



벤투리 효과를 활용한 도심형 건물용 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템 기초타당성 예비연구

김수현^{1)†} · 김윤수^{1)†} · 박수민^{1)†} · 안지현^{1)†} · 이상훈^{2)*}

Preliminary Feasibility Study on Wind and Solar Hybrid Power Systems based on Venturi Effects for Buildings

Suhyun Kim^{1)†} · Yoonsoo Kim^{1)†} · Sumin Park^{1)†} · Jihyeon An^{1)†} · Sanghun Lee^{2)*}

Received 23 December 2022 Revised 3 January 2023 Accepted 17 January 2023 Published online 23 February 2023

ABSTRACT Recently, the use of renewable energy has been increasing to achieve carbon neutrality. The concept of a zero-energy building is also attracting attention. In this study, a preliminary study was conducted to analyze the feasibility of a hybrid wind and solar power generation system between buildings that utilize the building wind generated by the Venturi effect. For this purpose, the wind speed and sunshine hours were monitored in the area where the building wind blows by the Venturi effect, and the power generation depending on system types, areas, and season was estimated. Consequently, the wind power generation system showed a larger amount of power per area than solar power. The wind power systems can generate larger power if wind power blades are installed along the height of the building. As a preliminary study, this study verified the feasibility of the system utilizing building wind and suggested follow-up studies.

Key words Wind power(풍력), Solar power(태양광), Hybrid systems(하이브리드 시스템), Venturi effects(벤투리 효과), Building energy(빌딩 에너지)

1. 서론

2017년부터 우리나라는 ‘에너지 전환’이라는 큰 목표 아

래 친환경 에너지원인 신재생 및 수소에너지 비중을 늘리고 있는 추세이다^[1~8]. 이에 따라 중앙집중형 체계에서 분산형 전원 기반의 전력망 구성 및 운영으로 전환이 이루어지고 있다^[9~12]. 분산형 전원이란 수요처 근처에 소규모 발전 설비를 배치하여 전기를 공급하는 방식을 말한다. 이는 대형 발전소에서 전력을 생산하여 각지에 송배전 하는 기존의 방식과는 달리 생산지와 소비처가 가까우므로 송배전망 투자비용이 절감되고, 전력 계통 부담을 줄여준다. 또한, 재난 시 독립적인 전력 공급도 가능하다^[13].

1) Undergraduate student, Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University

2) Assistant professor, Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University

[†]Co-first author, These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author: sanghun@ewha.ac.kr

Tel: +82-2-3277-5048

Fax: +82-2-3277-3535

그 목적으로 건물 단위에서 에너지 관리를 하는 제로 에너지 빌딩(ZEB, Zero-Energy Building)의 필요성이 대두되고 있다^[14]. 제로 에너지 빌딩은 단열 성능을 극대화하여 에너지 사용량을 최소화하고, 냉·난방에 사용되는 에너지를 태양광 등 신재생 에너지로 대체하며 건축물의 연간 에너지소비량이 제로가 되도록 하는 건축물이다^[15]. 이처럼 온실가스 감축과 건축물 에너지 절감을 위해 신재생 에너지를 결합한 제로 에너지 빌딩을 통한 에너지 절약 기술이 주목을 받고 있다.

태양광 및 풍력 발전을 건물에 효과적으로 적용하기 위해서는 다음과 같은 특성에 대한 고려가 필수적이다. 첫째로, 건물용 태양광 발전은 건축물의 특성과 환경을 고려할 필요가 있다. 태양광 발전은 건물의 어느 위치에 설치하느냐에 따라 일조시간 및 발전량이 크게 변하는 특징이 있다. 예를 들어, 태양광 발전 시스템이 많이 설치되는 옥상의 경우 가장 긴 일조시간의 확보가 가능하다. 건물 벽에 설치하는 경우, 건물의 방향에 따라 일조시간 및 발전량이 다르다. 건물의 사이에 설치하는 경우, 건물의 음영 때문에 일조시간이 많이 감소할 수 있는 특징이 있다. 다음으로, 건물용 풍력 발전은 벤틀리 효과(Venturi Effect)에 의한 강한 빌딩풍을 활용할 수 있는 장점이 있다. 빌딩풍이란 넓은 공간에서 불던 바람이 고층 빌딩 사이의 좁은 공간으로 들어오면서 속도가 더 빨라지는 현상을 가리킨다^[16]. 빌딩풍의 발생 원인은 벤틀리 효과로 설명할 수 있다^[17]. 벤틀리 효과는 굽기가 서로 다른 관에 유체를 통과시킬 때, 넓은 관보다 좁은 관에서 유체의 속도가 빨라지는 대신에 압력은 낮아지게 되는 현상이다. 빌딩들이 많은 도심의 바람은 빌딩들의 좁은 간격을 통과하면서 더 빠른 속도를 가지게 된다. 전 세계적으로도 많은 초고층 빌딩들이 빌딩풍을 활용해 에너지를 생산하고 있다^[18,19].

제로에너지를 위해 태양광, 풍력, 에너지저장장치 등을 통합 연계한 하이브리드 시스템이 주목을 받고 있다^[20,21]. 신재생에너지는 전력생산량의 변동성이 크기 때문에 이를 억제할 필요가 있다. 또한, 풍력은 바람이 많이 부는 시간대, 그리고 태양광은 낮시간대에 전력생산량이 집중되는 경향성이 있다. 이러한 이슈를 해결하기 위하여 풍력, 태양광 등 여러 에너지 시스템을 통합적으로 연계한 하이브리드 시스템이 많이 주목을 받고 있다.

본 연구팀은 재생에너지를 이용하여 분산형 전원 및 제로 에너지 빌딩을 도입하기 위한 기초 타당성 분석 연구를 수행하였다. 특히, 기존에 많이 연구되었던 건물 외벽, 옥상이 아니라, 벤틀리 효과에 의한 빌딩풍을 활용할 수 있는 건물 사이에 설치하는 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 타당성을 실험적으로 분석하는 예비연구를 수행하였다. 이를 위해, 빌딩풍이 발생하는 건물 사이에 풍속 및 태양광도 측정장치를 설치하여 데이터를 확보하였으며, 이를 기반으로 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 운영특성을 분석하여, 효율적인 설치 전략을 논의하였다.

2. 실험 장치 구성 및 발전량 추산

2.1 풍속 및 조도 측정장치

본 연구에서는 빌딩풍 활용을 위한 하이브리드 풍력 및 태양광 발전시스템의 타당성을 분석하기 위한 예비실험을 수행하였다. 풍속 및 조도 측정을 위해 Fig. 1과 같은 측정장치를 구성하였으며, 오픈소스 프로그래밍 언어인 아두이노를 활용하여 Fig. 2와 같이 측정 알고리즘을 작성하였다. 풍속 센서(한진데이터, 대한민국)는 구동 전원이 5 V, 측정 범위 0~45 m/s, 오차 범위는 ±3%의 센서를 활용하였다. 출력신호는 주파수로 출력되기 때문에 풍속으로 데이터를 변환하기 위해 식 (1)을 활용하였다^[22].

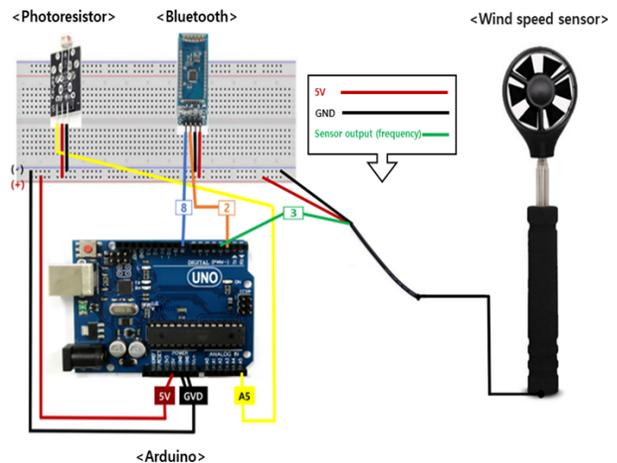


Fig. 1. Equipment for measuring wind speed and sunshine hours

```

#include <FreeRTOS.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT12.h>

//Photoreistor
int sensorPin = A5;
int sensorValue = 0;

//Bluetooth
SoftwareSerial bluetooth2(B);
SoftwareSerial BTSerial2(B);

//Wind speed
byte buff[1024];
int bufferSize;
float windSpeed_inpsenc=0;

const byte counterPin = 3;
const byte counterStorage = 1; // = pin 3
FreeRTOSCounter counter(counterPin, micros, 0);

int pin = 0; // variable to store the servo position
unsigned long windSpeed;

//Basic setup for measurement
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(counterInterrupt, counterISR, CHANGE);
  bluetooth.begin(9600);
  BTSerial.begin(9600);
  bufferSize=0;
  dht.begin();
}

void loop() {
  //Illuminance output
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  Serial.print("조도: ");
  Serial.println(sensorValue, DEC);
  bluetooth.print("조도: ");
  bluetooth.println(sensorValue, DEC);

  //Wind speed output
  if(counterReady() {
    windSpeed = counterGet();
    if(windSpeed > 200) windSpeed = 0;
    windSpeed_inpsenc=windSpeed*0.062+0.578;

    //Wind speed inpsenc
    Serial.print("풍속(m/s): ");
    bluetooth.print("풍속(m/s): ");
    Serial.println(windSpeed_inpsenc);
    bluetooth.println(windSpeed_inpsenc);
  }
  else {
    Serial.print("풍속(m/s): ");
    Serial.println(windSpeed_inpsenc);
    bluetooth.print("풍속(m/s): ");
    bluetooth.println(windSpeed_inpsenc);
  }
  }

  //Data transfer
  if (BTSerial.available()) {
    byte data=BTSerial.read();
    Serial.write(data);
    Serial.write(data);
    buffer[bufferPosition++] = data;

    if (data == '\n') {
      BTSerial.write(buffer, bufferPosition);
      bufferPosition=0;
    }
  }

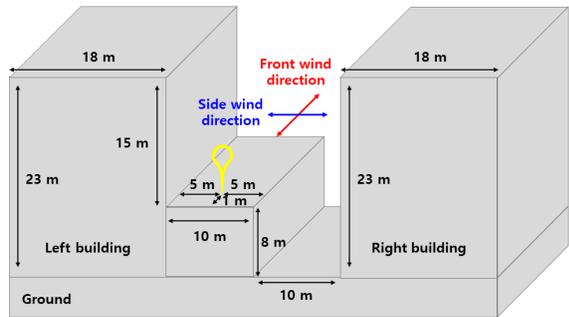
  delay(1000); //Data acquisition every 10 seconds;
}

void counterISR() {
  counterGet();
}
    
```

Fig. 2. Code for measuring wind speed and sunshine hours



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Picture and (b) simplified schematic diagram of the measurement site

$$\text{Wind speed (m/s)} = 0.062 \times \text{Output signal (Hz)} + 0.578 \text{ (m/s)} \quad (1)$$

조도를 측정하기 위하여 빛의 양에 따라 저항값이 변하는 포토레지스터(photoresistor) 기반의 조도 센서(WAT-ALS468, 키트 128, 대한민국)를 활용하였다. 구동 전압은 3.3~5.0 V이며, 1~65535 lux의 빛을 측정할 수 있다.

2.2 풍속 및 조도 측정 장소

풍속 및 조도 측정을 위해서 이화여자대학교의 공학관 건물을 선정하였다. 본 건물은 두 개의 높은 건물 사이 중간에 테라스가 뚫려 있는 구조로서 빌딩풍이 불 수 있는 구조이다. 측정장소의 사진 및 개략도는 Fig. 3과 같다. 본 측정장소는 양쪽에 건물이 위치하며 그 사이에 테라스가 위치하는 장소이다. 본 연구에서는 노란색으로 표시된 양쪽 건물 사이에 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템을 설치하는 시나리오를 가정하였다. 이 경우, 본 실험 장소에 실제로 설치 가능한 풍력의 경우 블레이드의 지름이 최대 10 m, 태양광 패널의 폭이 최대 10 m이다.

본 연구에서는 옥상이나 바깥쪽 벽이 아닌 건물 사이에 하이브리드 발전시스템을 설치하는 경우를 분석하였다. 그 이유는 이미 기존의 많은 연구에서 옥상 및 바깥쪽 벽에 발전시스템을 설치하는 경우의 타당성 및 경제성을 분석하여 그 타당성을 분석하였기 때문이다^[23,24]. 반면에 건물 사이에서 빌딩풍을 활용하는 하이브리드 발전시스템의 타당성 및 경제성을 분석하는 연구는 국내에서 보고된 바가 거의 없어 이에 초점을 맞추었다.

2.3 풍력 발전량 및 태양광 일일 발전량 계산

풍속 및 조도 측정 결과를 바탕으로 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 발전량을 추정하였다. 본 연구에서는 풍력 발전량 추산을 위해 일반적으로 사용되는 아래 식 (2)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Wind power generation (kWh)} \\ &= 0.5 \times \text{Air density (1.23 kg/m}^3) \times \text{Blade area (m}^2) \\ &\quad \times \text{Efficiency (40\%)} \times \text{Wind speed}^3 \text{ (m/s)}^3 \\ &\quad \times \text{time (h)} \div 1000 \end{aligned} \quad (2)$$

풍력 발전기의 이론적인 최대 효율은 Betz limit에 따라 59%이다^[25]. 하지만, 상용 풍력 발전시스템의 실제 효율은

블레이드의 개수, 풍속 등에 따라 지속해서 변화하는 특성을 보이며, 일반적으로 약 35-48% 수준의 효율을 가지는 것으로 알려져 있다^[26]. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 풍력 발전기의 효율을 40%로 가정하여 분석을 수행하였다.

풍력 발전기의 경우, 가동을 위한 최소 풍속 및 안전을 위한 최대 풍속이 정해져 있다. 본 연구에서는 3 m/s를 시동풍속으로, 15 m/s를 중단풍속으로 하여 풍력발전량을 추산하였다^[25].

태양광 발전량 추산을 위해서는 아래 식 (3)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Solar power generation (kWh)} \\ &= \text{Average solar irradiation (200 W/m}^2\text{)} \\ & \times \text{Solar panel area (m}^2\text{)} \times \text{Sunshine hours (h)} \\ & \times \text{Efficiency (20\%)} \div 1000 \end{aligned} \quad (3)$$

일조량은 시간 및 날씨에 따라 변하기 때문에, 대한민국의 1년 평균 일조량을 기준으로 하였다. 일반적으로 대한민국의 평균 일조량은 150-200 W/cm² 수준으로 알려져 있으므로, 본 연구에서는 200 W/cm²로 가정하였다^[25]. 또한, 태양광 발전 시스템의 효율은 일반적인 실리콘 태양전지를 가정하였으며, 전 세계적으로 활용되는 NREL의 태양전지 효율 그래프를 참고하여 20%로 가정하였다^[27].

3. 결과 및 고찰

3.1 벤틀리 효과 기반 풍력 발전 시스템 출력 예측

본 연구에서는 빌딩풍 활용을 위한 풍력 및 태양광 발전 시스템의 타당성을 평가하기 위해 빌딩풍이 발생하는 곳에서 정면 및 측면 방향으로의 풍속을 측정하였다. 정면 방향의 풍속은 마주 보는 빌딩 사이로 수직으로 들어오는 바람을 의미하며, 측면 방향의 풍속은 마주 보는 빌딩 방향으로 부는 바람을 의미한다. Fig. 4와 Table 1과 같이 정면과 측면의 평균 풍속은 각각 3.37 m/s와 1.62 m/s임을 확인할 수 있었다. 또한, 정면과 측면의 평균 풍속의 비율은 약 2.08배로 정면으로의 풍속이 측면에 비해 큰 것을 확인할

Table 1. Front and side wind speed and their ratios

Date	Front wind speed (m/s)	Side wind speed (m/s)	Ratio (front/side)
5.15	3.51	1.79	1.96
5.16	4.27	1.60	2.66
5.17	3.17	1.33	2.39
5.18	4.46	2.87	1.56
5.19	3.89	1.57	2.49
5.20	3.14	1.35	2.32
5.21	3.36	1.74	1.93
5.22	2.79	1.39	2.01
5.23	3.22	1.28	2.51
5.24	3.15	1.81	1.74
5.25	3.29	1.80	1.83
5.26	1.51	0.44	3.42
5.27	3.95	2.24	1.76
5.28	4.26	1.61	2.64
5.29	2.58	1.52	1.70
Average	3.37	1.62	2.08

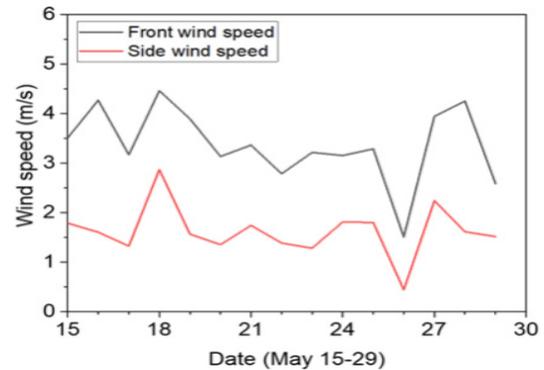


Fig. 4. Front and side wind speed at the terrace region between buildings

수 있었다. 이러한 결과는 앞서 예측되었던 바와 같이 벤틀리 효과에 의해 빌딩 사이 정면 방향으로 바람이 강하게 불었기 때문으로 판단된다. 1991~2020년 계절별 서울의 평균 풍속은 Table 2와 같이 알려져 있다. 봄에 해당하는 3~5월의 평균 풍속은 2.65 m/s로 있다^[28]. 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 서울시의 평균 풍속에 해당 비율을 곱하여 해당 지역의 계절별 평균 풍속을 추산하여 보았다. 풍속은 날에 따라 크게 변동하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 5월 26일에는 정면 풍속이 1.51 m/s로 바람이 약했던 반면에, 5월 18일에는 4.46 m/s로 바람이 강했던 것을 확

Table 2. Average wind speed and expected front wind speed for the hybrid systems for buildings

	Spring (Mar -May)	Summer (Jun -Aug)	Fall (Sep -Nov)	Winter (Dec -Feb)
Seasonal average wind speed (m/s) ^[23]	2.65	2.19	2.03	2.38
Expected wind speed at the hybrid systems (m/s)	3.37	2.79	2.58	3.03

Table 3. Wind power generation at the general systems and hybrid systems for buildings

	Spring (Mar -May)	Summer (Jun -Aug)	Fall (Sep -Nov)	Winter (Dec -Feb)
Wind power generation at the general systems with a rotor diameter of 1 m (kWh/day)	0.09	0.05	0.04	0.06
Wind power generation at the hybrid systems for buildings with a rotor diameter of 1 m (kWh/day)	0.18	0.10	0.08	0.13
Difference (kWh/day)	0.09	0.05	0.04	0.07

인할 수 있었다. 이처럼 풍속은 날마다 변동성이 크기 때문에 풍력 발전의 변동성 또한 클 것으로 생각된다. 하지만, 이러한 변동성을 빌딩풍과 무관하게 날마다 변동하는 풍속의 영향으로 인한 것으로, 풍력 발전의 기본적인 발전 특성에 해당한다.

일반적인 풍력 발전 시스템과 빌딩풍 활용을 위한 풍력 발전 시스템의 발전량을 비교한 결과는 Table 3과 같다. 각 시스템의 발전량은 앞선 서울시의 평균 풍속, 측정 풍속 데이터, 계절별 예측 데이터를 기반으로 식 (2)를 통해 계산하였다. 표에서 확인할 수 있듯이 벤틀리 효과에 의한 강한 바람으로 인하여 일반적인 풍력 발전 시스템의 예상 출력량과 비교하여 그 값이 2배 수준으로 차이 나는 것을 확인할 수 있었다. 풍속 차이보다 풍력발전량의 차이가 크게 발생한 이유는 풍력 발전량이 풍속의 3승에 비례하기 때문이다. 따라서 벤틀리 효과를 극대화하여 강한 바람 자원을 얻을 수 있는 구조의 빌딩 형태에서 특히 본 발전시스템이

Table 4. Wind power generation with various rotor diameters

Wind power (kWh/day)	Spring (Mar -May)	Summer (Jun -Aug)	Fall (Sep -Nov)	Winter (Dec -Feb)
Rotor diameter of 1 m	0.09	0.05	0.04	0.06
Rotor diameter of 5 m	2.16	1.22	0.97	1.56
Rotor diameter of 10 m	8.63	4.87	3.88	6.25
Rotor diameter of 25 m	53.93	30.44	24.24	39.07

효율적으로 운영될 가능성이 있다.

앞서 확인한 바와 같이 예측 정면 풍속은 봄, 겨울, 여름, 가을 순을 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라, 계절 별 및 블레이드 면적에 따른 풍력 발전 예측량은 Table 4와 같다. 풍속이 가장 빠른 봄에 가장 큰 풍력 발전량을 확인할 수 있었다. 또한, 블레이드 면적이 증가함에 따라 풍력 발전량이 증가함을 확인할 수 있었다.

3.2 건물 음영에 따른 태양광 발전 시스템 출력 예측

Fig. 5는 일조시간 측정 결과를 나타낸다. 태양의 고도가 낮을 때는 태양광 패널에 많은 양의 태양 빛이 도달하지 못한다. 특히, 빌딩풍을 활용하기 위해 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템을 건물 사이에 설치하는 경우, 건물의 음영으로 인하여 일조시간이 많이 감소할 수 있다. 본 예비 연구에서 측정된 최대 일조시간이 7시간 52분으로 측정되었으며, 평균적인 일조시간은 3시간 51분으로 측정되었다. 기상청에 따르면 흐린 날 등으로 인하여 봄의 평균 일조시간은 7:00이다^[29]. 이는 본 연구에서 측정된 일조시간에 비해 긴 시간이다. 이러한 차이는 건물의 음영이 영향을 미쳤

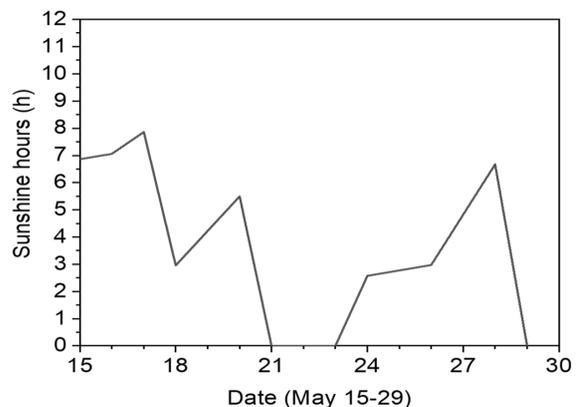


Fig. 5. Sunshine hours at the terrace region between buildings

을 수 있다.

일조시간을 기준으로 하이브리드 발전시스템의 예측 일조시간을 추산한 결과는 Table 5와 같다. 풍속의 경우와 마찬가지로 봄에 측정된 일조시간과 서울시의 평균 일조시간 데이터의 비율을 같게 적용하여, 나머지 계절에 대한 일조시간을 추정하였다. 그 결과, 모든 계절에서 약 3~4시간 범위에서 일조시간이 예측되었다. 이러한 일조시간을 기반으로 추산한 일반적인 태양광 발전시스템과 빌딩풍을 활용하기 위한 태양광 발전 시스템의 태양광 발전량은 Table 6과 같다. 태양광 시스템의 발전량은 앞선 서울시의 평균 일

Table 5. Average sunshine hours and expected sunshine hours for the hybrid systems

	Spring (Mar -May)	Summer (Jun -Aug)	Fall (Sep -Nov)	Winter (Dec -Feb)
Seasonal average sunshine hours (h) ^[24]	7:00	5:31	6:00	5:52
Expected sunshine hours at the hybrid systems (h)	3:51	3:02	3:18	3:14

Table 6. Solar power generation at the general systems and hybrid systems for buildings

	Spring (Mar -May)	Summer (Jun -Aug)	Fall (Sep -Nov)	Winter (Dec -Feb)
Solar power generation at the general systems with a solar panel size of 1 m ² (kWh/day)	0.28	0.22	0.24	0.23
Solar power generation at the hybrid systems for buildings with a solar panel size of 1 m ² (kWh/day)	0.15	0.12	0.13	0.13
Difference (kWh/day)	-0.13	-0.10	-0.11	-0.10

Table 7. Solar power generation with various solar cell panel sizes

Solar power (kWh/day)	Spring (Mar -May)	Summer (Jun -Aug)	Fall (Sep -Nov)	Winter (Dec -Feb)
Solar panel size of 1 m ²	0.15	0.12	0.13	0.13
Solar panel size of 25 m ²	3.85	3.03	3.30	3.23
Solar panel size of 100 m ²	15.40	12.13	13.20	12.93
Solar panel size of 625 m ²	96.25	75.83	82.50	80.83

조시간, 측정 일조시간 데이터, 계절별 예측 데이터를 기반으로 식 (3)을 통해 계산하였다. 건물의 음영으로 인하여 태양광 발전시스템의 운영 가능 시간이 많이 감소하였고, 이로 인하여 발전량도 감소하였다. 이는 앞선 풍력 발전과 반대의 결과로서, 빌딩풍을 활용하는 하이브리드 풍력 및 태양광 시스템의 경우, 풍력 발전량을 증가시킬 수 있지만 반대로 태양광 발전량은 음영으로 인하여 감소할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 7은 빌딩풍 활용을 위한 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 태양광 패널 크기와 계절에 따른 태양광 발전량을 나타낸다. 계절의 영향으로 봄, 가을, 겨울, 여름 순으로 태양광 발전량이 감소함을 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 계절에 따른 낮의 길이 차이와 여름철의 흐린 날씨에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 태양광 패널의 크기에 비례하여 태양광 발전량이 증가함을 확인할 수 있었다.

3.3 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템 설계 제언

본 연구에서는 빌딩풍 활용 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 타당성을 분석하기 위하여 기초실험을 수행하였다. 그 결과, 빌딩풍과 건물의 음영 등을 고려하여 풍력 발전 블레이드 및 태양광 패널 크기에 따른 발전량을 추정하였다. 그 결과는 Fig. 6과 같다. 같은 크기의 풍력 발전 블레이드와 태양광 패널을 비교하면, 계절에 따라 다르지만 풍력 발전이 태양광 발전보다 대체로 더 많은 전력을 생산할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 동일 양의 전력

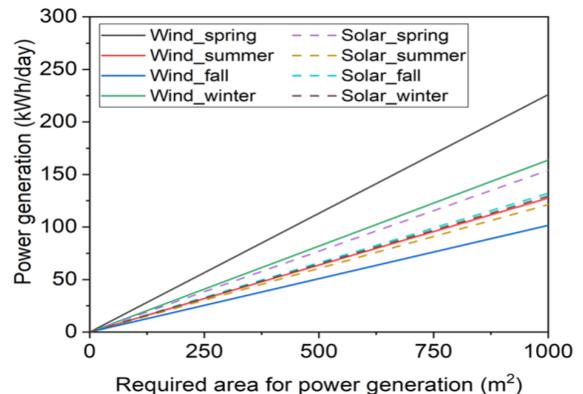


Fig. 6. Wind and solar power and required area for power generation at different seasons

을 생산하기 위해서는 태양광이 더 큰 크기의 패널을 필요로 한다. 이러한 결과는 벤틀리 효과에 의한 강한 빌딩풍을 활용할 수 있는 공간적 특성에 기인한다.

빌딩풍 활용을 위한 하이브리드 풍력 및 태양광 시스템의 경우 빌딩의 사이에 설치되기 때문에 단순히 대지의 면적뿐만 아니라 높이를 고려해야 한다. 빌딩의 높이가 높은 경우에 하이브리드 발전시스템을 높이 방향으로 여러 대 설치할 수 있으므로 더 넓은 면적의 발전시스템을 설치하는 것이 가능하다는 장점이 있다. 특히, 도심지 근처는 건물들로 인하여 큰 표면 거칠기를 가지고 있고, 이로 인하여 풍속이 지표면 근처에서는 많이 감소하는 현상이 있다^[15]. 그러므로 풍력 발전 시스템을 고층 빌딩 사이에 설치하는 경우, 더욱 빠른 풍속에서 풍력 발전이 가능하다. 이로 인하여, 풍력 발전기의 발전량이 많이 증가할 수 있다. 따라서, 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템을 설계하는 경우, 건물의 높이와 대지의 면적을 고려하여 발전량을 최대화할 수 있도록 시스템을 설계해야 한다.

3.4 하이브리드 풍력 및 태양광 발전시스템 관련 국내 규정

본 연구에서 논의한 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 구축을 위해서는 관련 규정준수가 필수적이다. 특히 풍력 터빈의 경우 블레이드가 물리적으로 회전하기 때문에 풍력 설비와 관련된 규정을 준수하는 것이 중요하다. 대한민국 전기사업법 제67조 및 같은 법 시행령 제43조, 전기설비기술기준(산업통상자원부 고시) 제4조에는 전기설비기술기준의 판단기준이 정의되어 있으며, 특히 발전용 풍력설비에 대한 상세한 규정이 있다. 특히 풍력터빈을 지지하는 구조물의 자중, 적재하중, 적설, 풍압, 지진, 진동 및 충격에 대한 고려가 필수적이다. 따라서 하이브리드 풍력 및 태양광 발전시스템 설비 구축 시 해당 사항을 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3.5 의의 및 한계

본 연구에서는 빌딩풍 활용 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 타당성을 분석하기 예비실험을 수행하였다. 이를 통해, 벤틀리 효과에 의한 강한 빌딩풍 형성을 실험적으로 확인할 수 있었다. 또한, 이를 기반으로 풍력 발전을

하는 경우 일반적인 풍력 발전 설비에 비해 많은 전력을 생산할 가능성을 확인하였다. 반면에, 태양광 발전 시스템의 경우 건물의 음영 등으로 인하여 짧은 일조시간 및 전력생산량을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 기반으로 하이브리드 발전시스템을 설치하는 경우, 풍력 블레이드 및 태양광 패널 면적에 따른 전력생산량을 비교하였다. 그 결과, 같은 면적을 가질 때에 풍력이 태양광보다 대체로 많은 전력을 생산하는 것을 확인하였다. 빌딩풍 활용 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 설치 목적은 건물 사이 공간을 활용하기 위한 것으로 대지뿐만 아니라 고층 빌딩 사이에 높이 방향으로 풍력 시스템의 설치가 가능하여 큰 설치 면적을 확보할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 위와 같은 발전량 예측 결과 및 고려사항을 검토하여 빌딩들의 형태에 맞게 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 형태 및 발전 비율을 선정하여야 한다. 건물의 형태에 따라 조도가 크게 낮은 건물 사이 영역에 태양광 패널을 설치하고 태양광 발전을 하는 시스템의 효율성은 크게 떨어질 가능성도 있다. 이런 경우 옥상 태양광 시스템과 빌딩풍 활용 풍력 시스템의 하이브리드화를 통한 시스템 효율화도 가능할 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구는 예비연구로서 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 건물로 불어오는 상류부의 풍향, 풍속 등의 측정과 정보가 있어야만 좀 더 엄밀한 연구가 가능하다. 또한, 엄밀하게 벤틀리 효과를 증명하려면 서울지역의 평균 풍속이 아닌 벤틀리로 접근하는 원방에서의 풍속과 비교하여 얼마큼 가속 되었나를 비교하여야 한다. 벤틀리 효과를 고려한 빌딩풍의 정확한 예측을 위해서는 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기반 시뮬레이션이 수행되어야 한다. 설치 대상 지역의 풍력 및 태양광 발전 자원에 대해 1년 이상 장기간의 데이터 수집 및 분석이 필요하다. 발전 설비 비용, 발전 단가 등 경제성 분석과 이산화탄소 감축량 등 환경성 분석이 필요하다. 건물 사이와 더불어 건물 외벽 및 옥상의 재생에너지 시스템을 통한 발전시스템에 관한 연구가 필요하다.

특히, 대한민국에서는 아직 빌딩풍을 활용한 도심형 풍력 발전 시스템에 관한 연구가 거의 이루어진바 없다^[30,31]. 따라서, 향후 위와 같은 본 연구의 한계점을 극복할 수 있는 추가적인 연구, 하이브리드 시스템 개발, 실증 사업 등

을 통해 본 기술의 가능성을 좀 더 면밀한 검토할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 벤틀리 효과에 의한 빌딩풍을 활용할 수 있는 도심형 건물용 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템의 타당성을 분석하는 예비실험 연구를 수행하였다. 이를 위해서, 벤틀리 효과에 의한 빌딩풍이 발생하는 장소에서 실제 풍속과 조도 데이터를 측정하였다. 이를 통해 벤틀리 효과에 의한 빌딩풍의 발생을 확인할 수 있었으며, 특히 측면 풍속과 비교할 때 정면 풍속이 약 2배에 이르는 것을 측정할 수 있었다. 하지만, 이 경우, 건물에 의한 음영 때문에 태양광 발전을 위한 일조시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 2022년 5월 15~29일 측정 결과에 따르면, 태양광 발전이 가능한 평균 일조시간은 3시간 51분에 불과했으며, 이는 해당 지역의 봄철 평균 일조시간인 7시간에 비해 약 3시간 9분 부족한 시간이었다. 이러한 결과로부터, 풍력 및 태양광 발전 시스템에서 생산되는 전력량을 추산하였다. 특히, 풍력 블레이드 면적 및 태양광 패널의 면적에 따른 발전량을 추산한 결과, 풍력이 같은 면적에서 태양광에 비해 많은 양을 발전할 수 있음을 확인하였다. 특히, 건물 사이의 빌딩풍을 활용하는 본 하이브리드 시스템의 특성을 고려할 때, 태양광은 건물 사이에서 설치 면적이 제한되지만, 풍력 블레이드의 면적은 건물의 높이에 비례하여 크게 시스템을 설치할 수 있는 점을 고려할 필요가 있다. 본 연구는 국내에서 많이 연구된 바 없는 벤틀리 효과에 기반한 빌딩풍을 활용하는 하이브리드 풍력 및 태양광 발전 시스템에 대한 예비 타당성 분석 연구를 수행하였다는 점에서 의미가 있다. 하지만, 전산 유체역학 기반 시뮬레이션 연구, 장기 데이터 분석, 경제성 및 환경성에 대한 종합적인 분석 등 좀 더 면밀한 후속연구가 반드시 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2022학년도 이화여자대학교 교내연구비 지원에 의한 연구입니다. 이 논문은 정부(기상청)의 재원으로

한국기상산업기술원의 기상기후데이터융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, C., 2021, "A review of the deployment programs, impact, and barriers of renewable energy policies in Korea", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **144**, 110870.
- [2] Park, J.H., Kim, C.H., Cho, H.S., Kim, S.K., and Cho, W.C., 2020, "Techno-economic analysis of green hydrogen production system based on renewable energy sources", *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **31**(4), 337-344.
- [3] Joo, Y.J., Shin, J.G., Seo, D.K., and Park, S.I., 2018, "Economic evaluation of ESS and natural gas generator for expansion of new and renewable generation", *Trans. Korean Hydrogen New Energy Soc.*, **29**(4), 363-369.
- [4] Lee, S.H., Jang, Y.H., Shin, H.Y., Lee, K.H., Bae, M.S., Kang, J.H., and Bae, J.M., 2019, "Reliable sealing design of metal-based solid oxide fuel cell stacks for transportation applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, **44**(57), 30280-30292.
- [5] Kang, S.M., Lee, J.S., Cho, G.Y., Kim, Y.S., Lee, S.H., Cha, S.W., and Bae, J.M., 2020, "Scalable fabrication process of thin-film solid oxide fuel cells with an anode functional layer design and a sputtered electrolyte", *Int. J. Hydrogen Energy*, **45**(58), 33980-33992.
- [6] Lee, S.H., Kim, T.H., Han, G.W., Kang, S.M., Yoo, Y.S., Jeon, S.Y., and Bae, J.M., 2021, "Comparative energetic studies on liquid organic hydrogen carrier: A net energy analysis", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **150**, 111447.
- [7] Jang, Y.H., Lee, S.H., Shin, H.Y., and Bae, J.M., 2018, "Development and evaluation of a 3-cell stack of metal-based solid oxide fuel cells fabricated via a sinter-joining method for auxiliary power unit applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, **43**(33), 16215-16229.
- [8] Lee, H.Y. and Lee, S.H., 2022, "Economic analysis on hydrogen pipeline infrastructure establishment scenarios: Case study of South Korea", *Energies*, **15**(18), 6824.
- [9] Chung, M.H., 2018, "Potential analysis of a target area

- selection for photovoltaic-based distributed generation in cases of an existing city in Korea”, *Sustain. Cities Soc.*, **41**, 341-348.
- [10] Han, G.W., Lee, S.H., Lee, J.M., Lee, K.Y., and Bae, J., 2021, “Deep-learning- and reinforcement-learning-based profitable strategy of a grid-level energy storage system for the smart grid”, *J. Energy Storage*, **41**, 102868.
- [11] Li, D. and Bae, J.H., 2022, “Analysis of factors driving the participation of small scale renewable power providers in the power brokerage market”, *New. Renew. Energy*, **18**(3), 32-42.
- [12] Lee, Y.J., Park, S.J., and Yoon, Y.B., 2021, “Estimation of electric power trading price between prosumer and consumer under Time-of-Use (TOU)”, *New. Renew. Energy*, **17**(2), 1-8.
- [13] Willis, H.L., 2000, “Distributed power generation: Planning and evaluation”, CRC Press, USA.
- [14] Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devito-francesco, A., Fanciulli, C., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., and Salamone, F., *et al.*, 2019, “A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions”, *J. Build. Eng.*, **25**, 100772.
- [15] Cabeza, L.F. and Chàfer, M., 2020, “Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review”, *Energy Build.*, **219**, 110009.
- [16] Li, Q.S., Chen, F.B., Li, Y.G., and Lee, Y.Y., 2013, “Implementing wind turbines in a tall building for power generation: A study of wind loads and wind speed amplifications”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **116**, 70-82.
- [17] Blocken, B., Moonen, P., Stathopoulos, T., and Carmeliet, J., 2008, “Numerical study on the existence of the venturi effect in passages between perpendicular buildings”, *J. Eng. Mech.*, **134**(12), 1021-1028.
- [18] Li, Q.S., Fu, J.Y., Xiao, Y.Q., Li, Z.N., Ni, Z.H., Xie, Z.N., and Gu, M., 2006, “Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China’s tallest building”, *Eng. Struct.*, **28**(12), 1745-1758.
- [19] Lu, L. and Ip, K.Y., 2009, “Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **13**(2), 450-461.
- [20] Mahesh, A. and Sandhu, K.S., 2015, “Hybrid wind/ photovoltaic energy system developments: Critical review and findings”, *Renew Sustain Energy Rev.*, **52**, 1135-1147.
- [21] Mahesar, S., Baloch, M.H., Kaloi, G.S., Kumar, M., Soomro, A., Solangi, A.A., and Memon, Y.A., 2018, “Power management of a stand-alone hybrid (Wind/Solar/ Battery) energy system: An experimental investigation”, *Int. J. Adv. Comp. Sci. Appl.*, **9**(6), 216-221.
- [22] Hanjin data, “Data sheet”, Accessed 11 August 2022, https://eleparts.co.kr/data/goods_old/data/P2531.pdf.
- [23] Miyazaki, T., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 2005, “Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows”, *Renew. Energy*, **30**(3), 281-304.
- [24] Singh, R. and Banerjee, R., 2015, “Estimation of rooftop solar photovoltaic potential of a city”, *Solar Energy*, **115**, 589-602.
- [25] Dunlap, R.A., 2018, “Sustainable energy, 2nd Edition”, Cengage Learning, USA.
- [26] Şahin, A.D., Dincer, I., and Rosen, M.A., 2006, “Thermodynamic analysis of wind energy”, *Int. J. Energy Res.*, **30**(8), 553-566.
- [27] At the National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Best research-cell efficiency chart”, Accessed 11 August 2022, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [28] Korea Meteorological Administration, “Comprehensive climate change monitoring information”, Accessed 11 August 2022, http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/.
- [29] Korea Meteorological Administration, “Meteorological data open portal”, Accessed 11 August 2022, <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>.
- [30] Lim, J.T., 2022, “How Should Urban Winds Be Evaluated?”, *Proc. the Conference of the Architectural Institute of Korea*, **42**(1), 9.
- [31] Park, M.W., You, J.Y., Son, Y.M., and You, K.P., 2018, “Analysis of air current characteristics for installing wind turbines between buildings”, *J. Korean Assoc. Spat. Struct.*, **18**(1), 117-125.