

옥상설치 냉각탑에서의 토출공기 재유입량 예측

이 태 구†, 문 선 애, 허 진 혁, 최 충 현*, 이 강 순**, 이 재 현***, 유 호 선****
한양대학교 대학원 기계공학과, †(주)명진에어테크, **삼성건설, ***한양대학교 기계공학부, ****송실대학교 기계공학과

Prediction of the Individual Reentering Rate of a Cooling Tower within it's Bank Installed on Building Roof

Tae-Gu Lee†, Sun-Ae Moon, Jin-Hyuk Heo, Choong-Hyun Choi*, Kang-Soon Yi**, Jae-Heon Lee***, Hoseon Yoo****

ABSTRACT: In this paper, the individual reentering rate of the cooling towers installed on a building roof is investigated considering the wind direction and louver wall installation. As the western wind with 5 m/s flows and the louver wall is not installed around the roof, the reentering rate of the cooling towers is predicted about 20%. However the reentering rate is simulated about 5% when the louver wall is installed around the roof. As the southern wind with 5 m/s flows and the louver wall is not installed, the reentering rate of the cooling tower is predicted about 30%. On the contrary, the reentering rate is simulated about 15% when the louver is installed. As a result, if there is no louver wall installed around the roof, the falloff of the cooling capacity would be serious by the reentering of the discharge air. The installation of the louver wall is strongly recommended to prevent the discharge air reentering.

Key words: Cooling tower(냉각탑), Recirculation(재순환), Interference(간섭), Reentering rate (재유입율)

1. 서 론

산업규모가 총체적으로 증가함으로써 그에 따른 산업용수의 사용량이 크게 증가하고 있다. 산업용수 사용량의 증가는 제한된 수자원의 부족과 방류 산업용수에 의한 수질오염 등의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 산업용수중 약 70%를 차지하는 각종 냉각수의 재이용이 필요하다. 냉각수는 주로 생산공정 중 제품의 냉각, 생산기기의 냉각, 그리고 공기조화기기의 냉각에 사용되고 있다. 산업체 및 대형 건물 등에서는 산업기기 및 냉동공조설비의 열방출용 설비로서 냉각탑을 사용하고 있으며 일반적으로 고열원의 열부하를 대기로 방출하는 최종 장치로서 냉각탑에서의 효율적인 열교환은 전체

시스템의 성능을 좌우하게 된다.

냉각탑의 경우 대부분 건물 옥상에 설치되고 있으나 헬기포트나 엘리베이터실 등으로 건물 옥상의 활용도가 높아지고 있기 때문에 냉각탑의 설치면적은 축소되고 있는 상황이다. 이 같은 상황에서 건축 등의 장애물과 외기에 의한 영향에 의해 냉각탑에서 열교환된 토출공기가 재유입되어 냉각성능을 크게 저하시키고 있으며 이는 곧 냉각기기에 막대한 손실을 초래하고 있다. 이를 방지하기 위해 외기 풍향에 따른 재유입 특성 예측을 통한 냉각탑의 최적 선정과 배치기술이 요구되며 외기 유입을 위한 루버 설치 등의 방법이 요구된다.

본 연구에서는 서울시 K동에 건설될 예정의 건물 옥상 설치 냉각탑을 연구대상으로 결정하여 외기 풍향에 의한 재유입율 및 루버벽 설치 유무에 의한 재유입율을 이론적인 방법으로 예측하였다.

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2293-5169

E-mail address: mybluetear@freechal.com

2. 냉각탑의 재유입현상 및 재유입율

2.1 재유입현상

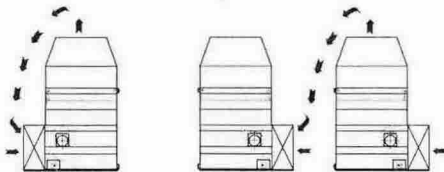
냉각탑은 냉동기, 열기관, 발전기 및 화학 플랜트 등으로부터 발생하는 온수를 주위의 공기와 접촉시켜 물을 냉각시키는 장치이다. 냉각탑의 냉각원리는 공기와 물의 온도차에 의한 현열냉각과 순환수의 증발에 의한 잠열냉각으로 이루어진다. 따라서 냉각탑 설계시 냉각탑으로 유입되는 외기의 습구온도가 냉각성능을 크게 좌우하며 이를 기준으로 냉각성능을 결정하게 된다. 그러나 냉각탑에서 열교환된 고온 다습의 토출공기가 재유입될 경우 냉각성능을 크게 저하시키게 된다. 냉각탑 토출공기가 재유입되는 현상을 크게 두가지로 구분하여 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)의 경우 재순환에 의해 토출 공기가 재유입되는 상황을 나타내며 Fig. 1(b)의 경우 냉각탑과 냉각탑 간의 간섭에 의해 재유입되는 상황을 나타낸다.

2.2 재유입율

냉각탑 토출면에서 토출된 습공기의 재유입 현상을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 재유입율은 유입면에서 유입되는 총 유입유량대비 재순환 또는 간섭에 의해 유입되는 재유입유량의 비로 정의 될 수 있으며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_e} \quad (1)$$

여기서 R 은 재유입율, \dot{m}_e 는 총 유입유량[kg/s],



(a) Recirculation (b) Interference

Fig. 1 Kinds of reentering.

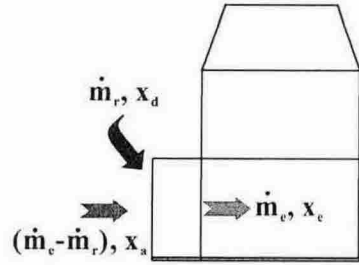


Fig. 2 Schematics of the reentering rate.

\dot{m}_r 은 재유입유량[kg/s]이다. 재유입유량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{m}_r = \frac{(x_e - x_a)\dot{m}_e}{x_d - x_a} \quad (2)$$

여기서, x_d , x_a 및 x_e 는 각각 냉각탑 토출측 습공기의 절대습도[kg/kgDA], 외기의 절대습도[kg/kgDA] 및 냉각탑 유입면 습공기의 절대습도[kg/kgDA]를 나타낸다. 따라서 식(2)를 식(1)에 대입하는 재유입율 R 은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$R = \frac{x_e - x_a}{x_d - x_a} \quad (3)$$

3. 연구모델

본 연구에서 연구모델로 채택된 옥상 설치 냉각탑 건물의 외형을 Fig. 3에 나타내었다. 본 건물 옥상은 서울시 K동에 건설될 예정의 건물 옥상이며 길이 59.2 m 폭 26.3 m 및 높이 7.5 m의 규모를 갖는다. 건물 옥상에는 냉방을 위한 4종류의 냉각탑, 헬기창륙장 및 엘리베이터실이 설치되어 있다.

냉각탑의 경우 설치 위치, 수량 및 사용목적에 따라 CT1-1~4, CT2-1~9, CT3-1 및 CT4-1~2로 구분하였다. 이때 각각의 냉각탑의 냉각수량(Q_w)은 265 m³/h, 냉각수 입·출구 온도(T_{wh} , T_{wc})는 각각 37℃ 및 32℃이며 유입 습구온도는 27℃이다. 총 16대의 냉각탑이 설치되어 있으며 CT1-1~4 냉각탑과 CT2-1~9 냉각탑의 경우 유

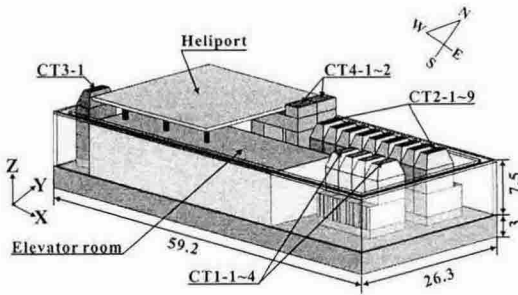


Fig. 3 Schematics of the research model [unit; m].

입면은 서로 반대 방향을 향해 있으며 CT3-1 냉각탑의 유입면은 북쪽을 CT4-1~2 냉각탑의 유입면은 동쪽과 서쪽을 향해 있다. 냉각탑의 토출면에는 노즐이 설치되어 있으며 냉각탑의 높이는 노즐을 포함하여 옥상 높이보다 약 1 m 정도 높게 설치되어 있다. 냉각탑에 노즐이 설치된 이유는 토출속도 상승 및 토출면의 높이를 옥상보다 높게 하여 외기에 의한 재유입을 방지하기 위한 것이다.

그러나 냉각탑과 인접한 옥상층벽의 경우 외관 및 미관 때문에 원활한 외기 유입을 위한 루버벽은 설치되어 있지 않은 상태이다. 이 경우 냉각탑 토출면에서 토출된 고온 다습의 습공기가 외기영향에 의해 냉각탑 유입면으로 재유입될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 외기 풍향에 의한 재유입 영향 및 루버벽 설치 유무에 의한 재유입 영향을 이론적인 방법으로 예측하였다.

4. 기류, 재유입을 해석방법

4.1 지배방정식

본 연구에서는 Fig. 4와 같은 해석영역을 설정하고 이론해석을 통하여 풍향 및 풍속에 따른 옥상설치 냉각탑 주위의 기류 분포 및 재유입을 해석영역은 냉각탑이 설치되어 있는 옥상으로부터 약 40 m의 영역을 크게 설정하여 길이 152 m, 폭 52 m 및 높이 50 m의 크기를 갖고 있다. 해석영역의 유동을 3차원 정상 비압축성 난류유동으로 가정하였으며 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산을 방정

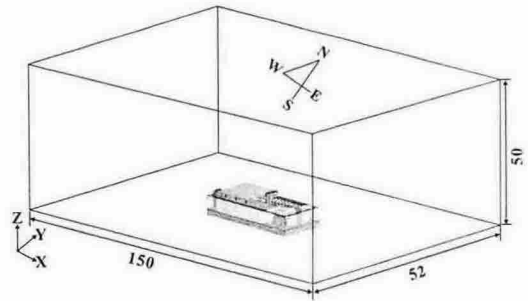


Fig. 4 Schematics of solution domain in the present study [unit; m].

식, 에너지방정식 및 수증기 농도방정식을 고려하였다. 이때 난류모델로는 부력이 고려된 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다.

4.2 경계조건

앞에서 언급된 해석영역의 기류 분포, 재유입율 및 유입습구온도를 예측하기 위한 경계조건은 해석영역의 동측면, 서측면, 남측면, 북측면, 상측면 및 하측면과 냉각탑 토출면, 냉각탑 유입면에서 정의될 수 있으며 이를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 외기 풍향 및 풍속에 의한 옥상설치 냉각탑의 재유입율을 예측하기 위하여 서측면에서 5 m/s의 외기 유입조건 및 남측면에서 5 m/s의 외기 유입조건 등의 2가지 외기 풍향 조건을 고려하였으며 풍속은 5 m/s로 동일하게 부여하였다. 서측 및 남측의 풍향을 고려한 이유는 우리나라의 경우 여름철 대부분의 풍향이 남서풍인 점에 기인한 점이고 외기풍속 5 m/s는 기상데이터를 참고하였다. 또한 외기온도 및 절대습도는 설계조건인 건구온도 32°C와 습구온도 27°C를 기준으로 부여하였다. 냉각탑 토출면에서 질량유량 41.65 kg/s, 건구온도 35.8°C 및 절대습도 0.0373 kg/kgDa인 습공기가 토출된다고 가정하였으며 냉각탑 유입면에서는 질량유량 41.65 kg/s인 습공기가 유입된다고 가정하였다.

4.3 옥상 층벽

본 연구에서 고려된 옥상층벽은 루버가 없는 옥상층벽과 루버가 설치된 옥상층벽이다. 따라서

Table 1 Boundary conditions for present study

Location	Conditions	
	Western wind flow	Southern wind flow
top wall	$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$	
bottom wall	$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$	
eastern wall	$P_s = 101315 \text{ Pa}$	$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$
western wall	$v_n = 5.0 \text{ m/s}, T_a = 32^\circ\text{C}, x_a = 0.0206 \text{ kg/kg DA}$	$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$
southern wall	$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$	$v_n = 5.0 \text{ m/s}, T_a = 32^\circ\text{C}, x_a = 0.0206 \text{ kg/kg DA}$
northern wall	$\frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$	$P_s = 101315 \text{ Pa}$
cooling tower discharge	$\dot{m}_c = 41.65 \text{ kg/s}, T_d = 35.8^\circ\text{C}, x_d = 0.0373 \text{ kg/kg DA}$	
cooling tower enter	$\dot{m}_e = 41.65 \text{ kg/s}, \frac{\partial \phi_i}{\partial x_i} = 0$	
wall	$u = v = w = 0$	

루버가 없는 옥상 측벽을 솔리드월(Solid wall)이라 정의하고 루버가 설치된 옥상 측벽을 루버월(Louver wall)이라 정의하였다. 루버벽의 경우 루버는 옥상 측벽 4방향에 모두 설치되어 있으며 루버가 설치된 높이는 냉각탑 유입면 하단에서 높이방향으로 2m이다. 이때 고려된 루버벽의 개구율은 50%이다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 외기 풍향 및 루버벽 설치 유무에 의한 옥상 설치 냉각탑의 재유입현상을 예측하였다. 따라서 풍향 및 루버벽 설치 유무에 따른 냉각탑 토출면에서의 습공기 패스라인, 냉각탑 유입면에서의 재유입률 결과를 비교 고찰하였다.

5.1 패스라인

서쪽으로부터 풍속 5 m/s 외기가 흐르고 있을 때 루버설치 유무에 따른 냉각탑 토출면에서의 습공기 패스라인을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Fig. 5(a)의 case 1은 솔리드벽의 패스라인이며 Fig. 5(b)의 case 2는 루버벽의 패스라인을 나타낸다. Fig. 5(a)를 살펴보면 냉각탑 토

출면에서 토출된 6 m/s의 습공기는 서쪽으로부터 불어오는 외기에 의해 동쪽으로 유동 방향이 바뀌게 되는 경향이 나타나게 된다. 이때 냉각탑 유입면에서는 지속적으로 외기 유입이 이루어져야 하는데 인접한 옥상 측벽이 원활한 외기 유입을 차단하는 장애물 역할을 하게 되므로 냉각탑 주변 외기가 유입되게 된다. 따라서 냉각탑에서 토출되어 외기에 의해 유동 방향이 바뀐 고온 다습한 습공기가 냉각탑 유입면으로 재유입되는 것을 알 수 있다. 특히 냉각탑 CT2-1~9의 경우 재순환에 의한 재유입과 CT4-1~2로부터 토출된 습공기가 유입되는 간섭에 의한 재유입이 동시에 이루어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 CT2-1~9 냉각탑 및 CT1-1~4 냉각탑의 경우 재유입에 의한 냉각성능 하락이 예상된다.

Fig. 5(b)를 살펴보면 Fig. 5(a)와 마찬가지로 냉각탑 토출면에서 토출된 습공기는 외기에 의해 유동 방향이 동쪽으로 바뀌게 되는 경향을 보이게 된다. 그러나 냉각탑 토출면에서 토출된 습공기가 냉각탑 유입면으로 재유입되는 현상은 거의 나타나지 않는다. 이 같은 이유는 유입면에서의 외기 유입은 냉각탑 주변 외기로부터 이루어지는 것이 아니라 옥상 측벽에 설치된 루버를 통해 외기가 유입되기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 루버를 설치함으로써 냉각탑의 재유입 현상이

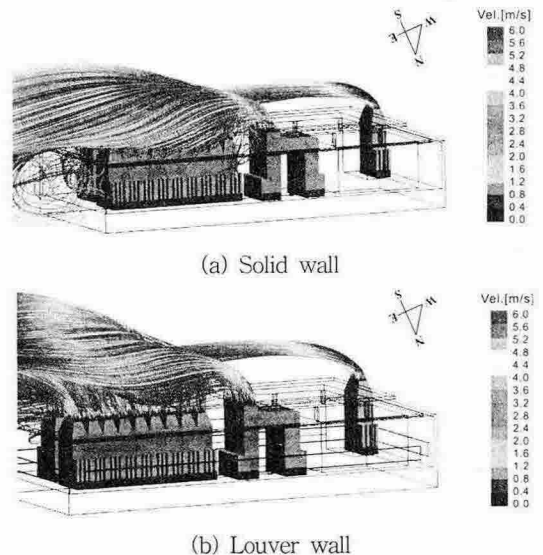
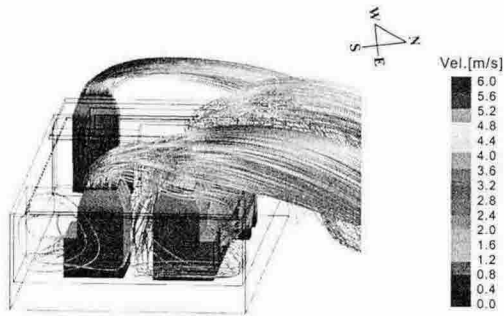
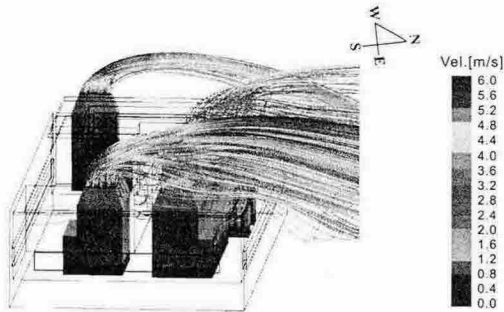


Fig. 5 Pathline of cooling tower discharge air in case of the western air with 5 m/s.



(a) Solid wall



(b) Louver wall

Fig. 6 Pathline of cooling tower discharge air in case of the southern air with 5 m/s.

개선되고 있음을 알 수 있다.

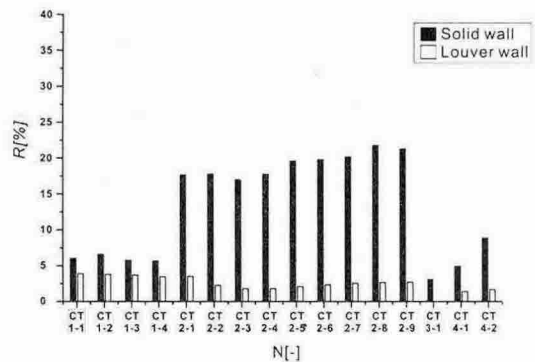
남쪽으로부터 풍속 5 m/s 외기가 흐르고 있을 때 루버설치 유무에 따른 냉각탑 토출면에서의 습공기 패스라인을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)를 살펴보면 냉각탑 토출면에서 토출된 6 m/s의 습공기는 남쪽으로부터 불어오는 외기에 의해 북쪽으로 유동 방향이 바뀌게 된다. 또한 냉각탑 유입면에서는 인접한 옥상 측벽이 장애물 역할을 하게 되므로 냉각탑 주변 외기가 유입되게 된다. 따라서 냉각탑에서 토출되어 외기에 의해 유동 방향이 바뀐 고온 다습한 습공기가 냉각탑 유입면으로 재유입되는 것을 알 수 있다. 특히 냉각탑 CT2-1~9의 경우 재순환에 의한 재유입과 CT1-1~4로부터 토출된 습공기가 재유입되기 때문에 재유입이 매우 크게 발생할 것이라고 예측된다. 또한 CT1-1~4 및 CT4-1~2의 경우도 유입면에서의 지속적인 외기 유입에 의해 재유입현상이 심하게 발생되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(b)를 살펴보면 토출면에서 토출된 습공기는 유동 방향이 동쪽으로 바뀌게 된다. CT 1-1~4의 경우 남쪽에 설치된 루버를 통해 외기

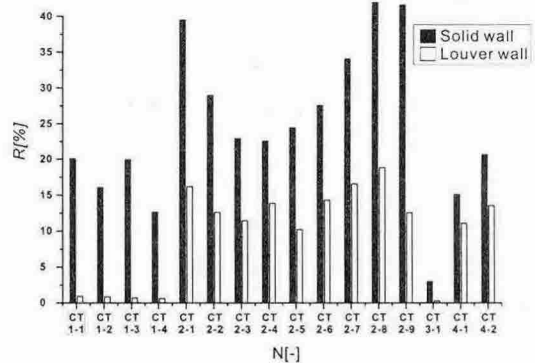
가 유입되므로 재유입 현상은 상당히 개선되고 있음을 알 수 있다. 또한 CT2-1~9 및 CT4-1~2의 경우 일부 재유입되는 현상이 발생하는 것을 볼 수 있으나 이는 루버가 없을 때보다 현저하게 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 루버를 설치함으로써 냉각탑의 재유입 현상이 개선되고 있음을 알 수 있다.

5.2 재유입율

풍향 및 루버설치 유무에 따른 냉각탑 유입면에서의 재유입율을 예측하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 서풍 5 m/s일때 냉각탑별 재유입율 그래프이며 Fig. 7(b)는 남풍 5 m/s일때 냉각탑별 재유입율 그래프이다. Fig. 7(a)의 솔리드벽의 경우 CT2-1~9 재유입율은 재순환 및 간섭에 의해 20% 정도로 크게 예측되며 그 외 냉각탑의 경우 10%이내 정도로 예측된다. CT2-1~9 냉각



(a) Western wind of 5 m/s



(b) Southern wind of 5 m/s

Fig. 7 Comparisons of the reentering rate incase of the solid wall or louver wall.

탑의 경우 CT2-1에서 CT 2-9로 갈수록 재유입율이 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 서쪽에서 으로부터 불어오는 외기에 의해 동쪽으로 갈수록 재유입이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 7(a)의 루버벽의 경우 냉각탑별 재유입율은 크게 감소한 것으로 예측된다. 이는 루버를 통해 옥상 외부의 외기 유입이 이루어지기 때문인 것으로 판단되며 특히 CT2-1~9의 경우 총 9대의 냉각탑에서 유입되는 유량이 크기 때문에 루버로부터의 유입이 효과적으로 이루어지기 때문에 재유입율이 감소되는 것으로 사료된다.

Fig. 7(b)의 루버가 없는 경우 CT3-1을 제외한 나머지 냉각탑의 재유입율은 20%이상으로 예측되며 특히 CT2-1~9의 경우 40%이상 재유입율이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 논의한 것처럼 유입측 방향과 외기의 진행방향이 동일하기 때문에 재순환 및 간섭이 가중되어 나타난 것으로 사료된다. 이 같은 경우 재유입에 의한 냉각성능 하락은 심각할 수준으로 판단되며 이를 개선할 방안이 요구된다. Fig. 7(b)의 루버가 설치된 경우 옥상 외부 외기 유입에 의해 냉각탑별 재유입율은 전반적으로 감소한 것으로 판단된다. 특히 CT1-1~4의 경우 외기풍향과 루버를 통한 외기 유입방향이 동일하기 때문에 재유입율은 크게 감소하였으며 CT2-1~9의 경우 루버가 없을 경우에 비해 50%이상 재유입율이 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 옥상 측벽에 루버를 설치함으로써 냉각탑의 재유입 현상이 개선되었음을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 외기 풍향 및 루버벽 설치 유무에 의한 냉각탑 재유입율을 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 5 m/s의 외기가 서풍으로 흐르고 있을 때,

냉각탑의 재유입율은 옥상측벽에 루버가 없을 경우 20% 정도로 루버가 있을 경우 5% 이내로 예측되었다.

(2) 5 m/s의 외기가 남풍으로 흐르고 있을 때, 냉각탑의 재유입율은 옥상측벽에 루버가 없을 경우 30% 이상으로 루버가 있을 경우 15% 이내로 예측되었다.

(3) 옥상 측벽에 루버가 없을 경우 냉각탑 재유입에 의한 냉각성능 감소가 우려될 것으로 사료된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 루버벽을 설치했을 경우 재유입 현상은 크게 개선된 것으로 예측되었다.

참고문헌

1. Shin, J. Y., Son, Y. S. and Han, D. W., 2002, Off-design performance analysis of a counterflow-type cooling tower, SAREK, Vol.14, No.3, pp. 191-199.
2. Lee, H. C., Bang, K. H. and Kim, M. H., 1998, Experimental study on the thermal performance of a cooling tower, SAREK, Vol. 10, No. 1, pp. 88-94.
3. Kim, Y. S., Seo, M. K. and Lee, S. K., 1999, A study on the counter-flow cooling tower performance analysis using NTU-method, SAREK, Vol. 11, No. 5, pp. 598-604.
4. ASHRAE, 1996, ASHRAE handbook-HVAC systems and equipment, ch.36, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering, Inc.
5. Seoh, J. I., Kim, K. S. and Lee, Y. S., 1984, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 2
6. Partankar, S. V., 1980, Numerical heat and fluid flow, McGraw-Hill, New York