

대기오염과 건강

연세대학교 의과대학 교수 및 공해연구소장

신동천

1. 서 론

대기오염은 대기 중에 인위적으로 배출된 오염물질인 먼지(dust), 매연(smoke), 가스(gas), 훈연(fume), 연무(mist), 증기(vapor) 및 악취(odor) 등이 사람의 보건위생상에 위해를 주거나 또는 인간의 생활에 밀접한 관계가 있는 재산과 동물·식물 및 그 생육환경에 해를 미칠 수 있는 농도로 임의의 지역에 존재하는 상태로 정의할 수 있으며, 특히, 유해화학물질로 인한 대기오염 문제는 영국의 산업혁명 이후 인류 문명이 공업화·도시화로 급속히 발전함과 더불어 일련의 사건들과 함께 표면화되기 시작하였다.

특히 대도시 및 산업 도시 대기오염물질 중에는 아황산가스, 질소산화물, 분진, 오존 등 규제물질뿐만 아니라 유기화합물, 금속 및 무기화합물 등의 수많은 인체 유해 화학물질이 포함되어 있는 것으로 밝혀지고 있다.

현재 우리나라는 6종 대기오염물질의 환경기준치를 설정하여 규제·관리하고 있다. 또한 날로 심각해지는 대기오염을 개선하기 위해 1990년 제정·공포된 대기환경보전법에는 47종의 대기오염물질을 지정하고 있으며, 이중 독성이 강한 16종의 오염물질을 특정 대기유해물질로 지정하고 있다. 그리고 1992년부터는 TSP 항목을 미세먼지(PM10) 항목으로 대체하였으며, 금년부터 시행되고 있는 대기환경기준에는 SO₂와 PM10항목에 대한 기준을 더욱 강화하였다(환경부, 1999).

세계보건기구(WHO)에서는 위해성 평가 결과를 바탕으로 28종의 대기 오염물질에 대한 권고기준치를 제시하고 있으며, 미국 EPA에서는 법적 규제물질(SO_x, NO_x, CO, TSP, PM10, PM2.5, O₃, Pb)

을 제외한 미규제 오염물질을 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants: HAPs)로 명명하고 있으며, 급성위험목록(Acute Hazards List)에 403종의 화학물질, 유해대기오염물질 우선 순위 관리 체계(Hazardous Air Pollutant Prioritization System: HAPPS) 목록에 620종의 화학물질을 수록하여 관리하고 있다.

1970년 환경오염물질이 사회문제로 대두되면서 안전한 환경을 확보하기 위한 예방적 측면에서 위해성 평가(health risk assessment)가 학문적으로 그리고 제도적인 측면에서 폭넓은 관심을 불러일으켰다. 위해성 평가란 인간이 환경적 위험(environmental hazard)에 노출되었을 경우 발생할 수 있는 건강장애를 정량적으로 예측·평가하는 것이다.

즉, 위해성 평가는 환경오염으로 인한 인체영향에 대해 “위해도(risk)”를 지표로 하는 종합적이고 계량적인 정보를 제공하기 때문에 복잡 다기화 되어가고 있는 사회현상 속에서 이해관계와 불확실성으로 얹혀 있는 환경문제를 이해할 수 있도록 하는 과학적이고 합리적인 방법론으로 평가받고 있다.

위해성 평가는 인간이 항상 접하면서 생활하고 있는 환경으로부터 위협요인을 제거하여 노출로부터 발생할 수 있는 위해영향을 최소화하는 예방적 견지에 그 의의가 있다. 따라서 위해성 평가의 궁극적인 목적은 평가 결과를 위해성 관리(risk management)를 위한 유용한 정보로서 사용하기 위함이다.

이미 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency: EPA), 산업안전보건국(Occupational Safety and Health Administration: OSHA), 환경보건과학국립연구소(National Institute of Environmental Health Science: NIEHS), 산업안전 및 보건국립연구소(National Institute for Occu-

pational Safety and Health: NIOSH), 식품의약국(Food and Drug Administration: FDA), 소비자제품 안전협회(Consumer Product Safety Commission: CPSC), 그리고 독성물질 및 질병등록청(Agency for Toxic Substance and Disease Registry: ATSDR)과 같은 주로 화학물질의 규제와 관련된 선진 각국의 여러 기관에서는 위해성 평가를 정책 결정(decision-making) 수단으로 다루고 있다. 질병의 예방 및 건강한 삶의 유지 그리고 위해요인의 저감에 일반 국민의 이해와 협조를 이끌어 내는데 유용하게 이용되고 있다.

본 원고에서는 현 대기환경보전법상 규제물질과 비규제물질의 위해성 평가 결과를 제시하고 그 관리 방안에 대해 생각해 보고자 한다.

2. 본 론

가. 규제오염물질

우리나라는 지난 30년~40년 동안 급격한 공업화와 도시 집중화로 인하여 우리나라 환경오염은 악화되어 왔으며 특히 대도시의 환경오염은 심각할 정도이다. 대기오염은 그 동안 청정연료인 저유황 공급 및 청정연료 사용 의무화, LNG, LPG 등의 공급 확대 등 저감대책과 배출오염규제 강화로 인하여 SO₂, CO, TSP 등을 점차 감소하고 있다. 하지만 자동차의 급격한 증가와 운행거리의 증가에 따라 자동차 배출가스의 규제강화와 배출가스 관리 및 연료의 품질 개선에도 불구하고 질소산화물, 탄화수소류, 오존 및 미세먼지와 같은 일부 오염물질은 증가하고 있는 추세에 있어, 도시 대기질은 개선되고 있지 않다.

실제 이러한 대기오염물질의 경우는 규제기준이하의 저농도에서도 유해영향이 발생할 수 있다고 보고되고 있다. 이들 영향은 심혈관, 호흡기 질환으로 인한 급성 사망률/유병률 증가와 심혈관계 질환이나 호흡기 질환으로 인한 입원율이나 응급실 방문율의 증가와 호흡기 질환의 증가, 폐기능의 저하 등으로 모두 이들 규제오염물질로 인한 노출과 관련성이 있는 지표들이다(Table 1).

매년 대기 오염으로 인하여 3백만명이 사망하며 이 수치는 전세계에서 매년 사망하는 5천 5백만명의 5%에 해당되는 수치이다. 사망자수 측정이 불확실하기 때문에 실제 사망자는 연간 140만명 내지는 600만명 정도로 추정하고 있다(WHO, 2000). 많은 연구에서 사망률과 직경 10μm이하의 대기 중 미세먼

지 농도 사이에 밀접한 관계가 있고 미세먼지의 농도가 높은 지역에서는 기대여명이 현저히 감소함을 보고하였다. 조기 사망이외에도 천식의 30~40%, 모든 호흡기 질환의 20~30% 정도가 대기오염과 밀접한 관계에 있다고 보고하였다(WHO, 2000). 대기오염을 인한 영향은 노출되는 정도와 노출된 개체군의 감수성에 따라 결정되며 특히 천식과 같은 호흡기 질환자, 노약자, 저소득층과 같은 민감집단에서 더욱 위험것으로 알려져 있다.

NMMAPS(US-wide National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study) 결과에서는 일일 평균 PM10의 농도가 15~53μg/m³ 정도인 90개의 도시에서 10μg/m³의 PM10이 증가하면 사고외 사망률이 0.5% 증가한다는것을 보고하였다. 이 결과는 유럽의 APHEA의 연구결과(10μg/m³당 0.6%)와 매우 비슷하며, 최근에 조사된 유럽과 북, 남미 29개 도시에 대한 연구결과(10μg/m³당 0.7%)와 매우 비슷하다(Levy 등, 2000).

또한 만성사망에 대한 두가지 전향적 코호트 연구, Havard Six Cities Study(Dockery 등 1993)와 American Cancer Society(ACS) Study(Pope 등 1995)에서는 다년간 많은 수의 사람들에 대한 추적 연구를 통해 그들의 만성 사망률을 관찰하였다. 이 연구에서는 미세먼지(PM2.5)의 수준이 높은 지역에 거주하는 사람들의 장기간 평균 사망률은 흡연 유무나 병력(病歴) 등과 같이 다른 위해 요인의 영향을 고려하더라도 보통 17~26% 더 높은 것으로 보고하고 있다.

이와 같이 대기오염과 사망률이나 유병률의 증가에 대한 일부 역학적 연구들이 우리나라에서도 진행되고 있는 실정이나 현재 도출된 결과들을 노출인구 집단에 직접적으로 일반화하기에는 어려움이 있다. 따라서 계속적인 연구를 통해 최대한 혼란변수를 통제하면서 결과들을 정교히 다듬는 작업을 계속해야 할 것이다.

현재 일부 대도시의 경우는 미세먼지와 오존과 같은 대기오염물질의 오염수준이 기준치를 상회하고 있는 실정이므로 이들 위해도를 관리하기 위한 대안이 필요한 실정이다. 그러나 우리나라에서 진행한 역학 연구가 아직까지 정교한 결론을 이끌어내지 못하였다 고 하여, 이들 오염물질에 대한 관리를 역학연구의 종결이후에나 미룰수 없는 문제라고 생각된다.

따라서 이들 역학연구와 병행하여 기존의 과학적인 사실들을 수집 분석하여 위해성 평가를 실시하여

Table 1. 연구대상물질의 주요 인체영향

대상물질	주요 인체영향
Particulate Matter (입자상 물질)	- 조기사망자수 증가 - 호흡기 질환으로 인한 입원환자수 증가 - 응급실 방문 증가 - 활동일수 제한 - 성인 - 천식 악화 - 하기도 호흡기계 질환 증상 유발- 어린이 - 호흡기계 증상 유발- 성인 - 조기사망자수 증가
Ozone (오존)	- 호흡기질환으로 인한 입원환자수 증가 - 활동일수 제한 - 성인 - 상기도 및 하기도 호흡기계 질환 증상 유발 - 천식 악화 - 눈 자극 - 성인 - 조기사망자수 증가
Sulfur Dioxide (아황산 가스)	- 호흡기 질환으로 인한 입원환자수 증가 - 기침 지속일수 증가- 어린이 - 가슴이 답답한 일수 증가 - 성인 - 조기사망자수 증가
Nitrogen Dioxide (질소 산화물)	- 호흡기 질환으로 인한 입원일수 증가
Carbon monoxide (일산화탄소)	- 혈중 카복시헤모글로빈 증가 - 심장이나 뇌 손상 유발

적절한 대안을 찾기위한 노력을 함께 기울여 궁극적으로 최종적인 해답을 찾아야 할 것이다. 이 원고에서는 현행 법상 규제하고 있는 대기오염물질에 대한 위해성 평가를 실시한 결과를 요약해서 보고하고자 한다.

역학연구를 이용하여 사망이나 유병에 대한 영향을 예측하기 위해서는 우선 대상지역에 대한 대기 모니터링 자료를 수집하여 분석한 후, 국가의 통계청에서 제공되는 사망자료를 참고한다. 역학자료에서 얻어진 용량-반응 곡선에서의 기울기, 즉 단위오염물질당 사망이나 질병발생 위해도를 도출한 후, 최종 위해도 계산을 위해서 모니터링 자료, 기대 사망자수, 단위 위해도를 조합한다.

각 도시별 대기오염으로 인한 인체 건강 위험성을 평가하기 위해서 대상 지역을 6개 대도시(서울, 부산, 인천, 대구, 광주, 대전)로 선정하였고, 대기자동측정망 감시자료(환경부, 1999)를 이용하여 오염물질의 농도에 대한 통계치를 산출하였다. 용량-반응 평가는 유럽 공동체의 Extern E. Project (1997)에서 도출된 연구결과를 사용하였다(신동천 2001).

위해도의 최종 결과물은 년간 사망자수나 유병자수로 표현하였다. 이를 산출하기 위해서는 각 오염

물질의 농도에 용량-반응 함수에서 도출된 기울기(단위농도당 인년당 유병자수, 또는 단위농도당 년간 사망률의 변화폭)를 고려하고 여기에 노출 가능한 인구수나 기대 사망자수를 곱하여 최종 위해도를 표현하였다. 각 지역(i)에서 오염물질별 총 위해도는 다음과 같다.

$$R = \sum_{j=1}^6 C_i \cdot Fer \cdot EP(EM)_i$$

R : 6대도시에서 사망 또는 유병 위해도

Ci : i 지역에서 시나리오별 오염물질의 농도

Fer : 해당 오염물질의 용량-반응 함수의 기울기

EP(EM)_i : i 지역의 노출인구수

(또는 기대 사망자수)

노출 인구수는 서울시 및 5개 대도시에 해당하는 인구가 자동차 배출 오염물질에 100% 노출된다고 가정하였고, 사망자수는 1999년도 년간 사망자수를 인용하였으며 만성사망의 경우는 30세이상의 인구만을 고려하여 산정하였다(통계청, 1999).

전체적인 위해성 평가 결과를 보면 PM10에 의한 만성사망 위해도와 오존으로 인한 호흡기 질환 유병

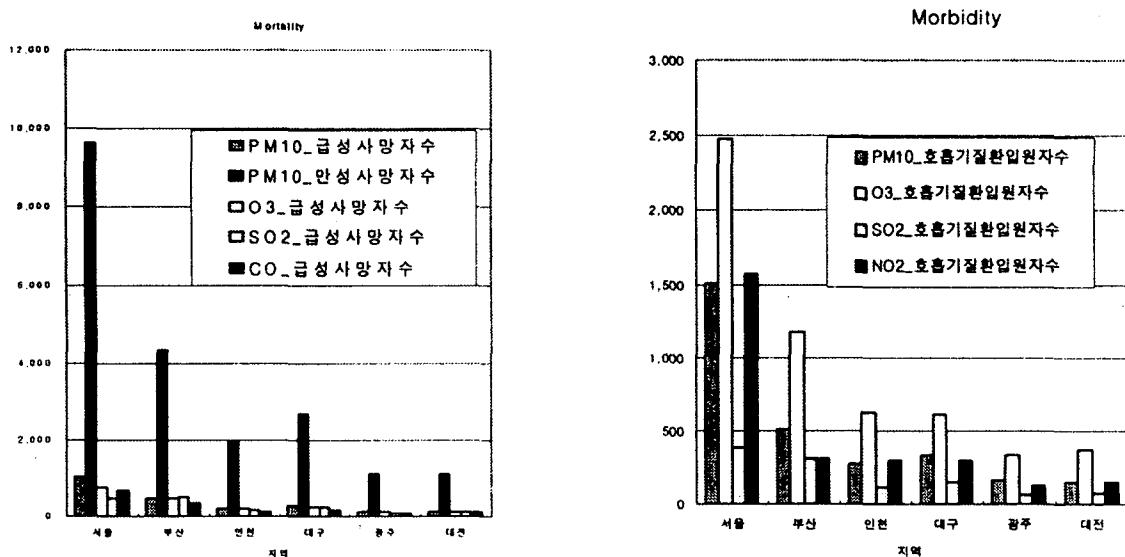


Fig. 1. 6개 대도시의 각 규제오염물질별 년간 사망 또는 유병 위험도

위해도가 다른 오염물질과 비교해 볼 때 두드러진 영향을 나타내고 있다(Fig. 1). 이를 평가 결과는 관리의 기준점을 제공하는 수단이 되는 것이지 정확한 통계는 아니며 불확실성이 따르는 확률적인 추정치임을 인식해야한다.

나. 비규제오염물질

2) 비규제 오염물질의 건강 위해성 평가

가) 휘발성 유기 오염물질

대도시 공기 중에는 암을 일으킨다고 알려진 휘발성 유기오염물질들(volatile organic compounds : 이하 VOCs)이 존재한다고 밝혀졌으며, 이러한 물질들은 호흡을 통해 인체내로 들어오게 된다. 이미 선진국에서는 VOCs나 PAHs와 같은 미량 대기오염물질에 대해 ATEOS(Airborn Toxic Element and Organic Substance)프로젝트와 같은 장기간의 대규모 연구를 통해 환경 중 농도분포를 규명하여 인체 유해영향 예측의 기초자료를 모으고 있으며, TEAM(Total Exposure Assessment Methodology)연구 및 THEES(Total Human Environmental Exposure Study)연구 등을 통해 종합적인 인체노출평가 및 위험성 평가를 시도하고 있다.

대기중의 분포하고 있는 VOCs는 주로 자동차, 산업공장, 석유관련 산업공장에 의해서 발생된 것이며 이들은 전체 대기 VOCs 오염의 약 20~25%를 기여하고 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 가솔린과 자동차 배출원은 도시 대기오염의 주범이 되고 있으며,

미국의 경우 대기 중 benzene 농도의 약 80% 가량이 자동차 배기ガ스나 가솔린 등에 의한 것으로 보고된 바 있다. 이외에도 실내건축물의 자재, 담배연기, 유기용매, 페인트등에서도 다량의 VOCs가 배출되며 실제로 사람은 일상 생활을 통해 밀접하게 VOCs에 노출되고 있다. 특히, VOCs는 공기를 매체로 널리 분포되어 있기 때문에 대부분 호흡을 통해 인체로 유입되어 건강 장해를 야기한다.

대기중의 VOCs는 만성 노출시에는 인체내 기관에 축적되어 폐부종, 신장독성, 혈액암 등의 유해한 영향을 끼치게 된다. VOCs 중 가장 대표적인 독성 물질인 benzene은 국제 암협회(International Agency for Research on Cancer, IARC), 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)등에서 이미 인체에 알려진 발암물질(human carcinogen, weight of evidence "A")로 확인되어 관리되고 있으며 그 외 물질들에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서 실행한 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리에 관한 연구에서 6대 대도시의 대기중의 VOCs 총 19개의 물질들을 측정하였으며, 그 중 발암성물질은 1,2-dichloroethane, 1,4-dichlorobenzene, carbon tetrachloride, chloroform, dichloromethane, ethylene dibromide, tetrachloroethylene, trichloroethylene과 benzene이었고, 비발암성 물질은 chlorobenzene, 1,2-dichloroethylen, 1,2-dichlorobenzene, ethylbenzene,

toluene, 1,1,1-trichloroethane, m,p-xylene, o-xylene과 styrene이었다.

도시별로 발암성 VOCs의 총 초과 발암위해도의 분포를 보면, 서울, 대전, 부산지역이 10~4대의 위해도 분포를 보이고 있으며, 인천, 대구, 광주지역은 평균값이 10~5대의 분포를 보여주고 있다. 암발생위해도에 주로 기여하는 물질은 1,2-dichloroethane, tetrachloroethylene과 benzene이었다.

비발암 VOCs의 경우도 전체적으로 석유연소계 VOCs로 분류된 toluene과 xylene이 95% 이상의 높은 기여율을 보이고 있으며, 6개 대도시 전 지역에서 비발암성 VOCs에 대한 위험값은 50~95 percentile 값의 범위에서 '1' 이하로 나타나 유해 영향이 일어날 가능성성이 없음을 시사해주고 있다.

이상의 연구결과를 종합해보면, 일부 도시지역에서 VOCs의 한 인체 발암위해도가 허용수준을 초과하고 있어, 이들 지역에서 VOCs에 대한 주기적인 모니터링과 관리대안을 찾는 노력을 해야할 것이다. 반면 비발암성 VOCs의 위해도 수준은 허용 가능한 것으로 판단된다.

나) 중금속

도시 대기 중의 10 μm 이하의 미세 분진들은 자동차, 트럭, 버스와 같은 교통관련 이동 오염원과 화학적 공정 등과 같은 고정 오염원에 의해 주로 인위적으로 방출된다. 이러한 미세 입자들은 호흡기관을 통해 기관지나 폐의 허파꽈리까지 침투하여 인체에 유해한 영향을 미친다. 또한 분진 입자의 크기가 작을 수록 상대적인 표면적이 증가하여 각종 이온류와 중금속 등 무기물질들의 흡착이 용이하여 인체에 미치는 유해 영향을 가중시키는 것으로 보고되고 있다.

발암성에 대한 충분한 증거가 존재하는 금속으로는 비소, 베릴륨, 카드뮴, 6가 크롬, 니켈 화합물등이다. 중금속 중 유의한 장기독성을 유발시키는 금속으로는 카드뮴, 납과 수은을 들 수 있다. 카드뮴의 경우는 만성 폐질환, 신장독성, 이따이 이따이병으로 유명한 근골격계질환을 유발시킬 수 있으며, 납의 경우는 어린 이에게 신경정신학적 영향과 발달 장애를, 그리고 성인에 있어서는 말초신경질환, 조혈과정의 방해로 인한 빈혈, 신장질환의 원인이 될 수 있다. 수은의 경우는 신경계 질환을 유발시킬 수 있다.

대기오염물질의 위해성 평가 및 관리에 관한 연구에서 중금속에 대한 부분을 요약하면, 각 도시별 발암성 중금속(크롬, 카드뮴, 비소)의 총 초과발암위해도 분포를 보면 서울, 인천, 대전, 부산지역이 10~5

대의 위해도를 보였고, 대구와 광주지역은 10~6대의 위해도를 보였다. 그러나 일부 중요한 발암성 중금속(비소, 베릴륨, 니켈등)이 노출정보가 없어 위해도 추정에서 제외되어 다소 과소평가 되었으므로 전반적인 조사를 통해 재평가가 이루어져야 할 것이다.

다) 다환 방향족 탄화수소류

도시의 대기분진에는 유기물질의 불완전 연소에서 생성되는 다환방향족 탄화수소류(Polycyclic aromatic hydrocarbons; 이하 PAHs)가 미량 분포하고 있으며, 이러한 PAHs는 인체에 암을 유발하는 것으로 알려져 관심의 대상이 되어 왔다. 대기분진 중의 PAHs는 주로 화석연료의 연소와 차량에 의한 디이젤 가솔린의 연소 또는 소각, 난방연료로부터 생성되어 배출된다. 도시지역의 경우 PAHs는 주로 차량 연료의 연소에 의해 발생되어 분포하게 된다.

PAHs는 대기 중에서 변화되거나 퇴색되지 않고 상당히 먼 거리까지 이동하며, 상대적으로 증기압이 높은 물질은 대개 90% 이상이 가스상 물질로 존재 하나 증기압이 낮은 물질은 분진등에 흡착되어 호흡을 통해 폐기관지 깊숙히 침투된다. 특히 2.0 μm 이하의 입자에 흡착되어 장시간 폐포에 잔류되며, 입자에서 분리되어 호흡기계 조직과 반응하여 인체에 해를 끼치게 되기 때문에 그동안 분진과 같은 입자상 물질에서의 연구가 많이 진행되어왔다.

인체내에서의 PAHs는 일부 물질의 특정구조로 인해 생성되는 중간물질인 diol epoxide의 이성질체가 PAHs 독성의 원인물질로 알려지고 있으며, 특히 benzo(a)pyrene 대사물질인 7, 8-diol-9, 10-epoxide는 PAHs 대사물질 중 가장 독성이 강한 것으로 보고되고 있다.

이러한 PAHs는 수백가지의 화합물이 혼합되어 존재하는 대표적인 복합물질로써 현재까지 PAHs 개개 물질에 대해 인체의 발암위해도를 평가할 수 있는 방법은 없다. 다만, PAHs 가운데 지금껏 가장 많은 연구가 되어 온 benzo(a)pyrene을 지표로 하여 발암위해도를 평가해 볼 수 있으며, 독성 상대계수(toxic equivalency factor, TEF)를 이용하여 PAHs 복합물질의 특성을 보다 더 고려해 볼 수 있는 정도이다. TEF 접근법은 측정된 PAHs의 농도에 각각 benzo(a)pyrene을 기준으로 하는 독성상대계수를 적용한 뒤 benzo(a)pyrene 농도에 해당하는 benzo(a)pyrene equivalents (TEQs)를 구하는 각각의 TEF을 모두 합하는 방법으로 복합물질의 위해도를 평가방법의 일종이다.

복합체의 각 성분들의 독성학적 종말점이 유사하고 여러 물질들 간의 독성학적 영향이 상가적 (additive)으로 작용한다는 가정 하에 사용되며 기준 물질에 대한 상대잠재력(relative potency)은 각 화학물에 할당된 TEF로 표현된다. TEF의 개념은 처음에 polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs)와 dibenzofu(PCDFs)과 같은 복합물질의 독성을 평가하기 위한 중간적(interim) 측정수단으로 개발되었으나, 현재 미국 환경보호청에서 PAHs PCB 등의 복합물질을 평가하는 방법론으로 추천하고 있다(US EPA, 1993).

본 연구소에서 일부 지역의 교통지역에서 1986년에서 1994까지 측정한 PAHs의 농도를 이용하여 위해성 평가를 실시한 결과, TEFs의 합은 8.74였고, benzo(a)pyrene의 단위 위해도를 적용하여 초과발암위해도를 산정한 결과, 1.5×10^{-5} 으로 추계되었다. 그러나 TEF 접근법에 의한 발암위해는 다른 발암성 성분이 더 존재할 경우 과소 평가될 수 있다는 단점이 있어 PAHs의 조성이 단순한 경우에 유용하며, 개개 PAHs 성분의 인체 발암성에 대한 직접적인 증거가 없다는 한계를 갖고 있다.

라) 다이옥신

90년대 초반이후 다양한 종류로 이루어져 있는 다양한 생활 폐기물의 효과적인 처리방법으로 소각처리가 중요시되고 있어, 소각과정에서 발생될 수 있는 인체에 유해한 오염물질에 대한 관심이 증대되기 시작하였다.

소각처리시 배출되는 주요 대기오염물질은 일반적으로 입자상 물질과 가스상 물질로 분류되며, 오염물질의 종류 및 양은 소각하는 폐기물의 성상이나 폐기물 소각로의 형태, 운전 조건 등에 따라 달라질 수 있다. 소각처리시 발생되는 입자상 오염물질로는 배기 가스에 포함된 미세먼지이며, 이 미세먼지에 흡착될 수 있는 비소, 납, 니켈, 수은 등의 중금속류와 다이옥신, PCBs(폴리클로로비페닐) 및 PAHs(다환방향족 탄화수소류) 등의 독성유기물을 들 수 있다. 가스상 물질로는 염화가스 및 황산화물 등의 산성 가스, 일산화질소 및 이산화질소 등의 질소산화물, 일산화탄소와 같은 불완전 연소산화물, 가스상 다이옥신과 같은 독성 유기물, 그리고, 벤젠, 트리클로로에탄 등의 휘발성 유기오염물질이 있다. 특히, 소각장에서 배출되는 오염물질 중 다이옥신(polychlorinated dibenzo-p-dioxin)은 인체에 발암 및 호르몬 이상을 초래할 수 있다는 연구가 발표되면서 도시 소각장으

로 인한 다이옥신에 관심이 집중되고 있다.

미국 환경보호청과 국제 암연구협회에서는 다이옥신을 인체발암물질(human carcinogen)으로 분류하고 있다. 특히, 다이옥신의 화학적 안정성에 기인하여 환경 중에서 안정적으로 먹이사슬을 통하여 인체내에 계속하여 축적될 가능성이 높기 때문에 이 물질에 대한 감시와 관리는 더욱 중요하다고 할 수 있다. 이미 미국이나 유럽의 일부 국가들에서는 1980년대부터 다이옥신류 화합물의 인체 축적성 및 부하량을 평가하기 위해 인체 시료(혈액, 지방조직 및 모유)에서의 농도를 평가하기 시작하였다.

우리나라의 경우, 본 연구소에서 수행한 연구결과를 살펴보면, 1997년 서울과 인천지역의 24명의 산모들(서울=11명, 인천=13명, 평균 연령: 30세(24세~43세), 비흡연자)을 대상으로 한 연구결과, 초산모에서의 모유 중 다이옥신 농도는 서울이 24.06 TEQ pg/g fat, 인천은 11.19 TEQ pg/g fat이며, 인천의 경산모에서는 8.60 TEQ pg/g fat으로 보고되었다. 서울 및 인천지역 초산모의 모유 중 PCDDs/PCDFs 농도는 평균 20.48TEQ pg/g fat으로 측정되어, 다이옥신류 화합물 오염이 우려되고 있는 일본보다는 낮은 수준이었지만, 캐나다, 독일, 및 미국 등의 선진국들보다는 높은 농도로 평가되었다.

우리나라 성인의 혈중 다이옥신 농도를 평가하기 위해, 본 연구소에서는 일반 및 산업 폐기물 소각시설이 위치한 공단지역의 폐기물 소각시설 근로자 및 인근 지역 거주 주민을 대상으로 혈중 다이옥신 농도를 평가하였다. 연구 대상 근로자의 혈중 다이옥신 오염도는 흡연자가 평균 50.12 pg-TEQ/g lipid(15.58~74.60 pg-TEQ/g lipid)이고, 비흡연자가 평균 33.70 pg-TEQ/g lipid(15.04~65.18 pg-TEQ/g lipid)로 평가되었다. 이에 비해 인근 주민들의 경우에는 흡연자(1명)가 22.16 pg-TEQ/g lipid이고, 비흡연자가 평균 16.01 pg-TEQ/g lipid(7.91~33.90 pg-TEQ/g lipid)로 평가되었다.

이와 같은 연구 대상자들의 혈중 다이옥신 농도는 다이옥신 오염이 우려가 되고 있는 일본의 일반 여성(16 pg-TEQ/g lipid)과 거의 동일한 농도 수준이었으며, 캐나다(14 pg-TEQ/g lipid), 스웨덴(12 pg-TEQ/g lipid), 중국(6 pg-TEQ/g lipid)의 경우에 비해서는 다소 높은 수준이었다. 미국 일반인들(30 pg-TEQ/g lipid)에 비해서는 본 연구대상자들 중 비흡연 주민들의 혈중 농도가 약 1/2배 수준인 것으로 평가되었다.

혈중 다이옥신 농도를 바탕으로 연구 자원자들의 일일평균 섭취량을 추정해 본 결과, 비흡연자들은 근로자가 평균 1.8(1.7~3.0) pg-TEQ/kg/day, 주민들은 평균 1.3(0.6~2.6) pg-TEQ/kg/day로 나타난 반면, 흡연근로자들은 평균 2.2(0.5~3.1) pg-TEQ/kg/day로 산출되었다. 연구 대상자들의 일일평균섭취량은 일본과 세계보건기구에서 제안하고 있는 다이옥신의 일일섭취 허용량인 4pg/kg/day을 초과하는 것은 없었지만, 본 연구 자원자들의 65%가 미국 환경보호청에서 제안하고 있는 일일섭취 허용량 1pg/kg/day를 초과하는 것으로 평가되었다. 여기서, 일생 동안의 다이옥신 폭으로 인해 백만명 당 1명(1×10^6)의 초과발암위해도를 일으킬 수 있는 농도를 0.01 pgTEQ/kg 체중/day이나, 현재 미국에서는 과거 환경중에 노출된 다이옥신으로 인해 이미 우리 생활과 관련된 모든 곳에서 발생하여 분포하고 있고, 우리가 원하든 원하지 않든 간에 노출될 수밖에 없는 상황에 있는 것임을 고려하여 인체 허용 기준을 1 pgTEQ/kg 체중/day로 제안하였다.

3. 결 론

규제오염물질에 대한 위해성 평가는 처음으로 시도되었고, 우리나라에서도 일부 역학연구가 진행되었으나 그 수치를 이용하기에는 아직 검증단계가 더 필요할 것으로 판단되어 선진국에서 진행한 역학적 연구 결과를 이용하였다. 따라서 추정된 위해도 수치는 불확실성이 많이 내포되어 있다. 또한 휘발성 유기오염물질, 다환방향족 탄화수소류, 중금속 그리고 다이옥신과 같은 비규제오염물질의 위해성도 동물자료를 이용하여 인체 위해도를 추정하고, 복합물질에 대한 위해도를 추정하는 과정에 있어 불확실성이 수반되는 것은 사실이다. 이들 불확실성을 줄이기 위해서는 계속적인 연구를 통해 연구결과들을 신중히 다듬는 작업이 필요하다. 그러나 우선적으로 중요한 오염원이나 오염물질을 규명하고, 오염물질 배출을 줄이기 위한 전략(strategies)에 대한 효과를 분석하거나 관리목표를 설정하고 정책결정을 위한 도구로서는 이들 결과물이 합리적이고 타당하다고 생각할 수 있다.

참 고 문 현

1. 신동천등. 교통혼잡지역의 대기 부유분진중 유기혼합물에 의한 발암위해성 평가 한국대기보전 학회지 1996;12(5):567-576
2. 환경부. 환경백서. 1999
3. 연세대 환경공해연구소. 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술. 환경부 1999
4. 신동천. 다이옥신의 인체 유해영향에 대한 고찰 대한의사협회지 1999;42(10):968-976
5. 신동천. 다이옥신에 의한 인체유해영향, 폐기물 현황과 용융열분해 자원화 신기술 세미나 연제집 2000
6. Dockery DW, Pope CA III, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG Jr, Speizer FE. An association between air pollution and mortality in six US cities. *New Engl J Med.* 1993
7. Dongchun Shin, Jiyeon Yang, Soungyun Park, and Yoonseok Jang PCDDs, PCDFs, and PCBs concentrations in breast milk from two areas in Korea: Body burden of mothers and implications for infant feeding. *Organohalogen Compounds* 1999;44:259-263
8. Extern E. - Externalities of Energy. A research Project of the European Commission IPTS. JRC, European Commission. 1996~2001
9. Health Effects Institute. Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality (A Special Report of the Institute's Particle Epidemiology Reanalysis Project). Health Effects Institute, Cambridge MA. 2000
10. Jongtae Lee, Dongchun Shin, Yong Chung: Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea, *Environmental Health Perspectives*, 1999
11. Levy JI, Hammitt JK, Spengler JD. 2000. Estimating the mortality impacts of particulate matter: What can be learned from between-study variability? *Environ Health Perspect* 2000;108(2):109-117
12. Pope CA III, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, Heath CW. 1995. Particulate air pollu-

- tion as a predictor of mortality in a Prospective study of US adults. Am J Respir Crit Care Med 1995;151:669-674.
13. WHO (World Health Organization). Air Pollution including WHO's 1999 Guidelines for Air Pollution Control. Geneva, Switzerland, 2000