

비교유추법을 이용한 국내 신재생에너지 확산과정 및 필요 R&D 투자규모 예측

구상희¹ · 이덕주^{1*} · 김태구²

¹경희대학교 산업경영공학과 / ²합동참모본부 분석실험부

Forecasting the Diffusion Process and the Required Scale of R&D Investment of Renewable Energy in Korea Using the Comparative Analogy Method

Sanghoi Koo¹ · Deok Joo Lee¹ · Taegu Kim²

¹Department of Industrial and Management Systems Engineering, Kyung Hee University

²Analysis and Experiment Directorate, Joint Chiefs of Staff

The purpose of this study is to forecast the penetration rate of renewable energy and a reasonable scale for the R&D investment plan in Korea based on the relationship between the diffusion and R&D investments drawn by analogy from empirical cases of advanced countries. Among numerous candidate developed countries, the German market was chosen based on the similarity of the diffusion patterns to those of the Korean plan. We then figured out how the investment triggers the growth of technology from the selected benchmark, and applied the technology S-curve relation formula to derive the desirable investment plan for Korea. The present paper is a pioneering attempt to forecast the diffusion process of renewable energy technology in Korea using the comparative analogy from cases of advanced countries.

Keywords: Renewable Energy, Comparative Analogy, Forecasting, Diffusion, R&D Investment

1. 서론

최근의 급속한 산업 발전은 전 세계적인 에너지 소비의 급증을 야기하고 있다. “세계 에너지 전망 보고서 2030(IEA 2010)”는 세계 1차 에너지 소비량이 2001년부터 2025년까지 58% 증가할 것으로 전망하였으며, 세계 석유 소비량 역시 2025년까지 연간 1.8%의 증가 추세를 보일 것으로 예측하였다. 이는 2001년 하루 7,700만 배럴 수준이던 석유 소비량이 2025년에는 1억 1,900만 배럴에 달하게 되는 것으로 이로 인해 국제 유가 역시 꾸준히 증가하여 2001년의 배럴 당 25달러에서 2007년의 배럴 당 98달러로 상승하였으며 2012년 현재에는 배럴 당 100달러

를 넘어서고 있다(www.Knoc.co.kr). 특히 한국의 경우 전체 에너지와 석유의 소비에 있어서 각각 세계 8위와 7위에 올라 있는 주요 에너지 소비국이지만, 동시에 전체 에너지의 97% 이상을 해외로부터의 수입에 의존하고 있는 에너지 자원 빈국이기도 하다.

이러한 국내 및 전 세계적 에너지 수요 급증과 그에 따른 화석 에너지 가격의 상승은 신재생에너지를 대안으로 부각시키고 있다. 그러나 신재생에너지를 개발하기 위한 각국의 노력이 본격화 된 지 30년이 넘었으나, 높은 해외 의존도에 따른 필요성에 비하여 한국의 신재생에너지 지표는 여전히 낮은 수준이다. 정부는 1970년대 두 차례의 심각한 석유파동을 경험한

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012R1A1A2007445).

* 연락처 : 이덕주 교수, 446-701 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 경희대학교 산업경영공학과, Tel : 031-201-2911, Fax : 031-203-4004,

E-mail : ldj@khu.ac.kr

2013년 7월 4일 접수; 2014년 1월 23일 수정본 접수; 2014년 2월 20일 게재 확정.

후 장기적이고 안정적인 에너지 기반조성 및 수급의 필요성을 인식하였다. 이에 따라 신재생에너지 관련 사업을 높이기 위한 관련 연구 사업에 많은 관심을 기울이기 시작하면서 개발 및 보급이 본격적으로 시작되었다. 1988년 「대체에너지 개발 촉진법」이 제정된 이래 국내 신재생에너지 기술개발 투자가 본격적으로 이루어 졌으며, 지식경제부는 태양광, 풍력 등 11개 신재생에너지 분야에 9,606억 원을 투자하여 이중 태양열 온수기, 태양광 발전시스템 등 66개 과제가 실용화 되었다. 현재 태양열, 태양광, 바이오, 폐기물 에너지 분야의 핵심기술인 태양열 온수급탕기술, 독립형 태양광 발전기술, 바이오디젤, 폐기물소각 및 폐열회수 기술수준은 선진국 근접하여 실용화 내지 상용화 단계 진입한 반면 수소 저장 및 이용기술 등은 기초 응용연구 단계로 기술수준이 저조한 편에 속한다. “국내 신재생에너지 기술수준은 전반적으로 선진국의 77% 수준으로 평가되고 있으며, 태양광은 87%, 풍력은 81%, 수소연료전지는 63~78% 수준이다”(Ministry of Knowledge and Economy, 2010).

1988년부터 본격적으로 신재생에너지 기술개발을 시작한 이래 “1997년 1월에 이용보급을 확대하기 위한 「제1차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」을 수립하여 2006년 기준 1차 에너지의 2%를 신재생에너지로 공급하겠다는 계획을 수립하였고, 2002년 12월에 제2차 국가 에너지 기본계획을 수립하면서 에너지 상황변화를 고려하여 신재생에너지 개발 및 보급목표를 2006년에 3%, 2011년에 5%로 설정하여 2003년 「제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」을 작성하였다”(Ministry of Knowledge and Economy, 2010). 이후 정부에서는 2008년 저탄소 녹색성장을 위하여 신재생에너지 산업화를 유도하고 궁극적으로 2030년까지 전체 에너지의 11%를 신재생에너지로 공급하겠다는 「제3차 국가 에너지 기본계획」을 발표하였다. 제3차 신재생에너지 기술개발 및 이용 보급 기본계획에서는 2030년 신재생에너지 보급 목표 11.0% 달성하기 위해 그에 따른 보급목표를 1차 에너지 대비 신재생에너지 비중으로 15년 4.3%, 20년 6.1% 달성을 제시하고 이와 함께 집중적인 노력을 통해 20년 이전에 신재생에너지의 그리드 패리티 달성을 목표로 하고 있다.

제3차 기본계획은 보급달성 분야와 R&D 분야를 구분하여 기술개발을 추진하고 시장과 민간 주도의 보급방식을 추가하여 보급정책의 효율성과 민간투자, 참여 등을 확대하였다. 또한 신재생에너지 보급정책은 설비의 국산화 및 시장진입을 높이기 위해 보급정책 수립 시 기술개발 산업화측면을 우선적으로 고려하고 있다. 2010년 기준, 1차 에너지 소비 중 신재생에너지가 차지하는 비중은 2.61%에 그치고 있어(지식경제부, 에너지관리공단 2010), 이를 개선하기 위해 정책 당국은 신재생에너지의 보급률 11%(3.027 TOE)를 목표로 R&D 투자액을 39.2조 원(보급 32조 원, 기술 개발 7.2조 원)으로 지속적으로 늘려갈 계획을 발표하였다.

그러나 실제로는 신재생에너지가 갖는 고비용의 특성 때문에 계획의 빠른 적용과 그에 따른 시장에서의 보급이 이루어지

지 못하고 있다고 지적되고 있다. 즉, 경제적 타당성이 확보되지 않는 상황에서 신재생에너지의 확산은 시장 메커니즘에 의한 자발적인 확산이 이루어지지 않고, 정책적인 이니셔티브에 의한 요인이 더욱 강하게 작용된다는 것이다. 따라서 투자에 따른 보급 목표를 달성하고, 신재생에너지의 활용을 높이기 위해서는 R&D 투자에 따른 보급률의 변화와 그 확산 과정에 대한 예측을 바탕으로 체계적인 투자 계획이 이루어져야하며, 그에 따라 지속적인 R&D 투자가 집행될 필요가 있다.

신재생에너지 및 관련 기술의 확산에 관한 연구는 1990년대 후반 이후 다양한 형태로 발전하여왔다. Jacobson(2000)은 에너지 시스템의 변화과정을 분석하기 위하여 technological system을 기반으로 한 분석적 프레임워크를 제시하였으며, Painuly(2001)는 에너지 시장에서 신재생에너지의 확산을 방해하는 요소를 규명하고, 그를 극복할 수 있는 방안을 제안하였다. Tsoutsos *et al.*(2005)은 에너지 시스템에서 신재생에너지 확산의 필요조건과 장애요인을 분석하였으며, Popp *et al.*(2011)은 신재생에너지의 OECD 국가별 확산패턴을 기술 특허를 통해 연구하였다. 그 외에도 확산 모형을 이용하여 인도의 양수발전 보급률을 예측한 Purohit and Kandpal(2005)의 연구와 같이, 개별 신재생에너지의 확산 패턴을 예측하려는 시도들도 있었다. 한편, Grübler *et al.*(1999)의 경우 신기술의 확산패턴이 기존 기술의 그것과 유사하게 나타난다는 것을 주장하였다. 즉, Grübler *et al.*(1999)은 에너지 기술의 확산을 설명하는데 있어서 공진화(Co-evolution) 개념을 도입하여, 기술 추종자(follower)의 기술 및 기반 시설 및 그 기반이 되는 에너지원의 확산 과정은 선진국 혹은 선도자(leader)의 그것을 매우 유사한 형태를 가지고 따르게 된다는 사실을 광범위한 역사적 데이터에 근거한 실증 분석을 통해서 보여주고 있다. 우리는 Grübler *et al.*(1999)의 연구결과를 통해서 에너지 기술의 확산과정을 분석하는데 있어서 기술 선도자와 추종자 간의 비교유추법이 매우 설명력 있는 결과를 도출할 수 있는 방법론이 된다는 함의를 이끌어 낼 수 있다.

국내의 경우 Hwang *et al.*(2005)은 한국의 신재생에너지 보급의 월별 추이를 분석한 결과를 이용하여 일관성과 시의성이 낮은 정책의 부정적인 영향을 확인하고, 이를 토대로 보급 추이를 추정하였다. Park *et al.*(2012)은 태양광 보급지원정책과 연구개발 투자계획을 고려한 2요인 학습곡선을 통하여 태양광 발전 산업의 그리드 패리티(grid parity)를 예측하였다. Kim(2007)은 확산모형과 학습률 분석을 활용한 신재생에너지의 보급률 및 기술개발 투자의 추이를 분석하였지만, 전체 신재생에너지가 아닌 태양광과 풍력만을 대상으로 하였다. 이렇듯 해외 연구들이 주로 신재생에너지 확산 패턴의 성격을 이해하고 예측하는데 반해, 국내의 신재생에너지에 관한 연구들은 주로 과거의 실측 데이터를 이용한 분석에 집중되어 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 신재생에너지 확산을 위한 체계적인 R&D 투자 정책의 수립을 위하여 신재생에너지와 R&D 투자의 확산 패턴의 특성을 분석하고, 둘 사이의 관계

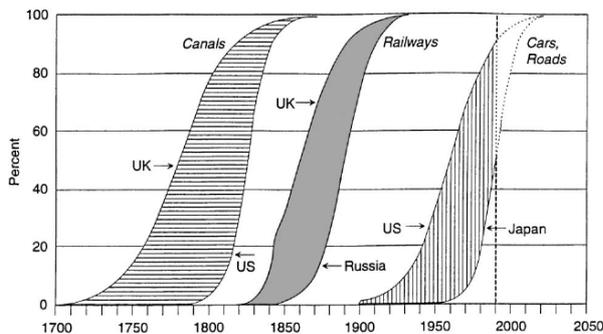
를 분석하고자 한다. 국내 연구들이 주로 실측 데이터를 이용한 현황 분석에 머물러 있는 것에 비해, 우리는 선진국들의 실측 데이터를 활용한 향후 확산 과정의 예측과 그를 바탕으로 한 정책 계획 수립에 목표를 두고 있다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 국내 신재생에너지 현황을 서술하고, 제 3장에서는 분석의 도구가 되는 배경이론 및 분석 모형에 대해 소개한다. 제 4장에서는 실제 데이터를 이용하여 신재생에너지의 향후 확산 과정을 예측하고, 이를 달성하기 위한 R&D 투자액을 도출한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

2. 분석 모형

2.1 분석 방법 개요

본 연구는 신재생에너지의 확산과정을 예측하고, 그에 따른 합리적인 R&D 투자 계획을 도출하는데 그 목적을 두고 있다. 그러나 상술한 바와 같이, 국내 신재생에너지 시장은 더딘 성장세를 보이고 있어 시계열 분석에 적합하지 못하다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 우리는 Grubler *et al.*(1999)의 공진화(Co-evolution) 개념을 활용하였다. Grubler *et al.*(1999)에 따르면, 기술 추종자(follower)의 기술 및 기반 시설 및 그 기반이 되는 에너지원의 확산 과정은 <Figure 1>에서 묘사되고 있는 것처럼 선진국 혹은 선도자(leader)의 그것을 매우 유사한 형태를 가지고 따르게 된다.



Source : Grubler, Nakićenović and Victor(1999).

Figure 1. Diffusion between leading and laggard markets

본 논문은 에너지 기술의 경우 기술 추종국의 확산과정이 일정한 시간적 차이를 가지고 선진국의 확산과정을 매우 유사한 형태로 따라간다는, 광범위한 역사적 데이터에 근거한 Grubler *et al.*(1999)의 연구결과를 분석방법의 논리적 전제로 활용하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 이미 신재생에너지 시장이 크게 발전하여 확산 모형을 추정하기에 충분한 역사적 데이터를 가지고 있는 선진국의 확산과정을 분석하고, 그 결과를 비교유추하여 한국의 신재생에너지 확산과정을 예측하고자 한다. 이를 위하여 OECD 가입 선진국 중에서 한국의 신재생에너지

확산목표와 가장 부합하는 국가를 선정하고 해당국가의 신재생에너지 확산과정을 분석하고, 더 나아가 해당 선진국의 신재생에너지의 확산이 어떠한 R&D 투자 추이를 바탕으로 하고 있는지를 분석하여 한국에서 신재생에너지 보급률 목표를 달성하기 위하여 요구되는 R&D 투자 규모까지 도출하고자 한다. 본 연구의 분석과정을 그림으로 나타내면 다음 <Figure 2>와 같다.

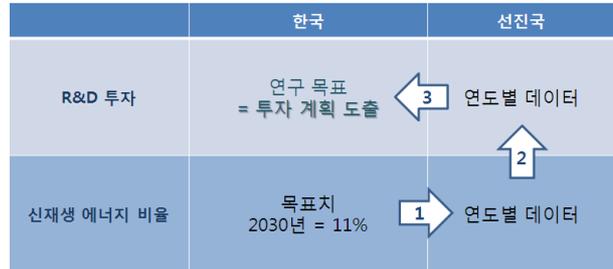


Figure 2. Analysis framework of the research

사실 본 연구에서와 같이 국내 신재생에너지의 확산과정을 선진국을 대상으로 하는 비교유추법을 이용하여 예측하기 위해서는 신재생에너지의 확산이 이루어지는 시장의 기본적인 조건이 비교유추 대상국의 그것과 유사하다는 조건을 만족하여야 한다. 예를 들어 비교유추 대상국의 경우에는 에너지 기술과 시장의 환경이 다른 에너지원에 비하여 신재생에너지의 경제성이 어느 정도 보장되는데 반해서, 예측 대상국은 경제성이 없음에도 불구하고 무역장벽 등과 같은 국내의 경제외적 상황에 의해서 국가의 정책적 보조금만을 바탕으로 신재생에너지의 확산이 이루어지는 경우라면 비교유추법은 타당한 접근법이 아닐 수 있다. 특히 확산에 영향을 주는 모든 요소가 유사하다는 조건을 만족시키기는 어렵더라도, 가장 기본적인 요소라 할 수 있는 ‘해당 국가 에너지 시장에서의 신재생에너지에 대한 경제성’이라는 부분에 있어서 큰 차이가 존재하면 안 될 것이다. 따라서 우리나라에서 신재생에너지의 경제성이 있는가에 대한 확인은 본 논문에서 채택한 방법론의 적절성 여부를 판단할 수 있는 가장 기본적인 조건이 될 수 있다.

국내의 경우 신재생에너지가 화석연료 에너지에 비해서 경제성이 없고, 앞으로도 경제성을 확보하기 어려울 것이라는 인식들이 존재하고 있다. 그러나 최근에 들어, 신재생에너지의 경제성에 대한 이러한 인식은 신재생에너지가 가지고 있는 특성을 기존의 현금흐름할인법(discounted cash flow)에 의한 경제성 분석 방법론이 제대로 반영하지 못하는 데서 기인하고 있다는 문제점을 지적하면서, 보다 발전된 방법론인 실물옵션법(real option)을 이용하여 신재생에너지의 경제성을 평가하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다(Menegaki, 2008; Martinez-Cesena *et al.*, 2013). 그리고 많은 연구에서 에너지 시장과 기술의 불확실성을 고려하면 신재생에너지가 높은 수준의 경제성을 가지고 있다는 분석 결과를 도출하고 있다는 사실에 주목할 필요가 있다(Davis and Owens, 2003; Siddiqui *et al.*, 2007; Lee

and Shih, 2010; Kim *et al.*, 2012; Jang *et al.*, 2013). 우리나라의 데이터를 이용한 실증분석 연구에서도 화석연료 에너지 시장의 불확실성을 고려한 경우(Kim *et al.*, 2012)와 신재생에너지 기술개발의 불확실까지 고려한 경우(Jang *et al.*, 2013) 모두 국내 신재생에너지가 경제성이 존재하고 있다는 결과를 도출하고 있고, 신재생에너지 중 태양광의 경우에는 그 가격이 화석연료의 가격수준보다 낮아지는 시점인 그리드패리티(grid parity)가 2019년에 달성 될 것이라는 분석결과를 보여주고 있다 (Park *et al.*, 2012).

위와 같은 신재생에너지의 경제성에 대한 최근의 연구결과들을 종합해볼 때, 우리나라에서 신재생에너지의 경제성이 없다는 인식에는 변화가 필요하며, 체계적인 분석에 의해서 도출된 ‘향 후 신재생에너지의 경제성이 존재한다’는 결과를 받아들인다면, 우리나라의 신재생에너지 확산도 보조금과 같은 시장 외적 변수에만 의존하는 것이 아니라 경제성에 근거한 시장 내적 요인에 의한 자발적 확산과정으로 설명하여도 큰 문제가 없다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 채택하고 있는 선진국의 비교유추법을 통한 신재생에너지 확산 예측도 충분히 시도할만한 가치가 있다고 주장 할 수 있겠다. 또한 본 연구에서는 단순히 시간에 따른 확산과정만을 예측하는데 그치지 않고, 그러한 확산을 가능케 하는데 필요한 연구개발 투자액까지 추정함으로써, 전술한 바와 같은 비교유추법을 통한 확산과정 분석결과가 가질 수 있는 문제점을 보완하고자 한다.

2.2 분석 모형

본 연구에서는 시간에 따른 신재생에너지의 보급률 분석하고 예측하기 위하여 확산 모형을 사용하였다. 확산 모형은 특정 상품이나 서비스 혹은 기술 등이 대상 집단에서 채택되는 과정을 수리적으로 설명하는 시계열 모형을 말한다. 다양한 분야에서 널리 쓰이고 있는 대표적인 확산 모형으로는 로지스틱(logistic), Bass, Gompertz 모형 등이 있으며, 본 연구에서는 이 중에서 로지스틱 모형을 채택하여 확산 과정을 추정 하였다.

Pierre Verhulst에 의해 고안되고 발전된 로지스틱 모형(Logistic model : Mansfield, 1961)은 대표적인 확산 모형의 하나로서, 외부 영향을 배제하고 채택자 및 미 채택자 간의 교류가 확산 과정의 형태를 결정한다고 가정하는 내부 영향 모형(internal influence model)이다(Meade and Islam, 2001). 로지스틱 모형의 누적 채택자 및 당기 채택자 함수는 다음과 같다.

$$N(t) = \frac{m}{1 + e^{-a+bt}} \quad (1)$$

$$n(t) = -\frac{mbe^{-a+bt}}{(1 + e^{-a+bt})^2} \quad (2)$$

이때, m 은 누적 채택자의 최대값 혹은 잠재 수요이며, a 는 초기 수요 혹은 누적 채택자 그래프의 y 절편을 결정하는 계수

이며, b 는 확산 과정의 형태를 결정하는 계수이다. 일반적인 로지스틱 모형의 누적 채택자 및 당기 채택자 곡선은 <Figure 3>과 같이 나타난다.

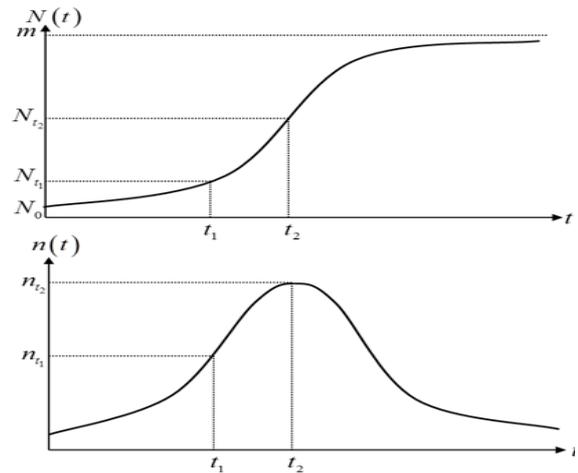


Figure 3. Adopters curves of logistic model

확산 모형이 일반적으로 상품이나 서비스의 가입자들을 대상으로 하지만, 전체 집단에 있어서의 특정 조건을 만족하는 구성원의 비율 역시 꾸준히 증가하는 곡선을 나타낸다는 점에서 분석 대상으로 적합하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 전체 에너지 생산 규모 대비 신재생에너지의 비율의 증가추세를 로지스틱 모형을 통해 분석하고자 한다.

3. 분석 결과

3.1 자료의 구성

연구에 사용된 국가별 신재생에너지 보급 현황 및 R&D 투자액 추이는 국제 에너지기구(IEA : International Energy Agency)로부터 수집하였다. 데이터 수집기간은 1990~2010년의 20년이다. 한편, 목표치로 사용할 우리나라의 신재생에너지 R&D 투자액 계획은 “제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2009~2030)”의 값을 참고로 하였다. 또한 GDP대비 투자액을 산출하기 위하여 사용된 국가별 GDP 값은 국가통화기금(IMF : International Monetary Fund)의 자료를 활용하였다. <Table 1>에 국가별 신재생에너지 보급률 자료를 정리하였다.

3.2 신재생에너지 점유율 예측

앞서 개요를 통해 살펴본 바와 같이, 분석의 첫 단계는 선진국의 신재생에너지 비율 확산 추이를 살펴보고 한국의 신재생에너지 비율 목표치를 고려하였을 때 가장 근접한 경우를 선정함으로써 한국의 향후 신재생에너지 점유율을 예측하는 것이다. 이를 위하여, 각국의 신재생에너지 점유율 데이터를 이

Table 1. Penetration rate of renewable energy of OECD countries

Country	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009
Austria	20.2%	21.9%	23.1%	21.2%	22.2%	24.3%	25.5%	26.9%
Belgium	1.0%	1.0%	1.1%	2.0%	2.3%	2.7%	3.1%	3.6%
Canada	16.2%	16.8%	16.9%	16.0%	15.8%	16.2%	16.9%	16.9%
Czech	0.2%	1.5%	1.5%	4.0%	4.2%	4.7%	5.0%	5.9%
Denmark	6.2%	6.8%	9.8%	15.2%	14.4%	16.2%	16.8%	18.0%
finland	19.3%	21.2%	24.1%	23.7%	23.4%	23.6%	25.8%	24.1%
France	6.8%	7.2%	6.3%	5.7%	6.0%	6.4%	7.1%	7.8%
Germany	1.5%	1.8%	2.7%	4.9%	5.8%	8.1%	8.1%	9.1%
Greece	5.2%	5.7%	5.2%	5.4%	5.9%	5.7%	5.6%	6.0%
Hungary	2.6%	3.4%	3.3%	4.3%	4.5%	5.1%	6.0%	7.4%
Ireland	67.0%	69.5%	74.4%	75.7%	78.3%	80.0%	82.8%	83.4%
Italy	4.4%	4.9%	5.9%	6.3%	6.9%	6.7%	7.7%	9.3%
Japan	3.5%	3.2%	3.2%	3.2%	3.3%	3.2%	3.2%	3.2%
Korea	1.1%	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.6%	0.6%	0.7%
Luxembourg	0.4%	0.1%	1.2%	1.2%	1.3%	2.2%	2.4%	2.4%
Mexico	11.4%	11.6%	11.0%	10.0%	9.7%	9.7%	9.9%	9.5%
Netherlands	1.1%	1.2%	1.7%	2.7%	2.9%	2.9%	3.4%	4.0%
New Zealand	32.4%	31.2%	29.0%	31.1%	31.1%	31.8%	33.1%	36.5%
Norway	54.3%	49.2%	51.2%	48.5%	42.6%	46.5%	45.0%	46.0%
Poland	1.5%	3.9%	4.3%	4.9%	5.1%	5.3%	5.7%	6.2%
Portugal	19.6%	16.4%	15.2%	13.1%	17.1%	17.9%	17.9%	20.8%
Slovak	1.5%	2.8%	2.8%	4.3%	4.5%	5.4%	5.4%	5.6%
Spain	6.9%	5.5%	5.7%	5.9%	6.5%	6.9%	7.7%	9.3%
Sweden	24.4%	25.5%	31.0%	28.8%	28.7%	30.6%	31.5%	34.2%
Switzerland	14.5%	17.1%	17.2%	15.8%	15.3%	17.7%	17.7%	17.7%
Turky	18.3%	17.5%	13.2%	12.0%	11.1%	9.6%	9.5%	10.6%
U.K.	0.5%	0.8%	1.0%	1.8%	1.9%	2.2%	2.6%	3.1%
USA	5.0%	5.1%	4.5%	4.5%	4.8%	4.7%	5.1%	5.4%

용하여 로지스틱 모델을 다음과 같이 추정하였다.

점유율이 전체 에너지 대비 신재생에너지의 비율이라는 점을 고려하여, 로지스틱 모형의 잠재수요 m 의 상한을 100%로 설정하였다. 국가별 추정 결과를 토대로 우리나라의 신재생에너지 점유율 도달 계획과 비교하기에 앞서, 추정 자체의 신뢰성을 확인하기 위하여 각 국가별 추정 결과가 실측 데이터에 대한 적합도(fitness)를 수정된 R^2 값을 통하여 살펴보고, 75% 이상의 설명력을 갖는 경우만을 비교분석의 대상으로 하였다. 그 결과, 총 9개의 선진국이 선택되었다.

다음 단계로, “제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2009~2030)” 보고서에 나타난 2030년의 우리나라 신재생에너지 점유율 목표치인 11%와 가장 유사한 예측치를 보이는 선진국의 점유율 추정치를 탐색하였다. <Table 2>에서 구한 로지스틱 모형 추정 결과를 바탕으로 22년째(2030년은 2009년을 기점으로 22년째에 해당)의 점유율 예측치를 구한 결과를 다음의 표와 그래프를 통하여 정리하였다.

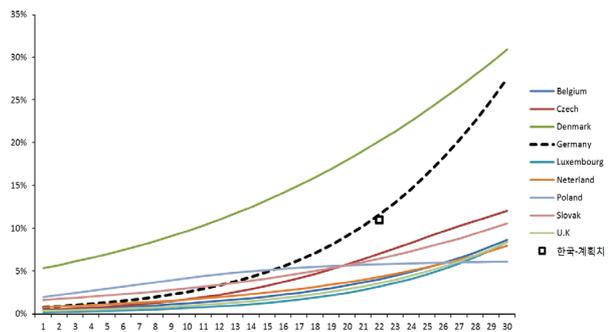


Figure 4. Comparison of penetration rates : forecasted values of OECD countries and the target value of Korea according the plan

<Table 3>과 <Figure 4>에 나타난 것과 같이, 독일의 신재생에너지 점유율의 확산 추이 및 예측치가 한국의 계획치와 가장 근접해 있다. 해당 시점에 대한 독일의 예측치는 11.6%로서

Table 2. Estimation results of logistic model

Country	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>adj.R</i> ² > 0.75
Austria	1.31	-0.01	93.6%	
Belgium	5.29	-0.10	89.2%	O
Canada	1.01	0.00	61.4%	
Czech	3.73	-0.15	17.1%	O
Denmark	2.94	-0.07	99.7%	O
Finland	0.05	-0.03	40.3%	
France	2.08	0.00	60.2%	
Germany	4.95	-0.13	98.5%	O
Greece	2.37	-0.01	61.2%	
Hungary	3.89	-0.06	99.8%	
Ireland	45.84	-47.25	83.4%	
Italy	3.20	-0.04	99.8%	
Japan	2.86	0.00	60.1%	
Korea	4.60	0.00	60.1%	
Luxembourg	5.80	-0.13	60.1%	O
Mexico	1.58	0.00	60.6%	
Netherlands	4.78	-0.08	90.8%	O
New Zealand	0.82	-0.01	99.8%	
Norway	0.04	0.00	97.9%	
Poland	0.93	-0.17	6.2%	O
Portugal	0.91	0.00	60.0%	
Slovak	4.15	-0.07	99.9%	O
Spain	2.83	-0.02	98.8%	
Sweden	1.14	-0.02	99.3%	
Switzerland	0.33	-0.01	36.5%	
Turky	1.33	0.00	60.8%	
U.K.	5.77	-0.11	99.9%	O
USA	2.43	0.00	60.5%	

한국 계획치인 11%를 기준으로 불과 5.4%의 APE 오차를 보이고 있다. 반면, 다른 국가의 데이터를 기반으로 한 예측치의 경우, 가장 가까운 값이 체코의 7.0%로서, 36.1%의 APE를 보여 큰 차이가 있다. 결과적으로 독일의 신재생에너지 점유율의 확산 추이가 한국 시장의 현황과 그에 따른 목표치를 가장 잘 설명하는 참조치로서 선택되었다.

이제 독일을 선도자(leader)로 선택하여 그 로지스틱 모형의

Table 3. Forecasting results for renewable energy penetration rate

Country	Belgium	Czech	Denmark	Germany	Luxembourg	Netherlands	Poland	Slovak	U.K.
Estimated value	4.1%	7.0%	20.2%	11.6%	3.2%	4.3%	5.8%	6.5%	3.6%
APE*	63.1%	36.1%	83.5%	5.4%	71.0%	60.6%	47.1%	41.3%	67.4%

* APE : Absolute Percentage Error.

Table 4. Forecasting results for renewable energy penetration rate in Korea

Year	2013	2018	2023	2028	2033	2038	2043	2048
Estimated target share	1.34%	2.58%	4.91%	9.13%	16.36%	27.55%	42.43%	58.70%

계수값을 통해 추종자(follower)인 우리나라의 확산 패턴을 예측하였다. <Table 2>에 정리된 계수를 이용하면, 본격적인 성장세를 보이는 이륙기(take-off)는 계획 시작 후 32년째인 2040년, 성장 속도가 최고조에 이르는 당기 최대 시점(peak)은 계획 시점을 기준으로 37년째인 2045년이 된다. 이륙기에 이르러 비로소 신재생에너지는 전체 시장의 50% 이상의 점유율을 차지하게 될 것으로 예측되었다. 연도별 점유율 목표의 추이는 다음 <Figure 5>에 나타나 있으며, <Table 4>에 그 일부를 정리하였다.

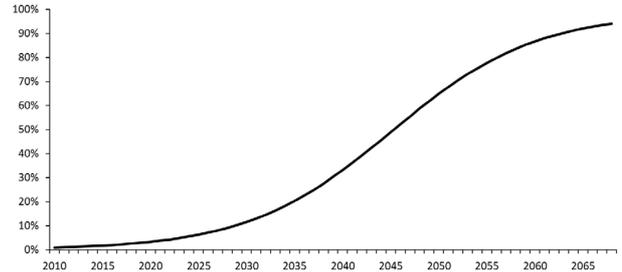


Figure 5. Forecasted diffusion curve of renewable energy in Korea

3.3 R&D 투자액 도출

앞 절에서, 신재생에너지의 연도별 점유율을 예측하였다. 이 예측치는 2030년에 11%를 달성하려는 정부의 정책적 목표치를 근거로 한 것으로서, 그를 달성하기 위한 연도별 목표치를 구체화 한 것으로 볼 수 있다. 이제 이러한 연도별 목표치를 달성하기 위한 R&D 투자 계획을 수립하기 위하여 참고 대상으로 선정된 독일의 연도별 점유율 확산 추이와 R&D 투자 현황의 관계를 분석하고자 한다.

자료 수집기간인 1990년에서 2009년까지의 독일의 GDP 대비 R&D 누적 투자액과 해당 년도의 신재생에너지 비율의 관계를 다음 <Table 5>와 <Figure 6>으로 나타내었다. 신재생에너지 비율의 경우, <Table 1>에 정리된 자료를 바탕으로 각 연도의 값은 내삽법(interpolation)을 통해 추가하였으며, GDP 대비 R&D 누적 투자액의 경우 2011년의 환율을 기준으로 한 GDP 값과 R&D 투자액 값을 이용하여 환산하였다. 비교 분석을 위하여 GDP 대비 R&D 누적 투자액의 비중은 %, 즉 1/1000의 형태로 표시하였다.

Table 5. Historical data of cumulative R&D investment and renewable energy penetration rate in Germany

Year	Ratio of cumulative R&D investment to GDP(%%)	Share of renewable energy(%)
1990	0.93	1.50
1991	1.83	1.56
1992	2.67	1.62
1993	3.61	1.68
1994	4.19	1.74
1995	4.62	1.80
1996	5.19	1.98
1997	5.69	2.16
1998	6.24	2.34
1999	6.74	2.52
2000	7.34	2.70
2001	7.91	3.14
2002	8.48	3.58
2003	8.90	4.02
2004	9.35	4.46
2005	9.95	4.90
2006	10.52	5.80
2007	11.05	8.10
2008	11.61	8.10
2009	12.49	9.10

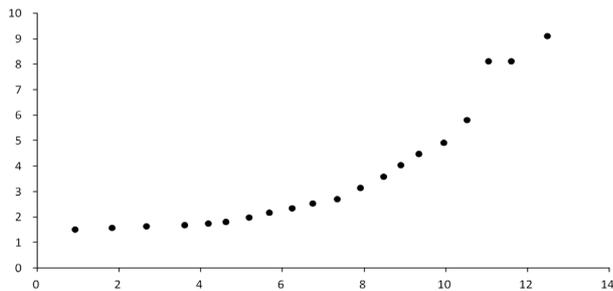


Figure 6. Relationship between cumulative R&D investment and renewable energy penetration rate in Germany

산포도 상의 데이터 추이는 두 자료 사이에 상식적으로 예측 가능한 비례 관계가 있음을 보여주고 있다. 다만, 단순 선형 비례관계가 아닌 성장세가 더욱 가속화되는 형태를 띠고 있음을 알 수 있는데, 이는 일정 수준이상의 R&D 투자가 누적되는 것이 해당 기술의 시장가치와 보급에 있어 중요한 요인임을 짐작하게 한다. 이러한 성질을 반영하여 두 값의 관계를 설명하는 식을 찾기 위해 우리는 다음과 같은 세 가지의 모형을 대안으로 추정을 실시하였다. <Table 6>에는 각 모형의 식과 식의 추정 결과에 따른 수정된 설명계수 값이 정리되어 있다.

<Table 6>에서 볼 수 있듯이, 데이터에 대한 추정 설명력은 2차 함수가 가장 우수하다. 그러나 <Figure 7>를 통해 알 수 있듯이 2차 함수의 경우, 초반 일정 기간 동안 오히려 투자금액 대비 감소하는 모습을 보여주어 현실성이 부족하다고 할 수 있

다. 또한 로그 함수의 경우 최근 데이터에 대한 적합도가 부족한 모습을 나타내고 있어, 가장 합리적인 대안으로서 상수항이 없는 2차 함수를 채택하였다.

Table 6. Estimation results for three equations

No.	Content	function	Adj. R ²
1	Logarithmic function	$\ln(ratio) = b_0 + b_1 Inv$	91.4%
2	Quadratic function	$ratio = b_0 + b_1 Inv + b_2 Inv^2$	97.1%
3	Quadratic function (no constant terms)	$ratio = b_1 Inv + b_2 Inv^2$	93.0%

주) ratio : 연도별 신재생에너지 점유율.
Inv : GDP 대비 누적 R&D 투자금액 비중.

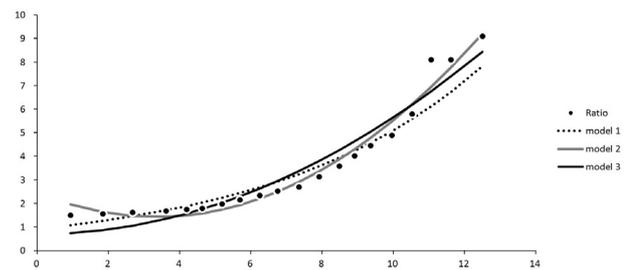


Figure 7. Estimated penetration curves against cumulative R&D investment

채택된 모형을 바탕으로 하여 추정된 식은 다음과 같다.

$$ratio = 0.0070321 Inv + 49576.55 Inv^2 \quad (3)$$

이제 이 관계식을 이용하여 앞서 <Table 5>에서 구한 연도별 점유율 목표치를 달성하기 위한 R&D 투자 계획을 도출하였다. 관계식의 역함수는 다음과 같이 표현된다.

$$Inv = \sqrt{\frac{ratio - 0.070321}{49576.553}} \quad (4)$$

연도별 점유율 목표치에 따른 R&D 투자 계획을 다음 <Table 7>과 <Figure 8>에 나타내었다.

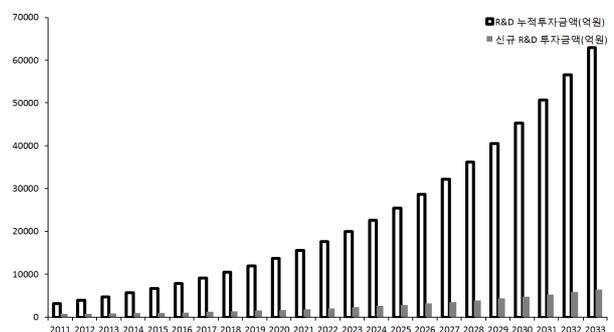


Figure 8. Estimated level of required R&D investment in Korea

Table 7. Estimated level of required annual R&D investment in Korea

Year	Target share of renewable energy	Ratio of cumulative R&D investment to GDP	GDP (trillion KRW)	Cumulative R&D investment (hundred million KRW)	R&D investment (hundred million KRW)
2011	1.03%	0.026%	1,235	3,168	819
2012	1.17%	0.031%	1,272	3,924	756
2013	1.34%	0.036%	1,336	4,789	865
2014	1.53%	0.041%	1,403	5,724	935
2015	1.74%	0.046%	1,473	6,746	1,022
2016	1.99%	0.051%	1,547	7,870	1,124
2017	2.26%	0.056%	1,624	9,113	1,242
2018	2.58%	0.062%	1,705	10,489	1,376
2019	2.94%	0.067%	1,790	12,017	1,528
2020	3.34%	0.073%	1,880	13,715	1,698
2021	3.80%	0.079%	1,974	15,602	1,888
2022	4.32%	0.085%	2,073	17,702	2,100
2023	4.91%	0.092%	2,176	20,037	2,335
2024	5.57%	0.099%	2,285	22,633	2,596
2025	6.31%	0.106%	2,399	25,518	2,885
2026	7.15%	0.114%	2,519	28,721	3,204
2027	8.08%	0.122%	2,645	32,276	3,554
2028	9.13%	0.130%	2,778	36,215	3,939
2029	10.30%	0.139%	2,917	40,574	4,360
2030	11.60%	0.148%	3,062	45,392	4,818
2031	13.03%	0.158%	3,215	50,708	5,316
2032	14.62%	0.168%	3,376	56,563	5,854
2033	16.36%	0.178%	3,545	62,997	6,434

GDP 데이터는 2012년까지는 e-나라지표 참조, 그 이후로는 최근 5년(2008~2012년)간 연평균 성장률 4.95%를 고려하여 연 5%의 성장률을 가정하여 추정함

결과로 도출된 R&D 투자 금액은 11%의 점유율 목표가 설정된 2030년까지의 누적 금액을 기준으로 4조 5천억 원에 달한다. 이는 연평균 1,421억 원 정도로서 매년 6.2%의 성장세에 해당하는 값이다. 또한 이 결과는 정부의 R&D 투자 목표치인 2015년까지 2,404억, 2020년까지 4,265억, 2030년까지 6,457억 원을 크게 상회하고 있다. 우리의 분석으로 도출된 R&D 투자 금액이 갖는 의미가 신재생에너지가 성공적으로 시장에 보급되어 있는 선진국의 사례를 기준으로 추정된 필요 수준이라는 점을 고려할 때, 정부의 계획은 목표를 달성하기에 충분치 못하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

중국 등 신흥시장의 급격한 성장세는 전 세계적인 화석에너지 수요 급증과 그에 따른 가격 상승의 원인이 되고 있다. 신재생에너지는 화석에너지에 대한 주요 대안으로서, 여러 선진국에서는 이미 이에 대한 꾸준한 투자가 실질적인 시장 보급을 통

해 결실을 얻고 있다. 그러나 한국의 경우 그 중요성을 인식하고 다양한 정책을 수립하여왔으나 기술 수준 및 보급률은 기대에 크게 미치지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 신재생에너지의 개발과 보급에 충분한 성과를 거둔 선진국들의 사례를 통하여 정책적 목표치를 고려한 국내 신재생에너지 시장의 확산 추이를 예측하고, 그를 달성하기 위한 R&D 투자 계획을 도출하고자 하였다. 비교분석을 통해 목표치에 가장 근접한 국가로서 독일이 선택되었으며, 독일의 R&D 투자와 신재생에너지의 시장점유율 사이의 관계식을 추정하고 이를 이용하여 우리나라의 연도별 투자 계획을 산출하였다. 분석 결과는 현재의 정책이 계획하고 있는 R&D 투자의 규모가 GDP를 고려한 비교 대상 선진국인 독일의 과거 투자 규모에 비해 상당히 낮은 수준이며, 따라서 계획에서 목표하고 있는 신재생에너지의 시장 점유율을 달성하기에는 상당히 부족하다는 것을 보여주고 있다. 이는 더욱 적극적인 투자 계획 및 민간 시장의 참여를 유도할 수 있는 다양한 지원 정책의 수립이 필요하다는 것을 시사하고 있으며, 오늘날 국가적 전력난에 시달리고 있는 상황에서 화석 에너지 가격의 상승에 따른 거시경제 전체에 대한 위협이 쉽사리 해소되지 못할 것임을 의미하는 것이다.

우리는 이 연구에서 상대적으로 기술 발전과 시장 성숙이

부족한 상황에서 기술 선진국의 사례를 비교 유추하여 향후 추이를 예측하고 정책적 분석을 가능하게 하는 방법론적 절차를 수립하고 실제 사례를 통해 살펴보았다. 이러한 방법은 다양한 기술 및 산업분야에 확장되어 적용될 수 있음은 물론, 그에 따라 다양한 정책적 시사점을 통해 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서 채택하고 있는 비교유추에 의한 예측은 비교유추 대상국과 예측대상 국가 간에 예측변수에 영향을 주는 다양한 요인들이 얼마나 유사할 수 있는가에 대한 문제점이 존재할 수 밖에 없다. 따라서 모든 요인들이 완벽하게 동일할 수는 없다는 현실을 인정하고, 그로부터 비롯되는 비교유추 방법론이 가지고 있는 본원적 한계가 항상 존재하고 있다는 사실을 염두에 두고 본 연구의 결과를 해석하고 활용하여야 할 것이다.

미성숙한 시장과 그에 따른 데이터 부족을 기반으로 한 연구라는 점에서, 향후 시장의 발전과 새로운 정책의 발표가 주어지는 경우 기존 연구와 신규 데이터를 결합하여 분석 결과를 개선하는 것이 주요 향후 연구 과제가 될 수 있을 것이다. 또한 도출된 정책적 시사점에 대한 대안을 탐색하기 위하여 선진국의 관련 정책의 특성과 그 성과를 활용하는 것 역시 흥미로운 주제이다.

참고문헌

- Davis, G. A. and Owens, B. (2003), Optimizing the level of renewable electric R&D expenditures using real options analysis, *Energy Policy*, **31**(15), 1589-1608.
- Grübler, A., Nakićenović, N., and Victor, D. G. (1999), Dynamics of energy technologies and global change, *Energy policy*, **27**(5), 247-280.
- Hwang, S. W., Won, J.R., Kim, J. H. (2005), Diffusion state Estimation of new and Renewable Energy Using Diffusion Model, *Proc. of the fall conference of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 320-322.
- International Monetary Fund, www.imf.org/external/data.htm.
- International Energy Agency, wds.iea.org/wds/ReportFolders/ReportFolders.aspx.
- Jacobsson, S. and Johnson, A. (2000), The diffusion of renewable energy technology : an analytical framework and key issues for research, *Energy policy*, **28**(9), 625-640.
- Jang, Y. S., Lee, D. J. and Oh, H. S. (2013), Evaluation of New and Renewable Energy Technology in Korea Using Real Options, *International Journal of Energy Research*, **37**, 1645-1656
- Kim, E. (2007), Wind power energy development promotion policy in Germany and its implication for Korean energy policy, *Magazine of Korean Solar Energy Society*, **6**(2), 13-21.
- Kim, K. T., Lee, D. J. and Park, S. J. (2012), Evaluation of the Economic Values and Optimal Deployment Timing of R&D Investment in New and Renewable Energy Using Real Option Approach, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **31**(2), 144-156.
- Korea National Oil Cooperation, www.Knoc.co.kr.
- Lee, S. and Shih, L. (2010), Renewable energy policy evaluation using real option model-The case of Taiwan. *Energy Economics*, **32**, 567-578.
- Mansfield, E. (1961), Technical change and the rate of imitation, *Econometrica Journal of the Econometric Society*, **29**(4), 741-766.
- Martinez-Cesena, E. A., Mutale, J., and Rivas-Davalos, F. (2013), Real options theory applied to electricity generation projects : A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **19**, 573-581.
- Meade N. and Islam, T. (2001), Forecasting the Diffusion of Innovations: Implications for Time-Series Extrapolation In Armstrong, J. S. (Eds), *Principles of forecasting : a handbook for researchers and practitioners*, Springer : US, 577-595.
- Menegaki, A. (2008), Valuation for renewable energy, *A comparative review*, **12**, 2422-2437.
- Ministry of Knowledge and Economy (2008), *The third basic plan for technology development and usage promotion of renewable energy in Korea*, mimeo.
- Ministry of Knowledge and Economy (2010), *White paper on renewable energy*.
- Painuly, J. P. (2001), Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis, *Renewable Energy*, **24**(1), 73-89.
- Park, S. J., Lee, D. J., and Kim, K. T. (2012), Forecasting the Grid Parity of Solar Photovoltaic Energy Using Two Factor Learning Curve Model, *IE Interfaces*, **25**(4), 441-449.
- Popp, D., Hascic, I., and Medhi, N. (2011), Technology and the diffusion of renewable energy, *Energy Economics*, **33**(4), 648-662.
- Purohit, P. and Kandpal, T. C. (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.
- Rao, K. U. and Kishore. V. V. N. (2010), A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(3), 1070-1078.
- Siddiqui., A. S., Marnay. C., and Wiser. R. H. (2007), Real options valuation of US federal renewable energy research, development, demonstration, and deployment, *Energy Policy*, **35**(1), 265-279.
- Tsoutsos, T. D. and Stamboulis, Y. A. (2005), The sustainable diffusion of renewable energy technologies as an example of an innovation-focused policy, *Technovation*, **25**(7), 753-761.