2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

전과정분석을 통한 원전의 종합 환경성 평가

A study on the Environmental Impacts Analysis with Life Cycle Analysis of NPPs

정환삼, 문기환, 윤성원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이 논문에서는 원자력발전에 따른 환경성을 전과정평가(LCA; Life Cycle Assessment)를 이용해 정량적으로 종합 평가하였다. 분석 대상 기술은 우리 나라에서 가동되고 있는 원자로로 하였고, 환경영향 분야로는 자원사용의 영향, 지구차원과 설비주변의 환경영향, 그리고 원자력의 고유한 환경 특성치에 대한 평가를 수행하였다.

평가결과 원자력발전은 오존층 파괴와 육상 및 수상 생태계독성물의 배출은 국외의 가공전단계에서 많이 발생하였고, 인체독성물은 가공전과 발전단계의 영향수준이 비슷했으며, 그 외의 영향범주들은 발전단계의 영향이 더 큰 것으로 평가되었다.

ABSTRACT

This Life Cycle Analysis (LCA) work was accomplished based on the ISO-14040 framework goal and scope definition, including life cycle inventory analysis, and life cycle impact assessment. For the selection of impact categories, resource use, global affairs, local affairs, and nuclear specific affair were considered.

It was unexpected that environmental burdens are generally heavier in an electricity generation process than in upper stream and fabrication processes, except ODP and ETPs. It has been normally thought that environmental burden in upper steam would be heavier than those in other processes. This misconception could have originated from the ambiguous thought for end-of-pipe emissions and life cycle inventories.

1. 에너지, 전력 그리고 원자력의 사용과 환경영향 분석의 중요성

우리나라에서 배출하는 지구온난화가스에서 가장 큰 비중을 차지하는 CO_2 가스를 기준으로 보면 에너지부문에서 배출하는 CO_2 가스는 1997년을 기준으로 보면 11,692 만 TC (탄소톤)으로 우리나라 전체 CO_2 가스배출량의 86%로 거의 대부분을 차지하고 있고, 이 중 전력은 2,867 만 TC로 에너지 부문 배출량의 24% 이상을 차지하고 있기 때문이다.

전력이 전체 에너지에서 차지하는 비중을 같은 기간으로 보면 전체 소비량은 200,784 GWh로 이는 최종에너지 소비의 11.9%로 그 비중은 석유, 석탄에 이을 정도로 크다. 이 점에서 보면 전력부문의 CO_2 가스배출 비율이 상대적으로는 그리 높은 수준이 아니다. 그러나 1990년이래 국내 전력부문의 CO_2 가스배출 증가율을 기준으로는 약 16%의 연평균증가율을 보여 국내 총 CO_2 가스배출 증가율 약 9%를 훨씬 상회하고 있다는 점에서 발전기술의 환경영향 분석이 시급하다.

환경영향의 유형은 다르지만, 원자력의 개발 이용에도 마찬가지로 환경문제가 주요 이슈가 되고 있다. 하나는 반원자력의 입장에서 원자력의 안전성과 방사능과 방사성물질에 따른 환경오염뿐만 아니라 발전소 건설에 막대한 자재가 투입될 뿐 아니라 운전·유지 단계에서도 많은 환경영향을 주는 원료물질이 투입되어야 하는 만치 그 과정에 투입되는 원·부자재와 에너지에서 발생되는 환경오염이 실로 막대할 것이며, 따라서 원전의 이용은 즉시 중단해야 할 것이라는 주장이고, 다른 하나는 친원자력의 입장에서 원자력은 전력생산에 있어 환경오염물질의 배출을 극소화할 수 있는 현실적인 대안으로 현재로서는 불가피한 선택이라는 주장이다.

지금까지 원자력계의 환경영향 분석 노력은 원전의 운전단계에서 발생하는 환경오염물을 관리하는 노력에 중점을 두고 있었다. 그러나 이제는 반원자력계의 합리적인 주장을 받아들여 기존 원자력기술의 환경영향 정도를 객관적이고 과학적 지식을 바탕으로 분석·평가하고 환경영향을 미치는 영향의 감소방안의 도출에 활용할 능력을 구비할 필요가 있다. 또한 이러한 분석능력은 장래 도입을 목표로 개발되고 있는 프로젝트의 설계개발 방향 설정에서도 환경성 측면의 의사결정 기능을 담당할 수 있다. 이러한 능력을 갖추기 위해 유용한 기술이 유럽을 중심으로 널리 이용되고 있는 전과정평가(LCA: Life Cycle Analysis)[1]이다.

LCA 분석개념은 21세기 기술개발이 사회통합, 경제성장, 그리고 환경보호를 3대 축으로 하는 지속가능성이라는 새로운 패러다임에 따라 이루어져야 한다고 여기는 구미의 선

---

1) LCA는 우리말로 '수명주기분석' 혹은 '생애주기분석' 등 여러 가지 용어로 혼용되다가 '환경경영 관련 용어 통일안'에서 '전과정분석'으로 통일 사용하기로 하였으며, 본 연구에서도 이에 따르기로 함.

진국들과 IAEA를 비롯한 국제기구들은 환경영향을 평가하기 위해 기존의 배출단(end-of-pipe) 평가의 유효성을 극복하기 위해 도입되고 있다.

2. 수명주기평가 수행

가. LCA 수행 과정

본 고에서는 원자력발전의 환경영향 평가를 위해 적용할 수 있는 다양한 LCA법 중에서 프로세스분석[2]법을 활용하였고 특히 분석의 객관성과 연구의 용이한 진행을 위하여 ISO-14040 가이드라인을 따르도록 하였다.

여기에 따라 수행된 LCA 과정을 요약하면 <그림-1>에 나타난 바와 같이 물질흐름에 관한 정보수집을 하는 MFA(Material Flow Assessment) 단계에서부터 수집정보의 처리와 가공 단계를 거쳐 환경영향 분석 system을 구축하는 LCiA(Life Cycle Impact Assessment) 모형을 설정하고 이를 통해 종국에는 영향평가를 수행하는 과정을 거치게 된다.

<그림-1> LCA 수행과정

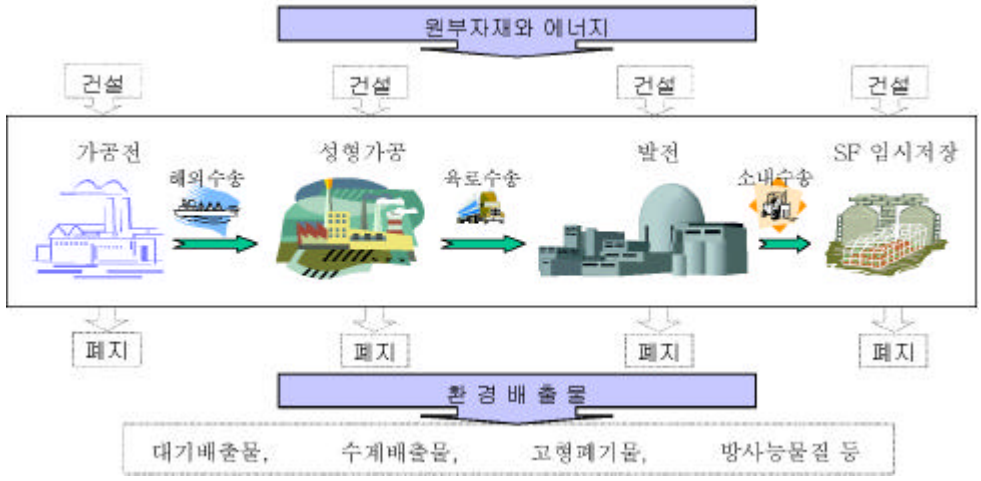
이중에서 마지막 단계에 포함된 주요 내용중 평가수행은 일반적으로 ISO의 권고에서는 분류화(Classification)와 특성화(Characterization)는 필수적인 내용으로 하고, 정규화(Normalization)와 기술간 환경특성을 비교할 때 유용한 가중화(Weighting)는 분석환경에 따라 선택적으로 수행할 수 있다고 권고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 분석대상이 된 두 종류 원자력발전소의 환경특성을 각각 분석하는 데 목적이 있지, 이들간 비교에 목적을 두고 있지 않으므로 이 중 가중화는 생략하기로 한다.

---

2) 일본을 중심으로는 일명 적산법이라고도 함

나. 분석범위 및 대상 설정

본 연구에서는 위에 언급한 원자력발전소의 전과정 평가 범위에서 다음의 <그림-2>와 같이 원자력 발전과정으로 범위를 정하여 분석하고자 한다.



<그림-2> 원자력발전소의 발전 과정

여기에서 원자력의 발전 전과정은 크게 다음의 3 단계로 구분하였다. 이는 국내에서 활동이 이루어지는 부분으로 '성형가공'과 '발전단계'를 우선 도출하고, 이어서 성형가공까지 이르는 사전 단계를 '가공전단계'이다. 특히 우리나라의 yellow cake 조달이 모두 국외에서 이루어진다는 점에서 이 단계의 데이터는 호주, 캐나다, 그리고 유럽평균치 등을 활용하였다.

분석대상으로 삼은 원자력발전소는 국내에 가동중인 원자로중 경수로와 중수로를 각 1기씩 선정하였다. 대상으로 삼을 원자로는 데이터의 신뢰성 관점에서 상업운전을 기준으로 너무 오래된 발전소이어서 낙후된 기술을 채용하고 있거나 너무 신형 원자로이어서 데이터의 안정화를 기대하기 어려운 경우를 배제하였다. 이 점에서 대상 발전소는 경수로의 경우는 우리나라 표준형 원자로로 1990년대 말에 가동되기 시작한 원전을 대상으로 하였고, 중수로의 경우는 이와 비슷한 시기인 가동된 발전소를 대상으로 하였다.

다. 환경영향범주의 설정

환경영향범주(Impact Categories)의 선택은 전과정목록분석 단계에서 작성된 투입/산출물 항목들에 대하여 ISO/CD 14042의 영향평가방법론과 국제적으로 공인된 방법론

(CML, CST, EDIP등)등 객관적, 과학적 근거확보에 기초한 모든 영향범주가 우선적으로 고려되었다. 본 연구에서는 목적 및 범위설정단계에서 지구상 부존자원의 고갈, 지구차원의 환경문제, 발전소 입지주변의 환경영향, 마지막으로 원자력발전소의 환경영향 특성을 반영할 수 있는 4개 분야에 대한 환경영향 범주를 <표-1>에서 보는 바와 같이 9가지로 정하고 분석하였다.

<표-1> 설정된 환경영향 범주

영향 분야	환경영향 범주	평가단위
지구차원의 자원소모 기여도	자원소모 (ADP)	kg Sb eq./kg
지구차원 환경영향	지구온난화 (GWP)	kg CO2 eq./kg
	오존층파괴 (ODP)	kg CFC-11 eq./kg
	산성화 (AP)	kg SO2 eq./kg
설비주변 환경영향	부영양화 (EP)	kg PO4-3 eq./kg
	광화학적 산화물생성 (POCP)	kg C2H4 eq./kg
	인체독성 (HTP)	kg 1,4-DCB eq./kg
	생태계독성 (AETP, TETP)	kg 1,4-DCB eq./kg
원자력의 환경 특성치	방사능 영향(RIP)	Year/Bq

3. LCA 수행 결과

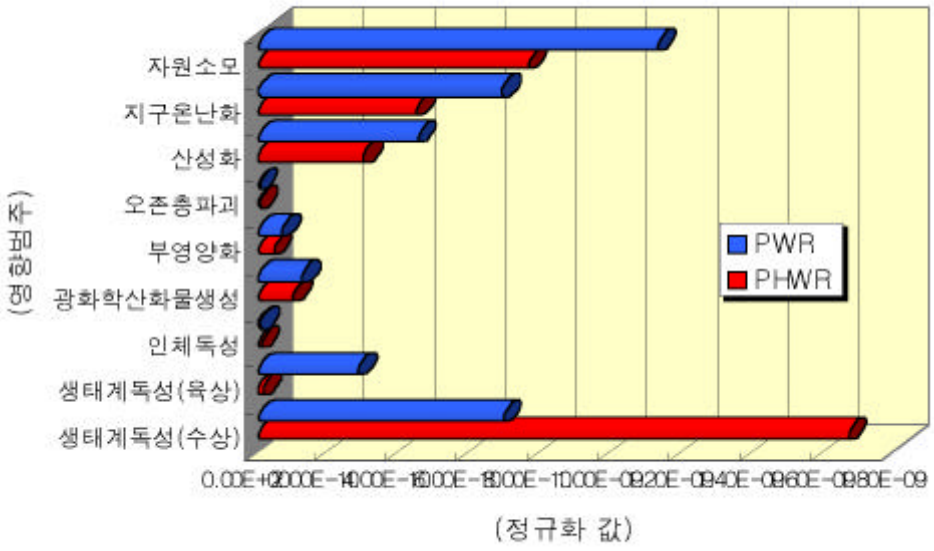
이상에 정한 9개의 환경영향 범주중 각 환경영향 분야별로 중요한 범주에 대한 환경영향 평가 결과를 정리하면 <표-2>와 같다. 이 표에서 보이는 바와 같이 원자력발전은 할론-1301 발생으로 인한 오존층 파괴와 Vanadium을 발생하는 육상 및 수상 생태계독성물의 배출은 가공전 단계에서 많이 발생하고, 인체독성물의 가공정과 발전단계의 수준이 비슷했으며, 그 외의 영향범주에 있어서는 주로 발전단계의 영향이 큰 것으로 평가되었다.

다음으로 <그림-3>은 각 영향범주별로 환경에 미치는 영향의 크기를 상대적으로 평가하기 위해 정규화한 평가치를 요약한 결과이다. 발전소들은 경수로의 경우 자원소모와 수상생태계독성 영향이 10^{-9} 10^{-10} 정도로 비교적 큰 것으로 나타났고, 이에 비해 인체독성과 오존층 파괴의 영향은 10^{-12} 10^{-13}로 극히 적은 것으로 평가되었다. 중수로의 경우도 마찬가지로 수상생태계독성과 자원소모 영향이 10^{-9} 10^{-10} 정도로 비교적 많은 것으로 나타났고, 이에 비해 인체독성과 오존층 파괴의 영향은 10^{-12} 10^{-13}로 극히 적은 것으로 평가되었다.

<표-2> **원자력 발전의 단계별 환경영향 특성화 결과**

(단위 : 배출단위 / GWh)

환경영향 범주	배출단위	로형	환경영향 단계			합 계
			가공전	성형가공	발 전	
자원소모	kg Sb-eq.	PWR	7.01E+00	8.57E-01	1.69E+02	1.77E+02
		PHWR	1.00E+01	3.01E+00	1.07E+02	1.20E+02
지구온난화	kg CO2-eq.	PWR	4.50E+02	9.82E+01	2.60E+04	2.65E+04
		PHWR	4.41E+02	3.28E+02	1.64E+04	1.72E+04
산 성 화	kg SO2-eq.	PWR	4.19E+00	5.30E-01	1.29E+02	1.34E+02
		PHWR	5.43E+00	1.77E+00	8.15E+01	8.87E+01
오존층 파괴	kg CFC-11-eq.	PWR	1.93E-04	4.49E-07	2.96E-05	2.23E-04
		PHWR	3.63E-04	2.69E-06	1.88E-05	3.84E-04
부영양화	kg PO-3 4-eq.	PWR	2.42E-01	3.82E-02	8.15E+00	8.43E+00
		PHWR	3.20E-01	1.28E-01	5.14E+00	5.59E+00
광화학적산화물생성	kg C2H4-eq.	PWR	7.68E-01	5.21E-02	4.72E+00	5.54E+00
		PHWR	1.26E+00	2.16E-01	2.98E+00	4.46E+00
인체독성	kg DCB-eq.	PWR	1.26E+02	3.93E-01	8.46E+01	2.11E+02
		PHWR	2.54E+02	1.34E+00	5.33E+01	3.09E+02
생태계독성(육상)	kg DCB-eq.	PWR	7.50E+01	1.86E-05	5.24E-02	7.50E+01
		PHWR	3.00E+00	7.12E-05	1.78E-02	3.02E+00
생태계독성(수상)	kg DCB-eq.	PWR	1.40E+03	1.04E-02	2.11E+00	1.40E+03
		PHWR	3.38E+03	3.55E-02	1.32E+00	3.38E+03
방사능 영향	DALY	PWR	2.75E-04	1.11E-11	9.51E-03	9.79E-03
		PHWR	6.66E-04	7.42E-11	1.48E-03	2.14E-03



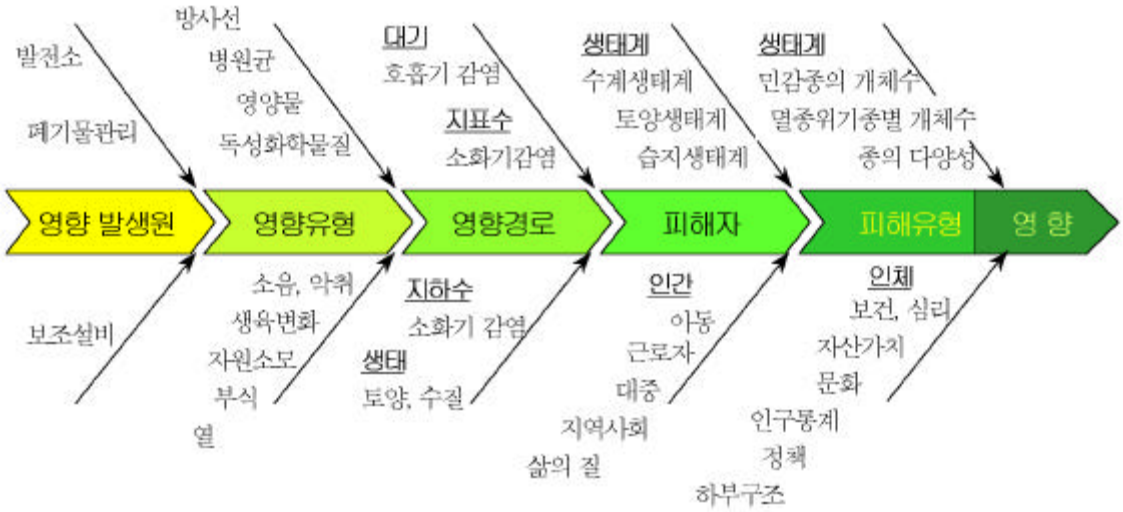
<그림-3> **원자력 발전의 환경범주 정규화 평가 결과**

4. 향후 추진방향

이 분석은 국내에서 가동중인 원자력 발전에서 기인하는 환경성을 종합 평가하였다. 평가는 9개 영향범주에 대해 이루어졌으며 이들의 특성치와 정규화 값들은 본문에 나타난 바와 같다.

본 연구에서는 원자로형별 비교를 위해 수행되지 않았으나, LCA의 도입이 앞선 선진국의 연구결과는 이 연구와 같은 절대평가의 범위를 넘어 ①원자력발전의 로형간, 핵연료 주기간 비교나 ②화석연료 발전원과의 비교를 넘어 ③신·재생 에너지원이나 수력발전원과의 비교연구도 수행하고 있다.

또한 이러한 절대 평가와 상대평가들을 개발중인 기술에도 적용하여 소위 환경부하 예측도 시도되고 있다. 그리고 이를 최근 중요한 패러다임으로 대두된 '지속가능한 개발'의 3개의 기준중 하나인 환경성 측면을 평가하는 데 활용하고 있다. 더욱이 산출결과를 타발전원과 비교하여 분석의 유용성을 극대화하기 위해서는 <그림-4>에 나타낸 과정과 같이 피해자(receptor)가 입는 손실을 외부효과로 측정하는 일관된 지표-예를 들어 화폐단위 혹은 인명 위해도-로 확장하여야 한다.



<그림-4> 환경영향 평가 과정

참고문헌

[1] 이강희, *"건물의 환경친화성 평가방법에 관한 연구"*, 연세대학교 대학원 건축공학과 박사학위논문, 1998. 12.

[2] 정 환삼 외, *"전원별 환경영향 평가를 위한 수명주기분석 적용 방안 연구"*, 에너지공학회 추계학술대회, 2001. 11

[3] 한국원자력연구소, *"전수명주기평가를 통한 원전의 환경영향 분석모형 구축 연구"*, 연구보고서, KAERI/ RR-2382/ 2002, 2002. 4

[4] E. Böhm and R. Walz, *"Life-cycle-analysis: a Methodology to Analyse Ecological Consequences within a Technology Assessment Study ?"*, IJTM, Special Publication on Technology Assessment, 1996.

[5] Frischknecht, R., A. Braunschweig, P. Hofstetter, P. Suter, *"Human Health Damages due to Ionising Radiation in Life Cycle Impact Assessment"*, Environmental Impact Assessment Review, 20(2000): 159-189, 2000.

[6] IAEA, *"INPRO ; Guidelines for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles"*, Final Draft, Phase IA Report-Extended Version, May 2003.

[7] ISO 14040's, *"Environment Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework"*, ISO, 1997.

[8] R. Friedrich and T. Marheineke, *"Life Cycle Analysis of Electricity Systems: Methods and Results"*, IAEA-TECDOC-892, 1994. 10.

[9] Yohji Uchiyama, *"Life Cycle Analysis of Power Generation Systems"*, Central Research Institute of Electric Power Industry(CRIEPI) Report No. Y94009, 1995