

일부 자원자를 통한 납, 카드뮴의 다경로 인체 노출평가

오은하¹⁾, 이은일^{1,2)}, 임호섭^{1,3)}, 장재연⁴⁾

고려대학교 유전체 및 단백질체 환경독성 의과학센터¹⁾, 고려대학교 의과대학 예방의학교실²⁾,
고려대학교 대학원 보건학과³⁾, 아주대학교 의과대학 예방의학교실⁴⁾

Human Multi-route Exposure Assessment of Lead and Cadmium for Korean Volunteers

Eunha Oh¹⁾, Eun-Il Lee^{1,2)}, Hosub Lim^{1,3)}, Jae-Yeon Jang⁴⁾

Medical Research Center for Environmental Toxico-Genomics and Proteomics¹⁾;
Department of Preventive Medicine, College of Medicine²⁾; Department of Public Health, Graduate School³⁾, Korea University;
Department of Preventive Medicine, School of Medicine, Ajou University⁴⁾

Objectives : We wanted to evaluate the main route of exposure to lead and cadmium for the general population in Korea by using multi-route and multi-media exposure assessment

Methods : Samples of air at the homes, samples of the food and water and peripheral blood samples were collected from thirty volunteers living in Seoul (the metropolitan area), Yong-in (the suburban area) and Ansan (the industrial area) in 2001. Graphite furnace atomic absorption spectrometric methods were used for the determination of the Pb and Cd levels in the air, food, water and blood samples.

Results : The average intake of lead through the air, drinking water and food were 5.06 $\mu\text{g/day}$ (26.3%), 0.002 $\mu\text{g/day}$ (0.1%), and 16.4 $\mu\text{g/day}$ (73.6%), respectively. The average intake of cadmium through the air, drinking water and food were 0.082 $\mu\text{g/day}$ (0.9%), 0.001 $\mu\text{g/day}$ (0.007%),

and 12.61 $\mu\text{g/day}$ (99.0%), respectively. The blood lead level was statistically higher in the male subjects than in the female subjects (3.39 and 2.22 $\mu\text{g/dl}$, respectively), and only gender was a significant variable on the multiple regression analysis for blood lead.

Conclusions : This study showed that the intake of lead and cadmium through food was the major route of exposure. A policy to reduce the pollutants according to the exposure routes should be established. However, more studies will be needed to support these data for the general population.

J Prev Med Public Health 2006;39(1):53-58

Key words : Lead, Cadmium, Environment, Exposure assessment, Food

서론

노출평가(exposure assessment)는 사람에게 노출되는 유해물질의 강도, 빈도 및 기간을 추정하는 과정이다 [1]. 환경오염에 의한 유해물질 노출 수준은 작업장에서의 유해물질의 노출 수준보다는 매우 낮기 때문에, 호흡기를 통한 노출뿐 아니라 경구, 피부를 통한 노출이 더 중요한 노출경로가 되고, 생활습관에 따라 노출수준이 달라지게 된다. 따라서 외국의 경우 노출평가를 위해서는 노출인자(exposure factor)에 대한 조사를 하여 기본 데이터를 만들고 있으며, 우리나라의 경우도 음용수에 대한 한국인의 물 섭취량, 섭취형태, 물 소비시간 및 피부노출 시간 등의 노출 변수

를 파악하는 연구가 보고되었다 [2].

환경오염 물질의 노출평가를 위해서 미국은 환경청(U.S. Environmental Protection Agency) 주관으로 NHEXAS(National Human Exposure Assessment Survey)가 실시되고 있으며, 미국인의 대표성 있는 집단에 대한 노출평가 조사를 실시하고 있다 [3]. 우리나라의 경우 환경부 G-7 환경공학기술 개발사업의 일환으로 납, 카드뮴 등의 환경오염물질에 대한 노출평가 연구가 1999년부터 이루어졌다 [4]. 그밖에 우리나라에서 중금속 오염에 대한 연구는 대부분 대기, 수질, 토양, 식품 등의 단일 매체에 있는 중금속을 측정하거나, 혈중 또는 요중에 있는 중금속 양을 측정하는 연구가 대부분이며, 인체를 중심으

로 여러 노출 경로를 동시에 평가하는 종합적인 연구는 거의 없었다 [5-7]. 환경오염 물질의 노출경로에서 중요한 음식물의 중금속 오염과 섭취에 대한 연구는 여러 연구보고가 있으나, Moon 등 [8,9]의 연구는 여성에 한정되었고, 대부분의 음식물에 대한 다른 연구도 음식물 자체에 있는 중금속을 측정하는 수준이었다 [10].

외국의 경우도 종합적인 노출평가 연구보다는 매체별 중금속 오염에 대한 연구들이 많이 수행되어, 대기 [11], 토양 [12] 등 매체별 평가가 되었으며, 그밖에 혈액이나 요 등에서 중금속을 조사하는 연구들이 보고된 바 있다 [13,14]. 또한 식이 섭취 조사(dietary intake study)등을 통한 중금속 노출 연구 등이 보고되었다 [15]. 반면에 미국의 NHEXAS 연구는 대표성 있는

Table 1. Characteristics of study subjects

Characteristics		Number(%)
Sex	Male	20 (66.6)
	Female	10 (33.3)
Age	< 30	24 (80.0)
	≥ 30	6 (20.0)
Area	Metropolitan area(Seoul)	14 (46.6)
	Suburban area(Yong-In)	11 (36.6)
	Industrial Area(Ansan)	5 (16.6)
Total		30 (100.0)

인구집단을 선정하여, 납과 비소에 대하여 개인 공기(personal air), 실내 공기(indoor air), 실외 공기(outdoor air)에 대한 조사 자료를 제시하고 있으며, 식품 등을 통한 납과 카드뮴 등의 섭취에 대한 결과도 종합적 제시한 다경로 노출평가 연구를 보고하고 있다 [16]. 독일의 경우도 NHEXAS와 유사한 GerES라는 환경 노출평가 연구를 수행하고 있으며 [17], 중국과 일본의 경우에도 대규모 다경로 노출평가 연구는 아니지만, 공기 및 식이를 통한 납과 카드뮴 노출에 대한 연구보고를 하였다 [18].

선진 외국의 경우와 달리, 우리나라의 경우 대표성 있는 인구집단에 대한 노출평가 연구는 막대한 연구비가 소요되어 아직 실시되지 못하고 있다. 환경오염이 문제가 된 지역 주민을 대상으로 인체 노출평가를 실시 한 연구보고는 있으나 [19], 환경오염 노출평가를 위한 체계적인 연구로서는 부족한 측면이 있었다. 따라서 본 연구는 다양한 중금속 중 현재 많은 연구가 이뤄지고 있는 납과 우리나라에서 환경오염 문제를 일으켰던 카드뮴을 대상으로 일부 자원자 집단에서 다매체, 다경로 노출평가를 실시하였다. 노출 경로에 따른 각 환경 매체에서의 오염도를 측정하고, 오염 경로에 따른 노출량을 평가함으로써 노출경로에 따른 납과 카드뮴 노출 감소를 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 하였다.

연구대상 및 방법

1. 연구대상 및 연구 지역

연구 대상 지역은 서울과 비교적 오염이 적은 용인 지역을 선정하였고, 또한 오염이 심할 것으로 예상되는 안산에서도 자원자를 모집하였다. 자원자는 모두 사무

직 종사자로 유해환경에 노출되는 직업력이 없었다. 시료채취는 1999년 10월 20일부터 2000년 1월 24일까지 30명의 자원자를 대상으로 조사를 실시하였고, 남성 20명과 여성 10명으로서, 20대 24명, 30대 4명과 40대 2명이었다. 남성 자원자는 흡연군, 비흡연군으로 나누었고, 여성은 모두 비흡연자였다 (Table 1).

2. 조사 방법

1) 설문 조사 및 시료채취

자원자들에게 기초 설문지와 개인면담을 하여 생활습관을 확인하고 음식물, 물, 공기 등 매체 별 수거방법 및 회수시기를 정하여 시료를 채취하였다. 또한 각자의 혈액을 채혈하여 전처리, 분석하였고, 1주일동안의 시간활동양상을 설문조사하였다. 음식물은 이틀 동안 섭취한 음식을 일일이 무게를 측정하는 방식으로 밥, 국, 국건더기, 반찬, 김치 및 기타로 분리하여 식사 전후 무게를 재었고, 식사량 중 일부를 각각 믹서기로 혼합하여 HNO₃과 3차 증류수로 내부를 세척한 Nalgene bottle에 음식물을 넣어 -15 °C에서 분석 전까지 냉동보관하였다.

실내 공기 중 납, 카드뮴의 측정은 대기공정시험법에 근거하여 Gillian사의 하이볼륨 에어 샘플러(AirCon2, Gilian Instrument Corp., W.Caldwell, NJ 07006)를 사용하였고, 공기 시료를 포집하기 위해 다단분립장치와 함께 Nuvlmpore사의 직경 55 mm 유리섬유여과지를 사용하였다. 여과지는 포집 전에 105 °C에서 약 2시간 동안 건조시키고 실리카겔이 담긴 진공건조기에서 항량이 되게 하였다. 포집된 여지는 분리케이스에 담아 진공 건조기에서 분석 때까지 보관하였고, 유량 20 L/min, 포집시간 24시간으로 하였다.

먹는 물의 채취는 자원자가 섭취하는 음용수를 종류별로 sampling하여 분석 후 하루 동안 매번 먹는 물의 종류 및 양을 적용하여 전체 노출량을 평가하였다. 용기는 폴리에틸렌제의 병을 HNO₃로 씻고 24시간후 3차 증류수로 세정하여 -15 °C에서 보관하였다. 먼지는 진공청소기를 이용하거나, 창문 틈의 먼지를 수거한 후 시험관

에 넣어 데시케이터에 보관하였고, 혈액은 공기 시료채취 2주 후 아침 공복 시에 채혈하고 헤파린 튜브에 넣고 5 ml을 nelgene bottle에 넣어 동결시켰다.

2) 중금속 분석

음식물, 공기중의 먼지를 포집한 Filter의 중금속의 분석을 위한 전처리는 Microwave Digestion System (Qustron, Q45)을 사용하였으며, 중금속 분석은 비불꽃 원자흡광광도계(Flameless Atomic Absorption Spectrometer, Varian, spectrAA- 400)를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 1000 ppm 표준용액은 시그마사 제품을 사용하였다. 음식물은 종류별(밥, 국, 반찬 및 김치)로 혼합하여 음식물의 전부를 회화(130 °C)에서 건조하여 함수율을 구하고 건조된 시료를 막자사발에 갈아 테프론 용기에 시료 1.0 g과 HNO₃ 4.0 ml + HCl 1.0 ml + HClO₄ 0.5 ml를 주입한 후 마이크로웨이브에서 저온고압 분해시켰으며 증류수로 희석하여 분석용 시료로 사용하여 납과 카드뮴을 분석하였다. 혈액 분석은 standard addition 법을 사용하여 GF-AAS로 분석하였다. 분석방법의 정확성을 검증하기 위해 recovery test를 병행하였다.

3) 다경로를 통한 납과 카드뮴의 일일 총 노출량 평가

자원자들을 대상으로 하여 공기, 음용수, 음식물 중 납과 카드뮴의 오염도를 바탕으로 우리나라 성인의 다경로 노출을 통한 일일 총 인체 노출량을 평가하기 위해 pathway exposure factor(PEF)를 이용하는 Mckone과 Daniels [20]의 방정식을 적용하였고, 각 매체별 노출량은 EPA의 Exposure factors handbook [21]의 계산식을 사용하였다. 호흡기를 통한 노출량을 계산하기 위해 Chung 등의 우리나라 연구에서 제시한 성인남녀의 하루 평균 공기 호흡량을 남성의 경우 15.3 m³/day, 여성의 경우 11.3 m³/day을 사용하였다 [2]. 또한 실내 및 실외 거주시간은 자원자들의 1주일동안의 시간활동 양상표를 통해 조사하였다. 대기 중 납 및 카드뮴 농도를 측정하기 위해 실내 및 실외 모두 측정해야 하나, 실내에서 거주한 시간이 평균적으로 실외에서 거주한 시간보다 길고, 실외 경우 다양한

Table 2. Lead and cadmium concentration in indoor air, water, food, and blood

Media	LeadGM (GSD) (95% confidence interval)	Cadmium GM (GSD) (95% confidence interval)
Indoor Air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.061 (1.777) (0.0196-0.1871)	0.0019 (1.839) (0.00059-0.0064)
Outdoor Air ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [*]	0.078 (1.270) (0.0486-0.1240)	0.0025 (1.698) (0.00089-0.0071)
Water ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0.005 (9.33) (0.00006-0.397)	0.011 (4.991) (0.00046-0.251)
Food ($\mu\text{g}/\text{g}$ dry weight)	0.164 (0.192) (0.046-0.587)	0.139 (2.346) (0.026-0.738)
Blood ($\mu\text{g}/\text{L}$)	28.85 (14.67) (13.51-61.19)	1.302 (18.13) [†] (0.41-4.18)

^{*} Data from Ministry of Environment (2003) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea

[†] Mean and standard deviation of blood cadmium

Table 3. Lead and cadmium exposure through respiration, water and food intake

Exposure Route	Lead		Cadmium	
	GM (GSD) (95% Mean(range) confidence interval)	Proportion(%)	GM (GSD) (95% Mean(range) confidence interval)	Proportion(%)
Air* ($\mu\text{g}/\text{day}$)				
Indoor	0.41 (1.89) (0.116-1.417)	3.9 (0.3-16.9)	0.013 (1.910) (0.003-0.046)	0.2 (0.0- 1.0)
Outdoor [†]	4.51 (1.43) (2.229-9.132)	23.3 (8.3-54.4)	0.067 (1.433) (0.033-0.137)	0.7(0.02- 2.9)
Total	5.06 (1.34) (2.840-9.027)	26.3 (9.8-65.7)	0.082 (1.423) (0.041-0.165)	0.9(0.02- 3.2)
Water($\mu\text{g}/\text{day}$)	0.002 (10.48) (0.0002-0.189)	0.1(0.0-2.5)	0.001 (17.59) (0.00004-0.286)	0.007(0.0- 0.5)
Food($\mu\text{g}/\text{day}$)	16.40 (0.23) (3.19-84.17)	73.6(34.3-90.2)	12.61 (2.43) (2.21-71.80)	99.0(96.8-99.9)
Total ($\mu\text{g}/\text{day}$)	22.89 (1.84) (6.96-75.29)		12.73 (2.41) (2.26-71.62)	

* Average air intake was assumed as 15.3 m³/day for male, 11.3 m³/day for female [2]

[†] Lead in outdoor air was Metropolitan area(Seoul), Suburban area(Yong-in), Industrial Area(Ansan) 0.0743 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0654 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.1290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cadmium in outdoor air was Metropolitan area(Seoul), Suburban area(Yong-in), Industrial Area(Ansan) 0.0029 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0062 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (Source : Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2003)

Table 4. Lead and cadmium level in blood by area, age, sex and smoking

		Pb($\mu\text{g}/\text{L}$) GM(GSD)	Cd($\mu\text{g}/\text{L}$) Mean(SD)
Area	Seoul (n=13)	25.3 (14.7)	1.4 (0.8)
	Yong-In (n=11)	32.5 (14.5)	1.4 (0.7)
	Ansan (n=5)	31.2 (14.5)	1.6 (0.4)
Age	<30 (n=23)	27.5 (14.9)	1.4 (0.68)
	30 (n=6)	34.2 (13.4)	1.6 (0.83)
Sex [*]	Male (n=19)	33.6 (14.0)	1.6 (0.74)
	Female (n=10)	21.5 (13.2)	1.2 (0.62)
Smoke	Smoker (n=10)	33.4 (14.2)	1.6 (0.72)
	Non-Smoker (n=19)	26.7 (14.7)	1.3 (0.7)

^{*} Statistically significant difference of blood lead between male and female (p=0.0014 by t-test)

장소에 노출되기 때문에 실제 측정은 각 자원자들의 실내에서 실시하였다. 실외 공기를 통한 노출을 평가하기 위해 실외 공기의 납, 카드뮴 농도는 환경부 대기질 측정 자료를 이용하였다 [22]. 물과 음식을 통해 섭취하는 중금속량은 실제로 마시는 물의 양과 먹는 음식의 무게를 실측하였고, 조사된 각각의 중금속 농도와 실측치를 곱하여 노출값을 구했다.

4) 자료 처리

공기, 물, 음식물 중의 납과 카드뮴 양은 log 정규분포를 보여, 기하평균 및 95% 신뢰 구간을 구하였고, 일원분산분석(ANOVA) 및 Student's t-test를 사용하여 평균값 사이의 유의성을 평가하였다. 물, 공기, 음식물 등 여러 경로에 의한 노출이 각각 혈중 중금속에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해서 다변량회귀분석을 사용하여 각각

의 독립변수(물, 공기, 음식물)가 혈액(중금속변수)에 미치는 영향을 분석하였다. 혈중 납의 경우 로그 정규분포를 취하므로 기하평균값을 사용하였고, 혈중 카드뮴의 경우는 평균값을 사용하여 분석하였다.

연구 결과

서울, 안산, 용인 지역의 자원자 30명 및 거주하고 있는 30개 집을 대상으로 2일간 수집한 시료는 공기시료 30개, 음료수 시료 58개, 음식물 750개 및 혈액 30개였다.

실내 공기의 납과 카드뮴의 평균 농도는 각각 0.061, 0.0019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 3개 지역 실외 공기의 납과 카드뮴의 평균 농도는 0.078, 0.0025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 자원자들이 음용한 물에서의 납과 카드뮴 농도는 매우 낮아, 각각 0.005, 0.011 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었다. 자원자들이 섭취한 음식물의 납과 카드뮴 농도는 각각 0.164, 0.139 $\mu\text{g}/\text{g}$ 이었다. 혈중 납과 카드뮴 농도는 각각 2.885, 0.1302 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 이었다 (Table 2).

경로별 납의 노출량 조사 결과 호흡기로는 5.06 $\mu\text{g}/\text{day}$, 음용수를 통해서 0.002 $\mu\text{g}/\text{day}$, 음식물을 통해서 16.4 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 자원자들은 하루 평균 22.89 μg 의 납에 노출되어 있었다. 카드뮴의 경우 호흡기로는 0.082 $\mu\text{g}/\text{day}$, 먹는 물에서 0.001 $\mu\text{g}/\text{day}$, 음식물에서 12.61 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 노출되었다 (Table 3). 공기, 음식, 물 등의 매개체를 통한 개인별 납 노출분포는 공기 (26.3%), 음식 (73.6%), 물 (0.1%)로 음식을 통한 노출이 가장 높았고, 카드뮴의 경우는 공기 (0.9%), 음식 (99.0%), 물 (0.007%)로 음식을 통한 노출이 대부분이고 물을 통한 노출은 매우 낮았다.

지역, 연령, 성별, 흡연에 따른 혈중 납 농도를 분석한 결과, 서울지역의 혈중 납의 기하평균 농도는 0.93 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 3개 지역 중에서 가장 낮았으나 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 연령대별로 볼 때는 30대 미만은 1.01 $\mu\text{g}/\text{dL}$, 30대 이상은 1.23 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 30대 이상에서 높았으나 통계적 유의성은 없었다. 성별의 경우 남성이 1.21 $\mu\text{g}/\text{dL}$, 여성은 0.77 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 로 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 흡연자의 경우

Table 5. Multiple regression analysis for blood lead

	Parameter estimate	Standard error	p-value
Intercept	0.5096	0.2229	0.0318
Sex	0.4070	0.1330	0.0056
Area(Seoul)	-0.2408	0.1271	0.0708
(Ansan)	0.1931	0.1683	0.2629
Total Intake	0.0011	0.0006	0.0933
Total Lead Intake	-0.0005	0.0005	0.3394

*Adjusted R square=0.4142, Sex 0=female, 1=male, Young-In is the referent in area variable.
Seoul is metropolitan area, Ansan is industrial Area.

는 1.21 $\mu\text{g}/\text{dl}$, 비흡연자의 경우는 0.98 $\mu\text{g}/\text{dl}$ 흡연자에서 높았으나 통계적 유의성은 없었다 (Table 4). 혈중 카드뮴 농도를 분석한 결과 전체적인 경향은 혈중 납의 경우와 거의 일치하게 30대 이상, 남성, 흡연자에서 높았으나 통계적으로 유의한 차이를 보인 경우는 없었다.

혈중 납과 카드뮴에 영향을 미치는 요인들을 회귀분석한 결과 혈중 납의 경우 성별이 통계적으로 유의한 변수였고, 전체 납 노출보다는 식사량이 더 영향력이 큰 것으로 나타났다 (Table 5). 혈중 카드뮴의 경우는 통계적으로 유의한 모델이 만들어지지 않았다.

고 찰

오염물질이 대기, 물, 음식 등 다양한 노출경로를 통해 인체에 유입되는 양은 일차적으로는 각 환경 매체에서의 농도가 매우 중요한 요소이지만, 이외에도 각 매체와의 접촉률, 접촉기간 및 흡수율 등의 노출인자들에 의해 영향을 받게 된다. 주요 노출 인자로는 체중(kg), 각 환경 매체와의 접촉률(ℓ/day , m^3/day , g/day), 연중 접촉 횟수(days, year), 접촉기간(years) 및 체내 흡수율(%)등을 고려하여야 하지만, 이 연구는 한정된 자원을 대상으로 한 단기기간의 실측 조사이기 때문에, 접촉률을 위주로 평가되었다. 즉, 각 환경 매체와의 접촉률은 음용수와 식품의 경우 일일 음용수 및 식품 섭취량이 되고, 공기를 통한 노출 경로에서는 일일 호흡률을 고려하게 된다. US EPA [23] 에서 실내와 실외의 거주시간을 고려하여 활동수준에 따른 여성과 남성 그리고 어린이에 대한 호흡률에 대해 보고된 바 있으나 특별한 활동 패턴이 알려지지 않았을 때 계속적인 노출상

황의 평가의 기준이 되는 성인의 평균 일일 호흡률로서 20 m^3/day 을 제안하고 있다. 우리나라의 연구에서는 성인남녀의 하루 평균 공기 호흡량 남성의 경우 15.3 m^3/day , 여성의 경우 11.3 m^3/day 라고 제시하여 [2], 본 연구도 이 연구결과에 따라 남성과 여성의 호흡률을 각각 적용하였다.

환경오염물질 중 대표적인 중금속으로 잘 알려진 납과 카드뮴은 비록 적은 농도이지만 환경 중에 존재하고, 산업의 발달됨에 따라 우려되고 있는 환경오염물질이다 [24]. 특별히 납과 카드뮴의 노출은 긴 생물학적 반감기 때문에 중요하다 [25]. 납은 복통, 뇌질환, 각혈 및 급성 신부전증과 말초 신경염, 신성 행동성 장애, 신부전 등을 유발하는 독성물질로 알려져 있고, 카드뮴의 경우 신장장애, 폐암 등을 일으키는 것으로 알려져 있다 [26]. 납은 주로 미세 분진에 흡착되어 있기 때문에 인체 호흡기로 직접 노출되며 [27], 대기 중 미세 분진을 통한 호흡 독성은 성인보다는 유아의 경우에 신경독성작용과 같은 우려할 만한 인체 영향을 유발할 수 있다 [28]. 카드뮴의 경우는 오염된 토양에서 자란 곡식으로 제조된 식료품과 먹는 물을 통해 노출되고 흡연자가 비흡연자에 비해 2배 카드뮴이 노출되는 것으로 알려져 있다 [29]. 본 연구의 경우에서도 납의 경우 호흡기로 노출되는 경우가 26.3%에 이르렀고, 음식을 통한 노출은 73.6%이었으나 카드뮴의 경우는 99%가 음식을 통한 노출이 이뤄졌다 (Table 3).

실내 및 실외 공기 중 오염물질 농도는 보통 실내 농도가 실외 농도보다 더 낮다. 보통 환기 시설이 없는 집에서 실내/실외 비율 보면 0.6~0.8로 겨울철에 더 낮았다 [30]. 본 연구에서도 실내 공기의 납 및 카드뮴 농도가 실외 농도보다 낮은 수준을 보였다

(Table 2). 대상자들의 실 내외 활동시간에 따라 계산된 호흡기를 통한 노출분율도 실외 대기를 통한 것이 납의 경우는 6배, 카드뮴의 경우는 3.5배에 이르렀다.

음식물 중의 납의 농도 평균값은 본 연구의 경우 0.164 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 Chung 등 [2]의 연구에서 쌀의 경우 0.12 mg/kg , 생선의 경우 0.26 mg/kg 등과 비교하여 유사한 수준이었다. 본 연구에서 음식을 통한 납과 카드뮴의 노출량은 16.4 $\mu\text{g}/\text{day}$, 12.6 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 측정되어 FAO/WHO의 기준인 납 429 $\mu\text{g}/\text{day}$, 카드뮴 57~72 $\mu\text{g}/\text{day}$ 보다 낮은 수준이었다. 본 연구의 경우 납 노출이 카드뮴보다 높았지만, 미국의 NHEXAS연구에서는 식이를 통한 납 노출은 10.9 $\mu\text{g}/\text{day}$, 카드뮴은 14.4 $\mu\text{g}/\text{day}$ 으로 카드뮴이 더 높은 노출 수준을 보였다 [3]. 납과 카드뮴 노출량에 대한 우리나라 사람들을 대상으로 한 Moon등의 연구에서는 서울 및 천안 지역은 식이를 통한 납 노출 (17.5, 21.7 $\mu\text{g}/\text{day}$)이 카드뮴 (14.3, 19.6 $\mu\text{g}/\text{day}$)보다 높았지만, 하남, 부산 등의 지역은 카드뮴 노출 (24.2, 24.3 $\mu\text{g}/\text{day}$)이 납 노출 (20.2, 21.6 $\mu\text{g}/\text{day}$)보다 높게 나타났다 [8]. 이러한 결과는 지역에 따라 납 노출과 카드뮴 노출 수준이 다르다는 것을 보여주고 있으며, 본 연구는 경인 지역을 중심으로 이뤄졌기 때문에 Moon등의 서울 천안 지역과 비교할 때 납 노출 수준이 카드뮴보다 높게 나온 유사한 결과를 보였다 [8].

서울 지역을 기준으로 할 때 본 연구의 납 노출 수준은 16.4 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 Moon 등 [9]의 서울 지역 17.5 $\mu\text{g}/\text{day}$ 보다는 약간 낮은 수준이었다. 일본의 경우 식이를 통한 납, 카드뮴 노출은 각각 11.6, 32.1 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 카드뮴 노출이 매우 높으며, 중국의 경우는 25.8, 9.9 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 납 노출이 높은 수준이었다 [18]. 영국에서는 1997년 전국 식이조사의 결과 납 노출은 26.0 $\mu\text{g}/\text{day}$, 카드뮴은 12.0 $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 납 노출이 높았다.

노출 경로에 따른 납의 노출분율은 본 연구의 경우 호흡기로 26.3%, 음식을 통해서 73.6%였고 물을 통한 노출은 0.1%에 불과하였다 (Table 3). 이런 노출분율은 미국의 NHEXAS 연구와는 큰 차이를 보인다. 미국의 경로별 평균 노출량은 식이의 경

우 10.9 $\mu\text{g/day}$, 먹는 물의 경우는 1.7 $\mu\text{g/day}$, 호흡 경로는 0.333 $\mu\text{g/day}$ 로 호흡기를 통해서 보다는 물을 통한 노출량이 높았다. 이런 차이는 물과 공기 중 납 농도의 차이 때문이다. 카드뮴의 경우도 납과 유사하게 식이와 물이 주된 노출경로임을 보였다 [3]. Fassett도 카드뮴 섭취가 하루 평균 호흡기를 통하여 0.072 μg , 식수를 통하여 2.1 μg , 식품을 통하여 51 μg 정도가 섭취된다고 보고하였다 [31].

반면에 Zhang 등 [18]이 중국과 일본에서 식이 및 호흡기를 통한 납과 카드뮴의 흡수분율을 보고한 것은 본 연구결과와 유사하게 호흡기를 통한 노출 분율이 상당한 부분을 차지하였다. 일본의 경우, 식이와 호흡기를 통한 납의 흡수 중 호흡기를 통한 분율은 23.7%, 카드뮴은 2.8%였다. 중국은 납의 경우 54.6%, 카드뮴의 경우는 6.3%였다.

지역, 연령, 성별, 흡연에 따른 혈중 납과 카드뮴의 농도는 남성과 여성의 혈중 납 농도만이 통계적으로 유의하게 높았고, 다중 회귀분석에서도 성별만이 유의한 변수였다 (Table 4, 5). 본 연구의 대상 숫자가 작기 때문에 다른 변수들의 영향이 유의하게 나오지 않을 수도 있겠으나, 남성이 여성보다 혈중 납 수치가 높은 것은 많은 연구에서 보고되고 있다 [32,33]. 남성이 여성보다 혈중 납 수치가 높은 것은 노인과 어린이들에서도 관찰되고 있다 [34,35]. 본 연구에서 호흡기와 식이를 통한 납 노출보다는 성별이 혈중 납을 설명하는 유의한 변수로 나타난 것은 미국의 NHEXAS 연구에서도 환경과 식이를 통한 노출 값보다 시간-활동 자료가 혈중 납을 더 잘 설명한다는 보고와도 유사한 결과이다 [36]. 카드뮴의 경우 흡연자에서 하루 1갑 기준으로 0.9 μg 정도가 더 흡입되고 이중 5~10%가 흡수된다고 보고되고 있는데 [37], 본 연구에서도 흡연자에서 혈중 납이나 카드뮴 농도가 높게 나타났다. 그러나 통계적 유의성은 없었다.

요약 및 결론

일부 자원자들을 대상으로 납, 카드뮴에

대한 대기, 식수, 식이 섭취 등의 다경로 노출평가를 실시한 결과 식이섭취를 통한 노출이 주된 경로였으며, 전체 노출량 중 식이섭취를 통한 노출이 납의 경우 73.6%, 카드뮴의 경우 99%의 비율을 보였다. 노출의 최종 결과라고 할 수 있는 혈중 납의 농도에 영향을 미치는 요인은 성별이었으며 남성이 여성보다 혈중 납 수준이 유의하게 높았다.

이상의 결과는 우리나라에서 환경을 통한 납과 카드뮴의 주된 노출 경로가 식이섭취를 통한 것이며, 중금속의 식품 오염을 감소시키는 것이 노출을 줄이는 주된 정책이 되어야 함을 보였다. 그러나 본 연구의 대상자들이 일부 자원자 집단이며 수도권 지역에 한정되어 있어, 향후 인구 집단을 대표하는 연구조사를 통해 지역별, 인구집단 별 노출평가가 필요하다.

참고문헌

1. Paustenbach DJ, Introduction : A Primer for Conducting Human or Environmental Health Risk Assessments. In Paustenbach DJ, The Risk Assessment of Environmental Hazards, A Wiley-Interscience Publication, New York. 1989. p. 10
2. Chung Y, Hwang MS, Yang GY, Jo S. Health risk assessment of lead exposure through multipathways in Korea. *Korean Environ Toxicol* 1999; 14(4): 203-216 (Korean)
3. Thomas KW, Pellizzari ED, Berry M. Population-based dietary intakes and tap water concentrations for selected elements in the EPA region V national human exposure assessment survey, *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1999; 9: 402-413
4. 환경부. 환경오염물질의 위해성 통합평가 및 시스템 개발, 제 3권; 환경오염물질의 위해성 통합평가를 위한 다경로노출평가, 2001
5. Park CG, Lee GJ, Yoo SJ. Distribution of lead, cadmium, zinc and copper in the field soil along the road. *J Korean Soc Environ Eng* 1985; 7(1): 37-42 (Korean)
6. Hwang ID, Ki NS, Lee JH and Park IS. A study on the heavy metal concentrations and their interrelationships in woman's blood and urine in small towns. *Korean J Prev Med* 1987; 20(1): 49-55 (Korean)
7. Chang MH, Chun JY, Kim MS. A study on the heavy metals contents in soil. *Bull Environ Sci* 1994; 15: 133-791 (Korean)
8. Moon CS, Zhang ZW, Shimbo S, Watanabe T,

- Moon DH, Lee CS, Lee BK, Ahn KD, Lee SH, Ikeda M. Dietary intake of cadmium and lead among general population in Korea. *Environ Res* 1995; 71: 46-54
9. Moon CS, Zhang ZW, Shimbo S, Watanabe T, Lee CU, Lee BK, Ahn KD, Lee SH, Ikeda M. Evaluation of urinary cadmium and lead as marker of background exposure of middle-aged women in Korea: Dietary intake as an influential factor. *Toxicol Letter* 1999; 108: 173-178
10. Lee MG and Lee SR. Contamination level and dietary intake of total mercury in common restaurant metals of Seoul area Korea. *J Food Sci & Technol* 1989; 21(2): 276-285
11. Azar A, Snee RD, Habibi K. An epidemiologic approach to community air lead exposure using personal air samplers. *Environ Qual Saf Suppl* 1975; 2: 254-290
12. Aschengrau A, Beiser A, Bellinger D, Copenhaver D, Weitzman M. Residential lead-based-paint hazard remediation and soil lead abatement: their impact among children with mildly elevated blood lead levels. *Am J Public Health* 1997; 87(10): 1698-1702
13. Schutz A, Barregard L, Sallsten G, Wilske J, Manay N, Pereira L, Cousillas ZA. Blood lead in Uruguayan children and possible sources of exposure. *Environ Res* 1997; 74: 17-23
14. Farrelly RO, Pybus J. Measurement of lead in blood and urine by atomic absorption spectrophotometer. *Clin Chem* 1969; 15: 566-570
15. Ysart G, Miller P Croasdale M, Crews H, Robb P, Baxter M, de L'argy C, Harrison N. 1997 UK total diet study-dietary exposure to aluminium, arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, mercury, nickel, selenium, tin and zinc. *Food Addit Contam* 2000; 17(9): 775-786
16. Clayton CA, Pellizzari ED, Whitmore RW, Perritt RL, Quackenboss JJ. National human exposure assessment survey (NHEXAS): Distributions and associations of lead, arsenic and volatile organic compounds in EPA region 5. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1999; 9: 381-392.
17. Hoffmann K, Becker K, Friedrich C, Helm D, Krause C, Seifert B. The German environmental survey 1991/1992(GeRES II): Cadmium in blood urine and hair of adults and children. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2000; 1(2): 126-135
18. Zhang ZW, Moon CS, Watanabe T, Shimbo S, He FS, Wu YQ, Zhou SF, Su DM, Qu JB, Ikeda M. Background exposure of urban populations to lead and cadmium: comparison between China and Japan. *Int Arch Occup Environ Health* 1997; 69: 273-281
19. Park JD, Park CB, Choi BS, Kang EY, Hong YP, Chang IW, Chun BY, Yeh MH. The

- study on urinary cadmium concentration and renal indices of inhabitant in an abandoned mine area. *Korean J Prev Med* 1998; 31(3): 424-439 (Korean)
20. Mckone TE, Daniels JI. Estimating human exposure through multiple pathways from air, water and soil. *Regul Toxicol Pharmacol* 1991; 13: 36-61
 21. U.S. Environmental Protection Agency. Exposure Factors Handbooks. Office of Health and Environmental Assessment EPA/600/8-89/043, March 1990
 22. Ministry of Environment. Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2003
 23. U.S. Environmental Protection Agency. Development of Statistical Distributions or Ranges of Standard Factors Used in Exposure assessments. Washington, DC: Office of Health and Environmental Assessment; 1985; EPA report No. EPA 600/8-85-010. Available from: NTIS, Springfield, VA; PB85-242667
 24. Lopez-Artiguez M, Soria ML, Camean A, Rpetto M. Cadmium in the diet of the local population of Seville(Spain). *Bull Environ Contam Toxicol* 1993; 50: 417-424
 25. Muller M and Anka M. Distribution of cadmium in the food chain(soil-plant-human)of a cadmium exposed area and the health risk of the general population. *Sci Total Environ* 1994; 156: 151-158
 26. Lewis R. Metals. In LaDou J. Editor. Occupational & Environmental Medicine. 2nd ed. Prentice-Hall International, Inc., 1997. p. 412-416
 27. Barrie LA, Gregor D, Hargrave B, Lake R, Muir D, Shearer R, Tracey B, Bidlenman T. Arctic contaminants: Sources, occurrence and pathways. *Sci Total Environ* 1992; 122: 1-74
 28. Thatcher RW, Lester ML, McAlaster R, Horst R. Effects of low levels of cadmium and lead on cognitive functioning in children. *Arch Environ Health* 1982; 37(3): 159-166
 29. Lee SH, Kim HA, Park CY, Lee BK, Lee KM, Cho KS. Blood cadmium concentration in occupationally non-exposed Korean to cadmium. *Korea J Occup Health* 1986; 25: 103-107 (Korean)
 30. Yocom JE. Indoor-outdoor air quality relationships-A critical review. *J Air Pollu Control Assoc* 1982; 32(5): 500-520
 31. Fassett DW. Metals in the Environment. New York, Academic Press. 1980, p61-100
 32. Mortada WI, Sobh MA, el-Defrawy MM, Farahat SE. Reference intervals of cadmium, lead, and mercury in blood, urine, and nails among residents in Mansoura city, Nile delta, Egypt. *Environ Res* 2002; 90(2): 104-110
 33. Counter SA, Buchanan LH, Ortega F. Gender differences in blood lead and hemoglobin levels in Andean adults with chronic lead exposure. *Int J Occup Environ Health* 2001; 7(2): 113-118
 34. Nordberg M, Winblad B, Fratiglioni L, Basun H. Lead concentrations in elderly urban people related to blood pressure and mental performance: results from a population-based study. *Am J Ind Med* 2000; 38(3): 290-294
 35. Sanna E, Liguori A, Palmas L, Soro MR, Floris G. Blood and hair lead levels in boys and girls living in two Sardinian towns at different risks of lead pollution. *Ecotoxicol Environ Saf* 2003; 55(3): 293-299
 36. Roy A, Georgopoulos PG, Ouyang M, Freeman N, Liyo PJ. Environmental, dietary, demographic, and activity variables associated with biomarkers of exposure for benzene and lead. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 2003; 13(6): 417-426
 37. Morgan WD. New ways of measuring cadmium in man. *Nature* 1979; 282: 673-694