

전과정 비용 산출을 위한 환경외부비용평가 사례연구

김해인, 이영일, 윤용범, 정영범, 김현실

(한국전력연구원, 전력경영연구소)

The Case Study of Environmental External Cost for LCC

Haein Kim, Youngil Lee, Yongbeom Yoon, Youngbeom Jung, Hyeonsil Kim

(Korea Electric Power Research Institution, Business Management Laboratory)

ABSTRACT

Nowadays, there are lots of governments which would consider the environmental impacts of resources as an important factor of decision-making. For that, they have been studying the methodology for monetization of the external cost. ExternE Project, the first study on the scientific method of environmental external cost, is performed through collaboration between European Commission and U.S. government, DOE. IAEA developed the Simpacts, a software for estimating health damage cost by using ExternE methodology but with only simple database. In South Korea, most energy decision makers are recognizing the necessity of the external costing, but studies are not accomplished yet. This Study is the first case study on the external cost of air emission in Korea. The external cost of a oil power plant, which is located near big cities in the middle of Korea, is estimated as 8.6% of the unit generation cost.

Key word : External Cost, Life-Cycle Cost, Simplified Impact Pathway, Oil Power Plant

요약문

국가적인 에너지수급을 결정함에 있어서 많은 선진국들이 환경영향을 고려하고 있다. 이를 위해서 그 국가들은 환경영향을 화폐가치로 평가할 수 있는 방법론을 연구해 왔다. 선구적인 연구로 유럽연합과 미국 에너지성이 공동으로 수행한 'ExternE 프로젝트'는 환경외부비용에 대한 객관적 방법론을 제시하였고, 이로부터 IAEA는 간편한 방법으로 외부비용을 평가하는 프로그램을 개발하였다. 우리나라의 경우, 외부비용 산정의 필요성은 인식하고 있으나 아직 연구는 이루어지고 있지 않다. 본 연구는 이에 대한 출발점으로 수도권 소재 중유화력발전소의 2005년 데이터를 통하여 화력발전의 외부비용을 추정하였다. 단위발전량 당 외부비용은 전체 발전단가의 8.6% 인 것으로 나타났다.

주제어 : 외부비용(External Cost), 수명주기비용(Life-Cycle Cost),

간편영향경로(Simplified Impact Pathway), 중유화력(Oil Power Plant)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

외부성(Externality)이란 한 경제주체의 생산·소비 또는 분배행위가 시장교환에 참여하지 않고 있는 다른 소비자 또는 생산자에게 유리 또는 불리한 영향을 미치는 것을 말한다. 그리고 외부비용(External Cost)이란 그 중 불리한 영향의 화폐가치, 즉 경제활동 과정에서 대가를 치르지 않은 유무형의 비용을 뜻한다. 이 외부성의 개념은 지금까지 시장이 자원 배분을 원활하게 수행하지 못하는 현상인, '시장실패(Market Failure)의 전형적인 예로서 회자되고 있다. 특히, 음(-)의 외부성의 대표 격인 환경문제는 경제적 의사결정의 중요한 요소로 부각되고 있다.

90년대 후반부터 EU나 미국과 같은 고도산업화를 이룬 국가에서는 지속가능한 성장(Sustainable Development)이 중요한 화두로 등장하였다. 이 국가들은 장기적인 국가에너지 수급정책에 환경의 비중을 높이고 있으며, 그 효과를 제대로 반영하기 위해 환경외부비용을 합리적이고 과학적인 방법으로 추산하는데 많은 연구를 수행해 왔다. 환경외부비용은 오염원이 배출되어 인체 및 생태계에 미치는 직간접적인 영향을 화폐가치화 한 값으로서, 대표적인 연구사례로 ExternE 프로젝트가 있다. ExternE는 유럽 위원회(European Commission)와 미국 에너지부(Department of Energy)가 협력하여 1991년부터 추진하고 있는 대규모 프로젝트로서 환경오염물질이 인체에 미치는 손상원가를 규명하는데 주력하였다.

국내의 경우, 세계적인 온실가스규제 추세와 대기 질 개선에 대한 관심으로 에너지 정책에 환경적 요소 고려의 필요성이 부각되고 있으나, 오염물질의 외부비용에 대한 객관화된 방법론이나 사례연구는 부족한 실정이다. 물론, 환경성지수를 통해 에너지산업부문의 환경성을 평가하여 의사결정에 반영할 수 있으나, 환경 개선을 위한 투자의사결정에 직접적인 기준이 되기 위해서는 환경부하를 화폐단위로 평가하는 작업이 무엇보다도 중요하다. 본 연구는 IAEA가 개발한 대기오염물질의 환경외부비용 평가 소프트웨어인 Simpacts에 기초하여 국내

화력발전소 대기배출물의 외부비용을 평가하는 것을 목적으로 한다. 2장에서 자세히 설명되겠지만, Simpacts는 ExternE의 연구방법론을 차용하여 오염물질의 확산 및 인체영향 경로를 확정, 외부비용을 산출하는 프로그램이다.

뿐만 아니라, 본 연구는 산출된 외부비용을 내부화(Internalization)하여 발전원의 경제성을 평가하고, 나아가 궁극적으로는 타 전원이나 재생에너지원과의 비교를 통해서 환경성이 반영된 국가적 전원믹스를 결정하는데 기초적인 자료가 되고자 한다.

1.2 전과정 평가에서의 필요성

전과정 비용평가(Life-Cycle Costing : 이하 LCC)는 제품의 수명주기 동안의 비용을 기준 흐름에 따라 집계하여 제품 단위별 원가를 산출하고, 이로부터 기술이나 생산방식의 경제성을 평가하는 방법이다. LCC에 포함되는 요소¹⁾는 크게 투자관련 비용(Investment-related Cost), 운영비용(Operating Cost)으로 분류된다. 세부적으로 살펴보면, 투자관련 비용은 초기투자비용(Initial Investment Cost), 투자성 교체비용(Capital Replacement Cost), 잔존가치(Residual Value)²⁾ 세 종류로 나뉘지고, 운영비용은 에너지비용(Energy Cost), 용수비용(Water Cost), 유지보수비용(Operating, Maintenance and Repair Cost)으로 나뉘진다. 각 비용의 산출방식은 연말기준 기대현금 흐름으로 하며, 최종 결과치는 기준년도의 현재가치로 합산하여 경제성을 평가한다.

1) NIST Handbook 135, 1995

2) 부(negative)의 잔존가치는 폐기 혹은 철거로 인한 비용이 소요됨을 의미한다.

<Table 1. LCC 비용분류 및 방법론>

비용항목	세부항목
투자관련 비용 (Investment related Cost)	초기투자비용
	투자성 교체비용
	잔존가치(철거비용 포함)
운영 비용 (Operating Cost)	에너지비용
	용수 비용
	유지보수비용
현재가치 전환	
$PV \text{ of LCC} = \sum_{k=0}^n \frac{C_k}{(1+d)^k} = C_0 + \frac{C_1}{(1+d)^1} + \dots + \frac{C_n}{(1+d)^n}$ <p> C_k : k년도에 지출된 비용. d : 실질할인율. $\rightarrow d = \frac{(1+i)}{(1+\pi)} - 1$ $(i$: 명목할인율, π : 인플레이션율) n : 프로젝트 종료시점. </p>	

그런데, 이러한 비용구성요소에는 기대되는 현금흐름, 즉 실제 지출이 예상되는 화폐액만 고려되고 있어 화폐단위로 추산되지 않는 무형의 자산이나 비용이 계상되지 않는다. 따라서 이렇게 평가할 경우 평가대상의 실제 경제성과 과소 또는 과대 계상할 가능성이 존재한다.

특히 환경적 요인으로 인한 부(-)의 효과가 원가에 가산되지 않을 경우, 해당 사업이나 기술의 경제성을 과대평가하게 된다. 왜냐하면 그 부의 효과를 개선하기 위한 설비 혹은 비용을 추가했다면 전체 비용이 상승했을 것이기 때문이다. 더욱이 전력산업과 같은 대규모 장치산업은 환경개선을 위한 설비의 비용규모가 상당하여, 그것 자체의 경제성을 살피기 위해서는 설비추가에 대한 기회비용으로서 환경부하가 만들어내는 물리적 손실의 화폐가치를 파악하는 것이 매우 중요하다. 이러한 관점에서 환경부하가 생성하는 외부비용을 LCC에 반영하여 실제적인 경제성을 파악하는 것이 절실히 요구된다.

2. 외부비용 산정 방법론

2.1. 외부비용 프로그램 개관

환경오염 물질의 배출로 인한 외부비용은, 인체에 미치는 영향, 농작물 수확감소에 미치는 영향, 구조물 부식으로 인한 영향, 생태계에 미치는 영향으로 분류될 수 있다. 현재 생태계에 미치는 영향을 제외한 나머지는, ExternE를 통해 화폐가치 전환방법론이 정식화되어 유럽지역을 중심으로 사례연구 되고 있다.

그러나 외부비용을 객관적으로 평가하기 위해서는 특성상 다량의 입력 자료가 필요하고 막대한 자금이 소요된다. 따라서 요구되는 환경관련 자료가 구축되어 있지 않고, 연구개발의 금전적 여력이 없는 개발도상국에서는 복잡한 환경외부비용 평가를 수행하는 데 어려움이 따른다. 국제원자력기구(IAEA)는 이를 고려하여 입력 자료를 최소화 하면서 ExternE의 연구결과에 매우 근접하는 결과를 도출하는 외부비용 산정 소프트웨어인, Simpacts를 개발 보급하고 있다.

<Table 2. SO₂의 손상비용 중 농작물 피해와 구조물 부식이 차지하는 비중>

오염원 위치	농작물피해(%)	구조물부식(%)
Albi(Fr)	0.07	1.3
Barcelona(Es)	0.20	1.5
Bordeaux(Fr)	0.31	2.5
London(UK)	0.27	4.1
Nantes(Fr)	0.05	1.0
Paris(Fr)	0.11	2.2
Piacenza(It)	0.28	2.5
Stuttgart(De)	0.24	3.0
Vienna(Au)	0.19	3.6
평균	0.19	2.4
표준편차	0.095	1.0

* 총 손상비용(Total Damage Cost)은 인체손상비용, 농작물피해비용, 구조물부식비용으로 구성되며, 이 표는 그 중 농작물과 구조물의 피해비용이 전체 손상비용에 차지하는 비중을 뜻함.
자료출처: ExternE, 1998

Simpacts는 세 가지 모듈로 구성되어 있다. 이는 각각 비방사성 대기오염물질의 외부비용을 도출하는 Airpacts, 방사성 오염물질의 외부비용을 도출하는 Nukpacts, 그리고 댐건설로 인한 외부비용을 도출하는 HydroPacts이

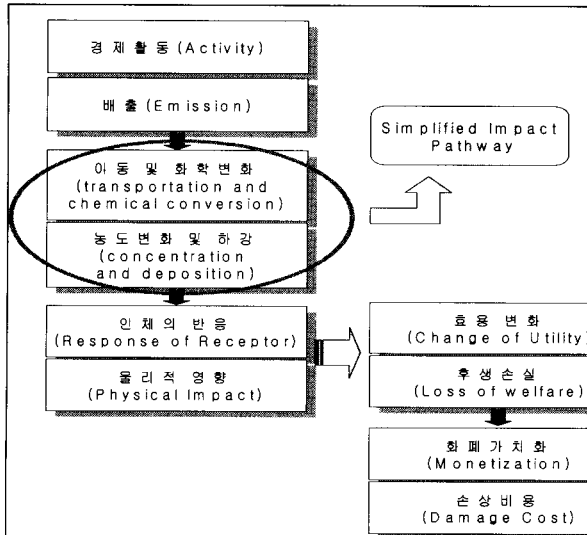
다. 본 연구에서 사용될 모듈은 Airpacts이며, 이 모듈은 전체 외부비용 중에서 '인체에 미치는 영향의 외부비용'만을 평가하고 있다. 그 이유는 농작물피해, 구조물부식과 관련한 외부비용이 상대적으로 매우 작은 비중을 차지하기 때문이다(Table 2. 참고).

2.2. Airpacts의 방법론

2.2.1. 영향경로(Impacts Pathway)

Airpacts는 역학(Epidemiology)적으로 수명을 단축하거나 질병을 야기하는 것으로 알려진 대기오염물질인 SO₂, NO_x, PM10, CO에 대한 인체 외부비용을 평가하는 소프트웨어이다. 구체적으로는, 1차 배출원인 SO₂, NO_x, PM10, CO와 이들의 화학적 변화로 생성된 2차 배출원 황산염(Sulfates), 질산염(Nitrates)이 원인이 되는 각종 질병 및 수명단축, 그리고 활동제한에 대한 화폐적 가치를 추정한다. 전체적인 평가 방법론은, <Graph 1.>과 같다.

<그림 1. Airpacts의 방법론>

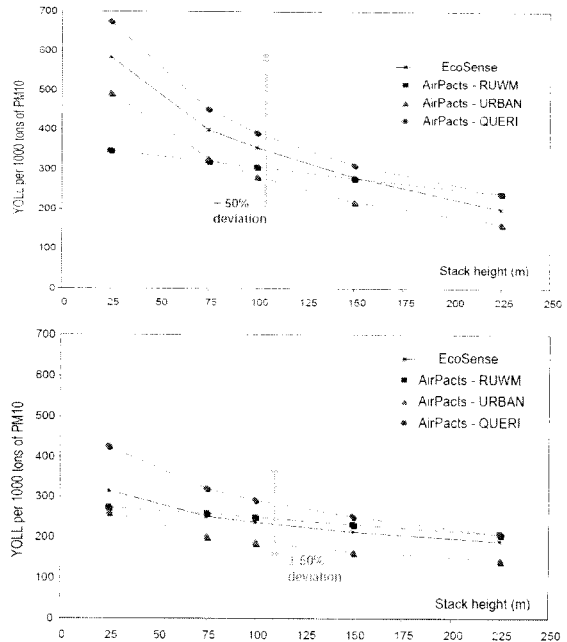


Airpacts은 간편 영향경로 접근법(Simplified Impacts Pathway)에 근거하여, 오염물질의 배출부터 이동, 소멸, 화학적 변화과정을 고려하고 있다. <그림 1>의 붉은 부분이 간소화한 영향경로를 의미하는 부분이다. 이것은 배출원 주변의 기상자료와 굴뚝의 높이를 변수로 하여 일정한 가정과 이론에 근거하여 주변지역의 농도를 간략하게 계산하는 방법론이다.

이렇게 영향경로를 간소화할 수 있는 근거는

다음과 같다. 첫째, 환경 손실비용을 추정함에 있어 현실상황과 부합하는 지식에 한계가 존재한다. 둘째, 상세분석에는 매우 많은 데이터가 소요되는데 그에 비해 간소화 방법론의 결과가 크게 다르지 않다. 셋째, 상세 분석에는 입력 자료의 불확실성이나 결핍을 설명할 민감도 분석을 신속히 수행하기 매우 어렵고, 많은 시간과 인력을 필요로 한다.

<Graph 1. Airpacts 방법론의 유효성>



※ 위 그래프는 각각 Paris, Stuttgart의 모델별 평가결과를 비교하고 있다. 상세모델인 EcoSense의 결과값에 50%신뢰구간³⁾을 적용하여 구간추정을 하여도 RUWM 및 QUERI의 결과값이 모두 구간추정범위 내에 존재한다.

2.2.2 손실함수(Damage Function)

가정된 영향경로에 따라 농도가 계산되면 배출원 주변의 인구의 분포를 이용하여 오염물질의 인체영향을 누적시키고, 이를 화폐단위로 전환하게 된다. 이에 대한 구체적인 손실비용⁴⁾함수는 식(1)과 같다.

3) 일반적으로 통계학에서는 68%(± 1표준오차)와 95%(± 2표준오차) 신뢰구간을 사용하며, 확률을 크게 잡는다는 의미는 추정치가 틀릴 확률을 줄이기 위해 추정구간의 범위를 넓게 잡는다는 것을 뜻한다.

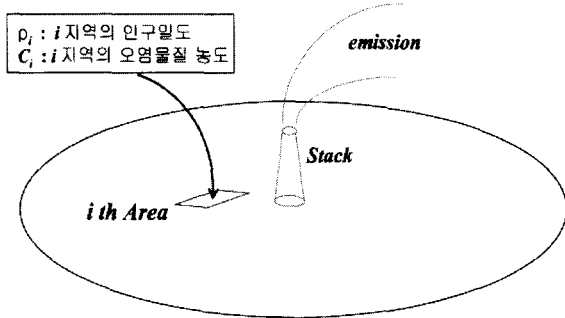
4) Airpacts에서 외부비용은 인체에 미치는 각종 손실만을 계산하므로, 본 논문에서는 인체손실비용(Health Damage Cost) 혹은 손실비용(Damage Cost)은 외부비용(External Cost)과 동일한 표현으로 사용한다.

$$D = \sum_{i \in Area} \rho_i \cdot F_i(C_i) \cdot U_V = \sum_{i \in Area} \rho_i \cdot f_{ER} \cdot C_i \cdot U_V$$

$$= \int_{Area} \rho(r) \cdot f_{ER} \cdot C(r, Q) \cdot U_V dr$$

$\rho(r)$: 반경 r 내의 인구밀도
 $C(r)$: 반경 r 내의 오염물질 농도
 f_{ER} : 노출반응계수
 U_V : 해당질병의 단위비용 -----식(1)

<그림 2. 손실함수 개념도>



손실함수(Damage Cost)는 연간 배출량으로 인한 단위지역의 손실액을 적분한 값이다. 단위지역 당 손실액은 인구밀도에 1인당 손실액을 곱하여 산출하며, 1인당 손실액은 해당질병의 발병횟수에 질병의 단위비용(U_V)을 곱하여 계산한다. 질병의 발병횟수는 단순히 해당질병의 노출반응계수(f_{ER})에 농도(C_i)의 곱으로 표현되는데, 그 이유는 역학적으로 발병횟수가 오염물질 농도에 선형성을 가지기 때문이다.

$$Health\ Impact = F(C) = f_{ER} \times C \quad \text{--- 식(2)}$$

이 계수는 ExternE가 수행한 회귀분석 결과를 이용하였으며, Airpacts에 내장되어 있는 각 질병의 ERF 값은 <Table 3.>과 같다.

<Table 3. 질병의 노출반응계수(ERF)>

Pollutant	ERF name	Endpoint type	ERF slope Cases/yr per (pers.ug/m ³)
PM ₁₀	Mortality YOLL [Pope 2002]	Long-term mortality	3.90E-04
PM ₁₀	Chronic Bronchitis [Abbey 1995]	Morbidity	3.92E-05
PM ₁₀	net Restricted activity days [Ostro 1987]	Morbidity	1.98E-02
PM ₁₀	Respiratory hospitalization [Dab 1996]	Morbidity	2.07E-06
PM ₁₀	Cerebrovascular hospitalization [Wordley 1997]	Morbidity	5.04E-06
PM ₁₀	Chronic cough, children [Dockery 1989]	Morbidity	4.14E-04
PM ₁₀	Congestive heart failure, elderly [Schwartz/Morris 1995]	Morbidity	2.59E-06
PM ₁₀	Cough, adult asthmatics [Dusseldorp 1995]	Morbidity	9.39E-03
PM ₁₀	Bronchodilator use, adult asthmatics [Dusseldorp 1995]	Morbidity	4.56E-03
PM ₁₀	Lower respiratory symptoms, adult asthmatics [Dusseldorp 1995]	Morbidity	1.70E-03
PM ₁₀	Cough, children asthmatics [Pope/Dockery 1992]	Morbidity	1.87E-03
PM ₁₀	Bronchodilator use, children asthmatics [Roemer 1993]	Morbidity	5.43E-04
PM ₁₀	Lower respiratory symptoms, children asthmatics [Roemer 1993]	Morbidity	7.20E-04
SO ₂	Mortality YOLL [Ardeson/Louami 1996]	Short-term mortality	5.34E-06
SO ₂	Respiratory hospitalization [Ponce de Leon 1996]	Morbidity	2.40E-06

자료출처 : ExternE, 1998

2.2.3. 화폐가치화(Monetary Valuation)

오염 물질의 농도 증가로 인해 인체에 미치는 영향이 정량화 되면 이를 화폐가치로 전환하여야 한다. 이는 인체영향(단위: case/person)에 질병의 단위비용(Unit Cost, 단위: US\$/case⁵⁾)을 곱하여 계산한다. 단위비용은 시장가치 혹은 비시장가치로 표현되는데, 시장가치로 표현되는 요소는 질병으로 인한 생산성 감소와 질병 치유비용이며, 비시장가치는 후생감소를 지불의사(willingness to pay)로 표현하여 나타낸다.

지불의사는 만족가격 접근법(Hedonic Price Approach⁶⁾)과 표본조사법으로 산출 될 수 있다. 이 소프트웨어는 사망위험에 대한 가치를 평가할 때 표본조사법을 이용하며, 이는 표본을 추출하여 위험을 회피하는 조건으로 지불할 용의가 있는 화폐액을 통계적으로 산출한 값이다. 질병의 경우는 질병치료에 소요되는 총비용을 2000년 EU 시장가격으로 계산하였고, 활동일수 감소는 2000년 기준 EU 1일 평균 임금으로 가치를 책정하였다.

5) ExternE 1998년 보고서에 나타난 단위비용은 단위가 2000년 Euro이나, 당시의 US\$와 Euro의 환율은 거의 1:1이었으므로 동일하게 보아도 무방함.

6) 헤도닉 가격접근법(Hedonic Price Approach) : 상품의 가격에는 소비자 선호가 반영되어 있으므로 동종의 다른 상품과의 가격 차이를 그 상품만이 가지는 비계량적 가치로 간주하는 방법이다. 예를 들면, 다른 모든 것이 동일한 주택 중에서 환경오염이 덜한 지역의 주택가격과 그렇지 않은 주택의 가격 차이가 소비자들이 평가하는 깨끗한 환경의 가치라고 결정하는 방법이다.

<Table 4. 질병의 단위비용>

ERF name	Endpoint type	Unit cost Euro (2000)
Mortality YOLL [Pope 2002]	Long-term mortality	50000 (VOLY)
Chronic Bronchitis [Abbey 1995]	Morbidity	169300
net Restricted activity days [Ostro 1997]	Morbidity	110
Respiratory hospitalization [Dab 1996]	Morbidity	4320
Cerebrovascular hospitalization [Wordley 1997]	Morbidity	16730
Chronic cough, children [Dockery 1989]	Morbidity	240
Congestive heart failure, elderly [Schwartz/Morris 1995]	Morbidity	3260
Cough, adult asthmatics [Dusseidorp 1995]	Morbidity	45
Bronchodilator use, adult asthmatics [Dusseidorp 1995]	Morbidity	40
Lower respiratory symptoms, adult asthmatics [Dusseidorp 1995]	Morbidity	8
Cough, children asthmatics [Pope/Dockery 1992]	Morbidity	45
Bronchodilator use, children asthmatics [Roemer 1993]	Morbidity	40
Lower respiratory symptoms, children asthmatics [Roemer 1993]	Morbidity	8
Mortality YOLL [Andersson/Toulemy 1996]	Short-term mortality	75000 (VOLY)
Respiratory hospitalization [Ponce de Leon 1996]	Morbidity	4320

자료출처 : ExternE, 1998

그런데 화폐가치전환의 경우, 지역마다 가치 기준이나 위험회피 정도가 다를 수 있기 때문에 지역별로 개별적인 연구가 이루어져야 한다. 하지만 그에는 많은 시간과 인력이 소요기 때문에 Airpacts은 간접적으로 추정하는 방법을 채택하고 있다. 간접 추정은 지역마다의 가치기준이나 위험회피는 크게 다르지 않다고 가정하여, 유럽의 단위비용을 해당 지역의 실질 구매력을 기준으로 전환하는 방법이다. 전환계수는 1인당 GDP(Gross Domestic Product per capita)비율로 계산하고, 실질구매력을 적용하기 위해 화폐단위(US\$)로 전환 시 구매력평가환율(Purchasing Power Parity, PPP)을 적용하였다. 이것을 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$U_{V_{South\ Korea}} = U_{V_{EU}} \times \frac{PPP\ GDP / cap_{South\ Korea}}{PPP\ GDP / cap_{EU}} \quad \text{--- 식(3)}$$

2.3. Airpacts의 추정방법들

대기상태와 주변인구에 대한 가정에 따라 Airpacts은 4가지 서로 다른 추정법을 제시하고 있다. 이들은 각각 SUWM, RUWM#1, RUWM#2, QUERI 모델로 불리며, 이 순서대로 데이터 수준과 정밀도가 높아진다.

2.3.1. SUWM

SUWM(Simple Uniform World Model)은 가장 데이터의 요구 수준이 낮고 가정이 강한

모델이다. SUWM이 가정하는 상황은 다음과 같다.

- ① 연구대상지역의 대기는 균일하다.
- ② 연구대상지역의 인구밀도(ρ)는 균일하다.
- ③ 배출원의 높이는 고려되지 않는다.

일반적으로 오염물질이 대기 중에서 사라지는 속도(depletion velocity, k)⁷⁾는 지역마다 차이가 나지만, SUWM은 연구대상 전 지역의 대기가 균일하기 때문에 그 속도가 지역에 관계없이 일정한 것으로 가정한다. 또, 인구가 모두 일정하게 분포하고 있는 것으로 가정하므로 인구수로 인한 손상비용의 지역적 편중이 없다. 따라서 위치와 무관하게 총 손상비용은 연간 오염배출량(Q)의 함수가 된다.

$$D = \int_{Area} \rho(r) \cdot f_{ER} \cdot C(r, Q) \cdot U_V dr = \int_{Area} \rho \cdot f_{ER} \cdot C(Q) \cdot U_V dr$$

$$= \rho \cdot f_{ER} \cdot U_V \int_{Area} C(Q) dr = \frac{\rho \cdot f_{ER} \cdot U_V \cdot Q}{k} \quad \text{--- 식(4)}$$

이러한 가정은 도시가 인근 해 있거나 국지적으로도 지역별 기후특성이 다른 현실과 큰 차이가 있으나, 오염배출원의 위치가 비도시지역(rural site)에 있고 배출높이가 낮은 경우에는 정밀한 연구결과와 큰 차이가 나지 않는 것으로 알려져 있다.⁸⁾

2.3.2. RUWM#1

RUWM#1(Robust Uniform World Model#1)은 SUWM이 가정하는 환경과 동일하나 연구대상지역을 두 지역으로 나누어 고려했다는 점에서 추정치를 더 정밀하게 산출하는 모델이다. RUWM#1은 반경 50km를 국소지역(rocal area), 50~1000km까지를 광역지역(regional area)으로 구분하여 손상비용을 계산한다.

7) 사라지는 요인으로는 건식퇴적(dry deposition)과 습식퇴적(wet deposition), 그리고 화학반응(chemical reaction) 세가지 종류가 있다.

8) J. V. Spadaro(2002 b)

$$\begin{aligned}
D_{RUWM\#1} &= D_{Local} + D_{Regional} \\
&= \int_{R_o}^{\infty} 2\pi r \cdot \rho_{reg} \cdot f_{ER} \cdot C(r) \cdot U_V dr \\
&\quad + \int_0^{R_o} 2\pi r \cdot \rho_{loc} \cdot f_{ER} \cdot C(r) \cdot U_V dr \\
&= D_{SUWM} \times C_{RUWM\#1} \\
(\text{단, } C_{RUWM\#1} &= \frac{\rho_{loc}}{\rho_{reg}} \cdot [1 - e^{-\frac{k \cdot R_o}{u \cdot h_{mix}}}] + e^{-\frac{k \cdot R_o}{u \cdot h_{mix}}}) \\
&\text{-----식 (5)}
\end{aligned}$$

추가되는 정보는 국소지역(rocal area)의 인구밀도이며, 이로부터 계산한 결과는 SUWM 추정치에 일정한 계수를 곱해준 값으로 도출된다. 인구밀도에 지역적 차등을 주어 SUWM보다는 가정을 완화했으나, 지역 내에서는 균일한 인구밀도를 지닌다는 비현실적 가정과 기상 데이터 미고려로 인해 여전히 정밀도가 낮은 모델이다.

2.3.3. RUWM#2

RUWM#2(Robust Uniform World Model#2)이 가정하는 환경은 다음과 같다.

- ① 인구는 균일하나 국소지역과 광역지역의 인구밀도는 서로 상이하다.
- ② 연중 바람의 강도와 방향은 360° 균일하다.
- ③ 국소지역의 오염원 농도는 가우시안 확산방식(Gaussian Plum)에 의해 결정된다.
- ④ 배출원의 높이가 고려된다.

RUWM#2이 이전 모델과 다른 가장 큰 차이점은 가우시안 확산함수를 가정하고 연평균 기상데이터를 이용해 국소지역의 오염원의 농도를 정밀하게 계산한다는 점이다. 또한 배출원의 높이를 고려함으로써 국소지역에서의 오염원 농도 분포가 보다 현실과 부합하도록 계산한다. 이로 인해 SUWM 추정치에 곱해지는 계수($C_{RUWM\#2}$)가 달라졌으며, 그 계산식은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
D_{RUWM\#2} &= D_{Local} + D_{Regional} \\
&= \int_0^{R_o} 2\pi r \cdot \rho_{loc} \cdot f_{ER} \cdot C(r, z) \cdot U_V dr \\
&\quad + \int_{R_o}^{\infty} 2\pi r \cdot \rho_{loc} \cdot f_{ER} \cdot C(r, z) \cdot U_V dr \\
&= D_{SUWM} \times C_{RUWM\#2} \\
(\text{단, } C_{RUWM\#2} &= \frac{\rho_{loc}}{\rho_{reg}} \cdot \left(\frac{\sqrt{2k}}{\sqrt{\pi} \cdot u} \right) \cdot \int_0^{R_o} \frac{1}{\sigma_z} \cdot e^{-\frac{kz^2}{2\sigma_z^2}} dr + e^{-\frac{k \cdot R_o}{u \cdot h_{mix}}}) \\
&\text{----- 식 (6)}
\end{aligned}$$

2.3.4. QUERI

QUERI 모델은 Airpacts이 제공하는 4가지 모델 중 가장 정밀도가 높은 모델이다. 이 모델은 국소지역의 인체손상비용을 정밀하게 계산하기 위하여, 일년간 매시간 기상데이터를 이용하여 국소지역의 농도를 산출한다. 이때, 확산경로는 RUWM#2와 마찬가지로 가우시안 확산경로를 사용한다. 그리고 인구데이터의 경우도 보다 세분화하여, 배출원 주변인 국소지역을 5km×5km 격자로 나누어 인구분포를 세분화하여 총 인체손상비용을 산출한다. 광역지역의 손상비용은 앞의 두 모델(RUWM#1, RUWM#2)과 마찬가지로 SUWM의 추정치를 그대로 사용하는데, 이는 세분화에 의한 실익이 없기 때문이다. QUERI의 계산식은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned}
D_{QUERI} &= D_{Local} + D_{Regional} \\
&= \sum_{i \in Area} \rho_i \cdot f_{ER} \cdot \Delta C_i \cdot U_V \\
&\quad + \frac{\rho_{reg} \cdot f_{ER} \cdot U_V \cdot Q}{k} \times e^{-b \cdot R_o} \\
&\text{----- 식 (7)}
\end{aligned}$$

3. 사례연구

본 사례연구는 Airpacts를 이용하여 수도권에 위치하고 있는 대표적인 중유발전소의 연간 배출정보와 연간 기상자료, 그리고 주변지역의 시·군 단위 인구자료를 이용해, 대기배출물의 인체 외부비용을 평가하였다. 모든 입력데이터는 2005년 자료를 기준으로 하였다.

3.1. 입력자료

3.1.1. 인구자료

4개의 세부 모델에 모두 들어가게 될 광역지역의 인구밀도는 발전소 반경 1000km⁹⁾로 설정하였다. 1000km 반경은, 남한과 북한을 포함하고, 북으로 중국 동북지역부터, 서에서 남으로는 요동반도부터 상하이에 이르는 중국 해안지역을 포함하며 일본열도의 일부를 포함한다(<그림 3> 참고). 총인구데이터는 2005년 IMF자료를 이용하였으며, 백만 명 단위이하로 절사하여 남한 4천8백만, 북한 2천3백만, 중국 2억, 일본 4천4백만(중국, 일본은 총인구 중 연구대상지역 내의 인구비율로 추산함.)으로 산출하였다. 이로부터, 바다의 넓이를 감안해 해당 지역의 인구밀도를 산출하면 100 명/km²이다.

<그림 3. 발전소 주변 1000km반경 지역>

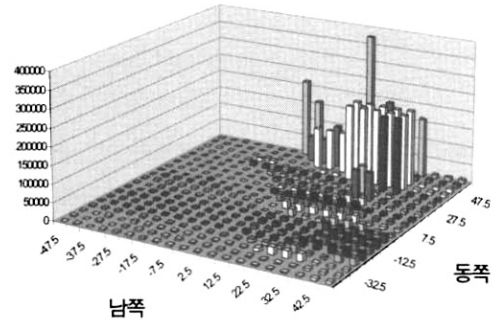


국소지역의 인구밀도는 50km반경 내의 시·군 단위 인구자료를 합산하여 해당지역 넓이로 나누어 산출하였다. 이때 사용한 인구자료는 통계청 2005년 총인구조사 자료를 이용하였으며, QUERI 모델에서 사용하게 될 5km×5km 격자지형 인구밀도의 경우는 행정구역 단위별 인구통계를 정방형(5km×5km)에 맞게 보정

9) Airpacts이 추천하는 광역지역의 범위는, 발전원이 대도시인근이면 반경 500km, 그 외의 경우는 반경 1000km이다.

하여 산출하였다. <Graph 2>는 해당 발전소 주변 5km×5km 인구를 3차원으로 옮긴 그림이다.

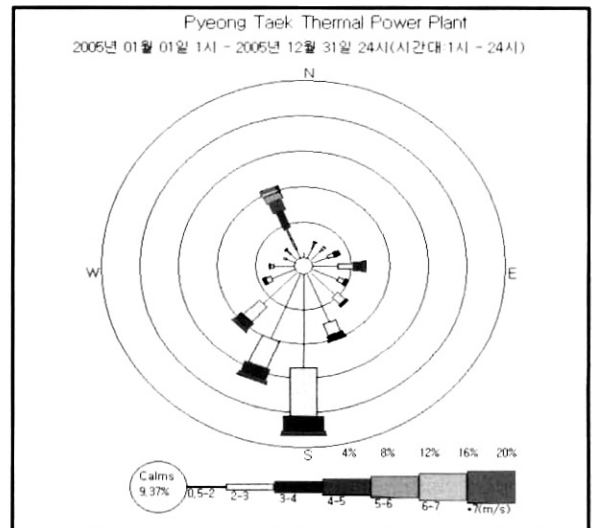
<Graph 2. 국소지역 5km×5km 인구밀도>



3.1.2. 오염배출량 통계 및 기상자료

기상자료 및 오염배출량 통계는 해당 발전소 측에서 매시간 별로 기록한 자료를 토대로 하였다. <그림 4>와 <Table 5>는 각각 발전소 주변 연간 기상데이터 및 배출통계를 보여주고 있다.

<그림 4. 2005년 발전소 풍향 및 풍속>



<Table 5. 2005년 발전소 대기배출 통계>

Source	CO ₂	PM10	SO ₂	NO _x
Emission (ton/yr)	3,950,650	77	2,807	5,622
Emission Factor (g/kWh)	719	0.014	0.51	1.02

※ 이 배출통계는 굴뚝에 부착된 기록장치가 굴뚝의 반경과 배기가스의 배출속도 및 농도를 측정하여 질량단위로 환산한 값임. 한국서부발전(주) 제공.
 ※ 2005년 해당 발전소의 발전량 : 5,498GWh

3.1.3 기타 가정

오염물질의 농도계산에 필요한 중요한 요소는 오염물질이 배출되어 확산되는 과정에서 대기에서 사라지는 속도(depletion velocity)이다. 이 속도는 지역에 따라 차이를 보이기 때문에 연구대상지역의 값을 실측하여 이용하여야 하나, 본 연구에서는 같은 위도 상에 있는 동북아시아 지역의 대기환경은 유사하다는 가정 아래, 중국 상하이와 북경 자료의 평균값을 이용하였다.

<Table 6. Depletion velocity>

지역	PM10	SO ₂	Sulfate	NO _x	Nitrate
북경	0.64	0.84	1.44	1.77	0.82
상해	0.96	1.06	1.40	2.27	1.02
중국 남부	1.83	1.16	0.90	2.26	0.81
중국 중부	0.99	1.06	2.35	2.06	0.67
한국*	0.80	0.95	2.02	1.42	0.92

* : 북경과 상해의 값을 평균하여 추정함.

손상원가를 연구대상지역의 실질구매력 가치로 전환하기 위해 곱하는 계수는 <그림 3>의 굵은 원 내부영역(한국, 중국, 일본) 인구에 비례하여 산출하였다. 왜냐하면 남한 내의 배출원의 경우 오염원의 영향 범위가 주변국까지 포함되기 때문이다. 산출하는 방식은 식(3)을 따르되 한국, 중국, 일본의 PPP GDP를 각 국의 인구 비중으로 가중 평균한 값으로 가정하였다. 이때, 인구비중만으로 가중 평균하게 될

경우, 본 연구의 실질구매력 가치는 EU 25개국의 41.5%이나, 영향규모가 큰 국소지역이 포함된 남한에 더 큰 가중치를 주어 EU지역의 60%를 본연구의 실질구매력으로 가정하였다.

<Table 7. 실질구매력 가치전환 계수>

	남한	북한	중국	일본	본연구
총인구 (백만)	48	23	200	44	315
인구 비율	0.15	0.07	0.64	0.14	1
1인GDP (\$2005)	19,515	-	5,791	29,165	10,722
EU대비 전환비율	0.76	-	0.22	1.13	0.6

※ 2005년 EU25 1인당 PPP GDP : \$ 25,838

3.2. 결과 및 해석

각 모델의 시뮬레이션 결과는 <Table 8>과 같다. 각 오염물질의 단위배출량 당 인체손상비용(이하 단위비용)을 살펴보면, 1차 오염물질인 PM10, SO₂은 모델 별 편차가 심하지만, 직접 배출되지 않고 화학적 변화로 생성되는 2차 오염물질인 Sulfate, Nitrate은 4개의 모델 모두 동일하게 나타났다. 이는 4개 모델 모두 광역지역의 추정 방법론이 같고, 2차 오염물질은 모두 광역지역에만 영향을 미치기 때문이다.

<Table 8. 각 모델별 인체손상단가 및 총 비용>

	SUWM	RUWM#1	RUWM#2	QUERI
PM10 (\$/Kg)	6.17 (475)	43.16 (3,323)	30.14 (2,321)	15.74 (1,212)
SO ₂ (\$/Kg)	0.13 (365)	0.58 (1,632)	0.40 (1,127)	0.20 (568)
Sulfate (\$/Kg)	2.80 (7,854)	2.80 (7,854)	2.80 (7,854)	2.80 (7,854)
Nitrate (\$/Kg)	6.14 (34,530)	6.14 (34,530)	6.14 (34,530)	6.14 (34,530)
총비용 (백만\$)	43.224	47.339	45.832	44.164
생산대비 (¢/kWh)	0.786	0.861	0.834	0.803

※ 괄호 안은 손상비용이며 단위는 백만\$.

그러나 총 배출물의 연간 인체손상비용은 큰 차이를 보이지 않는데, 이는 단위비용의 편차가 심한 PM10의 배출량이 총 오염물질에서 차지하는 비율이 매우 작기 때문이다(<Table 5> 참고). 총 손상비용에서 가장 큰 영향을 미치는 요소는 Nitrate로, 배출량이 연간 5,622 톤으로 가장 많을 뿐 아니라 단위비용도 6.14 \$/Kg으로 가장 크다.

또, 2005년 연간 총 발전량(5,498GWh)로 나누어 단위 발전량 당 인체손상비용을 살펴보면, 4개 모델이 0.786 ~ 0.861¢(센트)로 대략 0.83¢의 외부비용이 계산되었다. 이 값은 2005년 연간 환율을 950원/\$로 보았을 때 약 7.89원으로, 이는 2005년 발전단가¹⁰⁾ 91.25 원의 8.65%에 해당한다.

4. 결론

이미 많은 선진국들은 장기적인 에너지 수급을 계획하는 데 환경오염의 가치를 의사결정에 반영하는 추세다. 하지만 환경오염의 가치를 과학적인 방법으로 추정하는 것은 그 중요성만큼 매우 어려운 작업이다. 이미 몇몇 선진국들은, 환경오염 물질의 영향 경로를 과학적으로 정식화하고, 이로부터 환경영향을 객관화된 화폐액으로 전환하는 연구들을 수행하였다.

우리나라도 에너지수급정책에 환경적 요소가 포함되어야 할 필요성이 증대되고 있지만, 객관화된 외부비용을 밝히는 국내 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 이제 환경은 필수적인 의사결정요소인 만큼, 모든 발전원의 외부비용을 추정하여 이를 LCC에 가산해 비교 평가하여야 할 필요성이 있다.

본 연구는 이러한 연장선의 출발점으로서 국내의 대표적인 중유화력 발전소의 외부비용을 평가하였다. IAEA에서 배포한 Airpacts의 방법론으로부터 산출한 외부비용은 단위발전량(kWh) 당 7.89원으로 전체 발전단가의 약 8.7%를 차지하는 것으로 추정되었다. 다음 연구과제는, 석탄 및 LNG 등 다른 화석연료의 외부비용을 산출하여 본 연구결과와 비교 평가하는 작업이 될 것이다.

10) 이 발전단가는 변동비 뿐 아니라 투자지출을 모두 포함한 원가이다.

5. 참고문헌

- 1) 통계DB서비스(<http://kosis.nso.go.kr>), 2005년 총인구조사, 통계청.
- 2) The World Economic Outlook Database (<http://www.imf.org/external/pubs>), IMF.
- 3) ExternE, 1998. ExternE: Externalities of Energy, Vol. 7: Methodology 1998 Update (EUR 19083)
- 4) ExternE, 2000. External costs of energy conversion—improvement of the ExternE methodology and assessment of energy-related transport externalities. Final Report for Contract JOS3-CT97-0015.
- 5) NIST Handbook 135. (1995)
- 6) Rabl A and Spadaro, J.V. (1999) "Damages and Costs of Air Pollution: An Analysis of Uncertainties", Environment International
- 7) Rabl, A. and Spadaro, J.V. (2000) "Public Health Impact of Air Pollution and Implications for the Energy System", Annu. Rev. Energy Environ., 25, pp. 601-627
- 8) Spadaro, J.V. and Rabl, A. (1999) "Estimates of Real Damage from Air Pollution: Site Dependence and Simple Impact Indices for LCA" International Journal of Life Cycle Assessment, 4 (4).
- 9) Spadaro, J.V. and Rabl A. (2002_a) "Air Pollution Damage Estimates: The Cost per kg of Pollutant", International Journal of Environmental Technology and Management, 3 (1), pp.75-98.

10) Spadaro, J.V. (2002_b) "A Simplified Methodology for Calculating the Health Impacts and Damage Costs of Airborne Pollution: The Uniform World Models" report prepared for the Paul Scherrer Institut (Villigen, Switzerland) for the China Electricity Technology

Project, 63 pages, February 2002.

사사 : 본 연구는 (주)한국서부발전의 연구지원으로 수행되었음을 알려드리며, 연구를 위하여 주요 통계자료를 제공하는 등 물심양면으로 도와주신 서부발전 관계자 분들에게 감사를 드립니다.