

# 서울시 대기부유분진의 농도와 다환방향족 유기물질에 의한 발암 위해성

## Airborne Suspended Particulates Concentration and Cancer Risk Assessment of Polycyclic organic matter in Seoul

박 성 은 · 정 용

연세대학교 보건대학원 및 환경공해연구소  
(원고접수 : 1992. 11. 9)

Seoung-Eun Park and Young Chung

Graduate School of Health Science and Management,  
The Institute for Environmental Reaserch, Yonsei University  
(Received 9 November 1992)

### Abstract

Airborne suspended particulates were collected at Shinchon by a high volume cascade impactor from Sep. 1990 to Aug. 1991. Organic matter was extracted from particulates and fractionated by liquid-liquid extraction and thin layer chromatography. Substances in the PAHs and nitroarenes' subfraction of neutral fraction were determined by capillary gas chromatography. Based on unit risk estimates by multi-stage model of benzo(a)pyrene and the results of exposure estimates, cancer risk was assessed.

The annual average concentration of total suspended particulates was 201.77g/m<sup>3</sup>. The percentage of fine particulates was 57.40. The concentration of total suspended particulates showed seasonal variations and was high in winter and spring. The average concentration of extractable organic matter was 8.12g/m<sup>3</sup>. In all, 21 PAHs were identified and quantified. The annual concentration of fluoranthene was 2.38ng/m<sup>3</sup>, and that was the highest value of all PAHs. A carcinogenic compound, benzo(a)pyrene, was at a concentration of 1.84ng/m<sup>3</sup>. All the 10 nitroarenes were also identified and quantified. The major nitroarene in the Shinchon area was 2,7-dinitrofluorene. The annual concentration of 1-nitropyrene was 1.56ng/m<sup>3</sup>. Concentrations of PAHs and nitroarenes were high in winter and low in summer. The life time excess risk estimates of benzo(a)pyrene was calculated as 0.96 persons/a million population in this experiment. In the rank of relative potencies, carcinogenic effects of the other PAHs were calculated as 0.004-0.108 persons/a million population.

### 1. 서 론

부유분진은 우리나라 대기오염에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 작용하며(정용 등, 1986), 그 자체로도 인체에 해로울 뿐 아니라 다른 오염물질의 매개

체가 되기 때문에 그 위해가 매우 우려된다. 분진중의 유기추출물이 동물 실험(Sasaki 등, 1987)과 역학조사(Carnow와 Meier, 1973)에서 폐암과 상관관계가 있음이 밝혀져 있는 가운데 우리나라에서도 폐암으로 인한 인구 사망률이 매년 급속히 증가하

고 있어(통계청, 1991) 날로 심화되어 가고 있는 대기오염이 인간의 건강을 크게 위협하고 있음을 유추해 볼 수 있다.

대기중에는 약 2,800여 화학물질이 존재하며 그 중 300여종 이상에 대해 생물검증이 실시되었다(Graedel 등, 1986). 특히 불완전 연소과정에서 생성되는 다환방향족 탄화수소류(polycyclic aromatic hydrocarbons; 이하 PAHs)와 그 nitro방향족화합물(이하 nitroarenes)로 대표되는 다환방향족 유기물질(polycyclic organic matter; 이하 POM)에 의한 인체 발암영향은 이미 18세기부터 알려져 이에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 화합물들은 주로 도시 교통기관, 산업장, 소각 시설 등에서 배출되는데, NAS(National Academic Science)의 보고(1983)에 따르면 도시지역에서는 차량이 매우 중요한 오염원으로 작용한다.

IARC(International Agency for Research on Cancer, 1983)에서는 benzo[a]pyrene(이하 BaP)을 비롯한 몇몇 PAHs를 사람에게 대한 유력한(probable) 또는 가능한(possible) 발암물질로 구분하고 있으며, PAHs를 함유하고 있는 코크 생성물, 담배 연기, 타르 등에 대해서는 사람에게 대한 발암물질이라고 규정하여 관리하고 있다.

그러나 우리나라에서 이러한 물질에 대한 관리와 제어는 전혀 이루어지지 않고 있으며, 관리를 위한 환경 기준설정의 근거로 선진각국에서 제시하고 있는 위해성 평가(risk assessment)방법론이 도입된 것도 최근이다. 그동안 위해성을 평가하기 위해 요구되는 기초적 자료로써, 다수의 연구가 보고되어 왔으나(장재연 등 1988; 정용, 1989; 조성준, 1990) 현 오염도의 수준에서 위해성이 검토된 것은 일부 연구(김종만과 정용, 1992)를 제외하곤 거의 없는 실정에 있다.

따라서 본 연구에서는 서울시 일부지역의 부유분진을 대상으로 그 오염양상을 살펴보고 부유분진중에 함유되어 있는 다환방향족 유기물질의 농도를 파악하여 이로 인한 인체의 발암 위해성을 평가(cancer risk assessment)하고자 하였다. 이는 궁극적으로 서울시의 부유분진으로 인한 인체 건강 피해의 가능성을 제시하는 것이며 대기중의 미규제 오염물질의 평가와 기준 설정에 합리적인 판단 근거로 사용되는데 목적이 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 조사기간 및 분진채취

서울시의 신촌지역에서 1990년 9월부터 1991년

8월까지 48 또는 72 시간을 주기로 매달 일주일간 하이볼륨 에어 샘플러(high volume cascade impactor; Andersen Sierra -352, US)로 포집(7단계의 입경)하였다.

여지는 사용전후 향방으로 건조시킨 유리섬유여지(glass fiber filter; General metal works, US)를 사용하였다.

### 2.2 분진중 POM의 동정

포집된 분진 여지를 2.1 $\mu$ m 이상인 조대 입자(coarse particulates)와 2.0 $\mu$ m 이하인 미세 입자(fine particulates)로 분리하여 각각 잘게 자른 후, diethylether: cyclohexane(4:1, v/v)을 가해, 초음파 추출기(Branson 5200, US)로 20분동안 3회 반복하여 추출하였다.

추출된 유기물은 염기성 용액(2N-NaOH)은 산성 성분을 추출하고 산성 용액(2N-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)은 염기 성분을 추출하여 분리하는 방법(liquid-liquid extraction)을 이용하여 중성분획(neutral fraction)을 취하였다.

중성분획중 PAHs와 nitroarenes를 분리하기 위하여 박층 크로마토그래피(Thin Layer Chromatography)법을 이용하였으며 이 때 고정상으로는 silica gel G-60(0.5mm 20cm $\times$ 20cm, Merck)을 사용하였고, 이동상으로는 n-hexane: cyclohexane: toluene: benzen(8:36:4:53, V/V)을 사용하였다.

PAHs분획을 내부표준물질 4-azafluorene과 1-pyrene-aldehyde를 첨가한 benzene으로 용해시켰고 nitroarenes분획은 PAHs 가운데 비교적 빠른 머무름 시간을 갖고 있으면서도 휘발성이 없는 anthracene을 내부표준 물질로 하여 기체 크로마토그래피(Gas chromatography)로 동정 및 정량하였다. 이때의 분석조건은 표 1에 나타내었다.

분석 대상 항목은 POM 가운데, 독성도와 대기중 분포량을 고려하여 PAHs 21종(Supelco, US)과 nitroarenes 10종(Supelco, US)을 선정하였고 각 표준물질과 분진시료에서 검출된 크로마토그램을 그림 1과 2에 나타내었다.

### 2.3 발암 위해성 평가

대기 부유분진중에 존재하는 PAHs에 의한 발암 위해도를 평가하기 위하여 이미 연구보고(김종만과 정용, 1992) 된 바 있는 BaP의 단위 위해도치(unit risk estimates)를 이용하여 인구 백만명당 초과 발암 확률(excess risk estimates)을 산출하였다.

BaP의 단위위해도치는 70kg의 건강한 성인이 평생동안 BaP이 1ng/m<sup>3</sup> 함유된 공기를 호흡할 경우

**Table 1.** Analytical conditions of gas chromatography for the determination of PAHs and nitroarenes.

Item	Conditions	
	PAHs	Nitroarenes
GC	Shimadzu GC-7AG(Japan)	
Detector	FID(Flame Ionization Detector)	
Integrator	Youngin D510 B	
Flow rate	35ml/min	
Attenuation	4	
Chart speed	5mm/min	
Injection volume	2 $\mu$ l	
Column	BP-1 (25m $\times$ 0.33mm, 0.25m)	PTE-5 (30m $\times$ 0.25mm, 0.25m)
Inject. temp.	270 $^{\circ}$ C	300 $^{\circ}$ C
Detect. temp.	70 $^{\circ}$ C	300 $^{\circ}$ C
Oven temp.	130 $^{\circ}$ C(2min) $\rightarrow$ 270 $^{\circ}$ C(15min)	140 $^{\circ}$ C(4min) $\rightarrow$ 300 $^{\circ}$ C(15min)
Temp. rate	2 $^{\circ}$ C/min	2 $^{\circ}$ C/min

암이 발생할 확률로서 수학적 다단계 모델(multi-stage model)을 이용한 외삽(extrapolation)을 통하여 95% 신뢰한계의 upper bound에서  $5.2 \times 10^{-7}$ 로 산출된 값이었다.

또한, BaP은 100가지 이상의 PAHs중 가장 많은 연구가 되어온 발암 지표물질로서 BaP를 이용한 PAHs의 순위 상관 발암성(rank relative carcinogenicity; Clement et al, 1988)을 근거로 다음 (1) (2)식과 같이,

$$E_{BaP}(\text{per } 10^6) = C_{BaP}(\text{ng/m}^3) \cdot u \quad (1)$$

$$E_{PAHs}(\text{per } 10^6) = E_{BaP} \cdot RR_{PAHs} \quad (2)$$

(1)  $E_{BaP}$ : The life time excess risk estimates due to BaP

$C_{BaP}$ : Concentration( $\text{ng/m}^3$ ) of BaP

$u$ : Unit risk estimates( $5.2 \times 10^{-7}$ ), upper bound estimates by multi-stage model

(2)  $E_{PAHs}$ : The life time excess risk estimates due to PAHs

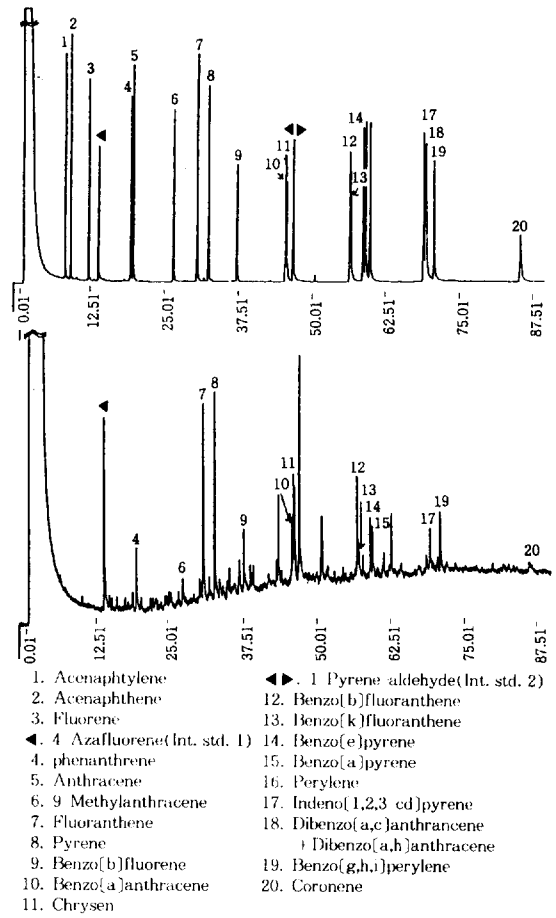
$RR_{PAHs}$ : Rank relative carcinogenicity

현오염도 수준에서 PAHs에 의한 초과 발암 확률을 산출하였다.

### 3. 연구결과

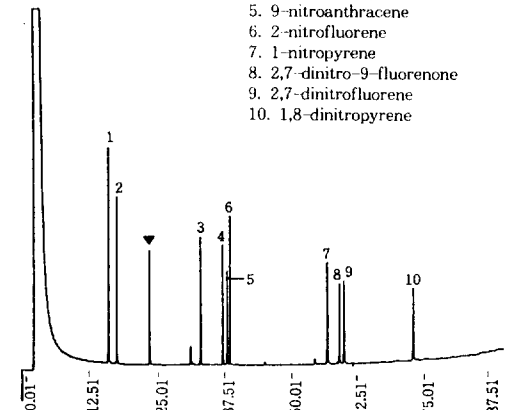
#### 3.1 부유분진의 농도

본 조사기간 동안의 연간 부유분진의 평균 농도는  $201.77 \mu\text{g/m}^3$ 이었으며, 최고 농도를 나타낸 달은 4월로  $331.07 \mu\text{g/m}^3$ 이었고 9월에  $102.15 \mu\text{g/m}^3$ 으로



**Fig. 1.** Chromatograms of PAHs standards and a sample fraction.

- 1. 1 nitroacenaphthylene
- 2. 2-nitronaphthalene
- 3. 3-nitro-9-fluorenone
- 4. 5-nitroacenaphthene
- 5. 9-nitroanthracene
- 6. 2-nitrofluorene
- 7. 1-nitropyrene
- 8. 2,7-dinitro-9-fluorenone
- 9. 2,7-dinitrofluorene
- 10. 1,8-dinitropyrene
- 11. Chrysen
- 12. Benzo[b]fluoranthene
- 13. Benzo[k]fluoranthene
- 14. Benzo[e]pyrene
- 15. Benzo[a]pyrene
- 16. Perylene
- 17. Indeno[1,2,3-cd]pyrene
- 18. Dibenzo[a,c]anthracene
- 19. Benzo[g,h,i]perylene
- 20. Coronene



**Fig. 2.** Chromatogram of nitroarenes standards.

가장 낮은 분포를 나타내었다(표 2).

**Table 2.** The monthly average concentration of airborne suspended particulates.

unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ( ) : range

Month	Total*	Coarse(%)	fine(%)
1990 Sep	102.15( 65.00-135.81)	45.52	54.48
Oct	163.88(117.87-198.99)	45.44	54.56
Nov	234.63(183.35-317.60)	46.79	53.21
Dec	231.04(175.87-315.78)	36.92	63.08
1991 Jan	200.61(159.79-266.63)	42.53	57.47
Feb	277.13(243.48-307.05)	25.16	74.84
Mar	205.50(182.54-241.27)	43.69	56.31
Apr	331.07(216.42-424.27)	41.02	58.98
May	229.72(181.37-256.79)	49.03	50.97
Jun	195.59(157.74-217.22)	49.53	50.47
Jul	131.33( 84.86-163.01)	48.71	51.29
Aug	118.53( 57.01-177.11)	52.06	47.94
Mean	201.77( 57.01-424.27)	42.62	57.38

\* No. of samples=3, sampling duration: 1 weeks

그 중 조대입자는 평균 42.62%, 미세 입자는 57.38%로 약 4:6의 비로서 미세입자가 많은 부분을 차지함을 알 수 있었고 특히 2월은 미세입자의 농도가 연중 가장 높았으며 조대입자의 농도가 가장 높은 달은 4월이었다.

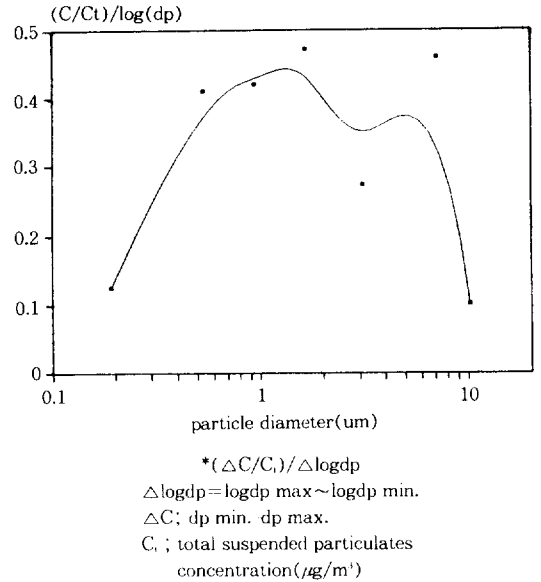
월별 분진 농도를 계절로 구분하여 살펴보면 봄에 255.43, 여름에 148.48, 가을에 166.89, 겨울에 236.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄에 가장 높은 농도를 보였으며 겨울, 가을, 여름의 순으로 줄어들었다. 이중 농도가 높은 봄과 겨울의 조대.미세 입자의 비율을 비교해 보면 겨울에는 조대입자가 34.55%, 미세입자가 65.45%이고 봄에는 각각 44.10%, 55.90%이었다. 이로써 겨울은 분진농도가 더 높았던 봄을 비롯한 다른 계절에 비해 미세입자의 영향을 많이 받고, 봄에는 조대입자의 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.

7단계의 입경으로 분리 포집한 분진의 각 입경별 분포는 입경 0.38 $\mu\text{m}$ 이하의 분진이 57.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고 이는 전체 분진량의 28.53%를 차지하는 양이며 가장 적은 부분은 2.1-4.1 $\mu\text{m}$ 의 크기를 가진 분진이었다.

입경 분포를 정규화시킨 질량분포(normalized mass distribution)식을 이용하여 단위입경당 농도로써 그림 3에 나타내었다. 분진량이 0.38 $\mu\text{m}$  이하 부분과 4.2-10.1 $\mu\text{m}$  부분에서 크게 증가되어 2.1-4.1 $\mu\text{m}$ 를 경계로 전형적인 도시형 분포인 이산형(bimodal)을 나타내었다.

### 3.2 분진 추출유기물 농도

조대와 미세입자별로 추출한 부유분진 중 유기물의 양은 표 3에서와 같이 조대 입자가 2.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,



**Fig. 3.** Normalized mass distribution of airborne particulates in Seoul.

미세 입자가 평균 5.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이는 총 유기물량의 각각 33.74%, 66.26%에 해당하는 값으로 미세입자가 조대입자보다 약 2배 가량 유기물 농도가 높음을 알 수 있었다.

추출된 유기물의 계절별 변화를 보면 겨울이 9.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 봄이 8.94, 가을이 7.58, 여름이 6.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 계절적으로 조대입자의 농도는 거의 일정한 반면 미세입자는 겨울철에 미세 75.95%, 조대 24.05%로 다른 계절에 비해 미세의 비율이 높은 것으로 나타났다(그림 4).

유기물을 액성별로 분획화한 결과 미세입자중 중성유기물분획은 평균 4.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체의 84.28%를 차지하였으며, 조대입자에서도 1.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체의 77.70%이었다.

### 3.3 PAHs와 nitroarenes의 농도

PAHs는 3개의 벤젠고리로 가장 분자량이 적은 acenaphthylene에서부터 6개고리의 거대분자인 coronene까지 모두 정성분리가 가능하였으나 이성질체인 dibenzo[a,c]anthracene과 dibenzo[a,h]anthracene의 분리는 불가능하였다.

조대와 미세입자로 구분하여 매월 측정된 PAHs의 농도를 계절별로 나누어 표 4에 나타내었다. 그 가운데 acenaphthylene은 본 실험의 검출 한계내에서 검출되지 않았으며 acenaphthene과 fluorene은

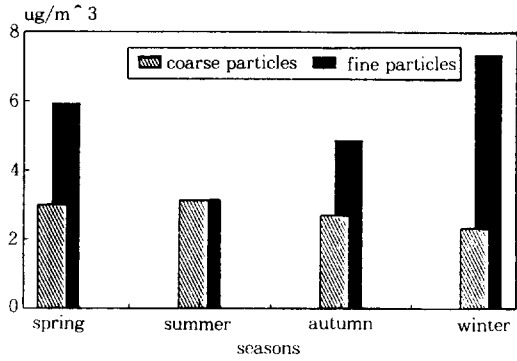


Fig. 4. The seasonal variation of extractable organic matters.

Table 3. Extractable Organic Matters(EOM) Concentration of Airborne Suspended Particulates.

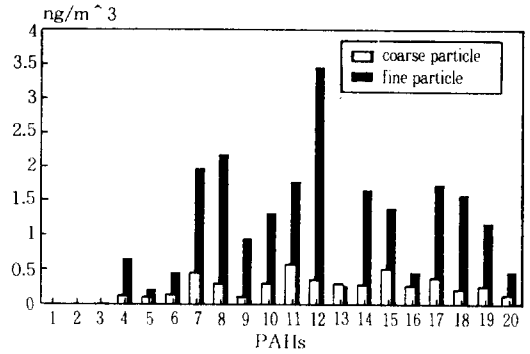
		unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ( ) : %	
Month		Coarse	Fine
1990	Sep	2.40(35.8)	4.32(64.2)
	Oct	2.42(29.3)	5.83(70.7)
	Nov	3.29(42.3)	4.49(57.7)
	Dec	2.53(20.2)	9.93(79.8)
1991	Jan	3.25(27.7)	8.59(72.3)
	Feb	1.21(25.0)	3.56(75.0)
	Mar	2.99(34.1)	5.83(65.9)
	Apr	3.23(30.5)	7.25(69.5)
	May	2.74(36.0)	4.78(64.0)
	Jun	3.68(62.7)	2.20(37.3)
	Jul	3.79(54.1)	3.21(45.9)
	Aug	1.88(32.8)	3.93(67.2)
Mean $\pm$ S.D.		2.74(33.74) $\pm$ 0.70	5.38(66.26) $\pm$ 2.24

9월 조대, 10월 미세입자를 제외한 모든 달에서 검출되지 않았다.

미세입자 가운데 benzo(b)fluoranthene이 연평균 3.46ng/m<sup>3</sup>로써 가장 높은 농도를 나타내었으며 pyrene이 2.20ng/m<sup>3</sup>, fluoranthene이 1.96ng/m<sup>3</sup>, 그외에 chrysene, indeno[1,2,3-cd]pyrene등이 높은 농도를 보였다. 또한 benzo(b)fluorene, benzo(k)fluoranthene, 9-methylanthracene 등이 상대적으로 적은 농도를 나타내었다(그림 5).

마찬가지로 조대입자에서는 chrysene이 0.57ng/m<sup>3</sup>, benzo(a)pyrene이 0.50ng/m<sup>3</sup>, fluoranthene 등이 높은 농도를 나타냈으며 anthracene, benzo(b)fluorene이 낮은 농도를 나타내었다.

전체적으로 benzo(k)fluoranthene을 제외한 모든 PAHs의 농도는 미세입자가 조대에서보다 1.7-9.7배 높은 값을 보였다. 또한 대부분의 PAHs가 겨울



- |                        |                                    |
|------------------------|------------------------------------|
| 1. Acenaphthylene      | 11. Chrysene                       |
| 2. Acenaphthene        | 12. Benzo(b)fluoranthene           |
| 3. Fluorene            | 13. Benzo(k)fluoranthene           |
| 4. Phenanthrene        | 14. Benzo(c)pyrene                 |
| 5. Anthracene          | 15. Benzo(a)pyrene                 |
| 6. 9 methylanthracene  | 16. Perylene                       |
| 7. Fluoranthene        | 17. Indeno[1,2,3-cd]pyrene         |
| 8. Pyrene              | 18. Dibenzo[a,c] + [a,h]anthracene |
| 9. Benzo(b)fluorene    | 19. Benzo(g,h,i)perylene           |
| 10. Benzo(a)anthracene | 20. Coronene                       |

Fig. 5. The yearly average concentration of PAHs.

철에 높은 농도로 검출되었으며 여름에 낮았다.

Nitroarenes은 1-nitroacenaphthylene을 제외한 9종이 검출되었다. Nitroarenes의 계절별 미세와 조대입자의 변화를 그림 6에 나타내었다.

이 중 2,7-dinitrofluorene이 미세입자에서 연 평균 0.94ng/m<sup>3</sup>으로 가장 높은 농도를 나타내었고, 1,8-dinitropyrene이 가장 적은 농도로 검출되었다. 다른 nitroarenes는 대체로 비슷한 농도분포를 보였다.

2,7-dinitrofluorene이 연 평균 0.43ng/m<sup>3</sup>으로 조대입자에서도 역시 가장 높은 농도를 나타낸 반면에 1,8-dinitropyrene이 0.35ng/m<sup>3</sup>으로 미세입자에서와는 다르게 높은 농도로 검출되었다.

미세입자와 조대입자의 nitroarenes의 함유비율은 2-nitronaphtalene과 1,8-dinitropyrene을 제외하고 모두 미세입자에서 약 1.3-4.0배 높았다(표 5).

### 3.4 분진중 PAHs의 발암위험성

1년동안 측정된 분진중 발암성 PAHs의 각 연평균 농도와 BaP을 기준으로 0.004-1.11의 범위로 조사된 각 PAHs의 순위상관발암성을 근거로 초과 발암확률을 구한 결과 사람에게 있어 유력한 발암물질(probable human carcinogen)로 알려진 BaP에 의해서는 노출인구 백만명당 0.96명의 초과발암확률을 나타내는 것으로 산출되었다. 또한 사람에게 가능한(possible) 발암물질로 알려진 indeno[1,2,3-cd]pyrene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene,

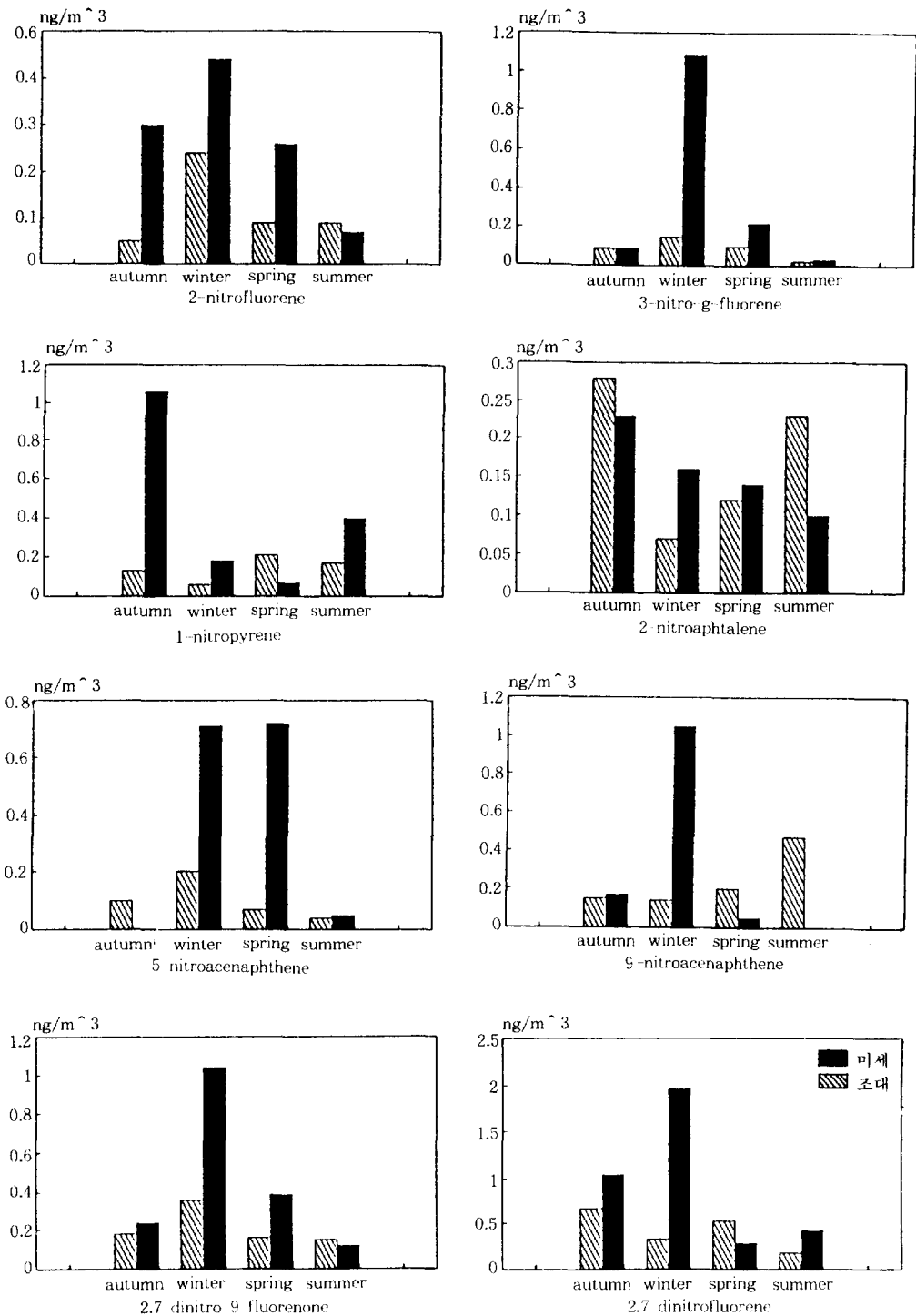


Fig. 6. The seasonal variation of nitroarenes concentrations in coarse and fine particulates.

**Table 4.** The seasonal concentrations of PAHs in coarse and fine particulates.

PAHs	Season*		Spring		Summer		Autumn		Winter	
	unit; ng/m <sup>3</sup>		Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine
	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine
Acenaphthylene	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acenaphthene	ND	ND	ND	ND	0.02	0.03	0.02	0.03	ND	ND
Fluorene	ND	ND	ND	ND	0.03	0.07	0.03	0.07	ND	ND
Phenanthrene	0.03	0.39	0.05	0.10	0.31	0.14	0.10	0.14	0.10	1.94
Anthracene	0.08	0.48	0.02	0.06	0.10	0.09	0.20	0.09	0.20	0.21
9-methylanthracene	0.02	0.35	0.19	0.34	0.13	0.39	0.19	0.39	0.19	0.71
Fluoranthene	0.19	0.71	0.13	0.12	0.22	0.52	1.22	0.52	1.22	6.50
Pyrene	0.10	0.98	0.05	0.11	0.05	0.27	0.94	0.27	0.94	7.43
Benzo[b]fluorene	0.08	0.51	0.05	0.12	0.14	0.08	0.13	0.08	0.13	3.03
Benzo[a]anthracene	ND	0.70	0.25	0.42	0.15	0.67	0.81	0.15	0.67	3.43
Chrysene	0.33	1.60	0.19	0.22	0.15	0.70	1.59	0.15	0.70	4.54
Benzo[b]fluoranthene	ND	2.44	0.21	0.76	0.65	1.54	1.58	0.65	1.54	9.09
Benzo[k]fluoranthene	0.13	0.57	0.19	0.26	0.04	0.22	0.83	0.04	0.22	ND
Benzo[e]pyrene	0.15	0.68	0.40	0.26	0.47	2.19	0.10	0.47	2.19	3.44
Benzo[a]pyrene	ND	0.88	0.49	0.56	0.35	0.52	1.15	0.35	0.52	3.57
Perylene	0.11	ND	0.35	0.37	0.25	0.43	0.34	0.25	0.43	1.00
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.13	1.12	0.30	0.74	0.39	0.44	0.66	0.39	0.44	4.61
Dibenzo[a,c] + [a,h]anthracene	0.12	2.29	0.34	0.49	0.39	0.08	ND	0.39	0.08	2.42
Benzo[g,h,i]perylene	0.14	0.87	0.08	0.11	0.06	0.51	0.72	0.06	0.51	3.14
Coronene	ND	ND	0.17	ND	0.20	0.17	0.13	0.20	0.17	1.68

\* Spring: 91. 3-5; summer: 91. 6-8; autumn: 90. 9-11; winter; 90. 12-91. 2, ND; Not Detected

**Table 5.** The yearly average concentration of nitroarenes.

Nitroarenes	unit; ng/m <sup>3</sup> · ( ) ; range	
	Coarse	Fine
1-nitroacenaphthylene	ND	ND
2-nitronaphthalene	0.18(ND-0.61)	0.16(ND-1.45)
3-nitro-9-fluorenone	0.09(ND-0.23)	0.36(ND-1.54)
5-nitroacenaphthene	0.10(ND-0.60)	0.37(ND-1.35)
9-nitroanthracene	0.24(ND-0.26)	0.32(ND-2.19)
2-nitrofluorene	0.12(ND-0.60)	0.27(ND-1.14)
1-nitropyrene	0.14(ND-0.63)	0.43(ND-1.73)
2,7-dinitro-9-fluorenone	0.41(ND-0.41)	0.51(ND-2.34)
2,7-dinitrofluorene	0.43(ND-1.38)	0.94(ND-3.31)
1,8-dinitropyrene	0.31(ND-0.17)	0.13(ND-0.56)

\* ND; Not Detected

dibenzo-[a,h]anthracene에 대해서는 각각 1.08, 0.3, 0.018, 0.98명의 초과 발암 확률이 산출되었다(표 6).

#### 4. 고 찰

서울의 신촌지역에서 1년간 채취한 부유분진의 연평균 농도는 201.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 우리나라 대기환경 기준인 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 훨씬 초과하는 수준이었다. 특히 10 $\mu\text{m}$ 이하의 호흡성 분진(respirable particulates)은 총 농도의 82%에 해당하는 167.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

으로 이는 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 규제하고 있는 미국의 환경 기준 농도를 훨씬 상회하는 수준이었다. 또한 분진의 입경분포를 정규화시켜 단위 입경당 농도로 비교해 보면 미세입자(2 $\mu\text{m}$ 이하)는 전체의 94%를 차지하고 있었다. 이러한 오염양상에 비추어 볼 때에 본 조사연구 지역의 분진오염은 매우 심각한 것으로 판단되었으며 주요오염원으로는 교통기관의 연소 배출물인 것으로 추측되었다. 그러나 부유분진농도와 교통량과의 통계적인 상관성은 교통통계량 자료가 매우 부실했기 때문에 증명할 수 없었다.

교통량은 POM의 농도와 독성에도 큰 영향을 미친다(Jari, 1988). 자동차 연소 배출물이 동물 수준에서 암을 유발시키며 대기 부유분진에 의한 암발생에 큰 요인으로 작용함이 이미 밝혀졌다. 특히 교통차량의 연소 배출물 가운데 약 75%를 차지하고 있는 중성성분중의 PAHs, nitroarenes, azaarenes 등이 인체에 암을 유발하는 것으로 알려져 있다(Crebelli, 1988). 본 연구결과에서도 조대와 미세에서 중성분획이 전체 유기물의 70%이상을 차지하고 있었고 그중 20종의 PAHs와 9종의 nitroarenes가 동정되었다. PAHs는 계절적으로 겨울에 높은 농도로 검출되었으며 특히 미세 입자에서 다량 검출되었다.

Table 6. The life time excess risk estimates due to BaP and other PAHs in ambient air of Seoul.

PAHs	Concentrationen (ng/m <sup>3</sup> )	Rank relative carcinogenicity	Excess risk estimates(per 10 <sup>6</sup> )
Benzo(a)pyrene	1.84	1.0	0.960
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	2.04	0.232	1.080
Dibenzo(a,h)anthracene	1.68	1.11	0.980
Benzo(g,h,i)perylene	1.34	0.022	0.460
Benzo(b)fluoranthene	4.00	0.141	0.300
Benzo(a)anthracene	1.54	0.145	0.116
Pyrene	2.48	0.081	0.100
Benzo(k)fluoranthene	0.54	0.066	0.018
Chrysene	2.16	0.0044	0.004
Benzo(e)pyrene	1.90	0.004	0.004

본 조사에서 정량된 BaP농도와 CO농도(환경처, 1991)를 이용해 오염원을 추정해 보면 자동차 배출연소물에 의해서 오염된 대기는 BaP에 대한 CO농도비가 밤과 겨울에 높은 것으로 나타난다는 Grosjean(1983)의 연구결과와 일치해(겨울 2.24, 여름 0.72) 교통차량이 PAHs의 유의한 오염원으로 작용했음을 알 수 있었다.

입자성 POM에의 폭로는 비알러지성 피부염, 피부암, 폐암 등을 유발시키는데(NAS, 1983), BaP과 같은 대기오염물질의 1 $\mu$ g/m<sup>3</sup>의 증가는 암사망율을 5%증가시킨다. BaP의 주요오염원인 디젤 차량배출물에 의한 폐암의 위험도는 미국대도시 거주자의 경우 인구 백만명당 5명의 추가 발암 사망확률을 나타내는 것으로 연구된 바 있다(Cuddihy, 1984).

현재 대기중 BaP의 농도는 각국의 대기오염방지 정책에 따라 세계적으로 감소추세에 있다(Peter, 1991). 미국 EPA(1979)에서는 32개 미국 도시지역의 평균 BaP의 농도가 1966년 약 3ng/m<sup>3</sup>에서 1970년 약 2ng/m<sup>3</sup>으로 줄어들었다고 보고하였다. 본 연구에서는 BaP이 연간 평균 1.84ng/m<sup>3</sup>의 농도로 나타났다. 권숙표 등(1978)에 의해 처음으로 서울시 대기중 BaP의 농도가 5.02ng/m<sup>3</sup>으로 결정된 이래 그간의 조사자들에 의한 농도변화는 연도별로 감소추세에 있다고 볼 수 있다.

그러나 최근 연구보고에 의하면 PAHs보다 더 강한 돌연변이원성 물질이고 동물실험에서 발암성이 인정되고 있는 nitroarenes가 분진에 의한 인체의 위해를 가중시킨다고 한다. 그동안 우리나라 대기중에서의 그 오염수준은 거의 밝혀지지 않은 상태인데 본 조사결과에서 미량이지만 하나 nitroarenes가 검출된 것을 볼 때에 앞으로 이에 대한 연구가 시급히 요망된다.

이러한 유독물질의 관리를 위해서 행해지는 과학적 평가방법인 위해성 평가는 그 불확실성(uncer-

tainty)이 논란의 대상이 되고 있는데도 불구하고 현재 선진 각국의 정책입안의 근거가 되고 있다. 우리나라에 이 방법론에 대한 연구가 시작된 것은 최근으로 본 연구결과 분진 중 BaP에 의한 위험도는 인구 백만명당 0.96명의 초과 발암확률로 산출되어 비교적 낮은 위험도를 나타내고 있었다. 이 산출에 이용된 단위 위험도치는 Collins등(1991)의 추계치와 일치한 유의한 값으로 판단되어 사용하였다.

그러나 분진중에는 BaP이외에도 100가지 이상의 PAHs가 존재하며 이들의 존재에 의한 위해의 가중을 간과해서는 안된다. 이들의 위험도를 평가하기 위해 사용한 순위 상관 발암성(rank relative carcinogenicity)은 BaP에 대한 PAHs의 상대적인 발암성으로(Clement, 1988; Krewski, 1989) 아직까지 dibenz[a,h]anthracene만이 BaP보다 더 강한 발암물질인 것으로 연구되었으며 다른 PAHs는 이보다 덜한 잠재위험을 갖고 있다고 하였다. 본 연구에서는 indeno[1,2,3-cd]pyrene과 dibenz[a,h]anthracene등이 BaP에 상응하는 발암 확률을 갖고 있는것으로 밝혀져 BaP이외에도 다른 PAHs의 복합적인 발암영향을 간과할 수 없는 것으로 나타났다.

이때 이러한 각 물질의 산출 위험도치를 개별적으로 적용하여 전체의 위험도로써 평가하는 것은 그 발암력을 과대 평가하는 오류가 될 수 있다. 실제로 이들은 대기중에 혼합으로 존재하며 각 물질들이 상승, 상가, 길항 효과를 일으킬 수 있기 때문이다. 그러나 현재까지 단독물질에 의해 평가된 위험도는 실제로 복합물질로 존재하며 일으킬수 있는 위해 효과를 전혀 고려하지 못한다는 지적이 있어왔기 때문에 본 연구에서 시도된 이러한 물질별 비교평가는 의미가 있다고 판단되며 실제적인 관리를 위해서는 앞으로 이들 물질외에도 많은 복합물질에 대한 부분도 연구되어야 할 것이다.



5. 결 론

서울시 대기중 부유분진의 오염과 그중 다환방향족 유기오염물질에 의한 발암 위해성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 총부유분진 오염도는 연평균 207.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 이중 94% 이상이 미세먼자인 것으로 나타났다. 특히 겨울과 봄에 높은 오염도를 보였으며 2.1-4.1 $\mu\text{m}$ 를 경계로 전형적인 도시형 이산분포(bimodal)를 나타내었다.

2) 분진 유기추출물의 중성분획중에 존재하는 PAHs 21종을 분석한 결과 acenaphthylene과 acenaphthene은 전 조사기간내에서 검출되지 않았으며, fluoranthene이 연평균 2.38 $\text{ng}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었다. 또한 대표적 발암물질인 benzo(a)pyrene은 1.84  $\text{ng}/\text{m}^3$ 의 농도였으며 nitroarenes중에는 2,7-dinitrofluorene이 가장 높은 농도로 검출되었고 대표적 nitroarenes인 1-nitropyrene은 연평균 1.56  $\text{ng}/\text{m}^3$ 의 농도였다. 입경별로는 미세먼자에서의 농도가 높았으며 계절별로는 겨울철이 높았다.

3) 다단계 모델에서 얻어진 단위위해도치와 이상의 노출결과를 토대로 산출된 BaP에 의한 초과 발암 사망률은 인구 백만명당 0.96명의수준으로 나타났다. 또한 BaP에 대한 상대적 순위 발암성을 토대로 구해진 각 PAHs의 초과발암 확률은 0.004-1.08 명으로 나타났다.

이상에서 대기중 부유분진이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해서 부유분진의 대기중 농도 뿐만 아니라 분진의 POM에 의한 발암 위해도를 평가해 본 결과 BaP는 비교적 낮은 위해도를 나타내었으나 다른 PAHs를 비롯한 많은 복합유기물질의 존재에 따라 발암 위해가 더욱 가중된다는 것을 알 수 있었으며 궁극적으로 이러한 물질의 관리를 위한 위해성 평가의 적용이 시급한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

권숙표, 정 용, 임동구 (1978) 서울시 대기중 유해 분진의 성분에 관한 조사 연구, 대한예방의학회지, 11(1), 65-75.  
 김중만, 정용 (1992) 대기중 Benzo(a)pyrene의 외삽방법에 따른 위해도 추계치의 비교연구, 한국대기보전학회지, 18(1), 29-37.  
 장재연외 4인 (1988) 서울시 대기중 다핵 방향족 탄화수소류의 분리 및 동정, 한국대기보전학회지, 4(2), 47-56.

정 용 외 2인 (1986) 오염물질기준지수 (Pollutant Standards Index)를 이용한 대기질의 평가, 예방의학회지, 19(1), 65-75.  
 정 용 (1989) 한국에서의 환경오염에 의한 위해성 관리의 종합적 접근 방법, 한국환경독성학회지, 4(1-2), 55-65.  
 조성준 (1990) 대기부유분진중 nitroarenes 오염도와 그 돌연변이원성에 관한 조사연구, 한국환경독성학회지, 5(3-4), 19-28.  
 통계청 (1991) 사망원인 통계연보.  
 환경처 (1991) 환경연감.  
 Carnow, B.W., Meier, P. (1973) Air pollution and pulmonary cancer. Arch. Environ. Health., 27, 207-218.  
 Clement Associates (1988) Comparative potency approach for estimating the cancer risk associated with exposure to mixture of PAHs. ICF-Clement Associates, Fairfax, VA.  
 Collins et al (1991) Risk assessment for Benzo(a)pyrene. Regule. toxico. and pharma., 13, 170-184.  
 Crebelli R. et al (1988) In vitro and in vivo mutagenicity studies with airborne particulate extracts. Mut. Res., 565-575.  
 Cuddihy R.G. et al (1984) Health risks from light-duty diesel vehicles. E.S.T. 18,(1), 13A-21A.  
 Graedel T. E. et al (1986) Atmospheric chemical compounds: Sources, Occurrence, and Bioassay; Academic: New York.  
 Grosjean D (1983) Polycyclic aromatic hydrocarbons in LA air from samples collected on teflon, glass and quartz filter. Atmos. Env., 17, (12), 2565-2573.  
 International Agency for Reserch on Cancer (1983) International Agency for Research on Cancer Benzo(a)pyrene. IARC Monogr Eval Carciong Risk chem Hum, 32, 211-224.  
 Jari T. et al (1988) Polynuclear Aromatic compound and genotoxicity in particulate and vapor phases of ambient air; Effect of traffic, season, and Meteorological conditions. E. S.T., 22,(10), 1228-1234.  
 Krewski D. et al (1989) Carcinogenic risk assessment of complex mixtures, Toxicol. Ind. Health., 5, 851-867.  
 National Academy Science (1983) Polycyclic

- Aromatic Hydrocarbons: Evaluation of sources and effects, National Academy press. Washington DC.
- Peter F (1991) Seasonal variations and trends in concentrations of filter collected PAHs and mutagenic activity in the San Francisco Bay Area, JAPCA, 41, 276-281.
- Sasaki Y (1987) Carcinogenicity of extract of airborne particles using newborn mice and comparative study of carcinogenic and mutagenic effect of the extract, Arch. Environ. Health., 42,(1), 14-18.
- US EPA (1979) Multimedia health assessment document for polycyclic organic matter.