

아두이노 기반 외피 열성능 무선 측정 장치 개발

Development of open MCU-based wireless measuring device for building envelope thermal performance

노 상 태*

No, Sangtae

Abstract

To increase the energy efficiency and efficiency of the building, we are focusing on the insulation performance of the building. Before implementing energy efficiency, it is necessary to evaluate the thermal performance of the wall. Current thermal performance evaluation methods are not only inaccurate but also costly because the test status cannot be known in real time due to weather constraints. Therefore, in this study, we manufactured a low-cost open source-based thermal performance measuring device that can measure thermal performance in real time and evaluated it wirelessly. Arduino, ADS1115, and HFP01 were used as the manufactured devices. As a result, the graphs of the open source-based heat flow measurement system and the LI-19 are almost the same, proving the reliability of the developed wireless device.

키워드 : 마이크로컨트롤러유닛, 아두이노, 열관류율, 무선 측정 장치, 열류 센서

Keywords : Microcontroller unit, Arduino, U-value, Wireless measuring device, Heat flux sensor

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

2018년 10월 IPCC에서 2050년까지 탄소 중립을 달성해야 한다고 발표하였다. 2021년 정부와 2050 탄소 중립 위원회는 2030년까지 2018년 온실가스 배출량의 40%를 감축할 것이라는 2030 국가 온실가스 감축 목표안(NDC)을 발표하였다. 세계 건축 및 건설연맹(Global ABC)의 '2020년 현황 보고서'에 따르면 전 세계 탄소 배출량 중 39%가 건물과 건축 분야에서 발생한다. 그중 28%는 빌딩 운영 즉, 냉난방, 조명 등에서 발생하며 11%는 건축물의 생애주기 동안 발생한다. 따라서 온실가스의 배출량 감축을 위해서는 건축물의 탄소 배출량을 줄일 필요성이 있다.

국내에서 건물의 에너지 및 효과 성능을 높이기 위해 건축물 단열성능에 관심을 기울이고 있다. 국토교통부에서는 '에너지 수요 절감을 위한 건축물 에너지 성능 향상 대책'을 마련하여, 기존 건축물에 대한 에너지 효율화를 본격 추진하고 있다. 기존 건축물의 에너지 효율화를 시키기 전에 건물 구조체의 벽체 열 성능을 평가해야 한다.

건축물 벽체 열 성능을 평가하는 여러 방법 중에는 열류 센서를 이용한 현장 측정시험이 있다. 현재까지의 현장 측정시험은 실험실 환경과는 달리 날씨 제한을 받고 재료의 불확실한 속성 때문에 측정값이 부정확하고 불일치할 수 있다. 실내외 온도차가 실험에 알맞고 다른 방해요소가 없더라도 실시간으로 시험 상황을 알 수 없어 실험 정확성이 떨어질 뿐만 아니라 비용이 많이 든다.

따라서 본 연구에서는 MCU(Microcontroller unit)기반 아두이노를 활용하여 무선 기반 열류 측정 장치를 개발하고 그 성능을 평가하고자 한다.

2. 기존 연구 분석 및 관련 기준

2.1 기존 문헌 검토

노상태 (2017)의 연구에서는 열류 센서를 이용하여 시공된 건축물 벽체 열 성능의 현장 측정에 관해 연구하여 열류 센서의 측정 성능에는 문제가 없으나, 실내외 온도차가 작아 통과 열류량이 작은 경우 벽체 평균 열관류율 값 측정에 어려움이 있는 것으로 판단하였다.

김창민 외 (2019)의 연구에서는 열류계 측정 방법과 열화상 측정 방법, 국외에서 제안된 열화상을 이용하여 열관류율 계산 방법을 비교했는데 높은 오차가 나타났다. 이는 상대적으로 간편한 계산 방법으로 인해 측정 현장의 환경에 따라 달라지는 인자들을 충분히 반영하지 못함을 의미한다고 판단하였다. 박민주 외 (2015)의 연구에서는 국내의 건물 외피 단열 규정을 조사하고 상호 비교함으로써 국내 규정의 한계를 파악하고 열교가 실제 단

* 한국교통대학교 건축학부 교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture, Korea National University of Transportation, stno@ut.ac.kr)

This was supported by Korea National University of Transportation in 2022

열성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석해 봄으로써 열교 영향을 고려한 단열 규정 마련이 필요하다고 판단하였다. 윤희원 외 (2013)의 연구에서는 기존 건물의 에너지 성능 강화를 위해 현장에서 건물의 단열성능을 정확하게 평가하기 위한 시스템 개발과 관련 기준 및 기존 연구 결과를 고찰 및 분석하였다. 허은지 외 (2012)의 연구에서는 건물 외피의 현장에서 적용할 수 있는 현장 측정 방법에 대한 선행연구를 바탕으로 벽체 종류에 상관없이 열관법을 적용하였을 때 정확한 열관류를 산출을 위한 방법에 대해 연구하였다.

기존 연구에서는 벽체 열류 측정 방법 또는 기준에 대한 내용을 주로 다루었는데, 본 연구에서는 오픈 소스 기반 열류 센서 데이터 취득 방법에 대하여 제안하였다는 점에서 차별성이 있다고 할 수 있다.

2.2 벽체 열관류를 현장 측정 기준

국내 기준 KS L 9869에서는 ISO 9869기준을 바탕으로 건물 요소의 열저항과 열 투과율 현장 측정에 대해 규정하고 있다. 열류계는 다른 방해 요소에 영향을 받지 않는 실내에 설치하고, 실내·외 온도를 측정한다. 열류계는 요소 표면과 직접적인 열 접촉을 하고 있어야 한다. 시험 동안에는 열 전도성이 일정해야 하기에 72시간 동안 일정 간격으로 여러 개의 측정 평균값을 기록한다. 시험 말기에 구한 R(열저항)값이 24시간 전에 구한 값에서 $\pm 5\%$ 를 벗어나지 않아야 한다. 데이터를 분석하는 방법에는 평균법 또는 동역학적 방법이 있다. 평균법을 이용한 열관류를 산정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (1)$$

U : 열관류율 값 ($W/m^2 \cdot K$)

j : 개별 측정

n : 측정 데이터 수

q_j : 열류량 밀도 (W/m^2)

T_{ij} : 실내 온도 (K)

T_{ej} : 실외 온도 (K)

2.3 열류 센서 측정 방식

그림 1은 열류계 센서의 구조를 나타낸다. 열류 센서는 써모파일(thermopile)로 구성되어 있다. 써모파일은 전기적으로 직렬로 연결된 두 개의 금속 합금으로 각각 구성된 여러 열전대로 구성된다. 열전대는 핫 조인트와 콜드 조인트 사이의 온도 차이에 비례하는 출력 전압을 생성하는데, 이 열전대를 직렬로 여러 개 연결하면 신호가 증폭된다. 이러한 열전대들로 구성된 써모파일은 센서를 관통하는 열유속에 비례하는 전압 출력을 생성하게 된다. 열유속은 동일한 온도 차이를 열유속 센서 본체의 유효 열

전도율로 나눈 값에 비례한다. 측정된 전압 U 를 센서 민감도 상수 S 로 나누어 주면 열유속 Φ 를 산출할 수 있다. (식(2))

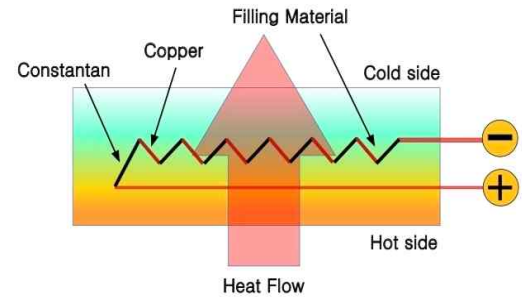


Fig.1 Structure of heat flow sensor

$$\Phi = U/S \quad (2)$$

Φ : 열유속 (W/m^2)

U : 전압 (V)

S : 감도 ($\mu V/W \cdot m^2$)

3. 오픈 소스 기반 열류 측정 장치 제작

3.1 오픈 소스 시스템의 열류 센서 데이터 취득 방안

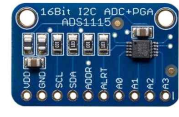
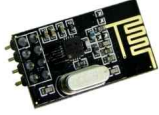
오픈 소스는 소스 코드가 공개된 소프트웨어로 개발에 필요한 방향으로 최적화가 용이하다. 대표적인 오픈 소스 기반 단일 보드 마이크로 컨트롤러로 아두이노와 라즈베리 파이를 들 수 있다. PC와 USB로 연결하여 보드에 프로그램을 업로드하고 시리얼 통신을 할 수 있다. 각종 센서를 아두이노의 아날로그/디지털 핀에 연결하여 센서 데이터를 받아들일 수 있다. 아두이노 보드는 6채널, 10비트의 아날로그-디지털 변환기(ADC: Analog to Digital Converter)를 갖고 있다. 이 변환기를 통해 센서에서 들어오는 0에서 5V 사이의 입력전압을 0에서 1024 사이의 정수값으로 변환할 수 있다. 이는 해상도가 $5/1024V$ 또는 $0.0049V(0.49mV)$ 단위임을 말한다.

일반적으로 열류 센서를 통해서 측정되는 출력값은 μV 단위의 아날로그 전압값이다. μV 단위 출력값이 미소하여 아두이노의 해상도 범위를 벗어나므로 열류 센서 데이터 측정이 불가능하다. 따라서 ADS1115 모듈과 같은 16비트 ADC를 추가 적용하여 해상도를 향상시킬 필요가 있다. ADS1115의 데이터 취득 범위(Gain range)를 5V에서 0.256V로 줄여서 설정하는 경우 $0.0078125mV$ 단위의 데이터를 처리할 수 있어, 열류 센서의 미소한 출력값도 다룰 수 있게 된다. ADS1115는 기본적으로 4채널(A0, A1, A2, A3)을 갖는데, 4개의 Single-ended 신호와 2개의 Differential input 측정(A0&A1, A2&A3)을 지원한다. 즉, ADS1115 모듈 1개가 열류 센서 1개와 T-type 열전대 1개의 Differential input을 지원할 수 있다. ADS1115 모듈은 4개를 중첩하여 아두이노 보드와 연결할 수 있으므로 보드 1개당 열류 센서 4개, 열전대 4개까지 연결 가능하다.

3.2 열류 측정 장치 제작

본 연구에서는 오픈 소스 기반의 열류 측정 장치의 사용 용도를 3가지로 가정하여 설정하였다. 열류 센서 데이터를 아두이노에 연결된 SD(Secure Digital)카드에 저장하는 방식(SD), 열류 센서 데이터를 근거리 무선 통신으로 전송하는 방식(블루투스), 열류 센서 데이터를 장거리 무선 통신으로 전송하는 방식(RF:Radio Frequency)이다. 그림 2, 3, 4에 각 방식별 아두이노와 열류 센서, 모듈 간 연결개요를 나타내었다. 표 2에 각 방식별 핀 연결을 표시하였다.

Table 1. Arduino board and parts for heat flow meter

Arduino Uno	ESP8266 (NodeMCU)	ADS1115 digital converter
		
SD card	HC-06 Bluetooth	nRF24L01 RF module
		

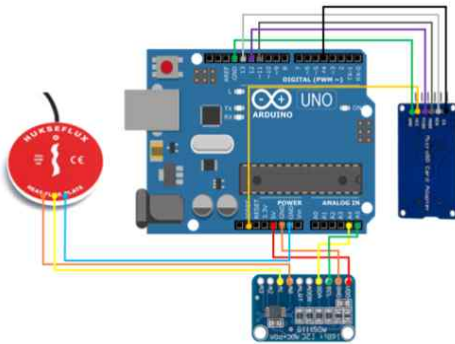


Fig.2. Heat flow sensor+arduino+ADS1115+SD card type

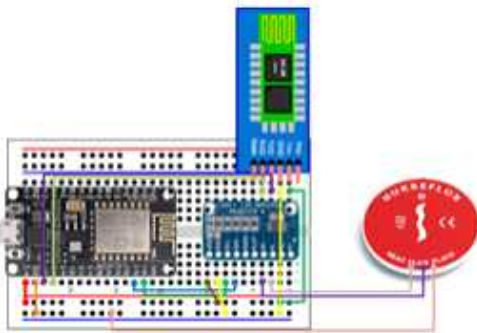


Fig 3. Heat flow sensor+Arduino+ADS1115+Bluetooth type

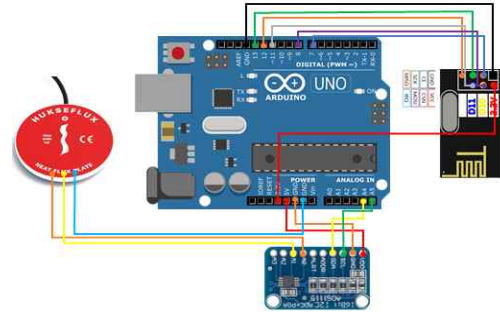


Fig 4. Heat flow sensor+arduino+ADS1115+RF type

3가지 방식으로 제작한 시스템 모두 열류 센서 데이터 취득과 데이터의 저장과 통신에 문제없이 작동하였다.

SD방식은 SD카드 모듈 데이터 저장 작동 상황을 디스플레이로 파악할 수 있도록 LCD 모듈의 추가를 고려할 만하다. 블루투스 방식으로 실내와 같은 근거리에서 다지점 측정 시, 다른 온습도 센서 등 블루투스 장비와 연계하여 동시 측정 시 열류값 상황을 실시간 모니터링할 수 있을 것이다. 블루투스 방식은 시스템의 소형화를 염두에 두고 제작 보드로는 아두이노 나노에 WiFi 모듈이 포함된 nodeMCU(ESP8266)을 사용하였다. RF 방식에서 사용된 PCB(Printed Circuit Board)형 nRF24L01 모듈은 이론상 통신 거리가 200m 정도이지만, 2.4GHz를 사용하기 때문에 수신기와 송신 측 사이 장애물이 있을 경우 수신율이 떨어지는 단점이 있다. 이 경우 물리적 안테나가 설치된 RF 모듈 적용 시 수신율을 높일 수 있다.

Table 2. Arduino Pin connections for 3 Types

	Arduino	ADS1115	HFP01	SD module
SD Card	GND			GND
	13			SCK
	12			MISO
	~11			MOSI
	4			CS
	IOREF			VCC
	5V	VDD		
	GND	GND		
	GND		GND	
	A4	SDA		
Bluetooth	A5	SCL		
		A0	LOW	
		A1	HI	
	nodemcu8266	ADS1115	HFP01	HC06
	3.3V	VDD		VCC
	GND	GND	GND	GND
RF Type	TX			TX
	RX			RX
	D2	SDA		
	D1	SCL		
		A0	LOW	
		A1	HI	
	Arduino	ADS1115	HFP01	nRF24L01
	7			CE
	8			CSN
	11			MOSI
	12			MISO
	13			SCK
	GND			GND
	3.3V			VCC
	5V	VDD		
	GND	GND		
	GND		GND	
	A4	SDA		
	A5	SCL		
		A0	LOW	
		A1	HI	

4. 오픈 소스 기반 열류 측정 장치 평가

4.1 측정 대상

본 연구에서는 개발된 오픈 소스 기반 열류 측정 시스템과 기존 열류 측정 시스템과 결과 비교를 통해 개발된 시스템의 신뢰성을 평가하였다. 측정 대상은 충북에 위치한 K대학교 건물 벽체이며 내·외벽체 표면에 온도 센서의 부착이 용이한 장소를 선정하였다. 그림 5는 대상 건축물의 조감도와 측정 부위를 나타낸 사진이다. 측정 대상 건축물의 외단열 방식의 단면 상세는 그림 6에 나타내었다. 표 3은 벽체의 단면설계도를 기준으로 하여 재료별 열전도율, 두께, 실내외 열전도 저항값을 구하고, 열저항(R : Resistance value) 값과 열관류율 (K : U-value) 값을 산출하였다.



Fig 5. Measurement target building

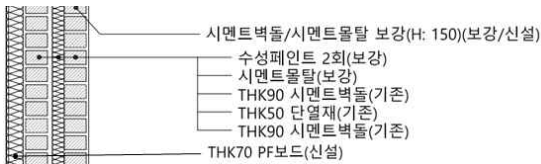


Fig 6. Structure of vertical composite wall (mm)

Table 3. Design value of Wall thermal performance

Material	thickness (mm)	λ (W/m·K)	thermal resistance (m ² ·K/W)
Ext. heat coeff.	-	-	0.043
PF board 1A	70	0.022	3.18
Cement brick	90	0.6	0.15
bid insulation 1-3	50	0.04	1.25
Cement brick	90	0.6	0.15
Int, heat coeff.	-	-	0.11
Total resistance			4.885m ² ·K/W
U-value			0.205W/m ² K

4.2 측정 방식

표 4는 본 시험을 위해 사용된 측정 장비를 나타낸 것이다. 열류 센서는 요소 표면과 직접적인 열 접촉을 위해 테이프로 부착하여 고정시키고, 내·외기 온도측정을 위해 GL-800, LI-19, T-type 열전대를 설치하였다. 기존 연구 결과에 따라⁴⁾ 열류 센서는 수평 1열로 설치하였고, KS 9869 기준에 따라 열류량, 실내·외 기온, 실내·외 벽체

표면 온도를 1분 간격으로 72시간(3일)간 측정하였다.

그림 2는 오픈 소스 하드웨어 시스템의 적용성을 평가하기 위한 실험이다. 위 실험에서 실내외 온도 차 생성을 위해 창과 문을 모두 닫고 실내 측에 온열기를 이용하였다. LI-19와 아두이노의 성능을 비교하기 위해 안정된 위치에 열류 센서를 2개 부착한 후 각각 LI-19와 아두이노에 연결해주었다. 최대한의 변수 방지를 위해 열류 센서는 수평 방향으로 동일선상에 부착시켰다. 열류계와 온도 센서의 전기적 데이터를 통해 열류량을 72시간 동안 1분 간격으로 측정하였다.

그림 3에서는 블루투스 기반 무선 열류 측정 시스템을 구현하였다. 공급 전력과 가동 지속 시간을 파악하기 위해 60,000mAh 용량의 배터리를 사용하여 56시간 동안 소모되는 전류량을 무선으로 측정하였다.

Table 4. Existing measuring instruments for comparison with developed measuring instruments

picture	model	description
	GL-800	data logger for T-type thermocouples
	LI-19	Dedicated data logger for heat flow sensor
	HFP-01 heat flow sensor	sensitivity : 60 μ V/W·m ² temp. range : -30~70°C measurement range : -2000~2000W·m ⁻² error range : $\pm$ 5%

5. 측정 결과

5.1 열류량 및 온도측정 결과

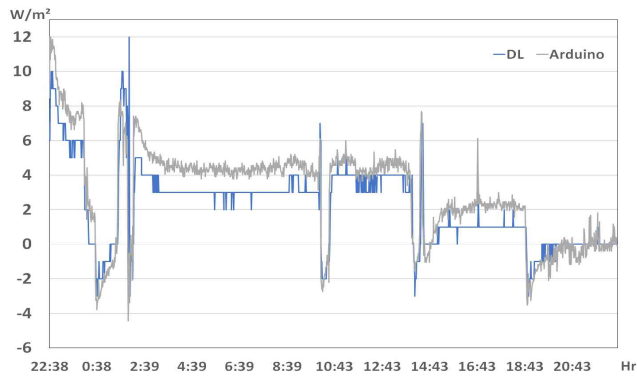
본 실험에서는 K대학교의 한 연구실에서 2021.10.15.일 22시부터 3일간 남측 벽체의 온도를 측정하였다.

그림 7의 (a),(c),(e)는 LI-19와 아두이노의 열류량을 비교한 그래프이다. (b),(d),(f)는 실내·외 벽체 온도, 실내 온도, 외기 온도를 나타낸 그래프이다.

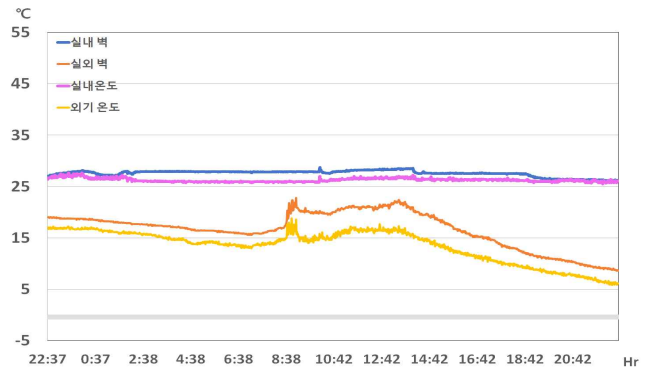
본 연구를 통해 제안된 오픈 소스 기반 열류 측정 시스템과 기존 열류 센서 전용 데이터 로거인 LI-19간 측정 결과의 상관성 비교를 위해 두 결과 간 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과 P 값(7.16E-174)이 낮아 통계가 유의미한 것으로 나타났으며, 결정계수 R^2 는 0.772로 두 측정값과 상관성이 높은 것으로 나타났다.

그림 7의 (a),(c)는 비슷한 패턴을 보이지만, LI-19의 열류량은 최소, 평균, 최대의 값 중 평균값을 사용했기 때문에 그래프가 상이하게 나온 것으로 보인다. (c)는 LI-19와 아두이노의 그래프가 거의 동일한 값을 보였다.

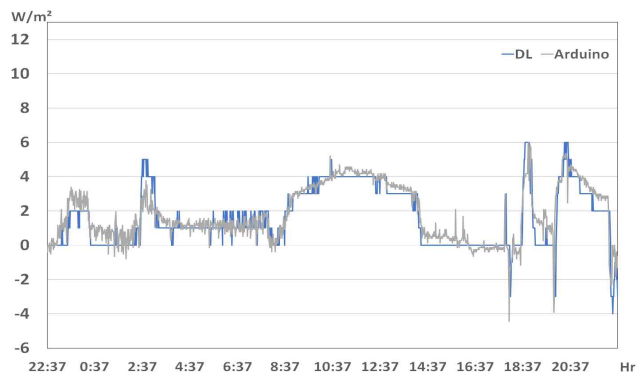
(b)는 실내·외 온도 차가 약 10°C이다. 하지만 (d),(f)를 보면 낮 동안의 벽체 온도가 약 40°C로 실내·외 온도 차가 크게 나타났다. 이는 일사량과 GL-800의 일시적인 선 연결 불량에 의한 영향인 것으로 보인다.



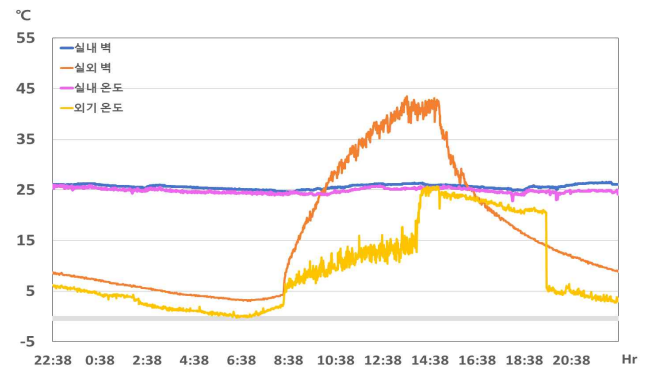
(a) 0 ~ 24H heat flow



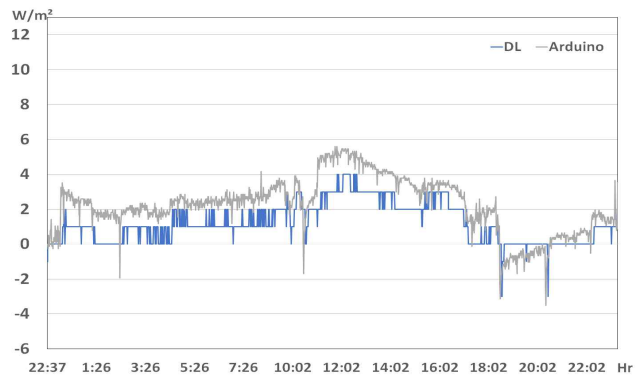
(b) 0 ~ 24H temperature



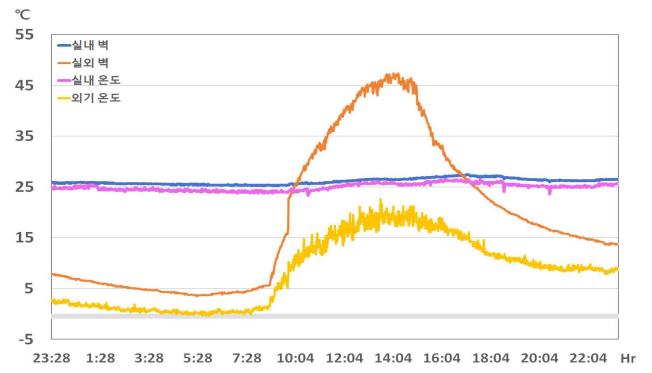
(c) 25 ~ 48H heat flow



(d) 25 ~ 48H temperature

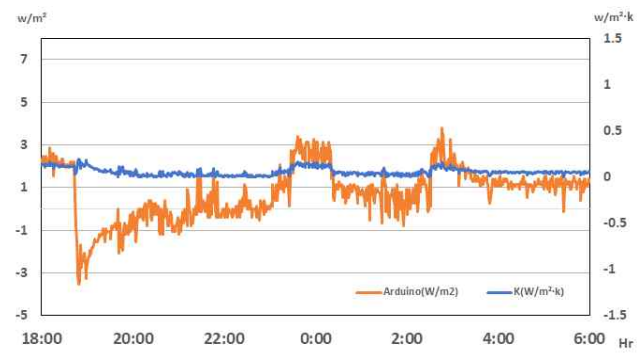


(e) 49 ~ 72H heat flow

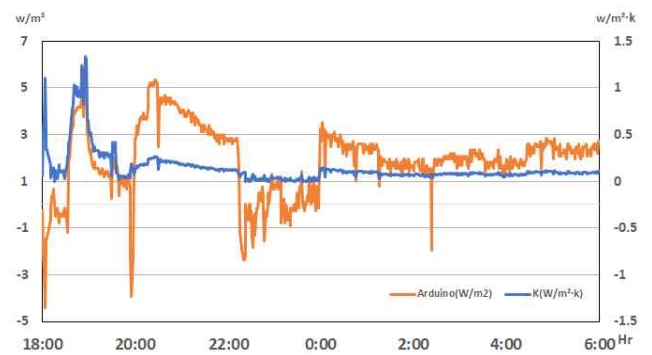


(f) 49 ~ 72H temperature

Fig 7. Heat flow and temperature measurement results



(a) 2nd day 18 ~ 6H heat flow and U-value



(b) 3rd day 18 ~ 6H heat flow and U-value

Fig 8. Heat flow rate and heat transmittance measurement results when solar radiation is blocked

5.2 열관류율 측정 결과

그림 8은 일사의 영향이 없는 오후 6시부터 오전 6시까지의 값을 사용하였다. 열관류율 값은 평균법을 이용해 산출하였다(식 (1)). 2일차와 3일차의 열관류율 평균값을 계산한 결과 각각 $0.058\text{W/m}^2\cdot\text{k}$, $0.158\text{W/m}^2\cdot\text{k}$ 가 나왔다. 표 3의 벽체 열 성능 설계값을 이용해 산출한 열관류율은 $0.205\text{W/m}^2\cdot\text{k}$ 로 실제 실험값과 차이를 보였다.

5.3 블루투스 방식 배터리 소모 측정

그림 3과 같은 장치에 배터리를 적용할 경우 지속 시간을 측정해 보았다. 60,000mAh 용량의 배터리 사용 시 최초 잔량 84%에서 56시간 사용 후 77% 잔량을 보여 시간당 75mA를 전류를 소모하는 것으로 나타났다. 충전식 배터리의 정격용량이 3.6V이므로, 시간당 소비 전력량은 270mAh이다. 그러나 충전식 배터리는 최대용량의 80%까지 충전되므로, 보조 배터리를 이용한 전원공급 가능 시간 산정을 위해 전력량 측정기기를 이용하여 정확한 값을 측정할 필요가 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 오픈 소스 기반 무선 열류 센서 데이터 취득 방법을 실시간 방식으로 모니터링이 가능한 플랫폼을 만들었다. 저비용으로 접근이 쉬운 재료로 여러 측정을 수행하여 비교적 정확한 결과를 도출할 수 있었다. 72시간 동안 열관류율 값을 측정, 비교하였다.

- (1) 본 실험에서는 실내외 온도 차이를 크게 하기 위해 실내 측 벽면을 향하여 복사 전열기를 가동하였는데, 실내 온도보다 실내 측 벽체 표면 온도가 상승하였다. 또한 낮 동안에 일사의 영향으로 외부 벽체 온도가 약 40°C 까지 상승하였다. 측정시 일사 영향을 고려할 필요가 있다.
- (2) 오픈 소스 기반 열류 측정 시스템과 기존 열류 측정 시스템을 비교한 결과 1일차와 3일차의 열류량 값에서 차이를 보였다. 이는 열류량 값을 평균값으로 사용했기 때문이거나 벽체에 부착된 LI-19의 열류 센서가 떨어졌을 가능성이 있다고 추측할 수 있다. 2일차에는 두 그래프가 거의 일치하는 것으로 보아 기존 장치와 동일한 성능을 보인다고 할 수 있다. 3일차 열류량 그래프는 특히 상관성이 떨어지는 모습이 보인다. LI-19는 최소, 최대, 평균값이 측정되는 반면, 아두이노는 순간값을 측정하도록 코딩되었기 때문이다.
- (3) (1)에서 언급한 실험 환경 조절의 문제로 인해 신뢰성 있는 열관류율 값을 얻기가 어려웠다. 인위적으로 국소 부위 통과 열류를 증가시키기 위한 부분 가열 등과 같은 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

이와 같은 결과를 분석했을 때, 본 연구에서 개발한 오픈 소스 기반 열 성능 무선 측정 장치의 데이터 취득 성능에는 문제가 없으나, 열류 센서의 벽체 부착 방법과 실내·외 온도 설정 및 조정 환경이 KS L 9869기준에 적합하지 않아 오차가 발생한 것으로 보인다.

아울러 향후 연구에서 오픈 소스 시스템의 열류 측정 값을 시간당 평균값으로 출력할 수 있도록 아두이노 시스템의 프로그래밍을 개선할 필요가 있다. 또한 여러 대의 오픈 소스 열류 측정 시스템을 적용하여 실험한 결과가 필요할 것이다.

REFERENCES

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), (2018). 「지구온난화 1.5°C 」 특별보고서
2. 외교부, (2021). NDC 상향안 온라인 토론회 보도자료
3. 세계 건축 및 건설 연맹(GlobalABC), (2020). 2020년 현황 보고서
4. Romwald Lihakanga, Yuan Ding, Gabriela M. Medero, Samuel Chapman, George Goussetis (2020). A High-Resolution Open Source Platform for Building Envelope Thermal Performance Assessment Using a Wireless Sensor Network
5. 국토교통부, (2014) “수요자 중심의 건축물 에너지 성능 향상 방안 마련” 보도자료
6. 김성임, 이현화, 임재한, 송승영 (2014). 그린 리모델링을 위한 노후 상업용 건축물 불투명 외벽의 단열성능 현장 측정 및 평가. 대한건축학회 논문집 - 계획계, 30(7), 237-246
7. 노상태 (2017). 복수 센서를 이용한 외단열 건축물의 외피 열관류율 성능 현장 측정 연구. 한국 건축 친환경 설비학회 논문집, 11(1), 58-64
8. 김창민, 장향인, 최재술, 김의중 (2019). 열화상 현장 측정 방법에 따른 벽체 열관류율 계산 결과 비교 분석. 한국 건축 친환경 설비학회 논문집, 13(5), 384-393
9. 박민주, 송진희, 임재한, 송승영 (2015). 국내의 유사 규정 비교 및 외피 유형별 사례 검토를 통한 건물 외피 단열 규정에서의 열교영향 고려 필요성 분석. 대한 건축학회 논문집 - 계획계, 31(2), 303-312
10. 윤희원, 송두삼 (2013). 단열성능 현장 측정 관련 기준 및 선행연구 분석. 대한 설비공학회 학술 발표대회 논문집, 711-715
11. 허은지, 송두삼 (2012). 열관법을 이용한 건물단열성능 현장측정 방법에 관한 연구. 한국건축친환경설비학회 학술발표대회 논문집 185-189
12. KS L ISO 9869. (2006). 단열-건물 요소-열저항과 열 투과율의 현장 측정
13. International Organization for Standardization (2014). ISO 9869-1 : Building Elements - In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance - Part 1: Heat Flow Meter Method
14. HFP01 HFP03 manual. <https://www.hukseflux.com>
15. 국가법령정보센터, (2018), 건축물의 에너지 절약설계 기준 [별표 1, 2, 3, 6]