

발전기술의 LCA 수행사례 비교 연구
-A Comparative Study on the LCA Cases
for Power Generation Technologies-

지철구 *

Ji Chul Goo

정환삼 *

Chung Whan Sam

Abstract

A life cycle assessment(LCA) is increasing its applicability as a powerful tool for an environmental burdens analysis. In this study, some cases are compared in terms of analysis procedures and results obtained with LCAs for evaluating power generation technologies in Korea. For the comparison, 3 power generation technologies are selected because they produces almost 90% of 2003 total electricity generation in Korea. It is shown that the range of evaluation values amounts to maximally the order of about 105, which is rather large discrepancy than the level of 101 in comparison with foreign studies. The difference seems to be due to the simplicity of modeling used in each case study. It is proposed that this large discrepancy should be obviously clarified to improve their reliability in that electricity is a essentialness for all industries and the capacity of LCA of national-level electricity affects the results of LCA for the other sectors.

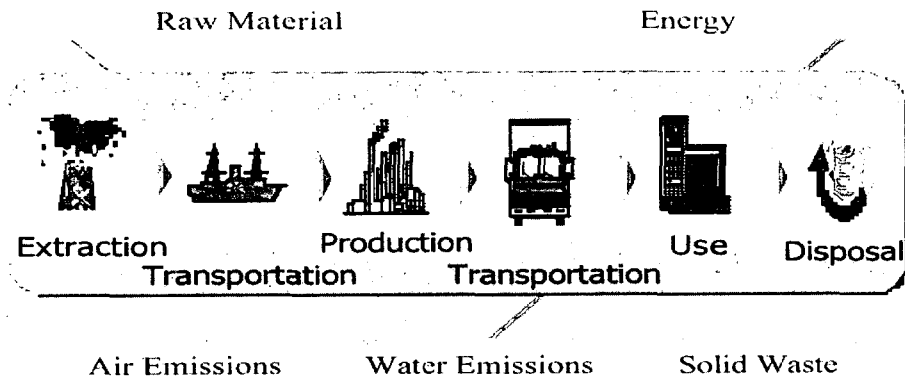
Keywords: LCA, LCI-DB, Power generation technology, Environment, Impact categories, GHGs emission

* 한국원자력연구소

2006년 7월접수; 2006년 8월 수정본 접수; 2006년 8월 게재확정

1. 서론

전수명 주기 평가(LCA: Life Cycle Assessment)는 성숙한 산업사회에서 파생되는 반대급부의 문제와 여기에서 야기되는 영향을 정량화 하려는 과정에서 쓰이는 시스템적 접근법의 하나이다. LCA는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 재화나 용역 혹은 기술의 수명주기 전반에서 발생하는 오염문제를 중심으로 환경에 미치는 영향을 종합적으로 연구하려는 것이다. 그리고 경우에 따라서는 여기서 나아가 복합적 문제로 인해 복잡한 환경영향을 미치는 각 요소를 명확하게 하는 것으로 환경부하를 줄이는 구체적인 해결책의 강구에 도움이 되기도 한다. 이러한 LCA 수행 노력은 서구 선진국에서는 일찍이 1970년경부터 이루어져 왔으나 우리나라에서는 그 동안의 급속한 경제성장과 개발논리의 지배로 관심을 끌지 못하다가 1990년대에 들어서야 비로소 민간부문의 상품들에 대한 환경특성 평가를 위해 시험적으로 적용되고 있다.



<그림 1> LCA의 분석 범위

본 연구에서는 거의 동일한 시대에 같은 발전기술을 대상으로 국내에서 수행한 LCA 연구들을 비교, 분석하기 위하여 연구목적이 공익적 필요성과 정부 출연된 연구비로 공식적으로 수행된 연구로 국한하였고, 분석대상 발전기술은 1978년 고리원전을 필두로 도입되어 20기가 가동되어 국내 전력공급의 40% 이상을 담당하고 있는 원전을 포함한 연구로 제한하였다. 분석활동에서는 LCA를 통한 글로벌 환경성 평가를 수행한 연구 중 비교에 충분한 영향범주를 갖고 있는 연구들을 대상으로 국내 발전기술을 분석한 비교대상인 LCA 연구사례를 3가지 연구로 압축하여 비교하였다. 이러한 통상의 LCA에서 발생할 수 있는 차이수준을 넘는다면, 이는 분석결과의 유효성에 혼돈을 불러올 수 있으며, 특히 전력기술과 같이 타산업의 필수소재로 사용되는 전방연쇄 효과가 큰 산업일수록 분석 결과의 신뢰성과 재현성 확보는 더욱 중요하다.

2. 발전기술의 LCA 중요성

2005년 2월 16일 교토의정서 정식으로 발효된 가운데 국내에서도 2005년부터 시작될 2차 공약기간(2013~2017년) 협상에서 제시할 우리나라의 의무부담 방안이 검토되기 시작되었다. 즉, 우리나라도 기후변화협약 의무국으로의 편입이 피하기 어려워지고 있다. 이러한 국제 환경규제 의무부담 강화에 맞추어 제조활동의 글로벌 환경영향 분석능력 구비가 더욱 필요해지고 있다. 기존의 환경영향 분석은 제조설비나 사용처 근처에서의 환경영향을 주로 평가했으나, 최근 환경의 무역연계가 강화되면서 제품의 생산, 사용, 폐기 단계인 전과정에 걸친 직·간접으로 미치는 환경영향을 평가하자는 LCA 개념이 대두되고 있다.

전력기술의 LCA 수행에서 특성은 크게 기술의 환경특성과 사용의 사회적 특성으로 나누어 볼 수 있다. 우선 환경특성에서 전력기술은 아직도 세계전력의 70 % 정도가 화석연료의 연소에 의해 발전되기 때문에 지구온난화가스 배출이 많고, 더욱이 기존 발전기술의 환경영향을 혁신적으로 줄여줄 기술이 가까운 장래에 출현하기 어려워 당분간 기존기술의 개량기술로 공급해야 한다는 애로가 있다. 다음으로 사회적 특성에서 전력은 소비자잉여가 큰 공공재적 성격을 갖고 있어 소득 수준이 향상될수록 전력 수요는 GDP 성장률보다 높은 증가율을 기록하게 된다. 즉, 미래사회 전력의 의존도는 더욱 심화될 것이라는 점이다. 이들을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

2.1 전력의 환경특성

수송산업과 마찬가지로 전력산업은 아직도 화석연료의 연소열을 이용해 발전한다는 것이다. 2003년을 기준으로 국내 발전소의 62% 이상을 석탄, 석유, LNG와 같은 화석연료 연소를 통해 발전하고 있기 때문에 지구온난화에 미치는 영향이 막대하다는 점을 들 수 있다[2]. 세계적으로도 2001년을 기준으로 64% 이상을 화석연료 발전원에 의존[9]하고 있다는 점에서 발전부분의 글로벌 환경영향은 중대하다. 지구온난화가스(GHGs, Green House Gases) 배출을 기준으로 전력산업의 비중은 미국의 경우도 자국내 전체 온난화가스 발생의 약 1/3을 전력산업이 차지하고 있다. 이는 우리나라의 경우도 마찬가지로 2004년 말 확정된 전력수급계획에 따르면 국내의 발전소에서 사용한 연료연소에 따라 배출한 탄소배출량은 동기간 국내 연료연소에 따른 발생량의 30% 수준으로 단위 산업으로는 최대의 배출분야라 할 수 있다[1].

전력기술 측면에서 산업자원부가 2004년 말 확정된 2017년까지의 발전소 도입계획에 따르면 화력발전원의 구성비는 2003년 말 62.6%에서 2017년 말에는 55.4%로 다소 줄어들지만, 여전히 주종 발전기술로써 확고한 기능을 담당할 수밖에 없어, 발전기술의 환경영향은 우리나라 미래사회에서도 역시 가장 중요한 요인으로 작용할 것으로 보인다.

2.2 전력수요의 급증 예측

전력의 수요특성으로, 우리나라에서 이러한 환경특성을 갖는 전력의 점유율(최종에너지 연간 소비량 대비 연간 전력사용량)은 우리의 에너지 소비활동에서 점차 높아질 것이라는 점이다. 이는 전력사용의 편의성과 청정성뿐만 아니라 산업에서는 산업구조의 고도화에 따라 보다 전력 사용비율이 높아지는 것은 선진국들의 공통된 수요패턴이다. 우리나라의 전력사용 점유율은 2002년의 경우 14.9%로 일본의 추이에 비추어 보면 겨우 1970년대 후반의 수준에 그치고 있다[12]. OECD 선진국들이 2003년 기준으로 20% 수준이라는 점에 비추어 보면 우리나라의 전력수요도 이 수준까지의 점유율을 기대할 수 있다[11]. 따라서 최종에너지원 대안에서 소비자 선호가 이어져 지속성장할 잠재력을 갖고 있다.

2.3. 전력의 사회적 특성

마지막으로 전력기술의 사회적 특징으로 산업연관을 기준으로 보면 전력산업의 생산유발계수는 0.025 수준으로 계수의 크기로는 77개 통합 중분류상 비록 상위 20위 수준이다. 그러나 타산업의 생산 활동에 투입되는 형태는 원유 및 천연가스 산업을 제외한 다른 76개의 전 산업에서 필수재로 사용하기 때문에 자신의 본원적 가치 보다 사회적 공익가치가 월등히 높아 전력소비에 따른 잉여가치가 큰 공공재로서 현실적으로 대체에너지원을 찾기 어렵다는 특성을 갖고 있다.

3. 국내 LCA 수행사례 조사

3.1 비교를 위한 동질성 기준

비교연구에 있어 중요한 점은 비교 대상 사례들이 비교에 적합한 동질성을 갖는 외에도 각 연구들이 객관적 합리성을 갖고 있어야 된다는 것이다. 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 비교기준을 수립하고, 이를 기준으로 비교대상이 되는 연구를 도출하였다.

- ① 연구목적: 분석 동기와 목적의 공공성
- ② 분석대상: 동일한 대상기술과 유사한 시대적 배경과 기술수준
- ③ 분석활동: 동일한 분석법의 적용과 유사한 영향범주에 대한 평가

이러한 기준을 요약하면 우선 연구목적으로는 공익적 필요성과 정부 출연된 연구비

로 공식적으로 수행된 연구로 국한하였으며, 분석대상 기술은 1978년 고리원전을 필두로 도입되어 2005년 말 20기가 가동되어 국내 전력공급의 40% 이상을 담당하고 있는 원전을 포함한 연구로 제한하였다. 마지막으로 분석활동에서는 LCA를 통한 글로벌 환경성 평가를 수행한 연구 중 비교에 충분한 영향범주를 갖고 있는 연구들을 대상으로 하였다. 이를 종합하여 적용하면 국내의 발전기술을 분석한 비교대상인 LCA 연구 사례는 다음과 같은 3가지 연구로 압축되었고, 본 논문에서는 의도의 왜곡을 피하기 위해 각 사례를 익명으로 표시하였다.

3.2 비교대상으로서 연구 수행사례

3.2.1 A(1999) 연구[3]

(1) LCA 수행 개요

가장 먼저 1999년 발표되었던 연구를 들 수 있다. 본 연구는 당시 산업자원부가 수행하고 있던 산업분야의 국가 LCA 기반 구축사업의 일환으로 수행되었으며, 비록 데이터보다는 데이터 대표치를 사용하는 등 부족한 점에도 불구하고 국내 전력기술의 환경성을 평가한 대표적인 연구이고 현재 환경부의 분석 결과와 함께 국가 LCA의 근간을 이루고 있다.

본 연구의 수행취지에 대해 보고서에서는 LCA를 기초로 제품의 환경영향 수준을 제품의 설계요인으로 통합시키는 도구 개발의 일환으로 다음과 같은 세부목표를 갖고 있는 것으로 언급하였다.

- ① 우리 실정에 맞는 환경성지표 개발에 필요한 방법론을 정립한다.
- ② 국내 산업에서 범용성이 높은 제품을 선정하여 LCA를 수행하며, 그 일환으로 전력을 평가한다.

본 연구에서 분석대상으로 삼은 원자력발전소는 후술할 두 연구와 달리 특정 발전소가 아니고 당시 국내에 가동되고 있던 4개부지의 원전들에서 수집된 자료를 경수로형(PWR: Pressurized Water Reactor)과 중수로형(PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor)로 구분하여 구하고 이들의 합을 발표하였다. 따라서, 본 연구에서 생산된 결과 값은 국내에 가동 중인 원전의 발전과 그에 따른 핵연료주기 단계에서 발생하는 환경영향을 평가하였기 때문에 국내원전의 평균치적 성격을 갖는다.

(2) LCA 수행 준비

본 연구는 당초 LCA 평가모형인 Eco-indicator 95와 EDIP를 분석해 국내 실정에 맞는 방법론의 개발과 이에 따른 환경성지표(Eco-Indicator) 도출을 추구하였다. 이를

위해 분석 범위는 발전과정을 원료물질의 채취 및 연료가공, 연료수송, 발전, 그리고 폐기 단계로 구분하였다. 이러한 분석범위 설정은 건물, 도로, 기기, 건설 등과 같이 자본적 투자인 설비와 장비 사용에 따른 온난화 영향은 수명기간으로 평균화할 경우 효과가 미미하기 때문에 통상의 LCA 방법에 포함하지 않는다는 관습에 근거하였다. 분석 기준이 되는 대상전력은 기준년도를 1998년으로 하여 발전기 끝을 기준으로 하는 총발전량에서 소내 소비량, 양수전력 사용량, 그리고 송·배전 손실량을 제하고 소비자 입장에서 '사용가능 전력량(Usable Electricity)' 1kWh를 기준으로 평가하였다.

(3) LCI와 LCA 수행

본 연구는 설정된 분석 기준설정에 이어 각 단위공정별 데이터 수집은 현장, 문헌자료, 선행연구 조사를 병행하였다. 특히 연료의 가공까지의 단계는 외국 DB를, 그리고 발전단계는 한전 발표자료와 외국 산출자료를 동시에 활용해 작성하였다.

각 발전원에 대한 LCA 결과는 하나의 대표치로 발표하였다. 이를 위해 LCA는 에너지와 운송기술에 적용하기 용이한 LCAit 3.0을 사용하였고 지구온난화 영향을 비롯한 통상의 8대 영향범주에 대한 특성화 영향(CI: Characterization Impact)값을 구한 후 영향범주별 정규화와 가중화도 수행하였다.

- ① 특성화 영향값: 영향범주로 할당된 목록항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 등가치(equivalent value)를 사용해 정량화하는 과정으로, 이 과정에서 특성화 인자들은 공인 DB나 혹은 공신력 있는 DB를 사용
- ② 영향범주별 정규화(Normalization): 특정 영향범주에 미치는 대상제품의 기능단위 수행이 해당 영향범주의 환경영향 총량(일정 기간과 지역)에 미치는 영향을 알 수 있고, 따라서 영향범주별 각기 다른 단위로 평가된 결과를 모두 동일한 상대값으로 전환하기 때문에 영향범주간 상대비교도 가능해짐
- ③ 가중화(Weighting): 대상제품의 환경영향을 영향범주별로 독립적으로 평가된 결과치를 영향범주간 과학적, 사회적, 정치적 중요도를 반영하여 하나의 환경영향 값으로 weighted sum하는 단계

(4) LCA 수행 결과

본 연구에서는 원자력의 환경영향 값들을 <표 1>와 같이 도출하였다. 이 분석에서는 국내 가동 중인 원자로형인 중수로(월성 소재)형과 경수로(고리, 울진, 영광 소재)형의 발전단계에 대해 각각 기준년도인 1998년의 발전단계의 데이터를 수집한 후 LCA를 수행하였다. 각 분석의 단위는 CI 값은 각 영향범주별로 <표 1>와 같으며 정규화 영향(NI: Normalization Impact) 값은 연간 지구환경에 미치는 범주간 중요성을 평가하기 위한 것으로 이 연구에서는 개별 인체에 미치는 영향이 각 범주간 동일하다고 가정하고 계산하였다.

<표 1> 원자력발전소의 환경영향 지표 산출 결과 (kWh 당)

영향범주	CI	NI (CI/인구*yr)
자원고갈	1.54E-00 l/yr	4.14E-07
지구온난화	2.33E-01 g CO ₂ -eq	4.12E-08
오존층 파괴	1.55E-09 g CFC11-eq	1.88E-11
광화학산화물 생성	6.75E-03 g C ₂ H ₄ -eq	9.16E-07
산성화	2.84E-02 g SO ₂ -eq	5.04E-07
부영양화	3.13E-04 g PO ₄ ³⁻ -eq	3.51E-08
생태독성	4.53E-04 m ³ water-eq	1.09E-08
인체독성	3.98E-02 g body-eq	5.96E-07

3.2.2 K(2002) 연구[4]

(1) LCA 수행 개요

본 연구는 한국원자력연구소에서 2002년 발간한 “전수명 주기 평가를 통한 원전의 환경영향 분석” 연구이다. 이 연구는 국내 원전의 가동에 따른 글로벌 환경영향을 공정별로 상세 분석했을 뿐만 아니라 활동의 수행 장소에 따라 환경 영향지역을 구분해 분석한 연구이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 원전의 발전과정에 관련되어 국내에서 일어나는 활동의 기초 자료는 거의 국내 활동자료를 도출해 충당하였다.

본 연구는 국내 원전에 대한 LCA 수행이 국내에서 이루어지고 있는 활동에 대해서 까지도 외국의 데이터를 활용하는 현실에 비추어, 국내 현장 데이터를 발굴해 원자력 발전의 LCA 분석을 수행하는 것을 목적으로 하였다. 따라서 통상 선진국들의 발전기술 LCA는 지구온난화 혹은 CO₂ 발생량 평가와 같은 글로벌 영향에 중점을 두는 데 비해, 이 연구에서는 원자력발전의 환경영향에 지역영향도 포함하여 영향을 미치는 지역을 국내와 국외를 구분해 고려하였다.

LCA 분석대상 원전은 경수로발전소의 경우 국내 표준형원전의 선도원전인 울진(PWR) 3/4호기와 중수로발전소의 경우는 울진원전과 비슷한 시기에 가동되기 시작한 월성(PHWR) 2호기를 평가대상으로 하였다.

(2) LCA 수행 준비

본 연구는 국내 발전소에 대한 LCA 수행이 국내에서 이루어지고 있는 활동에 대해서도 기초자료의 조달 어려움으로 외국의 데이터를 원용할 수 밖에 없는 현실에 비추어, 국내 현장 데이터 생산에 노력하였다.

LCA 분석대상은 원자력발전소를 선정한 배경으로는 국내 표준형원전의 선도원전으로 기술의 대표성도 인정할 수 있고, 또 1990년대 후반에 가동되기 시작하여 신형기술이 접목되어 있으면서 아울러 분석에 적합한 숙성된 데이터를 생산하고 있다는 점을 들 수 있다. 유연탄과 LNG의 경우 각각 태안발전소(1995~7년 준공)와 인천기력 및 서인천(1992년 준공) 복합화력으로 하였다. 분석의 기준은 발전기에서 생산한 전력량

을 기준으로 1GWh를 기능단위화 하였다.

(3) LCI와 LCA 수행

본 연구는 평가를 위한 LCI 수행은 사용현상을 그대로 묘사하기 위해 가급적 현실에 맞는 자료를 발굴·활용하였다. 예를 들어 원자력의 경우 우라늄 정광 도입국의 다양성을 반영하였다. 실제로 국내 원전연료 도입은 우라늄의 안정적인 확보를 위해 캐나다, 미국, 호주, 영국 뿐 아니라 프랑스, 러시아, 남아공, 카자흐스탄 등 다원화되어 있다. 이를 반영하기 위해 비중이 큰 공급국들의 정광과 농축 관련 자료는 해당국들의 DB자료를, 수송자료는 그들로부터의 평균거리를, 핵연료의 국내 가공자료와 수송 그리고 원전에서의 발전 자료는 가급적 현장에서 수집하였다.

LCA의 수행은 GaBi 3.0를 활용하였고, 분석은 통상의 8개 영향범주에 대해 각기 독립적으로 CI와 NI 값들이 평가되었다. 정규화 인자는 CML 방법론의 World-1995를 사용하였다. 이 연구에서는 원전의 경우 타발전원과 달리 방사성 영향에 대한 분석능력이 요구된다는 점에서 방사능 영향을 추가하였다.

(4) LCA 수행 결과

본 연구에서는 분석대상으로 삼은 원자력발전소에 대해 2001년도의 현장 데이터를 조사해 이용하였다. <표 2>에 나타난 바와 같이 각 영향범주들에 대한 CI는 <표 2>와 단위가 약간씩 다르게 설정되었다. 특히 NI는 CML-2000 보고를 기준으로 하여 모든 영향범주에 대해 kg*/Year로 했기 때문에 영향범주간 동일한 척도인 연(year)으로 산출하였다.

방사능 영향으로 인해 위해도 평가에는 통상 국제원자력기구(IAEA)는 YOLL(Years Of Life Lost)을 사용하고 LCA 분야에서 DALY(Disability Adjusted Life Years)를 사용하고 있지만 두 단위 공히 방사능 영향에 따른 수명단축뿐만 아니라 장애로 인한 경제활동 중단까지 반영하고 있는 개념이다. 본 연구에서는 후자인 DALY를 사용해 평가하였다.

<표 2> 원자력발전의 LCA 수행 결과 (GWh 당)

영향범주	CI			NI (Year)	
	단 위	PWR	PHWR	PWR	PHWR
자원고갈	kg Sb-eq	1.77E+02	1.20E+02	1.13E-09	7.62E-10
지구온난화	kg CO2-eq	2.65E+04	1.72E+04	6.87E-10	4.45E-10
오존층 파괴	kg CFC11-eq	2.23E-04	3.84E-04	4.33E-13	7.46E-13
광화학산화물생성	kg C2H4-eq	5.53E+00	4.44E+00	1.22E-10	9.76E-11
산성화	kg SO2-eq	1.34E+02	8.87E+01	4.48E-10	2.97E-10
부영양화	kg PO43--eq	8.43E+00	5.59E+00	6.54E-11	4.33E-11
육생태계독성	kg DCB-eq	7.50E+01	3.02E+00	2.80E-10	1.13E-11
수생태계독성	kg DCB-eq	1.40E+03	3.38E+03	6.90E-10	1.66E-09
인체독성	kg DCB-eq	2.11E+02	3.09E+02	4.23E-12	6.20E-12
방사능	DALY	9.79E+03	2.14E+03	-	-

3.3.2 W(2003) 연구[5]

(1) LCA 수행 개요

마지막은 비교대상 연구 중 가장 최근인 2003년 발표된 연구이다. 이 연구는 모형수립을 다소 과도하게 단순화 하여, 운전단계는 연료사용량에 국한하였다는 측면이 있지만, 발전소의 건설과 해체 및 폐기처분 단계까지 포함한 국내의 대표적인 연구이다. 본 연구에서 분석대상으로 삼은 원전은 국내에 가동되고 있는 PWR만을 대상으로 하였다. PWR은 K(2002) 연구와 동일한 울진 3/4호기를 대상으로 하였다. 영향범주도 8대 기본요소에 더해 방사능 영향까지 포함하였으며, 다음과 같은 목표를 갖고 있다.

- ① 원전과 LNG 복합발전소를 대상으로 LCA를 통해 환경영향 비교를 수행하여
- ② 원전의 청정성 여부를 판단하고,
- ③ 이 결과를 바탕으로 기술적 홍보 방안을 제시하는 데 있다. 원전의 운영단계에 대한 LCI 분석범위는 발전에 드는 비상용 경유와 우라늄 연료사용을 고려하였고 발생폐기물의 중간저장도 포함하였다.

(2) LCA 수행 준비

본 연구는 발전원별 발전과정(운영단계)의 환경영향을 분석하기 위해 수명기간 동안의 연료사용량을 추정하여 이를 기준으로 분석하고, 이를 기능단위로 삼은 1kWh 기준으로 평균화하는 방법을 취했다.

(3) LCI와 LCA 수행

본 연구는 원전의 수명을 40년으로 보고 2002년 운영실적을 기준으로 핵연료 투입량을 추정하였고, 전력생산을 위해 사용된 핵연료와 중저준위 폐기물들을 전량 중간저장하는 것으로 취급하였다. LNG는 30년 수명기간 동안 투입될 연료량을 추정하고 이에 수반되는 LCI 분석을 수행하였다.

LCA의 수행은 3가지 방법으로 수행하였다. 첫째는 CO₂ 배출량 평가, 둘째는 8대 영향범주평가, 셋째는 방사능 영향을 포함한 위해를 기준(Damage based)으로 한 평가로 구분하였다. 이를 위해 사용된 방법은 네덜란드의 PRe Consultants B.V.에서 개발한 Eco Indicator 99를 활용하였다.

(4) LCA 수행 결과

W(2003)의 연구 결과는 <표 3>과 같다. 이 연구에서는 영향범주별로 해당 물질별 상응인자 상수치들을 소개하고는 있으나 아쉽게도 특성화 결과인 CI는 수록하지 않았다. 이 외에도 인체영향을 미치는 방사능 범주도 건설, 운영, 해체 단계에서 각각 5.27E-06, 1.47E-06, 1.27E-08 Pt/kWh 발생하는 것으로 도출하였다.

<표 3> 원전의 LCA 환경영향 평가 결과 (kWh 당)

영향범주	NI (person · year)			
	건설	운영	해체	종합
자원고갈	2.85E-08	9.36E-09	3.03E-09	4.09E-08
지구온난화	1.51E-08	2.39E-08	3.24E-09	4.22E-08
오존층 파괴	1.21E-11	6.26E-08	2.17E-10	6.28E-08
광화학산화물 생성	2.92E-11	1.59E-10	4.40E-11	2.32E-10
산성화	1.16E-09	5.38E-09	7.95E-10	7.34E-09
부영양화	7.50E-13	7.69E-10	1.16E-11	7.81E-10
생태독성	2.86E-08	1.27E-07	1.11E-08	1.67E-07
인체독성	6.92E-06	7.62E-09	1.31E-09	6.93E-06

4. 평가 사례간 비교

4.1 사용 모형 비교

비교된 3가지 연구 사례들이 LCA 수행에 사용한 모형은 <표 4>와 같다. 사용 모형의 비교는 사례들 간 평가결과의 차이가 사용한 평가모형이나 DB에서 기인했는가를 알기 위해 작성되었다. 각 연구들에서 사용된 전산모형에 따라 사례별 영향범주의 중요성이 달리 나타날 수는 있다. 그러나 본 연구에서 대상으로 여긴 사례별 평가의 차이가 큰 것이 사용 모형에 왔다고 보기 어려운 이유는, 세계적으로 에너지 분야의 분석에 가장 많이 사용되고 있는 모형이기도 하지만, 이 보다 목록분석용 DB(Inventory DB)나 영향평가용 DB를 비롯 일부이기는 하지만 <표 4>에서 보이는 바와 같이 서로 공유해 사용하고 있기 때문이다. 더욱이 분석간 시차가 5년 미만이고 우리나라라는 지역적 공통성으로 거의 동일한 발전소들을 대상으로 하였기 때문에, 분석모형에 따른 결과의 차이가 크지는 않은 것으로 보인다.

<표 4> 연구별 LCA 수행을 위해 사용된 모형

사 례	사용모형	주 활용 분야	데이터베이스	
			목록분석	영향평가
A(1999)	LCAiT3.0	플라스틱, 화학, 펄프, 폐기물관리 및 재활용, 에너지, 운송	SPINE, Boustead/PWMI, 플라스틱, BUWAL, IDEA	EPS, SU 스웨덴 99, EDIP, Eco-Indicator, ET, ECO 등
K(2002)	GaBi 3.0	금속 유기화합물, 광물, 에너지, 폐기물	IKP와 PE유럽, Boustead/APME	CML, Eco-Indicator
W(2003)	Team과 SimaPro 등	펄프, 금속, 유리, 석유/무기화학, 에너지, 운송, 폐기물관리	ETH-ESU, BUWAL, 화란 콘크리트, DEAM 등	CML, Eco-Indicator, EPS, Ecopoints 등

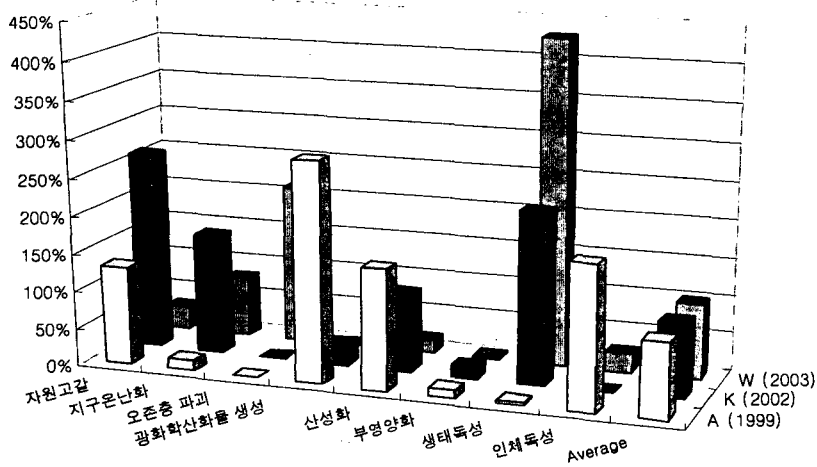
4.2 8대 영향범주 상대평가 성향 비교

본 절 비교평가의 이해를 돕기 위해 각 연구들의 수행과정을 간단히 기술하면 다음과 같다. 가장 먼저 각 연구들이 수행과정은

- ① 영향범주의 선정: 환경영향 평가를 분석의 관심사항으로 집중하기 위해 평가요소(지구온난화, 산성화, 부영양화, 인체독성 등)를 설정하고,
- ② CI 값 산출: 설정된 영향범주별로 환경영향 물질들(지구온난화의 탄산가스와 메탄 등)의 배출량을 대표물질의 등가(CO2 등가)절대량 기준으로 산출,
- ③ NI 값 환산: 영향범주별로 독립적으로 평가된 CI 값들을 영향범주간 상대 크기로 평가하기 위해 환산하는 단계로 평가되었다.

본 연구에서는 연구들간 절대량 평가의 차이보다도 먼저, NI 값을 기준으로 원자력발전이 어느 환경범주에 가장 많은 영향을 미치는 가에 대한 평가추이를 비교하였다. 연구간 비교를 위해 영향범주는 <그림 2>의 X축에 나타난 바와 같이 8종류로 하였다.

각 분석 사례별로 그들의 평가 내부에서 환경영향 범주별 상대적 중요성 평가결과에서도 각 평가는 확연한 차이를 보이고 있다. 예를 들어 <그림 2>에서 보이는 바와 같이, A(1999) 연구의 경우 원자력발전은 광화학산화물 생성, 산성화 순으로 환경영향이 큰 것으로 평가하였으나, K(2002) 연구에서는 자원고갈, 생태독성, 지구온난화 순인 것으로 나타났고, 마지막으로 W(2003)의 연구에서는 생태독성, 오존층파괴, 지구온난화 순인 것으로 평가하고 있다.



<그림 2> 연구사례별 영향범주별 평가추이 비교

즉 비교된 3 사례들은 원자력발전에 따른 환경영향이 어느 범주에 더 영향을 미쳤는가를 평가하는 추이에서 서로 다른 양상을 보이고 있다. 각 사례들의 평가양상을 사례간 쌍대(Pairwise) 비교하면 <표 5>과 같다. 즉 정량화된 기준을 정하지는 않았으나 A(1999)와 W(2003) 연구의 쌍대 비교에서 보면 부영양화 범주만이 유사하게 평가되었고 이외의 다른 범주에 대한 평가는 큰 평가차이를 보이고 있다.

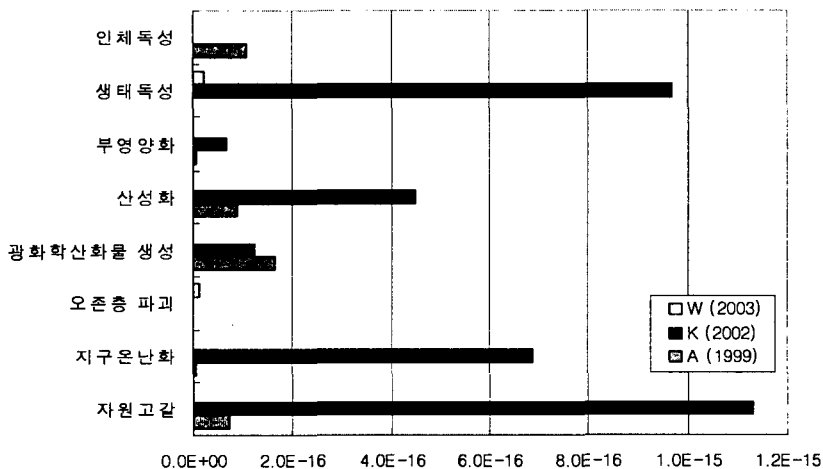
<표 5> 비교대상 연구별 영향범주 유사평가 추이 쌍대 비교

	W(2003)	K(2002)
A(1999)	부영양화	자원고갈, 오존층 파괴, 산성화, 부영양화
K(2002)	지구온난화, 광화학산화물생성, 생태계독성	

4.3 8대 영향범주 절대평가 값 비교

각 분석들의 평가추이를 종합하면 K(2002)의 연구는 많은 영향범주들에서 비교적 높은 환경영향 값들을 기록한 데 비해, W(2003)의 연구는 오존층 파괴와 생태독성을 제외하고는 대부분의 범주에서 가장 낮은 평가 값을 기록하고 있다.

구체적으로 각 연구들의 절대치 평가 추이를 비교하기 위해 동일한 잣대로 통일하면 <그림 3>에서 보이는 바와 같다. 비교된 연구들 간에는 동일 범주에 대해서도 105 정도의 평가 차이를 보이고 있어 사례 간 차이가 많은 것으로 나타났다.



<그림 3> 연구별 평가 결과 비교(NI 기준, year/kWh)

이와 같이 K(2002)의 분석 결과가 5개 영향범주에서 가장 큰 NI값을 기록하는 성향은 <표 6>과 같이 환경영향을 미치는 지역이 국내인가 혹은 국외인가에 영향을 받는 것으로 보인다. 이 표에 나타난 바와 같이 환경영향 정도를 지역으로 구분해 평가한 K(2002)의 연구에 따르면, 관련활동이 국내에서 발생해 국내 환경영향을 미치는 비율이 높은 경우 거의 예외 없이 K(2002)의 환경영향 평가가 가장 높게 평가하는 경향을 볼 수 있다. 즉, 많은 영향범주의 경우에서 국내 환경영향 비중이 높기 때문에 국내활동에 대해서는 가급적 국내 데이터의 발굴·사용이 필수적이고, 이를 등한히 할 경우 과소평가된 결과를 초래할 수 있다.

<표 6> 국내영향 비중별 영향평가 성향 (K(2002)의 경우, %)

영향범주	국내	국외	K(2002) 평가성향
지구온난화	98	2	1
산성화	97	3	1
부영양화	97	3	1
자원고갈	96	4	1
광화학산화물 생성	86	14	2
인체독성	40	60	2
오존층 파괴	13	87	2
생태독성	0	100	1

주) 평가성향 란의 숫자는 소개된 3가지 사례에서 배출량의 크기 순위를 나타냄

4.4 지구온난화가스 배출 평가 비교

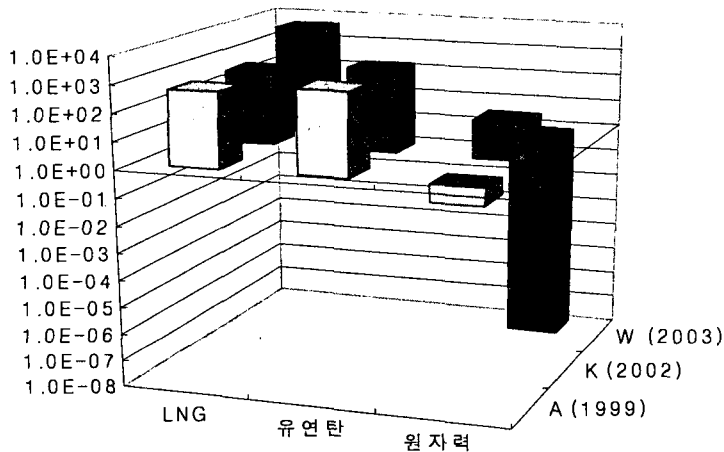
지금까지 다양한 영향범주에 대한 원자력발전의 환경영향 비교에서, 이제는 우리나라 대표 발전원인 유연탄 발전소와 LNG 발전소로 범위를 넓혀, 이들 발전원들에서 배출하는 GHGs 평가결과를 비교하기로 한다. 여기서 발전단계만 비교하는 것은 선진국들의 연구를 통해 보더라도 원자력, 유연탄, LNG 발전소의 발전과정(발전소에서 일어나는 활동과 이를 위한 연료의 전과정 포함)에서 야기되는 지구온난화 영향이 90~99%에 이르는 것으로 평가되고 있어 본 연구의 전과정 비교 취지에 부합하는 것으로 보았다. 이상에 소개한 세 연구들에서 추정된 발전소별 GHGs 배출 특성치 평가결과를 정리하면 <그림 4>와 같다.

<그림 4>에서 W(2003)에서는 화력발전소의 대표치로 LNG복합발전소를 택했기 때문에 유연탄에 대한 평가는 이루어지지 않아 평가치가 생략되었다. 평가성향을 보면 LNG 복합과 유연탄 발전소의 평가에서는 A(1999)와 K(2002)의 연구가 유사한 평가결

과를 보였으나, LNG 발전소에 대한 W(2003)의 연구는 타 연구에 비해 거의 10배에 가까운 차이를 보이고 있다. 이러한 평가의 차이는 원자력발전소를 대상으로 할 경우 더욱 커져서, 원전의 경우는 중간수준의 평가결과를 보인 A(1999) 연구를 기준으로 K(2002)와 W(2003)는 각각 102 상향과 107배 하향평가를 보이고 있다.

이러한 차이는 세계적으로 기후변화협약에 따라 GHGs 감축의무를 강화하는 추세속에서, 국내 전력생산의 40% 이상을 담당하고 있는 발전원에 대한 평가에서 기록했다는 점에서 평가간의 차이가 비정상적으로 크게 나타났다.

이를 국내 연구와 유사한 형태로 수행된 국외의 연구와 정리·비교하면 <표 7>과 같다. 여기에 나타난 값들은 발전원별로 GHGs 배출 특성을 CO₂ 등가치로 환산한 결과이다.



<그림 4> 비교대상 연구별 GHGs 특성치 평가 결과 비교(g CO₂-eq./kWh)

<표 7>에서 보이는 바와 같이 국내의 A(1999) 연구는 원자력의 경우는 하한을 벗어난 수준이지만 K(2002) 연구와 함께 거의 외국 평가치들의 범주에 드는 결과를 보이고 있다. 그러나 W(2003) 연구는 외국의 사례에 비해서도 LNG 발전소의 경우 8배 이상 높은 추정을 그리고 원자력 발전소에 대한 평가에서는 107 수준의 낮은 평가 성향을 보이고 있다. 여기에서 소개된 연구들 중 공식적인 연구로는 CRIEPI(2000)가 Uchiyama(1992)를 기반으로 하여 수행된 연구로 일본의 전력 LCA 평가 시 기준이 되는 연구로 일본 Type-III 인증인 Eco-Leaf 신청시 전력사들이 인용하는 평가이다. 마찬가지로 Sweden(2002)도 스웨덴의 최대전력사인 Vattenfall사가 가동중인 Ringhals AB 발전소의 EDP 인증 보고서를 참조하였다.

<표 7> 외국의 발전원별 GHGs 배출 평가 결과 비교 (g CO₂-eq./kWh)

	원자력	유연탄	LNG
San Martin(1989)	7.8	964.0	484.0
Frische(1989)	54.0	929.0	542.0
Science Conc(1990)	25.0	960.0	538.0
Uchiyama(1992)	27.0	1,008.0	660.0
Yasukawa(1992)	33.0	1,001.0	660.0
Lewin(1993)	28.0	1,244.0	453.0
CRIEPI(2000)	33.2	971.6	516.1
Sweden(2002)	2.8	N.A.	440.0
WEC(2004)	3.0~40.0	130.0~1,085.0	245.0~499.0
A (1999)	0.2	1,010.0	514.0
K (2002)	26.5	1,090.0	523.0
W (2003)	1.7E-6	N.A.	4,990.0

4.5 연구간 차이발생 원인 분석

원자력발전소에 대한 8개 환경영향범주간 중요도 평가추이와 평가값 그리고 국내 주요 발전원들에 대한 GHGs 배출 CI값 평가에서 비교한 바와 같이 각 사례별 평가 경향은 K(2002)의 연구와 같이 원자력발전소에 필요한 국내 현장 데이터를 많이 발굴할 수록 환경영향의 크기가 커지는 것으로 나타났다.

즉, K (2002)의 연구에 비해 다른 두 연구의 추정치가 때로는 약간 적게, 때로는 매우 적게 나타난 것도 국내의 원자력발전소에서 일어나는 발전단계 데이터를 충분히 반영하지 못하고 핵연료 연간 소요의 종속변수라고 보고 일괄 대체하여 분석한 데 원인이 있는 것으로 보인다. 실제 K(2002)의 연구에 따르면 원자력발전소의 환경영향은 정기정비 시 사용되는 외부전력과 비상발전기 정기 시험에 소요되는 연료 등의 환경 부담이 매우 큰 것으로 분석되고 있다.

예를 들어 자원고갈과 지구온난화의 경우 발전단계(완성 핵연료의 이송에서 원자력 발전소 울타리 안에서 이루어지는 제반 활동)의 환경영향이 가공단계(국외에서 농축된 우라늄을 해외에서 운송하는 단계에서부터 핵연료를 가공해 완제품을 원자력발전소에 보내기 위해 출고하기까지의 제반 활동)와 이전단계(우라늄 원료를 광상에서 채광하여 농축우라늄을 제조하기까지의 제반 활동)의 합에 비해 각각 22배와 47배나 높은 것으로 분석되고 있다. 이에 비해 K(2002)에 따르면 오존층 파괴와 인체독성 범주의 경우 외국에서 일어나는 이전단계인 우라늄 채광에서 농축단계의 영향이 90% 이상이라는 점에서 다른 두 연구에서 사용한 일괄대체 방식과 비교적 크지 않은 차이를 보였다.

5. 결론 및 시사점

각 연구 사례간 평가결과의 차이는 각 사례들의 환경영향 범주별 상대적 중요성 평가 양상이 다르다는 것과 비교 연구들 간 절대 평가치의 차이가 매우 크다는 점에서 나타났다. 물론 동일한 목적을 갖고 수행한 LCA일지라도 평가에 사용된 모형, 방법론, 분석대상물, 물질흐름분석(MFA: Material Flow Analysis)에 기울인 노력, 선택한 LCI DB나 Indicator 등 여러 요인들에 따라 각기 다르게 나타날 수 있다.

본 연구에서 인용한 연구들의 보고서에 수록된 내용을 기준으로 판단하면, 차이의 발생원인은 입력 자료의 작성을 위한 MFA에 기인한 것으로 보인다. 특히 K(2002)의 연구에 따르면 원자력발전소의 환경영향은 원전의 정기예방정비와 같은 발전 정지시 외부전력의 사용에 따른 영향이 가장 큰 요인으로 분석되었는데 다른 연구들은 이를 반영하지 않았다.

그러나 본 연구에서 비교한 바와 같이 거의 동일한 시대에 같은 기술을 대상으로 수행한 LCA 연구들이 통상의 평가들에서 발생할 수 있는 차이수준을 넘는다면, 이는 분석결과의 유효성에 혼돈을 불러올 수 있다. 특히 전력기술과 같이 타산업의 필수소재로 사용되는 전방연쇄 효과가 큰 산업일수록 분석 결과의 신뢰성과 재현성 확보는 더욱 중요하다.

이 연구를 통해 어느 결과가 더 잘 평가되었다고 단언하기는 쉽지 않다. 다만 MFA 분석시 국내실정에 맞는 데이터의 발굴에 노력하고 또한 동일한 기술을 평가한 외국의 사례들을 벤치마킹하여 기초자료를 보완한다면, 추정치간 분산이 좁혀진 일관성 있는 결과들을 가질 수 있을 뿐 아니라 우리나라 LCA의 분석능력 향상도 기대할 수 있다.

세계적으로 강화되고 있는 환경규범에 비추어, 이에 대비한 환경영향 분석능력을 배양하기 위해서는 향후 국가 DB 작성 시 해당분야의 LCA 전문가들과 협업을 통해 우리 고유의 데이터 축적이 이루어져야 한다. 동시에 현재 완성된 국가 LCI-DB도 해당분야의 공정개선과 기술발전을 반영해 주기적으로 개선해야겠다. 또한, LCA의 중요성은 지속가능성세계정상회의(WSSD: World Summit on Sustainable Development) 요하네스버그 회의에서 발표된 이행계획(Plan of Implementation) 선언에 수록되었듯이 제품의 환경성 분석에서 더욱 높아질 것이다.

6. 참고문헌

- [1] 산업자원부, 「제2차 전력수급기본계획」, 2004. 12. 30.
- [2] 산자부/에너지경제연구원, 「에너지통계연보」, 2004.
- [3] 이건모, 「환경영향평가 지수 개발 I (Eco-Indicator)」, 1999.
- [4] 정환삼 외, 「전수명주기평가를 통한 원전의 환경영향 분석 모형 구축」, 한국원자력연구소, 2002.

- [5] 황용우 외, 「LCA 기법을 이용한 원자력에너지의 청정성 평가 및 기술적 홍보제고 방안」, 과학기술부, 2003.11.
- [6] IAEA, Comparison of energy sources in term of their full-energy chain emission factors of greenhouse gases, 1996. 7.
- [7] Kun-Mo Lee, Sang-Young Lee and Tak Hur, "Life cycle inventory analysis for electricity in Korea", Energy 29(2004) 87-101, 87~101.
- [8] CRIEPI, 라이프사이클CO₂排出量による發電技術の評價, 研究報告(Y99009), 2000.DOE/EIA-0484, International Energy Outlook, 2004. 4.
- [9] Frische, U., L. Rausch and K.-H. Simon, Umweltwirkungsanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme(GEMIS), Oeko-Institut, Darmstadt, Germany, 1989.
- [10] IEA, Energy Policies of IEA Countries : 2003 Review, 2003.
- [11] Kae Takase(Governance Design Lab.) & Tatsujiro Suzuki(CRIEPI), "Japan Updates, and draft EAEF Scenarios", EAEF Workshop, Beijing China, May. 12-14, 2004.
- [12] LEWIN, B., "CO₂-Emission von Kraftwerken unter Berücksichtigung der vor-und nachgelagerten Energieketten". VDI Berichte Nr. 1093, Düsseldorf, Germany 1993.
- [13] SAN MARTIN, R.L., "Environmental Emissions from Energy Technology System: The Total Fuel Cycle", U.S .DOE, Washington, D.C., USA, 1989.
- [14] Science Concept, Inc., Reducing Airborne Emissions WITH nuclear Electricity. Report for US Council for Energy Awareness, 1990.
- [15] Vattenfall, Vattenfall Generation's Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Ringhals AB (S-P-00026), 2002.2.
- [16] WEC, Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment, 2004. 7.

저 자 소 개

지 철 구 : 한국원자력연구소 핵연료가공랩 재직, 관심분야는 원자력 시설안전, 품질경영 및 환경영향 평가

정 환 삼 : 한국원자력연구소 정책연구부 재직, 관심분야는 원자력 기술예측, 에너지 정책, 에너지 및 환경영향 평가

저 자 주 소

지 철 구 : 대전광역시 유성구 덕진동 150번지 문서함 226호

정 환 삼 : 대전광역시 유성구 덕진동 150번지 문서함 105호