

서울북부 지역 미세먼지에 함유된 유해 중금속의 분석 및 건강위해성평가

박은정, 강미선, 유대은, 김대선¹, 유승도¹, 정규혁², 박광식*

동덕여자대학교 약학대학, ¹국립환경연구원 환경위해성연구부,
²성균관대학교 약학대학

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Fine Particles Collected in Seoul Metropolitan Area

Eun-Jung Park, Misun Kang, Dae-Eun You, Dae-Seon Kim¹,
Seung-Do Yu¹, Kyu-Hyuck Chung² and Kwangsik Park*

College of Pharmacy, Dongduk Women's University, #23-1, Wolgok-dong,
Sungbuk-gu, Seoul 136-714, Korea

¹National Institute of Environmental Research, Gyeongseo-dong, Seo-gu,
Incheon 404-170, Korea

²College of Pharmacy, Sungkyunkwan University, #300, Cheoncheon-dong,
Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT

Particulate materials (PM) less than 10 μm in diameter are of special interest in air pollution because they are respirable and responsible for the increasing mortality rate of lung cancer and cardiovascular diseases. These particles are often referred to as PM₁₀ and they are divided into a coarse fraction and a fine fraction which is also often referred to as PM_{2.5}. In this study, we monitored the TSP, PM₁₀, PM_{2.5} concentration of ambient air collected in northern part of Seoul in early spring and measured the concentration of heavy metals; Cr, Mn, Zn, As, Cd, and Pb. All the heavy metals were found in the collected particles and the concentrations were variable in the PM₁₀ and PM_{2.5}, respectively. The detected concentration ranges were Cr: ND~2,889 ng/m³, Mn: 2.4~257.9 ng/m³, Zn: ND~353.7 ng/m³, As: ND~22.3 ng/m³, Cd: 0.1~2.9 ng/m³, and Pb: ND~392.2 ng/m³ in fine particles. Heavy metal toxicity of the particles were also tested in H₉C₂ cell line derived from rat cardiomyocytes. As for the results of health risk assessment calculated by unit risk of IRIS, heavy metals in ambient air of Seoul metropolitan area were found to be responsible for the increase of total excess cancer risk. Among them, chromium (hexavalent) was found to be the most risky in fine particles of ambient air collected in the northern part of Seoul in early spring.

Key words : PM₁₀, PM_{2.5}, health risk assessment, cardiomyocyte, heavy metals

*To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-940-4522, E-mail: kspark@dongduk.ac.kr

서론

현대화, 산업화와 더불어 환경오염과 관련된 사회적 문제가 관심사로 부각되고 있다. 그 중 대기 오염은 자신이 생활하는 대기조건에 장시간 노출되어 건강을 위협받게 되므로 수질오염과 더불어 국가적 차원에서의 관리가 필요한 항목 중 하나이다. 대기오염의 가장 중요한 원인물질 중 하나인 먼지는 발생원에 따라 흙, 화분 등 자연적으로 발생하는 것과 자동차 매연, 공장 배기가스, 가정용 연료 연소 등 인위적인 활동에 의해 발생하는 것으로 분류된다. 그러나, 대개의 경우, 대기의 먼지 성분은 자연발생적인 것과 인위적 요인에 의한 것을 포함한 복합적 발생원을 가지고 있으며 (Kyotani and Iwatsuki, 2002), 따라서 그 입경에 따라 분류하는 것이 더 합리적이라 할 수 있다. 먼지의 크기별 분류는 입경이 10 μm 이내인 조대분진 (Coarse particle, PM_{10})과 입경이 2.5 μm 이내인 미세분진 (Fine particle, $\text{PM}_{2.5}$)으로 분류하는 것이 일반적이며, 최근에는 미세분진 (fine particle)보다 작은 극미세분진 (ultrafine particle)과 초미세분진 (nanoparticle)에 대한 관심도 증가하고 있다 (Hsiao *et al.*, 2000; Donaldson and MacNee, 2001). 조대분진은 주로 자연발생적인 성분을 그리고, 미세분진은 주로 인위적인 활동에 의해 생성된 성분을 함유하고 있는 것으로 확인되었다 (Hsiao *et al.*, 2000; Fang *et al.*, 2003).

과거에는 전 세계적으로 대기환경의 기준을 TSP (Total Suspended Particles)로 설정하고 있었으나, 최근에는 입경이 작은 먼지일수록 산업활동이나 건강에 미치는 위해성이 크다는 점이 강조되면서 대부분의 나라에서 PM_{10} 혹은 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 환경 기준을 설정해 놓고 있다 (Donaldson and MacNee, 2001). 이는 호흡기를 통해 급, 만성적으로 인체에 유해한 작용을 입힐 수 있는 호흡성 분진은 주로 PM_{10} 이하, 특히 $\text{PM}_{2.5}$ 가 주요 원인 물질이며 (Hsiao *et al.*, 2000), 대부분 상기도에서 흡착되어 타액과 함께 체외로 분비되는 입경 100 μm 이내의 TSP (Total Suspended Particles)와는 그 유해 작용기전이 다르기 때문이다. 호흡기를 통해 흡수되어 침착된 먼지에는 중금속과 유기화합물을 비롯한 수많은 유해 물질이 함유되어 있다 (Choi *et al.*, 2004). 역학조사

와 실험적 연구는 대기오염 물질이 호흡기와 심혈관 질환을 유도하거나 이를 악화시킬 수 있다고 보고하고 있으며, 대기오염에 의한 유병률 및 사망률간의 유의적인 상관관계도 입증되고 있다 (Hetland *et al.*, 2004). 특히, 미세먼지에 함유되어 있는 납, 카드뮴, 비소, 망간, 아연, 니켈, 크롬 등의 중금속이 인체에 흡수되어 활성산소를 생성하는 등 여러 가지 기전을 통해 호흡기 및 순환기계 뿐만 아니라 전신적인 질환을 야기할 수 있다는 보고들이 계속해서 발표되고 있다 (Donaldson and MacNee, 2001; Kumar and Jugdutt, 2003).

이에 본 연구에서는 일반적인 우리나라 대기상태에서의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 분포 및 그 속에 함유되어 있는 중금속 성분 및 함량을 파악하여 이를 흡입하였을 경우의 인체위해성을 평가하고, 또한 각종 중금속 성분이 호흡기를 통해 흡수되어 순환함으로써 심장세포에 야기될 수 있는 독성을 실험적 연구를 통해 비교, 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. TSP, PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 포집

먼지는 성북구 하월곡동에 위치한 동덕여자대학교 약학대학 옥상에서 채취하였다. 샘플러가 위치한 건물옥상은 교통량이 매우 많은 서울시 내부순환 고가도로 및 6차선 도로변으로부터 약 300 m 떨어진 곳에 위치하고 있으며 인근 지역에서는 아파트 건설공사가 진행 중이다. 먼지포집에 사용한 필터 (Whatman, Grade653)는 염화칼슘제를 넣어 둔 데시케이터 안에서 향량이 될 때까지 약 1시간 건조시킨 후 사용하였다. TSP는 하이볼륨에어 샘플러 (Tisch environmental, TE5200, USA)를 사용하였고 공기를 흡입하여 대기 중의 입자상 부유분진을 포집하였다. 포집은 매 회마다 24시간씩 이루어졌으며, 포집된 필터는 다시 데시케이터에서 이를 이상 건조시킨 후, 무게를 측정하고 아래 식에 따라 먼지농도를 계산하였다.

$$\text{비산먼지 농도 } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{W_e - W_s}{V} \times 10^3$$

W_e = 포집후 여과지의 질량 (mg), W_s = 포집전 여과지의 질량 (mg), V = 총 공기흡인량 (m^3)

이때 총 공기 흡인량은 포집직후의 유량 Q_s (m^3/min)과 포집종료 직전의 유량 Q_e (m^3/min)의 평균값에 포집시간 T (min)을 곱한 값으로 산출하였다 [흡인공기량 = $\{(Q_s + Q_e)/2\} \times T$]. 미세먼지는 Filter (PALL Life Sciences, Zefluor™ 2.0 μm)를 염화칼슘제를 넣은 테시케이터에서 이틀간 건조시킨 후, 필터 무게를 측정하고, Thermo electron coporation사의 FH95 Staubprobensammler particulate sampler에 고정시킨 후, 분당 16.7 liter로 24시간동안 포집하였다. $PM_{2.5}$ 는 직경 2.5 μm 이상의 먼지를 제외시키는 분립장치가 장착된 동일회사의 샘플러를 사용하였다. 포집이 끝난 필터를 다시 테시케이터 안에서 이틀간 건조시킨 후, 무게를 측정하여 먼지농도를 계산하였다 (Kyotani and Iwatsuki, 2002; Hutchison *et al.*, 2005).

2. 중금속 추출 및 분석

$PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 이 포집된 각각의 필터를 세절하여, 마개가 있는 유리병에 넣고 2.6 M HNO_3 와 0.9 M HCl 의 혼합액 15 mL을 넣은 후 60분 동안 실온에서 Sonication시킨 후 hot plate 위에서 2시간 동안 끓인 후, 뚜껑을 열어 혼합액을 완전히 증발시켰다. 5 mL의 탈이온수를 넣어 추출된 수용성 중금속 성분을 용해시킨 후 ICP-MS (Perkin Elmer, Elan 6100)로 중금속을 측정하였다. (Fang *et al.*, 1999; Voutsas and Samara, 2002; Samara and Voutsas, 2005).

3. 세포배양 및 중금속 노출

Rat cardiomyocyte에서 유래한 H_9C_2 cell line을 한국 세포주 은행으로부터 분양받아 FBS 10%를 함유하는 DMEM배지를 이용하여 37°C, 5% CO_2 incubator에서 계대배양하였다 (Spallarossa *et al.*, 2004). 미세먼지 속에 들어 있는 수용성 중금속물질이 심장근육세포에 미치는 영향을 추정하기 위한 납 ($Pb(NO_3)_2$), 카드뮴 ($CdCl_2$), 크롬 ($K_2Cr_2O_7$), 비소 (As_2O_3), 망간 (MnO_2), 아연 ($ZnCl_2$) 등 미세먼지에 함유된 것으로 확인된 6종의 중금속을 각각 3차 증류수에 녹인 후 희석하여 세포독성을 평가하였다 (Ponsoda *et al.*, 1995).

4. MTT assay

배양한 H_9C_2 cell을 trypsin처리하여 회수한 후

PBS로 2회 세척하고, 각 노출시간별로 96 well plates에 분주하여 37°C, 5% CO_2 배양기에서 24시간동안 부착시킨 후 6종류의 중금속을 농도별로 처리하였다. CO_2 배양기에서 각각 24 h, 48 h, 72 h, 96 h씩 노출시킨 후, 2 mg/mL의 MTT (3-[4,5-dimethylthiazol-2-yl]-2,5-diphenyl tetrazolium bromide)용액을 well당 40 μL 씩 넣어 배양기내에서 4시간 정도 반응시킨 후, plate에 있는 상등액을 제거하고, DMSO (Dimethyl Sulfoxide)를 well당 150 μL 씩 넣어 주었다. 30분 정도 가볍게 흔들어진 후, 540 nm에서 흡광도를 측정하였다. 각 농도당 4 well씩 처리하였으며, 각각의 O.D값을 대조군의 O.D값과 비교하여, 백분율로 표시하였다 (Hsiao *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2004).

5. 인체 위해성평가

본 연구에서 포집한 먼지 중에 함유된 비소, 카드뮴, 망간, 아연, 크롬, 납이 인체에 유입되었을 경우 발생하는 위해도를 평가하기 위해 우선 미국 환경청에서 제시한 IRIS (Intergrated Risk Information System) 자료를 검토하였다. 평가대상 중금속이 호흡경로를 통해 인체에 유입되었을 때의 발암성과 비발암성자료에 대해 검토하였으며, 호흡경로를 통해 인체 유입시 발암성을 갖는 물질로 분류된 경우는 호흡단위위해도를 (Inhalation Unit Risk), 비발암물질로 분류된 경우에는 호흡기준치 (Inhalation Reference Concentration, RfC)를 제시하였다. 납의 경우 현재 미국환경청에서 발암분류 상향조정을 위해 정량적인 위해도가 제시되어 있지 않은 관계로 TOX-RISK 패키지를 이용하여 도출된 multistage 모델의 납의 단위용량당 발생 가능한 발암잠재력을 산출한 국내 연구결과를 인용하여 본 연구에 적용하였다 (Korea Ministry of Environment, 2004) 발암성인 경우의 초과발암위해도는 현 오염도수준 ($\mu g/m^3$) \times 단위위해도 추계치 ($\mu g/m^3$)⁻¹로 계산하였다.

결과 및 고찰

사람들은 공기, 물, 토양 등 환경에 존재하는 수많은 오염물질에 여러 가지 경로를 통하여 노출된다. 그 중 공기는 직업적인 특수성을 제외하고는

자신이 생활하는 지역의 오염물질에 비선택적으로 노출된다. 대기 중의 오염물질 중 하나인 먼지가 인체에 미치는 위해성을 평가하기 위한 노력은 다양한 방면에서 이루어져 왔다. 본 연구에서는 비황사 기간인 늦겨울에서 초봄에 이르는 기간의 먼지를 포집하여 그 속에 함유된 중금속 성분을 분석하고, 이것이 인체에 흡입되었을 경우에 일으킬 수 있는 독성을 실험적으로 평가하고자 하였다. 시료 채집은 서울특별시 성북구 하월곡동에 위치한 동덕여자대학교 약학대학 옥상에서 이루어졌으며, 채집은 매 회 24시간씩 실시하였다. 1차 채집은 2월 24일에서 3월 11일에 걸쳐 이루어졌으며, 2차 채집은 황사가 예보된 4월 20일부터 4월 29일까지 이루어졌다. 1차 채집은 먼지의 독성을 평가하기 위한 본 연구 취지에 맞추기 위해, 비 갠 후 24시간

이후부터 이루어졌으며, 2차 채집은 황사기간 동안의 먼지의 크기별 분포의 변화를 제시하기 위하여, 연속적으로 실시한 자료를 제시하였다. 1차 채집하는 기간 동안의 기상상태는 평년과 크게 다르지 않았으며, 2월 22일과 3월 2일에 각각 3.0 mm, 2.4 mm의 비가 내렸다. 2차 채집기간 동안, 황사주의보는 4월 20일 오전 11시 30분부터 4월 21일 오전 2시 30분까지 1회 내려졌으나, 미약한 황사예보가 약 4일(4월 21~22일, 4월 28~29일)에 걸쳐 있었다. 4월 18~20일에 걸쳐 총 25.5 mm의 비가 내렸으며, 4월 24일과 26일에도 소량의 비가 내렸다.

비황사 기간(1차)과 황사기간(2차)에 포집된 먼지의 양과 농도를 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 비황사기간의 PM₁₀농도는 약 30~140 µg/m³의 범위를 나타내었으며 황사기간의 PM₁₀농도는 50~290 µg/m³의 범위를 나타내었다. 또한, 황사기간의 TSP 농도는 70~430 µg/m³의 범위를 나타내었다. 비황사 기간의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율은 50~80%에 이르는 반면, 황사기간의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율은 15~60% 정도로 나타났는데, 이러한 결과는 황사기간에는 주로 입자가 큰 TSP나 PM₁₀의 비율이 상대적으로 더 많이 상승한다는 기존의 연구결과와 일치하는 것이었다. 특히, 우리나라에서는 1983년부터 TSP(300 µg/m³)를 대기환경기준으로 설정하여 관리해 왔으나 2001년부터는 PM₁₀(150 µg/m³)으로 변경하여 관리하고 있는데, 이번 조사 결과에서 알 수 있듯이 황사주의보가 내려진 4월 20일의 경우에는 TSP(433 µg/m³)나 PM₁₀(290 µg/m³) 모두 국가환경기준을 초과하였다. 그러나,

Table 1. Particle concentration of Ambient air (I)

Sampling date	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{2.5} ratio
	Concentration (µg/m ³)	Concentration (µg/m ³)	PM _{2.5} /PM ₁₀ (%)
Feb. 24 th	45.8	25.0	54.5
Feb. 25 th	33.3	16.7	50.0
Feb. 26 th	37.5	20.8	55.5
Mar. 4 th	41.7	33.3	80.0
Mar. 7 th	141.7	112.5	79.4
Mar. 8 th	66.7	37.5	56.0
Mar. 10 th	75.0	41.7	55.6
Mar. 11 st	54.2	25.0	46.2
Average ± S.D	62 ± 33	39.1 ± 28.9	59.7 ± 12

Table 2. Particle concentration of Ambient air (II)

Sampling date	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	Particle ratio	
	Concentration (µg/m ³)	Concentration (µg/m ³)	Concentration (µg/m ³)	PM ₁₀ /TSP (%)	PM _{2.5} /PM ₁₀ (%)
Apr. 20th	433.0	290.0	42.9	67.0	14.8
Apr. 21st	173.0	120.4	29.2	69.6	24.3
Apr. 22nd	95.6	62.9	22.5	65.8	35.8
Apr. 23rd	71.0	50.0	23.3	70.4	46.6
Apr. 24th	85.2	57.1	21.3	67.0	37.3
Apr. 25th	95.9	70.8	37.5	73.8	53.0
Apr. 26th	81.2	52.9	31.7	65.1	60.0
Apr. 28th	196.0	160.4	100.0	81.8	62.3
Apr. 29th	190.1	90.0	47.3	24.2	26.9
Average ± S.D	157.9 ± 107.9	106.1 ± 73.6	37 ± 23.3	67.5 ± 8.7	40.1 ± 15.6

Table 3. Heavy metals concentration in PM₁₀ (unit: ng/m³)

Sampling date	Cr	Mn	Zn	As	Cd	Pb
Feb. 24th	1999.3	221.9	164.3	21.5	1.9	131.6
Feb. 25th	661.0	87.4	159.2	27.6	1.4	57.2
Feb. 26th	57.7	22.7	43.1	10.2	2.5	36.2
Mar. 4th	43.8	23.5	60.9	7.7	1.9	129.9
Mar. 7th	4256.8	391.9	889	22.6	4.4	839.2
Mar. 8th	247.1	55.1	321	16.0	2.6	336.7
Mar. 10th	88.2	396.6	114	4.9	1.6	54.6
Mar. 11st	79.1	32.1	116.3	11.2	0.3	44.5
Average	929	153.9	233.4	15.2	2.1	203.7
±S.D	±1402.2	±151.4	±260.2	±7.5	±1.1	±257.2

Table 4. Heavy metals concentration in PM_{2.5} (unit: ng/m³)

Date	Cr	Mn	Zn	As	Cd	Pb
Feb. 24th	2889.0	257.9	12.5	15.6	1.5	3.2
Feb. 25th	14.8	6.8	ND	10.7	0.1	1.1
Feb. 26th	ND	8.0	30.2	ND	1.1	ND
Mar. 4th	36.7	5.4	197.1	10.2	0.8	258.4
Mar. 7th	1615.6	156.1	353.7	12.7	2.9	392.2
Mar. 8th	1610.6	87.7	30.5	22.3	2.2	58.1
Mar. 10th	312.7	40.4	ND	15.5	1.6	37.4
Mar. 11st	ND	2.4	ND	0.6	0.2	10.2
Average	809.9	70.6	78	11	1.3	95.1
±S.D	±1024.8	±87	±121.1	±7.1	±0.9	±138.4

* ND : Not Detected

황사가 없었던 4월 23~26일에는 입경크기별 분포량이나 비율로 보았을 때, 비황사기간과 거의 동일한 양상을 보였다.

비황사기간에 포집한 분진에 함유된 중금속 양을 분석한 결과를 Table 3과 4에 나타내었다. 분석은 총 6종의 중금속(크롬, 망간, 아연, 비소, 납, 카드뮴)(Kagawa, 2002; Kim *et al.*, 2002)에 대해 한국 기초과학지원 연구원에 의뢰하여 이루어졌다. PM₁₀의 경우에는 6종의 중금속이 모든 시료에서 검출되었으며, 검출 양을 평균적으로 계산해 보았을 때, PM₁₀의 중금속 함량은 크롬, 아연, 납, 망간, 비소, 카드뮴 순이었으며, PM_{2.5}는 크롬, 납, 아연, 망간, 비소, 카드뮴 순이었다. 특히, 발암성 중금속으로 분류된 6가 크롬은 PM₁₀(평균 929.1 ng/m³)과 PM_{2.5}(평균 809.9 ng/m³)에서 매우 높게 나타나 원인분석 및 계속적인 관찰이 반드시 필요할 것으로 생각된다. 또한 PM₁₀에서의 최고 농도로 4,257 ng/m³ 수준

Table 5. Dose-response via inhalation of heavy metals

Heavy metals	Inhalation unit risk (µg/m ³) ⁻¹	RfC	Classification	Source
Chromium	1.2 × 10 ⁻²	-	Group A (Cr ⁶⁺)	USEPA IRIS
Manganese	-	5 × 10 ⁻⁵ mg/m ³	Group D	USEPA IRIS
Zinc	-	Not available at this time	Group D	USEPA IRIS
Arsenic	4.3 × 10 ⁻³	-	Group A	USEPA IRIS
Cadmium	1.8 × 10 ⁻³	-	Group B1	USEPA IRIS
Lead	1.2 × 10 ⁻⁵	-	Group B2	Korea MOE

Table 6. Excess cancer risk via inhalation of heavy metals in fine particles (PM_{2.5})

Heavy metals	Excess cancer risk		Comments
	Mean	Max	
Chromium	1.4 × 10 ⁻³	5.0 × 10 ⁻³	assumption Cr ⁶⁺ :Cr ³⁺ = 1:6
Manganese	-	-	
Zinc	-	-	
Arsenic	4.7 × 10 ⁻⁵	9.6 × 10 ⁻⁵	
Cadmium	2.3 × 10 ⁻⁶	5.2 × 10 ⁻⁶	
Lead	1.1 × 10 ⁻⁶	4.7 × 10 ⁻⁶	

* Hexavalent Chromium is assumed to be 1/7 of total chromium.

까지 검출되었는데 이는 극히 드문 경우라고 생각되며 환경중에서 정상적으로 나타나는 농도라고 보기에는 어려운 점이 있다. 2월 말부터 3월 초까지 약 보름간 채집한 총 8건의 시료에 대해 중금속을 분석한 결과, 이 기간동안의 중금속 농도는 시료 채집일에 따라 그 차이가 매우 크다는 것을 알 수 있었다(Table 3, 4). 단기간에 걸쳐 채집한 미세먼지의 발생량과 유해성분의 농도가 일정하지 않다는 것은 먼지를 채집한 주변의 미세먼지 배출 환경이 고정적이지 않다는 것을 의미한다. 즉, 시료를 채집한 동덕여자대학교 약학대학 건물옥상은 교통량이 매우 많은 대로변(서울시 내부순환도로 통과 지역)과 아파트 건설현장에 인접하였기 때문에 교통량, 주행차량의 종류, 풍향 등에 따라 가변성이 매우 높은 환경이며, 따라서 미세먼지 속에

함유된 유해중금속의 농도 차는 이러한 환경적 조건을 반영한 것이라 판단된다. 미국환경청은 발암성과 비발암성 중금속을 노출경로에 따라 다르게 구분하여 그 위해도를 제시하였으나, 먼지의 인체 독성을 평가하고자 계획한 본 연구에서는 호흡노출에 의한 발암성만을 고려하여 미국환경청의 IRIS에 제시된 단위위해도를 준용하였으며 (Table 5), 흡입된 미세먼지 (PM_{2.5}) 100%가 인체 내부로 들어와 노출된다는 가정 하에 각 중금속의 초과발암위해도를 계산하여 Table 6에 나타내었다. 납의 경우 IRIS에는 단위위해도값이 제시되어 있지 않으며 현재 발암성에 대한 용량-반응평가를 재검토하고 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 중금속의 발암위해도를 중심으로 위해성평가를 수행하였으며 납의 경우 Tox-Risk™을 사용한 용량반

응평가에 관한 국내연구결과를 인용하여 사용하였다. 노출 평균값으로 계산하였을 경우, 크롬에 의한 초과발암위해도가 1,000명당 1.4명으로 가장 높게 나타났고, 비소와 카드뮴, 납에 의한 초과발암위해도는 백만명당 각각 47명, 2.3명, 1.1명이었다. 크롬의 경우 3가는 발암성을 갖지 않으나 6가 크롬은 발암성을 가지며, 총 크롬중 6가 크롬에 의한 발암(치사율)에 대한 기여는 1/7에 해당한다고 한다 (<http://toxnet.nlm.nih.gov>). 이에 근거하여 6가 크롬의 농도를 측정값의 1/7로 보정하여 위해성평가에 사용하였다. 그러나 크롬의 경우 노출값이 측정기간중 일정하지 않고 그 변화의 폭이 비정상적으로 크게 나타났으며 최고값 역시 비정상적 수준으로 높은 농도를 보여 크롬에 대한 위해성평가 결과는 정상적인 대기환경상태를 반영한 것이라고 보기에

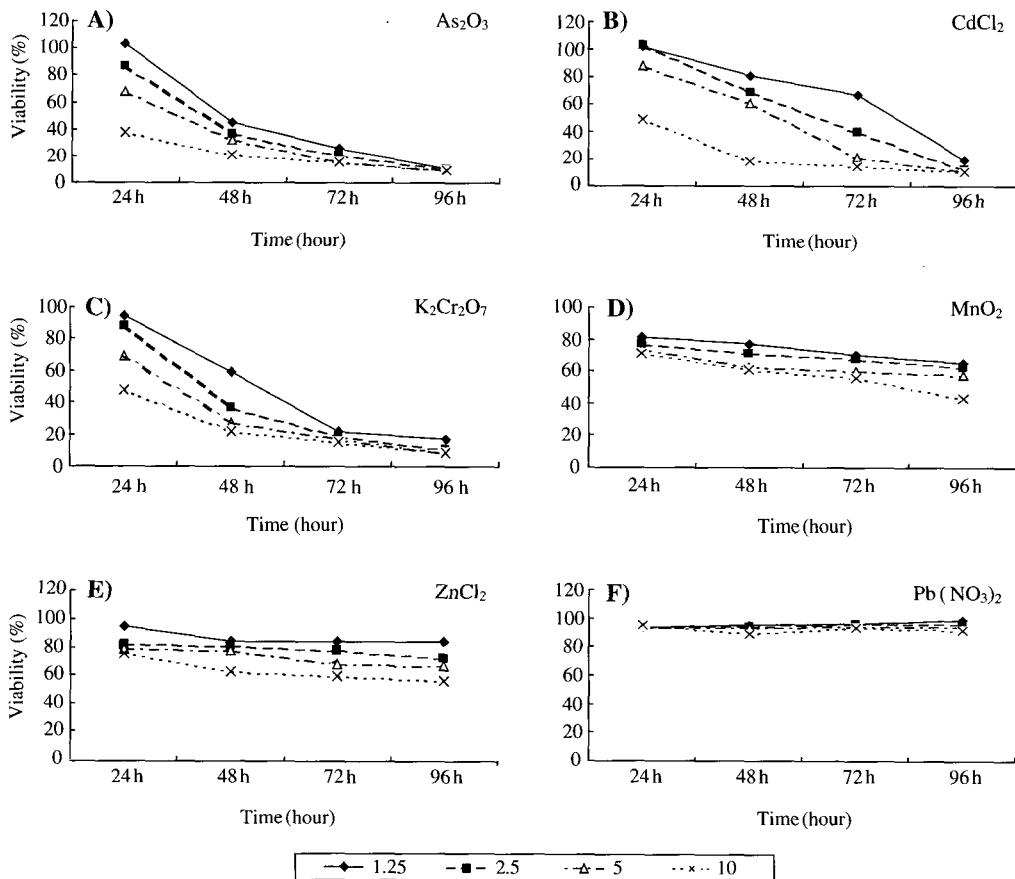


Fig. 1. Cytotoxicity of Heavy metals in rat cardiomyocytes H₉C₂.

는 무리가 있다고 판단된다. 또한 미국 환경청 IRIS에서는 6가 크롬의 농도가 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상일 경우 IRIS에서 제시한 단위위해도는 신뢰성이 낮다고 언급하고 있으므로 본 연구에서의 크롬에 대한 위해도는 제대로 환경영향을 제대로 반영하였다고는 볼 수 없다. 따라서 크롬 등 유해중금속의 위해성평가를 위해서는 향후 보다 장기간의 모니터링자료가 축적되어야만 가능하리라 본다.

한편, 미세먼지의 인체영향 중 심부전 또는 심혈관계에 미치는 영향을 평가하기 위한 기초연구로서 우선 미세먼지에 함유된 것으로 확인된 중금속에 대해 rat cardiomyocyte에서 유래한 H_9C_2 세포주를 이용하여 세포독성 실험을 실시하였다(Fig. 1 A-F). 그 결과 비소, 크롬 및 카드뮴의 세포독성이 매우 강하게 나타났으며 상대적으로 망간, 아연 및 납은 낮게 나타났다. 이는 미세먼지를 통해 동일한 양의 중금속이 흡입되었을 경우 심부전 또는 심혈관계에 독성을 나타내는 중금속의 독성크기를 예측할 수 있는 중요한 자료로 사료된다. 비록, 중금속의 흡수, 분포 및 배설의 기전이 상호간에 차이가 있어 인체에 나타날 수 있는 건강영향의 크기가 *in vitro* 실험결과를 그대로 반영할 수는 없다고 하더라도 세포독성이 강한 중금속이 일차적으로 심부전의 원인물질로서 더 크게 기여할 것이라는 것은 쉽게 예측할 수 있다. 납은 장기간 노출될 경우 적혈구의 heme 합성을 억제함으로써 빈혈 등을 유발하는 것으로 알려져 있으나 본 연구결과 심근세포에 미치는 독성은 상대적으로 매우 미약하였다. 크롬의 경우 미세먼지중의 농도도 가장 높게 나타났고, 단위위해도가 커 초과발암위해도가 높게 나타났을 뿐만 아니라 심근세포에 대한 독성영향도 타 중금속에 비해 매우 강하게 나타남으로써 심부전 또는 심혈관계에 미칠 영향도 매우 클 것으로 사료된다. 따라서 향후, 미세먼지의 유해중금속 관리를 위한 우선순위물질 선정시 크롬의 적정관리가 우선적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구는 미세먼지에 대한 환경관리기준 설정뿐만 아니라 미세먼지 중에 함유된 유해물질의 관리를 위한 우선순위 선정시 활용될 수 있는 중요한 기초자료를 제공하였다고 판단되며 향후 보다 상세한 연구를 통해 이를 뒷받침 할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업으로 지원받은 과제입니다.

참고 문헌

- Choi JH, Kim JS, Kim YC, Kim YS, Chung NH and Cho MH. Comparative study of $\text{PM}_{2.5}$ -and PM_{10} -induced oxidative stress in rat lung epithelial cell, *Journal of Veterinary Science* 2004; 5: 11-18.
- Donaldson K and MacNee W. Potential mechanisms of adverse pulmonary and cardiovascular effects of particulate air pollution (PM_{10}), *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2001; 203: 411-415.
- Fang GC, Chang CN, Wu YS, Fu PPC, Yang DG and Chium CC. Characterization of chemical species in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan, *The Science of The Total Environment* 1999; 234: 203-212.
- Fang GC, Cheng-Nan Chang, Chia-Chium Chu, Yuh-Shen Wu, Peter Pi-Cheng Fu, I-Lin Yang and Ming-Hsiang Chen. Characterization of particulate, metallic elements of TSP, $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{2.5-10}$ aerosols at a farm sampling site in Taiwan, Taichung, *The Science of The Total Environment*, 2003; 308(1-3): 157-166.
- Hetland RB, Cassee FR, Refsnes M, Schwarze PE, Låg M, Boere AJF and Dybing E. Release of inflammatory cytokines, cell toxicity and apoptosis in epithelial lung cells after exposure to ambient air particles of different size fractions, *Toxicology in Vitro* 2004; 18: 203-212.
- Hsiao W, Mo ZY, Fang M, Shi XM and Wang F. Cytotoxicity of $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{2.5-10}$ ambient air pollutants assessed by the MTT and the Comet assays, *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 2000; 471: 45-55.
- Hutchison GR, Broun DM, Hibbs LR, Heal MR, Donaldson K, Maynard RL, Monaghan M, Nicholl A and Stone V. The effect of refurbishing a UK steel plant on PM_{10} metal composition and ability to induce inflammation. 2005; 18;6(1): 43-58.
- Kagawa J. Health effects of diesel exhaust emissions—a mixture of air pollutants of worldwide concern, *Toxicology* 2002; 181-182: 349-353.
- Kim KH, Lee JH and Jang MS. Metals in airborne parti-

- culate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea, *Environmental Pollution* 2002; 118: 41–51.
- Korea Ministry of Environment, Risk Assessment of lead, cadmium and mercury 2004: 76–116.
- Kumar D and Jugdutt BI. Apoptosis and oxidants in the heart, *Journal of Laboratory and Clinical Medicine* 2003; 142: 288–297.
- Kyotani T and Iwatsuki M. Characterization of soluble and insoluble components in PM_{2.5} and PM₁₀ fractions of airborne particulate matter in Kofu city, Japan, *Atmospheric Environment* 2002; 36: 639–649.
- Ponsoda X, Jover R, Núñez C, Royo M, Castell JV and Gómez-Lechón MJ. Evaluation of the cytotoxicity of 10 chemicals in human and rat hepatocytes and in cell lines: Correlation between in vitro data and human lethal concentration, *Toxicology in Vitro* 1995; 9: 959–966.
- Samara C and Voutsas D. Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment, *Chemosphere*, 2005; 59: 1197–1206.
- Voutsas D and Samara C. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas, *Atmospheric Environment* 2002; 36: 3583–3590.
- Spallarossa P, Garibaldi S, Altieri P, Fabbi P, Manca V, Nasti S, Rossettin P, Ghigliotti G, Ballestrero A, Patrone F *et al.* Carvedilol prevents doxorubicin-induced free radical release and apoptosis in cardiomyocytes in vitro, *Journal of Molecular and Cellular Cardiology* 2004; 37: 837–846.