

공기열원 히트펌프의 에너지 효율 비율에 관한 실험적 연구

정순영[†]

한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부

An Experimental Study on the Energy Efficiency Ratio of Heat Pump for Air Source

SOON YOUNG JEONG[†]

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

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

Received 7 November, 2022
Revised 21 November, 2022
Accepted 9 December, 2022

Abstract >> In this paper, an experimental study was conducted on the energy efficiency ratio of performance for air source heat pump. The energy efficiency ratio presents the operating efficiency of heat pump performance. In order to improve reliability in the energy efficiency ratio test of air source heat pump, 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. The measurement uncertainty for the energy efficiency ratio test of air source heat pump was calculated and the measured results were presented.

Key words : Heat pump(히트펌프), Heat exchanger(열교환기), Performance(성능), Energy efficiency ratio(에너지 효율비), Measurement uncertainty(측정 불확도)

1. 서론

국내 및 해외에서 탄소중립 및 에너지 절감에 대한 중요성이 부각되면서 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 국내에서는 탄소중립 및 에너지 절감을 위한 투자 및 연구가 진행되고 있다.

히트펌프는 가정 및 산업에서 냉방 및 난방용으로 많이 사용되고 있으며, 히트펌프 시스템에서 열을 회

수하는 열원을 친환경 신재생에너지를 사용하고 있는 추세이다. 히트펌프 시스템의 열을 회수하는 열원으로 물, 지열, 태양 및 공기 등이 있다. 특히, 가정 및 산업에서는 사용되는 히트펌프 시스템의 열원은 주로 지열 및 공기로 많이 사용되고 있으며 지열을 열원으로 사용되는 히트펌프는 초기 투자비용이 많이 발생되지만 공기를 사용되는 히트펌프는 상대적으로 저렴한 투자비용이 발생하는 장점이 있다.

또한, 공기는 주위에서 가장 풍부하고 쉽게 활용이 가능하므로 히트펌프 시스템의 열원으로 사용하고 운전하는 데에 매우 효과적이며, 주위의 공기열을 70-80% 사용하므로 운전 효율이 매우 높아 에너지 절감에 대한 효과가 발생된다.

따라서 에너지 절감을 위해서는 객관적인 성능 검토에 대한 연구가 필요하다. 에너지 절감을 위한 히트펌프 시스템의 수요가 증가함에 따라 국내에서는 히트펌프 시스템의 성능 분석에 관한 연구 사례가 급격하게 증가하였다. Lee 등¹⁾은 공기열원 히트펌프의 난방 성능 특성에 관한 실험적인 연구를 수행하였고, Ko와 Park²⁾은 공기열과 수열원을 이용한 히트펌프의 성능 특성을 비교한 연구를 수행하였다. 또한, Lee 등³⁾은 공기열원 히트펌프의 공기열원과 지열원을 복합적으로 이용한 히트펌프의 성능 측정에 관한 연구를 진행하여 상호 보완적인 운전패턴을 갖는 복합열원 히트펌프 시스템 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 풍부한 자원의 공기를 이용한 히트펌프의 성능을 실험적으로 분석하였다. 공인인증기관에서 검/교정된 측정센서를 이용하여 성능시험을 수행하고 정밀한 데이터를 확보하였다. 또한, 공기열원 히트펌프의 성능을 효과적으로 분석 및 검토하였다.

2. 공기열원 히트펌프

히트펌프 시스템은 압축기(compressor), 응축기(condenser), 팽창밸브(expansion valve), 증발기(evaporator)로 구성되어 있으며, 공기를 이용하는 히트펌프 시스템의 계략도를 Fig. 1에 나타내었다.

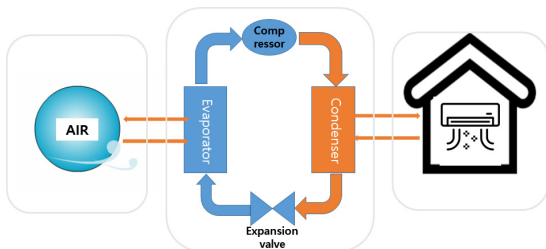


Fig. 1. Air source heat pump unit schematic

공기열 히트펌프 시스템의 냉방 및 난방운전의 계략도는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 냉방운전 모드, Fig. 2(b)는 난방운전 모드 계략도이다. 히트펌프 시스템은 압축기 토출부에 4-way valve를 설치하여 냉방과 난방운전 변환 시 냉매의 흐름 방향 제어가 가능하도록 설계 및 제작된다. 히트펌프 시스템의 작동은 냉매가 외부열원으로부터 열을 흡수, 이송하고 배출하는 원리를 이용하여 냉방과 난방열원을 공급하는 방식이다.

본 연구에서는 공기열원을 사용하는 히트펌프 시스템의 효과적인 운전을 위해, 냉방운전 모드의 성능을 분석하였다.

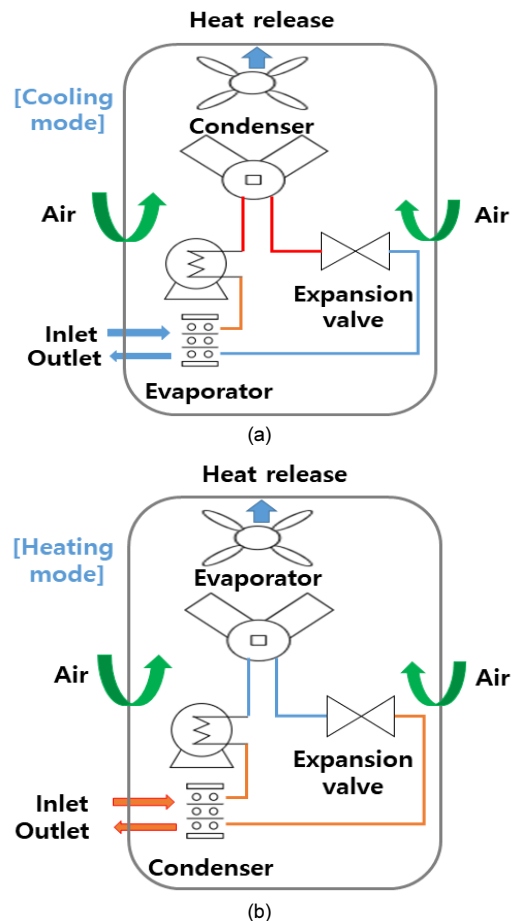


Fig. 2. Operation mode of air source heat pump unit (a) cooling mode, (b) heating mode

3. 공기열 히트펌프 시험

공기열원 히트펌프 시스템의 성능시험 장치 및 측정 계측기 구성 방법은 KS 규격에 근거하여(KS B 6275: 워터 칠링유닛) 구축하였다. 또한, 공기열원 히트펌프 시스템의 시험은 한국농기계협동조합(Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative)의 품질보증 및 사후관리 이행보증의 기준에 따라 인증시험 방법을 근거하여 수행하였다. 공기열원 히트펌프 시스템의 시험을 위한 시험장치 계략도는 Fig. 3에 나타내었다. 시험에 사용된 계측장비 및 시험 조건은 Table 1 및 2에 나타내었다. 이때 유량 조건은 난방 정격 시험온도 조건에서 결정되며 공기열원 히트펌프의 부하측 입구온도 및 출구온도 차이가 5°C일 때, 유량을 선정한다^{4,5)}.

4. 측정 불확도 추정

성능시험의 측정값은 측정 계측기들을 통한 측정값으로 나타내며, 최근에는 측정 및 계측에 대한 값뿐만 아니라 각 측정 계측기들의 신뢰 정도를 나타낸다.

측정 불확도(estimation of uncertainty)는 측정된 값들의 불확실한 정도를 표현하며, 각 측정값들의 객관적인 신뢰성을 나타낸다. 성능시험의 측정값들은

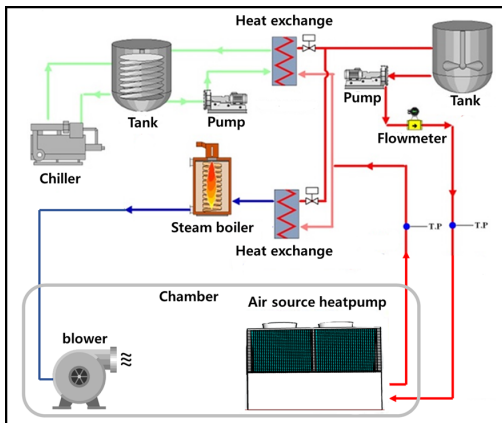


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus for performance of air source heat pump

환경 및 측정자에 의하여 오차가 발생되므로 그에 따른 특정한 신뢰수준에서 성능시험의 측정값들이 달라질 수 있으므로 각 측정값들의 범위를 함께 제시해야 한다. 따라서 측정 불확도는 측정된 측정값에 대하여 측정 결과뿐만 아니라 측정값들의 오차범위를 제시 가능하므로 성능시험 결과의 객관적인 분석이 가능하다.

성능시험을 통한 측정값들은 측정 계측기를 통한 결과이므로 참값이 아니다. 따라서 성능시험 및 측정 방법에 따라 합리적인 방법으로 추정해야 객관적인 검토가 가능하다. 그러므로 측정 계측기를 통한 성능시험 결과를 객관적으로 추정하고 측정값들의 불확실성을 불확도로 계산하여 제시해야 한다. 성능시험의 측정값의 측정 불확도 추정 절차를 Fig. 4에 나타내었다.

5. 공기열원 히트펌프 성능 분석

본 연구에서는 공기열원 히트펌프 시스템의 성능 중에서 운전 효율을 정량적으로 제시하는 에너지 효율비(energy efficiency ratio)를 계산하고 측정 불확도를 추정하였다. 에너지 효율비는 정격 냉각 능력(Q_c) 및 정격 냉각 소비전력(P) 비율이며, 식 (1)에 나타내었다^{6,7)}.

Table 1. Specifications of a measurement device

Measurement device	Range	Uncertainty
Temperature (°C)	0-60	±0.14
Power meter (kW)	0-200	±0.01
Flow-meter (m ³ /h)	0-18	±0.62

Table 2. Experimental condition

Parameter	Condition
Load water inlet temperature (°C)	12.00
Load water outlet temperature (°C)	7.00
Source dry temperature (°C)	35.00
Source wet temperature (°C)	24.00

$$\text{Energy efficiency ratio} = \frac{Q_c}{P} \quad (1)$$

식 (1)에서 정격 냉각 능력은 공기열원 히트펌프의 냉각 능력을 나타내며, 정격 냉각 소비전력은 공기열원 히트펌프에 인가되는 전력을 의미한다. 이때, 정격 냉각 능력의 식은 식 (2)에 나타내었다.

$$Q_c = m \times c_p \times (t_1 - t_2) \quad (2)$$

식 (2)에서 m 은 순환유량, c_p 는 물의 비열, t_1 은 물의 입구부 온도, t_2 는 출구부 온도를 나타낸다.

식 (1)에서 정격 냉각 소비전력은 공기열원 히트펌프의 소비전력의 측정값이며, 식 (3)에 나타내었다.

$$P = V \times A \times PF \times \sqrt{3} \quad (3)$$

식 (3)에서 V 는 전압, A 는 전류, PF 는 역률을 나타낸다.

에너지 효율비의 측정 불확도 추정을 위하여 에너지 효율비 식에 필요한 각 항목의 측정값은 공인인증기관에서 검/교정된 측정 센서를 이용하여 측정하였다. 에너지 효율비에 필요한 측정 결과는 시간에

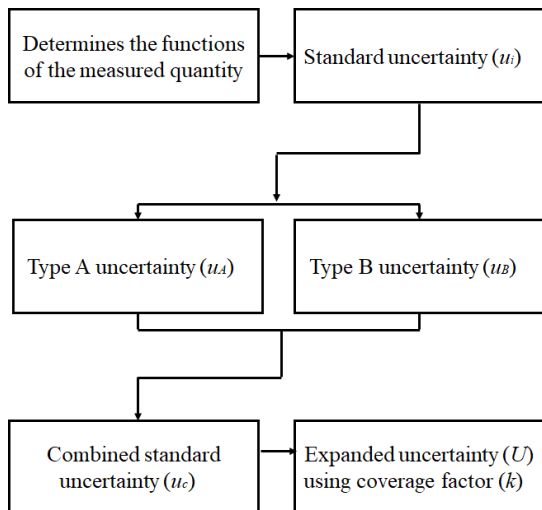


Fig. 4. Flowchart of the uncertainty calculation process

따라 Fig. 5와 같이 측정하였고 측정 센서로 측정된 결과 및 허용 오차는 Table 3에 나타내었다.

5.1 표준 불확도 평가

성능시험 수행 시, 환경적인 요인, 측정자 및 측정 계측기 등 다양한 불안 요소에 대하여 측정값들에 영향을 받으므로 각 불안 요소들의 평가가 필요하다.

표준 불확도(standard uncertainty)는 측정 방법 및 측정 결과에 따라 측정량을 객관적이고 합리적으로 추정한 값을 나타내며, 평가 방법에 따라 A형 및 B형 평가로 나누어진다.

표준 불확도의 평가는 A형 및 B형로 구별하여 평가한다. 왜냐하면 성능시험의 측정값들의 불확실한 요소들을 다양하고 개관적으로 분석하기 위해서다. A형 및 B형 평가 방법은 통계학적인 분석 방법으로 접근하여 분석하므로 각 다른 산출 방법에 의해 도출된 평가 결과를 확률분포에 근거하여 분석된다. 따라서 평가 결과의 불확도 성분은 분산이나 표준편차

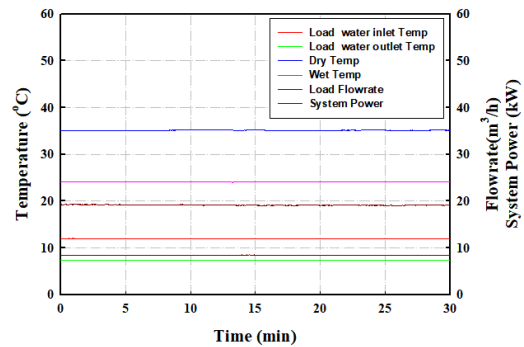


Fig. 5. Measurement results of air source heat pump unit depending on time

Table 3. Tolerance of a measurement results

Measurement device	Measurement	Tolerance
Inlet temperature (°C)	12.0	±0.1
Outlet temperature (°C)	7.4	±0.1
Power meter (kW)	19.2	±1.0
Flow-meter (m ³ /h)	8.5	±0.6

에 의하여 제시된다.

A형 평가는 성능시험의 측정 계측기를 통한 측정량을 통계적으로 분석하여 구하는 방법이다. 즉, 측정량의 반복 측정값의 빈도분포(frequency distribution)에 근거한 확률밀도함수(probability density function)로 구하므로 성능시험의 반복 측정을 통한 측정값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법으로 평가한다.

B형 평가는 A형 평가가 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. 에너지 효율비 식에 필요한 각 항목의 측정값의 A형 및 B형 표준 불확도 식 (4) 및 식 (5)로 나타내었다.

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

$$u_a = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \tag{5}$$

에너지 효율비 도출을 위한 각 항목들의 A형 불확도는 측정 센서를 통하여 반복 측정을 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.

5.2 합성 표준 불확도

합성 표준 불확도(combined standard uncertainty)는 측정 결과가 측정 방법 및 다양한 입력량에 의해서 도출될 때의 측정 결과를 합성하는 불확도이다. 따라서 여러 개의 다른 불확도 요인에 대한 표준 불확도를 구하여 합성된 값이므로 주로 A형 및 B형 표준 불확도를 합성하여 합성 표준 불확도를 나타낸다.

합성 표준 불확도는 측정결과에 따른 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. 합성 표준 불확도는 식 (6)에 나타내었다.

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \tag{6}$$

에너지 효율비의 정격 냉각 능력의 합성 표준 불확도는 순환유량, 물의 입구부 온도, 출구부 온도 측정값의 표준 불확도와 감도계수가 요구된다. 이때, 물의 비열은 측정온도에 따라 정해지므로 합성 표준 불확도에서 제외하였다. 정격 냉각 능력의 합성 표준 불확도는 식 (7)에 나타내었고 순환유량 및 입구 및 출구부 온도 차이의 감도계수는 식 (8) 및 식 (9)에 나타내었다. 이때, 2개 이상의 측정값이 포함된 수학적 모델링에서 미분을 수행할 경우에 각 측정값에 대하여 편미분하는 결과를 감도계수라 한다.

$$u_{Q_c} = \sqrt{(C_p \times u_{c_p})^2 + (C_{dt} \times u_{dt})^2} \tag{7}$$

$$C_{c_p} = m \times (t_1 - t_2) \tag{8}$$

$$C_{dt} = m \times c_p \tag{9}$$

에너지 효율비의 정격 냉각 소비전력의 합성 표준 불확도는 전압, 전류 및 역률 측정값의 표준 불확도와 감도계수가 요구된다. 정격 냉각 소비전력의 합성 표준 불확도는 식 (10)에 나타내었고 전압, 전류 및 역률의 감도계수는 식 (11)-(13)에 나타내었다.

$$u_{Q_c} = \sqrt{(C_V \times u_V)^2 + (C_A \times u_A)^2 + (C_{PF} \times u_{PF})^2} \tag{10}$$

$$C_V = A \times PF \times \sqrt{3} \tag{11}$$

$$C_A = V \times PF \times \sqrt{3} \tag{12}$$

$$C_{PF} = V \times A \times \sqrt{3} \tag{13}$$

에너지 효율비의 합성 표준 불확도는 식 (14)이며, 정격 냉각 능력 및 정격 냉각 소비전력의 감도계수는 식 (15) 및 식 (16)에 나타내었다.

$$u_{\eta} = \sqrt{(C_{Qp} \times u_{Qp})^2 + (C_p \times u_p)^2} \tag{14}$$

$$C_{Qp} = \frac{1}{P} \tag{15}$$

$$C_{Lp} = -\frac{Q_p}{P^2} \tag{16}$$

5.3 확장 불확도

확장 불확도(expanded uncertainty)는 측정량의 객관적이고 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정 결과 주변의 어떠한 구간을 정의하는 양이다. 확장 불확도는 합성 표준 불확도에 포함인자(coverage factor)를 곱하여 계산된다. 이때, 포함인자의 값은 그 구간에 대해 요구되는 포함확률 또는 신뢰수준에 따라 정해지는데, 보통 2와 3 사이의 값을 갖는다. 측정 방법 및 측정 결과에 따른 확장 불확도가 다른 측정 결과의 합성 표준 불확도를 구하는 데 사용될 경우에는 항상 포함

인자의 값을 명시해야 한다.

에너지 효율비의 확장 불확도는 합성 표준 불확도와 포함인자의 곱으로 이루어진다. 따라서 에너지 효율의 확장 불확도는 식 (17)과 같고, 냉각탑 능력비 및 불확도 추정 결과는 Table 4에 제시하였다.

$$U = k \times u_{\eta} \tag{17}$$

식 (17)에서 k 는 포함인자이며, 신뢰수준 약 95% 일 경우에 2를 사용한다. 포함인자는 성능시험 측정값이 정규분포로 가정하여 산출한다. 정규분포는 일반적으로 흔히 나타나는 자연현상의 숫자를 확률 모형으로 나타내며, 평균 및 표준편차를 표준화시켜 다양한 자료의 분포를 단 한 개의 함수식으로 대표해서 표현이 가능하다. 따라서 정규분포는 통계학에서 대표적인 연속확률분포이며 통계학뿐만 아니라 측정 불확도에서 사용된다. 포함인자는 측정값의 신뢰수준에 따라 결정되며, 결정된 포함인자와 합성 표준 불확도의 곱을 확장 불확도로 정의한다.

Table 5와 같이 에너지 효율비의 측정값과 확장 불확도를 나타내었으며, 에너지 효율비의 확장 불확도는 약 4.5%이다. 성능시험의 측정값의 불확도가 매우 낮을 경우에는 성능시험 방법 및 결과에 대해 객관적인 검증 및 신뢰성 확보가 가능하다.

6. 결론

본 논문에서는 공기열원 히트펌프의 성능을 객관적으로 검토하였다. 공기열원 히트펌프의 냉방시험 조건에 따른 성능시험을 수행하였고, 에너지 효율비의 측정 불확도를 추정함으로써 객관적인 성능을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 공기열원 히트펌프는 대기 중의 공기를 열원으로 이용하여 가정 및 산업에서 필요한 냉난방에 사용된다. 공기열원 히트펌프의 성능은 에너지 효율비로 나타내며, 에너지 효율비가 높을수록 장비의 능력이 우수하고 유지관리 비용이 절감된다.

2) 공기열원 히트펌프의 시험 수행을 하면서 사용되

Table 4. Uncertainty of a measurement results

Measurement device	Uncertainty		
	u_a	u_b	u_c
Load water inlet temperature (°C)	0.0021	0.07	0.07
Load water outlet temperature (°C)	0.0037	0.07	0.0701
Flowrate (m ³ /h)	0.0005	0.0072	0.0073

Table 5. Expanded uncertainty of capacity for air source heat pump

	Results
Energy efficiency ratio	2.37
Expanded uncertainty	0.107

는 계측 장비와 시험 장비의 유지 및 관리가 매우 중요하다. 시험 장비는 유지보수 및 인증된 제품으로 제작되고 계측 정비와 측정 센서는 주기적으로 검/교정과 중간점검을 통해 장비의 유효성을 확보해야 한다.

3) 시험에 대한 결과를 객관적으로 도출하기 위해 KOLAS 공인기관에서 검/교정된 측정 장비 및 센서의 측정오차를 도출하고 시험 방법에 오류를 분석하면서 시험 결과에 대한 측정 불확도를 추정할 수 있다. 성능시험에 도출된 결과를 측정 불확도를 추정할 수 있도록 시험 결과의 신뢰성을 확보할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 내부 연구(공동장비활용 및 에어기술 지원사업, PJC22110)의 지원에 의하여 수행되었다.

References

1. K. J. Lee, Y. C. Kwon, C. K. Chun, S. J. Park, J. T. Kwon, and C. Huh, "Experimental study on heating performance characteristics of air source heat pump with air to water type", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 23, No. 6, 2011, pp. 400-405. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01643622>.
2. W. B. Ko and Y. C. Park, "AA study on the comparison of the performance of a heat pump system with air and water heat sources", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 40, No. 7, 2016, pp. 563-568, doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2016.40.7.563>.
3. S. H. Lee, J. S. Park, W. Y. Lee, and D. W. Lee, "A study on the performance measurement of a heat pump using combined fin-tube heat exchanger", *Proceedings of the SAREK 2015 Summer Annual Conference*, 2015, pp. 944-948. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06382452>.
4. J. W. Son, J. H. Hong, and T. Y. Aum, "A pilot study on in-situ measurement method for cooling performance of air-source heat pump", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 38, No. 9, 2022, pp. 201-207, doi: <https://doi.org/10.5659/JAIK.2022.38.9.201>.
5. S. H. Oh, R. Yun, and Y. Cho, "Cooling and heating operation characteristics of raw-water source heat pump and air source heat pump in water treatment facility", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 25, No. 7, 2013, pp. 386-391, doi: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2013.25.7.386>.
6. Y. Kwon, S. Bae, Y. Nam, R. Yun, C. Y. Park, and H. Lee, "Comparative analysis of system performance for water, ground and air source heat pump system using the dynamic energy simulation", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 41, No. 4, 2021, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.4.001>.
7. Y. J. Hwang, J. W. Jeong, "Energy saving potential of air-source heat pump system for cooling, heating and hot water supply in residential buildings", *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 14, No. 5, 2020, pp. 503-514, doi: <https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200043>.