

확산모형을 이용한 주택용 상계 태양광 설비 보급량 예측1)

문형빈* · 안재균**† · 이철용***†

*부경대학교 데이터정보과학부 조교수,

에너지경제연구원 에너지탄소중립연구본부 재생에너지정책연구팀 연구위원, *부산대학교 경영학과 부교수

Forecasting Residential Solar Photovoltaic (PV) Capacity for Net Metering in South Korea

Moon, HyungBin* · Ahn, Jaekyun**† and Lee, Chul-Yong***†

*Assistant Professor, Division of Data and Information Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

**Research Fellow, Renewable Energy Research Team, Energy Carbon Neutrality Research Group,

Korea Energy Economics Institute, Ulsan, Korea

***Associate Professor, School of Business, Pusan National University, Busan, Korea

ABSTRACT

Most countries around the world are implementing carbon neutrality to respond to climate disasters. Solar photovoltaic (PV) plays an important role in carbon neutrality because it is easy to install and its cost is rapidly declining. Residential solar PV has the advantage of not requiring investment in transmission and distribution facilities and reducing the maximum load by lowering peak power demand. However, residential solar PV generation is variable and cannot be reliably predicted, causing uncertainty in the power system. Therefore, it is important to accurately forecast the size of residential solar PV capacity in order to prepare countermeasures that can enhance the stability of such power systems from a long-term perspective. This study forecasts the capacity of residential solar PV net metering in South Korea using diffusion models. The Gompertz model provided the best fit for the diffusion pattern of residential solar PV net metering in South Korea, outperforming the Bass and Logistic models. When the Gompertz model was used to predict the residential solar PV net metering capacity over the next 15 years, an increase from 2.1 GW (8.8% of total solar PV) in 2022 to 12.0 GW (15.4% of total solar PV) in 2036 was obtained. Therefore, this study suggests that it is necessary to consider the size and distribution of residential solar PV net metering in power system planning and operation, as it will play a major role in future power systems in South Korea.

Key words: Green House Gas Reduction, Forecasting, Residential Solar PV, Diffusion model, Net Metering

1. 서론

전 세계적으로 기후재난에 대응하기 위해서 장기적으로 탄소중립을 이행하고 있다. 이러한 과정에서 재생에너지는 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 특히 태양광 에너지는 설비 설치가 용이하고 가격이 빠르게 하락하고 있어 성장 속도가 매우 빠를 것으로 전망된다(IEA, 2022). 재생에너

지의 장점 중의 하나가 에너지 소비지에 직접 설치할 수 있는 분산 에너지임을 고려해 볼 때, 소규모 자가용 태양광 발전설비는 보급을 독려해야 할 에너지 장치라고 할 수 있다(REN21, 2022). 국내 소규모 자가용 태양광 발전설비는 설치보조금 지원사업과 상계거래 제도 도입 등으로 보급이 증가하고 있다. 상계거래는 태양광 설비로 생산한 전력을 소비한 후 남은 전력량을 수전량에서 차감하는 형태로 보

†Corresponding author : cylee7@pusan.ac.kr (2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea. Tel. +82-51-510-2568)

ORCID 문형빈 0000-0001-5900-8136
안재균 0009-0009-0420-4602

이철용 0000-0003-0870-0039

†Co-Corresponding author : jkahn@keei.re.kr (405-11, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44543, Korea. Tel. +82-52-714-2265)

1) 본 논문은 Korea Energy Economics Institute (2022)의 일부 내용을 발전시킨 연구입니다.

Received: March 8, 2023 / Revised: April 10, 2023 / Accepted: April 20, 2023

상하는 제도로 2005년에 도입되어 꾸준히 증가하고 있다 (Korea Energy Economics Institute, 2022). 주택용 상계 태양광 설비는 2014년 1월 약 200 MW에서 2021년 12월 시점에 약 1,584 MW 규모로 성장하였다. 일반용과 산업용은 2014년 1월에 각각 약 9 MW, 0.2 MW에서 2021년 12월 각각 약 299 MW, 33 MW로 증가하였다. 일반용과 산업용에 비해 주택용 태양광 설비가 월등하게 보급률이 높은 이유는 상대적으로 높은 전기요금 단가로 전기요금 절감수익이 타 용도에 비해 높고, 3 kW의 소규모 설비로 설치가 용이하며, 단독주택 소유 및 거주자는 태양광 설치로 인한 수혜를 직접적으로 받을 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

자가용 태양광 발전설비는 중장기적 관점에서 최대전력 수요를 낮춰 최대부하를 담당하는 피크발전기와 송배전 설비 투자를 회피할 수 있는 장점을 지니고 있다. 하지만 상계 태양광과 같은 비계측 발전설비가 점차 증가하게 되면 간헐적인 발전특성과 일몰이후 발전량 감소 등으로 전체 계통운영에 어려움을 겪게 된다. 안정적인 전력계통 운영을 위해서는 정확한 전력수요 예측이 필수적인데, 측정되지 않은 자가용 태양광 발전량이 전력 순수요(전력수요량 - 자가용 태양광 발전량) 예측을 어렵게 만들기 때문이다. 이에 따라 상계 태양광 설비의 정확한 예측은 우리나라 계통 계획과 운영에 반드시 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 중장기 예측에 많이 활용되고 있는 확산 모형을 이용하여 주택용 상계 태양광 설비 보급량을 추정하는 것이다.

본 연구의 기여점은 세 가지로 요약된다. 첫째, 확산 모형이 다양한 분야에 활용되었음에도 불구하고, 국내 주택용 상계 태양광 설비 예측에는 국내 최초로 시도된다. 태양광 설비는 기존 혁신들의 확산 패턴과 유사하게 S자 커브 형태를 보이므로 확산 모형 적용이 타당하다. 둘째, 수많은 확산 모형 중 대표적인 확산 모형인 Bass 모형, Logistic 모형, Gompertz 모형을 추정하고 적합성이 가장 뛰어난 모형을 선택하여 예측에 사용된다. 대부분의 연구가 하나의 예측 모형을 단순히 적용하여 전망을 시도한다는 점에서 본 연구 내용이 차별성을 가진다. 셋째, 재생에너지의 변동성이 계통에 미치는 영향이 점차 커지고 있어, 주택용 상계 태양광 설비 예측은 국내 전력수급 및 송배전망 계획 수립에 중요한 정책적 시사점을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 유사 선행 연구를 고찰하고, 제3장에서는 연구방법론을 소개한다. 제4장에서는 확산모형 추정결과와 주택용 상계 태양광 설비 보급량 전망치를 보여준다. 마지막으로 제5장 결론에서는 본 연구의 내용을 요약하고 한계점을 고찰한다.

2. 선행연구 고찰

에너지 분야에서 확산모형은 새로운 에너지 기술 및 서비스의 확산 양상을 분석하고 이에 기반하여 미래를 예측하려는 목적으로 활용되었다. 특히 신재생 발전원의 확산을 분석하였던 연구를 요약하면 다음과 같다. 먼저, 신재생 에너지원별 발전량 또는 설비 규모를 예측하기 위하여 확산모형을 적용한 해외 연구 사례는 다음과 같다. Cherp et al.(2021)는 전 세계 60개국을 대상으로 Logistic과 Gompertz 모형을 적용하여 국가별 태양광 및 풍력 발전 설비의 확산 패턴을 분석하고, 국가별 태양광 및 풍력 발전 설비의 확산 단계를 비교 분석하였다. Madsen & Hansen (2019)는 독일, 이탈리아, 스페인에서 태양광 및 태양열 에너지 발전량의 확산 패턴을 Logistic 모형을 활용하여 분석하였다. 해당 연구에서는 유럽 3개국에서 태양에너지 발전량은 해당 분야의 투자 규모에 유의한 영향을 받는다는 점을 밝혔다. 국내의 신재생에너지 발전량 예측에도 확산모형을 적용한 연구들도 다수 존재한다. Huh & Lee (2014)는 우리나라 전력 및 열 부문에서 신재생에너지의 확산을 분석하고 미래 수요를 예측하였다. 구체적으로, 전력 부문에서 태양광, 풍력, 연료전지, 열 부문에서 태양광, 지열 등 신재생에너지의 수요 패턴을 Bass 모형으로 추정하고 이를 활용하여 부문별 각 신재생에너지의 2035년 수요를 예측하였다. Hwang et al.(2005)는 우리나라의 태양광, 태양열, 바이오, 소수력, 풍력 등 신재생에너지 수요를 확산모형을 활용해 모사하였다. 특히 태양광에 대해서는 여러 시장 잠재량 시나리오를 설정하고 이에 따른 미래 수요를 예측하였다. Woo et al.(2022)는 우리나라의 태양광과 풍력 발전 설비 규모를 예측하기 위하여 과거 데이터를 Logistic과 Bass 모형 등의 확산모형에 적용하였다. 해당 연구는 정부의 계획과 모형의 예측 결과를 비교함으로써 정부 정책을 평가하였다. 또한 수소 연료 등 친환경 연료, 신재생 발전 기술이 적용된 관개용수 펌프 등 신재생 발전을 동력으로 하는 제품의 확산을 예측하는 데에도 확산모형이 적용된 사례가 있다. Lee et al.(2021)은 수송용 수소 연료의 수요를 예측하는 데에 확산모형을 활용하여 수소자동차의 대수를 예측하여 활용하였다. 구체적으로, 전기자동차의 확산 패턴을 Gompertz, Logistic, Bass 모형으로 추정하고 이를 수소자동차에 적용하여 미래의 차종별 수소자동차 대수를 예측하고 차종별 연비를 고려하여 수송용 수소 연료 수요를 최종적으로 예측하였다. Purohit & Kandpal (2005)는 신재생 발전을

동력으로 하는 관개용수 펌프 기술의 수요를 확산모형을 활용하여 예측하였다. 구체적으로, 태양광, 풍차, 바이오 가스, 천연가스 등 4개의 서로 다른 동력으로 작동하는 관개용수 펌프 기술 각각에 대한 수요를 Bass, Gompertz, Logistic, Pearl 모형을 활용하여 예측하였다.

이상의 기존 연구들은 확산모형을 활용하여 대체로 국가 단위에서 개별 또는 여러 신재생 발전원의 확산을 예측하였다는 점을 알 수 있다. 그 중에서 태양에너지의 확산을 예측한 연구들은 일반용, 산업용, 주택용 등의 용도 또는 설치 형태를 고려하지 않고 국가 단위의 총발전량 또는 설비 규모를 예측한 것으로 분석된다. 앞서 언급한 바와 같이, 국내에서 주택용 상계 태양광의 규모는 일반용 및 산업용과 비교해 월등히 크나 예측이 되지 않아 안정적인 계통 운영을 위해서는 주택용 상계 태양광의 규모에 대한 정교한 예측이 요구된다. 이에 본 연구에서는 확산모형을 활용하여 국내 주택용 상계 태양광 설비의 확산 패턴을 추정하고 이를 활용하여 미래 시점의 설비 규모를 예측하고자 한다.

3. 연구 방법론

3.1. 연구 절차

본 연구는 Fig. 1의 절차에 따라 진행된다. 먼저, 과거 주택용 상계 태양광 설비 실적치를 수집하고(2014~2021년), 이를 확산모형에 적용하여 모형을 추정한다. 이때 확산모형으로는 Bass, Logistic, Gompertz 모형을 활용한다. 다음으로, 확산모형의 추정 결과를 활용하여 분석 기간(2014~2021년)에 대한 추정치를 모형별로 도출하고 이를 실적치와 비교한다. 즉, 3개의 확산모형에 대해 MAPE (mean absolute percentage error)를 계산하고, 이를 비교하여 주택용 상계 태양광 설비의 확산 패턴을 가장 잘 묘사하는 모형을 선별한다. 마지막으로, 예측력이 가장 좋은 모형을 활용하여 미래 시점(2022~2036년)에 대해 주택용 상계 태양광 설비 보급량을 예측한다.

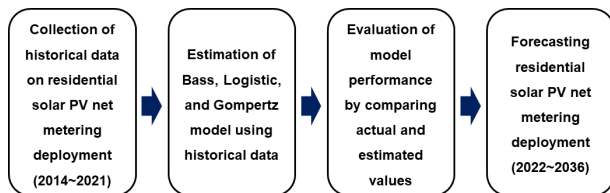


Fig. 1. Flow Diagram of Analysis

3.2. 데이터

전술한 바와 같이, 본 연구의 확산모형 추정에는 2014~2021년의 주택용 상계 태양광 설비 실적치가 활용되었다. 추정에 활용된 주택용 태양광 설비 규모의 과거 추이는 Fig. 2와 같다. 본 데이터는 한국전력의 내부자료로부터 확보하였다.

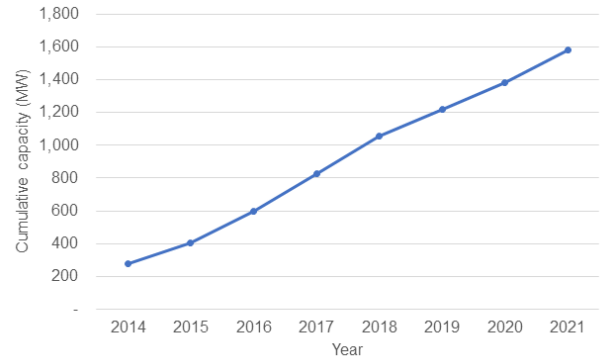


Fig. 2. Cumulative capacity of residential solar PV net metering in South Korea (2014 ~ 2021)

3.3. 연구 모형

본 연구에서는 Bass, Logistic, Gompertz 모형 등 3가지 확산모형을 도입하여 주택용 상계 태양광 설비의 확산 패턴을 묘사하였다.

먼저, Bass 모형은 신기술 등 혁신의 확산에 영향을 미치는 요인으로 외적 영향과 내적 영향이 있음을 가정한 모형으로서, t 시점에서 혁신의 신규 보급량($\frac{dN(t)}{dt}$)는 식 (1)과 같음을 가정한 모형이다(Bass, 1969). 여기서, $N(t)$ 는 t 시점에서 혁신의 누적 보급량, m 은 시장 잠재량(전체 시장 규모), p 는 혁신 효과, q 는 모방 효과를 의미한다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left[p + \frac{q}{m} N(t) \right] [m - N(t)] \quad (1)$$

식 (1)의 우변을 전개하여 이차식의 형태로 표현하면 식 (2)와 같다. Bass 모형의 추정에서 각 시점은 이산적이므로, 좌변에서는 t 시점에서 혁신의 신규 보급량($Y(t)$), 우변에서는 $t-1$ 시점에서 혁신의 누적 보급량($N(t-1)$)을 고려한다. 식 (2)를 최소자승법(ordinary least squares, OLS)을 이용하여 추정하면, Bass 모형의 파라미터 a, b, c 를 얻을 수 있다. 여기서 $a = pm, b = q - p, c = -q/m$ 의

관계식을 이용하여 추정된 a, b, c 로부터 m (시장 잠재량), p (혁신 효과), q (모방 효과)를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= Y(t) = pm + (q-p)N(t-1) \\ &\quad + (-q/m)[N(t-1)]^2 \\ &= a + bN(t-1) + c[N(t-1)]^2 \end{aligned} \tag{2}$$

다음으로, Logistic 모형은 혁신의 확산에 내적 영향만이 존재함을 가정한 확산모형이다(Mansfield, 1961). 즉, 혁신의 확산은 혁신을 이미 채택한 수용자들과 아직 채택하지 않은 잠재 수용자 간의 상호 작용에 의해 이루어진다는 것을 가정한 모형이다. Logistic 모형에서 가정한 t 시점에서 혁신의 신규 보급량은 식 (3)과 같다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left[\frac{a}{m}N(t) \right] [m - N(t)] \tag{3}$$

식 (3)의 미분방정식을 풀어 t 시점에서 혁신의 누적 보급량($N(t)$) 함수를 도출하면 식 (4)와 같다.

$$N(t) = m \left[\frac{1}{1 + e^{-a(t-\tau)}} \right] = m \left[\frac{1}{1 + e^{-at+b}} \right] \tag{4}$$

여기서 m (시장 잠재량)은 외생적으로 주어진다고 가정하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 t 의 선형함수로 표현될 수 있다. 식 (5)를 최소자승법을 이용하여 추정하면 Logistic 모형의 파라미터 a, b 를 얻을 수 있다. 이때 a 는 모방 효과의 정도를 나타내며, $b/a(=\tau)$ 는 누적 보급량($N(t)$)의 기울기의 부호가 변하는 시점(변곡점)을 나타낸다.

$$\ln\left(\frac{m - N(t)}{N(t)}\right) = -a(t - b) \tag{5}$$

Gompertz 모형도 Logistic 모형과 같이 내적 영향만이 혁신의 확산에 영향을 미침을 가정한 확산모형이다. Logistic 모형이 t 시점에서 혁신의 신규 보급량이 t 시점에서 잠재 채택자의 수($m - N(t)$)에 비례한다고 가정한 반면, Gompertz 모형은 t 시점에서 누적 채택자의 수 대비 시장 잠재량의 비중($\frac{m}{N(t)}$)에 비례한다고 가정한다는 점이 차별된다. 이에 따라 Logistic 모형이 변곡점을 중심으로 대칭된 확산 패턴을 묘사하는 것과는 달리, Gompertz 모형은 비대칭적인 확산 패턴을 상정하게 된다. Gompertz 모형에서 가정한 t 시점에서 혁신의 신규 보급량은 식 (6)과 같다(Gompertz, 1825).

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left[\frac{a}{m}N(t) \right] \ln\left[\frac{m}{N(t)} \right] \tag{6}$$

식 (6)의 미분방정식을 풀어 식 (7)과 같은 $N(t)$ 의 함수를 도출하고, m (시장 잠재량)을 외생적으로 가정하여 t 의 선형함수로 표현하면 식 (8)과 같다. 마찬가지로 식 (8)을 최소자승법을 이용하여 추정하면 Gompertz 모형의 파라미터 a, b 를 얻을 수 있다. 여기서도 a 는 모방 효과의 정도를, $b/a(=\tau)$ 는 누적 보급량($N(t)$)의 변곡점을 의미한다.

$$N(t) = me^{-e^{-a(t-\tau)}} = me^{-e^{-at+b}} \tag{7}$$

$$\ln\left(-\ln\left(\frac{N(t)}{m}\right)\right) = -at + b \tag{8}$$

4. 연구 결과

4.1. 확산모형 추정 결과

전술한 바와 같이, 본 연구에서는 우리나라의 2014년부터 2021년까지의 주택용 상계 태양광 설비 실적치를 활용하여 Bass, Logistic, Gompertz 모형 등 3가지 확산모형을 추정하고 각 모형의 예측 성능을 비교한다. 3가지 모형 중 예측 성능이 가장 뛰어난 모형을 선별하고 이를 활용하여 향후 15년(2022 ~ 2036년) 동안의 우리나라 주택용 상계 태양광 설비 규모를 예측한다.

Bass, Logistic, Gompertz 모형의 파라미터들은 각각 식 (2), (6), (9)를 최소자승법으로 추정하여 구할 수 있으며, Logistic과 Gompertz 모형의 경우에는 시장 잠재량 m 을 44.2 GW로 외생적으로 설정하였다. 이는 선행연구에서 주택용 태양광 시장의 잠재량을 44.2 GW로 산출한 결과를 활용한 것이다(Korea Energy Economics Institute, 2018).

각 모형의 추정 결과는 Table 1 ~ 3과 같다. 먼저, Bass 모형의 경우 결정계수(R^2) 값이 0.329로 3개 모형 중에서 설명력이 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 추정된 모형 파라미터들이 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 다음으로, Logistic 모형 추정 결과 결정계수(R^2)는 0.952로 Bass 모형보다는 설명력이 월등히 높은 것으로 나타났다. 또한 Logistic 모형의 두 파라미터는 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 마지막으로 Gompertz 모형의 경우 결정계수(R^2)가 0.971로 나타나 3가지 모형 중에서 설명력이 가장 높았다. 즉, 이는 3가지 모형 중에서는 Gompertz 모형이 주택용 상계 태양광 설비의 확산 패턴을 가장 잘 묘사하는 것을 의미한다. 또한 Gompertz 모형의

파라미터들은 통계적으로도 유의한 것으로 나타났다.

주택용 상계 태양광 설비 보급량 예측모형으로서 3가지 모형의 성능을 정교하게 평가하기 위하여, 실제값과 모형의 예측값을 비교함으로써 모형의 예측 성능을 평가할 수 있는 평균절대비오차(mean absolute percentage error, MAPE)을 평가지표로 활용하였다. MAPE의 산식은 (10)과 같다.

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (9)$$

여기서 A_t 는 t 시점에서의 실제값, F_t 는 모형을 통해 산출된 예측값, n 은 시점 수를 의미한다.

3가지 확산모형의 MAPE를 비교한 결과는 Table 4와 같다. MAPE는 그 값이 낮을수록 예측값과 실제값 사이의 차이가 작다는 것을 의미하므로, 낮은 MAPE 값을 가진 모형이 예측모형으로서 성능이 우수하다고 할 수 있다. 따라서 Table 4의 결과를 통하여 주택용 상계 태양광 설비 보급량 예측모형으로서의 성능은 Gompertz, Logistic, Bass 모형 순으로 우수한 것으로 보인다. 이는 결정계수 (R^2)를 통해 확인한 각 모형의 설명력 평가 결과와도 일관된 결과로 판단된다. 즉 설명력이 높은 모형이 예측력도 우수한 것으로 나타났다.

Table 1. Estimation results of Bass model

(R-squared = 0.329)

Parameter	Coefficient (Standard Error)	p-value	95% confidence interval
a	86487.597 (73632.024)	0.305	[-117947.675, 290922.869]
b	0.289 (0.207)	0.236	[-0.287, 0.864]
c	0.000 (0.000)	0.249	[0.000, 0.000]

Note: ***, **, * indicates statistically significant at 1%, 5%, and 10% significance level

Table 2. Estimation results of Logistic model

(R-squared = 0.952)

Parameter	Coefficient (Standard Error)	p-value	95% confidence interval
m	44,200,000	-	-
a	0.251*** (0.023)	0.000	[0.195, 0.307]
b	9.140*** (0.474)	0.000	[7.981, 10.300]

Note: ***, **, * indicates statistically significant at 1%, 5%, and 10% significance level

Table 3. Estimation results of Gompertz model

(R-squared = 0.971)

Parameter	Coefficient (Standard Error)	p-value	95% confidence interval
m	44,200,000	-	-
a	0.060*** (0.004)	0.000	[0.050, 0.071]
b	2.618*** (0.088)	0.000	[2.402, 2.833]

Note: ***, **, * indicates statistically significant at 1%, 5%, and 10% significance level

Table 4. MAPE of diffusion models

	Bass	Logistic	Gompertz
MAPE	14.99%	11.53%	8.82%

주택용 상계 태양광 설비의 확산 패턴을 가장 잘 묘사하는 확산모형이 Gompertz 모형이라는 것은 주택용 상계 태양광 설비의 확산이 정부나 기업의 광고 등 외적 영향 보다는 기존 채택자의 평가 등과 같은 내적 영향을 주로 받는다는 것을 시사한다. 즉, 가구가 주택용 상계 태양광 설비를 도입하는 의사 결정은 정부의 정책 홍보 및 광고에 의하기보다는 주로 이미 도입한 가구로부터 관측된 편익 또는 도입 가구의 의견에 영향을 받을 가능성이 크다는 것이다. 또한 Gompertz 모형과 동일하게 확산에 있어 내적 영향만을 고려한 Logistic 모형보다 Gompertz 모형의 예측 성능이 더욱 뛰어난 것은 주택용 상계 태양광 설비의 확산 패턴이 비대칭적인 특성을 가지고 있다는 것을 보여준다. 다시 확산모형 간의 특성을 살펴보면, Logistic 모형의 경우 누적 보급량이 시장 잠재량의 절반에 도달할 때($N(t) = m/2$) 변곡점이 발생하는 반면, Gompertz 모형은 누적 보급량이 m/e 에 도달할 때($N(t) = m/e$)에 변곡점이 발생한다. 이는 Gompertz 모형이 Logistic 모형보다 신규 보급량($Y(t)$)이 최대가 되는 시점에 빨리 도달하고 그 이후 완만하게 신규 보급량이 감소하는 확산 패턴을 묘사하고 있다는 것을 의미한다. 따라서 주택용 상계 태양광 설비는 초기에 빠르게 증가하다가 최대 신규 보급량

이후 완만하게 보급 속도가 완만하게 감소하는 형태로 확산한다고 할 수 있다.

4.2. 주택용 상계 태양광 설비 보급량 전망

다음으로 예측모형의 성능이 가장 우수한 모형인 Gompertz 모형의 추정 결과를 활용하여 향후 15년(2022~2036년) 동안의 우리나라 주택용 상계 태양광 설비 규모를 예측한다. Table 5에서 (A)는 Gompertz 모형을 활용하여 2022~2036년에 대해 우리나라 주택용 상계 태양광 설비 규모를 예측한 결과이다. 예측 결과, 예측 기간에서 우리나라의 주택용 상계 태양광 설비는 매년 약 410~930 MW 증가할 것으로 전망되며, 연간 신규로 증가하는 설비 규모는 예측 기간 내에서는 점차 증가할 것으로 보인다. 연평균으로 보면, 약 13.2%씩 설비 규모가 증가할 것으로 예측되었다.

Table 5의 (B)는 2023년 1월 발표된 제10차 전력수급기본계획에서 제시된 사업용 태양광 누적 설비 예측량이다. 제10차 전력수급기본계획에 따르면, 우리나라의 사업용 태양광 설비 규모는 2022년 22.1 GW에서

2036년 65.7 GW 수준으로 증가할 것으로 예상되며, 이를 연평균으로 보면 약 8.1% 증가하는 수준이다. 즉, 본 연구에서 예측한 주택용 상계 태양광 설비의 증가 속도가 제10차 전력수급기본계획에서 제시된 사업용 태양광 설비의 증가 속도보다 더욱 가파르다는 것을 알 수 있다.

Table 5의 (D)는 우리나라 전체 태양광 설비 중에서 주택용 상계 태양광이 차지하는 비중을 나타낸다. 즉 본모는 본 연구에서 예측한 주택용 상계 태양광의 규모에다가 제10차 전력수급기본계획에서 제시된 사업용 태양광의 규모를 더한 값을 활용하고, 분자에는 예측된 주택용 상계 태양광의 규모를 활용하여 구한 비중이다. 분석 결과, 2022년 주택용 상계 태양광이 전체 태양광 설비 중 약 8.8% 차지한 반면, 2036년에는 그 비중이 15.4%까지 증가할 것으로 전망된다. 이는 예측되지 않는 주택용 상계 태양광이 전력계통에 미치는 영향이 향후 더욱 커질 것임을 시사는 결과이며, 추후 주택용 상계 태양광 비중 확대에 따른 계통 안정성 확보방안 마련이 시급하다는 것을 의미한다.

Table 5. Estimated cumulative capacity of residential solar PV net metering in South Korea (2022 ~ 2036)

(unit: MW)

Year	Residential solar PV net metering (A)	Commercial solar PV (B)	Solar PV total (C=A+B)	Share of residential solar PV net metering (D=A/C)
2022	2,127	22,100	24,227	8.8%
2023	2,541	25,150	27,691	9.2%
2024	3,003	28,200	31,203	9.6%
2025	3,515	31,250	34,765	10.1%
2026	4,076	34,300	38,376	10.6%
2027	4,686	37,350	42,036	11.1%
2028	5,344	40,400	45,744	11.7%
2029	6,048	43,450	49,498	12.2%
2030	6,794	46,500	53,294	12.7%
2031	7,581	49,700	57,281	13.2%
2032	8,405	52,900	61,305	13.7%
2033	9,263	56,100	65,363	14.2%
2034	10,150	59,300	69,450	14.6%
2035	11,063	62,500	73,563	15.0%
2036	11,997	65,700	77,697	15.4%

5. 결론 및 시사점

태양광은 소규모로 설치할 수 있으며 경제성이 우수하여 우리나라에서 주택용 재생에너지원으로서 빠르게 확산하고 있다. 이와 함께 기후변화 대응, 탄소중립 이행에 있어 재생에너지의 역할이 크므로 정부도 상계제도 등을 도입하여 주택용 태양광의 확산을 촉진하고 있는 상황이다. 하지만 주택용 상계 태양광의 경우 미계측 발전설비이므로 전력계통 측면에서는 불확실성으로 작용하고 있다. 즉 태양광발전의 간헐성과 주택용 상계 태양광 가구의 전력 소비 변화에 따라 전력계통에 미치는 영향이 매우 다르므로, 주택용 상계 태양광 발전설비로부터 유입되는 전력은 전력계통 측면에서는 통제할 수 없는 영향 요인이라고 할 수 있다. 따라서 장기적 관점에서 전력계통의 안정성을 강화할 수 있는 대응 방안을 마련하기 위해서는 주택용 상계 태양광 발전설비의 규모를 정교하게 예측하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

이에 본 연구는 다양한 분야에서 중장기 예측에 활용되고 있는 확산모형을 이용하여 우리나라 중장기 주택용 상계 태양광 설비의 규모를 추정하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, Bass, Logistic, Gompertz 등 확산모형 중에서 우리나라 주택용 상계 태양광의 확산 패턴을 가장 잘 묘사하는 모형은 Gompertz 모형으로 나타났다. 이는 주택용 상계 태양광 설비의 확산이 정부의 정책 홍보 및 광고 등(외적 영향)에 영향을 받아 이루어지기보다는 주로 이미 도입한 가구로부터 관측된 편익 또는 도입 가구의 의견 등(내적 영향)에 영향을 받을 가능성이 크다는 것을 시사한다. 또한 우리나라 주택용 상계 태양광의 확산은 신규 보급량이 최대가 되는 시점을 기준으로 대칭적인 특성을 보인다기보다는 신규 보급량 최대가 되는 시점까지는 확산이 빠르게 진행되다가 이후 확산 속도가 완만하게 줄어드는 형태를 띠고 있다는 것을 알 수 있다. 둘째, 과거 시점(2014~2021년)에 대해 예측 성능이 가장 우수한 것으로 나타난 Gompertz 모형을 활용하여 미래 시점(2022~2036년)의 주택용 상계 태양광 설비의 규모를 예측한 결과, 2022년 2.1 GW에서 2036년 12.0 GW 수준으로 증가할 것으로 전망되었다. 이는 매년 약 410~930 MW 규모의 주택용 상계 태양광 설비가 증가한다는 결과이며, 연간 신규로 증가하는 설비 규모는 예측 기간 내에서 점차 증가할 것으로 예상된다. 이를 연평균으로 따지면 약 13.2%의 성장률을 보이는 수준이다. 셋째, 2023년 1월 발표된 제10차 전력수급기본계획에서 제시된

사업용 태양광 누적 설비 예측량을 고려하여 전체 태양광 설비 중에서 주택용 상계 태양광이 차지하는 비중을 예측하여 보면, 2022년 약 8.8%에서 2036년 15.4%까지 증가할 것으로 전망된다. 이는 제10차 전력수급기본계획에서 예측된 사업용 태양광 설비의 연평균 증가율이 약 8.1%인 것에 비해 본 연구에서 예측된 주택용 상계 태양광 설비의 연평균 증가율이 약 13.2%로 더욱 가파른 것에 기인한 것으로 보인다.

본 연구 결과에 기반하면 향후 주택용 상계 태양광 발전 설비는 향후 가파르게 증가하여 향후 15년 이내에 전체 태양광의 약 15.4% 수준까지 늘어날 전망이다. 이를 고려한 전력계통 계획 및 운영이 필요할 것이다. 예를 들어, 태양광 발전의 변동성을 고려하여 계통 안정성 강화를 위한 에너지 저장 기술을 도입하고자 경우, 계측이 가능한 태양광 설비만을 고려하게 되면 상당 부분의 태양광 변동성을 간과하게 될 것이다. 따라서 에너지 저장 기술의 규모와 설치 장소 등을 결정할 때 주택용 상계 태양광의 규모와 분포를 고려하여야 할 것이다. 뿐만 아니라, 전력망 구축, 상계 태양광 가구에 대한 요금제도 설계 등에 있어서도 주택용 상계 태양광 설비의 규모와 전력계통에 미치는 영향을 종합적으로 고려할 필요가 있다는 점을 본 연구는 시사한다.

끝으로 본 연구가 가진 한계점과 추후 연구주제를 제안하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서 도입한 확산모형은 확산에 영향을 미칠 수 있는 개별 요인들의 영향을 세부적으로 살펴보는 데에는 한계가 있다. 즉 주택용 상계 태양광의 확산에는 정부의 지원금, 상계 요금제도, 대체재의 확산, 지리적 제약 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 영향을 줄 수 있음에도 불구하고 본 연구의 모형으로는 이들의 영향을 확인하지 못하였다. 추후 연구를 통해 세부 정책 수단이 확산에 미치는 영향을 확인하는 것은 주택용 상계 태양광 확산과 관련한 정부의 정책을 평가하고 설계하는 데에 유의미한 함의를 줄 수 있을 것으로 기대된다. 둘째, 주택용 상계 태양광의 확산이 전력계통에 미치는 영향을 판단하기 위해서는 태양광발전 패턴과 함께 주택용 상계 태양광을 설치한 가구의 전력 소비 패턴을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 다루지 못하였으므로 이를 추후 연구주제로서 남겨둔다.

사사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Bass FM. 1969. A new product growth for model consumer durables. *Management science* 15(5): 215-227.
- Cherp A, Vinichenko V, Tosun J, Gordon JA, Jewell J. 2021. National growth dynamics of wind and solar power compared to the growth required for global climate targets. *Nature Energy* 6(7): 742-754.
- Gompertz B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 115: 513-583.
- Huh SY, Lee CY. 2014. Diffusion of renewable energy technologies in South Korea on incorporating their competitive interrelationships. *Energy Policy* 69: 248-257.
- Hwang SW, Won JR, Kim JH. 2005. Diffusion state estimation of new & renewable energy using diffusion model. In *Proceedings of the KIEE Conference*, 320-322. The Korean Institute of Electrical Engineers.
- IEA (International Energy Agency). 2022. *World Energy Outlook*, Paris.
- Korea Energy Economics Institute. 2018. Analysis of market potential and implementation costs of solar energy considering regional economic feasibility, KEEI Basic research report.
- Korea Energy Economics Institute. 2022. Analysis of electricity production and consumption characteristics of households with residential solar PV, KEEI Basic research report.
- Lee CY, Jeong D, Shin J. 2021. Forecasting hydrogen demand for transportation using the diffusion model and the CO₂ reduction effect. *Journal of Climate Change Research* 12(5-1): 363-370.
- Madsen DN, Hansen JP. 2019. Outlook of solar energy in Europe based on economic growth characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 114: 109306.
- Mansfield E. 1961. Technical change and the rate of imitation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 741-766.
- REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century). 2022. *Renewables Global Status*, Paris.
- Purohit P, Kandpal TC. 2005. Renewable energy technologies for irrigation water pumping in India: projected levels of dissemination, energy delivery and investment requirements using available diffusion models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9(6): 592-607.
- Woo JR, Lee H, Huh SY. 2022. Forecasting solar photovoltaic and wind power deployment in South Korea: An innovation diffusion approach. *Journal of Energy Engineering* 31(1): 16-29.