

## LCA를 통한 국내 원전의 환경영향 평가 수행사례 비교

정 환삼, 김 성호, 하 재주, 김 태운  
한국원자력연구소

### A Comparative Study on the Environmental Impacts Potential Estimations from Korean Nuclear Power Generation Using LCA

Whan-Sam Chung, Seong H. Kim, Jae-Joo Ha, Tae-Woon Kim  
Korea Atomic Energy Research Institute

#### 요 약

본 연구에서는 환경경영의 중요한 수단으로 대두되고 있는 전과정분석(Life Cycle Analysis; LCA)을 통해 원자력 발전기술을 평가한 주요 사례의 분석과정과 결과들을 비교하였다. 이는 선진국들이나 글로벌 선진기업들에서 채택하기 시작한 글로벌 환경친화성의 입증 요구 추세 속에서, 모든 재화의 생산에 전력은 필수 투입물이라는 점에서 그 중요성을 감안하여 수행되었다. 본 연구에서는 국내 전력의 40% 이상 공급을 담당하고 있는 원자력발전 기술을 중심으로 비교하였다. 우리나라의 대표적인 연구들 간 비교 결과 그 값의 차이는 최대  $10^5$  정도에 이르러, 이는 외국의 경우  $10^1$  수준의 차이를 보이는 데 비해 다소 많은 것으로 조사되었다. 이러한 차이는 사례에 따라 모형의 단순화 정도에 기인한 것으로 판단되며, 이는 전력의 타산업 기반성이나 국내 전력LCA 분석능력의 함양이 중요하다는 점에 비추어 시급히 개선되어야 할 것이라 제안한다.

#### 1. 전력기술과 전과정분석

러시아의 비준으로 2005년 상반기 교토의정서 발효가 예상되는 가운데 국내에서도 2005년부터 시작될 2차 공약기간(2013~2017년) 협상에서 제시할 우리나라의 의무부담 방안이 검토되기 시작하는 등 우리나라도 기후변화협약 의무국으로의 편입이 피하기 어려워지고 있다.

이와 같이 전과정분석(Life Cycle Analysis; LCA)을 통한 전력의 글로벌 환경영향 분석은 매우 유용한 결과를 얻을 수 있다. 이는 내부적으로는 지구온난화, 산성화, 그리고 오존층 파괴 문제와 같은 분야에 있어 글로벌 환경규제가 점차 심해지는 국제사회의 새로운 패러다임 정착에 대비할 수 있는 역량을 제공할 뿐 아니라, 외부적으로는 소의 Green Round나 Green Procurement라는 형태로 교역에서 환경규제를 만족시켜야 하는 여타 산업의 생산요소로 전력이 빠지지 않는다는 점에서 전력발전 기술의 LCA 적용능력 배양은 더욱 중요하다.

이 점에서 본 연구에서는 국내에서 원자력 발전기술을 대상으로 LCA를 통한 환경영향 분석 사례들 중 대표성과 비교가능성을 기준으로 비교 사례들을 일정한 비교기준에 맞추어 비교하도록

한다.

## II. 비교를 위한 연구사례의 선정기준과 리뷰

### 가. 연구의 비교를 위한 선정 기준

비교연구에 있어 중요한 점은 비교 대상 사례들의 선정기준이 객관적 합리성을 갖고 있어야 된다는 것이다. 본 연구에서는 다음과 같은 세 가지 비교기준을 수립하고, 이를 기준으로 비교대상이 되는 연구를 도출하였다.

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

이러한 기준을 요약하면 우선 연구목적으로는 개인의 사적 욕구에 따른 분석 보다는 공익적 필요성에 의해 출연된 연구비에 의해 공식적으로 수행된 연구로 국한하였다. 다음으로 분석대상 기술은 1978년 고리원전을 필두로 대두되기 시작하여 2004년 9월 현재 19기가 가동되어 국내 전력공급의 40% 이상을 담당하고 있는 원전을 포함한 연구로 제한하였다. 마지막으로 분석활동에서는 LCA를 통한 글로벌 환경성 평가를 수행한 연구중 비교에 충분한 영향범주를 갖고 있는 연구들을 대상으로 하였다.

이를 종합하여 적용하면 비교대상인 LCA 분석사례는 다음과 같은 이건모(1999)연구, KAERI(2002)연구 그리고 황용우(2003)연구의 세 가지 연구로 압축되었다.

### 나. 비교대상 연구 소개

#### 1) 이건모(1999) 연구

##### 가) LCA 수행 개요

가장 먼저 아주대학교에 의해 1999년 '환경영향평가 지수 개발(Eco-Indicator) I'로 발표<sup>1)</sup>되었던 연구를 들 수 있다. 이 연구는 당시 산업자원부가 수행하고 있던 산업분야의 국가 LCA 기반 구축사업의 일환으로 수행되었으며, 비록 현장데이터 보다는 데이터 대표치를 사용하는 등 부족한 점에도 불구하고 국내 전력기술의 환경성을 평가한 대표적인 연구이고 현재 환경부의 분석 결과와 함께 국가 LCA의 근간을 이루고 있다.

이 연구에서 분석대상으로 삼은 원자력발전소는 개별발전소들이 아니고 당시 국내에 가동되고 있던 4개부지<sup>2)</sup>의 원전들에서 수집된 자료를 輕水로형(PWR; Pressurized Water Reactor)과 重

1) 이 연구에서는 원전뿐만 아니라 유무연탄, 석유, 가스에 대해서도 LCA를 수행하였으나, 본 고에서는 이 중 원자력부 분만을 언급하기로 함.

2) 국내의 원자력발전소는 고리, 월성, 영광 그리고 울진지역에 입지하고 있음.

수로형(PHWR; Pressurized Heavy Water Reactor)로 구분하여 구하고 이들의 합을 발표하였다. 따라서 이 연구에서 생산된 결과치는 국내에 가동 중인 원전의 발전과 그에 따른 핵연료주기 단계에서 야기되는 환경영향을 평가하였기 때문에 국내원전의 평균치적 성격을 갖는다.

나) LCA 수행 결과

이건모(1999)의 연구에서는 원자력의 환경영향 값들을 <표-1>과 같이 도출하였다. 이 분석에서는 국내 가동 중인 원자로형인 중수로(월성 소재)형과 경수로(고리, 울진, 영광 소재)형의 발전 단계에 대해 각각 기준년도인 1998년의 발전단계의 데이터를 수집한 후 LCA를 수행하였다. 각 분석의 단위는 특성화 영향(CI; Characterization Impact)은 각 영향범주별로 <표-1>과 같으며 정규화 영향(NI; Normalization Impact)은 연간 지구환경에 미치는 범주간 중요성을 평가하기 위한 것으로 이 연구에서는 개별 인체에 미치는 영향이 각 범주간 동일하다고 가정하고 계산하였다.

<표-1> 원자력발전소의 Eco-indicator 산출 결과 (kWh 당)

영향범주	CI	NI (CI/인구*yr)
자원고갈	1.54E-00 1/yr	4.14E-07
지구온난화	2.33E-01 g CO <sub>2</sub> -eq	4.12E-08
오존층 파괴	1.55E-09 g CFC11-eq	1.88E-11
광화학산화물 생성	6.75E-03 g C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	9.16E-07
산성화	2.84E-02 g SO <sub>2</sub> -eq	5.04E-07
부영양화	3.13E-04 g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq	3.51E-08
생태독성	4.53E-04 m <sup>3</sup> water-eq	1.09E-08
인체독성	3.98E-02 g body-eq	5.96E-07

2) KAERI(2002) 연구

가) LCA 수행 개요

다음의 연구는 한국원자력연구소에서 2002년 발간한 '전수명주기평가를 통한 원전의 환경영향 분석' 연구이다. 이 연구는 국내 원전의 가동에 따른 글로벌 환경영향을 공정별로 상세 분석했을 뿐만 아니라 활동의 수행 장소에 따라 환경 영향지역이 어디에서 일어나는 가도 분석한 대표적 연구이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 원전의 발전과정에 관련되어 국내에서 일어나는 활동의 기초 자료는 거의 국내 활동자료를 도출해 충당하였다.

이 연구는 국내 원전에 대한 LCA 수행이 국내에서 이루어지고 있는 활동에 대해서도 외국의 데이터를 활용하는 현실에 비추어, 국내 현장의 데이터를 이용해 원자력 발전의 LCA 분석을 목적으로 하였다. 따라서 통상 교토협약의 의무당사국들인 선진국들의 발전기술 LCA는 지구온난화 혹은 CO<sub>2</sub> 발생량 평가에 중점을 두는 데 비해, 이 연구에서는 원자력발전의 환경영향에 지역영향도 포함하여 영향을 미치는 지역을 국내와 국외를 구분해 고려하였다.

LCA 분석대상으로 삼은 원전은 경수로 원전으로는 국내 표준형원전의 선도원전인 울진(PWR) 3/4호기와 중수로로는 비슷한 시기에 가동된 월성(PHWR) 2호기를 분석대상으로 하였다.

#### 나) LCA 수행 결과

KAERI(2002)의 연구에서는 분석대상으로 한 원자력발전소에 대해 2001년도의 현장 데이터를 조사해 이용하였다. <표-2>에 나타난 바와 같이 각 영향범주들에 대한 CI는 <표-1>과 단위가 약간씩 다르게 설정되었다. 특히 NI는 CML-2000 보고를 기준으로 하여 모든 영향범주에 대해 kg\*/Year로 한 관계로 영향범주간 동일한 척도인 연수(year)로 산출하였다.

<표-2> 원자력발전의 LCA 수행 결과 (per GWh)

영향범주	단 위	CI		NI (Year)	
		PWR	PHWR	PWR	PHWR
자원고갈	kg Sb-eq	1.77E+02	1.20E+02	1.13E-09	7.62E-10
지구온난화	kg CO <sub>2</sub> -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 C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq	5.53E+00	4.44E+00	1.22E-10	9.76E-11
산성화	kg SO <sub>2</sub> -eq	1.34E+02	8.87E+01	4.48E-10	2.97E-10
부영양화	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -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	—	—

DALY : 방사능 영향에 따른 위해도 평가에는 통상 국제원자력기구(IAEA)를 중심으로 YOLL(Years Of Life Lost)나 혹은 LCA 분야에서는 DALY(Disability Adjusted Life Years)를 사용하나, 두 단위 공히 방사능 영향에 따른 수명단축 뿐 아니라 장애로 인한 경제활동 중단까지 반영하고 있는 개념임. 본 연구에서는 후자인 DALY를 사용해 평가하기로 함.

### 3) 황용우(2003) 연구

#### 가) LCA 수행 개요

마지막은 2003년 인하대학교에 의해 발표되었던 'LCA 기법을 이용한 원자력에너지의 청정성 평가 및 기술적 홍보제고 방안 연구3)이다. 이 연구는 비록 많은 가정을 도입하였고, 운전단계는 연료사용량에 국한하고 그에 따른 환경영향을 추정하였다는 측면이 있기는 하나 발전소 유형에 따라 건설과 해체 및 폐기처분 단계까지 포함한 대표적인 연구이다.

이 연구에서 분석대상으로 삼은 원전은 국내에 가동되고 있는 두 가지 노형에서 PHWR은 빼고 PWR만을 대상으로 하였다. PWR은 KAERI(2002) 연구와 동일한 울진 3/4호기를 대상으로 하였다. 영향범주도 8대 기본요소에 더해 방사능 영향까지 포함하였다.

3) 이 연구에서 대상으로 삼은 기술은 원전 외에도 가스발전이 있으나, 본 연구의 목적에 따라 원전의 발전과정부분을 중심으로 기술함.

원전의 운영단계에 대한 LCI 분석범위는 발전과 이에 따른 핵연료주기와 발생폐기물의 중간저장을 포함하였다. 이를 위해 필요한 자료는 비상용 경유와 우라늄 연료사용에 국한하였다.

나) LCA 수행 결과

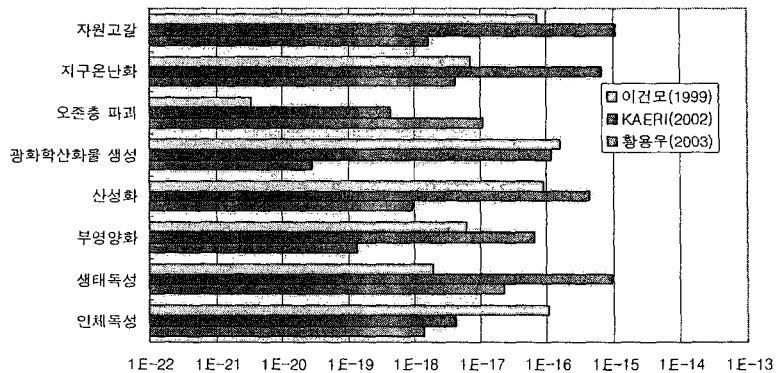
황용우(2003)의 연구 결과는 <표-3>과 같다. 이 연구에서는 영향범주별로 해당 물질별 상응인자 상수치들을 소개하고는 있으나 아쉽게도 특성화 결과인 CI는 수록하지 않았다. 이 외에도 인체영향을 미치는 방사능 범주도 건설, 운영, 해체 단계에서 각각 5.27E-06, 1.47E-06, 1.27E-08 Pt/kWh 발생하는 것으로 도출하였다.

<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

III. 연구 결과의 비교

이상에 소개된 세 가지 연구들을 동일한 단위로 환산하여 비교하면 <그림-1>과 같다.



<그림-1> 비교대상 연구별 NI 평가 결과 비교(year/kWh)

<그림-1>에서 보이는 바와 같이 평가성향은 KAERI(2002)의 연구가 많은 영향범주들에서 비교적 높은 NI 값들을 기록한 데 비해 황용우(2003)의 연구는 오존층 파괴와 생태독성을 제외하고는 대부분의 범주에서 가장 낮은 평가를 기록하고 있다. 비교된 연구들 간에는 동일 범주에 대해서도 10<sup>5</sup> 정도의 평가 차이를 보이고 있다.

또 다른 측면에서 각 연구별 영향범주간 평가 성향을 비교하면, 각 분석사례별로 그들의 평가 내부에서 환경영향 범주별 상대적 중요성 평가결과에서도 각 평가는 확연한 차이를 보이고 있다. 예를 들어 이진모(1999) 연구의 경우 원자력발전은 광화학산화물 생성, 인체독성, 산성화 순으로 환경영향을 많이 미치는 것으로 평가하였으나, KAERI(2002) 연구에서는 자원고갈, 생태독성, 지구온난화 순인 것으로 나타났고, 마지막으로 황용우(2003)의 연구에서는 생태독성, 오존층파괴, 지구온난화 순인 것으로 평가하고 있다.

#### IV. 결론 및 시사점

각 사례들 간 평가결과의 차이는 전 절에서 보인 바와 같이 사례간 결과의 절대량 차이와 개별 분석들의 영향범주별 평가형태의 상이함이 두드러진다. 물론 동일한 목적을 갖고 수행한 LCA일 지라도 평가에 사용된 모형, 방법론, 분석대상물, 물질흐름분석(Material Flow Analysis; MFA)에 기울인 노력, 선택한 LCI DB나 Indicator들에 따라 동일한 결과를 갖기 어려운 것은 당연하다.

그러나 본 연구의 비교에서 보이듯이 거의 동일한 시대와 지역의 기술을 대상으로 평가한 결과의 차이가 통상의 평가들에서 발생할 수 있는 인식의 범위<sup>4)</sup>를 넘는다면, 이는 분석 결과들의 신뢰성에 의문을 제기하지 않을 수 없다. 특히 전력기술과 같이 전방연쇄(forward linkage) 효과가 큰 산업일수록 분석 결과의 신뢰성 혹은 재현성 확보는 더욱 중요하다.

이 연구를 통해 어느 결과가 더욱 신빙성을 갖는다고 단언하기는 쉽지 않다. 다만 동일한 기술을 평가한 외국의 사례와 비교를 통해 평가 추이를 가늠한다면 보다 좋은 결과를 도출할 수 있을 것 같다.

본 연구에서 조사한 비교대상 연구의 보고서에 수록된 내용을 기준으로 판단하면, 각 사례의 입력자료 중 환경에 중요한 영향을 미치는 MFA의 차이에 기인한 것으로 보인다. 특히 KAERI(2002)의 연구에 따르면 원자력의 환경영향은 원전의 발전중단시 외부전력의 도입사용(受電)에 따른 영향이 가장 큰 요인으로 분석되었는데 다른 연구들은 이를 반영하지 않고 있었다.

아직까지 전력에 대한 LCA 분석 경험이 일천한 우리나라의 경우 분석 수행시 중요한 물질이 누락될 수는 있다. 그러나 발전을 기준으로 upstream에서 국내 일어나고 있는 활동에 대해서 까지 데이터 색출을 등한히 하고 무리하게 가정하고 단순화한다면 결과에 대한 국제적 신뢰는 물론이고, 우리 자신들의 분석능력 향상을 기대하기도 어렵다. 따라서 세계적으로 강화되고 있는 환

4) IAEA(1996)의 에너지원별 지구온난화가스 배출 추정 결과들을 정리한 proceeding에 따르면 1990년대 원자력에 대해 독립적으로 수행된 결과들 간 차이는 4.6E01 수준에 불과했음. 이도 각자 다른 나라에서 다른 설비를 기준으로 평가된 경우임.