연구논문 「환경정책」 제31권 제3호 2023. 9: 29-47
DOI http://dx.doi.org/10.15301/jepa.2023.31.3.29
pISSN 1598-835X eISSN 2714-0601

포트폴리오 이론을 통한 최적 전원구성 전략 연구*

A Study on the Optimal Strategy for the Electricity Mix Based on the Portfolio Theory

김나현** · 홍종호***
Nahyun Kim · Jong Ho Hong

요약: 이 연구는 재생에너지 등 친환경 에너지의 확대가 가격 변동성과 비용 불확실성을 함께 고려한 기대효용 변화에 어떤 영향을 미치는지를 계량화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 포트폴리오 이론을 활용하여 경제적 효용을 비교·분석하고, 재생에너지 확대 방향성에 대한 경제적 근거를 제공한다. 이 연구는 현재 대한민국의 전원구성을 기준(reference)으로 설정하고, 재생에너지 확대와 화석에너지 감축에 관한 국소적인 변화를 통해 효용 개선 효과를 분석한다. 이러한 측면에서 이 연구는 재생에너지의 확대를 환경 및 윤리적 당위성뿐만 아니라, 경제적 효용차원의 정량적인 근거를 제시한다는 점에서 의의가 있다.
핵심주제어: 전원구성, 현대포트폴리오이론, 비용변동성

Abstract: This study aims to measure the expected utility gains resulting from the expansion of renewable energy sources for power generation, considering both their costs and the volatility of prices. By applying Modern Portfolio Theory, which enables a comparison of economic benefits while accounting for price volatility and uncertainty, this study provides robust economic evidence supporting the expansion of renewable energy for power generation. Our findings emphasize the crucial role of renewable energy sources, such as solar and wind, in mitigating electricity mix risks at local level in South Korea. Furthermore, this study establishes a quantitative economic foundation for the expansion of renewable energy, advancing beyond the existing rationale that primarily justified such expansion solely on environmental and ethical considerations.
Key Words: Power Generation Mix, Modern Portfolio Theory, Price Volatility

* 이 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제대응 환경기술기발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003560007).
** 주저자, 한국개발연구원 글로벌지식협력단지 국제협력실 국제협력1팀장
*** 교신저자, 서울대학교 환경대학원 교수, 서울대 환경계획연구소 및 지속가능 발전연구소 겸무연구원

I. 서론

2000년대 이후 국제 에너지 정책의 흐름은 화석연료 활용을 줄이고, 재생에너지 비중을 확대해 나가는 추세이다. 특히 최근 들어서는 국제적으로 청정에너지 중심의 성장, 탄소중립 실현 정책 등을 강조하고 있다. 국제에너지기구(International Energy Agency(IEA))에 의하면, 2021년과 2022년 신규 발전설비 중 재생에너지 설비가 차지하는 비중이 90%에 달하는 등 재생에너지 증가 추세가 지속될 것으로 전망한다(IEA, 2021).

이와 같은 재생에너지 전환 움직임은 파리협정(Paris Agreement)에 의거 전 세계가 기후변화에 대응하기 위한 노력의 일환으로 화석연료에 기반한 에너지원에서 탈피하여 친환경적인 재생에너지로 대체해야 한다는 환경적 당위성에서 출발하였다. 환경적 측면에서 볼 때 재생에너지에 대한 중요성은 다수의 선행연구에서 과학적 근거가 뒷받침되었고, '기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovermental Panel on Climate Change(IPCC))' 등을 통한 국제적인 합의가 이루어지고 있는 상황이다(Bao and Fang, 2013; IRENA, 2017; Al-Shetwi, 2022).

그러나 경제적 측면에서의 재생에너지 기여도는 사회적 인식 및 수용성 제고 노력이 요구되는 실정이다. 무엇보다 전원 가격에 대한 분석 위주로 효용을 평가해 온 측면이 있어 재생에너지의 낮은 가격 변동성이 효용으로 평가되지 못하는 측면이 있다. 이는 재생에너지원별 과거 데이터의 부족과 한계로 인한 것에 주로 기인하나, 최근 여러 재생에너지원별 비용 데이터가 축적되고 있는 만큼 재생에너지 중요성에 경제적 논거를 줄 수 있는 실증 연구는 시의적절하다.

2019년 12월 코로나바이러스감염증-19 팬데믹이 발생한 이후 에너지 시장에는 많은 변화가 일어났다. 산업 활동이 위축되고 국가 간 이동이 제한됨에 따라 전 세계 원유 수요가 급감하고, 천연가스, 석탄 등 원자재 가격 변동성이 심화되었다(IEA, 2021). 2020년 4월에는 원유선물가격이 사상 처음 마이너스를 기록하기도 하였고, 주요 산유국에서는 석유 공급을 제한하면서

유가는 2020년 한 해에 두 배 가까이 급등하였다(국회예산정책처, 2021). 이처럼 원유를 비롯한 화석연료의 가격은 예측이 어렵고 변동폭이 크며 지정학적 리스크에 민감하다. 최근 러시아-우크라이나 전쟁과 양적완화로 인한 인플레이션 심화에 따라 에너지 가격이 크게 상승하는 등 에너지 위기에 대한 우려가 확산되고 있기도 하다. 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라의 경우 에너지 안보에 더욱 취약하다는 사실을 시사하며, 전원구성 계획에 있어 발전 비용의 최소화만을 강조하는 것이 아닌 에너지 안보 차원에서의 변동성과 그에 따른 불확실성을 함께 고려함으로써 전반적인 수급 안정성을 제고하는 전략이 필요함을 보여준다.

이 연구는 효율적 에너지 전환 목표 달성을 위한 에너지믹스 최적화 전략 및 방향성을 제시하는 것을 목표로 한다. 첫째, 에너지 가격 변동성 측면에서는 전체 포트폴리오 가격의 변동성을 통해 불확실한 비용 변화로부터의 대응력을 살펴본다. 둘째, 대기오염물질 및 온실가스 배출에 따른 외부 비용을 반영함으로써 환경 지속가능성을 제고할 수 있는 전원구성계획에 대한 분석을 수행한다. 마지막으로 원전사고대응비용을 토대로 사회적 관점에서의 발전비용 및 리스크 관리 방향성을 제시한다.

II. 선행연구 검토 및 차별성

1. 선행연구 검토

현대포트폴리오이론(Modern Portfolio Theory(MPT))을 에너지계획 부문에 사용한 최초 연구로는 미국 전력회사의 화석연료믹스에 대해 다룬 Bar-Lev and Katz(1976)가 있으며, 미국의 에너지 가격 쇼크에 대한 위험을 줄이기 위한 에너지믹스를 제시한 Humphreys and McClain(1998) 연구 등이 있다. 에너지 분야에 MPT를 적용한 문헌의 경우 대부분 화석연료 가격에 대한 리스크를 중심으로 에너지믹스 전략을 제시하고 있다. 반면 최근 선행연구를 보면 에너지믹스에서 재생에너지를 포함한 문헌이 주를 이루며, 재생에너지 비중 확

대 시의 기대 효과를 계량적으로 추정하는 연구가 활발하다.

Awerbuch(2000)는 MPT 방법론을 에너지 분야에 도입하여 친환경적인 에너지원이 발전 비용 및 위험을 감소시킬 수 있다고 주장하였다. 이 연구에 의하면 유럽은 풍력발전의 비중을 30% 확대하더라도 현재와 동일한 수준의 비용을 유지할 수 있고, 5~6%의 위험부담을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. Awerbuch and Berger(2003)는 연료가격 변동에 따른 위험뿐만 아니라 운영 및 유지보수(O&M)에 따른 위험을 동시에 고려하여 적정 수준의 유럽 에너지 기술 믹스 전략을 연구하였다. MPT 적용을 위해 에너지원별 생산단가의 역수(kWh/US cent)를 포트폴리오상 기대 수익으로 설정하고, 천연가스, 석탄, 석유, 원자력, 풍력을 대상으로 분석하였다.

그 결과 EU에서 제시한 2010년 에너지믹스 계획은 2000년 기준의 에너지 믹스에 비해 고위험 및 고수익 성향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 유럽 2010년 에너지믹스 계획에서 풍력 및 여타 유사한 수준의 고정비용을 지닌 재생에너지원 비중을 확대할 경우 2000년도 목표치에 비해 비용 및 위험을 줄일 수 있는 것으로 도출되었다. Bhattacharya and Kojima(2017), Martinez-Fernandez, deLlano-Paz, Calvo-Silvosa and Soares(2019) 등 최근 선행연구들에서도 대체적으로 재생에너지 확대가 리스크 감소 및 효용 증가 효과가 있는 것으로 나타났다.

국내에서 포트폴리오 이론을 활용한 전원구성 연구는 이유수(2012), 차경수(2017) 등이 있었다. 그러나 과거 재생에너지원별 데이터가 충분하지 않은 등의 한계로 인해 재생에너지 전체를 단일 범주로 분류하였으며, 최적해로 계산된 대안이 이론적으로 의미가 있겠으나 현실적으로 달성하기 어려울 수 있는 한계점 등이 있었다.

2. 선행연구와의 차별성

이 연구가 지닌 선행연구와의 차별점으로 다음 세 가지를 들 수 있다. 첫째, 비용-리스크 모형을 사용한다. 수익-리스크 모형에 적용하는 선행연구에서는 비용의 역수를 수익으로 취한 후 모형에 활용하게 되는데, 이 때 리스

크는 수익의 불확실성을 나타내므로 비용의 역수에 대한 변동성으로 리스크가 측정된다. 따라서 비용이 유의미하게 커질 경우 상대적으로 리스크가 과소평가되거나, 반대로 비용이 유의미하게 작아질 경우 리스크가 과대평가될 여지가 있다. 뿐만 아니라 공분산 행렬의 의미도 비용의 역수에 적용하게 되면 의미론적으로 해석이 어려운 한계가 있다. 그러므로 비용-리스크 모형과 그에 따른 효용함수를 새로 정의할 수 있는 분석 방식이 보다 합리적인 모형이라고 판단한다.

둘째, 발전원의 분석에 있어 재생에너지를 세분화하지 않고 통합적으로 적용한 선행연구들과는 달리 각 재생에너지원에 대해 분석하고, 발전 비용, 외부 비용 등을 개별적으로 평가한다. 현재 국가 전원구성 계획 수립 시 사용되는 모형은 WASP(Wein Automatic System Planning Package)로 우리나라 전력계통의 특수성을 반영한다는 장점이 있다. 그러나 WASP 모형은 가격 변동에 대한 위험성을 고려할 수 없고, 각 전원별 상관관계에 대한 반영이 미흡하다는 단점이 있다. 또한, 전통적 발전기술에 기반한 모형으로 신재생에너지 분석에 있어 제약이 있다(전력거래소, 2011).

재생에너지는 태양광, 풍력, 수력 등을 합하여 전체 전력의 10% 미만으로 낮은 비중을 차기 때문에 이유수(2012), 차경수(2017) 등 국내 선행연구에서는 재생에너지 전체를 하나의 범주로 취급한 연구가 주를 이룬다. 과거에는 신·재생에너지에 대한 발전 비용 자료가 온전하지 않거나, 가격 왜곡 문제 등으로 인해 활용 시 제약이 존재했다. 현 기준으로도 재생에너지원별 정교하고 체계적인 데이터가 부족한 실정이나, 재생에너지에 대한 국제적 관심 및 중요도가 지속적으로 증대되는 추세를 고려했을 때, 재생에너지원별로 세분화한 비용-리스크 차원의 분석은 기존 연구와의 중요한 차별점이다.

셋째, 기존에는 MPT를 활용함에 있어 효율적 경계선(efficient frontier)을 추정하고, 목적함수를 최적화하는 해를 도출하는 것이 연구의 주된 목적이었다. MPT의 경우 현실적이지 않은 극단적인 포트폴리오가 해로 산출이 되는 모서리해(corner solution) 이슈로 인해 현실적인 제한을 정의역의 제한으로 하는 경우가 많다. 이러한 설정은 연구자의 작위적인 선택에 의해 최적

포트폴리오 결과가 도출될 수 있는 한계점이 있다. 따라서 이 연구에서는 최적해의 산출에 초점을 맞추기 보다는 실질적인 시사점을 도출하고자 현재 전원구성 포트폴리오를 중심으로 1%~5% 조정 등의 국소적인 분석을 수행함으로써 포트폴리오 개선 방향성을 제시하고자 한다. 현 정책 포트폴리오를 중심으로 국소적인 변화를 준 포트폴리오들의 효용을 분석하는 것은 현실의 제한요소를 만족시키면서 어떠한 변화의 방향이 실질적인 효용 증가에 기여할 수 있을 지에 대해 의미 있는 결론을 제시할 수 있다는 장점이 있다.

Ⅲ. 연구방법론

1. 연구자료 정의 및 특성

전원구성 포트폴리오 연구에 있어 분석 대상이 되는 에너지원은 해당 연구 목적, 자료 가용성 등에 따라 상이하다. 이 연구는 원자력, 석탄, LNG, 태양광, 풍력, 수력, 바이오 등 총 7개 에너지원을 분석 대상으로 설정하였으며, 비용 데이터로는 정산단가 이외에 환경 비용, 원전사고 기대피해 비용 등의 외부 비용을 함께 고려하였다. 그 배경 및 근거는 다음과 같다.

첫째, 현재 우리나라 전원구성에 있어 주요 비중을 차지하는 원자력, 석탄, LNG 등 세 가지 에너지원은 현재 포트폴리오에서 국소적인 변화를 부여하더라도 주요 비중을 차지하기 때문에 포함되는 것을 가정하였다. 산업통상자원부(2021) 및 한국전력공사(2021)의 2020년 실적을 기준으로 볼 때 원자력과 석탄은 전력 수급에 있어 기저부하의 역할을 하며, LNG 또한 첨두부하 발전원으로서 많은 비중을 차지하고 있다. 태양광, 풍력, 수력, 바이오 등 재생에너지의 경우 전체 비중의 합이 10% 미만으로 작은 수준이나, 전술한 바와 같이 재생에너지를 하나로 통합하기 보다는 향후 비중 확대 가능성이 높고, 전원별 특성이 상이하므로 재생에너지원을 총 네 가지로 세분화하여 분석하였다. 한편, 유류, 해양 등 비중치가 0.4~0.9% 사이에 있는 에너지원들의 경우 현 상황에서 활용도가 적고, 미래 시점에서 볼 때에도 활용 잠재성이

낮으며 큰 비중변화를 기대하기 어려운 에너지원에 해당하여 분석에 포함되지 않았다. 또한 이 연구에서 논하고자 하는 친환경 에너지는 국제적 기준의 재생에너지로 국한하고 있어 연료전지, 석탄가스화복합발전 등의 신에너지는 분석에서 제외하였다.

둘째, 전원별 발전 비용에 있어서는 정산단가를 활용하였다. 우리나라 에너지 전력시장에서의 각 연료원별 가격은 한국전력거래소의 전력통계정보시스템 내 전력시장 정산단가 자료를 토대로 분석한다. 자료 범위는 2016년 6월부터 2021년 5월까지 5년간의 월별 데이터를 바탕으로 한다. 정산단가는 계통한계가격(System Marginal Price(SMP))이 LNG 가격에 연동이 되어 있고, SMP가 재생에너지 정산단가의 산정에도 활용되므로 포트폴리오 분석 시 한계점으로 작용할 수 있다. 그러나 에너지원별 특성이 상이한 만큼 일부에 국한되어 재생에너지 균등화 발전원가 등을 적용하게 되면, 연구자의 작위성이나 특정 에너지원의 과거 데이터 산출 시의 불연속성 등 결정적인 한계에 직면할 수 있다. 따라서 정산단가의 강점인 과거 데이터의 일관성 확보 등이 현 상황에서 가용 가능한 최선의 대안으로 판단되어 연구에 활용하였다. 이 부분은 이 연구의 한계점인 것과 동시에 미래에 가격이 결정되는 방식이 보다 시장 논리에 가깝게 보완되고, 유의미한 데이터가 축적될수록 후속 연구를 통해 개선이 될 수 있는 부분으로 보인다.

셋째, Doherty, Outhred and O'Malley(2006), Jansen, Beurskens and Tilburg(2006), Zhu and Fan(2010) 등의 선행연구를 토대로 전원별 외부 비용에 대해서 고려하였다. 환경 비용의 경우 에너지경제연구원(2020)에서 제시한 대기오염 및 온실가스 저감 비용 추정치를 적용함으로써 전원구성 계획과의 정합성을 확보하고자 한다. IMF(2014)를 원자료로 하며, 분석 시 유연탄 및 LNG에 대한 SOx, NOx, PM2.5 등의 배출저감 비용을 고려한다. 다음으로 원전사고 비용의 경우 이창훈(2013)에서 제시한 원전사고의 기대피해비용 수치[1]를 활용한다. 이창훈(2013)은 IAEA(2004)에서 제시한 신형경수

1) 국제원자력기구에서 제시한 신형경수로(Advanced Power Reactor, APR) 1400의 안전성 목표와 실제 국제원자력사건등급(International Nuclear Event Scale, INES) 중대사고 발생빈도를 적용하였다.

로(Advanced Power Reactor(APR)) 1400의 안전성 목표와 실제 국제원자력사건등급(International Nuclear Event Scale(INES)) 7등급 중대사고 발생빈도 두 가지를 적용한다. 전술한 외부 비용은 전원별 비용에 합산하는 방식을 사용하거나, 리스크 부문에 반영하는 등의 두 가지 접근이 가능하다. 이 연구에서는 기존 Awerbuch and Yang(2007), Jisma, Mohan, Thomas and Madhu(2022) 등의 선행연구들에서와 같이 리스크가 아닌 비용으로 간주하며, 가변성이 크지 않고 고정적으로 더해지는 개념에 적합한 비용으로 모형에 반영하고자 한다.

2. MPT를 활용한 비용 및 리스크 추정

이 연구에서는 포트폴리오 이론을 활용하여 각각의 전원에 대한 최적화가 아닌 각 발전원 간 상관관계를 분석하여 최적의 전원믹스 구성에 관해 분석하고자 한다. 이를 위한 방법론으로써 최근 에너지 부문에 포트폴리오 접근 방식을 사용한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 전원별 비용 및 위험도 간 상관관계 분석을 통해 현 에너지믹스 구성에서 재생에너지가 기여하는 부분에 대한 정량적인 실증분석 결과를 제시할 수 있는 MPT 방법론을 사용하고자 한다.

전력 부문에 MPT를 활용하기 위해서는 비용-리스크 모형을 응용하거나, 기대수익을 최적화하는 모형으로 투입 가격을 변형(가격의 역수)을 취해 분석하는 등의 방법이 존재한다. 이 연구에서는 전자인 비용-리스크 모형을 채택한다. 발전 비용의 역수를 취한 수익-리스크 모형을 활용하면 수익률은 비용 역수의 변화율이 되고, 비용이 커지더라도 역수의 변화율은 크지 않을 수 있기 때문에 MPT 모형에서 계산하는 변동성, 효용 등이 실제값을 잘 반영한 모델링으로 보기 어렵기 때문이다. 또한, 외부 비용에 대한 고려를 포함할 경우 추가적인 온실가스 및 대기오염물질 저감비용에 따른 효용과 실질적인 효용 간 괴리가 발생하여 왜곡의 여지가 있다. Zon and Fuss(2008) 등과 같이 비용-리스크 모형을 차용하고 있는 연구에서 동일한 문제점을 지적한 바 있다.

비용-리스크 모형은 세로축이 비용이고, 가로축이 리스크(비용의 표준편차)가 된다. 기존 MPT 모형에서는 비효율적인 포트폴리오에서 효율적인 점

에 도달하기 위해 2차원 평면상의 좌측이나 상단에 있는 효율적 경계선을 향해 이동해야 하는 것에 반해, 비용-리스크 모형에서는 좌측 하단으로 이동해야 한다(〈그림 1〉 참조). 비용-리스크 모형의 경우 동일한 무차별 곡선의 기울기가 음으로 표현된다. 이 연구에서는 에너지 전환에 있어 재생에너지 비중 확대가 2차원 평면상에서의 효용 변화에 기여하는 수준을 분석하고자 한다.

비용-리스크 모델의 경우 무차별 곡선 또는 효용함수에 대한 정의가 필요하다. 기존 수익-리스크 형태의 MPT 모형에서는 대표적으로 기대수익을 리스크로 나눈 샤프 지수(Sharpe Ratio) 등의 효용함수로 활용 가능하나, 비용-리스크 모델에서는 잘 알려진 별도의 효용함수가 존재하지 않는다. 이 연구에서는 Zon and Fuss(2008)에서 제시한 다음의 산식을 비용-리스크 모델의 목적함수(효용함수)로 채택하고자 하며, 각 변수에 대한 설명은 아래와 같다.

w: 포트폴리오 벡터

$c(w)$: 포트폴리오 비용

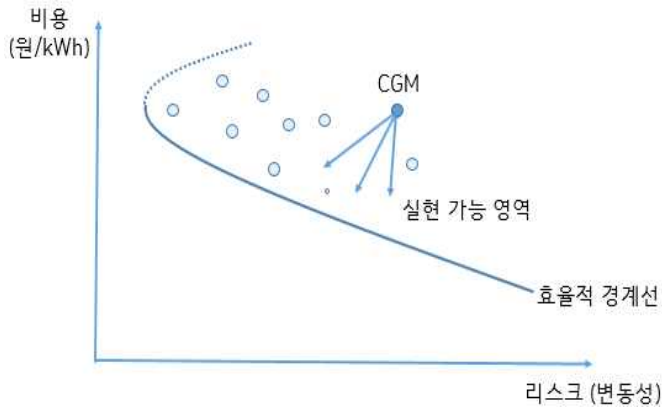
$\lambda(>0)$: 위험선호계수

$VAR(c(w))$: $w^T\sum w$ ($\sum$는 포트폴리오 공분산 행렬)

$STD(c(w))$: $\sqrt{VAR(c(w))}$

$\Phi(w) = c(w) + \lambda \cdot VAR(c(w))$: 포트폴리오 효용함수

〈그림 1〉 비용-리스크 모형



비용-리스크 평면에서 가로축은 포트폴리오 비용의 표준편차 $STD(c(w))$를 의미하며, 세로축은 포트폴리오 비용 $c(w)$를 나타낸다. 따라서 목적함수의 값이 상수로 일정한 효용 무차별 곡선은 비용-리스크 모형 상에서 $y=-\lambda x^2+c(\lambda>0)$개형의 위로 볼록인 이차 함수 그래프 형태가 된다. 목적함수는 비용 및 비용의 분산이 클수록 큰 값을 가지므로, 목적함수 값이 작을수록 효율적인 포트폴리오가 된다. 특정 포트폴리오 주변에서 국소적으로 비중을 변화시켰을 때, 효용함수 값이 변화하는 부분을 측정하여 방향성에 대한 비교·평가를 실시하고자 한다.

MPT 모형의 한계점 중 하나로 최적해로 모서리해가 주어지는 문제를 들 수 있다. 특히, 포트폴리오에 편입되는 기초 자산이 다양하고, 포트폴리오 정의역 공간이 고차원일 경우에는 수익-리스크 또는 비용-리스크의 2차원 평면에 각 포트폴리오를 매핑하고 효율적 경계선상의 조합들을 관찰하면 정의역의 내부점(interior point)이 아닌 경계점(boundary point)에 있는 포트폴리오들이 선택된다. 이러한 수치를 실질적으로 적용할 경우 극단적인 결론이 도출될 가능성이 있다는 단점이 있다. 이와 같은 모서리해 이슈를 해결하고자 최적해의 산출보다는 변화 방향에 따른 효용 변화의 분석에 초점을 맞춘다.

Ⅳ. 분석결과

비용-리스크 모형에서는 비중 정의역에 존재하는 각 비중 벡터들에 대해 그 벡터로 인해 발생하는 총 포트폴리오 비용을 정산단가 벡터와 내적을 통해 계산하고, 비용의 리스크를 공분산 행렬을 통해 계산함으로써 비용-리스크 2차원 공간으로 각 포트폴리오를 매핑하게 된다. 또한 이 연구는 각 7개의 전원별 비중값 중 두 개의 전원을 선택한 후, 하나의 전원 비중을 1%p 확대하고 나머지 전원 비중을 1%p 축소했을 때의 효용을 분석한다. 2020년 현재의 전원구성 포트폴리오를 “Current Generation Mix(CGM)”로 정의할 때 CGM

의 총 비용과 리스크를 측정한 결과 비용은 84.02원/kWh이고, 비용의 변동성인 표준편차는 10.04원/kWh로 나타났다.

1. 가격 변동성(Price Volatility) 측면

〈표 1〉은 가격 변동성만을 리스크 요소로 고려하여 현재 포트폴리오를 조정할 때의 효용증가 수준을 나타낸다. 현 수준(CGM)에서 풍력을 1%p 더 많이 활용하고, LNG를 1%p 줄이는 방향이 효용을 1.18% 높여 국소적으로 최적의 조합으로 나타났다. 비용이 절감됨과 동시에 변동성 수준도 개선되어 효용을 높이는 것으로 나타났다. 그 외에 효용을 높이는 상위 조합들의 대부분은 재생에너지를 확대하고, 석탄, LNG, 원자력을 줄이는 방향으로 나타났다. 이는 전원구성에서 재생에너지 확대와 기존 화석연료원을 축소하는 방향이 지속가능성, 환경적, 윤리적 당위성 차원뿐만 아니라, 경제적 효용 측면에서도 이익이 창출되고 리스크를 경감하는 대안이라는 것을 시사한다.

〈표 1〉 가격 변동성 측면 효용증가순위

순위	±1%p	c(w)	STD(c(w))	Φ(w)	효용증가율 (% change)
1	+W, -NG	83.71	9.95	182.69	1.18
2	+PV, -NG	83.71	9.96	182.92	1.06
3	+W, -B	83.84	9.98	183.42	0.79
4	+W, -N	83.98	9.97	183.43	0.78
5	+W, -C	83.88	9.99	183.60	0.69
6	+W, -NG	84.00	9.98	183.64	0.67
7	+PV, -B	83.84	9.99	183.65	0.66
8	+PV, -N	83.97	9.98	183.66	0.66
9	+PV, -C	83.88	10.00	183.84	0.56
10	+W, -H	83.74	10.01	183.92	0.51
11	+C, -NG	83.85	10.01	183.96	0.49
12	+B, -NG	83.89	10.01	184.14	0.40
13	+N, -NG	83.76	10.02	184.14	0.40
14	+PV, -H	83.73	10.02	184.16	0.39
15	+H, -B	84.12	10.01	184.37	0.27

16	+H, -N	84.26	10.01	184.38	0.27
17	+H, -C	84.16	10.02	184.55	0.17
18	+W, -PV	84.02	10.03	184.64	0.13
19	+C, -B	83.98	10.04	184.69	0.10
20	+C, -NG	84.11	10.03	184.70	0.09
reference	CGM	84.02	10.04	184.87	0.00

주) N: 원자력; C: 석탄; NG: LNG; PV: 태양광; W: 풍력; H: 수력; B: 바이오.

2. 환경 지속성(Environmental Sustainability) 측면

온실가스 감축비용 등의 외부 비용을 반영한 시나리오에서도 유사한 결론을 도출하였다. 〈표 2〉에서 보듯이 기존의 화석연료 대신 재생에너지를 적극적으로 활용하는 것이 효용의 증가로 이어지는 것으로 나타났다. 환경 비용을 반영할 경우 화석연료를 대체하여 수력 비중을 확대할 때에도 비용이 절감되었으며, 효용이 증가하는 수준(목적함수 값 감소비율)이 가격 변동성 측면의 분석 결과에 비해 크게 나타났다.

〈표 2〉 환경 지속성 측면 효용증가순위

순위	±1%p	c(w)	STD(c(w))	Φ(w)	효용증가율 (% change)
1	+W, -C	127.72	10.16	230.85	1.01
2	+PV, -C	127.70	10.16	230.95	0.96
3	+W, -N	128.83	10.11	231.13	0.89
4	+PV, -N	128.80	10.12	231.23	0.85
5	+B, -C	127.88	10.18	231.51	0.72
6	+W, -NG	128.26	10.17	231.61	0.68
7	+H, -C	128.00	10.18	231.61	0.68
8	+PV, -NG	128.24	10.17	231.71	0.64
9	+B, -N	128.99	10.14	231.79	0.61
10	+H, -N	129.11	10.14	231.88	0.56
11	+B, -NG	128.42	10.19	232.27	0.40
12	+H, -NG	128.55	10.19	232.37	0.36
13	+NG, -C	128.22	10.21	232.44	0.32
14	+W, -H	128.48	10.20	232.45	0.32
15	+W, -B	128.60	10.19	232.53	0.29

16	+PV, -H	128.46	10.20	232.55	0.28
17	+PV, -B	128.58	10.20	232.63	0.24
18	+NG, -N	129.33	10.17	232.71	0.21
19	+N, -C	127.66	10.26	232.93	0.12
20	+W, -PV	128.79	10.21	233.10	0.04
ref.	CGM	128.76	10.22	233.20	0.00

주) N: 원자력; C: 석탄; NG: LNG; PV: 태양광; W: 풍력; H: 수력; B: 바이오.

3. 원전사고 위험 측면

원전사고위험을 고려하면 전반적으로 원자력 비중을 늘릴 경우 효용이 감소하는 것으로 나타났으나, 재생에너지 확대와 화석에너지 감축으로 인한 효용 증가폭이 큰 결과는 유사하게 도출되었다. 원전사고 위험을 반영한 세부 결과는 다음 〈표 3〉과 같다. 전술한 분석과 다른 특이점으로는 원자력 비중을 조정하는 포트폴리오 중에서 원전을 축소하는 조합에서만 기대효용이 증가하는 것으로 나타났다.

〈표 3〉 원전사고 위험 측면 효용증가순위

순위	±1%p	c(w)	STD(c(w))	Φ(w)	효용증가율 (% change)
1	+W, -NG	86.77	9.76	182.11	1.17
2	+PV, -NG	86.77	9.78	182.35	1.04
3	+W, -B	86.90	9.79	182.84	0.78
4	+W, -N	86.93	9.80	182.88	0.76
5	+W, -C	86.94	9.80	183.00	0.69
6	+H, -NG	87.05	9.80	183.02	0.68
7	+PV, -B	86.89	9.81	183.07	0.65
8	+PV, -N	86.93	9.81	183.12	0.63
9	+PV, -C	86.93	9.81	183.24	0.56
10	+W, -H	86.79	9.83	183.37	0.49
11	+C, -NG	86.91	9.82	183.39	0.48
12	+B, -NG	86.92	9.83	183.51	0.41
13	+B, -N	86.95	9.83	183.55	0.39
14	+PV, -H	86.79	9.84	183.61	0.36
15	+H, -B	87.18	9.83	183.74	0.29

16	+H, -N	87.21	9.83	183.79	0.26
17	+H, -C	87.22	9.83	183.91	0.20
18	+W, -PV	87.08	9.85	184.03	0.13
19	+C, -B	87.04	9.85	184.11	0.09
20	+C, -NG	87.07	9.85	184.16	0.06
ref.	CGM	87.08	9.86	184.27	0.00

주) N: 원자력; C: 석탄; NG: LNG; PV: 태양광; W: 풍력; H: 수력; B: 바이오.

Ⅴ. 민감도 분석

민감도 분석에서는 전원별 발전 비용, 환경 비용, 원전사고 위험 비용 등의 변화에 대해 결론의 강건성이 유지된다는 것을 검증하고자 한다. 분석 시 활용된 전원별 발전 비용에 10% 수준으로 무작위적 오차를 반영한 시계열을 생성하고, 각 시계열을 통해 도출된 비용과 공분산 행렬 및 변동성으로 추정된 효용함수 값을 산출한다. 이와 같은 실험을 다수 반복한 후 다중회귀분석을 시행한다. 독립변수는 오차를 반영한 각 전원별 발전 비용이며, 종속변수는 해당 비용들로 계산된 효용함수 값으로 설정한다.

회귀분석 결과는 다음 〈표 4〉와 같다. 결정계수는 76.5%로 나타나며, 효용값에서 비용으로 설명 가능한 부분을 의미한다. 이 연구의 경우 효용 변수를 설명함에 있어 비용뿐만 아니라 변동성 측면의 고려가 포함되어 있으므로 나머지 부분은 비용의 불확실성으로 설명된다.

〈표 4〉 회귀분석 결과

·	β	Std. Error	t	p-value
Nulcear	0.79	0.204	3.865	0.000***
Bituminous	0.949	0.078	12.112	0.000***
Natural Gas	0.745	0.081	9.211	0.000***
Solar	0.358	0.229	1.56	-0.098
Wind	0.089	0.248	0.36	-0.404
Hydro	0.242	0.158	1.534	-0.072
Biomass	-0.085	0.106	-0.803	-0.297
(Constant)	-135.899	36.575	-3.716	0.000***

주) Dependent variables: Generation Cost; R: 0.87, R^2:0.77, R^2 change:0.75; Standard error of estimated value=4.13.

효용의 민감도에 해당하는 각 전원별 비용 계수는 원자력, 유연탄, 천연가스 등이 높은 것으로 계산되었으며, 태양광, 풍력 등 재생에너지의 경우 효용 변화가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 전원구성 포트폴리오상의 총 비용은 현 정책 비중에 비례하는 경향이 있기 때문에 해당 전원의 비중이 높을수록 민감도가 높게 나타나고, 동 비용이 효용함수에 반영되므로 효용에 대한 민감도 또한 비중이 클수록 수치가 크다는 것을 뜻한다. 원자력, 화석연료 등 기저 발전원의 가격이나 외부 비용 증감에 따른 효용 변화가 재생에너지에 비해 민감하다는 것을 확인할 수 있다.

각 전원별 p 값을 볼 때, 원자력, 유연탄, 천연가스는 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하게 관측된 반면, 재생에너지원은 상대적으로 유의성이 떨어지는 것으로 나타났다. 원자력, 화석연료 등 기저 발전원의 가격 변화나 환경비용, 원전사고위험 비용 등의 증감 정도에 따른 효용 변화는 재생에너지보다 민감하다는 것을 검증하였다. β 값이 모두 1 미만으로 나타나 발전 비용 혹은 외부 비용에 1원/kWh의 오차가 존재하더라도 효용함수 값의 오차 범위가 1 미만으로 확인되었다. 이는 가격에 오차 수준이 일정 부분 있어도 효용 값 변화 순위에 미치는 영향이 크지 않다는 것을 의미한다. 외부 비용 반영 여부와는 무관하게 화석에너지원 감축 및 재생에너지 확대 방향이 효용을 증가시킨다는 결론에는 영향을 미치지 않은 점으로 볼 때, 자료의 오차로 인해 결과가 민감하게 변하지 않는다는 사실을 확인하였다.

Ⅵ. 결론

이 연구는 우리나라 현 전원구성의 비용 및 리스크를 평가하였다. 분석 결과, 2020년을 기준으로 한 우리나라 현 전원구성은 재생에너지 확대와 화석에너지 감축방향을 통해 경제적인 효율성을 높일 수 있는 것으로 나타났다. 재생에너지 확대를 기반으로 한 에너지 전환 흐름은 비단 윤리적 환경적 당위성을 넘어 경제적 효용도 있다는 것을 시사한다.

실질적으로 국제 에너지 시장에서는 화석연료 가격의 변동성에 의해 청정 에너지 전환 움직임이 크게 좌우된다는 점에서 볼 때, 전력수급의 안정성, 가격변동 리스크 관리, 환경적 지속가능성 등의 중요성을 뒷받침하는 연구로 활용될 수 있을 것이다.

이 연구의 기여도는 다음과 같다. 첫째, 학문적 기여에 있어서는 기존 선행 연구에서 고려하지 못한 사회적 비용, 방법론 등을 적용하여 보다 심도 있는 분석을 수행하였다. 구체적으로 온실가스 및 대기오염물질 배출저감 비용, 원전사고 위험 비용 등의 외부 비용들을 결부시킴으로써 다차원적으로 접근하였다. 즉, 환경, 윤리적 차원뿐만 아니라 경제적인 접근방식으로도 재생에너지 확대 방향의 효용이 크다는 것을 실증하기 위해 과학적이고 객관적인 근거에 따른 시사점을 제공하였다. 이를 통해 차후 전원 부문 리스크 관리 차원의 연구 발전에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

둘째, 정책적 측면에서는 현재 우리나라 전원구성 계획 수립 방식의 한계를 보완하기 위한 대안이 될 수 있다. 전원 포트폴리오 구축에 있어 단순히 비용 최소화만을 목적으로 하지 않고 관련 리스크를 함께 고려함으로써 에너지 안보를 제고할 수 있는 방안 제시가 가능할 것이다. 또한, 태양광, 풍력 등 재생에너지 활성화에 대한 실증분석 결과는 친환경 정책의 사회적 수용성 제고에 긍정적으로 작용할 것이다.

그럼에도 불구하고 다음과 같은 연구의 한계점이 존재한다. 첫째, 연구 시 사용된 발전 비용 데이터의 경우 정부가 신·재생에너지 발전에 지급하는 보조금, 배출권거래비용 정산대금 등이 고려되지 않은 점을 들 수 있다. 신·재생에너지공급인증서(Renewable Energy Certificate(REC))는 신·재생에너지 공급의무화제도(Renewable Portfolio Standard(RPS)) 하에서 신·재생에너지 발전사업자에게 발전량에 비례하여 부여하는 인증서로, 태양광, 풍력 발전 등에 대한 정책 보조금을 포함할 경우 재생에너지 발전원가는 일부 상이할 수 있다.

둘째, 이 연구의 경우 태양광, 수력, 풍력 등의 재생에너지원으로부터 야기될 수 있는 간헐성 문제에 대한 고려가 미흡하다. 일조량, 기후 등 자연조건

영향을 받는 재생에너지는 출력이 일정하지 않은 한계가 있는데, 이러한 위험요인은 반영되지 않은 결과이다. 재생에너지 간헐성에 따른 대응 비용이 발생한다면 위험도 수준은 증가할 수 있고, 반대로 에너지저장장치(ESS) 등의 기술 발전을 통해 간헐성 이슈가 해소될 수도 있는 부분에 대한 반영은 후속 연구과제로 남아있다.

마지막으로 이 분석이 최종 결론이 아닌 우리나라 전원구성 계획에 있어 비용과 변동성에 따른 리스크를 함께 고려한 연구의 단초가 되길 기대한다.

▮참고문헌▮

국회예산정책처, 2021, “최근 국제유가 동향 및 전망”, 『나보포커스』, 제40호, 서울: 국회예산정책처.

에너지경제연구원, 2020, 『대기오염물질 저감을 위한 산업부문 연료의 상대가격 개선방안 연구』, 울산: 에너지경제연구원.

이유수, 2012, 『포트폴리오 이론을 활용한 전원믹스 계획의 분석』, 울산: 에너지경제연구원.

이창훈, 2013, 『화석연료 대체에너지원의 환경·경제성 평가 I: 원자력을 중심으로』, 세종: 한국환경연구원.

산업통상자원부, 2021, 『2020년 신·재생에너지 보급통계』, 세종: 산업통상자원부.

전력거래소, 2011, 『신재생에너지 공급의무화제도(RPS) 도입이 전력수급기본계획에 미치는 영향분석』, 나주: 전력거래소.

차경수, 2017, “평균분산이론을 활용한 전원구성계획의 타당성 분석”, 『에너지경제연구』, 16(2), pp.119~152, 울산: 에너지경제연구원.

한국전력공사, 2021, 『한국전력통계』.

Al-Shetwi, A. Q., 2022, “Sustainable Development of Renewable Energy Integrated Power Sector: Trends, Environmental Impacts, and Recent Challenges,” *Science of the Total Environment*, 822, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153645.

Awerbuch, S., 2000, “Investing in Photovoltaics: Risk, Accounting and the Value of New Technology,” *Energy Policy*, 28(14), pp.1023-1035, DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00089-6.

Awerbuch, S. and Berger, M., 2003, Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-Making, IEA Report Number EET/2002/03, Paris:

February.

Awerbuch, S. and Yang, S., 2007, "Efficient Electricity Generating Portfolios for Europe: Maximising Energy Security and Climate Change Mitigation," EIB Papers, 12(2), pp.8-37, DOI: 10.1016/j.energy.2011.06.053.

Bao, C. and Fang, C., 2013, "Geographical and Environmental Perspectives for the Sustainable Development of Renewable Energy in Urbanizing China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, pp.464~474, DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.008.

Bar-Lev, D. and Katz, S., 1976, "Approach to Fossil Fuel Procurement in the Electric Utility Industry," *The Journal of Finance*, 31(3), pp.933-947.

Bhattacharya, A. and Kojima, S., 2012, "Power sector investment risk and renewable energy: A Japanese case study using portfolio risk optimization method," *Energy Policy*, 40, pp.69~80, DOI: 10.1016/j.enpol.2010.09.031

Doherty, R., Outhred, R. and O'Malley, M., 2006, "Establishing the Role That Wind Generation May Have in Future Generation Portfolios," *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), pp.1415-1422, DOI: 10.1109/TPWRS.2006.879258.

Humphreys, H. and McClain, K., 1998, "Reducing the Impacts of Energy Price Volatility Through Dynamic Portfolio Selection," *The Energy Journal*, 19(3), pp.107-131.

IAEA, 2004, "Status of Advanced Light Water Reactor Designs," *Report IAEA-TECDOC-1391*, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IEA, 2021, "World Energy Outlook," International Energy Agency, Paris.

IMF, 2014, "How Much Carbon Pricing is in Countries' Own Interests? The Critical Role of Co-Benefits," IMF Working Paper 14/174, Washington.

IRENA, 2017, "Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Solar PV," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Jansen, J.C., Beurskens, M. and Tilburg, X., 2006, "Application of Portfolio Analysis To the Dutch Generating Mix Reference Case and Two Renewables Cases: Year 2030," Energy Research Center of the Netherlands, Patten.

Jisma, M., Mohan, V., Thomas, M. and Madhu, N., 2022, "Risk-Calibrated Conventional-Renewable Generation Mix Using Masterslave Portfolio Approach Guided by Flexible Investor Preferencing," *Energy*, 245(1), DOI: 10.1016/j.energy.2022.123261.

Martinez-Fernandez P., deLlano-Paz, F., Calvo-Silvosa, A. and Soares, I., 2019, "Assessing Renewable Energy Sources for Electricity Potential Using a CAPM-Analogous Multi-Stage Model," *Energies*, 12(19), DOI: 10.3390

/en12193599.

Zhu, L. and Fan, Y., 2010, "Optimization of China's Generating Portfolio and Policy Implications Based on Portfolio Theory," *Energy*, 35(3), pp.1391-1402, DOI: 10.1016/j.energy.2009.11.024.

Zon, A. and Fuss, S., 2008, "Risk, Embodied Technical Change and Irreversible Investment Decisions in UK Electricity Production: An Optimum Technology Portfolio Approach," *Analytical Methods for Energy Diversity and Security*, pp.275~302, DOI: 10.1016/B978-0-08-056887-4.00014-7.

전력통계정보시스템, "연료원별 정산단가", http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaUpsBftChart.do?menuId=040701.

김나현: 서울대학교 환경대학원에서 도시계획학(환경·에너지 경제 분야) 박사학위를 취득하고 현재 한국개발연구원(KDI)에 재직 중이다. 주요 관심 분야는 환경 경제, 에너지 정책 등이다(nhk@kdi.re.kr).

홍종호: 한국개발연구원(KDI)과 한양대학교 경제금융대학을 거쳐 현재 서울대학교 환경대학원 교수로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 기후·환경·에너지 경제학, 지속가능발전 및 재정공공 정책이다(hongjongho@snu.ac.kr).

투 고 일: 2023년 05월 12일
심 사 일: 2023년 05월 15일
게재확정일: 2023년 08월 09일