

우리나라 유해대기오염물질의 관리현황과 개선방향  
- 환경대기 모니터링 문제를 중심으로 -

Current Status and Future Directions of Management of  
Hazardous Air Pollutants in Korea  
- Focusing on Ambient Air Monitoring Issues -

백 성 옥\* · 전 찬 곤  
영남대학교 환경공학과

(2013년 9월 23일 접수, 2013년 9월 29일 수정, 2013년 9월 29일 채택)

Sung-Ok Baek\* and Chan-Gon Jeon

*Department of Environmental Engineering, Yeungnam University*

(Received 23 September 2013, revised 29 September 2013, accepted 29 September 2013)

**Abstract**

Recently, hazardous air pollutants (HAPs) have been of great concern in Korea, largely due to public awareness on the importance of their impacts on environmental health. A group of HAPs includes a large number of various chemicals such as VOCs, PAHs, PCBs, dioxines, furans, organochlorinated pesticides, and some heavy metals. These groups of pollutants are generally known to have genetic toxicity and to be persistent in the environment. In addition, most of chemicals belong to the category of HAPs are widely distributed not only in air, but also in water and soil environments, and has therefore undergone considerable scrutiny for the last three decades. In this article, environmental implications and management of HAPs in Korea will be reviewed, with a particular emphasis on the monitoring of HAPs in the ambient air. A number of field studies will be introduced, which were recently conducted in large urban and industrial areas. Based on the filed studies, eight pollutants have been suggested to be intensively managed as higher priority pollutants, which are benzene, 1,3-butadiene, formaldehyde, acrolein, trichloroethylene, benzo(a)pyrene, hexa-valent Cr, and PM<sub>2.5</sub>. Finally, future directions for a mega scale project for comprehensive monitoring of ambient atmosphere in large urban areas will be suggested. Such an innovative project is believed to provide more realistic information on the nature of the population exposure, which can not be simply identified by emission inventories or source investigations. Therefore, any strategy for the management of HAPs should be developed by not only emission-based approaches, but also observation-based approaches.

**Key words** : HAPs, VOCs, PAHs, Heavy metals, Ambient air monitoring

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-810-2544, E-mail : sobaek@yu.ac.kr

## 1. 서 론

최근의 미국과 일본, 유럽 등 선진국에서의 국가 및 지자체 환경관리 패러다임은 국민들의 ‘삶의 질’ 향상에 대한 욕구를 충족하기 위하여 종래의 매체별 물질농도 관리에서 나아가 보건학적 총괄 위해성 저감 차원으로 변하고 있는 추세이다. 이는 실질적으로 국민의 환경보건학적 위해성을 저감하는 통합매체 환경관리 체제로 변하고 있다는 것을 의미한다.

대부분의 유해화학물질은 일단 공기라는 매체를 통하여 수환경이나 토양환경으로 이송된다. 즉, 대기 환경은 유해물질이 환경으로 유입되는 일차관문일 뿐만 아니라 공기를 통한 호흡이 인체의 노출경로에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있어 상대적으로 다른 매체보다 중요하게 취급되어야 한다. 대기로 배출되어지는 유해물질, 즉 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, 이하 HAPs)은 토양이나 물 등 다른 매체로 침적·이송되기 전에 호흡을 통하여 인체에 가장 먼저 직접적으로 피해를 줄 수 있으므로 다른 매체의 유해물질보다 훨씬 치명적인 영향을 미친다고 알려져 있다(Patrick, 1994).

대기 중 독성이 강한 물질들 중 특히 환경적 관심사가 높은 물질로서는 휘발성 유기화합물(VOCs), 다환방향족탄화수소류(PAHs), 폴리클로라이네티드바이페닐류(PCBs), 다이옥신과 퓨란류, 그리고 유기염소계 농약류 등을 들 수 있다. 이외에도 니켈, 카드뮴, 납과 같이 발암성 혹은 생체농축성이 높은 중금속도 일부 포함된다(Kim, 2003). 이들 중 VOCs, PAHs와 유기염소계 화합물 그룹에는 강한 발암성 혹은 돌연변이원성을 가진 화합물들이 많이 포함되어 있을 뿐 아니라, 일반대중이 노출되는 주변 대기환경 어디에나 널리 분포되어 있을 가능성이 높으므로 다른 물질들에 비해 더 많은 연구와 관심의 대상이 되어 왔다(Calabrese and Kenyon, 1991).

국내의 수도권 및 광역대도시 인근에 산재된 공단에서 배출된 각종 HAPs는 대기 중으로 확산되어 공단 주변의 주거지역으로 유입될 우려가 있으나 아직까지 이에 대한 구체적인 현황 파악 및 대책이 마련되고 있지 않다. 2012년 9월 27일 발생한 구미산업단지의 불화수소유출 사건이 전형적인 사례로서 결과적으로 인명손실과 상상을 초월할 정도의 막대한

규모의 피해를 유발한 바 있다. 불화수소는 분명 불소화합물의 하나로서 환경보전법 제정 당시부터 우리나라 특정대기유해물질 목록에 포함된 항목이었으나 환경대기를 대상으로는 30여 년간 측정된 사례가 없었다.

따라서 산업단지뿐만 아니라 대규모 노출집단이 있는 대도시를 대상으로 유해대기오염물질 배출현황을 파악하고 이들 지역에서 배출되는 HAPs의 환경대기 중 농도를 측정으로써, 지역 주민의 건강을 보호하기 위한 근본적인 대책 수립은 국가안전관리차원에서도 가장 필수적이고 기본적인 과업이라고 할 수 있다. 이러한 측면에서 본 논문에서는 우리나라의 HAPs 관리 실태를 전반적으로 검토하고, 최근에 수행된 국가산업단지의 HAPs 모니터링 결과를 바탕으로 주요 핵심물질 선정의 배경 및 활용방안과 함께 향후 환경복지국가 실현을 위한 유해대기오염물질의 관리 방안에 대하여 그 방향을 제시하고자 한다.

## 2. HAPs의 환경학적 특성과 관리 체계

### 2.1 HAPs의 정의와 범주

‘유해대기오염물질(HAPs)’에 대한 정의와 대상물질은 나라마다 다르게 규정하고 있어 아직 명확한 개념이 정립된 상태는 아니다. 일본 대기오염방지법에서는 HAPs를 ‘저 농도에서도 장기적인 섭취에 의해 건강에 영향을 미칠 우려가 있는 물질’로 규정하고 있으며(Japan MOE, 1997), OECD는 ‘인간 건강과 식물 또는 동물에 위해를 주는 특성(독성 또는 잔류성 등)을 가진 대기 중의 미량의 가스상, 에어로졸, 또는 입자상 오염물질’로 규정하고 있다(WHO, 2000). 미국은 90년대 이전까지는 Toxic Air Pollutants (TAPs)와 HAPs의 용어를 혼용하였으나 1990년 개정된 Clean Air Act의 112조에서 규정된 191종(현재 187종으로 조정)의 구체적인 물질에 대하여 특별히 HAPs라는 용어를 법률적 의미로 적용하고, TAPs는 대기 중 독성물질 전반을 칭하는 보다 광범위한 개념으로 사용하고 있다(Patrick, 1994). 우리나라는 표 1에 나타난 바와 같이 대기오염물질 중 사람의 건강과 재산이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 우려가 있는 대기오염물질로서 특정대기유해물질 35종 및 환경부에서 내부적으로 선정한 우선관리

**Table 1. List of 48 priority air pollutants and hazardous air pollutants in Korea.**

No	Compound	Priority pollutant	HAPs	No	Compound	Priority pollutant	HAPs
1	Dioxins	✓	✓	25	Acrylonitrile	✓	✓
2	PAH	✓	✓	26	Acrolein	✓	-
3	Benzene	✓	✓	27	Aniline	✓	✓
4	Ethylene oxide	✓	✓	28	Di(2-ethylhexyl)phthalate	✓	-
5	1,3-Butadiene	✓	✓	29	Epichlorohydrin	✓	-
6	Vinyl chloride	✓	✓	30	Vinyl acetate	✓	-
7	Dichloromethane	✓	✓	31	Nitrobenzene	✓	-
8	Styrene	✓	✓	32	Dibutyl phthalate	✓	-
9	Tetrachloroethylene	✓	✓	33	Phenol	✓	✓
10	Propylene oxide	✓	✓	34	Cobalt & compounds	✓	-
11	Chloroform	✓	✓	35	Phosgene	✓	-
12	1,2-Dichloroethane	✓	✓	36	Asbestos	✓	✓
13	Ethylbenzene	✓	✓	37	Chlorine	✓	✓
14	Trichloroethylene	✓	✓	38	Diesel & gasoline exhaust	✓	-
15	Carbon tetrachloride	✓	✓	39	2-Ethoxyethylacetate	✓	-
16	Beryllium & compounds	✓	✓	40	Carbon disulfide	✓	-
17	Cadmium & compounds	✓	✓	41	2-Ethoxyethanol	✓	-
18	Chrome [VI] & compounds	✓	✓	42	Hydrazine	✓	✓
19	Arsenic & compounds	✓	✓	43	N,N-Dimethylformamide	✓	-
20	Lead & compounds	✓	✓	44	Acrylamide	✓	-
21	Nickel & compounds	✓	✓	45	Dimethyl sulfate	✓	-
22	Mercury & compounds	✓	✓	46	2-Methoxyethanol	✓	-
23	Formaldehyde	✓	✓	47	Methylene diphenyl diisocyanate	✓	-
24	Acetaldehyde	✓	✓	48	Toluene diisocyanate	✓	-

물질 48종 등을 포함하는 총 53종의 물질에 대해서 유해대기오염물질로 범위를 확대·지정하고 있다 (Korea MOE, 2009).

HAPs의 경우 일반적으로 ‘대기오염물질’의 의미에 이미 인체나 생태계에 나쁜 영향을 줄 수 있는 물질이라는 개념이 내재되어 있는데도 불구하고, ‘유해성’이라는 수식어를 사용하여 일반 대기오염물질과 구분하는 데는 나름대로 몇 가지 이유가 있다. 첫째, HAPs는 대기환경에서 낮은 농도에서도 장기간 노출될 경우 심각한 건강피해를 유발할 수 있는 물질, 즉 대부분 비역치 오염물질 (non-threshold pollutants)이 많이 포함된다. 둘째, HAPs는 유전독성을 가진 오염물질로 인간에게 암, 기형, 신경장애, 돌연변이 등을 유발할 수 있다. 마지막으로 대부분의 HAPs는 환경잔류성 (persistence), 생체농축성 (bio-accumulation)과 독성 (toxicity)을 가지는 물질들이 많다 (USEPA, 1999).

이와 같은 HAPs의 범주에 속하는 물질들은 대기환경뿐만 아니라 수환경, 토양환경 등 환경전반에 널

리 분포되어 있는 물질이 많으며, 어느 한 매체에서의 소멸은 다른 매체로의 이송을 뜻하게 되어 궁극적으로 환경계 내에서 출현 가능성이 높은 물질이다 (Kim, 2003). 이러한 물질들은 산업화된 나라에서는 언제 어디서든 검출될 가능성이 높은 물질들이므로 HAPs로 취급될 대상물질을 엄격히 제한적으로 규정할 수도 없으며, 그렇게 할 필요도 없다고 사료된다. 그러나 단기적인 저감 효율성을 높이기 위하여 우선 관리대상물질을 선정하여 집중 관리한다는 측면에서 제한적인 목록을 만들 수는 있으며, 일반 기준성 대기오염물질과는 달리 그 관리와 관측에 각별한 주의와 노력이 필요하다고 판단된다.

### 2.2 위해성 저감을 위한 HAPs 관리체계

우리나라는 1990년대까지는 주로 점, 면, 선오염원 등에 대한 배출농도 규제방식에 집중된 배출원 관리에 치중을 하였다. 이후 대기환경기준이 정비되면서 환경기준 달성 여부에 초점을 맞추는 체계로 발전하

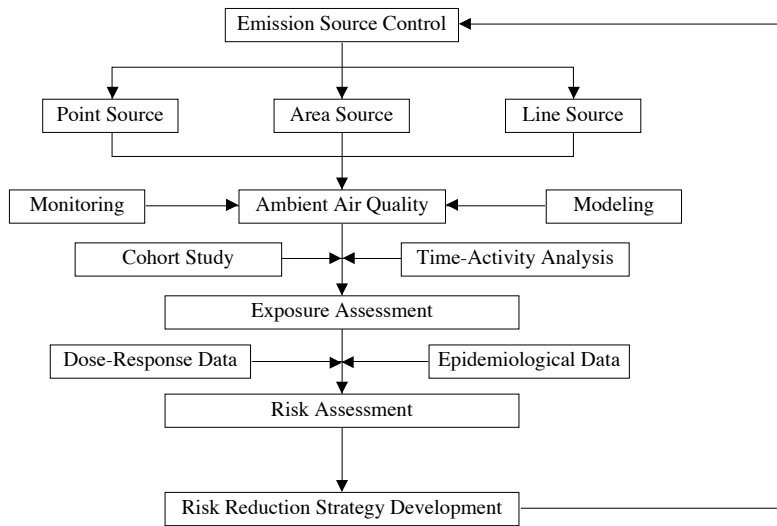


Fig. 1. Schematic diagram of risk-based air quality management system.

여 현재에 이르고 있다. 그러나 궁극적으로 대도시(나아가 전국적인) HAPs 관리의 최종 목표는 종전의 물질중심의 농도 저감차원이 아닌 시민의 환경보건학적 위해성 저감 차원으로 패러다임이 바뀌어야 한다(그림 1). 그러나 위해성 평가는 매우 어렵고 까다로운 작업이다. 위해성 평가의 가장 핵심적인 요소는 호흡을 통한 노출량 평가를 위한 대기 중 농도 경향에 대한 정보이다. 즉, 신뢰성 있는 측정 자료 없이는 어떠한 위해성 평가도 그 결과의 정확성을 확신할 수 없다.

노출 평가, 용량-반응 평가 등을 위하여 기본적으로 필요한 여러 사항들은 논외로 둔다 하더라도 대도시 HAPs를 대상으로 하여야 하기 때문에 고려하여야 할 특별한 사항들도 적지 않다. 현실적으로 어려움을 가중시키는 가장 중요한 문제는 다양한 집단이 다양한 HAPs에 다양한 방식으로 노출된다는 점이다. 더욱이 여러 물질이 가중되고 노출 양상이 복합적으로 나타날 때 HAPs에 대한 복합적인 누적위해도(cumulative risk)을 어떠한 방식으로 추정하고 저감해 갈 것인가에 대한 과학적 방법이 모색되어야 한다. 이러한 방법은 단시간에 간단한 방법으로 해결될 문제는 아니므로 장기간에 걸쳐 시행-반복-수정-보완 등의 절차를 밟으면서 중·장기적 관점에서 접근해야만 할 것이다.

### 3. HAPs 모니터링에 관련된 문제와 개선방안

#### 3.1 HAPs 모니터링의 국내 현황

HAPs의 위해성 평가를 위한 선결조건은 무엇보다 신뢰성 있는 노출량 자료가 마련되어야 한다. 또한 모니터링을 통한 신뢰성 있는 자료 수집을 위해서는 먼저 측정에 대한 보편화된 방법론이 확립되어 있어야 한다. 그러나 아직 HAPs의 범주에 포함되는 많은 종류의 물질에 대한 측정 방법이 국내뿐만 아니라 국외 선진국의 경우에도 완전히 정립되어 있지는 않은 실정이다. 따라서 HAPs의 측정기술개발 역시 매우 중요한 과제로 인식되고 있다.

우리나라에서는 아직 HAPs에 관한 연구가 선진국에 비하여 매우 미진한 편이며 일부 오염우심지역에서의 현황 파악 단계에 머무르고 있다. 환경관리의 첫 단계가 현황파악이므로 이는 반드시 필요한 단계이다. 과거 연구사례로는 1990년대 후반 연세대학교 환경공해연구소가 G-7 환경기술개발사업의 일환으로 수행한 “대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술” 연구를 필두로 간헐적으로 여러 연구기관이 참여하여 주요 대도시와 산업단지를 대상으로 중금속, VOCs, PAHs, 다이옥신 등을 측정하고 위해성을 조사한 바 있다. 2000년대 전반에는 차세대환경기술개발사업의

**Table 2. Target compounds measured at nationwide HAPs monitoring stations.**

Group	Target compound
VOC (13 compounds)	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, Styrene, o-Xylene, Chloroform, Methylchloroform, Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, 1,1-Dichloroethane, Carbon tetrachloride, 1,3-Butadiene
PAH (7 compounds)	Benzo(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Dibenzo(a,h)anthracene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene

일환으로 KIST가 주관이 되어 제주도 고산에서 잔류성유기오염물질(POPs)와 중금속을 측정하고 장거리이동을 평가한 바 있다.

환경부에서는 “특정대기유해물질측정망” 사업의 일환으로 1990년대부터 도시와 산업단지에서 매달 정기적으로 중금속을 측정하고 있으며 2000년대부터는 VOCs와 PAHs 등(표 2) 유해대기오염물질에 대하여 자동방식은 2시간 간격 연속, 수동방식은 월 1회 24시간 시료채취를 통해 측정하고 있다. 이외에 환경부 산하 환경관리공단에서는 광화학오염물질 측정망을 운영하여 일부 VOC를 자동연속 측정방법으로 자료를 수집하고 있으므로 VOCs 중 일부 HAPs 관련 자료를 얻을 수 있다. 그러나 광화학오염물질 측정망의 근본적인 설치목적은 오존오염 원인규명을 위한 비메탄계 탄화수소류(대부분은 인체 독성이 없는 물질)의 관측이며 독성이 강한 할로젠화 VOC 등은 누락되어 있으므로 이들 자료를 위해성평가에 바로 대입하여 사용할 수는 없는 한계점과 문제점이 내재되어 있다.

한편, HAPs의 범주에 속하는 다이옥신과 PCBs 등에 대해서는 2007년에 스톡홀름 협약 이행을 위하여 잔류성유기오염물질의 관리에 관한 특별법이 제정되었고, 다이옥신 등 POPs의 배출 조사와 함께 2008년부터 대도시, 산업단지뿐 아니라 배경지역 등 전국 37개 지점에서 연 4회 대기 중 농도를 측정하고 있다(Korea MOE, 2010a, b). POPs와는 별도로 환경부는 특정대기유해물질 저감대책의 일환으로 환경정책중장기계획을 수립하면서 2006년부터 2011년까지 5개년 중장기 로드맵을 작성하고 년차별로 사업을 수행한 바 있다(NIER, 2012). 즉, 대규모 국가산업단지의 특정대기유해물질에 대한 조사사업을 국립환경과학원을 통해 시화·반월지역(NIER, 2006, 2007), 여수·광양지역(NIER, 2009), 울산지역(NIER, 2010), 구미지역(NIER, 2011), 대산(NIER, 2012)지역에서 수행하였으며 최근에는 포항지역(NIER, 2013)을 추

가로 조사한 바 있다. 이들 연구들은 지금까지 국내에서 수행된 HAPs 관련 조사연구로는 가장 종합적이고 방대한 사업으로서 HAPs의 측정 방법 정립 및 위해성 평가와 연계한 관리방안 등을 제시하여 향후 정책 수립에 중요한 정보들을 제공하는 성과를 거둔 바 있다.

이와 같은 대규모 연구조사사업에 대해서는 반드시 사후연구(follow-up studies)를 통하여 수집된 주요 정보와 자료들에 대한 심층적 통계분석을 통한 요인해석이 반드시 수행되어야 하며, 궁극적으로는 자료저장창고(Archives)를 만들어 관련 전문가들이 쉽게 활용할 수 있도록 하여야 한다. 아울러 기존 조사 자료를 이용하여 환경부가 확충하고 있는 국가유해대기물질측정망의 운영계획과 연계하여 향후의 전국적인 HAPs 모니터링 계획의 최적화를 도모할 필요가 있다.

### 3. 2 HAPs 모니터링 계획의 개선방안

유해대기물질 측정은 이들 물질이 대기 중에서 매우 낮은 농도로 존재하거나 그 종류가 다양하여 다른 기준성 오염물질과는 달리 고도의 전문성이 요구되는 경우가 많다. 먼저 측정항목의 선정에서 가장 먼저 고려되어야 하는 것은 위해성(독성)이지만, 실제 대기 중에서의 검출빈도와 검출농도를 고려하여 우선관리 대상물질을 선정하는 것이 현실적이며 비용·효과 측면에서도 유리할 수 있다. 다음으로 측정가능성을 염두에 두어야 하는데, 아직 국내뿐만 아니라 선진외국에서도 수많은 종류의 HAPs 물질의 상시측정이 모두 가능한 것은 아니다. 측정대상물질의 선정은 독성, 출현빈도와 농도, 측정가능성 등을 동시에 고려하여 결정해야 한다.

국가적인 HAPs 모니터링의 개선방안을 모색함에 있어서 당분간은 대기측정망 기본계획에 따른 유해대기물질측정망과 대기중금속측정망은 계속 유지하면서 처음에는 측정항목을 확대하고 그 결과를 분석

하여 검출빈도가 낮고 아주 낮은 농도를 보이는 경우에는 측정대상에서 점차적으로 제외하면서 운영부담을 줄이는 방안을 생각할 수 있다. 장기적으로는 중금속도 HAPs의 범주에 포함되므로 대기중금속측정망은 유해대기물질측정망으로 통합하여 관리하는 것이 바람직할 것으로 본다. 예를 들어 미국은 187종의 HAPs를 목록에 등재하고 있으나 NATTS (National Air Toxic Trend Station Network)의 측정항목은 33종을 권장하고 있다(USEPA, 2006). 이들 결과는 전국의 오염도 추이를 장기적으로 파악하기 위한 목적으로 운영하고 있다. 일본의 경우도 234종의 HAPs를 목록에 등재하고 있으나 실제 대기 중에서는 22종의 물질을 측정하고 있으며 중앙정부와 지방자치단체가 협력하여 측정 가능한 물질부터 우선적으로 자료를 수집하고 있다.

현재 국가 유해대기물질측정망에서는 VOC 13종과 PAH 7종, 광화학오염물질측정망에서 카보닐 화합물 중 폼알데하이드 3종 및 페놀 등 23종을 측정하고 있다. 이미 우선관리 대상물질이 48종이 선정된 상황에서 국가가 관리하는 유해대기물질측정망에서 22종의 물질만 측정대상으로 선정하였는지에 대해서는 그 이유를 알 수 없지만 이 부분은 반드시 개선되어야 할 소지가 많은 부분이다. 첫째, VOC와 PAH, 및 카보닐 그룹 중에는 1회의 시료채취로 동시에 여러 물질을 분석할 수 있는 방법이 이미 정립되어 있다. 시중에 판매되는 표준시료도 VOC의 경우 60여 종, PAH는 미국 NIST의 SRM을 이용할 경우 36종, 카보닐화합물의 경우 15종까지 혼합시료로 공급되고 있는데 이들을 활용하면 많은 종류의 물질들을 동시에 분석하여 보다 많은 자료를 확보할 수 있다. 측정 주기 역시 현행 월 1회로서는 수집되는 자료 집단의 크기가 너무 작아서 통계처리를 하기도 힘든 실정이다. 더욱이 많은 자료가 구비되어야만 가능한 위해성 평가 작업은 거의 불가능한 수준이다. 따라서 이에 소요되는 비용을 고려한 예산을 대폭 증액하여 측정 주기를 보다 짧게 할 필요가 있다. 미국의 경우 매 6일마다 시료를 채취하고 있으며, 일본의 경우 월 1회로 되어 있으나 전국적으로 400여 개가 넘는 지점에서 자료가 수집되므로 모집단의 규모는 훨씬 크다. 이와 같은 점을 고려하여 HAPs 측정망에서 수집되는 측정 항목과 측정 주기에 대하여 개선할 사항을 표 3에 정리하였다.

다른 기준성오염물질과는 달리 특히 HAPs의 경우 주요 배출원(특히 고정 배출원)은 대규모 산업단지일 가능성이 매우 높다. 따라서 노출인구를 고려할 때 대도시 주거지역을 위주로 측정소를 설치하여야 하나 배출실태를 고려하면 대규모 산업단지(특히 국가산업단지를 중심으로)의 중요성을 간과할 수 없다. 작년에 제출된 “국가유해대기오염물질 기본계획 수립 및 배출특성사업 종합평가(일명 KATOP Project)” 최종보고서에 수록된 확충계획안에 따르면 향후 5년 뒤인 2017년까지 전국적으로 29개소를 추가로 설치하여 총 60개소의 유해대기물질측정망을 운영하는 것이 바람직하다고 제안된 바 있다(NIER, 2012). 그러나 특정된 도시의 HAPs 심층조사를 할 경우 이들 고정된 측정소 이외에도 그 지역의 다양성과 대표성을 확보하기 위하여 필요할 경우 임시적인 측정소를 설치 운영할 필요가 있다.

향후의 HAPs 측정망을 확충할 경우 현재의 측정 기술의 발달 수준을 고려할 때 HAPs도 기준성 오염물질과 같이 자동식 방법으로 채택될 가능성이 매우 높아 보인다. 그러나 일정기간은 선택된 주요 측정 지점에 대해서는 자동식 측정소와 수동식 측정소를 같이 운영하여 자료의 신뢰성을 검증할 수 있는 근거 자료를 확보할 필요가 있다고 사료된다. 따라서 향후 측정망 설치에서 자동식과 수동식 측정장비를 모두 갖추어야 할 장소는 현재 환경부가 추진하고 있는 대기오염집중측정소가 최적일 것으로 판단되며, 인력과 비용문제를 고려할 때 원거리 지역이나 신설 측정소에는 자동식 측정 장비를 설치하는 것이 비용·효과 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

국가대기오염측정망과는 별도로 지역적 특성이나 사업장 특성 등이 반영되어 지역의 원인이나 대책, 학술연구 등의 목적으로 자료를 생산할 수 있는 수동 측정망의 운영을 확대하여 기존 측정망 자료와 보완하여 D/B를 구축하는 방안도 생각할 수 있다. 이 경우 고정적인 측정소를 설치할 필요가 없으며, 측정 주체는 정부이지만 대학이나 연구소 등 인정받은 기관에 위탁하는 형식을 취하여 운영하여 업무의 효율성을 높이는 방안을 강구할 수 있다. 보다 현실적인 방안으로는 현재 환경부가 지원하고 있는 지역 녹색환경지원센터의 시설과 인력을 활용하는 방안을 강구할 수 있다. 지역녹색환경지원센터는 이미 전국적으로 18개 지역에서 주요 대학을 거점으로 조직의

**Table 3. Recommendations for advanced protocols of HAPs monitoring in Korea.**

Category	Recommendation
Monitoring station	Stepwise increase of nationwide monitoring stations • 31 (2012) ⇒ 40 (2013) ⇒ 50 stations (2015) ⇒ 60 stations (2017)
Monitoring target compound	• 7 PAHs ⇒ more than 16 PAHs • 13 VOCs ⇒ more than 25 VOCs • 3 carbonyls ⇒ more than 5 carbonyls • Heavy metals ⇒ including heavy metal monitoring stations to HAPs monitoring network • Hexa-valent Cr ⇒ should be monitored by a specific measurement method • some VOCs ⇒ need to be included by liquid standard method • other inorganic HAPs ⇒ depend on local sources and industrial types
Monitoring frequency	• 1/month (2012) ⇒ 2/months (2013) ⇒ 4/month (2015) ⇒ 6/month (2017) • basically 24 hour averaging time, but every 3 hours sampling duration is recommended for VOCs by adsorbent sampling method
QC/QA	• All the samples need to be transported and analyzed at a central analysis center • need to establish SOPs and QC/QA manuals for individual HAPs • need to develop specific standard methods for individual HAPs

운영체계가 확립되어 있는 단계에 있으므로 최소의 비용으로 최대의 효과를 얻을 수 있는 가능성이 매우 높을 것으로 사료된다.

**3.3 HAPs 측정 자료의 신뢰성 확보 문제**

환경관리의 궁극적인 목표는 불특정 다수가 비자의적으로 노출되는 환경매체를 통한 일반대중의 환경보건학적 위해성 저감에 있다. 전술한 바와 같이 위해성 평가의 가장 핵심적인 요소는 일반대중이 노출되는 각종 환경 매체에서의 유해물질의 농도를 파악하여 노출량을 평가하는 과정이다. 그러나 유해대기오염물질에 관한 한 아직까지 측정기술이 완전하게 개발되거나 보편화되어 있지는 못한 실정이다. HAPs 관련 물질의 측정 방법에 내재된 기술적 어려움의 주된 이유는 첫째, 대부분의 유해물질들은 환경에서 아주 낮은 농도로 존재한다는 점이다. 따라서 검출한계가 적절치 못할 경우 실제 환경시료에서의 유해물질의 존재 유·무를 파악하기 어려우며, 결과적으로 고가의 장비와 고감도의 측정기기가 활용되어야 한다는 어려움이 따르게 된다. 둘째, 특히 유기오염물질의 경우 동종체가 많으며, 이성질체에 따라 독성도 서로 다르게 나타나므로 정확한 독성 평가를 위해서는 이성질체를 분리 확인하는 작업이 반드시 필요하다는 점이다. 따라서 분석과정에서 상당한 전문성이 요구되며 분석 기술뿐만 아니라 분석요원의 전문성도 확보되어야 한다는 점이다. 그리고 셋째, 실

제 환경시료 matrix에 함유된 유해물질을 분리 정량하기 위해서는 복잡한 전처리 과정이나 정제작업 (cleaning-up)이 요구된다는 점이다. 분석 방법이 복잡하고 까다로워질수록 시료의 손실이나 인위적 오염 (artifact) 가능성이 커지게 되어 결국 최종적으로 얻어진 농도 값의 불확도 (uncertainty)는 커지게 되어 측정 결과의 신뢰도에 큰 영향을 미치게 된다.

일반적으로 측정 결과의 정도관리는 정확도와 정밀도 등을 평가하는 정도보증 (quality assurance, 이하 QA)과 정도관리 (quality control, 이하 QC) 과정으로 구분되며, 최종적인 정도 평가 (quality assessment)는 QA와 QC 모두를 포함하여야 한다. ISO에서는 불확도가 표기되지 않은 자료는 자료로서 의미가 없다고 할 정도로 국제적으로는 환경 자료의 정도관리가 강조되고 있으며, 이러한 추세를 감안하여 국내에서도 최근에는 환경 측정 분야에서 정도관리의 중요성이 인식되고 있다. 그러나 국내 대부분의 실험실에서는 자체적으로 측정치의 재현성 정도를 평가하는 수준에 그치고 있어 아직도 정도관리에 대한 명확한 개념이 전파되어 있다고 보기는 힘들다. 미국 EPA의 경우 정확도 평가를 위한 기준물질로 인증표준물질 (certified reference materials, 이하 CRM)의 이용을 적극 권장하고 있다. 그러나 미량 유해대기오염물질의 경우 아직 CRM이 없거나 비용문제로 정확도 평가가 현실적으로 어려운 경우가 많다.

측정의 궁극적인 목적은 정확한 자료를 제시함에

있다. 정도관리(혹은 불확도 평가)가 되지 않은 측정 자료는 환경기준치 혹은 다른 연구자의 측정 결과 등과의 비교 호환성을 부여 받기가 힘들게 되어 결국 많은 비용과 시간을 소모하여 얻은 귀한 자료가 정보로서의 의미가 없어지게 된다. 현실적으로 비교적도가 되는 CRM이 마련되지 않는 경우, 혹은 마련되어 있는 경우라 하더라도 실험실간 비교 평가를 통한 측정 자료의 신뢰성 제고는 매우 중요한 관건이라고 할 수 있다. 이와 관련하여 향후 국내의 HAPs 관련 자료 측정에 관한 신뢰성을 높이기 위하여 아래와 같은 주요 과제와 방안을 제시하고자 한다.

- Priority pollutants로서의 HAPs에 대한 극미량 수준의 분석방법론 개발
- 분석방법의 성능평가를 통한 표준공정시험법(SOP) 작성 및 정도관리 지침마련
- HAPs 측정분석에 대한 국내의 자체적인 정보와 기술의 축적 및 전문가 양성
- HAPs의 개인 노출량 평가(personal monitoring)를 위한 방법론 개발
- 각종 배출원에서의 HAPs 제거를 위한 방지시설의 성능평가를 위한 측정방법 개발

이와 같은 분야는 국내의 실정을 감안 할 때 특정 연구실이나 소수의 연구자에 의해 결정될 성격은 아니다. 따라서 측정방법에 대한 연구를 촉진하고, 개발된 방법에 대한 타당성 검토 등을 위하여 전문가 그룹(expert group)을 구성하여 HAPs 측정방법과 정도관리를 개선해 나갈 수 있는 지속적이고 체계적인 조직을 만들 필요가 있다고 사료된다.

### 3.4 국가 산업단지 HAPs 모니터링 사업의 성과와 교훈

2005년부터 7년간 수행된 국가산업단지 HAPs 모니터링 사업의 개요는 표 4에 요약하였다. 이 사업의 주요 성과로서는 5개 주요 국가산업단지에 대한 약 150여 종 유해대기오염물질의 계절별, 지역별 농도 수준을 확보할 수 있었다는 점과 이들 자료를 이용하여 국내에서는 최초로 위해가중농도(risk weighted concentration)를 산출하였으며, 나아가 이를 기반으로 향후 도시지역에서 중점적으로 관리해야 하는 핵심관리대상물질(Key HAPs)을 제안할 수 있었다는 점을 들 수 있다. 또한 각 산업단지별 입주 업종에 대한 배출농도 특성평가를 통한 주요 배출오염물질을 선정할 수 있었으며, 일례로 시화반월의 경우 트리클로로에틸렌 등 5개 물질이 제1차 금속산업, 전자부품, 영상, 음향 및 통신제조업 등에 주로 배출되고 있다는 사실을 알 수 있었다.

그러나 HAPs 모니터링 사업을 통하여 파악된 문제점도 없지는 않았다. 특히 측정사업이 1년 단위로 서로 다른 기간에 걸쳐 이루어짐으로 인해 전체 국가산업단지를 일관성 있게 파악할 수 있는 자료의 ‘동시성’이 결여되어 각 지역의 부분적인 평가 결과만 얻을 수 있었다. 결과적으로 서로 다른 특성을 가진 각종 국가산업단지 인근에 거주하는 지역 주민의 건강 위해성을 추정하는 데는 많은 제한적 요소가 있다. 또한, 예산상의 제한으로 인한 측정지점 수 및 측정일수의 한계로 지역 대표성을 확보하는데 어려움이 있었으며, 이로 인해 주민 건강평가와의 연계성

Table 4. Summary of HAPs monitoring projects for large national industrial complexes in Korea.

Area	Monitoring period	No. of site	Target compound
Sihwa-Banwol	2005/6/24~2006/7/23 (12 days per season, 4 seasons)	5	62 VOCs, 15 Carbonyls, 36 PAHs, 10 heavy metals
	2006/8/30~2007/9/29 (10 days per season, 4 seasons)	5	66 VOCs, 36 PAHs, 10 heavy metals, Cr <sup>+6</sup>
Yeosu-Gwangyang	2008/5/9~2009/6/8 (1 days per season, 4 seasons)	5	66 VOCs, 15 Carbonyls, 6 Phthalates, 36 PAHs, 10 heavy metals, Cr <sup>+6</sup>
Ulsan	2009/3/26~2010/3/25 (8 days per season, 4 seasons)	5	66 VOCs, 15 Carbonyls, 6 Phthalates, 36 PAHs, 10 heavy metals, Cr <sup>+6</sup>
Gumi	2010/4/26~2011/4/25 (7 days per season, 4 seasons)	5	66 VOCs, 15 Carbonyls, 6 Phthalates 36 PAHs, 10 heavy metals, Cr <sup>+6</sup>
Daesan	2011/4/25~2012/4/24 (7 days per season, 4 seasons)	3	66 VOCs, 15 Carbonyls, 6 Phthalates, 36 PAHs, 10 heavy metals Cr <sup>+6</sup>



을 파악하는데 부족함이 있었다.

한편, 산업단지에서는 측정 자료와 건강 위해성과의 연계 해석을 위하여 현재 국립환경과학원에서 진행 중인 ‘국가산단지역 주민건강영향 조사사업’과의 유기적 협조체제를 구축할 필요가 있다. 이를 위해서는 대기환경관리 분야와 환경보건관리 분야의 범부처적인 논의를 통하여 조사대상 산업단지의 공간적, 시간적 범위의 일치 및 모니터링의 주기성을 확보하는 방안이 강구되어야 투자 효과를 극대화 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 대도시나 산업단지를 구분할 필요 없이 어느 지역을 조사하더라도 조사평가 사업은 최소한 매 3년(혹은 최대한 매 5년)마다 정기적으로 반복하여야만 한다. 즉, 정기적인 현장 조사 자료를 토대로 향후 도입될 HAPs 시설에 대한 관리기준 시행 전·후의 오염원 규명 및 대기환경농도 수준을 파악하여 정책시행의 효과를 분석할 수 있는 시스템이 구축되어야 할 것으로 사료된다.

따라서 향후의 개선방안으로는 대도시 지역은 최대한 많은 지점에서 다양성을 고려한 동시성과 대표성을 추구하여야만 하며, 이를 위해서는 종전의 예산과 투입 인력 규모를 월등히 넘어서는 획기적인 기획안이 마련되어야 한다. 국가산업단지 조사의 경우 조사대상지역의 면적이 비교적 적고, 배출원의 상황도 비교적 균질적이었으나 대도시지역으로 갈 경우 현장조사 상황은 완전히 달라질 수 있다. 따라서 획기적인 ‘발상의 전환’을 통한 예산확보 노력이 필요하다고 판단된다. 즉, 수도권내의 경우 서울지역 10개소, 주변의 인천 및 경기도지역에 10개소 등 총 20여개의 측정 지점을 확보하고 최소 10일에 한번 정도의 년중 계속 측정계획을 수립해야만 인구규모와 면적 등을 고려할 때 어느 정도 유의적인 해석을 할 수 있는 자료가 수집될 것으로 전망된다.

#### 4. 대도시 HAPs 관리를 위한 향후의 과제

국가산업단지에 대한 HAPs 조사연구가 5년간 수행된 결과 새로운 정보가 많이 마련되었다. 당연히 이들 정보를 바탕으로 향후 대도시를 위주로 HAPs 관리계획을 수립하는 것은 매우 중요하고 당연한 수순이라고 할 수 있다. 그러나 대도시 HAPs 관리는 무엇보다도 다음과 같은 두 가지 관점에서 산업단지

와는 다른 차별성과 특이성이 있다. 첫째, 국내 대도시는 공통적으로 인구가 많을 뿐 아니라 밀집되어 있다. 즉 오염물질로 인한 노출규모가 커서 그 피해 규모도 크게 된다. 궁극적으로 환경부의 정책이 국민의 환경오염으로 인한 위해성 저감이라면 당연히 산업단지와 같은 오염우심지역이 아니더라도 많은 규모의 인구가 밀집된 도시지역의 HAPs 관리는 궁극적인 목표가 된다. 다음으로 대도시에는 다양한 HAPs 배출원이 존재하고 다양한 종류의 HAPs가 존재할 수 있으며 주민들은 다양한 방식으로 이들 물질에 노출된다. 즉, 오염의 양상이 매우 복잡 다양하므로 일부 배출원이 집중되어 있는 산업단지에 적용하던 관리 방식으로는 실효를 거두기 어려울 수가 있다.

국내 주요 산업체 (30인 이상, 사용량 1 ton 이상)를 대상으로 한 유해화학물질 배출량조사(Toxic Release Inventory, 이하 TRI) 결과 99% 이상이 대기로 배출되고 있으며 (Korea MOE, 2009), 인구의 90% 이상이 도시에 밀집되어 있음에 따라 도시지역의 대기질 개선은 전 국민의 건강을 위한 가장 효율적인 제어수단이 될 수 있다. 이를 추진함에 있어서 무엇보다도 중점적으로 고려되어야 할 주요사항은 HAPs 관리를 위한 현장실측 결과를 기반으로 한 우선관리대상물질을 선정·관리함으로써 궁극적으로는 인체노출에 대한 위해성평가를 현장 중심의 정보를 바탕으로 한 국가 고유의 환경보건학적 영향 평가가 수반되어야 한다. 이러한 국가적인 정책 과제들은 단기간에 완료되기 어려운 속성이 있으며 결국 중·장기적 계획을 수립하여 체계적인 예산 투입을 통한 종합적인 연구과제를 수행하여 정책적 기반을 확보해나가야 한다. 또한, HAPs 관리를 위해서는 유사한 정책을 수행하는 정부의 각 기관 또는 환경부 내의 관련 부 또는 과 단위와 상호 유기적이고 보완적인 관계를 설정하고, 협동연구체제를 구축하여 보다 원활하게 HAPs에 대한 위해성 저감을 최소화 할 수 있는 범부처적인 최적 관리체계 구축이 필요하다고 사료된다.

##### 4.1 우선관리대상 물질의 선정에 관한 문제

특정 유해물질에 대한 관리방안을 설정하는 데 있어서 제일 먼저 당면하는 과제는 ‘어디에서 무엇을 먼저 조사할 것인가?’라는 문제이다. 따라서 관리지역과 관리 대상물질에 대한 우선순위 매김이 중요한

관건으로 대두된다. 환경부는 2004년에 200여 종의 유해화학물질을 대상으로 그 사용량과 유해성을 조사한 결과 그 중에서 48종의 우선관리 대상물질을 선정할 바 있다. 이와 같은 접근방식은 효율성 제고의 측면에서 바람직한 것으로 보아지나, 이들 물질에 대한 관련 정보가 제대로 마련되지 못한 실정에서 초기단계부터 그 대상물질이 너무 많이 선정하였다는 지적을 하지 않을 수 없다. 우선관리물질이 너무 많아지면 결국 '선택과 집중'의 효과는 떨어지게 되며 비용과 시간이 분산되어 결과적으로 우선관리는 유명무실하게 될 가능성이 높기 때문이다. 참고로 HAPs에 대한 규제강화를 우리나라보다 약 10여 년 먼저 시작한 일본의 경우 현재 23개 물질을 우선관리 대상물질로 선정하여 주요 항목에 대해서는 대기환경기준을 설정하고(현재 4개 항목), 측정방법이 마련되지 못한 항목에 대해서는 그에 대한 연구를 지원하고 있다.

우선관리 물질을 선정함에 있어서 반드시 고려해야 될 중요한 사안 중의 하나는 이들 물질에 대한 측정방법이 현실적으로 마련되어 있는가를 고려해야만 한다는 점이다. 또 다른 중요한 사안은 배출원 조사에서 파악된 물질의 profile과 환경대기(ambient air) 중에서 결과적으로 나타나는 profile이 반드시 일치하지는 않을 수 있다는 점이다. 특정유해물질 중 어떤 물질은 산업체에서 사용은 되고 있으나 대기중으로 배출될 때는 다른 물질로 변환되어 나가는 경우도 있으며, 실제 산업체에서 사용은 되지 않으나 공정상에서 다른 물질로부터 변환되어 배출되는 물질들도 있다. 따라서 우선관리 대상물질은 산업체에서의 물질 사용량뿐만 아니라 주변 대기환경에서 나타나는 농도 수준과 검출빈도를 고려하여 선정하는 것이 바람직하며, 이 때 반드시 대상물질에 대한 측정가능성을 파악하여 단계적으로 그 대상물질을 확대해나가는 것이 효과를 높일 수 있는 방법으로 사료된다.

사실, HAPs의 관리 범위를 정하는 것은 비단 대도시에 국한된 작업은 아니다. 산업단지의 경우에는 산업의 유형과 특성에 따라 특징적인 물질들이 우선관리대상으로 선정될 수 있다. 국내의 산업단지에서는 HAPs의 종류와 배출이 상당 부분 파악되어 있으므로 알려진 정보를 대상으로 비교적 쉽게 우선 순위를 정하고 범위를 설정할 수 있다. 그러나 대도시의

경우 아직은 조사된 사례가 부족하고 다양한 노출형태를 임의적으로 규정하기 어려운 요인이 많다. 대도시지역 배출에는 소각로와 같은 일부 점오염원이 포함될 수 있지만 차량 배출과 먼오염원이 매우 중요한 부분을 차지한다. 차량 배출 부분은 이미 활동도 자료가 많이 갖추어져 있고 HAPs 배출에 대한 정보도 비교적 많이 축적된 상태로 판단된다. 그러나 도시지역의 HAPs에 대한 먼오염원 배출기여분(예로써 음식점에서의 생물성 연소 혹은 노천소각 등)은 아직도 어느 정도의 정보를 확보할 수 있을지 짐작하기 쉽지 않은 실정이다.

관리대상 HAPs의 범위를 결정하기 위해서는 먼저 가능한 한 많은 HAPs에 대하여 고려대상 목록을 만들어야 한다. 미국의 경우 1999년 도시지역 HAPs에 대한 통합 전략을 수립할 때 1990년 청정대기법 개정 때 지정된 188개 HAPs를 대상으로 선별 작업을 시작하였다. 우리나라에서는 35개 특정대기유해물질이나 48종의 우선관리대상물질 혹은 206종의 관리대상물질이 기초가 될 수 있다. 그러나 이미 수행된 국가산업단지의 5개년 조사연구사업의 결과, 환경부가 2004년도에 마련한 48개 우선관리대상물질을 HAPs 관리대상으로 그대로 적용하는 데는 현실적으로 몇 가지 문제(예를 들면 측정 가능성 문제)가 있는 것으로 나타났다.

우선관리대상물질의 선정에서 반드시 고려되어야 할 핵심 요소는 위해성(발암성, 비발암성)과 만연성(환경 농도) 그리고 측정가능성 세 가지를 들 수 있다. 아무리 독성이 높은 물질이라도 국내 대기 중에서 검출되는 가능성이 희박하다면 환경기준 설정과 같은 포괄적 관리대상에 포함하기 보다는 시설관리 기준 등을 정비하여 취급하는 몇몇 배출원을 중점적으로 관리하는 것이 효과적일 수 있다. 또한 아무리 위해성이 높은 물질이라도 현재의 과학기술 수준에서 신뢰성 있는 측정결과를 제시할 수 있는 방법이 마련되지 못한다면 관리대상영역에 포함되어 있다 하더라도 유명무실하게 취급될 수밖에 없게 된다. 따라서 우리 국민이 노출되는 HAPs에 대한 측정된 결과가 없는 상태에서 단순히 유통량이 많고 독성이 높다는 측면에서 우선관리 대상물질을 선정하는 것은 현실적으로 부적절한 정책을 유발하게 된다.

이러한 측면에서 저자는 국가산업단지 연구용역사업을 통하여 HAPs 우선관리 대상물질 선정에 부가하

여 실질적으로 국민의 환경위해성 저감을 목적으로 하는 가장 실효적인 방법으로 필요하다면 대기환경 기준 설정 등 핵심적으로 관리할 물질에 대하여 검토한 바 있다. 결과적으로 위의 요인들을 종합적으로 고려해 볼 때 우선적으로 선정할 항목으로서 VOC 그룹에서는 벤젠과 1,3-뷰타디엔 및 트리클로로에틸렌의 3종, 카보닐 그룹에서는 폼알데하이드와 아크로레인의 2종, PAH에서는 벤조(a)파이렌, 그리고 중금속 그룹에서는 6가 크롬을 제안한 바 있다(NIER, 2012). 이들 항목들은 모두 WHO에서 1급 혹은 2급 발암성 물질로 등재된 유해물질로서 각각 그룹 중독성 측면에서 대표적인 물질이다. 이러한 선정과정에 내재된 과학적인 논리와 관련 정보들은 매우 방대하므로 별도의 논문에서 거론될 예정이다.

#### 4.2 HAPs의 환경기준 설정의 문제

어떤 오염물질에 대한 환경기준의 설정은 환경관리의 가장 현실적인 지향목표를 설정하는 것과 같다고 할 수 있다. 환경기준의 경우 나라별로, 그리고 매체별로 그 대상 물질이나 기준치에서 공통되거나 비슷한 부분도 있지만 각각의 환경 현황, 산업화 정도, 사회·경제적 특성 등이 반영됨으로써 서로 상이한 요소들이 상당히 존재한다. 우리나라의 경우 지금까지 수질이나 대기환경 기준설정에 있어서 외국의 경우를 준용하는 수준에서 그친 것은 사실이다. 환경관리 역사가 짧은 탓에 자체적으로 누적된 자료와 정보가 없는 상황에서 어느 정도는 그 불가피성을 인정하지 않을 수 없지만, 나라마다 사회·경제적 요인이 다른 상황에서 다른 선진국의 경우를 그대로 국내에 여과 없이 도입하는 것은 재고되어야 한다. 특히 최근의 국내 산업발전과 규모를 고려할 때 우리나라는 이미 세계에서 유례없이 가장 특별한 수준에 이른 부분도 많다. 따라서 환경관리 분야 역시 우리의 경우에 맞는 독특한 방식을 개발해 나가는 발상의 전환이 필요하다고 사료된다. 이러한 측면에서 최근 마련된 다중이용시설과 신축공동주택에 대한 실내공기질관리법은 아직 그 법의 효율성과 타당성에 대한 논란이 전혀 없는 것은 아니나 우리나라의 독특한 경우를 반영하였다는 점에서 매우 고무적이라고 본다.

현재 국내 대기환경기준은 아황산가스, 일산화탄소, 질소산화물, 오존, 미세먼지, 납, 그리고 벤젠의 7

개 항목에 대하여 설정되어 있다. 이들중 HAPs와 관련 있는 항목은 벤젠과 납이 있으며 미세먼지는 간접적으로 입자상 유해물질과 관련이 있는 정도이다. 특히 아황산가스와 일산화탄소는 대도시 연료정책의 효과로 개선되어 이미 환경기준으로서의 의미가 상실된 지 오래이며, 납 역시 1986년에 무연휘발유를 공급하기 시작하여 이미 전국적으로 납 농도가 급격히 감소한 5년이 지난 시점에 기준을 새로이 설정하여 기준치로서의 효용성에 의문이 제기되는 항목이기도 하다. 결국, 현행 기준설정 항목 중에는 질소산화물과 오존 그리고 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 3개 항목만이 대도시와 산업단지의 환경위해성을 평가하는 항목으로 활용되고 있는 실정이며, 벤젠은 중요한 물질임에도 불구하고 2010년에 기준이 발효되어 아직까지는 전국적인 측정 database가 미흡한 실정이다.

대기환경기준은 대기오염물질의 농도로 인한 유해성을 저감하기 위한 가장 실효적인 수단으로 사용될 수 있음에도 불구하고 많은 국가에서 아직도 수많은 오염물질 중에 일부만이 기준이 설정되어 있다. 그 주된 이유는 대기환경기준을 설정하기 위해서는 아래와 같은 세 가지 요건이 수반되어야 하기 때문이다.

- 특정 대상오염물질에 대한 위해성평가 자료 축적
- 특정 대상오염물질에 대한 모니터링 기술 보편화
- 특정 대상오염물질에 대한 제어기술 확보

위의 세 가지 요건이 사전에 구비되고 난 후에 환경기준을 발효해야만 효과적인 관리가 수행될 수 있으며, 많은 오염물질에 대하여 아직도 이러한 조건을 충분히 충족하지 못하는 경우가 많다. 그러나 이러한 자료와 정보가 모두 마련될 때까지 기다리기 이전에 행정 효율을 높이고 측정 및 방지기술의 개발 등을 선도하기 위해서 국가나 지자체는 나름대로 환경기준을 행정목표로 제안하여 적용하는 것이 현실적으로 효과적일 수도 있다. 그리고 제안된 환경기준이 달성되면 다시 기준을 단계적으로 강화해 가면서 오염물질의 발생량을 억제시켜나가는 방법이 우리나라의 실정에는 오히려 적합할 수도 있다고 사료된다.

대기환경에 국한하여 생각해 보면, 새로운 기준설정 항목으로서 가장 우선적으로 고려할 항목은 벤조(a)파이렌을 들 수 있다. 이 항목은 WHO에서 1급 발암성물질로 등재된 유해물질로서 각각 PAH 그룹 중 독성 측면에서 대표적인 물질이다. 또한 앞 절에

서 고찰한 바와 같이 국내에서의 측정 사례도 어느 정도는 마련되어 있어 전혀 생소한 경우는 아니다. 이들 물질들이 비역치(non-threshold) 오염물질이므로 허용안전치 설정에 논란이 없지는 않겠으나, 우리나라의 과거 환경관리 사례를 고려해 볼 때 대기환경기준 설정과 그 기준의 단계적 강화를 통하여 배출량을 저감해 나가는 정책이 현실적으로 가장 효과적인 방안일 것으로 사료된다. 벤조(a)파이렌의 경우 영국은 현재 기준설정을 검토 중에 있는 것으로 알려지고 있다.

어떤 특정 오염물질에 대한 환경기준 설정을 통한 기대 효과는 물질에 따라 선택적(혹은 특수한) 효과(specific effect)와 계통적(혹은 집단적) 효과(generic effect)로 구분할 수 있다. 예를 들면, 납은 전자의 경우에 속하며, 미세먼지는 후자의 경우에 속한다. 벤젠과 벤조(a)파이렌에 대한 기준설정은 이들 물질이 VOC와 PAH의 대표적 물질로서 두 물질의 농도 저감은 결과적으로 이들 물질과 공변동(co-variation)을 하는 전체 그룹의 저감 효과를 동시에 가져 올 수 있다는 집단적 효과를 기대할 수 있다.

대기 환경기준 개선에 있어서 또 다른 대안은 PM<sub>2.5</sub>의 기준 도입을 앞당길 필요가 있다는 점이다. PAH, PCBs, dioxine 등과 같은 대기 중 많은 반 휘발성 유기오염물질(SVOC)들은 공통적으로 PM<sub>1.0</sub> 혹은 PM<sub>2.5</sub>와 같은 초미세먼지에 함유되어 있다(Krumal *et al.*, 2013; Barrado *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2009). 따라서 이 점을 고려하면, 비록 개별 물질에 대한 세부적인 기준 설정에 대한 과학적인 근거를 마련하지 못하고 있는 현재의 수준에서는 초미세먼지에 대한 기준을 설정함으로써 이에 함유된 많은 유해물질을 동시에 저감하는 간접적인 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

#### 4.3 다매체 통합환경관리 체제의 도입 필요성

여러 환경매체 중에서도 대기환경의 중요성은 대기가 각종 유해물질이 환경시스템으로 유입되는 출구 역할을 하고 있다는 점에서 찾을 수 있다. 일례로 국내의 경우 산업체에서 배출되는 특정유해물질의 최소 90% 이상은 일차적으로 대기로 배출된다고 조사된 바 있다. 대기 중으로 배출되기 이전의 HAPs는 배출원에서는 유해화학물질의 범주에서 다루어지게 된다. 미국과 네덜란드 등과 같은 선진국에서는 이미

환경잔류성이 강한 유해화학물질에 대해서는 환경매체 통합관리 개념이 환경정책의 새로운 패러다임으로 자리 잡는 추세이다.

중래의 우리나라 유해오염물질 관리는 배출원 중심의 농도 규제 정책을 위주로 시행되어 왔다. 그러나 앞으로 유해오염물질로 인한 일반대중 및 생태계 피해의 원인을 구명하고 이를 효과적으로 저감하기 위해서는 기존의 매체별 물질 농도 중심의 관리체제를 위해성 저감 원칙에 입각한 피해자 혹은 수용체(receptor) 중심의 관리체제로 전환하는 것이 필요하다. 이러한 점에서 최근 환경부는 ‘유해화학물질관리법’의 개정을 통하여 화학물질에 대한 위해성 평가 원칙을 명시하였다는 점은 매우 고무적이다. 그러나 아직까지 우리나라에는 오염우심지역에 대한 위해성 평가를 제대로 수행할 수 있는 사회적, 기술적 토대가 확고히 구축되지는 않은 실정이다. 따라서 유해오염물질에 관한 우리나라의 환경정책은 (i) 오염 사전 예방 원칙에 입각한 배출원 관리 정책, (ii) 매체별 개별물질 농도 규제 방식에서 나아가 총괄 위해성 저감 차원의 정책의 수립, (iii) 특정 유해오염물질의 다매체 분포 특성을 고려하여 발생에서 소멸에 이르는 전과정 평가의 개념 도입 등을 고려하여 방향을 설정하는 것이 바람직하다고 본다. 본 글에서는 오염측정 사례와 기준설정 등을 주로 대기환경을 위주로 고찰하였다. 그러나 국내의 산업 발전과 생활수준의 향상 등을 고려할 때 통합 환경관리 및 총괄 위해성 관리라는 측면에서 대기환경뿐만 아니라 수질과 토양환경에 대한 기준 설정 항목에 대한 전면적인 재검토가 요망되는 시점이라고 보아진다.

## 5. 도시지역 HAPs 관리를 위한 향후 연구사업 제안

국가적인 HAPs 관리를 위해서는 측정결과를 바탕으로 우선관리대상물질을 선정하고, 궁극적으로는 노출주민에 대한 위해성평가를 통한 환경보건학적 영향 평가가 수반되어야 한다. 이러한 과제들은 단기간에 완료되기 어려운 속성이 있으며 결국 중·장기적 계획을 수립하여 체계적인 예산 투입을 통한 종합적인 연구과제를 수행하여야 한다. 향후 도시지역의 HAPs 관리를 위한 기본계획에 반영되어야 할 주요

연구 내용은 아래와 같으며 이러한 과제를 추진하기 위한 중·장기 로드맵과 소요 예산 및 추진주체를 결정하기 위한 구체적 내용들이 조속히 검토되어야 한다.

- (1) 광역대도시 규모의 HAPs 모니터링 연구조사
  - 광역대도시 차원의 HAPs에 대한 실제 현장 측정 수행(매 3년~5년마다 반복)
  - 측정된 HAPs 자료에 근거한 인체노출수준 평가 등 종합적 검토 및 해석
  - 광역대도시의 HAPs 주요 배출원과 배출량 조사 및 현장 검증(매년 updating)
  - 광역대도시의 도시특성에 따른 HAPs 우선관리 대상 물질 선정 및 제안
  - 전국적인 유해대기오염물질 측정결과에 대한 DB구축(HAPs Archives 구축)
  - 주요 측정 항목-VOC 및 카보닐화합물, PAH 등 유기성애어로졸, 중금속 그룹
- (2) 중소 산업도시에 대한 HAPs 조사연구
  - 기존 국가산업단지 조사사업의 후속으로서 대기 정책효과 분석(매 5년마다 반복)
  - 인구 규모 50만 정도의 중소 산업도시 HAPs 측정 및 관리 방안 연구
  - 측정된 HAPs 자료에 근거한 인체노출수준 평가 등 종합적 검토 및 해석
  - 국가산업단지의 HAPs 주요 배출원과 배출량 조사 및 현장 검증(매년 updating)
  - 산업도시의 산업 특성에 따른 HAPs 우선관리대상 물질 선정 및 제안
  - 전국적인 유해대기오염물질 측정결과에 대한 DB구축(HAPs Archives 구축)
  - 주요 측정 항목-VOC 및 카보닐화합물, PAH 등 유기성애어로졸, 중금속 그룹
- (3) 새로운 HAPs에 대한 측정 방법 개발 및 보편화
  - HAPs 공정시험법 제정(예, 미국의 TO, IO method, 일본의 유해대기오염물질 시험법)
  - 실시간 HAPs 자동측정방법(real-time monitoring) 개발 및 현장응용기술개발
  - 비교적 간편 시료채취 및 분석 방법 개발(공간 분포 및 시계열성 등 상대적 농도 변동을 평가

- 하기 위한 수동식 측정법의 적용가능성 검토)
- 측정자료의 신뢰성 제고를 위한 국가 HAPs 정도관리(QC/QA)체계 구축

- (4) HAPs의 대기모델링을 위한 연구 지원
  - HAPs의 공간분포를 파악하기 위한 대기분산모델링 개발 및 실용화
  - HAPs의 대기중 농도에 대한 기여도 추정을 위한 수용모델 개발 및 활용
  - 대기모델 운영을 위한 배출량, 기상자료 등 관련 자료의 D/B 구축
  - 향후 환경영향평가 등을 지원하기 위한 모델링 네트워크 구축 및 지원

- (5) HAPs 건강위해성 평가에 관한 연구 지원
  - 도시규모의 건강위해성 평가 방법 개발 및 정립 부분
  - 측정 자료를 활용한 건강위해성 평가 통합 모델 개발 부분
  - 환경보건학적 역학조사와 연계한 종합적인 보건학적 위해성 저감 방안 연구 부분
  - 기존 산업단지 Cohort 조사사업과 연계하여 Archive를 구축하고 활용하는 방안

위와 같은 각종 과제를 수행하기 위해서는 결국 예산과 인력 및 장비가 수반되어야 한다. 이를 확보하기 위한 방법은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째는 환경부 혹은 국립환경과학원에서 내부에 한시기구로 기획사업단을 만들어 관련 유관기관과의 협의를 통하여 효과적으로 사업을 추진해 나가는 방법과, 둘째는 기존 방식대로 국립환경과학원에서 단위과제별로 매년 연구용역을 발주하는 방식을 생각할 수 있다. 그러나 과업의 규모와 연계성을 고려할 때 후자의 방법은 투자대비 효과를 거두기 어려울 것으로 예상된다. 특히 전국적으로 동시다발적으로 연구과제가 수행되어야 하는데 예산문제로 소규모 단위 연구용역 발주 방식을 채택한다면 국내 전문연구기관의 전문가 풀이나 측정 능력을 고려할 때 현실적으로 어려운 요인이 많을 것으로 사료된다.

과거 국가산업단지 HAPs 조사의 경우에도 예산과 전문인력 부족으로 년차별(5개년)로 전국을 순회하면서 조사를 한 결과 대기오염현상의 가장 중요한 인자인 '동시성'이 확보되지 못하여 자료의 해석이

어려운 경우가 많았으며 결과적으로 지역주민들에 대한 설득력 부족 및 향후 정책을 수립하는 데 있어서 과학적 판단의 근거가 결여될 가능성이 있다는 점을 경험한 바 있다. 따라서 대도시를 대상으로 하는 HAPs 관리 전략을 추진함에 있어서 전문인력 활용의 '지속성' 및 자료의 '동시성' 확보 측면에서 5개년간의 예산을 미리 확보하고 이 사업에 투입될 인력과 장비를 마련한 후 전국을 대상으로 동시다발적으로 사업을 수행·관리하여야만 장기적 대책을 설계할 수 있는 정확하고 현실적인 자료가 확보될 것으로 판단된다. 만약 불가피하게 전국을 동시다발로 수행하기 어렵다면 차선책으로는 일단 수도권(서울, 경기 인천 지역)과 비수도권의 광역도시(부산, 대구, 대전, 울산, 광주) 두 개 그룹으로 나누어 수도권을 먼저 하고 다음으로 비수도권 조사를 진행하는 방법도 생각할 수 있다. 결국, 연구단(혹은 사업단)을 구성하여 접근하는 방안이 최선으로 생각되며, 관련 세부과제 등 연구용역발주도 연구단에서 담당하고 관리할 수 있도록 한다면 기존 환경과학원 공무원들의 통상업무에 지장을 주지 않으면서 목표를 달성할 수 있을 것으로 사료된다. 이에 따라 본 연구의 목표와 성격을 고려해서 가칭 'UTOPIA 사업단'을 구성할 것을 제안하며 UTOPIA란 Urban Toxic Pollutants Identification and Assessment의 약어를 의미한다. 국내에서도 지식경제부나 교육과학기술부 등에서는 특별한 목적을 갖는 단위 사업단을 한시적(5~7년 등)으로 운영하여 사업의 추진효과를 극대화하고 있는 등 다른 부처에서는 많이 채택하는 추진전략으로서 환경부에서도 과감히 이런 방법을 채택할 필요가 있다고 본다.

## 6. 요약 및 결론

PAH와 VOC와 같은 화학적 발암성 물질을 포함하는 HAPs로 인한 환경보건학적 영향은 일반적으로 장기간에 걸친 저 농도수준에서의 누적노출로 인한 영향이 단기간의 급성노출로 인한 그것에 못지않거나 대도시나 대규모 산업단지에서는 피해규모의 측면에서 오히려 더 심각할 수 있다고 알려져 있다. 더욱이 국내의 경우 기존의 기준성 오염물질에 비해

HAPs와 같은 비 기준성 물질에 대한 측정과 연구는 상대적으로 부족하여 이들 독성 유기오염물질에 대한 노출정도를 평가할 신뢰성 있는 자료가 마련되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이들 물질의 대기 중 농도를 보다 정확히 측정할 수 있는 방법론의 확립과 아울러 장기적이고도 정기적인 관측을 통하여 HAPs에 대한 자료를 축적하는 것은 환경보건학적 측면에서의 국민 위해성 저감 차원에서 매우 중요한 과제라고 할 수 있다.

최근의 구미 불산가스 누출사고에서 경험한 바와 같이 특정대기유해물질의 경우 이들 물질의 유통과 배출 및 관리체계가 미비할 경우 자칫 대형 환경안전사고로 국가에 엄청난 피해를 줄 수 있으므로 환경부는 다른 기준성물질보다 더 많은 관심과 주의를 기울여야 한다. 전 세계적인 대기환경관리의 패러다임이 종래의 '맑고 푸른' 공기의 개념에서 진일보하여 국민에게 '건강하고 안전한' 공기를 공급하고 확보하는 방향으로 변하고 있다. 불특정 다수의 환경보건학적 위해성에 가장 큰 영향을 미치는 매체가 대기환경이라는 점을 고려할 때 HAPs에 대한 주기적인 측정과 그로인한 위해성 평가 및 저감은 궁극적으로 환경관리가 추구해야 할 당면과제이다. 이러한 측면에서 환경부는 2013년을 HAPs로 인한 위해성 평가에 기반을 둔 대기환경관리 전략 수립의 원년으로 삼고 예산확보 및 향후 5~10년을 대상으로 중·장기 계획수립과 대책마련에 만전을 기해야 할 것으로 본다. 그리고 이를 위한 구체적 추진방안으로는 대규모 연구기획단(가칭 UTOPIA 사업단)을 구성하여 접근하는 것이 과거의 경험과 현실적 문제 등을 고려할 때 가장 효율적인 방안일 것으로 사료된다.

향후에는 단일매체에 대한 물질별 농도규제보다는 복합매체에 대한 총괄 위해성 평가의 개념으로 환경관리의 패러다임이 바뀔 것으로 예상된다. 환경복지 국가 구현을 천명한 현 정부는 이미 환경행정 체제역시 새로운 패러다임을 반영하여 각종 정책을 발표하고 있는 중이다. 대부분의 유해화학물질은 일단 공기라는 매체를 통하여 수환경이나 토양환경으로 이송된다. 따라서 HAPs에 대한 효과적인 관리는 통합환경매체 관리에 있어서도 가장 중요한 요소이며, 이에 대한 집중적인 투자와 노력이 필요하다고 사료된다.

## References

- Barrado, A.I., S. Garcia, E. Barrado, and R.M. Perez (2012) PM<sub>2.5</sub>-bound PAHs and hydroxy-PAHs in atmospheric aerosol samples: Correlations with season and with physical and chemical factors, *Atmos. Environ.*, 49, 224-232.
- Calabrese, E.J. and E.M. Kenyon (1991) *Air Toxics and Risk Assessment*. Lewis Pub., 662 p.
- Japan MOE (1997) Guidelines of hazardous air pollutants monitoring.
- Kim, Y.S. (2003) Characteristics and status of persistent organic pollutants and heavy metals in the atmosphere, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19(2), 113-132.
- Korea MOE (2009) *Atmosphere environment annual report*, 71 pp.
- Korea MOE (2010a) Guidelines of air pollutants measurement station installation and operation, 31 pp.
- Korea MOE (2010b) Guidelines of air pollutants measurement station installation and operation, 182 p.
- Krumal, K., P. Mikuska, and Z. Vecera (2013) Polycyclic aromatic hydrocarbons and hopanes in PM1 aerosols in urban areas, *Atmos. Environ.*, 67, 27-37.
- Li, Z., E.N. Porter, A. Sjodin, L.L. Needham, S. Lee, A.G. Russell, and J.A. Mulholland (2009) Characterization of PM<sub>2.5</sub>-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Atlanta - Seasonal variations at urban, suburban, and rural ambient air monitoring sites, *Atmospheric Environment*, 43, 4187-4193.
- NIER (2006) Final Report of Hazardous Air Pollutants Monitoring in Sihwa-Banwol Area. 416 p.
- NIER (2007) Final Report of Hazardous Air Pollutants Monitoring in Sihwa-Banwol Area (II). 412 p.
- NIER (2009) Final Report of Hazardous Air Pollutants Monitoring in Yeosu-Gwangyang Area. 356 p.
- NIER (2010) Final Report of Hazardous Air Pollutants Monitoring in Yeosu-Gwangyang Area. 308 p.
- NIER (2011) Final Report of Hazardous Air Pollutants Monitoring in Gumi-Daegu Area. 396 p.
- NIER (2012) Final Report of Hazardous Air Pollutants Monitoring in Daesan Area. 380 p.
- Patric, D.R. (1994) *Toxic Air Pollutants Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, 588 p.
- USEPA (1999) Category for persistent, bioaccumulative, and toxic new chemical substances, *Federal Register*, 64, 60194 - 60204.
- USEPA (2006) Urban air toxics monitoring program (UATMP) final report, EPA-454/R-07-001.
- WHO (2000) Guidelines for air quality, Geneva, 2000.