2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

석탄화력과 원자력 발전원의 환경외부비용 추정

Estimation of Environmental External Costs between Coal Fired Power Plant and Nuclear Power Plant

문기환, 김승수

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 대기부문의 환경영향과 인체영향에 초점을 맞추어 미래의 발전원으로서 경쟁관계에 있는 석탄화력발전소와 원자력발전소의 환경외부비용을 추정하였다. 이를 위해 IAEA에서 개발한 AIRPACTS 모형(석탄화력)과 "Impacts of Atmospheric Release" 모형(원자력)을 이용하였다. 분석결과에 의하면 삼천포 석탄화력발전소가 영광 원자력발전소에 비해 25배 정도의 환경외부비용이 발생하는 것으로 추정되었다. 이를 통해 석탄화력보다는 원자력이 환경친화적인 발전원임을 알 수 있다. 이와 같은 비용 추정결과는 기존의 발전원가에 추가되어 발전원별 경제성 비교시에 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 미래의 전원계획 수립 단계에서 각 발전원에 대한 환경외부비용을 평가하여 반영함으로써 환경규제를 충족시킬 때 발생하는 경제적 충격완화와 자원의 효율적 배분 등의 효과를 기할 필요가 있다고 판단된다.

Abstract

First of all, this study evaluated the impacts on the health and the environment of air pollutants emitted from coal power plant and nuclear power pant, two major electric power generating options in Korea. Then, the environmental external costs of those two options were estimated by transforming the health and environment impact into monetary values. To do this, AIRPACTS and "Impacts of Atmospheric Release" model developed by IAEA were used. The environmental external cost of Samcheonpo coal power plant was estimated about 25 times as much as that of Younggwang nuclear power plant. This result implies that nuclear power plant is a clean technology compared with coal power plant. This study suggests that the external cost should be reflected in the electric system expansion plan in order to allocate energy resources efficiently and to reduce economic impact stemming from the environmental regulation emerged recently on a global level.

1. 서 론

인간 활동 특히 에너지의 사용에 의해 초래되는 환경피해에 대한 우려와 관심이 최근에 고조되고 있다. 지구온난화, 산성비, 오존층 파괴 등과 같은 환경 문제가 그 주요 관심의 대상이 되고 있으며, 이들에 의해 야기되는 환경피해는 인체, 삼림, 곡물, 수질, 인공구조물 등과 같은 다양한 분야에 걸쳐 일어나고 있다. 하지만 이와 같은 환경피해에 의한 피해비용은 일반적으로 생산자와 소비자에 의해 결정되는 시장가격에 포함되지 않고 있는데 이와 관련된 비용을 외부비용이라고 한다. 일례로 발전소의 건설비, 연료비, 운영비 등과 같은 사적비용은 에너지의 시장가격에 포함되지만 앞에서 설명한 피해비용은 시장가격에 포함되지 않고 있는 것이 현실이다.

한편 전력부문에 대한 환경영향은 1970년대 초부터 관심을 가지기 시작하였다. 이 당시에는 전력 부문의 발전원별 환경 영향평가 비교를 위해 주로 사망자수와 부상자수 등의 단순한 자료를 이용하였다. 생산된 에너지의 시장가격에 포함되지 않은 소위 외부비용에 대한 연구는 1980년대 말이 되서야 본격적으로 이루어지기 시작했다. 전력 부문에 대한 외부비용 평가의 중요성이 인식된 배경은 다음과 같다.

- 적정 연료와 에너지기술을 선택할 때에 환경영향을 고려할 필요가 생김.
- 보다 엄격한 환경규제기준에 대한 비용-편익 분석의 필요성이 제기됨.
- 환경정책으로 경제적 수단의 활용에 대한 관심이 고조됨.
- 다양한 기술의 비교를 위해 환경개선 지표를 개발할 필요가 생김.
- 사기업화, 시장의 자유화 등과 같은 에너지분야에서의 변화가 생김.

국제원자력기구(IAEA)에서는 현재 ①발전에 따른 환경오염의 영향을 평가하는 프로그램, ②환경영향의 외부비용을 객관적으로 평가하는 프로그램, ③환경영향 저감정책의 수립을 지원하는 의사결정지원 프로그램의 3가지 기능을 수행할 수 있는 단순화된 전산프로그램을 개발하고 있다. 이와 같은 개발을 추진하게 된 배경은 환경영향 평가 프로그램의 경우 그 특성상 다량의 입력자료가 필요하며, 개발을 위해 막대한 자금이 소요되기 때문이다. 실제로 막대한 입력자료가 요구되는 환경관련 자료가 구축되어 있지 않은 개발도상국에서는 복잡하고 상세한 환경관련 프로그램을 활용하는데 장애요소가 되어왔다. 따라서 IAEA가 개발중인 프로그램은 특히 입력자료를 최소화하면서 동시에 기존의 정밀한 모형의 결과와 최대한 근접한 결과를 도출할 수 있는 모형을 개발하는 것이 그 특징이라 할 수 있다.

그리하여 본 연구에서는 IAEA의 프로그램을 중심으로 환경 외부비용을 평가하는 방법을 간략히 살펴보고, 이 모형을 이용하여 국내의 석탄화력발전소와 원자력발전소의 외부비용을 평가하였다.

2. 환경외부비용 평가모형

2.1 화석연료발전소

유럽연합에서는 에너지변환과 전력생산과정에서 발생하는 대기오염물질이 환경에 어떤 영향을 끼치며, 이 영향에 대한 외부비용을 평가하기 위하여 1993년부터 ExternE 프로젝트

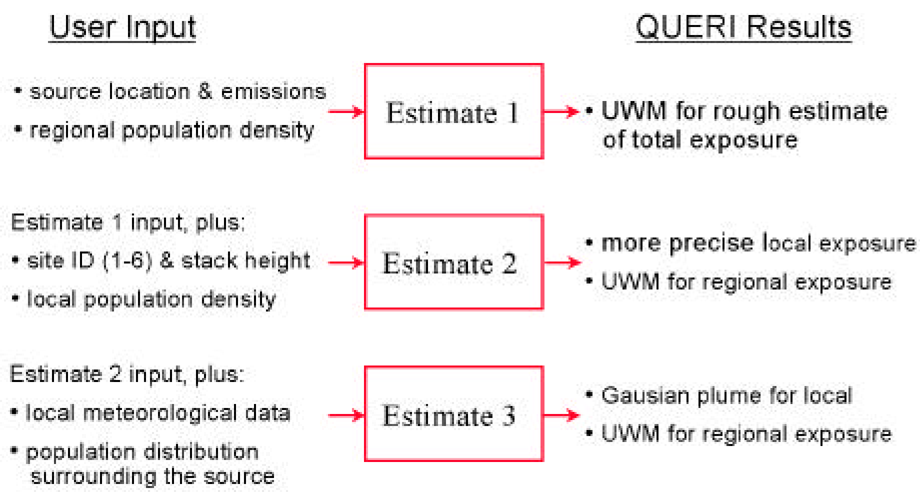
를 수행하고 있다. 현재 IAEA에서 개발중인 환경영향과 외부비용 평가 방법은 ExternE 프로젝트의 결과를 많이 이용하고 있다. IAEA의 모형을 이용한 대기부문의 환경영향 평가는 개략적으로 ①오염원 배출 -> ②대기 이동 -> ③인체와 생태계에 노출 -> ④인체 및 환경에의 영향 -> ⑤외부비용 평가와 같은 절차를 통해 이루어진다. 지금까지 수행된 대부분의 환경영향 평가는 오염원이 배출되어 인체 및 생태계에 미치는 영향을 평가하는 단계에서 머물러 있었지만 IAEA에서 개발한 모형은 이러한 영향을 가치평가를 통해 외부비용으로 환산하는 단계까지 분석이 가능하게 한다. 또한 비용화가 어려울 경우 정량화(비록 비용화 되지는 않았지만)된 환경영향을 고려하여 의사결정이 가능하도록 도와준다. IAEA의 환경영향 평가 모형은 평가 방법론과 대상 등에 따라 표-1과 같이 다음의 4가지로 구분된다.

[표-1] 환경영향 평가 모형

Model	모델 설명
QUERI (Ver 1.1)	semi-empirical 접근법을 이용하여 인체영향 평가
RUWM (Ver 1.0)	수리모형을 이용하여 인체영향 평가
URBAN (Version 1.0)	도시 인근지역에 위치한 오염원으로 인한 인체영향 및 비용 평가
AIRPACTS (Version 2.0)	환경오염물질에 의한 인체, 작물, 인공구조물의 영향 및 비용 평가

2.1.1 QUERI(QUick Estimate of Respiratory health Impacts)모형

QUERI 모형은 분석대상의 특성에 따라 다음 그림-1의 3가지 추정방법을 사용하여 분석을 수행할 수 있다.



[그림-1] QUERI의 3가지 추정 방법

이와 같은 QUERI모형은 Simple Uniform World Model(SUWM)이라는 매우 단순한 모형에 기초하고 있는데 이 모형에서 사용된 주요한 가정은 다음과 같다.

- 오염물질은 정상상태이며 고르게 섞여 있음.
- Exposure response 함수는 선형이며 문턱 값이 없음.

- 전체 영역에 걸쳐 대기는 균일함.
- 전체 영역내의 인구분포가 균일함.
- 오염물질은 다음과 같은 속도로 소멸됨.

$$\text{Depletion, } k(\vec{r}) = \frac{\text{Removal Flux}}{\text{Concentration}} = \frac{Flux\,(Q,\vec{r})}{C\,(Q,\vec{r})}$$

오염원에 의한 보건영향은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

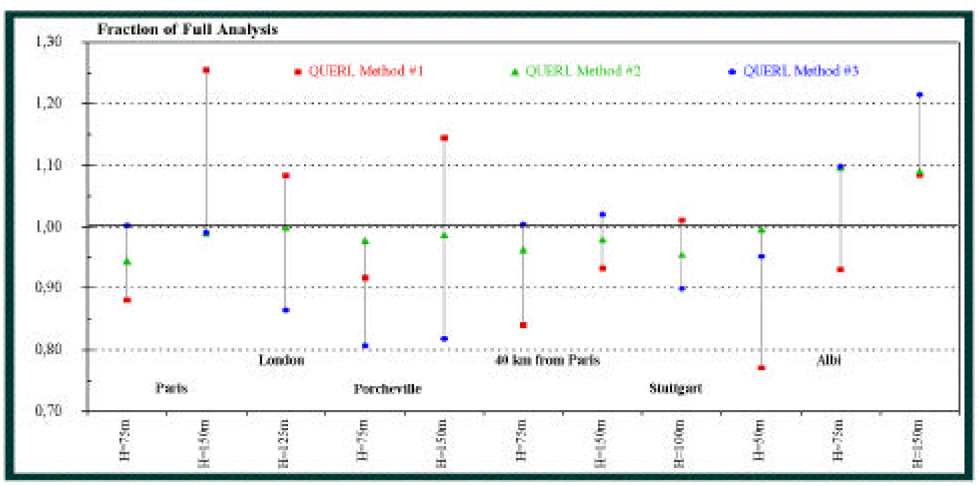
$$I = \int_{impact\ \ area} \rho\,(\vec{r})\,F_{er}\,(\vec{r}\,, C\,(\vec{r}\,, Q))\,dA$$

위의 식에 앞에서 제시한 가정을 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$I = \frac{\rho\ f_{ER}\ Q}{k}$$

단, ρ : 대상지역의 인구밀도, f_{ER} : Exposure response function
Q : 배출 속도, k : depletion velocity

대기 오염물질은 굴뚝에서 나오는 1차 오염물질(이산화황, 질산화물, 분진)과 1차 오염물질이 대기 중에서 화학반응을 일으켜 생성되는 2차 오염물질(Sulfate, Nitrate)로 구분할 수 있다. 2차 오염물질의 경우 그 영향 범위가 넓고 농도의 차이가 선원의 특성에 상대적으로 민감하지 않기 때문에 단순한 SUWM의 적용만으로 영향을 평가할 수 있다. 그러나 1차 오염물질의 경우 영향이 좁은 범위에서 나타나며 영향의 정도가 기상, 인구조건, 굴뚝높이 등에 따라 변화하므로 앞의 그림에서 제시된 Estimate #2, #3의 보정이 요구된다.



[그림-2] QUERI 모형과 ECOSENSE 추정 결과 비교

위의 그림-2는 QUERI모형의 결과를 기존의 정밀한 환경영향평가모형(ECOSENSE, ExternE Project에서 사용된 모형임)의 결과와 비교한 것이다. 비교 결과 다양한 기상조건과 인구조건하에서도 QUERI모형을 통해 ECOSENSE와 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

2.1.2 RUWM(Robust Uniform World Model)

RUWM의 역할은 QUERI 모형의 Estimate #2, #3와 매우 유사하다. 그러나 가장 큰 차이점은 QUERI 모형은 반실험식(semi-empirical formula)에 근거하여 계산을 수행하는 반면 RUWM은 수학적모형에 기반을 두고 있다는 것이다. RUWM은 다음과 같은 특징이 있다.

- 분석영역을 local(50 km 이하)과 region으로 나눔
- Gaussian plume model을 사용
- Non-uniform wind rose 및 local receptor distributions

2.1.3 URBAN 모형

URBAN 모형은 오염원이 대도시 인근에 있어서 국지적인 환경영향이 크게 나타나는 경우를 분석하기 위한 모형이다. 특히 인구분포함수를 사용하여 인구분포를 생성하기 때문에 인구밀집지역과 오염원의 상대적인 위치를 손쉽게 변화시켜 가며 영향을 비교할 수 있다. 실제 인구분포를 인구분포함수로 표현하기 힘든 경우에는 실측 자료를 사용할 수도 있다. URBAN 모형은 주요 입력과 출력을 한 화면에서 확인할 수 있으며 그래픽으로 처리하여 보여줌으로써 사용자의 이해를 돕고 있다.

2.1.4 AIRPACTS

AIRPACTS는 오염원에 의한 보건영향 뿐만 아니라 작물, 인공구조물에 미치는 영향을 종합적으로 살펴볼 수 있는 모형이다. 현재까지 작물과 인공구조물의 경우는 SO_2의 증가에 따른 영향만을 분석할 수 있다.

곡물 및 건물에 대한 영향을 평가하는데는 몇 가지 어려움이 있다. 작물에 대한 영향을 평가하기 위해서는 인체영향에서와 마찬가지로 오염물질의 농도와 작물의 수확에 관한 관계를 나타내는 Exposure-Response 함수가 알려져 있어야 한다. 그러나 이에 관한 연구가 많지 않으며 소량의 오염물질 농도의 증가는 작물에 유리하게 작용하는 소위 비료효과(Fertilizer Effect)가 있기 때문에 단순화가 어려운 경우가 있다. 또한 관련연구가 주로 선진국에서 이루어진 이유로 아시아지역에서 주로 재배되는 작물, 특히 벼에 관한 자료가 없어서 실제 적용에는 문제가 있을 것으로 예상된다. 현재 자료가 있는 작물은 밀, 보리, 귀리, 감자, 호밀, 근대 등이다.

인공구조물에 관한 영향은 주로 아연도금 철판, 석회석, 모르타르, 자연석, 페인트, 사암, 함석 등 재료에 따른 변형, 손상 정도를 평가한다. 따라서 역사적, 문화적 가치가 있는 기념물의 손상에 대해서는 별도로 평가하지 않는다.

한편 대기부문의 오염물질이 방출됨에 따라 인체, 작물 및 인공구조물에 어떤 영향을 끼치는 가를 간략히 정리하여 표-2에 정리하였다. 분석자는 이 표를 통해 분석의 범주를 설정할 수 있게 된다.

[표-2] 대기오염물질과 환경영향

1차 오염원	2차오염원	영향 부문
분진(Particulates)		Mortality(급성, 만성) Morbidity(기관지, 천식, 폐활량감소 등) Cancers
SO_2		Mortality(급성) Morbidity(기관지) Crops(생산량변화) Materials(부식, 탈색 등)
SO_2	Sulfates	Mortality(급성, 만성) Morbidity(기관지, 천식, 폐활량감소 등)
NO_x		Mortality(급성) Morbidity(기관지, 눈 염증 등)
NO_x	Nitrates	Mortality(급성, 만성) Morbidity(기관지, 천식, 폐활량감소 등)
NO_x 및 VOC	Ozone	Mortality(급성) Morbidity(기관지, 눈 염증 등) Crops(생산량변화)
PAC(Polycyclic Aromatic Compounds)		cancers
CO		Mortality(급성) Morbidity(심장질환)
Dioxins 및 Dibenzofurans		cancers
Heavy Metals (As, Cd, Cr, Ni)		cancers
Hg, Pb		Morbidity(신경중독)
Greenhouse Gases (CO_2, N_2O, CH_4...)		인체,곡물,생태계,기후변화,수위상승 등

2.2 원자력발전소

[표-3] 원자력시설의 영향경로분석 주요 단계

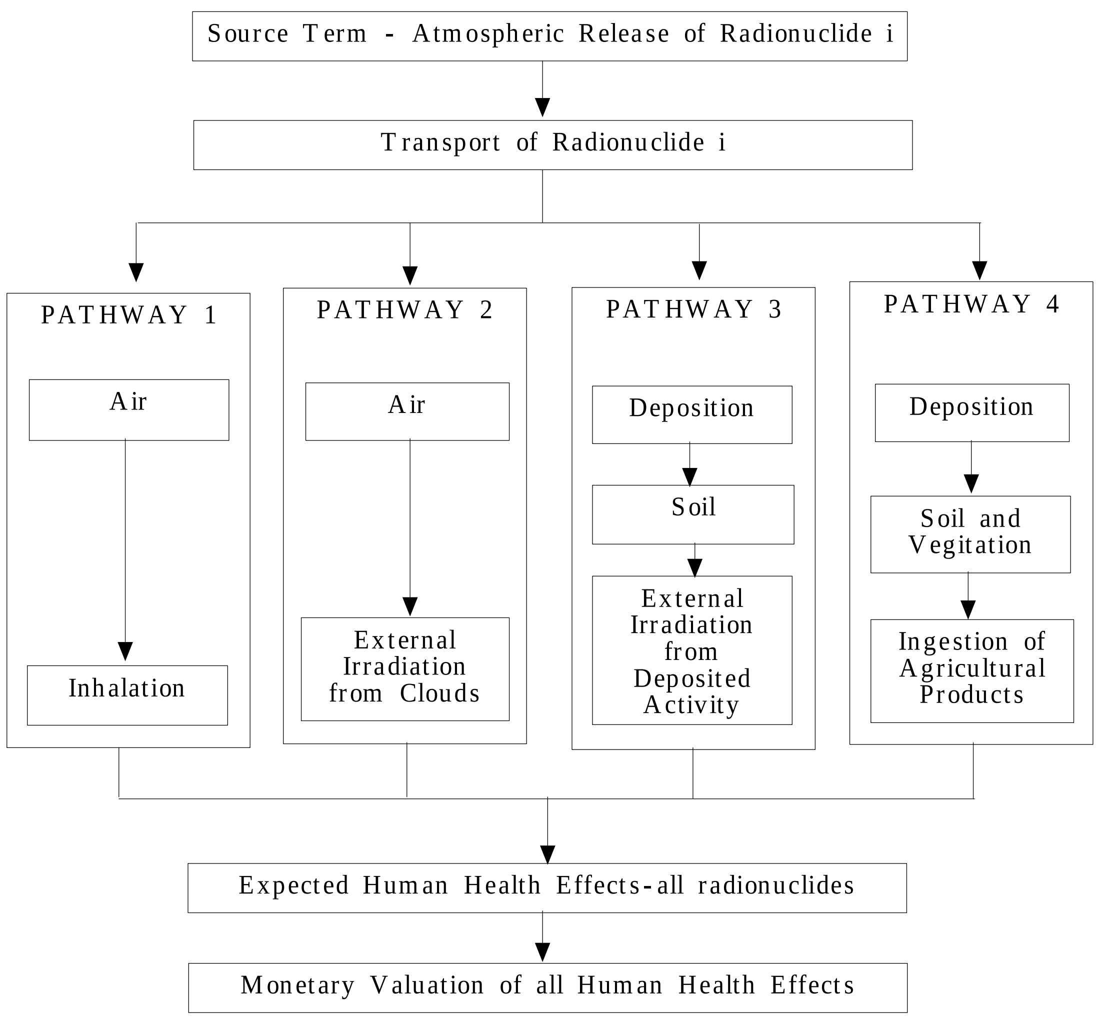
영향경로분석 단계	주요 입력자료	단 위
오염원	방출 자료 작업자 영향 통계 전기생산량	Bq/yr, Bq/sec, 톤/yr 영향자 수 kWh/yr
이동 및 확산	Gaussian plume(대기) 수질 및 토양	Bq/m^3
침전	침전속도	m/s
환경오염	축적농도 계산 - 음식소비량 - 물 소비량 - 토양오염 면적 - 대기	Bq/*kg* Bq/*l* Bq/m^2 Bq/m^3
인간피폭	인간의 표준 특성 - 호흡량 - 음식섭취량 - 조사선량	m^3 kg Sv, man Sv
기대 보건영향	투입-반응함수 (Dose-Response functions) 사고 통계	치명적인 암 환자 수 비치명적인 암 환자 수 유전영향 관련 인원 조기 질병과 사망 사망자 수, 부상자 수, 작업상실일, 신체장애자 수 등
가치평가	WTP(Willingness-to-pay)	$ 또는 원

석탄화력발전소와 마찬가지로 원자력시설에서 배출되는 환경오염원은 대기, 수질, 토양 등의 분야에서 영향을 끼친다. 이들 각 분야에 대한 영향 평가는 환경오염원에 대한 영향경로분석을 통해 이루어지며, 표-3에 이를 간략히 요약하였다.

한편 원자력시설에 의한 환경영향은 크게 정상운전시의 방사선 피폭과 사고시의 방사선 피폭 등 두 부분으로 나누어진다. 본 연구에서는 IAEA에서 개발한 프로그램(프로그램 명 : "Impacts of Atmospheric Release.xls“)을 중심으로 설명하고자 한다.

2.2.1 정상운전시의 방사선 피폭

방사성 핵종이 정상운전을 통해 대기로 방출되면 그림-3과 같이 ①대기중 방사성물질의 호흡에 의한 내부피폭, ②대기로부터의 외부 피폭, ③침전물로부터의 외부 피폭, ④음식물의 섭취에 의한 내부피폭 등 4가지 주요 경로를 통해 인간에게 영향을 끼치게 된다.



[그림-3] 방사성 핵종의 4가지 영향 경로

분석대상 영역은 반경 100km이내의 지역권(local scale), 100 1,000 km 구간의 권역권(regional scale), 1,000km 이상의 지구권(global scale)로 나누어지며, 대상기간은 최대 10만년이다. 이 모형에서는 권역권의 영향 평가를 위해 별도의 계산을 수행하지 않고 지역규모 영향 분석 결과의 15%의 영향을 미친다고 가정한다. 이러한 가정은 크게 무리가 없는 것으로 검증되었다.

지역권의 영향 분석은 반경 100km까지의 인구밀도(명/ km^2), 주요 농작물의 밀도(ton/ km^2), 주요 작물의 경작비율(%) 등과 같은 최소한의 자료를 이용하여 이루어진다. 대부분의 방사성 핵종은 주로 반경 1,000km 이내에 영향을 미치기 때문에 지역권 및 권역권의 영향 분석으로 충분하지만 H-3, C-14, Kr-85의 경우에는 대기와 해양을 통해 순환함으로써 전지구적으로 영향을 미치므로 지구권의 영향 분석이 요구된다. 이러한 분석은 지구전체의 인구와 10만년 동안의 effective dose equivalent를 바탕으로 이루어진다.

2.2.2 사고시의 방사선 피폭

이 모형에서는 객관적 사고확률 뿐만 아니라 대중이 인지하는 사고확률을 아울러 고려하여 원자력발전소 사고에 따른 외부비용을 평가한다. 기존의 방법은 사고의 확률과 피해를 곱하여 구해지는 기대값을 사용하여 분석을 수행하였으나 이러한 분석결과는 대중의 원자력 사고 회피를 위한 지불의사를 충분히 반영하지 못한다는 비판을 받아왔다. 이 모형에서는 Expected Utility Model을 사용하여 위험회피(risk-averse)적인 성향의 의사결정자가 위험에 부과하게 되는 할증(Risk Premium)을 반영하였다.

7.6TWh의 전기를 생산하는 프랑스 원자력발전소를 대상으로 분석한 결과에 의하면 원자력발전소의 경우 사고에 따른 기대값은 0.0044 millicents/ kWh 이며 위험회피성향을 고려한 경우는 0.087 millicents/ kWh인 것으로 나타났다. 즉 20배 가까운 위험할증이 존재함을 알 수 있다. 한편, 위의 결과에서 알 수 있듯이 위험회피를 고려한 경우에도 사고시의 방사능 피폭에 따른 외부비용은 발전비용과 비교하여 미미한 편이다.

한편 영향경로분석의 마지막 단계에서는 환경영향의 비용평가 이루어진다. 외부효과를 금전가치로 환산하는 것은 항상 논란의 여지가 많은 작업이다. 본 모형에서는 개인의 선호를 반영하는 Willingness To Pay(WTP)값을 사용하여 환경영향을 금전가치로 환산한다. 이러한 WTP값은 시장에서 직접 구할 수 없기 때문에 가상가치평가법(Contingent Valuation Method)등을 사용하여 구하게 된다. 그러나 개발도상국의 경우에는 이러한 WTP값에 대한 기존의 연구가 많지 않으며 각각의 경우에 대해 WTP값을 구하는 것도 쉬운 일이 아닐 것이다. 따라서 이 모형에서는 선진국의 연구에서 구해진 WTP값을 아래의 식으로 소득에 대해 보정한 값의 사용을 권장하고 있다.

$$WTP_i = WTP_0 (Y_I / Y_0)^{ß}$$

I : 적용대상국, 0 : 연구결과가 있는 국가, Y : 소득, ß : 소득 탄성치

이때, ß는 1이하의 값을 가지며 ß가 작을수록 소득대비 WTP 값은 커지게 된다.

방사능 누출에 의한 인체영향은 크게 암(치명적인 암과 비치명적인 암으로 구분)과 유전적 영향으로 나눌 수 있다. 이들 부문에 대한 가치 평가는 통계수명가치법(Value of a Statistical Life, VOSL)과 수명손실가치법(Value of a Life Year Lost, VLYL) 등 두 가지 평가방법으로 구할 수 있다. VOSL 방법은 여러 가지 종류의 암에 대한 잠복기간을 고려하지

않지만, VLYL 방법은 여러 가지 종류의 암에 대한 잠복기간을 고려하여 평가하는 점이 다르다. 이와 같은 VOSL, VLYL 값의 평가는 자국의 자료가 없는 경우에 앞에서 언급한 방법으로 보정하게 된다.

원자력발전소에서 대기로 방출되는 방사성 핵종으로 인해 발생하는 인체 피해비용 즉 외부비용은 다음과 같이 계산된다.

$$D_h(l,r,g;\ VOSL,\ VLYL) = N_h(l,r,g)\ x\ \ V_h(VOSL,\ VLYL)$$

여기에서

$D_h(l,r,g;\ VOSL,\ VLYL) =\ 'local','regional','global'$ 측면에서의 인체영향 비용

$N_h(l,r,g)\ =\ 'local','regional','global'$ 측면에서의 인체 피해자 수

$V_h(VOSL,\ VLYL)\ =\ \ VOSL,\ VLYL$ 방법에 의해 산정한 피해 단위비용

3. 발전원별 환경외부비용 평가

국내의 대표적인 기저부하 발전원은 석탄화력발전소와 원자력발전소이다. 이들 두 발전원은 발전량 기준으로 1998년 말 현재 74.6%를 차지하는 등 그 위치가 확고하며, 미래의 전원계획을 수립할 때 경쟁관계에 있는 중요한 발전원이다. 그리하여 본 연구에서는 이들 발전원에 대한 환경외부비용을 IAEA 모형을 이용하여 평가하였으며, 삼천포 화력발전소와 영광 원자력발전소를 그 평가 대상으로 하였다.

3.1 석탄화력발전소

본 연구에서는 앞에서 설명한 AIRPACTS 모형을 이용하여 삼천포 석탄화력발전소의 환경외부비용 평가하였다. 표-4는 이 모형을 이용하여 외부비용 평가를 위해 사용한 기본 입력자료를 나타낸다.

이와 같은 기본 입력자료를 이용하여 삼천포 화력발전소의 외부비용을 평가한 결과는 아래의 표-5와 같다. 기준안의 경우 총 외부비용은 3.7억 달러 정도로 평가되었으며, 이 중에서 인체영향은 6.3억 달러(비용)이며, 작물영향은 -2.5억 달러(혜택)으로 나타났다. 상한안과 하안안은 불확실성을 고려하여 *lognormal* 분포의 68%와 95%의 신뢰구간 값을 나타낸다. 또한 이 값은 오염원의 특성에 따라 불확실성 수준을 달리 설정하여 계산한 것을 알 수 있는데 이 값은 IAEA의 자료를 인용하였다.

또한 오염원 종류별로 살펴볼 경우, 전체 외부비용 중에서 분진이 10.0%, SO_2가 28.3%. NO_x가 61.4%, 기타 0.2% 정도를 점유하는 것으로 나타났다. 이는 SO_2의 경우 인체에 가장 큰 영향을 끼치나 적정 농도 수준에서의 SO_2는 비료효과가 있어 혜택으로 작용하기 때문이다. 그리하여 대부분의 외부비용이 NO_x에서 나타나는 것으로 분석되었다.

[표-4] **외부비용평가 주요 입력자료**(삼천포화력발전소)

구 분	단위	입력 값	비 고
1. 발전소 자료			
- 시설용량	MWe	2,240	
- 연돌 높이(Stack height)	m	200	
- 출구 온도(Exit temperature)	℃	136	
- 출구 속도(Exit velocity)	m/s	18.6	
- 출구배출량 속도(Exhaust flow)	Nm^3/s	2,140.3	
- 풍속계 높이 (Anemometer height)	m	10	
2. 환경 자료			
- SO_2	ton/yr	43,954.2	
- NO_x	ton/yr	24,802.7	
- 분진	ton/yr	1,255.8	
3. 비용 자료			
- 인체			IAEA 자료 보정
* 호흡기질환	$/case	5,675	(GDP 자료 이용)
* 급성사망	$/case	60,810	
* 암	$/case	260,000	
- 작물			국내 물가자료
* 미곡	$ton/(yr \cdot km^2)$	180	('95년 자료 이용)
* 보리 및 소맥	$ton/(yr \cdot km^2)$	1,030	
* 감자 및 고구마	$ton/(yr \cdot km^2)$	1,138	
* 콩류	$ton/(yr \cdot km^2)$	3,756	
* 기타	$ton/(yr \cdot km^2)$	696	
4. 인구 자료			
- 지역(local area)	명/km^2	122	
- 권역(regional area)	명/km^2	786.8	

[표-5] **환경외부비용 평가 결과** (삼천포화력발전소)

영향 부문	오염원 종류	외부비용(백만$/년)		
		하한안	기준안	상한안
인체 영향	분진	9.4	37.6	151.2
	SO_2	62.1	360.8	2,563
	NO_x	57.3	230.0	924.6
	기타	0.02	0.2	2.1
작물 피해	SO_2	-50.9	-254.7	-1,273
계		77.9	373.9	2,367.9

농작물에 대한 SO_2의 영향이 외부비용을 평가하는데 중요한 요소가 됨을 위의 결과에서 알 수 있다. 아래의 표-6은 본 연구에서 산출한 각 작물에 대한 SO_2의 비료효과를 나타낸다. 전체 비료효과 중에서 감자 및 고구마가 가장 큰 혜택을 입고 있으며, 미곡이 가장 작은 효과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 표에서도 알 수 있는 바와 같이 단가의 영향이 상당한 영향을 끼쳤음을 알 수 있다.

[표-6] 농작물에 대한 비료효과 (삼천포 화력발전소)

	생산량(ton/yr.km^2)	단가($/ton)	피해비용($/yr)
미곡	2.29	180	-9.8
보리 및 소맥	2.76	1,030	-67.4
감자 및 고구마	3.29	1,138	-88.5
콩류	0.86	3,756	-78.8
기타 작물	0.62	696	-10.2

3.2 원자력발전소

본 연구에서는 영광 원자력발전소를 대상으로 외부비용을 평가하였으며, 이를 위한 기본입력자료는 아래의 표-7과 같다.

[표-7] 기본입력자료(영광 원자력발전소)

구 분	입력값	
영향경로		
- 호흡 (Sv per Bq)	IAEA 자료 인용	
- 외부노출-대기 (Sv per Bq per m^3)	IAEA 자료 인용	
- 외부노출-지표 (Sv per Bq per m^3)	IAEA 자료 인용	
- 농작물 섭취	수확량 (ton/km^2)	경작면적 비율 (%)
* 육류	9.03	0.6
* 식량작물	52.4	24.21
* 채소류	1,297.4	15.95
* 우유	16.3	0.6
연간방출 방사능량 (Bq/sec)	영광 1호기 6호기 평균값 이용	
인구 밀도 (명/km^2)	557.3	
평균 풍속 (m/sec)	3.8	

이와 같은 입력자료를 이용하여 영광 원자력발전소의 외부비용을 평가한 결과는 아래의 표-8과 같다. 본 연구에서는 원자력발전소에 의한 영향을 지역권, 권역권, 지구권으로 나누어 분석하였다. 분석결과에 의하면 연간 총 15백만 달러 정도의 외부비용이 발생하여 삼천포 화력발전소에 비해 현저히 낮은 것으로 나타났다. 특히 지역권과 권역권의 영향은 극히 미미한 것으로 나타나 정상 운전 중에 방출되는 방사능에 의한 효과는 거의 영향이 없는 것

으로 분석되었다. 또한 발전소 운전에 따른 방사능 누출은 암에 걸리게 하거나 유전적인 영향을 끼칠 수 있는데, IAEA는 이들에 대한 대부분의 자료를 일본의 히로시마와 나가사키의 원폭피해자에 대한 연구를 통해 얻은 자료를 참고로 하였으며, 본 연구에서도 이들 자료를 이용하였다.

[표-8] 환경외부비용 평가 결과 (영광 원자력발전소)

(단위 : US$)

	지역권 영향	권역권 영향	지구권 영향	총 영향
치명적 암				
- VOSL 접근법	709,000	125,000	9,170,000	10,004,000
- VLYL 접근법	49,200	8,690	637,000	694,890
비치명적 암	24,400	43,000	3,150,000	3,217,400
치명적 유전영향	142,000	25,000	1,830,000	1,997,000
총 영향	875,400 (215,600)	193,000 (76,690)	14,150,000 (5,617,000)	15,218,400 (5,909,290)

4. 종합평가

본 연구에서는 미래의 발전원으로서 경쟁관계에 있는 석탄화력발전소와 원자력발전소의 운영에 의해 발생하는 환경오염물질이 환경과 인체에 미치는 영향을 비용화 하였다. 지금까지 수행된 대부분의 연구가 이들 두 발전원에 대한 경제성 측면에서의 비교·평가를 위해 발전원가(자본비, 운전유지비, 연료비로 구성)가 이용되었지만, 이 방법은 앞으로 가장 중요한 의사결정기준 요소가 될 환경측면을 고려하지 못하는 한계가 있다. 그리하여 여기에서는 이들 두 발전원에 대한 외부비용을 평가하게 되었다.

분석결과에 의하면 삼천포 석탄화력발전소와 영광 원자력발전소의 외부비용은 각각 연간 3.7억 달러와 0.15억 달러 정도로 삼천포 석탄화력발전소가 약 25배정도 더 발생하는 것으로 평가되었다. 본 연구의 결과만으로 완전한 결론을 내리기는 다소 무리가 있지만 석탄화력보다는 원자력이 환경친화적인 발전원임을 알 수 있다.

이와 같은 비용 추정결과는 기존의 발전원가에 추가되어 발전원별 경제성 비교시에 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 전력공급 부문에 대한 계획을 수립할 때에 계획수립 이후에 탄소세 등과 같은 경제적인 수단에 의해 환경규제를 충족시킬 경우 많은 경제적 충격을 야기시킬 뿐만 아니라 자원의 효율적 배분을 왜곡시키는 측면이 있다. 하지만 계획수립단계에서 각 발전원에 대한 환경외부비용을 평가하여 반영함으로써 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 하나의 방법이 된다는 데서 본 연구의 의미를 찾아 볼 수 있다.

그러나 아직까지 이 분야는 국내의 경우 연구의 초보단계이기 때문에 많은 자료를 외국의 자료에 의존해야 하는 한계가 있는 것은 사실이다. 또한 본 연구의 결과가 환경오염물질에 의한 인체 및 환경에 영향을 끼치는 모든 요소를 반영하지 못한 한계가 있다. 이와 같은 부문은 앞으로 지속적인 연구를 통해 보완·수정해 나갈 필요가 있다.

5. 결론

본 연구의 주요 결과물과 이를 토대로 도출되는 시사점은 다음과 같다.

첫째로, 삼천포 석탄화력발전소가 영광 원자력발전소에 비해 25배 정도의 환경외부비용이 발생하는 것으로 추정되었다. 이를 통해 석탄화력보다는 원자력이 환경친화적인 발전원임을 알 수 있다. 이와 같은 비용 추정결과는 기존의 발전원가에 추가되어 발전원별 경제성 비교시에 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 미래의 전원계획 수립 단계에서 각 발전원에 대한 환경외부비용을 평가하여 반영함으로써 환경규제를 충족시킬 때 발생하는 경제적 충격완화와 자원의 효율적 배분 등의 효과를 기할 필요가 있다고 판단된다.

둘째로, 원자력연구개발기금 분석에서는 현재의 기금요율은 원자력발전의 경제성에 미치는 영향이 작으며 오히려 에너지상황이 비슷한 일본과 비교시에는 현재보다 최대 약 6배까지 원자력연구개발비를 증대시키는 것으로 나타나 기술개발 재원마련을 위한 정부 주도의 방안 마련이 필요한 것으로 판단된다.

셋째로, 이산화탄소 배출규제가 우리나라 국민경제에 미치는 충격의 정도는 약규제하의 원자력안이 가장 적고, 그 다음 순서로는 강규제하의 원자력안, 약규제하의 비원자력안, 강규제하의 비원자력안인 것으로 평가되었다. 이러한 분석결과는 본 연구에서 설정한 이산화탄소 배출정도의 강약보다는 원자력발전의 존재여부가, 국민경제에 미치는 영향이 더 큼을 보여주는 것이다. 원자력발전은 이산화탄소 배출규제 하에서 그 역할이 극대화될 수 있다는 것을 의미하는 것으로 해석할 수 있다.

본 연구의 분석내용 중 원자력경제성에 대한 분석결과는 원자력자원의 효율적 활용을 위한 의사결정의 기본자료로 활용될 수 있으며 이산화탄소 배출규제 하에서의 원자력발전의 역할에 대한 분석결과는 원자력발전의 국민경제적 위치에 대한 인식을 제고시킴으로써 원자력발전의 중요성에 대한 공감대 형성에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 현재 논의가 진행중인 기후변화협약의 당사국총회에서 우리정부의 전략 수립에도 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

에너지경제연구원, 에너지통계연보 1998.

한국전력공사, 『경영통계』, 1998.

한국전력공사, 『영광원자력 5,6호기 건설사업 환경영향평가보고서』, 1994. 11.

CEPN, Fr., ExternE Externalities of Energy(Vol.5: Nuclear), ISSN 1018-5593, European Commission, 1995

ETSU, UK, and IER, D., ExternE Externalities of Energy(Vol.3: Coal & Lignite), ISSN 1018-5593, European Commission, 1995

IAEA, Guidance for Comparative Assessment of the Health Environmental Impacts of Electricity Generation Systems (Draft of an IAEA Technical Report)

IAEA, Course Material of RCA Training Course on Externalities Associated with Electricity Generation, 1998. 9.