

국가전력생산 시스템에 대한 전과정 영향평가

김태운, 김성호, 정환삼, 하재주, 민경란, 고순현*
한국원자력연구소, (주)에코프론티어*

Life Cycle Assessment for National Electricity Generation Systems

T.W. Kim[¶], S. Ho Kim, W.-S. Chung, J.J. Ha, K.R. Min, and S.-H. Ko*

Korea Atomic Energy Research Institute, Eco-Frontier Co.*

([¶]Corresponding author: twkim2@kaeri.re.kr)

Abstract

In recent, the trends in national energy policy are established in the context of the integrated risk estimation for various national electricity generating options. The approach takes account of health, environmental, economic, and social aspects of electricity generation systems. In the present work, nuclear, coal, and LNG sources are chosen because these hold more than 90% of national total electricity generation in a descending order. A life cycle assessment (LCA) methodology is used for comparing environmental impacts of these options during the life cycle such as construction, operation as well as disposal stages. Here, the LCA consists of life cycle inventory analysis, classification/selection process of impact categories, characterization process, and normalization process of each category. LCA can be an useful tool for environmental impact assessment of future national energy options. At the planning stage of future energy policies, the results of LCA would be taken into consideration. According to data update at the construction and disposal stages, the LCA needs to be conducted iteratively.

키워드: 국가 전력생산시스템; LCA; 전과정평가 기법.

1. 서론

최근 국가 에너지 정책은 다양한 발전원들의 대중보건, 환경성, 경제성, 사회기여도 등을 고려하여 결정되고 있다. 이는 원자력을 포함한 여러 발전원들에 대한 종합 위험도 평가 체계에 기반을 두어 구체화된다. 세계적으로는 화석연료-의존 에너지 정책에서 벗어나 좀 더 지속가능 에너지 개발에 관심이 집중되고 있다.

이 연구의 목적은 국내 주요 발전원별 환경성 데이터베이스를 구축하고 LCA 방법론을 사용하여 발전원별 건설, 운영(연료주기), 폐기단계 등 전반에 걸쳐서 전과정 환경영향을 평가하여 발전원의 환경적 영향부하를 비교하려는 것이다.

국내 전력에 대한 전과정에서 환경영향을 평가하는 작업은 Table 1에 정리되어 제시되었다. 원자력, 유연탄, LNG 발전원의 대상발전소는 모두 동일하다. 대상발전소는 원자력(울진3,4호기, 월성2호기), 유연탄(태안화력), LNG(서인천복합, 안양복합, 인천화력)이다. 사용되거나 사용될 자료는 기존 수집자료 또는 보유하고 추가적인 수집자료 등 서로 다를 수

있으므로 평가결과를 비교하는 경우에 주의가 요구된다.

Table 1. Previous studies on LCA for domestic electricity generation systems

수행 기관/연도	수행 목적/내용	비교분석된 대상 발전원
한국인정원 1999 [1]	국가 발전원별 LCI-DB [2] 작성	원자력, 유연탄, 무연탄, LNG, 수력, 오일 등 6개 발전원
한국가스공사 2000 [3]	발전연료별 환경영향평가. 일반자료에 의한 분석	원자력, 유연탄, LNG, 오일
한국원자력연구소 2002 [4; 5]	원자력 연료개발부터 발전과정의 전과정평가	원자력연료단계 중심: 타 발전원은 한국가스공사자료
한국원자력연구소 2002.4-2005.2 (3년간) [6]	발전원 건설/운영/폐기단계 환경평가 + 위해성 및 사회적 영향 평가	원자력, 유연탄, LNG
한전전력연구원 2003.5-2005.4 (2년간)	운영과정 평가만 수행. 목적: 발전으로 인한 외부비용 평가	원자력, 유연탄, LNG.

전과정평가 기법은 세 단계로 나뉘어 수행될 수 있다 [7; 8]: (가) 목적 및 범위정의 단계, (나) 전과정목록분석 단계, (다) 전과정영향평가 (Life Cycle Impact Assessment; LCIA) 및 결과해석 단계. LCIA 단계에서 다음과 같이 9 개의 영향범주가 사용되었다: 자원소모 (ADP), 지구온난화 (GWP), 산성화 (AP), 부영양화 (EP), 오존층파괴 (ODP), 광화학적 산화물 생성 (POCP), 육생태계독성 (TETP), 수생태계독성 (AETP), 인체독성 (HTP). 이 연구에서는 특성화 영향 및 정규화영향 값들이 얻어진다. 특성화영향 측도는 특성화인자 (CF)의 값을 사용하여 영향범주별 기준값에 대한 상대기여도를 의미한다. 다양한 발전원에 대한 영향범주별 환경영향을 비교할 수 있다. 반면에, 정규화영향 측도는 주어진 평가 대상시스템에 어떤 영향범주가 영향을 많이 미치는지를 파악하는 데 도움을 준다. 각 영향범주의 지역적 특성이 반영된 상대기여도를 평가하기 위하여 특성화 환경영향의 수치가 지구전체 자원량이나 지구전체 인구로 나뉜 양이다. 정규화 환경영향은 지구전체의 자원이나 인구에 미치는 기여도를 의미한다. 예를 들어, 석탄의 자원고갈이 1E-9으로 표시되어 있으면 석탄자원의 채굴 및 사용으로 인해 지구전체 자원의 1/1E+9의 기여를 의미한다. 여기서는 산자부, 한국형 정규화인자 및 CML 방법론이 사용된다. 가능한 경우, 국가(환경부, 산자부) LCI-DB가 사용된다. 가용하지 않은 경우, 최신 외국 DB가 사용된다. Data gap의 경우, 현재 국내의 DB가 가용하지 않음을 뜻하며 다음에 보완되어야 한다.

이 연구에서 발전원별 환경성 평가 내용은 다음과 같다: 원자력은 경수로, 중수로로 LNG는 기력, 복합화력으로 구분되었다. 석탄은 유연탄이 고려되었다. 지역적 경계는 국외 활동 (연료채굴, 해상수송) 단계 및 국내 활동 (저장, 수송, 발전) 단계로 구분되었다. 수행된 발전원별 환경성 비교평가는 다음과 같다: (1) 3 개 발전원별 건설단계대비 운영단계, 국외 활동대비 국내활동 환경영향이 비교되었다; (2) 지구온난화에 대한 전과정 환경영향이 단계

별로 비교되었다.

2. 전과정평가 방법론의 적용: 다양한 상용 발전원

전과정평가는 제품, 에너지, 또는 서비스 생산/사용 시스템에서 원료취득, 운반, 가공, 생산, 유통, 사용, 폐기 단계 등 전과정에서 일어나는 환경오염물의 배출이나 자원/에너지의 기준 흐름을 파악하여 영향범주의 환경영향을 정량화하는 방법이다. 이 방법은 사회적 종합평가에 기초한 대안시스템의 선정 문제에서 환경성측면 의사결정의 보조수단으로 사용된다.

이 기법을 적용하여 대상시스템의 가치와 영향을 비교 평가하면 자원/에너지 소비 및 환경부하를 최소화시키는 방향으로 개선방안을 개발할 수 있다. 또는 지속적인 환경개선이나 환경규제를 위한 감시에 활용될 수 있다. 예를 들어, 폐기단계에서 재활용/재사용 방안을 도입하여 전과정평가가 적용되면 환경영향이 더 감소될 수 있을 것이다. 발전원 전과정평가의 경우, 발전원의 LCI 데이터 및 전과정에 걸친 환경평가의 비교 데이터가 얻어진다. 이러한 데이터는 국가 에너지/전력 계획이나 정책을 개발하는 데 기초자료로 사용될 수 있다.

2.1 전과정평가에 사용된 대상발전소

2002년 현재 국내의 원자력, 석탄, LNG 발전에 의한 발전실적 비율이 각각 39.3%, 38.5%, 12.7%이어서 전체 발전량의 90% 이상을 차지한다. 나머지는 석유(경유 및 중유)와 수력이 약 9.2% 정도를 차지한다. 현재 풍력과 태양력에 의한 발전은 미미하다고 알려져 있다 [9].

내림차순으로 에너지원별 누적 발전량의 90% 이상을 차지하는 원자력, 석탄, LNG의 3개 발전원이 평가대상으로 고려되었다. 대상발전소로서 경수원자력은 울진3,4호기, 중수원자력은 월성2호기, 유연탄화력은 태안화력 3,4호기, 기력LNG는 인천화력, 복합LNG는 서인천복합화력 1,2단계 등이 선정되었다.

Table 2에 건설/폐기단계 및 운영단계에서 필요한 자료들이 주어진다. 건설단계는 각 발전소별 건설지, 건설통계자료, 공사지 등에서 수집된 자료들이다. 기준 운전기간 40년 동안 설비 이용률은 다음과 같다: 원자력은 90%, LNG는 30%, 유연탄은 85%이다. 기능단위는 1 GWh로 환산된다. 각 발전소 설비용량 (GWe) 정보를 사용하여 기준흐름은 다음과 같이 얻어진다: 기준흐름 = 설비용량 (GW) · 이용률 (%) · 40 yr · 8760 hr/yr.

Table 2. Reference plants data for power systems at construction/destruction and operation stages

발전원	경수원자력	중수원자력	유연탄화력	기력LNG	복합LNG
기준년도	2001	2001	2002	1997	1998
설비용량 (GW)	2.0	0.7	0.5	-	1.8
건설/폐기단계 전력생산량 (TWh)	16.475	5.957	22.059	5.933	11.797
건설/폐기단계 사용연료량 (톤)	55 tUO ₂	102 tUO ₂	7.57E6 hard coal	0.86E6 tLNG	1.65E6 tLNG
운영단계 전력생산량 (TWh)	630	220	297	189	
운영단계 콘크리트 (k톤)	2,534	488	154	590	
운영단계 철강재 (k톤)	98	23	93	19	

2.2 가정사항 및 제한사항

운영단계, 건설단계, 폐기단계에 걸친 LCA 수행에 요구되는 자료수집/자료가공에서 사용되는 가정사항 및 제한사항은 다음과 같다:

운영단계: 데이터 통합 및 해석이 쉽도록 각 공정별 물질 및 에너지 투입량과 산출물, 폐기물, 재활용율 등 정리하였다. 발전소 방문조사를 통하여, 년간, 월간, 일정 전기 생산량 기준 등 현장에서 관리하는 데이터를 수집하였다. 운영단계의 항목인 발전단계에서는 국내 자료가 사용되었다. 국외에서 발생하는 연료채취 및 해상수송 과정들에서는 Upstream DB가 사용되었다.

건설단계: 건설단계는 토목공사와 건축공사로 범위가 한정되었다. 기계, 전기, 계측제어 설비는 제외되었다. 이는 수량자료의 수집은 가능하지만 구성물질 및 중량화 자료는 가능하지 않기 때문이다. 세 가지 발전원에 대하여 일관성 있는 중량 데이터를 수집하기 어렵기 때문에 영향평가에 포함된 건설자재는 주요자재(즉, 콘크리트, 철강재)로 제한되었다. 콘크리트의 경우, 국내 데이터베이스가 가용하지 않으므로 국외자료 (예: 네덜란드의 Boustead 자료원) 이, 철강재는 국내 냉연코일 자료원이 사용되었다.

개발된 건설지, 건설통계자료집 등의 문헌데이터가 사용되었다. 이는 건설단계의 경우 현장에서 데이터를 직접 수집할 수 없기 때문이다. 모든 발전시스템 건물의 수명은 40년으로 가정되었다. 각 발전시스템 건물의 기능을 정량화하기 위하여 여러 인자들 (예상 수명, 생산 가능한 전기량, 필요 요건 등)이 수집되었다.

폐기단계: 건설단계에서 포함된 자재 가운데 콘크리트만 포함된다고 가정하였다. 폐기시나리오로서 건설단계에 투입된 콘크리트 전량이 매립된다고 가정하였다.

2.3 결과 및 논의

특성화 환경영향

특성화 영향이란 환경범주별로 단위 전력생산 당 환경오염물의 배출량 (예: g.CO2 eq./MWh) 을 뜻한다. 여기서는 지구온난화 가스배출에 대한 전과정 환경영향 평가(LCA 수행) 특성화 결과가 주어진다.

Figure 1에 발전원별 지구온난화에 기여하는 잠재적 배출량이 보인다. 그림에 보이듯이, 각 발전원의 전과정 (건설, 운영, 폐기단계)에 대한 지구온난화에 이바지하는 특성화 영향은 유연탄, 기력LNG, 복합화력LNG, 경수원자력, 중수원자력 순으로 나타났다. 운영단계에서 원자력발전원의 시스템경계에 포함된 공정들은 가공전단계 (채광, 정련, 경수인 경우는 변환/농축도 포함), 해외수송, 성형가공, 국내수송, 발전 등이다.

단계별 대비로는, 건설단계에서 보다 운영단계에서 지구온난화에 미치는 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 그러나 건설단계에서 환경영향이 높은 과정이라고 예상되는 기계, 전기, 계측제어 설비 등이 무시되었으므로 결과해석에서 주의가 요구된다.

운영단계에 포함된 원료채취/가공 및 발전 단계에 대하여 발전원별 지구온난화에 기여하는 잠재적 배출량도 얻어졌다. 운영단계에서 원자력발전원의 시스템경계에 포함된 공정들은 크게 원료채취/가공단계 (채광, 정련, 경수인 경우는 변환/농축도 포함, 해외수송, 성형가공, 국내수송) 및 발전단계 등이다. 표에 보이듯이, 운영단계에서 지구온난화에 이바지하는 특성화 영

향은 원자력에서는 발전단계에서 95% 이상, 유연탄에서 95% 이상, LNG에서 85% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 발전단계에서 사용되는 연료인 경유의 연소 때문이다.

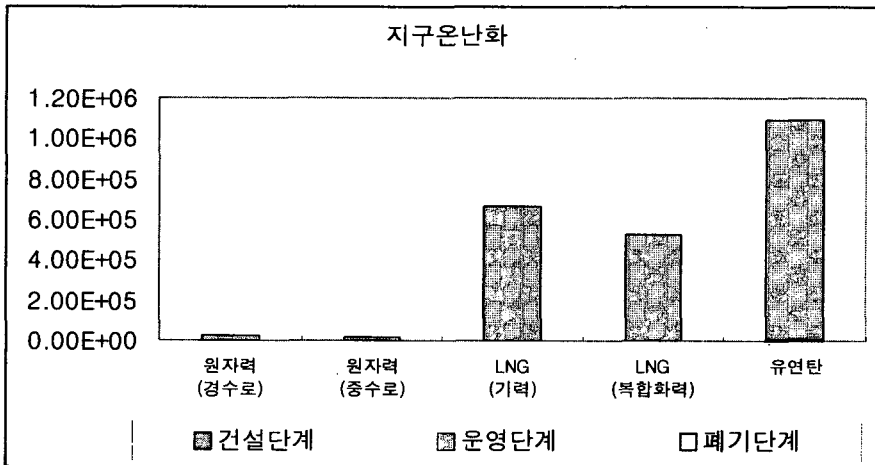


Figure 1. Global warming gas emissions for various sources (Unit: kg CO2 eq./GWh)

정규화 환경영향

Figure 2에 발전원별 영향범주의 상대적 환경영향이 주어진다.

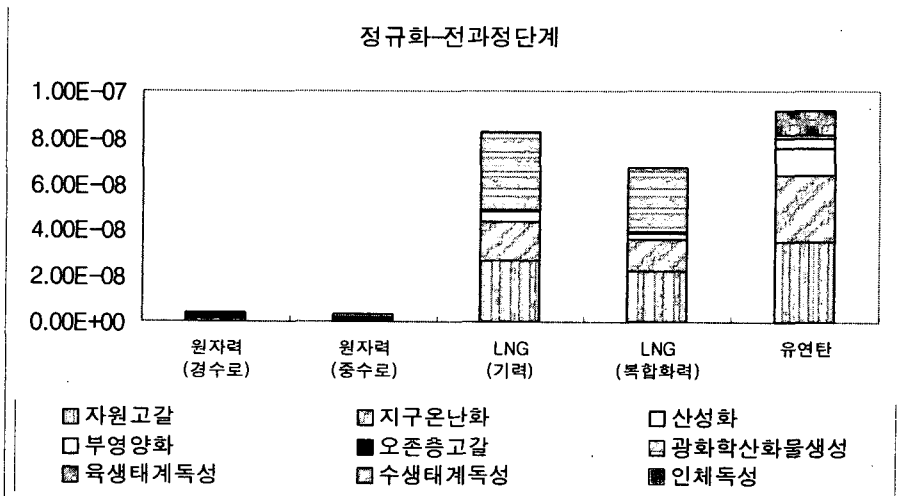


Figure 2. Normalized impacts for various power sources (Unit: Year/GWh)

그림에 따르면, 유연탄, 기력LNG, 복합화력LNG, 원자력 순으로 환경영향이 낮아지는 것으로 나타났다. 전과정을 고려할 때, 유연탄 발전원의 환경 이슈는 자원고갈, 지구온난화, 산성화 등이고 원자력의 경우는 수생태계독성, 자원고갈, 지구온난화 등이며, LNG의 경우는 광화학산화물생성, 자원고갈, 지구온난화 등이다.

3. 결론

국내 발전원에 대한 전과정평가가 수행되었다. 경수원자력, 중수원자력, 유연탄, 기력LNG, 복합LNG 발전에 대한 특성화 영향 및 정규화 영향이 계산되었다. 각 발전원의 지배적 환경 이슈가 파악되었다. 발전원별로 전과정에서 지구온난화에 대한 상대적 기여도가 평가되었고, 운영단계, 건설단계, 폐기단계에서 지구온난화에 미치는 정도가 알려졌다. 전과정평가 방법으로 좀 더 실제적 결과를 얻기 위해 지속적인 데이터베이스의 갱신이 바람직하다고 판단된다. 이 방법론은 또한 설계 또는 건설중인 에너지원(예: 수소생산형 원자력 설비)의 환경영향을 예측하는 데 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 과제 of 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] 한국품질환경인정협회: "국내전력데이터", <http://www.kab.or.kr/> (1999).
- [2] 이상용, 이진모: "국내 전력에 대한 전과정목록 분석", 한국 전과정평가 학회 학술대회, 139-142 (1998).
- [3] 정해봉 외: "천연가스 전과정 환경영향평가 (LCA) 기술용역 최종보고서", 한국가스공사 (1999).
- [4] 정환삼 외: "전수명 주기 평가를 통한 원전의 환경영향분석 모형 구축", KAERI/RR-2382/2002, 한국원자력연구소 (2002).
- [5] 정환삼, 문기환, 윤성원: "전과정분석을 통한 원전의 종합 환경성 평가", 2003년도 추계학술 발표회, 한국원자력학회 논문집 (2003).
- [6] 정해봉 외: "발전원별 전과정시스템에 대한 환경영향평가", KAERI/CM-715/2003, 한국원자력연구소 (2003).
- [7] Kim, C.-R.: "Development and application of life cycle assessment methodology for chemical processes", PhD Thesis, KAIST, Taejeon, 179pp (1999).
- [8] Lee, Y. E.: "Development and application of environmental management technique for nuclear power generation system", PhD Thesis, KAIST (2001).
- [9] 한국전력거래소, "발전설비현황" (2003).