

냉각탑 백연방지의 성능 향상에 관한 실험적 연구

정순영¹ · 이병천² · 김 성^{1†}

¹한국생산기술연구원 열유체시스템그룹 ²풍천엔지니어링

An Experimental Study on the Cooling Tower of Plume Prevention and Performance Improvements

SOON YOUNG JEONG¹, BYEONG CHEON LEE², SUNG KIM^{1†}

¹Thermal & Fluid System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

²POONGGHEON Engineering Co., Ltd, 775 Gyeongin-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07299, Korea

†Corresponding author :
ks2928@kitech.re.kr

Received 27 September, 2019

Revised 3 December, 2019

Accepted 30 December, 2019

Abstract >> The occurrence of white plume in the cooling tower is phenomenon that the steam in the air through the cooling tower fan is condensed again by the cold ambient air to become saturated moist air. Accordingly, this can cause many problems like spoiling landscape around the cooling tower, odor of ambient air, falling accident by frozenness in the winter, and traffic accident, etc. This study was to install the heat exchanger in the inside of the cooling tower in order to prevent the white plume phenomenon in the cooling tower without affecting the performance of cooling tower. In addition, this study was to discharge the part of cooling water into the atmosphere through the recirculation of heat exchanger after creating dry air by heating the saturated moist air to the dew point temperature. At that time, this study was to conduct the experimental study in order to secure the optimal design data to prevent the white plume in the cooling tower because it checked the dry-moist temperature and relative humidity in the inside-outside of cooling tower on the moist air, and evaluated the performance of the heat exchanger.

Key words : Cooling tower(냉각탑), Plume(백연), Heat exchanger(열교환기), Dispersion (비산)

1. 서 론

산업용 기기장치 및 공정시스템의 운영 중 발생하는 발열(calescence)은 작업환경을 저하시킬 뿐만 아니라 공정 시스템 운영효율을 저하시킨다. 또한 기기

장치에서 발생하는 열(heat)은 기기장치 고장의 원인이 될 수 있으며, 더 나아가 기기장치의 유지보수 비용이 증가하는 부정적인 효과가 발생된다. 따라서 쾌적한 산업 환경을 위해서는 기기장치 및 공정시스템 운영 중에 발생하는 열 제거 및 적절한 온도 유지가

필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기기장치 및 공정시스템 운영 중에 발생하는 기계의 열을 냉각시켜주는 장치(냉각탑)들이 개발 및 생산되었다. 냉각탑은 다양한 냉각 매체 및 최소한의 에너지를 사용하여 경제 및 효율적 방법으로 열 제거 및 적절한 온도를 유지하는 기기장치이다. 주로 산업에서는 원활한 수급이 가능한 물을 이용하여 대기 중으로 증발시키는 원리로 개발된 냉각탑이 많이 사용되고 있다. 물을 사용하고 자연의 원리로 개발된 냉각탑은 다량의 냉각수가 증발하면서 포화상태로 수증기가 대기로 방출하면 냉각탑의 주변의 찬 공기와 혼합되어 과포화증기상태로 방출된다. 이때 과포화증기는 하얀 연기처럼 미세한 물방울로 변화되어 매연과 같이 보이거나 기기장치 주변에 안개로 형성되는 현상으로 인해 환경적 문제 및 소음 등의 문제점이 발생되며, 외부온도가 차갑고 건조한 겨울철에 주로 발생한다. 이처럼 냉각탑에서 배출된 공기 중의 수증기가 액체 상태에서 물로 상변화하여 하얀 연기처럼 보이는 현상을 백연현상이라 하며, 백연현상을 저감시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. So¹⁾는 건습식 백연방지는 습식부분의 습 공기와 건습부분을 빠져 나온 건공기가 혼합되어 드리프트 엘리미네이터를 통과한 혼합 공기는 별집 모양의 형태로 수직·수평 방향의 난류 유통으로 나누어지며 이때 혼합된 공기는 균일한 불포화상태가 되는 방식의 백연을 저감하는 냉각탑을 개발하였다. Gu 등²⁾은 기존 판코일을 충전재와 직렬로 장착하여 백연을 방지하는 문제점을 인지하고 플라스틱 판형 공기가열기가 병렬로 장착하여 기존 문제점을 해결하고, 또한 추가적으로 댐퍼의 조작에 따른 열 성능과 공기가열 성능의 변화를 통해 백연을 저감하는 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 백연방지 성능시험에 대한 실험적 연구를 수행하기 위해 대향류형 냉각탑에 백연장치를 설치하였다. 대향류형 냉각탑은 탑 내부에서 물과 공기의 흐름이 서로 대향류로 접촉하여 열교환성능이 좋고 설치면적이 적어 가장 널리 이용되는 방식이다. 따라서 대향류형 백연방지 냉각탑은 냉각탑에서 배출되는 공기의 습도가 높으면 외부공기와 혼합

되는 과정에서 수증기로 액화되어 연기처럼 백연이 발생한다. 또한 냉각탑 충전물과 송풍기 전단에 열교환기를 설치 후 과포화상태의 공기를 직접 가열하여 온도를 높이거나 습도를 내려서 대기로 방출하는 방식으로 백연방지를 위한 냉각탑 성능시험을 수행하였다. 다양한 시험조건의 결과를 분석하여 냉각탑의 백연현상을 방지할 수 있는 실험조건을 분석하였다.

2. 냉각탑

2.1 냉각탑 원리 및 형상

Fig. 1은 냉각탑 형상을 나타낸다. 냉각탑은 증발 잠열과 현열의 열을 이동하는 원리로 작동한다. 공기는 물의 온도차에 의해 현열로 냉각되고 물은 증발하면서 주위의 공기 중의 증발잠열을 빼앗아 냉각된다. 물의 체공시간을 늘리고 물과 공기의 접촉면적을 극대화하여 냉각탑 팬을 통해 물과 공기의 접촉을 최대로 하여 많은 증발이 일어나는 원리로 작동된다.

냉각탑 형상은 대향류형(counter-flow)과 직교류형(cross-flow)으로 나뉘며 대향류형은 충전재에서 공기가 하부에서 상부로 상승하면서 냉각수와 수직으로 열교환을 형성하고, 직교류형은 충전재에서 냉각수와 공기가 수평으로 열교환하는 형태로 나누게 된



Fig. 1. Cooling tower

다. Fig. 2는 대향류형 및 직교류형 냉각탑 형상을 비교한 것이다. 직교류형은 같은 수량과 열교환계수값이 동일하여 냉각탑의 부피가 대향류형에 비해 20% 커지며 루버(louver)의 높이가 흡입구와 동일하여 고온다습한 공기가 재순환의 영향이 커지나 구조가 간단하고 보수가 용이하다.

대향류형 냉각탑은 물과 공기의 향휴형 접촉으로 열교환율이 높고 루버와 투출부의 있으므로 재순환되는 공기량이 적다. 그러나 루버, 비상방지 등으로 타워의 길이가 높고 압력에 의한 살수로 저항이 높다. 또한 송풍기의 마력이 증가하여 제작 및 보수비용이 증가한다.

2.2 백연현상

Fig. 3은 냉각탑의 백연현상을 나타낸 것이다. 백

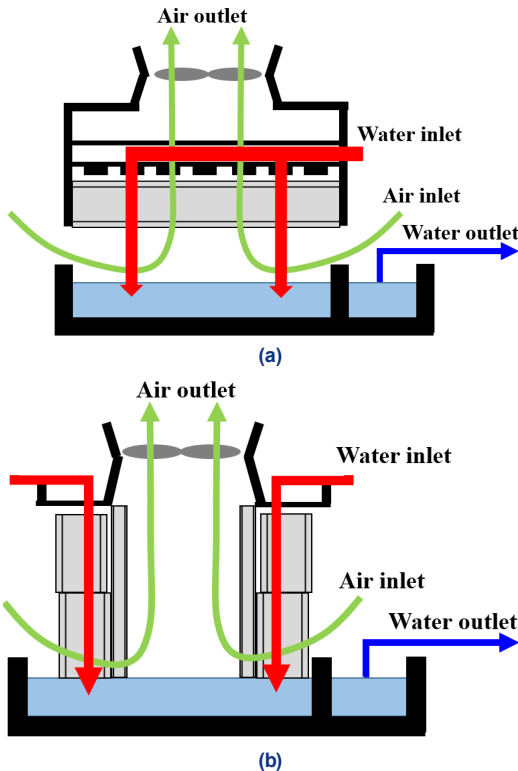


Fig. 2. Comparison of cooling tower (a) counter-flow cooling tower, (b) cross-flow cooling tower

연현상은 특히 겨울철 냉각탑의 송풍기를 통해서 날아가는 포화 습공기가 저온의 주변공기에서 응축되어 미세한 입자로 가시화 되는 현상을 의미한다^{3,4)}. 이러한 백연은 주변에 비산으로 인해 물이 생성되어 주변에 악취를 발생시킨다. 또한 겨울철 도로의 결빙으로 인한 사고가 발생하고 화재 등의 문제점이 발생된다. 따라서 본 연구에서는 다양한 시험조건에서 백연현상이 발생하는 조건을 확인하고, 시험결과를 분석하여 백연현상을 방지하는 방안을 실험적 연구를 통해 도출하였다.

3. 냉각탑 성능시험

냉각탑 성능시험은 한국설비기술협회(Korean Association of Air Conditioning Refrigerating and Sanitary Engineers, KARSE) 단체표준의 기계통풍식 냉각탑 성능시험 방법에 따라 수행하였다. 한국설비기술협회의 단체표준에 따라 냉각탑 성능시험 장치를 구축 및 검토하였고, 성능시험에 필요한 측정센서 등을 확인하였다⁵⁾.

3.1 시험장치 및 방법

냉각탑 백연현상 성능시험을 위한 성능시험장치



Fig. 3. Cooling tower of plume phenomenon

계략도는 Fig. 4에 나타내었고 성능시험에 사용된 측정센서는 Table 1에 제시하였다. 일반적으로 백연현상 방지를 위해 냉각탑의 상부에 열교환기를 설치하여 토출 공기의 온도를 상승시킨다. 따라서 백연방지 성능실험을 위해 냉각탑 순환수 입구온도를 일정하게 유지하였고, 냉각탑 입구 및 출구부분에 온도센서를 설치하여 온도를 측정하였다. 또한 열교환기의 입구 및 출구 부분에도 온도센서를 설치하였고 냉각탑의 입구 측에 유량계를 설치하여 냉각탑의 순환수 유량을 측정하였다. 열교환기 전단 및 후단의 온도를 정밀하게 측정하기 위해서 전단에는 5구간, 후단에는 12구간을 설치하여 입구 및 출구온도를 측정하였다. 열교환기의 입구 및 출구의 압력 차이는 압력센서를 이용하여 측정하였고, 냉각탑 내부 순환을 위한 송풍기의 소비동력은 적력분석기를 이용하여 측정하였다.

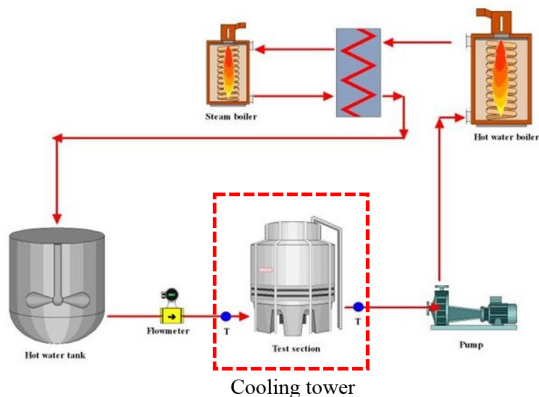


Fig. 4. Schematic diagram of experimental apparatus for pump performance

Table 1. Specifications of a measurement device

Measurement device	Range	Uncertainty
Temperature (°C)	-200~850	±0.2
Power meter (V, A)	0~600, 0~200	±0.6
Flow-meter (m ³ /h)	0~1000	±0.5
Velocity meter (m/s)	0~50	±0.02

3.2 시험조건

Table 2는 냉각탑 백연방지 성능시험을 위한 실험 조건이며, 외기온도조건별 실험조건을 나타낸다. 성능시험은 외기온도 -5°C, 0°C 및 5°C 때 성능실험을 실시하였다. 일반적인 냉각탑 성능을 확인하는 방법과 동일하게 냉각탑 입구온도 37°C 및 40°C의 순환수 유량을 흘려 냉각탑의 성능을 확인하였으며, 백연방지운전을 통해 백연현상에 대한 성능실험을 수행하였다. 일반운전과 백연방지운전의 차이점은 일반운전 시 순환수량은 냉각탑의 입구와 출구로만 순환하여 냉각탑의 성능을 확인한 반면, 백연방지 운전 시에는 냉각탑의 순환수량의 일부분을 냉각탑 내부의 열교환기를 통과하도록 설계하였다. 이때 냉각탑 내부로 흐르는 고온의 순환수가 저온의 토출 공기온도 상승을 일으켜 냉각탑에서 토출하는 백연을 방지한다.

4. 성능시험 결과 분석 및 함수화

일반적으로 냉각탑 백연현상은 냉각탑 백연지표 (tower plume indicator, TPI)로 나타낸다. 냉각탑 백연지표는 냉각탑 토출상대습도(relative humidity)와 설계조건인 상대습도의 비율로 나타낸다. 냉각탑 백연지표 식은 다음과 같다.

$$\text{Tower plume indicator} = \frac{\text{Relative humidity}(\text{test})}{\text{Relative humidity}(\text{design})} \quad (1)$$

냉각탑 백연현상 방지를 위한 성능시험조건을 냉각탑 백연지표로 분석하였다. 냉각탑 백연지표보다

Table 2. Experimental condition

	Value	
Driving methods	Plume prevention	
Outside temp. (°C)	-5, 0, 5	-5, 0, 5
Cooling water temp. (°C)	37	40
Cooling water flow-rate (m ³ /h)	149	195
By pass flow	0	0

낮을 경우에는 백연현상 발생 가능성이 있으므로 백연발생 방지를 위해서는 냉각탑 백연지표 조건이 중요하다. 냉각탑 백연지표를 도출하기 위해서는 실험조건의 냉각탑 토출상대습도가 필요하다. 실험조건의 냉각탑 토출상대습도는 대한설비공학회(Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, SAREK)에서 제시한 습공기선도(psychrometric chart)를 이용하여 분석하였고 냉각탑 토출상대습도를 도출하였다. Fig. 5는 습공기선도를 나타낸다⁶⁾.

Fig. 6은 습공기선도를 이용하여 시험조건에 따른 냉각탑 토출상대습도 도출 방법을 나타낸다. 실험조건의 외기건구온도와 토출 공기온도의 연장선을 나타내고 실험조건의 외기건구온도와 설계조건의 토출 공기온도의 연장선을 나타내었다. 이때, 설계조건의

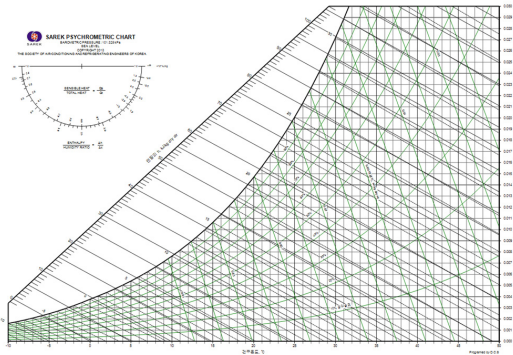


Fig. 5. Psychrometric chart from the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea (SAREK)⁵⁾

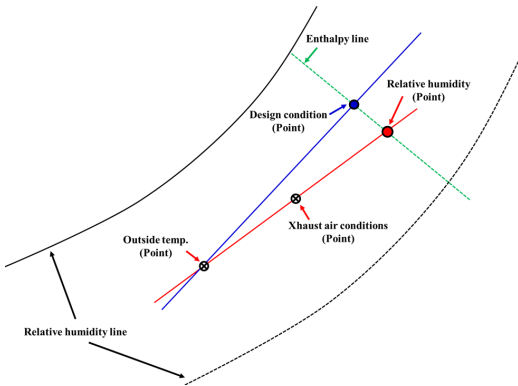


Fig. 6. Decision method of relative humidity from Psychrometric chart

토출 공기온도에서 엔탈피의 연장선과 실험조건의 외기건구온도와 토출 공기온도의 연장선이 교차하는 지점이 냉각탑 백연 상태의 토출상대습도이다. Fig. 6에 제시된 냉각탑 토출상대습도 도출 방법을 이용하여 각각의 시험조건에 따른 냉각탑 토출상대습도를 도출하였고, 도출된 토출상대습도는 각각의 설계조건 상대습도의 비율인 냉각탑 백연지표로 나타내었다. 외기온도에 따른 냉각탑 백연지표 경향성을 분석하기 위해 외기온도에 따른 냉각탑 백연지표의 곡선을 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7 및 Fig. 8에서 적색영역은 냉각탑 백연지표보다 낮은 영역이므로 백연현상이 발생하는 조건이다. Fig. 7은 냉각탑 입구온도 37°C일 때 냉각탑 백연 지표 곡선을 나타낸다. Fig. 7을 보면 외기온도에 따라 감소하면서 증가

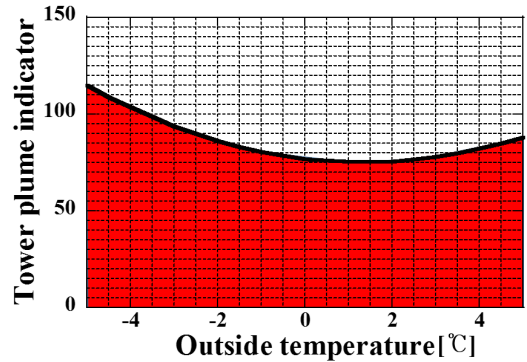


Fig. 7. Tower plume indicator depending on outside temperature (Inlet temperature 37°C)

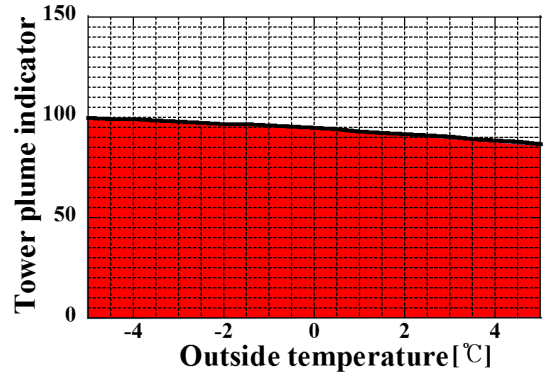


Fig. 8. Tower plume indicator depending on outside temperature (inlet temperature 40°C)

하는 2차 곡선을 나타낸다. Fig. 8은 냉각탑 입구온도 40℃일 때 냉각탑 백연지표 곡선을 나타낸다. Fig. 8을 보면 외기온도에 따라 감소하는 2차 곡선을 나타낸다.

외기온도에 따른 냉각탑 백연지표는 백연이 발생 하는 기준이 되므로 외기온도에 따른 냉각탑 백연지표의 경향성을 확보하면 백연현상을 방지하는 조건을 확보할 수 있다. 외기온도에 따른 냉각탑 백연지표의 경향성은 Fig. 7 및 Fig. 8의 냉각탑 백연지표의 곡선을 이용하여 외기온도에 따른 냉각탑 백연지표 경향성을 분석하였고 냉각탑 백연지표의 경향성의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} TPI(\text{Cooling watertemp. : } 37^{\circ}\text{C}) \\ = 0.98 \times (\text{Temp.}_{\text{Outside}})^2 - 2.66 \times (\text{Temp.}_{\text{Outside}}) \\ + 77.2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} TPI(\text{Cooling watertemp. : } 40^{\circ}\text{C}) \\ = -0.52 \times (\text{Temp.}_{\text{Outside}})^2 - 1.3 \times (\text{Temp.}_{\text{Outside}}) \\ + 94.8 \end{aligned} \quad (3)$$

냉각탑의 백연현상은 온도조건에 따라 발생한다. 따라서 식 (2) 및 (3)에서 제시된 외기온도에 따른 냉각탑 백연지표의 경향성을 바탕으로 냉각탑의 백연현상을 방지할 수 있는 토출 공기온도 예측이 가능하다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 입구온도가 37℃ 및 40℃일 때 외기온도에 따른 공기 엔탈피와 열교환기의 열량을

비교한 것이다. 열교환기의 열량식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Quantity of heat} \\ = \text{Air mass} \times \left(\frac{Cp_1 \times Cp_2}{2} \right) \times (\text{Temp.}_2 - \text{Temp.}_1) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 Cp_1 및 Cp_2 는 열교환기 기준에서 입/출구 비열이며, Temp._1 및 Temp._2 는 입/출구 온도 측정값이다. 공기 엔탈피는 열교환기 기준에서 입/출구 온도 및 상대습도를 측정하여 engineering equation solver (EES)를 제공하는 엔탈피 선도에서 도출하였다⁷⁾. Fig. 9 및 Fig. 10을 보면 외기온도가 증가함에 따라 공기 엔탈피는 증가하고 열교환기의 열량은 감소한다. 백연현상의 방지를 위해서는 냉각탑 내부의 포화공기를 열교환기의 열과 교환하여 온도를 상승시켜 상대습도를 낮춰야한다. 따라서 외기온도가 낮을수록 열교환기의 열량은 증가되어야함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 냉각탑의 백연방지 방안도출을 위해 시험조건에 따른 냉각탑 성능시험 수행 및 결과를 분석하였다. 또한 시험조건에 따른 냉각탑 백연지표의 경향성을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

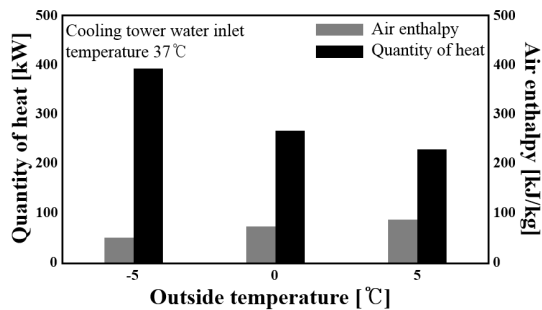


Fig. 9. Comparison of air enthalpy and quantity of heat (inlet temperature 37°C)

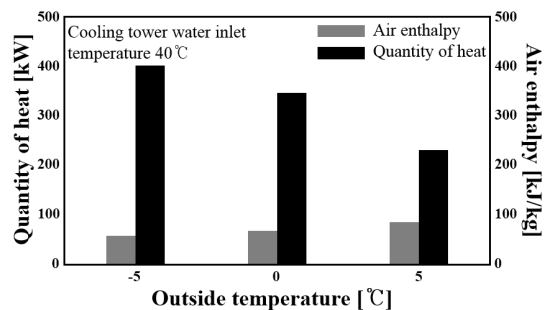


Fig. 10. Comparison of air enthalpy and quantity of heat (inlet temperature 40°C)

- 1) 백연현상은 외부 온도 및 습도의 조건에 따라 나타난다. 따라서 백연현상 방지를 위해서는 냉각탑 외부 온도 및 습도에 대한 정밀한 분석이 필요하다.
- 2) 냉각탑 백연지표는 냉각탑 토출상대습도와 설계조건의 상대습도의 비율로 나타내며, 냉각탑 토출상대습도는 습공기선도를 이용하여 도출할 수 있다.
- 3) 토출상대습도는 시험조건의 외기건구온도, 토출 공기온도, 설계조건의 토출 공기온도로 도출된다.
- 4) 외기온도 조건에 따라 냉각탑 백연지표의 특정한 경향성이 나타나며, 냉각탑 백연지표 경향성을 이용하여 백연현상을 방지할 수 있는 냉각탑 토출 공기온도 조건을 도출할 수 있다.
- 5) 백연현상 방지를 위해서는 냉각탑 내부의 열교 환기를 통과하는 공기온도를 증가시켜 상대습도를 낮추어야 한다.

References

1. H. Y. So, "Wet/dry integrated plume abatement cooling tower", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2000, pp. 997-1003. Retrieved from http://www.sarek.or.kr/html/sub06_02.jsp.
2. T. J. Gu, J. H. Jeon, and Y. K. Joe, "A Empirical Study of Cooling Tower Performance of Opening and Closing Damper of Wet and Dry Section", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 2017, No. 6, 2017, pp. 156-159. Retrieved from http://www.sarek.or.kr/html/sub06_02.jsp.
3. C. K. Choi, Y. K. Choi, and H. Y. So, "A Numerical Study on the Performance Analysis of the Plume Abatement NWD Cooling Tower", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 2001, pp. 1049-1058. Retrieved from http://www.sarek.or.kr/html/sub06_02.jsp.
4. Z. H. Wang, J. Son, J. M. Cha, and Y. C. Kon, "Numerical Study on Air-side Performance of Wave Heat Exchanger for White Smoke Reduction", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Vol. 2016, No. 6, 2016, pp. 1088-1090. Retrieved from http://www.sarek.or.kr/html/sub06_02.jsp.
5. Korean Association of Air Conditioning Refrigerating and Sanitary Engineers (KARSE), Performance Tests of Mechanical Draft Cooling Tower, SPS-KARSE B0004-0166, Korea, 2015. Retrieved from <https://www.dcs.co.kr/index.php/products/psy-chart/>.
6. Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea (SAREK), Psychrometric chart, Korea, Retrieved from http://www.karse.or.kr/new_html/subpage_05_a.jsp.
7. Engineering Equation Solver (ESS), Enthalpy chart, F-chart software, USA. Retrieved from <http://fchartsoftware.com/ees/>.