

Solar, Wind, Battery(SWB)로 탄소중립 가능성 연구

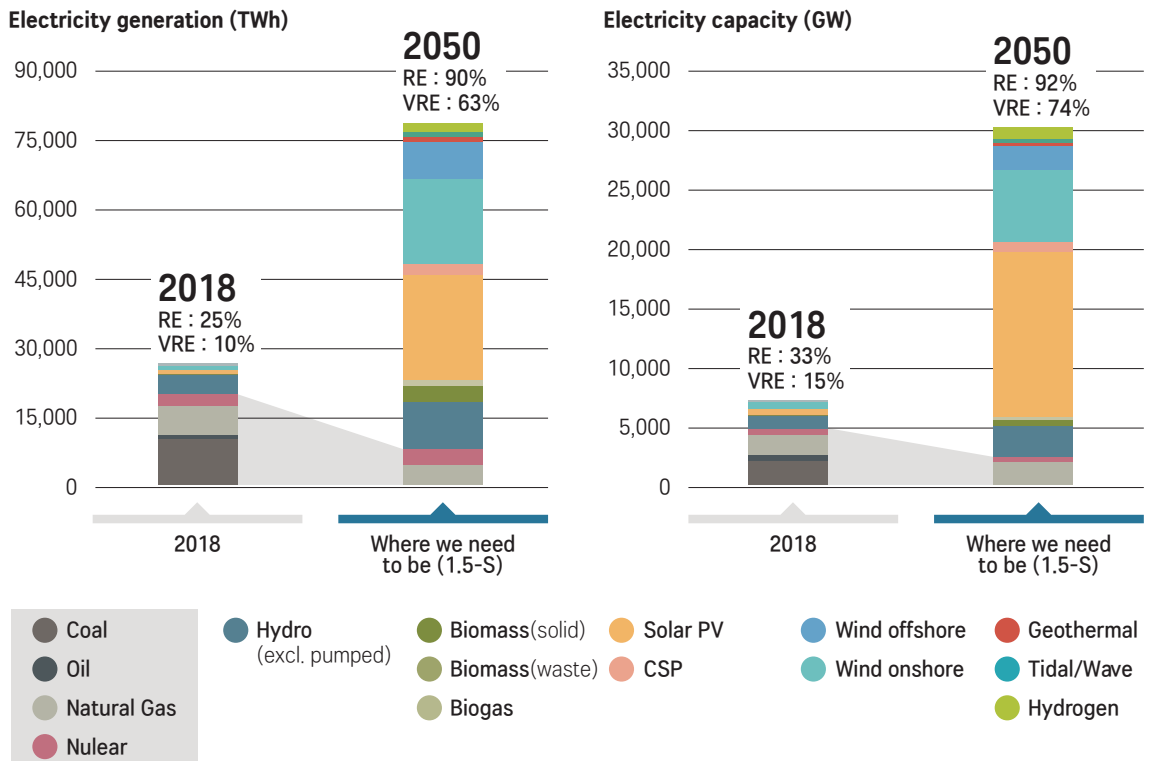
박 승 용 전 효성중공업 연구소장(syngpark@me.com)

기후위기와 탄소중립

2021년 10월 영국 글래스고우에서는 유엔기후변화협약당사국총회(UN Climate Change Conference, Conference Of the Parties 26, COP26)가 개최되었다. 각국이 석탄발전 감축에 최초로 합의했고 2030년까지 국가온실감축목표(Nationally Determined Contributions)를 상향하기로 했으며 한국도 2018년 대비 40% 이상 감축하기로 했다. 이를 달성하기 위해 재생에너지 발전량을 30%까지 상향하기로 했다.^{1) 2)} 그러나 이 회의에서 도출된 각국의 목표를 종합해 보면 아쉽게도 2050년에 1.5°C 이내로 기온의 상승을 억제하기에는 많이 부족하다. 국제재생에너지기구(International Renewable Energy Agency, IRENA)에서는 이 목표를 달성하기 위해서는 2050년에 태양광, 풍력 등 재생에너지의 보급률을 전체 전기발전용량의 74%인 22TW가 되어야 한다고 제시하였다.³⁾ 2021년 말 현재 태양광과 풍력의 누적 설치용량이 각각 1TW 정도이므로 앞으로 각각 약 10배 정도의 추가설치가 필요하다는 주장이다. (그림 1 참조)

그림 1 1.5°C 시나리오를 달성하기 위한 신규발전량 및 발전설비 용량

Electricity generation and capacity by source, 2018 and 2050(TWh/yr and GW) in the 1.5°C Scenario



Note : 1.5-S = 1.5°C Scenario; CSP = concentrating solar power; GW = gigawatts; PES = Planned Energy Scenario; PV = photovoltaic; RE = renewable energy; TWh/yr = terawatt hours per year; VRE = variable renewable energy.

1) <https://www.bbc.co.uk/news/world-59277788>

2) https://www.mofa.go.kr/www/brd/m_4080/view.do?seq=371966

3) <https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>

각국의 탄소감축 목표가 미흡한 이유는 재생에너지 발전원이 갖고 있는 변동성을 해결하기 위한 유연성 자원, 그리고 전력망의 보완을 위한 투자가 너무 막대하다고 생각하여 재생에너지의 신규설치 속도를 높이기 어렵다고 판단한 데 기인한다. 또한, 이런 판단의 배경에는 International Energy Agency(IEA), US Energy Information Agency(US EIA) 등 유수의 국제에너지 관련 연구기관들이 실망스럽게도 2000년 부터 재생에너지의 설치는 지속적으로 낮게, 석탄화력의 퇴출은 지속적으로 높게 전망해 왔기 때문이다. (그림 2,3 참조)

그림 2 IEA 태양광 설치 전망 및 실적

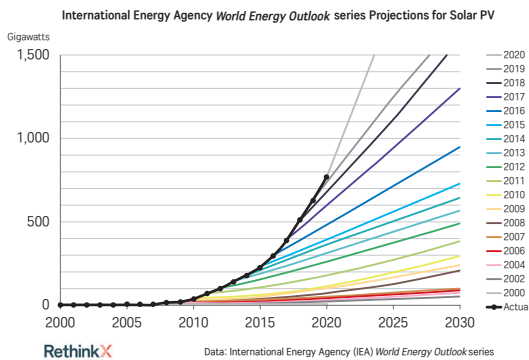
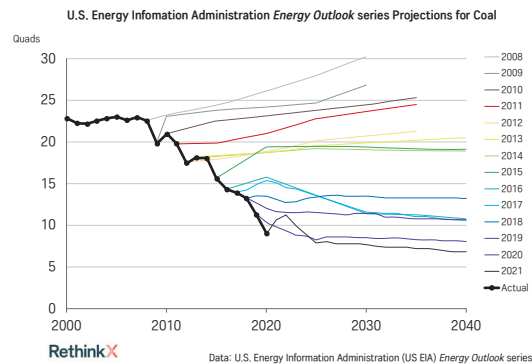


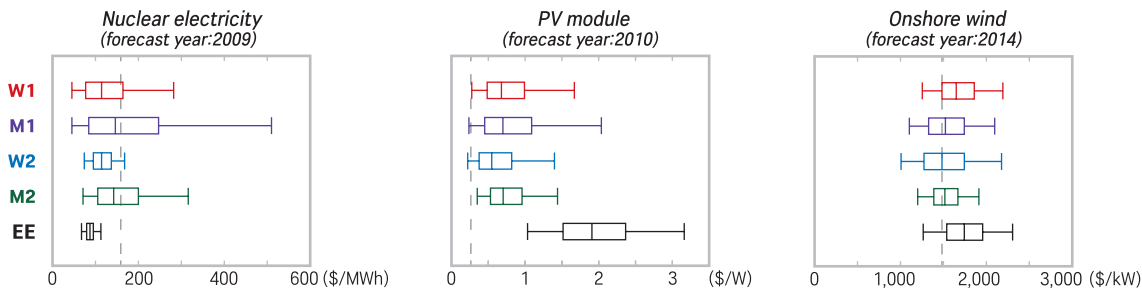
그림 3 EIA 석탄화력 발전 전망 및 실적



에너지기술 가격전망 및 실제 결과

IEA나 US EIA 등 연구기관들의 전망이 실패한 배경에는 전망방법의 오류가 원인이 되었다는 사실이 2021년 5월에 전미과학아카데미 저널에(Proceedings of National Academy of Sciences, PNAS) 실린 논문 에 의해 밝혀졌다.⁴⁾ 이 연구에서는 2010년에 크게 두 가지 방식, 즉 학습곡선에 기반한 모델기반예측(Model Based Forecast)과 전문가조사예측(Expert Elicitation Forecast) 방식으로 2019년의 가격을 전망한 값 과 2019년의 실제 가격을 비교 했다. 모델기반예측 방식으로는 2개의 모델, 즉 Wright의 법칙과 Moore의 법칙을 사용했고 각각 불확실성을 예측하는 두가지 방식, Stochastic Shock과 Stochastic Exponent 등 총 4가지로 나누어 분석하였다.

그림 4 원자력발전 LCOE 추이, 재생에너지 설치비용 추이(전망 대 실적)



4) <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1917165118>

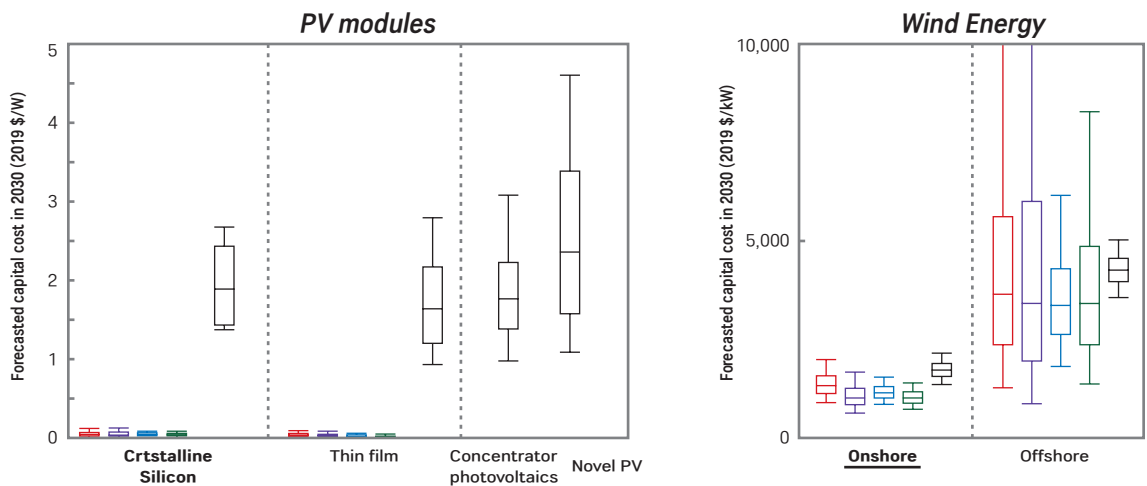
Ø W1:Wright의 법칙+Stochastic Shock(red), M1 Moore의 법칙+Stochastic Shock(purple)
 Ø W2:Wright의 법칙+Stochastic Exponent(blue), M2:Moore의 법칙+Stochastic Exponent(green)
 Ø EE는 전문가조사 예측방식(black)
 Ø 실제 가격(점선)

태양광 모듈의 경우 전문가조사예측 방식으로 전망한 2019년의 태양광 모듈의 가격은 kW당 2,000불, 모델기반예측 방식은 약 600불~700불로 예측하였으나 실제 결과는 300불로 나타났다. 전문가조사예측 방식이 무려 6.7배나 비싸게 예측했고 모델기반예측 방식은 2배 정도로 비싸게 예측하였다는 것이 밝혀졌다. 육상풍력의 경우에도 양상은 비슷했으나 오차범위가 크지 않았고 해상풍력의 경우에는 오히려 전문가도출 방법의 정확성이 높았다. 반면에 원자력의 경우는 전문가조사예측 방식은 원자력 발전의 Levelized Cost Of Energy(LCOE)를 90불로 예측하였고 모델기반예측 방식으로는 110불~140불로 예측하였으나 실제 가격은 160불로 나타나 각각 78%, 14~45% 낮게 전망한 것으로 판정되었다. 한 마디로 태양광발전 전망을 전문가조사 예측방법으로 전망한 결과는 모델기반 예측방법에 비해 크게 부정확하였다는 것이 밝혀졌는데 이를 레퍼런스로 계획을 수립했던 정책결정자, 투자자, 기업들은 엄청나게 큰 차질로 인해 애로를 겪었음을 알 수 있다.

2030년 까지의 에너지 기술 가격전망

2010년에 전망한 가격이 2019년에 실제 어떤 결과를 가져왔는지 분석해 보았고 이번에는 2030년 가격을 전망한 결과를 다루었다. [그림 5]

그림 5 태양광 및 풍력의 2030년 설치비용 예상



태양광 모듈의 가격은 이전보다 더 극적인 변화를 보이고 있다. 단결정 모듈의 경우 모델기반 예측방법은 100불 정도로 예측한 반면 전문가조사 예측방법은 무려 1,900불로 예측을 하고 있다. 이런 전문가조사 예측방법으로 전망한 가격으로 탄소중립에 소요되는 예산을 수립하니 당연히 천문학적인 투자비가 들어간다는 결론



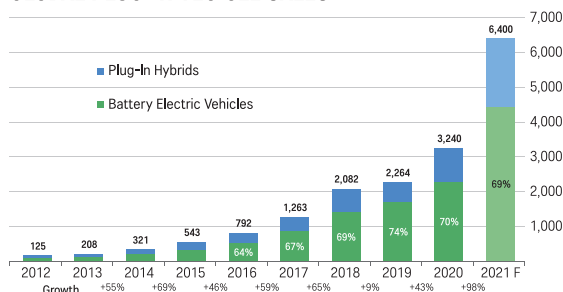
에 도달할 수 밖에 없게 된다. 풍력의 경우 대체로 육상이나 해상풍력 모두 모델기반이 전문가도출보다 약간 더 낮은 것을 볼 수 있고 태양광과 풍력이 이렇게 큰 차이가 나는 이유에 대한 견해도 밝히고 있다. 즉, 태양광은 모듈러 방식이라 반복적으로 사용되는 부품이 많고 용량을 늘리려면 이 모듈을 직병렬로 연결하면 쉽게 구성되기 때문에 학습속도가 빠른 반면, 풍력의 경우는 단위 풍력기기의 용량이 점점 대형화하는 추세로 발전해 왔기 때문에 전체 풍력발전기 설비 용량이 늘어나도 반복 사용되는 단위부품의 갯수가 늘어나지 않아 학습 효과가 크지 않은 것이라 지적한다. 이러한 결과는 과거에는 풍력의 가격이 더 낮아서 더 빠른 속도로 풍력발전기 설치가 이루어졌으나 향후에는 태양광의 가격 하락속도가 더 빨라서 풍력보다 더 많은 용량이 설치될 것을 예측할 수 있게 한다.

배터리 전력저장장치(Energy Storage System)

한편 재생에너지가 대세가 되는 미래 발전설비의 변동성을 보완해 줄 전력저장장치가 필수적인 구성요소로 양수발전, 수소, 배터리 ESS 등이 거론되고 있으나 최근 전기차의 급속한 보급을 통해 가격이 기하급수적으로 하락한 Li-ion 배터리를 활용하는 ESS가 유망한 대안으로 떠오르고 있다. 배터리 가격은 지난 10년 동안 1/9로 하락하였고 이는 Wright의 법칙으로 해석해 보면 연 평균 20% 정도의 하락이 일어난 것을 알 수 있다.⁵⁾⁶⁾

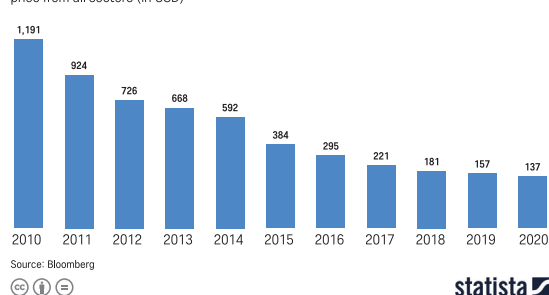
그림 6 EV 판매 추이 및 Li-ion 배터리 가격 하락 추이

GLOBAL PLUG-IN VEHICLE SALES



Lithium Battery Prices Plunge

Volume-weighted average of lithium-ion battery price from all sectors (in USD)



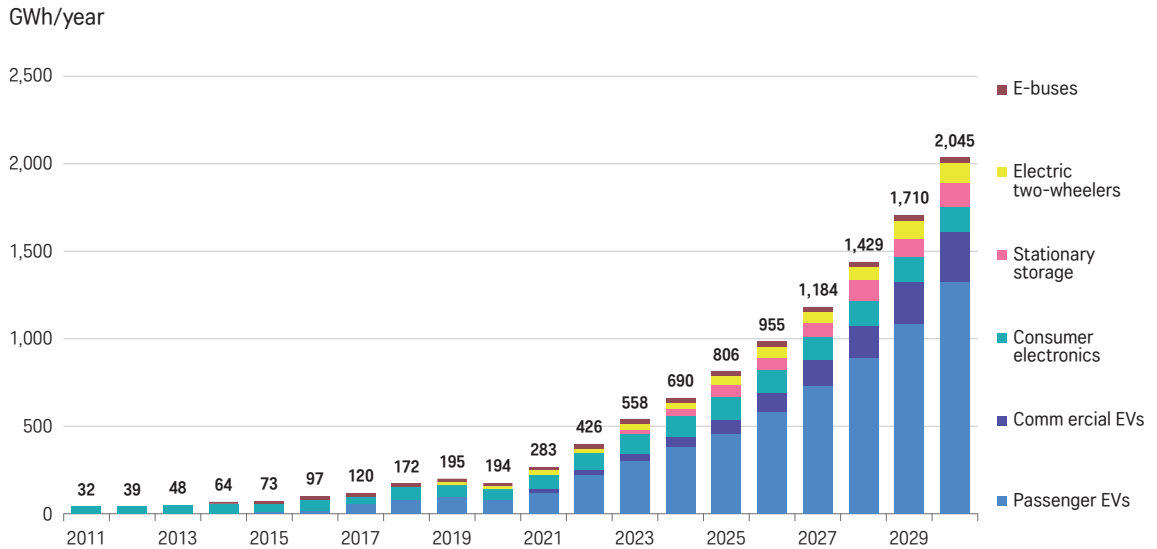
2020년에 출하된 전기차를 비롯한 Li-ion Battery의 출하량은 2020년 194GWh로부터 2030년에는 2,045GWh로 10배 이상의 성장을 이룰 것으로 예상하고 있다. 누적으로 계산하면 2020년 까지 1TWh 정도

5) <https://www.statista.com/chart/26845/global-electric-car-sales/>

6) <https://www.statista.com/chart/>

인데 2030년까지는 11TWh로 성장하여 배터리 가격의 하락은 지속될 것으로 예상된다.⁷⁾ [그림 7] 가장 큰 점유율을 보이는 전기차배터리의 가격은 2020년에 kWh당 137 USD인데 2030년에는 60 USD 정도가 될 것으로 보인다. 이와는 별도로 재생에너지의 급격한 증가에 따른 Li-ion 배터리를 이용하는 ESS도 또한 용량의 급격한 증대가 예상되는데 아직은 이를 반영한 시장조사 결과는 없는 실정이다.

그림 7 Li-ion Battery의 수요 추이(2010 ~ 2030)



SWB(Solar,Wind, Battery)는 2030년 까지 가장 값싼 전력시스템이 될 것이다.

2020년에 이미 태양광(Solar PV)과 풍력(Wind) 발전 등 재생에너지는 이미 기존 발전원보다 싼 발전원이 되었고 향후 10년 후에는 또 추가적으로 70%의 가격이 하락할 것으로 예측되며 배터리 ESS와 결합된 발전 시스템은 가장 값싼 발전원이 되어 탄소중립을 위한 발전 솔루션으로 자리매김할 것으로 예상된다.⁸⁾ [그림 8] 미국 캘리포니아에 소재하고 있는 RethinkX사에서는 이러한 가격 하락을 바탕으로 기존의 전력시스템 전체를 SWB에 기반한 전력시스템으로 대체가능성을 연구하여 그 결과를 발표했다. SWB 기반의 전력시스템으로 바꿀 경우 LCOE는 지금보다 오히려 더 낮은 가격으로 전력을 공급할 수 있을 것으로 예상된다. 이런 변화에 의해 기존 발전원인 석탄화력 뿐 아니라 원자력과 가스조차도 투자 효과가 급격히 감소하며 신규설치가 줄어들 것이며 기존에 설치되어 있는 석탄화력 뿐 아니라 가스발전과 원자력발전도 좌초자산화가 될 것이다. 이렇게 될 경우 1.5℃ 이내로 지구온도를 억제하기 위한 탄소중립의 목표가 많은 국제기구, 정부 및 연구기관들에서 걱정하는 것과는 달리 2050년 보다 훨씬 빠른 시간에 달성될 수 있을 것이다.

7) <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/electric-vehicles-to-drive-massive-battery-demand-bnef-chart>

8) RethinkX사는 2030년에 SWB가 가장 값싼 발전원이 될 것이라 전망

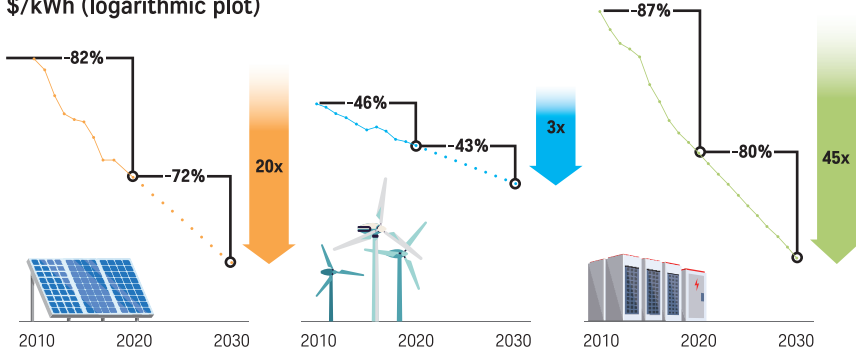
그림 8 RethinkX 2030년 SWB 단 변동 전망가

RethinkX사의 Rethinking Energy 2020-2030

100% Solar, Wind, and Batteries is the Cheapest System by 2030

Falling costs drive technology disruptions. Solar and wind are already the cheapest new generation options, and cost less than existing coal, gas, and nuclear power plants in many areas. The cost of SWB systems will fall another 70% by 2030, making disruption inevitable.

\$/kWh (logarithmic plot)



» We are beyond the rupture point, and the bulk of disruption will unfold rapidly over the next decade.

» Electricity from a 100% SWB system in 2030 will cost less than 3 cents per kilowatt-hour.

» New investments in coal, gas, or nuclear power is financially unviable.

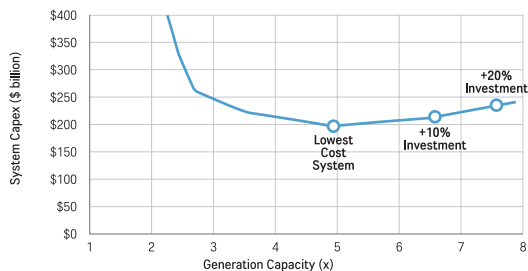
» Existing coal, gas, and nuclear assets will be stranded.

100% SWB System Simulation

미국의 RethinkX라는 연구소에서 이런 가격의 하락을 바탕으로 미국의 몇 개 지역에 대해 향후 10년 동안 충분한 Solar, Wind, Battery 설치를 할 경우, 즉 지역별로 소위 RE100을 한다고 할 때 들어가는 투자비를 산정해 보았다. 이 연구 중에서 우리나라 탄소중립 목표와 유사한 전력량을 사용 중인 텍사스의 케이스를 소개하려 한다. 텍사스는 연간 총 전력 소비량이 414TWh이고(한국은 500TWh) 평균 전력소비량은 47.2GW, 피크수요는 81.5GW이다. RE100을 위해서는 2030년에 Solar 360GW, Wind 40GW 등 400GW의 재생 에너지 용량이 필요하고 배터리 ESS는 2,300GWh(49시간 저장분) 이 필요하다. (한국의 탄소중립 계획의 태양광 500GW, 풍력 100GW 등을 통해 RE70을 하겠다는 계획과 비교해도 다소 적은 양이나 충분히 참고할 만한 케이스이다.)

그림 9 SWB Clean Energy U-Curve 및 투자비에 따른 전기화 비중

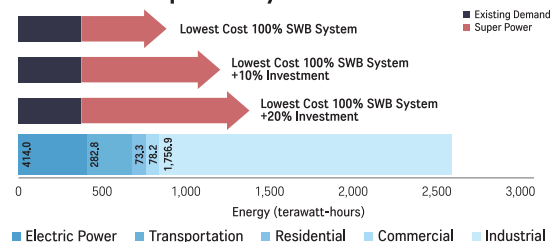
Figure 18. The Clean Energy U-Curve for Texas



Source : RethinkX

The Clean Energy U-Curve for Texas shows that there is a nonlinear tradeoff relationship between generation capacity and battery energy storage. Most conventional analyses to date have assumed that building more than 1.5x generation capacity is infeasible, and as a result many weeks of battery energy storage would be required at enormous cost. Using the Clean Energy U-Curve, our analysis shows that in Texas the most affordable combination of these technologies comprises 4.9x generation capacity with only 49 hours of battery energy storage for a total system capex of \$197 billion. This is much less expensive than most conventional analyses have claimed.

Figure 23. Texas Super Power - Energy Use Comparison by Sector



Source : RethinkX

This chart shows that super power output in Texas would be large enough to offset a substantial fraction of all other energy use in the state, and that modest increases in capital investment yield disproportionately large increases in super power. If Texas chose to invest in an additional 20% in its 100% SWB system, the super power output could be used to replace most if not all fossil fuel use in the residential, commercial, and road transportation sectors combined (assuming electrification of vehicles and heating).

[그림 9]에서 보듯이 RE100을 위해서는 현 필요 발전량의 4.9배의 태양광 및 풍력 발전용량이 필요하고, 49시간의 ESS 저장용량이 필요한데 이 경우 총 투자비는 USD 197B이면 가능하다고 한다. 이렇게 될 경우 잉여전력의 발생으로 발전부문의 RE100을 넘어서서 전기차 충전, 가정용 및 사무용 건물의 냉난방의 전기화 수요도 커버가 된다. 텍사스는 한국과 유사하게 산업용이 유난히 큰데 만약 투자 최저점에서 20%를 추가로 늘려 USD 240B를 투입하면 전력 생산용량이 7.6배로 늘어나고 대신 배터리의 양은 1,500GWh로 줄어들게 된다. 이 경우 산업용의 1/3까지도 커버할 수 있게 된다. 발전부문의 RE100을 달성할 경우 전기가격은 1.6센트가 되고 20% 추가 투자를 하는 경우에는 1.3센트가 된다. 그러나, 이 가격은 이 시물레이션을 실행할 때 전제조건을 고립망, 분산전원 및 분산저장장치, EV와 Grid 사이의 Vehicle To Grid(VTG), Demand Response(DR) 등의 활용을 배제한 최악의 조건을 상정한 것으로 이들을 활용한다고 가정하면 1센트 미만으로 될 가능성이 높다.

그림 10 100% SWB의 구현시 전기가격 전망

Table 5. Texas System Electricity Cost with Super Power Investment and Utilization

	Lowest Cost 100% SWB System	Lowest Cost 100% SWB System + 10% Investment	Lowest Cost 100% SWB System + 20% Investment
0% Super Power Utilization	3.5 cents/kilowatt-hour	3.9 cents/kilowatt-hour	4.2 cents/kilowatt-hour
50% Super Power Utilization	2.2 cents/kilowatt-hour	2.0 cents/kilowatt-hour	1.9 cents/kilowatt-hour
100% Super Power Utilization	1.6 cents/kilowatt-hour	1.3 cents/kilowatt-hour	1.3 cents/kilowatt-hour

Source : RethinkX

한국의 탄소중립 계획에 대하여

이를 우리 나라에 대입해 보면 현재 재생에너지 LCOE 가격은 미국의 2배 정도이고, 재생에너지 용량은 600GW로 유사하고 ESS 용량은 텍사스는 49시간 저장할 수 있는 용량이 필요하나 89시간을 적용해 보도록 하면 용량으로는 4,500GWh가 필요하다.(이 시물레이션에서 재생에너지 자원이 가장 빈약한 뉴잉글랜드의 사례 적용). 투자비로 환산해 보면 대략 텍사스의 약 2배, 약 500조원 정도의 투자를 할 경우 가능하다는 결론이다. 투자 대비 효과를 따져보면 한국은 에너지 해외의존율이 93%로 매년 150조원 내외를 수입한다. 연간 800TWh 재생에너지 발전으로 40조원을 수입 대체한다면 30년간 총 1,200조원이 절약되며 재생에너지가 더 늘어나면 에너지자립까지도 가능하게 될 것이다. 간략히 계산을 해 본 것이지만 한국의 실정에 맞는 시물레이션을 체계적으로 해야 정확한 투자비와 전기가격이 산출될 수 있기 때문에 국내 연구진들의 연구가 필요하다는 제언을 하고자 한다. 재생에너지 중심의 전기생산 시스템을 갖추면 전기요금이 천문학적으로 올라간다는 이야기는 새로운 기술 및 시장 변화에 대해 모르거나 화석연료나 원자력 등 기존 발전시스템의 유지를 바라는 사람들의 희망사항임이 드러났다. 원료가 필요없으며 단가가 급속히 하락하는 발전 시스템으로 인해 전기요금은 지금보다 하락하고 저렴한 전기요금으로 인해 전력소비가 증가하면 인류의 영원인 탄소중립을 통한 기후문제 해결 뿐 아니라 사회의 많은 부분이 더 활성화 되는 효과를 기대할 수 있다. 이런 전망을 바탕으로 테슬라는 전기차 사업 뿐 아니라 태양광과 ESS 사업을 적극 추진하여 선도하고 있으며 기가팩토리, 테라팩토리를 건설하는 등 거대한 도전을 하고 있다. 이에 비하면 방향도 잡지 못하고 맴돌고 있는 한국도 빨리 방향을 전환하고 과감한 속도전을 펼쳐야 에너지 전환이라는 거대한 와해성 혁신의 소용돌이에서 생존하고 번영할 수 있는 기회를 가질 수 있을 것이다.