에너지 기술 확산 패턴에 기반한 IPCC AR5 에너지 시나리오 평가

COLLEGE OF BUSINESS
Graduate School of Green Growth

카이스트 녹색성장 대학원 녹색정책 방태웅

E-mail: ungbang@business.kaist.ac.kr

본 연구에서는 IPCC의 가장 최근 보고서인 AR5의 에너지 시나리오 부분을 에너지 기술 확산 패턴에 기반하여 평가하였다. 보고서의 전반부에서는 '기술 확산'에 대한 기존 문헌들의 광범위한 분석을 통하여 에너지 기술 확산 패턴들에 대하여 재정리 하였다. 에너지 기술 확산 패턴은 일반적으로 다음과 같은 특징들을 가지고 있다. 에너지 기술은 초기 기술수용 지역에서 주변 지역으로 갈수록 빠르게 확산한다. 에너지 기술은 S-shape Curve 형태를 따라 확산한다. 에너지 기술은 관련 기술을 사용하는 사용자가 증가할수록 빠르게 확산한다. 에너지 기술은 다른 기술들과 공진화를 이루며 확산한다. 에너지 기술은 관련 인프라가 있을 경우 더욱 빠르게 확산한다. 기존 문헌분석에서 밝혀 낸 에너지 기술의 일반적인 패턴들을 활용하여 연구의 후반부에서는 AR5 시나리오의 Low Scenario, High(BAU) Scenario의 Data들을 분석하였다. 시나리오 분석결과 AR5 시나리오는 대체적으로 에너지기술확산 패턴을 따르고 있는 것으로 보여진다.

연구배경

정부간 기후변화 협의체 (이하 IPCC)에서 발간하는 보고서는 각 국가의 에너지/온실가스 정책 및 기업의 활동에 많은 영향을 주는 중요한 지표가 된다. 하지만 IPCC 보고서의 시나리오 타당성 및 신뢰성에 대한 사후 평가 연구는 많지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 IPCC AR5 보고서에 사용된 다양한 에너지 시나리오와 Data Base들을 '에너지 기술 확산 패턴'에 기반하여 비교 및 평가하고자 한다. 연구의 결과물을 통하여, IPCC보고서가 과거의 에너지 기술 확산 패턴에 비추어 보았을 때 시나리오를 급진적 혹은 보수적으로 반영하고 있다는 등의 결론에 도달할 수 있으며 나아가 향후 에너지 기술 확산 패턴 이외에도 다양한 지표들을 활용하여 IPCC 시나리오를 평가하는 연구가 추진될 수 있는데 기여하는 함의를 갖고 있다.

연구질문

- 기존의 기술확산 패턴들 중 시나리오 평가에 활용 가능한 패턴들은 어떠한 것들이 있는가?
- IPCC AR5 보고서는 에너지기술확산 패턴에 기반하여 평가 하였을 때 어떠한 결과를 가지는가?

연구방법

- **STEP1:** Arnulf GruK (1991), Blackman, A. (1999). Charlie Wilson(2009). Kemp, René(2008)등 Energy & technology diffusion 에 관한 논문 및 보고서에 대한 광범위한 '문헌연구'를 통하여 기술확산의 일반적인 패턴에 대해 분석한다.
- **STEP2:** 기술확산의 일반적인 패턴들 중에서 IPCC 시나리오 평가에 활용 가능한 지표들을 도출한다.
- **STEP3:** IPCC AR5 시나리오에 사용된 31개 모델, 1,184개의 시나리오들 중에서 2100년 이산화탄소 농도 430~530ppm을 예상으로 하는 403개의 시나리오를 'Low Scenario', 720ppm 이상을 예상으로 하는 310개의 시나리오를 High (BAU) Scenario로 구분하여 이를 에너지기술확산 패턴을 기반으로 분석, 평가한다.

STEP1 에너지기술확산의 일반적인 5가지 패턴

화석 에너지, 신재생 에너지 등 '에너지'가 최종 소비자에게까지 도달하기 위해서는 에너지 기술뿐만이 아니라 관련된 에너지설비 기술도 함께 확산이 되어야 가능하다. 따라서 본 연구에서는 '에너지'에 한정하지 않고 일반적인 '기술 확산'에 관한 문헌들도 함께 분석하여 '에너지 기술 확산'의 일반적인 패턴에 대하여 정리하였다.

1) 초기 기술수용 지역에서 주변 지역으로 갈수록 빠르게 확산함

- 대표문헌: A. Grubler(2012) Wilson(2012) Kander (2007)
- 에너지 기술 확산 패턴을 공간(Spatial)의 관점에서 살펴 보았을 때, 에너지 기술은 Core (처음 기술이 사용되는 지역), Rim (빠르게 기술을 수용한 지역), Periphery (늦게 기술을 수용하는 지역)으로 점차 확산한다.
- Knowledge Spillover 효과에 의해 주변부로 갈수록, 에너지 기술에 대한 정보와 경험이 축척 되어 전파되기 때문에, 기술 확산이 보다 가속화 되는 경향이 있다.
- 미래의 기후변화 대응과 신 재생 에너지 기술의 확산에 있어서 개발도상국은 기존 에너지 체제 시스템의 중심국가들보다, 청정에너지 체제로 바뀔 수 있는 가능성이 높다.

2) 시간이 지남에 따라 S-shape Curve 형태로 확산함

- 대표문헌: Arnulf Grubler (1998), Kemp(2008), Rogers(1993)
- 시그모이드 곡선 (Sigmoid Curve)이론에 의하면 기술은 시간에 따라 도입기, 성장기, 성숙기 쇠퇴기를 거치게 되며, 도입기와 성장기 사이의 특이점 (Singular point), 성장기와 성숙기 사이의 변곡점(Inflection point)를 지나면서 S-shape Curve 형태를 띄게 된다.
- S-Shape Curve의 Logistic Function은 k, b, Δt로 구성되어 있다. 일반적으로 K는 기술 확산의 정도 (extent of growth)를 의미하며, Mw, EJ 등의 단위가 사용된다. b는 곡선의 기울기를 뜻하고, Δt 는 k가 1%에서 50%에 도달하는 데 걸리는 기간을 의미한다.에너지 기술이 해당 지역에서 K에 도달하는 Δt 를 구함으로써 에너지 기술 확산 속도를 예측할 수 있다.

3) 사용자가 많을수록 빠르게 확산함

- 대표문헌: BH Hall (2003), Claudia Keser (2012), Edison Tse (2002)
- 네트워크 효과(Network effect)에 의하면 특정 제품이나 기술의 사용자가 증가할수록 이는 다른 사람들의 수요에도 영향을 주게 되어, 해당 제품과 기술의 가치는 더욱 높아진다.
- 네트워크 효과(+)는 소비자에게 매력(+)과 가격(-)에 영향을 주며, 이는 공급업자가 생산시설(+)을 늘리게 되고 학습효과와, 규모의경제(+)의 이점을 얻게 됨으로써 가격을 낮출(-)수 있는 선순환 과정을 야기한다.
- 통신기술은 사용하는 사람들이 많아질수록 연결할 수 있는 상대가 많아지게 되어 가치를 갖게 되며, 에너지 기술도 이처럼 역시 해당 기술을 사용하는 사람들이 많아질수록 표준으로 자리잡게 될 가능성이 높다.

4) 에너지 기술은 연관된 다른 기술들과 공진화 하며 확산

- 대표문헌: Lori Rosenkope (2000), M.P.Hekkert (2007), Staffan Jacobsson(2000)
- 기술경제학(Techno-Economics)측면에서 보면 기술은 그 기술만의 고유한 사회, 제도 문화적 체제를 갖고 있다. 기술들은 개별적으로 존재하기도 하지만 서로간에 영향을 주어, 함께 발전하기도 한다. 특히 에너지 기술의 경우 기술의 특성상 제조업을 포함한 직간접 관련된 기술들의 발전과 상호간에 영향을 많이 받는다. 예를 들어 스마트그리드 기술이 발전하게 되면 그 영향으로 태양광, 풍력과 같은 신재생에너지 역시 발전할 가능성이 있다.
- 에너지 기술은 확산 과정에서 연관 산업들과의 공진화(Co-evolve)의 가능성이 크기 때문에 국가적 차원에서는 공진화를 통한 공생의 플랫폼 구축을 위하여 에너지 기술과 연관 산업과의 클러스터 구축을 통하여서 시너지 효과를 기대하기도 함

5) 관련된 인프라가 있을 경우 빠르게 확산

- 대표문헌: B.Bengtsson (2012), Staffan Jacobsson (1998), David Popp (2009)
- 경로 의존성(path dependency)과 기존 인프라의 잠금효과(Lock in effect)에 의하여 기술은 단기간에 바뀌기 힘들다. 하지만 기존의 인프라를 재사용할 수 있다면 빠르게 확산할 수 있다. 예를 들어 자동차는 마차가 사용하던 도로 인프라를 다시 이용함으로써, 천연가스 역시 기존의 전통(Coal-based)도시가스 인프라를 그대로 이용함으로써 보다 빠르게 확산될 수 있었다.이러한 사례를 볼 때, 에너지 기술은 해당 지역에 있는 인프라를 얼마나 활용할 수 있는가? 에 따라서 같은 기술이라도 지역에 따라 빠르게 혹은 느리게 확산됨을 일 수 있다.
- 기존의 인프라를 사용할 수 없는 에너지 기술의 경우 정부, 민간 차원에서 필수 인프라 구축이 기술 확산에 중요한 영향을 끼치는 요소임을 알 수 있다.

STEP2 IPCC AR5 시나리오 평가 지표

- 본 연구에서는 에너지 기술확산의 일반적인 패턴중 IPCC AR5에 사용된 Data Base를 실질적으로 비교가 가능한 **기술수용 지역의 중심부에서 주변부 로 갈수록 빠르게 확산함**, **S-shape Curve 형태로 확산함,** 2가지 패턴을 활용하여 시나리오를 평가하였다.
- '기술수용지역의 중심부에서 주변부로 갈수록 빠르게 확산함'을 평가하기 위해서 2010년 이전 과거의 데이터는 IEA 데이터를 사용하였으며, 미래의 데이터는 IPCC AR5 시나리오의 Low Scenario, High Scenario의 데이터를 이용하였다. Core 부분은 OECD, Rim 부분은 ASIA, REF (Reforming Ecomonies of Eastern Europe and the Former Soviet Union), Periphery 부분의 MAF(Middle East and Africa), LAM(Latin America and the Caribbean)지역으로 한정하였으며, 각 지역의 Carbon Intensity, Energy Intensity 변동을 비교, 평가하였다. (Carbon Intensity, Energy Intensity는 해당지역의 저탄소, 고효율 에너지 기술의 수준을 반영한다.)
- 'S-Shape Curve 형태로 확산함'을 평가하기 위하여서도 IEA데이터와 IPCC AR5 시나리오를 활용하였으며 Hydro, Nuclear, Solar, Wind 에너지의 Global Electricity output을 평가 지표로 삼았다.

STEP3 IPCC AR5 시나리오 평가

1) IPCC AR5 시나리오가 기술수용 지역의 중심부에서 주변부로 갈수록 빠르게 확산함을 평가

Figure 1. Energy Intensity (Low Scenario)

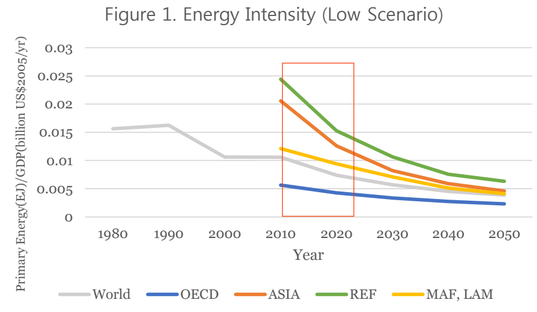


Figure 2. Energy Intensity (High Scenario)

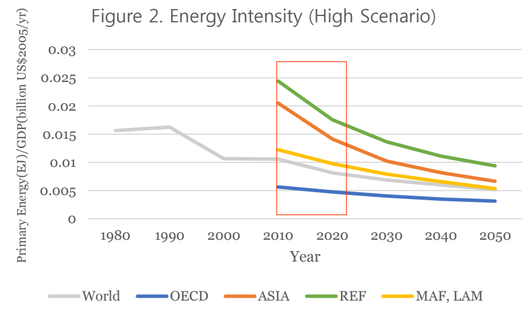


Figure 3. Carbon Intensity (Low Scenario)

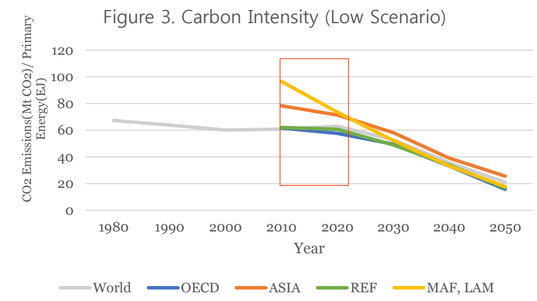
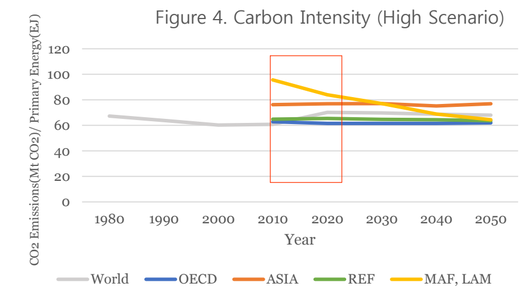


Figure 4. Carbon Intensity (High Scenario)



- Low Scenario, High(BAU) Scenario 모두 전반적으로 중심부(OECD)에서 주변부(MAF,LAM)으로 갈수록 Carbon Intensity, Energy Intensity가 감소하는 양상을 보이고 있다.
- Energy Intensity의 경우 Low Scenario, High(BAU) Scenario 모두 비슷한 패턴을 보이나, Figure 3. Carbon Intensity(Low Scenario)의 경우 2010년 이전의 과거 IEA의 기록과, High(BAU) Scenario의 수치들과 비교하여 보았을 때 급격한 감소를 보이는 것으로 보아, 저 탄소기술에 대한 높은 비중이 반영되어 있다고 볼 수 있다.

2) IPCC AR5 시나리오가 시간이 지남에 따라 S-shape Curve 형태로 확산함을 평가

Figure 5. Global Electricity output (Low Scenario)

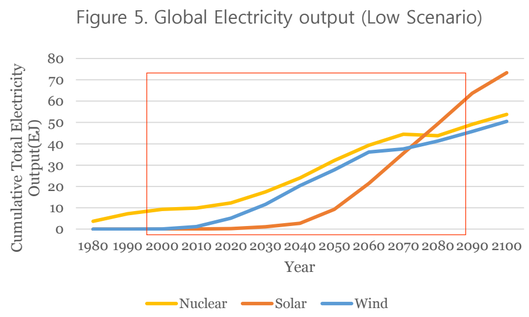


Figure 6.Global Electricity output (High Scenario)

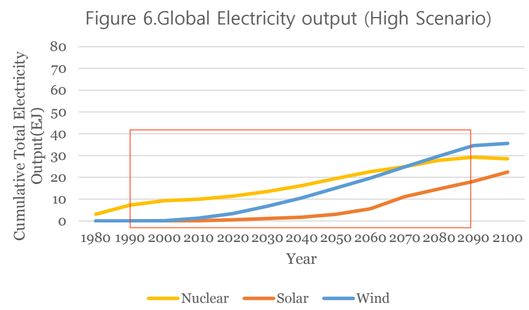
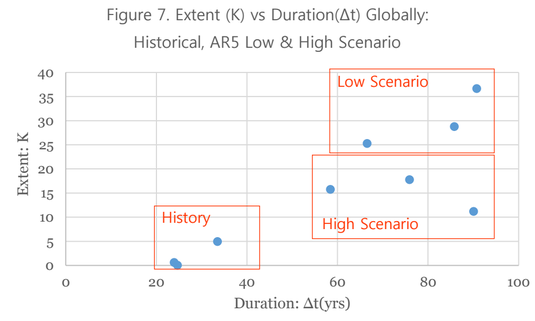


Figure 7. Extent (K) vs Duration(Δt) Globally:

	Extent (K)	Duration(Δt)
History_Nuclear	4.95	33.5
History_Solar	0.05	24.69
History_Wind	0.6	23.96
Low Scenario_Nuclear	28.77	85.84
Low Scenario_Solar	36.65	90.79
Low Scenario_Wind	25.26	66.57
High Scenario_Nuclear	15.75	58.45
High Scenario_Solar	11.19	90.1
High Scenario_Wind	17.78	75.92



- Nuclear, Solar, Wind 기술들은 Low Scenario, High(BAU)Scenario 모두, 대부분 S-Shape pattern을 따르고 있으며 High (BAU) Scenario에서는 2100년까지 신재생 에너지 기술들이 S-Shape pattern의 도입기와 성장기 사이의 특이점 (Singular point)을 지나지 않을 것으로 보고 있다.
- K(기술확산 정도)와 Δt (기술 확산 정도가 1%에서 50%에 도달함에 걸리는 기간)은 Figure.7과 같으며, 시나리오와 과거의 패턴을 비교해 보았을 때, 크게 다르지 않다.

결론

- '기술수용 지역의 중심부에서 주변부 로 갈수록 빠르게 확산함', 'S-shape Curve 형태로 확산함.' 이상의 2가지 일반적인 에너지 기술 확산 패턴으로 IPCC AR5의 시나리오를 평가하였을 때, 시나리오의 추정치 (2100년 이산화탄소 농도)에 따라 정도의 차이는 있었지만 대부분 기술확산 패턴과 크게 다르지 않은 결과를 보였다.
- 하지만 IPCC AR5 시나리오가 과거의 기술확산에 비해 보수적 혹은 급진적이라는 평가에 도달하기에는 부족하며, 향후 추가적인 연구를 통하여 시나리오 평가와 분석을 진행한다.