

냉각탑의 간이성능 평가

윤재호, 권오경

발주사양 조건하에서 냉각탑을 운전할 수 있는 것은 외기습구온도(t'), 냉각수입구온도($t_{w,2}$) 등의 모든 값이 사양치와 일치하는 것이 드물기 때문에 불가능에 가깝다. 그러나 납품시의 성능확인을 조건이 잘 갖추어질 때까지 지연할 수는 없다. 또한 조건의 변화에 의한 성능의 변화를 알지 못하면 고효율 운전은 기대할 수 없다. 다행히 일본공업규격「강제통풍식 냉각탑 성능시험방법」B8609-1981에 다른 조건하에서도 성능 평가를 할 수 있는 방법을 정해놓고 있으나 제법 복잡하다. 특히 사양치가 아래 표준 설계치와 다른 경우는 평가를 위한 계산 도표를 새롭게 작성할 필요가 있으며 매우 번거롭다. 또한 조건변화에 의한 성능 변화를 구하는 방법에 관해서는 전혀 언급되어 있지 않다.

-표준설계온도

입구수온($t_{w,1}$) : 37℃

출구수온($t_{w,2}$) : 32℃

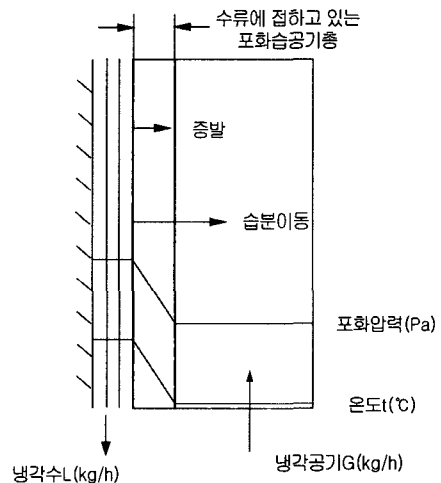
입구공기습구온도(t_1') : 27℃

그 때문에 근사치(2.5% 이내)이긴 하지만 냉각탑 상부에서 하부까지의 냉각수온에서의 포화습공기와 냉각공기의 비엔탈피차의 중앙치를 열이동구동력으로서 생각하면 평가와 성능 변화를 구하는 것은 아주 단순하게 된다. 냉각탑은 대향류형과 직교류형으로 나눌 수 있다. 대향류형에서의 성능해석은 쉽지만 직교류형은 어렵다. 여기에서는 대향류형에 대한 해석을 진행하였다. 그러나 대향류형으로 구한 방법도 직교류형에도 앞에서 언급한 오차내에서 적용가능하다.

열이동을 위한 구동력

냉각탑에서의 열이동은 그 대부분이 냉각수 자신의 증발에 의한다. 따라서 일반 열교환기와 같이 관벽을 사이에 둔 온도차가 아니고 수증기분압 P의 차에 의한다(그림 1). 따라서 절대습도 x의 차, 더우기 온도차도 고려하면 최종적으로는 공기가 가지고 있는 비엔탈피의 차가 구동력이 된다.

냉각탑내에서는 냉각수온도가 하강하고 냉각공기의 비엔탈피는 상승한다. 냉각탑의 어떤 단면을 취하여 그곳을 흘러내리는 수량을 L(kg/h), 상승하는 풍량을 G(kg/h)라고 하면, 그들 사이에는 다음의 관계가 성립한다.



[그림 1] 냉각탑에서 냉각수의 냉각메카니즘

윤재호 한국생산기술연구원(jhyun@kitech.re.kr)

권오경 한국생산기술연구원(kwonok@kitech.re.kr)

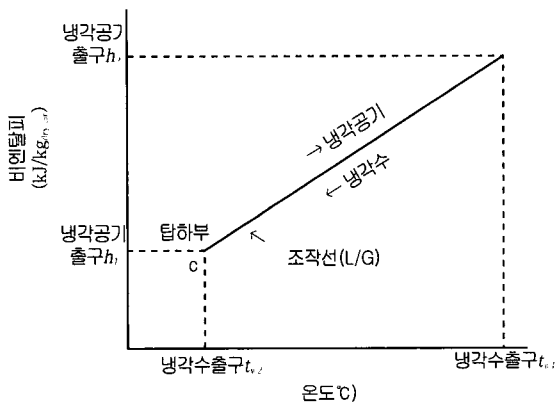
$$G\Delta h = C_p L \Delta t_w$$

여기서,

h : 습공기의 비엔탈피 (kJ/kg_{dry air})

C_p : 물의 비열, 4.18(kJ/kg · K)

t_i : 냉각수 온도 (°C)



[그림 2] 조작선

실제로는 L 은 증발분만큼 줄어든다. 그러나 적은 양이므로 일정하다고 간주한다. 또한 G 로 건조공기량을 취하면 냉각탑을 통하여 변하지 않는 것으로 취급할 수 있다. 따라서 아래식이 성립하고 이 관계를 습공기의 $t-h$ 선도상에 나타내면 그림 2의 C, D점을 잇는 직선이 된다.

$$G(h_2 - h_1) \Delta h = C_p L (t_{w1} - t_{w2}) \quad (1)$$

이 직선 CD는 조작선 또는 단순히 N선이라고 불린다. 조작선의 기울기 L/G 는 수공기비라고 불린다. 점 C는 입구공기 습구온도 t_{i1} 으로 정해지는 공기가 갖는 비엔탈피 h_1 과 소요 냉각수 출구온도 t_{w2} 의 교점에서 정해진다. 점 C에서 L/G 의 기울기를 가진 직선을 그으면 조작선CD가 얻어진다.

냉각수는 온도 t_{w1} 으로 냉각탑에 들어가고 조작선상을 하강하여 냉각공기는 비엔탈피 h_1 으로 냉각탑에 들어가서 선상을 상승한다. 물은 온도 h_2 로 공기는 비엔탈피로 냉각탑을 떠난다. 냉각탑내에서 물과 접촉

하고 있는 공기층은 물로부터 열을 빼앗아 증발할 수 분으로 포화하여 수온에 상당하는 포화 습공기가 된다. 그러나 접촉면에서 떨어짐에 따라 습도는 저하한다. 그 때문에 습도(비엔탈피)가 큰 물과 접촉하고 있는 포화공기에서 습도가 작은 주위공기로 수분이 이동한다. 그림 3은 습포화공기의 온도와 비엔탈피의 관계를 나타내는 포화공기선을, 그림 2에 나타낸 것이다. 그림 3에서 포화공기선과 조작선 사이의 수직거리(비엔탈피차)가 그 단면에서의 열이동을 위한 구동력 Δh 가 된다. 그러나 이 비엔탈피차는 일정하지 않다. 따라서 필요한 냉각탑 용적 V (m³)을 구하기 위해서는 냉각수의 미소 온도강하(예를 들면 1°C)마다 필요한 ΔV 를 구하고 그것을 적산하게 된다.

$$\Delta V = \frac{C_p L \Delta t}{k_a \Delta t}$$

여기서,

k_a : 냉각탑1(m³)에 대한 비엔탈피차

1(kJ/kg_{dry air})당 매시 열이동량(kJ/h)의 실험치.

$$\left(\frac{\text{kJ/h}}{\text{m}^3 \text{kJ/kg}_{\text{dry air}}} \right)$$

따라서,

$$V = \left(\frac{C_p L \Delta t}{k_a \Delta h_1} + \frac{C_p L \Delta t}{k_a \Delta h_2} + \frac{C_p L \Delta t}{k_a \Delta h_3} + \dots \right) \\ = \frac{L}{k_a} \left(\frac{C_p \Delta t}{\Delta h_1} + \frac{C_p \Delta t}{\Delta h_2} + \frac{C_p \Delta t}{\Delta h_3} + \dots \right)$$

윗식의 ()내는 열이동단위수 NTU 또는 U/N 이라고 불리는 것으로 이 값이 클수록 큰 냉각탑이 필요하게 되는 것을 나타내는 지수(무차원)이다.

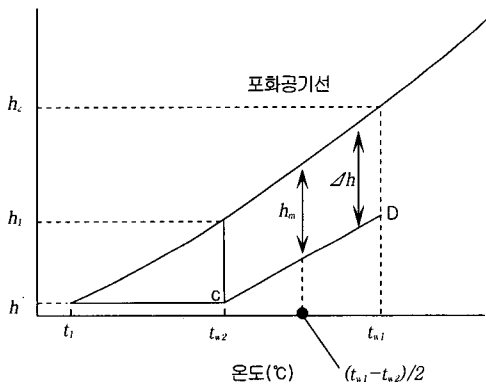
윗식을 다음과 같이 바꿔쓸 수 있다.

$$\frac{k_a V}{L} = \frac{C_p \Delta t}{\Delta h_1} + \frac{C_p \Delta t}{\Delta h_2} + \frac{C_p \Delta t}{\Delta h_3} + \dots \\ \Delta h \text{의 대표로 그림 3의 중앙값을 이용하면 다음식이 얻어진다.}$$

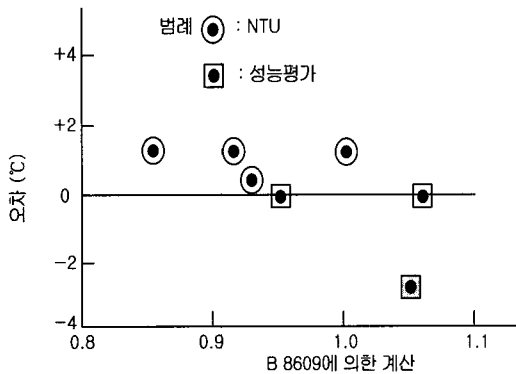
$$\frac{k_a V}{L} \approx \frac{C_p(t_{w1}-t_{w2})}{h_m} \quad (2)$$

윗식에서 $(t_{w1}-t_{w2})$ 는 냉각수의 온도강하(수온 레인지)이다. 냉각탑이 일단 설치된 후에는 L, G가 변하지 않으면 도 변하지 않는다. 물론 V도 변하지 않으므로 냉각탑은 냉각수의 온도강하(냉각탑 부하)에 비례하는 을 취하면서 운전하게 된다.

그림 4는 NTU(U/N)를 JIS B 8609에 채용되어 있는 방법과 앞에서 언급한 근사법을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 오차는 그림 4의 (직교류)를 제외하고 2%이하이다.



[그림 3] 열이동구동력 h_m



[그림 4] 근사법의 B 8609에 대한 오차
(○: 대항류, □: 직교류)

사양과 다른 조건하에서의 운전

설치후의 성능 평가에는 L, G가 사양과 다르면 가 변하기 때문에 사양치대로인지 확인이 우선 필요하게 된다. 변하지 않으면 간단하고 정밀도가 높은 평가가 가능하다.

그림 5의 점 A, B, C를 이은 삼각형 ABC는 냉각탑의 특성 삼각형이라고 불리고, L, G가 변하지 않으면 사양치와 다른 점에서 예를 들면 다른 입구 공기습구 온도에서 운전되어도 그 형태는 변하지 않으므로 합 동 또는 상사가 된다

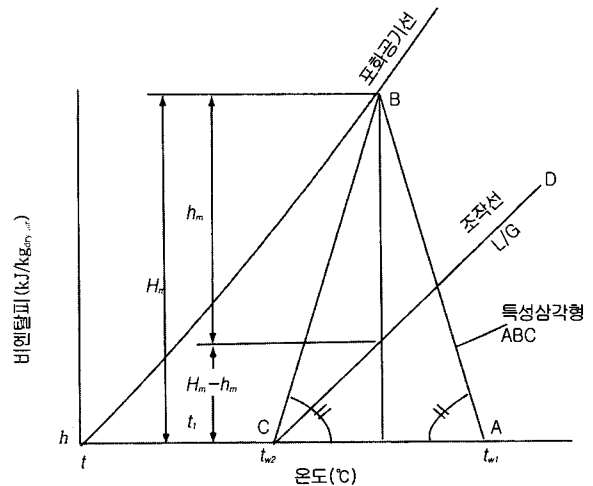
이것은 아래에 의해 설명할 수 있다. 그림 5에서

$$H_m = h_m + \frac{C_p(t_{w1}-t_{w2})}{2} \times \frac{L}{G}$$

$$\frac{H_m}{C_p(t_{w1}-t_{w2})} = \frac{h_m}{C_p(t_{w1}-t_{w2})} + \frac{L}{2G}$$

$$\frac{H_m}{(t_{w1}-t_{w2})} = \frac{L}{k_a V} + \frac{C_p L}{2G}$$

윗식에서 L, G가 변하지 않으면 k_a 도 변하지 않으므로 $H_m/(t_{w1}-t_{w2})$ 도 변하지 않는다. 그러므로 특성삼각형의 형태가 변하지 않는다.



[그림 5] 특성삼각형

부하가 변하지 않고 입구공기 습구온도가 변화한 경우의 냉각수 출구 온도

부하가 같으면 L은 사양치 그대로 이므로 냉각수 출구 온도차도 변하지 않는다. 따라서 특성 삼각형도 전혀 변하지 않는다. 표준 설계온도(37-32-27)로 설계된 냉각탑을 같은 부하에서 입구공기 습구온도 10℃에서 운전할 때의 냉각수 출구온도를 예로 들어 그것을 구해보자. 표준설계온도에서의 특성삼각형을 그림 6과 같이 포화공기의 엔탈피표(JIS B 8609 참조 표 7)의 엔탈피값을 사용하여 그리면 H_m 을 얻는다.

$$H_m = 125.59 - 84.9 = 40.69 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$$

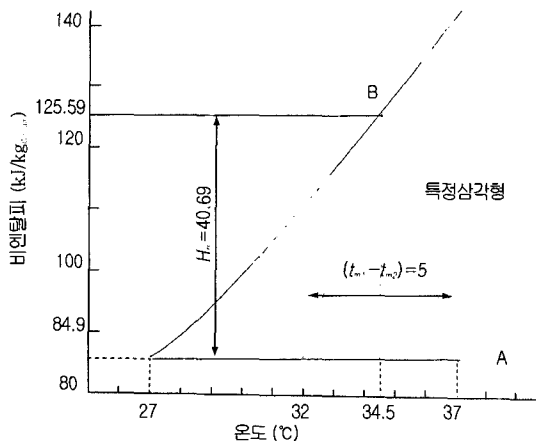
다음으로 10℃에서의 포화공기의 엔탈피값 29.26 kJ/kg_{dry air}를 표에서 구하고 먼저 구한 H_m 에 가산하여 다음 값을 얻는다.

$$29.26 + 40.69 = 69.95 \text{ kJ/kg}_{\text{dry air}}$$

이 값을 가지는 포화공기의 온도를 표에서 구해 23.7℃를 얻고 이를 구한다(그림 7).

$$t_{m2} = 23.7 - 2.5 = 21.2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

그림 8은 일본 공기조화 위생공학편람 제 12판, 제 4편, 476페이지, 그림 2.15를 인용한 것이다. 그림중의 온도차가 일정한 레인지 5℃ 곡선상의 O점은 근사법으로 얻어진 값을 타점한 것이다.



[그림 6] 표준설계온도에서의 특성삼각형

냉각수 입구온도가 일정하게 운전될 때 얻어지는 냉각수 출구 온도

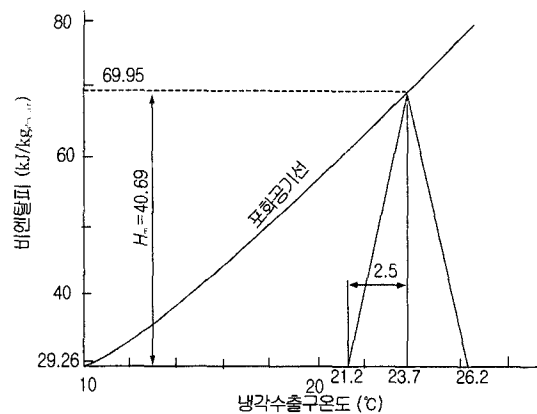
앞에서 서술한 냉각탑을 예를 들어 습구온도 10℃에서 냉각수 입구온도를 36℃로 유지하면서 운전할 경우의 냉각수 출구온도를 구해본다. 그림 9와 같이 습공기의 t-h선도상에 냉각수 입구온도 36℃와 습구온도 10℃의 습공기가 가지는 비엔탈피 29.30kJ/kg_{dry air}으로부터 점 A를 구하여 타점한다. AC를 저변으로하여 그림 6에서 구한 특성 삼각형 ABC를 그린다. AB의 연장선과 포화공기선과의 교점 B'를 구하고, 이 점에서 BC에 평행인 B'C'선을 그어 29.30kJ/kg_{dry air}의 등비엔탈피선과의 교점 C'의 온도를 읽어서 다음 값을 얻는다.

$$t_{m2} = 26.4 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

그림 8의 입구 수온 일정한 곡선중의 36℃의 선상에는 앞에서 말한 바와 같이 구한 점이 O표시로 나타나 있다.

간이성능평가(L, G불변)

t_w , 등은 항상 변화하므로 사양과 다른 조건하에도 그 성능의 평가가 가능하고 용이한 방법이 요구된다. 앞에서 서술한 특성 삼각형의 사고방식에 의하면 평가가 매우 간단하다. JIS B 8609중의 평가예에 이 간이



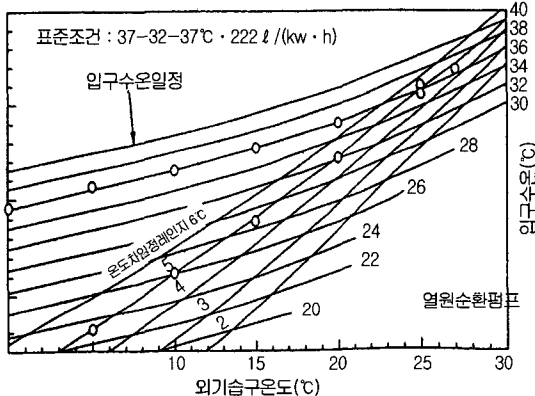
[그림 7] 표준조건으로 설계된 냉각탑을 같은 $(t_{w1} - t_{w2})$ 로 운전하고 t_w 가 10℃로 변할 때의 냉각수 출구 온도 t_{w2}

일반원고

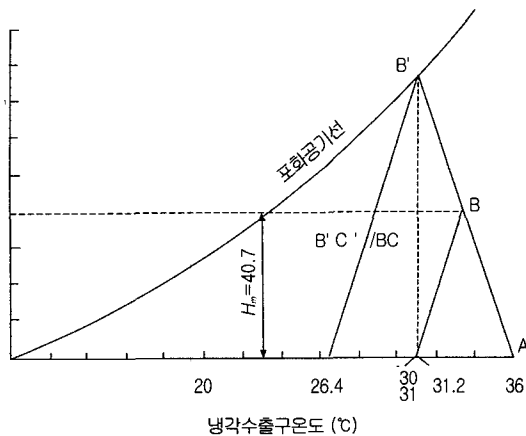
성능평가법을 적용하고 간이법의 정밀도를 확인한다.
표준 설계온도로 설계되어진 냉각탑을 아래 조건에서 운전하고 다음 성능을 얻었다. 이 냉각탑의 성능을 평가한다.

- 입구공기 습구온도 t_s : 20.1℃
- 냉각수 입구온도 t_{w1} : 38.5℃
- 냉각수 온도강하 $t_{w1} - t_{w2}$: 8.8℃

운전시의 데이터로부터 성능시험 제품의 특성 삼각형 ABC를 습공기의 t-h선도상에 그림 10과 같이 그린다. 다음으로 이 특성을 갖는 냉각탑을 표준 설계온



[그림 8] 설계조건과 다른 조건에서의 운전

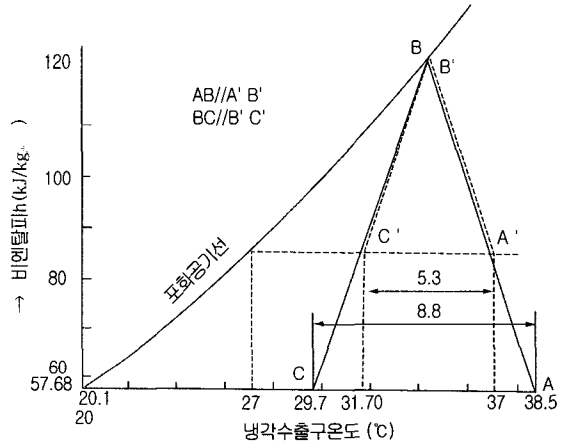


[그림 9] 표준설계온도로 설계된 냉각탑을 동일 냉각수 입구 온도에서 다른 습구온도로 운전한 경우의 냉각수 출구온도

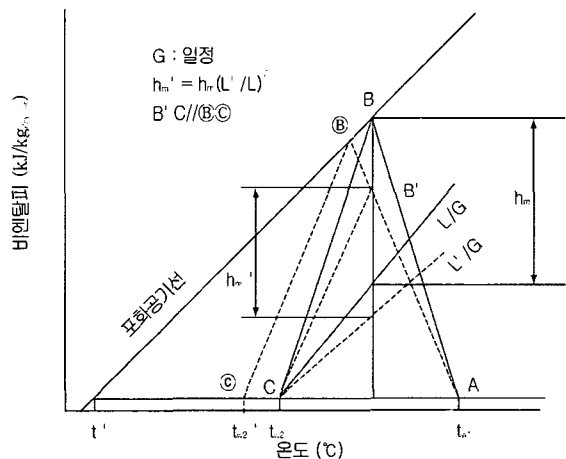
도에서 운전할 때의 특성 삼각형 A'B'C'를, 습구온도 27℃가 갖는 비엔탈피선과 냉각수 입구온도 37℃의 등온도선과의 교점을 A'라고 그린다. C'점의 온도를 그림상에서 읽으면 31.70℃를 얻는다. 따라서, 이 냉각탑의 능력은 L이

$$\frac{C_p L \times (37 - 31.7)}{C_p L \times (37 - 32)} = 1.06$$

JIS B 8609에서는 이 값은 1.06으로 산출되어 있다.



[그림 10] L, G는 사양치와 같고 다른 습구온도에서 운전할 때의 측정치로부터의 성능평가



[그림 11] 수량감소시의 성능변화

수량감소시의 성능변화

냉각 수량이 감소하면 앞에서 나타낸 식(2)의 k_a 가 변하므로 냉각탑의 특성도 변화하는 것은 당연하다.

$$\frac{k_a V}{L} \cong \frac{C_p(t_{u1} - t_{u2})}{h_m}$$

는 많은 실험결과로부터 L, G 와의 사이에 다음 관계가 있는 것이 알려져 있다

$$k_a = C_1 L^\alpha G^\beta \quad (3)$$

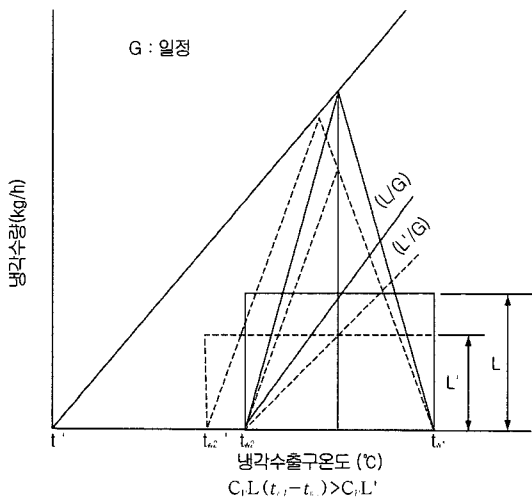
α, β 는 충전물에 따라 변하지만 그 사이에는 다음의 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

$$\alpha + \beta = 1$$

이러한 관계를 식(3)에 대입하여 정리하면 아래식이 얻어진다. β 에는 일반적으로 0.6이 사용된다.

$$C_1 V \left(\frac{G}{L}\right)^\beta = \frac{C_p(t_{u1} - t_{u2})}{h_m}$$

$$\frac{h_m}{C_p(t_{u1} - t_{u2})} = \frac{1}{C_1 V} \times \left(\frac{L}{G}\right)^\beta$$



[그림 12] 냉각수량 감소시의 용량감소

윗식으로부터 특성 삼각형의 저변을 그림 11과 같이 사양대로 ($t_{u1} - t_{u2}$)로 잡으면 수량을 감소시킨 경우의 특성 삼각형은 $AB'C$ 로 변한다. 또한 냉각수의 출구 온도는 AB' 의 연장선과 포화 공기선과의 교점 \textcircled{A} 를 정점으로 하는 이등변 삼각형 $A\textcircled{A}\textcircled{B}$ 를 그리면 점 \textcircled{C} 가 얻어진다. t_{u1} 는 t_{u2}' 로 저하하지만 냉각능력은 냉각수량의 감소가 크므로 감소한다(그림 12).

아래 사양의 냉각탑에서 수량을 60%로 감소시킨 경우의 L 를 구한다.

$$\text{사양 } t_{u1} : 37.6^\circ\text{C} \quad L/G : 1.2$$

$$t_{u2} : 32^\circ\text{C} \quad \beta : 0.6$$

$$t_1 : 27^\circ\text{C}$$

습공기의 t - h 선도상에 그림 13과 같이 사양치를 기준으로 특성 삼각형 ABC 를 그리고, H_m, h_m 을 구하여 다음식을 얻는다.

$$H_m = 42.16 \text{ (kJ/kg}_{\text{dry air}})$$

$$h_m = 28.55 \text{ (kJ/kg}_{\text{dry air}})$$

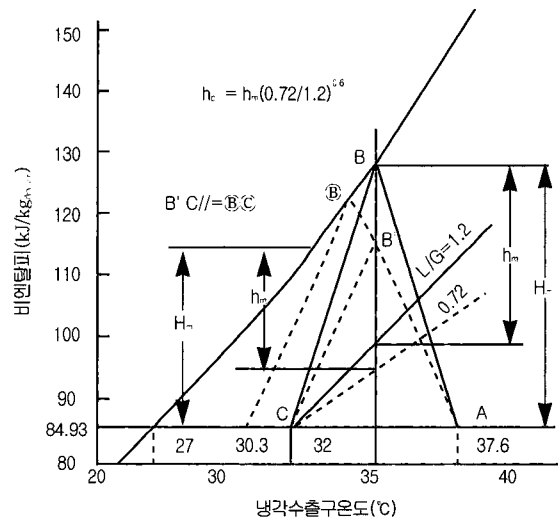
수량감소시의 h_m', H_m' 을 구한다.

$$h_m' = 28.55 \times 0.60.6$$

$$= 20.84 \text{ (kJ/kg}_{\text{dry air}})$$

$$H_m' = 28.5 \times \frac{0.72 \times 4.18 \times (37.6 - 32)}{2}$$

$$= 29.27 \text{ (kJ/kg}_{\text{dry air}})$$



[그림 13] 수량감소시의 냉각수 출구온도를 구하는 방법

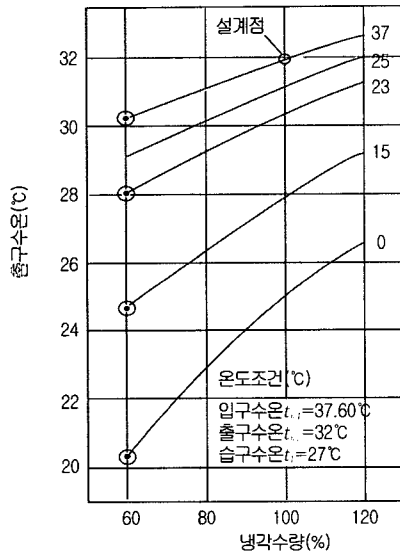
H_m 의 높이를 갖는 이등변 삼각형(수량 감소시의 특성 삼각형) $AB'C$ 를 그린다. AB' 를 연장하여 포화 공기선과의 교점 \textcircled{B} 을 구하고, \textcircled{B} 를 정점으로 하는 이등변 삼각형을 그린다. 점 \textcircled{C} 가 수량감소시의 냉각수 출구온도이다.

$$t_{w2} : 30.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

그림 14는 이 냉각탑의 냉각수 입구온도를 일정(37.6 $^\circ\text{C}$)하게 하고 수량을 감소시킨 경우의 t_{w2} 를 실험적으로 구한 것이다. 그림중의 \textcircled{C} 점은 앞에서 설명한 근사 방법에 의한 수량을 60%로 감소시킨 경우의 계산값이다.

수량이 사양치와 다른 경우의 간이성능평가

성능평가는 첫째로 수량을 사양치와 맞춘 다음 시험을 진행해야만 한다. 그러나 예를 들어 설치 펌프의 관계상 그 수량이 얻어지지 않는 경우도 있다. G는 불변하지만 L만이 변화하는 경우($t_{w1}-t_{w2}$)로 사양치를

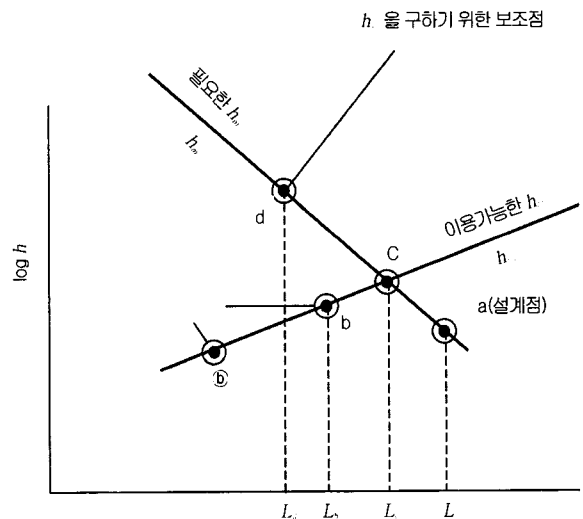


[그림 14] 입구수온 일정시의 습구온도에 대한 냉각수량과 출구수온의 관계

잡으면 식 (4)로부터 h_m 은 L' 에 비례한다. 대수도표상에서는 그림 15의 직선 h_{ms} 로 표현된다. 그림 15 h_{ms} 는 이용가능한 h_m 이라고 부르고 기존 설치된 냉각탑의 운전점은 이 h_{ms} 선상을 이동하며 특성 삼각형은 변한다. 그림의 곡선 h_{mr} 은 주어진 조건(사양)을 만족하는데 필요한 h_m 을 L에 대해서 나타내는 것으로 필요한 $h_m(h_{mr})$ 이라고 부른다. h_{mr} 의 선상에서는 특성 삼각형은 변하지 않으나 수공기비가 변하고 h_m 이 변한다. 그림 16. 냉각탑은 h_{mr} 과 h_{ms} 와의 교점 C로 운전된다. 다른 두수량에서의 시험결과를 대수그래프상에 잡아 양점을 연결하면 h_{ms} 의 선이, 또한 설계점과 보조점의 수량으로부터 구해진 h_m 을 연결하면 h_{mr} 선이 얻어진다. 사양점에서의 h_{mr} 값이 h_{ms} 선의 아래에 있으면 성능은 부족하고 이상에서는 부족하지 않다고 판정할 수 있으며 다음과 같이 평가할 수 있다.

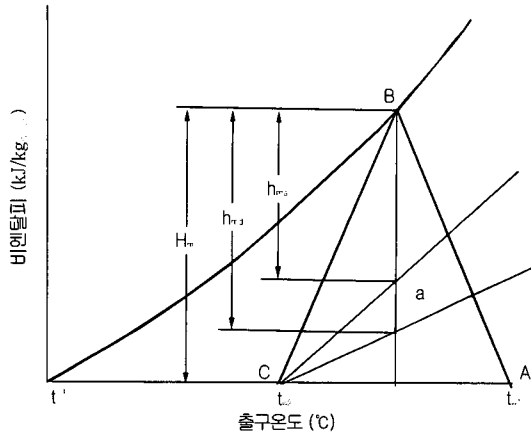
$$\frac{\text{점 C에서의 냉각수량 } L_c}{\text{점 a에서의 냉각수량 } L_a} \times 100(\%)$$

간이성능평가(4장)에서 미루었던 JIS B 8609에서의 평가예로 이 근사해를 적용하고 정밀도를 확인했다.

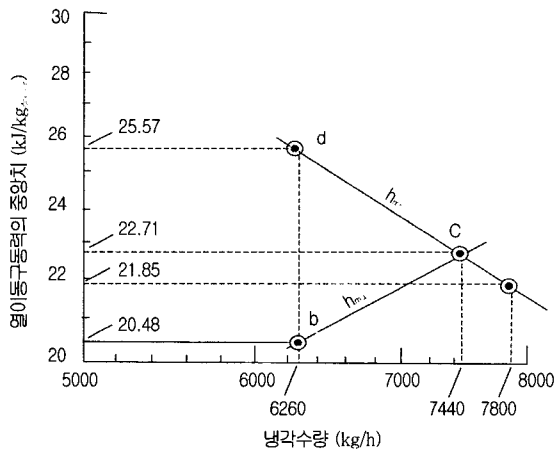


$$(L_c/L_c) \times (100\%)$$

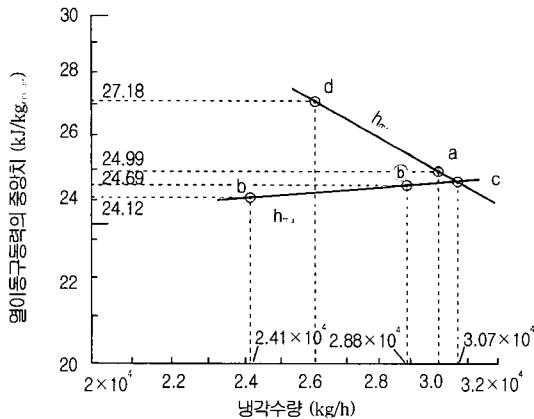
[그림 15] 이용가능한 $h_{mr}(h_{ms})$ 와 필요한 $h_{mr}(h_{mr})$ 성능평가



[그림 16] 선을 그리는데 필요한 구하는 방법



[그림 17] 대향류형의 성능평가



[그림 18] 직교류형의 성능평가

향류형 냉각탑(예1)

표 1은 성능시험제품의 사양치, 시험점 b, ㉔에서의 측정값 및 그것들로부터의 유도값을 정리한 것이다. 이 표의 값으로부터 그림 15에서 서술한 바와 같이 대수 그래프상에, 선을 그린 것이 그림 17이다. 양선의 교점을 구하여 L의 기대치로서 7400[kg/h]가 얻어진다. 따라서 다음과 같이 성능을 평가할 수 있다.

$$\frac{7400}{7800} \times 100 = 94.87\%$$

JIS B 8609의 평가예에서는 이 값은 95%로 계산되어 있다.

<표 1> JIS B 8609에서의 향류형 냉각탑의 냉각수량 부족 시 성능평가에서의 측정치와 사양치

항 목	단 위	측 정 치		사 양 치
		b	(b)	
$(t_{w1} - t_{w2})$	(°C)	(35.3-29.3)	(36.4-30.3)	(37-32)
레인지	(°C)	6.0	6.1	5
t	(°C)	23.0	22.8	27
L	(kg/h)	6260	7440	7800
G	(kg/h)	4040	4040	4333
L/G	-	1.55	1.83	1.80
H_m	kJ/kg _{dry air}	44.04	51.07	40.69
h_m	kJ/kg _{dry air}	24.57	27.71	21.85
h'_m	kJ/kg _{dry air}	20.48	22.71	21.85

주1) h'_m 는 h_m 을 아래식에 의해 사양레인지로 환산 것이다.

직교류형 냉각탑(예2)

표 2에 성능시험제품의 사양치, 시험점 b, ㉔에서의 측정값 및 그것들로부터의 유도값을 정리했다. 표의 값으로부터 앞에서 서술한 바와 같이 대수 그래프상에, 선을 그린다(그림 18). 양선의 교점C에서의 L의 값을 읽어 다음 값을 얻는다.

$$L = 3.07 \times 10^4 \text{ (kg/h)}$$

일반원고

따라서 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\frac{3.07 \times 10^4}{3.00 \times 10^4} \times 100 = 102.3\%$$

JIS B 8609에서는 이 값은 105%로 평가되어 있다.

〈표 2〉 JIS B 8609에서의 직교류형 냉각탑의 냉각수량 부족 시 성능평가에의 측정치와 사양치

항 목	단 위	측 정 치		사 양 치
		b	㉔	
$(t_{w1} - t_{w2})$	°C	(36.6-29.0)	(35.4-29.0)	(37-32)
레인지	°C	7.6	6.4	5
t	°C	21.5	21.4	27
L	kg/h	24100	288000	30000
G	kg/h	21000	21000	20000
L/G	-	1.148	1.371	1,500
H_m	kJ/kg _{dry air}	52.58	49.40	40.69
h_m	kJ/kg _{dry air}	36.67	31.60	24.99
h'_m	kJ/kg _{dry air}	24.12	24.69	24.99

주1) $h'_m = h_m \times (\text{레인지 사양치} / \text{레인지 측정치})$

맺음말

열이동의 구동력으로 중간값 (그림 3)을 취하면 설계점 이외에서의 성능을 용이하게 높은 정밀도로 구할 수 있다. 은 일반 열교환기에서의 평균온도차 과 동일하게 열이동의 구동력이다.

$$k \times \Delta t_m \times A = C_p L (t_{w1} - t_{w2}) \text{ 일반열교환기}$$

$$k \times h_m \times V = C_p L (t_{w1} - t_{w2}) \text{ 냉각탑}$$

상기 두식은 일반열교환기, 냉각탑의 열교환식을 나타낸 것으로 상기 두식을 대비하면 는 K와 h_m 은 Δt_m 과 또한 V는 A와 같은 물리적 의미를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

설계점 이외에서의 운전시에도 L, G가 변하지 않으면 (그림 5)을 높이로서 를 저변으로 하는 이등변 삼각형(특성 삼각형)은 설계점에서의 이 삼각형과 합동 또는 상사가 되는 것을 밝혀내었다. 이렇게 하여 습공기의 t-h 선도상에서 매우 간단히 설계점 이외의 성능을 추정할 수 있게 되었다(그림 7). 따라서 성능평가는 설계점과 다른 상태에서도 가능하게 되어 간편하게 되었다(그림 10).

기호표

기 호	기호의 설명	단 위
C_p	물의 비열	kJ/kg · K
G	냉각공기량	kJ/h
h	습공기의 비엔탈피	kJ/kg _{dry air}
h_m	열이동구동력의 중앙치	kJ/kg _{dry air}
h_{ma}	기존설치된 냉각탑에서 L이 감소될 때 이용가능한 h_m	kJ/kg _{dry air}
h_{mr}	사양상태에서 L만 감소될 때 필요한 h_m	
H_m	$h_m + C_p(t_{w1} - t_{w2})L/G \times \frac{1}{2}$	kJ/kg _{dry air}
k_a	냉각탑 총전충용적 1m ³ , 비엔탈피치 1kJ/KG마다 1시간당의 열이동량	$\frac{\text{kJ/h}}{\text{m}^3 \cdot \text{kJ/kg}_{\text{dry air}}}$
L	냉각수량	kg/h
L/G	수공기비	-
t	공기습구온도	K
k_w	냉각수온도	K
V	냉각탑 총전충용적	m ³
dry air	건공기	-

식 (3)에서 k_0 는 G 가 불변이면 L^b 에 비례하는 것이 많은 실험으로 확인되어 있다. 그 비례상수를 C_1 이라고 하면 아래와 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$h_m = L^{(1-a)} \times \frac{C_1(t_{w1}-t_{w2})}{C_1 V} = C_2 L^b$$

따라서 $(t_{w1}-t_{w2})$ 에 사양치를 잡으면 h_m 은 L^b 에 비례하므로 과 L 과의 관계를 대수그래프 상에 잡으면 직선이 된다. 이 직선은 냉각수량에 대해 이미 설치된 냉각탑에서 이용할 수 있는 열 이동 구동력을 표현하는 것이 되고, 선이라고 부른다. 이 h_{ma} 선은 다른 두 수량에서의 운전시의 h_m 을 구하고 두점을 이으면 얻어진다.

또한 L 이외는 불변 그대로 수량 L_d 에서 운전하는데 필요한 h_{md} 는 특성삼각형이 변하지 않으므로(냉각탑의 크기는 변함) 다음식으로부터 구해진다(그림 16). 윗식으로부터 구해진 L 과 h_{mr} 의 관계를 앞의 대수그

$$\frac{H_m - h_{md}}{H_m - h_{ma}} = \frac{\text{변화후 수량}}{\text{설계수량}}$$

래프상에 그린 것을 h_{mr} 선이라 부르고 선과의 교점에서 성능시험 제품은 운전한다. 사양의 $(t_{w1}-t_{w2})$ 에서는 그 점의 수량 를 생각할 수 있을것으로 기대된다. 따라서 L 와 설계수량 L 에 의한 성능을 평가할 수 있다. 이 근사법을 JIS B 8609의 평가예에 적용하고 이 근사법의 정밀도를 검증했다. L , G 가 사양대로이면 대향류, 직교류형에 관계없이 2%이하의 오차로 일치하고 있다. 그러나 L 이 사양치와 다른 경우 직교류에서는 2.5%에 달한다. 이 근사법에 의하면 성능 평가는 매우 간편하게 된다. 특히 성능시험 제품이 표준설계온도 이외의 것이면 JIS B 8609에서는 평가를 위해서 작성되어 있는 여러가지의 계산도표를 설계온도로 새롭게 작성하여야 한다. 그러나 이러한 수고를 생략가능하다. (2)