국토계획
pISSN: 1226-7147, eISSN: 2383-9171
https://doi.org/10.17208/jkpa.2026.10.61.5.274
Check for updates
Journal of Korea Planning Association Vol.61, No.5 (2026)
대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제61권 제5호 pp.274-287

기후기술재원이 개발도상국의 에너지 전환에 미치는 영향

The Impact of Climate Technology-related Development Finance on Energy Transition of Developing Countries

이민주*
Lee, Min Joo

Abstract

This study examines the association between climate technology-related development finance (CTRDF) and energy-transition outcomes in developing countries. Using OECD DAC CRS commitments, we construct CTRDF from climate-marked, technology-related activities across 117 developing economies from 2003 to 2022. We employ a two-way fixed-effects distributed-lag model with country-specific trends and Driscoll-Kraay standard errors, focusing on transmission and distribution losses, renewable energy consumption, and low-carbon technology imports. The results show that CTRDF is significantly associated with lower transmission and distribution losses over a three-year lag structure, while its links to low-carbon technology imports are positive but marginal. Meanwhile, no significant response is found for renewable energy consumption. The results suggest that climate technology finance is more readily observed in intermediate transition outcomes, particularly grid efficiency and technology inflows, than in short-run changes in the final energy mix.

주제어 기후기술재원, 에너지 전환, 전력망 효율, 분산시차모형, 이원고정효과
Keywords Climate Technology-related Development Finance (CTRDF), Energy Transition, Grid Efficiency, Distributed Lag Model, Two-way Fixed Effects

I. 서 론

기후변화 대응에서 기술과 재원의 결합은 점차 핵심적인 정책 수단으로 부상하고 있다. 최근 국제 논의에서는 재원의 총량 확대만으로는 충분하지 않으며, 재원의 규모뿐 아니라 해당 재원이 어떤 기술 분야와 역량 형성 단계에 배분되는지가 중요하다는 점이 강조되고 있다(IPCC, 2022; Stern, 2022). Climate Policy Initiative(2025)는 2023년 전 세계 기후재원이 1.9조 달러에 이르렀다고 보고했고, OECD(2024)는 DAC 회원국의 양자 기후 관련 개발재원이 전체 배분 가능 양자 ODA의 3분의 1을 넘는다고 설명한다. 그럼에도 불구하고 기후기술에 특화된 개발재원이 수원국의 에너지 시스템에 어떤 변화를 남기는지에 대해서는 아직 정리된 실증이 많지 않다.

이 공백은 한국의 정책 맥락에서 더욱 뚜렷하다. 한국은 그린뉴딜 ODA, EDCF의 그린 분야 확대, KOICA의 에너지 접근성과 효율 부문 중점화 등을 통해 대외 기후·에너지 지원을 꾸준히 넓혀 왔다. 그러나 지원의 규모와 방식, 유·무상 연계 구조, 사업 포트폴리오가 실제로 수원국의 에너지 전환과 어떻게 연결되는지에 대한 근거는 충분하지 않다. 특히 한국의 기후 관련 지원이 DAC 평균보다 낮은 비중과 분절적인 사업 구조라는 평가를 받아왔다는 점을 감안하면, 효과성에 대한 실증은 정책 논의의 전제가 된다(OECD, 2024; World Bank, 2024).

기존 문헌은 대체로 공적개발원조(ODA)에 분석 범위를 묶어 두었다. 그러나 개발도상국의 에너지 전환을 뒷받침하는 자금은 ODA만으로 설명되지 않는다. 유상원조, 기타 공적 흐름, CRS에 보고되는 동원 민간재원은 특히 인프라 투자에서 고려될 필요가 있다(IEA, 2023; UNCTAD, 2024). 에너지 분야처럼 초기 투자비가 크고 회수 기간이 긴 영역에서는 ODA만 보는 접근이 실

* Postdoctral Researcher, National Institutue of Green Technology (i.leemj917@gmail.com)

제 재원 흐름을 과소평가할 가능성이 크다. 이에 본 연구는 ODA에 한정하지 않고, 기후·기술 관련 개발재원 전반을 포괄하는 CTRDF 개념을 설정하였다.

본 연구는 CTRDF가 최종적인 성장률이나 탄소배출처럼 먼 결과가 아니라, 에너지 전환의 중간 단계에서 먼저 포착되는 성과와 어떻게 맞물리는지를 살핀다. 전력 송배전 손실(LOSS)은 전력 인프라의 물리적 효율을, 재생에너지 소비 비중(REC)은 에너지 전환의 배치를, 저탄소 기술제품 수입(LCTI)은 무역을 통한 체화된 기술 확산을 보여주는 지표로 설정했다. 세 지표를 함께 고려하면, 기후기술재원과의 연관이 어느 성과에서 먼저 나타나고 어느 영역에서는 뚜렷하지 않은지를 보다 다층적으로 파악할 수 있다.

본 연구의 핵심 연구문제는 기후기술재원이 개발도상국 에너지 전환의 어느 단계에 위치한 성과와 먼저 연관되는가에 있다. 구체적으로 CTRDF의 선행적 유입이 이후의 전력 송배전 손실 감소와 연관되는지, 이러한 연관이 재생에너지 소비 비중과 저탄소 기술제품 수입에서도 나타나는지, 그리고 연관의 크기와 방향이 국가의 초기 소득수준에 따라 달라지는지를 검토한다. 이를 통해 ODA에 머물지 않고 개발재원 전체를 포괄하는 측정 전략을 제시하고, 중간 성과에 초점을 맞춤으로써 기후기술 재원 투입과 에너지 전환 성과 간의 관계를 단계별로 분석한다. 한국의 그린 개발협력 전략과 연결할 때, 본 연구는 단순한 성과 비교를 넘어 사업 설계의 우선순위를 고민하는 근거를 제공한다. CTRDF가 에너지 전환의 어떤 단계에서 먼저 효과를 발휘하는지를 분명히 함으로써, 한국의 기후·에너지 개발협력 사업에서 우선 지원 분야와 성과관리 지표를 설정하는 데 필요한 실증적 근거를 제공하고자 한다.

II. 이론적 배경 및 선행연구

1. 이론적 논의

본 절은 본 연구의 이론적 토대를 이루는 세 가지 논의인 기술역량 축적과 흡수역량, 에너지 시스템 전환의 다층 관점과 경로의존성, 무역에 체화된 기술이전을 차례로 검토하고자 한다. 세 이론은 서로 다른 연구 흐름에서 발전해 왔으나, 개발도상국의 에너지 전환을 설명하는 데 상호 보완적으로 활용될 수 있다. 특히 외부 재원이 기술역량 형성, 에너지 시스템 전환, 체화된 기술이전의 각 단계에 미치는 영향을 구분해 이해할 필요가 있다. 이에 본 연구는 기후기술 재원의 효과를 단일 최종 성과가 아니라 시간적으로 분산된 여러 제도적·구조적 요인의 영향을 함께 받을 수 있음을 의미한다.

기술이 한 경제 안에 자리 잡는 과정은 설비의 도입과 동일하지 않다. 기술역량(technological capability) 논의는 외부에서 이전된 설비와 노하우를 활용해 정해진 산출을 내는 생산능력(production capacity)과, 그 기술을 흡수·개량하여 자립적으로 운용·재생산할 수 있는 기술역량을 개념적으로 구분해 왔다(Lall, 1992; Bell and Pavitt, 1992, 1993; Lall, 2000). 전자가 일정한 학습곡선을 따라 비교적 짧은 기간 안에 형성될 수 있는 반면, 후자는 학습·실험·제도적 축적이 누적되어야 하며 그 자체로 시간을 요구하는 동태적 과정이다. 이러한 구분은 개발도상국의 산업발전 경로를 설명하는 데 있어 핵심적 시각으로 기능해 왔으며, 외부 재원이 동반된 기술 도입이 단기적 산출 증대에는 기여하더라도 장기적 자립역량 형성으로 곧바로 이어지지 않을 수 있다는 함의를 제공한다(Lall, 2000; Figueiredo, 2002). 기술이전을 단순한 설비·자금의 이동이 아니라 장비·노하우·경험·제도·역량의 묶음으로 정의해 온 일련의 합의(IPCC, 2000; UNFCCC, 2001) 또한, 동일한 재원 유입이라도 어떤 층위의 역량을 우선적으로 형성하는지에 따라 발생되는 성과의 종류와 시점이 달라질 수 있음을 시사한다.

기술의 국제적 확산 또한 자동적 과정으로 가정될 수 없다. 흡수역량(absorptive capacity) 이론은 외부 지식이 실질적인 생산성 향상으로 전환되기 위해서는 수원 단위의 사전적 지식 기반과 학습 능력이 갖추어져 있어야 함을 강조하며, 이때 흡수역량은 외부 정보의 가치를 인지하고 동화하며 상업적으로 응용하는 일련의 능력을 포괄한다(Cohen and Levinthal, 1990). 거시 수준에서도 동일한 명제가 확인되어 왔다. 국제 기술확산은 수원국의 인적자본, 제도적 품질, 연구개발 기반에 따라 그 효과의 크기와 방향이 달라지며, 이러한 조건이 미비한 환경에서는 동일한 외부 자원이 유입되더라도 기술이전의 실질적 진척이 제한될 수 있다(Saggi, 2002; Keller, 2004). 원조의 흡수력 또한 수원국의 행정역량과 거버넌스 조건에 의해 강하게 매개되며, 이는 동일 규모의 재원이 국가에 따라 상이한 성과를 산출하는 구조적 배경을 형성한다(Kharas, 2007). 다만 흡수역량 가설의 함의는 한 방향으로 수렴되지 않는다. 한편에서는 수원국의 발전 단계가 높을수록 외부 자원을 생산적으로 전환할 역량이 갖춰져 있어 한계효과가 더 크게 나타난다는 정통 해석이 제시되어 온 반면(Burnside and Dollar, 2000), 다른 한편에서는 발전 초기 단계의 병목이 클수록 단위 자원이 가져오는 한계 개선폭이 더 크다는 초기병목 가설이 제기되어 왔다(Sachs et al., 2004; Kharas, 2007). 두 시각은 외형상 대립적이지만, 어느 가설이 우세하게 관측되는지가 결과지표가 기초 인프라의 물리적 효율을 반영하는지, 제도·시장 조건이 누적적으로 결합된 시스템 산출을 반영하는지에 따라 달라질 수 있다는 점에서 상호 보완적인 관계로 이해할 수 있다. 이러한 이론적 분기는 외부 재원의 효과를 평가할 때 수원국의 출발 조건에 따른 이질적 반응 가능성을 사전적으로 검토할 필요성을 시사한다.

에너지 부문에서는, 전환의 동학은 단일 설비의 도입이나 비중

의 확대로 단순화될 수 없다. 다층 관점(Multi-Level Perspective; MLP)은 에너지 시스템의 변화를 신기술이 등장하는 niche, 기존 산업·제도·관행의 결합체인 regime, 그리고 거시 사회·경제·환경 압력으로서의 landscape라는 세 층위 간 상호작용으로 이해하며, 시스템 전환은 이들 층위가 정렬되었을 때 비로소 가시적으로 진행된다고 본다(Geels, 2002, 2011; Geels and Schot, 2007). 이러한 관점에서 보면 에너지원 구성의 구조적 변화는 발전·송배전 설비의 추가 그 자체에 의해서가 아니라 전력시장 구조, 가격 신호, 규제 체계, 운영 조직의 학습 등 regime 차원의 동시적 재편이 수반될 때 비로소 안정적으로 관측 가능한 단계로 진입한다. 시스템 전환의 시간성을 다룬 연구들 또한 역사적 에너지 전환이 평균적으로 수십 년 단위에 걸쳐 진행되어 왔음을 보고하며, 외부 재원의 단기적 유입이 곧바로 최종 에너지믹스의 구조적 변동으로 이어지지 않는 이유를 시스템적으로 설명한다(Smil, 2010; Sovacool, 2016).

기존 시스템의 관성은 단순한 시간 지연이 아니라 구조적 잠금(lock-in)으로 나타난다. 화석연료 기반 인프라는 매몰비용, 수직통합된 공급망, 보조금과 가격구조, 숙련의 분포 등이 결합된 자체 강화 메커니즘을 형성하며, 이러한 탄소 잠금(carbon lock-in)은 청정 기술의 단가가 충분히 하락한 이후에도 시스템 전환을 지연시키는 독립적 장애요인으로 작용한다(Unruh, 2000, 2002). 이는 보다 일반적인 경로의존성 이론과 맞닿아 있으며, 초기 조건의 작은 차이가 자기강화 동학을 거쳐 장기적으로 큰 격차를 만들어 낸다는 명제로 정식화된다(Arthur, 1989; David, 1985). 개발도상국 맥락에서는 화석연료 인프라가 비교적 미성숙한 단계에서 청정 기술로 곧바로 도약할 수 있다는 leapfrogging 가능성도 제시되어 왔으나(Goldemberg, 1998; Watson and Sauter, 2011), 이러한 도약이 실현되기 위해서는 인프라·제도·금융의 동시적 정비가 요구되며, 그러한 보완 조건이 미비할 경우 외부 재원의 유입은 기존 체제의 점진적 효율 개선에 흡수되는 데 그칠 수 있다. 신흥·개도국 청정전환 진단에서도 가장 직접적인 병목이 발전 설비의 부족 그 자체가 아니라 송배전망의 노후화·확장 지연·운영 효율의 정체에 있다는 점이 거듭 보고되어 왔으며(IEA, 2023, 2024), 이는 동일한 재원 유입이라도 그 영향이 우선 전력망 효율 개선으로 나타나고, 에너지원 구성의 구조적 재편은 그 이후의 보완 조건이 갖추어진 뒤에야 관측될 수 있음을 시사한다. 이러한 다층적·동태적 시각은 외부 재원의 성과를 단일 최종 지표만으로 판단할 경우 시스템 전환의 초기 단계에서 진행되고 있는 변화가 체계적으로 가려질 수 있음을 함축하며, 빠른 반응 지표(near-term outcome)와 느린 결과변수(slow-moving outcome)를 분리하여 추적할 필요성을 제기한다.

국제 기술확산의 또 다른 주요 채널은 무역에 체화된 기술이전(embodied technology transfer)이다. 연구개발 스필오버 문헌은 한 국가의 지식자본이 무역 파트너의 생산성에 영향을 미치며, 특히 자본재 수입을 매개로 한 외국 R&D 스톡의 흡수가 수입국의 전요소생산성 향상으로 이어짐을 보고해 왔다(Coe and Helpman, 1995; Coe et al., 1997, 2009). 자본재 무역과 발전의 관계를 다룬 후속 연구들 또한 개도국의 생산성 격차의 상당 부분이 자본재 수입의 가격·접근성 격차로 설명될 수 있음을 보였으며(Eaton and Kortum, 2001), 이는 무역 자체가 단순 교환을 넘어 기술 흡수의 통로로 기능함을 시사한다. 이러한 관점에서 보면 청정·저탄소 영역에서의 기술 확산 또한 발명·특허 그 자체보다 무역에 체화된 자본재 흐름을 통해 일차적으로 진행되며(Dechezleprêtre et al., 2011; Haščič et al., 2015), 따라서 저탄소 기술제품의 국가 간 이동은 단순한 교역 통계가 아니라 수원국의 전환역량 축적을 매개하는 실질적 채널로 해석될 수 있는 이론적 근거를 갖는다.

체화된 기술이전의 효과는 그러나 수입품의 단순 양적 유입을 넘어 학습과 적응 과정을 통해 매개된다. 수입된 자본재의 운용은 사용자 단위에서의 학습(learning-by-using)을, 그 정비와 부품 조달은 supplier-user 관계망의 형성을 동반하며, 이러한 과정이 누적될 때 비로소 생산성 향상이 나타된다(Rosenberg, 1982; Henry et al., 2009). 외국인직접투자 또한 시연 효과, 인력 이동, 후방연쇄(backward linkage)를 통해 유사한 채널로 기여할 수 있으나, 그 효과의 크기는 수원국의 인적자본과 흡수역량에 의해 강하게 조건부화된다는 점에서 단순 무역 채널과 구분된다(Saggi, 2002; Javorcik, 2004). 즉 체화된 기술이전이 실질적 역량 축적으로 이어지는지 여부는 수원국의 흡수역량, 무역개방도, 산업구조 등 보완 조건에 따라 다르게 나타나며, 그 효과는 동시적이라기보다 시차를 두고 누적적으로 나타나는 성격을 띤다. 이러한 시각은 외부 재원의 효과를 평가할 때 무역에 체화된 기술 유입의 경로를 별도의 성과 차원으로 고려할 이론적 정당성을 제공하는 동시에, 그 효과의 측정이 동시기 단일 횡단면 비교가 아니라 시차를 누적한 시간적 흔적의 추적으로 이루어져야 할 필요성을 함께 시사한다.

이상의 세 이론적 흐름은 서로 독립적으로 발전해 왔으나 개발도상국에서의 기후·에너지 전환을 설명하는 데에서는 보완적으로 결합된다. 기술역량 축적과 흡수역량 이론은 외부 재원의 효과가 수원국의 출발 조건에 의해 매개되며 일시적 유입이 곧바로 자립적 역량 형성으로 이어지지 않음을, 다층 관점과 경로의존성 이론은 시스템 전환이 서로 다른 시간축을 따라 진행되어 빠른 반응 지표와 느린 결과변수 간에 시점 격차가 존재함을, 그리고 체화된 기술이전 이론은 무역이 전환역량 형성의 한 채널로 작동하되 그 효과가 사용자 학습을 매개로 누적적으로 축적됨을 각각 제시한다. 이러한 이론적 토대는 분석설계에 세 가지 함의를 제공한다. 첫째, 외부 재원의 성과는 단일 최종 산출이 아니라 시스템 전환의 서로 다른 단계에 위치한 복수의 성과지표, 곧 기초 인프

라의 물리적 효율, 최종 에너지원 구성, 그리고 무역에 체화된 저탄소 기술 유입의 조합으로 추적되어야 한다. 둘째, 이들 지표의 시간 반응성이 상이하다는 점에서 동시효과만이 아닌 시차를 누적한 분산시차 구조로 효과를 식별하는 접근이 요구된다. 셋째, 효과의 크기와 방향은 수원국의 초기 발전 조건에 따라 이질적으로 나타날 수 있으며, 특히 기초 인프라의 병목이 큰 환경에서 단위 재원의 한계 개선폭이 더 크게 나타날 가능성이 사전적으로 타당성을 갖는다. 다음 장에서는 이를 변수와 모형으로 구체화한다.

2. 선행연구 고찰

개발재원과 에너지 전환의 관계를 다룬 실증연구는 본 연구와의 인접성을 기준으로 크게 세 흐름으로 나눌 수 있다. 첫째 흐름은 재생에너지 확대나 전력 접근성 개선에 대한 개발재원의 직접효과를 추정한다. Wang et al.(2021)은 사하라 이남 아프리카 34개국 자료에서 ODA와 재생에너지 개발 사이에 비선형 관계가 존재함을 보고하였고, Capucine(2022)은 AidData와 Afrobarometer를 결합한 지리참조 자료를 통해 재생에너지 ODA 프로젝트가 지역사회 전력 접근성을 개선한다는 미시적 증거를 제시하였다. 둘째 흐름은 에너지 원조의 안정성·구성·정책조건에 주목한다. Dornan and Shah(2016)는 소도서국 사례에서 개발원조가 재생에너지 목표의 야심을 높이는 데는 기여했으나 에너지 효율과 현대적 에너지 접근성 같은 기초 조건은 상대적으로 소홀히 다뤄졌음을 지적하였다. Jain and Bardhan(2023)은 2002–2019년 67개 수원국을 대상으로 에너지 원조의 부문별 변동성을 분석하고, 재생에너지 원조가 총 에너지 원조 변동성의 주요 원천임을 보였다. 이들은 SDG7 달성을 위해 에너지 원조의 효과성이 중요하다는 점에서, 부문별 변동성을 완화할 필요가 있다고 주장하였다. 셋째 흐름은 보다 최근에 등장한 것으로, 기후재원(climate finance) 그 자체를 직접 다룬다. Halimanjaya(2015)는 기후완화 재원의 국가 간 배분이 수원국의 배출 수준과 정책역량에 의해 체계적으로 결정됨을 보였고, Li et al.(2022)은 기후관련 개발재원이 개도국의 탄소배출 감축과 에너지구조 전환에 기여할 수 있으며 그 경로의 하나로 재생에너지 확대와 과학기술 수준 제고를 제시하였다. 다만 이 계열의 연구 대다수는 탄소배출, 재생에너지 발전량, 에너지 원단위 등 비교적 상위 수준의 결과변수에 집중하고 있어, 기후 관련 개발재원이 최종 전환 성과에 닿기 이전에 경유하는 하부 경로, 가령 전력망 운영 효율의 개선이나 기술의 체화된 무역 유입 같은 중간 단계의 역량 변화는 거의 다루어지지 않았다. 또한 원조의 효과가 시점에 따라 분산되어 가시화된다는 Arndt et al.(2010, 2015)의 장기 누적 접근은, 본 연구가 누적분산시차 모형으로 효과의 시차 효과를 추적하려는 직접적 근거이기도 하다.

기술이전·기술확산 문헌은 이러한 중간 단계의 공백을 메우는 데 직접적인 단서를 제공한다. 국제 기술확산은 단순히 장비가 국경을 넘는 사건이 아니라 지식·경험·운용능력·적응과 개량이 함께 이전되는 과정으로 이해되어 왔으며, UNFCCC(2001)와 IPCC(2000)의 기술이전 정의 역시 장비뿐 아니라 know-how, 경험, 제도, 역량강화를 포괄한다. Keller(2004)와 Saggi(2002)의 고전적 검토는 국제 기술확산이 자동적으로 일어나지 않으며 수원국의 흡수역량(absorptive capacity)과 제도적 조건이 선행되어야 실질적 생산성 향상으로 연결됨을 강조하는데, 이는 본 연구의 이질성 분석이 의지하는 근거로도 직접 작동한다. 청정·저탄소 영역에 한정하면, Popp(2011)은 청정기술의 국제 확산이 수원국의 연구개발 기반과 인적자본에 의해 강하게 매개됨을 실증적으로 확인하였고, Dechezleprêtre et al.(2011)은 청정기술의 일차적 이전 경로가 특허 라이선싱보다 무역에 체화된 자본재 흐름을 통해 더 많이 진행됨을 보고하였다. 이는 무역이 자본재에 체화된(embodied) 기술을 전달하고 효율성 개선을 유도한다는 Henry et al.(2009)의 결과와 정합적이며, 본 연구가 저탄소 기술제품 수입(LCTI)을 단순한 수입통계가 아니라 무역을 통한 체화된 기술이전의 근사치로 별도 결과지표화한 근거와 직접 맞닿아 있다. Tigabu et al.(2015) 또한 케냐와 르완다의 가정용 바이오가스(biodigester) 보급 사례에서 원조가 기술지식의 전파에는 기여했지만 균형 잡힌 혁신체계가 형성되지 않으면 광범위한 확산으로 이어지기 어렵다고 보고하며, 국내 연구로는 Choi and Cho(2023)가 과학기술혁신 ODA의 효과가 수원국 R&D 투자 같은 흡수역량 조건에 의해 조건부적으로 발현됨을 보여준다.

한편 기후기술 관련 개발재원을 실증적으로 식별하는 문제는 그 자체가 별도의 측정 문제를 제기한다. OECD DAC CRS에는 "기후기술 재원"이라는 독립된 통계 항목이 존재하지 않으며, 기후 관련성은 Rio marker로, 세부 부문과 활동 성격은 목적코드와 채널 정보로 분산 기록된다. 이 체계는 본래 기후재원을 정확한 금액으로 계상하기 위한 것이 아니라 개발협력 포트폴리오에 기후 목적이 어느 정도 주류화(mainstreamed)되어 있는지를 추적하기 위해 설계되었다. OECD(2024)가 명시하듯 Rio marker는 DAC 회원국의 ODA에 대해서는 의무 보고 항목이지만 OOF(기타 공적 흐름)에 대해서는 자발적 보고에 머무르며, marker 점수는 개별 활동 전체에 부여되는 기술적·서술적 표시이지 활동 내부의 정확한 기후 관련 금액을 의미하지 않는다. 이러한 보고체계의 한계는 보고된 기후재원이 실제 기후 목적 지출을 체계적으로 과대평가할 수 있다는 비판으로도 이어져 왔으며(Weikmans and Roberts, 2019), 그 결과 실증연구마다 기후재원의 포괄 범위와 집계 방식이 상이하여 비교가능성이 훼손되는 구조적 문제가 발생한다. 본 연구가 채택한 CTRDF는 Rio marker와 목적코드를 교차시켜 기후·기술 양쪽 속성을 모두 만족하는 활동을 개발재원 전체 흐름에서 재구성한 것으로, 단순한

변수 가공이라기보다 현행 통계체계의 한계를 실증분석 맥락에 맞게 보완하려는 조작적 선택에 해당한다.

이상의 검토를 바탕으로 기존 연구의 공백과 본 연구의 차별성은 세 가지로 정리된다. 첫째, 측정의 차원에서, 기존 연구는 단일 재원 범주에 머무르거나 표준 보고체계의 한계에 그대로 노출되어 실제 기후·기술 관련 재원 흐름을 체계적으로 과소·과대 포착해 왔다. 본 연구는 기후 관련성과 기술 관련성을 동시에 만족하는 활동을 교차 기준으로 재구성함으로써 이 한계를 보완하고자 한다. 둘째, 결과변수의 차원에서, 기존 연구는 시스템 전환의 최종 단계에 위치한 지표에 집중해 온 반면, 전환의 중간 단계에서 확인되는 역량 변화는 상대적으로 가려져 왔다. 본 연구는 서로 다른 시간 반응성을 가진 복수의 성과지표를 동일한 추정 틀 안에 병렬적으로 배치함으로써 이를 보완한다. 셋째, 분석 틀의 차원에서, 원조 효과 문헌과 기술이전 문헌은 평행적으로 축적되어 왔을 뿐 "기후기술 관련 개발재원 → 전환역량 → 최종 전환"의 순차적 경로를 한 모형 안에서 결합·검증한 연구는 드물다. 본 연구는 시차를 누적한 분산 효과의 식별 구조와 초기 발전 조건에 따른 이질성 분석을 결합함으로써 두 문헌 흐름을 잇는 분석 틀을 제공하고자 한다.

Ⅲ. 연구설계

1. 변수 설정

본 연구는 국가별 관측기간이 상이한 비균형패널(unbalanced panel)을 사용한다. 분석에는 결과변수별로 최소 10개 연도의 유효 관측치를 보유한 국가를 포함하였으며, 분산시차 변수를 생성할 때에는 연속시점 조건을 적용하여 시점 간극에 따른 허위 시차 결합을 방지하였다. 결과변수별 결측 구조의 차이로 실제 분석 관측치는 LOSS와 REC 모형에서 각각 2,300개, LCTI 모형에서 2,240개이다.

본 연구의 핵심 설명변수인 기후기술 관련 개발재원(Climate Technology-Related Development Finance; 이하 CTRDF)은 OECD DAC CRS의 활동(activity) 단위 자료에 두 단계의 필터를 차례로 적용하여 산출된다. 먼저 기술 필터는 강희종·임덕순(2019)의 과학기술 ODA 분류 틀을 토대로, 연구개발, 인적자원개발, 산업기술, 사회안전, 정책·기타의 다섯 범주를 포괄하는 목적코드(purpose code) 집합 $\mathcal{S}$_tech를 구성한다(Table 1).

다음으로 기후 필터는 Rio Marker 체계에서 기후변화 완화(mitigation) 또는 적응(adaptation) marker가 principal(=2) 혹은 significant(=1)로 부여된 활동의 집합 $\mathcal{S}$_clim을 식별한다. 두 집합의 교집합 $\mathcal{S}$_tech ∩ $\mathcal{S}$_clim에 해당하는 활동들의 약정액(commitment)을 수원국-연도 단위로 합산한 값이 곧 CTRDF의 원시 흐름액 F_it이다.

Table 1. CRS purpose codes constituting the technology filter

Category	Subcategory	CRS purpose codes
R&D	Research	11182, 12182, 23182, 31182, 31282, 31382, 32182, 41082, 43082
	Development	31120, 31165, 31320, 32120, 32130, 32220, 43040
Human resource development	School education	11220, 11320, 11420
	Education and training	11120, 11130, 11230, 11330, 11430, 12181, 12261, 14081, 21081, 23181, 31181, 31281, 31381, 41081, 43081
Industrial technology	Technology transfer	15153, 21040, 21050, 22040, 23210, 31161, 31162, 31166, 31192, 32140, 32171
	Environmental conservation	41020, 41030
Social safety	Disease control	12250, 12262, 12263, 13020, 13040
	Social infrastructure building	13030, 14015, 15130, 15150, 15160, 15220, 16062, 43010, 52010
Policy and others	Policy and administrative management	11110, 12110, 13010, 15110, 21010, 22010, 23110, 25010, 31110, 31210, 31310, 32210, 33110, 41010
	Others	99810

Source: Adapted from Kang and Yim (2019)

원시 흐름액 F_it는 일부 대형 수원국으로의 자금 집중에 기인한 우편향(right-skewed)이 두드러지는 한편, F_it=0 또는 0에 근접한 극소값 관측치도 다수 분포한다. 단순 자연로그 변환은 0 관측을 정의역에서 배제하고 작은 값에서 한계효과를 과장하는 약점이 있으므로, 본 연구는 역쌍곡사인(Inverse Hyperbolic Sine; IHS) 변환을 적용하였다. IHS 변환은 0을 정의역에 그대로 수용하면서 큰 값에서는 로그와 유사한 비선형 수축을, 0 근방에서는 선형 거동을 보이는 특성을 지닌다(Burbidge et al., 1988; Bellemare and Wichman, 2020). 다만 IHS 계수의 해석은 원자료의 단위 척도에 민감하기 때문에, 양수 관측치의 중윗값 $\tilde{m}$ = median{F_it : F_it >0}을 기준으로 사전 정규화를 거친 뒤 변환을 수행하였다.

$$CTRDF = \sinh^{-1}\left(\frac{F}{\tilde{m}}\right) = \log\left(\frac{F}{\tilde{m}} + \sqrt{\left(\frac{F}{\tilde{m}}\right)^2 + 1}\right) \quad (1)$$

F_it/$\tilde{m}$이 충분히 클 때 식 (1)은 log(2F_it/$\tilde{m}$)에 근사한다. 이 성질에 따라 회귀계수는 종속변수가 비율 척도로 정의된 본 연구의 맥락에서 준탄력성(semi-elasticity)에 근접한 값으로 해석될 수 있다. 따라서 추정계수는 정규화·IHS 변환된 CTRDF 1단위

변화에 대응하는 종속변수의 변화이며, 준탄력성 해석은 재원 규모가 큰 구간에서만 유효하다. 한편 F_it가 0에 가까운 영역에서는 IHS의 선형 거동에 의해 0 경계 부근에서 한계효과가 비현실적으로 부풀려지는 문제도 자연스럽게 완화된다. 이러한 이유로 본 연구는 식 (1)의 IHS 변환을 사용하였다.

본 연구에 사용한 주요 변수의 정의와 자료 출처는 〈Table 2〉와 같다. 종속변수는 에너지 전환의 동학을 서로 다른 시간 반응성의 층위에서 포착하기 위해 세 지표로 구성된다. LOSS(electric power transmission and distribution losses, % of output)는 전력 생산 대비 송배전 손실률로, 전력 인프라의 물리적 효율과 운영 단계의 학습 수준을 반영하는 비교적 단기 반응성 지표이다. REC(renewable energy consumption, % of total final energy consumption)는 최종 에너지소비 대비 재생에너지 비중을 의미하며, 발전·송배전 설비의 추가만으로는 변동이 관측되지 않고 가격·규제·시장 구조의 동시적 재편이 누적되어야 비로소 변동이 관측되는, 변화가 느린 결과변수(slow-moving outcome)에 해당한다. LCTI(imports of low-carbon technology products, % of GDP)는 저탄소 기술제품 수입액을 GDP로 표준화한 비율로, 무역에 체화된 기술이전(embodied technology transfer)의 거시적 근사치로 활용된다. 세 변수 모두 비율형 지표이며, 추정 단계에서는 원자료의 퍼센트 값을 100으로 나눈 0-1 스케일로 통일하였다.[1)]

이처럼 세 지표는 인프라 효율(LOSS), 체화된 기술 유입(LCTI), 최종 에너지믹스(REC)라는 전환 경로의 상이한 단계를 각각 대표하며, 기후기술재원과 연관된 성과가 어느 단계에서 먼저 가시화되는지를 판별하기 위한 조합으로 선정되었다. 기존 연구에서 널리 활용되는 대안 지표를 채택하지 않은 것도 같은 이유에서다. 재생에너지 설비용량은 설치된 자본스톡만을 측정해 실제 이용률과 계통통합을 반영하지 못하고, CO_2 배출량은 성장·산업구조·연료가격 등 전환 외적 요인이 혼재된 원거리 결과변수이며, 에너지 원단위는 기술적 효율과 산업구조 변화가 분리되지 않는 복합지표이기 때문이다.

통제변수 벡터 X_{i,t−1}은 선행연구의 표준적 처방을 좇아 모두 1기 시차로 투입함으로써 동시기 처치-결과의 동시결정성에서 비롯되는 편의를 일차적으로 차단한다. 구성 변수는 무역개방도(TO), 외국인직접투자(FDI), 제조업 부가가치 비중(MANU), 인구 자연로그(lnPOP), 1인당 GDP 자연로그(lnGDPPC)의 다섯 가지이다. TO는 자본재 수입을 통한 기술 흡수의 기초 조건을, FDI는 기술이전의 또 다른 채널인 직접투자 경로를, MANU는 산업구조와 에너지 수요 강도를, lnPOP과 lnGDPPC는 국가 규모 및 발전 단계라는 거시 배경을 흡수하는 역할을 각각 수행한다.

2. 분석모형

본 연구의 기본 모형은 이원고정효과(two-way fixed effects; TWFE)에 3기 분산시차(distributed lag)를 결합한 동태 축약형(dynamic reduced-form) 사양이다. 종속변수 y_it ∈ {LOSS_it, REC_it, LCTI_it}에 대해 모형은 식 (2)와 같이 구성된다.

$$y = \alpha_i + \delta_t + \sum_{k=1}^{3} \beta_k \; CTRDF_{i,\,t-k} + \gamma' \; X_{i,\,t-1} + \phi_i \cdot t + \epsilon \qquad (2)$$

α_i는 국가 고정효과로, 제도 수준, 지리·기후 부존, 초기 에너지구조, 행정역량과 같은 시간불변 이질성을 흡수하는 역할을 맡는다. δ_t는 연도 고정효과이며, 원유·가스 가격 변동, 글로벌 거시 충격, 기후협정 협상 사이클처럼 모든 국가에 동시에 작용하는 시점별 공통요인을 통제한다. $\varphi_i \cdot t$는 국가별 선형시간추세(country-specific linear trend)로, 수렴 경로 또는 전환 속도의 이질적 기울기를 추가로 포착한다. X_{i,t−1}은 앞 절에서 정의한 1기 시차 통제변수 벡터, ε_{it}는 특이오차이다.

식 (2)는 분산시차만을 포함하고 동시효과 $\beta_0 \cdot$ CTRDF_it는 의도적으로 제외하였는데, 그 이유는 두 가지이다. 첫째, 기후기술 관련 재원은 그 성격상 약정(commitment) 시점에 송배전 효율이나 재생에너지 비중을 즉각 움직일 만큼 빠른 반응성을 갖

Table 2. Variable descriptions

Variables		Description	Source
Independent	CTRDF	IHS of climate technology finance (median-normalized) (commitment, 2021 USD)	OECD/CRS
Dependent	LOSS	Electric power transmission and distribution losses (share of output, 0–1)	WDI
	REC	Renewable energy consumption (share of total final energy consumption, 0–1)	WDI
	LCTI	Imports of low-carbon technology products (share of GDP, 0–1)	UN Comtrade
Controls	FDI	Foreign direct investment, net inflows (share of GDP, 0–1), 1-year lag	WDI
	MANU	Manufacturing, value added (share of GDP, 0–1), 1-year lag	WDI
	TO	Trade openness: exports plus imports (share of GDP, 0–1), 1-year lag	WDI
	lnGDPPC	Natural logarithm of GDP per capita (constant 2015 USD), 1-year lag	WDI
	lnPOP	Natural logarithm of total population, 1-year lag	WDI

지 않는다. 둘째, 보다 본질적인 이유로, 동시기 CTRDF는 수원국 성과의 현 상태와 동시결정적(simultaneous) 관계를 가질 가능성이 크다. 동시효과의 포함은 역인과 경로를 모형 내부에 그대로 열어두는 결과를 낳으며, 시차 구조를 통한 식별 의도를 훼손할 우려가 있다.[2)]

정책적 관심의 대상은 개별 시차계수 β_k 그 자체라기보다 3기 누적효과(cumulative effect)이다. 재원의 효과가 시점에 분산되어 나타난다는 이론적 시각(Arndt et al., 2010, 2015)을 받아들이면, 단일 시차의 계수보다는 시점을 가로지른 합산효과가 정책 평가에 더 적합한 정보를 제공한다. 누적효과와 그 분산은 식 (3)과 같다.

$$\beta_{cum} \equiv \sum_{k=1}^{3} \beta_k, \quad \widehat{Var}\left(\hat{\beta}_{cum}\right) = \sum_{k=1}^{3} \widehat{Var}\left(\hat{\beta}_k\right) + 2 \sum_{k<l}^{\widehat{Cov}\left(\hat{\beta}_k, \hat{\beta}_l\right)} \tag{3}$$

시차계수들 간의 상관은 일반적으로 무시할 수 있는 수준이 아니므로, 분산의 산출에 공분산 항을 명시적으로 포함하지 않으면 누적효과의 표준오차가 체계적으로 과소·과대 평가될 위험이 있다. 본 연구는 식 (3)의 검정을 Driscoll-Kraay 공분산행렬에 기반한 선형결합 검정(linear-hypothesis test) 방식으로 구현하였다.

CTRDF가 결과변수에 대해 시간적으로 선행한다는 식별의 핵심 전제는 직접 관측되지 않는다. 이를 간접적으로 점검하고 사전추세 및 역인과의 잔존 가능성을 진단하기 위해, 본 연구는 식 (2)에 2기 리드(lead) 항을 추가한 확장 사양을 별도로 추정한다.

$$y = \alpha_i + \delta_t + \sum_{k=1}^{2} \theta_k \, CTRDF_{i,\,t+k} + \sum_{k=1}^{3} \beta_k \, CTRDF_{i,\,t-k} + \gamma' X_{i,\,t-1} + \phi_i \cdot t + \epsilon \tag{4}$$

리드-플라시보 검정의 귀무가설은 H_0 : θ_1 = θ_2 = 0이며, 그 진술 내용은 "미래의 CTRDF가 현재의 성과지표를 예측해서는 안 된다"는 사전추세 부재 조건에 해당한다. 귀무가설이 기각되지 않는 경우, 본 모형에 포함한 1·2기 선형 리드 구조에서는 통계적으로 유의한 사전관계가 확인되지 않은 것으로 해석한다. 다만 이는 역인과성이나 시간가변 누락요인이 존재하지 않음을 입증하는 것은 아니다. Wald 결합검정은 동일하게 Driscoll-Kraay 공분산행렬을 사용한다.

흡수역량 가설과 초기병목 가설은 동일한 규모의 CTRDF 유입이라 하더라도 수원국의 출발 조건에 따라 한계효과의 크기가 다를 수 있음을 시사한다. 본 연구는 이를 시간불변 분할변수 D_i^LowInc로 조작화하였다. 구체적으로 국가별 표본 내 최초 관측시점 lnGDPPC가 패널 중윗값 이하면 1, 아니면 0의 값을 부여하였다. 다음으로 식 (2)에 CTRDF 시차변수와 D_i^LowInc 간의 상호작용항 Σ_k λ_k (CTRDF_{i,t−k} × D_i^LowInc)을 추가한 확장 모형을 추정하였다. D_i^LowInc 자체는 시간불변이므로 α_i에 흡수되어 주효과로 식별되지 않으며, 본 연구의 관심은 저소득·고소득 그룹 간 누적효과의 차이 λ_cum = Σ_{k=1}^{3} λ_k에 놓인다. λ_cum이 음(-)으로 추정된다면 저소득 수원국에서 추가적인 성과 개선, 즉 LOSS의 더 큰 폭의 감소가 발생함을 의미하며, 이는 초기병목 가설에 부합하는 결과로 해석할 수 있다.

3. 식별 전략과 강건성 점검

식 (2)의 인과적 해석을 정당화하는 핵심 식별가정은 조건부 엄격외생성(conditional strict exogeneity)이다.

$$E\left[\epsilon \mid \{CTRDF_{is}\}_{s=1}^{T}, \{X_{is}\}_{s=1}^{T}, \alpha_i, \delta_t, \phi_i \cdot t \right] = 0 \tag{5}$$

이 조건은 국가 고정효과, 연도 고정효과, 국가별 선형추세를 통제한 뒤 잔존하는 특이오차가 과거·현재·미래의 CTRDF 및 통제변수 어느 시점과도 상관되지 않아야 한다는 요구이다. 관측자료 기반 축약형 패널분석에서 엄격외생성이 직접 검증되기는 어렵지만, 본 연구는 세 장치의 결합을 통해 가정의 설득력을 확보하는 방식을 취한다. 우선 설명변수를 시차 구조로만 투입함으로써 동시기 역인과의 일차적 경로를 차단한다. 다음으로, 식 (4)의 리드-플라시보 검정으로 미래의 CTRDF가 현재 성과를 예측하지 않음을 직접 확인한다. 마지막으로 Mundlak(1978)와 Chamberlain(1982) 유형의 상관임의효과(Correlated Random Effects; CRE) 모형을 누적 사양에 결합해 병렬 추정함으로써, 시간불변 잠재 이질성의 잔존 영향을 대조 점검한다.[3)] 다만 이러한 접근이 관측자료 분석에 내재하는 내생성 우려를 모두 해소하는 것은 아니다. 기후기술재원이 전력 손실이 크거나 전환 수요가 높은 국가에 우선 배분될 개연성을 감안하면 역인과성의 가능성을 완전히 배제하기 어려우므로, 본 연구의 추정 결과는 인과효과의 확정적 증거라기보다 식별 전략과 정합적인 조건부 연관(conditional association)으로 해석한다.

표준오차는 Driscoll and Kraay(1998)의 비모수 공분산행렬로 추정한다. 본 표본에는 글로벌 상품가격 충격, 국제 기후정책 사이클, 다국적 자본의 동조적 이동과 같이 국가 간 공통요인에서 비롯되는 횡단면 의존성(cross-sectional dependence)이 잠재되어 있으며, 이 환경에서 Arellano-type 클러스터-강건 표준오차는 하향 편의를 보이는 경향이 보고되어 왔다. 반면 Driscoll-Kraay 표준오차는 이분산성, 시계열 자기상관, 임의의 횡단면 의존성에 동시에 강건하다(Hoechle, 2007). Lag truncation 파라미터는 Newey-West 처방에 따라 L = 4로 설정하였으며, 본 표본의 차원(T≈20, N≈117)은 Driscoll-Kraay 추정량의 점근적 성질이 확보되는 영역에 든다. 횡단면 의존성 자체는

Pesaran(2021) CD 검정으로, 단위근 가능성은 Pesaran(2007) CIPS 및 Im et al.(2003) IPS 검정으로 각각 진단하여 사양 선택의 정당성을 사전 점검하였다.

주 추정의 강건성은 세 측면에서 검증된다. 첫째, 국가별 선형 추세의 포함 여부를 대조하여 LOSS 계수의 안정성이 추세 사양에 종속되지 않음을 확인한다. 둘째, 상위 분위 winsorization(p=0.99, 0.95)과 영향력 있는 대형 수원국(인도, 브라질, 벨라루스, 카자흐스탄, 우크라이나, 멕시코)의 표본 배제를 통해 일부 관측치 또는 특정 국가군에 의한 추정치 흔들림 가능성을 점검한다. 셋째, 분산시차 차수를 2기와 4기로 변형 적용하여 시차 구조 선택의 민감도를 평가한다. 이 세 강건성 결과는 모두 Ⅳ장의 해당 소절에서 종합한다.

Ⅳ. 분석 결과

1. 기초통계

〈Table 3〉은 분석에 활용된 주요 변수의 기초통계량을 정리한 것이다. CTRDF(IHS 변환 후)의 평균은 1.702, 중윗값은 1.299로 평균이 중윗값을 뚜렷이 상회하며 최댓값은 8.58에 이른다. 분포 형태는 명백한 우편향(right-skewed)을 띠는데, 이는 터키·인도·케냐와 같이 일부 대형 수원국으로 재원이 집중되는 구조에 기인한다. 이러한 비대칭성은 OLS 추정 단계에서 소수 관측치의 영향력이 비대해질 가능성을 환기시키며, 본 연구가 IHS 변환에 더해 강건성 점검에서 상위 분위 winsorization과 영향력 있는 수원국 표본 배제를 함께 수행한 배경이기도 하다.

종속변수 세 지표의 분산 구조 또한 표본의 이질성을 함축적으로 드러낸다. LOSS의 평균은 12.6%이지만 표준편차가 11.8%p로 평균에 육박하며, 최댓값은 90%에 근접한다. 국가 간 전력망 손실 격차가 극단적이라는 사실을 단적으로 보여주는 수치이다. REC의 경우 평균이 40.7%인 반면 표준편차가 30.8%p에 달한다. 전통 바이오매스 의존도가 높은 저소득국과 재생에너지 비중이 0에 가까운 산유국이 동일 표본 안에 공존한다는 의미이며, REC 추정에서 국가 이질성의 통제가 결정적 비중을 가질 수밖에 없음을 시사한다. LCTI는 평균 0.87%, 표준편차 0.73%p로 규모 자체는 작지만, 개별 국가의 저탄소 기술 도입 흐름을 시계열로 추적하기에는 충분한 변동폭을 보유한다.

〈Figure 1〉은 상위 40개 수원국의 연도별 CTRDF 처리 강도를 시각화한 결과이다. 대부분의 국가에서 CTRDF 강도는 일관된 단조 변동이 아닌, 증감이 교차하는 굴곡 패턴으로 관측된다. 터키·인도·케냐는 2015년 이후 처리 강도가 가파르게 상승하는 반면, 벨라루스·카자흐스탄·우크라이나는 연도별 편차가 큰 흐름을 보인다. 본 연구가 채택한 TWFE 모형의 식별 기반이 바로 이러한 국가 내(within-country) 시간 변동에 있다는 점은 강조될 필요가 있다. 즉, 본 연구의 추정계수는 "재원을 원래 많이 받는 국가 대 적게 받는 국가" 간의 횡단면 비교가 아니라 동일 국가 안에서 발생한 시점 간 처리 강도의 변동으로부터 도출되며, 이

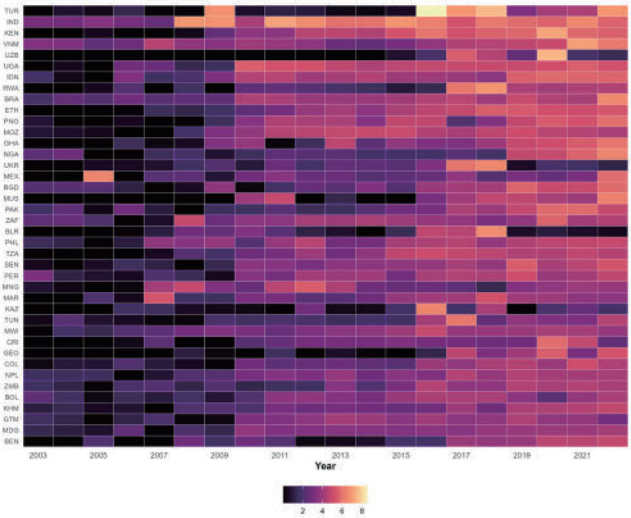


Figure 1. Year-country distribution of CTRDF treatment intensity (Top 40 recipients)

Note: Countries are sorted by cumulative CTRDF level. Lighter shading indicates higher CTRDF intensity (IHS-transformed) within the estimation sample.

Table 3. Descriptive statistics

Variable	.Obs	Mean	Std.dev.	Min	Max
CTRDF	2,340	1.702	1.707	0.00	8.58
LOSS	2,340	0.126	0.118	0.00	0.90
REC	2,340	0.407	0.308	0.00	0.98
LCTI	2,260	0.009	0.007	0.00	0.07
FDI	2,340	0.040	0.060	-0.37	1.03
MANU	2,340	0.107	0.063	0.00	0.30
TO	2,340	0.634	0.388	0.00	2.10
lnGDPPC	2,300	8.841	0.912	6.66	10.79
lnPOP	2,340	15.952	1.889	9.78	21.08

는 시간불변 이질성에 의한 교란 가능성을 일차적으로 차단하는 식별 장치로 작동한다.

2. 주요 분석결과

〈Table 4〉는 식 (2)의 TWFE-DL 모형으로 산출한 추정 결과를 결과변수별로 통합 제시한다. Panel A에는 CTRDF의 3기 누적효과가, Panel B에는 초기소득 기반 이질성의 추가 효과가, 통제변수 블록에는 1기 시차 통제벡터의 추정계수가 제시되어 있으며, 표 하단에는 사전추세·역인과를 진단하는 리드-플라시보 결합검정의 p-값과 표본 구성 정보를 함께 수록하였다.

분석결과, 가장 두드러진 연관은 LOSS에서 확인되었다. CTRDF의 3기 누적효과는 -0.00492로 1% 수준에서 통계적으로 유의하다(p = 0.007). 계수의 절댓값만 놓고 보면 작아 보일 수 있으나, 실질적 함의가 반드시 작다고 보기는 어려운데, 두 가지 측면에서 이를 살펴볼 수 있다. 첫째, 종속변수 LOSS는 0-1 스케일의 비율변수이며 표본 표준편차가 약 0.118이다. 누적계수를 결과변수의 표준편차로 나누면 약 -0.042 표준편차에 해당한다. 둘째, IHS 변환을 적용한 CTRDF 계수는 일정 부분 준탄력성에 가깝게 해석할 수 있다. 특히 재원 규모가 충분히 큰 구간에서는 IHS(F/m)가 log(2F/m)에 근사하므로, 변환된 CTRDF 지표의 증가는 원자료 기준 재원 규모의 상당한 확대를 의미한다. 이러한 점을 감안하면, 변환된 CTRDF 지수가 1단위 증가할 때 송배전 손실률은 약 0.5%p 낮은 방향과 연관되는 것으로 추정된다. 전력망 현대화의 성과가 통상 장기간에 걸쳐 누적된다는 점을 감안하면, 3년의 누적 시차 안에서 이러한 크기의 반응이 식별되었다는 점은 주목할 만하다.

Table 4. Main estimation results

	LOSS	REC	LCTI
Panel A: Main effect			
CTRDF cumulative (Σβ_k, k = 1–3)	-0.0049***	-0.0004	0.0003*
	(0.0018)	(0.0011)	(0.00016)
Panel B: Heterogeneity (Low-High initial income)			
CTRDF cumulative, high-income group (Σβ_k)	-0.0003	0.0004	0.0003
	(0.0016)	(0.0011)	(0.0003)
Low-income × CTRDF cumulative (Σλ_k)	-0.0098**	-0.0017	0.0001
	(0.0044)	(0.0043)	(0.00037)
Control variables (t-1)			
FDI	0.045***	-0.037***	0.003
	(0.015)	(0.010)	(0.003)
MANU	-0.016	0.019	-0.004
	(0.053)	(0.058)	(0.006)
TO	-0.006**	-0.012**	0.005***
	(0.003)	(0.005)	(0.001)
lnGDPPC	-0.008	-0.051*	-0.003
	(0.013)	(0.026)	(0.002)
lnPOP	0.003	-0.132	-0.019**
	(0.030)	(0.105)	(0.008)
Lead-placebo joint p-value	0.740	0.883	0.268
Obs	2,300	2,300	2,240

Note: All specifications follow Eq. (2): TWFE-DL with country fixed effects, year fixed effects, country-specific linear trends, and one-year lagged control vector. Driscoll-Kraay standard errors (L=4) in parentheses.

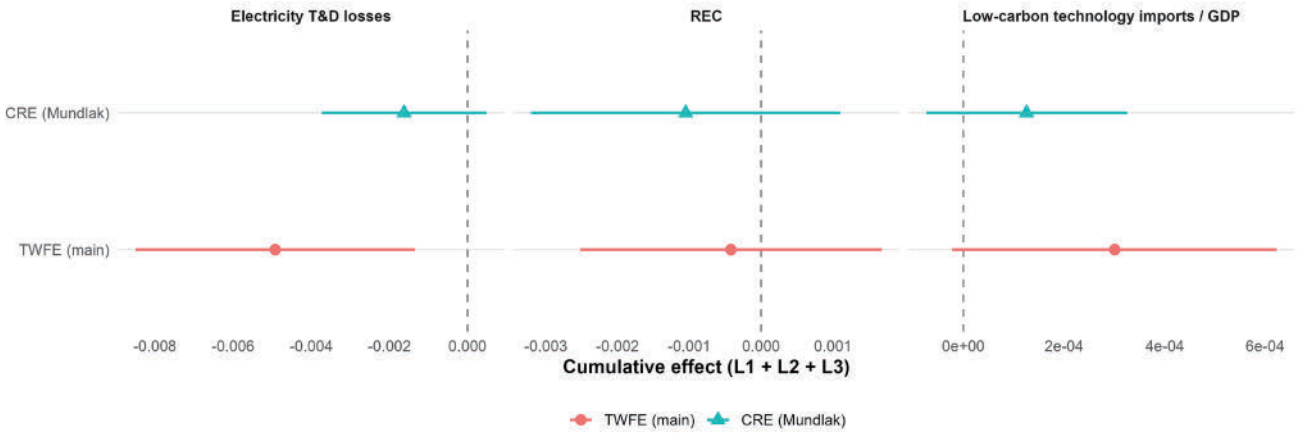
***p <0.01, **p <0.05, *p <0.1

이와 대조적으로 REC에서는 누적계수가 -0.00042로 통계적으로 0과 구분되지 않는다(p = 0.695). 이는 3년의 누적 시차 안에서 CTRDF와 REC 간의 유의한 평균적 연관이 확인되지 않았음을 의미한다. REC는 계통통합 능력, 전력시장 제도, 가격 신호 및 보조금 구조 등 다수의 보완 조건에 의해 좌우되는 slow-moving outcome이므로, 단기간에는 재원 유입이 최종 에너지믹스의 변화로 이어지지 않을 수 있다. 또한 국가별 정책 역량과 재생에너지 보급정책의 설계·집행 수준, 화석연료 보조금과 탄소 잠금, 전통 바이오매스 또는 화석연료 중심의 초기 에너지원 구성, 인허가·계통접속 등 정치·제도적 여건의 차이가 국가별 반응을 상쇄했을 가능성도 있다(Halimanjaya, 2015; Unruh, 2000; Dornan and Shah, 2016; Coady et al., 2017; Pfeiffer and Mulder, 2013). 이러한 요인들은 상호 배타적이지 않으며 본 연구의 자료로 각각의 기여도를 구분하기 어렵다. 따라서 비유의 결과는 CTRDF가 REC와 무관하다는 증거라기보다, 이질적인 제도·구조적 조건 아래 3년의 시차에서는 통계적으로 유의한 평균 반응이 관측되지 않았다는 결과로 해석하는 것이 적절하다.

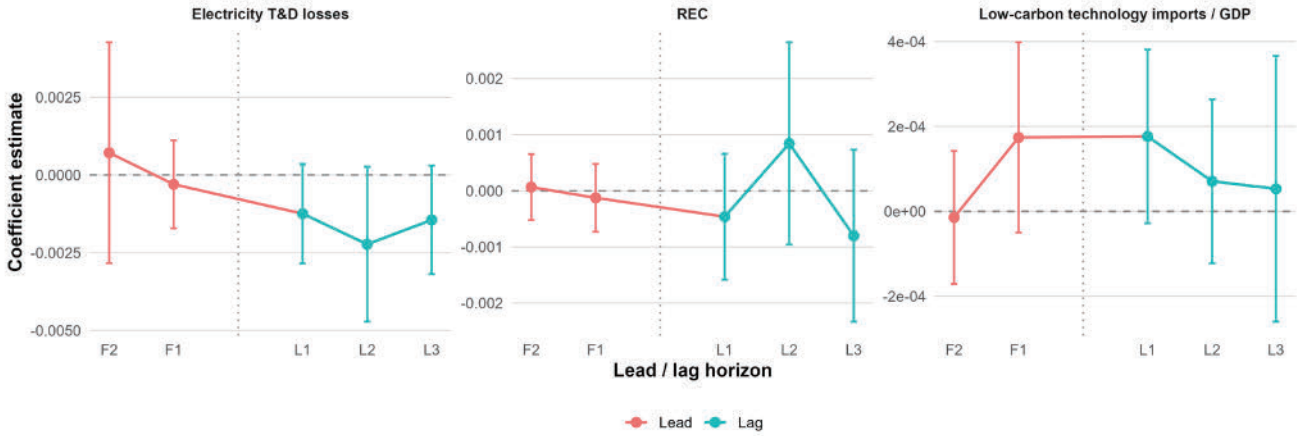
LCTI의 누적계수는 +0.000300으로 10% 수준에서 한계적으로 유의하다(p = 0.068). 표준화 계수의 절댓값은 LOSS와 유사하지만 신뢰구간이 더 넓어 통계적 정밀도는 상대적으로 낮다. 따라서 LCTI 결과는 양의 연관에 대한 한계적 증거로 해석하는 것이 적절하다. 이러한 시간적 순서는 양(+)의 연관과 정합적이지만, 선택편의 가능성을 배제하지는 못한다.

통제변수의 계수는 결과변수별로 상이한 부호를 보인다. 다만 이 변수들은 CTRDF 계수의 조건부 추정을 위한 통제항으로 포함되었으므로, 개별 계수를 인과적으로 해석하지 않는다. 무역개방도와 FDI 등 일부 변수에서는 통계적으로 유의한 계수가 관측되지만, 그 구체적인 작동경로를 확인하기 위해서는 별도의 분석이 필요하다.

〈Figure 2〉의 Panel A는 TWFE와 CRE(Mundlak) 누적효과 추정치를 95% 신뢰구간과 함께 비교한다. 세 결과변수에서 CRE 추정치는 TWFE와 동일한 부호를 유지하면서 절댓값은 축



Panel A. Cumulative effects (TWFE vs. CRE)



Panel B. Lead-placebo and distributed-lag profile

Figure 2. Dynamic effects of CTRDF: Cumulative estimates and lead-lag profile

소되는 일관된 패턴이 관측되는데, 추정 사양 간 부호 안정성에 대한 본격적인 점검은 다음 절에서 다룬다. 〈Figure 2〉의 리드-래그 프로파일은 LOSS에서 F2·F1 구간의 계수가 0 근방에서 시작해 L1–L3 구간을 따라 단조적으로 음의 방향으로 이동하는 양상을 드러낸다. 이는 처리 직후 급변하는 '계단형 효과'가 아니라 시점에 걸쳐 누적되어 나타나는 분산시차형 반응의 전형적 형태이다. REC에서는 L1–L3 구간 부호가 일관되지 않아 동태적 배치가 불명확하며, LCTI는 L1–L3 구간 전반에서 완만한 양의 값을 유지한다. 리드-플라시보 결합검정은 사전추세 및 역인과의 가능성을 직접적으로 검토한다. LOSS($p=0.740$), REC($p=0.883$), LCTI($p=0.268$) 모두에서 귀무가설을 기각하지 못하며, 통상적 유의수준을 큰 폭으로 상회한다. 특히 LOSS에서 F1·F2 계수가 0에 가까운 수준을 보인 뒤 L1부터 음(-)의 방향으로 전환되는 시간적 배치는 주 결과와 정합적이다. 다만 리드 검정은 특정 형태의 사전추세를 진단하는 보조적 검정이므로, 이 결과만으로 역인과성 가능성이 완전히 배제되었다고 해석하지 않는다.

Panel B의 이질성 추정은 동일한 규모의 재원이라 하더라도 수원국의 초기 조건에 따라 연관의 크기가 달라지는지를 보여 준다. LOSS에서 초기소득 하위집단의 추가적 누적계수는 -0.0098로 5% 수준에서 유의하다($p=0.028$). 상호작용 모형에서 초기소득 상위집단의 누적계수는 -0.0003으로 0과 통계적으로 구분되지 않는 반면($p=0.869$), 하위집단의 누적계수는 약 -0.010으로 계산되어, CTRDF와 LOSS 간의 음의 연관은 사실상 초기소득 하위집단에서 더 크게 나타났다. 다만 해당 분류는 국가별 표본 최초 관측시점의 1인당 GDP를 표본 중윗값으로 나눈 상대적 구분이므로, 세계은행의 공식 소득그룹과는 구별된다. 이러한 패턴은 흡수역량 가설보다 초기병목 가설에 상대적으로 더 부합하는 것으로 해석할 수 있으며, 개선 여지가 큰 낮은 출발점일수록 단위 재원당 연관의 크기가 더 크게 나타날 수 있다는 직관과 일치한다(Sachs et al., 2004; Kharas, 2007). 반면 REC($\lambda_cum=-0.0017$, $p=0.687$)와 LCTI($\lambda_cum=0.0001$, $p=0.808$)에서는 그룹 간 차이가 유의하지 않다. 이질성 패턴이 LOSS에 국한된다는 사실에 대해서는 두 가지 해석이 가능하다. REC의 그룹 간 신뢰구간이 폭넓게 겹친다는 점은 재생에너지 비중의 변동이 초기소득이라는 단일 축이 아닌 복수의 제도·구조적 조건에 분산되어 반응함을 의미한다. LCTI 또한 저탄소 기술 수입이 산업구조, 수입 의존도, 환율 체제와 더 밀접하게 결부되어 있어 단순 초기소득 축으로는 포착되지 않는 것으로 보인다. 즉, 초기소득에 따른

차이는 LOSS에서만 확인되었으며, 이를 REC와 LCTI 등 다른 전환 성과로 일반화하기는 어렵다.

3. 강건성 점검

본 절은 주요 분석 결과의 안정성을 사양·표본·시차 구조의 세 축에서 점검한다. 첫째, Mundlak(1978)와 Chamberlain(1982) 유형의 상관임의효과(CRE) 모형을 활용해 사양 변경에 대한 강건성을 검토한다. 〈Table 5〉는 식 (2)의 누적 사양에 각 시변 설명변수의 국가별 시계열 평균을 회귀변수로 함께 투입한 CRE-Mundlak 추정 결과이다. 이 사양은 RE의 무상관 가정에 의존하므로, 추가된 국가별 평균항이 결합적으로 0이라는 귀무가설을 군집-강건 공분산 기반 Mundlak 결합 Wald 검정으로 점검하였다. 세 종속변수 모두에서 귀무가설이 기각되어, 시간불변 국가 이질성이 설명변수와 상관되어 있고 이를 제거하는 TWFE를 주 사양으로 두는 것이 타당함을 확인하였다(Table 5). 이 검정은 Driscoll-Kraay 표준오차 하에서 점근적 정당성이 보장되지 않는 고전적 Hausman 검정을 대체한다(Mundlak, 1978; Wooldridge, 2010).

LOSS의 CRE 누적효과는 -0.00162로, 본 추정의 TWFE 누적효과(-0.00492) 대비 약 3분의 1 수준까지 축소된다. 절댓값은 줄어들지만 부호는 동일하게 유지되며, p-값은 0.131로 통계적으로 유의하지 않다. 이러한 축소 패턴은 두 가지 방향에서 해석될 수 있다. 첫 번째 방향은 TWFE 추정이 관측되지 않는 시간불변 이질성의 일부를 통해 LOSS 감소 방향으로 다소간 편의되어 있을 가능성이다(사업수행 역량이 높은 국가가 CTRDF 수혜와 LOSS 개선을 동시에 보이는 경우가 이에 해당한다). 두 번째 방향은 CRE가 국가별 평균을 회귀변수로 추가하면서 within 변동의 일부를 흡수한 결과일 가능성이다. 어느 해석을 따르든, LOSS의 CRE 누적계수는 음의 부호를 유지하지만, 크기는 TWFE 추정치의 약 3분의 1로 축소되고 통계적 유의성도 사라진다. 따라서 음의 연관 방향은 유지되지만, 계수의 크기와 통계적 정밀도는 추정 사양에 민감할 수 있다. REC의 CRE 추정치(-0.00105, p=0.339)도 TWFE 결과와 마찬가지로 0에 근접한 비유의한 값에 머무르며, LCTI의 CRE 추정치(+0.000126, p=0.216)는 부호는 유지되지만 유의성이 약화된다. LCTI 계수가 CRE에서 비유의해진다는 사실은, 해당 결과를 "한계적 증거(marginal evidence)"로 신중하게 해석해야 한다는 본 연구의 기존 입장을 재차 뒷받침한다.

Table 5. Robustness: Mundlak-augmented RE: Cumulative effects

	LOSS	REC	LCTI
CRE cumulative coefficient	-0.0016	-0.0011	0.0001
	(0.0011)	(0.0011)	(0.00010)
p-value	0.131	0.339	0.216
Mundlak joint Wald, $X^2(6)$	13.14	33.60	13.88
(p-value)	(0.041)	(<0.001)	(0.031)
Observations	2,300	2,300	2,240

Note: Mundlak-augmented RE cumulative specification, with within-country means of all time-varying regressors added as additional controls. Variance components estimated via Swamy–Arora. Cluster-robust standard errors (by country) in parentheses. The Mundlak joint Wald test (df=6) evaluates H_0: the within-country means are jointly zero (the RE no-correlation assumption); rejection supports the TWFE specification used in the main analysis.

둘째, 표본 구성에 대한 민감도를 점검한다. 상위 분위 winsorization(p=0.99, 0.95)을 적용한 사양, 그리고 표본 평균 대비 영향력이 큰 대형 수원국(인도·브라질·벨라루스·카자흐스탄·우크라이나·멕시코)을 순차적으로 표본에서 배제한 사양을 함께 추정하였다. 두 종류의 변경 모두에서 LOSS 누적효과의 부호와 1% 수준의 통계적 유의성은 유지된다. 이는 LOSS의 결과가 일부 극단치 또는 특정 대형 수원국에 의해 견인된 결과가 아님을 보여 준다. LCTI의 경우 영향력 있는 수원국을 배제한 사양에서 한계 유의성이 다소 약해지지만 부호 자체가 반전되는 사양은 발견되지 않는다. 셋째, 분산시차의 차수를 2기와 4기로 변형 적용하여 시차 구조 선택의 민감도를 평가한 결과, LOSS 누적효과의 부호와 유의성은 본 추정(3기)과 일관되게 유지되었다. 분산시차 차수의 선택이 본 연구의 주된 결과를 좌우하지 않음을 확인할 수 있는 대목이다.

종합하면, CTRDF와 세 성과지표의 연관은 서로 다르게 나타났다. 3년의 누적 시차 안에서 LOSS에서는 통계적으로 유의한 음의 연관이, LCTI에서는 한계적인 양의 연관이 확인된 반면, REC에서는 유의한 연관이 나타나지 않았다. 이는 CTRDF와 관련된 변화가 최종 에너지믹스보다 전력망 효율과 저탄소 기술 유입에서 먼저 관측될 가능성을 시사한다. 또한 초기소득에 따른 차이는 LOSS에서만 확인되었으므로, 이러한 이질성을 다른 성과지표로 일반화하는 데에는 주의가 필요하다. 동시에 LOSS에서 관측된 이질성 패턴은 CTRDF의 한계효과가 재원 총량보다도 수원국의 초기소득 수준에 따라 차이가 나타날 수 있음을 보여주며, 이는 원조 배분의 목표화(targeting) 논의에 직접 연결되는 정책적 함의를 갖는다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 기후기술 관련 개발재원(CTRDF)과 개발도상국의 에너지 전환 성과 간의 조건부 연관을, 117개 수원국의 2003-2022년 패널자료를 토대로 실증 분석하였다. OECD DAC CRS의 활동단위 자료에 기술 필터(강희종·임덕순, 2019)와 Rio Marker 기반 기후 필터를 교차 적용해 CTRDF를 조작화하고, 이원고정효과 분산시차 모형에 Driscoll-Kraay 표준오차·리드-

플라시보 검정·Mundlak CRE 강건성 점검을 결합한 추정 사양을 채택하였다. 분석의 핵심 결과는 세 성과지표에 걸쳐 드러난 비대칭적 반응이다. 전력 송배전 손실(LOSS)에서 3기 누적효과는 −0.0049($p=0.007$)로 1% 수준에서 유의했고, 저탄소 기술제품 수입(LCTI)에서는 +0.0003($p=0.068$)의 한계적 양효과가 관측된 반면, 재생에너지 소비 비중(REC)에서는 통계적으로 유의한 연관이 포착되지 않았다($p=0.695$). 이질성 분석에서는 초기 소득 하위집단의 LOSS 추가 누적계수가 −0.0098($p=0.028$)로 유의했으며, CTRDF와 LOSS 간의 음의 연관은 상위집단에서는 확인되지 않고 하위집단(누적계수 약 −0.010)에 집중되는 것으로 나타났다.

이 결과는 기후기술 관련 개발재원과 결부된 변화가 최종 에너지믹스 전환보다 전력 인프라 효율 개선과 체화된 기술 확산이라는 중간 성과 경로에서 먼저 관측될 수 있음을 시사한다. 기후재원이 최종 지표에 도달하기까지는 흡수역량 축적·계통 통합·제도 정비라는 다단계 보완 조건이 누적되어야 하므로, REC의 비유의 결과는 반응이 느린 결과변수라는 시간적 특성뿐 아니라, 수원국별 정책역량, 화석연료 보조금, 초기 에너지원 구성 및 정치·제도적 여건의 차이가 함께 작용한 결과로 해석할 수 있다. LOSS에서 관측된 이질성 패턴은 흡수역량 가설보다 초기병목 가설에 상대적으로 더 부합하는 것으로 해석할 수 있으며, 신흥·개도국의 전력망 흡수능력 정체가 청정전환의 핵심 병목이라는 최근 진단과도 부합한다(IEA, 2024; CPI, 2025).

본 연구의 결과는 세 가지 정책적 시사점을 갖는다. 첫째, 그린개발협력의 성과관리는 재생에너지 설비 보급량과 같은 최종지표에만 의존하기보다 전력망 효율, 운영인력 역량, 기술학습 기반과 같은 중간 성과를 함께 반영할 필요가 있다. CTRDF의 효과가 REC보다 LOSS에서 먼저 확인되었다는 점은 에너지 전환의 초기 성과가 최종 에너지믹스 변화보다 전력 인프라 개선에서 먼저 나타날 수 있음을 시사한다. 둘째, 기후재원의 효과 평가는 ODA에 한정되지 않는 포괄적 개발재원 관점에서 이루어질 필요가 있다. 에너지 인프라는 초기 투자비가 크고 회수 기간이 긴 분야이므로, OOF, 유상원조, 기술협력, 동원 민간재원 등이 서로 연계되어 작동할 가능성이 크다. 따라서 한국의 기후·에너지 협력도 EDCF, KOICA, GCF 공여를 개별 사업이 아니라 포트폴리오 수준에서 평가할 필요가 있다. 셋째, 수원국의 초기 조건에 따라 지원 분야와 성과지표를 차등화할 필요가 있다. 초기소득이 낮고 송배전 손실이 큰 국가에는 전력망 개보수와 운영·유지보수 역량 형성을 우선하고 송배전 손실률 등 중간지표로 성과를 평가하되, 기초 전력망이 안정된 국가에는 계통통합과 전력시장·제도 정비에 중점을 두고 재생에너지 비중과 저탄소 기술 도입을 중장기 성과로 관리하는 접근이 적합하다. 다만 본 연구의 소득 구분은 표본 내 상대적 분류이므로, 실제 사업 설계에는 전력망과 제도역량에 대한 국가별 진단이 병행되어야 한다.

본 연구는 몇 가지 한계를 지닌다. 첫째, CTRDF는 CRS에 독립적으로 존재하는 항목이 아니라 활동단위 자료에 기후 관련성과 기술 관련성을 교차 적용해 구성한 변수이다. 따라서 Rio Marker의 자체 평가 방식, 공여기관별 적용 기준의 차이, 목적코드 분류의 한계에서 비롯되는 측정오차를 완전히 배제하기 어렵다. 또한 약정금액 기준 자료를 활용하였기 때문에 실제 지출 시점, 집행률, 사업 품질의 차이를 충분히 반영하지 못한다. 둘째, 이원고정효과, 국가별 선형추세, 시차 구조, 리드-플라시보 검정 등을 적용했음에도 관측되지 않은 이질성이 남아 있을 가능성이 있다. 특히 Mundlak-augmented RE 사양에서 LOSS 계수의 부호는 유지되지만 크기와 유의성이 약화된다는 점은 효과크기를 보수적으로 해석할 필요가 있음을 보여준다. 아울러 제도품질, 거버넌스, 전력시장 규제, 계통운영 역량과 같은 매개 요인을 직접 통제하지 못한 점도 한계로 남는다.

후속 연구에서는 프로젝트 수준의 사업 속성, 공여국-수원국 간 재원 흐름, 위성 기반 전력망 자료, 기업 단위 수입 자료 등을 결합해 CTRDF의 작동 경로를 보다 정밀하게 식별할 필요가 있다. 이와 함께 공여국이나 다자기구의 공급 측 재원 변동, 사업 승인·집행 시점의 준실험적 변이는 본 연구가 확인한 조건부 연관을 인과적 수준에서 재검증할 수 있는 유력한 식별 원천이 될 것이다. 또한 파리협정 이후의 재원 구조 변화와 K-GX 전략 등 최근 정책 변화를 반영하여 CTRDF의 효과가 시기별로 어떻게 달라지는지도 검토할 필요가 있다.

● 이 논문에서 저자는 일부 문장 다듬기 및 영문번역을 위해서만 Claude opus를 2026.6-7 사용하였습니다. AI가 생성한 모든 내용은 저자들이 검토·수정·검증하였고, 최종 내용에 대해 전적인 책임을 집니다.

주1. 일부 선행연구는 비율 변수에 로짓 변환을 적용한다. 그러나 본 연구는 해석의 투명성과 계수 비교 가능성을 우선시하여 수준 비율을 그대로 사용한다. 표본 내 분포를 확인한 결과 LOSS와 LCTI는 상한 인근 관측치가 거의 존재하지 않았으며, REC의 경우 상한에 가까운 관측치가 일부 존재하지만, 강건성 점검에서 주요 결과에 미치는 영향은 제한적이었다.

주2. 국가별 선형추세의 추가는 식별의 보수성을 끌어올리지만, 동시에 동태적 효과의 일부를 추세에 흡수시킬 잠재적 비용도 동반한다. 본 연구의 강건성 점검에서 국가별 선형추세의 포함 여부와 무관하게 LOSS 계수의 부호와 유의성이 유지됨을 확인하였다(Ⅳ장 참조).

주3. CRE 누적 사양은 3기 누적 처리변수 $CTRDF_it^{CUM} \equiv \Sigma_{k=1}^{3} CTRDF_{i,t-k}$를 구성한 뒤, 각 시변 설명변수의 국가별 시계열 평균(within-country means)을 회귀변수로 동반 투입한다. Mundlak-Chamberlain 장치하에서 CRE 추정량 β^{CRE}는 고정효과 추정치와 점근적으로 동치이면서도 시간불변 특성의 부분 식별을 허용하는 검증 도구로 활용된다(Wooldridge, 2010). 분산성분은 Swamy-Arora 방식으로 추정하였다. 주 추정치와 β^{CRE}가 부호·크기에서 일관되게 나타날 경우, TWFE 추정치가 관측되지 않는 시간불변 이질성에 의해 심각하게 오염되지는 않았다는 간접 증거로 판단할 수 있다.

인용문헌
References

1. 강희종·임덕순, 2019. "과학기술 ODA 통계 산출 방법에 관한 연구", 「과학기술정책」, 2(2): 203-228.
   Kang, H.J. and Yim, D.S., 2019. "A Study on the Method of Producing Science and Technology ODA Statistics", *Science and Technology Policy*, 2(2): 203-228.
2. Arndt, C., Jones, S., and Tarp, F., 2010. "Aid, Growth, and Development: Have We Come Full Circle?", *Journal of Globalization and Development*, 1(2): 1-27.
3. Arndt, C., Jones, S., and Tarp, F., 2015. "Assessing Foreign Aid's Long-Run Contribution to Growth and Development", *World Development*, 69: 6-18.
4. Arthur, W.B., 1989. "Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events", *The Economic Journal*, 99(394): 116-131.
5. Bell, M. and Pavitt, K., 1992. "Accumulating Technological Capability in Developing Countries", *The World Bank Economic Review*, 6(suppl_1): 257-281.
6. Bell, M. and Pavitt, K., 1993. "Technological Accumulation and Industrial Growth: Contrasts between Developed and Developing Countries", *Industrial and Corporate Change*, 2(2): 157-210.
7. Bellemare, M.F. and Wichman, C.J., 2020. "Elasticities and the Inverse Hyperbolic Sine Transformation", *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 82(1): 50-61.
8. Burbidge, J.B., Magee, L., and Robb, A.L., 1988. "Alternative Transformations to Handle Extreme Values of the Dependent Variable", *Journal of the American Statistical Association*, 83(401): 123-127.
9. Burnside, C. and Dollar, D., 2000. "Aid, Policies, and Growth", *American Economic Review*, 90(4): 847-868.
10. Capucine, C., 2022. "Impact of Official Development Assistance Projects for Renewable Energy on Electrification in Sub-Saharan Africa", *World Development*, 152: 1-23.
11. Chamberlain, G., 1982. "Multivariate Regression Models for Panel Data", *Journal of Econometrics*, 18(1): 5-46.
12. Choi, H. and Cho, M., 2023. "Effects of Science, Technology, and Innovation Official Development Assistance on Innovative Capacity in Developing Countries", *Sustainability*, 15(4): 2906.
13. Climate Policy Initiative, 2025. *Global Landscape of Climate Finance 2025*, London.
14. Coady, D., Parry, I., Sears, L., and Shang, B., 2017. "How Large Are Global Fossil Fuel Subsidies?", *World Development*, 91: 11-27.
15. Coe, D.T. and Helpman, E., 1995. "International R&D Spillovers", *European Economic Review*, 39(5): 859-887.
16. Coe, D.T., Helpman, E., and Hoffmaister, A.W., 1997. "North-South R&D Spillovers", *The Economic Journal*, 107(440): 134-149.
17. Coe, D.T., Helpman, E., and Hoffmaister, A.W., 2009. "International R&D Spillovers and Institutions", *European Economic Review*, 53(7): 723-741.
18. Cohen, W.M. and Levinthal, D.A., 1990. "Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation", *Administrative Science Quarterly*, 35(1): 128-152.
19. David, P.A., 1985. "Clio and the Economics of QWERTY", *The American Economic Review*, 75(2): 332-337.
20. Dechezleprêtre, A., Glachant, M., HaščiČ, I., Johnstone, N., and Ménière, Y., 2011. "Invention and Transfer of Climate Change-Mitigation Technologies: A Global Analysis", *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(1): 109-130.
21. Dornan, M. and Shah, K.U., 2016. "Energy Policy, Aid, and the Development of Renewable Energy Resources in Small Island Developing States", *Energy Policy*, 98: 759-767.
22. Driscoll, J.C. and Kraay, A.C., 1998. "Consistent Covariance Matrix Estimation with Spatially Dependent Panel Data", *The Review of Economics and Statistics*, 80(4): 549-560.
23. Eaton, J. and Kortum, S., 2001. "Trade in Capital Goods", *European Economic Review*, 45(7): 1195-1235.
24. Figueiredo, P.N., 2002. "Does Technological Learning Pay Off? Inter-Firm Differences in Technological Capability-Accumulation Paths and Operational P1erformance Improvement", *Research Policy*, 31(1): 73-94.
25. Geels, F.W., 2002. "Technological Transitions as Evolutionary Reconfiguration Processes: A Multi-Level Perspective and a Case Study", *Research Policy*, 31(8-9): 1257-1274.
26. Geels, F.W., 2011. "The Multi-Level Perspective on Sustainability Transitions: Responses to Seven Criticisms", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1): 24-40.
27. Geels, F.W. and Schot, J., 2007. "Typology of Sociotechnical Transition Pathways", *Research Policy*, 36(3): 399-417.
28. Goldemberg, J., 1998. "Leapfrog Energy Technologies", *Energy Policy*, 26(10): 729-741.
29. Halimanjaya, A., 2015. "Climate Mitigation Finance across Developing Countries: What Are the Major Determinants?", *Climate Policy*, 15(2): 223-252.
30. Haščič, I., Cárdenas Rodríguez, M., Jachnik, R., Silva, J., and Johnstone, N., 2015. *Public Interventions and Private Climate Finance Flows: Empirical Evidence from Renewable Energy Financing*, OECD Environment Working Papers, No. 80, Paris: OECD Publishing.
31. Henry, M., Kneller, R., and Milner, C., 2009. "Trade, Technology Transfer and National Efficiency in Developing Countries", *European Economic Review*, 53(2): 237-254.
32. Hoechle, D., 2007. "Robust Standard Errors for Panel Regressions with Cross-Sectional Dependence", *The Stata Journal*, 7(3): 281-312.
33. Im, K.S., Pesaran, M.H., and Shin, Y., 2003. "Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels", *Journal of Econometrics*, 115(1): 53-74.

34. International Energy Agency (IEC), 2023. *World Energy Outlook 2023*, Paris.

35. International Energy Agency (IEC), 2024. *World Energy Investment 2024*, Paris.

36. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2000. *Methodological and Technological Issues in Technology Transfer: A Special Report of IPCC Working Group III*, Cambridge: Cambridge University Press.

37. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*, Cambridge: Cambridge University Press.

38. Jain, S. and Bardhan, R., 2023. "Energy Aid Volatility across Developing Countries: A Disaggregated Sectoral Analysis", *International Economics and Economic Policy*, 20(3): 457–483.

39. Javorcik, B.S., 2004. "Does Foreign Direct Investment Increase the Productivity of Domestic Firms? In Search of Spillovers through Backward Linkages", *The American Economic Review*, 94(3): 605-627.

40. Keller, W., 2004. "International Technology Diffusion", *Journal of Economic Literature*, 42(3): 752-782.

41. Kharas, H., 2007. *Trends and Issues in Development Aid*, Wolfensohn Center for Development Working Paper, No. 1, Washington, DC: Brookings Institution.

42. Lall, S., 1992. "Technological Capabilities and Industrialization", *World Development*, 20(2): 165-186.

43. Lall, S., 2000. "The Technological Structure and Performance of Developing Country Manufactured Exports, 1985-98", *Oxford Development Studies*, 28(3): 337-369.

44. Li, N., Shi, B., Wu, L., Kang, R., and Gao, Q., 2022. "Climate-Related Development Finance, Energy Structure Transformation and Carbon Emissions Reduction: An Analysis From the Perspective of Developing Countries", *Frontiers in Environmental Science*, 9: 778254.

45. Mundlak, Y., 1978. "On the Pooling of Time Series and Cross Section Data", *Econometrica*, 46(1): 69-85.

46. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2024. *Climate Finance Provided and Mobilised by Developed Countries in 2013-2022*, Paris: OECD Publishing.

47. Pesaran, M.H., 2007. "A Simple Panel Unit Root Test in the Presence of Cross-Section Dependence", *Journal of Applied Econometrics*, 22(2): 265-312.

48. Pesaran, M.H., 2021. "General Diagnostic Tests for Cross-Sectional Dependence in Panels", *Empirical Economics*, 60(1): 13-50.

49. Pfeiffer, B. and Mulder, P., 2013. "Explaining the Diffusion of Renewable Energy Technology in Developing Countries", *Energy Economics*, 40: 285–296.

50. Popp, D., 2011. "International Technology Transfer, Climate Change, and the Clean Development Mechanism", *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(1): 131-152.

51. Rosenberg, N., 1982. *Inside the Black Box: Technology and Economics,* Cambridge: Cambridge University Press.

52. Sachs, J.D., McArthur, J.W., Schmidt-Traub, G., Kruk, M., Bahadur, C., Faye, M., and McCord, G., 2004. "Ending Africa's Poverty Trap", *Brookings Papers on Economic Activity*, 35(1): 117-240.

53. Saggi, K., 2002. "Trade, Foreign Direct Investment, and International Technology Transfer: A Survey", *World Bank Research Observer*, 17(2): 191-235.

54. Smil, V., 2010. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Santa Barbara, CA: Praeger.

55. Sovacool, B.K., 2016. "How Long Will It Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions", *Energy Research & Social Science*, 13: 202-215.

56. Stern, N., 2022. "A Time for Action on Climate Change and a Time for Change in Economics", *The Economic Journal*, 132(644): 1259-1289.

57. Tigabu, A.D., Berkhout, F., and van Beukering, P., 2015. "The Diffusion of a Renewable Energy Technology and Innovation System Functioning: Comparing Bio-Digestion in Kenya and Rwanda", *Technological Forecasting and Social Change*, 90: 331-345.

58. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2024. *World Investment Report 2024: Investment Facilitation and Digital Government*, Geneva.

59. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2001. *Development and Transfer of Technologies (Decision 4/CP.7)*, Marrakesh.

60. Unruh, G.C., 2000. "Understanding Carbon Lock-In", *Energy Policy*, 28(12): 817-830.

61. Unruh, G.C., 2002. "Escaping Carbon Lock-In", *Energy Policy*, 30(4): 317-325.

62. Wang, X., Guo, J., and Dong, K., 2021. "The Positive Impact of Official Development Assistance (ODA) on Renewable Energy Development Africa", *Sustainable Production and Consumption*, 28: 532-542.

63. Watson, J. and Sauter, R., 2011. "Sustainable Innovation through Leapfrogging: A Review of the Evidence", *International Journal of Technology and Globalisation*, 5(3-4): 170-189.

64. Weikmans, R. and Roberts, J.T., 2019. "The International Climate Finance Accounting Muddle: Is There Hope on the Horizon?", *Climate and Development*, 11(2): 97-111.

65. Wooldridge, J.M., 2010. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data, 2nd ed.*, Cambridge, MA: MIT Press.

66. World Bank, 2024. *World Development Report 2024: The Middle-Income Trap*, Washington, DC: World Bank.

Date Received	2026-06-01
Date Reviewed	2026-07-05
Date Accepted	2026-07-05
Date Revised	2026-07-29
Final Received	2026-07-29