

신재생에너지 지열을 이용한 열펌프유닛의 성능에 관한 실험적 연구

정순영[†]

한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부

An Experimental Study on the Performance of Heat Pump Unit Using Geothermal Heat for New Renewable Energy

SOON YOUNG JEONG[†]

Clean Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ijang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

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

Received 2 November, 2020
Revised 12 November, 2020
Accepted 30 December, 2020

Abstract >> This paper presents an experimental study on the performance of the heat pump. Uncertainty of measurement means the degree of uncertainty in the measurement. Therefore, it estimates a section where expected value of the measurement might be within a certain confidence level and suggests a range where measured representative value might be incorrect. Uncertainty of measurement is a parameter that shows characteristics of dispersion of measured value that was reasonably estimated from measured quantity. Measurement result of performance experiment is not a true value but estimated value that was estimated reasonably. Therefore, uncertainty of measurement needs to be calculated and presented with the result of measurement.

Key words : New renewable energy(신재생에너지), Geothermal heat(지열), Heat pump(열펌프), Performance(성능), Measurement uncertainty(불확도)

1. 서론

산업발전을 위해 사용된 화석연료는 연소과정에서 발생하는 대기오염 물질이 환경뿐만 아니라 지구 온난화 형상을 촉진시키는 문제점을 가지고 있다. 이에 따른 문제점을 개선하기 위해, 국내뿐만 아니라 해외에서도 신재생에너지를 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

최근 몇 년간 에너지 절약문제를 해결하기 위하여

신재생에너지 및 신에너지를 이용하여 에너지 보급에 관한 문제를 해결하고자 하였다.

특히, 신재생에너지 중에서도 에너지 절약과 환경 개선측면에 매우 가치가 높은 지열을 재사용하는 연구가 필수적이다. 지열에너지는 지면 아래의 열을 이용하므로 설치 장소, 시간 및 기후 등에 관계없이 이용 가능하며, 다른 신재생설비에 비해 유지보수 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다.

지열을 재사용하고 효과적으로 운영하는 연구가

국내에서 활발하게 진행되고 있다. Gwon 등¹⁾은 지역난방용 열펌프 성능분석에 관한 연구를 수행하였고, Cha 등²⁾은 열교환 방식에 따른 지열을 이용한 열펌프의 특성에 관한 연구를 수행하였다. Lian 등³⁾은 수열원과 공기열원 히트펌프를 시뮬레이션을 수행하여 비교분석하였다. 국내, 한국에너지공단의 신재생에너지보급 중에서 지열에너지는 발전비용이 비교적 저렴하고 공해물질 배출이 없으며 가동률이 높아 잉여열 재활용이 가능한 장점을 토대로 열펌프 시스템의 보급률이 증가하였고 특히, 지열에너지를 적용한 열펌프는 다른 난방 방식 중에서도 효율이 높고 환경 친화적이며 그 사용 및 기술개발이 증가하고 있다.

본 연구에서는 신재생에너지 중에서 지열을 이용한 열펌프의 성능을 실험적으로 분석하였다⁴⁾. Fig. 1은 지열을 이용한 열펌프 설치 계략도를 보여준다. 열펌프는 열기관과는 다르게 외부에 일을 하는 것이 아니라 외부로부터 일을 받아서 저열원의 열을 고열원으로 내보내는 장치이다. 따라서 지열을 효과적으로 제어하기 위해서는 열펌프의 성능의 정밀한 분석이 요구된다. 열펌프의 성능을 정밀하고 효과적으로 분석하기 위해 측정 불확도를 도출하였고 성능시험에 대한 객관적인 검토를 수행하였다. 특히, 여름철에는 냉방을 위해 소비전력이 매우 높은 시기이므로 본 연구에서는 열펌프의 냉방을 효과적으로 제어하기 위해 냉방 성능을 정밀하게 분석하였다.

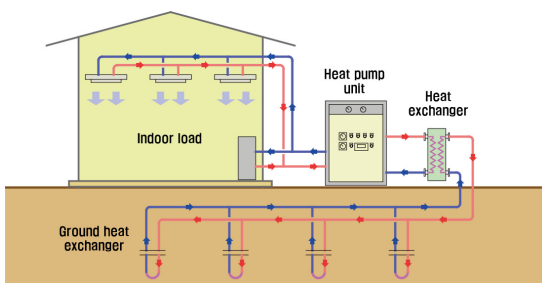


Fig. 1. Heat pump unit using geothermal heat of new renewable energy

2. 열펌프

Fig. 2는 열펌프 시스템의 냉방 및 난방운전의 계략도를 보여준다. Fig. 2(a)는 냉방운전에서 냉매와 열원의 순환을 나타내었으며, Fig. 2(b)는 난방운전으로 전환하였을 때 냉매와 열원의 순환방향 변화를 나타내었다.

열펌프 시스템은 압축기(compressor), 응축기(condenser), 팽창밸브(expansion valve), 증발기(evaporator)로 구성되어 있으며, 압축기 토출부에 4-way valve를 설치하여 냉방과 난방운전 변환 시 냉매의 흐름방향 제어가 가능하도록 설계 및 제작된다. 열펌프 시스템의 작동은 냉매가 외부열원으로부터 열을 흡수, 이송하고 배출하는 원리를 이용하여 냉방과 난방열원을 공급하는 방식이다. 열펌프 운전 사이클(cycle)은 냉방 사이클을 기준으로 압축기에서 압축된 고온, 고압의 기체 냉매는 응축기에서 외부열원과 열교환을 통해 고압의 액체 상태로 응축이 되며, 팽창밸브를 통

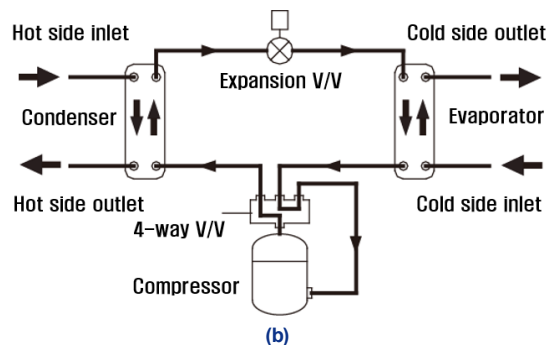
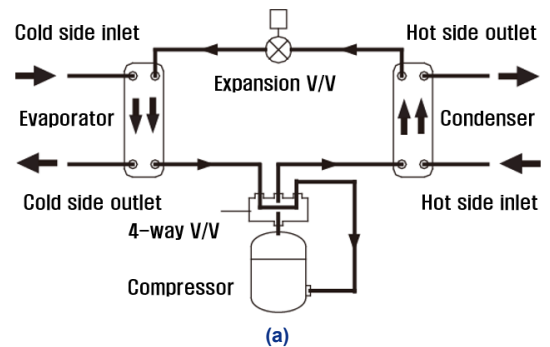


Fig. 2. Operation mode of heat pump unit (a) cooling mode, (b) heating mode

과한 저온, 저압의 냉매는 증발기에서 외부열을 흡수하여 냉방운전이 된다. 그리고 응축기에서 방출되는 고온의 열원을 이용하여 실내온도를 상승시키고 상대적으로 낮은 열을 외부로 배출하는 사이클이 난방 사이클이다.

3. 열펌프 시스템 성능시험

열펌프 성능시험은 한국에너지공단(Korea Energy Agency)의 신재생에너지설비 KS 인증(KS B 8292 : 물-물 지열원 열펌프 유닛) 성능시험 방법에 따라 수행하였다⁵⁾.

한국에너지공단 신재생에너지설비 성능인증 규격에 따라 열펌프 성능시험 장치를 구축 및 검토하였고, 성능시험에 필요한 측정센서 등을 확인하였다.

3.1 시험장치 및 방법

열펌프 성능시험을 위한 성능시험장치 계략도는 Fig. 3에 나타내었고 성능시험에 사용된 측정센서는 Table 1에 제시하였다.

열펌프 장비는 일반적으로 압축기-응축기-팽창변-증발기로 구성되어 있으며 사방밸브의 조건에 따라 열펌프 시스템의 냉방 및 난방운전이 가능하다.

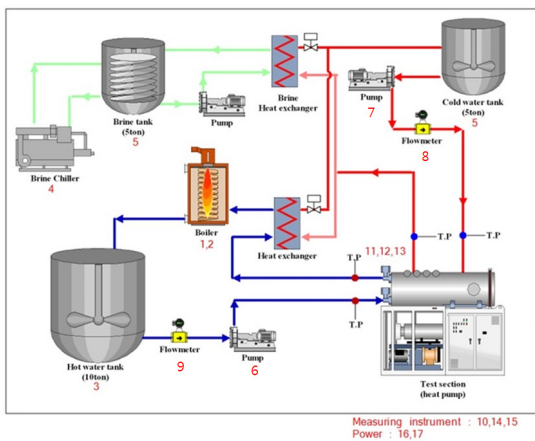


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus for pump performance

3.2 시험조건

Table 2는 열펌프 시스템의 성능시험을 위한 실험 조건이며, 정격 냉방 용량 산정(지중 루프 시스템)을 위한 시험 조건을 나타낸다.

열펌프 시스템의 냉방용량은 주어진 냉방모드의 운전시간동안 열펌프 시스템의 부하(load)측 열교환기를 순환하는 유체(순환수)로부터 제거하는 열량을 의미한다. 각 열펌프 시스템에서 주어지는 특정 시험 조건과 방법에 따라 시험을 수행한 후 열펌프 시스템의 정격 냉방 용량을 산정한다. 냉방용량을 나타내는 냉방성능계수는 열펌프에 공급되는 유효 전력에 대한 정미 냉방 용량의 비를 의미하며, 물-물 열펌프의 냉방성능 척도로 나타낸다. 냉방성능 계수의 식은 다음과 같다.

$$COP_c = \frac{\text{정미 냉방용량 } (W)}{\text{유효소비전력 } (W)} = \frac{nQ_c}{\phi_{total}} \quad (1)$$

$$\phi_{total} = \phi_{hp} + \phi_{pai} + \phi_{pao} \quad (2)$$

이때, cooling coefficient of performance (COP_c)는 냉방 성능 계수를 나타내며, nQ_c 는 정미 냉방 용량

Table 1. Specifications of a measurement device

Measurement device	Range	Uncertainty
Temperature (°C)	0-50	±0.05
Power meter (V, A)	0-600, 0-200	±0.6
Flow-meter (m ³ /h)	0-200	±0.5
Diff. pressure (kgf/cm ²)	0-5	±0.6

Table 2. Experimental condition

Parameter	Condition	
	Load	Source
Temperature (°C)	12	25
Flow rate (L/min)	570	570
Frequency (Hz)	Rated frequency	
Voltage (V)	Rated voltage	

(net cooling capacity)이며, \mathcal{O}_{total} 은 유효소비전력(effective power)을 나타낸다. 이때, \mathcal{O}_{hp} 는 총 열펌프의 소비 전력이며, \mathcal{O}_{pai} 는 부하측 순환펌프 유량 보정 소비전력이며, \mathcal{O}_{pao} 는 열원측 순환펌프 유량 보정 소비 전력이다. 정미 냉방 용량은 부하 측의 유체를 순환하는 펌프의 소비전력을 의미하며 냉방용량에서 순환수 펌프 소비 전력을 보정한다. 유효 소비전력은 주어진 시험시간 동안의 열펌프 시스템에 공급되는 평균 전력을 의미한다.

4. 측정 불확도 추정

측정 불확도(estimation of uncertainty)는 측정이 불확실한 정도를 의미한다. 따라서 특정 신뢰수준에서 측정대상의 기댓값이 존재할 구간을 추정하고 측정된 대표값이 달라질 수도 있는 범위를 제시한다⁶⁾. 측정 불확도는 측정 결과와 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정된 값의 산포 특성을 나타내는 파라미터이다.

성능시험의 측정 결과는 참값이 아니라 합리적인 방법으로 추정한 추정값이다. 따라서 측정 결과를 제시할 경우에는 어느 정도의 불확실성을 갖고 있는 값인지 불확도를 계산하고 제시해야 한다. Fig. 4는

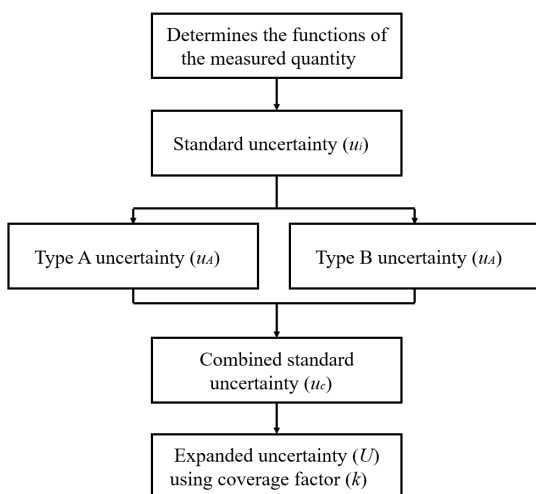


Fig. 4. Flowchart of the uncertainty calculation process

불확도 추정 절차를 보여준다.

4.1 표준불확도 평가

표준불확도(standard uncertainty)는 A형 및 B형으로 나뉜다. A형 표준불확도는 반복 측정값의 빈도분포(frequency distribution)에 근거한 확률밀도함수(probability density function)에서 구하는 반면, B형 표준불확도는 기존의 정보 또는 문헌을 통해 측정값이 가질 수 있는 확률밀도함수를 가정하여 구한다. 두 가지 방법은 모두 확률에 근거를 둔 것이다.

A형과 B형 평가로 분류하는 목적은 불확도 성분을 산출하는 두 가지 다른 방법을 보이고 논의하는데 편리하게 하기 위함이다. 그러나 이 분류는 두 가지 다른 산출방법(method of calculation)에서 얻은 불확도 성분이 본질적으로 어떤 차이가 있다는 것을 의미하지는 않는다. 두 가지 모두 확률분포(probability distribution)에 근거하여 구해지며 어떤 방법으로 구하든지 불확도 성분은 분산이나 표준편차에 의하여 정량화(quantization) 된다⁷⁾.

4.2 합성표준불확도

합성표준불확도(combined standard uncertainty)는 측정 결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때의 측정 결과 표준불확도를 의미한다. 합성표준불확도는 측정 결과에 대한 추정 표준편차(estimation of standard deviation)이다. 합성표준불확도는 여러 입력량들의 분산(dispersion)과 공분산(covariance) 성분(component)으로부터 얻어지는 합성분산(compose dispersion)의 양의 제곱근으로서 불확도 전파 법칙(law of uncertainty propagation)에 의해 구해진다.

4.3 확장불확도

확장불확도(expanded uncertainty)는 합성표준불확도에 포함인자(coverage factor)를 곱하여 계산된다. 이러한 확장불확도를 도입한 목적은 측정량의 합리

적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정 결과 주위의 어떤 구간을 제공해 주자는 것이다. 포함인자의 값은 그 구간에 대해 요구되는 포함확률 또는 신뢰수준에 따라 정해지는데, 보통 2와 3 사이의 값을 갖는다.

어떤 측정 결과의 확장불확도(이로부터 영향을 받는다)가 또 다른 측정 결과의 합성표준불확도를 구하는데 사용될 경우, 하나의 표준불확도 성분으로 회복될 수 있도록 하기 위해서, 항상 포함인자의 값을 명시해야 한다.

5. 열펌프 시스템 성능분석

열펌프 시스템의 냉방성능의 객관적인 성능 검토를 위해 냉방 성능 계수의 측정 불확도를 추정하였다. 불확도 평가절차는 우선 측정모형을 설정하고 불확도 구성요소를 A타입 또는 B타입으로 구분하여 기술한 후 해당평가방법으로 표준불확도를 구분한다. 이들 불확도 성분들을 합성하여 합성표준불확도를 산출하고 사용목적 및 신뢰수준에 따라 합성표준불확도에 보정계수를 곱하여 확장불확도를 구한다.

열펌프 시스템의 냉방성능분석을 위해 식 (1) 및 (2)를 이용하여 냉방 성능 계수의 식을 세부적으로 나타내었다.

$$COP_c = \frac{Q_c - \phi_{pai}}{\phi_{hp} + \phi_{pai} + \phi_{pao}} \tag{3}$$

$$= \frac{C_{pf} \times q_{pai} \times (T_{out} - T_{in}) - \frac{q_{pai} \times \Delta P_{pai}}{\eta}}{\phi_c + \frac{q_{pai} \times \Delta P_{pai}}{\eta} + \frac{q_{pao} \times \Delta P_{pao}}{\eta}}$$

식 (3)에서 Q_c 는 냉방 용량이며, Q_{pf} 는 부하측 순환수의 비열을 나타내며, q_{pai} 은 부하측 순환수 유량을 나타내며, q_{pao} 는 열원측 순환수 유량을 나타낸다. T_{in} 은 부하측 순환수의 열펌프 시스템의 유입 온도이며, T_{out} 은 부하측 순환수의 열펌프 시스템의 유출 온도이다. 또한, ΔP_{pai} 은 부하측 순환펌프의 입/출구 정압차이며, ΔP_{pao} 은 열원측 순환펌프의 입/출구 정압차이다. 시스템의 유출 온도이다. 이때, η 는 보정상수이며, KS 규격의 시험방법에 의하여 0.3으로 고정하였다.

냉방 성능 계수의 측정 불확도의 추정을 위하여 냉방 성능 계수 식에 필요한 각 항목의 측정값은 공

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 (m ³ /h)	±2	±1
Diff. pressure (Pa)	±10	±5

Table 4. Uncertainty of a measurement results

Measurement device	Uncertainty		
	u_a	u_b	u_c
Load mass-flow (kg/s)	0.002	0.021	0.0211
Load temperature (°C)	0.01	0.035	0.04
Load flow rate (m ³ /h)	0.007	0.0757	0.0761
Load diff. pressure (kPa)	0.00	0.07	0.07
Power meter (kW)	0.00	0.005	0.006
Source flow rate (m ³ /h)	0.0056	0.0651	0.0654
Source diff. pressure (kPa)	0.00	0.07	0.07

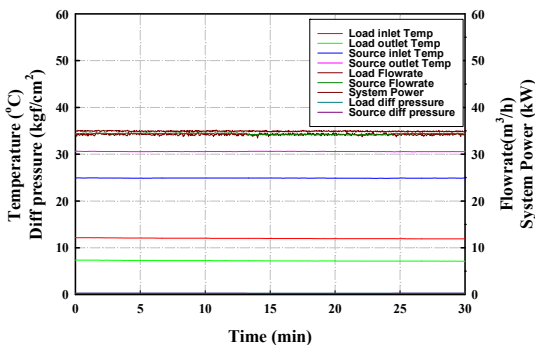


Fig. 5. Measurement results of heat pump unit depending on time

인인증기관에서 검교정된 측정센서를 이용하여 측정하였으며, 시간에 따른 측정된 결과는 Fig. 5에 제시하였다. 또한, 측정센서로 측정된 결과의 허용오차는 Table 3에 제시하였다. 냉방 성능 계수 식에 필요한 각 항목의 측정값의 A형, B형 불확도, 합성 불확도의 식은 식 (4)-(6)에 나타내었고, 결과는 Table 4에 제시하였다.

$$u_a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$$u_b = \frac{u}{k} \quad (5)$$

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (6)$$

각 항목의 A형 불확도는 유한 반복측정에 의한 표본의 표준편차를 구하고 모집단의 표준편차를 추정하므로 반복측정을 통하여 A형 불확도를 추정하였다. B형 불확도는 통계적으로 직접 구하지 않는 모든 불확도이므로 각 항목에 측정되는 측정센서의 검/교정 성적서에 제시한 불확도 결과를 사용하였다.

열펌프 시스템의 냉각 성능 계수 합성 표준불확도는 정미 냉방 용량 및 유효 소비 전력값의 표준불확도와 감도계수가 요구된다. 냉각 성능 계수의 합성 표준불확도, 정미 냉방 용량 및 유효 소비 전력의 감도계수의 식은 다음과 같다.

$$u_{COPc} = \sqrt{[C_{nQc} \times u_{nQc}]^2 + [C_{\phi total} \times u_{\phi total}]^2} \quad (7)$$

Table 5. Expanded uncertainty of a COPc

	Results
$COPc$	5.23
C_{nQc}	0.0273
$C_{\phi total}$	0.1426
u_{nQc}	0.057
$UCOPc$	0.11

$$C_{nQc} = \frac{1}{\phi_{total}} \quad (8)$$

$$C_{\phi total} = Q_c \frac{1}{\phi_{total}^2} \quad (9)$$

식 (7)-(9)에서 u_{nQc} 는 정미 냉방 용량의 표준불확도이며, $u_{\phi total}$ 는 유효소비전력의 표준불확도이다. 정미 냉방 용량 및 유효소비전력의 감도계수는 C_{nQc} 및 $C_{\phi total}$ 로 나타내었다. 감도계수는 변수가 2개 이상인 함수에서 미분할 때 하나의 변수만을 간주하고 미분한다. 이때, 편미분된 결과를 감도계수라 한다.

열펌프 시스템의 냉각 성능 계수의 확장 불확도는 합성 표준불확도와 포함인자의 곱으로 이루어진다. 따라서 열펌프 시스템의 냉각 성능 계수의 확장불확도는 식 (10)과 같고, Table 5에 결과를 제시하였다. 이때, 포함인자는 신뢰수준 약 95%일 경우에 2를 사용하며 이러한 경우는 측정 결과가 정규분포로 가정하여 포함인자를 산출한다. 정규분포는 통계학에서 대표적인 연속확률분포이며 통계학에 뿐만 아니라 측정 불확도에서 사용되고 있다.

$$UCOPc = k \times u_{COPc} = 2 \times 0.057 = 0.11 \quad (10)$$

위와 같이 열펌프 시스템의 냉각 성능 계수의 확장 불확도는 0.11%로서 매우 신뢰성 있는 성능 결과를 도출할 수 있으며, 성능시험 방법 및 결과에 대해 객관적인 신뢰성을 확보할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 신재생에너지 중에서 지열을 이용한 열펌프 시스템의 성능을 객관적으로 검토하였다. 열펌프 시스템의 시험조건에 따른 성능시험을 수행하였고, 열펌프 시스템의 냉방성능 계수의 측정 불확도를 추정함으로써 객관적인 성능 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 열펌프 시스템의 냉각 성능 계수는 지열을 이

용하여 냉방 성능의 능력을 계수로 나타낸다. 따라서 계수가 높을수록 열펌프 시스템 운전의 에너지절감 효과를 나타낸다.

2) 측정 불확도 추정은 성능시험 결과를 통계적으로 분석하므로 성능시험을 체계적으로 수행하고 성능 결과를 객관적인 분석이 가능하다.

3) 열펌프 시스템의 성능시험 수행을 위해서는 시험장비 및 측정센서의 유지 및 관리가 매우 중요하다. 시험장비는 공인 인증된 규격에 따라 제작이 되어야 하며, 측정센서는 주기적으로 검/교정을 수행해야 한다.

4) 시험장비 및 측정센서의 측정오차를 분석하고 시험방법에 대한 오차를 분석하면, 시험 결과의 측정 불확도를 추정할 수 있다. 성능시험 결과의 측정 불확도를 추정함으로써 성능시험 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

References

1. O. K. Gwon, D. A. Cha, C. S. Park, and S. G. Lee, "A study on two-stage compression heat pump for district heating", The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 2011, pp. 471-476.
2. D. A. Cha, O. K. Gwon, C. S. Park, and S. G. Park, "A study on cooling characteristics of ground source heat pump with variation of heat exchange methods", The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2011, pp. 1093-1096.
3. Z. Lian, S. Park, and H. Qi, "Analysis on energy consumption of water-loop heat pump system in china", Applied Thermal Engineering, 2005, Vol. 25, No. 1, pp. 73-85, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.002>.
4. C. Y. Cho and J. M. Choi, "Influence of refrigerant charge amount on the performance of a water-to-water type ground source heat pump with a variation of compressor speed and water flow rate", New & Renewable Energy, Vol. 7, No. 4, 2011, pp. 30-36, doi: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2011.7.4.030>.
5. KS (Korean industrial standards) B (B: machine) 8292, "Water-to-water ground source heat pump unit", Korea, 2015. Retrieved from <https://standard.go.kr/KSCI/standardIntro/getStandardSearchList.do>.
6. D. Y. Um, "Consideration of the measurement uncertainty for reliability improvement of surveying results", Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, 2011, pp. 107-112. Retrieved from UCI(KEPA): I410-ECN-0101-2014-530-003268699.
7. S. J. Moon and J. H. Chung, "Measurement uncertainty of vibration testing result with including uncertainty of testing facilities", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 7, 2016, pp. 781-786. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07070582>.