

미세먼지가 태양광 발전량에 미치는 비선형적 영향: 충청남도 시공간 패널 분석

Nonlinear Impacts of Particulate Matter on Solar PV Generation: A Spatiotemporal Panel Analysis of Chungcheongnam-do

박재원* · 김문준**

Jaewon Park · Moon Joon Kim

요약: 본 연구는 충청남도를 대상으로 시간별 태양광(PV) 발전량과 미세먼지(PM_{10} · $PM_{2.5}$), 기상자료를 결합한 고해상도 시공간 패널을 구축하고, 대기오염이 PV 출력에 미치는 영향을 분석하였다. 시간·월 고정효과와 복사·기상 변수를 통제한 시간단위 회귀(Newey-West)에서 PM_{10} · $PM_{2.5}$ 는 발전량을 유의하게 감소시켰으며, $PM_{2.5}$ 의 영향이 더 크게 추정되었다. 비모수적 탐색은 오염-발전 관계가 선형이 아니라 농도 구간별로 효과가 달라지는 비선형(비단조) 구조임을 보여준다. 또한 풍속: 풍향(16방위) 상호작용 모형은 서해안-내륙 유입 풍향에서 발전량 저하가 강화됨을 확인해, 수송경로 기반의 조건부 충격을 시사한다. 이는 고빈도 자료 기반의 대기질-기상 통합 모형이 발전량 예측과 계통 운영에 필수적임을 의미한다.
핵심주제어: 미세먼지, 태양광 발전, 비선형 효과, 시공간 패널

Abstract: We construct a high-resolution spatiotemporal panel for Chungcheongnam-do, Korea, by merging hourly solar PV output with $PM_{10}/PM_{2.5}$ and meteorological variables, and estimate the impact of air pollution on PV performance. Hourly fixed-effects regressions with radiative and weather controls (Newey-West) show significant negative effects of both PM measures, with larger impacts for $PM_{2.5}$. Nonparametric evidence suggests a nonlinear (potentially non-monotonic) relationship between pollution and PV, which varies across different concentration ranges. An extended specification with wind-speed:16-direction interactions further reveals strong directional heterogeneity: PV losses intensify under coastal-to-inland inflow directions, consistent with a transport-pathway mechanism. The results stress the need for high-frequency, integrated weather-pollution models for accurate solar forecasting and grid operations.

Key Words: Particulate Matter, Solar PV, Nonlinear Effects, Spatiotemporal Panel

* 제1저자, 조지메이슨대학교 경제학과

** 교신저자, 한국조지메이슨대학교 경제학과

I. 서론

전 세계적으로 태양광(Photovoltaic, PV) 발전은 균등화발전비용(LCOE)의 급격한 하락과 기술적 효율 향상에 힘입어 가장 빠르게 확장되는 재생에너지원으로 자리 잡고 있다(Mülmenstädt and Feingold, 2018; Liu, Xing, Zhao, Wang, Wang and Zhang et al., 2019). 그러나 태양복사, 대기 에어로졸, 운량 간의 상호작용은 일사량의 지표 도달을 구조적으로 제약하는 요인으로 작용하며(Li, Lau, Ramanathan, Wu, Ding and Manoj et al., 2016), 이는 태양광 발전의 실제 출력이 대기 및 기상 조건에 대한 의존도가 매우 높음을 시사한다.

특히 대기오염물질은 (i) 부유 에어로졸에 의한 광학적 산란 및 흡수(scattering/absorption), (ii) 패널 표면 침적에 의한 오염(soiling)이라는 두 가지 물리적 경로를 통해 발전량을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 중국과 인도를 대상으로 한 선행 연구들은 PM 농도 상승이 태양광 잠재력을 10-50%까지 위축시킬 수 있음을 경고하였으나(Bergin, Ghoroj, Dixit, Schauer and Shindell, 2017; Li, Mauzerall and Bergin, 2020), 이들 연구의 대다수는 장기적인 누적 에어로졸 증가에 따른 발전 손실 시나리오를 제시하는 데 주력하고 있어(Sweerts, Pfenninger, Yang, Folini, Van der Zwaan and Wild, 2019), 전력 시장의 운영 효율성을 결정짓는 단기적 발전 변동성과 그 인과적 메커니즘을 설명하는 데는 한계가 있다.

동아시아는 세계적으로 가장 높은 에어로졸 부하를 기록하는 지역 중 하나로, 몬순 순환과 기류 변화가 결합된 복잡한 오염-기후-복사 체계를 형성하고 있다(Li et al., 2016; Rosenfeld, Andreae, Asmi, Chin, de Leeuw and Donovan et al., 2014). 한국 역시 산업 배출, 도시화, 국경 간 장거리 수송이 중첩되며 계절별 미세먼지 변동성이 매우 크다(Wang and Yi, 2024; Heo, Lee and Bell, 2021). 그 중에서도 본 연구가 주목하는 충청남도는 대한민국의 에너지 전환 딜레마를 가장 압축적으로 보여주는 독보적인 공간이다.

충남은 보령, 당진, 태안 등 서해안 벨트를 따라 국내 최대 규모의 석탄화

력발전소와 제철·석유화학 단지가 밀집해 있어, 국가 전체에서 가장 높은 수준의 대기오염 배출 부하를 감당하고 있다. 동시에 이 지역은 풍부한 일사량과 넓은 평지를 바탕으로 대규모 태양광 발전 단지가 급속히 보급되고 있는 지역이기도 하다. 즉, 오염원(화력발전)과 청정 에너지원(태양광)이 동일한 공간 내에서 물리적·화학적으로 상호작용하는 독특한 생태계를 형성하고 있는 것이다.

특히, 기존 대기질 연구들에 따르면 충남 지역의 미세먼지는 단순한 토양 기원 입자가 아니라, 황산염과 질산염 등 산업 기원의 2차 생성입자 비중이 높아 복사감쇠 효과가 구조적으로 강화되는 특징을 보인다(주서령, 유근해, 박승식, 이지이, 이상일, 지준범 등, 2020; 김종범, 윤수향, 이상신, 김경환, 노수진, 배귀남, 2020). 아울러 역궤적 분석 결과, 서해안 PM의 상당 부분이 중국 및 산둥반도에서 기원하는 장거리 수송 기류의 영향을 받는 것으로 나타나(He, Kim, Ogunjobi and Hong, 2003), 국지적 배출과 광역적 유입이 혼재된 복합적인 오염 동학을 보인다.

그럼에도 불구하고 국내 기존 문헌들은 이러한 지역적 특수성과 미세먼지의 인과적 효과를 충분히 규명하지 못했다. 대다수 연구는 단순 상관관계 분석이나 특정 측정소 중심의 접근에 머물러 있어, 산업입자·풍계·지형·기상요인이 복합적으로 작용하는 충남의 미시적 오염 구조를 반영하지 못한다. 최근 Kim(2024)은 전국 단위 자료를 활용하여 PM_{10} 과 태양광 발전량의 관계를 도구변수로 추정된 실증 결과를 제시했으나, 거시적 데이터는 지역 간 기류 동학이나 오염 군집의 이질성에 따른 발전량 저하 메커니즘을 정밀하게 포착하기 어렵다.

요컨대, 선행연구들은 미세입자의 광학적 효과를 중심으로 태양광 발전 저하를 설명해 왔으며, 대기 중 미세입자가 태양 복사를 산란·흡수함으로써 지표면에 도달하는 유효 일사량을 감소시키고 결과적으로 태양광 발전량을 저해할 수 있음을 물리적·실증적으로 제시해 왔다(Liu, Sun, Tan, Ho, Zhao and Hove, 2023). 그러나 태양광 발전량 변동의 상당 부분은 일사량·일조시간·운량·습도 등 복사 환경과 직접적으로 연관된 기상 변수에 의해 설명되

며, 이러한 요인들이 충분히 통제되지 않을 경우 미세먼지의 효과는 기상 상태의 대리 변수로 과대 추정될 가능성이 있다(Bradford, Walker, Moon and Ibanez, 2020). 이로 인해 미세먼지의 단기적·조건부 효과와 대기 수송 경로에 따른 이질성은 여전히 충분히 규명되지 못하고 있다. 더욱이 미세먼지의 영향이 농도 수준에 따라 선형적으로 작동하는지, 혹은 특정 구간에서 급격히 강화되는 비선형 구조를 갖는지에 대해서도 실증적 합의가 부족하다.

본 연구는 이러한 기존 문헌의 한계를 극복하기 위해, 충청남도 전역을 대상으로 고해상도 시공간 패널(Spatiotemporal Panel) 데이터를 구축하여 대기오염이 태양광 발전량에 미치는 비선형적 영향을 실증적으로 분석한다. 본 연구는 충남이 (i) 대규모 발전단지과 산업시설의 연속적 배치, (ii) 서해안-내륙 간 뚜렷한 오염 군집, (iii) 장거리 수송·국지순환·지형 효과가 결합된 복합 오염 동학을 보인다는 점에서 분석에 최적화된 환경을 제공한다는 점에 주목한다(Zhu, Yang, Liu, Wang, Zhou and Zhu et al., 2022). 이에 본 연구는 읍·면·동 단위의 세밀한 공간 해상도를 확보함으로써 오염원과의 거리에 따른 농도 구배(Gradient)와 국지적 기상 이질성을 모형에 반영하고자 했다. 또한 시간(Hourly) 단위의 고빈도 자료를 활용하여, 일평균 데이터에서는 희석되기 쉬운 순간적인 광학적 산란 효과와 발전량의 동적 반응까지 포착하였다.

본 연구의 목적은 (i) 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)가 태양광 발전량에 미치는 단기적 영향의 크기와 형태(비선형성)를 정량화하고, (ii) 대기 이동 경로(풍향·풍속 등)에 따라 그 영향이 어떻게 달라지는지(이질성)를 실증적으로 규명하는데 있다. 이를 위해 다음 가설을 검증한다.

- 가설1(비선형성):미세먼지 농도가 증가할수록 태양광 발전량은 감소하며, 그 한계효과는 일정하지 않고 농도 구간에 따라 달라지는 비선형 구조를 갖는다(예: 고농도 구간에서 감소폭이 더 커짐).
- 가설2(경로별 이질성):동일한 미세먼지 농도라도 풍향·풍속 등으로 대변되는 대기 이동 경로(transport pathway)가 달라지면 태양광 발전량 감소효과의 크기가 유의하게 달라진다(예: 특정 풍향/해륙풍 조건에서 효과가 강화됨).

이러한 검증은 충청남도와 같은 산업·재생에너지 복합 지역에서 대기질 관리와 재생에너지 확산을 동시에 고려한 입지·운영·예측 정책(예: 발전량 예측모형 고도화, 고농도 시 계통운영 대응, 지역 맞춤형 저감 우선순위) 설계에 필요한 실증적 근거를 제공한다.

II. 이론적·물리적 메커니즘

태양광 발전량은 패널에 도달하는 일사량(Solar Irradiance)과 모듈의 광전 변환 효율에 의해 결정되며, 이 두 요소는 대기 중 입자상 물질과 기상 조건의 상호작용에 의해 즉각적이고 비선형적인 영향을 받는다. 대기오염이 태양광 발전량을 저해하는 물리적 경로는 크게 (i) 부유 에어로졸에 의한 복사 강제력(Radiative Forcing) 변화, (ii) 패널 표면 침적(Soiling)에 의한 투과율 감소, (iii) 기상 변수와 연동된 열역학적 효율 저하로 구분된다(Kawajiri, Oozeki and Genchi, 2011; Li, Wagner, Peng, Yang and Mauzerall, 2017).

특히 동아시아 연안 및 산업지역에서는 미세먼지가 단순한 입자상 물질을 넘어, 화학적 조성과의 상호작용을 통해 복사 감쇠 효과를 증폭시키는 특성을 보인다. 선행연구들은 황산염·질산염 등 흡습성(hygroscopic) 성분을 포함한 에어로졸이 상대습도 조건에 따라 광학적 산란 효율을 비선형적으로 증가시킬 수 있음을 지적해 왔다(Li et al., 2016; Sweerts et al., 2019). 따라서 태양광 발전량에 대한 대기오염의 영향은 단순한 농도 효과를 넘어, 입자의 화학적 조성과의 기상 조건이 결합된 복합적 메커니즘으로 이해될 필요가 있다.

1. 에어로졸의 광학적 특성과 복사 감쇠(Radiative Attenuation)

대기 중에 부유하는 입자상 물질(Particulate Matter, PM)은 지표 도달 일사량(Global Horizontal Irradiance, GHI)을 감소시키는 가장 직접적인 요인이다. 이는 입자가 태양 복사 에너지를 산란(Scattering)시키거나 흡수(Absorption)하여 지표에 도달하는 광자(Photon)의 수를 줄이는 과정으로, 물리적으로는 램버트-비어 법칙(Lambert-Beer Law)에 따른 지수 함수적 감쇠로 설명된다(Sweerts et al., 2019). 즉, 대기 중 에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)가 증가함에 따라 직달 일사는 급격히 감소하며, 이는 발전량의 비선형적 저하를 유발하는 핵심 기제가 된다.

특히, 입자의 크기에 따라 광 산란 효율은 현저한 차이를 보인다. PM_{2.5}와 같은 미세입자는 가시광선 파장 대역과 유사한 입경을 가져 미(Mie) 산란을 통해 직달 일사를 산란광으로 전환시키는 효율이 매우 높다. 반면, PM₁₀에 포함된 굵은 입자(Coarse Mode)는 상대적으로 산란 효율이 낮다(Li et al., 2017). 이러한 광학적 특성은 본 연구가 총부유분진(TSP) 대신 PM₁₀과 PM_{2.5}를 구분하여 각각의 한계 효과를 추정하는 이론적 근거가 된다.

2. 충남권 에어로졸의 화학적 조성 and 흡습성장(Hygroscopic Growth)

본 연구의 대상지인 충청남도는 대기오염과 발전량의 관계가 단순한 물리적 차단을 넘어 화학적 상호작용으로 확장되는 지역적 특수성을 지닌다. 선행 연구에 따르면, 충남 서해안 산업단지 및 화력발전소 인근의 미세먼지는 황산염과 질산염 등 2차 생성 무기 이온의 비중이 타 지역 대비 월등히 높다(주서령 등, 2020; 신지혜, 김영민, 박천웅, 안정준, 유하나, 김종숙 등, 2021).

이러한 염류 성분은 강한 흡습성을 지니고 있어, 대기 중 상대습도(RH)가 임계점을 초과할 경우 수분을 흡수하여 입자가 팽창하는 조해(Deliquescence) 현상을 일으킨다. 입자의 팽창은 산란 단면적(Scattering Cross-section)을 급격히 증가시키므로, 동일한 질량 농도의 미세먼지라 할지라도 건조한 내륙 지역보다 습도가 높은 서해안 지역에서 일사량 차단 효과가 훨씬 강력하게 나타난다.

다(Li et al., 2016). 따라서 충남 지역의 태양광 발전량 분석에서는 미세먼지 농도 뿐만 아니라 습도와와의 상호작용이 발전량 감소를 증폭시키는 주요 메커니즘으로 작용할 가능성이 크다.

3. 표면 오염(Soiling) 및 기상 변수의 열역학적 영향

부유 입자가 패널 표면에 가라앉아 형성되는 표면 오염(Soiling) 또한 발전량을 저하시키는 요인이다(El-Shobokshy and Hussein, 1993). 그러나 강우에 의한 자연 세정(Wash-out) 효과가 빈번한 한국의 기후 특성상, 장기적인 누적 효과보다는 고농도 미세먼지 발생 시의 단기적인 광 투과율 저하가 더 유의미한 변수로 작용한다. 더불어 기온, 풍속, 습도 등의 기상 조건은 태양광 모듈의 열역학적 효율을 결정짓는다. 일반적으로 태양광 모듈은 온도가 1℃ 상승할 때마다 효율이 감소하는 부(-)의 온도 계수를 갖는다(Dubey, Sarvaiya and Seshadri, 2013). 이때 풍속은 모듈의 냉각을 돕는 긍정적 요인으로 작용하는 반면, 고습 조건은 수증기에 의한 복사 흡수와 앞서 언급한 에어로졸의 흡습성장을 동시에 유발하여 발전량을 이중으로 감소시키는 요인이 된다(Mekhilef, Saidur and Kamalisarvestani, 2012).

종합하면, 대기오염은 단순한 빛의 차단을 넘어, 입자의 크기(PM_{10} vs $PM_{2.5}$)와 화학적 조성(흡습성), 그리고 기상 조건(습도·기온)이 복합적으로 결합된 경로를 통해 태양광 발전 출력에 구조적인 영향을 미친다. 이러한 이론적·물리적 메커니즘은 본 연구가 충청남도의 고해상도 시공간 데이터를 활용하여 미세먼지의 농도별, 성분별, 기상 조건별 차등 효과를 실증적으로 규명해야 하는 당위성을 제공한다.

III. 대기오염-태양광 발전의 실증적 연구 및 공간분석 접근

앞선 장에서 논의한 물리적 메커니즘이 실제 자료에서 어떤 양상으로 나타나는지 살펴보기 위해, 본 장에서는 국내외 선행 연구를 검토하고 충남 지역의 오염 특성을 분석한다. 대기오염은 복사감쇠, 표면오염, 기상변조라는 다층적 경로를 통해 태양광 발전량을 구조적으로 저하시키며, 이러한 물리적 현상은 재생에너지 보급 정책의 비용편익 분석, 전력 계통의 안정성 확보, 최적 발전 입지 선정 등 사회경제적 의사결정의 핵심 변수로 작용한다. 이에 따라 최근 학계에서는 대기오염과 발전량 간의 인과관계를 정량적으로 식별하고, 지역별 기상 및 지형 요인을 고려한 공간 계량적 접근을 통해 그 복합적인 메커니즘을 규명하려는 시도가 확대되고 있다.

이에 본 장에서는 관련 해외 실증연구를 검토하고, 충청남도의 오염 특성과 공간 구조를 심층 분석함으로써 본 연구가 채택한 시공간 패널(Spatiotemporal Panel) 접근의 타당성을 확보하고자 한다.

1. 해외 실증연구: 복사감쇠와 발전 손실의 경제적 함의

해외의 선행 연구들은 주로 위성 관측 자료와 지상 일사량 데이터를 결합하여 대기오염에 의한 발전 손실을 거시적 관점에서 추정해 왔다. Li et al.(2017)은 중국 전역의 AOD와 일사량 자료를 결합한 분석을 통해, 고농도 PM 지역의 태양광 발전 잠재력이 평균 11-15% 감소하며, 산업화 및 도시화가 집중된 지역일수록 이러한 감쇠 효과가 가중됨을 보고하였다. 나아가 Sweerts et al.(2019)은 1960년부터 2015년까지의 장기 복사량 시계열 분석을 통해 누적 에어로졸의 증가가 태양광 발전 손실의 구조적 원인임을 규명하고, 강력한 대기질 개선 정책이 수반될 경우 발전량이 최대 20%까지 회복될 수 있다는 시나리오를 제시하였다. 이는 공기질 개선이 에너지 생산 효율성 향상으로 이어지는 거시적 파급 경로를 입증한 것이다(Kuang, Tan and Zhang, 2023).

미시적 관점에서는 입자상 물질의 물리적 침적 효과에 주목한 연구들도

존재한다. Bergin et al.(2017)은 대기 중 부유 입자에 의한 복사 산란 뿐만 아니라 패널 표면에 쌓이는 분진(Soiling) 효과가 결합될 경우, 실제 발전량이 평균 17-25%까지 감소할 수 있음을 실증하였다. 특히 사막이나 도심 지역과 같이 강수 세정 효과가 불규칙한 환경에서는 분진 침적만으로도 40% 이상의 출력 저하가 발생할 수 있음이 확인되었다(El-Shobokshy and Hussein, 1993; Mani and Pillai, 2010).

또한, 기상 조건과의 상호작용 역시 중요한 변수이다. Mekhilef et al.(2012)과 Dubey et al.(2013)은 기온 상승, 고습도, 풍속 저하가 태양광 모듈의 열역학적 효율을 체계적으로 떨어뜨리며, 이러한 기상 요인이 오염물질의 확산 및 광학적 특성과 밀접하게 공변(Covariate)함을 강조하였다.

종합하면, 해외 선행 연구들은 대기오염이 태양광 발전량을 저해하는 현상이 단일 요인이 아닌, 복사감쇠·표면오염·기상변조가 결합된 비선형적 메커니즘임을 시사한다. 이는 단순한 평균적 농도 분석을 넘어, 지역의 산업 입지, 풍계, 지형적 특성에 따른 공간적 이질성(Spatial Heterogeneity)을 고려한 정밀한 분석이 필수적임을 의미한다.

2. 국내 연구: 충청남도의 오염 특성과 공간 구조의 특수성

국내 문헌 중 대기오염과 태양광 발전량을 직접적으로 연계한 실증 연구는 상대적으로 제한적이다. 그러나 충남 및 수도권 권역을 대상으로 한 대기질 연구들은 충남 지역 특유의 오염원 분포, 화학적 조성, 국지 순환 특성을 규명함으로써, 이 지역에서 태양광 발전량 저하가 발생할 수 있는 물리적·공간적 전제 조건을 명확히 제시하고 있다.

1) 충남권 오염 특성: 조성·농도·계절성

충청남도는 화력발전소와 산업단지가 밀집한 서해안 벨트와 내륙 도시권이 공존하여, 오염원의 분포와 화학적 조성이 공간적으로 뚜렷이 구분된다. 선행 연구에 따르면, 서산·당진 등 서해안 지역의 $PM_{2.5}$ 는 황산염(SO_4^{2-})과

질산염(NO_3^-) 등 2차 생성 무기 이온의 비중이 타 지역 대비 유의하게 높다(주서령 등, 2020; 신지혜 등, 2021). 이러한 염류 성분은 높은 흡습성을 가져 입자의 광학적 산란 효율을 극대화하므로, 동일 농도라 하더라도 서해안의 발전 저하 효과가 구조적으로 클 수 있음을 시사한다.

반면, 천안·아산 등 북부 및 내륙권은 상대적으로 자동차 등 교통 배출원의 영향을 더 많이 받는 것으로 보고된다(김종범 등, 2020). 또한 흑탄소(Black Carbon)와 같은 광 흡수성 에어로졸 역시 국지 풍향에 따라 변동 폭이 커(Cha, Lee and Lee, 2019), 충남 내에서도 지역별로 태양광 패널에 도달하는 입자의 광학적 성질이 상이함을 알 수 있다.

2) 기상 및 국지 순환에 따른 오염 확산 메커니즘

충남 지역의 미세먼지 농도는 서해안의 지리적 특성과 결합된 국지 순환(Local Circulation)에 의해 복잡한 시공간 패턴을 보인다. Lee, Lee, Choi, Kim and Kim(2024)은 충남 지역의 고농도 사례를 해륙풍형, 종관형, 정체형으로 유형화하였다. 특히 대기 정체형(Stagnation) 조건에서는 지상풍 약화로 오염물질의 수평 확산이 억제되어 농도가 급증하며, 해륙풍형 조건에서는 주간에는 내륙으로 이동한 오염운(Plume)이 야간에 다시 연안으로 재유입되는 순환 구조가 확인되었다.

장거리 수송의 영향 또한 지배적이다. He et al.(2003)의 역궤적 분석에 따르면, 충남 서해안은 중국 산둥반도 등 국외에서 유입되는 기류의 직접적인 영향권에 놓여 있다. 이는 충남 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 현상이 지역 내 배출뿐 아니라 외부 유입에 의한 기저 농도 상승과 증첩되어 발생함을 의미하며, 태양광 발전량 변동성을 예측하기 위해서는 이러한 광역적 기류 분석이 병행되어야 함을 보여준다.

3) 공간적 군집(Spatial Clustering)과 이질성

충청남도의 미세먼지 분포는 단순한 행정 경계를 넘어, 지형과 풍계에 따른 고유한 오염 군집(Cluster)을 형성한다. 서지훈, 권재은, 김종범, 윤대옥, 김경환, 이광열 등(2024)의 공간 상관성 분석 결과, 당진·서산·보령·태안 등 서해안 발전단지 인근 지역은 서로 높은 농도 동조화 현상을 보인 반면, 차령 산맥을 경계로 한 내륙 지역(대전·세종 등)과는 상관성이 낮게 나타났다. 이는 충남의 대기질이 '서해안 발전·산업 권역'과 '내륙 도시 권역'으로 구조적으로 분절(Decoupling)되어 있음을 시사한다.

또한 Choi, Song, Kim, Kim and Cho(2023)은 시계열 군집 분석을 통해 서해안 지역이 겨울철 북서풍 계열의 바람 조건에서 고농도가 반복되는 독자적인 패턴을 보임을 확인하였다. 반면 내륙 지역은 지형적 차폐 효과로 인해 국지적 정체 시 농도 변동성이 증폭되는 경향을 보였다.

종합하면, 충청남도의 대기환경은 (i) 흡습성이 강한 2차 에어로졸의 높은 비중, (ii) 해륙풍 및 장거리 수송에 의한 복잡한 확산 경로, (iii) 서해안과 내륙으로 구분되는 공간적 군집 구조로 요약된다. 그럼에도 불구하고 기존 문헌은 태양광 발전과 대기오염의 관계를 정책·운영 차원에서 직접 활용하기에는 몇 가지 공백을 남긴다.

첫째, 다수 연구가 연평균·일평균 등 저빈도 자료에 기반하거나 장기적 누적 손실(예: 오염 증가 시나리오)에 초점을 두어, 계통 운영과 발전 예측에서 핵심인 단기(시간 단위) 출력 변동과 그 인과적 메커니즘을 충분히 설명하지 못한다. 둘째, 미세먼지의 효과를 선형으로 가정하는 경우가 많아, 농도 수준에 따라 한계효과가 달라질 수 있는 비선형 구조(고농도 구간에서의 급격한 효율 저하 등)를 체계적으로 검증한 연구는 제한적이다. 셋째, 충청남도처럼 대규모 배출원(석탄화력·산단)과 재생에너지 확대가 공존하고, 풍향·풍속에 따라 국지 배출과 광역 이동(transport)이 혼재하는 지역에서는 동일한 농도라도 대기 조성·기상 조건이 달라 발전 손실의 크기가 달라질 수 있는데, 이러한 공간적·기류 경로별 이질성을 고해상도로 식별한 국내 실증연구는 드물다. 본 연구는 이 공백을 메우기 위해 충청남도 전역의 시간별 발전량·대

기질-기상 정보를 결합한 고해상도 시공간 패널을 구축하고, 비선형성과 경로별 이질성을 동시에 검증함으로써, 대기질-재생에너지 연계 정책과 계통 운영에 직접 활용 가능한 근거를 제시한다.

IV. 연구자료 및 방법

본 연구는 미세먼지와 태양광 발전량 간의 인과적 메커니즘을 정밀하게 규명하기 위해, 충청남도 전역의 시간별(hourly) 태양광 발전량, 고해상도 대기오염농도(PM_{10} · $PM_{2.5}$), 그리고 기상 변수(온도·습도·풍속·운량)를 3차원적으로 결합한 시공간 패널(Spatiotemporal Panel) 데이터를 구축하였다. 연구 대상지인 충청남도는 국내 최대 규모의 석탄화력발전 단지가 밀집한 지역으로, 발전소 배출 오염원이 지리적·기상학적 요인과 결합하여 복합적인 대기질 패턴을 형성한다. 이러한 공간적 특성은 오염물질의 확산 경로와 그에 따른 태양광 발전량의 비선형적 반응을 실증하기 위한 최적의 '자연 실험(Natural Experiment)' 환경을 제공한다.

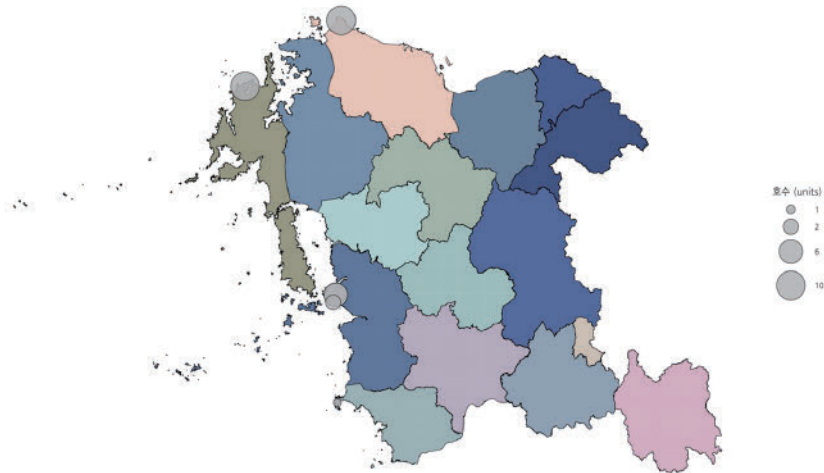
1. 충청남도 석탄화력발전소의 공간적 배분 및 배출 특성

충남 지역의 대기질은 권역 내 위치한 대규모 석탄화력발전소의 배출 특성에 의해 구조적으로 지배받는다. 충남 서해안에는 보령, 당진, 태안, 서천 등 국내 핵심 발전 단지가 연안 벨트를 따라 선형으로 배치되어 있으며, 이들은 충남 전체 대기오염물질 배출량, 특히 PM_{10} , SO_x , NO_x 배출의 상당 부분을 점유하고 있다. <표 1>은 본 연구의 분석 범위에 포함된 주요 화력발전소의 지리적 제원과 설비 현황을 요약한 것이다. 총 5개의 거점 발전단지(보령, 신보령, 당진, 서천, 태안)는 모두 해안선에 인접해 있으며, 서로 약 20-40km의 등간격으로 군집(Cluster)을 형성하고 있다. <그림 1>은 이러한 발전단지들의 지리적 분포를 충청남도 행정구역도(Shapefile) 상에 시각화한 것으로, 대규모 오염원이 서해안 라인을 따라 밀집해 있는 공간적 편재성을 직관적으로 보여준다.

〈표 1〉 충청남도 석탄화력발전소 주요 배치 현황

발전소명	좌표	주소	설비용량 (호기)
신보령발전본부 (신보령1·2호기)	36°23'04.7"N, 126°29'15.3"E	충남 보령시 주교면 송도길, 한국중부발전 신보령발전본부	2
당진화력 (1-10호기)	37°03'19.1"N, 126°30'40.7"E	충남 당진시 석문면 교로길30	10
보령화력 (3-8호기)	36°24'09.4"N, 126°29'44.9"E	충남 보령시 오천면 오천해안로89-37	6
서천화력 (신서천1호기)	36°08'47.9"N, 126°29'57.2"E	충남 서천군 서면 서인로265	1
태안화력 (1-10호기)	36°53'53.6"N, 126°13'35.9"E	충남 태안군 원북면	10

〈그림 1〉 충청남도 내 주요 석탄화력발전소 위치도



이러한 지리적 배치는 대기과학적 관점에서 두 가지 중요한 함의를 갖는다. 첫째, 발전소가 서쪽에 위치하고 내륙이 동쪽에 위치하는 구조는 한반도의 주 풍계인 북서풍(Winter Monsoon) 및 편서풍 계열의 바람과 맞물려, 배출된 오염물질(Plume)이 내륙 깊숙이 수송되기 쉬운 경로를 형성한다. 둘째, 발전단지 간의 인접성은 개별 점오염원(Point Source)의 영향이 중첩되어 광

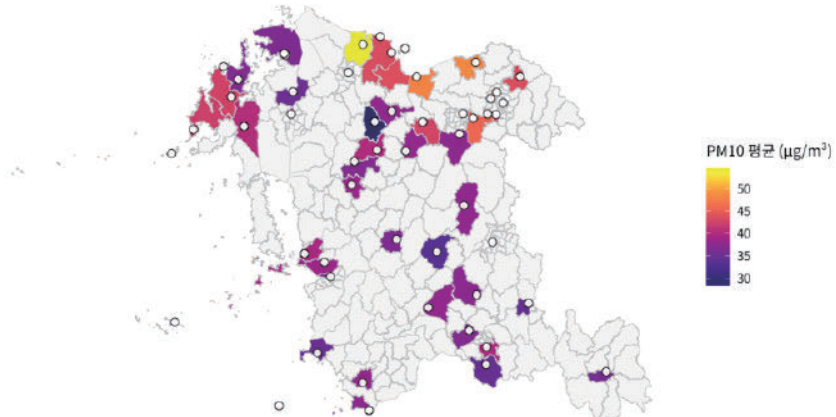
역적인 오염피를 형성하는 '누적 배출 효과'를 유발한다. 따라서 본 연구는 이러한 발전소의 위치 정보를 공간 패널 모형의 핵심 변수로 활용하여, 오염 원으로부터의 풍향 정렬(Wind Alignment) 여부가 미세먼지 농도와 태양광 발전량에 미치는 인과적 효과를 식별하고자 한다.

2. 충청남도 읍·면·동별 대기오염 공간 분포

충청남도 대기오염의 미시적 공간 특성을 파악하기 위해, 본 연구는 2019년부터 2023년까지의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 시계열 자료를 기반으로 읍·면·동 단위의 고해상도 오염지도를 구축하였다. 충남 전역에 분포한 53개 대기오염측정소(도시대기·도로변·교외대기 포함)의 좌표 정보를 활용하였으며, 측정소와 행정구역 중심점(Centroid) 간의 최인접 이웃(Nearest Neighbor) 매칭 방식을 적용하여 총 5,066개 읍·면·동의 연평균 농도 데이터를 산출하였다. 이러한 고해상도 공간화 작업은 기존 시·군·구 단위의 평균 농도가 놓치기 쉬운 오염원 인접 지역의 국지적 핫스팟(Hotspot)과 내륙 산간 지역의 농도 구배(Gradient)를 정교하게 식별하기 위한 필수적인 전처리 과정이다.

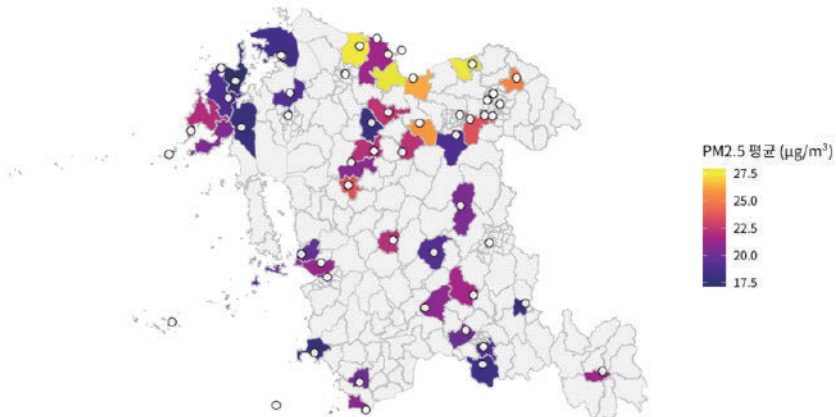
〈그림 2〉와 〈그림 3〉에 시각화된 공간 분포는 충남의 대기질이 단순한 무작위 분포가 아니라, 뚜렷한 '서고동저(西高東低)'의 공간적 구배를 형성하고 있음을 보여준다. PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 대규모 화력발전 단지가 밀집한 보령·태안·당진·서천 등 서해안 연안 벨트에서 가장 높은 농도대가 형성되었으며, 내륙 및 동남부(청양·예산·논산 등)로 갈수록 농도가 점진적으로 낮아지는 패턴이 확인된다. 이는 충남의 대기질이 도시 인구밀도나 교통량보다는, 서해안 산업축(발전소·석유화학·제철소)에서 기원하는 광역 배출 영향에 의해 구조적으로 지배받고 있음을 시사한다(충남연구원, 2023).

〈그림 2〉 충청남도 읍·면·동별 평균 PM₁₀ 농도 분포(2019.12-2023.12)



주석: 배경은 읍·면·동 행정경계를 나타내며, 색상은 해당 기간의 평균PM₁₀농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 점은 대기오염 측정소 위치를 나타낸다.

〈그림 3〉 충청남도 읍·면·동별 평균PM_{2.5} 농도 분포(2019.12-2023.12)



주석: 배경은 읍·면·동 행정경계를 나타내며, 색상은 해당 기간의 평균PM_{2.5}농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 점은 대기오염 측정소 위치를 나타낸다.

이러한 고농도 구간의 공간적 분포는 미세먼지의 화학적 성분 분석 결과와 결합될 때 태양광 발전량에 더욱 중요한 함의를 갖는다. 신지혜 등(2021)의 성분 분석에 따르면, 보령·당진 등 서해안 산업 지역의 PM_{2.5}는 황산염(SO_4^{2-})과 질산염(NO_3^-) 등 2차 생성 무기 이온의 비중이 타지역 대비 유의하게 높게 나타났다. 앞서 이론적 배경에서 논의한 바와 같이, 이러한 흡습성 염류는 연안의 높은 습도 조건과 결합하여 산란 효율을 증폭시키므로, 서해안

지역은 단순한 농도 수치 이상의 ‘광학적 발전 손실’이 발생할 위험이 크다.

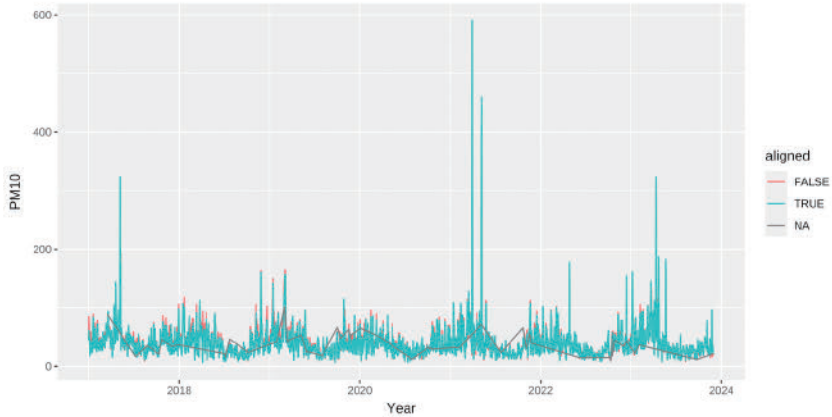
또한 이해원, 이승현, 전정인, 이정일, 이철민(2022)는 해당 지역 미세먼지에서 연료 연소 기원의 금속 성분 기여도가 높음을 확인하였고, Sung, Choi, Park, Kim, Jeon and Ahn et al.(2018)은 충남 서해안이 중국발 장거리 수송 오염물질이 유입되는 관문 역할을 함을 지적하였다. 즉, 서해안 발전단지 주변은 ‘자체 배출’과 ‘외부 유입’이 중첩되는 복합 오염권역을 형성하며, 이는 태양광 패널에 대한 복사 감쇠 효과가 연중 상시적으로, 그리고 강도 높게 발생할 수 있음을 의미한다.

반면, 차령산맥 이남의 청양, 부여, 논산 등 내륙 농경 지역은 상대적으로 낮은 농도 분포를 보인다. 이는 지형적 장벽 효과로 인해 서해안의 오염 플룸(Plume) 유입이 일부 차단되고, 자체 대형 배출원이 부재하기 때문으로 해석된다. 이러한 지역 간 뚜렷한 농도 격차와 성분 차이는 본 연구가 단일 지역 평균이 아닌, 시공간 패널 모형을 통해 오염의 한계 효과를 추정해야 하는 당위성을 뒷받침한다.

3. 발전소 풍향 정렬 여부(Wind Alignment)에 따른 PM 농도 동학

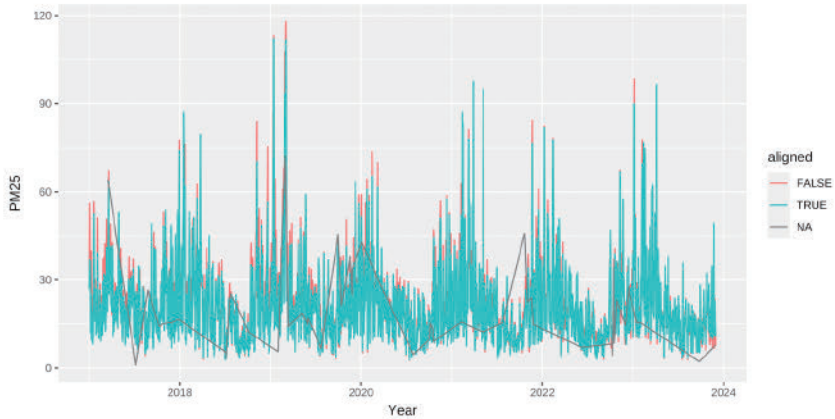
본 연구는 충남 지역의 미세먼지 농도 변동이 국지적 배출원(Local Source)에 기인하는지, 혹은 광역적 배경 오염(Regional Background)에 의해 주도되는지를 식별하기 위해 ‘풍향 정렬(Wind Alignment)’ 분석을 수행하였다. 발전소 굴뚝에서 배출된 오염 플룸(Plume)이 대기측정소로 직접 수송되는 조건을 포착하기 위해, 발전소와 측정소 간의 지리적 방위각 벡터를 산출하고 이를 시간별 실측 풍향과 결합하였다. 구체적으로는 풍향 벡터가 발전소-측정소 연결선 상의 $\pm 30^\circ$ 범위 내에 포함될 때를 ‘정렬(Aligned=TRUE)’, 그 외의 경우를 ‘비정렬(Aligned=FALSE)’로 정의하였다.

〈그림 4〉 발전소 풍향 정렬 여부에 따른 일별 PM₁₀ 변화



주석: 풍향 정렬 여부(True = 발전소-측정소 방향 일치)

〈그림 5〉 발전소 풍향 정렬 여부에 따른 일별 PM_{2.5} 변화



주석: 풍향 정렬 여부(True = 발전소-측정소 방향 일치)

이러한 접근은 대기오염물질의 확산 경로를 점오염원과 풍계의 상호작용으로 해석하는 기존 문헌의 방법론을 확장한 것이다. 김남일, 김기환, 신희철, 성원(2017)은 충남 서해안에서 서풍 계열의 바람이 불 때 내륙으로 유입되는 SO₂ 및 NO_x 농도가 유의하게 상승함을 확인하였으며, 김창혁, 김정호, 황규철, 김필호, 신수현, 방종성 등(2023)은 산업단지 인근 고농도 사례의 대부분이 국지적 정체와 외부 유입이 복합적으로 작용한 결과임을 보고하였다. 즉, 풍향은 오염물질의 수송 경로를 결정짓는 핵심 변수로서, 미세먼지 농도의 외생적 변동성(Exogenous Variation)을 설명하는 중요한 단서를 제공한다.

〈그림 4〉와 〈그림 5〉는 풍향 정렬 여부에 따른 일별 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 시계열 변화를 보여준다. 분석 결과, 직관적인 예상과는 달리 '비정렬(Aligned=FALSE)' 시간대의 미세먼지 농도가 '정렬(Aligned=TRUE)' 시간대보다 지속적으로 높게 나타나는 역설적 현상이 관측되었다.

이는 충남의 대기질 구조를 해석하는 데 있어 매우 중요한 함의를 갖는다. '정렬' 조건은 특정 발전소의 배출 플룸이 측정소에 직접 닿는 좁은 부채꼴 영역(Sector)만을 반영하는 반면, '비정렬' 조건은 중국발 장거리 수송, 서해안 산업단지(제철·석유화학)의 누적 배출, 그리고 도시의 교통 오염원이 혼재된 광범위한 배경 농도(Background Concentration)를 포괄하기 때문이다. 즉, 비정렬 시의 고농도 현상은 충남 대기질이 단일 점오염원보다는 광역적인 오염 덩어리(Air Mass)에 의해 구조적으로 지배받고 있음을 시사한다.

〈표 2〉 발전소 풍향 정렬 여부에 따른 연도별 PM₁₀·PM_{2.5} 변화

연도	PM ₁₀ (비정렬)	PM ₁₀ (정렬)	PM _{2.5} (비정렬)	PM _{2.5} (정렬)
2017	45.37	43.74	24.23	21.97
2018	41.37	37.87	22.44	20.45
2019	43.28	39.90	25.91	23.48
2020	37.24	35.59	21.71	20.11
2021	43.10	42.98	21.72	20.79
2022	35.38	34.72	19.90	19.26
2023	41.32	40.96	19.91	19.91

〈표 2〉의 연도별 기술통계는 이러한 경향성이 일시적 현상이 아님을 보여준다. 2017년부터 2023년까지 전 기간에 걸쳐 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 비정렬 조건에서의 평균 농도가 정렬 조건보다 높게 나타났다. PM₁₀은 연평균 약 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 격차를 보였으며, PM_{2.5} 역시 모든 연도에서 비정렬 상태의 농도가 우위를 점했다.

이 결과는 충남 서해안 지역이 중국 및 수도권 등 외부로부터 유입되는 기저 오염(Base Pollution) 수준이 상당히 높으며, 이러한 배경 오염이 발전소의 직접 배출 영향보다 전체 대기질 농도 결정에 더 큰 기여를 하고 있음을 실

증한다. 따라서 태양광 발전량 저하를 분석함에 있어, 단순히 발전소 가동 여부만을 변수로 고려하는 것은 불충분하며, 풍계에 따라 유입되는 광역적 오염 부하(Regional Pollution Load)를 통제하는 것이 필수적임을 시사한다.

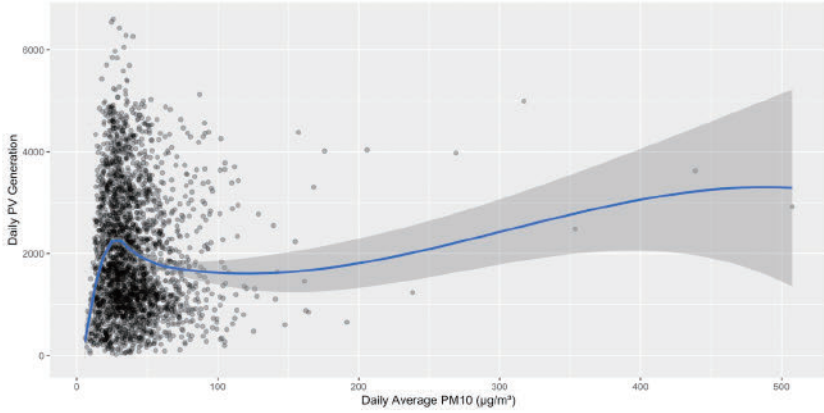
4. 태양광 발전량-대기오염 간 관계 분석

충청남도에서 관측된 태양광 발전량이 미세먼지(PM_{10} · $PM_{2.5}$) 및 기상조건 변화에 따라 어떻게 반응하는지를 살펴보기 위해, 본 연구는 시간별 태양광 발전량 자료와 시군구 단위 대기오염·기상자료를 통합한 일 단위 패널을 구축하였다. 시간별 변동성을 평활화하여 하루 단위의 발전량, 대기오염(PM_{10} · $PM_{2.5}$), 기온·습도·풍속 등을 정리함으로써 오염도와 발전량의 구조적 관계를 시각적으로 검토하였다.

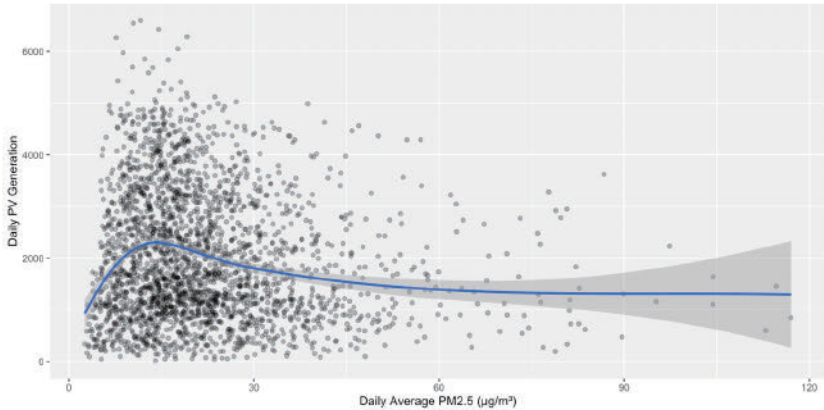
먼저 <그림 6>과 <그림 7>은 일평균 미세먼지 농도와 태양광 발전량의 산점도를 국소회귀(Locally Estimated Scatterplot Smoothing, Loess) 추세선과 함께 제시한 것이다. 이때, 자료의 특정 분포 형태를 사전에 가정하지 않고 데이터 자체의 국소적 추세를 유연하게 파악하기 위해 비모수적 Loess 방법을 적용하였다.

두 미세먼지는 공통적으로 농도가 증가할수록 발전량이 감소하는 경향을 보이나, 그 영향 강도와 분포는 확연히 다르다. PM_{10} 은 대부분의 관측값이 0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에 밀집되어 있으며, Loess 추세는 비교적 완만한 음의 기울기를 보인다. 이는 PM_{10} 이 해염·황사·토양먼지 등 굵은 입자를 포함하고 있어 광학적 산란·흡수에 의한 복사감쇠가 상대적으로 제한적이라는 물리적 특성과 부합한다(Plachinski, Holloway, Meier, Nemet, Rrushaj and Oberman et al., 2014; Zhu, Jang, Zhu, Dong, Wang and Xing et al., 2025). 즉, PM_{10} 농도 상승은 태양광 발전량을 저하시키지만 그 영향의 기울기는 크지 않다.

<그림 6> 충남권 PM_{10} -태양광 발전량 관계(일 단위)



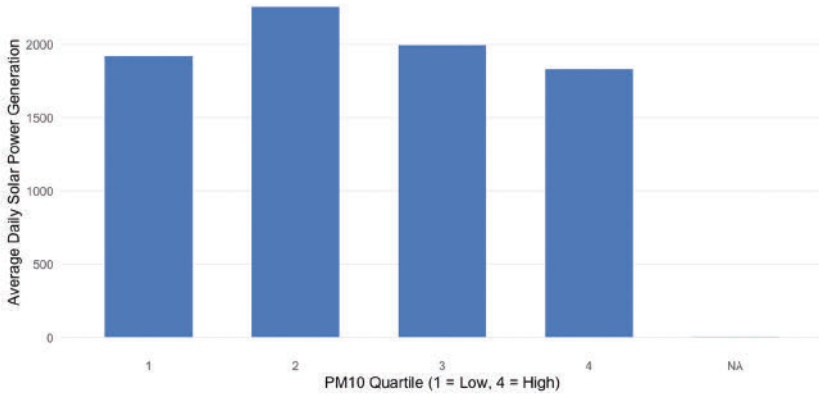
〈그림 7〉 충남권 PM_{2.5}-태양광 발전량 관계(일 단위)



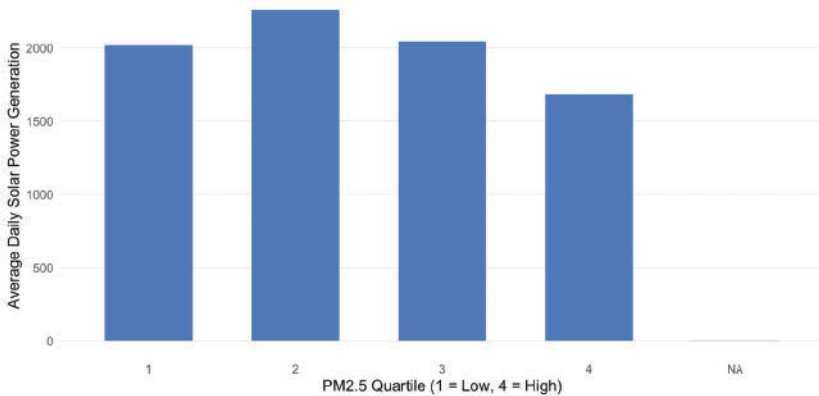
반면 PM_{2.5}의 경우 〈그림 7〉에서 보듯이 분포가 30-120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위까지 넓게 퍼져 있고, 농도가 증가할수록 발전량이 빠르게 감소하는 비선형적 패턴이 나타난다. PM_{2.5}는 광학적으로 높은 산란·흡수 계수를 가지며 대기 중 AOD를 크게 증가시키기 때문에, 직달일사를 더욱 효과적으로 약화시키는 것으로 알려져 있다(Kaya, Klepacka and Florkowski, 2019; Bosman, Leon-Salas, Hutzal and Soto, 2020). 본 분석에서도 PM_{2.5} 농도가 일정 수준을 넘어서면 발전량이 급격히 감소하는 결과가 나타났는데, 이는 고농도 미세먼지의 복사 차단 효과가 비선형적으로 강화된다는 기존 실증 연구(Uhanto, Yandri, Hilmi,

Saiful and Hamja, 2024; Wisner, Millstein, Mai, Macknick, Carpenter and Cohen et al., 2016)와 일치한다.

〈그림 8〉 PM₁₀ 수준별 평균 태양광 발전량(1=저농도, 4=고농도)



〈그림 9〉 PM_{2.5} 수준별 평균 태양광 발전량(1=저농도, 4=고농도)



이러한 경향은 PM 농도를 4분위로 구분하여 평균 발전량을 비교한 〈그림 8〉과 〈그림 9〉에서도 정량적으로 확인된다. 흥미롭게도 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두에서 2분위 구간의 발전량이 가장 높게 나타났다. PM₁₀ 분위수 결과에 따르면 1분위의 평균 발전량은 약 1,920 MWh였으나 2분위에서 약 2,257 MWh로 가장 크게 증가하고, 이후 3·4 분위로 갈수록 각각 약 1,993 MWh, 1,832

MWh로 완만히 감소하였다. 이는 PM_{10} 의 저농도 영역에서는 미세먼지 자체보다 오히려 기온·습도·운량 등 기상변수가 발전량 변동의 더 큰 설명력을 갖는다는 점을 시사한다.

$PM_{2.5}$ 에서도 동일하게 2분위에서 평균 발전량이 약 2,259 MWh로 가장 높았으며, 이는 1분위(약 2,017 MWh)보다도 더 큰 값이다. 그러나 $PM_{2.5}$ 는 3분위에서 약 2,044 MWh로 감소하기 시작하여, 4분위에서는 약 1,682 MWh로 급락하였다. 이는 $PM_{2.5}$ 농도가 일정 임계값을 넘어서면 발전량 저하가 비선형적·가속적으로 나타남을 의미한다. 다시 말해, PM_{10} 은 저·중 농도에서 기상요인의 영향이 상대적으로 더 크지만, $PM_{2.5}$ 는 고농도 구간에서 태양광 발전량을 결정짓는 가장 중요한 요인으로 기능한다.

정리하면, 충남 지역에서 태양광 발전량과 대기오염의 관계는 단순한 음의 선형 구조가 아니라 다음과 같은 비선형적·차등적 영향 구조를 보인다. (1) PM_{10} 의 영향은 완만하며, 저농도에서는 기상변수가 더 큰 설명력을 갖는다, (2) $PM_{2.5}$ 는 고농도에서 발전량을 급격히 감소시키는 핵심 요인이다, (3) 두 미세먼지 모두 2분위에서 발전량이 최대치에 도달하는 hump-shaped 패턴을 보이며, 이는 오염도와 기상변수가 결합한 복합적 결과를 반영한다.

따라서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 발전량에 미치는 효과의 방향은 동일하지만, 강도·비선형성·영향이 작동하는 범위에서 중요한 차이를 가진다. 이와 같은 관찰은 이후 장에서 기상변수 통제, 비선형 모형 접근 등을 활용한 실증 모형 설정의 필요성을 강하게 시사한다.

5. 실증모형

본 절에서는 충청남도 수준에서 구축한 시간 단위 패널자료를 이용하여, 미세먼지 농도(PM_{10} · $PM_{2.5}$)가 태양광 발전량에 미치는 영향을 기상조건 및 시간적·계절적 요인을 통제한 이후에도 식별할 수 있는지를 검증한다. 회귀 분석에 사용된 주요 변수들의 분포와 변동성을 요약하기 위해 <표 3>은 본 연구의 기술통계를 제시한다.

〈표 3〉 기술통계

	관측치 수	평균	표준오차	최소값	최대값
PV 발전량(kWh)	60,600	83.36	115.26	0.00	837.31
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	60,596	40.66	30.63	2.55	849.38
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	60,581	21.93	15.55	0.00	181.75
기온 (°C)	60,599	12.82	10.54	-19.35	35.93
풍속(m/s)	60,599	1.58	1.13	0.00	10.50
상대습도(%)	60,599	72.27	19.67	9.60	99.50
일사량 (MJ/m ²)	33,245	1.09	0.96	0.00	4.37
일조량(hr)	33,303	0.49	0.41	0.00	1.00
적운량(10분위)	57,585	5.21	3.56	0.00	10.00

이를 반영하여 본 연구는 미세먼지의 효과를 단순한 평균적 상관관계가 아니라, 동일한 시간대와 계절 조건 하에서 관측되는 조건부 효과로 해석하기 위해 시간 단위 고정효과 모형을 채택하였다. 구체적으로, 시간에서의 태양광 발전량을 y_t 로 설정하고, 미세먼지 농도와 기상변수 벡터를 각각 PM_t , W_t 로 정의하면, 본 연구의 기준 모형은 다음과 같다:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 PM_t + \gamma W_t + \delta_{hour} + \tau_{month} + \epsilon_t \quad (1)$$

여기서 δ_{hour} 는 태양 고도 및 일중 발전 패턴을 반영하는 시간 고정효과, τ_{month} 는 계절적 요인을 통제하기 위한 월 고정효과이다. W_t 에는 발전량에 직접적인 영향을 주는 기상변수(기온·습도·운량·일사량/일조시간)가 포함된다. 이러한 구성은 복사 관련 변수가 누락될 경우 미세먼지 효과가 과대 추정될 수 있음을 지적한 선행연구의 분석 프레임과 일치한다(Song, Wang and Yang, 2022; Tamoor, Hussain, Bhatti, Miran, Arif and Kiren et al., 2022; Kosmopoulos, Kazadzis, El-Askary, Taylor, Gkikas and Proestakis et al., 2018; Liu et al., 2023).

다만 이러한 시간 고정효과는 반복적인 평균적 일중 패턴을 제거하는 데에는 효과적이지만, 특정 시점의 운량 변화나 박무·연무와 같은 단기적 대기

상태 충격까지 완전히 상쇄하지는 못한다. 이에 본 연구는 복사 환경을 보다 정밀하게 통제하기 위해 일사량과 일조시간, 적운량을 명시적으로 모형에 포함한다. 이는 시간 고정효과가 복사 관련 누락변수를 완전히 대체하기보다는, 해당 변수들과 결합될 때 미세먼지 효과의 해석 가능성을 높인다는 최근 실증 연구의 논의와도 부합한다(Bradford et al., 2020).

한편 본 논문의 핵심 가설은 미세먼지의 효과가 단순히 농도 수준에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 풍속과 풍향이 결합된 대기 수송 메커니즘에 의해 강화되거나 완화될 수 있다는 점에 있다. 충청남도는 서해안에 인접한 지역으로, 해안 방향에서 내륙으로 유입되는 기류는 해염 입자, 산업 배출, 연무 및 장거리 이동 오염물질을 동반할 가능성이 높다. 이를 반영하기 위해 본 연구는 풍향을 22.5도 간격의 16방위 더미로 구분하고, 풍속과 풍향 더미의 상호작용항을 추가한 확장 모형을 다음과 같이 설정한다.

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 PM_t + \lambda W_t + \sum_{k=1}^{16} \theta_k (ws_t \times D_{k,t}) + \zeta_{hour} + \eta_{month} + v_t \quad (2)$$

여기서 ws_t 는 풍속, $D_{k,t}$ 는 풍향 k 에 해당하는 더미 변수이다. 이 사양은 풍속의 효과가 풍향에 따라 이질적으로 나타날 수 있음을 허용하며, 단순한 평균 풍속 효과로는 포착할 수 없는 대기 수송 경로의 차이를 실증적으로 식별하기 위한 것이다. 이러한 접근은 대기 오염과 태양 복사 간의 관계가 특정 기상 조건 및 수송 방향에 따라 달라질 수 있음을 강조한 기존 실증 연구들과 통합적인 확장으로 볼 수 있다(Elminir, 2007; Liu et al., 2019).

V. 실증분석 결과

앞 절에서는 충청남도 수준에서 구축한 시간 단위 패널자료를 이용하여 미세먼지 농도와 태양광 발전량 간의 관계를 비모수적으로 탐색하였다. 본

절에서는 이러한 시각적 패턴이 기상조건과 시간적·계절적 요인을 통제한 이후에도 유지되는지를 검증하기 위해 회귀 기반의 실증분석 결과를 제시한다. 특히 본 절은 (i) 미세먼지의 평균적 효과, (ii) 풍속·풍향에 따른 이질적 효과, 그리고 (iii) 서해안-내륙 기류가 형성하는 구조적 발전량 저하 메커니즘을 단계적으로 검증하는 데 초점을 둔다.

〈표 4〉는 시간 단위 데이터를 이용해 추정한 기준 회귀모형 결과를 제시한다. 모형(1)과 (2)는 각각 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 포함한 기준 모형이며, 모형(3)과 (4)는 풍속과 16방위표를 바탕으로 구성된 풍향 더미 변수를 추가하여 기상 조건의 방향별 이질성을 보다 정밀하게 통제한 확장 모형이다. 모든 모형에는 시간 고정효과와 월 고정효과가 포함되어 있다. 아울러 본 연구는 시간 단위 고빈도 패널 데이터에서 발생하기 쉬운 오차항의 자기상관(Autocorrelation)과 이분산성 문제를 엄밀하게 보정하기 위해, Newey-West(lag=24) 강건 표준오차(Robust Standard Errors)를 적용하여 추정 계수의 통계적 유의성을 검증하였다.

먼저 미세먼지 농도(PM_{10} · $PM_{2.5}$)는 모든 모형 사양(1-4)에서 일관되게 음(-)의 계수로 추정되며 통계적으로 유의하다. 이는 미세입자가 태양 복사를 산란·흡수함으로써 지표면에 도달하는 유효 일사량을 감소시켜 태양광 발전량을 저하시킨다는 기존의 물리적·실증적 연구 결과와 방향성 측면에서 정합적이다(Song et al., 2022; Tamoor et al., 2022; Kosmopoulos et al., 2018). 특히 선행연구들은 $PM_{2.5}$ 가 PM_{10} 에 비해 광학적 산란계수와 흡수 효과가 크기 때문에 태양광 발전에 더 강한 부정적 영향을 미칠 수 있음을 반복적으로 지적해 왔으며, 본 연구의 결과 역시 이러한 경향을 지지한다.

〈표 4〉 시간 단위 태양광 발전량에 대한 미세먼지 및 기상 변수의 회귀분석 결과

	(1)	(2)	(3)	(4)
$PM_{10}(\mu g/m^3)$	-0.118*** (0.076)	-	-0.127*** (0.081)	-
$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$	-	-0.509*** (0.099)	-	-0.594*** (0.103)
기온(°C)	1.408***	1.767***	1.191***	1.605***

	(0.457)	(0.453)	(0.452)	(0.452)
상대습도(%)	-0.092*** (0.097)	-0.015 (0.097)	-0.157*** (0.096)	-0.086*** (0.095)
적운량 (10분위)	-1.341*** (0.435)	-1.401*** (0.431)	-1.184*** (0.433)	-1.198*** (0.428)
일조 시간(hr)	96.232*** (2.928)	96.299*** (2.929)	96.260*** (2.903)	96.184*** (2.900)
일사량(MJ/m ²)	21.836*** (3.997)	22.241*** (3.996)	21.566*** (3.953)	22.563*** (3.949)
풍속(m/s)	-	-	-3.904*** (1.295)	-5.779*** (1.293)
풍향 더미	X	X	O	O
시간 고정효과	O	O	O	O
월 고정효과	O	O	O	O
관측치 수	32,609	32,604	32,609	32,604
R ²	0.664	0.666	0.666	0.669
Adj. R ²	0.663	0.665	0.666	0.668

주석: ()괄호 안 표준오차는 Newey-West(lag=24) 강건 표준오차이다.

유의수준 표기: '***' p < 0.01, '**' p < 0.05, '' p < 0.1

한편, 미세먼지 계수의 절대적 크기는 일사량이나 일조 시간과 같은 복사 관련 변수에 비해 상대적으로 작게 추정된다. 이는 태양광 발전량 변동의 주된 설명력이 여전히 복사 환경에 의해 좌우됨을 의미하며, 미세먼지는 동일한 기상·시간 조건 하에서 발전량을 체계적으로 하향 이동시키는 조건부 감소 요인으로 기능함을 시사한다. 다시 말해, 미세먼지의 부정적 효과는 계절적 공변성이나 평균적 상관관계를 넘어, 동일한 시간대와 계절 조건하에서도 태양광 발전량을 일관되게 감소시키는 구조적 요인으로 작용한다.

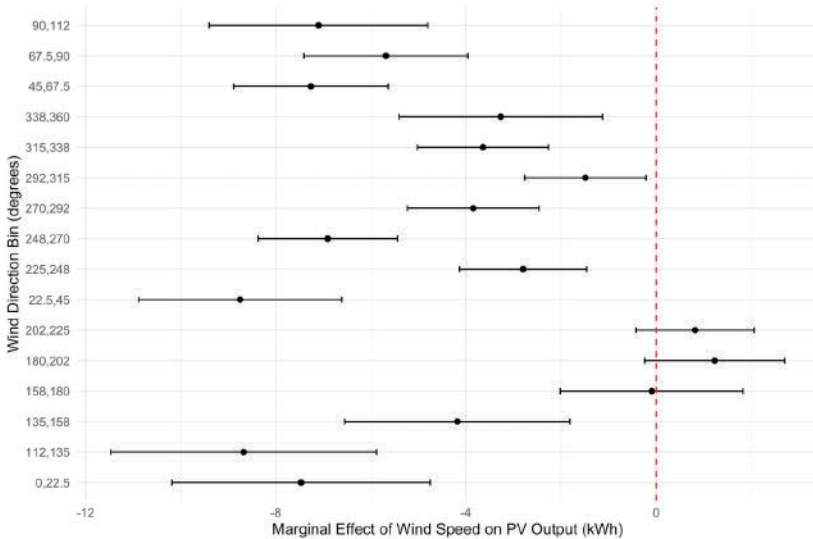
기상 변수 중 기온은 모든 모형에서 양(+)의 계수로 추정되며 통계적으로 유의한 반면, 상대습도와 적운량은 일관되게 음(-)의 계수를 보인다. 이는 태양광 발전이 복사 환경에 매우 민감하게 반응하며, 고습·고운량 조건에서 발전량이 저하된다는 기존의 기술적·실증적 결과와 일치한다. 특히 일조 시간과 일사량 변수는 매우 큰 양(+)의 계수를 가지며, 태양광 발전량 변동의 상당 부분이 여전히 복사 조건에 의해 설명됨을 보여준다.

모형(3)과 (4)에서는 풍속과 풍향 더미 변수를 추가하여 기상 조건의 방향

별 이질성을 보다 직접적으로 분석하였다. 풍속은 평균적으로 음(-)의 계수를 가지며, 이는 단순한 풍속 증가가 태양광 발전에 긍정적으로 작용하지 않음을 시사한다. 그러나 이러한 평균 효과보다 더 중요한 결과는 풍속과 풍향의 상호작용항에서 확인된다.

〈표 5〉와 〈그림 10〉은 동일한 풍속 증가가 모든 방향에서 동일한 영향을 미치지 않으며, 특히 서해안에서 내륙으로 유입되는 기류 조건에서 태양광 발전량을 체계적으로 저하시킨다는 점을 보여준다. 분석 결과, 풍속의 효과는 풍향에 따라 뚜렷한 이질성을 보이며, 서해안에서 내륙 방향으로 유입되는 기류 구간에서 태양광 발전량이 통계적으로 유의하게 감소하는 패턴이 관찰된다.

〈그림 10〉 풍향에 따른 풍속 효과의 이질성



〈표 5〉 풍향별 풍속 효과와 태양광 발전량의 관계

풍향 각도	16방위		p-value
(0, 22.5]	북-북북동	-7.469 (-5.389)	< 0.001

(22.5, 45]	북북동-북동	-8.751 (-8.040)	< 0.001
(45, 67.5]	북동-동북동	-7.262 (-8.778)	< 0.001
(67.5, 90]	동북동-동	-5.686 (-6.456)	< 0.001
(90, 112]	동-동남동	-7.101 (-6.050)	< 0.001
(112, 135]	동남동-남동	-8.678 (-6.083)	< 0.001
(135, 158]	남동-남남동	-4.182 (-3.464)	< 0.001
(158, 180]	남남동-남	-0.094 (-0.096)	0.924
(180, 202]	남-남남서	1.230 (1.639)	0.101
(202, 225]	남남서-남서	0.820 (1.292)	0.197
(225, 248]	남서-서남서	-2.798 (-4.095)	< 0.001
(248, 270]	서남서-서	-6.909 (-9.247)	< 0.001
(270, 292]	서-서북서	-3.849 (-5.437)	< 0.001
(292, 315]	서북서-북서	-1.491 (-2.292)	0.022
(315, 338]	북서-북북서	-3.643 (-5.172)	< 0.001
(338, 360]	북북서-북	-3.270 (-3.000)	0.003

주석: ()괄호는 t 통계량이다.

구체적으로, 북-북동(0, 22.5]부터 동-남동(90, 112.5] 및 남동 계열(112.5, 158]에 이르는 풍향 구간에서는 풍속 증가가 태양광 발전량 감소와 유의하게 연관되어 있다. 이들 구간의 계수는 대체로 음(-)의 값을 가지며, 통계적으로도 유의한 경우가 다수 확인된다. 이는 충청남도 서해안 산업단지 및 연안 발전·항만 지역을 통과한 공기질이 내륙으로 이동하는 과정에서 미세먼지 및 부유입자를 동반하거나, 복사 환경을 악화시키는 조건을 형성할 가능성을 시사한다.

반면, 남풍 계열(158, 225)에서는 계수가 통계적으로 유의하지 않거나 오히려 양(+)의 값을 보이는 경우도 존재한다. 이는 내륙 또는 남부 지역에서 유입되는 공기 흐름이 상대적으로 청정하거나, 동일한 풍속 조건 하에서도 태양 복사 환경을 크게 훼손하지 않는 기상 조건과 결합되어 있을 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 풍속 자체의 평균적 효과만을 고려할 경우 포착하기 어려운 방향 조건부 효과가 존재함을 보여준다.

정리하면, 풍속 변수 단독으로는 평균적으로 음(-)의 계수를 가지지만 그 설명력은 제한적이다. 반면, 풍향을 고려한 상호작용항은 태양광 발전량 변동을 보다 정밀하게 설명한다. 즉, 태양광 발전 저하는 단순한 풍속 증가나 기계적 냉각 효과에 의해 발생하는 것이 아니라, 특정 대기 이동 경로를 따라 형성되는 공기질 및 복사 환경의 구조적 특성과 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다. 이는 서해안-내륙 기류라는 공간적 메커니즘이 태양광 발전량 변동을 설명하는 핵심 경로임을 실증적으로 보여준다.

아울러 본 연구는 추정 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 견고성 검토(Robustness Check)를 수행하였다. 우선, 시간 단위 고빈도 패널 자료에서 발생할 수 있는 오차항의 자기상관과 이분산성 문제를 통제하기 위해 Newey-West 강건 표준오차(Robust Standard Errors)를 적용하였음에도 미세먼지의 유의미한 음(-)의 효과는 견고하게 유지되었다. 또한, 단순 기본 모형에서 기상 변수와 풍향 상호작용항을 포함한 확장 모형에 이르기까지, 모형의 설정(Specification)을 단계적으로 변경하였을 때도 주요 변수의 방향성과 유의성은 일관되게 나타났다. 이는 본 연구의 주요 발견이 특정 모형 설정에 의존하지 않는 통계적으로 신뢰할 만한 결과임을 뒷받침한다.

VI. 결론 및 논의

본 연구는 충청남도 전역을 대상으로 시간별 태양광 발전량과 대기오염(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 및 기상 자료를 결합한 고해상도 시공간 패널을 구축하고, 미세

먼지와 태양광 발전량 간의 관계를 기상조건 및 시간적·계절적 요인을 통제 한 이후에도 식별할 수 있는지를 검증하였다. 특히 충남이 서해안에 대규모 석탄화력발전소·산업단지가 밀집해 있고, 동시에 태양광 발전단지가 빠르게 확장되는 지역이라는 점에 주목하여, 오염-기상-발전이 동일 공간 내에서 상호작용하는 메커니즘을 실증적으로 제시하는 데 목적을 두었다.

본 연구의 실증 분석 결과는 다음과 같은 세 가지 핵심 발견으로 요약된다. 첫째, 기술적·비모수적 탐색에서 PM_{10} · $PM_{2.5}$ 가 증가할수록 태양광 발전량이 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이는 대기 중 입자상 물질이 태양복사를 산란·흡수하여 지표면 유효 일사량을 감소시킨다는 물리적 메커니즘과 정합적이다. 또한 분위수 기반 비교에서는 저농도 구간에서 단조 감소가 뚜렷하지 않고, 고농도 구간에서 발전량이 급락하는 비선형적 형태가 나타나, 오염 충격이 기상 조건 및 온전 환경과 결합될 때 발전 손실이 임계적으로 확대될 수 있음을 확인하였다.

둘째, 회귀 기반 실증분석에서는 태양광 발전량 변동의 주된 설명력이 일사량·일조시간·운량·습도 등 복사 환경과 직접적으로 연관된 기상 변수에 의해 좌우된다는 점이 확인되었다. 미세먼지 계수는 방향성이 음(-)으로 유지되더라도 그 크기는 복사 관련 변수 대비 상대적으로 작게 추정되었는데, 이는 미세먼지가 발전량의 주된 결정요인이라기보다는 동일한 복사·기상 조건 하에서 발전량을 체계적으로 하향 이동시키는 조건부 감쇠 요인으로 기능함을 의미한다.

셋째이자 본 논문의 핵심 기여는 풍속의 효과가 풍향에 따라 뚜렷하게 달라진다는 점을 시간 단위 자료에서 직접 확인했다는 데 있다. 풍향을 16방위로 구분하고 풍속과의 상호작용항을 포함한 확장 모형에서, 서해안에서 내륙으로 유입되는 기류 구간에서 풍속 증가가 태양광 발전량을 유의하게 감소시키는 패턴이 관찰되었다. 이는 충남의 발전 손실이 단순히 '바람이 강해져서 발생하는 평균적 효과'라기보다, 특정 풍향을 따라 형성되는 대기 수송 경로가 공기질과 복사 환경을 동시에 악화시키면서 발전량을 끌어내리는 공간적 메커니즘(서해안-내륙 기류- 경로)에 의해 강화됨을 시사한다.

본 연구의 결과는 환경 및 에너지 통합 정책 수립에 있어 다음과 같은 중요한 시사점을 제공한다. 첫째, 태양광 발전량 예측 및 계통 운영 모형의 구조적 고도화가 필요하다. 현재 국내외 발전량 예측 모형은 대기오염 변수를 포함하더라도 이를 일평균 농도 기반의 선형 보정항이나 단순한 출력 감쇠 계수로 처리하는 경우가 일반적이다. 이러한 단순화는 미세먼지의 단기적 광학적 산란 효과나, 특정 기상·수송 조건에서만 강화되는 발전 손실을 충분히 반영하지 못한다. 본 연구의 결과는 미세먼지의 영향이 (i) 시간 해상도에 따라 달라지며, (ii) 농도 구간별로 비선형적으로 작동하고, (iii) 풍향·풍속으로 대변되는 대기 수송 경로에 따라 조건부로 증폭된다는 점을 보여준다. 따라서 발전량 예측 모형에 미세먼지를 단일 계수로 포함시키기보다는, 풍향·풍속과 결합된 방향 조건부 충격항이나 농도 구간별 비선형 보정항으로 반영할 경우, 단기 발전량 변동성과 고농도 시 발전 손실을 보다 정밀하게 예측할 수 있을 것이다. 이는 고농도 미세먼지 발생 시 태양광 발전량의 과대예측을 완화하고, 계통 운영 측면에서는 예비력 확보 및 출력 변동성 관리의 효율성을 제고하는 데 기여할 수 있다.

둘째, 대기질 관리 정책과 재생에너지 확산 정책의 통합적 설계가 요구된다. 충남과 같이 오염원이 서해안에 군집하고 내륙으로 수송되는 구조를 갖는 지역에서는, 재생에너지 확대 정책이 단순한 설비 보급을 넘어 대기질 관리 정책과 결합될 때 발전량 측면에서 추가적인 편익이 발생할 수 있다. 즉, 본 연구는 미세먼지 저감 정책이 보건 영역에 국한된 편익을 넘어, 전력 생산 효율 및 계통 안정성 측면에서도 의미 있는 공동편익(co-benefit)을 창출할 수 있음을 실증적으로 보여준다.

본 연구는 몇 가지 한계를 지니며 이는 향후 연구를 통해 보완될 필요가 있다. 첫째, 일사량·운량 등 핵심 복사 변수의 결측과 측정소 기반 자료의 공간 대표성 한계로 인해 표본 손실이 발생하였다. 둘째, 미세먼지와 기상 조건이 상호결정적으로 움직일 가능성이 있어 내생성 문제가 완전히 해소되지는 않았다. 향후 연구에서는 위성 기반 AOD 자료, 지면 일사량 재분석 자료, 패널 표면 오염(soiling) 지표, 그리고 풍계 기반 외생 변동을 결합한 확장된 식별

전략을 통해 인과 구조를 보다 명확히 규명할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 충청남도의 시간 단위 고빈도 시공간 패널을 활용하여, 미세먼지의 평균적 영향뿐 아니라 서해안-내륙 기류라는 공간적 대기 수송 메커니즘이 태양광 발전량 저하와 결합되는 경로를 실증적으로 제시했다는 점에서 중요한 학술적 기여를 갖는다. 이는 지역 기반의 기후·대기질·재생에너지 통합 정책 설계와 고정밀 발전량 예측 모형 구축을 위한 실증적 기준점을 제공한다.

■ 참고문헌 ■

- 김남일·김기환·신희철·성원, 2017, 『발전부문 미세먼지 배출감소 대책의 전력시장 영향 분석』, 에너지경제연구원.
- 김종범·윤수향·이상신·김경환·노수진·배귀남, 2020, “충남지역 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 시공간 분포 특징,” 『한국대기환경학회지』, 36(4), pp.464-481, DOI: 10.5572/KOSAE.2020.36.4.464.
- 김창혁·김정호·황규철·김필호·신수현·박종성·박세찬·이가혜·이재영·김종범, 2023, “고농도 PM_{2.5} 발생 시 국내외 영향에 따른 산업단지 인근 지역의 PM_{2.5} 특성 분석,” 『한국대기환경학회지』, 39(1), pp.62-76, DOI: 10.5572/KOSAE.2023.39.1.62.
- 서지훈·권재은·김종범·윤대옥·김경환·이광열·김진영, 2024, “충청권 PM_{2.5} 국지적 변동성의 공간상관성 분석,” 『한국대기환경학회지』, 40(1), pp.131-148, DOI: 10.5572/KOSAE.2024.40.1.131.
- 신지혜·김영민·박천웅·안정준·유하나·김종숙·정금희·최진하, 2021, “충남지역 배출원별 PM_{2.5} 중 이온, 탄소, 원소성분의 특성 연구,” 『환경분석과 독성보건』, 24(1), pp.26-34, DOI: 10.36278/jeht.24.1.26.
- 이혜원·이승현·전정인·이정일·이철민, 2022, “안산·시흥 산업단지 지역PM_{2.5} 중 이온, 탄소, 원소성분의 특성 연구,” 『한국환경보건학회지』, 48(2), pp.66-74, DOI: 10.5668/JEHS.2022.48.2.66.
- 주서령·유근혜·박승식·이지이·이상일·지준범·이광열·이민도, 2020, “충남 서산에서 가을에 측정된 초미세먼지의 오염 특성 조사,” 『한국대기환경학회지』, 36(3), pp.329-345, DOI: 10.5572/KOSAE.2020.36.3.329.
- 충남연구원, 2023, 『중부권 초미세먼지의 물리화학적 특성 및 지역 발생원 조사』.
- Bergin, M. H., C. Ghoroi, D. Dixit, J. J. Schauer, and D. T. Shindell, 2017, “Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution,” *Environmental Science & Technology Letters*, 4(8), pp.339-344, DOI: 10.1021/acs.estlett.7b00197.
- Bosman, L. B., W. D. Leon-Salas, W. Hutzler, and E. A. Soto, 2020, “PV system predictive maintenance: Challenges, current approaches, and opportunities,” *Energies*, 13(6), p.1398, DOI: 10.3390/en13061398.
- Bradford, K., R. Walker, D. Moon, and M. Ibanez, 2020, “A regression model to correct for intra-hourly irradiance variability bias in solar energy models,” In 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, pp. 2679-2682, DOI: 10.1109/PVSC45281.2020.9300613.
- Cha, Y., S. Lee, and J. Lee, 2019, “Measurement of black carbon concentration and

- comparison with PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations monitored in Chungcheong Province, Korea," *Aerosol and Air Quality Research*, 19(3), pp.541-547, DOI: 10.4209/aaqr.2018.08.0325.
- Choi, W., M. Y. Song, J. B. Kim, K. Kim, and C. Cho, 2023, "Regional classification of high PM₁₀ concentrations in the Seoul metropolitan and Chungcheongnam-do areas, Republic of Korea," *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9), p.1075, DOI: 10.1007/s10661-023-11732-6.
- Dubey, S., J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, 2013, "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review," *Energy Procedia*, 33, pp.311-321, DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- El-Shobokshy, M. S., and F. M. Hussein, 1993, "Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells," *Solar Energy*, 51(6), pp.505-511, DOI: 10.1016/0038-092X(93)90135-B.
- Elminir, H. K., 2007, "Relative influence of air pollutants and weather conditions on solar radiation—Part 1: relationship of air pollutants with weather conditions," *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96(3), pp.245-256, DOI: 10.1007/s00703-006-0209-4.
- He, Z., Y. J. Kim, K. O. Ogunjobi, and C. S. Hong, 2003, "Characteristics of PM_{2.5} species and long-range transport of air masses at Taean background station, South Korea," *Atmospheric Environment*, 37(2), pp.219-230, DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00834-8.
- Heo, S., W. Lee, and M. L. Bell, 2021, "Suicide and associations with air pollution and ambient temperature: a systematic review and meta-analysis," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), p.7699, DOI: 10.3390/ijerph18147699.
- Kawajiri, K., T. Oozeki, and Y. Genchi, 2011, "Effect of temperature on PV potential in the world," *Environmental Science & Technology*, 45(20), pp.9030-9035, DOI: 10.1021/es200635x.
- Kaya, O., A. M. Klepacka, and W. J. Florkowski, 2019, "Achieving renewable energy, climate, and air quality policy goals: Rural residential investment in solar panel," *Journal of Environmental Management*, 248, p.109309, DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109309.
- Kim, M. J., 2024, "Air Pollution and Solar Photovoltaic Power Generation: Evidence from South Korea," *Energy Economics*, 139, p.107924, DOI: 10.1016/

j.eneco.2024.107924.

- Kosmopoulos, P. G., S. Kazadzis, H. El-Askary, M. Taylor, A. Gkikas, E. Proestakis, C. Kontoes, and M. M. El-Khayat, 2018, "Earth-observation-based estimation and forecasting of particulate matter impact on solar energy in Egypt," *Remote Sensing*, 10(12), p.1870, DOI: 10.3390/rs10121870.
- Kuang, Y., R. Tan, and Z. Zhang, 2023, "Saving energy by cleaning the air?: Endogenous energy efficiency and energy conservation potential," *Energy Economics*, 126, p.106946, DOI: 10.1016/j.eneco.2023.106946.
- Lee, S. J., S. H. Lee, H. J. Choi, J. Kim, and M. K. Kim, 2024, "Influence of Local Circulation on Short-term Variations in Ground-level PM_{2.5} Concentrations," *Aerosol and Air Quality Research*, 24(10), p.240042, DOI: 10.4209/aaqr.240042.
- Li, X., D. L. Mauzerall, and M. H. Bergin, 2020, "Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling," *Nature Sustainability*, 3(9), pp.720-727, DOI: 10.1038/s41893-020-0553-2.
- Li, X., F. Wagner, W. Peng, J. Yang, and D. L. Mauzerall, 2017, "Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(45), pp.11867-11872, DOI: 10.1073/pnas.1711462114.
- Li, Z., W. M. Lau, V. Ramanathan, G. Wu, Y. Ding, M. G. Manoj, J. Liu, Y. Qian, J. Li, T. Zhou, and J. Fan, 2016, "Aerosol and monsoon climate interactions over Asia," *Reviews of Geophysics*, 54(4), pp.866-929, DOI: 10.1002/2015RG000500.
- Liu, H., Y. Sun, C. Tan, C. Ho, L. Zhao, and A. Hove, 2023, "Toward the development of an empirical model of air pollution impact on solar PV output for industry use," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 13(6), pp.991-997, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2023.3317636.
- Liu, S., J. Xing, B. Zhao, J. Wang, S. Wang, X. Zhang, and A. Ding, 2019, "Understanding of aerosol-climate interactions in China: Aerosol impacts on solar radiation, temperature, cloud, and precipitation and its changes under future climate and emission scenarios," *Current Pollution Reports*, 3(2), pp.36-51, DOI: 10.1007/s40726-019-00107-6.
- Mani, M., and R. Pillai, 2010, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp.3124-3131, DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.065.

- Mekhilef, S., R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, 2012, "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp.2920-2925, DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.012.
- Mülmenstädt, J., and G. Feingold, 2018, "The radiative forcing of aerosol-cloud interactions in liquid clouds: Wrestling and embracing uncertainty," *Current Climate Change Reports*, 4(1), pp.23-40, DOI: 10.1007/s40641-018-0089-y.
- Plachinski, S. D., T. Holloway, P. J. Meier, G. F. Nemet, A. Rrushaj, J. T. Oberman, P. L. Duran, and C. L. Voigt, 2014, "Quantifying the emissions and air quality co-benefits of lower-carbon electricity production," *Atmospheric Environment*, 94, pp.180-191, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.028.
- Rosenfeld, D., M. O. Andreae, A. Asmi, M. Chin, G. de Leeuw, D. P. Donovan, R. Kahn, S. Kinne, N. Kivekäs, M. Kulmala, and W. Lau, 2014, "Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions," *Reviews of Geophysics*, 52(4), pp.750-808, DOI: 10.1002/2013RG000441.
- Song, Z., M. Wang, and H. Yang, 2022, "Quantification of the impact of fine particulate matter on solar energy resources and energy performance of different photovoltaic technologies," *ACS Environmental Au*, 2(3), pp.275-286, DOI: 10.1021/acsenvironau.1c00048.
- Sung, M. Y., M. H. Choi, J. S. Park, H. J. Kim, H. E. Jeon, J. Y. Ahn, S. B. Lee, and J. S. Kim, 2018, "Chemical composition of the ambient PM_{2.5} in 2014 over Korea," *Global Environmental Research*, 22, pp.55-64.
- Sweerts, B., S. Pfenninger, S. Yang, D. Folini, B. Van der Zwaan, and M. Wild, 2019, "Estimation of losses in solar energy production from air pollution in China since 1960 using surface radiation data," *Nature Energy*, 4(8), pp.657-663, DOI: 10.1038/s41560-019-0412-4.
- Tamoor, M., M. I. Hussain, A. R. Bhatti, S. Miran, W. Arif, T. Kiren, and G. H. Lee, 2022, "Investigation of dust pollutants and the impact of suspended particulate matter on the performance of photovoltaic systems," *Frontiers in Energy Research*, 10, p.1017293, DOI: 10.3389/fenrg.2022.1017293.
- Uhanto, U., E. Yandri, E. Hilmi, R. Saiful, and N. Hamja, 2024, "Predictive maintenance with machine learning: A comparative analysis of wind turbines and pv power plants," *Heca Journal of Applied Sciences*, 2(2), pp.87-98, DOI: 10.60084/hjas.v2i2.219.
- Wang, S., and B. Yi, 2024, "Bibliometric Analysis of Aerosol-Radiation Research

from 1999 to 2023," *Atmosphere*, 15(10), p.1189, DOI: 10.3390/atmos15101189.

- Wiser, R., D. Millstein, T. Mai, J. Macknick, A. Carpenter, S. Cohen, W. Cole, B. Frew, and G. Heath, 2016, "The environmental and public health benefits of achieving high penetrations of solar energy in the United States," *Energy*, 113, pp.472-486, DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.068.
- Zhu, J., J. C. Jang, Y. Zhu, X. Dong, S. Wang, J. Xing, B. Zhao, S. Long, Z. Dong, and B. Zhang, 2025, "Co-benefits of wind and solar power deployments for air pollutants and carbon emissions reduction in Guangdong Province of China," *Environmental Pollution*, p.126485, DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126485.
- Zhu, S., H. Yang, D. Liu, H. Wang, L. Zhou, C. Zhu, F. Zu, H. Wu, Y. Lyu, Y. Xia, and Y. Zhu, 2022, "Observations and forecasts of urban transportation meteorology in China: A review," *Atmosphere*, 13(11), p.1823, DOI: 10.3390/atmos13111823

부록

〈부록1〉 관측소별 주소·PM₁₀·PM_{2.5}

측정소명	주소	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
격렬비열도	충남 태안군 근흥면 가의도길44-71번지	-	20.5
고덕면(충남)	충청남도 예산군 고덕면 예당산단4길147	28.3	18
공주	충남 공주시 봉황로1	35.9	22
금산읍	충남 금산군 금산읍 비호로69	35.9	21.4
내포	충남 홍성군 홍북읍 흥예공원로8	36.9	20.8
논산	충남 논산시 시민로	39.8	18.8
당진시청사	충남 당진시 시청1로1	42.4	24.2
대산리	충남 서산시 대산읍 충의로1942	34.3	18.5
대산항	충남 서산시 대산읍 대죽리1114	43.1	21.3
대전2동	충남 보령시 중앙로142-16	35.6	20.4
도고면	충남 아산시 도고면 기곡리296-4	42.8	25.9
독곶리	충남 서산시 대산읍 평신1로(독곶리) 한국수자원공사 대산산업용수센터	38.5	18.3
동문동	충남 서산시 동문동918-3(서산초등학교)	40	19.5
둔포면	충남 아산시 둔포면 석곡리1481	48.5	27.7
모종동	충남 아산시 모종동573-2	46.9	25.5
배방읍	충남 아산시 배방읍 배방로38	46.6	24.8
백석동	충남 천안시 백석동555-57번지(백성농공단지)	42.2	22.6
보령항	충청남도 보령시 오천면 오천해안로89-37	42.5	19
복운리	충청남도 당진시 송악읍 신복운로5	43.5	21.4
부여읍	충남 부여군 부여읍 사비로36	37.9	20.9
사곡면	충남 공주시 사곡면 마곡사로	37.7	20.4
삽교읍	충청남도 예산군 삽교읍 두리3길33	40	22.2
서면	충남 서천군 서면 서인로761	34.9	17.6
서천읍	충남 서천군 서천읍 서천로14번길20	38	20
성거읍	충남 천안시 서북구 성거읍 천흥8길7	43.7	25.3
성동면	충청남도 논산시 성동면 산업단지5길73-28	36.6	19.9
성성동	충남 천안시 서북구 성성동	49.7	27.8
성연면	충남 서산시 성연면 마루들길15	35.2	19
성황동	충남 천안시 동남구 복자1길24 문성어린이집	43.1	24.5
송산면	충남 당진시 송산면 유곡로342-27	54.6	27.5
송악면	충청남도 아산시 송악면 송악로790	37.5	18.8
신방동	충남 천안시 동남구 천안천변길127	43.4	23.9

엄사면	충남 계룡시 엄사면 번영7길17	34.5	17.8
연무읍	충청남도 논산시 연무읍 안심로50	34.7	18.2
예산군	충남 예산군 예산읍 주교로	38	22.3
외연도	충남 보령시 오천면 외연도리 산64	36.6	20.1
원북면	충청남도 태안군 원북면 상리길17-4	30.2	16.1
이원면	충남 태안군 이원면 분지길	36.6	17.1
인주면	충남 아산시 인주면 인주산단로23-28	48	26.3
장재리	충청남도 아산시 배방읍 장재리2116	44.6	22.3
장항읍	충남 서천군 장항읍 장산로297	36	19.5
장항항	충남 서천군 장항읍 장산로270-3	38.8	22
정산면	충청남도 청양군 정산면 칠갑산로1861	33.7	19.1
주교면	충남 보령시 주교면 울계큰길396	38.7	21.2
청양읍	충남 청양군 청양읍 칠갑산로7길54	36.4	22.3
탄천면	충청남도 공주시 탄천면 안터새말길34	37.3	21.5
태안읍	충남 태안군 태안읍 군청6길	40.4	18
태안항	충청남도 태안군 원북면 발전로457	55.2	21.6
파도리	충남 태안군 소원면 파도길	42.3	22
평택당진항	충청남도 당진시 신평면 매산리976	43.7	27.9
평택당진항	충청남도 당진시 송악읍 고대공단2길79-30	37.5	20.5
합덕읍	충청남도 당진시 합덕읍 합덕리344	37.7	22.4
홍성읍	충남 홍성군 홍성읍 내포로136번길	38.3	23.6

〈부록2〉 발전소 풍향 정렬 여부에 따른 월별 PM₁₀·PM_{2.5} 변화

연도	월	PM ₁₀ (비정렬)	PM ₁₀ (정렬)	PM _{2.5} (비정렬)	PM _{2.5} (정렬)
2017	1	48.02	41.38	27.84	21.59
2017	2	42.12	40.91	22.65	18.87
2017	3	56.27	53.84	35.21	29.66
2017	4	54.71	57.25	24.79	23.22
2017	5	62.45	65.61	23.19	21.69
2017	6	43.11	43.23	24.00	21.94
2017	7	34.10	31.38	19.33	18.52
2017	8	28.00	27.35	14.82	14.83
2017	9	40.56	39.54	23.47	22.33
2017	10	41.19	39.33	21.65	20.36
2017	11	48.11	44.46	26.20	24.59
2017	12	45.70	40.66	27.51	25.83
2018	1	53.82	49.44	32.39	30.42
2018	2	50.45	46.55	28.08	26.30
2018	3	49.86	47.09	29.43	29.10
2018	4	52.56	47.29	21.53	20.53
2018	5	41.72	39.28	18.69	18.25
2018	6	36.72	32.78	21.22	19.98
2018	7	23.55	21.56	13.61	12.28
2018	8	24.08	23.69	13.43	13.46
2018	9	21.94	21.80	10.09	9.32
2018	10	32.20	30.29	17.28	14.92
2018	11	63.08	55.18	37.16	29.74
2018	12	47.65	40.52	26.95	21.64
2019	1	63.96	55.14	38.14	31.36
2019	2	58.40	50.39	36.48	29.76
2019	3	66.38	59.78	43.21	37.86
2019	4	41.89	40.53	21.38	19.64
2019	5	50.57	48.45	27.17	25.84
2019	6	32.65	29.38	21.89	20.07
2019	7	26.35	24.81	17.09	16.29
2019	8	28.67	27.93	18.44	18.00
2019	9	26.04	26.20	14.78	14.67
2019	10	36.98	36.88	19.94	19.42
2019	11	45.28	40.65	23.82	21.88
2019	12	42.73	38.90	28.91	27.04

2020	1	46.29	43.00	32.52	29.40
2020	2	44.69	41.38	31.07	27.82
2020	3	46.80	45.81	26.03	25.08
2020	4	43.65	42.09	20.13	19.43
2020	5	33.89	32.14	18.72	18.06
2020	6	33.90	31.24	19.53	18.00
2020	7	22.51	21.56	13.35	12.85
2020	8	24.37	24.76	13.45	12.79
2020	9	25.29	26.68	13.41	12.84
2020	10	40.15	38.72	20.83	19.05
2020	11	43.15	40.73	24.82	22.27
2020	12	42.52	39.24	26.99	23.96
2021	1	45.21	44.15	24.81	23.28
2021	2	53.64	53.78	32.57	31.80
2021	3	82.58	85.48	35.54	35.83
2021	4	47.62	48.03	20.76	20.92
2021	5	65.08	65.96	22.16	22.06
2021	6	36.36	36.77	21.09	19.95
2021	7	24.84	25.02	13.82	13.21
2021	8	24.31	23.96	13.43	12.70
2021	9	18.51	18.77	9.03	8.88
2021	10	31.97	30.97	16.87	14.84
2021	11	44.47	43.09	25.10	22.90
2021	12	42.86	39.97	26.14	23.80
2022	1	45.07	41.27	30.65	27.57
2022	2	42.69	40.58	27.91	26.55
2022	3	46.47	45.50	25.05	24.50
2022	4	44.31	45.11	21.40	21.90
2022	5	34.29	34.74	16.50	17.16
2022	6	23.00	22.52	11.34	10.72
2022	7	24.99	25.15	14.74	14.25
2022	8	18.67	18.56	9.12	8.04
2022	9	27.38	27.92	14.06	14.08
2022	10	34.31	34.22	20.00	20.01
2022	11	46.90	45.35	27.74	26.97
2022	12	37.23	36.36	20.86	19.94
2023	1	51.85	51.42	27.22	26.93
2023	2	54.02	50.44	34.59	33.43

2023	3	69.70	66.81	29.23	29.17
2023	4	74.52	76.16	24.09	24.61
2023	5	40.20	40.40	17.86	18.08
2023	6	28.04	26.32	15.90	14.85
2023	7	24.60	24.14	13.26	13.16
2023	8	24.36	24.53	13.32	13.16
2023	9	24.21	25.05	12.23	12.26
2023	10	32.42	33.03	15.87	16.43
2023	11	31.63	33.05	16.48	17.94

박재원: 조지메이슨대학교 경제학과 학사과정에 재학 중이다. 생산성 측정, 무형자산, 산업환경 및 에너지 정책 영역에서의 실증분석 중심의 연구를 추구하고 있다. 최근에는 재귀식 지수 기반 실질 부가가치 측정과 산업 정책의 불확실성을 고려한 에너지 소비 최적화 문제를 중심으로 연구를 수행하고 있다(jpark261@gmu.edu).

김문준: 미국 노스캐롤라이나주립대학교(North Carolina State University)에서 박사학위를 수여하고, 현재는 한국조지메이슨대학교 경제학과 조교수로 재직 중이다. 주요 연구분야는 환경경제학, 보건경제학, 에너지경제학, 미시계량경제학이며, 대표실적으로는 Moon, G.E. and Kim, M.J. 2026. Estimating the Impact of PM_{2.5} on Solar Power with Machine Learning: Evidence from South Korea. *Energy Economics*, 153:109071., Kim, M.J. 2024. Air Pollution and Solar Photovoltaic Power Generation: Evidence from South Korea. *Energy Economics*, 139(1):107924.가 있다(mkim238@gmu.edu).

투 고 일: 2025년 12월 23일
심 사 일: 2026년 01월 22일
게재확정일: 2026년 01월 29일