

LCA 기법을 이용한 발전시스템의 환경성 평가

고광훈 · 황용우[†] · 박광호 · 조현정 · 제무성*

인하대학교 환경공학과 · *한양대학교 원자력공학과

(2005년 1월 31일 접수, 2005년 7월 4일 채택)

Environmental Impact Evaluation for the Power Generation System Using the LCA Methodology

Kwang-Hoon Ko · Yong-Woo Hwang[†] · Kwang-Ho Park · Hyun-Jung Jo · Moo-Sung Jae*

Department of Environmental Engineering, Inha University · *Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

ABSTRACT : In this study, life cycle assessment(LCA) for the nuclear power generation system and the thermal power generation system, which make a great distribution of the electric power supply in Korea, has been carried out to compare the environmental impact between two power generation systems. In system boundary of this study, the stage of construction, operation and demolition & disposal were included. For life cycle impact assessment(LCIA), three cases were considered; the single environmental impact for the CO₂ emissions, the 8 major global environmental impact, and the major global environmental impact categories including radioactive impact. As the results, it was found that the nuclear power generation system is environmentally superior to the thermal power generation system as 10,000 times in the evaluation for the CO₂ emissions, 90 times in the evaluation for the 8 major environmental impact categories, and 40 times in the evaluation for the environmental impact categories including radioactive impact.

Key Words : Life Cycle Assessment, Nuclear Power Generation System, Thermal Power Generation System, CO₂ emission, Radioactive Impact

요약 : 본 연구에서는 국내 전력공급을 양분하는 원자력발전시스템과 화력발전시스템사이에 대하여 LCA를 수행하여 환경영향을 비교 평가하였다. 연구범위로서 두 발전시스템의 건설, 운영, 해체 및 폐기처분단계를 포함하였으며, 환경영향은 Life Cycle Impact Assessment(LCIA) 방법론을 이용하여 단일 환경영향으로 CO₂ 배출량을 평가하고, 영향 범주를 확대하여 8대 지구 환경영향 및 방사능 영향을 포함한 환경영향에 대하여 평가를 수행하였다. 평가 결과, 원자력발전시스템이 화력발전시스템보다 CO₂ 배출량 평가에서는 10,000배, 8대 환경영향범주에 대한 평가에서는 90배, 방사능을 고려한 환경영향 평가결과에서는 40배의 환경적 우위를 나타내어 환경영향범주 확대와 방사능 포함여부에 따라 원자력발전의 친환경성이 크게 달라짐을 알 수 있었다.

주제어 : LCA, 원자력발전시스템, 화력발전시스템, CO₂ 배출량, 방사능 영향

1. 서론

오늘 날의 경제 및 산업 활동에 있어서 화석에너지는 가장 큰 비중을 차지하고 있으나, 그로부터 야기된 지구온난화나 산성비와 같은 환경 문제는 인류의 생존을 위협하고 있다. 이러한 지구 환경 문제에 대응하려는 세계적인 움직임은 1990년 8월에 개최된 기후 변동에 관한 정부간 패널(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change) 총회와 11월에 개최된 세계기후회의(WCC; World Climate Conference) 등에서 구체화되어, 지구온난화의 주요 원인인 CO₂의 배출량을 규제하고 화력에너지를 원자력에너지로 전환하는 방안을 제시한 바 있다.

우리나라의 경우, 에너지경제연구원의 자료¹⁾에 따르면

2002년 현재 발전원별 전력 생산 점유율은 원자력발전과 화력발전이 38.9%와 59.4%를 차지하고 있어, 화력과 원자력에 의한 발전이 대부분의 전력을 공급하고 있다. 이 중 원자력발전은 소량의 연료로 막대한 에너지를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 화석에너지와 달리 CO₂와 같은 환경 오염 물질의 배출이 적어 환경보전 및 대체에너지 수단으로 부각되고 있다. 그러나 원자력발전은 연료의 채취 및 발전시설 건설시 타 발전에 비해 막대한 양의 에너지 및 자재가 투입되며, 더욱이 발전소 운영 및 해체 시 발생하는 방사성폐기물의 위험성 때문에, 최근 논란이 되고 있는 방사성폐기물처리장 등 사회적 인식은 그다지 좋지 않은 상황이다. 따라서 원자력발전소 운영을 포함한 건설, 해체 및 폐기처분과정 등 발전시스템의 전체 Life cycle에 대하여 방사능 영향까지 고려할 경우, 다른 발전시스템보다 과연 환경적으로 우수하다고 평가할 수 있는지, 또한 우수하다면 어느 정도 우수한지 과학적이고 정량적인 평가를 수행할 필요가 있다.

[†] Corresponding author

E-mail: hwangyw@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7501

Fax: 032-863-4267

이에 본 연구에서는, 최근 국내외에서 종합적 환경영향을 평가하는 기법으로 주목받고 있는 LCA(Life Cycle Assessment) 방법론을 이용하여 국내 전력생산량을 양분하고 있는 원자력발전시스템과 화력발전시스템을 대상으로 건설, 운영, 해체 및 폐기처분단계에 이르는 발전시스템의 Life cycle에 대하여 환경영향을 평가하여 보았다. 구체적으로, 단일 환경영향으로 지구온난화에 큰 영향을 미치는 CO₂ 배출량에 대해 평가하고, 이를 확대하여 8대 지구환경영향(자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화, 생태독성, 인간독성) 및 방사능 영향까지 포함한 환경영향에 대하여 LCA 평가를 수행하였다. 지금까지 원자력발전에 대해 CO₂ 배출량과 같은 단일 환경부하 측면을 연구한 사례는 다수 발표되었고, 발전시스템에 사용된 연료의 Life cycle을 평가한 국내외 연구사례^{2~4)}는 존재한다. 그러나 본 연구에서와 같이 발전시스템에 대하여 건설, 운영, 해체 및 폐기처분, 연료 cycle까지 고려하여 광범위하게 LCA를 수행한 사례는 국내외에 아직 전무한 실정이다. 이러한 의미에서 본 연구에서 검토한 발전시스템 전체의 전과정에 대한 환경영향 평가 결과는 발전시스템의 환경성에 대한 객관적이고 과학적인 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법 및 결과

LCA는 비교적 최근에 개발된 종합 환경영향 평가기법으로 최근 환경성적표지제도 등과 관련하여 제조 산업을 중심으로 활발히 적용되고 있다.

본 연구에서는 발전시스템에 대한 LCA의 수행을 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, ISO 14040s⁵⁾에서 제시하고 있는 목적 및 범위설정(Goal and Scope Definition), 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 결과해석(Interpretation)등 4단계로 나누어 수행하였다.

2.1. 목적 및 범위설정

목적 및 범위설정은 LCA의 적용 목적 및 연구범위를 설정하는 단계로, 연구 목적을 명확하게 정의하고 적용 대상 시스템에 대한 기능단위 및 연구범위를 설정하여야 한다.

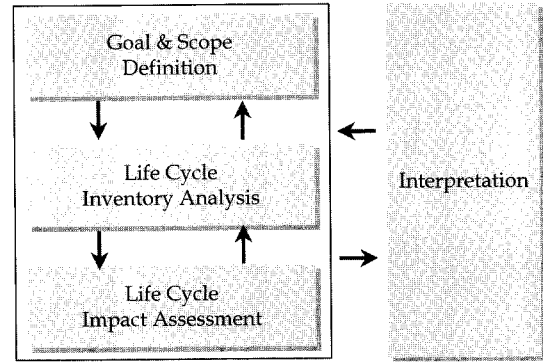


Fig. 1. LCA Framework based on ISO 14040s.

본 연구는 국내 발전시스템 중 원자력발전 및 화력발전 시스템을 대상으로 각 발전시스템의 건설단계, 운영단계, 해체 및 폐기처분단계의 Life cycle에 대하여 단일 환경영향 측면에서 CO₂ 배출량을 평가하고, 환경 영향범주들 8대 지구 환경영향, 그리고 방사능 영향까지 포함한 환경영향으로 확대하여 발전시스템에 대한 환경성을 비교, 평가하는데 목적이 있다.

LCA 적용 대상으로는 국내 전력생산량의 대부분을 차지하고 점유율이 유사하다는 점에서 원자력발전시스템과 화력발전시스템을 선정하였고, 연구의 대표성과 객관성을 위하여 원자력발전시스템으로서는 U지역에 위치한 한국 표준형 원자력발전소를, 화력발전시스템으로서는 I지역에 위치한 LNG복합화력발전소를 대상모델로 선정하였다. 발전시스템의 Life Cycle은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 크게 건설단계, 운영단계, 해체 및 폐기처분단계의 세 단계로 나눌 수 있다. 건설단계에서는 발전소 건설시 투입자재와 시공장비 사용에 대하여, 운영단계에서는 연료의 생산 및 발전시 운영되는 항목에 대하여 분석하였다. 또한, 해체 및 폐기처분단계에서는 해체장비 사용과 해체 폐기물 및 방사성폐기물 처분에 관련한 항목에 대하여 고려하였다.

본 연구에서는 각 발전시스템의 내구연한을 원자력발전소와 화력발전소의 설계 수명인 40년과 30년으로 설정하였고, 동일 기능의 발전시스템 비교를 위하여 각 발전시스템에서 생산하는 전력 1 MWh를 환경성 평가의 기능단위(F.U.; Functional Unit)로 설정하였다.

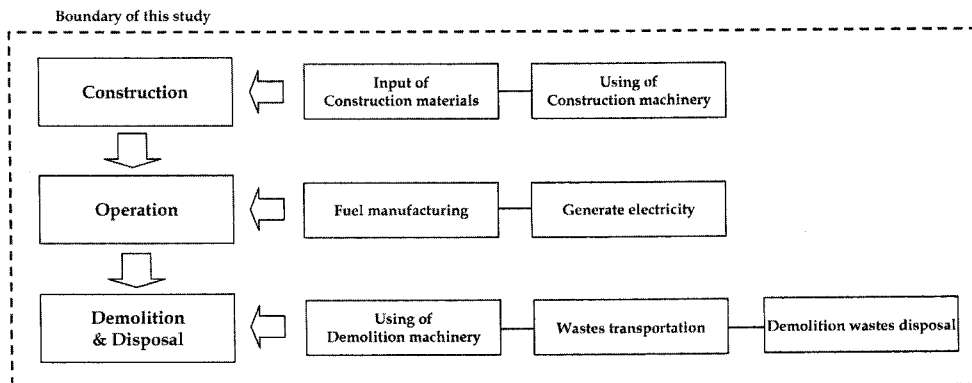


Fig. 2. System boundary in this study.

2.2. 목록분석

목록분석은 LCA 적용 대상에 대한 투입물과 배출물의 데이터를 정리하고 정량화하는 단계로, 투입물에는 원재료, 부재료, 연료, 에너지 등이 포함되고, 배출물에는 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 폐기물 등이 포함된다. 본 연구에서는 목록분석에 필요한 발전시스템의 건설, 운영, 해체 및 폐기처분단계에서의 투입물 및 배출물을 실제 자료를 바탕으로 산출하였다.

2.2.1. 건설단계

건설단계에서는 건설 시 사용되는 시공장비와 건설투입자재를 고려하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 두 발전시스템 건설시의 시공장비에 대해서는 실제공사자료집⁶⁻⁸⁾을 이용하여 장비종류를 조사하였고, 총 공사기간동안의 각각의 시공장비에 대한 작업시간은 각 사용 장비들이 1일 8시간 동안 경유를 이용하여 작업한다고 가정하고 산출하였다. 각 장비에 대한 작업시간당 연료소비량은 표준폼셈⁹⁾을 이용하였다. 예를 들어, Bull Dozer의 경우 시간당 약 40 L의 연료를 소비하여 총 공사기간동안에 원자력발전은 1,393,600 L, 화력발전은 702,030 L 정도를 사용한다. 나머지 장비에 대해서도 동일한 방식을 적용한 결과, 건설단계에서의 총 연료소비량은 원자력발전 49,429,600 L, 화력발전 10,652,720 L로 나타났다.

Table 1. Construction machinery list and amount of fuel consumption in the construction stage of the power generation systems

Machinery	Type	Nuclear		Thermal	
		Working time(hr)	Fuel consumption(L)	Working time(hr)	Fuel consumption(L)
Bull Dozer	32 ton	35,192	1,393,603	17,728	702,029
Wheel Loader	1.72 m ³	29,344	528,192	16,776	301,968
Back Hoe	2 m ³	156,688	4669302	76,064	2,266,707
Dump Truck	32 ton	283,680	9,588,384	86,704	2,930,595
Crane	150 ton	127,432	6,408,997	58,120	900,860
Diesel Hammer	4 ton	744	16,368	672	14,784
Roller	10 ton	22,984	268,913	5,024	73,350
Grader	3.6 m	18,176	279,910	272	4,189
Water Truck	5500 L	33,440	341,088	6,760	68,952
Fork Lift	7.5 ton	95,344	791,355	47,655	395,545
Trailer	60 ton	195,264	6,482,765	6,528	43,738
Pump Car	80 m ³ /hr	43,328	779,904	13,536	243,648
Titan	10.5 ton	141,336	2,657,117	7,104	133,555
Generator	700 kW	50,016	8,142,605	12,520	2,038,256
Mixer Truck	6 L	225,504	4,758,134	32,616	127,202
Unloader	5 ton	7,376	267,011	10,064	107,685
Crawler Drill	120 mm	19,568	450,064	11,096	255,208
Batch Plant	120 m ³ /hr	27,624	538,668	-	-
Compressor	7.1 m ³ /min	108,768	1,065,926	-	-
Hammer	1.5 ton	160	1,280	11,696	44,445
Total			49,429,586		10,652,716

두 발전시스템의 건설단계 투입자재 역시, 실제공사자료집^{6-8,10,11)}을 이용하여 토건공사, 배관공사, 전기공사, 설치기기공사로 분류하고 자재 종류와 투입량을 산출하였으며, 그 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 이 중 주요 자재에 해당하는 원자로, 보일러, 터빈발전기 등은 주요 재질 및 중량을 조사하여 목록분석을 실시하였다. 원자로의 경우 주요 재질은 티타늄 및 스테인레스강, 투입량은 약 700 ton이었고, 보일러는 주요 재질이 티타늄, 투입량은 약 200 ton이었다. 또한, 터빈발전기는 원자력 발전, 화력발전 모두 크롬강이 주요 재질로 구성되어 있고 투입량은 각각 36,080 ton, 32,471 ton 정도였다.

2.2.2. 운영단계

발전시스템의 운영단계에서는 전력생산을 위해 사용되는 연료의 사용 및 부산 폐기물의 처리에 대하여 고려하였다. 발전소 운영 시 원자력발전의 경우 핵연료와 부속시설 가동을 위해 경유가 사용되며, 화력발전의 경우 LNG가 사용된다. 실제 발전소 현장 조사에 따르면 전력생산을 위해, 원자력발전은 연간 약 4 ton의 핵연료와 760 ton의 경유가

Table 2. Amount of construction materials in two power generation systems

Construction materials		Amount (ton)	
		Nuclear	Thermal
Civil work	Cement	44,029	9,390
	Gravel	213,338	58,024
	Sand	543,134	3,948
	Concrete mixing compound	811,536	184,652
	Steel	72,807	21,136
Piping work	Steel frame	15,327	66
	Steel pipe products	530	96
	Screw products	1.0	0.3
	Valve products	755	11
Electricity work	Pipe metal products	48	4.7
	Heat insulation products	24	4.9
	Electric wires & cables	420,318	169,302
	Metal support products	1,497	20
	Illumination devices	11	2.5
Machinery & Instrument work	Atomic reactor	698	-
	Boiler	-	204
	Containment Liner Plate	3,352	-
	Stainless Steel Liner Plate	714	-
	Air conditioner facility	2,096	0.3
	Steam condenser	2,400	800
	Turbine generator	36,079	32,471
	Pump products	15,900	5,100
	Tank products	18,700	6,188
	Condenser products	159,692	52,910
Heat exchanger products	189	54	

Table 3. Amount of fuel requirement in the operation stage

Type	Nuclear	Thermal	Remark
Fuel	Nuclear Fuel (ton)	170	- Annual amount of spent fuel : 4.25 ton/yr - Life span : 40 years
	Diesel (ton)	30,382	- Annual amount of spent fuel : 760 ton/yr - Spent fuel in operating attached building - Life span : 40 years
	Natural Gas (m ³)	-	2.76E+12 - Annual amount of spent fuel : 9.20E+10 m ³ - Life span : 30 years

소비되며, 화력발전은 연간 900억 m³ 정도의 LNG를 소비하고 있는 것으로 나타났다. Table 3에 설계수명동안의 총 연료사용량을 나타내었다.

화력발전과는 달리, 원자력발전의 경우 발전 특성 상 전력생산 시 사용된 핵연료 및 장갑, 신발, 공구 등은 고, 중, 저준위 방사성폐기물로 분류되어 중간저장단계를 거쳐 최종 처분 된다. 그러나 국내의 경우 방사성폐기물 최종처분장이 존재하지 않으므로 본 연구에서는 발생한 방사성 폐기물을 전량 중간 저장한다고 가정하였다. 본 연구에서 대상으로 한 원자력 발전소의 연간 폐기물 발생량은 고준위 폐기물 27.5 m³/yr, 중·저준위 폐기물 166.95 m³/yr로 조사되었고, Table 4에 설계수명동안의 중간저장폐기물량을 나타내었다.

2.2.3. 해체 및 폐기처분단계

세계적으로 원자력발전소를 해체한 사례는 미국의 상업용 원자력발전소인 Shippingport와 독일 니테라이히바의 경우를 제외하면 거의 드물다. 국내에서는 고리 1호기가 1978년 최초로 운전을 개시한 이래 현재까지 운영되고 있으며, 원자력발전소의 해체 사례는 전무한 상태이다. 화력발전소의 경우도, 국내의 군산, 영월 등의 소형 발전시설에서의 해체 사례는 찾아 볼 수 있으나 대규모 화력발전소의 해체 사례는 거의 드물다. 본 연구에서는 발전시스템의 설계수명이 종료하면 해체한다는 가정하에 발전시스템 해체장비 및 폐기(폐기물수송)장비의 연료소비량을 산정하였다.

Table 4. Amount of radioactive wastes in the operation stage of Nuclear power generation system

Radioactive wastes of the Nuclear power generation system	Amount (m ³)	Remark
High level wastes	1,100	- Spent nuclear fuels - Annual amount of spent fuel : 27.5 m ³ /yr - Life span : 40 years
Medium · Low level wastes	6,678	- Gloves, Shoes, Repair tools - Annual amount of spent fuel : 170.0 m ³ /yr - Life span : 40 years

Table 5에 두 발전시스템의 해체장비 및 폐기장비의 연료소비량을 산출하여 나타내었다. 여기서, 발전시설 해체장비는 압쇄기를 사용하며, 해체 장비 사용에 따른 연료 소비량은 해체 대상의 단위면적당 5 L의 경유를 소비¹²⁾한다고 가정하였다. 폐기단계에서는 해체폐기물을 매립지까지 수송하는데 에너지가 소비된다. 일반적인 건축물 해체 공사 시, 단위면적당 2.5 ton 정도의 폐기물이 발생하며,¹³⁾ 해체 폐기물은 전량 11 ton 트럭으로 인근 매립지에 매립한다고 가정하였다.

원자력발전소 해체 시, 방사능에 노출된 폐기물(전체 해체폐기물 중 약 10%를 방사성폐기물로 가정)은 일반 매립이 불가능하다. 따라서 방사성 폐기물 최종 처분 단계가 필요하며, 해체단계에서 발생한 방사성폐기물은 해체 시까지 저장된 중간저장 폐기물과 함께 전량 최종처분 하는 것으로 가정하였다. Table 5에 산정한 결과를 나타내었다.

2.2.4. 전과정 목록분석 결과

이상에서 조사한 두 발전시스템의 Life Cycle 즉, 건설단계, 운영단계, 해체 및 폐기처분단계에서의 투입물 분석결과를 바탕으로 환경 배출물에 대하여 국외의 LCI DB¹⁴⁻¹⁶⁾ 이용하여 목록분석을 수행하였다. 그 결과, 총 400여개의 환경배출 목록항목이 도출되었으며 이 중 대표적인 항목을 raw material, air emissions, water emissions, soil emissions, radioactive substances로 구분하여 Table 6에 나타내었다.

2.3. 전과정 영향평가

전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment; LCIA)는 전과정 목록분석 결과를 이용하여 잠재적인 환경영향을 평가하는 단계로, 환경에 미치는 영향 정도를 종합적이며 정량적으로 산출하여 평가한다.

본 연구에서는 각 발전시스템의 Life cycle에 대하여, 우선 지구온난화 측면에서 CO₂ 배출량을 평가하고, 다음으로 환경 영향범주를 확대하여 지구온난화영향이 포함된 8대 지구 환경영향으로 평가하고, 마지막으로 범위를 더욱 확대하여 방사능 영향까지 포함한 환경영향에 대하여 영향평가를 수행하여 두 발전시스템의 환경성을 비교하였다.

Table 5. Amount of fuel consumption and wastes in the demolition & disposal stage

Type	Nuclear	Thermal	Remark
Fuel consumption	Demolition (L)	855,185.8	210,627.5 - Nuclear area : 171,037.2 m ² - Thermal area : 42,123.5 m ² - Demolition machinery : Breaker - Fuel consumption : 5 L/m ²
	Disposal (L)	29947.5	7375.4 - Transportation distance : 10 km
Amount of wastes	General waste (ton)	263,534.1	64,903.9 - Amount of wastes : 2.541 ton/m ²
	Radioactive waste (m ³)	25,237	-

Table 6. Results of inventory analysis in each stage of the power generation systems

	Inventory Parameter	Unit	Construction		Operation		Demolition & Disposal	
			Nuclear	Thermal	Nuclear	Thermal	Nuclear	Thermal
I	(r) Bauxite	g	6.80E+04	3.16E+04	5.79E+08	3.51E+10	5.88E+07	6.17E-02
I	(r) Chromium(in ore)	g	1.57E+07	4.54E+06	1.37E+08	4.00E+09	2.26E+06	3.15E-03
I	(r) Copper(in ore)	g	5.82E+04	2.68E+04	6.83E+07	3.97E+10	1.12E+07	6.71E-04
I	(r) Crude oil	g	7.29E+11	1.79E+11	2.98E+10	1.43E+13	8.24E+09	1.40E+01
I	(r) Iron(in ore)	g	7.91E+08	2.45E+08	5.84E+09	2.76E+10	4.73E+09	1.84E+01
I	(r) Manganese(in ore)	g	4.24E+06	1.25E+06	1.87E+07	9.49E+08	8.97E+05	3.30E-03
I	(r) Natural gas	g	8.38E+07	2.47E+07	4.66E+07	3.39E+12	4.41E+05	1.14E+03
I	(r) Nickel(in ore)	g	6.04E+04	3.48E+04	1.13E+08	2.63E+09	1.26E+0	5.54E-04
I	(r) Tin(in ore)	g	9.61E+05	2.30E+05	5.18E+04	2.45E+07	1.42E+10	6.96E-07
O	(a) Benzene	g	1.01E+05	2.55E+04	9.92E+05	4.75E+08	2.05E+05	1.35E-01
O	(a) Carbon dioxide	g	2.33E+11	6.29E+10	2.21E+11	1.26E+15	4.33E+10	1.70E+05
O	(a) Fluoranthene	g	8.75E+13	1.52E+13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
O	(a) Methane	g	2.57E+08	9.60E+07	5.25E+08	4.11E+13	3.24E+08	8.57E+01
O	(a) NMVOC	g	1.90E+04	6.82E+03	4.89E+08	3.62E+12	8.52E+07	1.88E-01
O	(a) NOx	g	9.26E+07	4.55E+07	9.22E+08	4.66E+12	1.84E+08	1.67E+00
O	(a) SOx	g	1.31E+08	3.68E+07	1.02E+09	3.73E+12	1.18E+08	7.97E+01
O	(w) Arsenic	g	9.72E+04	3.56E+04	3.66E+05	1.13E+08	2.85E+04	3.15E-02
O	(w) Chromium	g	1.62E+05	4.54E+01	2.98E+01	2.37E+04	5.55E+00	1.61E-04
O	(w) Copper	g	9.24E+04	3.79E+04	1.45E+03	2.75E+08	7.40E+04	1.03E-02
O	(w) Nickel	g	7.80E+04	3.39E+04	6.92E+05	2.98E+08	7.67E+04	1.35E-02
O	(w) Lead	g	9.95E+04	4.03E+04	2.57E+07	7.78E+08	1.75E+05	1.34E-01
O	(w) Zinc	g	1.14E+05	3.23E+04	3.36E+06	1.89E+09	2.08E+05	9.64E-04
O	(s) Arsenic(ind.)	g	1.19E+05	8.27E+03	3.11E+03	3.75E+07	2.49E+02	1.36E+01
O	(s) Mercury(ind.)	g	1.67E+05	6.61E+04	4.10E+03	3.59E+03	1.03E+02	2.73E+01
O	(ra) C-14	Bq	7.38E-02	2.47E-02	2.78E+10	3.31E+05	8.61E+08	1.21E-04
O	(ra) H-3	Bq	1.85E+05	7.45E+04	4.01E+11	3.42E+00	2.71E+09	6.83E-01
O	(ra) I-129	Bq	1.37E+11	5.50E+10	1.93E+08	1.18E+06	3.99E+06	5.08E+05
O	(ra) U-234	Bq	3.27E+04	9.14E+03	4.19E+09	1.57E+06	2.75E+06	1.35E+00
O	(ra) Pu-238	Bq	3.94E+04	1.58E+04	2.03E+02	4.91E+02	5.08E+00	9.81E+01

(r) : Raw material, (a) : Air emissions, (w) : Water emissions, (s) : Soil emissions, (ra) : Radioactive substances

2.3.1. Case 1 : 지구온난화 영향 평가

본 연구에서는 전술한 목록분석 결과를 이용하여 CO₂ 배출량을 산정하였으며, 기존의 연구 사례^{17,18)}와 비교해 보았다. Table 7에 나타난 바와 같이, 화력발전의 경우 원자력발전에 비해 건설단계에서 단위전력을 생산하기 위해 배출되는 CO₂ 량은 적으나, 운영단계에서의 화석연료 사용으로 인한 CO₂ 배출량이 막대하여, 전 Life Cycle에서 발생하는 CO₂는 원자력발전에서 4.37E+02 g-CO₂/F.U., 화력발전에서 4.99E+06 g-CO₂/F.U.로 화력발전시스템이 원자력발전시스템보다 10,000배 이상 더 배출하는 것으로 나타났다. 각 발전시스템의 Life Cycle 별 CO₂ 배출 비율을 살펴보면, 원자력발전은 건설단계, 운영단계, 해체 및 폐기처분단계가 각각 84%, 0.1%, 16%이었고, 화력발전시스템은 운영단계가 99.9% 이상 이었다.

Table 7. CO₂ emissions from each life cycle stage of two power generation systems

Life cycle	Nuclear		Thermal	
	Amount (g-CO ₂ /F.U.)	Contribution (%)	Amount (g-CO ₂ /F.U.)	Contribution (%)
Construction	3.68E+02	84.2	2.91E+02	0.0
Operation	1.68E-05	0.1	4.99E+06	99.9
Demolition & Disposal	6.85E+01	15.7	6.71E-04	0.0
Total	4.37E+02	100	4.99E+06	100

본 연구의 결과를 외국사례^{17,18)}와 비교하면 Table 8에 나타난 바와 같이, 나라별로 사정이 다르고 연구범위가 다르기 때문에 결과 값에 다소 차이를 보이지만 화력발전이 압도적으로 많은 CO₂ 배출을 나타내고 있는 공통점을 보이고 있다.

Table 8. Comparison of CO₂ emissions with results of other studies(Unit : g-CO₂/F.U.)

CO ₂ emission / Life cycle	Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan	University of Wisconsin Madison	This study
Nuclear	2.20E+04	1.70E+07	4.37E+02
Thermal	6.53E+08	6.22E+08	4.99E+06

* CRIEP and UWM considered the fuel cycle only.

2.3.2. Case 2 : 8대 지구환경영향에 대한 평가

본 연구에서는 두 발전시스템의 종합적 환경성을 평가하기 위해서, 국내외 LCA 분야에서 환경성 평가 방법론으로 보편적으로 사용되고 있는 Eco-indicator 95 방법을 이용하였다. 이 방법은 목록분석 결과가 8가지 환경영향범주에 미치는 영향을 각 영향범주별 특성화 인자, 정규화 인자 및 가중인자¹⁹⁾를 적용하여 정량화한다. 평가하는 8가지 환경영향범주는 자원고갈(Abiotic Resources Depletion; ARD), 지구온난화(Global Warming; GW), 오존층파괴(Ozone Depletion; OD), 광화학산화물생성(Photochemical Oxidant Creation; POC), 산성화(Acidification; AC), 부영양화(Eutrophication; EU), 생태독성(Eco-Toxicity; ET), 인간독성(Human Toxicity; HT)이다.

Table 9는 환경영향평가 결과로서, 전체 환경영향은 원자력발전이 7.25E-03 person · yr/F.U., 화력발전이 6.40E-01 person · yr/F.U.의 결과를 나타내었다. 이를 발전시스템의

Table 9. Results of Life cycle environmental impact for each power generation system

Life cycle / Type	Nuclear		Thermal	
	Environmental Impact (person · yr/F.U.)	Contribution (%)	Environmental Impact (person · yr/F.U.)	Contribution (%)
Construction	6.99E-03	96.4	5.80E-03	0.8
Operation	2.37E-04	3.3	6.34E-01	99.1
Demolition & Disposal	1.98E-05	0.3	5.74E-11	0.1
Total	7.25E-03	100	6.40E-01	100

Life cycle 별로 살펴보면, 원자력발전의 경우 건설단계가, 화력발전의 경우 운영단계가 가장 큰 비중을 차지하였으며, 전체적으로 화력발전이 원자력발전에 비해 90배 정도 큰 값, 즉 환경영향을 더 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 두 발전시스템의 각 단계별 환경영향비율을 나타낸 것으로, 건설단계에서 원자력, 화력발전 모두 인간독성영향(각각 98%, 99%)이 가장 큰 비중을 나타냈다. 운영단계에서 원자력발전은 생태독성영향(54%)이, 화력발전은 지구온난화영향(53%)이 큰 환경영향으로 나타났으며, 해체폐기단계에서 원자력발전은 생태독성영향(56%)이, 화력발전은 지구온난화영향(48%)이 가장 큰 환경영향으로 나타났다. 또한, 전체적인 결과에서는, 원자력발전의 경우 인간독성영향(95.6%)이, 화력발전의 경우 지구온난화영향(52.8%)이 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타나 발전 특성에 따라 미치는 환경영향범주가 다르게 나타남을 알 수 있었다.

2.3.3. Case 3 : 방사능 영향을 포함한 환경영향평가

전술한 8대 지구환경영향범주 영향평가 방법은 LCA에서 일반적으로 사용되는 방법론이기는 하지만 방사능에 대한 영향은 고려하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 원자력 발전시스템의 환경성에 대한 좀더 객관적인 평가를 위해, 일반적인 환경영향 뿐만 아니라, 방사능 영향까지 평가에 포함하고 있는 Eco-indicator99²⁰⁾ 방법론을 이용하여 영향평가를 수행하였다. Eco-indicator99는 네덜란드에서 개발된 방법론으로, 환경오염을 야기시키는 배출물질로부터 수용체(인간, 동물, 생태계 등)가 받는 환경 위해성을 크게 인간 건강영향, 생태계영향, 자원사용영향으로 나누어 분석하고, 이를 하나의 환경지수(Pt; Eco-Point)로 통합하여 나타내는 방법이다. 각 영향범주는 세부 영향범주로 구성되어 있으며, 인간건강의 경우, 발암물질영향, 호흡으로 인한 영향, 기후변화로 인한 영향, 방사능에 의한 영향 및 오존층 고갈로 인한 영향으로 구성되고, 생태계의 경우 생태 독성물질로 인한 영향, 산성화 및 부영양화로 인한 영향으로 구성된다. 마지막으로 자원의 경우, 광물자원 고갈로 인한 영향과 화석자원 고갈로 인한 영향이 포함된다.

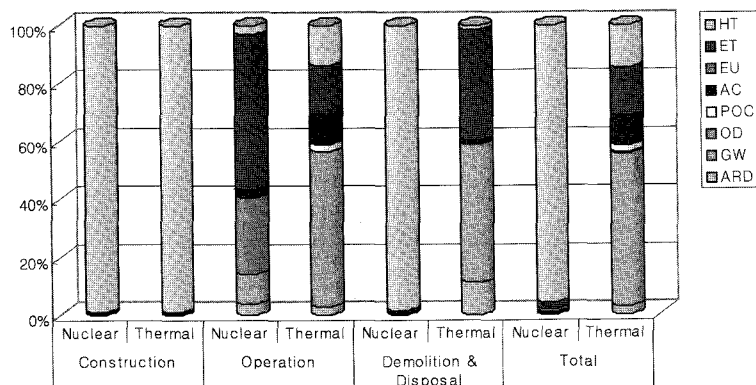


Fig. 3. Distribution of the 8 major environmental categories in life cycle of each power generation system.

Table 10. Results of the Life cycle damage impact for each power generation systems

Life cycle	Nuclear		Thermal	
	Environmental Impact (Pt/F.U.)	Contribution (%)	Environmental Impact (Pt/F.U.)	Contribution (%)
Construction	6.59E+02	16.8	3.43E+02	-
Operation	2.17E+01	0.6	1.57E+05	99.9
Demolition & Disposal	3.25E+03	82.7	2.79E-04	-
Total	3.93E+03	100	1.57E+05	100

Table 10은 전술한 목록분석 결과에 대한 영향평가 결과로서, 전체 환경 영향은 원자력발전이 3.93E+03 Pt/F.U., 화력발전은 1.57E+05 Pt/F.U.의 결과를 나타내었다. 이를 발전시스템의 Life cycle 별로 살펴보면, 원자력발전의 경우 해체 및 폐기처분단계가, 화력발전의 경우 운영단계가 가장 큰 비중을 차지하였으며, 방사능 영향 고려 시, 화력발전이 원자력발전에 비해 40배 정도 큰 환경영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 각 Life cycle 단계별 환경영향 비율을 나타낸 것으로, 원자력, 화력발전 모두 건설단계에서는 생태계영향(각각 72%, 59%)이 가장 큰 환경영향을 받는 것으로 나타났다. 운영단계에서는 두 발전시스템 모두 인간건강(61%, 85%)이 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 해체폐기단계에서는 두 발전시스템이 생태계영향(90%, 69%)이 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 전과정에 걸친 결과에서는 원자력발전은 생태계영향(90%)이, 화력발전은 인간건강영향(89%)이 높은 것을 알 수 있었다.

Table 11. Summary of the results of this study

Type	Nuclear	Thermal	Comparison
Evaluation of CO ₂ emission	4.37E+02	4.99E+06	Thermal Power 10,000 times > Nuclear Power
Evaluation of 8 major environmental categories	7.25E-03	6.40E-01	Thermal Power 90 times > Nuclear Power
Evaluation of environmental categories including radioactive impact	3.93E+03	1.57E+05	Thermal Power 40 times > Nuclear Power

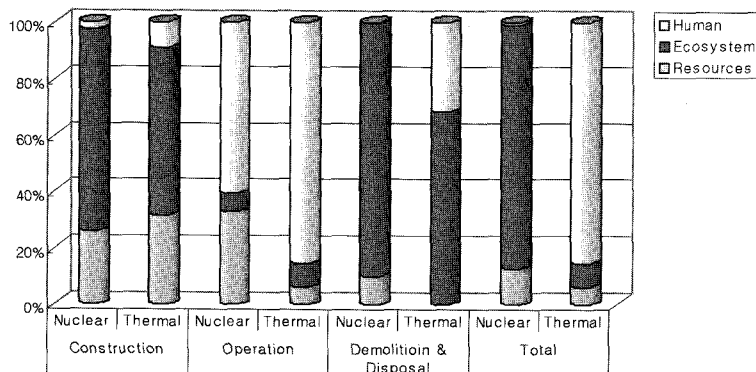


Fig. 4. Distribution of the environmental damage categories in life cycle of each power generation system.

2.4. 결과해석

Table 11에 본 연구에서 시도한 3가지 LCA 환경영향평가 결과를 정리하여 나타내었다.

우선, 단일 환경영향으로서 CO₂ 배출량을 평가한 결과, 원자력발전시스템이 화력발전시스템보다 약 10,000배의 CO₂ 배출량 우위를 보였고, 환경영향범주를 확대하여 8대 지구 환경영향에 대하여 평가 결과, 원자력발전시스템이 화력발전시스템보다 약 90배 정도 환경영향 우위를 보였다. 또한, 환경영향범주에 방사능 영향까지 포함한 영향 평가 결과, 원자력발전시스템이 화력발전시스템보다 약 40배 정도의 환경적 우위를 나타냄을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는, 환경영향을 단일항목에서 복수항목으로 확대하고, 영향범주에 방사능을 포함하느냐의 여부에 따라 화력발전에 비해 절대 우위를 나타내던 원자력 발전의 환경성이 크게 낮아지며, 향후 평가 정도의 향상과 항목의 추가 등에 따라 원자력발전시스템의 친환경성은 지금까지의 연구결과와는 큰 차이가 나는 결과를 보일 수도 있음을 제시하고 있다.

3. 결론

본 연구에서는 국내 전력생산량의 대부분을 차지하고 있는 원자력발전시스템과 화력발전시스템의 전과정, 즉 건설, 운영, 해체 및 폐기처분단계에서의 환경영향을 LCA기법을 이용하여 평가하였다. 두 발전시스템에 대한 영향평가는 각 단계에 대한 목록분석 결과를 이용하여 지구온난화에 주요 영향물질인 CO₂ 배출량에 대하여 단일환경성을 평가하였고, 환경영향범주를 확대하여 8대 지구환경영향에 대하여 평가를 수행하였다. 또한, 일반적 환경영향범주에 방사능 영향까지 더욱 확대하여 두 발전시스템의 환경성을 평가하였다.

그 결과, CO₂ 배출량 평가에서는 원자력이 화력보다 약 10,000배의 환경성 우위를 보였고, 8대 지구환경영향범주에서는 원자력이 화력보다 약 90배 환경성 우위를, 방사능 영향까지 포함한 평가결과에서는 원자력이 화력보다 약 40배의 환경성 우위를 나타내어, 환경영향범주의 확대에 따라 원자력 발전의 친환경성이 크게 낮아짐을 알 수 있었다.

본 연구는 LCA기법을 이용하여 발전시스템 전과정에 대하여 단일 환경영향 및 방사능 영향을 포함한 복수환경영향 분석을 시도한 연구로서, LCA에서 사용하는 방법론, DB의 종류에 따라 발전시스템의 환경성은 본 연구의 결과와 다소 달라질 수도 있다. 향후, 원자력발전시스템의 환경성에 대한 보다 정확하고 객관적인 평가를 위해서는 관련 DB 개발 및 원자력 발전 운전시의 정상 상태 뿐 아니라 사고시의 방사능 영향을 고려할 수 있는 방사능영향 특성화 인자에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술부 원자력연구기반확충사업의 연구비 지원(M2-0214-00-0002)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 에너지경제연구원, 에너지통계연보(2003).
- 강명휘, 정해봉, 정환삼, "원자력발전의 환경영향분석을 위한 LCA 연구," 한국전과정평가학회 학술연구논문 발표회 연구논문집, pp. 85~92(2002).
- Lee, Y. E. and Koh, K. K., "Decision-making of nuclear energy policy: application of environmental management tool to nuclear fuel cycle," *Energy Policy*, **30**(13), 1151~1161(2002).
- IEA(International Energy Agency), *Hydropower-Internalised Costs and Externalised Benefits*(2000).
- ISO (International Organization for Standardization), *Environmental Management - Life Cycle Assessment ; Principles and Framework*(1997).
- 한국전력공사, 울진 3·4 호기 건설 통계 자료집(2000).
- 한국전력공사, 울진 3·4 호기 건설 경험집 제 2권 공정관리(2000).
- 한국중공업, 신인천 복합화력발전소 월간 진도보고서(기전)(2001).
- 대한건설진흥회, *건설공사 표준품셈*(1998).
- 한국수력원자력(주), 울진5·6호기 *Construction Handbook*(2003).
- 김성무, 이임호, "복합화력발전소 건설사례에 대한 적용사례 소개," *대우엔지니어링사보*, **13**(1), 86~104(1996).
- 酒井寛二, *建築活動と地球環境*, 理工圖書(1995).
- 서울시정개발연구원, *건축물 폐재류의 적정처리 및 재활용 방안*(1995).
- Frischknecht R., *Life Cycle Inventories for Energy Systems*, 3rd edition, ESU Services(1996).
- Delft University of Technology, *IDEMAT 2001 library* (2003).
- SAEFL, *Life Cycle Inventories for Packagings Part I and II*(1998).
- 日本電力中央研究所, *ライフサイクルCO₂排出量による原子力発電技術の評価*(2000).
- Meier, P. J., *Life-Cycle Assessment of Electricity Generation System and Application for Climate Change Policy Analysis*, Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison(2002).
- 산업자원부, *환경친화적 산업기반 구축을 위한 환경영표준화 사업*, pp. 19~165(2003).
- Mark, G. K. and Renilde, S., *The Eco-indicator 99 - A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment*, Methodology Report, PRe Consultants B. V.(2000).