

태양광/풍력 하이브리드 발전시스템의 타워 내부 공기유동에 관한 기초 연구

A Basic Study on the Airflow inside the Tower of Solar/Wind Hybrid Power Generation System

박재홍*† · 김재돌*

Jae-Hong Park*† and Jae-Dol Kim*

(Received 25 November 2020, Revised 22 January 2021, Accepted 01 February 2021)

Abstract : In this study, a new type of solar and wind hybrid power generation system that enables to simultaneously generate power by solar and wind power is proposed. This new hybrid power generation system mainly consists of a tower with attached solar modules attached and a windmill. While solar modules are being operated, the air inside the tower is hotter than the ambient outside air and therefore less dense than the ambient air. Such a difference in temperature causes the bottom of the tower of inside air to have a lower pressure than the pressure at the bottom of the tower of outside air. The higher pressure outside the tower is the driving force that moves the outside air into the tower and also moves the air up and out of the tower. This movement is called the stack effect. Besides, a wind power generator that can be driven by the airflow generated inside the tower is installed at the top of the tower and generates power. It can be said that this new hybrid system actively utilizes heat which is a disadvantage of the current solar power system. As a basic study for the development of solar and wind hybrid power generation system, pressure differences between outside and inside the tower caused by various conditions and the draft flow rates induced by the stack effect were analyzed and presented. It was found that available pressure differences and draft flow rates increase with the air temperature inside the tower and the tower height. However, the increase of air temperature outside the tower shows the opposite results, lowering pressure differences and draft flow rates.

Key Words : Solar, Wind, Hybrid power generation, Stack effect, Draft flow rate

1. 서 론

태양 에너지를 이용한 발전(power generation)

시스템들은 지금까지 많은 발전을 이루어 왔고, 또한 다양한 태양 에너지 응용기술들이 꾸준히 새롭게 도입되고 있다.¹⁻⁵⁾ 그러나 태양광을 이용한

*† 박재홍(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7364-9618>) :
조교수, 동명대학교 냉동공조공학과
E-mail : jhpark2020@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1688
*김재돌(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6438-0303>) :
교수, 동명대학교 냉동공조공학과

*** Jae-Hong Park(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7364-9618>)
: Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering Tongmyong University.
E-mail : jhpark2020@tu.ac.kr, Tel : 051-629-1688
*Jae-Dol Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-6438-0303>) :
Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering Tongmyong University.

기존 기술들은 태양광 모듈을 일정한 각도와 방향으로 설치하여 태양광에 의해서만 전력을 생산하고 있다. 그리고 이때 태양광 모듈 후면에서는 상당한 열이 발생하여 태양광 모듈의 발전효율을 저하시키는 문제도 발생하고 있다.

본 연구에서 제안하는 태양광/풍력 하이브리드 발전시스템은 Fig. 1과 같이 원형 타워, 태양광 모듈 그리고 풍력발전기로 구성된다.⁶⁾ 원형 타워에는 태양광 모듈(solar module)이 부착되어 있고, 타워 하부에는 외부 공기가 유입될 수 있는 통로가 있다. 태양광 모듈이 작동되면 모듈 후면에서 발생하는 열에 의해 타워 내부 공기온도가 올라가게 된다. 온도가 높아진 타워 내부 공기는 타워 외부 공기보다 밀도가 낮아져 타워 외부 공기에 비해 압력이 낮아지게 된다. 이러한 압력차이에 의해 상대적으로 압력이 높은 타워 외부 공기가 타워 내부로 유입되게 되고, 계속해서 타워 상부로 이동하여 최종적으로 타워 밖으로 빠져나가게 된다. 이와 같이 타워 내·외부의 압력차는 외부공기를 타워 내부로 유입하는 구동력(driving force)으로 작용한다.⁷⁻⁹⁾ 그리고 이는 굴뚝 등에서 발생하는 Fig. 2의 굴뚝효과(stack effect)와 동일한 원리이다. 이때 타워 상부에는 타워 내부에서 발생하는 기류에 의해 구동이 가능한 풍력발전기가 설치되어 상승 기류에 의한 풍력 발전이 태양광

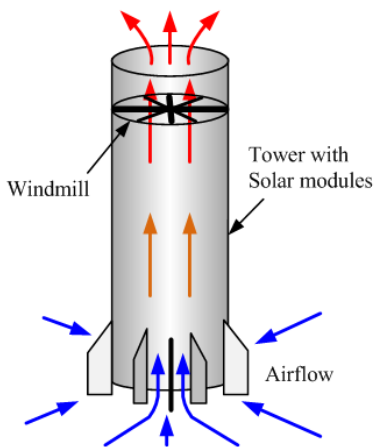


Fig. 1 Concept of Solar/Wind Hybrid Power Generation System

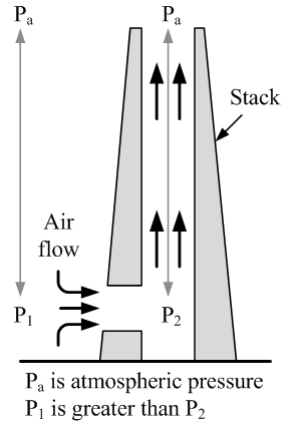


Fig. 2 Stack effect

발전과 함께 동시에 이루어지게 된다. 이와 함께 굴뚝효과를 이용하여 타워 내부 상승기류에 의한 대류 효과로 태양광 모듈에서 발생하는 열의 제거에도 효과적일 수 있다.

이와 같이 본 연구에서 제안한 발전시스템은 굴뚝효과를 응용한 풍력 발전과 기존 태양광 발전에 의한 전력 생산을 동시에 할 수 있는 새로운 형태의 하이브리드 발전시스템으로 기존 태양광 발전의 단점인 발열을 적극 활용하는 시스템이라 할 수 있겠다. 또한 기존 풍력의 자연바람이 없을 경우 발전이 불가능한 단점을 극복할 수 있는 시스템이라고도 할 수 있겠다.

본 연구에서는 태양광/풍력 하이브리드 발전시스템 개발을 위한 기초연구로서 타워 내·외부 온도차, 타워 높이 그리고 타워 내부유동면적에 따른 타워 내·외부 압력차와 도입 풍량에 관한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 타워 구조물 내·외부 압력차

일반적으로 건축물과 같은 구조물의 경우, 구조물 내부와 외부 공기 사이의 온도차에 따른 밀도차, 부력차로 인한 대류현상으로 구조물의 수직 공간을 통한 연기나 공기 등의 유동현상을 앞서 설명한 굴뚝효과라고 한다. 정상상태에서 구조물 내의 자연적인 공기유동은 대부분 굴뚝효과이며,

Table 1 Analysis conditions for pressure difference

	Tower height(m)	Inside temp.(°C)	Outside temp.(°C)
Case 1	5 ~ 50 m	40	32
Case 2	10 m	40	20 ~ 38
Case 3	10 m	36 ~ 52	32

고층 건물의 화재 발생 시에 이 굴뚝효과가 엘리베이터 슈트(elevator chute), 배관 슈트, 계단 등을 통해서 연기와 유독 가스를 확산시키게 된다.

본 연구에서는 외부공기를 타워 내부로 유입하는 구동력인 내·외부 압력차를 타워 높이와 타워 내·외부 온도차에 따라 식 (1)을 사용하여 계산하였다.¹⁰⁾ 식 (1)은 건물에서 굴뚝효과 발생 시 건물 내·외부의 압력차를 구하는 수식으로 건물의 내·외부가 공기인 경우에 적용할 수 있으며, 본 연구에도 동일하게 적용될 수 있다.

$$\Delta P = C a h \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 타워 내·외부 압력차(Pa), C는 상관계수로 0.0342 K/m, a는 대기압(Pa), h는 타워 높이(m), 그리고 T_i 와 T_o 는 타워 내부 및 외부의 절대온도(K)를 의미한다.

Table 1은 타워 내·외부 압력차 분석조건을 나타내고 있다.

2.2 타워 구조물 내부 발생 풍량

타워 내·외부의 온도차, 타워 높이 그리고 타워 내부유동면적에 따라 발생하는 타워 내부 풍량은 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다.^{8,9)}

$$Q = C A \sqrt{2gh \frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (2)$$

여기서 Q는 타워 내부에서 발생하는 풍량(m^3/s), C는 배출계수(discharge coefficient)로 0.65, A는 타워 내부 유동 단면적(m^2), g는 중력가속도(m/s^2), h는 타워 높이(m), T_i 와 T_o 는 타워 내부 및 외부의 절대온도(K)를 의미한다.

Table 2 Analysis conditions for airflow volume

	Airflow area(m^2)	Tower height(m)	Inside temp.(°C)	Outside temp.(°C)
Case 4	2 ~ 20	10	40	32
Case 5	10	2 ~ 20	40	32
Case 6	10	10	36 ~ 52	32
Case 7	10	10	40	20 ~ 38

Table 2는 타워 내부 발생풍량 분석 조건을 나타내고 있다.

3. 해석 결과

3.1 타워 구조물 내·외부 압력차 해석 결과

Fig. 3은 타워 높이에 따른 타워 내·외부 압력차를 나타낸 그래프이다. 타워 내부온도는 40°C, 외부온도는 여름철을 가정하여 32°C로 두고 계산하였다. Fig. 3에서와 같이 타워의 높이가 높아질수록 내·외부 압력차가 증가하는 것을 알 수 있다. 내·외부 압력차가 커질수록 타워 외부에서 내부로 들어올 수 있는 공기의 유량이 많아지고, 이에 따라 타워 내부에서도 공기의 상승기류가 크게 발생할 수 있다. 이는 내부에 설치될 풍력발전기의 효율과도 직결되기 때문에 태양광/풍력 하이브리드 발전시스템의 기초설계에 중요한 요소가 될 수 있다.

Fig. 4는 타워의 높이를 10 m, 타워 내부온도를 40°C로 고정한 상태에서 계절별, 시간별에 따라 변화하는 외부온도에 따른 타워 내·외부의 압력차를 나타낸 그래프이다. Fig. 4에서와 같이 외부온도가 증가할수록 타워 내·외부의 압력차가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 외부 공기의 온도가 올라갈수록 밀도가 낮아지게 되고 이에 따라 외부 공기에 걸리는 압력이 감소하기 때문이다. 이와 같이 외부온도가 증가할수록 타워 내·외부 압력차가 감소하게 되고 이는 타워 내부로의 유동 현상을 저해시켜 풍력발전기의 발전효율을 감소하게 될 것이다.

Fig. 5는 타워 높이를 10 m, 외부온도를 32°C로 일정하게 유지한 상태에서 타워 내부온도 변화에

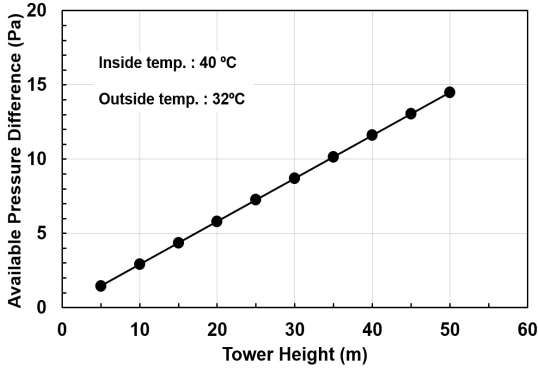


Fig. 3 Pressure differences according to tower height

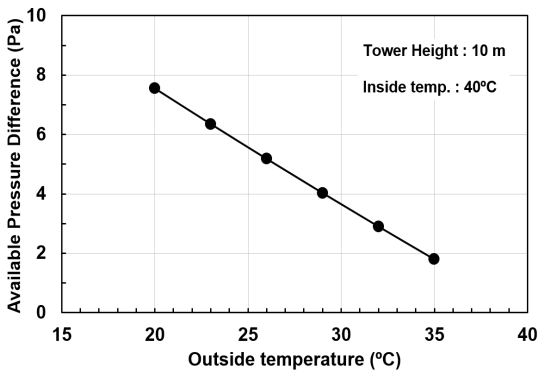


Fig. 4 Pressure differences according to temperature outside tower (ambient temperature)

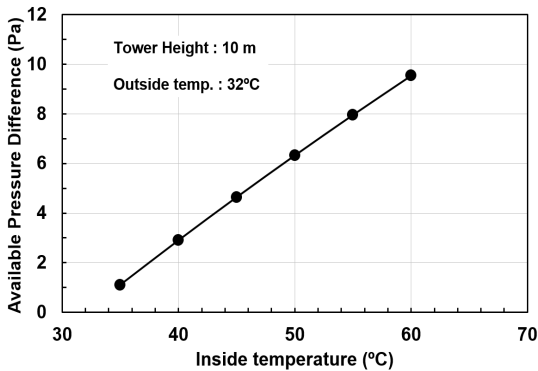


Fig. 5 Pressure differences according to temperature inside tower

다른 압력차를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 타워 내부온도 증가에 따라 타워 내·외부 압력차는 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

타워 내부온도가 증가할수록 Fig. 3과 같이 유입 풍량 증대 효과를 얻을 수 있어 풍력발전기의 발전효율 측면에서는 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것이다. 그러나 태양광 발전을 위한 태양광 모듈은 온도가 올라갈수록 발전효율이 감소하는 단점이 있기 때문에 최상의 하이브리드 발전효율을 얻기 위해서는 최적 내부온도에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 사료된다.

3.2 타워 구조물 내부 발생 풍량 해석 결과

Fig. 6은 타워 높이 10 m, 외부온도 32°C, 내부온도 40°C일 때, 내부 유동 단면적(cross section area)에 따른 풍량의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 유동 단면적이 증가할수록 풍량도 비례하여 증가한다. 풍량의 증가는 풍력발전기의 발전효율을 높일 수 있기 때문에 긍정적인 측면이 있으나 유동 단면적이 클수록 하이브리드 발전시스템의 제작 비용이 증가하기 때문에 경제성을 고려한 단면적 선정이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 타워 내부온도 32°C, 외부온도 40°C 그리고 유동 단면적 10 m²(타워 내부 직경 3.57 m)인 조건에서 타워 높이 변화에 따른 내부 발생 풍량 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 타워 높이가 높아질수록 풍량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서의 결과와 같이 타워 높이가 높아질수록 타워 내·외부에 걸리는 압력차가 커져 이로 인해 타워 내부로 유입되는 풍량이

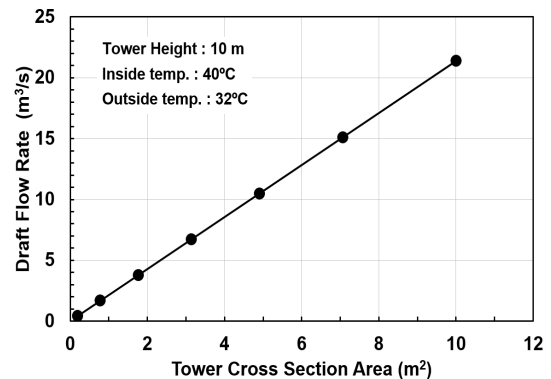


Fig. 6 Draft flow rate according to tower cross area

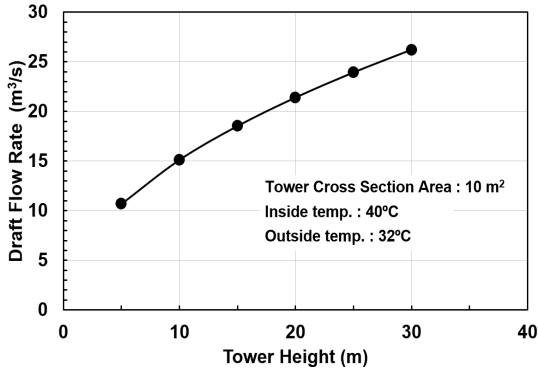


Fig. 7 Draft flow rate according to tower height

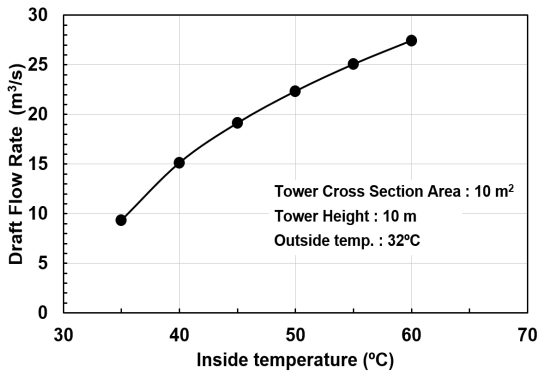


Fig. 8 Draft flow rate according to temperature inside tower

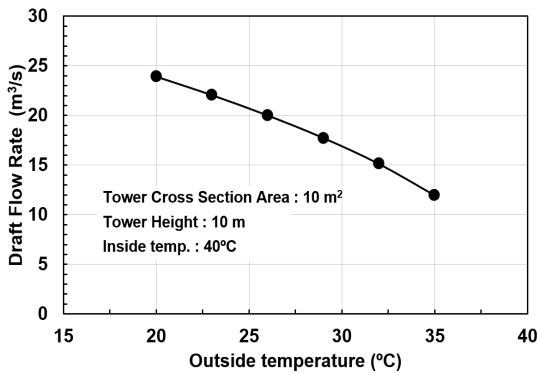


Fig. 9 Draft flow rate according to temperature outside tower

증가하기 때문이다.

Fig. 8은 타워 내부 유동 단면적 10 m^2 , 타워 높이 10 m , 외부온도 32°C 조건에서 타워 내부온도

변화에 따른 타워 내부 풍량 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 타워 내부온도가 증가할수록 타워 내부 발생 풍량도 증가하였다. 이와 같은 결과는 타워 내부온도가 올라갈수록 내부 공기의 밀도가 감소하여 내부에 걸리는 압력이 감소하기 때문이다. 이는 최종적으로 타워 내·외부의 압력차를 증대시키는 역할을 하기 때문에 풍력발전기의 발전효율 측면에서는 긍정적 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 9는 타워 외부온도에 따른 내부 풍량 변화를 나타낸 그래프이다. 이때 해석조건은 유동단면적 10 m^2 , 타워 높이 10 m 그리고 내부온도 40°C 이다. 그림에서와 같이 타워 외부온도가 높아짐에 따라 타워 내부 발생 풍량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 본 하이브리드 발전시스템의 발전효율이 겨울철보다는 여름철에 더 낮을 것이라는 것을 의미한다.

상기 해석조건들은 모두 하이브리드 발전시스템의 제작비용과 직결되기 때문에 최적의 비용으로 최상의 발전효율을 낼 수 있는 타워 높이, 내부 유동 단면적 그리고 타워 내부온도 등 공정변수의 최적 설계가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

4. 결 론

태양광/풍력 하이브리드 발전시스템은 굴뚝효과를 응용한 풍력 발전과 기존 태양광 발전의 단점인 태양광 모듈의 발열을 적극적으로 활용한 새로운 개념의 발전시스템이라 할 수 있다.

본 연구에서는 태양광/풍력 하이브리드 발전시스템 개발을 위한 기초연구로서 타워 내·외부 온도차, 타워 높이 그리고 타워 내부유동면적에 따른 타워 내·외부 압력차와 도입 풍량에 관한 기초 자료를 다양한 조건에서 해석하였다.

외부공기를 타워 내부로 유입하는 구동력인 타워 내·외부 압력차는 타워의 높이와 내·외부 온도차가 클수록 높게 나타났다. 그러나 외부 공기의 온도 증가는 앞선 결과와 반대로 타워 내·외부 압력차를 감소시켰다.

타워 내부 발생 풍량은 내부 유동 단면적, 타워 높이가 그리고 내부온도 증가에 따라 증가하였으나, 외부온도 증가는 반대로 풍량 감소를 초래하였다.

상기 결과들은 태양광/풍력 하이브리드 발전시스템의 풍력발전기 용량 선정 및 효율 계산 등에 유용한 기초 자료로 활용가능할 것으로 판단된다.

Author contributions

J. H. Park; Investigation, Data analysis, Writing-review & editing. J. D. Kim; Conceptualization, Methodology and Writing-original draft.

References

1. Y. H. Kim, Y. S. Cho, E. J. Lee, M. T. Hyun and E. C. Kang, 2005, "The Performance Evaluation Study of PV-Solarwall Unit Module Solar Thermal-Electric Energy", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 3, pp. 69-75.
2. Y. H. Kang, 2008, "Current Status and Prospect of Solar Energy Technology Development", KSES Autumn Annual Conference, pp. 23-34.
3. Y. C. Yoon, Y. H. Bae, R. Y. Sun, S. H. Lee and W. M. Suh, 2009, "Power Generating Performance of Photovoltaic Power System for Greenhouse Equipment Operation", Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 18, No. 3, pp. 177-184.
4. S. S. Jung, 2014, "A Study on the Benefit-Cost Analysis of Photovoltaic System in the Greenhome", Journal of Power System Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 112-117. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.3.112>)
5. Korea Energy Agency, 2016, "New & Renewable Energy White Paper", Renewable Energy Center, pp. 329-375.
6. J. H. Park and J. D. Kim, 2020, "A Basic Study on the Airflow inside the Tower Structure for Solar/Wind Hybrid Power Generation System", Proceedings of the 2020 KSPSE Autumn Conference, pp. 74-75.
7. D. S. Song and D. L. Park, 2008, "Overview and the Reduction Strategies of Stack Effect in High-rise Residential Buildings", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 145-152.
8. A. Walker, 2016, "Natural Ventilation", National Institute of Building Sciences, Washington, DC, USA.
9. S. Irving, B. Ford and D. Etheridge, 2010, "AM 10. Natural ventilation in non-domestic buildings", The Chartered Institution of Building Services Engineers(CIBSE), London, United Kingdom.
10. R. H. Perry and D. W. Green, 1984. "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 6th Edition, McGraw-Hill, New York, USA, pp. 9-72.