

튜브형 초고속 이동수단을 위한 태양광 시스템 연구

권경준, 김예린
울산과학기술원

Photovoltaic Panel Orientation Study for Tube-Enclosed Transportation Systems

Kyoungjun Kwon, Katherine Ann Kim
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

최근 전 세계적으로 차세대 초고속 교통수단의 연구, 개발에 박차를 가하고 있다. 대표적으로 미국에서 개발하고 있는 하이퍼루프는 승객을 태운 차체가 원통형인 튜브 안에서 최대 1200 km/h로 이동하는 초고속 교통수단이다. 이렇게 빠른 속도에 도달하기 위해서 수십 MW 수준의 상당히 큰 전력이 필요하며, 이러한 큰 전력소모에 의한 전력망의 부담을 덜기 위해, 태양광 시스템을 튜브에 장착하여 추진에 필요한 일부 전력을 태양광 발전으로 대체하는 시스템이 연구되고 있다. 본 논문에서는 튜브의 방향, 태양전지의 배열에 따른 에너지 생산량, 전력 발전량 및 비용 등의 다각적인 측면에서의 분석을 제시하였다. 원통형 튜브에 부착되는 태양전지의 배열을 여섯 가지 경우로 나누었을 때, 삼각 지붕 모양으로 태양전지를 배열한 Case 2가 가장 높은 에너지 생산량을 보였다. 하지만 태양전지의 단위면적 당 에너지 생산량을 비용으로 계산하였을 경우, 튜브 위에 평평하게 태양전지를 배열한 Case 1이 가장 높은 가격 경쟁력을 가졌다.

1. 서론

최근 전 세계적으로 하이퍼루프 (Hyperloop)와 같은 차세대 아음속 교통수단의 연구, 개발이 진행되고 있다. 하이퍼루프는 현 테슬라 (Tesla)의 CEO인 일론 머스크 (Elon Musk)에 의해서 제안된 시스템이다. 이 시스템은 압력이 매우 낮은 튜브 안에서 차체가 모터에 의해 추진되어 최대속도 1200 km/h에 달하는 속도를 낸다. 이때, 전력공급은 튜브위에 설치되는 태양광 시스템 (Photovoltaic(PV) system)과 전력망에서, 차체 추진은 선형 모터에 의해 이루어진다^[1]. 이러한 튜브형 초고속 이동수단 (Tube enclosed transportation system)은 추진에 필요한 전력소모가 상당히 높으며, 이러한 큰 전력 소모에 의한 전력망의 안정도 및 보충전력공급을 위한 태양광 시스템이 필요하다. 이에 대해, 태양광 시스템의 최대 전력생산 및 저비용 달성을 위한 다각적인 연구가 필요하다. 본 논문에서는 튜브의 방향에 따른 태양광 시스템의 전력생산 최대화 및 비용 최소화를 위한 태양전지의 배열 및 비용분석을 진행하였으며, 제시한 태양전지의 배열별 최대전력 (Maximum power), 총 에너지 생산량 (Total energy), 하루 중 전력 변화량(Coefficient of Variation(CV) for power over a day), 단위면적 당 에너지 생산량 (Energy/Area)을 중심으로 분석하였다.

2. 시뮬레이션 조건 및 일사 분석

2.1 태양전지 배열

태양전지는 튜브위에 여러 가지 배열로 설치될 수 있으며, 본 연구에서는 그림 1의 여섯가지 태양전지 배열을 토대로 시뮬레이션을 진행하였다. 각 배열 별 사용되는 태양전지의 면적을 구하기 위하여, 태양전지의 폭을 구하면 다음과 같다.

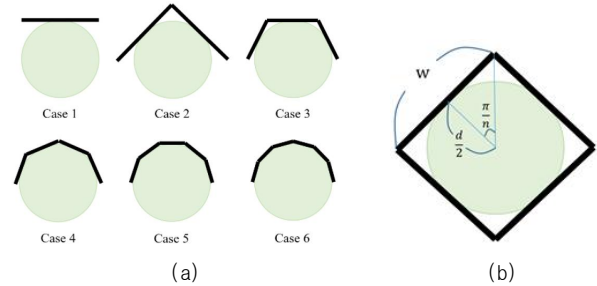


그림 1(a) 태양전지 배열 (b) 수학적 도식도 (2번 배열)
Fig. 1(a) PV panel cases (b) Mathematical setup (Case 2)

$$w = d \cdot \tan \frac{\pi}{n} \quad (1)$$

식 (1)에서, w 는 태양전지의 폭이며, d 는 튜브의 직경, n 은 그림 1(b)와 같이 각 배열을 적용시켰을 때 사용되는 태양전지의 개수이다. 튜브의 길이를 l 이라 할 때, 각 배열별 사용되는 태양전지의 면적은 $A = w \cdot l$ 으로 계산될 수 있다.

2.2 튜브 설치방향

튜브형 초고속 이동수단의 설치 방향은 지역에 따라 다르지만, 본 연구에서는 그림 2와 같이 기본적인 방향 중 세 가지 방향인 North to South (N S), East to West (E W), Northeast to Southwest (NE SW)를 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

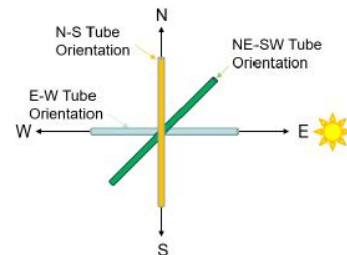


그림 2 튜브형 초고속 이동수단의 설치방향
Fig. 2 Different orientations of the transportation system

2.3 일사(irradiation) 분석

태양빛은 직달 일사(beam irradiation), 확산 일사(diffuse irradiation)와 반사 일사(reflected irradiation)으로 구성된다. 그런데 반사 일사의 비율은 전체 일사량에서 차지하는 비율이 매우 낮아 무시할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 일사량에 대해서 직달 일사와 확산 일사만 가정하여 분석하기로 한다.

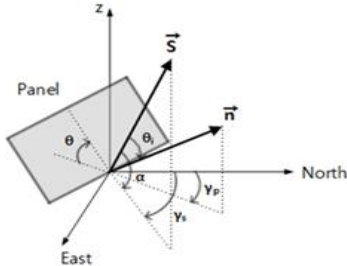


그림 3 입사하는 태양빛과 태양전지와의 관계도

Fig. 3 Relation between the incident sunlight and the PV panel

먼저, 태양전지의 표면에 직접적으로 도달하는 일사량인 직달 일사 G_D 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$G_D = G_n \cdot \cos(\theta_i) \quad [W/m^2] \quad (2)$$

식 (2)에서 θ_i 는 태양빛의 입사각으로 태양빛과 패널표면의 수직벡터 사이의 각도이며, G_n 은 일사세기로 맑은 날은 약 $1000 W/m^2$ 정도이다. 여기서 $\cos(\theta_i)$ 는

$$\cos(\theta_i) = \vec{n} \cdot \vec{S} \quad (3)$$

으로 표현될 수 있으며, \vec{n} 은 패널 표면의 수직벡터, \vec{S} 는 태양빛에 대한 벡터이다. 그림 3을 이용해, 식 (3)의 \vec{n} 과 \vec{S} 를 북, 동쪽과 z축에 대해 나누어서 내적하면,

$$\cos(\theta_i) = \sin(\alpha)\cos(\theta) + \cos(\alpha)\sin(\theta)\cos(\gamma_p - \gamma_s) \quad (4)$$

과 같이 표현되며, α 는 태양고도를, θ 는 패널의 기울기를, γ_p 는 패널의 방위각을, γ_s 는 태양의 방위각을 나타낸다. 이 때, 태양고도를 나타내는 식 α 는 태양이 동 서쪽 축을 시간 t 에 따라 이동하면, 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\pi}{\text{일사시간}} \cdot t \quad (5)$$

직달 일사에 대한 전력생산식 P_b 는 식 (2)에 태양전지 면적 A 와 효율 η 을 곱하여 구할 수 있다.

$$P_b = A\eta G_n [\sin(\alpha)\cos(\theta) + \cos(\alpha)\sin(\theta)\cos(\gamma_p - \gamma_s)] \quad (6)$$

두 번째로 확산 일사는 햇빛이 대기에 있는 성분들에 의해 확산되는 일사이므로, 입사각이나 패널, 태양의 방위각과 관계가 없으며, 확산 일사에 의한 전력생산량 P_d 는 다음과 같다.

$$P_d = KA\eta G_n \sin(\alpha) \quad (7)$$

이 때, K 는 확산 계수로 맑은날 기준으로 0.259를 택하였다^[2].

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 및 파라미터 설정

시뮬레이션에는 $d=2.5 m$, $l=10 m$, $\eta=21.2\%$ ^[3], 일사시간은 12 시간과 G_n 은 맑은 날 기준 $1000 W/m^2$ 으로 가정하였다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션 결과는 에너지 측면에서, 각 배열 별 최대 전력 및 총 에너지 생산량, 비용 측면에서는 태양광 시스템 컨버터의 정격, 하루 중 전력변화량, 단위면적 당 에너지 생산량을 중심으로 분석하였다.

먼저, 각 배열 별 최대 전력량에서는 Case 2가 전 튜브 방향에서 10.24 kW로 가장 높았으며, Case 1이 6.67 kW로 가장 낮았다. 컨버터의 정격 부분에서는 가장 높은 최대 전력량을 보이는 Case 2가 가장 높으며, 가장 낮은 최대 전력량을 보이는 Case 1이 가장 낮다. 컨버터의 정격이 낮을수록 비용이 줄어들므로 Case 1이 컨버터 비용측면에서 가장 유리하다.

두 번째로, 총 에너지 생산량에 대해서는 Case 2가 전 튜브 방향에서 가장 높았으며, 특히, N S 튜브방향에서 90 kJ로 가장 높았다. 그리고 단위면적 당 에너지 생산량은 Case 1이 전 튜브 방향에서 가장 높았다. 단위면적 당 에너지 생산량은 태양전지의 비용에 비례하며, 이러한 측면에서 Case 1이 가장 유리하다. 전체적으로 N S 튜브방향이 나머지 두 방향보다 높은 에너지 생산량과 단위면적 당 에너지 생산량을 보였다.

세 번째로, 하루 중 전력변화량 (CV)은 컨버터의 활용도와 그에 따른 기회비용에 영향을 준다. 낮은 CV는 하루 중 전력변화량이 적은 것을 의미하며, 이는 곧 컨버터에 대한 낮은 기회비용으로 해석된다. 시뮬레이션 결과에서, E W 방향을 제외한 나머지 방향에서는 Case 6가 가장 낮은 CV를 가지므로, 컨버터의 활용도 및 기회비용 측면에서, Case 6가 가장 유리한 태양전지 배열이다.

표 1 튜브 방향 별 시뮬레이션 결과

Table 1 Simulation results for each tube orientation

	Tube Orientation		
	N-S	E-W	NE-SW
Max. Power	Case 2	Case 2	Case 2
Power Rating	Case 1	Case 1	Case 1
Energy	Case 2	Case 2	Case 2
CV	Case 6	Same for all cases	Case 6
Energy/Area	Case 1	Case 1	Case 1

4. 결론

본 논문에서는 튜브형 초고속 이동수단의 태양광 시스템에 대하여 각 튜브 방향 및 태양전지 배열 별 비용과 에너지 측면에서 분석하였으며, 각 측면에 대해서 적합한 태양전지 배열을 제시하였다. 에너지관점에서, 최대 전력 및 총 에너지 생산량에 대해서는 Case 2가 가장 유리한 배열임을 알 수 있었다. 비용 관점에서, 컨버터의 활용도 및 기회비용 측면에서는 Case 6가 가장 적합한 배열이었으며, 컨버터의 정격에 따른 제작비용과 태양전지 비용의 측면에서는 Case 1이 가장 적합한 배열이었다.

This material is based upon work supported by the research funding from Ulsan National Institute of Science and Technology (Grant No. 1.170004.01).

참고 문헌

- [1] "Hyperloop Alpha," SpaceX, California, Aug. 2013.
- [2] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, "The Interrelationship and of Direct, Diffuse and Characteristic Distribution Total Solar Radiation," SolarEnergy, vol. 4, pp. 1 19, July 1960
- [3] Y. Zhou, M. Eck and M. Kruger, "Bulk heterojunction hybrid solar cells based on colloidal nanocrystals and conjugated polymers," Energy & Environment Science,