



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

열차의 태양광 발전량 계산을 위한
GIS 기반 알고리즘

GIS-based algorithm for the calculation of
photovoltaic power generation on a train

2023년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

김 한 진

열차의 태양광 발전량 계산을 위한 GIS 기반 알고리즘

지도교수 박형동

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 2월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
김한진

김한진의 석사 학위논문을 인준함
2023년 2월

위원장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위원 _____ (인)

국문초록

VIPV(Vehicle Integrated Photovoltaic)는 자동차나 대중교통 등 이동수단에 태양광 패널을 접목, 통합하여 전력을 보충하는 것으로, 기존의 지정 장소에서 움직이지 않는 태양광 발전소 시스템과는 달리 시공간적 요소에 발전량이 크게 영향을 받기 때문에 이를 정량적으로 추산할 수 있는 계산 모델이 필요하다.

본 연구는 이런 VIPV 중 경로가 지정된 열차 모델에 집중하여, 시간 및 노선에 따른 열차가 생산할 수 있는 최적의 태양광 발전량을 계산하는 모델과 인터페이스를 제안한다. GIS를 기반으로 열차 경로 인근의 지형지물을 래스터 자료로 구현하고, 경로상의 2700여 개의 측정 지점에서 시간, 공간에 따른 태양광 일사량 입사 각도를 계산하여 지형지물에 가려지는지 여부와, 실제 패널 입사 시 실질적으로 얻는 일사량을 계산하였다. 지형지물을 구현하기 위하여 고도자료인 DEM(Digital Elevation Model)과 공개 자료로 제공되는 건물 벡터 파일 데이터베이스 정보와 건물 평균 층고를 추산하여 DSM(Digital Surface Model)을 만들었으며, 천체 이동을 고려한 함수를 포함하는 Python 패키지 pvlib을 이용하여 태양 상대 위치를 계산 후, 측정 지점에서 음영 여부를 판별 함수를 Python 코딩하여 판단할 수 있도록 했다. 등방성 일사량 모델을 적용, ArcGIS를 통해 뽑아낸 측정 구역 인근 3km짜리 직사각형 구역 내부 영역의 DSM 픽셀들이 측정 지점에 음영을 주는지에 대한 여부를 검사하고, 지점별로 음영 진 지역은 직달일사량을 배제, Solar Radiation Graphics 기능을 사용하여 그림자에 가려지지 않은 영역은 전부 산란일사량 입사 영역으로 판단, 해당 직달일사량, 산란일사량을 합산한 양을 시점별로 계산하여 전체 합산 일사

량으로 계산했다. 더 정밀한 계산을 위해 운량 등 일사량에 직접 영향을 미치는 기상 요소를 적용하였다.

개발한 알고리즘에 이동체 물리 모델 등을 접목하여 실제 패널을 운용하는 것에 대한 열차 운행 일정 별 손익을 분석해보았다. 연간 대표 일자(월당 하루)를 선택하여 하루에 총 얼마의 일사량을 받을 수 있는지 계산하였다. 이후 가상의 인버터 및 패널을 설정하여 전력을 계산한 결과, 연간 편도 기준 98.88 MWh의 기차 전력을 생산할 수 있는 것으로 분석되었다. 패널 운용의 경제성 분석 결과, 동절기와 새벽, 늦은 오후 시간대에는 태양광 열차 운영의 경제성이 낮게 나타났다.

본 연구 결과는 대중교통 산업의 재생에너지 결합 형태로의 차량 전환 시 수익성을 계산하거나 전력 계획을 세우는데 이바지할 수 있으며, 경로가 자유로운 태양광 자동차 등의 알고리즘을 구축하는 프로토타입이 될 수 있다.

주요어 : 태양광 발전, 고속열차, GIS, GUI, 일사량 모델, 음영 분석

학 번 : 2021-20381

목 차

1. 서론	1
2. 배경이론	5
2.1 천체 이론 및 일사량 모델	5
2.2 기상 모델	14
2.3. 이동체 물리 모델	17
2.4 GIS 기반 일사량 계산 모델	19
3. 연구 방법론	24
3.1 노선 선정 및 이동체 정보	24
3.2 GIS를 통한 노선 인근 지형지물 구축	29
3.3 일사량 모델 및 기상 모델 적용	31
3.4 이동체 물리 모델 적용	32
3.5 파이썬 GUI 프로그래밍	34
4. 시뮬레이션 설계	46
4.1 청명 일사량 적용 시 발전량 추산	46
4.2 일정별 패널 운용 손익 분석	47
5. 결과 분석	48
5.1 시뮬레이션 결과	48
5.1.1 연간 발전량 추산 결과	48
5.1.2 일정별 패널 운용 손익 분석 결과	54

6. 결론	59
7. 참고문헌	61
Abstract	67

표 목 차

[Table 3-1]	27
[Table 3-2]	28
[Table 3-3]	32
[Table 3-4]	45
[Table 5-1]	49
[Table 5-2]	50
[Table 5-3]	55
[Table 5-4]	55
[Table 5-5]	57
[Table 5-6]	58

그 립 목 차

[Figure 1-1]	4
[Figure 2-1]	5
[Figure 2-2]	6
[Figure 2-3]	8
[Figure 2-4]	10
[Figure 2-5]	12
[Figure 2-6]	15
[Figure 2-7]	19
[Figure 2-8]	21

[Figure 2-9]	22
[Figure 3-1]	24
[Figure 3-2]	25
[Figure 3-3]	26
[Figure 3-4]	29
[Figure 3-5]	30
[Figure 3-6]	33
[Figure 3-7]	34
[Figure 3-8]	35
[Figure 3-9]	39
[Figure 3-10]	39
[Figure 3-11]	40
[Figure 3-12]	41
[Figure 3-13]	41
[Figure 3-14]	42
[Figure 3-15]	43
[Figure 5-1]	51
[Figure 5-2]	51
[Figure 5-3]	52
[Figure 5-4]	52
[Figure 5-5]	53
[Figure 5-6]	53

보존용 학위논문 정오표

페이지	정정 전	정정 후
p. 5	-6-	-5-
p. 6	-5-	-6-
p. 7	-6-	-7-
p. 8	-7-	-8-
p. 9	-8-	-9-
p. 10	-9-	-10-
p. 11	-10-	-11-
p. 12	-11-	-12-
p. 13	-12-	-13-
p. 59	-58-	-59-
p. 60	-59-	-60-

제 1 장 서론

국내외로 에너지 수급 문제와 환경 문제가 대두됨에 따라, 재래식 에너지원인 화석 연료의 단점이 (한정 자원, 공해) 부각되면서, 상대적으로 고갈 위험이 없고 친환경적인 재생에너지를 전력 시스템에 도입하는 방안이 확대되고 있다. 1965년 세계적으로 비중이 6.45%였던 재생에너지는 2021년 현재 약 13.47%로 약 55년여 만에 109 %의 성장을 기록했다(BP, 2022). 특히 태양광 에너지는 초기 주류 에너지원이던 수력에 이어 풍력과 함께 가장 보편적이고 대중적인 형태의 재생에너지원으로 각광 받고 있으며, 적절한 일조량만 갖춘 조건이면 반도체 패널을 통해 전력을 생산해 낼 수 있다. 현재 전세계적으로 태양광 에너지 기반 시설은 확대되는 추세이며, 2021년 기준 843.09 GW의 용량만큼이 전세계에 설치되었다고 알려져 있다(BP, 2022). 한국의 경우 2012년부터 신재생에너지 공급인증서(REC) 제도를 운영하여 (Kim & Kim, 2013) 수익성 높은 태양광 발전을 장려했고 ESG 경영으로 재생에너지 사용이 요구되는 기업체가 REC를 상거래하는 시장이 형성되었으며, 계통에 공급되는 신재생에너지 전기가 2012년 한국 전력 발전량의 2.5 %를 차지하던 것과 비교해 2021년 발전 비중의 7.5 %를 차지할 정도로 산업이 성장했다(KEPCO, 2022; Statistic Korea).

에너지원이 무한정할 뿐, 태양광 에너지를 통한 발전 시스템은 기존 화석 연료 등의 전통적인 에너지원과 비교해 설치 면적 대비 밀도 높은 발전을 하기 어려워 목표 설치 용량에 비례하여 적은 잔여 부지 대비 넓은 설치 면적을 필요로 하고(Layton, 2008), 패널을 대량으로 설치하는 발전 단지 시설이 근래 들어 재해 위험성 검토 의무화 등 산림청의 ‘산지 태양광 안전관리 강화 추진’ 으로 인해 신축이 비교적 까다로워진 만큼, 태양광 에너지의 입지 문제가 새로운 이슈로 떠오르고 있는 실정이다(Korea Forest Service, 2020). 태양광 에너지를 비롯한 재생에너지

발전량은 환경 각종 환경(시간대, 계절, 온도, 기상 상황 등)에 영향을 받기 때문에 정확한 공급량 예측이 어렵고 생산량에 따라 기저 발전 전력을 줄여야 하는 문제도 있다. 태양이 뜨지 않거나 고도가 낮은 저녁부터 새벽까지의 시간대에는 높은 발전량을 기대하기 어려우며, 계절에 따라 태양의 일조시간이 다르기에 1년 내에도 계절 일조량에 따라 전력 공급책을 다르게 세워야 한다. 태양광 패널은 온도가 올라가면 발전 효율이 감소하므로 이에 대한 문제도 고려해야 하며, 악천후에서는 일사량 예상치를 크게 밑도는 전력이 생산되기도 한다(Dubey et al., 2013; Bollen, 2001). 이런 문제를 최대한 회피하기 위해서, 태양광 패널을 다른 시설의 기능을 해치지 않는 잉여 면적에 설치하면서도, 보조전력 공급 및 충·방전 식으로 운용하여 입지 문제와 계통 연결 문제를 동시에 해결하는 방안을 고안하는 것이 대안으로 부상하고 있다.

근래에는 차량 등에 패널을 일체형으로 설치하여 전력을 공급받는 VIPV(Vehicle Integrated Photovoltaics)가 건축물과 패널을 결합한 일체형 건물 BIPV(Building Integrated Photovoltaics)와 함께 가장 주목받고 있는 차세대 태양광 발전 활용 사례이며, 상용화 단계로 가기 위한 준비를 하고 있다(Araki et al., 2020).

중국에서는 활발하게 기차에 태양광 시스템을 접목할 수 있도록 하는 설계 연구가 진행되고 있으며, 대표적으로 태양광 시스템을 열차 운용 계통에 연결하는 방식을 고찰한 연구(Shen et al, 2012; Zhong et al, 2020)와 태양광 패널을 열차 전력 시스템에 직접 연결하는 모델을 제안한 연구가 있다(Wei et al, 2016). 이런 흐름에 부응하여, 실제 적용 사례도 늘어나고 있다. 영국에서는 세계 최초로 열차 인근에 태양광 발전 시설을 설치해 직접 운영 전력으로 사용하는 Aldershot의 사례와 더불어(Ambrose, 2019), 열차 선로 위에 직접 태양광 패널을 설치해 운영하는 기술도 Saxony 지역에서 최근 테스트 중이다(Alter, 2022). 인도에서는 2017년 7월 태양광을 통해 보조전력을 충전 해주는 열차 노선을 최초로 개설했으며(The Economic Times, 2017), 16개의 패널

로 총 4800 Wp를 생산하는 차를 설계해 72시간 동안의 예비 보조전력을 저장할 수 있도록 했다.

이동수단에 부착되어 운용되는 태양광의 사례에 늘어남에 따라서, 공급량을 예측하는 연구 또한 그 중요성이 점차 강조되고 있다. 근래 이에 해당하는 다양한 연구가 진행되고 있는데, 대표적인 예로 서울대학교 캠퍼스를 돌아다니는 버스 노선상의 예상 발전량을 계산한 연구(Oh et al, 2020)가 존재한다. Kutter et al.(2021)은 상업용 트럭에 패널을 접목한 VIPV의 다섯 가지 사례에 대해서 발전 잠재량을 분석하기도 했다.

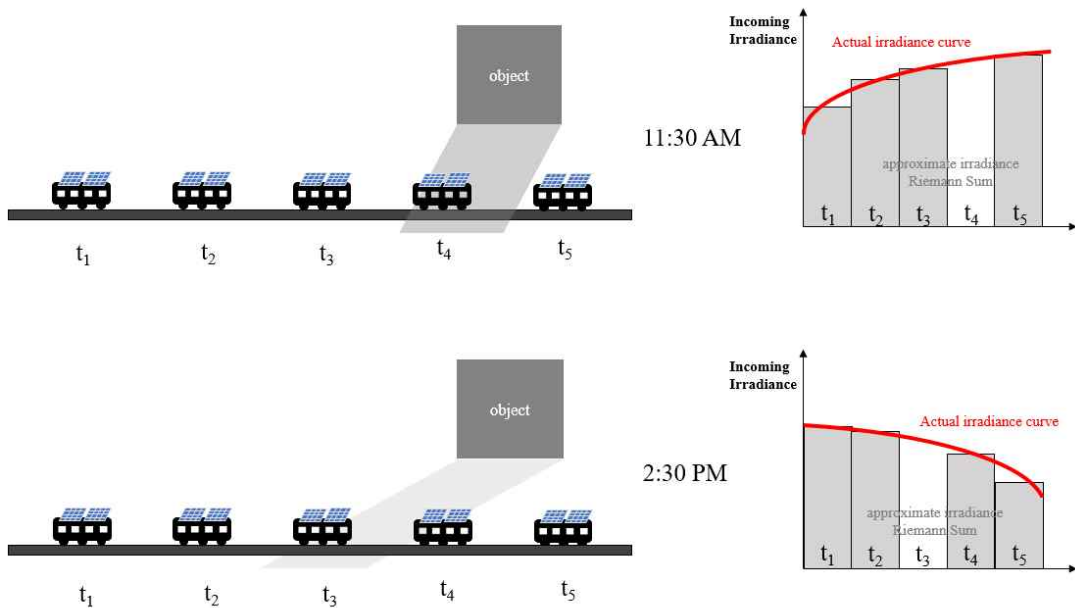


Figure 1-1. Principles of solar irradiance calculation algorithm (Kim et al., 2022).

한국 고속열차 KTX 경부선에 태양광을 접목할 경우 예상되는 발전량을 각종 가정을 한 상태로 시뮬레이션을 돌리는 비교적 단순한 모델로 진행한 연구에서 GIS를 통해 구축된 지형지물에 태양광 그림자가 지는 여부를 판별하여 지형지물에 태양광이 차단되어 진행하지 못하면 음영이져 일사량 전체가 측정점에 입사하지 못하는 것으로 판단하고, 그 반대의 경우는 이론적 일사량 전체가 측정점에 들어오는 것으로 판단하여 태

양광 에너지를 추산하였다(Figure 1-1). 청명 일사량 전체가 입사한다는 기상 조건을 전제로 하였으며, 이를 통해 가장 낙관적인 연간 발전량을 계산하였다. 서울 - 부산 구간의 KTX-산천 노선의 매일 6회가량의 노선에서 연간 얻을 수 있는 일사량 최대치를 계산한 결과, 122.15 MWh으로 추산되었다(Kim et al., 2022).

본 연구에서는 해당 시스템을 기상 모델, 일사량 모델, 물리 모델 등을 적용하여 개량하고, 개량된 알고리즘을 통해 최선의 열차 태양광 운용 방안을 제시하고자 한다.

2. 배경 이론

2.1 천체 이론 및 일사량 모델

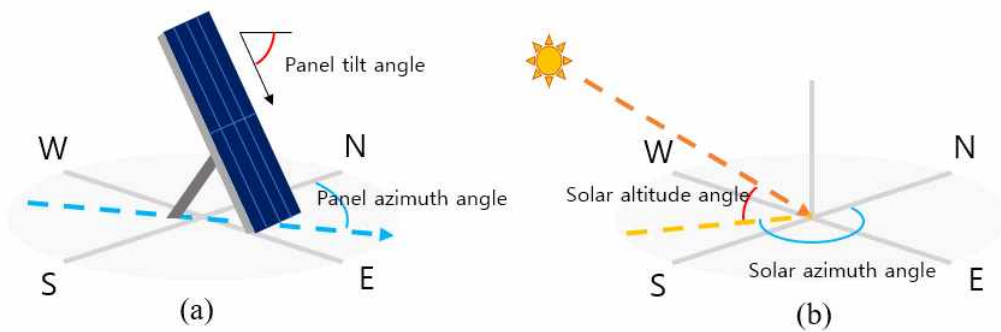


Figure 2-1. Spatial relationship between the Sun and panel. (a) schematic of tilt angle and azimuth angle of solar panel. (b) schematic of altitude angle and azimuth angle of solar ray based on Gilman et al. (2018)

태양광 발전량은 태양에너지가 어떻게 입사하느냐에 따라 그 양이 달라지며, 이는 패널의 경사각(tilt angle) 및 방향각(azimuth angle)과 태양광 고도각(altitude angle) 및 방향각(azimuth angle) 간의 관계에 따라 영향을 받는다. 이중 사람이 통제 가능한 변수인 패널 경사각 및 방향각은 설정에 따라 달라지나, 천체 움직임에 의해 결정되는 태양광 고도각 및 방향각은 시간 변수와 공간 변수에 의해 결정되므로 태양광 입사 지점의 정확한 위치와 날짜 및 시간을 파악할 경우 기준점에서 태양이 어떤 방향의 어떤 각도로 입사하는지 구할 수 있다.

태양광은 항성 본체에서부터 사방으로 전자기파를 방사하지만, 지구는 태양과 1.5×10^8 km 만큼 떨어져 있고 이는 지구 지름(1.3×10^4 km)에

비해 매우 크므로 방사하는 가상의 광선 중 지구에 들어온 광선들의 방향 벡터는 거의 그 차이를 구분하기 어렵다. 이로 인해 동시에 지구에 입사하는 모든 태양광의 방향 벡터는 같은 것으로 간주한다. 따라서 태양광이 평행하게 입사할 경우, 특정 지점에서 태양광 방향 벡터 방향으로 장애물이 있으면, 해당 지점에 직접 직진하여 도달하는 태양광 일사량은 0이다.

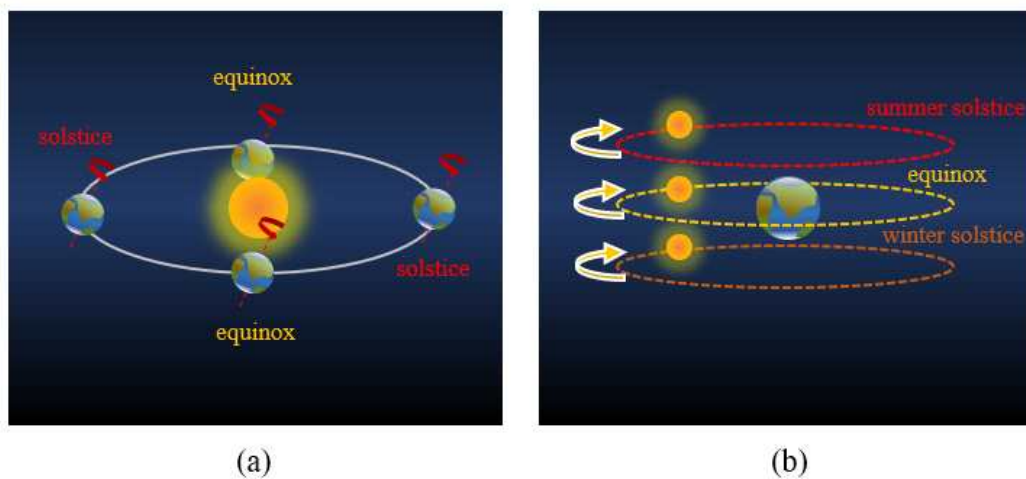


Figure 2-2. Relative location between the Sun and the Earth. (a) Earth orbiting the Sun with a tilted rotation axis. (b) Seasonal shift of solar apparent motion on Earth, resulted from tilted axis.

지구는 태양 주위를 약 365.25일 단위로 공전함과 동시에 약 24시간 주기로 자전하고 있다. 지구의 자전축은 23° 가량 기울어져 자전하고 있으며, 이 때문에 북반구와 남반구는 위치에 따라 태양 일조시간이 달라진다(Figure 2-2.). 북반구 기준 하지에 해당하는 시기에 북반구에서 태양이 가장 길고 남반구는 가장 짧으며, 북반구 기준 동지에 해당하는 시기에 북반구는 태양이 가장 짧고 남반구는 가장 길다. 이런 계절적 주기성으로 인해 1년 단위로 동일 지점 동일 시각이라고 해도 관측지점에서 보이는 태양의 상대 위치는 다르다. 따라서 지점별 일사량을 계산하는 알고리즘을 제작하기 위해서는 방향각과 고도각으로 대표되는 태양의 겉보기 위치를 파악해야 하므로 연중 변화하는 태양의 상대 위치를 계산

하는 천체 공식을 알아야 한다.

Michalsky(1988)는 태양의 상대 위치를 근사하는 알고리즘을 고안하였고, 이를 기본 토대로 Gilman et al.(2018)은 상대 날짜에 따른 태양의 고도각과 방향각을 계산하는 알고리즘을 만들어 재생에너지 발전량 계산 소프트웨어인 SAM(System Advisor Model)에 적용했다. 수식에 따르면, 태양의 상대 위치는 연월일과 시각에 따라 달라지기에 위치 계산 수식은 연월일 및 시각을 통일한 시간 변수를 필요로 한다. 따라서 날짜를 2000년 1월 1일 정오를 기준점 삼아 해당 일로부터 며칠이 지났는지를 정량적으로 나타내는 시간 변수(Days)를 정의하였다(Y는 연도, h는 시간, m은 분, JD는 Julian Date로 1월 1일을 1로 하여, 하루 단위로 날짜를 세는 단위).

$$Days = 365(Y-2000) + \left[\frac{Y-1997}{4}\right] + JD + \frac{h}{24} + \frac{m}{1440} - 1.5 \quad (\text{Eqn. 2-1})$$

태양광은 지구와의 거리($1.5 \times 10^8 \text{km}$)로 인해 지구로 도달하는 데 약 8분의 시간이 소요되므로, 관측자가 느끼는 태양의 위치는 태양이 실제 떠 있는 정확한 방향과는 다르다. 태양광이 관찰자 위치로 입사할 때, 관찰자가 느끼는 태양 위치에 의한 시각계를 시태양시(apparent solar time)라고 하며(USNO), 실제 태양 위치에 의한 시각계는 반대로 진태양시라고 한다. 태양의 경로는 연간 변동을 거치게 되는데, 시태양시와 기계적 시간(mechanical time) 간의 차이인 균시차(Equation of Time, EOT)가 연중 변화한다(Figure 2-3.). 이를 수식으로 나타내면 아래와 같다.

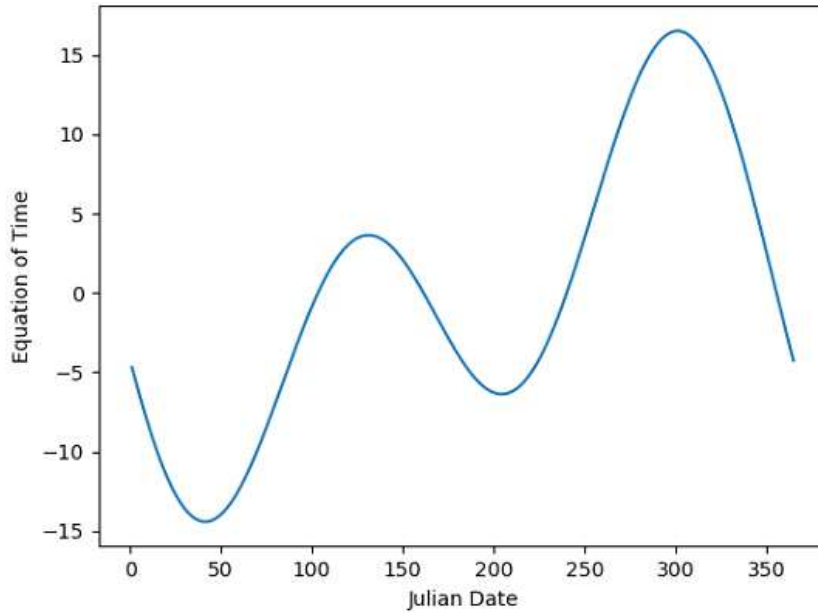


Figure 2-3. Julian date and equation of time.

$$EOT(\text{분}) = -7.655\sin\left(\frac{2\pi JD}{365}\right) + 9.873\sin\left(\frac{4\pi JD}{365} + 3.588\right) \quad (\text{Eqn. 2-2})$$

기계적 시간은 지역별 정해진 기준 경도가 존재하기 때문에 정오 시간에 태양이 반드시 최고 고도각을 가지지 않으며, 태양이 일일 최고 고도각일 때의 시각(북반구 기준 남중 시각)은 지역에 따라, 날짜에 따라 달라진다. Eqn. 2-2의 균시차 수식을 알면, 태양이 최고 고도(남중)에 있을 때와 태양이 해당 날짜 정오일 때 위치상 각도의 차이, 즉 시간각 (Hour Angle, HRA)을 계산할 수 있다. 시간각은 당일 날짜에서 태양 상대 위치를 계산하는 기준이 되므로 이를 계산하는 것이 매우 중요하다.

$$HRA(^{\circ}) = \left[15\left(h + \frac{m}{60}\right) + (\theta - LSTM) - 180 + \frac{EOT}{4}\right] \quad (\text{Eqn. 2-3})$$

시간각은 위의 식으로 구하게 되는데, LSTM은 기준 경도, θ 는 실제 위치의 경도이며, 계산 값을 육십분법으로 나타내기 위해 현재 시각인 h, m 을 시간, 분 단위에서 육십분법 단위로 변환해준다.

태양의 상대 위치에 영향을 주는 인자로 천체 움직임이 있다. 대표적인 예로 평균 황경(Mean longitude)의 변동, 평균 근점 이각(Mean anomaly)의 변동, 황경(Ecliptic longitude) 연중 변화, 황도의 기울기 변화(Obliquity of the ecliptic), 연중 적위(Solar declination) 변동 등이 있다. 나열한 천체 움직임에 관한 수식들은 아래와 같다(Reda & Andreas, 2004; Gilman et al., 2018).

$$\text{Mean Longitude}(ML, ^\circ) = 280.46 + 0.9856474 \cdot \text{Days} \quad (\text{Eqn. 2-4})$$

$$\text{Mean Anomaly}(MA, ^\circ) = 357.528 + 0.9856003 \cdot \text{Days} \quad (\text{Eqn. 2-5})$$

$$\text{Ecliptic Longitude}(EL, ^\circ) = ML + 1.915\sin(MA) + 0.02\sin(2MA) \quad (\text{Eqn. 2-6})$$

$$\text{Obliquity of the ecliptic}(OE, ^\circ) = 23.439 - 0.0000004 \cdot \text{Days} \quad (\text{Eqn. 2-7})$$

$$\text{Declination}(\delta, ^\circ) = \arcsin[\sin(OE) \cdot \sin(EL)] \quad (\text{Eqn. 2-8})$$

위의 천체 운동 수식을 통해 태양 적위 값(δ)과 시간각(HRA), 현재 위도(ϕ)를 변수로 갖는 태양광 고도각(altitude angle, α), 방향각(azimuth angle, γ)을 구할 수 있다.

$$\alpha = \arcsin(\sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos HRA) \quad (\text{Eqn. 2-9})$$

$$\gamma = \arccos\left[\frac{\cos\phi\sin\delta + \sin\phi\cos\delta\cos HRA}{\cos\alpha}\right] \quad (\text{Eqn. 2-10})$$

지구는 연중 이심율 약 0.0167의 타원 궤도를 공전하고 있으며 북반구 여름 기준 태양은 원일점에 위치하게 된다(Figure 2-4.). 태양 위치가 근일점에 가까울수록 태양 일사량(G)이 강해지고 원일점에 가까울수

록 일사량이 약해지는 특성이 있으며 이는 1년 단위 주기함수 성격을 띤다. 수식은 아래와 같이 정리된다.

$$G(W/m^2) = 1367[1 + 0.033\cos(\frac{360JD}{365})] \quad (\text{Eqn. 2-11})$$

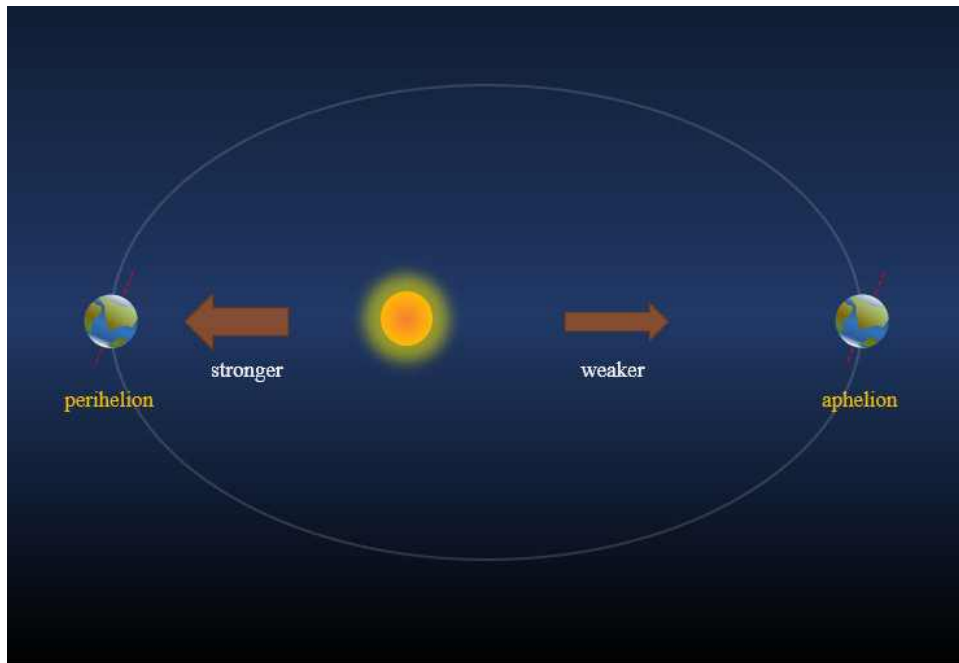


Figure 2-4. Seasonal difference of solar irradiance in ecliptic orbit.

수평면에 입사하는 태양광은 고도각(α)에 따라서 받는 외기에서 들어오는 일사량 강도를 I 라고 할 때 아래 수식을 만족한다.

$$I = \begin{cases} G\sin\alpha & (0 < \alpha < 90^\circ) \\ G & (\alpha = 90^\circ) \\ 0 & (\alpha < 0^\circ) \end{cases} \quad (\text{Eqn. 2-12})$$

위 식은 수평면에 입사한다는 전제하에 평가한 일사량이고, 패널의 설치 상태에 따라서 AOI(Angle of incidence, 입사하는 평면의 들어가는 법선 벡터 방향과 광선의 벡터 사이의 각도)는 달라진다. 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$a = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\cos(\gamma - \gamma_s)\sin\beta_s + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\cos\beta_s \quad (\text{Eqn. 2-13})$$

$$AOI = \begin{cases} \pi & \text{if } a < -1 \\ 0 & \text{if } a > 1 \\ \arccosa & \text{if } -1 \leq a \leq 1 \end{cases} \quad (\text{Eqn. 2-14})$$

일반적으로 북반구 기준 패널 방향각이 남향일수록 일조 시간대에 많은 일사량을 얻어지며(Naraghi & Atefi, 2022), 고정된 패널을 설치하게 될 경우는 설치 방향각 및 경사각 설정이 연간 운용 시 총발전량을 좌우한다. VIPV와 같은 태양광이 이동하는 물체에 결합된 형태의 태양광 발전 장비의 경우, 수평면을 이동할 때는 설치하는 면에 따라 패널 경사각이 특정 값으로 고정되지만, 이동체가 향하는 방향에 따라서 패널 방향각이 수시로 변하게 되며, 이는 일사량 계산 모델을 복잡하게 만든다. 심지어 이동체가 수평면이 아닌 경사로를 이동할 때는 패널 경사각 또한 변화하기 때문에 이에 대한 기하학적 고려가 추가로 필요하다. 만약 이동체의 여러 면에 패널이 부착되어있다면 정밀한 계산을 위해서는 더 큰 계산 소요가 든다. 그러므로 비교적 직관적이고 간단한 계산 모델을 구축하기 위해 평탄한 경로 위를 달리는 이동체의 수평면 천장에 태양광 패널이 부착된 것으로 가정한다.

직진성이 있는 태양광을 직접 받는 수식은 위와 같지만, 태양광은 특정 지점에 직접적인 형태로만 도달하지는 않는다. 매질이 다른 물질을 통과하거나, 다양한 입자에 부딪히면서 태양광 중 일부는 산란광이 되고, 측정 지점으로부터 무작위한 모든 방향에서 산란광이 입사하게 된다. 직진하는 태양광과 산란하는 태양광을 포괄하여 전체 일사량을 아우르는 개념이 수평면전일사량(GHI, Global Horizontal Irradiance)이며, 이는 직진하는 태양광에 비례하는 법선면 직달일사량(DNI, Direct Normal Irradiance)와 산란하는 태양광에 비례하는 수평면 산란일사량(DHI, Diffuse Horizontal Irradiance)로 나뉜다. GHI, DNI, DHI의 수

식 관례는 아래와 같다.

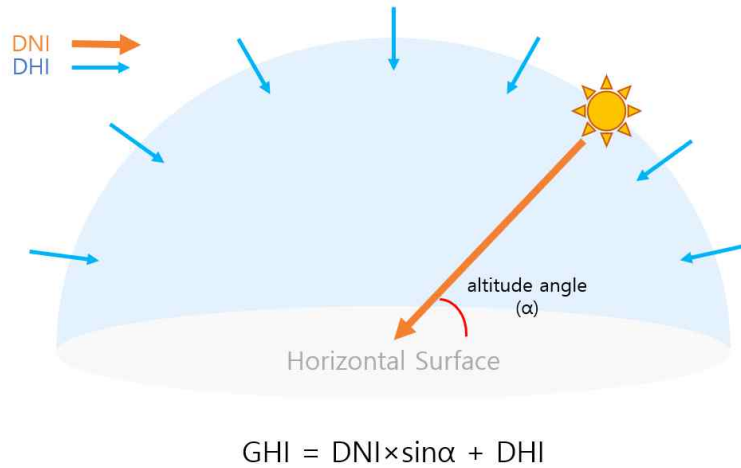


Figure 2-5. Concept of GHI, DNI and DHI.

$$GHI = DNI \cdot \sin\alpha + DHI \quad (\text{Eqn. 2-15})$$

위의 식에서 구한 특정 시점에서 입사하는 태양광 I 는 투과율을 고려하지 않은 대기권 밖의 일사량이며, 공기를 투과하는 일사량은 투과율을 곱하여 식으로 나타내게 되는데, 다음과 같이 정리할 수 있다(Liu & Jordan, 1960; Jo et al., 2003). τ_b , τ_d 는 각각 직달일사량, 산란일사량의 대기 투과율이다.

$$DNI = G \times \tau_b \quad (\text{Eqn. 2-16})$$

$$DHI = I \times \tau_d = G \sin\alpha \times \tau_d \quad (\text{Eqn. 2-17})$$

천구상에서 입사하는 무작위한 방향의 산란일사량은 총량이 수식으로 정의 되어있음에도 모델에 따라 들어오는 태양광 세기 수식이 달라진다. 가장 간단한 모델인 등방성 모델의 경우, 반구로 표현되는 천구상의 모든 방향에서 입사하는 산란일사량을 동일하다고 가정한다. 대중적으로

통용되는 일사량 모델인 Perez et al.(1987)의 모델의 경우 천구상의 영역을 세 구역으로 구분하여 청명도와 Air Mass의 상태에 따라 가중치를 다르게 주어 산란일사량을 지정한다.

이론적인 수평면 태양광 패널에 입사하는 태양광은 직달일사량 ($DNI \cdot \sin\alpha$), 산란일사량(DHI)과 더불어 인근 지형지물의 알베도 (Albedo, 빛 반사 정도) 값에 의한 반사일사량으로 정리할 수 있다. 하지만, 이동체의 연간 일사량을 구할 때 반사일사량은 주변 지역의 상태에 따라 불확실성이 지나치게 큰 만큼 보수적인 계산을 위해 배제하도록 한다.

2.2 기상 모델

앞선 일사량 모델을 통한 발전량 계산은 일사량이 다른 방해 조건 없는 청명한 하늘에서 입사한다는 가정하에 계산된 지나치게 낙관적인 계산법이다. 하지만 실제로 대기상에는 운량, 에어로졸 등 태양광 일사량의 진행을 방해하는 다양한 요인이 존재하며(Cho et al., 1988; Jo et al., 2010), 이를 실제적으로 고려하지 않는다면 연간 일사량 계산 시 수치가 과대평가될 우려가 있다. 실제로 한국의 경우, 2020년 기준 강수가 있던 날은 135일이며, 연간 실제 총 일조시간은 2280시간으로 기상 조건에 의해 이론적인 일조시간보다 적음을 알 수 있다(Global Residence Index, 2021). 따라서 특정 시점에서 특정 기상 상태의 태양광 일사량의 직달일사량과 산란일사량의 비율이 어떻게 달라지는지를 정량적인 수식을 통해 적용해야 보다 실제에 가까운 값을 얻을 수 있다.

운량에 따른 일사량 변화 모델은 다양하며 Kimura & Stephenson (1969)의 연구가 이 모델들의 수식 중 일례이다. 해당 연구는 운량(CC, Cloud Cover)을 0에서부터 10까지 정량적으로 나타내는 변수라고 하고 일사량에 수식적으로 어떻게 미치는지를 정리하였다. 먼저 CCF(Cloud Cover Factor)를 정의하였는데, 이는 구름의 상태에 따라 기존 일사량(I)이 몇 배로 줄어드는지 나타내는 인자이며, 운량이 존재하는 날의 일사량을 I_{THC} 로 표기할 경우 아래 수식을 만족한다.

$$I_{THC} = CCF \cdot I \quad (\text{Eqn. 2-18})$$

캐나다 오타와 지역 내 다양한 실측 및 분석 결과, CCF는 CC에 대한 이차식으로 나타내어질 수 있으며, 이차식의 각 항 계수인 P, Q, R은 월별 태양 평균 고도에 따라 다르다.

$$CCF = P + Q \cdot CC + R \cdot (CC)^2 \quad (\text{Eqn. 2-19})$$

직달일사량은 운량이 증가함에 따라 선형감소하는 형태를 보이므로, 종합적으로 정리하면 아래와 같은 그래프를 띠게 된다. 이와 같은 CCF 모델을 연구에 적용할 시, 기상 현황에 따라 더 정확한 일사량 분석을 모델에 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

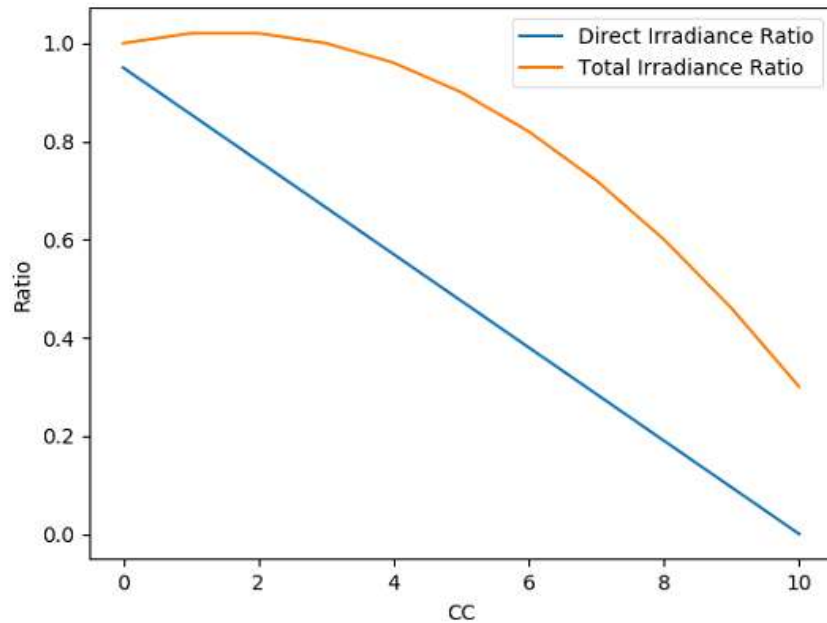


Figure 2-6 Relationship between CC(Cloud cover) and Irradiance ratio.

단기간 내의 정확한 일사량 예측의 경우 기상청 예보 상의 운량 등의 자료를 활용하면 되지만, 연 단위 이상의 일사량을 예측할 경우 날씨의 변동성으로 인해 장기간 기상 예측 자료를 미리 받을 수 없으므로, 대상 지역의 지난 몇 년간의 평균적인 기상 양상을 나타내는 표준 기상 연도 (TMY, Typical Meteorological Year) 자료를 사용하여 기존 알고리즘 보다 더 정확한 연간 총 일사량 및 발전량 근사치를 구할 수 있다.

또한, 태양광 패널은 풍속 및 온도의 영향도 받는다. 태양광 발전 기작인 광전효과는 실제 온도가 그 효율에 미치는 영향이 있고, 패널에 부는 바람은 열을 식혀주는 냉각 효과를 일으켜 패널의 효율을 좌우한다 (Chandra et al., 2018). 따라서 기상변수 고려 시 가능하다면 기온 등

역시 계산 변수로 포함시킬 필요가 있으나, 세부적인 패널 온도의 경우 열차 운행 시의 풍속에 의한 냉각 속도와 열차 내 자체 발생 열 등의 변수가 많아 엄밀한 패널 온도 상정이 쉽지 않다. 이에 평균적인 수치와 비슷한 결과를 도출할 수 있도록 대한민국 월별 평년 온도 등을 적용해 계산에 대입하였다.

2.3 이동체 물리 모델

태양광 패널을 이동체에 더 많은 면적을 적재할수록 발전량은 비례하
 려 증가하지만(자재의 종류에 따라 상이함), 반대급부로 이동체의 전체
 무게가 패널 개수에 따라 증가하므로 일정 속도 이상의 출력을 내기 위
 한 전체 필요 에너지양도 증가하게 된다. 순수 중량을 지탱하는 데 사용
 하는 에너지만 해도 전체 소모 전력에너지 중 가장 큰 비중을 차지하는
 데(약 30%), 열차가 출발할 때 걸리는 출발 저항, 경사도를 오르내릴
 때 받는 구배 저항, 주행 중에 받는 주행 저항, 곡선 구간을 돌 때 받는
 곡선 저항 등 다양한 저항 요인이 차량 무게와 관련이 있다(Kim et al.,
 2016). 이로 인해 어떤 패널을 어떻게 싣는지에 따라, 혹은 패널을 얼
 마나 효율적으로 활용하냐에 따라서 태양광 패널을 이동체에 부착하는
 것이 득이 될 수도, 실이 될 수도 있다. 따라서 이런 물리 모델을 고려
 하는 것은 매우 중요하다.

열차 가동 시, 가속 및 속도 유지를 위해 동력을 위한 에너지를 사용
 하게 된다. 뉴턴의 운동 법칙에 의한 식으로 표현하면 아래와 같다(Lee
 et al., 2011). (W: 열차 중량, TR: 열차 저항, MF: 열차 견인력, EF:
 유효견인력(가속력))

$$a = F/m = EF/W = (MF - TR)/W(m/sec^2) \quad (\text{Eqn. 2-20})$$

같은 힘일 때 가속도는 중량이 클수록 작아지기 때문에 원하는 출력
 을 내기 위해서는 더 큰 힘을 내야 한다. 더구나 열차 저항이 작아야 가
 속도가 잘 나오는데, 열차 저항 역시 W의 함수이다. 직선 주행 시 걸리
 는 주행저항의 식은 아래와 같다.(V는 속도, A, B, C는 기계, 차축, 공
 기, 진동에 의해 생기는 계수)

$$R = (A + B \cdot V)W + C \cdot V^2 \quad (\text{Eqn. 2-21})$$

경사면에서 중력을 이겨내고 올라갈 때 발생하는 구배 저항 R은 다음과 같다(i는 선로의 구배(gradient)).

$$R = W \cdot i \quad (\text{Eqn. 2-22})$$

이런 계산 요인을 종합적으로 고려하여 구한 전동기 소비전력(E)은 다음과 같다. (g는 중력 가속도, η_g 는 기어 효율, η_m 는 전동기 효율, p_m 는 전동기 역률, η_i 는 인버터 효율)

$$E = \frac{MF \cdot W \cdot V \cdot g}{\eta_g \times \eta_m \times p_m \times \eta_i} \quad (\text{Eqn. 2-23})$$

Eqn. 2-23을 통해 현행 소비전력은 차량 전체 중량을 증량하면 증량 비율에 비례하여 상승한다고 볼 수 있다. 이를 이용해, 부가적인 태양광 설치가 소비전력을 얼마나 증가시킬지 정량적 유추가 가능하다.

2.4 GIS 기반 일사량 계산 모델

GIS(Geographic Information Systems)란, 지리정보시스템의 약자로, 각종 데이터를 생성, 관리, 분석, 제작하는 공간 시스템을 총칭한다. GIS는 두 가지 종류의 자료를 다루는데, 지도, 이미지 파일 등 픽셀 단위 자료로 이루어진 래스터 (Raster) 자료와 점, 선, 면 등으로 나타내어지는 벡터 (Vector) 자료를 다루며, GIS 소프트웨어 내에서 자유롭게 상호 교차 가공이 가능하다. 여러 자료를 교차 가공하기 위해서는 벡터 자료를 일정한 해상도를 갖는 래스터 자료로 전환하는 것이 일반적이며, 소프트웨어 기능을 통해 벡터 자료가 겹친 부분의 래스터 속성값을 점, 선, 면 개체가 가져올 수도 있고, 지도 내 기하적 특성(길이, 둘레, 면적 등)을 계산해주시기도 한다. 추후 서술할 공간 정보 함수에 투입될 지도 자료를 구축하는 데에 GIS 소프트웨어가 활용된다.

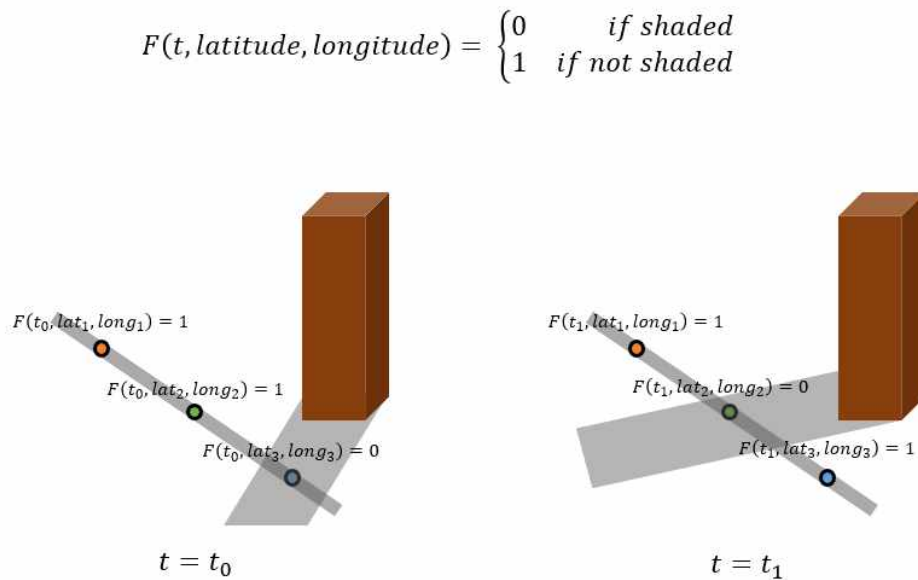


Figure 2-7. Binary function which determines whether spot is shaded or not. 그림과 같이, 측정 지점에서 일사량의 입사 여부를 결정하는 음영의

유무는 인근 지형 정보를 통해 결정된다. 특정 시간, 특정 위치에서 이동체 상의 음영 여부는 시공간 함수를 통해 인근 지역 정보에 대입해 알아낼 수 있으므로 측정 지역별 인근 지형 정보 구축이 필수이다. 지형 정보가 설정된 측점은 시공간(t, 위치) 데이터만 있다면 태양광 고도각 및 방향각 측정을 통해 Figure 2-7의 이진 함수 $F(t, \text{latitude}, \text{longitude})$ 의 값을 확인할 수 있다.

음영 여부를 결정할 정확한 지형지물 정보를 구축하기 위해서는 DSM(Digital Surface Model)이 필요하며, 이는 기본 지형 고도자료인 DEM(Digital Elevation Model)에 건물 데이터 높이 정보를 합산하여 제작한다. 다만 전국단위 DSM을 제작하면, 래스터 자료로 변환 시 연구에 있어 실제로 사용되는 면적 비율이 적고 작업 용량이 지나치게 커 연구의 효율성이 저하되므로 측정 지점 및 선로 인근 구역의 DSM만 잘라 사용하도록 한다.



(a)



(b)

Figure 2-8. An example of Solar Radiation Graphics function in ArcGIS (a) with result (b).

등간격으로 설정한 측정 지점은 해당 지점의 위경도 및 높이 값을 받아 온전한 태양광 입사 여부를 따진다. 추가로, 등방성 일사량 모델에서 산란일사량 값을 추산하기 위해 ArcGIS의 Solar Radiation Graphics를 이용하여 천구 상에서 가려지는 영역을 어안렌즈 뷰 형태로 도출할 수 있다. Figure 2-8의 (b)와 같은 형태의 자료가 나오며, 전체 영역 중 가려지지 않은 비율(r)을 계산하여 등방성 모델에서의 산란일사량을 구할 수 있다.

앞서 구한 직달일사량 값($DNI \times \alpha$)과 산란일사량($DHI \times r$)을 합한 결

꺾값이 총 받은 일사량이 되며, 이것을 한 지점에서 계산하며, 다음 측정 지점 이동 시 변경된 시공간 자료를 통해 태양 상대 위치가 변하므로 앞서 진행한 연산을 마지막 지점까지 동일하게 수행한다.

이에 더해, 최종적인 발전량 계산은 적절한 인버터 및 패널의 성능을 가정하여 아래의 발전량 식에 대입함으로써 가능하다. 발전량 계산 수식은 NRC (Natural Resources Canada)의 RETScreen software 수식을 참고했다.

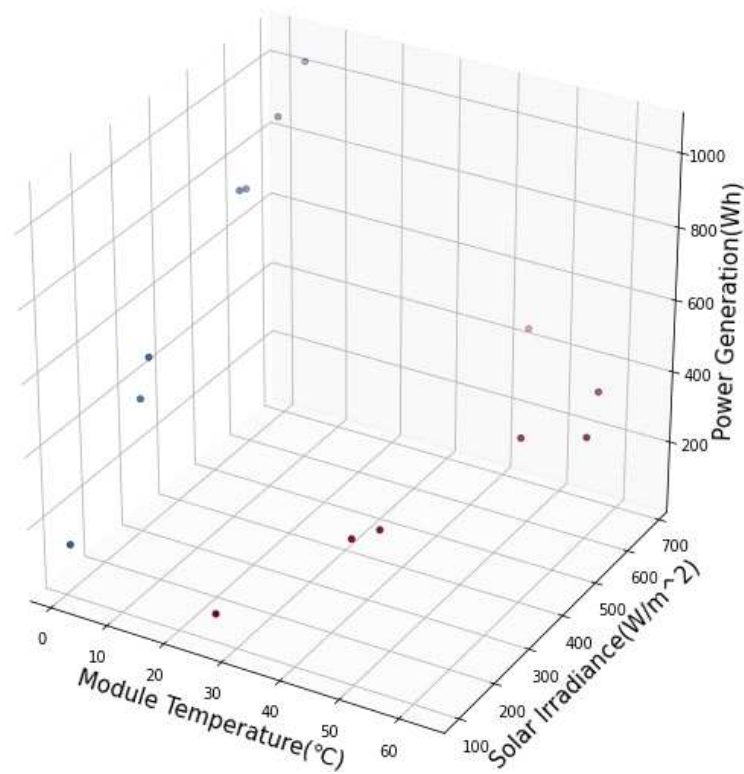


Figure 2-9. Photovoltaic power generation with given module temperature and solar irradiance (Shin et al., 2009).

$$E = H_t \times S \times \eta_\gamma \times \eta_i \times [1 - \beta_p \times (T_c - 25)] \times (1 - \lambda_p) \times (1 - \lambda_c) \quad (\text{Eqn. 2-24})$$

E 는 실제 발전량(kWh), H_t 는 단위 면적당 입사한 전체 일사량

(kWh/m²), S 는 태양광 받는 패널 면적, η_p 은 패널 셀 모듈의 전환 효율, η_i 는 인버터 전환 효율, β_p 는 온도 계수, T_c 는 패널 셀 평균 온도 (°C), λ_p , λ_c 는 각각 패널과 인버터의 손실 계수이다(RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre, 2005). 온도의 경우 패널 운용의 최적 온도는 섭씨 25도로 알려져 있기에(Zhang et al., 2017) 온도에 의한 효율 손실을 표현하고자 ($T_c - 25$)가 들어가 있다. 모듈 자체로만 한정하여 보면 동일한 일사량이 적용될 시 모듈의 온도가 낮을수록 더 발전량이 늘어남을 실험 데이터를 도시한 3차원 산점도를 통해 확인할 수 있다(Figure 2-9.). 적절한 온도 가정이 있을 경우 설계한 알고리즘에서 전력량 E 는 오로지 H_t 에 대한 함수로 나타내어진다.

3. 연구 방법론

3.1 노선 선정 및 이동체 정보

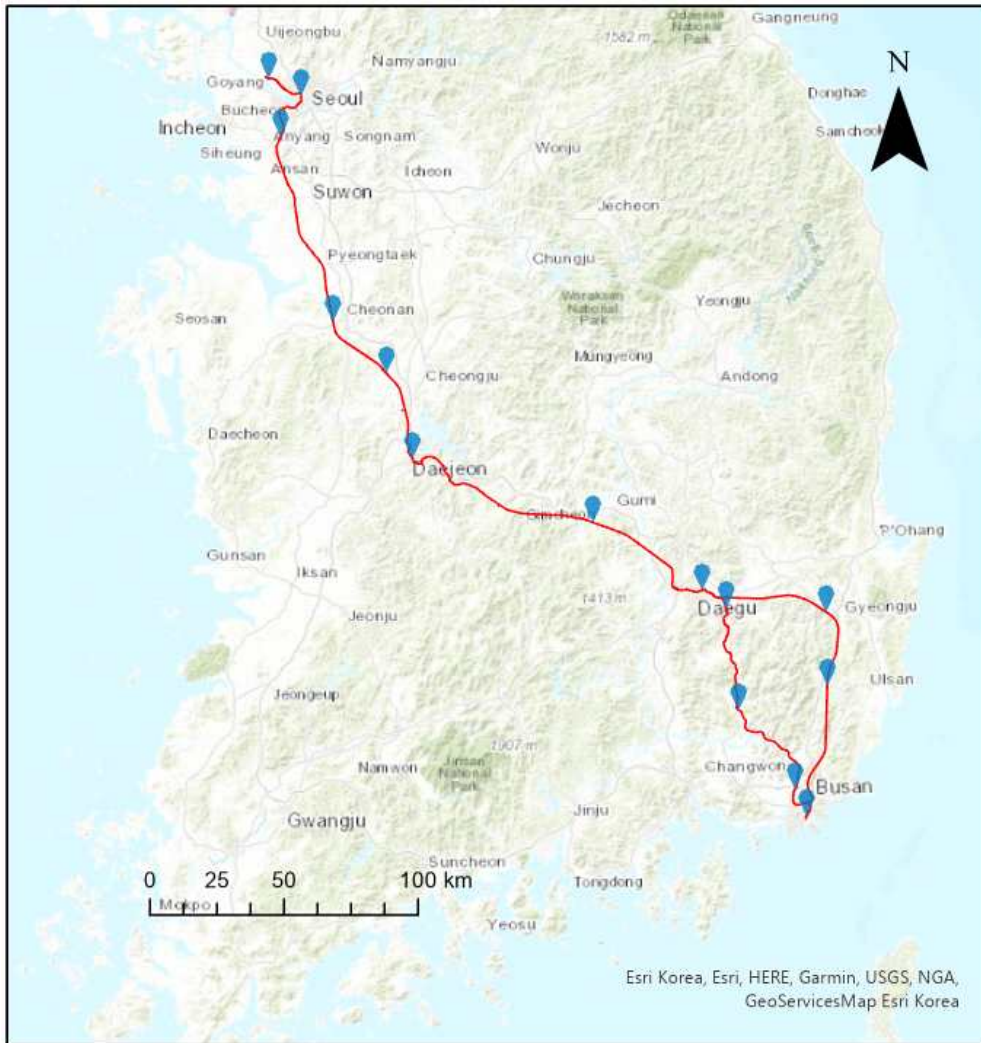


Figure 3-1. KTX-Sancheon Gyeongbu line and its stations. (Up train: passing Ulsan or Gupo toward Seoul/Down train: passing Ulsan from Seoul) (Base map from Esri Korea).

앞서 언급한 배경이론을 토대로, 고속열차인 KTX 노선을 지정하여 시뮬레이션을 진행하고자 한다. 선정된 노선은 KTX-산천 경부선 왕복 구간으로, 해당 노선은 2009년 10월 정식 운영을 시작했으며 (Han,

2010) 왕복 노선 기준 총 12개의 역을 중간 정차역으로 지나게 된다. 일부 시간대에는 출발 및 종착역이 서울이 아닌 행신으로 지정되어 있어 고려해야 할 전체 노선 길이는 서울-부산 구간 421.3472km가 아닌 행신-부산 구간 436.6731km이다. 부산으로 내려가는 하행선은 울산을 경유하는 하나의 경로만 가지지만, 서울 방면으로 올라오는 상행선은 울산 방향 루트와 밀양 방향 루트 두 가지가 존재한다.

열차 옥외가 가장 이상적으로 설치하기 좋은 유희 공간이며, 해당 면적은 도합 약 570 m²이고, 2 m² 기준 통상 400 W의 용량을 가지는 패널을 넘치지 않게 지붕에 설치할 경우 총 75.2 kW의 용량을 설치할 수 있다(승객차에 1량 당 18개, 동력차에 1량당 22개, 총합 188개).

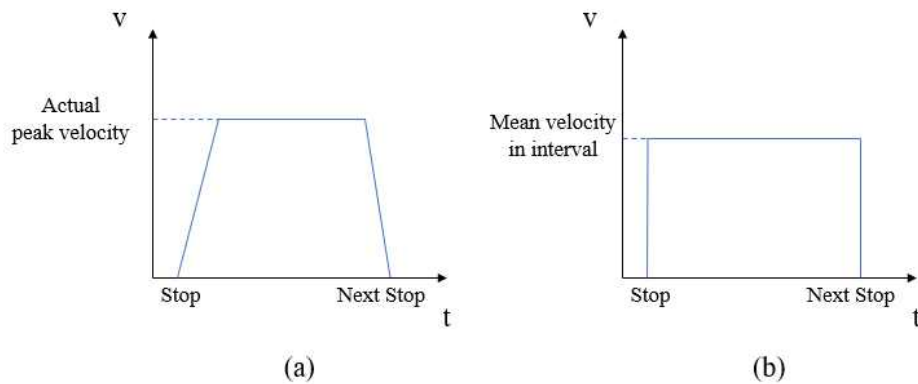


Figure 3-2. Velocity model of train. (a) actual velocity model of train, which has acceleration interval and deceleration interval. (b) assumed velocity model which has constant speed while moving from station to station.

실제 열차 모델에 계산 편의를 위해 몇 가지 가정을 전제했다. 실제 열차는 가속 구간과 감속 구간이 존재하지만, 전 운행구간 운행 시간 동안 가속도가 없는 등속도를 가정하여(Figure 3-2. (b)), 등간격으로 나누어질 선로의 지점 간의 시간 변화량 값을 같도록 설정했다. 등속도로 설정해야 추후 일사량 총합 계산할 때 시간 변화량을 일일이 반환할 필요가 없어 계산 소요가 적다. 이때 속도 개념에서 평균 속도(Average

speed, 정차 시간을 제외한 운행 시간 대비 속도)와 표정속도 (Scheduled speed, 정차 시간 포함한 속도)를 구분해야 한다.

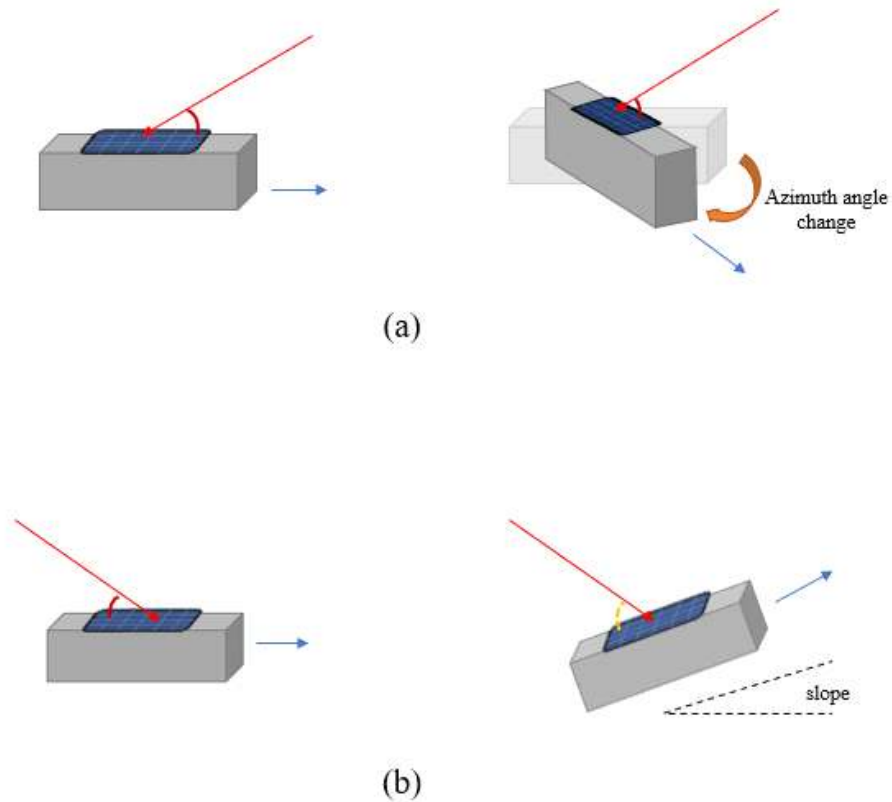


Figure 3-3. Variation of inclination of solar incident. (a) relative solar altitude angle on object being irrelevant to object's azimuth angle, if panel installed horizontally. (b) change of relative solar altitude angle on object, as object passing through a slope.

또한, 실제로는 곡면 형태를 띠는 열차 지붕에 태양광 패널을 부착하거나, 내장 설계를 할 경우, 각 시점의 열차 진행 방향과 이에 대응하는 패널 각에 따라서 태양광을 받는 양이 달라지고 지표 반사량 등의 수식이 추가되는 등 복잡한 일사량 계산식이 개입하므로(Hailu & Fung, 2019), 태양 방향각과 일사량 계산이 무관해져 계산이 비교적 단순하도록 열차 지붕에 설치하는 패널은 수평으로 설치되며, 선로의 경사도를

무시하여 항상 경사각 0도를 유지하는 것으로 가정했다(Figure 3-3.).

Table 3-1. Details of the train adopted in this study(Hyundai Rotem, 2014).

Train Attributes	
Name	KTX-Sancheon
Total length	201 m (8 × passenger cars, 2 × power driving cars)
Single car length	18.7 m (Passenger car) 22.7 m (Power driving car)
Height	3.78 m in average
Width	2.97 m (Passenger car) 2.81 m (Power driving car)
Total weight	403 ton (without passengers)
Average energy consumption per single drive (by TPS Simulation)	11,633kWh at peak speed 300km/h, average speed 208.5km/h, scheduled speed 189.6km/h 11,960kWh at peak speed 350km/h, average speed 210.3km/h scheduled speed 191.1km/h

Table 3-2. Route Information.

Route information	Seoul to Busan	Busan to Seoul
Total rail distance	Haengsin - Busan : 437km Seoul - Busan : 421km	
Tunnel distance	Haengsin - Busan : 160km Seoul - Busan : 157km	
Exposed distance	Haengsin - Busan : 277km Seoul - Busan : 264km	
Timetable	6:05 (Seoul to Busan) 9:30 (Seoul to Busan) 13:00 (Seoul to Busan) 13:55 (Haengsin to Busan, Monday to Thursday only) 14:30 (Seoul to Busan) 15:25 (Seoul to Busan, Friday to Sunday)	9:44 (Busan to Seoul, Monday to Thursday only) 10:06 (Busan to Seoul, Friday to Sunday only) 13:29 (Busan to Seoul) 17:09 (Busan to Seoul,) 17:17 (Busan to Haengsin) 18:30 (Busan to Haengsin) 18:43 (Busan to Seoul)
Total running time	Shortest : 141 min. (15:25~17:46) Longest : 167 min. (13:00~15:47)	Shortest : 149 min. (9:44~12:13) Longest : 194 min (18:43~21:57)
Stations on the way	Haengsin, Seoul, Gwangmyeong, Cheonan-Asan, Osong, Daejeon, Gimcheon-Gumi, Dongdaegu, Shingyeongju, Ulsan, Busan	Busan, Gupo, Milyang, Gyeongsan Ulsan, Shingyeongju, Dongdaegu, Gimcheon-Gumi, Daejeon, Osong, Cheonan-Asan, Gwangmyeong, Seoul, Haengsin

3.2 GIS를 이용한 노선 인근 지형지물 구축

열차의 노선상의 일정한 간격의 측정점을 두고 일사량을 측정하기 위해서는 해당 위치의 위경도 및 고도 정보와 인근 지형지물에 의한 음영 여부를 판단하는 것이 중요하다. 해당 작업을 위해 공간 정보를 처리하는 GIS 소프트웨어인 ArcGIS를 사용하였다.



Figure 3-4. Process for DSM. (a) ASTER GDEM (Basic DEM) (b) building polygon (c) DSM made by adding height of rasterized (b) to (a)

지형지물을 나타내는 DSM을 구축하고자 전 지구 범위의 고도자료를 제공하는 Aster GDEM 자료를 남한 전 지역을 대상으로 사용한다. 국가공간정보포털(NGII)에서 층 데이터가 포함된 한국 건물 데이터를 취득하여 평균 건물 층고인 2.7m를 층수와 곱한 후 래스터화하여 DEM에 합성함으로써 전국단위 DSM을 완성시켰다(Figure 3-4.).

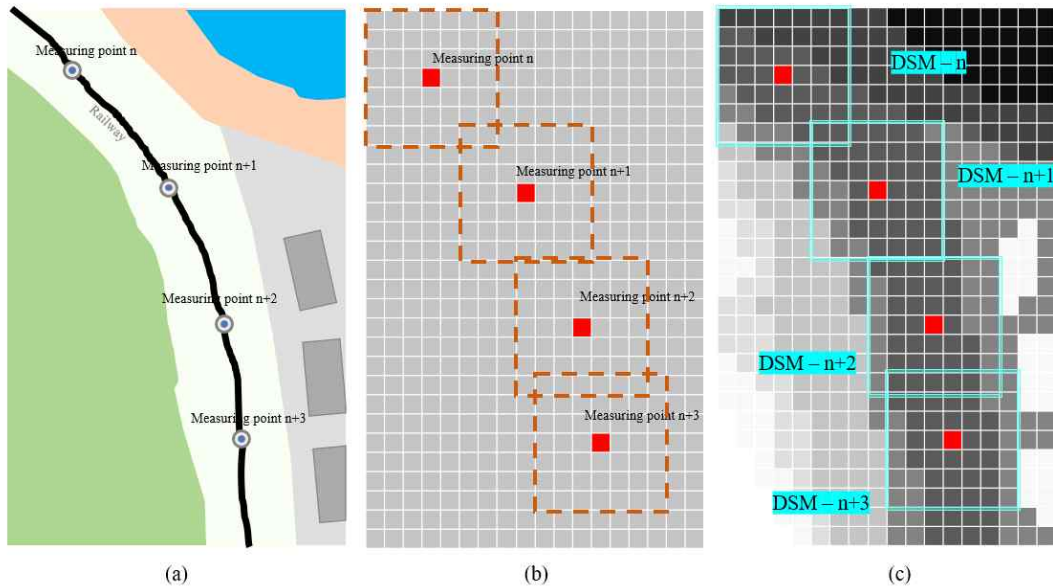


Figure 3-5. Process of extracting DSM around measuring point from actual railway map and original DSM. (a) simplified ambient environment map of railway and its equal-interval-measuring points. (b) rasterized measuring point and DSM range. (c) regional DSM extraction from original DSM.

측정 지점 생성 및 공간 정보 추출을 위해 국가 공간정보 포털(NGII)에서 KTX 경부선에 해당하는 철도중심선 벡터 파일과 터널 벡터 파일을 받아 태양광이 차단되는 터널 구간을 배제한 후 ArcGIS 툴을 이용해 약 100m 간격의 균일한 지점으로 측정 지점을 나누었다. 각각의 지점의 위치정보를 추출하고, 계산량을 줄이기 위해 인근 3km 내부 영역에 DSM만을 추출하여 음영 여부 이진 함수에 사용하고자 하였다. DSM은 ASCII 파일로 측정 지점 개수만큼 만들고 측정 지점에 대한 공간 정보 속성 파일(위경도 및 인접 지점들과의 거리 데이터, 지점에서 천구가 가려진 비율)을 따로 만들어서 해당 공간에서의 태양 상대 위치 파악 및 음영 여부 판단을 동시에 진행할 수 있도록 설정하였다.

3.3 일사량 모델 및 기상 모델 적용

일사량 모델은 등방성 모델을 가정하고, 지점별 천구를 추출하여 등방성 산란일사량 모델을 통해 실제 값과 유사한 일사량 계산을 진행한다. 음영 여부 판별을 통한 직달일사량 값과 가려지지 않은 천구 상 면적에서 받는 산란일사량 값을 합쳐 해당 지점에서의 총 일사량 값을 계산할 수 있다. 이렇게 계산할 경우 기존의 직달일사량만 고려하여 계산했을 때 보다 더 정밀한 발전량을 기대할 수 있다.

Cloud Cover 값이 주어질 경우, 이를 Cloud Cover Factor 값으로 변환함으로 해당 기상 조건에서의 DNI와 DHI 비율로 치환할 수 있어야 한다. 앞선 Eqn. 2-19 에서 P, Q, R 값을 알면 CCF 및 직달일사량, 산란일사량 비를 비교적 쉽게 구할 수 있는데, Kimura & Stephenson의 연구 배경이 된 캐나다 오타와 지역에서 활용된 계수 값(하절기 $P=0.96$, $Q=0.033$, $R=-0.0106$, 춘절기 $P = 1.06$, $Q=0.012$, $R=-0.0084$, 동절기 $P=1.14$, $Q=0.003$, $R=-0.0082$)을 활용하여 계산했다.

시뮬레이션을 실행할 당시의 운량 등 기상 상황을 알 경우, 기상변수 고려 옵션을 선택할 수 있도록 한다. 기상 정보는 가까운 미래나 현재 정보가 필요할 경우 직접 입력할 수도 있지만, 데이터 크롤링을 통해 실시간 기상청 예보 정보를 가져올 수 있고, 긴 시간 범위에서 연 단위 발전량 등의 계산을 목적으로 계산하고 싶다면 한국의 권역별 표준 기상 연도(TMY) 데이터를 이용하여 이를 활용할 수 있다.

3.4 이동체 물리 모델 적용

위와 같이 패널을 가정하여 인버터 모델과 같이 설치할 경우, 총 188개의 패널을 설치하므로 패널과 인버터 무게 총합은 3.884 ton으로, 기존 빈 열차의 중량의 약 0.96%에 해당한다. 따라서 태양광 패널을 설치할 경우 기존의 사용되던 전력량에 비해 증가한 중량의 효과와 저항의 효과로 약 0.96% 이상의 추가 전력 손실이 예상된다.

에너지에 영향을 주는 요인으로는 속도와 저항(경사, 커브 등)이 추가로 존재하지만, 계산의 복잡성으로 인해 알려진 일정한 속도와 저항에 대한 소비 에너지량 레퍼런스 값을 찾은 후 알려진 수식에 따라 적절히 적용하도록 한다.

Table 3-3. Panel and Inverter Assumption

Panel Attributes	
Model name	LG400S2W-U5
Geometry	2,024(mm) × 1,024(mm) × 40 (mm)
Power capacity (kW/unit)	0.4
Efficiency (%)	19.3
Module weight (kg/unit)	20.3
Nominal Operating cell temperature (°C)	45 ± 3°C
Temperature coefficient (%/°C)	-0.35
Losses (%)	2
Inverter Attributes	
Model	SSE-S050JK
Efficiency (%)	98.6
Capacity (kW/unit)	56
Inverter weight (kg)	68
Losses (%)	0

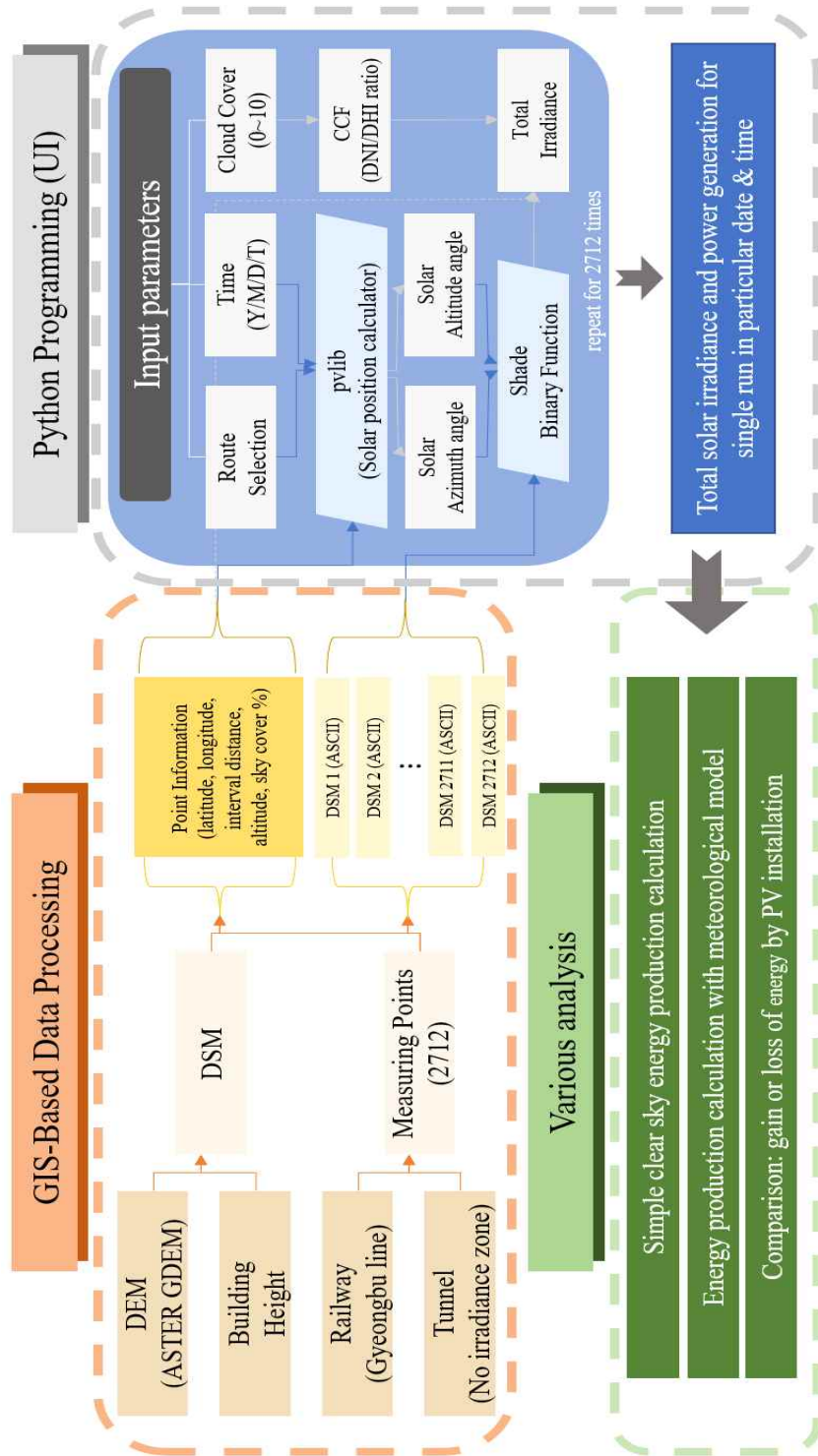


Figure 3-6. Design of the whole processes in this study.

3.5 파이썬 GUI 프로그래밍

방법론을 종합하여 알고리즘을 도시하면 Figure 3-6.와 같다. GIS를 통해 측정 지점 개수에 맞는 DSM과 해당 지역의 위치 및 속성값을 추출한 후, 후반부 알고리즘은 Python 프로그래밍을 통해 구현하였다. 전체 알고리즘의 일부가 될 다양한 매서드(UI 클래스 내 함수)를 코딩하고, PyQt 라이브러리를 이용해 UI 창에서 사용자가 계산 알고리즘을 활용할 수 있도록 했다.

프로그램을 실행하기 전 기본 설정 자료를 및 변수를 정해두었는데, GIS 소프트웨어에서 추출한 ASCII 형식의 DSM 2712개, 지점별 위치 특성 및 노선 노면 거리, 노선 내 스케줄 별 출발시각, 정차지 도착시각 및 정차 시간 간격을 미리 사전 변수 설정을 해 두었다. 특별히 노선 및 날짜와 관련한 변수는 추후 UI 내 매서드 구동 시 필요할 때 언제든지 활용할 수 있도록 UI Class 내의 self 변수로 지정되도록 설정해 두었다.

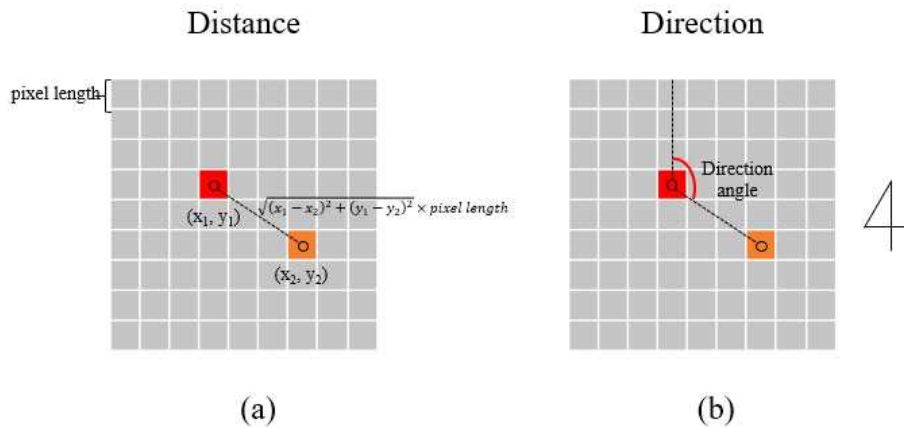


Figure 3-7. Principle of Distance function and Direction function.

먼저, 기본 기능으로 다른 함수를 보조하는 함수를 제작했다. 두 픽셀 간의 유클리드 거리를 구해주는 Distance 함수와 기준 픽셀에 대한 다

큰 픽셀의 정복을 기준으로 시계방향의 방향각을 재는 Direction 함수를 구축하여 다른 기능 제작 시 보조로 활용했다(Figure 3-7.).

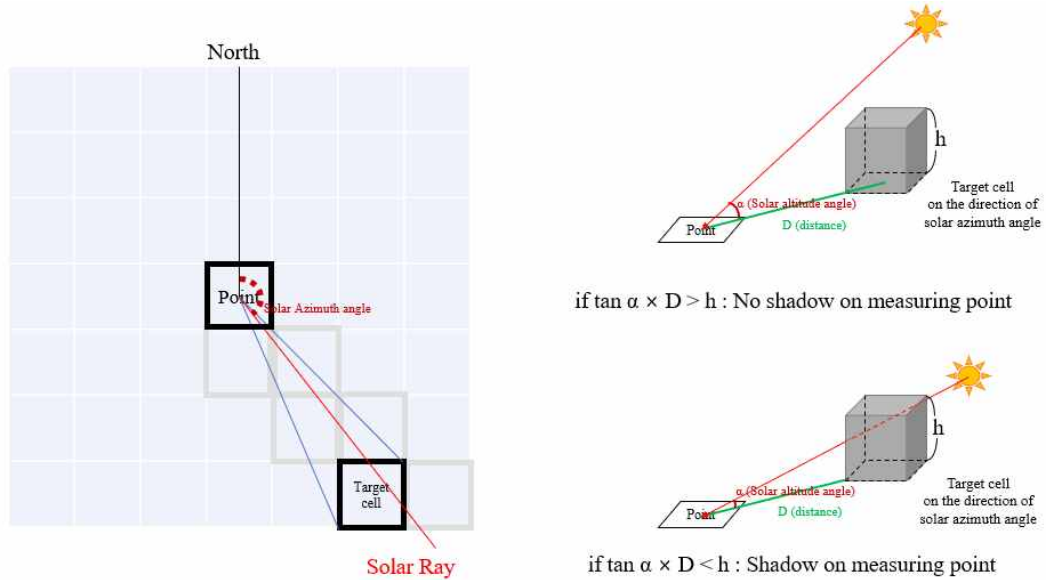


Figure 3-8. Schematic of Ray function in UI.

Figure 2-7.에 해당하는 음영 여부를 판별하여 음영이 지면 0, 음영이 지지 않으면 1을 반환하는 이진 함수 Ray를 만들었다. 함수가 받는 변수는 DSM 조각과 측정 대상 좌표, 태양광 방향각 및 고도각이다. 구축한 DSM 각 측정 지점에서 만들어진 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 의 중심 픽셀이 측정 지점이므로 함수는 래스터 형식의 DSM을 list 형식으로 받아 해당 측정 지점 인근 셀 중 태양광 방향 선상에 걸쳐있는 모든 픽셀을 전부 검사한다. 이때 태양광 방향에 걸쳐있는지를 확인하기 위해 픽셀의 중심점을 기준 삼는 것이 아니고, 픽셀의 경계점 위치를 범위로 설정한다. 따라서 태양광 입사 범위로 설정될 때 사용되는 위치는 검사대상 픽셀의 중심점이 (X, Y) 일 때, 전체 검사범위를 $(X \pm 0.5, Y \pm 0.5)$ 4개의 점 중 가장 중심점에 대해 큰 Direction 각을 갖는 지점과 가장 작은 Direction 각을 갖는 지점 두 개를 선택하여 태양광 방향각 포함 여부를 확인한다. 해당 범위에 들어가 있는 모든 픽셀은 중심점 고도자료와의 고도차가 계산되며, 이 때 검사하는 픽셀의 고도가 중심점보다 클 경우

Distance 함수에 의해 계산된 픽셀 간 거리와 고도차의 arctan 연산을 통해 나온 검사 대상 픽셀의 최고점을 바라보는 가상선과 수평면이 이루는 각을 측정하여 해당 방향에서 진행되는 태양광이 픽셀의 지형지물에 차단되는지를 판단할 수 있다(Figure 3-8.). 기존 연구에서 사용된 코드 성능 개선을 위해 태양광 방향각에 따라 DSM의 중심점으로부터 4개의 영역을 분리하여 태양광이 지나가는 영역의 사분면 안에 있는 픽셀들만 검사대상으로 진행, 계산량을 최소 75% 줄였다.

Michalsky 알고리즘과 같은 각종 천체 움직임을 고려하여 태양 상대 위치를 반환하는 기능을 사용하기 위해, 태양광 위치 알고리즘(Solar Position Algorithm, SPA)을 담고 있는 pvlib 라이브러리 하위 패키지 'solarposition' 을 활용했다. 패키지 내의 'get_solarposition' 기능은 데이터 프레임 연산을 수행할 때 유용한 pandas 패키지의 DatetimeIndex(날짜 및 시간, 기준 경도 변수)을 받고 위도, 경도, 고도 정보를 받으면 해당하는 시공간에서 태양광이 가지는 천정각(Zenith angle), 겉보기 천정각, 고도각, 겉보기 고도각, 방향각, 균시차까지 계산된다. 순차적으로 측정 지점 2712개에 대한 연산을 진행할 시 각 지점의 위도, 경도 및 고도 값은 지정되어있으므로 정확한 시간 정보만 입력이 된다면 Ray 함수에 투입할 태양광 방향각 및 고도각을 구할 수 있다. 이때, 현지점 측정 지점에서 들어오는 태양광이 중요하므로, 태양의 실제 위치가 아닌 겉보기 위치를 반영해야 하며, Ray 함수 및 실제 계산에는 겉보기 고도각을 선택해야 한다.

구간별 평균 속도를 반환하는 VeloEach 함수와 출발시각을 기준으로 시간이 얼마나 지났는지 판단할 수 있도록 한 TrainPassTime 함수를 만들었다. 열차 모델을 운행 중 가속 및 감속 구간이 없는 등속도 모델로 가정하였고, 구간별 거리 당 소요 시간이 다르므로 각 구간별 평균 속도를 구하면 측정 지점 간격 간의 일정한 시간 변화량을 구할 수 있고, 구간별 시간 차원을 곱해주어 입사한 태양에너지의 양(Wh)을 구할 수 있다. 초기 설정에서 노선 각 시간표 당에 존재하는 정차지의 정차

시각과 정차 지속 시간을 알면, 두 정차지 간의 거리와 시간 간격이 주어지기 때문에 정차지 사이의 두 측정 지점 간 운행 시간 간격(Δt_n)을 반환할 수 있다. 간혹 터널 등의 노선 분절 지역으로 간격이 일정하지 못한 영역이 발생할 수 있으므로 VeloEach에서 설정한 속력을 적용하여 해당 거리까지 갔을 때의 경과 시간을 정확하게 입력할 수 있도록 하는 TrainPassTime을 통해 태양 위치 계산을 위해 'get_solarposition'에 입력할 지점별 시간을 비교적 정확하게 구할 수 있다.

Cloud cover 값을 입력받아서 해당 값을 DNI 식과 CCF 식에 대입하는 함수 CloudCoverFactor 함수를 만들었다. 이 함수는 DNI 선형 감소를 통해 DNI 비중을 구하고, CCF 식의 P, Q, R 3개의 계수 값을 대입하여 전체 GHI 값도 구할 수 있으며 이는 월 선택에 따라 계수 설정값이 달라진다. 이 함수는 기상 모델을 적용할 경우 선택적으로 사용할 수 있도록 UI Class 상에 설정되어 있다.

이 모든 기능을 아우르는 최종 기능 함수 SolarTrainCalculation 함수를 제작하였다. 우선 계산 대상 지점에 따른 DSM ASCII 파일을 파일 경로에서 소환하고, list 형태의 자료로 바꾼 후, 각 지점의 전력량 계산을 누적 계산하기 위한 시간 간격(Δt)을 계산하고, pvlib의 'get_solarposition'를 통해 태양 겹보기 고도각과 방향각을 구하여 Ray 함수에 넣고 직달일사량 도달 여부를 선택한다. 이후 아래 계산식을 통해 직달일사량 도달 여부를 계산한다. 전체 n개의 지점에 대해 직달일사량을 합산하고자 하면 음영 판별 이진함수 $F(t_n, s_n)$ 를 이용해 아래와 같은 수식으로 적용하면 된다(t_n 는 n 번째 지점의 시간 정보, s_n 는 n 번째 지점의 공간 정보, $(DNI)_n$ 는 n 번째 지점에서 태양 고도각에 의한 감쇄($\sin \alpha$)와 기상변수의 영향을 거쳐 최종적으로 입사하는 직달일사량 값).

$$\sum_{n=1}^k (DNI)_n F(t_n, s_n) \Delta t_n \quad (\text{Eqn. 3-1})$$

기상 모델의 운량값을 적용하게 될 경우 CCF가 나오게 되고, 수식에
서 $(DNI)_n$ 값이 변동할 것이다.

이후 CCF 값에 의해 계산된 DHI (= CCF-DNI)와 지점에서의 천구
상 지형지물로 가려지지 않은 비율을 곱하면 실제 들어오는 일사량을 구
할 수 있다. 이를 역시 식으로 나타낼 경우 다음과 같다. ($(DHI)_n$ 는 n
번째 지점에서 기상변수와 태양 고도각에 의한 조사량 차이, 가려진 비
율을 고려해서 나온 산란일사량 값)

$$\sum_{n=1}^k (DHI)_n \Delta t_n \quad (\text{Eqn. 3-2})$$

두 DNI와 DHI 총량을 합산하여 열차가 한 노선을 거치는데 얼마큼
의 일사량을 받는지에 대한 계산식을 완성하였다.

이후 PyQT 및 UI 디자인 기능인 QtDesigner를 사용하여 아래
Figure 3-9.과 같은 인터페이스를 구성했다. UI 콤보박스를 통해 선택
할 수 있는 옵션은 노선, 날짜, 해당 날짜 운영 노선, 운량 등 4가지이
다. 가장 윗줄에 있는 콤보박스인 경로 선택 옵션은 현재 연구에서 구축
한 노선이 상행선과 하행선 두 가지 루트이기 때문에 Seoul to Busan
옵션과 Busan to Seoul 옵션 중 택일하여 시뮬레이션을 수행할 수 있
다. 아래의 연월일 설정을 통해 측정 대상 날짜를 지정할 수 있다. 출발
일자에 따라 요일이 결정되며 내장 모듈 datetime을 통해 계산된 요일
에 따라 해당 요일에 맞는 일정 시간표가 시간표 선택 콤보박스에 활성화
화하게 된다(KTX 산천 기준, 월~목 스케줄과 금~일 스케줄이 동일).
아래 Cloud cover를 설정하는 창에서 체크박스로 옵션 선택 시 구름 상
태 역시 입력할 수 있다. 위의 각종 변수 설정이 완료되었으면, 계산

(Calculate) 버튼을 눌러 해당 변수에 맞게 일사량 총량 계산이 이루어진다.

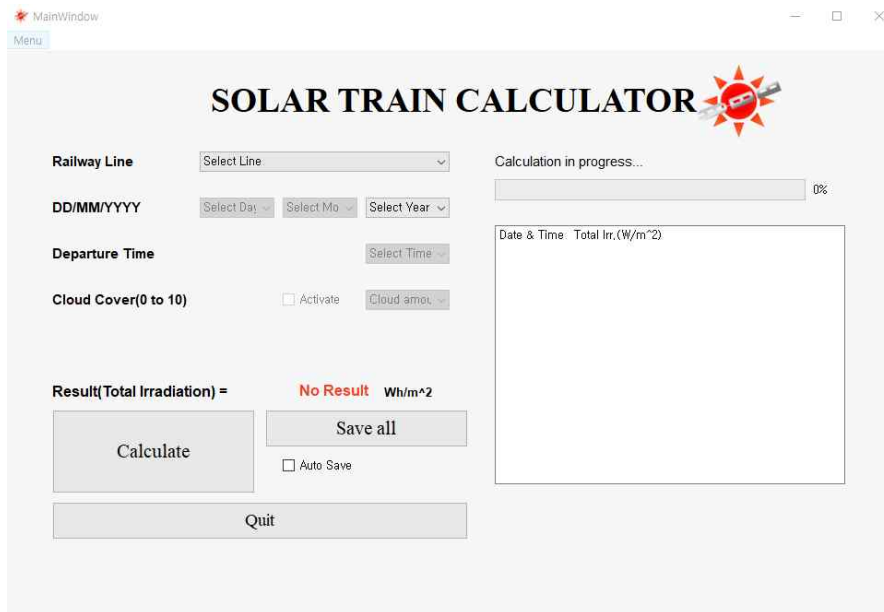


Figure 3-9. Initial state of UI design.

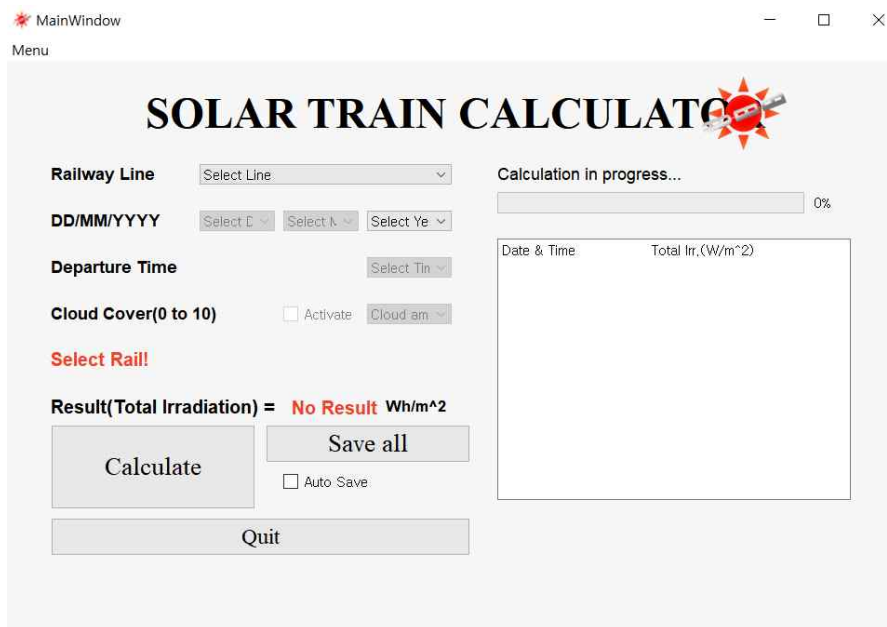


Figure 3-10. Error message coming up for any of combobox is not selected.

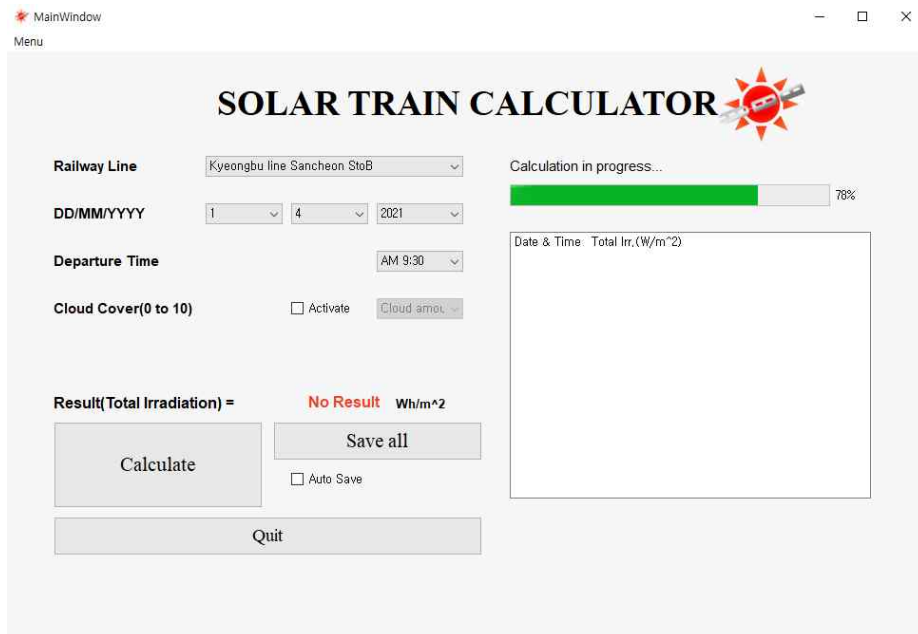


Figure 3-11. First step of the calculations in progress after finishing proper combobox setting.

계산을 진행할 경우, Progress bar에서 총 지점 개수(2700여 개) 중 누적 합산 계산이 최종적으로 완료된 개수의 비율을 백분율로 나타내어 진행 현황을 표기하게 된다.

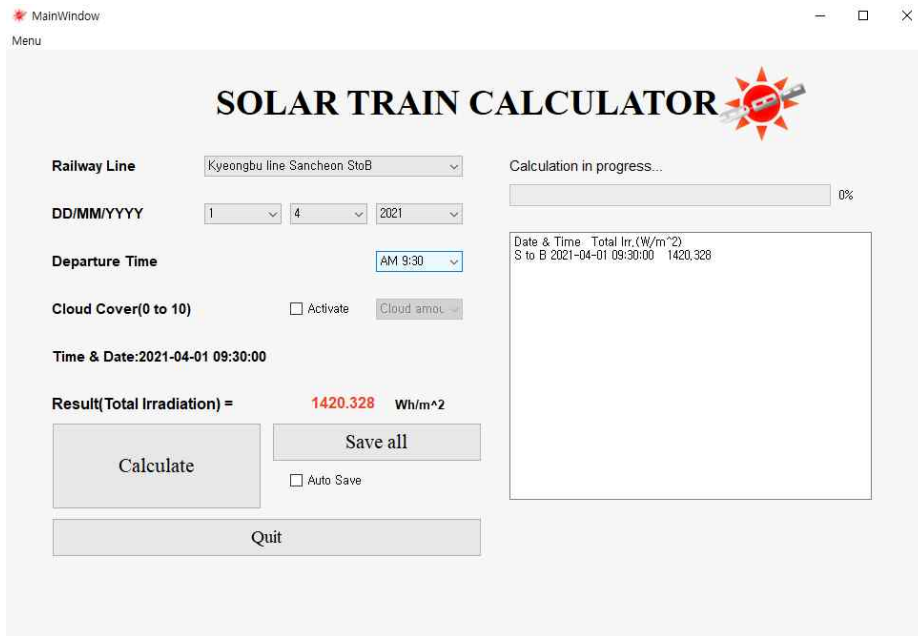


Figure 3-12. First result recorded on text browser.

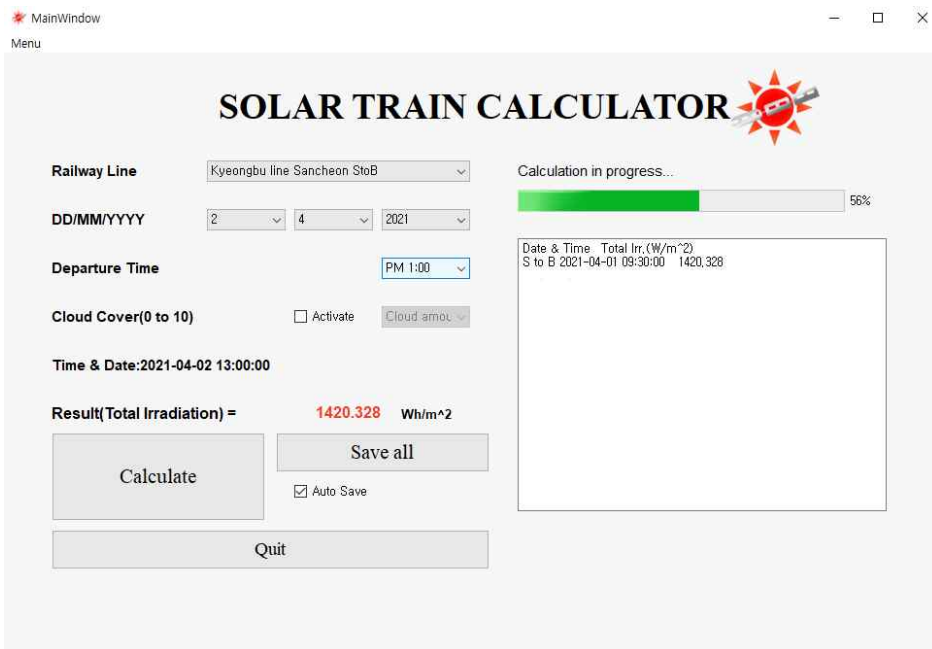


Figure 3-13. Second calculation in progress.

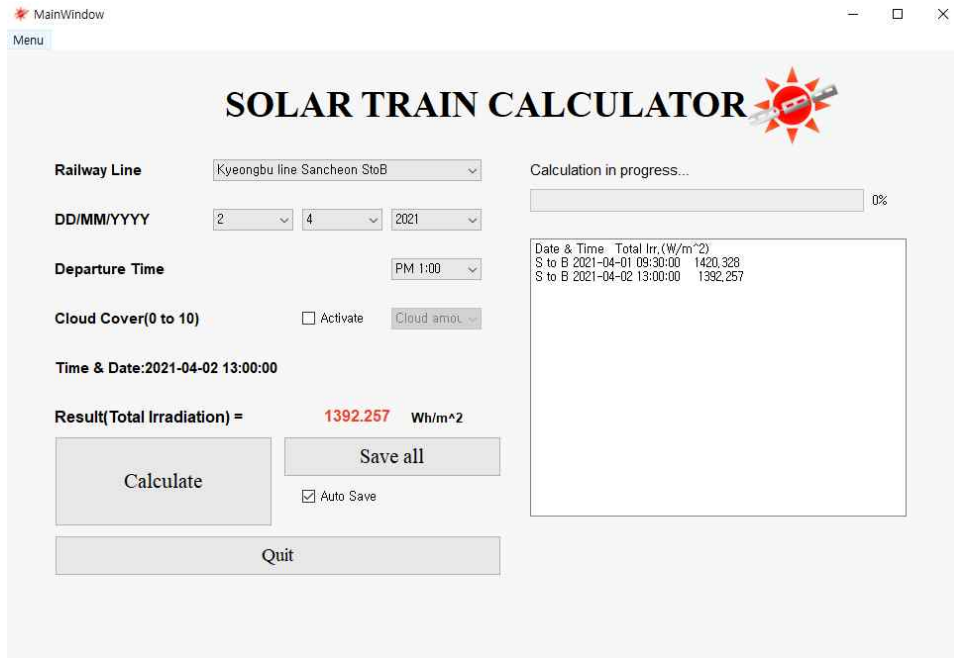


Figure 3-14. Second calculation result accumulated in text browser.

Auto Save 모드를 켜고 다음 계산을 진행할 경우, 텍스트 브라우저에 경로, 날짜, 시간, 총 일사량이 출력된다(Figure 3-13.). 추가 계산을 지속하고 Auto Save 모드를 선택할 시, 계속해서 누적된 기록이 텍스트 브라우저에 나타난다(Figure 3-14.).

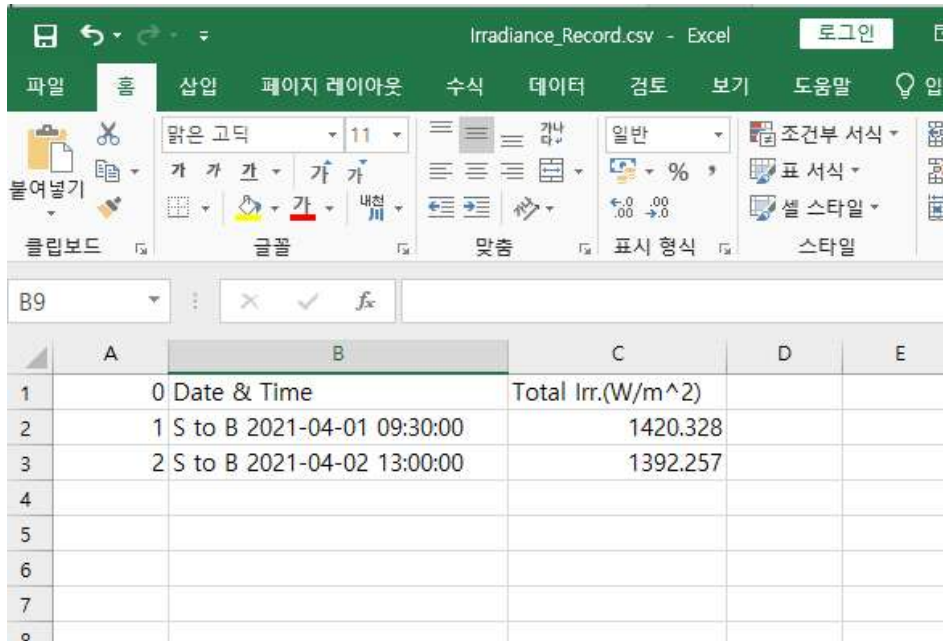


Figure 3-15. Creating CSV file containing record history by clicking 'Save all' button.

모든 목표로 한 계산 시행이 종료된 후 Save all 항목을 체크할 경우 계산 결과들이 자동적으로 Figure 3-15와 같이 누적 저장된다. 위의 방법을 토대로 필요한 날짜에 대한 연산을 마친 후 엑셀 등을 활용해 누적 연간 일사량, 평균 일사량, 전력량 등을 계산할 수 있다.

전력량 계산은 Table 3-3. 에 제시된 모듈 스펙(효율 $\eta_r = 19.3\%$, $\beta_p = -0.35$, $\lambda_p = 2\%$, 개수 188개에 대한 총 면적 389.64 m^2)과 인버터 스펙(효율 $\eta_i = 98.6\%$, $\lambda_c = 0\%$)을 참고하였다. 수식으로 나타낼 경우 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 E &= H_i \times 398.64 \times 0.193 \times 0.986 \times [1 - 0.0035 \times (T_c - 25)] \times 0.98 \\
 &= 72.67 H_i \times [1 - 0.0035 \times (T_c - 25)]
 \end{aligned}$$

(Eqn. 3-3)

계산 시 필요한 변수는 입사한 총 일사량, 셀 온도 두 가지이다. 일사량은 UI를 통해 계산되어 나오며, 온도는 표준기상연도를 참고하거나,

월별 평균 온도를 적용하여 계산하였다.

아래는 지난 20년간 한국의 월별 평균 온도표이다. 전국의 관측지점별 온도를 크리깅하여 전국단위 시간대별 온도 지도를 만든 후 이를 속성값에 부여하여 계산하는 것이 가장 정확한 방법이겠으나, 계산량 및 저장 데이터양이 지나치게 많아지는 관계로 주요 정차역 기준 14개의 구역의 지난 30년간 월별 평균 온도를 구해 (Table 3-4.) 해당 날짜에 맞게 대입하는 방식을 선택했다.

Table 3-4. Average monthly temperature of 14 train stops in past 30 years (1991~2020) (KMA, 2021).

Stops /Month (° C)	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual avg.
Haengsin (Goyang-si, Gyeonggido)	-3.5	-0.4	5.2	11.8	17.4	22.0	24.8	25.4	20.8	13.8	6.3	-1.2	11.6
Seoul (Jung-gu, Seoul)	-3.3	-0.4	5.1	11.7	17.6	21.9	24.3	25.2	20.7	14.3	6.4	-1.2	11.9
Gwangmyeong (Gwangmyeong-si, Gyeonggido)	-1.1	1.6	6.7	12.8	18.7	23.3	25.6	27.0	22.6	16.3	8.8	0.8	13.6
Cheonan-Asan (Asan-si, Chungcheongnamdo)	-0.2	0.2	5.4	11.7	17.7	22.0	25.2	26.0	21.1	14.5	7.3	0.3	12.5
Osong (Cheongju-si, Chungchungbukdo)	-1.5	1.0	6.5	13.0	18.7	23.0	25.8	26.2	21.3	14.6	7.5	0.6	13.1
Daejeon (Dong-gu, Daejeon)	-1.0	1.4	6.6	13.0	18.5	22.7	25.5	26.0	21.2	14.6	7.7	1.0	13.1
Gimcheon-Gumi (Gimcheon-si, Gyeongsangbukdo)	-0.1	1.2	6.7	13.0	18.3	22.4	25.5	25.7	20.5	13.8	7.0	0.4	12.8
Dondaegu (Dong-gu, Daegu)	1.1	3.5	8.4	14.5	19.7	23.4	26.3	26.7	22.1	16.2	9.4	3.0	13.7
Shingyeongju (Gyeongju, Gyeongsangbukdo)	0.3	2.3	7.4	12.7	18.4	21.9	25.4	25.9	20.5	14.8	8.7	1.9	14.5
Ulsan (Ulju-gun, Ulsan)	2.4	4.3	8.4	13.7	18.2	21.6	25.2	26.0	21.7	16.5	10.4	4.3	14.4
Gyeongsan (Gyeongsan-si, Gyeongsangbukdo)	0.5	3.0	8.0	14.0	19.4	23.0	26.2	26.7	21.7	15.7	8.8	2.2	14.1
Milyang (Milyang-si, Gyeongsangnamdo)	0.5	2.8	7.7	13.2	18.3	22.3	25.6	26.1	21.5	15.2	8.4	2.1	13.6
Gupo (Buk-gu, Busan)	2.2	4.3	8.6	13.9	18.7	22.0	25.2	26.4	22.2	16.9	10.5	4.2	14.6
Busan (Dong-gu, Busan)	3.6	5.4	9.1	13.8	17.9	21.0	24.4	26.1	22.6	17.9	11.9	5.8	15.0
Regional avg.	0.0	2.2	7.1	13.1	18.4	22.3	25.4	26.1	21.5	15.4	8.5	1.7	13.5

4. 시뮬레이션 설계

4.1 청명 일사량 적용 시 발전량 추산

청명 일사량 적용 시뮬레이션은 기상 조건을 고려하지 않기 때문에 계산 수식이 상대적으로 단순하여 신속한 계산이 이루어지며 결과값의 정확도를 관대하게 설정한다. 따라서 일간 혹은 연간 일사량 추정 시 연간 운량이 없다고 가정한 후의 이론적인 일사량 최댓값을 계산하는 등 가장 낙관적인 결과치를 도출한다.

현재 하행선(서울-부산), 상행선(부산-서울) 두 가지 루트가 있으며 실제 전체 운영 발전량을 계산하기 위해서는 두 시나리오를 모두 계산해야 하지만, 비교적 큰 레스터 데이터 분석으로 인한 계산 시간 소요가 크기 때문에 하행선에 한해 연간 월별 대표성을 띠는 날짜를 지정하여 모든 시간대에 대해 일사량을 측정 후, 이를 월 대푯값으로 삼아 365일에 대한 전체 패널 입사 일사량을 계산한다.

측정 기간은 전 연구와의 원활한 비교를 위해 2021년도 12개월을 기준으로 잡았으며, 해당 월의 대푯값을 바탕으로 월 발전량 총량을 계산해, 궁극적으로 연간 발전량 총량을 계산하여 기존의 것과 비교하였다. Table 3-4. 하단의 전체 지역 월평균치를 계산에 활용하였다. 대기 투과율로 대표되는 청명도 값은 한국의 전년 전체 지역 평균치인 0.636를 상정했다(Jo et al., 2009). 이를 토대로 직달일사량은 총 $G \times \sin \alpha$ 대비 63.6%, 산란일사량은 투과율이 총 0.084이므로 총 $G \times \sin \alpha$ 대비 8.4%가 들어오게 된다. 직달일사량은 이중 음영 효과에 의해 측정지에 들어오지 못하는 사례를 배제하고, 산란일사량은 각각의 지점의 하늘이 가려진 비율을 추가로 곱 연산해준다.

4.2 일정별 패널 운용 손익 분석

종합적인 물리 모델을 고려하여, 실제 전력 발전 시 얼마의 소비전력이 드는지, 태양광 패널을 설치한 상태에서 노선별 연산 결과는 어떻게 되는지 분석하여, 가장 경제적인 열차 패널 운용 방안을 마련하고자 한다.

이동 구간에서 등속도 운동을 상정한 열차이기 때문에 적절한 열차 평균 속도를 계산하여 열차의 운행 당 소비 에너지를 계산할 수 있었으며 이를 각각의 운행 결과와 비교하여 분석하였다. 일별 5번 있는 시간대별 운행에서 연 12개 일, 총 60번의 운행이 각각 에너지 절감 측면에서 효율적인 운행인지 계산하였다. 승객 및 화물을 싣지 않은 빈 열차 기준과 만석 운행을 하는 열차(성인 평균 질량 60kg 상정, 총인원 363명 탑승 가정, 추가 질량 21.78 ton) 기준으로 각각 분석해보았다.

5. 결과 분석

5.1 시뮬레이션 결과

5.1.1 연간 발전량 추산 결과

GHI, 발전량을 구하는 중간과정부터 관찰해보자. 12개월에 대해 대표 일(1일)에 $G \times \sin \alpha$ (외기 일사량의 수평면 입사량)에 해당하는 데이터를 알고리즘을 통해 얻었다. 그 결과는 아래 Table 3-1.와 같다. 새벽에 해당하는 6:05에 출발한 열차는 일출 전에 출발했고 운행 도중 일출을 겪으므로 상당 시간을 일사량을 받지 못한 채로 운행하였기에 저조한 값을 기록한다. 다만, 5월에서 6월로 넘어가는 6월 1일과 하지 근처에 위치한 시기는 태양 일출 시기도 빠르고 태양 고도도 높으므로 준수한 일사량 수치가 나온다. 한국에서 태양이 남중하는 시각은 12:30 전후이며, 이 시기에 가깝게 열차가 운행 중이라면 태양 고도각이 높기 때문에 수평면 일사량 값이 커진다. 따라서 9:30 및 13:00에서 가장 일사량 값이 높게 관찰된다. 전반적으로 태양 고도가 낮은 겨울철에 적은 일사량이 들어오고, 태양 고도가 높은 여름철에 많은 일사량이 들어온다.

Table 3-2.는 앞서 구해진 $G \times \sin \alpha$ 에 각각 τ_b , τ_d 를 곱하고, 각각의 지점에서 직달일사량은 입사 여부를, 산란일사량은 지점별 합을 구한 결과를 나타낸 것이다. DNI, DHI의 총합을 합친 값이 GHI이고, 이것을 월 평균 기온을 적용해 최종적인 발전량을 구했다. 시간대별 온도를 적용한 것은 아니기 때문에 정밀한 발전량은 아니지만, 대략적인 발전량 추세를 관찰할 수 있는 데, 동계와 하계 일사량 편차 대비, 발전량 편차는 감소함이 보인다.

Table 5-1. Calculation for total $G \sin \alpha$ (Blank means there is no train schedule).

Train Schedule - Solar irradiance (Wh/m ²)	6:05	9:30	13:00	13:55	14:30	15:25	Total $G \times \sin \alpha$
Jan 1 st (Fri)	9.84	801.64	878.47		444.00	176.61	2310.56
Feb 1 st (Mon)	1.65	806.80	1195.21	1022.33	870.58		3896.57
Mar 1 st (Mon)	28.67	1100.88	1475.36	1293.81	1151.20		5049.91
Apr 1 st (Thu)	251.61	1540.56	1668.267	1426.54	1256.06		6143.05
May 1 st (Sat)	628.32	1812.03	1732.68		1274.66	876.90	6324.58
Jun 1 st (Tue)	740.60	1872.52	1810.41	1547.77	1373.31		7344.61
Jul 1 st (Thu)	589.31	1797.31	1888.84	1665.80	1501.15		7442.41
Aug 1 st (Sun)	411.71	1695.69	1869.56		1499.04	1136.17	6612.17
Sep 1 st (Wed)	394.84	1641.25	1655.03	1391.56	1212.63		6295.32
Oct 1 st (Fri)	447.53	1528.83	1231.23		666.02	316.34	4189.94
Nov 1 st (Mon)	342.72	1281.28	777.82	419.95	246.17		3067.95
Dec 1 st (Wed)	114.69	1012.63	662.36	350.68	195.27		2335.63

Table 5-2. Calculation for total DNI, DHI, GHI, and electricity generation.

Date - Total Solar irradiance (Wh/m ²)	DNI	DHI	GHI	Monthly Avg. Temp. (°C)	Generated energy (kWh)
Jan 1 st (Fri)	1469.52	174.68	1644.19	-0.01	129.94
Feb 1 st (Mon)	2478.22	294.58	2772.80	2.16	217.61
Mar 1 st (Mon)	3211.75	381.77	3593.52	7.13	277.48
Apr 1 st (Thu)	3906.98	464.41	4371.39	13.06	330.95
May 1 st (Sat)	4022.43	478.14	4500.57	18.39	334.62
Jun 1 st (Tue)	4671.17	555.25	5226.42	22.32	383.36
Jul 1 st (Thu)	4733.37	562.65	5296.02	25.36	384.38
Aug 1 st (Sun)	4205.34	499.88	4705.22	26.10	340.61
Sep 1 st (Wed)	4003.82	475.93	4479.75	21.46	329.57
Oct 1 st (Fri)	2664.80	316.76	2981.56	15.36	223.98
Nov 1 st (Mon)	1951.21	231.94	2183.15	8.51	167.81
Dec 1 st (Wed)	1485.46	176.57	1662.03	1.73	130.62

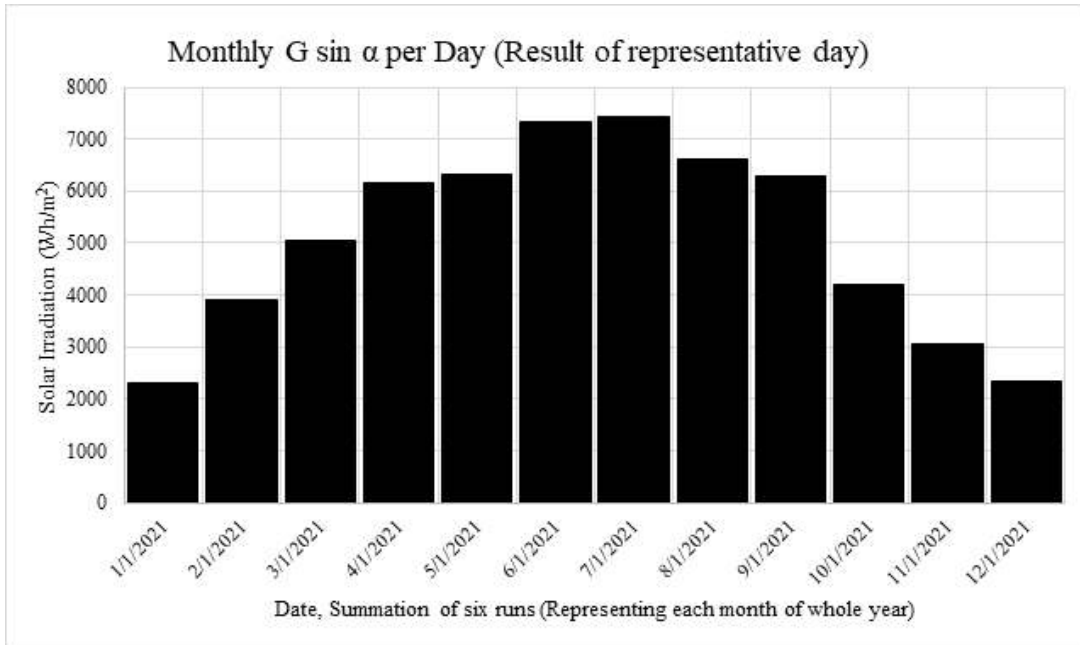


Figure 5-1. Monthly representative G sin α value.

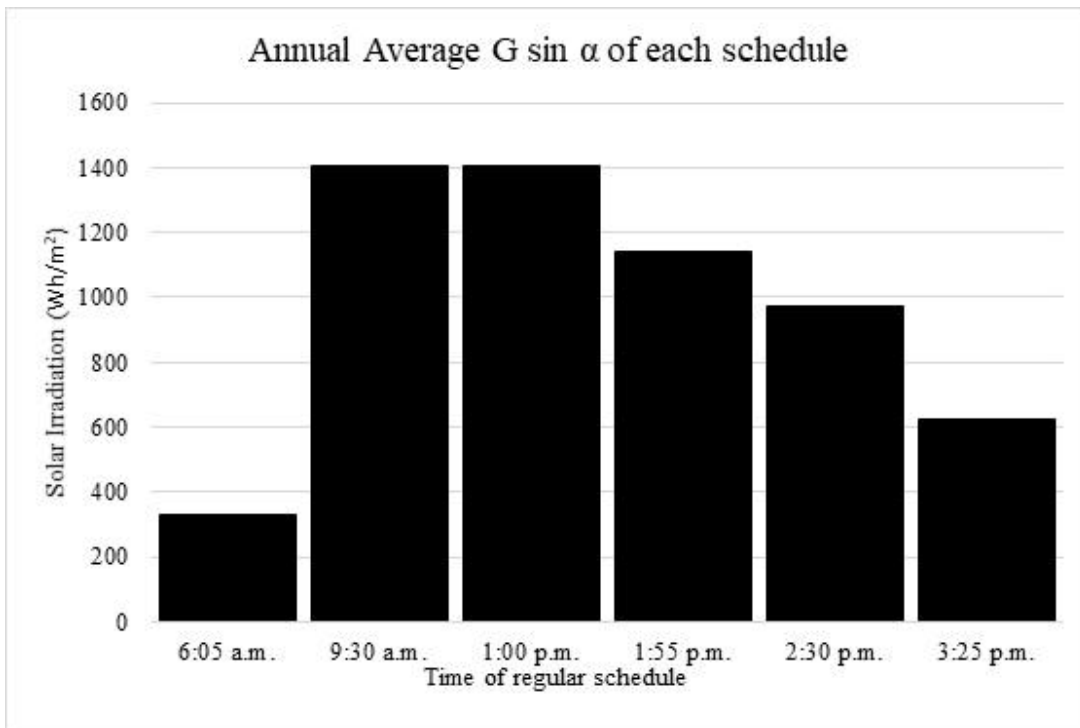


Figure 5-2. Average G sin α value of each time schedule.

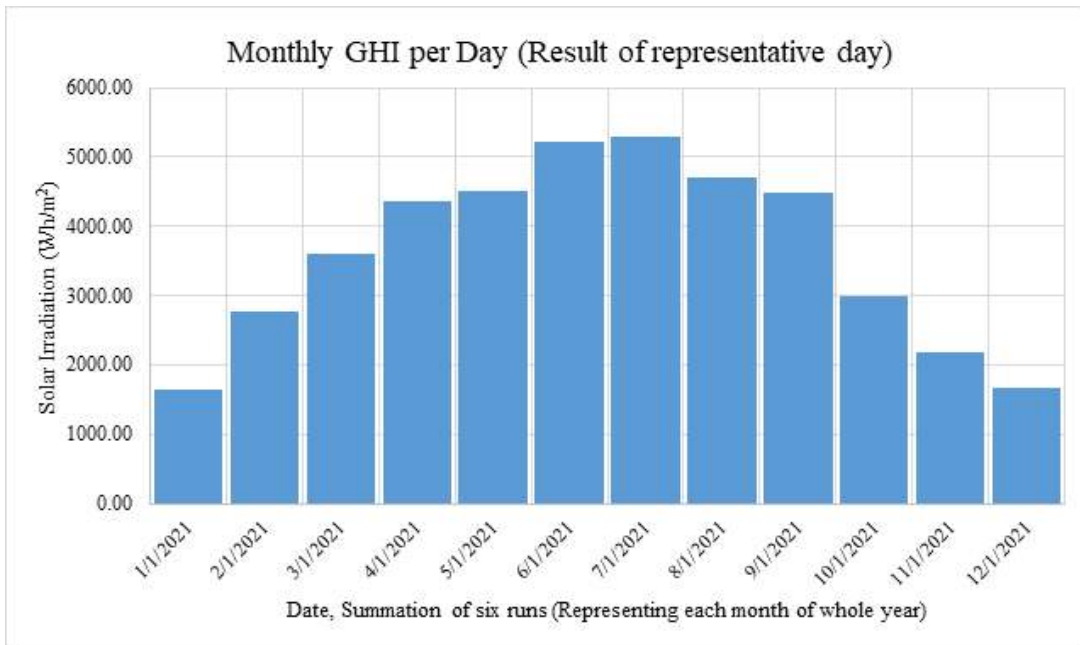


Figure 5-3. Monthly representative GHI.

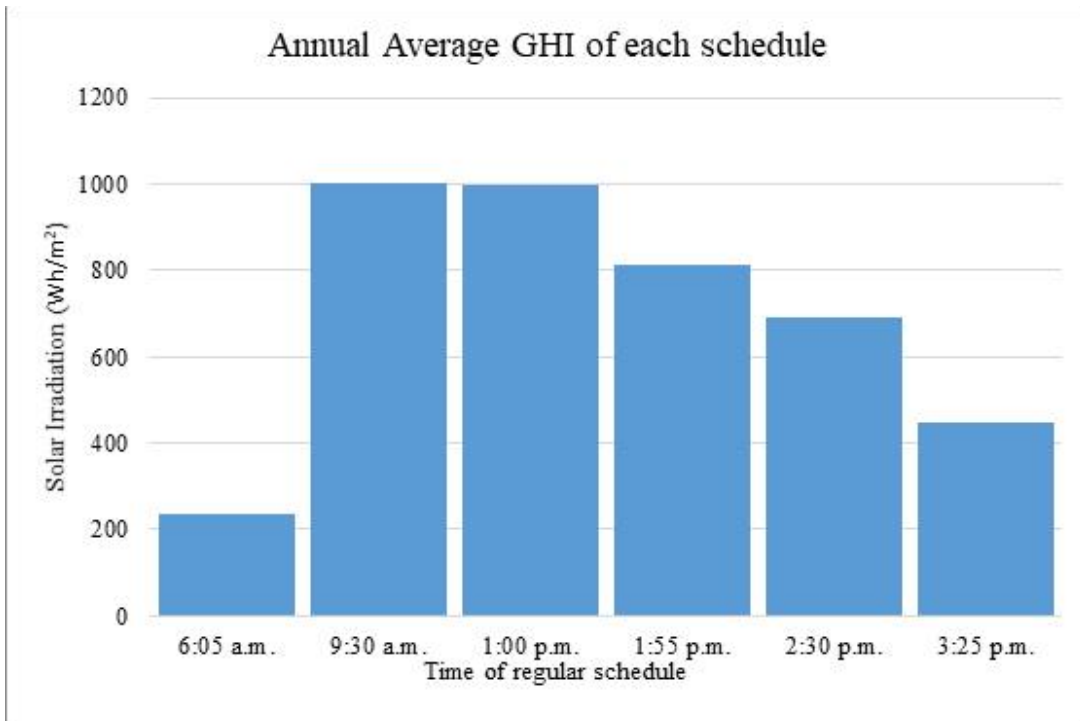


Figure 5-4. Average GHI of each time schedule.

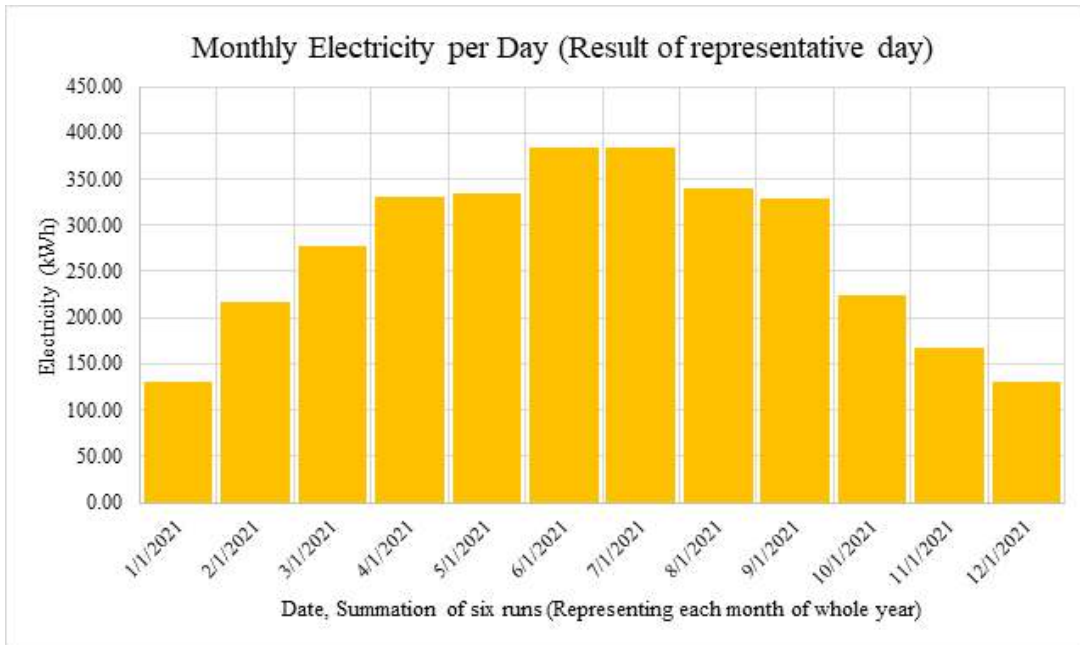


Figure 5-5. Monthly representative electricity generation.

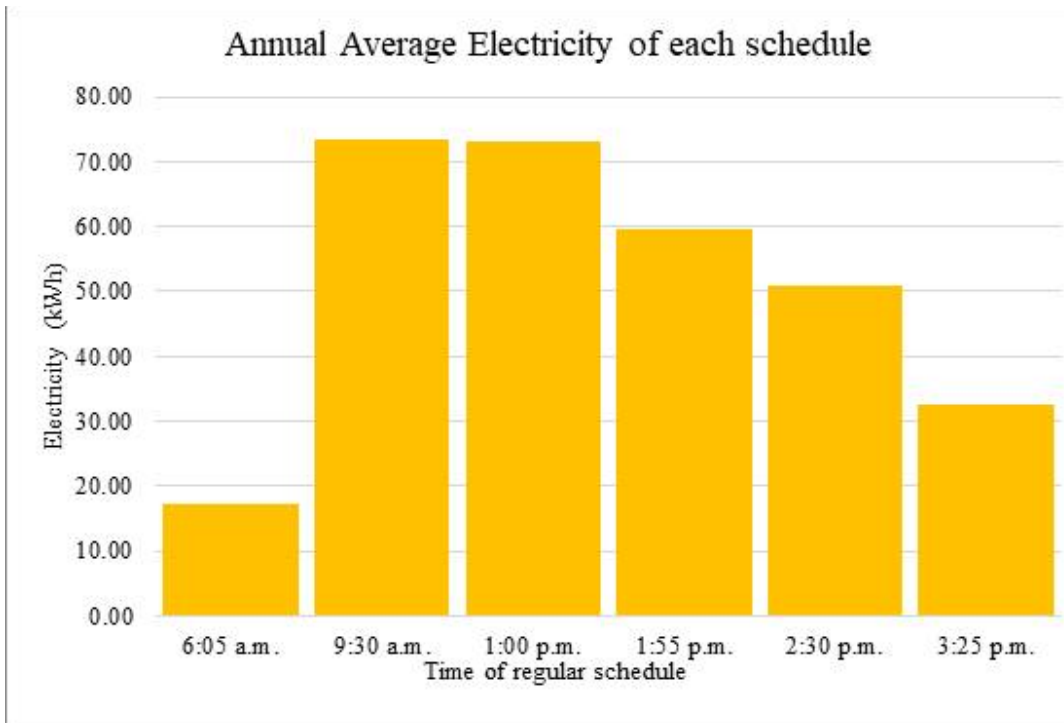


Figure 5-6. Average electricity generation of each time schedule.

평균적으로 하루 6번 있는 열차 일정을 전부 소화하면 전력을 평균적으로 306.91 kWh 생산할 수 있고, 12개월 60개의 시뮬레이션을 통해 얻어진 하루 평균 생산량이 270.91 kWh이므로 365일로 치환하면 약 98.88 MWh 만큼의 전력 생산이 기대된다.

5.1.2 일정별 패널 운용 손익 분석 결과

앞선 결과에서 관찰할 수 있듯, 태양광 패널 발전량은 매일, 매 운행 시간대마다 달라진다. 정오 전후의 시간대를 포함한 채로 운행할 경우 높은 전력 생산을 기대할 수 있고, 하절기에 운행할 때 역시 높은 전력 생산을 기대할 수 있다. 반대로 새벽 시간에 출발하는 시간표나 동절기에 운행하는 열차는 기대 발전량이 적는데, 이 경우 패널을 신지 않고 달리는 기본 전력량 대비 태양광 발전 설비를 신고 달림으로 인해 추가적으로 필요한 에너지량이 더 증가한다. 태양광 시스템을 효율적으로 KTX에 적용하기 위해서는 시간대별 손익을 따져야 하므로 각각의 시나리오별 소비전력 증가량과 추가 발전량을 비교해 어느 시간대에 태양광 패널 열차를 운행해야 소비전력 절감 측면에서 이익이 되는지 비교했다.

연구 대상 노선의 전체 거리는 서울-부산 노선 기준 Table 2-1.을 참고하면 KTX-산천은 평균 속도 시속 208.5km, 표정속도 시속 189.6km로 달릴 때 소비전력은 약 11,633 kWh로 추산된다(Lee et al., 2011). 이는 TPS 시뮬레이션(Train Performance Simulation)을 통해 구한 값이며, 공차 중량 기준인지 만차 중량 기준인지는 알려지지 않았다. 다음 Table 3-3.은 하행선 노선 시간표 당 표정속도이다. 우측의 소비 전력량은 표정속도 0.8% 증가 시 소비 전력량이 2.8% 증가함을 이용하여 역산해 구한 표정속도별 소비전력이다.

Table 5-3. Approximation of electricity consumption of whole schedule of KTX-Sancheon down train.

Departure	Arrival	Driving time (hr)	Distance (km)	Scheduled speed (km/h)	Electricity Consumption (kWh)
6:05	8:48	2.72	421	154.97	5782.60
9:30	12:16	2.77	421	152.17	5428.42
13:00	15:47	2.78	421	151.26	5316.60
13:55	16:38	2.72	437	160.86	6830.69
14:30	17:11	2.68	421	156.89	6035.39
15:25	17:46	2.35	421	179.15	9557.68

시뮬레이션이 공차 중량 기준으로 진행되었다고 생각하면 (시나리오 1) 승객 없는 열차(총 중량 403 ton)에 태양광 및 인버터와 같은 보조 발전을 위한 최소한의 설비를 갖춘 후 (3.884 ton) 달렸을 때 증가하는 소비 전력량은 각 현행에서 0.96% 증가할 것이며, 시뮬레이션이 만차 중량 기준으로 진행되었다고 생각하면(시나리오 2) 만석 상태의 열차(총 중량 424.78 ton)에 설비를 추가하면 소비 전력량은 각 현행에서 0.91% 증가할 것이다. 아래 Table 3-4.에 시나리오별 소비전력 증가분을 정리했다.

Table 5-4. Approximation of additional electricity consumption of each TPS (Train Performance Simulation) scenario.

Schedule (Departure)	Electricity Consumption (kWh)	Additional consumption for PV & inverter weight (kWh)	
		if empty car is assumed in TPS (Scenario 1)	If full occupation is assumed in TPS (Scenario 2)
6:05	5782.60	55.51	52.62
9:30	5428.42	52.11	49.40
13:00	5316.60	51.04	48.38
13:55	6830.69	65.57	62.16
14:30	6035.39	57.94	54.92
15:25	9557.68	91.75	86.97

이것을 기존의 Table 3-1.과 비교해서 소비전력 증가분이 발전량보다 커서 전력 소비 절감 효과가 없으면 붉은색 표시(Unsuitable), 전력 소비 절감 효과가 있으면 초록색 표시(Suitable)를 하여 비교해보았다. 해당 칸에는 손익이 얼마인지도 기재되어 있다(Table 3-5, 3-6.). 시나리오 1의 경우 31개의 열차 시간대에서 태양광을 운영하기 적합했으며, 시나리오 2의 경우 32개의 열차 시간대에서 태양광을 운영하기 적합했다. 6시 30분 시간대의 열차는 12개의 날짜에서 전부 운영하기 부적합한 것으로 나왔으며, 가장 운영하기 적합한 시간대는 동절기를 제외하면 시나리오 1, 2에서 모두 높은 전력 절감 효과를 볼 수 있는 13시 정각 시간대의 열차였다. 만일 손익 계산을 하지 않은 채 모든 60개의 시간대에 태양광 시스템을 도입할 경우, 시나리오 1은 전체 239.84 kWh의 손해를 보며, 시나리오 2는 전체 58.07 kWh의 손해를 본다. 만약 태양광을 기설치 후에는 제거할 수 없는 형태라면, 설치 시 12개 날짜에서 이득을 보는 경우는 9:30, 13:00 두 가지 경우뿐이므로 두 열차에 설치할 때 시나리오 1, 2에서 각각 563.14 kWh, 627.58 kWh의 전기를 절약할 수 있다. 이 밖에 태양광 패널을 탈부착식으로 운영할 수 있다면, 절약 효과가 있는 모든 시간대에 적용한다고 가정할 때 최대 각각 743.82 kWh, 843.07 kWh의 전기를 절감할 수 있다. 다만, 이 분석은 청명한 기상 상태를 가정하고 있으므로, 실제 기상 상황 악화로 실제 일사량 감소 시 더 손해가 커질 수 있음을 유의해야 한다.

Table 5-5. Gains and losses of each schedule's electric energy of scenario 1 (Blank: no train schedule).

Gains and losses of scenario 1	6:05	9:30	13:00	13:55	14:30	15:25
Jan 1 st (Fri)	-54.96	-7.03	-1.64		-32.97	-81.82
Feb 1 st (Mon)	-55.42	-7.05	15.71	-8.48	-9.32	
Mar 1 st (Mon)	-53.93	8.38	30.03	5.52	5.31	
Apr 1 st (Thu)	-41.95	30.89	38.84	11.28	9.73	
May 1 st (Sat)	-22.27	43.76	40.63		9.50	-45.36
Jun 1 st (Tue)	-16.85	45.63	43.46	15.22	13.74	
Jul 1 st (Thu)	-25.07	40.72	46.51	20.46	19.59	
Aug 1 st (Sun)	-34.30	35.24	45.27		19.28	-33.22
Sep 1 st (Wed)	-34.84	33.81	35.60	7.28	5.54	
Oct 1 st (Fri)	-31.59	29.61	14.78		-22.34	-74.84
Nov 1 st (Mon)	-36.76	17.97	-8.50	-42.60	-44.48	
Dec 1 st (Wed)	-49.10	4.52	-14.00	-45.96	-47.02	

Table 5-6. Gains and losses of each schedule's electric energy of scenario 2 (Blank: no train schedule).

Gains and losses of Scenario 2	6:05	9:30	13:00	13:55	14:30	15:25
Jan 1 st (Fri)	-52.07	-4.32	1.02		-29.95	-77.04
Feb 1 st (Mon)	-52.53	-4.34	18.37	-5.07	-6.30	
Mar 1 st (Mon)	-51.04	11.09	32.69	8.93	8.33	
Apr 1 st (Thu)	-39.06	33.60	41.50	14.69	12.75	
May 1 st (Sat)	-19.38	46.47	43.29		12.52	-40.58
Jun 1 st (Tue)	-13.96	48.34	46.12	18.63	16.76	
Jul 1 st (Thu)	-22.18	43.43	49.17	23.87	22.61	
Aug 1 st (Sun)	-31.41	37.95	47.93		22.30	-28.44
Sep 1 st (Wed)	-31.95	36.52	38.26	10.69	8.56	
Oct 1 st (Fri)	-28.70	32.32	17.44		-19.32	-70.06
Nov 1 st (Mon)	-33.87	20.68	-5.84	-39.19	-41.46	
Dec 1 st (Wed)	-46.21	7.23	-11.34	-42.55	-44.00	

6. 결론

본 연구를 통해, 차세대 태양광 활용 분야인 태양광 열차 산업에 적용할 수 있는 열차 노선 및 날짜, 시간에 대한 일사량 및 발전량을 계산하는 정교한 알고리즘을 구현하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

기존 연구에서 더욱 향상시켜 기상 모델과 물리 모델을 추가로 적용했으며, 이를 Python 기반의 GUI로 구축하여 호환되는 DSM을 구축한 모든 노선에 대해 계산할 수 있도록 했다. 분석 결과, 기간 내 전일을 청명한 기상 상태를 상정하였을 시(전체 기간 내 받는 일사량 값은 청명 일사량임을 가정), 연간 약 98.88 MWh 만큼의 추가 전력을 생산할 수 있고, 실제 노선에 적용 시 약 50%의 열차 운행에서 태양광 운영으로 추가적인 전력 절감 효과를 누릴 수 있다고 분석되었다. 전체 KTX 일정표상에서 차량번호가 고정되는 것으로 보아 정해진 날 정해진 시간대에는 정해진 차량만이 운영되며, 이 중 태양광을 실제로 부착하고 운영하여 이윤을 얻을 수 있는 열차는 정해져 있다고 볼 수 있다. 새벽 시간대 혹은 일사량을 충분히 받지 못하는 늦은 오후 시간대의 열차는 경제성이 없어 태양광 시스템을 부착하면 손해인 것으로 분석된다. 태양광을 운영할 열차도 태양광을 일체형이 아닌 탈부착식으로 운영할 수 있다면 동절기에는 패널을 따로 설치 않음으로써 무게를 늘리지 않는 것이 경제적이다. 만일 기존 열차와 중량이 같도록 태양광을 열차 차체 일체형으로 통합할 경우, 추가 중량으로 인한 전력 소비량 증가를 고려하지 않고 계산할 수 있다.

더 정밀한 계산을 위해서는 대표 일수 12일이 아닌 365일에 대한 5개의 시나리오를 전부 계산해야 하지만, 상대적으로 신속하지 않은 알고리즘 계산으로 인해 제한된 시간 안에 계산하기 어려워 적은 양의 계산으로 대략적인 결과값을 도출하였다. 또한, 일정별 패널 운용 손익 분석은 명확한 결과를 내기 위하여 가장 낙관적인 청명 일사량을 가정하고

계산하였고, 따라서 계산된 전력 절감치는 최대치이고, 실제 운행에서는 계산된 값보다 적은 값이 나올 것이다. 운량, 대기 질 등 기상변수로 인해 실제로 연간 운영 시 정확한 발전량 예측은 어렵다. 다만 일별 비교 시에는 정확도가 비교적 떨어져도 표준 기상 연도를 대입하여 전체 일수에 대한 계산을 시행하면 연간 전력 절감 결괏값이 합리적인 수치에 도달한다.

더 효과적인 분석을 위해서는 본 연구 알고리즘에 개선점이 있다. 열차의 천장부는 평면이 아니고, 부착 시에는 완벽한 수평면보다는 경사각을 가진 채로 설치될 확률이 높으며, 추후 공간 활용을 위해 측면에 설치하게 될 가능성도 있다. 따라서, 측정 지점 간의 방향 속성도 기록하여 열차 운행 시의 진행 시 열차에 부착된 패널의 상대 방향도 실시간으로 계산하는 알고리즘이 필요하다. 또한, 본 알고리즘은 평지를 달리는 상황을 가정했으나, 실제로는 선로의 고도 높낮이가 있고, 열차도 상대적으로 경사면을 오르내리는 구간이 있으며 이로 인해 패널에 입사하는 태양광의 각도가 달라질 수 있으므로 측정 지점의 높이 값과 상대 경사를 계산하여 정확한 패널의 일사량 입사각을 측정해야 한다. 산란일사량 모델도 계산의 편의를 위해 등방성 모델을 가정했지만, Perez 모델 등 더 신뢰성 높은 직산분리 모델을 적용할 필요가 있다.

본 연구는 KTX-산천을 비롯한 모든 종류의 열차에 적용할 수 있으며, GIS를 통한 노선 구축만 정상적으로 가능하다면, 다양한 열차의 태양광 도입 산업의 참고자료이자 분석 도구로서의 역할을 수행할 수 있을 것이다. 전기에너지를 기반으로 한 교통수단의 점진적 보편화로, 기차, 버스, 자가용 등 모든 교통수단이 잠재적으로 태양광 패널 시스템을 도입할 수 있는 가운데, 본 연구의 알고리즘을 더욱 발전시킨다면, 지정 경로에 국한해 분석하는 것을 넘어서 예측 경로상의 실시간 기상 모델까지 통합한 고정밀 태양광 발전량 분석 알고리즘 개발의 전초가 될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- Alter, L., 2022, Treehugger, Solar Freakin' Railways Are Coming Down the Line,
<https://www.treehugger.com/solar-freaking-railway-bankset-energy-5537246>, accessed on Oct. 15, 2022
- Ambrose, J., 2019, The Guardian, Rail line in Hampshire is world's first to be powered by solar farm,
<https://www.theguardian.com/business/2019/aug/22/rail-line-in-hampshire-is-worlds-first-to-be-powered-by-solar-farm>, accessed on Oct. 15, 2022
- Araki, K., Ota, Y., & Yamaguchi, M., 2020, Measurement and modeling of 3D solar irradiance for vehicle-integrated photovoltaic. *Applied Sciences*, 10(3), 872
- Bollen, M. H. J., 2001, Effects of adverse weather and aging on power system reliability, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 2, pp. 452-457
- BP, 2022, bp Statistical Review of World Energy 2022, 71, pp. 1-57
- Chandra, S., Agrawal, S., & Chauhan, D. S., 2018, Effect of ambient temperature and wind speed on performance ratio of polycrystalline solar photovoltaic module: An experimental analysis. *International Energy Journal*, 18(2)
- Cho, H. K, Lee, T. Y., Lee, K. T. & Lee, B. Y., 1988, A model for the direct solar spectral irradiance at the earth's surface on clear days, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 24(3), pp. 57-71
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N. and Seshadri, B., 2013, Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - a review. *Energy Procedia*, 33, pp.

311-321

- Gilman, P., Dobos, A., DiOrio, N., Freeman, J., Janzou, S., & Ryberg, D., 2018, SAM photovoltaic model technical reference update. NREL: Golden, CO, USA.
- Global Residence Index, 2020, The 2021 STC Climate Index, <https://globalresidenceindex.com/hnwi-index/climate-index/>, access on 2022-10-15
- Hailu, G., & Fung, A. S., 2019, Optimum tilt angle and orientation of photovoltaic thermal system for application in greater Toronto area, Canada. *Sustainability*, 11(22), 6443.
- Han, S. Y., 2010, Korean standard train, KTX-Sancheon runs, Hankyoreh, https://www.hani.co.kr/arti/science/science_general/408342.html, access on Nov. 21, 2022
- Hyundai Rotem, 2014, New express train(KTX-Sancheon), https://www.hyundai-rotem.co.kr/Business/Rail/Business_Record_View.asp?brid=59, access on Oct. 15, 2022
- Jo, D. K., Kang, Y. H., & Auh, C. M., 2003, A study on the analysis of solar radiation characteristics on a high elevated area. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 23(3), 23-28.
- Jo, D. K., Kang, Y. H., 2010, A study on the solar radiation estimation of 16 areas in Korea using cloud cover, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 30(4), pp. 15-21.
- Jo, D. K., Yun, C. Y., Kim, K. D., & Kang, Y. H., 2009, A Revaluation of Atmospheric Clearness Index in Korean Major Cities, *Journal of the Korean Society of New and Renewable Energy*, pp. 239-242.
- KEPCO(Korea Electric Power Corporation), 2022, Statistics of Electric Power in Korea, KEPCO, Republic of Korea, 91, pp. 1-181

- Kim B. J. & Kim, K. S., 2013, Status and Challenge of Renewable Portfolio Standard, Issue and Point, Research report, National Assembly Research Service, no. 753
- Kim, M. H., Park, K. B., Cho, H. J. & Lee, J. W., 2016, Analysis on the influence factors of energy consumption and study on the prediction of energy consumption in EMU, 2016 Spring Conference Journal of Korean Society for Railway, pp. 65-71
- Kim, H., Ku, J., Kim, S. M. & Park, H. D., 2022, A new GIS-based algorithm to estimate photovoltaic potential of solar train: Case study in Gyeongbu line, Korea, Renewable Energy, 190, pp. 713-729
- Kimura, K., & Stephenson, D. G., 1969, Solar radiation on cloudy days. ASHRAE J., 75.
- KMA(Korea Meteorological Administration), 2021, Climatological Normals of Korea(1991~2020), KMA, Republic of Korea, pp. 1-1018
- Korea Forest Service, 2020, Strengthening safety management of forest photovoltaic facility, Korea Forest Service, Republic of Korea
- Kutter, C., Alanis, L. E., Neuhaus, D. H. & Heinrich, M., 2021, Yield potential of vehicle integrated photovoltaics on commercial trucks and vans, In Presented at the 38th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Vol. 6, pp. 10
- Layton, B. E., 2008, A comparison of energy densities of prevalent energy sources in units of joules per cubic meter, International Journal of Green Energy, 5(6), pp. 438-455
- Lee., K. M., Lee, J. H. & Kim, Y., 2011, The study on train electric consumption analysis according to operation speed, 2011 Spring Conference of Korea Academia-Industrial cooperation

- Society, pp. 182-185
- Liu, B. Y., & Jordan, R. C., 1960, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar energy*, 4(3), pp. 1-19.
- Michalsky, J. J., 1988, The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position(1950-2050), *Solar Energy*, Vol. 40. No. 3, pp. 228-229
- Naraghi, M. H., & Atefi, E., 2022, Optimum Solar Panel Orientation and Performance: A Climatic Data-Driven Metaheuristic Approach, *Energies*, 15(2), pp. 624
- NSDI(National Spatial Data Infrastructure Portal), 2021, National Spatial Data Infrastructure Portal, <http://data.nsd.gov.kr/dataset/20180927ds0008>, access on Oct. 15, 2022
- Oh, M., Kim, S. M., & Park, H. D., 2020, Estimation of photovoltaic potential of solar bus in an urban area: Case study in Gwanak, Seoul, Korea. *Renewable Energy*, 160, pp. 1335-1348.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987, A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* 39 (3), 221 - 232.
- Reda, I. & Andreas, A., 2004, *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*,
- RETScreen International Clean Energy Decision Support Centre, 2005, *Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases Textbook*, third ed., CANMET Energy Technology Centre, Montreal, QC, Canada
- Shen, X. J., Zhang, Y. & Chen, S., 2012, Investigation of Grid-Connected Photovoltaic Generation System Applied for Urban Rail Transit Energy-Savings, *Proceedings of 2012*

- IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE: Las Vegas, United States, pp. 1-4
- Shin, H. Y., Choi, H. K., Kim, Y. K., An, Y. K., Choi, J. Y., Yoon, C., G., Lim, M. H., Kim, J. S. and Seo, B. G., 2009, The efficiency of solar cell related to temperature, In: Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Conference. The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp. 356-359
- Statistics Korea, Domestic power generation status of Energy Source, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339, access on Oct. 15, 2022
- The Economic Times, 2017, Indian Railways launches first solar-powered train, <https://economictimes.indiatimes.com/industry/transportation/railways/indian-railways-launches-first-solar-powered-train/more-power-to-railways/slideshow/59593824.cms>, access on Oct. 15, 2022
- USNO(United States Naval Observatory), Astronomical Almanac Glossary, solar time, https://aa.usno.navy.mil/faq/asa_glossary#solar-time,-apparent, access on Oct. 15, 2022
- Wei, M., Wei, W., Ruonan, H. & Ziyi, W., 2016, Auxiliary Power Supply System of Passenger Train Based on Photovoltaic and Energy Storage, Proceedings of the 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE: Hefei, China, pp. 784-788
- Zhang, R., Mirzaei, P. A., & Carmeliet, J. (2017). Prediction of the surface temperature of building-integrated photovoltaics: Development of a high accuracy correlation using

computational fluid dynamics. *Solar Energy*, 147, 151–163.

Zhong, Z., Zhang, Y., Shen, H. & Li, X., 2020, Optimal Planning of Distributed Photovoltaic Generation for the Traction Power Supply System of High-Speed Railway. *J. Clean. Prod.* 263

Abstract

GIS-based algorithm for the calculation of photovoltaic power generation on a train

KIM Hanjin

Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

VIPV (Vehicle Integrated PhotoVoltaic) is photovoltaic system integrated into vehicles such as cars and public transportation, and it requires a computational model that can quantitatively estimate power generation because they are significantly impacted by spatio-temporal elements, unlike typical solar power plant systems remaining stationary in locations.

This study, which concentrates on the routed train model among various VIPVs, suggests models and interfaces that figure out the ideal quantity of solar electricity a train can generate over time and route. Based on GIS, the terrain close to the train route was displayed as raster data, and the incident angle of the solar irradiance in time and space was calculated at about 2,700 measuring points along the route to determine whether it was shaded by the terrain or buildings and the actual amount of solar irradiance when it entered the panel. The DSM (Digital Surface Model) was developed to rasterize topography by setting the DEM (Digital Elevation Model),

downloading open-source building vector file database data, and calculating the average floor height of buildings across the country. It was possible to determine whether the sun was blocked at the measuring point after calculating the sun's relative position using a celestial movement-aware function by utilizing Python programming package (pvlib). The 3km rectangular area near the measuring points was examined using an isotropic solar diffuse irradiance model to see if the any DSM pixel blocks solar ray at the measuring point. If shaded area was identified, direct irradiance is excluded and total diffuse irradiance is calculated by using the Solar Radiation Graphics function as an incident area for diffuse irradiance. For better accuracy, meteorological variables which directly affect solar irradiance, like clouds, were applied.

The actual profit and loss of panel operating by train schedule was analyzed by combining the algorithm with the physical model of the moving object. The daily amount of solar irradiance was calculated by choosing the annual representative date(one day per month). Following that, the inverter and panel were set using the proper assumptions, and the power was calculated. According to the analysis, an optimistic calculation could result in the production of 98.88 MWh of train power annually on a one-way basis. Moreover, as a result of analysis of panel operation, it was found that solar panel is not efficient in winter season, dawn or afternoon.

The study's findings can be used to assess the financial viability or planning capacity of converting cars into renewable energy combinations in major public transportation industry. It can also be used as a test bed for developing algorithms that forecast sun irradiance for free-path solar vehicles.

keywords : Photovoltaic power, Express train, GIS, GUI, Solar

irradiance model, Shade analysis

Student Number : 2021-20381

감사의 글

논문 제출을 목전에 두고 있는 지금, 2년여에 걸친 연구실 생활을 하면서 현재의 연구 활동을 마무리하기까지 부족한 저를 도와주신 여러 감사한 분들의 이름이 떠오릅니다. 본 결과물은 제 혼자 힘이 아닌, 물심양면으로 도움과 성원을 보내주신 분들 덕분에 완성할 수 있었습니다.

먼저, 제 지도교수님이시며 2년 동안 저에게 부족한 부분과 개선할 부분을 알려주시고, 더욱 연구에 정진할 수 있도록 격려해주신 박형동 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 교수님의 지도 덕분에 연구자로서의 기본 소양과 통찰력을 기를 수 있었으며, 대학원 생활 중에 다양한 경험을 할 기회를 마련해 주셔서 제 진로의 초석을 닦을 수 있었습니다.

심사위원장으로 제 논문의 완성도를 높여주신 정은혜 교수님과, 따뜻한 조언으로 제 연구의 올바른 방향성을 제시해주신 조용채 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다.

연구실 동료들에게도 고마움을 표하고 싶습니다. 연구실 선배로서 초기 적응에 도움을 주고, 연구실 활동의 좋은 본이 되어준 아란과 예빈, 가장 오래 함께하며 공동 연구 성과도 수확하고 무엇보다 연구실 생활에 있어 제게 큰 귀감이 되어준 동기 지윤, 또 한 해 동안 여러 업무를 진행하면서 든든한 도움이 되어준 채연에게 감사의 말을 전합니다.

또한, 부모님과 누나, 동생 등 소중한 가족 구성원들의 응원과 지원에 감사드리고, 힘든 시간을 버티고 이겨낼 수 있도록 도와준 소중한 제 사람들에게 사랑한다는 말을 남깁니다.

마지막으로, 이 모든 상황과 환경, 그리고 미래를 주관하시는 하나님께 감사드립니다.