

기계통풍식 냉각탑 유닛의 성능에 관한 실험적 연구

정순영[†]

한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부

An Experimental Study on the Performance of Cooling Tower Unit for Mechanical Draft

SOON YOUNG JEONG[†]

Carbon Neutral Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ippang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

[†]Corresponding author :
jeongsy@kitech.re.kr

Received 10 November, 2021
Revised 22 November, 2021
Accepted 14 December, 2021

Abstract >> In this paper, an experimental study was conducted on the performance of the cooling tower. In order to improve reliability in the cooling tower performance test, the measurement uncertainty of the instrument was estimated. Measurement uncertainty refers to the uncertainty of a measurement, estimates the range in which the expected value of the measurement can be within a certain confidence level, and suggests a range in which the measured representative value is incorrect. Therefore, the measurement result of the performance experiment is not an actual value, but a reasonable estimated value. The measurement uncertainty for the test was calculated and the measured results were presented.

Key words : Cooling tower(냉각탑), Heat exchanger(열교환기), Cooling tower capacity(냉각탑 능력비), Performance(성능), Measurement uncertainty(측정 불확도)

1. 서론

일반적인 기기장치나 산업용 시스템에서 발생하는 발열(calcescence)은 운전 효율을 저하시키고 발열이 지속되는 경우에는 운전 오작동 및 고장의 원인이 된다. 따라서 기기장치나 산업용 시스템에서 운전 효율의 향상 및 유지보수비용 절감을 위해서는 발열에 대한 해결책이 시급한 실정이다.

기기장치 및 산업용 시스템의 운전 중에 발생하는 발열을 해결하기 위해서 냉각 매체를 이용하는 경우도 있으나, 이 경우에는 냉각 매체로 인한 비용 증가와 환경오염에 대한 문제에서도 자유롭지 못하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 친환경적인 물을 이용하여 발열 문제점을 해결하는 장치로 냉각탑(cooling tower)이 사용되고 있다.

Lee 등¹⁾은 냉각탑에서 발생하는 백연 현상을 제거

하기 위해 히트펌프 사이클을 적용하는 연구를 수행하였고, Ha 등²⁾은 냉방 에너지 사용량 절감을 위하여 냉각탑 제어에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Chung과 Yoo³⁾는 복합 화력발전소의 운전 효율 향상을 위해서 백연방지를 위한 연구를 수행하였다.

Fig. 1은 냉각탑 형상을 나타낸다. 냉각탑은 냉각하고자 하는 작동유체인 물과 대기의 공기를 냉각탑 내부로 이송하여 충전재(filler)의 표면에 뜨거워진 냉각수가 외부에서 유입된 공기와 접촉하여 열교환이 이루어지고 있으며, 증발(evaporation) 현상으로 인해 물이 수증기로 변화한다. 이때, 수증기가 공기로 이동하면서 물이 열을 빼앗겨 냉각되는 원리를 이용한 친환경적인 냉각장치이다.

본 연구에서는 냉각탑의 성능을 실험적으로 분석하였다. 냉각탑의 성능을 정밀하고 효과적으로 분석

하기 위해서 측정 불확도를 추정하였고 냉각탑의 성능을 객관적으로 검토하였다.

2. 냉각탑

Fig. 2는 작동유체 흐름에 따른 냉각탑의 형상을 비교한 것이다. Fig. 2(a)는 대향류형(counter-flow) 냉각탑을, Fig. 2(b)는 직교류형(cross-flow) 냉각탑 형상을 나타낸다. 직교류형은 충전재에서 냉각수와 공기가 수평하게 열교환하는 방식이고, 대향류형은 충전재에서 냉각수와 공기가 하부에서 상부로 상승하면서 수직으로 열교환하는 형태로 나누게 된다.

직교류형은 같은 수량과 열교환 계수값이 동일하여 냉각탑의 부피가 대향류형에 비해 20% 커지며 루버의 높이가 흡입구와 동일하여 고온다습한 공기가

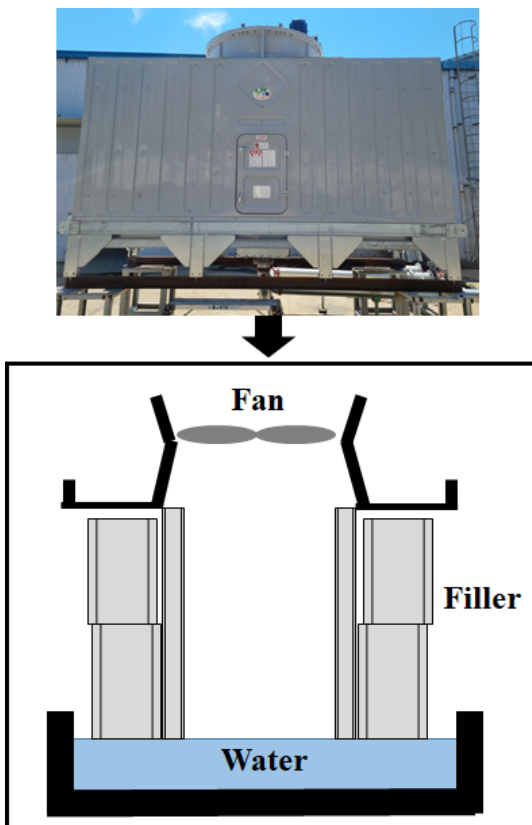


Fig. 1. Shape of cooling tower

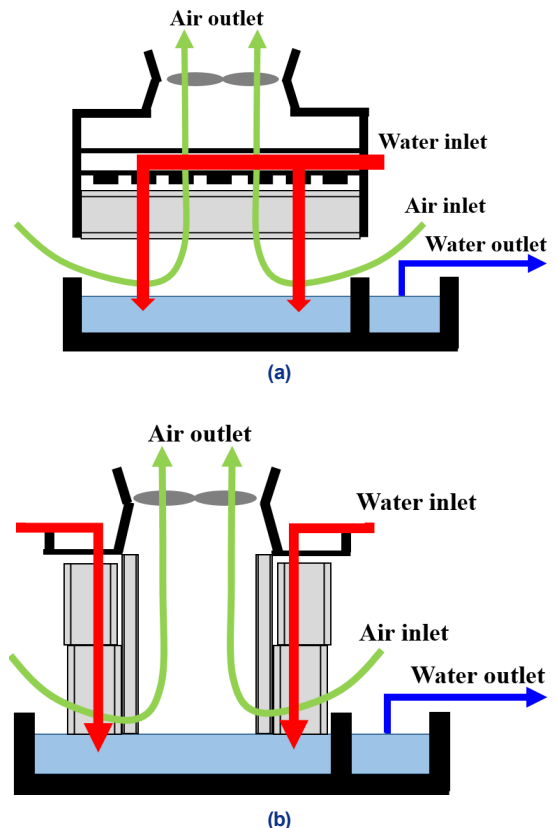


Fig. 2. Comparison of cooling tower (a) Counter-flow cooling tower, (b) Cross-flow cooling tower

재순환의 영향이 커지나 구조가 간단하고 보수가 용이하다. 본 연구에서는 방열문제를 효과적으로 해결하기 위해서 직교류형 냉각탑 성능을 객관적으로 분석하였다.

3. 냉각탑 시험

냉각탑 성능 시험은 한국설비기술협회(Korean Association of Air Conditioning Refrigerating and Sanitary Engineers, KARSE)의 단체표준인증(SPS-KARSE B0004-0165, 166 : 2015) 인증 시험 방법에 따라 수행하였다. 한국설비기술협회 단체표준인증 규격에 따라 냉각탑 성능 시험 장치를 구축 및 검토하였으며, 성능 시험에 필요한 장비 및 측정 센서 등을 확인하였다⁴⁾.

3.1 시험장치 및 방법

냉각탑 성능 시험을 위한 시험장치 계략도는 Fig. 3에 나타내었다⁵⁾. 성능 시험에 사용된 측정 센서는 Table 1에 제시하였으며, 냉각탑 설계사양은 Table 2에 나타내었다. 냉각탑 성능 시험은 냉각탑 운전 유량조건에서 송풍기는 정격으로 운전된다. 이때, 냉각탑 성능 시험 환경의 건구온도 및 습구온도에 따라 냉각탑 입구온도는 출구온도차가 5°C가 되도록 조정한다.

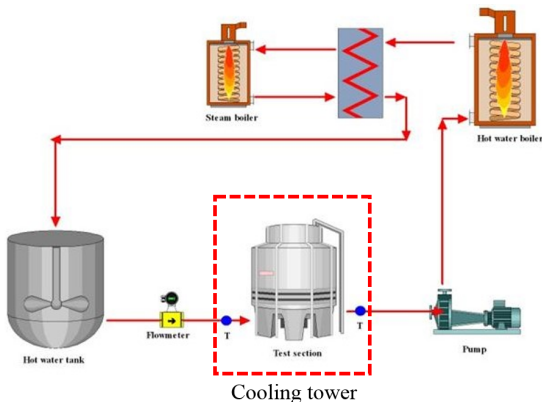


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus for pump performance

4. 측정 불확도 추정

측정 불확도(estimation of uncertainty)는 측정값의 측정이 불확실한 정도를 나타낸다. 따라서 특정 신뢰 수준에서 측정대상의 기댓값이 존재할 구간을 추정하고 측정된 대푯값이 달라질 수도 있는 범위를 제시한다. 측정 불확도는 사용된 측정 결과와 관련하여, 측정량에 대한 측정값의 산포 특성을 나타내는 파라미터이다⁶⁾.

성능 시험의 측정 결과는 참값이 아니라 성능 시험방법 및 측정 센서에 따라 합리적인 방법으로 추정한 추정값이다. 따라서 성능 시험의 측정 결과를 제시할 경우에는 어느 정도의 불확실성을 갖고 있는 값인지 불확도를 계산하고 객관적인 성능 시험 결과를 제시해야 한다. Fig. 4는 성능 시험 측정 결과의 불확도 추정 절차를 보여준다.

4.1 표준불확도 평가

표준불확도(standard uncertainty)는 측정방법 및 측정 결과에 따라 측정량을 객관적이고 합리적으로 추정한 값을 나타내며, 평가방법에 따라 A형 및 B형

Table 1. Specifications of a measurement device

Measurement device	Range	Uncertainty
Temperature (°C)	0-50	±0.14
Power meter (kW)	0-200	±0.01
Flow-meter (m ³ /h)	0-500	±0.27

Table 2. Experimental condition

Parameter	Design specification
Cooling tower inlet temperature (°C)	37.00
Cooling tower outlet temperature (°C)	32.00
Dry temperature (°C)	30.00
Wet temperature (°C)	27.00
Flow rate (m ³ /hr)	78.00
Fan motor power (kW)	15.00
Density	1.12

평가로 나누어진다.

A형 평가는 일련 측정량을 통계적으로 분석하여 구하는 방법으로 측정량의 반복 측정값의 빈도분포 (frequency distribution)에 근거한 확률밀도함수(probability density function)로 구한다. 즉, 시료의 반복측정을 통한 측정값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법이다.

B형 평가는 일련 측정량의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 평가하는 방법이며, 경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 구한다. 즉, B형 평가는 기존의 정보 및 문헌을 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수로 가정한다.

표준불확도의 평가를 A 및 B로 구분하는 목적은 측정량의 불확도 성분을 좀 더 객관적으로 분석하기 위함이다. A형 및 B형 평가방법은 각각 다른 산출방법(method of calculation)에 의해서 도출된 평가 결과는 확률분포(probability distribution)에 근거하여 구해지며 불확도 성분은 분산이나 표준편차에 의하여 정량화(quantization)된다.

4.2 합성표준불확도

합성표준불확도(combined standard uncertainty)는 측정 결과가 측정방법 및 다양한 입력량에 의해서 도출될 때의 측정 결과의 표준불확도이다. 즉, 여러 개의 다른 불확도 요인에 대한 표준불확도를 구하여 합성된 값이다. 합성표준불확도는 측정 결과에 따른

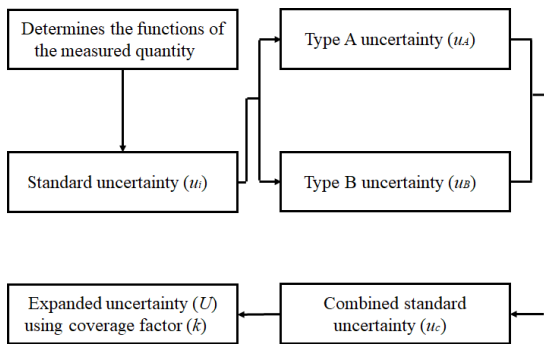


Fig. 4. Flowchart of the uncertainty calculation process

추정 표준편차(estimation of standard deviation)이며, 다양한 입력량의 분산(dispersion) 및 공분산(covariance) 성분으로부터 도출되는 합성분산(compose dispersion) 양의 제곱근이다. 또한 불확도 전파 법칙(law of uncertainty propagation)에 의해 구해진다.

4.3 확장불확도

확장불확도(expanded uncertainty)는 측정량의 객관적이고 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정 결과 주변의 어떠한 구간을 정의하는 양이다. 확장불확도(expanded uncertainty)는 합성표준불확도에 포함인자(coverage factor)를 곱하여 계산된다. 이때, 포함인자의 값은 그 구간에 대해 요구되는 포함확률 또는 신뢰 수준에 따라 정해지는데, 보통 2와 3 사이의 값을 갖는다. 측정방법 및 측정 결과에 따른 확장불확도가 다른 측정 결과의 합성표준불확도를 구하는 데 사용될 경우에는 항상 포함인자의 값을 명시해야 한다.

5. 냉각탑 성능분석

냉각탑의 성능지표 중에서 냉각탑 능력비(capacity ratio)는 냉각탑 설계사양 대비, 성능 시험 결과의 비율로 나타낸다⁷⁾. 따라서 냉각탑 능력비가 증가될수록 냉각탑 설계사양을 만족함을 의미한다. 식 (1)은 냉각탑 능력비를 나타낸다.

$$\eta = \left(\frac{L_a}{L_p} \right) \times 100 \tag{1}$$

식 (1)에서 L_a 는 조정순환수량이며, L_p 는 예측순환수량을 의미한다. 이때, L_a 식은 다음과 같다.

$$L_a = L_t \left(\frac{W_d}{W_t} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_t}{\rho_d} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

식 (2)에서 L_t 는 측정된 냉각수 순환유량, W_d 는

설계사양의 팬 동력, W_t 는 팬 동력 측정값, ρ_d 는 설계사양의 공기 밀도, ρ_t 는 공기 밀도 측정값이다.

예측 순환수량은 냉각탑 설계사양에 따라 설계된 조건이므로 냉각탑 제조사에서 제시되는 값이며, 조정순환수량은 냉각탑 성능 시험을 통하여 측정된 성능 시험 결과이다.

냉각탑 능력비의 측정 불확도의 추정을 위하여 냉각탑 능력비식에 필요한 각 항목의 측정값은 공인인증기관에서 검교정된 측정 센서를 이용하여 측정하였다. 냉각탑 능력비에 필요한 측정 결과는 시간에 따라 Fig. 5와 같이 측정하였고 측정 센서로 측정된 결과의 허용 오차는 Table 3에 나타내었다. 냉각탑 능력비 식에 필요한 각 항목의 측정값의 A형 및 B형 표준불확도 식은 (3) 및 (4)로 합성표준불확도의 식은 (5)에 나타내었다.

$$u_a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \tag{3}$$

$$u_b = \frac{u}{k} \tag{4}$$

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \tag{5}$$

냉각탑 능력비 도출을 위한 각 항목들의 A형 불확

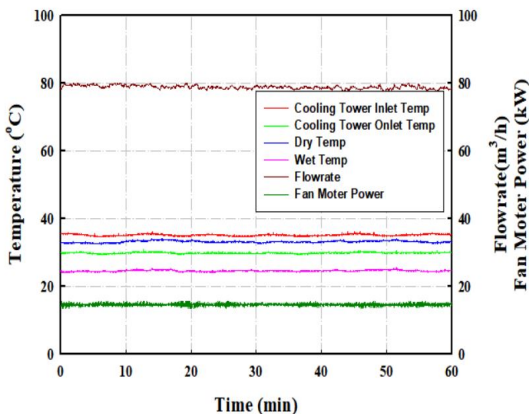


Fig. 5. Measurement results of heat pump unit depending on time

도는 측정 센서를 통하여 반복측정을 하고 표본의 표준편차 및 모집단의 표준편차를 추정하였다. B형 불확도는 통계적으로 직접 구하지 않는 모든 불확도이므로 각 항목에 측정되는 측정 센서의 검/교정 성적서에 제시한 불확도 결과로 추정하였다.

냉각탑 능력비의 조정순환수량의 합성 표준불확도는 냉각수 순환유량 측정값, 설계사양 팬 동력 측정값, 설계사양의 공기 밀도, 공기밀도 측정값의 표준불확도와 감도계수가 요구된다.

냉각탑 능력비의 조정순환수량의 합성 표준불확도는 식 (6)에 나타내었다. 또한, 냉각수 순환유량 측정값(C_{L_t}), 설계사양 팬 동력 측정값(C_{W_t}), 공기밀도 측정값(C_{ρ_t})의 감도계수의 식은 (7)-(9)에 나타내었다.

$$u_{L_t} = \sqrt{(C_{L_t} \times u_{L_t})^2 + (C_{W_t} \times u_{W_t})^2 + (C_{\rho_t} \times u_{\rho_t})^2} \tag{6}$$

$$C_{L_t} = \sqrt[3]{\frac{W_d}{W_t}} \sqrt[3]{\frac{\rho_t}{\rho_d}} \tag{7}$$

$$C_{W_t} = -\frac{L_a \sqrt[3]{\frac{W_d}{W_t}} \sqrt[3]{\frac{\rho_t}{\rho_d}}}{3 W_t} \tag{8}$$

$$C_{\rho_t} = \frac{L_a \sqrt[3]{\frac{W_d}{W_t}} \sqrt[3]{\frac{\rho_t}{\rho_d}}}{3 \rho_t} \tag{9}$$

감도계수는 변수가 2개 이상인 함수에서 미분할 때 하나의 변수만을 간주하고 미분하며, 편미분된 결과를 감도계수라 한다. 냉각탑 능력비의 합성 표준불

Table 3. Tolerance of a measurement results

Measurement device	Tolerance	
	Measurement	Calculation
Temperature (°C)	±0.5	±0.2
Power meter (V, A)	±2	±1
Flow-meter (m³/h)	±2	±1

확도 식은 식 (10)이며, 조정순환수량(C_{La}) 및 예측 순환수량(C_{Lp})의 감도계수는 식 (11) 및 (12)에 나타내었다.

$$u_{\eta} = \sqrt{(C_{La} \times u_{La})^2 + (C_{Lp} \times u_{Lp})^2} \quad (10)$$

$$C_{La} = \frac{1}{L_p} \times 100 \quad (11)$$

$$C_{Lp} = \frac{L_a}{L_p^2} \times 100 \quad (12)$$

냉각탑 능력비의 확장 불확도는 합성 표준불확도와 포함인자의 곱으로 이루어진다. 따라서 냉각탑 능력비의 확장불확도는 식 (13)과 같고, 냉각탑 능력비 및 불확도 추정 결과는 Table 4에 제시하였다.

$$U = k \times u_{\eta} \quad (13)$$

식 (13)에서 k 는 포함인자이며, 신뢰수준 약 95.45%일 경우에 2.65를 사용한다. 포함인자는 성능 시험 측정값이 정규분포로 가정하여 산출한다. 정규분포는 평균, 표준편차를 표준화시켜 다양한 자료의 분포를 단 한 개의 함수식으로 대표해서 표현이 가능하다. 따라서 정규분포는 통계학에서 대표적인 연

속확률분포이며 통계학에 뿐만 아니라 측정 불확도에서 사용된다. 포함인자는 측정값의 신뢰수준에 따라 결정되며, 결정된 포함인자와 합성 불확도의 곱을 확장 불확도로 정의한다.

Table 5와 같이 냉각탑 능력비의 측정값과 확장 불확도를 나타내었으며, 냉각능력비의 확장 불확도는 0.01%이다. 성능 시험의 측정값의 불확도가 매우 낮을 경우에는 성능 시험방법 및 결과에 대해 객관적인 검증 및 신뢰성 확보가 가능하다.

6. 결론

본 논문에서는 기계통풍식 냉각탑 유닛의 성능을 객관적으로 검토하였다. 기계통풍식 냉각탑의 시험 조건에 따른 성능 시험을 수행하였고, 냉각탑 능력비의 측정 불확도를 추정함으로써 객관적인 성능 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 기계통풍식 냉각탑의 능력비는 대기 중의 공기를 이용하여 냉각탑 설계사양 대비, 성능 시험 결과의 비율(%)로 나타낸다. 따라서 능력비가 높을수록 냉각탑의 능력을 만족함을 나타낸다.

2) 측정 불확도 추정은 시험기관에서 성능 시험 결과에 대한 불확도의 요소들을 확인하고 합리적인 추정을 시도하여 통계적으로 분석하고 성능 시험을 체계적으로 수행하고 성능 결과를 객관적인 분석이 가능하다.

3) 기계통풍식 냉각탑의 성능 시험 수행을 위해서는 시험장비와 측정 센서의 유지 및 관리가 매우 중요하다. 시험 장비는 시험 범위에 따라 인증된 제품으로 제작되고 측정 센서는 주기적으로 검/교정과 중간점검을 수행해야 한다.

4) 시험 결과를 도출하기 위해 공인기관에서 교정된 측정 센서의 측정오차를 분석하고 시험방법에 오류를 분석하면, 시험 결과에 대한 측정 불확도를 추정할 수 있다. 인증 및 성능 시험에 도출된 결과를 바탕으로 측정 불확도를 추정함으로써 분석된 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

Table 4. Uncertainty of a measurement results

Measurement device	Uncertainty		
	u_a	u_b	u_c
Flow rate (m ³ /hr)	0.129	0.106	0.167
Fan moter power (kW)	0.011	0.001	0.011
Dry temperature (°C)	0.098	0.070	0.121
Wet temperature (°C)	0.054	0.070	0.088

Table 5. Expanded uncertainty of a cooling tower capacity

	Results
Cooling tower capacity (%)	116.79
Expanded uncertainty	0.01

후기

본 연구는 한국생산기술연구원 내부 연구(공동장비활용 및 애로기술 지원사업, PJC21030)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

1. G. B. Lee, B. J. Lee, C. W. Roh, E. S. Wang, H. S. Ra, K. H. Chang, and H. K. Shin, "A study on water recovery and plume abatement of cooling tower using heat pump cycle", The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2020, pp. 99-101. Retrieved from https://www.sarek.or.kr/html/sub06_02.jsp.
2. J. W. Ha, K. S. Park, H. Y. Kim, and Y. H. Song, "A study on annual cooling energy consumption cut-off with cooling tower control change", Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2019, pp. 503-514. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09299650>.
3. H. B. Chung and H. S. Yoo, "The cooling water bypass ratio of packing in plume abatement cooling tower of a combined cycle power plant during winter operation", Plant Journal, Vol. 14, No. 4, 2018, pp. 33-38. Retrieved from <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201815561989577.pdf>.
4. KARSE, "Mechanical draft cooling tower", Korea, 2018. Retrieved from <https://standard.go.kr/KSCI/grpstd/getGrpStdCrtfcDetail.do?menuId=60372&topMenuId=502&upperMenuId=503&grpStdSn=5559>.
5. K. R. Kim, H.W. Kang, and C. W. Shul, "The confidence estimation of moi measurement equipment using uncertainty analysis", International Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 12, No. 3, 2018, pp. 53-57, doi: <https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.3.53>.
6. J. K. Lee, "An investigation on influence of vibration noise in cooling tower on precision equipments", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 17, No. 9, 2016, pp. 369-374, doi: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.369>.
7. J. H. Jung, J. H. Jung, and Y. K. Choi, "Program development for the prediction of cooling tower performance", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 3, 2014, pp. 130-136, doi: <http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.3.130>.