

한국에너지공학회(2004년도)
춘계 학술발표회 논문집 P341-346

방사형차트를 이용한 국가 에너지 및 전력 생산원의 사회적 영향 종합평가

김태운, 김성호, 문기환, 하재주, 김홍채*, 장순홍*
한국원자력연구소, 한국과학기술연구원

Integrated Assessment for Social Impacts of National Energy and Electricity Generation Sources Using Radar Chart

T.W. Kim, S. Ho Kim, K.-H. Moon, J.J. Ha, H.C. Kim*, and S.H. Chang*

Korea Atomic Energy Research Institute, Korea Advanced Institute of Science and Technology*

(Corresponding author: shokim@kaeri.re.kr)

Abstract

In the present work, for various energy and electricity generating systems to be compared in view of integrated social impacts, nuclear, coal-fired, heavy oil-fired, and LNG, and hydroelectricity systems are considered as electricity generating options. The following assessment factors are selected: economic effect, health effect, environmental effect, and benefit at the national level. As a preliminary study, these factors are represented as power generation cost, estimated mortality, Carbon Dioxide gas emission, and fuel supply stability, respectively. For integrated representation of a multi-criteria decision-making (MCDM) problem, radar charts are introduced to facilitate a comparative recognition of estimates. In the near future, based on the estimates, a MCDM methodology for both qualitative and quantitative comparison will be developed.

초록

국가의 다양한 전력생산시스템(원자력, 석탄, 중유, LNG, 수력 발전원 등)에 대한 사회적 영향을 종합적으로 비교하기 위하여 고려된 평가항목으로서 산업적 경제성, 개인적 보건영향(리스크), 환경영향 및 국가차원의 기여도 등이 선택되었다. 각 평가항목은 특히 발전단가, 추정사망자수, 이산화탄소 배출량, 연료수급 안정성 등에 의하여 대표되었다. 이러한 다기준 의사결정 문제의 평가방법을 개발하기 위한 예비적 연구단계로서 방사형 차트를 이용한 표현방법을 도입하였다. 이 연구에서는 이러한 사회적 영향 다이어그램을 이용하여 각 발전원의 사회적 영향의 다른 점을 쉽게 가시화할 수 있었다. 이 연구결과에 기초하여 정성적/정량적 종합비교 방법론이 개발될 예정이다.

키워드: 국가 전력생산시스템; 다기준 의사결정; 방사형 차트; Multicriteria decision.

1. 서론

다른 나라에 비하여 상대적으로 국내 일차에너지자원이 빈약한 우리나라의 상황에서, 더 나은 생활수준과 경제성장을 계속적으로 유지하기 위해서는 증가하는 에너지수요를 안정적으로 충족시켜야 한다. 이를 만족하려면 국가 에너지 정책을 세우면서 에너지원의 다양성과

더불어 에너지원들의 상호 시너지효과가 고려될 필요가 있다. 각 에너지원 대안들을 사회적 영향의 관점에서 비교 평가해서 얻어진 상대적 결과는 이러한 국내 에너지개발 및 전원개발 정책의 의사결정을 지원하는 데 활용될 수 있다. 예를 들면, 터키에서 에너지정책 계획에 도움을 주기 위하여, 원자력, LNG, 갈탄, 중유, 석탄 발전시스템이 각각 투자비, 전기비, 환경공해성, 신뢰도/안전도 등의 평가항목들을 통해서 비교되었다 [1]. 더욱이, 평가요소로 지속가능성이 고려되는 경우 얻어지는 비교평가 결과는, 지속가능성 [2]이 반영된 에너지원 및 전원개발 정책에 보조적 자료로 활용될 수 있다.

국가의 다양한 전력생산시스템을 종합적인 사회적 영향이라는 평가기준에서 비교하는 문제는 하나의 다기준 의사결정 (Multi-criteria decision-making: MCDM) 문제로 볼 수 있다. 이러한 MCDM 문제는 여러 가지 방법론들에 의하여 정성적 또는 정량적으로 다루지고 있다.

이 연구의 목적은 (1) 평가대안과 평가항목을 선정하고; (2) 예비적 연구단계로 선정된 대안들을 정성적으로 비교하려는 데 있다. 여기서는 방사형 차트에 기초한 에너지 대안들의 순위순 정성적 종합평가 방법을 제시하려 한다.

2. 종합적 평가 방법론

2.1 평가 비교지표

한 국가의 다양한 전력생산시스템이 지역 (local), 광역 (region), 세계 (global) 환경 등에 미치는 긍정적/부정적 영향은 사회영향이라는 종합적 비교지표에 의하여 정성적/정량적으로 평가될 수 있다. 각 발전원이 국내에 미치는 사회영향은 다음과 같은 평가항목에 의하여 비교된다: 경제성, 위해성 (또는 비위해성), 환경성 (또는 환경친화성), 사회성 (또는 사회수용성).

경제성: 각 전력생산시스템의 단위 전력 생산을 위해서 채굴, 운송, 건설, 운전, 폐기 과정에 들어가는 모든 생산비용을 그 시스템의 총 전력 생산량으로 나눈 값이 경제성 지표로 사용될 수 있다. 예를 들면, 발전원의 발전단가가 사용될 수 있다. 또는 발전단가 및 관련 비용이 사용될 수 있다. 원자력 시스템의 경우, 현 단계에서는 폐기과정에 들어가는 비용의 정확한 계산이 고려되지 않은 상태이다. 그러므로 폐기비용에서 지식부족에 의한 불확실성이 고려되어야 한다.

위해성: 발전원의 건설, 연료채취, 운전, 폐기 등 전과정 산업 활동에서 발생하는 개인적 단계의 위험도가 위해성 지표로 사용될 수 있다. 예컨대, 특정 발전원에서 전력생산을 하기 위하여 발전원료의 채취/가공/운반 등 전반적으로 관련된 산업 활동을 통해 발생하는 실제적 위해성이 고려될 수 있다. 개인의 위해성은 사망, 상해, 질병, 사고 등의 요소가 있을 수 있다.

환경성: 각 발전원의 건설, 운전, 폐기 과정 및 관련 산업 활동에서 배출되는 각종 환경공해 물질의 배출량이 환경성 지표로 사용될 수 있다. 이는 전과정 평가 (Life Cycle Assessment; LCA) 방법을 사용한 환경영향평가를 통해 얻어질 수 있다. 환경으로 배출된 공해물이 지구 환경에 미치는 두드러진 현상으로서 특히 이산화탄소 배출에 의한 지구온난화를 들 수 있다. 그러나 현 단계에서는 여러 환경공해 물질이 실제로 인체건강에 미치는 보건영향성의 정량화에는 불확실성이 있다.

사회성: 각 발전원이 사회에 미치는 기술/경제/정치적 영향, 국가의 지정학적 측면 등이 사회성 지표로 사용될 수 있다. 예를 들면, 에너지 수급안정성 [3], 에너지 경제적 안보, 에너지 지정학적 안보, 에너지 지속가능성 [4] 등이 고려될 수 있다. 또한, 특정 발전원이 다른 에너지원으로

대체될 때 고려될 수 있는 대체 비용이나 특정 발전원의 경제적/기술적 파급효과 등이 고려될 수 있다. 그러므로 사회성의 정량화에도 지식부족으로 인한 불확실성이 존재한다.

이러한 다기준 의사결정 문제에서는 사회영향의 평가항목들을 구성하는 다양한 정성적이나 정량적인 평가요소들을 동일 가치 판단기준으로 바꾸어 상호 비교하거나 모호이론에 기초한 모델을 개발하는 것이 필요하다. Figure 1에 이러한 평가항목들이 연계된 사회영향 평가 모델이 주어진다. 여기서는 각 평가항목의 대표적 평가요소가 가치 표준화 (또는 정량화)를 통해 비교 가능한 하나의 일원화된 지표로 표시된다.

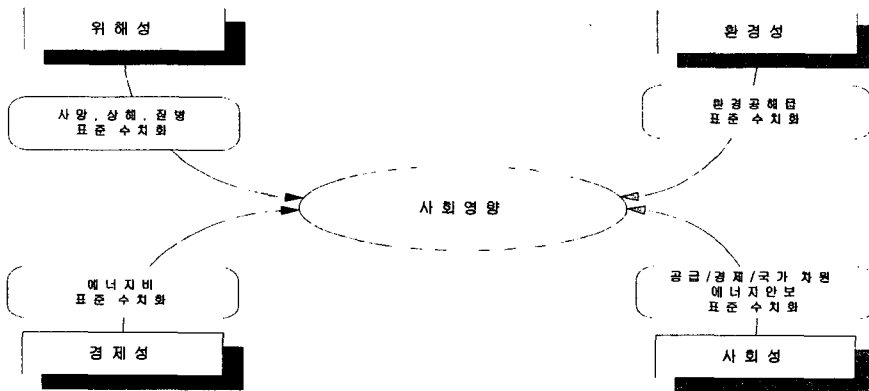


Figure 1. A model of social impacts estimation for each energy option

2.2 방사형 차트(Radar Chart)에 의한 표현

각 범주 (즉 평가항목)는 중심점에서 퍼져 나오는 고유의 값 축에 대응된다. 같은 계열 (즉 발전원)의 모든 데이터 값들이 하나의 선으로 연결되므로 데이터가 방사형의 선으로 나타난다. 이 차트는 많은 데이터 계열의 집계 값을 비교할 때 사용된다. 여기서는 방사형의 선으로 둘러싸인 면적이 비교지표로 사용될 수 있다.

2.3 영향평가 모델의 적용

평가항목 선정

앞에서 거론된 각 평가항목에 대하여 대표적 평가요소가 선정되었다. 이 연구에서 대표 평가요소들은 다음과 같다:

발전단가: 경제성의 대표적 평가요소로서 발전단가가 사용되었다. 현 단계에서는 2003년 3월의 발전원별 정산단가가 사용되었다 [5].

원자력의 경우, 발전단가에 세 가지의 원전 쓰레기(수명이 다된 원전의 폐기, 중저준위 폐기물, 사용후 핵연료)를 처분하는 비용이 반영되었다. 즉, 원자력 정산단가 수치인 1 kWh당 40원 안팎에서 10% 정도인 4~5원이 폐기물 처분에 쓰이는 비용이라고 가정되었다. 앞으로 폐기단체를 고려하려면, 발전원건물의 폐기단가의 실제적 평가가 필요하다. 발전원별 정산단가가

Table 1 에 주어진다.

사망자수: 위해성의 대표적 평가요소로서 사망자수가 사용되었다. 현 단계에서는 각 발전원별 최근 30년간의 전 세계에 걸친 경험적 추정 사망자 수가 선정되었다 [6]. 그 이유는 완전한 데이터베이스가 가용하지 못하기 때문이다. 이는 불완전에 기인한 불확실성의 근원이 된다. 각 발전원의 추정사망자수가 Table 1 에 나타난다.

이산화탄소 배출량: 전과정 평가를 통한 환경영향평가에서는 모두 6개의 영향범주가 고려된다. 이 가운데 현재 가장 큰 관심사가 되고 있는 영향범주인 지구온난화는 이산화탄소 배출량의 증가에 기인한다. 그러므로 여기서는 환경성의 대표적 평가요소로서 이산화탄소 배출량이 사용되었다. 이 값은 LCA방법을 통한 환경성 연구를 참조하였다 [7]. 발전원별 이산화탄소 배출량이 Table 1에 주어진다.

연료수급 안정성: 사회성의 대표적 평가요소로서 연료 수급 안정성 [3] 이 사용되었다. 아직 정량화된 수치가 없으므로 각 발전원에 대해 전문가 의견에 기초하여 주관적으로 배정하였다. Table 1에 전문가 판단에 기초한 추정치가 주어진다.

연료수급 안정성으로 본 사회수용성은 다음과 같이 정량화하였다: 원자력의 경우, 연료 수급에 차질이 없는 것으로 판단하여 1.0이 주어졌다. 석탄의 경우, 중국 산업개발의 활성화로 국내로 석탄수급 사정이 조금 나빠질 여지가 있음을 반영하여 0.9가 주어졌다. 중유의 경우, 1, 2차 석유파동 및 이란전쟁이 전량 수입에 의존하고 있는 상황에서 중유수급에 나쁜 영향을 준다고 판단되어 0.5가 주어졌다. LNG의 경우, 중국 산업개발의 활성화로 중국산 천연가스수급이 나빠질 수 있지만 구러시아 천연가스의 수급가능성으로 안정될 수 있음을 반영하여 0.8이 주어졌다. 수력의 경우, 수자원의 전량 국내 자급자족이 가능하다고 판단되어 1.0으로 배정하였다.

Table 1. Estimates of unit generation cost, mortality, CO₂ emission, and fuel supply security

발전원	원자력	석탄	중유	LNG	수력
정산단가 (원/kWh)	40.53	42.00	73.52	89.93	66.37
사망자수 (명/GWh)	0.18	5.27	6.20	1.55	4.79
이산화탄소 배출량 (g.CO ₂ -eq./kWh)	23.6	1,094	730	590	11.0
연료수급 안정성	1.0	0.9	0.5	0.8	1.0

방사형 차트를 사용한 친화적 사회영향의 표현

발전원별로 정규화(Normalization)된 수치를 앞에서 언급된 4 가지 평가인자들을 축으로 하는 차트에 표기하면 친화적 사회영향의 정보가 시각적으로 표현될 수 있다. 발전원별 종합 위험도 평가 데이터베이스 구축 및 환경위해 사례조사를 통해 얻어진 값들이 평가인자의 정량화에 사용되었다.

각 축에 변수들을 표기하기 위해서는 우선적으로 변수값들의 재크기조정(Rescaling)이 필요

하다. 긍정적인 평가인자의 경우, 발전원별 인자들의 최소값과 최대값이 각각 0.5와 1.0이 되도록 한다. 최소값을 0.5로 배정한 이유는 상대적인 비교에서 최소값이 0.0이 될 경우, 시각적 표현에서 왜곡이 있을 수 있기 때문이다. 반면에, 부정적인 평가인자의 경우, 발전원별 인자들의 최대값과 최소값이 재크기조정이후에 각각 0.5와 1.0이 되도록 한다. 이런 부정적 평가인자의 정규화는 다음과 같이 정의될 수 있다:

$$data_{norm} = 1 - \frac{data - min}{max - min} \cdot 0.5$$

여기에서, 1.0에서 재크기조정값을 뺀 형태로 식을 변형한 이유는 다이어그램에서 방사형 선에 둘러싸인 전체 넓이 (최대값 2.0, 최소값 1.0)가 크면 클수록 친화적 사회영향이 크다고 간주할 수 있기 때문이다. 예컨대, 발전단가, 위해도, 이산화탄소 배출량 등의 경우, 각 값이 적으면 적을수록 상대적으로 친화적 사회영향이 좋은 발전원이라고 볼 수 있다. Table 2에 각 평가항목의 정규화 수치들 및 친화적 사회영향의 수치가 주어진다.

Table 2. Integrated estimates of social impacts

발전원	원자력	석탄	중유	LNG	수력
경제성	1.00	0.99	0.67	0.50	0.74
비위해성	1.00	0.58	0.50	0.89	0.62
환경친화성	0.99	0.50	0.67	0.73	1.00
사회수용성	1.00	0.90	0.50	0.80	1.00
친화적 사회영향 (넓이)	1.99	1.10	0.67	1.04	1.41

각 발전원별 사회적 영향평가 다이어그램이 Figure 1에 보인다. 그림에서 볼 수 있듯이, 원자력 대안의 경우, 경제성, 비위해성, 사회수용성 등 모든 평가기준에서 다른 발전원들 보다 우수하다고 나타난다. 석탄 대안의 경우, 경제성 및 사회수용성 기준에서는 양호하나 비위해성 및 환경친화성 기준에서 불리하다는 것을 알 수 있다. 중유 대안의 경우, 경제성, 비위해성, 환경친화성, 사회수용성 등 모든 평가기준에서 열악하다. LNG 발전의 경우, 비위해성 기준에서 중유보다 유리하지만 전반적으로 열악함을 알 수 있다. 마지막으로 수력의 경우, 환경친화성 및 사회수용성 기준에서 우수하나 경제성 및 비위해성 기준에서 중유와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 수력의 경우에는 지구온난화가스 배출이 없으므로 가장 좋은 환경친화성 시스템이다. 그래서 정규화 값이 1.0으로 배정되었다. 만일 댐의 건설로 인한 생태계 영향이 고려된다면, 이 정규화 값은 작게 설정될 것이다.

결론적으로 사회영향 평가다이어그램을 사용하여, 네 가지 평가항목들의 친화적 사회영향을 정성적으로 종합평가할 수 있다. 평가결과에 따르면, 원자력이 가장 양호하고 중유가 가장 열악하다.

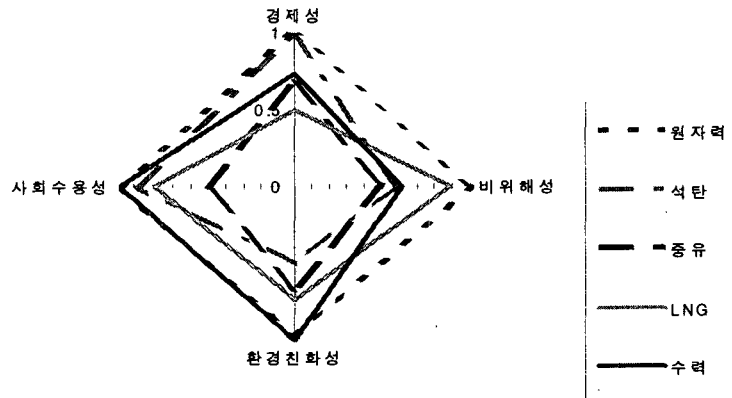


Figure 1. Social impacts diagram for nuclear, coal-, oil-, LNG-fired hydropower systems

3. 결론

국가차원의 다양한 전력생산시스템 (원자력, 석탄, 중유, LNG, 수력 등)에 대한 사회영향을 종합적으로 평가하기 위하여 경제성, 개인적 위해성, 환경성, 국가차원의 기여도 등이 평가기준으로 선정되었다. 이 연구에서는 평가항목이 발전단가, 사망자수, 이산화탄소 배출량, 연료수급 안정성 등의 평가요소로 각각 대표되었다. 이러한 다기준 의사결정 문제를 정성적으로 쉽게 가시화 비교하기 위하여 방사형 차트를 이용한 표현방법이 사용되었다. 앞으로는 아직 고려되지 않은 다른 평가요소들이 구체적으로 포함될 수 있으리라 판단한다. 이 연구결과를 기초하여 정성적/정량적 종합비교 방법론이 개발될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 과제의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] Z. Güngör and F. Arıkan: "A fuzzy outranking method in energy policy planning", Fuzzy Sets and Systems 114(1), 115-122 (2000).
- [2] OECD NEA, 2000, Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective.
- [3] S. G. Lee: "Energy Security and Cooperation in Northeast Asia", 환경정책 9(2), 5-27 (2001).
- [4] Afgan, N. H., Carvalho, M. G., Hovanov, N. V.: "Energy system assessment with sustainability indicators", Energy Policy 28(9), 603-612 (2000).
- [5] 한국전력거래소, "2003년 3월 초기정산실적" (2003).
- [6] 김태운: "발전원별 종합위험도 비교 평가 연구 연차보고서" (2004).
- [7] 정해봉 외: "발전원별 전과정시스템에 대한 환경영향평가", KAERI/CM-715/2003, 한국 원자력연구소 (2003).