

현장 분석 데이터 기반의 지속가능한 유연탄 수입국 평가 및 선정 연구: 다기준 의사결정(MCDM) 시나리오 분석을 중심으로

유재호* · 조승현* · 박민성** · 우지윤* · 전의찬***†

*세종대학교 기후환경융합센터 선임연구원, **세종대학교 대학원 기후에너지융합학과 석사과정학생,

***세종대학교 대학원 기후에너지융합학과 교수

Optimizing sustainable bituminous coal import portfolios using plant-specific measured data: A TOPSIS scenario analysis

Yoo, Jae-Ho* · Jo, Seunghyun* · Park, Minsung** · Woo, Jiyun* and Jeon, Eui-Chan***†

*Senior Researcher, Department of Climate and Environment Research Center, Sejong University, Seoul, Korea

**Master's Student, Department of Climate and Energy, Graduate School, Sejong University, Seoul, Korea

***Professor, Department of Climate and Energy, Graduate School, Sejong University, Seoul, Korea

ABSTRACT

As South Korea relies entirely on overseas imports for bituminous coal used in power generation, establishing a stable and environmentally sustainable procurement portfolio has become a core challenge for national energy security. This study identifies optimal import countries by comprehensively considering empirical measured data on import volume, proximate analysis, and ultimate analysis of bituminous coal actually used in five major domestic thermal power plants, together with marine transportation distance as an indicator of environmental sustainability and sovereign credit-based geopolitical risk as an indicator of energy security. The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), a multi-criteria decision-making (MCDM) method, was applied to analyze four scenarios: Standard, Environment Priority, Efficiency Priority, and Security Priority. The results show that Australia and Canada ranked highest in most scenarios, indicating that they are the most stable import options. In the Environment Priority scenario, however, Indonesia ranked first because of its geographical proximity. Notably, Russia, despite showing the highest apparent economic feasibility owing to its short transportation distance and excellent calorific value, ranked at the bottom (7th) in virtually all scenarios because of its extremely high geopolitical risk. These findings indicate that, beyond conventional procurement practices focused solely on cost and quality, the environmental burden of transportation and uncertainty in international affairs act as critical constraints on supply chain optimization. Based on empirical field data, this study proposes a realistic and diversified bituminous coal import strategy that can simultaneously enhance energy security and reduce carbon emissions, offering meaningful academic and policy implications.

Key words : Bituminous Coal, Import Optimization, MCDM, Energy Security

1. 서론

우리나라는 2025년 제11차 전력수급기본계획을 통하여

2038년까지의 전력수급의 기본 방향을 수립하였다 (MOTIE, 2025). 본 계획에 따르면 탄소중립 달성 등을 고려하여 2038년까지 재생에너지를 체계적으로 확대해나가

†Corresponding author : ecjeon@sejong.ac.kr (Sejong University 1115B-ho Gwanggaeto Building, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-3408-4353)

ORCID 유재호 0000-0001-6340-3710
조승현 0000-0001-9004-9948
박민성 0009-0000-1802-3292

우지윤 0000-0002-9376-0206
전의찬 0000-0003-2783-4550

고, 청정수소·암모니아 발전 확대, 원전 지속 활용 등 무탄소전원을 확대하기 위한 다양한 정책 방향을 제시하고 있다. 하지만, 재생에너지의 간헐성을 보완할 기저 부하(Base load)로서 석탄화력발전은 여전히 국가 전력 공급의 핵심적인 역할을 담당하고 있다. 2024년 한국전력통계연보에 따르면 2024년 기준 유연탄을 에너지원으로 사용한 발전량은 165TWh에 달하며, 이는 2024년 전체 발전량인 595TWh의 약 28%에 달하는 수준이다(KEPCO, 2025).

2021년 9월 한국광해관리공단이 해체됨에 따라 우리나라는 발전용 유연탄을 전량 해외 수입에 의존하고 있는 실정이지만, 최근 러시아-우크라이나 전쟁 등 지정학적 불안정성이 심화되고 있으며, 특정 국가에 편중된 연료 조달 방식은 국가 에너지 안보에 심각한 위협이 되고 있다. 2024년 우리나라가 수입한 유연탄은 총 108,802,792MT이며, 이 중 약 16%에 해당되는 17,349,716MT을 러시아에서 수입하고 있다(KIGAM, 2025). 이와 같은 상황에서 지속가능한 유연탄 수입과 에너지 안보 확보를 위하여 다각적인 수입 전략을 살펴볼 필요가 있다.

본 연구는 국내 발전소 중 5곳의 대형 화력 발전소에서 실제 사용된 유연탄의 수입국, 수입물량, 원소분석, 공업분석 데이터를 기반으로 탄소배출계수와 저위발열량을 산정하고, 수입국가와의 거리, 지정학적 리스크 등 다양한 변수를 고려하여 우리나라의 지속가능한 유연탄 수입국을 시나리오별로 도출하고자 한다. 연구를 위한 분석 방법으로는 다기준의사결정방법 중 하나인 TOPSIS 모델을 사용하였다. 연구를 위한 구조는 다음과 같다. 2장에서는 우리나라의 유연탄 수입 통계, 유연탄 수입 관련 연구, TOPSIS 기법을 활용한 연구 등에 대한 문헌 고찰을 수행하고자 하며, 3장에서는 본 연구에 활용된 자료를 정리하고, TOPSIS 기법을 적용하는 과정에 대하여 설명하고자 한다. 4장에서는 TOPSIS 분석 결과를 제시하고, 5장에서는 분석 결과에 따른 국내 정책적 함의에 대한 고찰을 수행하고자 한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 의의와 한계점에 대하여 살펴보하고자 한다.

2. 문헌 고찰

2.1. 우리나라 유연탄 수입 및 발전 연료 이용 현황

우리나라의 석탄 소비는 크게 발전, 제철, 난방에서 이루어지고 있으며, 그 중 발전 부문에서 가장 많은 석탄을

Table 1. Top 7 bituminous coal import countries

Rank	Country	Import Volume (MT)
1	Australia	31,360,603
2	Indonesia	26,527,274
3	Russia	17,349,716
4	Canada	9,903,246
5	Colombia	9,537,915
6	South Africa	6,181,794
7	United States	4,531,689

소비하고 있다. 이러한 총 석탄 소비는 2018년 55.6 백만 toe에 달하였지만, 이후 2018년부터 2023년까지 연평균 5.5% 감소한 것으로 나타났다(KEEI, 2024). 또한, 2050년까지 발전용 석탄 수요의 감소는 탄소중립 달성을 위한 석탄발전소 퇴출 등으로 인하여 지속적으로 크게 감소할 것으로 예상되지만, 그럼에도 불구하고 2050년에도 석탄을 활용한 발전이 남아있을 것으로 전망되었다(KEEI, 2024). 한국지질자원연구원의 광물자원통계포털에 따르면 2024년 우리나라 유연탄 수입량은 총 108,802,792MT에 달하며, 호주, 인도네시아, 러시아, 캐나다, 콜롬비아 등 13개국에서 수입하고 있다(KIGAM, 2025). 그 중 가장 많은 유연탄을 수입해오는 국가는 호주이며, 인도네시아, 러시아 등이 그 뒤를 잇고 있다(Table 1 참조).

2.2. 선행연구 고찰

우리나라는 세계에서 석탄을 가장 많이 수입하는 나라 중 하나이며, 수입해 온 석탄 중 많은 양을 화력발전에서 사용하고 있어 안정적인 저렴한 석탄 공급은 국가 경제·에너지 안보 차원에서 매우 중요하다. 이에 국내에서는 석탄 수입과 관련된 다양한 연구가 수행된 바 있다. Moon et al. (2022)은 유연탄 가격결정에 영향을 미치는 요인에 대하여 실증적으로 분석하였고, 수요 측면에서는 전 세계 석탄 수요의 대부분을 차지하고 있는 인도와 한국의 유연탄 수입량이 유의미한 영향을 미치며, 공급 측면에서는 인도네시아의 수출 및 생산량에 유의미한 영향을 미쳤음을 밝혀냈다. Kwon (2023)은 러시아와 우크라이나 전쟁으로 인한 EU의 에너지 안보와 그로 인해 변화된 에너지 정책방향을 살펴보았으며, 공급의 안정성, 지속가능성, 에너지의 안정성 등을 고려한 우리나라의 에너지 정책 방향을 제안하였다. 또한, EU의 그린딜 정책 역시 러시아-우크라이나 전쟁으로 인하여 에너지 안보, 경제 및 산업 정책과 연결된 복합 전략으로 발전할 가능성이 크다는 의견

도 제시된 바 있다(Kang, 2024).

Kim et al. (2016)은 우리나라 9개 석탄화력발전소와 2개 철강 업체에서 사용하고 있는 연료용 유연탄 및 원료용 유연탄의 입하량, 발열량, 원소, 공업분석 자료를 토대로 발열량 추이와 탄소배출계수를 개발한 바 있다. 최근 전과정 사고가 중요하게 여겨지며, 연료 수입 과정에서 수입국과의 거리, 수송 방법 등도 중요하게 부상하고 있다. 특히, 해상 운송에서 발생하는 온실가스 배출량은 세계 무역량이 증가함에 따라 크게 증가할 것으로 예상되고 있는 와중에 해상 운송에 크게 의존하는 유연탄 수입 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 고려할 필요가 있다(Bouman et al., 2017).

앞서 살펴 본 바와 같이 지속가능한 에너지 수입을 위해서는 연료 수입국과의 거리, 탄소 배출량, 수입국의 지정학적 리스크 등을 복합적으로 분석할 필요가 있지만, 연료 수입국별 탄소배출계수 및 발열량이 구분된 사례는 거의 없었으며, 향후 우리나라의 연료 수입 전략을 제시한 논문은 거의 찾아볼 수 없었다. 이에 본 연구에서는 국내 발전소에서 실제 사용되고 있는 유연탄의 탄소배출계수, 발열량 등을 국가별로 분류하고, 수입국의 지정학적 리스크, 거리 등을 종합적으로 고려한 지속가능한 유연탄 수입 전략을 제시하고자 한다.

3. 연구방법론 및 활용 자료

3.1. TOPSIS 기법

본 연구에서는 지속가능한 연료 수입국 설정을 위해 다기준 의사결정(MCDM, Multiple Criteria Decision Making) 방법을 활용하고자 한다. 다기준 의사결정 방법이란 상충되는 복수의 기준이 존재할 때, 여러 가지 항목을 고려하여 우선순위를 제공하여 복잡한 문제에 대한 최적의 의사결정을 지원하는 방법론이다(Park, 2024). 본 연구에서는 다양한 다기준 의사결정 방법 중 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 기법을 활용하고자 한다. TOPSIS 기법이란 C.L. Hwang & Yoon이 개발한 방법으로 제한된 대안(Alternatives) 중에서 다수의 속성(Attributes)을 고려하여 최적의 대안을 선택하는 기법으로 ‘이상적인 해(PIS, Positive Ideal Solution)’로부터의 거리는 최소화하고, ‘부정적인 해(NIS, Negative Ideal Solution)’의 거리는 최대화하는 대안을 선택한다(Hwang and Yoon, 1981).

세부적인 TOPSIS 분석 방법은 다음과 같다. 먼저, 평가 대상과 항목으로 이루어진 의사결정행렬(Decision Matrix)을 구성한다. 본 연구에서는 m개의 대안(국가)과 n개의 평가기준으로 구성된 의사결정 행렬 X를 구축하였다(식 (1) 참조).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

그 뒤, 각 평가 기준별로 단위와 스케일이 다르기 때문에 정확한 비교를 위하여 정규화를 수행하였다(식 (2) 참조). 여기서, m은 평가 대상, n은 평가 항목의 개수이며, r_{ij} 는 i번째 대상의 j번째 평가 항목에 대한 점수를 의미한다. 정규화 수행 후 평가 기준의 가중치(w)를 정규화된 행렬에 곱하여 가중 정규화 행렬 V를 도출한다(식 (3) 참조).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

$$V_{ij} = W_j * r_{ij} \quad (3)$$

이상적 해(PIS)와 부정적 해(NIS) 설정을 위해 각 평가 기준의 특성에 따라 이익 기준(Benefit criteria)과 비용 기준(Cost criteria)을 구분하여 정의한다. 본 연구에서 발열량은 높을수록 좋은 이익 기준이며, 탄소배출계수, 거리, 지정학적 리스크는 낮을수록 좋은 비용 기준으로 설정하였으며, 가장 이상적인 해($v_j^+ = \max(v_{ij})$)와 그 반대인 해($v_j^- = \min(v_{ij})$)를 찾았다.

이후 각 평가 대상과 이상적인 해의 유클리드 거리와 반대 해와의 유클리드 거리를 계산한다(식 (4) 및 식 (5) 참조).

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2} \quad (4)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2} \quad (5)$$

마지막으로 각 대안의 상대적 근접도를 계산한다. 상대

적 근접도는 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 PIS에 근접하고, NIS에서 멀리 떨어진 최적의 대안임을 의미한다(식 (6) 참조).

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (0 \leq C_i \leq 1) \quad (6)$$

3.2. 활용 자료

본 연구는 TOPSIS 분석을 위한 자료로 수입국별 유연탄의 발열량, 탄소배출계수, 수입국과의 해양 운송 거리, 수입국의 지정학적 리스크를 활용하고자 한다. 먼저, 수입국별 유연탄의 발열량, 탄소배출계수는 국내 석탄화력발전본부 중 5개 발전본부에서 2024년에 수입한 유연탄 시료, 입하량, 산지, 원소분석(C, H, O, N, S, Ash) 결과, 공업분석(고유수분량, 고정탄소, 휘발분, Ash) 결과값을 제공받았으며, 원소분석과 공업분석 결과를 토대로 순발열량과 탄소배출계수(Carbon emission factor)를 산정하였다. 분석 자료는 국내 5대 발전공기업 중 4개사 소속의 5개 발전본부에서 제공받아 특정 기업에 편향되지 않은 균형잡힌 석탄 조달 구조를 반영하고자 하였다. 또한, 본 연구에 활용된 5개 발전본부에서 수입한 석탄은 총 21,779,005ton으로 2024년 전체 유연탄 수입량의 약 20%에 달한다. 이와 같이 다양한 발전소의 실측 자료를 활용함으로써 국내 유연탄 수입에 대한 대표성을 확보하고자 하였다.

이러한 자료를 바탕으로 국가별 수입 유연탄의 순발열량과 탄소배출계수 평균값은 Table 2와 같다. 특히, 평균값을 구할 때에는 유연탄의 입하량에 따른 정확한 평균을 산정하기 위하여 입하량을 기준으로 가중평균하여 산정하였다.

수입국과의 해상 운송 거리는 국내 주요 입항지인 부산항을 기준으로 각국의 항구와의 거리를 산정하였다. 거리 산정은 국립해양조사원에서 제공하는 주요 항구와의 거리(km)를 활용하였으며, 속도는 10 knot를 기준으로 산출하였다(KHOA, 2026). 다만, 국립해양조사원 자료에는 콜롬비아와의 거리를 제공하지 않아 거리를 제공하는 또 다른 기관인 SEA-DISTANCES 홈페이지를 추가로 활용하였다(SEA-DISTANCE, 2026). 수입국의 지정학적 리스크는 한국무역보험공사에서 제공하는 Country risk map의 자료를 활용하였다(K-SURE, 2026). Country risk map은 OECD 국가 신용등급과 국별인수방침을 기반으로 한국무

Table 2. Basic data of bituminous coal by import country

Country	Import Volume (ton)	Net Calorific Value (kcal/kg)	Carbon Emission Factor (ton C/TJ)
South Africa	3,572,483	5,603.97	26.37
Russia	3,660,203	5,850.52	25.46
Indonesia	1,851,834	4,827.65	26.24
Australia	7,226,286	5,606.94	25.83
Colombia	4,291,657	5,599.55	25.62
United States	469,638	5,125.64	26.48
Canada	706,904	5,170.30	25.55

Table 3. Marine transportation distance and geopolitical risk by import country

Country	Marine Transportation Distance (km)	Reference Port	Geopolitical Risk (Grade)
South Africa	15,046	Cape town	4
Russia	946	Vladivosotok	7
Indonesia	4,434	Balikpapan	3
Australia	8,575	Sydney	1
Colombia	15,692	Puerto prodeco	4
United States	9,684	Los angeles	1
Canada	8,623	Vancouver	1

역보험공사가 산정한 국가등급이다. 특히, 정치적 안정성, 경제적 성과, 신용 위험, 분쟁 가능성 등을 기준으로 국가별 산정등급을 평가하고 있어 현재 장기적인 전쟁 상태에 있으며, 에너지 자원을 무기화하고 있는 러시아의 지정학적 리스크가 매우 높은 것으로 판단된다. 이와 같은 자료는 Table 3과 같다.

3.3. 가중치 시나리오 설정

TOPSIS 분석의 가중치 설정을 위하여 분석 항목을 분류화하였다. 먼저, 탄소 배출량에 영향을 미치는 인자인 탄소배출계수와 수입국과의 해상운송거리는 환경성 항목으로 분류하였으며, 발열량이 높을수록 투입하는 유연탄이 적어질 수 있으므로 에너지 효율성 항목으로 분류하였다. 마지막으로 지정학적 리스크는 에너지 안보 항목으로 설정하였다. 이와 같은 항목별 가중치는 표준 시나리오를 비롯하여 각각의 항목의 가중치를 높인 환경성 우선 시나리오, 에너

Table 4. TOPSIS analysis scenarios and weights

Criteria	Environment		Energy Efficiency	Energy Security
	Carbon Emission Factor	Marine Transportation Distance	Net Calorific Value	Geopolitical Risk
Standard Scenario	0.167	0.167	0.333	0.333
Environment Priority Scenario	0.3	0.3	0.2	0.2
Efficiency Priority Scenario	0.1	0.1	0.6	0.2
Security Priority Scenario	0.1	0.1	0.2	0.6

지 효율 우선 시나리오, 에너지 안보 우선 시나리오 등 4개 시나리오로 구성하였다. ‘표준 시나리오’는 모든 평가 항목이 동일한 중요도를 지닌다고 가정한 베이스라인(Baseline) 시나리오이며, 3개의 ‘우선 시나리오’는 특정 정책 목표 달성을 위한 석탄 수입국 우선순위를 도출하기 위하여 설정하였다. 시나리오별 가중치는 Table 4와 같다.

본 연구에서 시나리오별 가중치는 특정 기법을 활용하여 단일 가중치를 산출 후 적용하는 방식이 아닌, 다중 시나리오 방식으로 설정하였다. 이는 각 지표가 지니는 정책적 중요도가 가변적이며, 다양한 가중치의 시나리오에서 공급망 우선순위를 도출하기 위함이다. 따라서 본 연구는 시나리오별로 특정 항목에 지배적인 가중치(0.6)를 부여하고, 나머지 항목에 잔여 가중치를 동일하게 분배하는 형태의 시나리오를 구성하였다.

4. 연구 결과

4.1. TOPSIS 분석 결과

앞서 정리한 수입국가와 평가 항목을 기준으로 의사결정 행렬 X를 Table 5와 같이 구성하였다.

다음으로 시나리오별 가중치를 적용하여 Table 6과 같은 가중 정규화 행렬을 구성하였다.

식 (4)와 식 (5)를 적용하여 PIS거리와 NIS거리를 계산 후 최종적으로 식 (6)을 적용하여 상대적 근접도를 계산 후 시나리오별 가장 점수가 높은 순위를 산출하였다

Table 5. TOPSIS decision matrix

Country	Environment		Energy Efficiency	Energy Security
	Carbon Emission Factor (tC/TJ)	Marine Transportation Distance (km)	Net Calorific Value (kcal/kg)	Geopolitical Risk (Grade)
South Africa	26.33	15,046	5,603.97	4
Russia	25.46	946	5,850.52	7
Indonesia	26.24	4,434	4,827.65	3
Australia	25.83	8,575	5,606.94	1
Colombia	25.62	15,692	5,599.55	4
United States	26.48	9,684	5,125.64	1
Canada	25.55	8,623	5,170.30	1

(Table 7 참조). 분석 결과, 표준 시나리오에서는 호주, 캐나다, 미국, 인도네시아, 남아공, 콜롬비아, 러시아 순으로 지속가능한 유연탄 수입국인 것으로 나타났다. 환경성 우선 시나리오에서는 인도네시아, 호주, 캐나다, 미국, 러시아, 남아공, 콜롬비아 순으로 분석되었으며, 표준 시나리오에서 7위를 차지한 러시아의 순위가 올라온 점을 확인할 수 있다. 에너지 효율성 시나리오와 에너지 안보 우선 시나리오에서는 동일한 결과가 나타났으며, 호주, 캐나다, 미국, 인도네시아, 남아공, 콜롬비아, 러시아 순으로 분석되었다.

4.2. 결과 고찰 및 정책적 시사점

TOPSIS 분석 결과, 국내 발전용 유연탄 주요 수입국 중 호주, 캐나다, 미국, 인도네시아 순으로 리스크가 적은 것으로 분석되었으며, 유연탄의 탄소배출계수, 수입 과정에서의 해상 운송 거리 등을 고려한 환경성 우선 시나리오에서는 인도네시아의 순위가 높아지는 결과를 확인하였다. 특히, 러시아는 표준 시나리오, 에너지 효율성 우선 시나리오, 에너지 안보 우선 시나리오 등 3개 시나리오에서 가장 낮은 점수를 받았는데, 이는 우크라이나와의 전쟁 과정에서 지정학적 리스크가 높게 평가되었기 때문으로 판단된다.

본 연구 결과와 실제 우리나라의 유연탄 수입 통계를 함께 비교하였다. 먼저, 호주는 3개 시나리오(표준-에너지 효율성-에너지 안보)에서 가장 높은 점수를 받았으며, 실제로 우리나라의 유연탄 수입이 가장 많은 국가이다. 다

Table 6. TOPSIS weighted normalized matrix

Scenario	Country	Environment		Energy Efficiency	Energy Security
		Carbon Emission Factor (tC/TJ)	Marine Transportation Distance (km)	Net Calorific Value (kcal/kg)	Geopolitical Risk (Grade)
Standard Scenario	South Africa	0.06	0.09	0.13	0.14
	Russia	0.06	0.01	0.14	0.24
	Indonesia	0.06	0.03	0.11	0.10
	Australia	0.06	0.05	0.13	0.03
	Colombia	0.06	0.10	0.13	0.14
	United States	0.06	0.06	0.12	0.03
	Canada	0.06	0.05	0.12	0.03
Environment Priority Scenario	South Africa	0.12	0.17	0.08	0.08
	Russia	0.11	0.01	0.08	0.15
	Indonesia	0.11	0.05	0.07	0.06
	Australia	0.11	0.09	0.08	0.02
	Colombia	0.11	0.17	0.08	0.08
	United States	0.12	0.11	0.07	0.02
	Canada	0.11	0.10	0.07	0.02
Efficiency Priority Scenario	South Africa	0.04	0.06	0.23	0.08
	Russia	0.04	0.00	0.25	0.15
	Indonesia	0.04	0.02	0.20	0.06
	Australia	0.04	0.03	0.24	0.02
	Colombia	0.04	0.06	0.23	0.08
	United States	0.04	0.04	0.21	0.02
	Canada	0.04	0.03	0.22	0.02
Security Priority Scenario	South Africa	0.04	0.06	0.08	0.25
	Russia	0.04	0.00	0.08	0.44
	Indonesia	0.04	0.02	0.07	0.19
	Australia	0.04	0.03	0.08	0.06
	Colombia	0.04	0.06	0.08	0.25
	United States	0.04	0.04	0.07	0.06
	Canada	0.04	0.03	0.07	0.06

Table 7. TOPSIS analysis results

Rank	Standard Scenario		Environment Priority Scenario		Efficiency Priority Scenario		Security Priority Scenario	
	Country	C _i	Country	C _i	Country	C _i	Country	C _i
1	Australia	0.818	Indonesia	0.719	Australia	0.814	Australia	0.930
2	Canada	0.809	Australia	0.636	Canada	0.761	Canada	0.926
3	United States	0.789	Canada	0.632	United States	0.741	United States	0.917
4	Indonesia	0.670	United States	0.592	Indonesia	0.603	Indonesia	0.667
5	South Africa	0.437	Russia	0.568	South Africa	0.462	South Africa	0.491
6	Colombia	0.433	South Africa	0.274	Colombia	0.457	Colombia	0.490
7	Russia	0.312	Colombia	0.266	Russia	0.358	Russia	0.131

음으로는 캐나다의 우선순위가 높게 나타났으며, 우리나라의 유연탄 수입이 4번째로 많은 국가이다. 다음으로는 미국의 우선순위가 높게 나타난 반면, 미국은 우리나라에서 7번째로 유연탄 수입이 많은 국가로 그 수입량이 비교적 적은 편으로 나타났다. 또한, 러시아는 대부분의 시나리오에서 낮은 우선순위를 보였으나, 실제 우리나라의 유

연탄 수입국가 중에서는 3위를 차지할 정도로 유연탄 수입이 많은 국가로 나타났다. 인도네시아는 3개 시나리오(표준-에너지 효율성-에너지 안보)에서는 4번째 순위에 그쳤지만, 환경성 우선 시나리오에서는 가장 우선순위가 높은 것으로 나타났으며, 유연탄 수입량 2위에 해당되는 것으로 나타났다.

위와 같은 결과를 고려하여 다음과 같은 정책적 시사점을 제언하고자 한다. 첫 번째, 연료용 유연탄 수입 시 환경성을 고려할 필요가 있다. Jeong (2024)에 따르면 전력 생산을 위한 연료 수송 과정에서 약 1,106 ~ 1,278 kgCO₂/TJ의 온실가스가 배출되는 것으로 나타났다. 또한, 전과정 관점에서 보았을 때, 석탄화력발전 운영 중 석탄 운송에서 발생하는 온실가스 배출량은 전체 온실가스 배출량의 약 2 ~ 8%에 해당한다(Whitaker et al., 2012). 이와 같은 측면에서 보다 환경성이 높은 수입국을 선택할 필요가 있다. 통상적으로 환경성이 높다는 의미는 탄소배출계수가 비교적 낮은 연료를 수입할 수 있으며, 수입 과정에서의 거리가 가까운 지역을 의미한다. 즉, 환경성 측면에서 인도네시아, 러시아, 호주, 캐나다 등을 주요 수입국으로 고려해야 한다.

두 번째, 수입국의 지정학적 리스크를 고려해야 한다. 러시아는 다른 수입국에 비하여 탄소배출계수가 낮고, 거리가 가장 가까우며, 순발열량이 높아 연료용 유연탄 수입국으로서는 최적의 국가이다. 그럼에도 불구하고, 지정학적 리스크로 인하여 우선순위에서 최하위권으로 밀려났다. 우크라이나와 러시아 전쟁으로 인한 천연가스 수출 제한은 전세계적으로 화석연료 수입에 대한 불확실성과 불안정성을 고조시키고, 재생에너지에 비하여 신뢰도가 낮을 수 있다는 시사점을 제시하였다(Kuzemko et al., 2022). 연료용 유연탄을 전량 수입하고 있는 우리나라에서 수입국의 지정학적 리스크는 에너지 안보 차원에서 매우 중요하다. 이에 향후 연료용 유연탄 수입 시 수입국의 지정학적 리스크를 고려할 필요가 있다.

5. 결론

우리나라의 전력 중 많은 부분이 석탄화력발전소에서 발전되고 있으며, 발전에 사용되는 연료용 유연탄 전량이 수입됨에 따라서 유연탄 수입국을 선정하는 것은 매우 중요하다. 또한, 최근 전과정 사고와 Scope 3에 대한 관심도가 높아짐에 따라 유연탄 수입 과정에서 환경성을 고려하는 등에 대한 관심도가 제고되고 있다. 이에 본 연구는 국내 석탄화력발전소 중 5곳의 유연탄 수입 실적, 공업분석 및 원소분석 결과를 토대로 분석한 탄소배출계수 및 순발열량, 유연탄 수입국가의 거리, 지정학적 리스크 등을 고려하여 지속가능한 연료용 유연탄 수입국 우선순위를 도출하였다.

본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다. 환경성, 에너지

효율성, 에너지 안보의 가중치를 동등하게 배분한 표준 시나리오에서는 호주, 캐나다, 미국, 인도네시아, 남아공, 콜롬비아 순으로 분석되었으며, 에너지 효율성 시나리오와 에너지 안보 우선 시나리오에서도 동일한 결과를 보였다. 환경성 우선 시나리오에서는 차별화된 결과를 보였는데, 인도네시아, 호주, 캐나다, 미국, 러시아, 남아공, 콜롬비아 순으로 우선순위가 높은 것으로 나타났다. 이는, 비교적 거리가 가까워 운송 과정에서 온실가스 배출량이 적고, 탄소배출계수가 낮은 국가인 인도네시아와 러시아의 순위가 높아진 결과이다. 특히, 러시아의 경우, 대부분의 시나리오에서 7위를 차지하였으며 환경성 우선 시나리오에서만 5위를 차지했는데, 이는 지정학적 리스크에서 기인한 결과로 판단된다.

본 연구는 우리나라 유연탄 수입의 대부분을 차지하고 있는 7개국을 대상으로 지속가능한 유연탄 수입 과정에서 수입국 우선순위를 분석하였다는 점에 그 의의가 있다. 특히, 실제 발전소에서 수입하여 사용하고 있는 유연탄의 실측 자료를 토대로 탄소배출계수와 발열량을 계산하여 분석에 투입되었다는 점에서 의의가 있다. 또한, 본 연구는 에너지 안보, 환경성, 에너지 효율성 등을 고려한 다양한 시나리오 측면에서 지속가능한 유연탄 수입국 우선순위를 도출하였으며, 연료 수입국 선택 과정에서 환경성과 지정학적 리스크의 중요도를 밝혔다라는 점에 그 의의가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 우리나라에서 수입하고 있는 모든 유연탄 수입국의 자료를 분석하지 못하였다는 점, 운송 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 정량적으로 계산하지 않고, 거리로 측정을 했다는 점, 5대 발전공기업 전체의 자료를 확보하지 못하였다는 점에서 한계점이 있다.

최근 미국과 이란 전쟁으로 인하여 원유 가격이 급등하고, 원유 수입에 큰 지장을 겪고 있다. 후속연구로 석탄·석유를 포함한 에너지 자원 전반의 수입 과정에서의 리스크를 분석할 필요가 있으며, 특히, 기후변화로 인해 심화될 물리적 기후 리스크 등을 함께 고려하여 분석할 필요가 있다. 또한, 전과정 평가를 고려하여 실제 온실가스 배출량을 측정하고, 수입국별 연료용 유연탄 가격, 지정학적 리스크 등을 종합적으로 고려하여 수입국별 장단점을 제시할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 수입국별 지정학적 리스크 평가를 한국무역보험공사의 자료를 활용하였지만, 향후에는 ‘에너지 무기화’, ‘수입국의 사회·정치적 환경’, ‘전쟁 및 국제적 갈등 상황’ 등을 고려하여 지정학적 리스크를 도출하고, 변수로 활용할 필요가 있다.

사사

본 연구는 기후에너지환경부 ‘기후변화특성화대학원사업’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bouman EA, Lindstad E, Rialland AI, Strømman AH. 2017. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transp Res Part D: Transp Environ* 52: 408-421. doi: 10.1016/j.trd.2017.03.022
- Hwang CL, Yoon K. 1981. Multiple attribute decision making: Methods and applications. New York: Springer-Verlag.
- Jeong HR. 2024. Benefits of expanding high-calorific coal for the entire CO₂ emission process in the coal-fired power generation process: Focusing on fuel transportation, combustion, air pollutants, and power generation by-product treatment (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 15(2): 195-206. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.2.195
- Kang YD. 2024. The impact of the Russia-Ukraine war on the European Green Deal: Acceleration or challenge to energy transition? (in Korean with English abstract). *J Int Stud* 40: 205-242. doi: 10.22971/jois.40..202412.205
- KEEI (Korea Energy Economics Institute). 2024. 2024 long-term energy outlook (in Korean). Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute.
- KEPCO (Korea Electric Power Corporation). 2025. 2024 Korea electric power statistics (No. 94) (in Korean). Naju, Korea: Korea Electric Power Corporation.
- KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency). 2026. Port distances (in Korean); [accessed 2026 Feb 25]. <https://www.khoa.go.kr/kcom/cnt/selectContentsPage.do?cntId=31307000#tabs3>
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). 2025. Mineral production status (in Korean); [accessed 2026 Feb 25]. <https://www.kigam.r>
- [e.kr/menu.es?mid=a30101010102](https://www.kigam.r)
- Kim MW, Cho CS, Jeon YJ, Yang JH, Sin HC, Jeon EC. 2016. Domestic bituminous coal's calorific value trend analysis (2010~2014) and carbon emission factor development (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 7(4): 513-520. doi: 10.15531/KSCCR.2016.7.4.513
- K-SURE (Korea Trade Insurance Corporation). 2026. Country risk map (in Korean); [accessed 2026 Feb 25]. <https://ksight.ksure.or.kr/rsrch/nation/nationView?view=map>
- Kuzemko C, Blondeel M, Dupont C, Brisbois MC. 2022. Russia's war on Ukraine, European energy policy responses & implications for sustainable transformations. *Energy Res Soc Sci* 93: 102842. doi: 10.1016/j.erss.2022.102842
- Kwon KS. 2023. A study on energy legislation to establish energy security (in Korean with English abstract). *Natl Public Law Rev* 19(2): 203-231. doi: 10.46751/nplak.2023.19.2.1
- Moon MB, Soh SB, Rhee CS. 2022. An empirical analysis of the determinants of the price of flexible coal (in Korean with English abstract). *Yonsei Bus Rev* 59(2): 55-71. doi: 10.55125/YBR.2022.12.5
- MOTIE (Ministry of Trade, Industry and Energy). 2025. The 11th basic plan for long-term electricity supply and demand (2024-2038) (in Korean). Sejong, Korea: Ministry of Trade, Industry and Energy.
- Park MS. 2024. Study on the optimal design of Korean aircraft carrier with TOPSIS technique (in Korean with English abstract). *J Korea Acad-Ind Cooperation Soc* 25(7): 297-304. doi: 10.5762/KAIS.2024.25.7.297
- SEA-DISTANCES. 2026. Sea distances voyager; [accessed 2026 Feb 25]. <https://sea-distances.org/>
- Whitaker M, Heath GA, O'Donoughue P, Vorum M. 2012. Life cycle greenhouse gas emissions of coal-fired electricity generation: Systematic review and harmonization. *J Ind Ecol* 16(S1): S53-S72. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00465.x

부록

Table A1. Elemental analysis results of bituminous coal by import country

Country	C	H	O	N	S	Ash
South Africa	68.03	4.06	3.00	7.07	0.57	17.27
Russia	70.13	4.69	4.12	7.06	0.37	13.62
Indonesia	68.93	4.93	5.92	12.72	0.52	6.98
Australia	69.20	4.35	3.00	7.14	0.48	15.84
Colombia	70.37	4.96	1.67	11.99	0.66	10.36
United States	72.22	4.57	14.43	1.28	0.59	6.92
Canada	66.68	4.73	0.89	16.90	0.40	10.40