

환경 문제의 우선 순위 도출을 위한 비교 위해도 분석에 관한 연구

김예신, 임영욱*, 남정모**, 장재연***, 이동수****, 신동천**,*

연세대학교 환경공해연구소, *서남대학교 환경보건학과,

**연세대학교 의과대학 예방의학교실,

***아주대학교 의과대학 예방의학교실,

****서울대학교 환경대학원

Comparative Risk Analysis for Priority Ranking of Environmental Problems

Ye Shin Kim, Young Wook Lim*, Chung Mo Nam**, Jae Yeon Jang***,
Dong Soo Lee**** and Dong Chun Shin**,*

Institute for Environmental Research, Yonsei University,

**Department of Environmental Health, Seonam University,*

***Department of Preventive Medicine and Public Health,*

College of Medicine, Yonsei University

****Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Ajou University,*

*****Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University*

ABSTRACT

In Korea, no CRA (comparative risk analysis) studies have been undertaken, nor have their methodologies of such studies been established. Therefore, the objectives of this study were to establish the framework of CRA consisting of health risk, economic risk and perceived risk, and to estimate and compare these risks among the three environmental problems of air pollution, indoor air pollution and drinking water contamination, which are themselves subject to the eight sub-problems of hazardous air pollutants (HAPs), regulated pollutants (representative as PM10) and dioxins (PCDDs/PCDFs) in air pollution, indoor air pollutants (IAPs) and radon in indoor air pollution, and drinking water pollutants (DWPs), disinfection by-products (DBPs) and radionuclides in drinking water contamination in Seoul, Korea. After which, the priorities of these problems were set by individual and integrated risk. From the results, the rankings of both health risk and economical risk were in the following order: radon, PM10, IAPs, HAPs, DWPs, dioxins, DBPs, and radionuclides among the eight sub-problems. On the contrary, the ranking of perceived risk was in the following order: HAPs, dioxins, radionuclides, PM10, DWPs, IAPs, Radon and then DBPs among the eight sub-problems.

Key words : CRA (comparative risk analysis), Health risk, Economic risk, Perceived risk, Environmental problems

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-2-361-5361, E-mail: dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

서 론

1980년대 이후, 미국 환경보호청이나 세계보건기구를 포함한 유럽 지역의 환경관리 기관에서 위험도(risk)라는 확률(likelihood or probability)의 개념을 도입해 환경오염물질의 노출로 인한 인체 피해 정도를 계량적으로 표현하고자 하였다(U.S EPA, 1993). 1990년대 이전, 우리나라의 경우는 환경오염으로 인한 인체피해 정도를 가늠할 수 없는 상황에서, 외국의 기준과 단순 비교하여 초과 여부에 따라 위해성을 판가름하였다. 이와 같이 인체 위해성 측정이나 기준 설정의 적당한 도구가 없었던 상황에서 1990년대 이후, 위해성 평가 제도를 도입하여 학계를 중심으로 방법론이나 이론적 근거를 정립하였고, 먹는 물과 공기를 중심으로 다매체·다경로 노출을 고려한 광범위한 위해성 평가(연세대 환경공해연구소, 1992~2001)가 진행되어져 왔다.

그러나 이미 미국 환경보호청에서는 인체 위해성 평가 결과만을 가지고 환경정책을 결정하기에는 부족함을 느끼고, 생태계나 재산 피해와 같은 여러 가지 다른 중요한 가치에 대한 측면들도 함께 고려해야함을 강조하였다(U.S EPA, 1987). 이를 위해서 개발된 도구가 비교 위험도 분석(comparative risk analysis; 이하 CRA)으로 이는 인체 위험도 분석(health risk analysis), 생태 위험도 분석(ecological risk analysis), 경제 또는 후생 위험도 분석(economic or welfare risk analysis)과 같은 3가지 주요 영역으로 이루어지고, 여기에 정책결정에 중요한 외적변수로 작용하는 일반 대중의 인지 위험도 분석(perceived risk analysis)과 같은 위험도 관리 요소들이 부가적인 정보로 개입되게 된다(U.S EPA, 1993).

이와 같이 3가지 주요 영역의 분석에서 도출된 객관적인 또는 과학적인 정량 또는 정성 위험도(quantitative or qualitative risk)가 연속형 또는 범주형 순위로 할당되고, 주관적인 인지 위험도가 병렬적인 연속선상에서 개별적 또는 통합적인 순위가 결정되어, 최종적으로 환경문제에 대한 우선 순위를 도출하게 된다.

즉 비교 위험도 분석은 각 위험도 영역에서 도출된 결과를 재평가하고 흩어진 결과들을 집약하는

과정이라고도 말할 수 있다. 또한 인체 위험도만을 고려한 정책 결정의 불확실성을 줄이기 위하여, 서로 다른 위험도 영역에 대한 양질의 정보를 제공받을 수 있으며, 더 나아가서는 다양한 위험도 정보를 하나의 통합 지표로 묶어 활용할 수도 있다. 이를 통해 동일한 문제에 대해서 서로 다른 위험도간의 비교가 가능하고, 동일한 위험도에 대해서 서로 다른 환경문제간의 비교가 가능하다(U.S EPA, 1993).

이러한 비교 과정을 통해, 산재해 있는 환경문제의 정책 우선 투자 순위를 가려내어 제한된 인력이나 비용을 최대한 효율적으로 이용한다는 데 있다. 즉 위해성이 높은 문제에 대해 우선적으로 투자하여 위험도를 감소시키는데 목적이 있다고 할 수 있다(U.S EPA, 1987).

따라서 인체 위해성 평가 결과들이 정책 결정에 활용되고 있는 이 시점에서, 다른 위험도를 고려한 비교 위험도 분석 시스템에서 도출되는 정보들이 정책 결정과정에 반영되어야 하고, 이를 통해 중대한 정책결정의 불확실성을 조금이나마 줄이려는 노력을 해야 할 것이다.

그러한 작업을 하기 위해서는 비교 위험도 분석에 대한 연구가 필요한 시점이다. 따라서 이 연구에서는 지역 고유의 비교 위험도 분석 시스템에 대한 틀을 만들고, 시스템의 틀 속에 포함되는 각 위험도의 최종 측정치(endpoint)를 추정하는 방법론을 구축하며, 이들 개발된 틀과 방법론을 이용하여, 실제 수집되고 조사된 자료를 적용하여 비교 위험도 분석을 실행하고자 한다.

따라서 본 연구의 목적은 서울 지역을 대상으로 다양한 환경 문제를 선정하고, 이들 문제에 대한 우선 순위를 결정하기 위하여, 비교 위험도 분석 시스템 전체의 틀과 틀 내의 3가지 위험도에 대한 세부적인 분석 방법론을 정립하고, 이들을 통해 실제 자료를 적용하여, 연구 대상 환경문제에 대한 인체 위험도의 endpoint인 이론적 사망수를 추정하고, 환경오염으로 인한 위험도에 입각한 지불의사금액(risk-based willingness to pay)을 조사하기 위한 설문지와 추정모형을 개발·적용하여 이론적 사망수에 따른 손실 비용을 추정하며, 동일 문제에 대한 사회적 인식 위험도를 조사하여, 산정된 각각의 위험도와 이를 통합한 위험도에 의거하여 환경문제의 우선 순위를 도출하였다.

연구 및 방법

세 가지 인체 주요 접촉 매체 오염(대기 오염, 실내공기 오염, 먹는 물 오염)에서 중금속이나 휘발성 유기오염물질과 같은 개개의 화학물질, 다환방향족 탄화수소류나 다이옥신류와 같은 복합물질, 그리고 라돈과 같은 방사성물질, 미세 분진 등 각각의 물질 특성에 따른 위험성 평가 방법론(김예신, 2002)을 적용하여 암 발생으로 인한 인체 사망 위험도를 추정하고 동시에 불확실성 분석(uncertainty analysis)을 실시하였다.

이와 같이 추정된 사망 위험도와 설문조사를 통한 가상 가치 평가법(contingent valuation method)에 의해 도출된 지불의사금액(willingness to pay; 이하 WTP)을 이용한 통계적 생명 가치액(value of statistical life; 이하 VSL)을 조합하여 사망 손실비용(통계적 생명 가치액*사망 추정자수)을 추정하였고, 동시에 불확실성 분석을 실시하였다. 여기서 경제 위험도 또는 후생 위험도(economic or welfare risk)는 원래 사망이외에도 질병 이환에 대한 손실 비용이나 무염물에 대한 손실 비용을 함께 고려하는 의미이다. 그러나, 이 연구에서 경제 위험도는 단지 사람에 대한 이론적 사망으로 인한 손실 비용만을 포함하는 것으로 규정하였다.

인지 위험도를 추정하기 위하여 비교적 간단한 설문조사를 통해, 해당 환경오염에 대한 사회적 인식을 조사하였다. 마지막으로, 이들 세 가지 연구에서 도출된 위험도 결과를 이용하여 대상 환경문제

에 대해 위험도 우선 순위를 결정하였다(Fig. 1).

1. 연구대상 물질 및 문제

주요 환경문제 선정은 외국에서 선행 연구 대상(U.S EPA, 1987; U.S EPA, 1993; Konisky, 1999)이 되었던 환경문제들과 비교하였고, 10여년간의 연구 자료(연세대 환경공해연구소 1992~2001)를 검토한 후, 인체와 직접적으로 접촉하는 중요한 환경매체 오염과 정량적인 위험성 평가가 가능하도록 자료를 충분히 지원해줄 만한 문제들을 대상으로 결정하였다.

연구 대상은 대기 오염, 먹는 물 오염, 실내공기 오염 등 3가지 상위 환경문제로 분류하였고, 다시 상위 환경문제를 8개의 하위 환경문제로, 하위 환경문제는 16가지 물질군으로 분류하였고, 물질군에 해당하는 오염물질은 총 84종이었다. 여기서 이 연구에 해당하는 물질들은 모두 발암물질로서 EPA 발암물질 분류체계(U.S EPA, 1993)에서 A (human carcinogen), B1, B2 (probable human carcinogen), C (possible human carcinogen)에 해당하는 물질들을 대상으로 하였다.

대기오염은 다시 3가지의 하위 문제로 분류하였다. 유해 대기오염물질(hazardous air pollutants; 이하 HAPs)은 현재 환경보전법상 규제기준이 없는 화학물질(non-regulated pollutants)들로 이 논문에서는 다환방향족 탄화수소류(polycyclic aromatic hydrocarbons; 이하 PAHs), 휘발성 유기오염물질(volatile organic compounds; 이하 VOCs)과 중금속

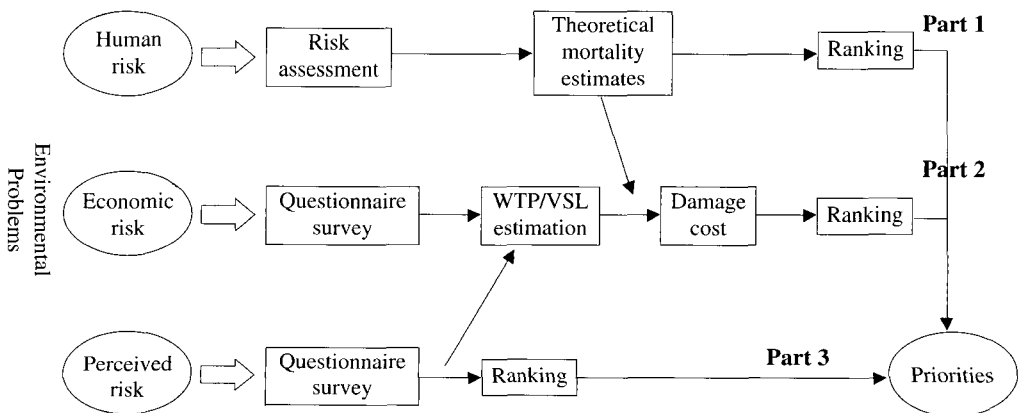


Fig. 1. Framework for comparative risk analysis of study.

(metals)을 포함하였다. 그리고 HAPs와는 대조적인 의미에서 규제 기준이 존재하는 오염물질(regulated pollutants) 중 PM10을 대표물질로 하였다. 주로 만성 사망과 관련된 물질은 규제오염물질 중 PM10과 관련성이 있기 때문이다(European Commission, 1997). 또한 여기서 다이옥신류는 다이옥신류(poly-chlorinated dibenzo-*p*-dioxins; 이하 PCDDs)와 퓨란류(poly-chlorinated dibenzo-*p*-furans; 이하 PCDFs)를 포함하여 일컫는 분류이다.

실내공기오염은 주요 두 가지 하위 문제로 분류하였다. 실내공기 오염물질류(indoor air pollutants; 이하 IAPs)는 실내공기에서 주요 오염물질로 발생할 수 있는 화학물질류로 VOCs와 알데히드류가 포함되었다. 그리고 자연 방사성 물질인 라돈을 하나의 큰 하위 문제로 분류하였다.

먹는 물 오염은 주요 3가지 오염문제로 분류하였다. 먹는 물이 주로 수도수나 지하수임을 감안할 때, 라돈, 우라늄, 전알파 등으로 구성되는 지하수 중 방사성물질에 대한 요소들을 고려하였고, 수도수의 경우는 수도수 중 존재하는 PAHs, 중금속류 및 VOCs를 포함하는 화학물질들(drinking water pollutants; 이하 DWPs)과 염소소독으로 인해 발생하는 소독 부산물(disinfectants and its by-products; 이하 DBPs)로 구분하였다. 여기서 DBPs는 THM(trihalomethane; 이하 THMs)을 포함하는 소독 부산물로서 현재까지 THMs에 대한 용량-반응 정보만이 존재하므로 DBPs에 THMs만을 고려하였다.

2. 인체 위해도 추정

이론적 사망수(theoretical mortality estimates)로 표현되는 인체 위해도는 크게 대기오염과 그 하위문제(HAPs, PM10, Dioxins), 실내공기 오염과 그 하위문제(IAPs, 라돈), 먹는 물 오염과 그 하위문제(DWPs, DBPs, 방사성물질)로 분류하여 추정하였다.

이론적 사망수의 추정치(인구집단 위해도)는 개인 위해도에 노출인구수를 곱한 값(오염 농도*단위 위해도*노출인구수)과 동일하다(US EPA, 1993; Ostro, 1994; Joh *et al.*, 2001). 여기서 개인 위해도는 각 물질의 오염 농도와 단위 오염도에 대한 위해도(단위 위해도)를 곱한 값과 같다. 위해도 추정에 이용된 평균 오염도 및 단위 위해도는 표 2-4에 제시하였다.

그리고 계산에 사용된 오염 농도(연세대 환경공해연구소, 1992~1995, 1995~1998, 2000, 2002; 환경부, 2001; Shin DC, 2001; 한국원자력안전기술원, 2002)는 측정시기가 동일하지 않고, 시료수도 다르기 때문에, 현재 오염도와 동일하다고 가정을 하였고, 서울 지역을 대표한다고 가정하였다.

위해도 계산에 사용된 단위 위해도는 동물 실험이나 역학 자료로부터 도출되는 결과로, 동물실험 결과는 EPA Protocol에 따라 중간(동물-사람) 외삽과 고용량-저용량 외삽을 통해 인체에 적용된 결과이고(연세대 환경공해연구소, 2002), 역학 자료는 특정 인종을 대상으로 한 연구 결과이기 때문에 인종간 차이가 없는 것으로 가정하고 적용하였다. 위해도 계산시 단위 위해도의 최종 단위가 평생 위해도(lifetime risk)로 제시되는 경우, 연간 위해도는 평생 위해도를 기대수명으로 동일하게 분할한 위해도와 같다고 가정하였다(EPA, 1993).

또한 노출 인구수는 최종 영향(target effect)이 암으로 인한 사망이므로 잠복기(latency period)를 고려하여, 대기 및 실내공기 오염의 경우는 20세 이상의 서울 지역 성인(7,651,408명)으로 하였으며, 먹는 물 오염의 경우는 20세 이상의 급수 인구(5,409,545명)만을 대상으로 하였다. 지하수 중 방사성 물질의 경우는 지하수 사용 인구만(711,581명)을 대상으로 하였다. 각 오염물질과 물질군 또는 하위문제에 대한 자세한 위해성 평가 방법은 선행 연구에서 제시하였다(김예신, 2002).

여기서 물질군의 위해도는 물질군에 해당하는 물질의 위해도의 합이고, 각 하위문제에 대한 위해도는 각 물질군의 위해도의 합이고, 상위 문제에 대한 위해도는 각 하위문제에 대한 위해도의 합으로 계산하였다. 즉 여러 물질에 대한 위해도는 개개 물질의 위해도를 더한 결과(additive effect)와 같다고 가정하였다(EPA, 1993; Morello-Frosch RA *et al.*, 2000).

3. 경제 위해도 추정

1) WTP 추정

해당 환경 오염(대기오염, 실내공기오염, 먹는물 오염)으로 인한 10년간 5/1,000(연간 5/10,000)에 해당하는 위해도 감소에 대한 지불의사금액을 추정하기 위하여, 서울 시민 600명을 대상으로 개인

면접을 통한 설문조사를 실시하였다. 설문지 구성은 총 6개 영역으로 지불 의사금액을 묻는 부분이 외에 5개 세부 영역으로 분류하였다(Part A: 건강 상태 및 삶의 질 조사, Part B: 위험도 인식, Part C: 확률 및 위험도에 대한 이해도, Part D: 소득 및 지출비용, Part E: 지불의사금액, Part F: 기타 정보).

지불의사금액(WTP)을 이끌어 내기 위하여 가상 가치 평가법(contingent valuation method)을 이용하였다. 여기서 초기 제시 금액 설정은 투표 모형에서 발생할 수 있는 출발점 편향의(starting point bias)를 최소화하기 위해서 예비조사를 실시하여 10,000원, 20,000원, 40,000원과 60,000원으로 결정하였다. 그리고 지불 의사 금액을 유도하기 위하여 2단계 양분선택법(double-bounded dichotomous choice)을 이용하였으며, 지불수단(vehicle payment)으로는 기부금을 선택하였다.

지불의사금액을 추정하기 위한 기본 모델로는 lower-bounded Turnbull method, Weibull model, Spike model을 선택하였다. 그리고 이들 추정모형에 설명변수로서 소득, 성, 연령, 질병 상태, 주택 소유 여부, 삶의 질, 인식도(환경오염에 대한 일반적인 인식도, 환경오염으로 인한 사회적 가치에 대한 영향), 확률 및 위험도에 대한 검사 점수를 포함시켰다(김예신 등, 2002).

2) 건강손실비용 산정

건강 손실 비용은 사망(mortality) 또는 암 발생(cancer incidence)으로 인한 손실비용과 질병 이환(morbidity)으로 인한 손실비용으로 분류할 수 있으나, 본 연구에서는 암 발생으로 인한 사망에 대한 손실비용만을 추정하였다.

VSL은 각각의 환경문제로 인한 위험도 감소를 위한 WTP(3가지 모델에 의한 평균값의 추정치)를 위험도 감소분(ΔP; 이 연구에서는 5/10,000)으로 나누어서 산출하였다. 크게 3가지 상위환경문제에 대한 VSL을 산출하였다. 여기서 하위 환경문제에 대한 VSL은 상위 환경문제에 대한 WTP(각각의 상위 환경문제에 대한 WTP는 해당 하위 환경문제의 WTP와 동일하다고 가정)를 적용하여 산출하였다.

건강 손실 비용은 각각의 환경문제에 해당하는 VSL에 인체 위험도 평가에서 추정된 이론적 사망수(50%tile 값)를 곱하여 산출하였다.

$$\therefore VSL = WTP/\Delta P, \text{ Change in probability of death}$$

$$\therefore \text{Damage cost (₩)} = VSL \times \text{Theoretical Mortality Incidence}$$

건강 손실 비용에 대한 불확실성을 감안하여 Monte-Carlo Simulation (Crystal-Ball Package, 2000)을 이용하여, 각각의 환경문제에 대한 사망 위험도에 대한 확률밀도함수(오염농도, 단위 위험도, 노출인구수와의 함수)와 VSL에 대한 확률밀도함수(WTP와 위험도와의 함수)의 조합을 통해 모의되는 출력함수인 손실비용함수로부터 50%tile과 95%tile값의 사망 손실 비용을 이용하였다(김예신 등, 2002).

4. 인지 위험도 조사

8가지 하위 환경문제에 대해 7점 척도로 하여 지불의사금액 조사시 Part B에서 설문에 같이 포함시켜 조사하였다. 그리고 해당 문제에 대한 인식도는 응답자의 평균 점수를 이용하였다.

5. 우선 순위 도출

1) 연속형 순위 설정

인체 위험도는 이론적 사망수 추정치를 지표로, 인지 위험도는 7점척도에 대한 평균값을 지표로, 경제 위험도는 이론적 사망 손실 비용을 지표로 하여 하위문제 8개에 대해 순위(1순위~8순위)를 설정하였다. 인체 위험도는 사망자수가 많을수록, 경제 위험도는 건강 손실 비용이 클수록, 인지 위험도는 인식하고 있는 정도가 클수록 우선 순위가 높은 것으로 간주하였다.

2) 범주형 순위 설정

우선 순위를 연속형으로 설정하였을 경우, 위해

Table 1. Criteria for categorical allocation of individual risk

Category	Human risk ¹	Economic risk ²	Perceived risk ³
Low	~ 10	~ 1	1~2
Low -Medium	10~100	1~10	2~3
Medium	100~500	10~50	3~5
Medium -High	500~1,000	50~100	5~6
High	1,000~	100~	6~7

¹persons, ²monetary value (billion₩), ³score

Table 2. Annual individual and population risks due to air pollutants in Seoul

Sub-problem	Chemical classes	Chemical	Mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Unit risk ¹⁾	Annual individual risk	Annual population risk ²⁾
	Metals	Chromium (Cr^{6+})	0.012	1.40E-02	2.48E-06	19.0
		Arsenic (As) (ng/m^3)	6.340	5.02E-03	4.55E-07	3.5
		Cadmium (Cd)	0.006	2.10E-03	1.65E-07	1.2
HAPs	VOCs	Benzene	12.490	9.57E-06	1.71E-06	13.1
		1,2-dichloroethane	1.380	3.03E-05	5.97E-07	4.6
		Trichloroethylene	9.240	1.64E-06 ³⁾	2.16E-07	1.6
		Chloroform	0.220	2.74E-05	8.61E-08	0.66
		Dichloromethane	1.980	2.50E-06	7.07E-08	0.54
		Tetrachloroethylene	6.730	6.74E-07 ⁴⁾	6.48E-08	0.50
		Ethylene dibromide	ND	1.20E-04 ³⁾	—	—
PAHs	PAHs	8.85 ⁵⁾	2.43E-06	3.07E-07 ⁶⁾	2.3	
Regulated pollutant	PM ₁₀	PM ₁₀	70.083	0.800%	5.50E-05 ⁷⁾	564.6 ⁸⁾
Dioxins	PCDDs/PCDFs	PCDDs/PCDFs	0.208 ⁹⁾	3.33E-04	9.89E-07 ¹⁰⁾	7.6

¹⁾IRIS (2002)²⁾Exposure population : Population above 20 years-old, 7,651,408 persons (Korea National Statistical Office, 2001)³⁾Ministry of Environment, Korea (1998)⁴⁾Edward *et al.* (1991)⁵⁾ng B(a)p-TEQ/ m^3 ⁶⁾ng B(a)p-TEQ/ m^3 × unit risk of B(a)P⁷⁾Annual population risk ÷ Exposure population (Korea National Statistical Office, 2001)⁸⁾Target population : Mortality incidence cause by lung cancer above 30 years-old, 1,007 persons (Korea National Statistical Office, 2000)⁹⁾pg TEQ-WHO/ m^3 ¹⁰⁾pg TEQ-WHO/ m^3 × unit risk of 2, 3, 7, 8-TCDD

*HAPs : Hazardous Air Pollutants *VOCs : Volatile Organic Compounds

*PAHs : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons *PM₁₀ : Particulate Matter (size : $\leq 10 \mu\text{m}$)*PCDDs : Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins *PCDFs : Polychlorinated dibenzofurans**Table 3.** Annual individual and population risks due to indoor air pollutants in Seoul

Sub-problem	Chemical classes	Chemical	Mean ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Unit risk ¹⁾	Annual individual risk	Annual population risk ²⁾
	Aldehyde	Formaldehyde	81.75	1.52E-05	1.78E-05	135.8
		Acetaldehyde	44.76	2.57E-06	1.64E-06	12.6
IAPs	VOCs	Benzene	4.05	9.57E-06	5.54E-07	4.24
		Carbon tetrachloride	0.13	4.33E-05	8.04E-08	0.62
		Trichloroethylene	1.79	1.64E-06 ³⁾	4.19E-08	0.32
		Tetrachloroethylene	2.42	6.74E-07 ⁴⁾	2.33E-08	0.18
		1,2-dichloroethane	0.02	3.03E-05	8.22E-09	0.06
Radon	Indoor radon	Radon (pCi/L)	1.22	5.92E-03 ⁵⁾	1.03E-04	788.0

¹⁾IRIS (2002)²⁾Exposure population : Population above 20 years-old, 7,651,408 persons (Korea National Statistical Office, 2001)³⁾Ministry of Environment, Korea (1998)⁴⁾Edward *et al.* (1991)⁵⁾NRC (1999)

*IAPs : Indoor Air Pollutants *VOCs : Volatile Organic Compounds

도 추정치의 절대값에 대한 고려가 배제되므로, 실제 위해도의 절대값을 고려하여 표 1과 같은 분류 기준에 의거하여 5가지 범주형 지표를 설정하였다. 그리고 각 하위 문제로 인한 위해도 추정치를 해당하는 범주로 할당하여 범주형 순위를 설정하였다.

3) 통합 순위 설정

통합 순위는 두 가지 형태로 분류하였다. 하나는 하위 환경문제 각각에 대해 세 가지 위해도 지표

에 대한 연속성 순위를 합산하여 통합순위를 결정하였고, 다른 하나는 세 가지 위해도 지표에 대한 범주형 순위 할당 결과를 병렬선상에 놓고, 가장 높은 범주(highest rule) 또는 중간 순위(average rule)에 있는 범주를 최종 통합 순위로 결정하였다. 예를 들어, 임의의 문제에 대해 세 가지 위해도가 각각 High, Medium-High, Medium일 때, Highest rule을 이용하면, 통합 위해도는 'High'가 되고, Average rule을 적용하면 'Medium-high'가 된다.

Table 4. Annual individual and population risks due to water pollutants in Seoul

Sub-problem	Chemical classes	Chemical	Mean ($\mu\text{g/L}$)	Unit risk ¹⁾	Annual individual risk	Annual population risk ²⁾		
DWP	VOCs	1, 1-dichloroethylene	0.840	2.00E-05	2.40E-07	1.30		
		1, 2-dichloroethane	1.190	3.03E-06	5.15E-08	0.28		
		Carbon tetrachloride	0.710	4.33E-06	4.39E-08	0.24		
		Benzene	2.280	9.57E-07	3.12E-08	0.17		
		Dichloromethane	1.820	2.50E-07	6.50E-09	0.035		
		Tetrachloroethylene	0.170	8.09E-07 ³⁾	1.97E-09	0.011		
		1, 1-dichloroethane	1.440	5.00E-08 ³⁾	1.03E-09	0.0056		
		Trichloroethylene	0.030	6.15E-07 ³⁾	2.64E-10	0.0014		
		1, 1, 1, 2-tetrachloroethane	0.010	8.67E-07	1.24E-10	0.0007		
		1, 1, 2, 2-tetrachloroethane	ND	6.67E-06	-	-		
		1, 1, 2-trichloroethane	ND	1.90E-06	-	-		
		Metals (mg/L)	Metals (mg/L)	Arsenic (As)	0.001	5.00E-05	7.14E-07	3.9
				Lead (Pb)	0.001	1.30E-06 ³⁾	1.86E-08	0.1
Beryllium (Be)	ND			4.28E-04 ³⁾	-	-		
PAHs	PAHs	0.089 ⁴⁾	2.43E-04	3.08E-07 ⁵⁾	1.66			
DBPs	THMs	Chloroform	16.327	9.60E-07 ³⁾	2.24E-07	1.2		
		Bromodichloromethane	4.791	2.07E-06	1.42E-07	0.77		
		Dibromochloromethane	0.958	2.80E-06	3.83E-08	0.21		
		Bromoform	0.075	2.63E-07	2.81E-10	0.002		
Radio-nuclides	Radio-nuclides ⁸⁾ (pCi/L)	Radon	1160.65	7.00E-08 ⁶⁾	1.16E-06	0.83 ⁹⁾		
		Gross α	0.47	5.83E-06 ⁷⁾	3.90E-08	0.028 ⁹⁾		
		Uranium	0.27	1.51E-06 ⁷⁾	5.71E-09	0.0041 ⁹⁾		

¹⁾IRIS (2002)

²⁾Exposure population : 5,409,545 persons (Population above 20 years-old (Korea National Statistical Office, 2001) \times Fraction using tap water as drinking water (70.7%, Korea National Statistical Office, 1997))

³⁾Ministry of Environment, Korea (1995)

⁴⁾ng B(a)p-TEQ/m³

⁵⁾ng B(a)p-TEQ/m³ \times unit risk of B(a)p

⁶⁾NAS (1999)

⁷⁾EPA (1999)

⁸⁾Assume average level of Seoul and Gyeonggi-do as that of Seoul

⁹⁾Exposure population : 711,581 persons (Population above 20 years-old (Korea National Statistical Office, 2001) \times Fraction using ground-water as drinking water (9.3%, Korea National Statistical Office, 1997))

*DWP: Drinking Water Pollutants *VOC: Volatile Organic Compounds

*PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons *DBP: Disinfection by-products

*THM: Trihalomethanes *ND: Not Detected

결 과

1. 인체 위해도

각 오염도 자료와 단위 위해도 자료를 사용하여 추정된 하위 환경문제에 대한 평생 및 연간 위해도는 표 2-4와 같다. 인체 위해도에 입각한 하위문제들의 우선순위는 실내공기 중 라돈, PM10, IAPs, HAPs, DWPs, 일반 대기 중 다이옥신류, DBPs 그리고 먹는물 중 일부 방사성물질의 순으로 추정되었다(표 5). 또한 다중 비교 결과, 이들 상위 및 하위 문제들의 각각의 평균 추정치 간에는 모두 통계학적으로 유의한 차이를 나타내었다.

2. 경제 위해도

각 모델에 따른 WTP와 VSL은 표 6과 같다. 추정결과 Weibull 모형이 모델의 적합도가 가장 양호

하였다. Weibull 모델을 기준으로 할 때, 대기오염으로 인한 WTP는 12,000원, 실내공기오염은 약 20,000원, 먹는물 오염은 약 13,000원으로 추정되었다. 이렇게 유도된 WTP를 사용하여 추정된 통계적 생명가치는 대기오염으로 인한 경우, 약 3억원으로 추정되었고, 실내공기 오염으로 인한 사망은 약 5억원으로 추정되었으며, 먹는 물 오염으로 인한 사망은 약 3억원으로 추정되었다.

모형의 적합성이 가장 좋은 Weibull 모델에서 추정된 VSL을 적용하여 손실비용을 추정된 결과 하위문제간의 우선순위는 인체 위해도에 입각한 우선순위와 동일하였다(표 7). 그리고 사망 손실비용이 천억을 초과하는 것으로 추정된 하위 문제는 PM10과 라돈이었으며, 백억을 초과하는 하위 문제는 실내공기오염의 IAPs와 대기오염의 HAPs였다.

이론적 사망 손실 비용에 대해, 상위 문제간에는 모두 통계학적으로 유의한 차이를 나타내었고, 하위 문제간에도 유의한 차이를 나타내었으나, 다중

Table 5. Health risk and its ranking of environmental sub-problems and problems

Sub-problem	Population risk ¹⁾			Ranking	
	Point	50%tile	95%tile		
Air pollution	HAPs	47	38	121	4
	Regulated pollutant (PM10)	565	548	826	2
	Dioxins (PCDDs/PCDFs)	8	7	14	6
Indoor air pollution †	IAPs	154	132	413	3
	Radon*	788	434	2,555	1
Drinking water contamination	DWPs	8	7	16	5
	DBPs	2	2	3	7
	Radionuclides (groundwater)	1	1	6	8

¹⁾Theoretical mortality estimates (unit : person/year)

*p < 0.05 (comparison among theoretical mortality estimates of sub-problems), ANOVA

†p < 0.05 (comparison among theoretical mortality estimates of problems), ANOVA

Table 6. Median WTP & VSL of environmental problems

Environmental problem	Median WTP & VSL (₩)					
	Lower-bounded Turnbull		Dichotomous Weibull		Spike model	
	WTP	VSL	WTP	VSL	WTP	VSL
Air pollution	12,900	311,000,000	12,000	287,000,000	9,700	233,000,000
Indoor air pollution	16,900	406,000,000	19,900	477,000,000	20,600	495,000,000
Drinking water contamination	10,000	240,000,000	12,600	302,000,000	13,700	330,000,000

Table 7. The health damage cost and its ranking of sub-problem

	Sub-problem	Health damage cost (billion ₩)			Ranking
		Point	50%tile	95%tile	
Air pollution	HAP	16	11	43	4
	Regulated pollutant (PM10)	180	155	388	2
	Dioxins (PCDDs/PCDFs)	2	2	6	6
Indoor air pollution*	IAPs	88	63	243	3
	Radon#	408	215	1,384	1
Drinking water contamination	DWPs	3	2	7	5
	DBPs	1 >	1 >	2	7
	Radionuclides (groundwater)	1 >	1 >	2	8

#p < 0.05 (comparison among health damage costs of sub-problems), ANOVA

*p < 0.05 (comparison among health damage costs of problems), ANOVA

Table 8. The perceived risk and its ranking of sub-problem

	Sub-problem	Group 1 (n = 206)	Group 2# (n = 196)	Group 3 (n = 201)	Total sample (n = 603)	Ranking
Air pollution	HAPs*	6.32	5.86	6.33	6.17	1
	Regulated pollutant	6.01	5.62	6.07	5.90	4
	Dioxins	6.35	5.77	6.35	6.16	2
Indoor air pollution	IAPs	6.01	5.44	5.96	5.81	6
	Radon	6.05	5.42	5.93	5.81	7
Drinking water contaminant	DWPs	6.02	5.53	6.10	5.89	5
	DBPs	5.89	5.35	5.89	5.72	8
	Radionuclides (groundwater)	6.17	5.66	6.09	5.98	3

scale 1 ~ 7 : never ~ very much

#p < 0.05 (comparison among mean values of groups), ANOVA

*p < 0.05 (comparison among mean values of sub-problems), ANOVA

비교 결과, 다이옥신류와 DWPs간, 그리고 DBPs와 지하수 중 방사성 물질간에는 유의한 차이가 없었다(표 7).

3. 인지 위해도

환경오염으로 인한 위해성에 대한 인식도 조사 결과, 7점 만점에서 평균 6점에 근접하게 응답하여 전체적으로 높은 위해도 인식 수준을 나타내었다(표 8). 인지 위해도에 의거한 상위 5순위에는 HAPs, 다이옥신, 지하수 중 방사성물질, 규제 물질 및 DWPs가 포함되었으나, 다중비교결과, HAPs (1

순위)-DBPs (8순위), Dioxins (2순위)-DBPs (8순위) 간에만 유의한 차이를 보였다.

4. 우선 순위 비교

1) 연속형 순위 결과

앞에서 살펴본 바와 같이 암 발생으로 인한 이론적 사망수 추정치에 대한 인체 위해도, 실제 서울 시민이 인식하고 있는 인지 위해도, 그리고 이론적 사망 손실 비용에 대한 경제 위해도의 순위를 비교하였다.

인체 위해도 순위와 경제 위해도 순위는 동일하

였다. 그러나 인지 위험도의 경우는 실제 인체나 경제 위험도가 낮은 순위를 나타내는 다이옥신, 방사성 물질 등이 높은 순위를 나타내었다(표 9).

각 위험도 결과 순위(1순위~8순위)에 대한 통계학적인 유의성 검증을 한 결과, 인체 위험도 결과물의 경우는 하위문제간에 모두 통계학적으로 유의한 차이를 보였다. 경제 위험도의 경우는 두 가지 하위 문제들이 서로간에 통계학적으로 유의한 차이가 없었다. 즉 DWPs와 다이옥신류(5순위와 6순위) 그리고 DBPs와 지하수 중 방사성물질(7순위와 8순위)의 이론적 사망손실 비용이 통계학적으로 유의한 차이가 없었다. 또한 인지 위험도의 경우는 HAPs와 DBPs(1순위와 8순위), 다이옥신과 DBPs(2순위와 8순위)의 인지 위험도만이 통계학적으로 유의한 차이를 나타내어 3순위와 7순위 사이에는 인식도가 유의한 차이가 없었다.

2) 범주형 순위 결과

각 위험도 추정치의 절대 크기를 분류 지표에 의거하여 5가지 범주로 분류한 후, 하위 문제에 대한 범주형 순위를 매긴 결과(표 10), 인체 위험도에서는 PM10은 Medium-High범주에, 라돈과 IAPs는 Medium범주에, HAPs는 Low-Medium범주에 그리고 다이옥신류, DWPs, DBPs, 지하수 중 방사성 물질은 Low범주로 분류되었다.

경제 위험도에서는 라돈과 PM10이 High범주에, IAPs는 Medium-High범주에, HAPs는 Medium범주에, 다이옥신류와 DWPs는 Low-Medium범주에 그리고 DBPs와 지하수 중 방사성 물질은 Low범주로 분류되었다.

인지 위험도에서는 HAPs와 다이옥신류가 High범주에, 그리고 나머지 하위 문제들은 모두 Medium-High 범주로 분류되어 다른 위험도보다 전반적인

Table 9. Priorities of each sub-problem category

Ranking	Health risk	Economic risk	Perception risk	Integrated risk
1	· Radon	· Radon	· HAPs	· Radon, PM10
2	· PM10	· PM10	· Dioxins	
3	· IAPs	· IAPs	· Radionuclides	· HAPs
4	· HAPs	· HAPs	· PM10	· IAPs
5	· DWPs	· DWPs	· DWPs	· Dioxin
6	· Dioxins	· Dioxins	· IAPs	· DWPs
7	· DBPs	· DBPs	· Radon	· Radionuclides
8	· Radionuclides	· Radionuclides	· DBPs	· DBPs

IAPs : indoor air pollutants, HAPs : hazardous air pollutants
 DWPs : drinking water pollutants, DBPs : disinfection by-products

Table 10. Sub-problem's allocation

Category	Health risk	Economic risk	Perception risk	Integrated risk	
				Highest rule	Average rule
High	—	Radon, PM10	Radon, PM10	Radon, PM10, HAPs, Dioxins	—
Medium-High	PM10	IAPs	IAPs	IAPs, DWPs, DBPs, Radionuclides	Radon, PM10, IAPs
Medium	Radon, IAPs	HAPs	HAPs	—	—
Low-Medium	HAPs	DWPs, Dioxins	DWPs, Dioxins	—	HAPs, DWPs, Dioxins
Low	Dioxins, DWPs, DBPs, Radionuclides	DBPs, Radionuclides	DBPs, Radionuclides	—	DBPs, Radionuclides

IAPs : indoor air pollutants, HAPs : hazardous air pollutants,
 DWPs : drinking water pollutants, DBPs : disinfection by-products

위해도 인식 수준이 높았다.

3) 통합형 순위 결과

연속형 순위 결과를 합산하여 통합 순위를 매긴 결과, 가장 높은 우선 순위에는 PM10과 라돈이 동시에 포함되었다(표 9).

범주형 순위 결과를 다시 “Highest Rule”과 “Average Rule”을 적용하여 통합 순위를 매긴 결과를 살펴보면, “Highest Rule”을 적용한 경우, 실내공기 중 라돈, PM10, HAPs와, 일반대기 중 Dioxins은 High 범주에, 나머지 문제는 Medium-High 범주로 분류되었다. “Average Rule”을 적용한 경우, 실내공기 중 라돈, PM10과 IAPs는 Medium-High 범주로, HAPs, DWPs와 일반 대기 중 다이옥신류는 Low-Medium 범주로, 그리고 DBPs와 지하수 중 방사성 물질은 Low 범주로 분류되었다(표 10).

고 찰

비교 위해도 분석은 실질적인 환경문제의 심각성을 상대적으로 비교하기 위해 위해도라는 공통의 객관적인 측정 척도를 제공하고, 동일한 환경문제에 대해 차원이 다른 위해도를 평가하고 비교하는 조직적인 틀을 제공한다. 이들 분석을 통해 가장 큰 환경적 위해를 규명하고 그들의 순위를 매김으로써 문제의 우선 순위를 확립하고, 우선 순위 설정과정에 공중을 참여시키고 그들의 의견을 반영하여 위해도를 감소시키기 위한 실행 계획이나 전략을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

이는 처음으로 U.S EPA (1987)에서 개발하여, “Unfinished Business”라는 보고서를 간행하였으나 초기에는 이들 결과물들이 US EPA에서 재원의 재분배에는 활용되지는 못했다. 그것은 위해도에 대한 대중의 인식이 급진적으로 변화하지 않기 때문이다. 따라서 이들 결과물은 우선순위를 정해나갈 필요성이 있는 정책집단에게 광역의 사고를 할 수 있게 도와주는 정도였다. 그러나 이 책의 간행 이후 미국 주 정부의 과반수 이상과 50개 이상의 지역에서 중요한 환경문제를 규명하고 기술하는데 비교 위해도 접근법을 이용하였다. 이들 비교 위해도 분석 결과들은 www.scorecard.org (Environmental Defence, 2002)을 접속하면 위해도 별 환경문제의 우선 순위 결과들을 일목요연하게 정보를 제공

하고 있다.

지역의 환경 문제의 우선순위를 정하기 위해서는 먼저 그 지역의 환경문제를 정의하고 분류하는 단계가 필요하다. 비교 위해도 분석에서 환경문제를 선택하는 기준은 관리 프로그램상의 분류, 오염원에 따른 분류, 매체별 분류, 오염물질 분류 등 다양하다(U.S EPA, 1993). 따라서 비교 위해도 분석에 있어 환경 문제를 일정한 분류기준에 의거하여 선택하기는 쉽지 않기 때문에 다소 프로젝트 참여자의 주관적인 판단이나 지역적 특이성이 개입된다. 즉 공통의 척도에 의해 환경문제를 명확히 정의하여 선택하기는 어렵다. 미국의 대부분의 보건 당국과 환경보호 기관은 관리 프로그램에 따라 문제를 분류하고 있다(U.S EPA, 1993).

이 논문에서 사용된 환경 문제의 선택 기준은 실제 인체 위해성을 평가할 수 있는 자료가 확보 가능한 경우를 기준으로 삼았다. 즉 우리나라에서 현재 위해성 평가가 가능한 자료와 사람과 직접적으로 접촉하는 환경매체 오염이 기준이 되었다. 즉 대기 오염, 실내공기 오염, 먹는 물 오염이다. 또한 분류된 3가지 상위 문제를 발생 가능한 8가지의 하위 문제로 다시 분류하였다.

이 연구에서 분류된 하위 문제들은 미국에서 실행되었던 비교 위해도 분석에서 다루었던 환경문제를 통합하여 재분류한 문제들에 포함되어있다(Davies T and Darnall N, 1996). 또한 비교 위해도 분석의 초기 연구인 “Unfinished Business”에서 열거된 31개의 환경문제에도 포함되어 있다(U.S EPA, 1987).

앞에서 살펴본 것처럼, 이 논문에서 다루고 있는 문제들은 환경 전반에 걸친 문제들을 모두 다루지는 못했으므로, 지역 환경 전반에 대한 문제점을 진단하는데 부족함이 존재한다. 따라서 차후 연구에서는 좀 더 자료 수집과 분석을 통해 유해 폐기물이나 식품을 매개로 하는 환경오염 문제 등을 포함한 서울지역의 중요한 환경 문제를 보완해 나가는 것이 필요할 것으로 생각된다.

흥미롭게도 선진국들만 아니라 개발 도상국 및 경제 전환기에 있는 OECD 국가에서도 비교 위해도 분석을 진행하였다. “Unfinished Business”에서 다루는 환경문제는 31가지에 대해 인체 위해도, 생태 위해도, 경제 위해도에 대해 분석이 이루어졌지만, 이들 국가들은 대부분이 인체 위해도만을 반영

한 3~16개 정도의 환경문제에 대해 분석 결과를 제시하고 있다(Morgenstern *et al.*, 2000).

위와 같은 비교 위해도 분석은 소집단의 전문가에 의해 실행되거나 일반 대중 대표나 정부/비정부 조직의 전문가를 모두 포함하는 광역 참여 과정(broad participatory process)을 통해 실행되기도 한다. 따라서 참여 주체(정부기관/대학/사업체/환경단체/컨설팅 업체/연구 조직/지역 조직/일반 대중)에 따라 우선 순위결과에는 차이가 발생할 수 있다.

또한 비교 위해도 분석의 주체 뿐만 아니라, 분석의 객체가 되는 환경 문제라든지 우선 순위를 분류하는 기준이 다른 경우도 결과의 차이를 가져올 수 있다. 미래 자원연구소에서는 미국 전역에서 진행된 비교 위해도 분석 결과를 비교하고자 하였으나, 각 주체마다 분류기준이 달라, 서로 비교하거나 통합된 결과를 표현하기는 불가능하여 인체 위해도만을 대상으로 환경문제의 분류 기준이나 우선 순위 범주 분류 기준을 통합하여 비교 위해도 분석결과를 집약적으로 재평가하여 미국 전체의 우선 순위 결과를 제시하였다(Konisky, 1999).

이들 결과에서 주요 환경문제 10가지(실내공기 오염, 대기오염, 먹는물 오염, 지하수 오염, 오존층 파괴, 농약, 식품, 독성물질, 납, 유해 폐기물)에 대한 순위에서 Highest Rule(여러 지역에서 도출된 위해도 결과 중 가장 높은 것에 우선순위를 둠, 최대값의 의미)을 적용한 경우는, 실내공기오염이 1순위, 대기오염이 2순위, 먹는 물 오염이 8순위였다. 이 논문의 결과와는 문제의 수나 문제에 해당하는 구성성분들이 일치하지는 않지만, 경향은 유사하였다(이 연구에서 다른 3가지 상위 환경문제의 인체 위해도 순위; 실내공기 오염, 대기 오염, 먹는 물 오염). 그리고 Average Rule(여러 지역에서 도출된 위해도 결과 중 중간값에 우선순위를 둠, 중앙값의 의미)을 따르는 경우에는 대기오염의 순위가 4순위로 떨어졌다.

지역의 전반적인 환경문제를 평가하기 위해서는 뒷받침되는 자료들이 충분히 존재하는가에 대한 문제가 발생하게 된다. 뒷받침되는 자료들이 항상 수치적 해석이 가능한 정량적 자료들만을 가지고 평가하는 것은 아니다. 미국의 경우도 일부 주의 경우는 해당 문제에 대한 정성적인 자료를 가지고 전문가적 판단으로 문제의 가중을 설정하기도 하

였다(Davies T and Darnall N, 1996). 이 때, 발생하는 문제는 의사 결정을 하는 참여자의 주관적인 편견이 개입될 수 있기 때문에, 과학적인 시스템을 통해 도출되는 결과보다는 불확실성이나 신뢰성이 떨어질 수 있을 것으로 생각된다.

비교 위해도 분석시, 계량적인 자료를 통해 환경오염에 대한 문제의 우선 순위를 설정하는 과정에서 도출된 수치에 의해 직접적인 순위를 매기는 것보다는 절대적 수치를 일정한 간격으로 범주를 분류하여 범주형 순위를 매기는 것이 더욱 합리적인 결과를 가져다 줄 수 있다. 또한 미국 환경보호청에서 진행한 분석 결과도, 연구 대상 지역에 따라 분류 범위는 다르지만, 대부분의 경우, 우선 순위 결과의 형태는 범주형을 선호하고 있다(U.S EPA, 1993).

다음 연구 결과에서도 범주형 순위가 연속형 순위보다 더 유용하다는 점을 시사해주고 있다. 즉 각 순위(1순위~8순위)에 대한 통계학적인 유의성 검증을 한 결과, 인체 위해도 결과물의 경우는 상위문제간에 그리고 하위문제간에 모두 통계학적으로 유의한 차이를 보여, 순위에 대한 의미를 부여할 수 있었으나, 경제 위해도의 경우는 두가지 하위 문제들이 서로간에 통계학적으로 유의한 차이가 없었다. 즉, DWPs와 다이옥신류(5순위와 6순위) 그리고 DBPs와 지하수 중 방사성물질(7순위와 8순위)의 이론적 사망손실 비용이 통계학적으로 유의한 차이가 없었다. 이와 같은 경우 연속형 순위는 의미가 약하다. 또한 인지 위해도의 경우는 HAPs와 DBPs(1순위와 8순위), 다이옥신과 DBPs(2순위와 8순위)의 인지 위해도만이 통계학적으로 유의한 차이를 나타내어 3순위와 7순위 사이에는 인식도가 유의한 차이가 없어 연속형 순위 결과는 의미가 없을 수 있다. 따라서 이들 수치에 대한 크기나 불확실성을 고려한다면 범주형 순위가 더 합리적인 것으로 판단된다.

결론

3가지 위해도 지표(인체 위해도, 경제 위해도, 인지 위해도)에 의거하여, 서울지역에서 환경문제에 대한 위해도 결과를 비교하여 통합 우선 순위를 선정한 결과, 실내공기 중 라돈과 대기 중 PM10이

가장 위해도가 높고 관리 우선 순위에 있는 문제로 선정되었다.

이 연구에서는 과학적인 방법론을 통해 비교 위해도 분석의 논리적인 시스템을 개발하고, 이들 시스템에서 정량적인 연구결과를 도출하였으므로, 정성적인 평가에 의해 주관적인 견해가 개입되어 도출되는 순위보다는 신뢰성이 있는 것으로 판단되고, 단지 뒷받침되는 과학적 자료들이 부족했기 때문에, 서울지역 전반의 환경문제를 파악하기는 어려웠다. 하지만 이 연구에서 다룬 주요 문제들은 인간과 직접적인 접촉하는 매체 오염이라는 점을 감안할 때, 큰 의의가 있다고 판단된다. 따라서 결과 해석시 불확실성에 대한 부분을 잘 감안하고 활용을 한다면, 서울시 환경문제의 정책결정에 예비적 지표로서 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 환경부의 차세대 핵심환경 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김예신. 환경 문제의 우선순위 도출을 위한 비교 위해도 시스템 개발에 관한 연구. 연세대학교 대학원 박사학위논문 2002.

김예신, 이용진, 박화성, 신동천. 환경 오염으로 인한 인체 위해도에 입각한 사망 손실 비용에 관한 연구. 대한예방의학회지 투고 중.

김예신, 박화성, 이용진, 임영욱, 신동천. 서울 지역에서 인체 위해도에 입각한 대기오염물질의 관리 우선 순위 선정에 관한 연구. 한국대기환경학회지 투고 중.

연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-수질오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 개발. 환경부(1992~1995).

연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 개발. 환경부(1995~1998).

연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발. 환경부(1998~2001).

연세대학교 환경공해연구소. 고도정수처리기술개발-살균

기법 및 부산물 제어기술. 국립환경연구원 2000.

연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발; 대기오염물질의 위해성 평가 지침서. 환경부 2002.

연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발; 수질오염물질의 위해성 평가 지침서. 환경부 2002.

연세대학교 환경공해연구소. 환경 위해성 평가 및 관리기술-환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발; 실내공기 오염물질의 위해성 평가 지침서. 환경부 2002.

연세대학교 환경공해연구소. 환경오염에 의한 건강위험요인 평가 및 예방-실내공기오염에 의한 건강위험요인 평가 및 예방. 보건복지부 2002.

환경부. 대기오염 자동 측정망 자료, <http://www.me.go.kr/> 2001.

한국원자력안전기술원. 전국 실내라돈 조사 2002.

Covello VT. Risk perception and communication, Canadian Journal of Public Health 1995; 86: 78-79.

Davies T and Darnall N. Environmental Priorities for the District of Columbia: A Report to the Summit Fund. Washington DC: Resources for the Future, Center for Risk Management, Discussion Paper 97-04. 1996.

Environmental Defence. <http://www.scorecard.org> 2002.

European Commission. Externalities of Energy. General Science, Research and Development, European Commission 1997.

Joh SH, Nam YM, Shim SY, Sung JH and Shin YC. Ancillary benefit due to greenhouse gas mitigation, 2000 to 2020-The international co-control analysis program for Korea. Korea Environmental Insititue 2001.

Konisky DM. Comparative Risk Project: A Methodology for Cross-Project Analysis of Human Health Risk Ranking. Resource for the Future. Discussion Paper 99-146. 1999.

McCarty LS and MacKay D. Enhancing Ecotoxicological Modeling and Assessment, Environmental Science and Technology 1993; 27(9): 1719-1728.

Morello-Frosch RA, Woodruff TJ and Axelrad DA. Air toxics and health risk in California: The public health implications of outdoor concentration, Risk Analysis 2000; 20(2): 273-291.

Morgenstern RD, Shih JS and Sessions SL. Comparative risk assessment : an international comparison of methodologies and results, J. of Hazardous Material 2000; 78: 19-39.

Ostro B. Estimating health effects of air pollutants: A methodology with an application to Jakarta. Policy research

working paper 1301. Washington D.C. the World Bank 1994.

Shin DC. Comparison of direct and indirect approach for estimating average daily dose of dioxins in Korea, *Organohalogen Compounds* 2001; 52: 325-329.

U.S EPA. Regional and State Planning Branch, A Guide-

book to Comparing Risks and Setting Environmental Priorities, Washington D.C. 1993.

U.S EPA. Unfinished Business : A Comparative Assessment of Environmental Problems-Overview Report, Washington D.C. 1987.