

한국의 건물부문 온실가스 감축을 위한 기술혁신 전개 양상 분석: 국가 간 비교를 중심으로

최고봉* · 하수진** · 김도형*** · 박철호****†

*국가녹색기술연구소 제도혁신센터 선임연구원, **국가녹색기술연구소 국가기후기술협력센터 연구원,

국가녹색기술연구소 제도혁신센터 박사후연구원, *국가녹색기술연구소 정책연구본부장

Innovation patterns in climate change mitigation technologies in Korea's building sector: A cross-country comparison

Choi, Gobong* · Ha, Su-Jin** · Kim, Do-Hyung*** and Park, Chul-Ho****†

*Senior Researcher, Center for Institutional Innovation, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

**Researcher, National Climate Technology Cooperation Center, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

***Postdoctoral Fellow, Center for Institutional Innovation, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

****Director General, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

ABSTRACT

The building sector is one of South Korea's major sources of greenhouse gas emissions. This study analyzes systematic growth patterns and characteristics of technological innovation in greenhouse gas reduction technologies in this sector to derive policy implications for promoting innovation. Patent time-series data from 1990 to 2022 were constructed for climate change mitigation technologies in the building sector and its four constituent technology groups. A generalized logistic function was used to examine the dynamics of technological innovation. In addition, patent data from Japan, Canada, the United States, France, and Germany were analyzed to compare technological innovation characteristics with those of South Korea. The results indicated that, although Korea's technologies generally exhibit high potential saturation levels of innovation, the activation of innovation has been delayed, and its growth rate remains relatively moderate compared with advanced countries. As of 2025, all analyzed countries appeared to be approaching their respective saturation points of innovation. To further reduce greenhouse gas emissions in the building sector, future policy measures should strengthen technological innovation systems to induce new innovation cycles centered on emerging technologies. The findings of this study provide valuable foundational evidence for developing future technology policies in the building sector.

Key words : Building Sector, Technological Innovation, Patent Analysis, Generalised Logistic Function, Climate Change Mitigation

1. 서론

한국의 주요 온실가스 배출 분야 중 하나인 건물부문은 기후위기 대응을 위해 적극적인 온실가스 감축 노력이 요구되고 있다. 한국의 건물부문 온실가스 배출량은 2024년

직접배출량을 기준으로 약 43.6백만 톤으로 잠정 추산되어(Ministry of Environment, 2025) 국가 총배출량의 약 6.3%를 차지한다. 하지만, 건물부문이 기여하는 간접배출량을 포함할 경우 온실가스 배출량은 150.2백만 톤까지 증가하며, 국가 총배출량의 22%에 달한다(Choi, 2025).

†Corresponding author : park5085@nigt.re.kr (14th Floor, 60, Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07328, Korea. Tel. +82-2-3393-3928)

ORCID 최고봉 0009-0002-3609-2632
하수진 0000-0002-7361-5810

김도형 0000-0002-0418-8851
박철호 0000-0003-1098-2901

이는 에너지 최종 소비처인 건물의 특성에 기인한 것으로, 건물은 전환부문에서 생산된 전기 및 열을 소비하며 온실가스 배출에 상당한 영향을 미치고 있음을 단적으로 보여준다. 따라서 건물부문은 직접배출량뿐만 아니라 간접배출량을 포함한 온실가스 배출 총량의 관점에서의 감축 노력이 요구되며, 이를 통해 국가 총배출량을 실질적으로 감축할 수 있다.

이에 따라 한국은 건물부문의 온실가스 감축 목표를 설정하고, 국가 총배출량의 관점에서 이행 방안을 마련하는 등 정책적인 노력을 추진해왔다. 예컨대 2021년에 수립된 「2030 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC) 상향안」에는 건물부문의 목표가 2018년 직접배출량 52.1백만 톤에서 2030년까지 35.0백만 톤으로 감축하는 것으로 설정되어 있으며¹⁾, 그 이행 방안으로 에너지 효율 향상, 고효율 기기 보급, 수요관리, 스마트 에너지 관리, 재생에너지 보급 확대 등을 제시하고 있다(Joint Ministries of Korea, 2021). 제시된 이행 수단에서 알 수 있듯이, 건물부문에 대한 감축은 건축물의 에너지 소비를 줄이고 재생에너지를 통해 에너지를 자체적으로 생산·공급하는 것을 주요 골자로 하고 있으며, 이를 통해 직접배출량뿐만 아니라 전환부문의 온실가스 배출 압박도 경감하고자 하는 의도가 반영된 것으로 이해된다. 같은 해에 마련된 「2050 탄소중립 시나리오」는 탄소중립이 실현된 2050년의 건물부문 배출량을 6.2백만 톤으로 전망하며, 유사한 이행 수단을 제시하고 있다(2050 Carbon Neutrality Commission, 2021).

상기와 같은 목표를 달성하기 위해서는 건물부문의 온실가스 감축 기술의 지속적인 혁신이 무엇보다 중요하다. 앞서 살펴본 이행 수단은 소위 제로에너지건물(Zero Energy Building, ZEB)²⁾ 기술의 활용을 전제로 하고 있으나, 현재 상용화된 기술만으로는 감축 목표를 달성하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 효과적인 목표 달성을 위해서는 ZEB 기술로 대표되는 건물부문 온실가스 감축 기술의 혁신이 뒷받침되어야 하며, 국가 차원에서 이를 촉진할 수 있는 정책수단의 마련도 요구된다.

한국 실정에 부합하는 건물부문의 온실가스 감축 기술 혁신 정책을 수립하기 위해서는, 그동안 국내에서 전개되

어 온 혁신의 성장 과정을 분석하고 어떠한 특성을 보이는지에 대한 이해가 선행될 필요가 있다. 한국은 탄소중립 100대 핵심기술에 제로에너지건물 기술 4개³⁾를 포함하고 기술혁신 전략로드맵을 수립하는 등 기술개발의 방향성을 정립한 바 있으며(Ministry of Science and ICT, 2023), 2024년 말에는 「제3차 녹색건축물 기본계획」을 수립하여 기술개발 실천과제를 마련한 바 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024). 그러나 이러한 노력에도 불구하고, 건물부문 온실가스 감축 기술혁신이 어떠한 양상으로 전개되었는지에 대한 체계적인 연구는 찾아보기 어렵다. 특히 시간에 따른 특허 출원 추세를 통해 기술혁신 성장 과정을 정량적으로 분석하고 국가 간 비교를 수행하는 체계적인 연구는 전무하다. 이러한 분석은 과거로부터 혁신이 전개되어 온 양상에 대한 정보를 제공해줄 수 있으며, 그 과정에서 한국의 혁신체계가 가지고 있는 구조적 특성과 제약을 식별할 수 있게 해준다. 또한, 해당 결과로부터 국내 기술혁신 체계의 강점과 개선 과제를 파악할 수 있으며, 더욱 효과적인 기술혁신 정책을 설계할 수 있는 근거를 마련해준다.

이에 따라 본 연구는 특허 시계열 자료를 활용하여 한국에서 건물부문 온실가스 감축 기술에 대한 혁신이 어떠한 경로를 거쳐 성장해 왔는지 분석하였다. 본 연구는 기술혁신 등 특정 시스템의 성장과 포화를 설명할 수 있는 ‘S자형 곡선(S-shaped Curve)’ 형태를 가지는 일반화된 로지스틱 함수(Generalised Logistic Function)를 모형으로 활용하고, 함수 형태를 결정하는 모수를 추정하였다. 또한, 한국의 기술혁신이 지니는 특성을 판단하기 위한 준거를 마련하기 위해, 일본, 캐나다, 미국, 프랑스, 독일 등 5개국을 비교 대상으로 동일한 함수를 추정하였다. 이 경우는 특히 모수의 추정치를 비교하여 한국의 기술혁신이 가지는 상대적인 특성을 파악하는데 초점을 맞추었다. 나아가, 한국의 건물부문 온실가스 감축 기술혁신이 성장해 온 특성을 정책·제도적 맥락에서 해석함으로써, 향후 혁신 정책 수립을 위한 시사점을 제공하고자 하였다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 건물부문 온실가스 감축 기술에 대해 정책적 연구를 수행한 선행연구를 간략히 살펴봄으로써 본 연구의 차별성과 의

1) 2035 NDC에서는 2035년까지 건물부문의 온실가스 배출량을 최대 27.8백만 톤에서 최소 25.4백만 톤까지 감축하는 것이 목표로 고려되고 있다(Choi, 2025).

2) 현행 「녹색건축물 조성 지원법」 제2조 제4호에 따르면, 건축물에 필요한 에너지 부하를 최소화하고 신에너지 및 재생에너지를 활용하여 에너지소요량을 최소화하는 녹색건축물로 정의된다(Republic of Korea, 2024).

3) 고성능·다기능 건물 외피 기술, 건물 설비 전기화 및 고효율화 기술, 건물 신재생에너지 및 에너지 융합시스템 기술, 건물 에너지 관리·제어 및 데이터 활용 기술이 포함된다(Ministry of Science and ICT, 2023).

의를 검토했다. 제3장에서는 본 연구에서 활용한 일반화된 로지스틱 함수의 형태와 동 함수를 추정하기 위한 전략을 설명하였다. 제4장은 실증분석 결과로, 함수의 추정에서 활용한 특허 통계자료를 설명하고, 분석결과를 제시하였다. 마지막으로 5장에서는 연구의 결과를 요약하고 정책적 시사점을 제시하였다.

2. 선행연구

국가 온실가스 감축목표 달성에 있어 건물부문의 중요성에도 불구하고, 건물부문의 온실가스 감축 기술에 대한 정책적 관점에서의 연구는 제한적으로 수행되었다. 국내에서 수행된 연구는 논문 등 기술개발의 성과 자료를 활용하여 기술적인(Descriptive) 동향분석을 실시하거나 전문가 설문 조사에 기반한 평가가 주를 이루었다. 예컨대 Kim et al. (2016)은 건물부문 온실가스 감축 기술의 개발 동향을 파악하기 위해 특허, 논문, 연구개발 사업의 추이를 분석하였으며, 설문을 통해 국내 연구개발 인프라에 대한 인식을 조사하였다. Kim et al. (2016)의 연구에서 나아가 Son et al. (2023)은 탄소중립 기술과 관련한 국내 건물부문 혁신생태계 참가자에 대해 설문조사를 진행하여 혁신생태계 활성화를 저해하는 요인을 도출하였으며, 이를 기반으로 혁신생태계를 활성화하기 위한 방안을 제안하였다. Park et al. (2024)은 국가과학기술지식정보서비스 플랫폼 등을 활용하여 한국에서 추진되어 온 건물부문 온실가스 감축 기술개발 과제에 추이를 분석하였으며, 전문가 설문조사를 통해 핵심기술별 기술개발의 필요성과 시급성을 진단하였다.

국외 연구로는 국내 연구와 유사하게 설문조사를 통해 녹색건물 기술 도입을 위한 전략을 식별하기 위한 연구(Chan et al., 2017; Darko and Chan, 2018)가 수행된 바 있으며, Shen et al. (2016)과 같이 기술개발의 투입 또는 성과가 아닌 건물에너지 효율 개선을 위한 정책수단의 도입 동향을 국제적으로 비교한 연구도 수행되었다. 한편, 국외에서는 Noailly (2012)와 같이 특허 통계와 계량경제학적 방법론을 활용하여 건축물의 열관류율 기준 등 환경정책이 기술 혁신에 미치는 영향을 규명하고자 하거나, Yang et al. (2021)과 같이 시뮬레이션 분석을 통해 환경정책이 친환경 건축 기술을 도입하는 건설기업의 의사결정에 미치는 영향을 분석하는 등 시도가 있었다. S자형 곡선에 기반한 기술성장에 관한 연구는 주로 수소에너지나 연료전지차 등 비교적 새롭게 등장한 기술에 대해 초기 단계

의 성장구조를 파악하고 장기적인 수준을 예측하고자 하는 연구들이 수행되었으며(Chen et al., 2010; Purba and Nooraeni, 2019; Sinigaglia et al., 2022), 건물부문의 온실가스 감축 기술에 관한 연구는 찾아보기 어려웠다.

이상의 선행연구를 종합해보면, 건물부문 온실가스 감축 기술에 관한 정책연구로서 기술혁신의 전개 양상에 관한 연구는 제한적으로 수행된 것으로 파악된다. 이는 Markard (2020)가 지적한 바와 같이, 기술정책학의 주요 연구 영역인 기술혁신시스템에 대한 분석이 주로 기술개발의 초기 단계에 집중되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 넓은 범위에서의 건물 기술은 인류가 문명사회를 이룩한 후부터 지속적으로 발전해 온 기술 분야로서, 기술혁신의 체계가 구축되어가고 있는 개발 초기 기술과는 달리 비교적 학술적 주목이 부족할 수 있다. 그러나, 서론에서 밝힌 바와 같이 건물부문 및 국가 온실가스를 감축하기 위해 동 분야의 기술혁신은 무엇보다 중요하므로 효과적인 혁신정책의 수립도 필요한 시점이다. 이에 따라 본 연구는 상기와 같은 연구 공백을 보완하여, 건물부문 온실가스 감축 기술에 대해 혁신의 성장 경로를 모형화하여 분석하고 정책적 함의를 도출하고자 한다.

3. 연구방법론

3.1. 일반화된 로지스틱 함수

본 연구는 건물부문 온실가스 감축기술의 혁신 전개 양상을 분석하기 위하여 모수(Parameter)의 제약이 적은 S자형 곡선 중 하나인 일반화된 로지스틱 함수(Generalised Logistic Function)를 활용했다. 제안자의 이름에 따라 리처드 곡선(Richards Curve)이라고도 불리는 일반화된 로지스틱 함수는 Richards (1959)의 연구에서 처음으로 제안되었으며, 유연한 함수 형태를 갖는다는 강점이 있다. 이러한 강점으로 인해 일반화된 로지스틱 함수는 제2장에서 설명한 기술혁신에 관한 연구뿐만 아니라, 감염병(Mingione et al., 2022, 2024)이나 조류, 어류, 갑각류 등 생물의 성장(Gregorczyk, 1998; Hernandez-Llamas and Ratkowsky, 2004; Zach et al., 1984) 등의 분석에도 널리 활용되어 왔다.

전형적인 형태의 일반화된 로지스틱 곡선은 식 (1a) 및 (1b)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y(t) = A + (K - A)(1 + e^{-B(t - M)})^{-1/\nu} \quad (1a)$$

$$Y(t) = K(1 + e^{-B(t-M)})^{-1/\nu} \tag{1b}$$

본 연구의 기술혁신 분석 관점에서 식 (1a)의 각 변수 및 모수가 의미하는 바는 다음과 같다. $Y(t)$ 는 시간의 함수로 설명할 수 있는 종속변수로 본 연구에서는 누적 특허 수를 의미한다. A 와 K 는 각각 시간 t 가 음의 무한대와 양의 무한대로 갈 때의 점근값(Asymptotic Value)을 의미한다. 특허 출원이나 논문 게재, 연구개발 사업의 수행 등 기술혁신과 관련된 활동이 한 국가의 부존량으로 주어지는 것이 아닌 인간의 작위로 인해 생성된다는 점을 고려할 때, A 는 0에 가까운 값을 가지는 것으로 상정할 수 있으며(식 (1b) 참고), K 는 한 국가에서 누적될 수 있는 기술혁신의 포화점으로 해석할 수 있다. B 는 소위 성장률(Growth Rate)을 결정하는 모수로(Andersen, 1999; Marinakis, 2012; Park et al., 2004) S자형 곡선의 변곡점에서 기울기를 조정하는데 관여하며, 본 연구에서는 혁신의 증가 속도 또는 혁신이 집중되는 정도를 의미한다. M 은 일반화된 로지스틱 곡선을 시간 축에 따라 평행이동시키는 역할을 하며, 변곡점의 위치를 결정하는 데 관여한다. 양의 값을 가지는 ν 는 변곡점을 전후로 한 혁신의 증가와 감소의 대칭성을 조절하는 인자이며, ν 가 1일 경우 대칭적인 모습을 보이지만 ν 가 작을수록 초기에는 혁신이 지연되다가 변곡점 직전에 혁신이 급격하게 증가하는 양상을 보이며 ν 가 클수록 변곡점 전에 장기적으로 완만한 증가세를 보인다.

한편, A 가 0인 식 (1b)를 시간 t 에 대해 미분하여 1차 도함수를 구할 경우, 시간의 흐름에 따른 신규 특허 수 $y(t)$ 의 변화를 모델링할 수 있으며(식 (2) 참고), 신규 특허 수의 변화는 일반화된 로지스틱 함수의 변곡점 시점까지 특허 수가 증가했다가 이후에 감소하는 종 모양(Bell-shaped)의 형태로 나타난다.

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{dY(t)}{dt} \\ &= \frac{K}{\nu} e^{-B(t-M)} (1 + e^{-B(t-M)})^{-1-1/\nu} \end{aligned} \tag{2}$$

일반화된 로지스틱 함수의 변곡점은 기울기가 증가하다가 감소하는 지점이자 종 모양의 1차 도함수에서 극댓

값에 해당하는 지점으로, 식 (1)의 시간에 대한 2차 도함수가 0이 되는 지점으로 구할 수 있다⁴⁾. 식 (3)과 같이 일반화된 로지스틱 함수의 2차 도함수가 주어졌을 때 변곡점에 해당하는 시점 T 는 $M + (1/B)\ln(1/\nu)$ 이며, 일반화된 로지스틱 함수가 대칭적이라면($\nu = 1$) 변곡점의 시점은 시간 이동값(Time Shift) M 과 일치한다. 만약 일반화된 로지스틱 함수가 대칭적이지 않을 경우 이동값 M 전후로 일부 조정된 시점에 변곡점이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} &= \frac{-BK}{\nu} \frac{e^{-B(t-M)}}{(1 + e^{-B(t-M)})^{1+1/\nu}} \left(1 - \frac{\nu+1}{\nu} \frac{e^{-B(t-M)}}{1 + e^{-B(t-M)}}\right) \end{aligned} \tag{3}$$

3.2. 추정 전략

본 연구는 건물부문 온실가스 감축기술의 특허 수를 종속변수로 활용하며, 국가별 일반화된 로지스틱 함수의 집합으로 구성된 시스템을 비선형 최소자승법(Non-linear Least Squares)으로 추정했다. 앞서 설명하였듯이 일반화된 로지스틱 함수의 각 모수는 혁신의 구조적 포화점(K), 증가 속도(B), 비대칭성(ν) 등을 의미하므로, 국가별로 해당 모수가 추정될 경우 다른 나라와 비교했을 때 혁신이 전개되는 모습이 상대적으로 어떠한 특성을 보이는지 파악할 수 있다. 단, 국가별로 고유의 구조적 특성을 가진다고 하더라도, 글로벌 경제위기나 글로벌 아젠다로서의 기후변화 이슈 등 공통적인 충격이 가해질 수 있으며, 이에 따라 국가별 오차항 간에 상관관계가 존재할 수 있다. 따라서 본 연구는 국가 간 모수 비교의 통계적 타당성을 제고하기 위해 국가별 모형을 각각 추정하는 것이 아니라, 하나의 방정식 시스템으로서 추정하였다.

분석대상 기술은 건물부문 온실가스 감축기술이며, 해당 기술 전반에 대한 분석과 그 하위의 세부 기술군에 대한 분석을 포함했다. 기술 전반에 대한 추정은 해당 기술과 관련된 각 국가의 전체적인 혁신 양상을 분석할 수 있으나, 세부 기술군에 따라 그 모습에 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구는 건물부문 온실가스 감축기술 전체 및 세부 기술군에 대해 일반화된 로지스틱 함수를 추정했다.

4) 엄밀히 말하여 변곡점 근방 전후로 2차 도함수의 부호가 바뀌어야 하며, 일반화된 로지스틱 함수 등 통상적으로 특정 수준으로 포화(Saturation)되는 S자형 성장곡선은 변곡점 전에 아래로 볼록했다가 변곡점 후에 위로 볼록한 형태를 띠며 이 조건을 만족한다.

한편, Andersen (1999), Purba and Nooraeni (2019), Martínez-Ardila et al. (2022) 등 기술특허 자료에 기반하여 S자형 성장곡선을 추정한 연구들은 통상적으로 식 (1a)와 같이 종속변수로 누적 특허 수를 활용하여 성장곡선을 추정한 것으로 파악된다. 직접적으로 성장곡선을 추정했다는 점에서 직관적이며, 도함수에 비해 상대적으로 함수의 형태가 간단하다는 장점이 있다.

그러나 특허 자료의 관측 시작 시점이 제약될 경우, S자형 성장곡선의 직접적인 추정은 제한적일 수 있다. 예컨대, 취득할 수 있는 특허 자료의 최초 관측 시점이 t_0 이며, t_0 및 일정 초기 구간의 신규 특허 수가 0이거나 0에 가까운 국가 A가 있다고 하자. 이때, 국가 A에 대해서 t_0 시점에서의 누적 특허 수를 0이라고 상정하는 것은 비합리적이라고 보기 어렵다. 그러나 만약 t_0 시점에서 이미 다수의 신규 특허를 출원한 국가 B가 존재할 경우, 국가 B는 일반적인 기술성장 주기에 근거했을 때 t_0 이전 시점에서부터 혁신 활동이 존재하여 t_0 시점에서는 이미 큰 규모의 특허 스톡(stock)이 형성되었을 가능성이 높다. 이와 같은 상황에서 국가 B의 t_0 시점에서의 누적 특허 수를 단순히 t_0 시점의 관측치로 상정하여 추정할 경우, 과거부터 누적되어 온 혁신 활동과 그 영향을 충분히 반영하지 못할 수 있다. 즉, S자형 성장곡선을 직접적으로 추정하기 위해서는 혁신 활동이 수행되기 시작한 초기의 관측치를 포함하여 특허 자료를 구축하거나, 다른 선행연구 등을 참고하여 최초 관측 시점 또는 분석 시작 시점에서 이미 누적된 특허 수의 정보가 필요하다.

제4장에서 설명한 바와 같이, 본 연구에서 활용한 특허 자료는 OECD가 제공하고 있는 국가별 신규 특허 출원 수로, 일부 국가에 대해서는 초기 혁신 활동에 대한 정보를 포함하지 못하고 있으며 관련 선행연구에서 누적 특허에 대한 정보를 찾기 어렵다. OECD 통계 데이터베이스가 제공하고 있는 건물부문 온실가스 감축 기술의 특허는 1990년부터 그 자료가 제공되고 있는데, 미국, 독일, 일본 등 소위 기술력이 우수하다고 알려진 선진국의 경우 1990년(t_0)에 이미 많은 수의 특허를 출원한 것으로 나타난다. 따라서 해당 자료를 이용한 일반화된 로지스틱 함수의 직접적인 추정은 제한적인 상황이다.

이에 따라 본 연구는 S자형 성장곡선의 초기값 문제를 해결하기 위하여 연도별 특허 수 자료를 활용하여 식 (2)로 주어진 일반화된 로지스틱 함수의 1차 도함수를 추정했다. 일반화된 로지스틱 함수가 누적 특허 수를 설명하

는 함수이므로 해당 함수의 1차 도함수는 시점별 신규 특허 수라는 누적 특허 수의 차분 값을 설명할 수 있다. 또한, 식 (2)와 같이 1차 도함수에도 원함수의 모든 모수가 포함되어 있으므로, 기존 S자형 성장곡선의 형태를 결정하는 인자를 모두 추정할 수 있다. 따라서 본 연구는 식 (2)의 형태로 일반화된 로지스틱 함수의 모수를 추정한다.

한편, 식 (1b) 및 식 (2)에 포함된 모수는 총 4개로, 본 연구는 제한된 관측치 개수 하에서 추정치의 신뢰성을 제고하기 위해 평행이동 모수 M 을 고정한 후 3개의 모수 (K, B, ν)만 추정했다. 제4장에서 설명한 바와 같이 본 연구가 활용한 특허 자료는 1990년부터 2022년까지의 연간 자료로 관측치가 총 33개이다. 비선형 모형의 최소자승법 추정 시 요구되는 표본의 최소 크기에 관한 연구는 찾기 어려우나, 본 연구는 4개의 모수를 추정하는데 33개의 관측치는 충분하지 않다고 판단하였다. 따라서 본 연구는 상대적으로 그 값을 사전에 탐색하기 용이하다고 판단되는 모수 M 을 고정하여 실제 추정할 모수의 개수를 축소하였다.

본 연구는 평행이동 모수 M 을 다음과 같이 고정하였다. 제3장 1절에서 설명하였듯이 변곡점에 해당하는 시점 T 는 $M + (1/B)\ln(1/\nu)$ 으로 계산되며, 이를 모수 M 에 대해 정리하면 식 (4a)와 같다. 즉, 일반화된 로지스틱 함수에서 모수 M 은 T 를 중심으로 위치하며, T 가 T_0 에 가까울 것으로 예상될 때 T_0 를 중심으로 0보다 크거나 같은 값을 가지는 시간 변화량 Δ 를 조정하여 M 을 M_0 로 고정할 수 있다(식 (4b) 참고).

$$M = T - (1/B)\ln(1/\nu) \tag{4a}$$

$$M_0 = T_0 \pm \Delta \tag{4b}$$

이론적으로 T 는 1차 도함수에서 극댓값에 해당하는 시점인바 T_0 를 연간 특허 출원 수가 가장 많은 시점으로 근사할 수 있다고 할 때, M 을 고정하기 위해 필요한 정보는 적절한 시간 조정분($\pm\Delta$)이다. 단, 이에 대해서는 사전에 주어진 정보가 부족하기 때문에, 본 연구는 Δ 를 조정해가며 탐색적으로 식 (2)를 추정하여 최적의 M_0 를 선택하고자 하였다. 즉, 본 연구는 Δ 에 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0를 대입하여 총 9개의 M_0 후보를 설정하고 각각의 M_0 후보로 M 을 고정한 후 식 (2)를 추정하였으며, 9개의 추정 결과

중 가장 낮은 아카이케 정보 기준(Akaike Information Criterion, AIC)을 가지는 결과의 M_0 를 최적의 M_0 로 설정하였다.

4. 분석결과

4.1. 분석자료

본 연구는 OECD 데이터베이스가 제공하고 있는 환경 관련 특허 통계 중, 건물부문 온실가스 감축 기술(Climate Change Mitigation Technologies Related to Buildings)의 특허 통계 자료를 활용하였다. 해당 통계는 OECD 과학기술혁신 마이크로데이터 연구소(OECD Science, Technology and Innovation Micro-data Lab)의 자료를 바탕으로 OECD 환경국(Environment Directorate)이 개발한 알고리즘을 사용하여 구축되었으며, 실용신안(Utility Model)이나 소특허(Petty Patent)를 제외한 발명 특허(Patent of Invention)의 공개 출원만 고려된다(OECD, 2025a). 본 연구는 제3장 제2절에서 설명한 바와 같이, 기술 전반 및 세부 기술군에 대한 혁신 전개 양상을 추정하기 위해 건물부문 기술 전체와 그 하위의 세부 기술군에 대해서 각각 특허 자료를 취득하였다(Table 1 참고). 하위 기술군은 총 4개로, OECD 특허 데이터베이스 위계 상 중분류에 해당하는 기술이다⁵⁾.

본 연구에서 추정하고자 하는 세부 기술군은 다음과 같다. 첫 번째는 ‘건축물 내 재생 에너지원의 통합 기술(Integration of Renewable Energy Sources in Buildings, 이하 건물 재생에너지 기술)’이며, 태양광, 태양열 등 건물

에서 에너지를 자체적으로 생산하기 위한 재생에너지 기술이 포함되어 있다. 두 번째는 ‘건축물 에너지 효율 기술(Energy Efficiency in Buildings)’이다. 에너지 효율 기술은 소위 액티브(Active) 기술과 관련 있는 기술로서, 에너지를 더욱 효율적으로 소비하게 하여 같은 효율을 누리는데 소요되는 에너지를 줄이는 기술이며, 조명기기, 냉·난방 기기, 가전, 승강기 등과 관련된 기술과 최종 전력소비 단계에서 효율적인 전력 관리 등을 가능케 하는 기술 등이 포함된다(OECD, 2025b). 세 번째는 ‘건축물 열성능 향상을 위한 건축 또는 구조적 요소 기술(Architectural or Constructional Elements Improving the Thermal Performance of Buildings, 이하 건축 및 구조 기술)’이며 건물 내·외부의 열교를 차단하기 위한 단열 등 제로에너지건물의 패시브(Passive) 요소와 연관된 기술이 포함된다. 마지막으로 ‘건축물 관련 유용 기술(Enabling Technologies in Buildings, 이하 기타 유용 기술)’도 하위 기술군 중 하나이며, OECD (2025b)에 따르면 건물 내에서 연료전지를 활용하는 기술과 건물부문의 활성화 기술(Enabling Technology in Building Sector)로서의 스마트 그리드 기술 등이 포함된다(OECD, 2025b).

특허 통계의 취득에 있어서 패밀리 사이즈(Family Size)의 설정이 중요하다. 패밀리 사이즈는 하나의 특허가 몇 개의 국가에 출원 또는 등록되었는지를 의미하는데, OECD 통계는 패밀리 사이즈가 1부터 2, 3, 4 이상인 특허를 구분하여 자료를 제공하고 있다. 본 연구는 각 국가의 모든 혁신을 반영하기 위하여 패밀리 사이즈가 1 이상인 특허를 활용했다.

Table 1. Technologies used in the patent analysis

OECD Hierarchy	Technology Name	CPC	Technology Code in This Study
5	Climate Change Mitigation Technologies Related to Buildings	Y02B	Technology 0
5.1	Integration of Renewable Energy Sources in Buildings	Y02B10	Technology 1
5.2	Energy Efficiency in Buildings	Y02B20, Y02B30, Y02B40, Y02B50, Y02B70	Technology 2
5.3	Architectural or Constructional Elements Improving the Thermal Performance of Buildings	Y02B80	Technology 3
5.4	Enabling Technologies in Buildings	Y02B90	Technology 4

Source: OECD (2025b)

5) 건물부문 온실가스 감축 기술 하위에는 기타 분류되지 않는 기술도 포함되어 있으나 일반적인 특성 또는 경향성을 가진 기술군이 아니라고 판단하여 본 연구에서는 제외하였다.

Table 2. Summary statistics

Country	Obs.	Avg.	Std. Dev.	Min	Max
<i>Technology 0: Climate Change Mitigation Technologies Related to Buildings</i>					
Korea	33	808.6	623.4	15.0	1,959.7
Japan	33	560.6	324.4	127.5	1,144.8
Canada	33	77.9	49.3	15.0	179.6
United States	33	987.9	639.0	198.3	2,033.5
France	33	115.4	96.5	11.5	310.5
Germany	33	426.0	189.3	24.4	799.3
<i>Technology 1: Integration of Renewable Energy Sources in Buildings</i>					
Korea	33	113.8	107.0	1.0	279.5
Japan	33	44.6	34.9	4.0	137.7
Canada	33	16.9	13.6	1.0	50.6
United States	33	183.5	162.7	19.0	500.4
France	33	37.9	48.1	1.0	176.3
Germany	33	115.8	83.4	5.0	338.5
<i>Technology 2: Energy Efficiency in Buildings</i>					
Korea	33	668.9	492.8	14.0	1,590.2
Japan	33	481.0	282.1	108.5	951.2
Canada	33	54.6	35.3	11.0	120.2
United States	33	724.6	449.5	168.8	1,546.7
France	33	72.6	52.6	9.5	153.2
Germany	33	286.1	116.3	20.4	457.2
<i>Technology 3: Architectural or Constructional Elements Improving the Thermal Performance of Buildings</i>					
Korea	33	34.0	25.9	1.0	81.5
Japan	33	11.1	8.6	2.0	32.0
Canada	33	2.4	2.1	0.5	9.0
United States	33	23.5	19.4	3.0	68.5
France	33	4.2	3.8	0.5	13.7
Germany	33	16.3	6.3	3.5	27.9
<i>Technology 4: Enabling Technologies in Buildings</i>					
Korea	33	29.6	30.0	1.0	133.5
Japan	33	43.7	35.2	2.0	139.8
Canada	33	9.0	7.7	0.5	27.5
United States	33	111.6	76.8	14.3	248.7
France	33	11.0	8.8	1.3	33.0
Germany	33	30.0	13.3	0.5	65.7

Note: Obs., Avg., Std. Dev., Min, and Max denote the number of observations, average, standard deviation, minimum value, and maximum value, respectively.

상기 자료를 활용하여 혁신 전개 특성을 비교하고자 하는 국가는 한국, 일본, 캐나다, 미국, 프랑스, 독일의 6개국으로 설정했다. OECD 자료를 기준으로 1990년~2022년 동안 한국의 건물부문 기술의 누적 특허 출원수가 아시아에서 가장 많다는 점을 고려하여, 한국과 유사한 수준의

국가와 비교분석을 수행하기 위해 아시아, 북미, 유럽에서 누적 특허 출원수가 첫 번째(한국, 미국, 독일) 및 두 번째로 많은 국가(일본, 캐나다, 프랑스)를 선택하였다.

분석 기간은 OECD 데이터베이스가 제공하고 있는 전체 기간으로 1990년부터 2022년까지이다. 특허 출원 통계

는 연간 단위로 제공되며, 분석대상 국가별로 총 33개의 관측치를 가진다. 분석에 활용한 자료의 기초 통계량은 Table 2와 같다.

4.2. 추정결과

4.2.1. 평행이동 모수 M 의 설정

본 연구는 제한적인 관측치를 대상으로 분석을 수행하므로, 시간 평행이동 모수 M 을 M_0 로 고정하여 총 모수의 수를 축소하였다. 국가 및 기술별 고정된 T_0 와 시간 변화량 L 에 따른 AIC 계산 결과는 부록에 제시하였으며 (Table A-1 참고), 최종적으로 고정한 평행이동 모수 M_0 는 Table 3과 같다. 본 연구는 Table 3에 제시한 M_0 에 따라 각 국가 및 기술에 대하여 일반화된 로지스틱 함수의 모수를 추정하였다.

4.2.2. 건물부문 온실가스 감축 기술(Technology 0)

첫 번째는 모든 기술의 전반적인 혁신 양상이 반영된 ‘건물부문 온실가스 감축 기술’에 대한 결과이다. 추정된 모수는 Table 4에 제시하였으며, 모든 모수는 통계적으로

유의하고 모형의 결정계수(R-squared)도 1에 가까워 각 모형이 충분한 설명력을 가지는 것으로 판단된다. 이 결과를 기반으로 일반화된 로지스틱 함수의 1차 도함수와 원함수를 도시하면 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 제3.1절에서 설명한 바와 같이, 일반화된 로지스틱 함수의 1차 도함수는 종 모양으로 나타나며(Fig. 1 참고), 추정된 모수에 따라 곡선의 기울기 및 좌우대칭 등 추정 곡선(Fitted Line)의 세부적인 형태가 다르게 도시된다. 종 모양으로 표현된 국가별·연도별 특허 수를 시간 t 에 따라 누적할 경우 S자형의 일반화된 로지스틱 함수(원함수)를 도시할 수 있으며(Fig. 2 참고), 특허 수가 누적되어 온 양상과 그 예상되는 포화 수준(시간이 양의 무한대로 갈 때 누적 특허수의 점근값)을 직접적으로 확인할 수 있다.

모수 K 는 미국, 한국, 일본, 독일, 프랑스, 캐나다의 순서로 큰 것으로 추정되었으며, 한국의 건물부문 온실가스 감축 기술의 혁신은 예상되는 포화점이 다른 선진국에 비해서 높은 편에 속하는 것으로 나타났다. 한편, 혁신 증가 속도를 의미하는 모수 B 의 경우, 한국의 수준이 분석대상 국가 중 중간 정도에 위치하는 것으로 나타났으나, 일본, 독일, 캐나다와의 차이가 통계적으로 유의하지 않았다(부록 Table A-2 참고). ν 는 캐나다를 제외하고 모든 국가에

Table 3. Estimates of fixed time shift parameter

Country	Technology 0	Technology 1	Technology 2	Technology 3	Technology 4
Korea	21.0	21.0	21.5	25.0	22.0
Japan	25.0	24.0	25.0	11.0	24.0
Canada	23.0	19.0	30.5	19.0	16.0
United States	26.0	18.0	29.0	25.0	24.0
France	21.5	19.0	26.0	20.0	26.0
Germany	23.0	23.0	25.0	24.0	20.0

Table 4. Estimation results for technology 0

Parameter	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
K	29,511.396*** (1,160.570)	20,942.776*** (883.389)	2,930.890*** (121.556)	35,478.073*** (1,053.058)	4,019.734*** (233.789)	15,784.353*** (804.236)
B	0.208*** (0.010)	0.209*** (0.014)	0.195*** (0.011)	0.254*** (0.013)	0.265*** (0.020)	0.203*** (0.018)
ν	0.666*** (0.030)	1.273*** (0.088)	0.965*** (0.056)	1.510*** (0.083)	1.090*** (0.094)	1.602*** (0.162)
R-squared	0.975	0.975	0.973	0.985	0.934	0.949

Note: Parenthesis indicate the standard deviations of estimated parameters. ***, **, and * denote statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

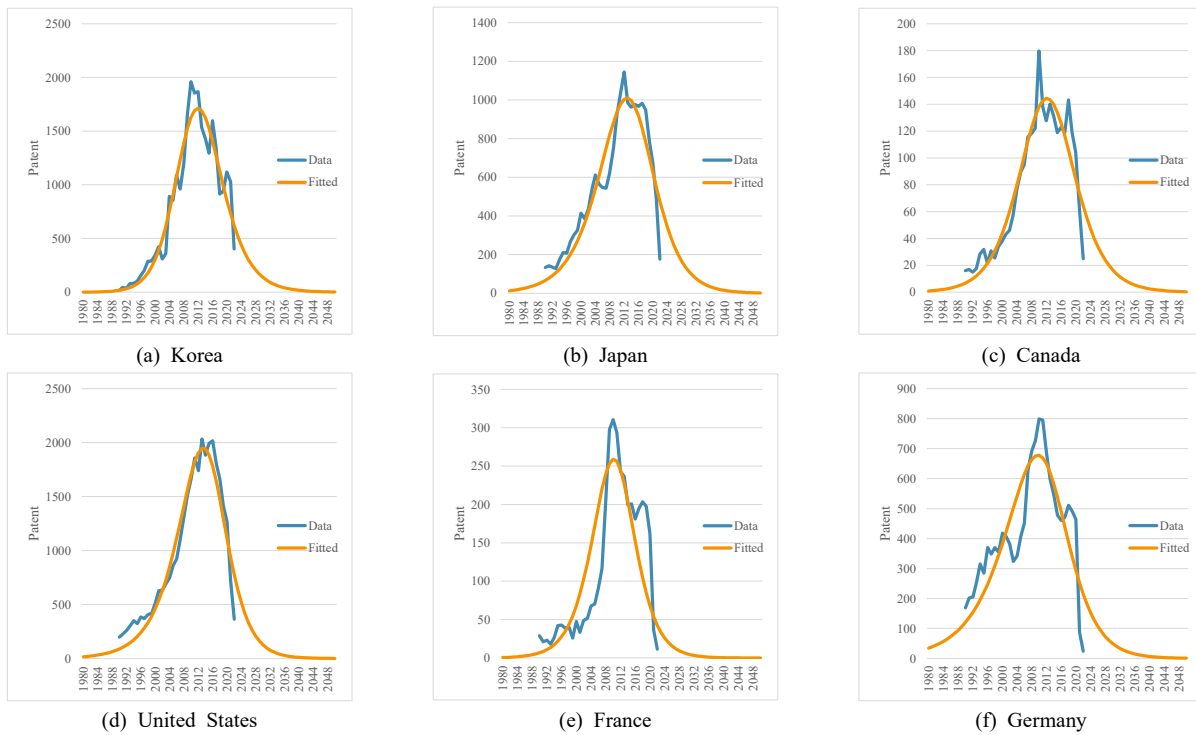
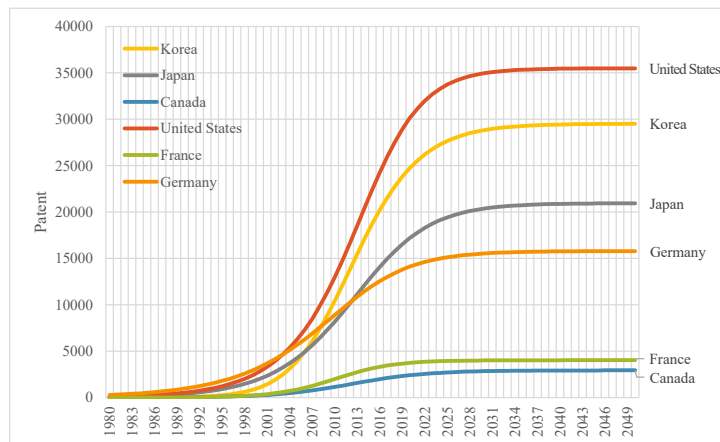


Fig. 1. 1st-order differential generalised logistic functions for technology 0



Note: Only the fitted values are shown.

Fig. 2. Generalised logistic functions for technology 0

대해 통계적으로 1과 차이를 보이는 것으로 해석되어 혁신 활동의 극댓값⁶⁾을 전후로 비대칭성을 보였는데(부록 Table A-3 참고), 독일, 미국, 일본은 ν 가 1보다 큰 값으로 추정되어 극댓값 전에 이미 점진적으로 혁신이 누적되는 반면, 한국과 프랑스는 비교적 극댓값 직전에 가파르게

증가하는 것으로 나타났다.

이상의 추정 결과를 종합하자면, 건물부문 온실가스 감축 기술에 대한 한국의 혁신체계는 초기에는 그 활동이 지연되었지만, 본격적으로 혁신이 시작된 이후 그 규모가 크게 확장된 것으로 추정된다. 기술혁신이 늦게 가속화되

6) 제3장에서 설명한 바와 같이 ν 는 일반화된 로지스틱 함수의 변곡점 전후의 비대칭성을 조절하는 인자이며, 일반화된 로지스틱 함수의 변곡점은 1차 도함수의 극댓값을 가지는 시점과 같다.

는 특성의 경우, 과학기술 전반에 걸쳐 한국이 비교적 후발주자로서 기술혁신을 도모해왔다는 역사적인 맥락과 1992년 기후변화협약 채택 당시 한국은 비부속서 1 (Non-Annex I) 국가로 분류되는 등 국제사회에서 요구되는 온실가스 감축 책임이 상대적으로 적었다는 점이 복합적으로 영향을 미친 것으로 보인다. 그러나 곧 한국의 혁신은 다른 나라를 빠르게 추월하였는데, 이는 국가 주도적인 연구개발 투자와 함께 기술개발을 위한 정책적 기반에 기인한 것으로 판단된다. 특히 2000년대 초반부터 추진되어 온 친환경건축물인증제도와 「건축법」 개정을 통한 법적 근거의 마련, 녹색성장 시책의 추진, 자발적인 온실가스 감축 목표의 설정 등은 건물부문 온실가스 감축 기술개발의 동인으로 작용하였을 것이다.

한편, 한국을 비롯한 분석 국가들은 2025년 현재 대부분 혁신의 포화점에 근접해 있는 것으로 예측된다(Fig. 2 참고). 이는 본 연구의 분석자료가 포함하고 있는 건물부문 온실가스 감축 기술이 어느 정도 성숙되어 있기 때문으로 판단되며, 현재의 추세가 이어질 경우 추가적으로 활발한 혁신활동이 어려울 수 있음을 시사한다.

4.2.3. 건물 재생에너지 기술(Technology 1)

두 번째는 건물부문 온실가스 감축 기술의 하위 기술군인 ‘건물 재생에너지 기술’의 국가별 혁신 전개 특성을 추정된 결과이다(Table 5 참고). 모든 국가에 대해서 모수 추정값은 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 모형의 설명력도 높은 수준인 것으로 판단된다. 이 추정결과를 바탕으로 일반화된 로지스틱 함수의 1차 도함수를 도출하면 Fig. 3과 같고, 원함수는 Fig. 4와 같다.

건물 재생에너지 기술혁신의 포화 규모 K 를 살펴보면,

미국이 약 6,100 수준으로 가장 크고, 다음으로 한국, 독일, 일본, 프랑스, 캐나다의 순으로 도출되어, 분석대상 국가 중 한국의 포화 규모는 큰 수준인 것으로 나타났다. 단, 통계적으로 한국과 독일의 K 추정치가 같다는 귀무가설을 기각하지 못하여, 한국과 독일의 잠재적 포화 규모는 유사한 것으로 판단된다(부록 Table A-4 참고). 반면, 혁신의 성장률인 B 의 크기는 독일, 일본, 프랑스, 캐나다, 미국, 한국의 순서로 추정되어, 한국은 건물 재생에너지 기술에 관한 혁신 성장 속도(0.230)가 상대적으로 낮았던 것으로 확인되었다. 비록 한국의 성장률은 가장 낮게 추정되었으나, 가설 검정 결과, 한국과 미국 간의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다(부록 Table A-4 참고). 비대칭성을 결정하는 모수 ν 에 관해서는 독일과 일본이 1보다 큰 값을 가지는 것으로 나타나 과거부터 지속적으로 건물 재생에너지 기술에 관한 혁신을 축적해온 것으로 해석된다. 그러나 독일과 일본을 제외한 나머지 국가는 1보다 작은 값으로 추정되어, 혁신이 비교적 늦게 가속화된 것으로 드러났다.

건물 재생에너지 기술에 대한 추정 결과를 종합적으로 고려하면, 한국은 혁신을 추격하고 높은 수준의 기술혁신 규모가 전망되는 등 건물부문 온실가스 감축 기술과 유사한 혁신 전개 양상을 보였으나, 모수 B 의 추정 결과로 보건대 상대적으로 다른 나라와 비교하여 혁신이 덜 집중되었던 것으로 해석된다. 한국은 2001년 「대체에너지 기술개발·보급 기본계획」을 시작으로 「신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」을 수립해온 한편, 2004년 태양광주택10만호보급사업을 시작으로 그린홈100만호보급사업, 주택지원사업 및 건물지원사업을 시행하여 건물의 재생에너지 기술 수요를 촉진해 왔다. 그럼에도 불구하고 건

Table 5. Estimation results for technology 1

Parameter	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
K	3,841.418*** (194.989)	1,385.700*** (93.793)	529.237*** (25.541)	6,103.597*** (192.555)	1,095.976*** (75.659)	3,496.693*** (219.086)
B	0.230*** (0.013)	0.387*** (0.040)	0.272*** (0.014)	0.240*** (0.007)	0.422*** (0.028)	0.501*** (0.058)
ν	0.487*** (0.029)	1.942*** (0.245)	0.622*** (0.035)	0.382*** (0.014)	0.427*** (0.035)	2.977*** (0.448)
R-squared	0.949	0.899	0.939	0.977	0.902	0.903

Note: Parenthesis indicate the standard deviations of estimated parameters. ***, **, and * denote statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

7) 각 국가의 추정된 ν 값은 1과 같다는 귀무가설을 기각하였으며, 그 결과는 부록의 Table A5에 제시하였다.

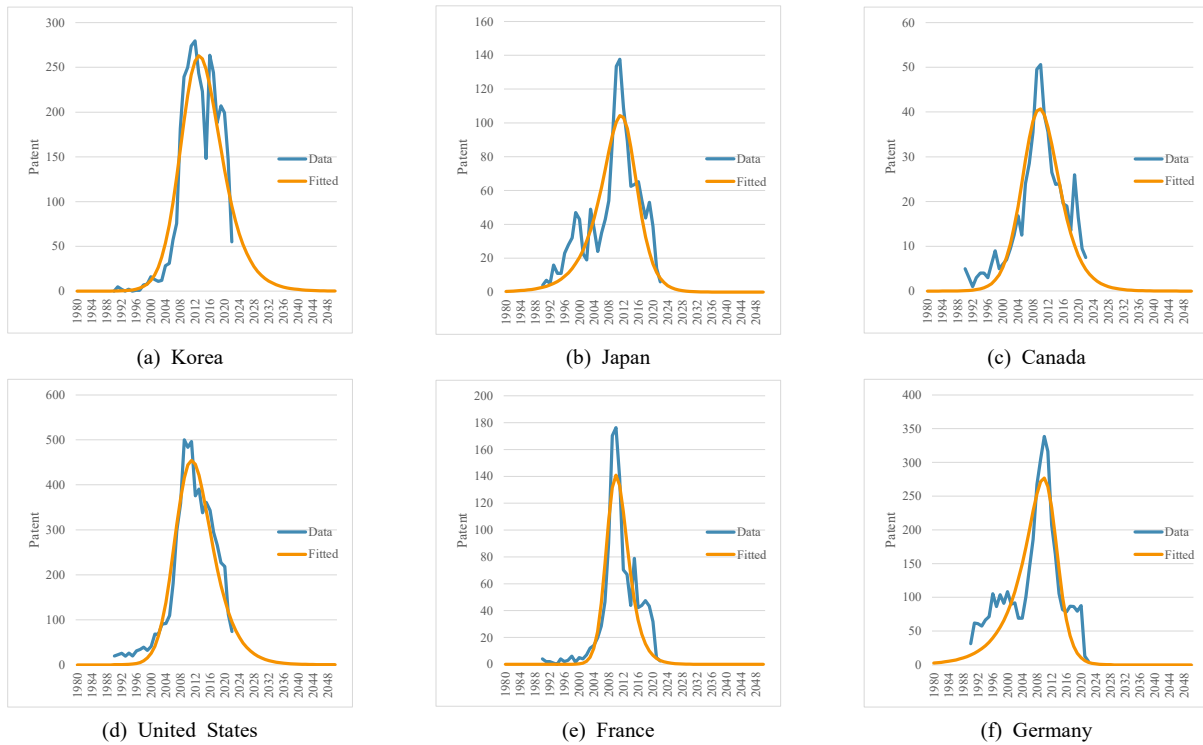
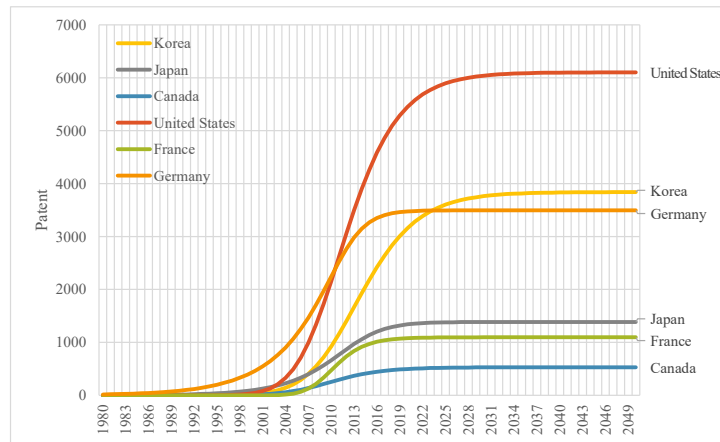


Fig. 3. 1st-order differential generalised logistic functions for technology 1



Note: Only the fitted values are shown.

Fig. 4. Generalised logistic functions for technology 1

물 재생에너지 기술의 혁신 성장 속도가 상대적으로 낮은 수준이었다는 것은 건축물에 초점을 맞춘 기술개발보다 재생에너지 분야 그 자체에 대한 기술개발 또는 건축물로의 보급 측면에 정책이 집중되어 있었을 가능성이 높다.

한편, 건물 재생에너지 기술에 대해서도 본 연구의 분석대상 국가들은 현재 기술혁신이 포화 수준에 다다른 것으로 분석되며(Fig. 4 참고), 현재의 추세가 유지된다면 동

국가들의 추가적인 혁신이 제한적일 것으로 전망된다.

4.2.4. 건축물 에너지 효율 기술(Technology 2)

건축물 에너지 효율 기술과 관련하여 각 분석대상 국가의 혁신 전개 패턴을 추정한 결과는 Table 6에 제시하였으며, 추정된 모수를 활용하여 1차 미분한 일반화된 로지스틱 함수 및 리차드 곡선을 도시하면 Fig. 5 및 Fig. 6과

같다. 추정된 모수는 모두 1%의 유의수준에서 유의한 것으로 나타났으며, 일반화된 로지스틱 함수가 각 국가의 혁신을 분석하는 데 충분한 설명력을 가지는 것으로 도출되었다.

건축물 에너지 효율 기술에 대해서도 한국의 혁신 포화 규모(K)는 분석대상 국가 중에서 높은 수준으로 추정된다. 한국의 모수 K 추정치는 약 24,000으로 미국 다음으로 높은 것으로 추정되었으며, 한국 다음으로는 일본, 독일, 프랑스, 캐나다의 순서로 추정되었다. 또한, Fig. 6에서 알 수 있듯이, 분석대상 선진국의 기술혁신은 현재 포

화 수준에 근접한 것으로 나타난다.

반면, 한국의 혁신 증가 속도 B 와 비대칭성 ν 는 분석대상 국가와 비교할 때 상대적으로 작은 수준으로 추정되었다. 모수 B 의 경우, 캐나다가 가장 크고, 그 다음으로 미국, 프랑스, 한국, 일본, 독일 순서로 추정되었으나, 한국과 일본 및 독일의 추정치는 유의한 차이를 보이지 않았다(부록 Table A-6 참고). 모수 ν 는 모든 국가에 대해서 통계적으로 1과 차이가 있는 것으로 해석되는데(부록 Table A-7 참고), 한국만 유일하게 1보다 작은 값을 가지는 것으로 추정되어 혁신이 늦게 가속화된 것으로 판단된다.

Table 6. Estimation results for technology 2

Parameter	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
K	24,201.545*** (931.151)	18,262.174*** (784.548)	2,024.335*** (79.922)	25,788.385*** (456.937)	2,645.847*** (140.600)	11,301.104*** (586.434)
B	0.213*** (0.010)	0.201*** (0.013)	0.530*** (0.072)	0.451*** (0.021)	0.249*** (0.019)	0.189*** (0.019)
ν	0.769*** (0.036)	1.193*** (0.082)	5.982*** (0.995)	4.338*** (0.256)	1.445*** (0.136)	1.840*** (0.223)
R-squared	0.975	0.973	0.973	0.994	0.948	0.955

Note: Parenthesis indicate the standard deviations of estimated parameters. ***, **, and * denote statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

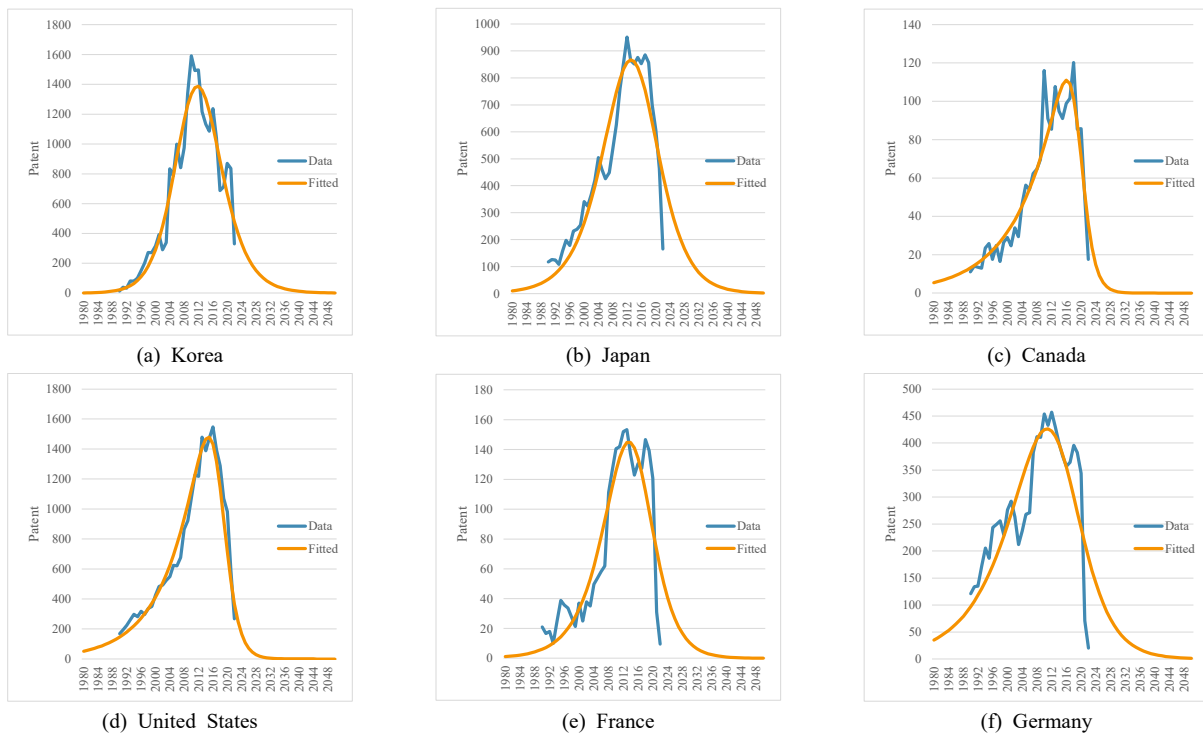
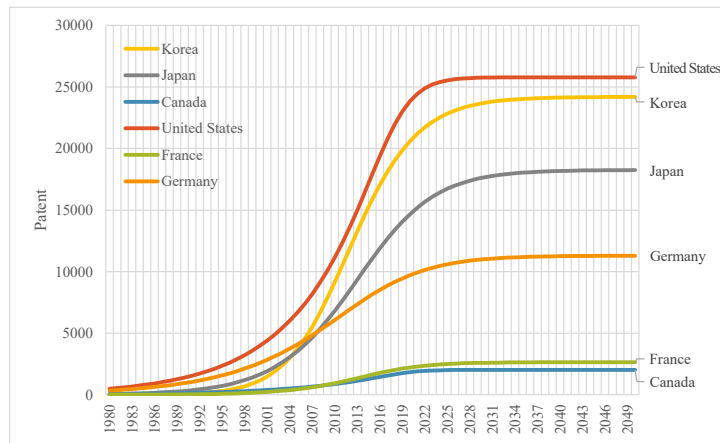


Fig. 5. 1st-order differential generalised logistic functions for technology 2



Note: Only the fitted values are shown.

Fig. 6. Generalised logistic functions for technology 2

이상의 추정 결과를 종합하면, 한국의 건축물 에너지 효율 기술의 혁신 전개 양상은 그 잠재적 규모는 크지만, 다른 국가의 혁신을 추격하고 그 성장 속도가 낮은 양상을 보인 것으로 해석된다. 이는 건물 재생에너지 기술의 혁신과 유사하며, 한 가지 특기할 점은 한국이 에너지 효율에 대한 정책 기반을 재생에너지보다 일찍 마련했음에도 불구하고 유사한 모습을 보인다는 점이다. 한국은 석유파동 이후 「에너지이용 합리화법」을 1979년에 제정하여 제16조 및 제17조에 건축물에 대한 에너지 관리기준과 냉난방 온도의 제한기준을 규정하였으며(Republic of Korea, 1979a), 1985년부터는 「건축법 시행령」에 에너지 절약계획서 제출을 의무화하는 등 건축물 내 기계 설비 및 전기설비의 에너지 고효율화를 추진하였다(Republic of Korea, 1985). 그러나 이와 같은 정책 기반이 분석 초기부터 점진적으로 기술혁신을 추진할 수 있는 환경을 조성하거나 특정 시기에 집중적인 기술혁신을 유도하는 데에는 제한적이었던 것으로 판단된다.

4.2.5. 건축 및 구조 기술(Technology 3)

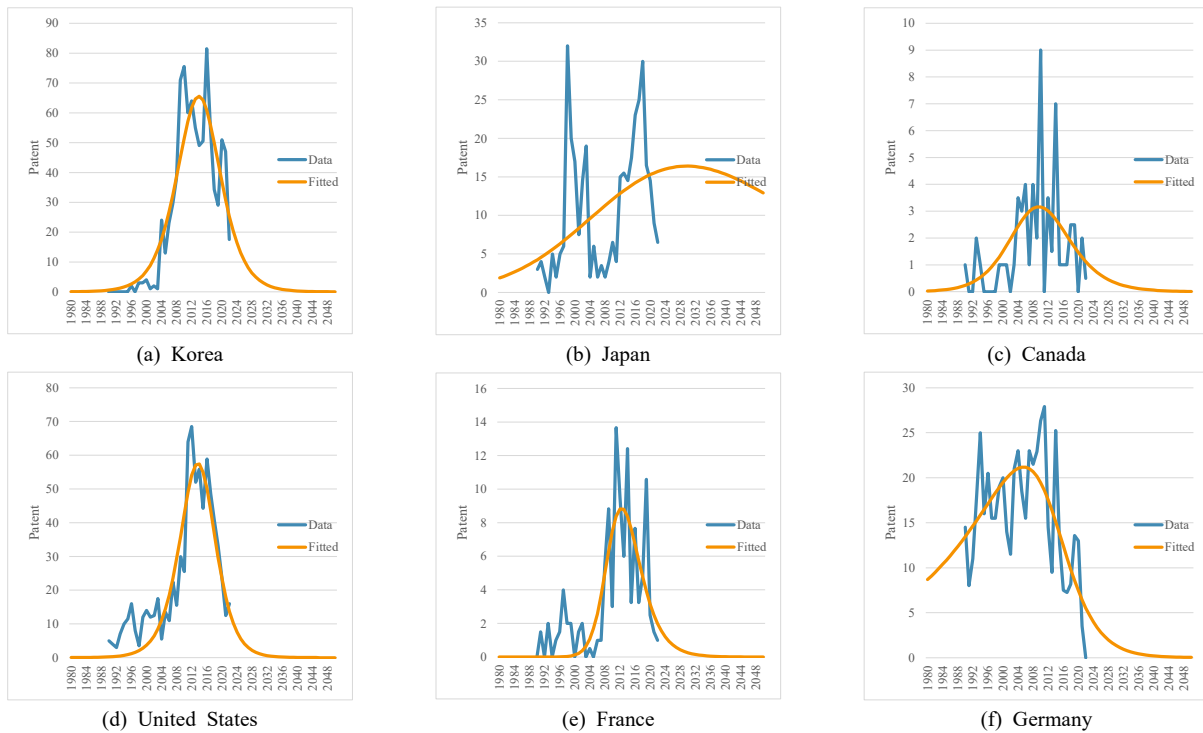
건축 및 구조 기술 특허에 대해 1차 미분한 일반화된 로지스틱 함수를 추정한 결과, 일본을 제외한 나머지 5개 국가의 모수는 모두 유의하게 추정되었으나, 일본은 모수 K 와 B 가 통계적으로 유의하지 않았으며, 모형의 결정계수도 0.669로 상대적으로 낮았다(Table 7 참고). 일본의 경우, Fig. 7에 도시된 원자료와 같이 특허 출원수가 하나의 봉우리를 형성하는 종 모양이 아닌 쌍봉(Bimodal) 형태를 띠고 있는 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서 상정한 일반화된 로지스틱 함수 및 그 1차 도함수는 일본의 건축 및 구조 기술의 혁신을 설명하기에 적절한 구조(Model Specification)가 아닐 수 있으며, 일본의 경우 혁신이 성장과 둔화를 반복하는 패턴 또는 일반화된 로지스틱 함수가 중첩된 형태일 수 있다.

한편, Table 7에 정리하였듯이 모형의 설명력은 일본뿐만 아니라, 캐나다와 프랑스에 대해서도 다른 기술 및 국

Table 7. Estimation results for technology 3

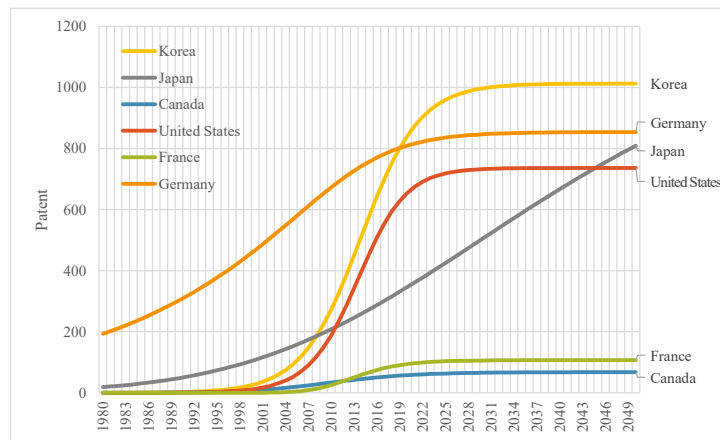
Parameter	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
K	1,012.642*** (78.106)	1,209.993 (2,372.037)	67.803*** (14.174)	736.202*** (49.391)	106.890*** (14.242)	854.044*** (125.383)
B	0.261*** (0.029)	0.042 (0.057)	0.173*** (0.048)	0.326*** (0.030)	0.269*** (0.039)	0.194*** (0.040)
ν	1.026*** (0.109)	0.287** (0.140)	0.764*** (0.189)	1.134*** (0.110)	0.395*** (0.065)	4.307*** (1.169)
R-squared	0.921	0.669	0.593	0.927	0.763	0.923

Note: Parenthesis indicate the standard deviations of estimated parameters. ***, **, and * denote statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.



Note: The estimated parameters for Japan are not statistically significant.

Fig. 7. 1st-order differential generalised logistic functions for technology 3



Note: Only the fitted values are shown. The estimated parameters for Japan are not statistically significant.

Fig. 8. Generalised logistic functions for technology 3

가와 비교하여 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 캐나다와 프랑스에 대한 모수 추정치가 모두 유의하다는 점에서 일반화된 로지스틱 함수가 해당 국가의 혁신 구조를 모형화하는 데에는 적절하지만, 동 국가들의 특허 출원 수 변동을 잘 설명하지 못한다는 것을 의미한다. 실제로 Fig. 7에 도시된 바와 같이, 캐나다와 프랑스의 건축 및 구조 기술은 일반화된 로지스틱 함수의 1차 도함수에 따

라 변화하는 경향을 보이지만, 도함수를 중심으로 높은 변동성을 가지며, 이 변동성에 의해 모형의 결정계수가 낮게 도출된 것으로 판단된다.

모수 추정 결과를 바탕으로 건축 및 구조 기술의 혁신에 대해 일반화된 로지스틱 함수를 도시하면 Fig. 8과 같다. 모든 모수가 유의하지 않은 일본의 곡선을 제외할 때, 모든 국가는 현재 누적 혁신의 포화 수준에 도달한 것으

로 판단된다.

추정된 혁신의 포화 규모(K)는 일본을 제외하고 한국, 독일, 미국, 프랑스, 캐나다 순서로 크게 나타났으며, 본 연구가 포함하고 있는 기술군 중 유일하게 한국의 규모가 가장 크게 도출되었다. 단, 한국과 독일의 포화 규모는 통계적으로 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다(부록 Table A-8 참고). 한국의 혁신 증가 속도(B)는 다른 기술과 유사하게 분석대상 국가 중 중간 정도의 크기이지만, 한국의 추정치는 일본을 제외한 나머지 4개 국가의 추정치와 통계적으로 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다(부록 Table A-8 참고). 비대칭성 모수 ν 의 경우, 독일, 미국, 한국이 1보다 크게 추정되었는데, 미국과 한국의 경우 모수 ν 가 통계적으로 1과 유사한 것으로 나타났다(부록 Table A-9 참고). 캐나다와 프랑스는 ν 가 1보다 낮게 추정되어 혁신이 늦게 촉발될 것으로 분석되었다.

선진국과 비교한 한국의 건축 및 구조 기술의 혁신 전개 모습은 다른 기술과 크게 다르지 않지만, 유일하게 혁신의 가속화 시점이 늦지 않은 기술이라는 점이 특징이다. 다른 기술군에 대해서 한국의 비대칭성 모수는 모두 1보다 낮게 추정되어 혁신이 늦게 가속화되는 경향을 보인 반면, 건축 및 구조 기술에 한해서는 혁신의 가속과 둔화가 대칭적인 모습을 보였다. 이와 같은 형태는 건축 및 구조 기술에 대한 한국의 연속적이며 일관된 정책 신호에 기인한 것으로 판단된다. 한국은 1979년 9월에 시행된 「건축법 시행규칙」 제25조에 건축물의 열손실 방지를 위한 조치를 두어 관련 기술의 적용을 위한 규정을 마련하고(Republic of Korea, 1979b), 지역별 및 건축물의 부위별 단열재 두께 기준을 추가적으로 수립·개정하는 등 지속적으로 규정을 개선해 왔다. 이로 인해 건축 및 구조 기술에 대해서는 안정적인 정책 환경이 조성되어 있으며, 이로 인해 초기에도 기술혁신이 점진적으로 추진되는 구

조를 보이는 것으로 판단된다.

4.2.6. 기타 유용 기술(Technology 4)

건물의 연료전지 활용, 스마트 그리드 등의 기술이 포함되는 기타 유용 기술의 혁신 전개 패턴을 추정한 결과는 Table 8과 같으며, 추정 결과를 바탕으로 일반화된 로지스틱 함수의 1차 도함수와 원함수는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 도시할 수 있다. 기타 유용 기술에 대해서도 분석대상 국가의 모수는 모두 1% 유의수준에서 유의하게 추정되었으며, 상대적으로 한국과 프랑스의 결정계수가 0.9 미만으로 도출되었으나 설명력도 양호한 것으로 판단된다.

기타 유용 기술에 대한 혁신의 구조적 포화점(K)과 관련하여, 한국의 규모는 분석대상 국가 중 중간 수준에 해당하는 것으로 추정되었다. 모수 K 의 크기는 미국, 일본, 독일, 한국, 프랑스, 캐나다 순서로 도출되었으며, 다른 기술군에 대해서는 한국이 상대적으로 높은 수준인 것과 대조적이다. 한국의 혁신 증가 속도 B 는 분석대상 국가 중 상위권인 것으로 나타났는데, 한국의 전후에 위치한 일본 및 프랑스와 통계적으로 유의하게 차이를 보이지는 않는다(부록 Table A-10 참고). 모수 ν 는 독일을 제외하고 모두 1과 유의한 차이를 보이는 것으로 검정되었다(부록 Table A-11 참고). 일본, 프랑스, 미국과 달리 한국과 캐나다는 ν 가 1보다 작게 추정되었으며, 기타 유용 기술에 대해 초기부터 점진적인 혁신을 보이는 것이 아니라 변곡점 직전에 급격히 혁신이 가속화되는 양상을 보였다.

이상의 추정 결과를 종합적으로 분석해보면, 한국의 기타 유용 기술은 혁신의 그 비대칭성에 있어 다른 기술군과 유사한 상대적 특성을 가지고 있으나, 혁신의 잠재적 규모가 다른 국가에 비해 큰 수준이 아니며 혁신의 증가 속도가 빠르다는 점이 특징이다. 즉, 건물에서 연료전지를 활용하는 기술이나 활성화 기술(Enabling Technology)로

Table 8. Estimation results for technology 4

Parameter	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
K	864.980*** (74.982)	1,409.087*** (93.014)	288.422*** (20.022)	3,911.979*** (121.903)	356.499*** (37.514)	1,096.385*** (77.568)
B	0.343*** (0.036)	0.368*** (0.043)	0.253*** (0.020)	0.261*** (0.012)	0.319*** (0.061)	0.167*** (0.017)
ν	0.815*** (0.088)	2.095*** (0.280)	0.540*** (0.046)	1.370*** (0.069)	1.993*** (0.427)	1.096*** (0.109)
R-squared	0.865	0.920	0.909	0.982	0.825	0.926

Note: Parenthesis indicate the standard deviations of estimated parameters. ***, **, and * denote statistical significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

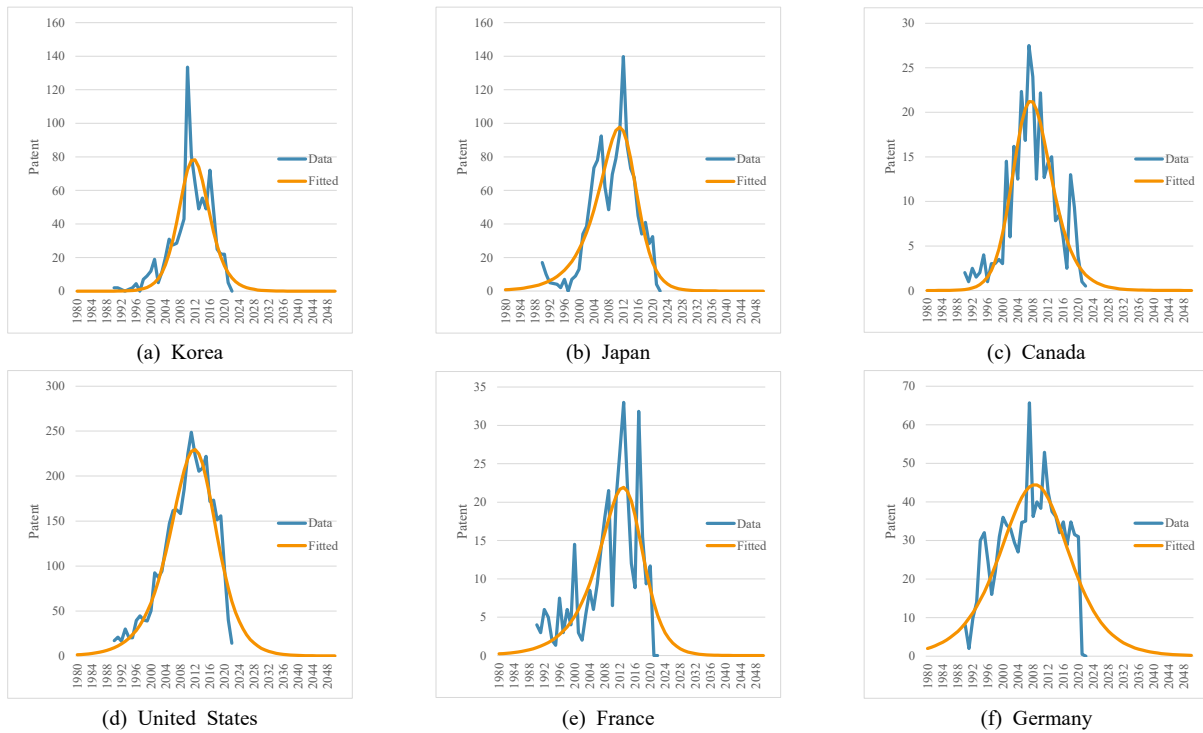
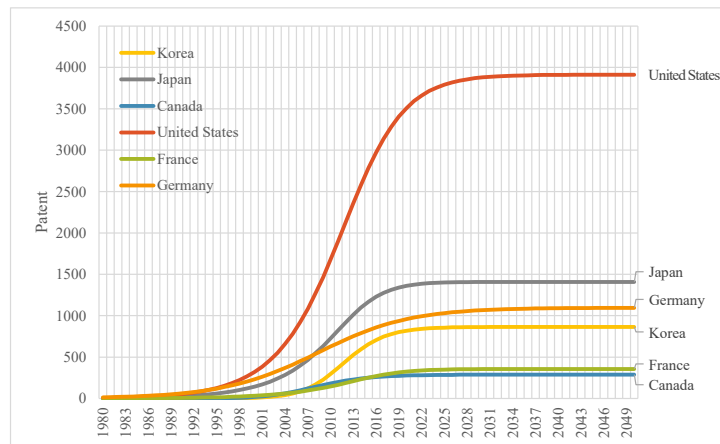


Fig. 9. 1st-order differential generalised logistic functions for technology 4



Note: Only the fitted values are shown.

Fig. 10. Generalised logistic functions for technology 4

서의 스마트 그리드 기술은 다른 선진국에 비해 혁신의 집중적 증가는 가능했지만, 규모 측면에서 경쟁력이 다소 낮은 것으로 해석된다. 연료전지와 스마트 그리드는 한국이 정책적으로 기술개발을 추진해 온 분야라는 점을 고려할 때, 상기와 같이 단기간의 집중적인 혁신은 일부분 달성할 수 있었을 것으로 판단된다. 그러나, 다른 나라에 비해 해당 기술의 장기적인 활용처 및 응용 분야로서 건물

부문에 대한 고려가 부족했거나, 경제성 문제 등으로 기술혁신에 대한 시장 수요가 제한적이었을 가능성을 시사한다.

한편, 기타 유용 기술에 대해서도 분석대상 국가는 현재 혁신의 포화 수준에 근접한 것으로 분석되며(Fig. 10 참고), 현재의 추세가 지속될 경우 추가적인 혁신은 제한적일 것으로 판단된다.

4.3. 주요국 정책 검토를 통한 분석결과 논의

이상의 분석결과에 따르면, 한국은 전반적으로 기술혁신의 포화 수준 측면에서 상대적 우위를 보이지만 혁신이 늦게 본격화되고 그 증가 속도도 상대적으로 완만한 것으로 나타났다. 이는 한국보다 혁신이 먼저 활성화된 미국, 독일, 일본에서 관련 정책의 수립이 빨랐기 때문이라고 일부 해석할 수도 있으나, 실제로는 큰 차이를 보이지 않는다. 한국, 미국, 독일, 일본은 모두 1970년대 석유파동 이후 관련 법·제도적 기반을 마련하기 시작했으며, 1975년 미국의 「에너지 정책 및 보전법(Energy Policy and Conservation Act)」 제정을 시작으로, 독일은 1976년에 「에너지 절약법(Energy Saving Act, EnEG)」을 제정하고, 일본과 한국은 같은 해에 각각 「에너지 사용의 합리화 등에 관한 법률」과 「에너지이용 합리화법」을 제정했다. 이는 제도 마련과 같은 정책 신호의 유무보다 해당 신호를 수용하는 혁신시스템의 성숙도나, 기술개발에 대한 인식, 인프라 등에 차이가 있었을 가능성을 시사한다.

한편, 모든 국가 및 기술에서 기술혁신이 현재 포화 시점에 근접해 있음을 알 수 있는데, 주요국의 최신 정책은 혁신의 중단보다 건축물 생애주기 탄소감축 기술과 같이 새로운 기술이 대두되고 있을 가능성을 제기한다. 실제로 독일은 2021년에 지속가능한 건축물 품질인증(QNG Sustainable Building Certification) 제도를 도입하였는데, 해당 인증의 특별 조건 중 하나로 건물의 생애주기 온실가스 배출량 조건을 충족할 것을 요구하고 있다⁸⁾. 일본의 경우 국토교통성을 중심으로 건축물의 원재료 조달부터 사용, 해체단계까지 생애주기 탄소배출량을 평가하기 위한 제도를 설계 중이다(Study Group on a System to Promote the Calculation and Evaluation of Life Cycle Carbon of Buildings, 2025). 상기와 같은 정책은 세계적으로 통용되는 건물부문 온실가스 감축 기술의 범위가 ‘건물 사용 단계’에 국한되지 않고 생애주기 전체를 포괄하는 새로운 패러다임으로 확장되고 있을 가능성을 시사하며, 이에 따라 본 연구의 기술적 범위 내에서는 해당 혁신이 포착되지 못했을 가능성이 있다.

5. 시사점 및 결론

본 연구는 특허 출원 시계열 자료를 활용하여 일반화된

로지스틱 함수를 추정함으로써 한국, 일본, 캐나다, 미국, 프랑스, 독일에서 건물부문 온실가스 감축 기술 및 그 상위 기술군의 혁신이 전개되어 온 양상을 분석하였다. 또한, 추정 결과를 바탕으로, 한국의 혁신 전개가 비교 대상 선진국에 비해 상대적으로 어떠한 특성을 지니고 있는지 비교하였다.

분석결과, 기술별로 다소 차이는 존재하나, 한국은 전반적으로 혁신의 포화 수준(K)이 높으나, 혁신의 활성화 시점이 지연되고($\nu < 1$) 증가 속도(B) 또한 선진국에 비해 완만한 경향을 보인다. 혁신의 지연된 가속은 초기에 내생적으로 혁신이 활성화되는데 다소 제약이 있고 정책 등 외부 신호가 일정 수준 이상 누적되었을 때 반응하는 기술혁신체계를 시사한다. 또한, 기술혁신이 활성화된 후의 완만한 증가는 정책 등 외부 신호에 의해 혁신의 증가는 견인되지만, 혁신 활동이 내부적으로 빠르게 확산되지는 못하는 특성을 시사한다. 다만, 이와 같은 구조적 특성은 한국이 과거에 다른 국가와 비교하여 경제 수준이 낮았다는 점에서 일정 부분 설명될 수 있으며, 이러한 한계 점에도 불구하고 혁신의 구조적 포화 수준이 높은 것은 상당히 긍정적이라고 할 수 있다.

한편, 모든 국가와 기술에서 혁신의 규모가 일반화된 로지스틱 함수의 포화 수준에 근접한 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 분석한 건물부문 온실가스 감축 기술이 상당 부분 성숙 단계에 진입해 있으며, 새로운 혁신을 창출하기 어려울 수 있음을 시사한다. 그러나, 건물부문은 여전히 높은 수준의 에너지 절감과 온실가스 감축이 필요한 분야로, 대형화·고층화되는 건물에 적용 가능한 기술, 그린리모델링 등 기축 건물의 에너지 성능을 향상시키기 위한 기술 등 다양한 난제가 남아있다. 또한, 제4.3절에서 설명한 바와 같이 건축물의 생애주기 탄소감축 기술 등 새로운 기술도 국제적으로 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서 도출된 기술혁신의 포화 시점을 혁신의 종결 시점이 아닌, 정책적으로 혁신체계를 보완하여 신기술을 지속적으로 발굴하고 새로운 혁신 사이클을 유도해 나가야 하는 시점으로 해석해야 할 것이다.

본 연구로부터 도출된 한국의 혁신 전개 특성과 그 제약에 근거하여, 새로운 기술의 발굴하고 혁신을 도모하기 위한 각 세부 기술군별 정책적 시사점은 다음과 같다. 첫 번째, ‘건물 재생에너지 기술’의 경우 혁신의 증가 속도가 낮아 혁신이 활성화되더라도 다른 나라에 비해 단기적으

8) 한국의 경우 현행 제로에너지건축물 인증제도에서 명시적으로 온실가스 배출량을 고려하고 있지 않으며(「제로에너지건축물 인증 기준」 별표 1), 녹색건축 인증제도에서는 저탄소 에너지원 기술의 적용 여부 등을 평가한다(「녹색건축 인증 기준」 별표 1 등).

로 집중적인 성과 창출이 부족할 수 있으며, 혁신의 신속한 증가를 견인할 수 있도록 건축물 재생에너지 관련 제도의 수정 및 보완이 필요하다. 직접적으로는 재생에너지 설치 의무화 등 행정적 규제가 효과적인 수단이 될 수 있겠으나, 고층형 건물 등 건축물에서의 신재생에너지 설치 기준 등을 종합적으로 검토하여, 설비의 합리적인 설치라는 본래의 목적에 부합하면서도 더욱 다양한 기술혁신 수요를 창출할 수 있는 방안에 대한 고민이 필요하다.

두 번째, ‘건축물 에너지 효율 기술’은 효율개선을 위한 각종 제도의 도입에도 불구하고, 혁신이 늦게 본격화되었으므로, 신규 유망 기술이 초기에도 점진적으로 혁신이 추진될 수 있도록 경제적 유인의 마련이 필요할 것으로 보인다. 냉·난방·공조기기나 가전기기, 승강기 등은 내구재(Durable Goods)적 성격을 갖는 재화로서 단순 소비재와 달리 교체주기에 따라 대체되는 특성을 가지며, 이 특성을 고려할 때 건축물에 포함되는 에너지 사용 기기의 잦은 교체는 순환경제의 측면에서 합리적이라고 보기는 어렵다. 그러나 환경적 부담을 최소화하면서도 새로운 기술에 대한 시장이 형성될 수 있는 인센티브에 대한 고민이 필요하며, 그린리모델링 정책과 연계한 혁신조달 정책의 강화를 고려해 볼 수 있다.

세 번째, ‘건축 및 구조 기술’은 다른 국가와 비교했을 때 안정적인 혁신 전개 양상을 보이는데, 지금까지와 유사한 시장 및 규제환경을 이어나가는 방안이 효과적일 수 있다. 그러나 지속적으로 에너지절약 설계기준을 보완해 왔듯이 기후환경의 변화에 따라 해당 기준의 지속적 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 시장 및 규제환경에 따라 국내에서 충분한 기술혁신이 유도될 수 있도록 투자와 성과관리도 병행되어야 할 것이다.

네 번째, ‘기타 유용 기술’은 혁신의 잠재적 규모를 확대할 수 있는 방안에 대한 고민이 필요하다. 다른 세부 기술군의 혁신은 예상되는 구조적 포화점이 선진국 중에서도 상위권에 해당하나, 동 기술군은 연료전지 및 스마트 그리드에 대한 한국의 정책적 기술개발 추진에도 불구하고 중위권에 그쳤다. 따라서 개별 기술력을 기반으로 건물에서 연료전지 및 스마트 그리드 등의 충분한 응용이 이루어지고, 수요가 창출될 수 있는 제도적 지원이 요구된다. 특히 「제3차 녹색건축물 기본계획」에서 건축물 내의 수소 활용을 핵심 기술개발 분야로 명시하고 있는바, 해당 계획을 실행할 수 있는 전략 수립 시 본 연구결과를 활용하여 다른 국가의 정책을 벤치마킹하는 방안도 고려할 수 있다.

본 연구는 그간 제한적으로 수행되었던 건물부문의 온실가스 감축 기술 혁신과 관련하여, 특히 자료를 바탕으로 일반화된 로지스틱 함수를 추정하여 한국에서 어떻게 혁신이 추진되어 왔는지에 대한 양상을 파악했다는 데 의미가 있다. 특히, 한국뿐만 아니라 미국, 일본 등 주요 선진국과의 비교를 통해 시사점을 도출했다는 점에서 향후 건물부문의 기술정책 수립에 유용한 기초자료로 활용될 수 있다.

그러나 본 연구는 1990년부터 2022년까지 총 33개라는 비교적 적은 수준의 특허 자료를 활용했다는 점에 한계가 있다. 관측치 수를 고려하여 3개의 모수만 추정했다고 하더라도 추정된 모수의 신뢰성에 한계가 있을 가능성이 있다. 특히 2020년대 초반에는 국제적으로 유행한 코로나 바이러스로 인해 기술혁신 활동에도 제약이 발생했을 가능성이 크며, 비록 그 이전부터 특허 출원 수가 감소세를 보이지만 코로나 바이러스 팬데믹으로 인해 기술혁신의 감소세가 커졌을 가능성도 있다. 따라서 OECD 통계 외 별도의 특허 통계자료를 획득하여 분석하거나, 충분한 시계열이 누적되었을 때 혁신의 추이를 다시 추정하여 본 연구의 보완적인 결과로 활용할 필요가 있다.

또한, 본 연구는 패밀리 사이즈가 1 이상인 특허를 대상으로 했다는 점에서 해석에 유의할 필요가 있다. 본 연구는 분석대상 국가의 기술혁신 전체를 분석하기 위해 각 나라의 총 특허 출원 수를 활용하였으며, 특허의 질적 수준은 고려하지 않았다. 혁신의 질적 우수성이나 경쟁력을 고려한 혁신 전개 양상을 분석하기 위해서는 패밀리 사이즈가 2 이상인 자료로 추가적인 분석이 필요하며, 이에 따른 추정 결과는 본 연구의 결과와 차이를 보일 것으로 예상된다.

본 연구의 결과는 개별 세부 기술에 대한 분석이 아니라 기술군에 대한 분석이라는 점에서도 한계를 가진다. 본 연구는 다양한 기술이 포함된 기술군의 특허를 활용하여 분석하였으므로, 도출된 결과 또한 세부 기술의 구조적 특성이 중첩되어 도출되었을 것이다. 따라서 세부 기술별 특성은 본 연구결과와 상이할 수 있으며, 향후 더 상세한 기술 분류에 따른 연구도 수행될 필요가 있다.

마지막으로, 건물부문 온실가스 감축 기술과 관련된 국가별 정책적 맥락을 상호 비교하거나, 이러한 정책이 기술혁신에 미치는 정량적 영향을 분석하는 연구도 요구된다. 본 연구는 한국의 기술혁신이 지니는 상대적인 특성을 파악하고 이를 한국의 맥락에서 해석하는 데 초점을 맞추었으며, 다른 나라의 정책에 대한 논의는 제한적이었

다. 또한, 본 연구는 정책이 기술혁신에 미치는 영향을 정성적으로 해석하는데 그쳤으며, 정량적·객관적인 근거를 제시하지 못한 한계가 있다. 향후 국가별 정책과 그 영향을 심층적으로 분석하는 연구가 수행될 경우, 건물부문 온실가스 감축 기술에 대해 더욱 풍부한 정책적 시사점을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

사사

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: RS-2025-02309164).

Reference

- 2050 Carbon Neutrality Commission. 2021. 2050 Carbon neutrality scenarios. Secretariat of the Carbon Neutrality Commission.
- Andersen B. 1999. The hunt for S-shaped growth paths in technological innovation: A patent study. *J Evol Econ* 9(4): 487-526. doi: 10.1007/s001910050093
- Chan APC, Darko A, Ameyaw EE. 2017. Strategies for promoting green building technologies adoption in the construction industry—An international study. *Sustainability* 9(6): 969. doi: 10.3390/su9060969
- Chen YH, Chen CY, Lee SC. 2010. Technology forecasting of new clean energy: The example of hydrogen energy and fuel cell. *African J Bus Manage* 4(7): 1372. doi: 10.5897/AJBM.9000544
- Choi MJ. 2025. Establishing the 2035 national greenhouse gas reduction target (NDC) - Building sector. Public Discussion Forum on the 2035 NDC - Building sector. Sep 30, 2025. p. 4-10.
- Darko A, Chan APC. 2018. Strategies to promote green building technologies adoption in developing countries: The case of Ghana. *Build Environ* 130: 74-84. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.12.022
- Gregorczyk A. 1998. Richards plant growth model. *J Agron Crop Sci* 181(4): 243-247. doi: 10.1111/j.1439-037X.1998.tb00424.x
- Hernandez-Llamas A, Ratkowsky DA. 2004. Growth of fishes, crustaceans and molluscs: estimation of the von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Richards curves and a new growth model. *Mar Ecol Prog Ser* 282: 237-244. doi: 10.3354/meps282237
- Joint Ministries of Korea. 2021. Enhanced 2030 National Greenhouse Gas Reduction Target (NDC). Oct 18, 2021.
- Kim TH, Jung YS, Jeong HK. 2016. A Trend analysis of Greenhouses gas reduction technique development for building sector in Korea. *Proc 2016 Annu Conf Archit Inst Korea* 36(2): 716-717.
- Markard J. 2020. The life cycle of technological innovation systems. *Technol Forecasting Soc Change* 153: 119407. doi: 10.1016/j.techfore.2018.07.045
- Marinakakis YD. 2012. Forecasting technology diffusion with the Richards model. *Technol Forecasting Soc Change* 79(1): 172-179. doi: 10.1016/j.techfore.2011.02.010
- Martínez-Ardila H, Corredor-Clavijo A, del Pilar Rojas-Castellanos V, Contreras O, Lesmes JC. 2022. The technology life cycle of Persian lime. A patent based analysis. *Heliyon* 8(11): e11781. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11781
- Mingione M, Alaimo Di Loro P, Farcomeni A, Divino F, Lovison G, Maruotti A, Lasinio GJ. 2022. Spatio-temporal modelling of COVID-19 incident cases using Richards' curve: An application to the Italian regions. *Spatial Stat* 49: 100544. doi: 10.1016/j.spasta.2021.100544
- Mingione M, Alaimo Di Loro P, Maruotti A. 2024. A useful parametric specification to model epidemiological data: Revival of the Richards' curve. *Stat Methods Med Res* 33(8): 1473-1494. doi: 10.1177/0962280224126252
- Ministry of Environment. 2025. Provisional national greenhouse gas emissions for 2024: 691.58 million tons. Press release. Aug 20, 2025.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Korea). 2024. The 3rd Basic Plan for Green Buildings. Dec 2024.
- Ministry of Science and ICT (Korea). 2023. Presentation of detailed R&D strategies for key carbon neutrality

- technologies. Press release. Dec 19, 2023.
- Noailly J. 2012. Improving the energy efficiency of buildings: The impact of environmental policy on technological innovation. *Energy Econ* 34(3): 795-806. doi: 10.1016/j.eneco.2011.07.015
- OECD. 2025a. Database document, Patents – technology development, Dataset release date: March 12, 2025.
- OECD. 2025b. Patent search strategies for the identification of selected environment-related technologies (ENV-TECH), climate change adaptation technologies, and similar technologies relevant for the ocean economy. Dataset release date: March 12, 2025.
- Park SG, Lee SU, Park JH. 2004. A software cost estimation using growth curve model (in Korean with English abstract). *KIPS Trans: Part D* 11(3): 597-604. doi: 10.3745/KIPSTD.2004.11D.3.597
- Park SH, Shin H, Choi KS, Kim YM. 2024. Empirical research analysis of building-based decarbonization and energy reduction core technologies to achieve the 2030 Nationally Determined Contributions (in Korean with English abstract). *Korean J Air-Cond Refrig Eng* 36(7): 342-356. doi: 10.6110/KJACR.2024.36.7.342
- Purba NS, Nooraeni R. 2019. Forecasting of quantum dots technology using simple logistic growth curve. In: *International Conference on Trade 2019 (ICOT 2019)*. p. 126-130.
- Republic of Korea. 1979a. Energy Use Regionalization Act. Act No. 3181. superseded by Act No. 3569, partially amended Nov 29, 1982.
- Republic of Korea. 1979b. Enforcement Rule of the Building Act. Ordinance of the Ministry of Construction No. 244, partially amended Sep 5, 1979. superseded by Act Ordinance of the Ministry of Construction No. 279, partially amended Dec 22, 1980.
- Republic of Korea. 1985. Enforcement Decree of the Building Act. Presidential Decree No. 11740. superseded by Presidential Decree No. 12022, partially amended Dec 29, 1986.
- Republic of Korea. 2024. Green Building Construction Support Act. Act No. 20517. amended (by other laws) Oct 22, 2024. superseded by Act No. 21065, amended (by other laws) Oct 1, 2025.
- Richards FJ. 1959. A flexible growth function for empirical use. *J Exp Bot* 10(2): 290-301. doi: 10.1093/jxb/10.2.290
- Shen L, He B, Jiao L, Song X, Zhang X. 2016. Research on the development of main policy instruments for improving building energy-efficiency. *J Cleaner Prod* 112: 1789-1803. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.108
- Sinigaglia T, Martins MES, Siluk JCM. 2022. Technological forecasting for fuel cell electric vehicle: A comparison with electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *World Pat Inf* 71: 102152. doi: 10.1016/j.wpi.2022.102152
- Son JH, Koo JS, Woo AM, Kim TY, Choi G, Ha SJ, Song IO, Oh S, Lim CR. 2023. Research on innovation ecosystems facilitation to achieve the Korea's GHG reduction target: Focusing on the transportation and building sectors. Seoul, Korea: National Institute of Green Technology. Research Report 2023-001.
- Study Group on a System to Promote the Calculation and Evaluation of Life Cycle Carbon of Buildings (Japan). 2025. Interim report on a system for reducing building lifecycle carbon dioxide (draft). Oct 9, 2025.
- Yang Z, Chen H, Mi L, Li P, Qi K. 2021. Green building technologies adoption process in China: How environmental policies are reshaping the decision-making among alliance-based construction enterprises? *Sustainable Cities Soc* 73: 103122. doi: 10.1016/j.scs.2021.103122
- Zach R, Liner Y, Rigby GL, Mayoh KR. 1984. Growth curve analysis of birds: The Richards model and procedural problems. *Canadian J Zool* 62(12): 2429-2435. doi: 10.1139/z84-358

부록

Table A1. AIC values for different time shift parameters $M_0 = T_0 \pm \Delta$

Country	T_0	$\pm \Delta$								
		-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
<i>Technology 0: Climate Change Mitigation Technologies Related to Buildings</i>										
Korea	21	435.3	435.0	434.9	434.7	434.7*	434.7	434.8	435.1	435.6
Japan	23	414.6	413.8	412.9	411.8	410.7	409.5	408.1	406.5	404.8*
Canada	21	282.8	282.3	281.9	281.4	280.9	280.4	280.0	279.5	279.1*
United States	24	447.8	446.2	444.4	442.3	440.0	437.4	434.4	431.0	426.9*
France	21	338.5	338.4	338.4	338.4*	338.4	338.5	338.6	338.7	338.9
Germany	21	411.8	411.3	410.8	410.2	409.6	408.9	408.1	407.3	406.4*
<i>Technology 1: Integration of Renewable Energy Sources in Buildings</i>										
Korea	21	329.5*	330.1	330.8	331.5	332.4	333.2	334.2	335.2	336.4
Japan	24	295.1	294.4	293.6	292.8	291.9	291.0	290.2	289.3	288.5*
Canada	19	206.7*	206.8	206.9	207.1	207.5	208.1	208.8	209.8	211.0
United States	18	340.3*	340.6	340.9	341.4	341.9	342.6	343.4	344.3	345.5
France	19	291.7*	292.6	293.8	295.3	297.1	299.3	302.0	305.1	308.1
Germany	23	361.3	360.3	359.1	357.9	356.5	354.9	353.2	351.4	349.6*
<i>Technology 2: Energy Efficiency in Buildings</i>										
Korea	21	421.7	421.5	421.2	421.1	421.0	421.0*	421.1	421.3	421.7
Japan	23	406.9	406.1	405.3	404.3	403.2	402.0	400.7	399.2	397.5*
Canada	29	264.7	263.5	262.1	260.6	259.2	257.8	256.7	256.3*	257.5
United States	27	432.7	430.4	427.6	424.2	420.1	414.9	408.3	399.6	388.5*
France	24	303.3	302.7	302.0	301.3	300.6	299.8	299.0	298.1	297.3*
Germany	23	380.8	380.4	379.9	379.4	378.8	378.2	377.5	376.7	375.8*
<i>Technology 3: Architectural or Constructional Elements Improving the Thermal Performance of Buildings</i>										
Korea	27	235.7*	236.6	237.5	238.6	239.8	241.1	242.6	244.1	245.8
Japan	9	236.0	236.0	236.0	236.0	236.0	236.0	236.0	236.0	236.0*
Canada	21	132.8*	132.8	132.8	132.8	132.9	132.9	132.9	133.0	133.1
United States	23	243.6	243.2	242.7	242.2	241.6	241.0	240.3	239.6	238.8*
France	22	151.9*	152.0	152.1	152.2	152.3	152.5	152.6	152.8	152.9
Germany	22	205.4	205.2	205.0	204.7	204.4	204.1	203.8	203.5	203.1*
<i>Technology 4: Enabling Technologies in Buildings</i>										
Korea	21	277.3	277.1	277.0	276.8	276.7	276.6	276.6*	276.6	276.7
Japan	23	281.0	280.7	280.4	280.2	279.9	279.7	279.6*	279.6	280.0
Canada	18	182.9*	183.0	183.2	183.4	183.6	184.0	184.4	185.0	185.6
United States	22	302.2	300.9	299.6	298.2	296.7	295.1	293.5	291.8	290.1*
France	24	217.9	217.5	217.1	216.6	216.1	215.6	215.1	214.5	214.0*
Germany	18	243.5	243.4	243.3	243.1	242.9	242.8	242.6	242.4	242.3*

Note: * denotes the minimum AIC value. A time shift parameter M_0 is calculated by $T_0 \pm \Delta$

Table A2. Inequality test results for technology 0

Null Hypothesis	χ^2 Statistics		
	K	B	ν
Korea = Japan	47.033***	0.000	49.850***
Korea = Canada	543.676***	0.976	27.611***
Korea = United States	16.467***	8.620***	99.887***
Korea = France	537.406***	8.791***	23.124***
Korea = Germany	118.613***	0.092	34.987***
Japan = Canada	453.886***	0.847	13.707***
Japan = United States	315.759***	15.750***	12.036***
Japan = France	403.241***	6.991***	3.090*
Japan = Germany	27.656***	0.091	4.532**
Canada = United States	1,060.637***	21.710***	56.945***
Canada = France	33.714***	18.505***	3.125*
Canada = Germany	300.008***	0.242	22.060***
United States = France	1,065.535***	0.313	22.273***
United States = Germany	432.149***	8.807***	0.427
France = Germany	319.987***	16.098***	22.183***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A3. Asymmetry test results for technology 0

Null Hypothesis	χ^2 Statistics					
	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
$\nu = 1$	123.560***	9.546***	0.386	37.931***	0.917	13.755***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A4. Inequality test results for technology 1

Null Hypothesis	χ^2 Statistics		
	K	B	ν
Korea = Japan	190.073***	16.042***	38.247***
Korea = Canada	324.198***	6.880***	14.988***
Korea = United States	121.954***	0.632	15.108***
Korea = France	179.989***	39.137***	1.754
Korea = Germany	2.515	21.980***	32.209***
Japan = Canada	107.256***	9.920***	32.108***
Japan = United States	759.256***	14.472***	42.055***
Japan = France	7.447***	0.599	38.948***
Japan = Germany	139.113***	4.426**	7.430***
Canada = United States	992.231***	7.193***	68.612***
Canada = France	67.877***	30.116***	22.668***
Canada = Germany	209.623***	18.455***	29.659***
United States = France	922.220***	48.314***	2.182
United States = Germany	219.807***	21.942***	34.450***
France = Germany	136.825***	1.783	33.035***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A5. Asymmetry test results for technology 1

Null Hypothesis	χ^2 Statistics					
	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
$\nu = 1$	312.526***	14.836***	118.197***	1,883.574***	272.774***	19.443***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A6. Inequality test results for technology 2

Null Hypothesis	χ^2 Statistics		
	K	B	ν
Korea = Japan	28.117***	0.581	25.182***
Korea = Canada	586.259***	19.373***	27.632***
Korea = United States	2.825*	112.566***	197.830***
Korea = France	538.767***	2.779*	23.976**
Korea = Germany	132.798***	1.052	22.497***
Japan = Canada	426.058***	20.176***	23.030***
Japan = United States	111.426**	151.034***	184.943***
Japan = France	467.824***	7.695***	4.927**
Japan = Germany	96.570***	0.416	11.529***
Canada = United States	2,862.681***	1.134	2.706
Canada = France	21.194**	15.806***	21.846**
Canada = Germany	258.469***	22.101***	17.660***
United States = France	3,390.092***	85.426***	168.324***
United States = Germany	616.091***	121.583***	91.728***
France = Germany	307.076***	15.247***	7.594***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A7. Asymmetry test results for technology 2

Null Hypothesis	χ^2 Statistics					
	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
$\nu = 1$	41.695***	5.572**	25.074***	170.067***	10.640***	14.219***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A8. Inequality test results for technology 3

Null Hypothesis	χ^2 Statistics		
	K	B	ν
Korea = Japan	0.007	10.414***	14.166***
Korea = Canada	142.740***	2.448	1.474
Korea = United States	7.515***	2.022	0.400
Korea = France	124.791***	0.021	23.623***
Korea = Germany	1.196	2.005	7.961***
Japan = Canada	0.232	2.925*	3.944**
Japan = United States	0.040	21.802***	28.651***
Japan = France	0.216	10.960***	0.485
Japan = Germany	0.022	4.086**	11.340***
Canada = United States	148.559***	6.257**	2.406
Canada = France	3.615*	2.277	3.304*
Canada = Germany	40.413***	0.152	9.800***
United States = France	202.205***	2.492	44.686***
United States = Germany	0.751	6.927***	7.298***
France = Germany	34.900***	2.032	11.286***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A9. Asymmetry test results for technology 3

Null Hypothesis	χ^2 Statistics					
	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
$\nu = 1$	0.058	26.007***	1.564	1.482	86.414***	8.000***

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A10. Inequality test results for technology 4

Null Hypothesis	χ^2 Statistics		
	K	B	ν
Korea = Japan	19.260***	0.181	18.126***
Korea = Canada	58.165***	4.981**	7.979***
Korea = United States	606.347***	5.501**	32.783***
Korea = France	29.024***	0.086	6.670**
Korea = Germany	4.733**	19.576***	4.104**
Japan = Canada	140.744***	6.014**	30.083***
Japan = United States	401.015***	6.981***	7.474**
Japan = France	109.254***	0.422	0.040
Japan = Germany	6.353**	18.141***	10.638***
Canada = United States	920.680***	0.136	108.081***
Canada = France	2.394	1.058	11.417***
Canada = Germany	114.961***	13.656***	25.764***
United States = France	788.134***	0.878	2.101
United States = Germany	519.361***	25.288***	6.193**
France = Germany	85.402***	6.181**	4.533**

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

Table A11. Asymmetry test results for technology 4

Null Hypothesis	χ^2 Statistics					
	Korea	Japan	Canada	United States	France	Germany
$\nu = 1$	4.392**	15.246***	99.416***	28.717***	5.399**	0.769

Note: ***, **, and * denote rejection of the null hypothesis at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.