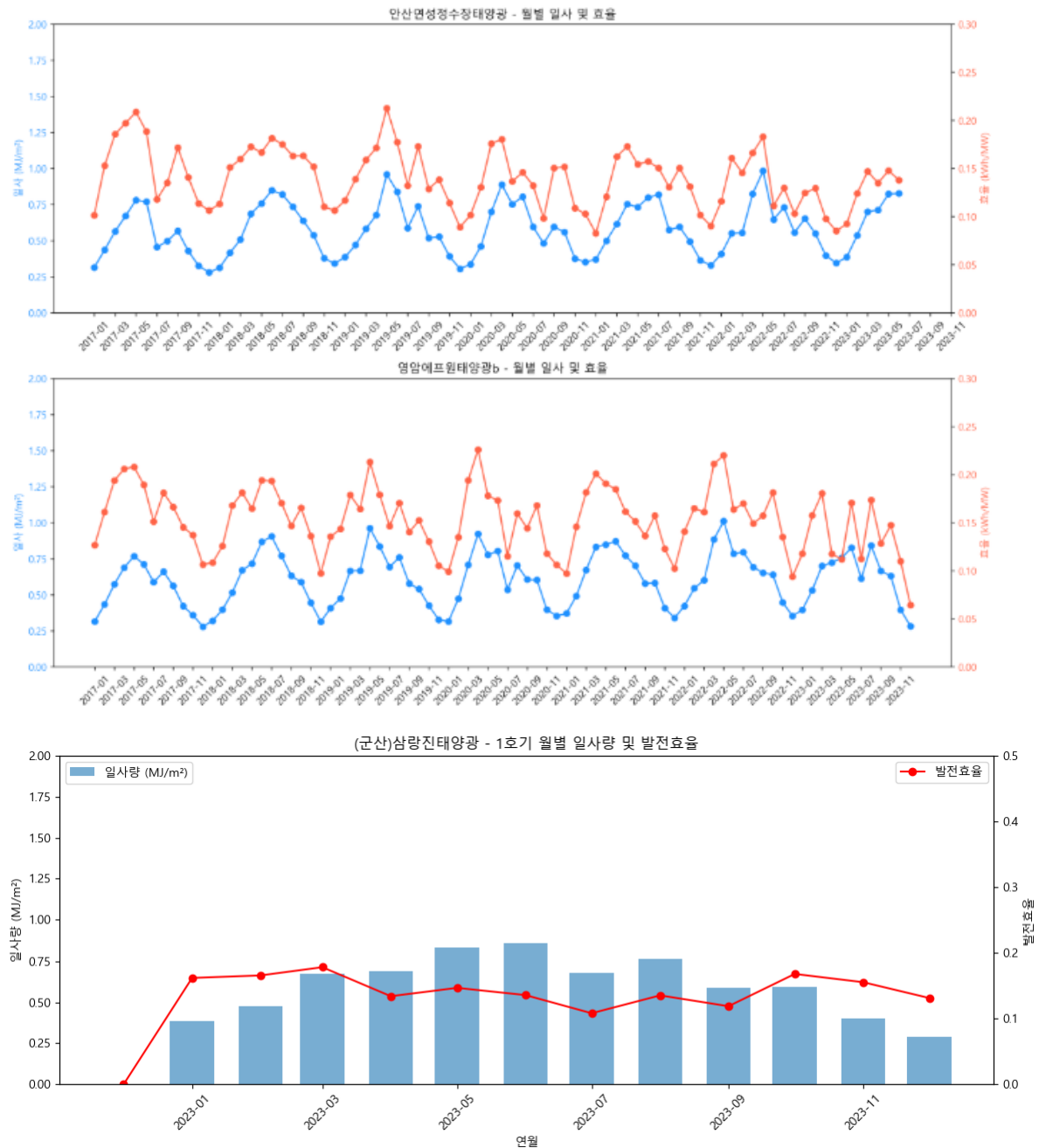


태양광발전량 예측 모델 분석 보고서 추가 자료



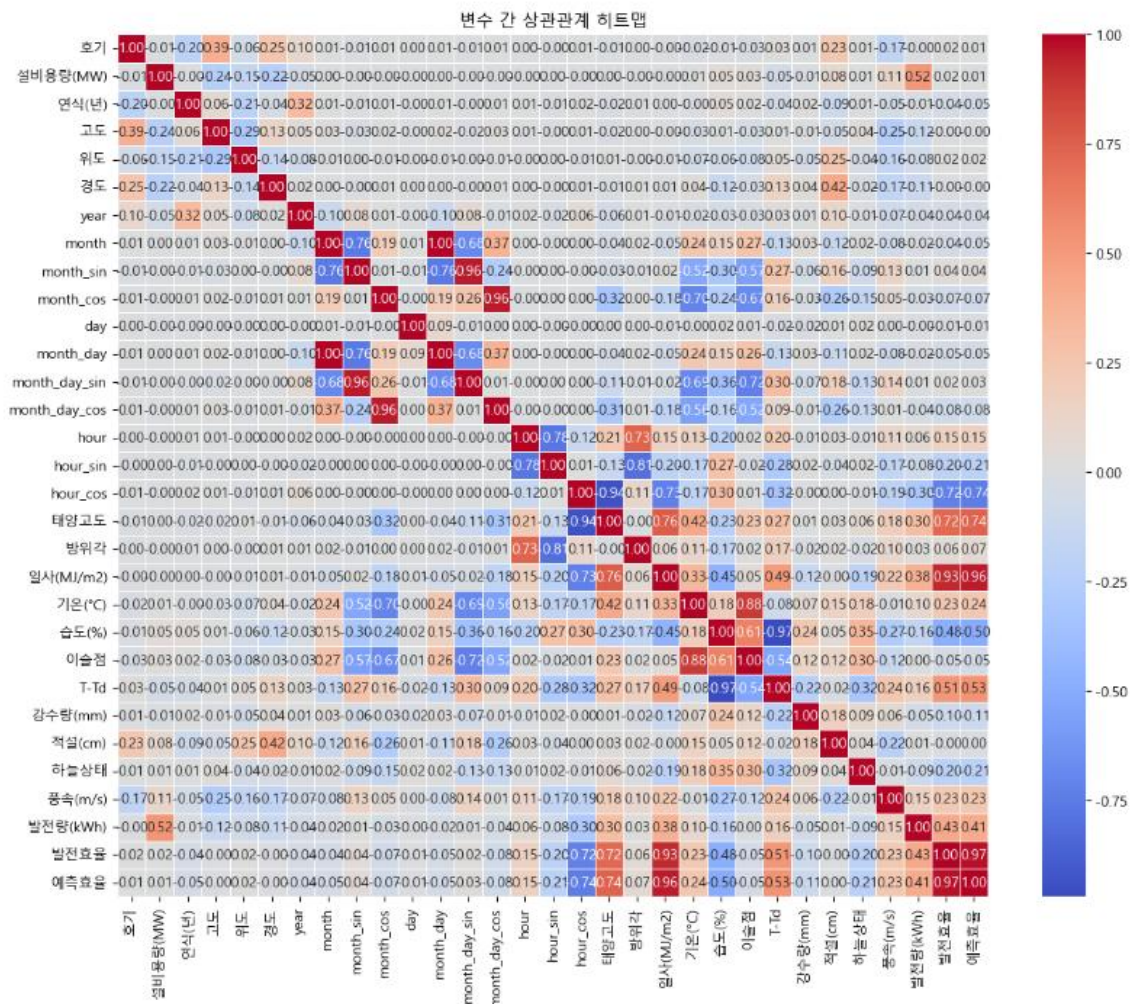
그래프에 나타난 발전소별 월별 일사량 및 발전효율 추이를 살펴보면, 전반적으로 일사량과 발전효율은 유사한 패턴을 보이며 함께 움직이는 경향을 확인할 수 있다. 특히 연도별로 일사량이 증가할 때 발전효율 역시 동반 상승하는 경우가 많아, 태양광 발전에서 일사량이 중요한 결정 요인임을 한 번 보여준다.

그러나 월별로 세부적으로 분석해보면, 의외로 여름철(6~8월)의 발전효율이 상대적으로 낮은 경향을 보인다. 이는 단순히 일사량이 많다고 해서 발전효율이 항상 높아지는 것은

아님을 시사한다. 실제로 여름철은 장마와 같은 흐린 날씨가 지속되는 경우가 많고, 이로 인해 실제 발전에 기여하는 직달 일사량이 줄어들 수 있다.

또한 여름철 고온 환경에서는 태양광 모듈의 온도가 크게 상승하게 되는데, 모듈 온도가 상승하면 반도체의 전기적 특성 변화로 인해 발전 효율이 저하되는 물리적 현상이 존재한다. 즉, 높은 일사량에도 불구하고 모듈 과열과 기상 요인으로 인해 효율은 오히려 떨어질 수 있는 것이다.

이러한 결과는 태양광 발전소의 계절별 운영 전략이나 냉각 설계, 모듈 선택 시 고려할 중요한 인사이트를 제공하며, 단순히 연간 일사량 총합이 아닌 계절별 기상 조건과 열 환경까지 함께 고려한 접근이 필요하다는 점을 시사한다.



히트맵에 나타난 상관계수 분석을 통해, 발전 효율에 영향을 미치는 주요 변수들 간의 관계를 명확히 파악할 수 있다. 먼저, 발전 효율은 일사량(MJ/m^2)과 가장 높은 양의 상관관계(0.96)를 보였다. 이는 태양광 발전의 기본 원리상 일사량이 많을수록 에너지원이 풍부해지고, 결과적으로 발전 효율이 증가하는 매우 직관적인 결과이다.

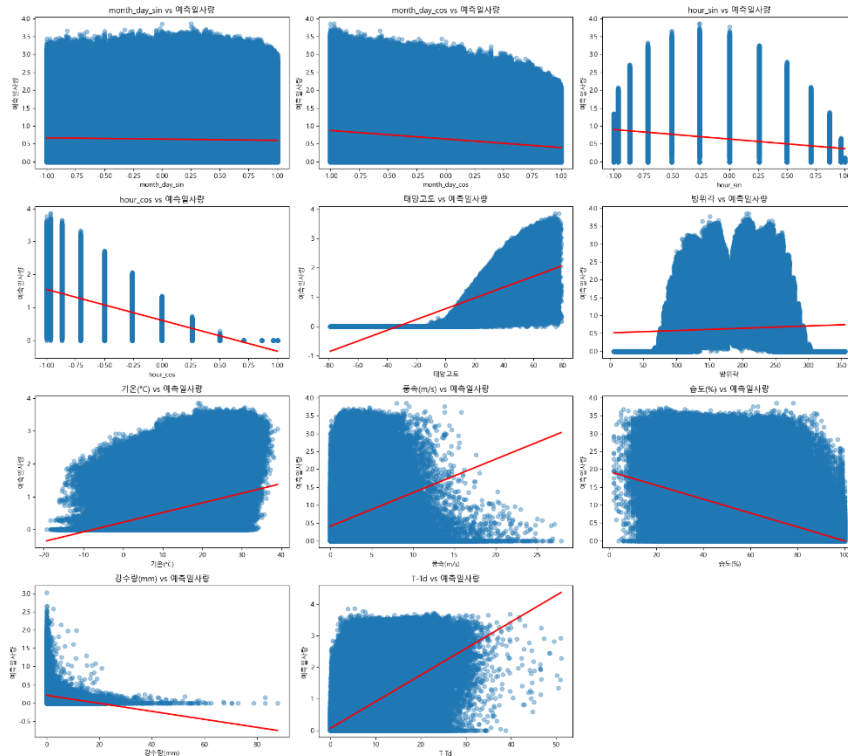
또한 풍속(m/s) 역시 발전 효율과 양의 상관관계(0.23)를 갖는데, 이는 바람이 모듈 표면을 식혀주는 냉각 효과를 통해 모듈 온도 상승으로 인한 효율 저하를 방지해주는 역할을 하기 때문이다. 이와 함께, $T-T_d$ (기온과 이슬점의 차) 또한 양의 상관계수(0.53)를 보였으며, 이는 대기 중 습도가 낮고 건조할수록 발전 환경이 개선된다는 점을 시사한다.

반대로, 습도(%)와는 -0.22의 음의 상관관계를 가지며, 이는 습한 날씨일수록 대기 중 수분이 광선을 산란시키거나 차단하여 발전 효율을 저하시키는 요인이 됨을 보여준다. 이와 비슷하게, 하늘상태 역시 -0.15의 상관계수를 보이며, 흐림이나 구름이 많은 날에는 발전 효율이 낮아지는 경향이 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로, 시간 관련 파생변수들(hour, hour_sin, month_sin 등)은 효율과 비교적 낮은 상관성을 갖지만, 전체 모델에서는 계절성과 일변량 추세를 반영하는 데 기여할 수 있으므로 여전히 의미 있는 변수들로 볼 수 있다.

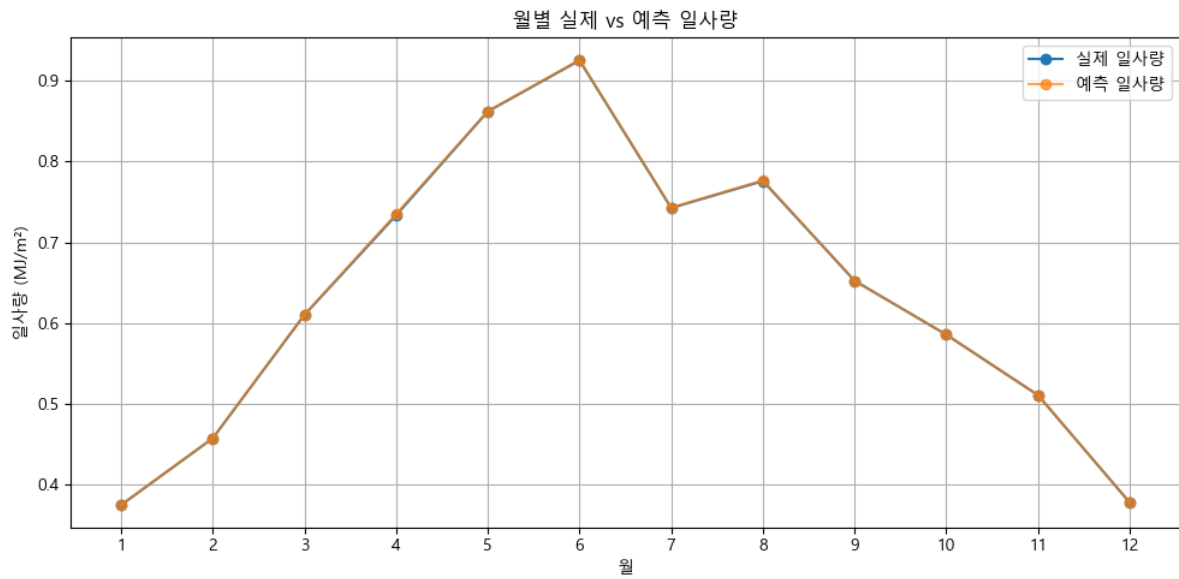
결론적으로, 발전 효율은 일사량, 풍속, 대기 건조도($T-T_d$)와 같은 변수들과는 양의 관계를, 습도, 흐림 등 하늘상태와는 음의 관계를 가지며, 이러한 변수들은 실제 모델 설계 및 발전소 운영 시 고려되어야 할 중요한 요인들이다.

LightGBM 기반 일사 예측 모델 분석



예측일사량과 입력변수 간의 상관관계를 분석한 결과, 태양고도와 시간변수인 hour_cos 은 일사량과 매우 뚜렷한 선형 관계를 보였다. 특히 hour_cos 값이 음수(오전 6시부터 오후 6시 사이)일 때 일사량이 높은 경향이 나타나 모델이 태양의 위치 변화에 민감하게 반응하고 있음을 보여준다.

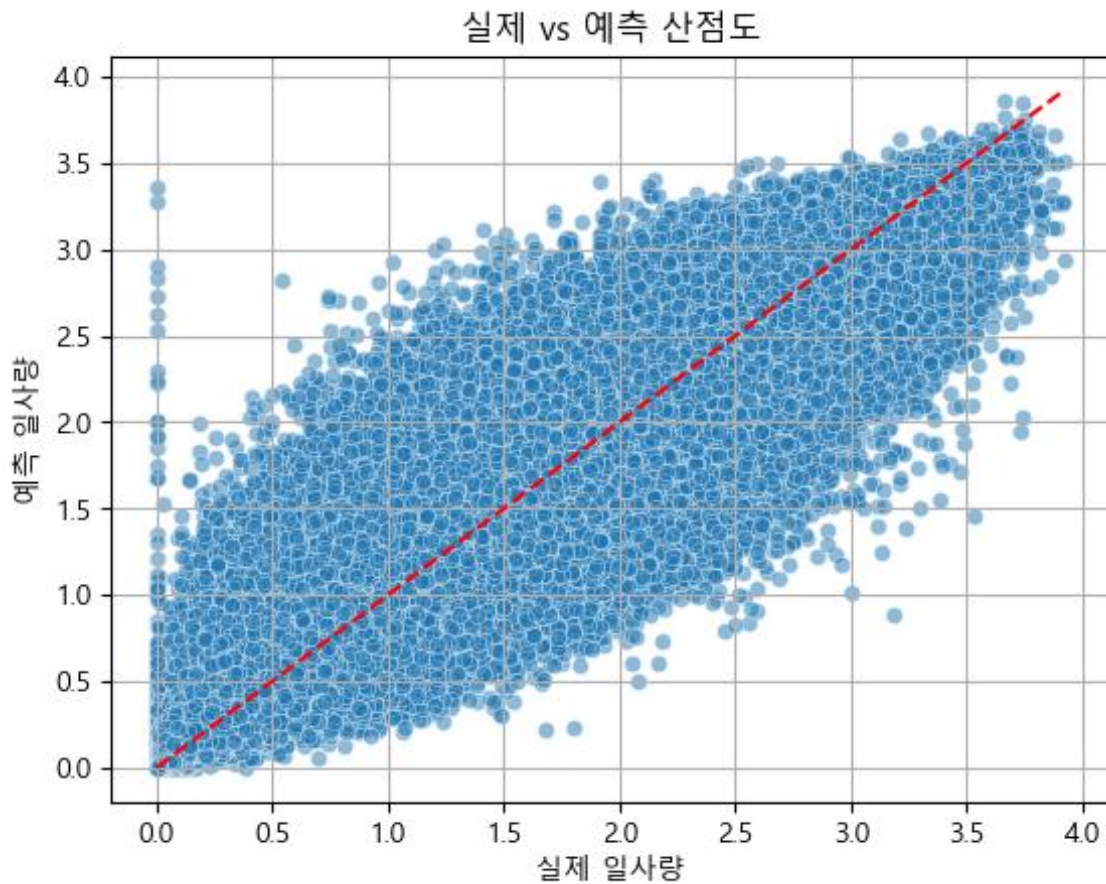
또한, 강수량, 습도, T-Td 등 기상 변수는 일사량을 감소시키는 요인으로 작용하며 이 중 강수량은 일사량과 강한 음의 상관관계를 나타내어 강수 여부가 일사량 예측에 큰 영향을 미치는 변수임을 시사한다.



월별 실제 일사량과 예측 일사량을 비교한 결과, 모델은 계절에 따른 일사량 변동 패턴을 전반적으로 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

특히 3월부터 일사량이 증가하여 6월에 최고점을 기록한 뒤, 12월까지 감소하는 계절적 흐름이 실제 관측값과 유사하게 예측되었다. 이는 모델이 시간 변수와 태양 위치 변수의 영향을 모델이 성공적으로 학습했음을 시사한다.

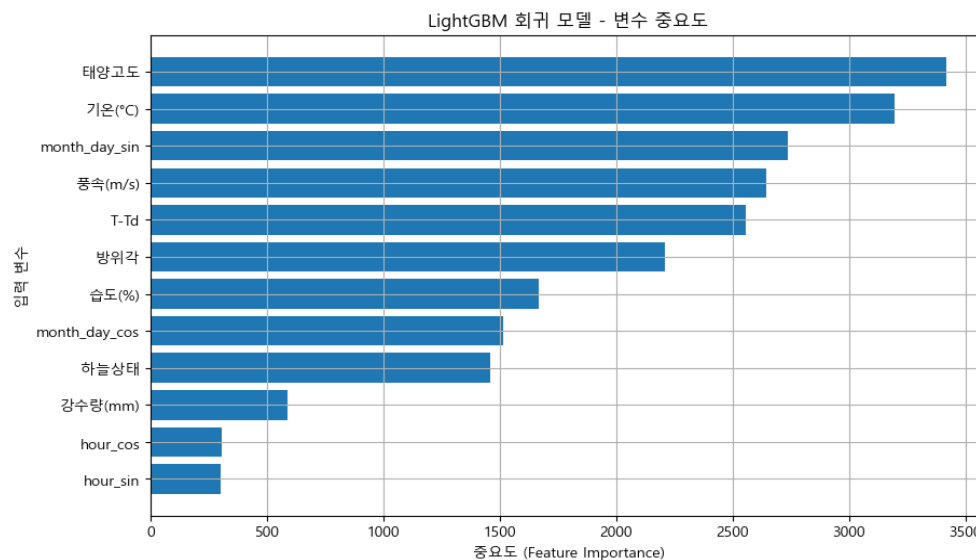
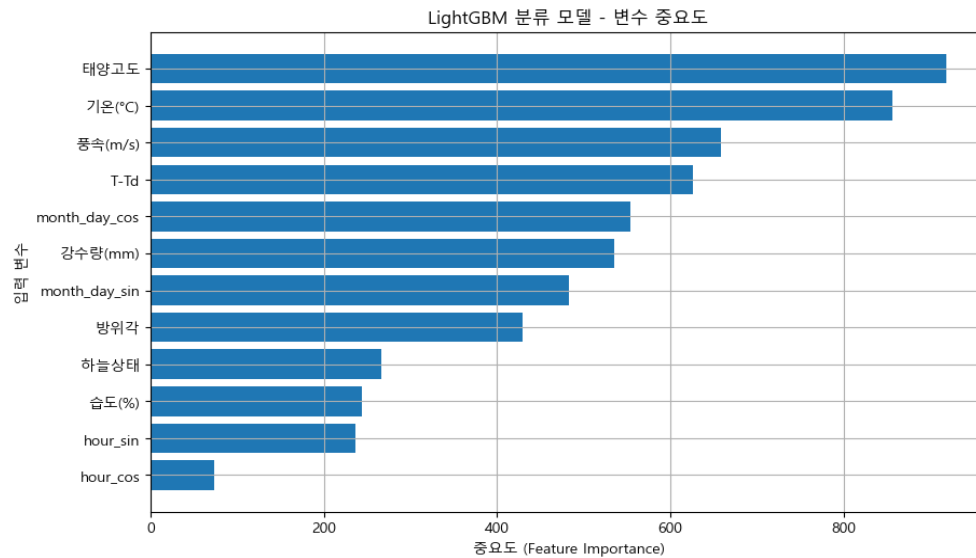
이 결과는 본 모델이 일사량의 계절적·시간적 특성을 정밀하게 반영하고 있음을 의미하며, 향후 발전량 예측 모델의 입력값으로서 일사량 예측값이 신뢰할 수 있는 수준이라는 것을 입증한다.



실제 일사량과 예측 일사량 간의 산점도 분석 결과, 대부분의 점들이 대각선(이상적인 예측선)에 근접해 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 예측값이 실제값을 전반적으로 잘 따라가고 있으며, 모델의 전역적 예측 정확도와 선형적 일치도가 높다는 것을 시사한다.

일사량 간의 산점도 분석 결과, 대부분의 점들이 대각선(이상적인 예측선)에 근접해 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 예측값이 실제값을 전반적으로 잘 따라가고 있으며, 모델의 전역적 예측 정확도와 선형적 일치도가 높다는 것을 시사한다.

이는 R^2 Score 0.96, RMSE 0.1842와 함께 모델이 정확도와 신뢰도 모두에서 양호한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.



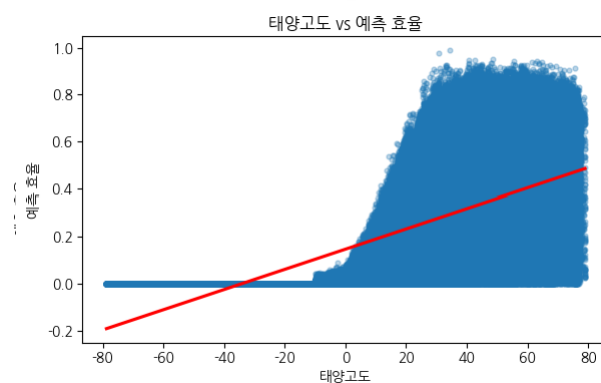
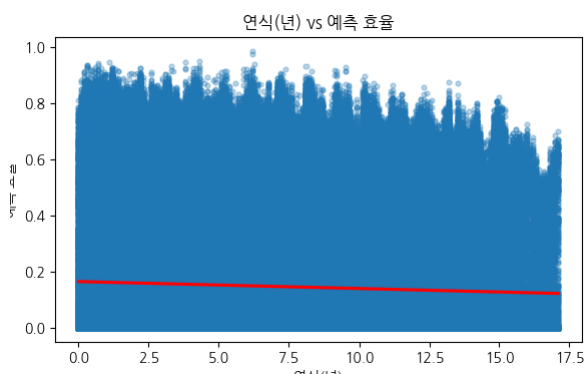
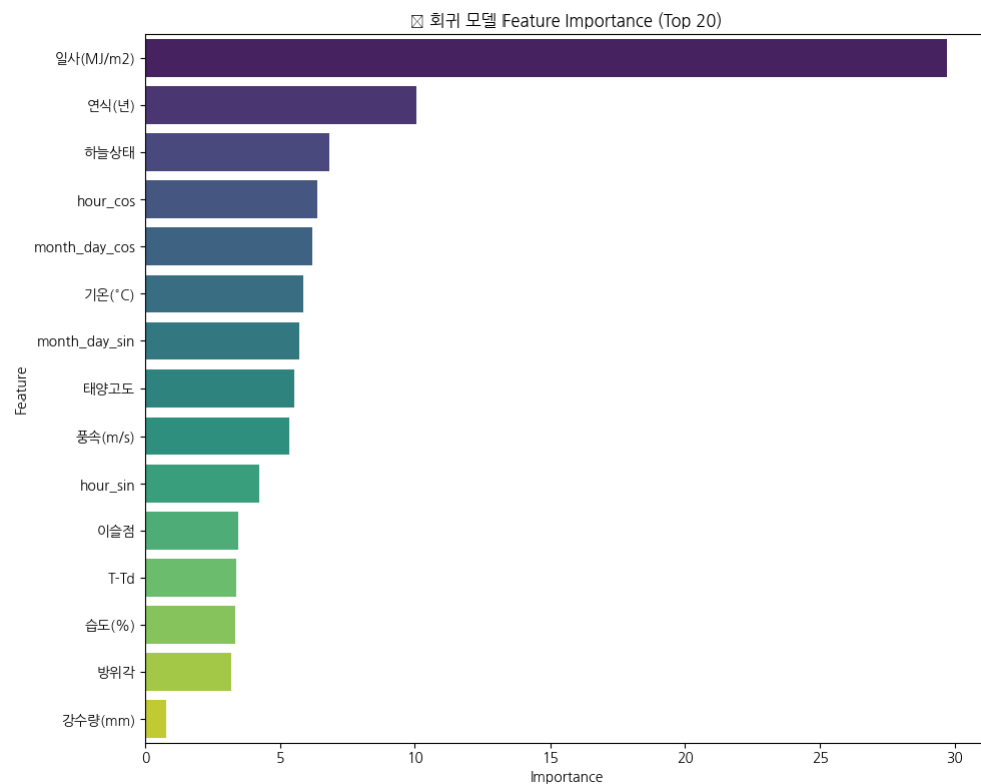
일사량 예측을 위한 Two-Stage 모델의 각 단계에서 사용된 LightGBM 모델의 변수 중요도를 분석한 결과, 단계별로 중요한 변수가 다소 상이하게 나타났다.

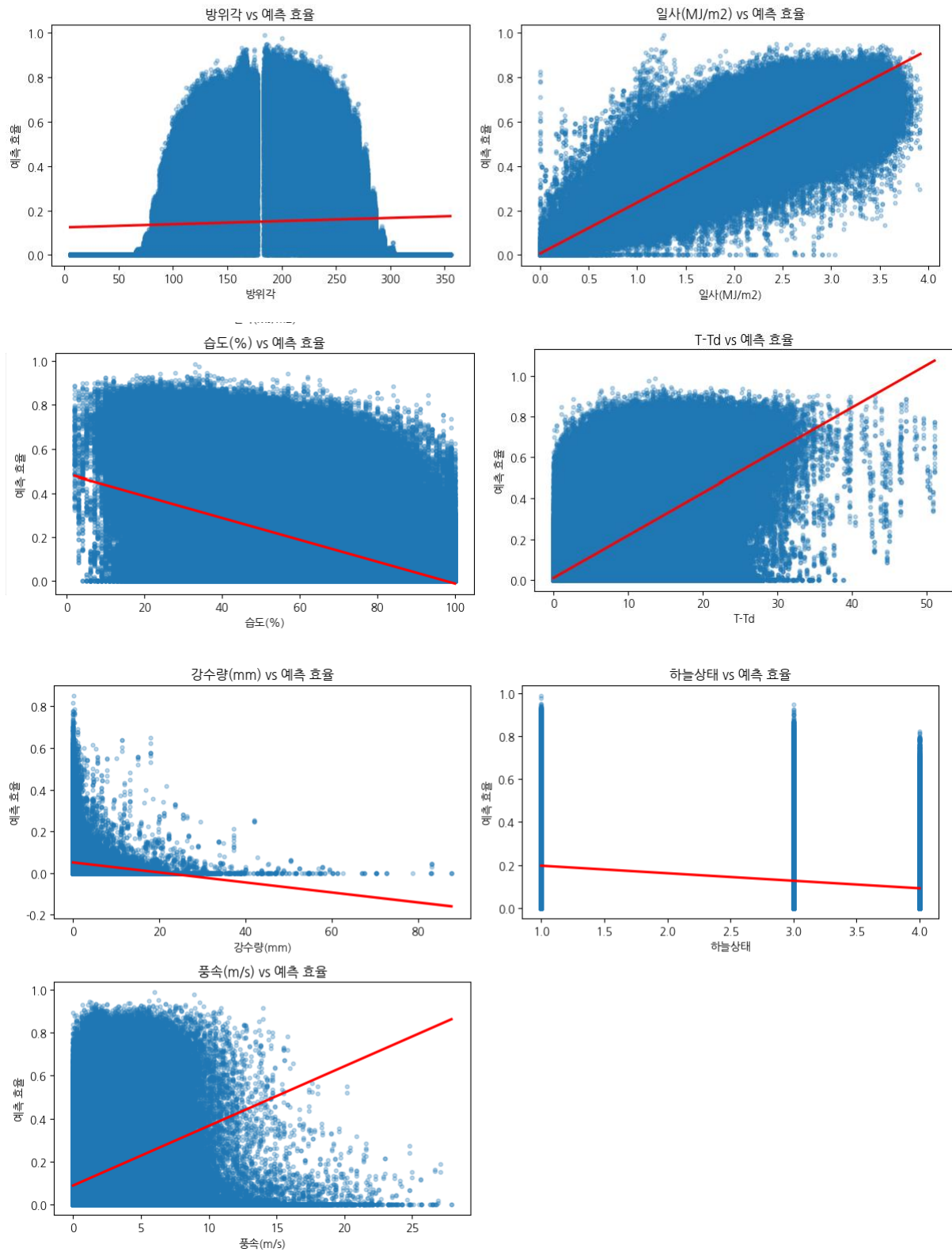
분류 모델의 변수 중요도 분석 결과, 태양고도, 기온, 풍속, T-Td, 강수량 등의 기상 및 태양 위치 관련 변수들이 높은 중요도를 보였다. 이는 모델이 일사량이 0인지 여부를 판별할 때, 일사 존재 여부와 직접적으로 관련 있는 물리적 요소들을 활용하고 있음을 보여준다.

반면, 회귀 모델의 변수 중요도에서는 태양고도와 기온이 여전히 높은 중요도를 보이고 있으며, 시간변수도 보다 높은 비중을 차지했다. 이는 모델이 일사량 수치를 정밀 예측할 때 시간적·계절적 패턴이 중요한 요소로 작용하고 있음을 의미한다.

이러한 결과는 모델이 단지 수치적으로 유의한 변수만 사용하는 것이 아니라, 실제 일사량의 생성 원리와 관련된 물리적·천문학적 요인들을 의미 있게 반영하고 있다는 점에서 모델의 해석 가능성과 타당성을 강화하는 근거로 활용될 수 있다.

CatBoost 기반 발전 효율 예측 모델





피쳐 중요도 분석 결과, 발전 효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 단연코 '일사 (MJ/m²)'였다. 이는 태양광 발전에서 가장 직접적인 에너지원이 태양 복사량이기 때문으로, 일사가 많을수록 효율이 높아지는 것은 자연스러운 결과다.

그 다음으로 중요한 변수는 '연식(년)'으로 나타났다. 이는 발전소가 설치된 이후의 경과 연수로, 설비의 노후화가 발전 효율에 영향을 미친다는 점을 시사한다. 즉, 설비가 오래 될수록 효율이 점차 낮아지는 경향이 있다. '하늘상태' 또한 중요한 변수 중 하나로, 흐림, 맑음 등 대기 상태는 일사량과 직접적인 상관관계를 가지며, 결과적으로 효율에 영향을 미친다.

시간 관련 파생 변수인 hour_cos, hour_sin, month_day_cos, month_day_sin 등의 중요도도 높게 나타났는데, 이는 태양의 고도나 위치 변화에 따른 일사량의 주기성이 발전 효율에 영향을 준다는 것을 반영한다. 기온, 풍속, 습도, 강수량, T-Td(기온과 이슬점의 차) 등 기상 요소들도 효율 예측에 유의미한 영향을 주는 것으로 나타났다.

각 변수와 발전 효율 간의 관계를 시각화한 산점도들을 통해 보다 구체적인 해석이 가능하다. 우선 습도(%)와 발전 효율의 관계를 보면, 전반적으로 습도가 높을수록 효율은 낮아지는 경향이 있다. 이는 습한 날일수록 대기 중 수증기와 입자들이 많아져 태양광이 산란되거나 차단되어 발전 효율이 떨어지기 때문이다.

반면, T-Td(기온과 이슬점의 차)가 클수록, 즉 대기가 건조할수록 효율은 증가하는 추세를 보인다. 이는 대기가 건조할수록 태양광이 더 잘 투과되며, 모듈 표면에 응결이 생길 가능성도 낮아져 발전 조건이 좋아지기 때문으로 해석된다. 강수량(mm)과의 관계에서는, 비가 많이 올수록 발전 효율이 급격히 떨어지는 명확한 음의 상관관계가 관측된다. 이는 비가 오는 동안 일사량이 현저히 낮아지고, 발전 모듈 위에 수분이 쌓이거나 오염이 유입되어 효율을 저하시킬 수 있기 때문이다.

또한 풍속(m/s)은 효율과 양의 상관관계를 나타낸다. 일반적으로 바람이 불면 모듈이 식혀지고, 온도가 너무 높아지는 것을 방지할 수 있어 발전 효율이 개선된다. 즉, 일정 수준의 풍속은 모듈의 냉각 효과를 제공함으로써 성능을 유지시켜주는 역할을 한다.

이 외에도 태양고도는 일사량과 마찬가지로 효율과 밀접한 관계를 가지며, 태양고도가 높을수록 발전 효율도 증가하는 추세를 보인다. 방위각과 효율 간에는 일정한 패턴이 관찰되며, 설비의 방향이 태양 방향과 일치하는 정도에 따라 효율에 차이가 발생하는 것으로 보인다.