	
8호선	가락시장역	상대식	22.4	23.4	-1.0	

주 1) *는 승강장 건구온도에서 외기건구온도를 뺀 값임.

타내고 있다.

수공기비(N)는 식(1)과 같이 구할 수 있으며, 조작선의 구배는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$N=L/G \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}N \quad (2)$$

식(1)에서 냉각수유량(L)이 일정할 때 냉각탑의 냉각풍량(G)이 증가되면 수-공기비(N)는 감소하고 식(2)에서 수-공기비(N)가 감소하면 구배(θ)는 감소하므로 그림 2의 조작선 구배 변화는 냉각수유량(G)이 일정할 때 냉각풍량의 증가에 따른다.

2.2 지하철 지하정거장의 검토용 기본자료⁴⁾

2.2.1 공기조화장비의 운전개시 외기상태

지하철 지하정거장에 설비된 공기조화 설비가 냉방운전을 개시하는 외기 온습도는 냉각탑의 입구 공기 상태가 되므로 서울지하철 2기 지하철의 냉방운전 개시 상태를 조사한 결과는 다음과 같다.

1) 냉동기 운전개시 정거장내 건구온도: 실내건구온도 $28^{\circ}\text{C db} + (2\sim 5^{\circ}\text{C db}) = 30^{\circ}\text{C db} \sim 33^{\circ}\text{C db}$ 단, 여기서 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ 는 냉동기 단속운전을 방지하기 위한 편차이며 서울도시철도공사 운전조 건임.

냉방운전개시 정거장내 온도는 백연발생이 낮은 건구 온도에서 쉽게 발생하므로 30°C db 로 한다.

2) 냉동기 운전형태: 실내 건구온도와 냉동기 운전개시 셋팅 건구온도가 일치하면 자동제어에 의해 자동운전 한다.

3) 냉동기 운전개시 외기온도: 지하철 지하정거장의 실내외 온도차는 1998년 5월 25일 11시~13시 20분 동안에 측정된 결과를 표 1에 나타낸다.

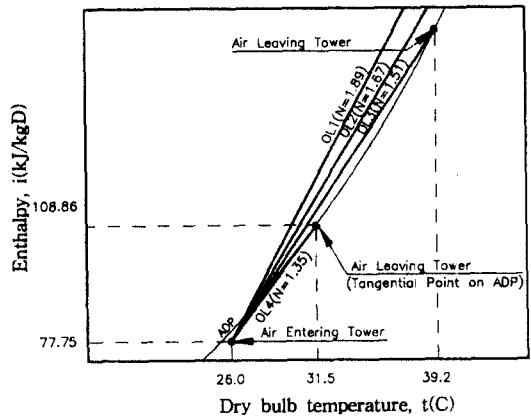


그림 3 제직회사 표준형 냉각탑의 냉각공기 상태변화

표 1을 살펴보면 실내건구온도가 외기보다 높은 정거장도 있고 낮은 정거장도 있는데 백연의 발생은 낮은 건구온도에서 쉽게 발생하므로 시청역의 4.1°C 를 기준하면 냉각탑 운전초기에 유입되는 외기공기상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 냉각탑 유입초기 건구온도: $30^{\circ}\text{C} - 4.1^{\circ}\text{C} \approx 26^{\circ}\text{C db}$
- 상대습도: 95% rh(그림 1 참조)
- 절대습도: $0.02133 \times 0.95 = 0.02026\text{kg/kgD}$
- 엔탈피: $0.24 \times 26 + 0.02026 \times (0.444 \times 26 + 597.1) \approx 18.57\text{kcal/kgD}$

2.2.2 냉동기 및 냉각탑 설치현황

- 1) 냉동기: 터어보형, $708.3\text{kW} \times 2$ 대 (=200USRT $\times 2$ 대)
- 2) 냉각탑: 대향류, 압입송풍형, $920.8\text{kW} \times 2$ 대(=CT 200 USRT $\times 2$ 대)
- 3) 냉각수(L): $32^{\circ}\text{C}/37^{\circ}\text{C}$, $43.34\text{L/s.대} \approx 43.34\text{kg/s.대}$

- 4) 냉각탑 풍량(G) : 경인기계⁵⁾ = 28.76(kg/s.대)
 범양냉방⁶⁾ = 22.95(kg/s.대)
 경원세기⁷⁾ = 26(kg/s.대)
- 5) 수공기비(N) : 경인기계 = 43.34(kg/s)
 /28.76 (kg/s) ≃ 1.51
 범양냉방 = 43.34(kg/s)/22.95(kg/s) ≃ 1.89
 경원세기 = 43.34(kg/s)/26(kg/s) ≃ 1.67
- 6) 건물배기(1/2용량) : 29.4℃db, 61%rh,
 16.82kcal/kg
 공조시 상시 배기량=19.12m³/s ≃ 22.94kg/s

2.3 제조회사 표준형 냉각탑의 냉각공기 상태변화

지하철 지하정거장에 설치된 수냉각탑의 냉각 공기 상태변화는 운전용 개시할 때 전술한 외기 공기 상태와 각 국내 제조회사의 대향류형 냉각탑의 수공기비(N)를 이용하여 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3에서 조작선 OL₄는 ADP 선의 접점과 냉각탑 입구공기 상태를 연결한 선으로서 백연이 발생되지 않는 이상적인 냉각탑의 수공기비이며 냉각탑 출구공기의 건구온도는 31.5℃db이다. 조작선 OL₁, OL₂ 및 OL₃는 전술한 제조회사의 표준사양에 대응하는 냉각공기의 상태변화선이다.

그림 3의 조작선 OL₁, OL₂ 및 OL₃는 건구온도 31.5℃db를 초과하여 ADP선과 교점(냉각탑 출구 공기상태)을 이루므로 제조회사의 표준형 냉각탑이 지하철 지하정거장에 설치 운전되면 백연이 발생됨을 예상할 수 있고 백연방지 방식들의 백연감소 또는 방지효과를 분석해 보기도 한다.

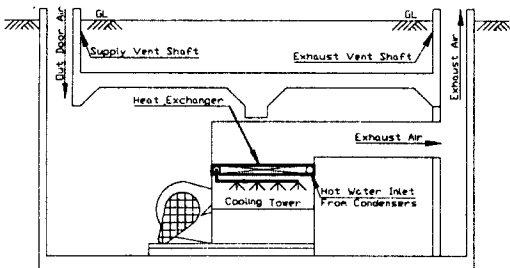


그림 4 응축열 가열 방식 단면개념도

2.4 응축열 가열방식

응축열가열 방식은 기존 지하철의 지하정거장에 대다수 설비된 압입송풍식 대향류형 냉각탑의 냉각공기 출구부분에 튜브형의 가열기를 장착하고 냉동기에서 응축열을 흡수한 냉각수를 가열기로 유입시켜 냉각탑 출구공기를 가열하면서 약간 냉각된 후에 냉각탑 상부에서 산수하여 냉각공기와 대향류로 접촉하여 냉각을 완료하는 방식으로 단면개념도를 그림 4에 나타낸다.

그림 4의 단면개념도에 나타난 냉각공기의 유동과정과 그림 3에 표기된 백연 발생의 우려가 큰 OL₁(N=1.89) 및 냉각탑 출구공기의 건구온도를 31.5℃db인 냉각공기의 상태변화는 습공기 선도(t-i)상에 그림 5와 같이 나타낼수 있다.

그림 5를 살펴보면 점①의 상태로 냉각탑에 유입된 냉각공기는 수-공기비(N)에 따른 조작선

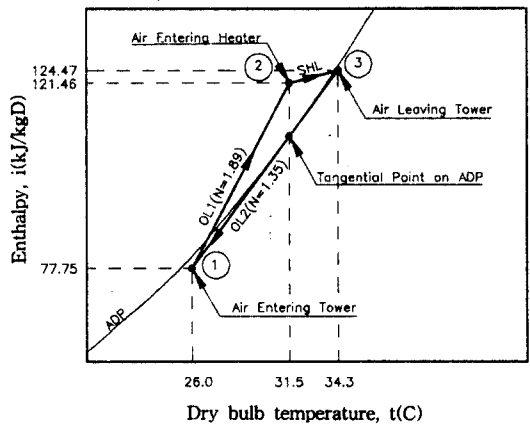


그림 5 응축열가열 냉각공기의 상태변화

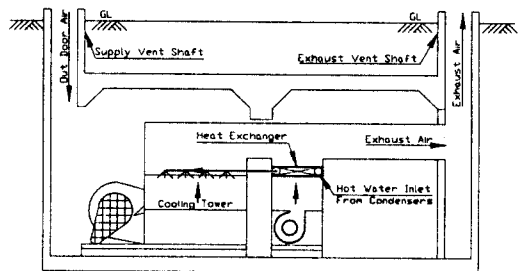


그림 6 건습혼합 냉각방식 단면개념도

OL₁을 따라 점②상태가 될때까지 냉각수와 접촉하여 가열기 입구에 도달하며 가열기 입구에 도달한 냉각공기는 가습없이 가열기를 통과하면서 점③의 상태까지 현열 가열된 후 점③의 상태로 대기중에 배출되고 대기중에서 체류하는 동안 대기와 섞이면서 점①의 외기상태로 되돌아 오는데 백연이 발생되지 않으며, 표준형 냉각탑에 냉동기 응축열로 냉각탑 출구공기를 가열 할수 있는 가열기가 부가되어야 한다.

2.5 출구공기 가열방식

냉각탑 출구공기 가열방식은 ASHRAE에서 소개하고 있는 방식이며 그림 4와 같이 구성된 냉각탑에 있어서 가열기에 공급되는 가열유체가 냉동기로부터 발생된 냉동기 응축열이 아닌 별도로 구성된 가열장치에 의해 가열공급되고 순환된다. 또한 냉각탑을 통과하는 냉각공기의 상태변화는 그림 5와 같이 나타낼수 있지만 백연방지를 위해 냉각수 최고온도 37℃db보다 높은 건구온도로 냉각탑 출구공기를 가열할 필요가 있을 때에는 이 방식으로 가열이 가능하다는 점이 “응축열 가열방식”과 다르다. 이 “출구공기 가열방식”은 “응축열 가열방식”에 비해 별도의 가열장치를 필요로 하므로 냉동기 응축열가열이 곤란하거나 가열온도가 냉각수최고온도를 초과할때 또는 냉각수 온도보다 높은 온도의 폐열이 냉각탑 근방에 존재할 때 유용하다.

2.6 건습혼합 냉각방식

건습혼합 냉각방식은 ASHRAE에서 소개하고있는 방식으로 냉동기 응축열로 가열한 외기를 냉각탑 출구에서 혼합하여 백연을 방지하는 방식이며, 단면개념도를 그림 6에 나타낸다.

그림 3, 그림 6과 지하철 기본자료를 이용하여 냉각탑의 냉각공기 상태변화를 습공기선도(t-i)상에 구성하면 그림 7과 같다.

그림 7을 살펴보면 점①의 외기상태인 냉각공기가 냉각탑 내부에서 냉각수와 접촉하면서 통과하는 동안 조작성 OL₁(N=1.89)을 따라 점②상태까지 변화되는 한편, 점①의 외기공기가 냉동기의 응축열을 공급받는 가열기를 통과하는 동안 현열가열선 SHL을 따라 점③의 상태까지 변화된후 점②상태의 냉각공기와 혼합하여 점④상태가 되며 이 상태로 대기중에 방출되면 백연의 방지가 가능한 조작성 OL₂(N=1.35)를 따라 외기상태점 ①까지 변화한다.

그림 7의 혼합 상태점 ④를 만족 시키기 위해서는 상태점 ②인 공기와 상태점 ③인 공기의 혼합비율이 적절히 이루어져야 하는데 그 비율은 다음식(3),(4) 및 (5)로 구할 수 있다.

- 혼합공기량에 대한 냉각공기량의 비율(R₁)

$$R_1 = \Delta i / (\Delta i_1 + \Delta i_2) \tag{3}$$

$$= 6.0 / (6.0 + 3.01)$$

$$\approx 0.666$$

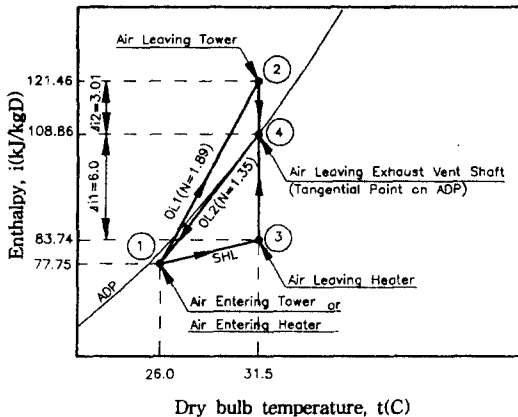


그림 7 건습혼합 냉각공기의 상태변화

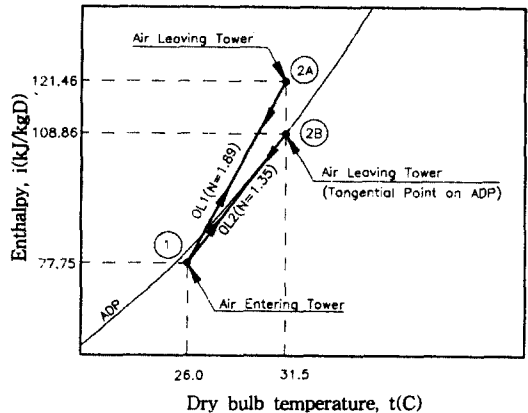


그림 8 냉각공량 추가 냉각공기의 상태변화

여기서 Δi_1 은 점③과 점④공기의 엔탈피차.

Δi_2 는 점②와 점③공기의 엔탈피차임.

- 혼합공기량에 대한 가열공기량의 비율(R_2)

$$R_2 = \Delta i_2 / (\Delta i_1 + \Delta i_2) \quad (4)$$

$$= 3.01 / (6.0 + 3.01)$$

$$= 0.334$$

- 냉각공기량에 대한 가열공기량의 비율(R_3)

$$R_3 = R_2 / R_1 \quad (5)$$

$$= \Delta i_2 / \Delta i_1$$

$$= 3.01 / 6.0$$

$$\approx 0.5 = 50\%$$

건습혼합냉각 방식은 표준형 냉각탑에 외기공기를 냉동기의 용출열로 가열하는 가열기와 가열된 공기를 가압 송풍하여 냉각탑 출구에 압입하는 덕트경로 및 순환펌프의 추가가 필요하다.

2.7 냉각풍량 추가방식

냉각풍량 추가방식은 표준형 냉각탑에 공급되는 풍량보다 많은 풍량을 공급하여 백연을 방지하는 방식으로 전술한 지하철 기본자료를 참고하여 냉각공기 상태변화를 습공기선도(t-i)상에 구성하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

그림 8을 살펴보면 표준형의 냉각탑은 점①의 외기상태인 냉각공기가 냉각탑내부를 냉각수와 접촉하면서 조작선 OL₁을 따라 점2A의 상태로 변화된 후 대기중에 방출되어 백연상태로 체류하다가 조작선 OL₁을 따라 외기와 혼합되면서 외기 상태점①까지 변화되는 과정을 거치므로 백연의 발생이 필연적이다. 이 백연 상태를 개선하기 위하여 백연방지가 가능한 조작선 OL₂를 구성하고 냉각 공기가 외기 상태점①에서 냉각탑을 통과하면서 조작선 OL₂를 따라 점2B까지 변화하도록 한 후에 대기중에 방출하면 조작선 OL₂를 따라 외기상태 점①까지 변화되므로 백연 발생이 방지될 수 있다.

조작선 OL₁을 조작선 OL₂로 변경하기 위해서는 수·공기비(N)가 1.89에서 1.35가 되도록 냉각탑풍량을 증가시켜야 하며 추가 풍량(ΔG)은 식(6)으로 구할 수 있다.

$$\Delta G = G_c \times (L/G_{st}) / (L/G_c) - G_c \quad (6)$$

$$= G_c \times N_1 / N_2 - G_c$$

$$= G_c \times 1.89 / 1.35 - G_c$$

$$= G_c (1.4 - 1)$$

$$= 0.4 G_c$$

여기서 G_c 는 표준형 냉각탑 풍량임.

식(6)의 결과에서 보여주는 바와 같이 백연을 방지하기 위해서는 표준형 냉각탑에 공급하는 풍량보다 40%의 풍량을 더 공급하여야 한다. 이러한 추가 풍량은 큰 냉각탑 단면과 많은 동력 소비를 유발한다.

2.8 배기 혼합 방식

배기 혼합 방식은 지하 건물내에서 공조시 상시 배출되는 저온·저습도의 배기 공기와 냉각탑에서 배출되는 공기를 배기 환기구에서 혼합하

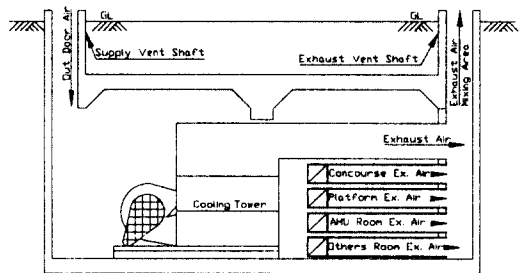


그림 9 배기 혼합 방식 단면개념도

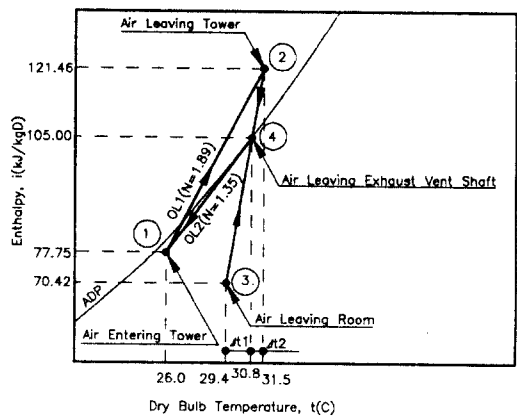


그림 10 배기 혼합 냉각 공기의 상태 변화

여 배기하는 방식인데 최소한의 요건은 배기 공기 상태에 따른 상시 배기 공기량과 냉각탑 출구 공기와 건물 배기 공기를 혼합하는데 필요한 최소거리인 흡수거리가 확보되어야 하며 이 방식의 단면 개념도를 그림 9에 나타낸다.

그림 9의 단면개념도와 전술한 지하철 기본 자료를 이용하여 냉각탑을 통과하는 냉각공기의 상태 변화과정은 습공기선도(t-i)상에 그림 10과 같이 구성될 수 있다.

그림 10을 살펴보면 냉각탑에 주입되는 공기는 외기 공기 상태점①에서 조작선 OL₁을 따라 냉각탑 내부에서 점②상태가 될 때까지 변화한 후 건물 배기 공기 상태점③과 혼합하여 상태점④의 상태로 대기중에 방출되며 백연이 발생되지 않는 조작선 OL₂를 따라 상태 변화하여 외기상태 점①로 되돌아 가는 변화의 과정을 거친다.

그림 10의 상태를 만족시키기 위해서는 건물 배기량(EXat)이 냉각탑 풍량(Gc)보다 적은상태이며 지하철 기본자료와 그림 10의 자료를 식(7)에 대입하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} EXat &= Gc \times (t_2 - t_4) / (t_4 - t_3) = Gc \times \Delta t_2 / \Delta t_1 \\ &= Gc \times (31.5 - 30.8) / (30.8 - 29.4) \\ &\approx 0.5Gc \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 하첨자 1, 2, 3, 4는 그림 10의 공기 상태점 번호임.

식(7)에 의하여 구한 건물 배기량은 냉각탑 풍량의 50%가 필요하므로 전술한 지하철 기본 자료를 식(7)의 결과와 비교하면 다음과 같다.

- 표준형 냉각탑 풍량(Gc) = 22.95kg/s
- 배기 필요량(EXat) = 22.95kg/s × 0.5
≈ 11.48kg/s
- 건물 상시 배기량(EX) = 22.94(kg/s) >>
11.48(kg/s)
- 여유율 = ((22.94 - 11.48) / 11.48) × 100
≈ 100%

배기 혼합 방식은 지하철 지하정거장의 냉각탑에서 발생하는 백연을 방지하기 위한 가열기등의 추가 장치없이 표준형 냉각탑을 설치하고 냉각탑 출구 공기와 지하철 정거장 배기 공기가 혼합하도록 통로를 구성하면 흡수거리는 스파이렉

스 사코⁸⁾에 의하면 혼합통로인 환기구의 풍속이 7.5m/s이하이므로 최소 2.5m가 필요한데 환기구의 혼합길이가 4.0m이상이므로 백연이 방지된다.

3. 맺 음 말

지하철 지하정거장의 제조회사 표준형 냉각탑의 출구공기는 건구온도 26℃db, 상대습도 95%rh에서 운전될 때 백연을 발생한다.

“용축열 가열 방식”은 백연 방지가 가능하나 가열기가 추가 설비되어야 하고 가열기의 송풍 저항에 따른 동력이 증가하며 설치 용적이 큰 단점이 있다.

“출구 공기 가열방식”은 백연 방지가 용축열 가열 방식보다 폭넓게 가능하나 가열기, 가열원 및 순환 펌프등이 추가 설비되어야 하므로 송풍 동력, 가열 연료비, 펌프 동력 및 설치 용적이 추가되어야 하는 단점이 있다.

“건습 혼합 냉각 방식”은 백연방지가 가능하나 냉동기의 용축열을 공급받아 가열할 수 있는 가열기, 압입 송풍기 및 압입 덕트등이 추가되기에 따른 송풍동력 및 펌프동력이 추가 되는 단점이 있다.

“냉각 풍량 추가 방식”은 백연방지가 가능하지만 표준형 냉각탑 풍량에 40% 풍량의 추가가 필요하며 이에 따른 송풍동력 및 냉각탑의 크기가 증가되는 단점이 있다.

“배기 혼합 방식”은 건물 배기량 및 흡수거리에 여유가 있어 백연방지가 가능하며 별도의 장치나 동력이 추가되지는 않지만 냉각탑 공기가 가동이 중지중인 건물 배기 덕트로 역류 하지 않도록 고려 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE, 1996, ASHRAE Systems and Equipment Handbook, pp. 36·1 ~ 36·20.
2. (주)정인기계, Cooling Tower Catalogue, pp. 25.

3. 서정윤 임장순, 1981, 冷凍工學, pp. 406~413.
4. 서울특별시 지하철 건설본부, 1998, 제3기 지하철 9호선 기본설계보고서(기계설비) pp. 7~8, pp. 136, pp. 154, pp. 166.
5. (주)경인기계, 1998, New EX-Cooling Tower Catalogue, pp. 4.
6. 범양냉방공업(주), Catalogue, pp. 199~200.
7. 경원세기, 1997, 경원세기 제품 데이터집, pp. 6-3.
8. 한국 스파이렉스사코(주), 회사 제품 소개서, 가습장치 가스시스템 및 가습기.