

연구논문

## 영향경로해석을 이용한 수원시 가상 점오염원의 외부비용 예측 - 수원시와 파리시 비교분석을 중심으로 -

정 상 진

경기대학교 토목환경공학부

(2005년 7월 21일 접수, 2005년 8월 22일 승인)

### External cost Forecasting of Virtual Point Source in Suwon Area Using Impact Pathway Analysis - A Comparison of Suwon to Paris -

Sang Jin Jeong

Dept. of Environmental Engineering, Kyonggi University

(Manuscript received 21 July 2005; accepted 22 August 2005)

#### Abstract

Impact pathway analysis(IPA) is a bottom-up approach to estimates health and environmental risks from emissions of classical pollutants (eg. PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO). The model starts from the emission rates of facility, calculates the yearly mean concentrations of pollutants at the ground level using atmospheric dispersion models. After this, proper epidemiological exposure-response functions are applied to determine the impact on the receptors. Finally the methodology can monetise the calculated physical impact on the basis of selected economic evaluation. The aim of this study is to evaluate an external cost of virtual point source in Suwon area using IPA. The results shows minor modification of local input data can make it possible to apply the model to Suwon area.

Key words : Air pollution, Impact pathway analysis, Damage cost, Point source

#### 1. 서론

국내외적으로 의사결정론자들의 정책결정에서 공

중보건 및 환경에서 물리적 그리고 경제에 대한 관심이 증대되고 있다. 지속가능한 개발(sustainable development)을 위해서 인류의 에너지 사용과 에너

지 공급가격에 대한 요구증가에 따른 경제와 환경의 주의 깊은 균형을 필요로 한다. 만일 경제개발이 이롭고 필요한 것이라면, 지속가능한 경제성장은 환경위해(environmental risk)와 관련한 피해비용(damage cost)의 적절한 관리를 통하여 달성될 수 있을 것이다. 대기, 물 그리고 토양 속으로 오염물의 배출은 인체건강(human health), 농작물, 자연 그리고 인공구조물에 내적(internal) 또는 외적(external) 노출 및 경로를 통하여 많은 영향을 주고 있다. 공공 건강에 대한 역학적(epidemiological) 연구에 따르면 대기오염 노출에 따른 급성 질환율(예를 들면, 천식, 호흡기 그리고 순환기병에 따른 병원 입원과 기대수명(life expectancy)의 단축(years of life lost, YOLL)이 증대됨을 보이고 있다(Spadaro, 2002).

대기배출에 의한 피해(damage)의 평가는 환경정책과 경제정책에 대한 의사결정에서 중요하다. 산업 활동은 다양한 범위의 수용체(receptor), 예를 들면 인체, 자연생태계, 인공구조물 등에 피해를 입히는 원인이 된다. 그 결과로 발생하는 피해비용 중 에너지의 시장가격에 명백히 포함되지 않아서 보상 없이 영향 받은 수용체에 부과된 피해비용을 외부비용(external cost)이라고 하는데, 그 이유는 생산에서 시장가격에 영향을 주지 않기 때문으로 전통적으로 산업 정책과 정부의 관리정책에서 무시되어 왔기 때문이다. 그러나 다른 제삼자들은 소위 말하는 외부비용의 내부 비용화(internalization)에 많은 관심을 가져왔다(Spadaro, 2002, Sonnemann et al. 2002).

최근 국내에서도 대규모개발사업에 따른 환경피해를 화폐화 하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔으며(김광임 등, 2002), 특히 대기 오염에서는 대기오염물의 위해성 평가와 연계한 환경피해를 화폐 가치화하는 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다(장재연 등, 2003).

에너지 사용 및 공급에 연계하여 물리적 영향과 경제적 피해를 정량화하는 데는 다양한 분야의 전문가의 노하우가 필요하며, 이들 전문가에는 공학자, 확산모델링 수해자, 전염병학자, 생태학자 그리고 경제

학자가 있다. 환경영향평가(Environmental Impact Assessment; EIA)를 위해서는 오염원으로부터 수백에서 수천 km의 거리를 가로지르는 오염물의 확산에 따른 농도 계산이 필요하다. 일단 농도가 계산되면, 영향을 받는 수용체(사람, 농작물, 생태계 등)에 대한 물리적 영향 및 노출(dose)이 예측될 수 있고 피해비용이 계산될 수 있다(Spadaro, 2002).

이러한 피해를 평가하는 방법으로 전통적인 Top-down과 최근의 Bottom-up 방법이 제안되어왔다. Hohmeyer(1992)와 Friedrich and Voss(1993)는 소위 말하는 Top-down 접근법을 소개하였다. 이들 방법에서 총괄 피해는 대상 지역의 총괄 오염도와 관련한 각 오염원의 비율을 이용한 무게 인자를 사용하여 해당 오염원에 할당하는 방법으로 산정한다. 비록 이 방법에 의한 외부 비용 산정은 정책분석용으로 쉽게 채택되었으나 논란의 여지가 많았다. 그래서 지난 수년간 유럽 위원회(EC, European Commission)에서 Bottom-up 방법을 개발하였다. Bottom-up 방법은 대기 오염에 의한 인간 활동의 피해를 정량화하기 위한 프로젝트인 ExternE (External Costs of Energy)에서 개발되었다. ExternE 프로젝트에서는 외부 비용 산정을 위하여 Bottom-up 방법으로 영향경로분석(IPA; Impact Pathway Analysis) 방법을 이용한다. 영향경로분석은 특정 지역에서 새로운 산업 활동으로 인한 배출의 증가 효과를 고려하여 피해를 정량화하는 접근법이다. 영향경로분석은 Krewitt 등(1995)의 EcoSense와 Rabl과 Spadaro (1998)에 의한 PathWays 소프트웨어 프로그램이 개발되어 왔다(Sonnemann et al., 2002). 한편으로 미국에서는 발전소 설치로 인한 외부비용을 산정하기 위한 영향경로분석 방법으로 EXMOD가 개발되었다(Rowe et al., 1995; Schleisner, 2000)

Spadaro(2002)에 따르면 영향경로분석은 1) 오염물의 배출량을 시작점으로 2) 국소 및 지역규모의 확산 해석을 통한 대기 중 오염물의 농도계산을 하고 3) 노출-반응함수를 사용한 물리적 영향을 계산하여 4) 단위 가격인자를 이용하여 피해비용을 산정하는

4개의 단계로 구성된다. 산정된 피해비용은 모든 영향을 받는 수용체의 합으로 표현되며, 계산영역의 공간적 한계는 기준성 오염물(SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> 등)의 경우 점오염원으로부터 500에서 1000km까지, 온실가스의 경우는 지구전체 규모이다. 영향경로분석은 점오염원의 영향 평가를 위하여 4 단계의 과정을 거쳐서 계산되므로 불확실성이 크지만 단일 오염원(발전소나 소각장 등)에 의한 인체 위험도와 외부효과를 계산하기 용이한 방법으로 유럽, 북미 그리고 아시아 지역에서 사용되어 왔다(Spadaro, 2002, 2004).

이상의 논의에서 알 수 있듯이 일반적으로 대기오염물에 의한 외부 비용을 산정하는 방법은 다양한 분석 과정을 거치므로 결과도 많은 차이가 난다. 따라서 분석 방법에서 오는 결과 오차를 최소화하기 위해서는 평가 방법의 일관성과 통일성을 유지하는 것은 중요하다. 따라서 본 연구에서는 외부 비용의 산정 방법으로 유럽지역에서 거의 표준화된 평가 방법인 영향경로해석법을 수원 지역(피해 대상지역은 수도권입)에 적용하여 유사한 도시 지역인 파리지역의 계산 결과를 비교함으로써 평가 방법의 일관성과 통일성을 유지하고자 하였다. 본 연구에서는 가상 점오염원인 발전소 설치로 인해 배출되는 대기오염물이 인체에 미치는 외부 효과를 계산하기 위하여 영향경로 분석 방법 중 Spadaro(2002)가 개발한 RiskPoll 모델을 사용하였다. 외부 효과 계산에 사용된 대상오염물은 발전소 배출의 중요 일차오염물인 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> 그리고 이차오염물인 황산염 및 질산염 등 5가지 화학종으로 하였다. 대기오염에 의한 위해평가 및 피해비용도 통일성을 유지하기 위하여 파리 지역에서 적용된 것과 동일한 방법으로 사망 및 질병 발생 조건에 대하여 구하였다. 계산된 결과를 동일 배출조건에서 계산된 프랑스 파리 지역의 그것과 비교 분석하고 장래 연구 방향을 논하였다.

## II. 영향경로분석 관련 이론고찰

영향경로분석 중 Spadaro(2002)가 개발한

RiskPoll 모델은 윈도우용 프로그램으로 Microsoft Visual Basic 6.0을 사용하여 제작되었으며, 인터넷상에서 구할 수 있다. 이 모델은 유럽에서 개발된 정교한 영향경로해석법인 EcoSense를 수정 보완한 단순평가 모델이다. 이 모델은 4가지 옵션 모델(SUWM, RUWM, QUERI, URBAN)을 가지고 있다. 이들 옵션 모델 중 EcoSense 모델과 가장 가까운 결과를 나타내는 모델은 QUERI 모델이다. 유럽 중심부에 위치한 가상발전소에 대한 영향 평가에서 QUERI모델의 결과는 EcoSense 결과와 26% 차이를 보였다(Spadaro, 2004). 본 연구에서는 QUERI 모델을 사용한다.

RiskPoll 모델에 따르면 영향경로분석은 오염원에 의한 농도계산, 위해평가 그리고 외부효과를 순차적으로 평가할 수 있는 방법이다. Fig. 1에서는 영향경로분석에 따른 평가 과정을 도식화하여 나타내었다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 영향경로분석은 오염원에서 배출량 산정, 확산 모델에 의한 지표농도의 산정, 노출-반응 관계식을 이용한 물리적 영향 평가 그리고 피해를 화폐가치화 하는 평가로 구성된다. 각 계산 경로에 대한 설명은 다음과 같다.

### 1. 오염원 및 수용체 특성

영향경로분석은 오염원의 위치지정(도시, 시골 등)

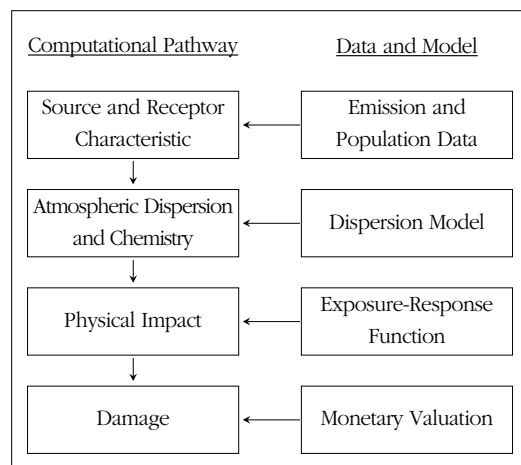


Fig. 1. Computational process of Impact pathway analysis in RiskPoll model

에서 시작하여, 오염원의 물리적 특성을 정하고, 대기 배출의 자세한 목록을 입력한다. 오염원 인자로 굴뚝 높이, 대기온도, 배가스 온도, 배가스 속도 등이 있다. 배출량은 방지기술과 사용연료 조건에 따라 다르게 입력할 수 있다. 수용체는 대기오염물의 영향을 받는 대상으로 인체, 물건, 농작물 등에 대한 자료이다.

## 2. 대기확산과 화학

대기 확산 영역은 오염원으로부터 50km까지인 국소규모(local scale)와 그 이상인 지역규모(regional scale)로 나눈다. 지역규모는 통상 오염원에서 수천 km까지 걸친다. 국소규모 오염물의 확산은 기상인자에 의하여 강한 영향을 받는다. 이들 중에서 특히 가장 중요한 것은 풍속, 풍향, 안정도 등급(대기안정도와 난류) 그리고 혼합고도(난류확산이 일어나는 대류권 저층대기)이다. 정상상태이고 고정오염원에서 배출되는 일차오염물의 지표부근농도는 가우스 확산 모형(여기서는 ISC 모형을 사용)으로 예측한다. 화학변화에 따른 2차 오염물과 에어로졸은 일반적으로 국소규모에서는 무시한다.

50km 이상의 거리(지역규모)에서는 화학반응과 중력침강과 강수에 의한 침적이 대기 중 오염물의 제거에 중요한 역할을 한다. 지역규모의 농도는 유럽연합의 ExternE 연구에서 개발된 EcoSense 프로그램 내에 있는 Windrose Trajectory Model(WTM)로 예측한다. WTM은 영국의 AEA Technology에 있는 Harwell Laboratory에서 Derwent와 그 동료들에 의하여 개발된 더 복잡한 Harwell Trajectory Dispersion Model(HTM)을 단순화한 모델이다(Derwent and Nodof, 1986; Derwent, Dollard and Metcalfe, 1988). HTM 알고리즘은 라그랑지안 플룸 모델로 유럽에서 질소, 황 그리고 질산염, 황산염의 농도와 침적율을 계산하는데 널리 사용된 모델이다. 이 모델은 통계학적으로 평균화된 지역 기상자료를 사용한다. 포함되는 기후 파라미터는 연평균 풍속, 오염원에서 24개의 평균 풍향(15도 간격) 그리고 연평균 강수율을 사용한다. WTM은 일차 및 이차오

염물 모두의 수송에 사용할 수 있다.

## 3. 물리적 영향(Physical Impact)

물리적 영향은 노출-응답함수(exposure-response function; ERF)로 구할 수 있다. ERF는 오염물 농도와 수용체에 미치는 영향(인체 건강, 농작물 등)을 관련시킨 함수이다. 인체 영향에는 천식, 입원(hospital admission), 만성기관지염, 제한된 활동일, 조기사망(premature death) 등으로 표시되는 발생건수(case)로 표시한다. 사망률 영향은 기대수명의 감소치로 정량화 하고 위해(risk)에 노출된 인구의 수명단축연한(YOLL)으로 표시한다.

인체 영향에 대한 ERF는 인체의 건강상태와 그와 관련한 질병에 대한 역학적 연구결과에서 유도된다(Aunan, 1996; Brunekreef 1997; ExternE 1998; Leksell and Labl, 2001). 엄밀하게 말하면 ERF는 수용체의 개인노출량과 관련 되어야 한다. 개인노출량은 실외 대기 오염물의 농도, 실외에서 보내는 시간, 실내외 농도비, 운동 활동수준, 오염물의 구성성분, 화학, 오염물의 크기와 분포, 그리고 오염원과의 근접성 등에 영향을 받는다. 실용상으로는 이들 내용의 자세한 정보는 구하기 곤란하다. 과거의 자료 분석에서 개인노출은 외부의 자극에 대한 개개인의 민감도에 따라 다양하게 변하지만, 본 연구에서는 ERF를 Spadaro(2002)에 따라 위해 그룹이나 집합적 개인 수준 자료에 구한 것을 사용하였다.

농도증분( $\Delta c$ )에 따른 상대위해도( $R$ )는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Rabl, 2001).

$$R = \exp(\gamma \cdot \Delta c) \quad (1)$$

여기서  $\gamma$ 는 상수이다. 식(1)에서 상수  $\gamma$ 는 식(2)와 같이 표시되며 이는 노출-반응함수의 기울기로 case/(person · yr · g/m<sup>3</sup>)의 단위를 가진다.

$$\gamma = \ln(R)/\Delta c \approx \Delta R/\Delta c \quad (2)$$

선형 노출-반응함수로 가정할 때 식(2)의 노출-반응함수 기울기를 사용하고 다른 노출 대상 인구의 특성과 노출집단에 따른 건수(incidence)를 고려한 기

을기를  $S_{CR}$ 로 나타내면 식(3)과 같다.

$$S_{CR} = \gamma \cdot f_{POP} \cdot I_{ref} \quad (3)$$

여기서  $f_{POP}$ 는 영향종점 대상인구 분율(fraction of the population affected by the end point in

question)이고  $I_{ref}$ 는 건수의 참조치(reference level of incidence)이다. 각 평가 지역에 따른  $f_{POP}$ 과  $I_{ref}$ 를 구하면 식(3)을 이용하여 그 지역에 사용할 수 있는 기율기를 구할 수 있다.

Table 1과 2에서는 Rabl(2001)이 제안한 식(3)으

Table 1. Summary for SO<sub>2</sub> Exposure-Response function(Rabl, 2001)

Parameter End point	$\gamma = \Delta R / \Delta c$ %/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Incidence rate( $I_{ref}$ ) cases/(pers · yr)	$S_{CR}$ [Unit]	Comment
Short-term Mortality	0.046	0.01	2.30E-6 [YOLL/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	Assuming 0.5 YOLL for death
Hospital Admission, Respiratory	0.04	0.0071	2.84E-6 [HA/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	-

Table 2. Summary for PM<sub>10</sub> Exposure-Response function(Rabl, 2001)

Parameter End point	$\gamma = \Delta R / \Delta c$ %/( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$I_{ref}$ cases/(pers · yr)	$S_{CR}$ [Unit]	Comment
Long-term mortality	0.46	-	2.60E-4 [YOLL/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	Using R for mean concentration
Infant mortality	2.08	-	2.78E-5	TSP converted PM10 by multiplying by 0.55
Chronic Bronchitis, adults	2.14	0.0036	$7.65\text{E-}5 \cdot f_{POP}$	$f_{POP}$ = fraction of population over age 18
Work Day Lost	0.95	1.057	$1.0\text{E-}2 \cdot f_{POP}$ [WDL/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	only respiratory and cardiovascular causes $f_{POP}$ = fraction of population employed
Restricted Activity Day, adults	0.26	19	$5.00\text{E-}2 f_{POP}$ [RAD/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	$f_{POP}$ = adult population. Overlap with WDL
Hospital Admission, cardiovascular	0.1	0.06	$6.0\text{E-}5 \cdot f_{POP}$ [HA/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	$f_{POP}$ = fraction of population above age 65
Hospital Admission, respiratory	0.04	0.0071	$2.56\text{E-}5$ [HA/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	Original based on BS, here converted to PM <sub>10</sub> by multiplying by 0.6
Bronchodilator usage, asthmatic adults	0.22	28	$0.06 \cdot f_{POP}$ [cases/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	$f_{POP}$ = fraction of population that is adults asthmatic
Bronchodilator usage, asthmatic children	0.23	34	$0.078 \cdot f_{POP}$ [cases/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	$f_{POP}$ = fraction of population that is asthmatic children
Lower Respiratory Symptoms, asthmatic adults	0.18	91	$0.163 \cdot f_{POP}$ [cases/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	$f_{POP}$ = fraction of population that is adults asthmatic
Lower Respiratory Symptoms, asthmatic children	0.33	30	$0.10 \cdot f_{POP}$ [cases/(pers · yr · $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]	$f_{POP}$ = fraction of population that is asthmatic children

Table 3. Exposure-Response function and Unit Damage Costs for EU-15. The damage cost has units of US\$2000 per incidence (Spadaro(2002))

Receptor Group	Health impact	Pollutant	ERF slope	Unit of damage cost(\$)
Adults	Chronic Bronchitis	$PM_{10}$ , Nitrates $PM_{2.5}$ , Sulfates	2.45E-5 3.90E-5	177,800
	Restricted Activity Day	$PM_{10}$ , Nitrates $PM_{2.5}$ , Sulfates	2.50e-2 4.20e-2	116
	Asthmatics Bronchodilator use Lower respiratory Coughing	$PM_{10}$ , Nitrates ( $PM_{2.5}$ , Sulfates)	1.63E-1(2.72E-1) 6.06E-2(1.01E-1) 1.68E-1(2.79E-1)	42 47
Children	Chronic Cough	$PM_{10}$ , Nitrates $PM_{2.5}$ , Sulfates	2.07E-3 3.46E-3	252
	Asthmatics Bronchodilator use Lower respiratory Coughing	$PM_{10}$ , Nitrates ( $PM_{2.5}$ , Sulfates)	7.75E-2(1.29E-1) 1.03E-1(1.72E-1) 1.33E-1(2.23E-1)	42 8 47
	Elderly 65+	Congestive heart failure	$PM_{10}$ , Nitrates $PM_{2.5}$ , Sulfates CO	1.85E-5 3.09E-5 5.64E-7
Entire Population	Mortality	$SO_2$	5.34E-6	174,000
	Short-term YOLL	$PM_{10}$ , Nitrates	1.57E-4	101,000
	Long-term YOLL	$PM_{2.5}$ , Sulfates	2.60E-7	
	Respiratory hospital Admissions	$SO_2$ $PM_{10}$ , Nitrates $PM_{2.5}$ , Sulfates	2.04E-6 2.07E-6 3.46E-6	4,540
	Cerebrovascular Hospital Admissions	$PM_{10}$ , Nitrates $PM_{2.5}$ , Sulfates	5.04E-6 8.42E-6	17,600

로 표시되는  $SO_2$ 와  $PM_{10}$ 에 대한 파라미터들을 나타내었다. 황산염과 질산염 입자에 대한 파라미터는  $PM_{10}$ 과 동일한 값을 사용한다.

#### 4. 화폐가치(Monetary valuation)

ExternE에서 추천하는 유럽(EU-15)의 인체영향에 대한 단위가격(unit cost)을 Table 3에 나타내었다. Spadaro(2002)에 따르면 유럽(EU-15) 이외의 국가에 대해서는 유럽의 단위 영향가격에 식(4)로 표시되는 구매력 평가 국민총생산(Purchasing Power Parity GNP, PPPGNP) 비를 곱하여 구한다.

$$\text{Unit Cost in Country} = \text{Unit Cost in EU} \times \left( \frac{\text{PPPGNP}_{\text{country}}}{\text{PPPGNP}_{\text{EU}}} \right)^{\gamma} \quad (4)$$

식(4)에서 탄성인자( $\gamma$ )는 0.3 - 1.0사이 값을 가진

다. Markandya(1997)는 탄력인자 1을 사용하라고 추천하고 있고, 본 연구에서도 이를 사용한다.  $\gamma$ 를 1로 하는 경우 2000년 PPPGNP를 사용하여 우리나라의 단위 가격을 구하면 EU-15의 0.655배이다 (Spadaro, 2004).

### III. 분석모델의 입력조건

#### 1. 인구 자료

RiskPoll 모델에서는 인체에 미치는 영향을 평가하기 위하여 입력 자료로 국소규모의 격자내 인구수와 지역규모의 인구밀도를 필요로 한다. 국소지역의 인구수는 5km×5km 격자 내의 인구수를 사용하고 지역규모의 인구수는 배경인구수로 입력하게 되어 있다. Fig. 2에서는 국소지역 인구 입력 자료로 수원

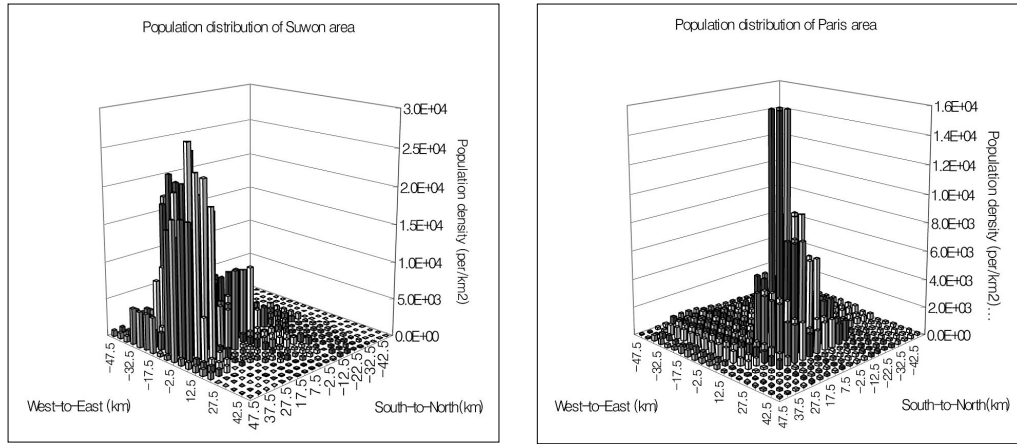


Fig. 2. Population distributions of two computational areas

과 파리 지역의 오염원을 원점으로 하여 50km 내의 인구분포를 나타내었다. 전체적으로 수원 지역을 중심으로 한 50km 반경 지역은 서울과 인천을 포함하는 대부분의 수도권지역이 포함되며 이 영역의 평균 인구밀도는 2000년 기준으로 2298명/km<sup>2</sup>이었다. 비교로 사용된 파리지역의 평균 인구밀도는 1013명/km<sup>2</sup>으로 수원지역의 인구 밀도의 절반 정도이다. 지역규모의 인구밀도는 수원지역을 제외한 우리나라만의 영향을 평가하기 위하여 우리나라 전체인구에서 수원지역의 인구를 뺀 나머지 인구수를 전체 계산 영역에서 국소지역 면적을 제외한 나머지 면적으로 나누어 구한 86명/km<sup>2</sup>를 사용하였다. 비교 대상인 파리지역의 지역규모 인구밀도는 80명/km<sup>2</sup>이었다.

## 2. 오염원 입력자료

Table 4는 본 연구에서 사용한 가상오염원 배출량 자료와 파리지역의 배출량 자료와 침적속도를 나타내었다. 두 지역의 비교를 위하여 배출량 자료는 동일한 값을 사용하였으나 침적 속도는 지역별 차이가 있으므로 다른 값을 사용하였다. 수원지역의 침적속도는 Spadaro(2002)에서 제시한 동아시아 지역 자료를 평균하여 사용하였다.

## 3. 기상 입력자료

기상 자료는 RiskPoll 모델 내에 있는 ISC 모델에서 농도 계산을 위하여 사용된다. 본 연구에서 2000년 수원 기상대에서 관측된 1년간 기상자료를 사용하였다.

Table 4. Summary of Emission parameter and depletion velocity for Suwon and Paris

Site	Suwon		Paris	
	Emission Rate(tons/year)	Depletion Velocity(cm/s)	Emission Rate(tons/year)	Depletion Velocity(cm/s)
PM <sub>10</sub>	1.00E+03	1.18	1.00E+03	0.67
SO <sub>2</sub>	1.00E+03	0.82	1.00E+03	0.73
NO <sub>x</sub>	1.00E+03	1.5	1.00E+03	1.47
CO	No value	No value	No value	No value
Other	No value	No value	No value	No value
Nitrates	-	0.92	-	0.71
Sulfates	-	1.52	-	1.73

Table 5. Fraction of the population affected by the end point in question(Suwon)

$f_{POP}$	fraction of population over age 18	fraction of population employed	fraction of population above age 65	fraction of population that is adults asthmatic	fraction of population that is asthmatic children
Values	0.695	0.47	0.091	0.022	0.02

4. 노출-반응 입력자료

노출-반응함수 기울기 입력 자료는 Table 1과 2의 계산방법에 따라 사용하여 구하였다. Table 1과 2의 계산방법에서 해당 건수(case)에 해당하는  $f_{POP}$  값은 건강보험심사평가원통계연보(2000)을 참고로 구하였다. Table 5에서는 해당 파라미터의 계산결과를 나타내었다.

5. 피해비용 입력자료

피해비용 입력 자료는 식(4)를 사용하여 구하였으며, Table 3에 표시된 각 피해 원인별 유럽 단위피해비용에서 PPPGNP를 고려하여 구한 계수 0.655를 곱한 값을 사용하였다.

IV. 분석결과 및 해석

1. 기상 자료 계산 결과

Table 6은 RiskPoll 모델에서 계산된 수원과 파리

Table 6. Computed meteorological parameters in two sites

Parameter	Paris	Suwon
Mean Air Temperature (K):	262.3	285.5
Mean Local Wind Speed (m/s):	1.8	3
Anemometer Height (m):	10	25
Pasquill Distribution Class A (%):	4.4	1.1
Pasquill Distribution Class B (%):	19.5	7.7
Pasquill Distribution Class C (%):	10.8	9.8
Pasquill Distribution Class D (%):	12.7	28.2
Pasquill Distribution Class E (%):	4.7	25
Pasquill Distribution Class F (%):	48	28.2
Mean mixing layer height (m):	571.8	1074.4

두 지역의 기상 자료를 비교해 보기 위하여 나타낸 것이다. Table 6에서 알 수 있는 바와 같이 수원 지역의 연평균 온도와 평균 풍속은 파리지역의 그것보다 높게 나타났다. 안정도의 분포는 수원지역이 더 안정한 값을 나타낸다. 그러나 혼합고도는 수원지역이 파리의 그것 보다 2배 정도 크게 나타났다.

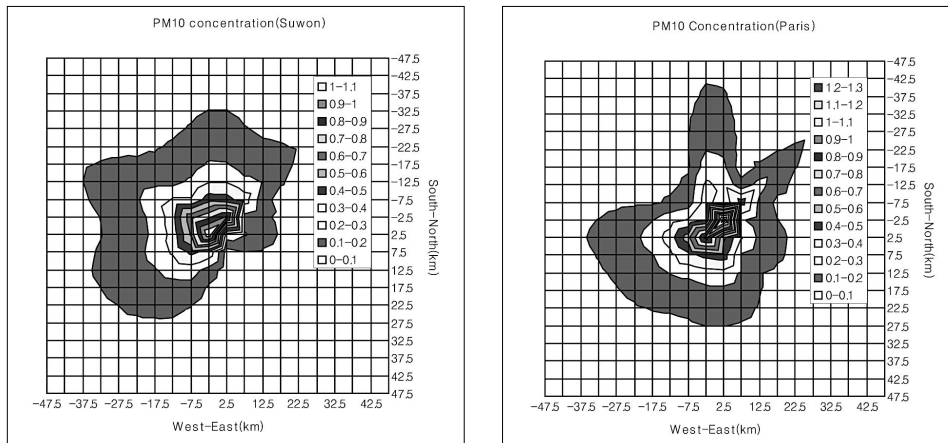


Fig. 3. Computational results of PM10 concentration contour in two areas

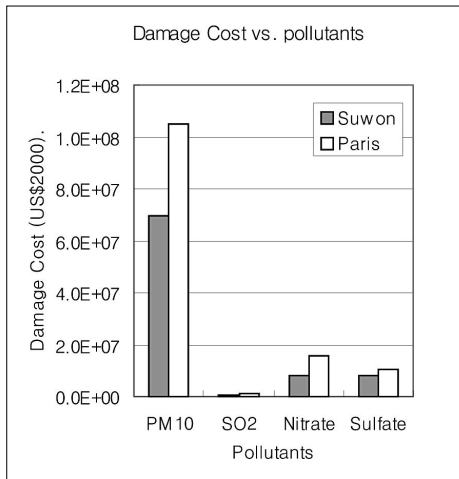


Fig. 4. Comparison of damage cost in two areas

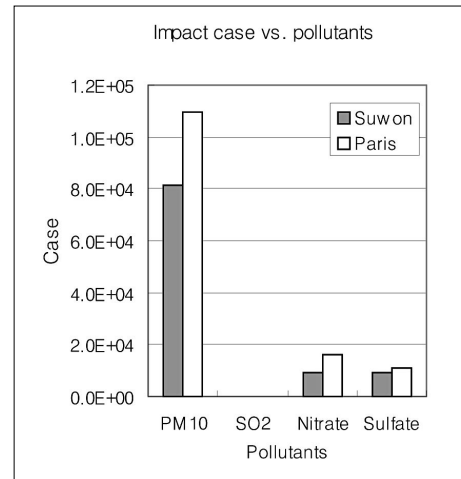


Fig. 5. Comparison of impact case in two areas

## 2. 농도 계산 결과 비교

Fig. 3에서는 모델에서 계산된 두 지역의 PM10 농도 분포를 나타내었다. 파리지역의 농도는 0~1.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 걸치고 수원지역은 0~1.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 오염원 주변에서 파리지역이 약간 높은 농도 값을 나타내고 있다. 수원지역의 영향 범위는 동북방향으로 축소되어 있는 반면 파리지역 영향범위는 오염원을 중심으로 서북방향으로 축소된 분포를 나타내고 있으나 두 지역은 공간적으로 비슷한 영향 범위를 나타내고 있다.

## 3. 오염물별 피해비용 및 영향건수

Fig. 4는 두 지역의 발전소 배출로 인한 총괄적인 오염물질별 피해비용을 비교하기 위해 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 전반적으로 RiskPoll 모델로 예측한 두 도시 지역 주변의 피해비용의 크기와 경향은 유사한 것으로 나타났다. 전체적으로 수원지역의 피해비용이 낮게 나타난 것은 동일 오염물의 배출량을 사용할 때 Fig. 3에 나타난 바와 같이 수원지역에서 국소지역에 형성되는 농도가 파리 지역의 그것보다 낮은 것과 피해비용 계산에서 유럽지역의 피해비용에 0.655배 곱한 값을 수원지역에 적용한 것이 주된 원인으로 보인다. Fig. 4에서 알 수 있는 바

와 같이 4가지 오염물질(PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, Nitrate, sulfate) 중 인체에 가장 큰 피해를 입히는 오염물질은 두 지역 모두 PM<sub>10</sub>으로 나타났으며 다음으로 질산염과 황산염 그리고 SO<sub>2</sub>의 순으로 나타났다. 수원지역의 경우 전체 피해비용 중 국소지역의 피해비용이 차지하는 비율은 PM<sub>10</sub>의 경우 93.4%, SO<sub>2</sub>는 90%를 차지하였으며 이는 동일 배출량을 사용할 때 파리지역의 국소지역 피해비용 비율인 PM<sub>10</sub>의 85.5%와 SO<sub>2</sub>의 86.7%보다는 조금 높은 값이다. 이와 같은 결과는 계산된 수원 지역의 평균 인구 밀도(2229명/km<sup>2</sup>)가 파리지역의 그것(1013.2명/km<sup>2</sup>)보다 큰 것이 부분적인 원인으로 생각된다.

Fig. 5에서는 두 지역의 오염물에 의한 총괄적인 피해 건수를 비교해 보기 위하여 나타낸 것이다. 두 지역 모두 PM<sub>10</sub>에 의한 피해 건수가 최대로 나타났으며 다음으로 질산염, 황산염 그리고 SO<sub>2</sub> 순으로 나타났다.

## 4. 피해 양상별 외부 비용 및 발생빈도

Fig. 6에서는 수원과 파리 두 지역의 대기오염으로 인한 인체에 미치는 피해 양상인 사망 및 질병에 따른 피해비용을 비교해 보기 위하여 나타내었다. 전체적으로 대기오염에 의한 만성 영향에 의한 사망

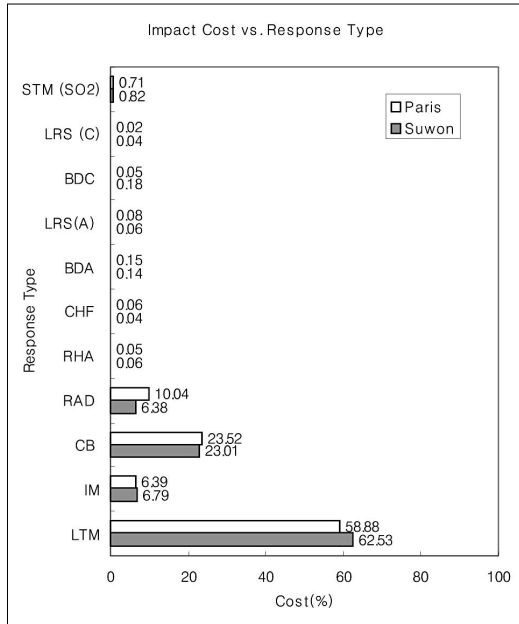


Fig. 6. Impact cost vs. of response type

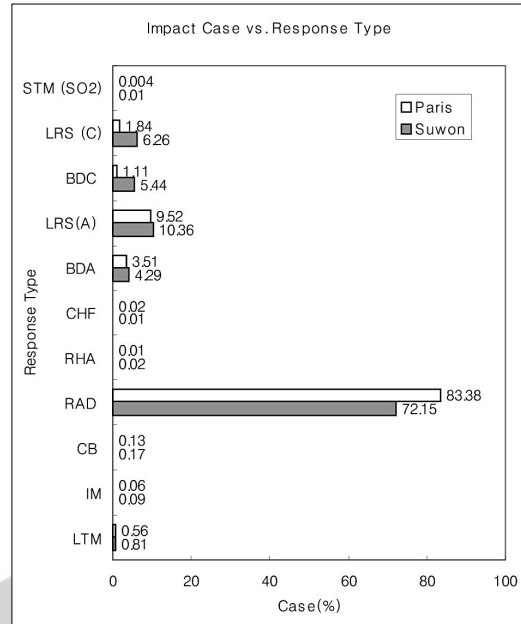


Fig. 7. Impact Case vs. Response type

(LTM: Long term mortality)의 피해비용이 가장 큰 비율로 나타났다(수원 63%, 파리 59%). 다음으로 만성기관지염(CB; Chronic Bronchitis), 질병으로 인한 활동일수의 감소(RAD; Restricted Activity days), 유아 사망(IM; Infant Mortality) 순으로 두 도시 모두 유사한 경향을 나타내었다. 만성영향에 의한 사망과 유아사망을 합한 전체 사망 피해비용 비율은 70%로 나타났으며 이와 같은 결과는 Schleisner (2000) 등이 EXMOD 모델을 사용하여 구한 New York 지역의 발전소 설치로 인한 사망 피해비용 비율 71%와 유사한 결과이고 Krewitt 등(1998)이 EcoSense 모델을 사용하여 유럽 전역에 대한 대기 오염으로 인한 인체 영향 피해비용을 계산한 내용 중 사망이 차지하는 비율 90% 보다는 작은 값으로 나타났다.

Fig. 7에서는 두 도시에서의 대기오염으로 인한 피해 종류별 발생 건수를 비교해 보기 위하여 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 피해 건수는 질병으로 인한 활동일수의 감소(RAD)가 가장 큰 부분(72.2%)

으로 나타났으며 다음으로 하기도 증상(LRS; Lower Respiratory Symptoms, 팔호의 (A)는 adults, (C)는 children을 나타냄), 어린이 기관지 천식 (BDC; Bronchodilator usage, Asthmatic Children) 그리고 성인 기관지 천식(BDA; Bronchodilator usage, Asthmatic Adults) 순으로 두 지역 모두 유사한 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과는 미국에서 발전소에서 배출된 입자상 오염물에 의한 질병 발생빈도에서 RAD(81.9%)가 가장 큰 비율로 나타난 것과 유사한 결과이다(Clean Task Force, 2000).

## V. 결론

본 연구에서는 대도시 내에 설치된 가상 점오염원인 발전소에서 배출되는 대기오염물이 주변지역의 인체에 미치는 영향을 평가하기 위한 영향경로해석법을 소개하고 사용하였다. 영향경로해석법은 대기오염물이 대상영역의 인체, 농작물, 물건 등에 미치는 영향을 Bottom-up 방식으로 구하는 방법이다. 본 연구에서 소개한 방법은 유럽에서 거의 표준화된

영향경로 해석법인 EcoSense 모델의 파생모델인 RiskPoll 모델을 사용하여 동일 배출조건을 가지는 가상 발전소를 프랑스 파리와 우리나라 수원에 설치하는 경우 계산결과를 비교하고 논하였다. 본 연구의 계산 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 발전소에서 배출되는 주요 오염물질인 4가지 오염물질(PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, Nitrate, sulfate) 중 인체에 가장 큰 피해를 입히는 오염물질은 수원지역도 파리 지역과 동일하게 PM<sub>10</sub>으로 나타났으며 다음으로 입자상 오염물질 산염과 황산염 그리고 SO<sub>2</sub>의 순으로 나타났다.

2) 수원 지역에서 전체 피해비용에서 국소지역이 차지하는 오염물질별 피해비용은 PM<sub>10</sub>의 경우 93.4%, SO<sub>2</sub>는 90%를 차지하였으며 이는 동일 배출량을 사용할 때 파리지역의 국소지역 피해비용 비율인 PM<sub>10</sub>의 경우 85.5%와 SO<sub>2</sub>의 86.7%보다는 조금 높은 값이다.

3) 수원지역의 발전소 배출 오염물에 의한 피해건수는 PM<sub>10</sub>에 의한 피해가 최대로 나타났으며 다음으로 질산염, 황산염 그리고 이산화황 순으로 나타났다. 이와 같은 결과는 파리지역의 계산 결과와 유사한 결과이다.

4) 발전소 배출로 인한 인체에 미치는 피해인 전체 피해 비용 중 사망 피해 비용 비율은 수원이 70%, 파리는 60%로 나타났으며 이와 같은 결과는 New York 지역의 발전소 설치로 인한 사망 피해 비용 비율 71%와 유사한 결과였다.

5) 발전소 배출에 의한 피해 발생 건수는 질병으로 인한 활동일수의 감소(RAD)가 가장 큰 비율(수원, 72.2%, 파리, 83.3%)로 나타났으며 이 결과는 미국에서 발전소에서 배출된 입자상 오염물에 의한 질병별 발생빈도에서 RAD(81.9%)가 가장 큰 비율로 나타난 것과 유사한 결과이다.

이상의 결과에서 정성적으로는 점오염원인 발전소 설치로 인한 피해평가에 유럽지역에서 사용되는 RiskPoll 모델을 수원지역에 적용하는 것은 가능할 것 같다. 그러나 영향경로해석법은 다양한 자료의 입

력, 확산모델에 의한 농도예측, 노출-반응함수, 화폐 가치화 등을 거치는 복잡한 과정을 통하여 인체 위해와 피해비용을 예측하기 때문에 오차가 많이 발생할 수 있는 방법이다. 이들 과정에서 발생하는 정량적 평가를 통한 총량적 오차를 줄이기 위해서는 민감도, 정합도 등을 평가를 통한 신뢰도 검토를 위한 앞으로의 연구가 필요하다. 그러나 본 연구에서 소개한 영향경로해석법은 유럽지역에서 거의 표준화된 평가 방법으로 평가방법의 일관성 및 통일성을 가지는 방법이다. 따라서 표준적인 방법을 두 도시 지역인 수원지역과 파리 지역에 적용하는 경우 정성적으로 유사한 결과를 도출할 수 있다는 점에서 본 연구 결과의 활용 가능성이 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 김광임, 여준호, 정홍락, 정희성, 2002, 대규모 개발사업의 환경경제성 분석 도입방안 I, 한국환경정책·평가연구원, p186.
- 건강보험심사평가원통계연보, 2000, 건강보험심사평가원, 23.
- 장재연 외 14인, 2003, 대기오염 위해성평가 연구 및 관리를 위한 중·장기 연구계획, 환경부, p120.
- Aunan, K., 1996, Exposure-Response Functions for Health Effects of Air Pollutants Based on Epidemiological Findings, Risk Analysis, 16(5), 693-709.
- Brunekreef, B., 1997, Air Pollution and Life Expectancy: Is There a Relation?, Occup. Environ. Med., 54, 781-784.
- Clean Air Task Force, 2000, Death, Disease, & Dirty Power, Mortality and Health Damage Due to Air Pollution from Power Plants, p25, available at <http://www.cleartheair.org>
- Derwent, R. G., Dollard, G. J., and Metcalfe, S.

- E., 1988, On the Nitrogen Budget for the United Kingdom and North-West Europe, Q. J. R. Meteorol. Soc., 114, 1127-1152.
- Derwent, R. G. and Nodof, K., 1986, Long-Range Transport and Deposition of Acidic Nitrogen Species in North-West Europe, Nature, 324, 356-358.
- ExternE, 1998, Externalities of Energy, Vol.7: Methodology 1988 Update(EUR 19083); Vol.8: Global warming(EUR 18836); Vol.9: Fuel Cycles for Emerging and End-Use Technologies, Transport and Waste(EUR 18887); Vol.10:National Implementation(EUR 18528). Published by European Commission, Directorate-General XII, Science Research and Development. Office for Official Publications of the European Communities, L-2920 Luxemburg. Results also available at <http://ExternE.jrc.es/publica.html>.
- Friedrich, R. and Voss, A., 1993, External costs of electricity generation, Energy Policy, 1993, 21, 114-122.
- Hohmeyer, O., 1992, Renewables and the full costs of energy, Energy Policy, 20, 365-375.
- Krewitt, W., Trukenmueller, A., Mayerhofer, P., and Friedrich, R., 1995, Eco-sense-an integrated tool for environmental impact analysis. In: Kremers, H., Pillmann, W., editors, Space and time in environmental information systems, Umwelt-Inf Aktuell Band 7, Marburg(Germany), Metropolis-Verlag.
- Krewitt, W., Friedrich, R., Heck, T., and Mayerhofer, P., 1998, Assessment of environmental and health benefits from the implementation of the UN-ECE protocols on long range transboundary air pollution, Journal of Hazardous Materials, 239-247.
- Leksell, L. and Rabl, A., 2001, Air Pollution and Mortality: Quantification and Valuation of Years of Life Lost, Risk Analysis, 21(5), 843-857.
- Markandya, A., 1997, Monetary Valuation Issues in Extended ExternE, working paper prepared for the ExternE Projects for the European Commission-DG XII.
- Rabl, A. and Spadaro J. V., 1998, Estimates of real damages from air pollution: site dependence and simple impact indices for LCA, Presented at SETAC(Society of Environmental Toxicology and Chemistry), 8th Annual meeting Europe, Bordeaux (France).
- Rabl, A., 2001, Reference database of concentration-response functions for health impacts of air pollution, available at <http://www.externe.info/tools.html>
- Rowe, R. D., Lang, C. M., and Chestnut, L. G., 1996, Critical factors in computing externalities for electricity resources, Resources and Energy Economics, 18, 363-394.
- Schleisner, L., 2000, Comparison of methodologies for externality assessment, Energy Policy, 28, 1127-1136.
- Sonnemann, G. W., Pla, Y., Schuhmacher, M., and Castells, F., 2002, Framework for uncertainty in the Impact Pathway Analysis with an application on a local

scale in Spain, Environmental International, 28, 9-18.

Spadaro, J. V., 2002, A Simplified methodology for calculating the health impacts and damage costs of airborne pollution: the

uniform world model, available at <http://www.externe.info/tools.html>.

Spadaro J. V., 2004, RiskPoll Manual and Reference documentation, available at <http://www.externe.info/tools.html>.

최종원고채택 05. 09. 02

