2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

국내 주요 발전원의 환경외부비용 추정

Environmental External Cost Estimation of a Major Power Plant Type in Korea

문기환, 김승수

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

동일한 지역인 고리부지에 석탄 500MWe, LNG 450MWe, 원자력 1000MWe 발전소를 각각 1년간 운전할 경우 배출 오염원에 의한 인체영향을 비용화한 결과, 석탄 500MWe 발전소와 LNG 450MWe 발전소 그리고 원자력 1000MWe 발전소는 각각 30.2, 2.4, 0.48 mills/kWh의 환경외부비용이 발생하는 것으로 추정되어 원자력이 가장 환경친화적인 것으로 나타났다. 이 결과는 탈황설비와 탈질설비와 같은 환경설비를 부착하지 않은 결과이며, 이들 설비를 부착하더라도 원자력은 석탄 500MWe와 LNG 450MWe의 5.3, 1.2 mills/kWh에 비해 환경외부비용이 작아 여전히 인체에 영향을 덜 끼치는 발전원임을 알 수 있다.

향후로는 석탄발전소와 LNG 발전소와 같은 화석연료 발전원에서 배출되는 이산화탄소 배출에 의한 지구온난화 영향 등과 수질영향, 사고 등에 따른 환경외부비용의 추정 등이 이루어져 국민의 인체영향을 최소화 할 수 있고 경제적인 발전소를 건설할 필요가 있다. 이를 위해서는 지금까지 주로 수행한 발전원별 경제성에 의존한 발전원별 비교 우위 검증은 한계에 와 있다고 볼 수 있고, 이제는 이와 같은 외부비용을 포함한 다양한 요소를 종합적으로 고려한 발전원간의 비교우위 검증이 필요하다고 하겠다.

Abstract

As for coal, LNG, and nuclear power plant, environmental external costs were estimated. The estimation covered health and/or crops impacts caused by ambient pollutants such as PM10, SO2, sulfates, nitrates, and radioactive isotopes, for one year operation basis.

According to the results, in the case of without installation of FGD and DE-NOx to coal and LNG, nuclear power(0.48mills/kWh) has economic competitiveness over coal (30.2mills/kWh) and LNG(2.4mills/kWh) power plant. And also, in the case of installation of FGD and DE-NOx to coal power plant and DE-NOx for LNG power plant, nuclear power appears to be the most economical option.

Further study is required in the field of environmental external costs of global impact, water impact, and accident impact in order to properly capture the whole impacts on public health and agricultural crops.

1. 서 론

에너지 특히 전기에너지는 깨끗하고 이용이 편리한 특성으로 앞으로도 그 이용이 증가할 전망이다. 이와 같은 에너지의 이용은 산업활동의 필수요소인 반면에 환경을 오염시키기도 한다. 이러한 배경 하에 대두된 지속가능개발 개념도 결국은 개발과 환경이라는 두 마리의 토끼를 잡아보기 위한 방안이라고 볼 수 있다. 지금까지 전력회사는 사적비용인 자본비, 운전유지비, 연료비 등의 원가 요소만을 고려해 왔고, 전력생산 과정에서 발생하는 오염원에 의한 인체피해와 같은 외부비용은 고려하지 않았다. 그러나 지속가능한 개발이라는 대명제하에서 전력회사들의 사적비용에 의한 전원구성과 같은 의사결정은 한계에 부닥칠 수밖에 없으며, 환경 피해에 의한 외부성 등을 고려할 필요가 제기되고 있다. 이러한 외부성의 고려에는 다양한 방법이 있을 수 있으나 본 연구에서는 발전원별로 환경오염물질 배출에 의한 인체피해를 비용화함으로써 환경외부성을 고려한 전원구성의 기초자료를 생산하고자 하였다. 본 연구에서 환경외부이용의 산정을 위해 사용한 프로그램은 IAEA에서 개발한 B-GLAD(석탄 및 LNG 발전소)와 원자력발전소 운영에 따른 외부비용 추정용 엑셀 스프레드시트를 이용하였다.

이를 위해 본 연구는 다음의 내용으로 구성되어 있다.

먼저 석탄화력, LNG, 원자력발전소의 환경외부비용을 산정하기 위하여 필요한 입력자료를 정리하였다. 이들 입력자료는 발전소 특성 자료, 환경자료, 비용자료 등으로 구성되어 있다. 특히 석탄화력의 경우는 탈황설비와 탈질설비와 같은 환경설비가 포함되는 경우의 효과를 살펴보기 위한 자료가 포함되어 있다. 다음으로는 발전원별 대기오염물질 배출에 의한 인체영향과 곡물영향의 환경외부비용을 산정하였다. 분석 대상 발전소는 석탄 500MWe, LNG 450 MWe, 그리고 원자력 1000MWe를 고려하였는데, 이는 이들 발전원이 국내 전원계획에서 주요 후보 발전원으로 고려되고 있기 때문이다. 또한 이 절에서는 환경설비의 부착에 대한 효과를 살펴보기 위하여 비용편익 분석도 수행하였다. 마지막으로 이들 결과에 대한 종합적인 결론을 맺었다.

2. 주요 입력자료

본 연구의 주요 목적 중의 하나인 발전원별 환경외부비용을 산출하기 위해 필요한 입력자료를 발전원별 공통의 입력자료, 화석연료 발전원(석탄, LNG) 관련 입력자료, 원자력 관련 입력자료로 구분하여 정리하였다. 본 연구에서 이용한 B-GLAD 패키지는 QUERI, RUWM, URBAN, AIRPACTS 등 4개의 독립된 프로그램으로 구성되어 있으며, 아래의 표 1.2-1은 이들 4개 모형에 대한 주요 입력자료를 정리한 것이다. 이 표에 포함되어 있는 SUWM(Simple Uniform World Model)은 별도의 프로그램이 아니고 4개 독립 프로그램에서 권역권(Regional)[1]의 영향을 평가할 때 이용하는 가장 단순한 프로그램이다. RUWM(Rubust Uniform World Model)은 권역권의 영향은 SUWM으로 평가하지만 지역권(Local)[2]의 영향은 수학적 모형을 이용하여 평가한다. 그리고 RUWM Est. 1은 오염원을 배출하는 연돌 높이를 고려하지 않지만, Est. 2는 이를 고려한다는 것이 이들의 가장 큰 차이점이다. QUERI Est. 1과 Est. 2는 SUWM의 결과를 오염원의 위치와 연돌 높이(QUERI Est. 2의 경우에 고려됨) 등을 고려하여 수정하여 영향을 평가한다. QUERI Est. 3의 경우는 상세한 지역권의 인구분포 자료와 연간 일별 기상자료를 이용하여 영향을 평가한다. RUWM이 수학적 모형을 이용하여 영향을 평가하지만, QUERI는 반실험식(Semi-empirical formula)을 이용하여 평가한다. URBAN은 오염원이 도시 근처에 있을 때 환경영향을 평가하기에 적합한 프로그램이며, QUERI Est.3이 상세한 일별 기상자료를 이용하는 반면에 연간 평균 자료를 이용하는 차이가 있다. AIRPACTS는 QUERI 또는 RUWM의 결과를 이용하여 환경영향을 평가하기 때문에 인체영향은 동일한 결과를 도출하지만, SO_2에 의한 농작물 영향과 본 보고서에서는 고려하지는 않았지만 석회석, 아연, 페인트 등과 같은 재료에의 영향을 평가할 수 있는 프로그램이다. 이들 4개의 독립된 프로그램은 동일

---

1) 오염원으로부터 사방 50km 이상 1000km 이내의 지역을 의미함.
2) 오염원으로부터 사방 50km 이내의 지역을 의미함.

한 자료를 이용하더라도 영향을 평가하는 방법과 특성의 차이로 인해 평가 결과의 차이가 존재한다. 그러므로 사용자는 이들의 결과를 종합적으로 판단하여 이용하는 것이 바람직하다.

표 1.2-1 B-GLAD 패키지에 포함된 4개 독립 프로그램의 주요 입력자료

입력자료	SUWM	RUWM		URBAN	QUERI			AIRPACTS
		Est.1	Est.2		Est.1	Est.2	Est.3	
지역 특성 구분자료(도시, 시골 등)		∨	∨		∨	∨		
지역권 인구밀도		∨	∨		∨	∨		∨
지역권 인구분포				∨			∨	
권역권 인구밀도	∨	∨	∨	∨	∨	∨	∨	∨
연돌 높이			∨	∨		∨	∨	∨
연동 지름			∨	∨				
연돌 배출량					∨	∨	∨	
연돌 출구 유속			∨	∨			∨	∨
연돌 출구온도			∨	∨	∨	∨	∨	∨
오염원 배출량	∨	∨	∨	∨	∨	∨	∨	∨
오염원 감속속도	∨	∨	∨	∨	∨	∨	∨	∨
연간 평균 풍속			∨	∨				
연간 평균 기온			∨	∨				
연간 대기안정도			∨	∨				
연간, 시간별, 기상자료(기온, 온도, 풍속)							∨	

가. 공통 자료

(1) 분석대상 지역

본 연구에서는 고리 지역을 대상으로 환경외부비용을 분석하였다. 그 이유는 현재 고리지역은 원자력발전소가 위치해 있고 대규모 인구 밀집지역이 인접해 있어서 환경에 대한 중요성이 부각되고 있는 지역이기 때문이다. 또한 이 지역은 본 연구에서 분석하고자 하는 동일지역에서의 발전원별 환경외부비용 평가 및 비교를 위해서도 적합한 지역이다. 그 이유는 일반적으로 화석연료 발전소는 원자력발전소에 비해 입지조건이 까다롭지 않으므로 기존에 원자력발전소가 위치하고 있는 고리지역의 경우 화석연료 발전소를 건설하는 가정에 큰 무리가 없기 때문이다. 고리 부지는 동경 129° 17.4′과 북위 35° 19.1′에 위치하고 있으며, 한국의 표준시간은 동경 135도를 기준으로 하고 있다.

(2) 인구자료

고리 부지를 중심으로 사방 50km 내에 있는 지역 인구는 1999년 기준으로 7,019,310명으로 추정되었다. 그리하여 이 지역권 내의 평균 인구밀도는 702명/km^2이며, 표 1.2-2를 통해 알 수 있는 바와 같이 주요 인구밀집 지역으로는 고리 북부 27km 지점에 위치한 울산과 남서부 24km 지점에 위치한 부산으로 나타났다. 또한 고리는 해안지역에 위치해 있기 때문에 사방 50km 내의 50% 정도는 사람이 살지 않는 바다임을 알 수 있다.

표 1.2-2 고리 부지 중심 사방 50km 내의 지역권 인구분포

	-45km	-35km	-25km	-15km	-5km	5km	15km	25km	35km	45km
45km	1,400	1,400	2,825	2,825	5,175	5,175	3,225	3,225	-	-
35km	1,400	1,400	2,825	2,825	5,175	5,175	3,225	3,225	-	-
25km	4,225	4,225	14,800	13,400	175,400	175,600	175,700	-	-	-
15km	4,225	4,225	17,600	10,176	6,343	23,805	1,062	-	-	-
5km	8,225	8,225	26,600	9,521	10,645	3,284	-	-	-	-
-5km	8,225	8,225	449,000	6,547	10,391	-	-	-	-	-
-15km	79,025	79,025	449,000	41,944	16,192	-	-	-	-	-
-25km	79,025	79,025	3,189,800*	67,700	-	-	-	-	-	-
-35km	427,100	427,100	-	-	-	-	-	-	-	-
-45km	427,100	427,100	-	-	-	-	-	-	-	-

주 1) 가운데의 검은 점은 발전소가 위치하는 지점으로 오염원이 배출되는 지점을 의미함.
2) (*)한 지점은 오염원 배출지점에서 서쪽으로 25km, 남쪽으로 25km 되는 지점인 부산 지역을 의미하며, 하나 셀의 크기인 10km x 10km 내에 인구가 약 3,189,800명이 분포되어 있음을 의미함.

고리를 중심으로 반경 1000km 내에 있는 인구밀도는 QUERI의 실행을 위해 필요한 입력자료이다. 이를 위해 본 연구에서는 표 1.2-3과 같이 해당 국가의 인구밀도와 면적비율 등을 고려하여 추정하였으며, 추정결과 권역(regional) 인구밀도는 126명/km^2로 나타났다. 또한 QUERI 모형에서는 부지의 특성을 규정하기를 요구하는데 본 연구에서는 대단위 도시로부터 40km 내에 고리가 위치해 있기 때문에 site ID를 5[3]로 가정하였다.

표 1.2-3 고리 중심 반경 1000 km 내의 권역 인구밀도

	인구밀도 (명/km^2)	면적비율 (%)	추정 인구밀도 (명/km^2)
한국	472	10	47
북한	184	10	18
중국	136	20	27
일본	336	10	34
바다	0	50	0
권역 인구밀도			126

(3) 기상 자료

고리 지역의 연평균 풍속과 기온은 각각 1.9 m/s와 13.9℃로 나타났다. 이와 같은 기상자료는 고리지역과 가까이에 위치한 일광지역의 무인자동기상기록장치의 결과를 이용하였다. 기상자료에는 기온, 풍향, 풍속 등의 자료를 포함하고 있으며, 하루 24시간, 365일의 자료로 구성되어 있다. 한편 대기안정도는 대기의 확산용량을 설명해주는데 고리지역의 대기 안정도는 표 1.2-4

3) 부지의 인구밀도와 위치 등을 고려하여 7가지로 구분하고 있음.
- Site ID=0: 농촌지역(지역인구밀도/권역인구밀도 < 1)
- Site ID=1: 소규모 도시지역(지역인구밀도/권역인구밀도 < 6)
- Site ID=2: 중규모 도시지역(지역인구밀도/권역인구밀도 < 10)
- Site ID=3: 대규모 도시지역(지역인구밀도/권역인구밀도 > 10)
- Site ID=4: 대규모 도시로부터 25km 이내 위치
- Site ID=5: 대규모 도시로부터 40km 이내 위치
- Site ID=6: 대규모 도시로부터 40km 이상 위치

에서 알 수 있는 바와 같이 안정상태를 나타내는 Pasquill dispersion class E, F가 72% 정도 차지하는 것으로 나타났다.

표 1.2-4 고리지역의 대기안정도

Pasquill dispersion class	대기안정도	발생빈도 (%)
A	극히 불안정 대기	0.23
B	보통 불안정 대기	0.44
C	약간 불안정 대기	2.18
D	보통 대기	25.25
E	안정대기	66.80
F	극히 안정대기	5.10

나. 석탄과 LNG 자료

(1) 발전소 자료

본 연구에서는 화석연료 발전원의 경우 석탄화력 500MWe와 LNG 450 MWe 만을 고려하였고 석유화력 발전소는 고려하지 않았다. 이는 우리 나라에서 석유발전소는 더 이상 전원계획에서 중요한 후보 발전원으로 고려하지 않고 있지만, 석탄화력과 LNG는 미래의 후보발전원으로서 적극적인 도입을 고려하고 있기 때문이다. 표 1.2-5는 석탄발전소와 LNG발전소 관련 주요 자료를 나타낸다.

표 1.2-5 석탄발전소와 LNG 발전소 자료

	단위	석탄발전소	LNG발전소
발전소용량	MWe	500	450
연돌높이	m	150	75
연돌 출구 온도	℃	90	82
연돌 출구 유속	m/s	13.0	10.2
연돌 배출량	Nm^3/s	500	200
풍속계 높이	m	10	10
연돌 지름	m	7	5

(2) 환경 자료

표 1.2-6은 석탄과 LNG 발전소 등 화석연료 발전원의 환경오염물질 배출계수를 나타낸다.

표 1.2-6 석탄발전소와 LNG발전소의 환경오염물질 배출계수

오염원	단위	석탄발전소		LNG발전소	
		환경설비미부착	환경설비부착	환경설비미부착	환경설비부착
황산화물(SO_x)	g/초	269.7	27.0	0.0	0.0
질산화물(NO_x)	g/초	103.0	51.5	30.1	15.0
분진(PM_{10})*	g/초	15.8	15.8	0.04	0.04
황산화물(SO_x)	ton/년	8506.5	850.7	0.0	0.0
질산화물(NO_x)	ton/년	3247.3	1623.6	948.5	474.3
분진(PM_{10})*	ton/년	499.8	25.0	1.3	0.1

주) * : PM_{10}은 분진의 입자크기가 10마이크론(㎛)이하 크기의 먼지 농도를 말한다. 미국, 일본 등 선진국에서는 주로 PM_{10}으로 규제하고 있으며 우리 나라도 PM_{10}을 대기환경보전법에서 규제할 계획임. 또한 본 연구에서는 집진기가 부착된 경우의 배출 계수를 이용하였는데 이는 대부분의 발전소가 집진설비가 부착되었기 때문임.

이 표는 환경설비를 부착하는 경우와 부착하지 않는 경우에 대한 배출계수를 포함하고 있으며, 환경설비로는 황산화물(SO_x) 배출저감을 위한 탈황설비와 질산화물(NO_x) 저감을 위한 탈질설비가 고려되었다. 분진(PM_{10})을 위한 집진설비의 경우는 대상발전소에 부착되어 있는 경우를 가정하였는데 이는 대부분의 국내 발전소가 이 시설을 부착하고 있기 때문이다. 이들 탈황설비와 탈질설비의 효율은 각각 90%, 50%로 가정하였다. 여기에서 환경설비를 부착하는 경우의 배출계수는 본 절의 환경설비를 부착할 경우의 비용-편익 분석 시에 이용되었다.

(3) 농작물 생산량 및 가격자료

고리지역의 대표적인 농작물로는 표 1.2-7에 나타난 바와 같이 쌀, 보리와 밀, 콩, 고구마, 감자, 무, 배추, 고추 등을 들 수 있다. 이들 농작물 자료는 AIRPACTS 프로그램에서 황산화물(SO_x)에 의한 농작물 피해를 추정하기 위해 이용된다.

표 1.2-7 고리지역의 주요 농작물 생산량 및 가격

	연간 생산량 (ton/km^2)	가격 (US$/ton)
쌀	43.98	1,727
보리 및 밀	1.37	836
콩	0.84	2,796
고구마	5.38	761
감자	6.66	771
무	3.25	158
배추	11.23	173
고추	12.80	4,517

(4) 노출반응함수 기울기(Exposure Response Function Slope, ERF), 노출피해대상비율, 단위피해비용

국내의 ERF 자료가 없기 때문에 본 연구에서는 ExternE[4]의 결과를 인용하였다. 또한 환경오염원에 의한 피해비용 자료는 ExternE의 연구결과를 PPPGNP[5]를 이용하여 보정하였다. 위험노출그룹은 고리지역의 인구자료를 이용하였으며, 이상의 자료를 요약하면 표 1.2-8과 같다.

4) 전기생산을 위한 다양한 연료(화석, 원자력, 신재생)주기와 에너지절약 등과 관련된 외부비용을 평가하기 위하여 유럽연합은 미국 에너지부의 협력하에 1991년 ExternE(Externalities of Energy) 프로젝트를 착수하였음. 동 프로젝트에는 15개국 50개 이상의 기관이 참여하여 에너지-환경-경제 부문의 의사결정에 필요한 많은 기초 자료를 생산하고 있음.

5) 국별 경제활동을 비교하기 위하여 UN의 국제비교프로그램(UN's International Comparison Programme)에 의해 개발된 개념임. 이는 1달러로 미국에서 살 수 있는 재화의 양을 자국 시장에서 구매할 경우 필요한 화폐의 양을 말하며, 결국 PPPGNP(Purchasing power parity of GNP)는 국별 상대적 구매지수를 의미함.

표 1.2-8 노출반응함수 기울기, 노출피해대상비율, 단위 피해비용

대상 그룹	오염원	인체영향	노출반응 함수 기울기	노출피해 대상비율 (%)	단위 피해비용 ($/case)
성인	-분진(PM_{10}) -질산염(Nitrates)	만성 기관지염	2.45E-05	72.9	134,905
		활동 제약일수	2.50E-02	72.9	88
		천식(기관지 확장제 이용)	1.63E-01	72.9	32
		심장질환(65세이상)	1.85E-05	9.8	2,595
	-황산염 (Sulfates)	활동 제약일수	4.20E-02	72.9	88
		만성 기관지염	3.90E-05	72.9	134,905
미성인	-분진(PM_{10}) -질산염 (Nitrates)	만성 기침	2.07E-04	27.1	191
		천식(기관지 확장제 이용)	7.75E-02	27.1	32
성인 + 미성인	-황산화물(SO_x)	급성 사망	5.34E-06	100.0	132,022
		호흡기질환 병원 입원	2.04E-06	100.0	3,445
	-분진(PM_{10}) -황산염(Sulfates)	지연 사망	1.57E-04	100.0	76,633
		호흡기질환 병원 입원	2.07E-06	100.0	3,445
	-분진(PM_{10}) -질산염(Nitrates)	뇌혈관 질환 병원 입원	5.04E-06	100.0	13,354

주 1) 성인은 18세 이상을 미성인은 18세 미만으로 구분함.
2) 노출반응함수 기울기는 노출피해 대상들이 단위 오염원(mg/m^3)에 의해 피해를 입는 연간 건수를 의미함.
3) 노출피해 대상비율은 해당 오염원에 의해 인체영향을 받는 분석대상 인구가 전체 고리부지 사방 50km내의 전체 인구에서 차지하는 비율을 의미함.
4) 단위 피해비용은 오염원에 의해 야기되는 인체영향 발생 건당 단위비용을 의미함.

3. 원자력 관련 자료

본 연구에서의 원자력 관련 자료는 한국형 표준원전의 모체인 영광 3,4 호기의 최종안전성분석보고서 자료를 이용하였다. 표 1.2-9와 표 1.2-10은 원자력의 정상운전시에 발생하는 환경외부비용을 산정하기 위한 주요 입력자료를 나타낸다. 본 연구의 대상지역은 화석연료 발전원과 마찬가지로 고리지역이므로 풍속과 지역 인구밀도는 1.9 m/s와 702명/km^2로 같다. 연평균 호흡량은 7400 m^3/년으로 가정하였고 나머지 자료는 IAEA 자료를 인용하였다.[6)7)]

표 1.2-9 기체폐기물 계통에서 방출되는 방사능 양

핵 종	방사능(Bq/s)
H-3	1.29E+05
C-14	8.56E+03
Co-58	8.10E-01
Co-60	1.65E-01
Kr-85	1.04E+06
I-131	8.91E+01
I-133	2.93E+02
Xe-133	3.63E+06
Cs-134	8.00E-02
Cs-137	1.55E-01

6) Markandya A., Boyd R (1999b), *Valuing the Human Health Effects of Routine Atmospheric Release from Nuclear Power Facilities*, 1999. 5
7) 여기에서 언급하지 않은 자료는 Markandya A.가 개발한 "Impacts of Atmospheric Releases.xls" 내의 기본입력 자료를 사용하였음.

표 1.2-10 고리 부지의 주요 농축산물 자료

	생산량 (t/km^2)	면적 점유비율 (%)
소	0.43	2.27
곡물	452.15	13.35
엽채류	2719.15	1.89
근채류	2832.56	1.73
우유(젖소)	0.50	0.54

주) 면적 점유비율은 고리 부지 중에서 해당 농축산물이 차지하는 면적의 비율을 의미함.

3. 발전원별 환경외부비용 추정

가. 기준 발전소

본 연구에서는 석탄 500MWe, LNG 450MWe, 원자력 1000MWe를 기준 발전소로 하여 이들에 대한 환경외부비용을 산출하였다. 석탄과 LNG의 화석연료 발전원은 분진(PM_{10}), 황산화물(SO_x), 질산화물(NO_x)와 같은 환경오염물질의 대기방출에 의한 인체 및 곡물 영향을 고려하였고, 원자력의 경우는 방사성물질의 대기 방출에 의한 인체영향을 고려하였다. 본 절의 석탄과 LNG에 대한 인체영향은 탈황설비와 탈질설비와 같은 환경설비를 부착하지 않은 경우의 결과이다.

석탄과 LNG의 경우, QUERI, URBAN 모형에 의한 연간 피해 규모 결과를 인체영향별로 비교하였다. 또한 RUWM과 AIRPACTS 계산 모듈에 의한 외부비용의 종합 결과를 QUERI와 RUWM 등의 결과와 종합적으로 비교하였다.

(1) 석탄 500MWe 발전소

탈황설비와 탈질설비와 같은 환경설비를 부착하지 않은 경우의 석탄 500MWe에 대한 QUERI와 URBAN의 환경오염물질에 의한 인체영향 결과는 표 1.2-11과 같다. 본 연구에서 이들 두 모형을 중심으로 살펴보는 것은 QUERI 모형의 경우 가장 상세한 기상자료를 이용하여 지역(local) 영향을 평가하며, URBAN 모형은 오염원 배출이 이루어지는 고리지역이 대도시인 부산과 울산 등과 가까이에 위치해 있는 경우 적합한 모형이기 때문이다. 권역(regional) 영향은 두 모형 모두 SUWM 모형을 이용한다.

QUERI 모형의 경우 이 표의 결과에서도 나타난 바와 같이 PM10과 SO_2와 같은 1차 오염원의 인체영향의 경우, URBAN의 결과가 QUERI Est.3의 결과에 비해 2.4배정도 큰 것으로 나타났다. 이는 1일 기상 자료를 이용하는 QUERI 모형과 연간 평균 기온과 풍속 및 대기안정도 자료를 이용하는 URBAN 모형의 특성에 기인한다. 마찬가지로 2차 오염원인 황산염(Sulfates)과 질산염(Natrates)의 인체영향은 URBAN이 QUERI에 비해 2.9배, 1.8배정도 더 큰 것으로 나타났다. 이 표에는 나타나지는 않았지만 URBAN과 QUERI는 권역(regional) 영향은 같기 때문에 지역(local) 영향의 차이에 의한 결과라고 볼 수 있다. 결국 QUERI와 URBAN 모형의 실행결과 총 외부비용은 18.08 mills/kWh와 43.51 mills/kWh 정도 되는 것으로 추정된다.

두 결과를 통해 볼 때 석탄화력 500 MWe의 대기오염물질 배출에 의한 인체영향인 환경외부비용은 평균적으로 약 30.8 mills/kWh[8] 정도 된다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 또한 RUWM과 AIRPACTS 모형을 실행하였으며 이들의 결과를 종합적으로 비교한 결과가 표 1.2-12이다. 이 표의 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 QUERI와 AIRPACTS의 결과의 차이는 황산화물(SO_x)에 의한 농작물의 비료효과(fertilizer effects)를 AIRPACT에서 고려하는 데서 기인한다. 하지만 인체영향은 QUERI의 결과를 AIRPACTS에서 이용하였기 때문에 차이가 나지 않는다. 한편 QUERI와 RUWM의 결과의 차이는 1차 오염원

8) 이 값은 QUERI와 URBAN 두 모형 결과의 평균값인 30.8 mills/kWh(=(18.08+43.51)/2)을 참고로 한 것임.

의 차이에서 기인하며, 이는 QUERI가 지역의 사방 50km의 인구분포 자료를 이용한 반면에 RUWM은 지역의 인구밀도 자료를 이용하는 데서 오는 차이가 가장 큰 원인이라고 볼 수 있다. 다시 말해 이는 사방 50km 내의 인구분포를 50% 정도가 바다로 이루어져 50% 정도만이 사람이 사는 것으로 보는 것과 모든 지역에 고루 인구가 분포되어 있다는 가정에서 오는 차이의 결과인 것이다. 결국 4개의 모형의 결과를 통해 볼 때 석탄화력 500MWe 발전소의 대기오염물질 배출에 의한 인체영향인 환경외부비용은 16.98~43.51mills/kWh 정도되는 것으로 평가되어 평균적으로 약 30.2 mills/kWh[9] 정도 된다고 볼 수 있다.

표 1.2-11 석탄 500MWe 발전소의 QUERI와 URBAN 모형 결과

(단위: mills/kWh)

오염원	인체영향 부문	QUERI	URBAN
분진 (PM_{10})	만성 기관지염	0.241	0.359
	활동 제약일수	0.161	0.239
	천식(기관지 확장제 이용)	0.448	0.667
	심장질환(65세이상)	5E-4	0.001
	만성 기침	0.001	0.002
	지연 사망	1.205	1.795
	호흡기질환 병원 입원	0.001	0.001
	뇌혈관 질환 병원 입원	0.007	0.010
	소 계	2.065	3.074
황산화물 (SO_x)	급성 사망	1.122	1.706
	호흡기질환 병원 입원	0.011	0.017
	소 계	1.133	1.723
황산염 (Sulfates)	만성 기관지염	2.150	6.337
	활동 제약일수	1.510	4.450
	지연 사망	6.745	19.873
	호흡기질환 병원 입원	0.004	0.012
	소 계	10.409	30.673
질산염 (Nitrates)	뇌혈관 질환 병원 입원	0.035	0.063
	만성 기관지염	1.257	2.260
	활동 제약일수	0.837	1.504
	천식 (기관지 확장제 이용)	2.334	4.198
	심장질환(65세이상)	0.002	0.004
	만성 기침	0.006	0.010
	소 계	4.471	8.040
총 계		18.078	43.509

표 1.2-12 석탄 500MWe 발전소의 모듈별 계산 결과 비교

(단위: mills/kWh)

	QUERI	RUWM	URBAN	AIRPACTS
분진(PM_{10})	2.06	3.80	3.07	2.06
황산화물(SO_x)	1.13	2.06	1.72	1.13
황산염(Sulfates)	10.41	10.41	30.67	10.41
질산염(Nitrates)	4.47	4.47	8.04	4.47
농작물	-	-	-	-1.10
총 계	18.08	20.74	43.51	16.98

9) 이 값은 QUERI와 URBAN 두 모형 결과의 평균값인 30.8 mills/kWh(=(18.08+43.51)/2) 보다는 AIRPACTS 모형의 비료효과에 의한 결과를 사용하는 관계로 30.2 mills/kWh(=(16.98+43.51)/2)로 약간 낮은 값을 갖게 됨.

(2) LNG 450MWe 발전소

LNG 450MWe 발전소의 결과도 COAL 500MWe 발전소의 결과와 유사하다. LNG 450MWe 발전소의 경우는 SO_x를 배출하지 않아 이에 대한 환경영향이 없기 때문에 분진(PM_{10})과 질산염(nitrates)에 대한 영향만을 평가하였으며 그 결과는 표 1.2-13과 같다. QUERI 모형의 결과에 비해 URBAN 모형의 결과가 2.2배정도 되는 것으로 평가되었다. 질산염(nitrates)에 의한 영향이 거의 대부분을 차지하며, 그 중에서 52% 정도가 천식 질병에의 영향인 것으로 나타났다. 표 1.2-14는 고리지역에 LNG 450MWe를 1년간 운영할 때 발생하는 총 환경외부비용의 모형별 추정결과이며, URBAN 모형을 제외한 나머지 3개 모형의 결과는 거의 같은 것으로 나타났다. 이들 결과를 종합해 보면 환경외부비용은 1.46~3.25 mills/kWh 정도로 나타나 평균적으로 2.4 mills/kWh 정도 된다고 볼 수 있다.

표 1.2-13 LNG 450MWe 발전소의 QUERI와 URBAN 모형 결과

(단위: mills/kWh)

오염원	인체영향 부문	QUERI	URBAN
분진 (PM_{10})	만성 기관지염	0.001	0.001
	활동 제약일수	5E-4	0.001
	천식(기관지 확장제 이용)	0.001	0.002
	심장질환(65세이상)	1E-6	3E-6
	만성 기침	3E-6	1E-5
	지연 사망	0.004	0.006
	호흡기질환 병원 입원	2E-6	4E-6
	뇌혈관 질환 병원 입원	2E-5	4E-5
	소 계	0.006	0.011
질산염 (Nitrates)	뇌혈관 질환 병원 입원	0.011	0.013
	만성 기관지염	0.408	0.915
	활동 제약일수	0.272	0.609
	천식 (기관지 확장제 이용)	0.758	1.699
	심장질환(65세이상)	0.001	0.002
	만성 기침	0.002	0.004
	소 계	1.452	3.242
총 계		1.458	3.253

표 1.2-14 LNG 450MWe 발전소의 모듈별 계산 결과 비교

(단위: mills/kWh)

	QUERI	RUWM	URBAN	AIRPACTS
분진(PM_{10})	0.01	0.01	0.01	0.01
질산염(Nitrates)	1.45	1.45	3.24	1.45
총 계	1.46	1.46	3.25	1.46

(3) 원자력 1000MWe 발전소

본 연구에서는 원자력 1000MWe 발전소의 1년간 정상운전에 따른 환경외부비용을 추정하기 위하여 IAEA에서 Microsoft Excel 소프트웨어를 이용하여 개발한 프로그램 이용하였다.[10] 이 프로그램은 원자력발전소의 운전에 의해 발생하는 방사성물질의 대기로의 방출에 의한 인체영향 평가를 주목적으로 한다. 인체에 의한 평가는 직접적으로 인체에 영향을 미치는 것과 오염된 농작물 동물의 섭취에 의한 영향 등을 포함한다. 또한 영향권을 지역권(local), 권역권

10) Markandya A.가 개발한 "Impacts of Atmospheric Releases.xls"를 말함.

(regional), 지구권(global)[11]으로 나누었으며, 영향권별로 인체영향을 살펴보았다.
표 1.2-15는 정상운전 상태에서의 지역권, 권역권, 지구권에 미치는 인체영향 결과를 나타낸다. 이 표에서도 알 수 있는 바와 같이 지구권으로 미치는 인체영향이 가장 큰 83.5%를 차지하는 것으로 나타났다.

표 1.2-15 원자력발전소 정상운전에 따른 인체 영향

인체영향 부문	영향권별 인체영향(man-SV/년)		
	지역권	권역권	지구권
치명적 암	1.79E+00	3.16E-01	3.83E-02
비치명적 암	4.29E+00	7.58E-01	3.83E+01
치명적 유전자 영향	3.58E-01	6.31E-02	3.06E-03
총 계 (100.0%)	6.44E+00 (14.0%)	1.14E+00 (2.5%)	3.84E+01 (83.5%)

주) 괄호 안은 전체 인체영향(45.98(man-SV/년)에서 각 영향 지역에서 받는 영향의 비율을 의미함.

또한 표 1.2-16은 표 1.2-15에서 도출한 인체영향 결과를 이용하여 추정한 원자력 1000MWe의 환경외부비용 결과이다. 이 결과에 의하면 총 환경외부비용은 0.48 mills/kWh로 나타났다. 또한 총 비용 중에서 치명적 암, 비치명적 암, 치명적 유전 영향의 비중은 각각 8.3%, 63.3%, 28.4%를 차지하는 것으로 나타났다.

표 1.2-16 원자력 1000MWe 발전소의 환경외부비용

인체영향 부문	권역별 환경외부비용[주1)]				
	지역권	권역권	지구권	계	
	US$/년	US$/년	US$/년	US$/년	mills/kWh[주2)]
치명적 암	2.03E+05	3.58E+04	4.06E+04	2.79E+05	0.04
비치명적 암	4.87E+05	8.60E+04	1.55E+06	2.12E+06	0.30
치명적 유전 영향	4.06E+04	7.17E+03	9.04E+05	9.52E+05	0.14
계	7.31E+05	1.29E+05	2.49E+06	4.35E+06	0.48

주1) 인체영향(표 1.2-15)에 대한 권역별 환경외부비용 산출을 위해서 이용된 한국인의 평균 단위비용은 113,497$/man-Sv임.[12)]
2) 이용율은 80%를 가정함.

나. 환경설비 부착의 비용-편익 분석(석탄 500MWe 발전소와 LNG 450MWe 발전소)

(1) 환경설비 부착 비용
앞에서도 언급한 바와 같이 본 연구에서 고려하고 있는 환경설비는 탈황설비와 탈질설비이며, 이들의 비용을 산정하기 위한 주요 입력자료와 가정은 표 1.2-17과 같다.

---

11) 지역권과 권역권은 앞에서 정의한 바 있고 지구권의 경우는 환경오염원으로부터 100km 이상의 지역을 의미함.
12) 이 값은 한국과학기술원 최광식 박사의 2001년도 학위 논문인 『원자력안전 규제분석을 위한 방사선피폭 금전환산계수 산정에 관한 연구』에서 제시한 수치를 환율로 보정하여 산정한 값임.
동 논문에서는 한국인의 대표치로 130백만원/man-Sv를 제시하였으며, 이 값을 1999년의 환율인 1145.4원/$로 보정한 값을 본 보고서에서 이용하였음.

표 1.2-17 환경설비 관련 주요 가정

	단위	값
용량	MWe	500
수명기간	년	25
이용율	%	80
할인율	%	8
환율('99)	원/$	1145.4

이들 가정과 환경설비에 대한 투자비와 연간 운영비 자료를 이용하여 비용을 산정한 결과는 표 1.2-18과 같다. 이 표의 결과에서 알 수 있듯이 총 환경시설 비용은 4.86 mills/kWh이며, 이 중에서 탈황설비와 탈질설비의 환경설비 비용은 각각 3.26 mills/kWh와 1.60 mills/kWh로 분석되었다.

표 1.2-18 환경설비 비용

환경설비	투자비 (10억원)	연간운전유지비 (10억원)	연간 총비용 (10억원)	원/kWh	mills/kWh
탈황설비	500	84.2	131.04	3.74	3.26
탈질설비	200	45.3	64.04	1.83	1.60
계	700	129.5	195.08	5.57	4.86

나. 환경설비 부착 편익

환경설비 부착의 편익을 분석하기 위해서 본 연구에서는 환경설비를 부착하지 않은 경우에 비해 환경설비를 부착함으로써 감소되는 환경외부비용을 편익으로 정의하였다.

본 연구에서는 편익의 평가를 위해 QUERI와 URBAN 모형의 결과를 이용하였다. 그리고 분진(PM_{10})을 위한 분진설비는 기본적으로 발전소에 장착하는 것으로 가정하였기 때문에 편익 추정시에는 영향이 없다.

표 1.2-19는 석탄 500MWe 발전소에 탈황설비와 탈질설비를 장착하는 경우의 비용-편익 분석 결과이다. 먼저 QUERI 모형의 결과에 의하면, 총 편익은 12.614 mills/kWh이며, 이 중에서 황산염(sulfates)에 의한 편익이 가장 커서 전체의 74.3% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 1차 오염원인 황산화물(SO_x)의 편익이 전체 편익의 8% 정도만을 차지하여 지역권 측면에서의 편익은 작은 것으로 추정되었다. URBAN 모형에 의한 총 편익은 33.176 mills/kWh으로 QUERI에 비해 2.6배정도 크게 평가되었다. 편익 구성은 황산화물(SO_x), 황산염(sulfates), 질산염(nitrates) 각각에 대해 4.7%, 83.2%, 14.1%로 나타났다.

한편 LNG 450MWe 발전소의 경우, 표 1.2-20에서 알 수 있는 바와 같이 질산화물(nitrates)에 의한 총 편익은 QUERI와 URBAN 모형의 각각에 대해 0.729 mills/kWh와 1.615 mills/kWh 정도 되는 것으로 추정되었다. 질산화물(nitrates)에 의한 편익 중에는 천식환자(asthmatics)에 의한 효과가 가장 커 약 52%를 기여하는 것으로 평가되었다(QUERI 기준).

표 1.2-19 석탄 500MWe 발전소의 환경설비 부착시 편익

오염원	인체영향	QUERI(mills/kWh)			URBAN(mills/kWh)		
		미부착 (A)	부착 (B)	부착 편익 (A)-(B)	미부착 (A)	부착 (B)	부착 편익 (A)-(B)
황산화물 (SO_x)	급성 사망	1.122	0.120	1.002	1.706	0.171	1.535
	호흡기질환 병원 입원	0.011	0.001	0.010	0.017	0.002	0.015
	소계	1.133	0.122	1.011	1.723	0.172	1.551
황산염 (Sulfates)	만성 기관지염	2.150	0.215	1.935	6.337	0.634	5.703
	활동 제약일수	1.510	0.151	1.359	4.450	0.445	4.005
	지연 사망	6.745	0.675	6.070	19.873	1.988	17.885
	호흡기질환 병원 입원	0.004	0.0004	0.0036	0.012	0.001	0.011
	소계	10.409	1.042	9.367	30.673	3.067	27.606
질산염 (Nitrates)	뇌혈관 질환 병원 입원	0.035	0.018	0.017	0.063	0.032	0.031
	만성 기관지염	1.257	0.628	0.629	2.260	1.130	1.130
	활동 제약일수	0.837	0.418	0.419	1.504	0.752	0.752
	천식(기관지 확장제 이용)	2.334	1.167	1.167	4.198	2.099	2.099
	심장질환(65세이상)	0.002	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002
	만성 기침	0.006	0.003	0.003	0.010	0.005	0.005
	소계	4.471	2.235	2.236	8.040	4.020	4.020
계		16.013	3.399	12.614	40.436	7.260	33.176

주1) 미부착은 환경설비(탈황설비+탈질설비)를 부착하지 않은 것을 의미하며, 부착은 동 환경설비를 부착하는 경우를 의미함.

2) PM10의 환경외부비용은 QUERI와 URBAN의 경우 각각 2.06, 3.07 mills/kWh 정도 되지만 이들 값은 이미 발전소에 장착되어 있는 것으로 가정하였기 때문에 이들 값을 비용-편익 분석에서는 제외하였음.

표 1.2-20 LNG 450MWe 발전소의 환경설비 부착시 편익

오염원	인체영향	QUERI(mills/kWh)			URBAN(mills/kWh)		
		미부착 (A)	부착 (B)	부착 편익 (A)-(B)	미부착 (A)	부착 (B)	부착 편익 (A)-(B)
질산염 (Nitrat)es	뇌혈관 질환 병원 입원	0.011	0.006	0.005	0.013	0.013	-
	만성 기관지염	0.408	0.203	0.205	0.915	0.458	0.457
	활동 제약일수	0.272	0.135	0.137	0.609	0.304	0.305
	천식(기관지 확장제 이용)	0.758	0.378	0.380	1.699	0.850	0.849
	심장질환(65세이상)	0.001	0.0004	0.0006	0.002	0.001	0.001
	만성 기침	0.002	0.001	0.001	0.004	0.002	0.002
계		1.452	0.723	0.729	3.242	1.627	1.615

주1) 미부착은 환경설비(탈질설비)를 부착하지 않은 것을 의미하며, 부착은 동 환경설비를 부착하는 경우를 의미함.

2) 분진(PM_{10})의 환경외부비용은 QUERI와 URBAN의 경우 각각 0.01, 0.01 mills/kWh 정도 되지만 이들 값은 이미 발전소에 장착되어 있는 것으로 가정하였기 때문에 이들 값을 비용-편익 분석에서는 제외하였음.

(3) 비용-편익 분석 결과

앞에서 분석한 비용과 편익의 분석 결과를 정리하면 표 1.2-21과 같다. 이 표의 결과에도 나타난 바와 같이 석탄 500MWe 발전소의 경우는 탈황설비와 탈질설비를 부착하는 비용에 비해 탈활설비의 부착에 따른 환경외부비용의 감소분 즉 편익이 큰 것으로 나타났다. QUERI 모형의 경우는 연간 약 7.75 mills/kWh 정도의 편익이 발생하는 것으로 분석되었고, URBAN 모형의 경우는 28.32mills/kWh의 편익이 발생하는 것으로 분석되어 약 18.04mills/kWh[13]의 편익이 석탄 500MWe 발전소에 탈황설비와 탈질설비를 부착하는 경우에 발생하는 것으로 분석되었다. 하지만 LNG 450MWe 발전소의 경우는 탈질설비 부착의 비용에 비해 편익이 QUERI 모형의

13) QUERI와 URBAN 모형의 결과에 대한 평균값(=(7.75+28.32)/2)임.

경우 -0.87 mills/kWh, URBAN 모형의 경우는 0.02로 약간의 편익이 발생하는 것으로 평가되었다. 그리하여 LNG 450MWe 발전소의 탈질설비 부착에 따른 편익은 거의 없는 것으로 평가되었다.

표 1.2-21 비용-편익 분석 결과(석탄 500MWe, LNG 450MWe)

(단위: mills/kWh)

	석탄 500MWe 발전소 (탈황설비+탈질설비)		LNG 450MWe 발전소 (탈질설비)	
	QUERI	URBAN	QUERI	URBAN
비용 (A)	4.86	4.86	1.60	1.60
편익 (B)	12.61	33.18	0.73	1.62
(B) - (A)	7.75	28.32	-0.87	0.02

4. 결 론

본 연구에서는 고리부지에 석탄 500MWe, LNG 50MWe, 원자력 1000MWe 발전소를 각각 1년간 운전할 경우의 배출 오염원에 의한 인체영향을 중심으로 환경외부비용을 추정하였다. 분석결과에 의하면 석탄 500MWe 발전소와 LNG 450MWe 발전소 그리고 원자력 1000MWe 발전소는 각각 30.2, 2.4, 0.48 mills/kWh 정도의 환경외부비용이 존재하는 것으로 추정되어 원자력이 가장 환경친화적인 것으로 나타났다. 이 결과는 탈황설비와 탈질설비와 같은 환경설비를 부착하지 않은 결과이며, 이들 설비를 부착하더라도 원자력은 석탄 500MWe와 LNG 450MWe의 5.3[14], 1.2[15] mills/kWh에 비해 환경외부비용이 작아 여전히 인체에 영향을 덜 끼치는 발전원임을 알 수 있다.

한편 석탄 500MWe 발전소에 탈황설비와 탈질설비를 부착하는 경우 부착에 따른 편익이 발생하여 매년 오염원에 의한 인체영향 비용을 상쇄하고도 남는 편익이 있음을 의미한다. 하지만 LNG 450MWe 발전소에 탈질설비를 부착하는 경우는 탈질설비 부착비용에 비해 환경외부비용 절감을 의미하는 편익이 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 환경외부비용 측면에서 석탄발전소는 비용 효과적이지만 LNG발전소는 비용 효과적이지 못해 환경설비 비용 자체가 편익을 상쇄하고 원가의 부담으로 작용함을 의미한다.

앞으로는 석탄발전소와 LNG 발전소와 같은 화석연료 발전원에서 배출되는 이산화탄소 배출에 의한 지구온난화 영향 등과 수질영향, 사고 등에 따른 환경외부비용의 추정 등이 이루어져 국민의 인체영향을 최소화 할 수 있고 경제적인 발전소를 건설할 필요가 있다. 이를 위해서는 지금까지 주로 수행한 발전원별 경제성에 의존한 발전원 우위성 검증은 한계에 와 있다고 볼 수 있고, 이제는 이와 같은 외부비용을 포함한 다양한 요소를 종합적으로 고려한 발전원간의 비교우위 검증이 필요하다고 하겠다. 또한 전력시장 민영화와 자유화는 비용의 최소화를 통한 이윤의 극대화가 최대의 목적이 될 것이므로, 기후변화협약 발효에 의한 환경영향 최소화 추세와는 상충되는 요소가 있다. 환경외부비용은 이들 두 요소를 반영하는 하나의 방법이 될 수 있다는 측면에서 그 중요성은 부각될 것이기에 지속적인 연구가 필요하다 하겠다.

14) 표 1.2-19의 환경설비를 부착하는 경우에 대한 두 모형(QUERI, URBAN) 결과의 평균값 (=(3.399+7.260)/2)임.

15) 표 1.2-20의 환경설비를 부착하는 경우에 대한 두 모형(QUERI, URBAN) 결과의 평균값 (=(0.723+1.627)/2)임.

참 고 문 헌

대전지방기상청, “일광지역의 시간별, 기온, 풍향, 풍속자료”, 2001. 11

최광식, 『원자력 안전규제 분석을 위한 방사선피폭 금전환산계수 산정에 관한 연구』, 한국과학기술원 박사학위 논문, 2001

한국원자력연구소, 『원자력발전에 의한 대기개선편익의 경제적 가치 추정』, KAERI /CM-417/2000, 2000. 12

한국원자력연구소, 『원자력 경제성분석 연구』, KAERI/RR-1985/99, 1999. 12

한국원자력연구소, 『원자력 경제성분석 연구』, KAERI/RR-2098/2000, 2000. 12

한국전력공사, 『영광 원자력 5,6호기 건설사업 환경영향 평가 보고서』, 1994. 11

Markandya A., Boyd R (1999b), *Valuing the Human Health Effects of Routine Atmospheric Release from Nuclear Power Facilities*, 1999. 5

U.L.Radovic, *Estimating the External Costs Associated with Electricity Generating Options in Developing Countries using Simplified Methodologies(Poland Final report)*, 2001. 10.