한국환경보건학회지, 제42권 제3호(2016)
J Environ Health Sci. 2016; 42(3): 224-233
pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2016.42.3.224
원 저 Original articles

충청남도 내 산업단지 주변에 거주하는 주민들의 요중 비소 농도

김희찬*·노상철*,**†
*단국대학교 의과대학 직업환경의학교실
**단국대학교병원 농업안전보건센터

Urinary Arsenic Concentrations among Residents in the Vicinity of a Chungcheongnam-do Province Industrial Complex Area

Hee Chan Kim* and Sangchul Roh*,†**
**Department of Occupational and Environmental Medicine, College of Medicine, Dankook University*
***Center for Farmers' Safety and Health, Dankook University Hospital*

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to evaluate the relationship between residential surroundings, such as a power plant, steel mill and petrochemical facilities, and urinary arsenic concentrations in Chungcheongnam-do Province, Korea.

Methods: Stratified by fish consumption and residential district, median and maximum block sampling was applied. A total of 346 spot urine samples were speciated for As^{5+}, As^{3+}, monomethylarsonic acid(MMA), dimethylarsonic acid (DMA) and arsenobetaine (AsB). Exposure assessment was based on questionnaires including data on sex, age, current tobacco use, fish consumption, type of water consumed, and occupational category.

Results: Urinary As^{5+} + As^{3+} + MMA + DMA concentrations of people living in the vicinity of a power plant (GM=50.39 μg/g) were 61% higher than those of people living in the inland area according to median block sampling. Urinary As^{5+} + As^{3+} + MMA + DMA + AsB concentrations of people living in the vicinity of industrial complex area were higher than those of people living in the inland area according to block sampling by median and maximum.

Conclusion: Urinary arsenic concentrations of people living in vulnerable areas such as around industrial complexes, especially power plants, were higher than those of people living in an inland area.

Keywords: Arsenic species, biomarker, Chungcheongnam-do Province industrial complex, environmental exposure, urine

I. 서 론

비소의 환경 노출과 체내 건강 영향은 오랜 시간 동안 주목받았다. 발암성은 널리 알려졌지만, 노출 평가, 대사, 작용 기전에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않았다.[1)] 비소는 대기, 수질, 토양 등과 같은 환경에 분포하고 있다. 비소는 −3, 0, +3, +5 등 4개의 원자 형태로 있을 수 있는데, 환경에서는 지하수와 같은 환원 상태에서는 3가 비소(As^{3+}), 대기와 지표수와 같은 산화된 상태에서는 5가 비소(As^{5+})로

†**Corresponding author:** Department of Occupational and Environmental Medicine, College of Medicine, Dankook University, Dandaero 119, Dong-nam gu, Cheon-an, Chung-nam, Republic of Korea 330-714, Tel: 82-41-550-3956, Fax: 82-41-556-6461, E-mail: scroh@dku.edu
Received: 19 May 2016, Revised: 10 June 2016, Accepted: 17 June 2016

존재한다.[2] 비소에 의한 환경오염은 산업 과정에서 탄광, 제련, 화석연료의 연소가 원인이다.[1] 체내에 흡수된 비소의 생체변형이 진행되는 과정은 As^{5+}에서 As^{3+}로 환원 반응이 발생하고, 이후 메틸화가 연속적으로 이루어져 monomethylarsonic acid(MMA), dimethylarsinic acid(DMA)가 발생한다.[3]

일반 인구 집단에서 비소의 노출은 저농도로 이루어진다. 비소는 체내에서 빠르게 대사 및 배출이 이루어지기 때문에 식수에 의한 무기비소와 식이에 의한 유기비소를 구별하는데 많은 어려움이 있다. 요중 비소 농도는 최근 비소 노출의 생체지표로 이용된다.[4] 무기비소의 경우 체내 반감기는 10시간 정도이고 생선섭취에 의한 유기비소의 경우 체내 반감기는 20시간 이내이다. 해산물에 의해 흡수된 비소는 소변을 통해 배출되기 때문에 환경에 의한 비소 노출을 추정하기 위해서는 소변 시료를 채취하기 전 48시간 이내 해산물 섭취를 회피하도록 권고한다.[5] 비소의 위험도를 평가하기 위해서는 비소 종분석이 중요하다. 소변 내 As^{5+}, As^{3+}, MMA, DMA를 측정하는 방법으로 이를 해결할 수 있다. 독성학적으로 의미가 있는 무기비소의 대사물질과 독성이 없는 arsenobetaine(AsB)를 구분하는 것이 필요하다.[6]

우리나라는 산업화 과정에서 석유, 석탄, 금속의 수요가 급격히 증가하였고 이 과정에서 발전소, 제철소, 석유화학단지가 건설되었다. 산업단지는 경제발전에 크게 기여하였지만 배출되는 매연, 폐수로 인하여 주변지역에 대기오염, 토양오염, 수질오염을 발생하였다.[7,8,9] 화석연료의 연소나 제련 과정에서 발생하는 중금속은 연소과정에서 배출된 후 분진에 흡착되어 강하하거나 빗물에 의해 지표로 떨어진다.[2] 이러한 중금속은 인체에 흡수되어 급, 만성 건강영향을 일으킨다.[10,11] 이에 따라 환경부는 국가산단지역에서 환경오염과 건강영향을 평가하기 위하여 지역주민들을 대상으로 환경오염 노출 및 생체지표 모니터링 사업을 실시하였다.[12] 충남지역에서도 발전소, 제철소, 석유화학단지가 위치해 있고 이들 산업단지에서 발생할 수 있는 환경오염 물질과 건강양향을 모니터링하고 있다.[13]

본 연구에서는 충청남도에 건립된 발전소, 제철소, 석유화학단지 주변지역에서 거주하고 있는 주민들과 산업단지의 영향을 받지 않는 주민들을 대상으로 거주 지역과 요중 비소 농도와의 연관성을 밝히고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상자

충남 지역 발전소, 제철소, 석유화학단지에 인접한 각각 4개, 1개, 1개 지역을 환경오염 취약지역으로 임의로 선정하였다. 또한 산업단지로부터 거리가 10 km 이상으로 산업단지에 의한 비소 노출 위험이 낮은 4개 지역을 비교지역으로 선정하여 육지에 위치한 2개 지역을 내륙 비교지역으로 해안에 위치한 2개 지역을 해안 비교지역으로 지정하였다. 2013년 11월부터 2015년 12월까지 조사를 진행하였다. 대상자는 선정된 지역에 거주하는 성인이면서 지역주민 건강검진에 참여하여 소변을 제공한 경우로 한정하였다, 소변 검사 결과 요중 크레아티닌 농도가 정상범위(0.5-2.0 g/L)에 포함되지 않은 경우, 만성 콩팥병을 진단받은 적이 있거나, 신사구체 여과율이 < 30 mL/min/1.73 m^2인 경우는 대상자에서 제외하였다. 또한 설문조사에서 생선 섭취 빈도가 미확인된 경우 대상자에서 제외하였다.

지역주민 건강검진에 참여한 대상자는 총 1320명이었다. 이 중 소변 시료를 채취한 대상자는 1193명이었다. 환경오염 취약지역(n=665)과 비교지역(n=254)에서 생선 섭취 빈도를 기준(주 1회 이하, 주 2-3회 이상)으로 층화한 후, 각 군별로 분포에 따른 최대값과 중앙값에서 표본을 선정하였다. 발전소, 제철소, 석유화학단지, 내륙 비교지역, 해안 비교지역으로 나누어진 각 군에서 총 비소를 기준으로 최대값은 순차적으로 작은 농도를 가지는 대상자를 선정하였고, 중앙값은 순차적으로 큰 농도와 작은 농도를 가지는 대상자를 동일한 분율로 대상자를 선정하였다. 최종적으로 환경오염 취약지역은 226명, 비교지역은 120명으로 총 346명이 비소의 환경 노출에 의한 건강영향 평가를 분석하기 위하여 선정되었다(Fig. 1). 단국대병원 연구윤리위원회의 승인을 받았고, 건강검진 및 설문조사를 시행하기 전 대상자로부터 사전 동의를 받았다.

2. 자료수집

설문조사 요원은 사회경제적 수준과 비소 노출에 관한 설문지를 이용하여 연구대상자를 조사하였다. 사회경제적 수준에 관한 내용으로는 성별, 연령, 결혼상태, 교육수준, 경제수준, 거주 지역 등으로 구성

하였다. 비소 노출에 관한 내용으로는 거주지 주변 산업단지 유무 및 종류, 식이(생선섭취 빈도), 식수 형태, 건강 행동(흡연, 음주, 운동), 현재 직업 등으로 구성하였다.

3. 실험방법

연구 기간 중 참여자를 대상으로 총비소 분석을 먼저 시행하였다. 요 시료는 용기에 채취한 후 분석할 때까지 –20°C로 동결 보관하였다. 표준물질(Tellurium 10 μg/L)은 1% 질산에 넣어 조제하였다. 시료 전처리는 생체시료 400 μl를 1% 질산 3,600 μl를 넣었다. 단계적으로 농도가 다른 보정용 표준용액을 표준물첨가법을 이용하여 측정하였다. 총비소 분석을 시행한 시료 중 선정 기준에 부합할 경우 비소 종분석을 시행하였다. 시료첨가용 표준용액은 요 시료에 희석하여 최소 2개 이상의 농도 수준으로 조제하였다. 검정표준용액은 Elusion 용액 혹은 증류수를 이용하여 희석하였다. 총비소 분석 및 비소 종분석 모두 유도결합플라즈마 질량분석기(inductively coupled plasma mass spectrometer)를 사용하여 이온화된 시료를 검출하였다. 비소 종분석에서 검출 한계값(limit of detection)은 As^{5+}는 0.100 μg/L, As^{3+}는 0.127 μg/L, MMA는 0.159 μg/L, DMA는 0.245 μg/L, AsB는 0.634 μg/L이었다. 비소 종분석시 검출 한계값 이하로 나온 시료는 As^{5+}는 15.6%, As^{3+}는 5.5%, MMA는 8.1%, DMA는 0%, AsB는 0%으로 전반적으로 낮았다. 검출 한계값 이하에서는 종비소의 분포가 음의 왜도 분포를 보이기 때문에 각각의 검출 한계값의 2/3 수치를 대표값으로 치환하였다. 비소 총합(∑As)은 As^{5+}, As^{3+}, MMA, DMA, AsB 수치를 더한 값으로, 무기비소는 As^{5+}와 As^{3+} 수치를 더한 값으로, 무기비소 노출지표는 As^{5+}, As^{3+}, MMA, DMA 수치를 더한 값으로 계산하였다.

4. 정도관리

비소 종 분리용 정도관리 물질로는 NIST사에서 제조하는 2가지 레벨의 시약을 사용하였다. As^{5+}, As^{3+}, MMA, DMA, AsB은 각 시약마다 다른 기준값을 가지고 있고 범위내 포함되는지를 확인하였다. 매 검사마다 측정법의 신뢰성을 확보하였다. CDC에서 발간한 화학물질 노출 보고서와 국립독성연구원에서 제시한 생체시료 분석법 Validation을 준수하였다.

5. 분석방법

요중 비소 수치는 각 시료의 측정값에 요중 크레아티닌으로 나누어서 보정하였다. 모수적인 분석법을 적용하기 위해 요중 비소가 로그-정규 분포를 보임을 확인한 후 측정된 모든 종비소 농도를 로그 변환하였다. 그룹 간 차이를 비교하기 위하여 카이제곱검정과 일원배치분산분석을 시행하여 p-value를 산출하였다. 요중 비소 수치에 영향을 줄 수 있는 여러 요인들을 보정하여 중회귀분석을 시행하였다. 회귀계수를 지수화함으로써 기화평균의 비를 추정할

Table 1. Characteristics of the study population with urine samples speciated for urinary arsenic

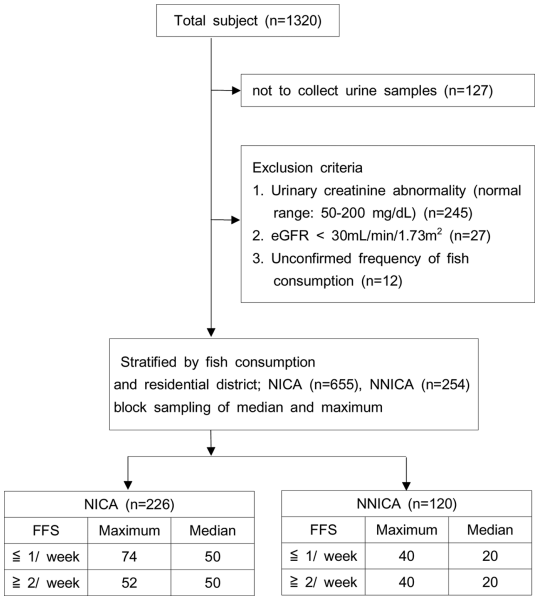
	NICA	NNICA	p-value*
	n (%)	n (%)	
Sex			
Male	110 (48.7)	72 (60.0)	0.045
Female	116 (51.3)	48 (40.0)	
Age			
Mean±SD	62.5±10.4	64.0±8.4	0.135
≤59	85 (37.6)	40 (33.3)	0.495
60-69	76 (33.6)	48 (40.0)	
≥70	65 (28.8)	32 (26.7)	
Current tobacco use			
No	190 (84.1)	98 (81.7)	0.569
Yes	36 (15.9)	22 (18.3)	
Fish consumption			
Once a week or less	102 (45.1)	60 (50.0)	0.388
At least twice a week	124 (54.9)	60 (50.0)	
Type of water comsumed			
Tapwater, etc.†	162 (71.7)	86 (71.7)	0.998
Ground water	64 (28.3)	34 (28.3)	
Occupational category			
Farmer/fisherman	103 (45.6)	85 (70.8)	<0.001
Retailer/service employee	13 (5.8)	4 (3.3)	
Housewives	41 (18.1)	12 (10.0)	
Unemployee	34 (15.0)	11 (9.2)	
Others	35 (15.5)	8 (6.7)	

*P-value were calculated using t-test for continuous variable and chi-square test for categorical variables
† etc. included mineral water, purifier water
NICA, Near by industrial complex area; NNICA, Not near by industrial complex area
SD, standard deviation

수 있었다. 회귀모델 내에서 다른 요인들을 고정한 후 독립변수에 따른 기하평균의 비를 계산할 수 있었다. 모든 자료는 SPSS ver. 23을 이용하여 통계분석하였다.

III. 결 과

연구대상자들의 인구사회학적 특징은 Table 1와 같다. 총대상자는 346명이었다. 환경오염 취약지역의 경우 여성이 116명(51.3%)으로 분율이 더 높았고, 비교지역의 경우 남성이 72명(60.0%)으로 분율이 더 높았다. 평균 연령은 환경오염 취약지역이 62.5±10.4세로 비교지역 64.0±8.4 세보다 더 낮았다. 흡연률은 비교지역이 18.3%로 환경오염 취약지역 15.9%보다 더 높았다. 생선 섭취 빈도에 따라 층화 표본추출을 시행하였지만 환경오염 취약지역 중 최대값 인근 표본에서 대상자가 한정되어 있어서 환경오염 취약지역에서 생선 섭취 빈도가 주 2회 이상인 경우가 54.9%로 더 많이 선정되었다(Fig. 1). 지하수를 식수로 이용하는 경우는 환경오염 취약지역과 비교지역에서 28.3%으로 동일하게 관찰되었다. 직업이 농어업민이라고 응답한 사람은 비교지역에서 70.8%으로 환경오염 취약지역에서 45.6%보다 더 높았다. 가정주부라고 응답한 사람은 환경오염 취약지역에서 18.1%으로 비교지역 10.0%보다 더 높았다.



NICA (n=226)		
FFS	Maximum	Median
≦ 1/ week	74	50
≧ 2/ week	52	50

NNICA (n=120)		
FFS	Maximum	Median
≦ 1/ week	40	20
≧ 2/ week	40	20

Fig. 1. Flow chart of subject selection to evaluate spot urine samples
eGFR, estimated glomerular filtration rate; NICA, Near by industrial complex area; NNICA, Not near by industrial complex area; FFS, Frequency of fish consumption.

중앙값 인근 표본에서 환경오염 취약지역과 비교지역간의 무기비소 노출지표는 유의한 차이가 없었지만, ∑As는 환경오염 취약지역에서 비교지역보다 유의하게 증가하였다(p=0.011). ∑As는 성별, 연령, 흡연 유무, 생선 섭취 빈도, 식수 형태, 현재 직업에 따라 유의한 차이가 나타났다. ∑As는 남성에서 환경오염 취약지역(171.07 μg/g)이 비교지역(127.59 μg/g)보다 유의하게 높았다(p=0.018). ∑As는 60대 연령군에서 환경오염 취약지역(181.98 μg/g)이 비교지역(120.45 μg/g)보다 유의하게 높았다(p=0.020). ∑As는 현재 흡연을 하지 않을 경우에서 환경오염 취약지역(180.15 μg/g)이 비교지역(129.18 μg/g)보다 유의하게 높았다(p=0.014). ∑As는 생선 섭취 빈도가 주 2회 이상인 경우에서 환경오염 취약지역(195.57 μg/g)이 비교지역(120.14 μg/g)보다 유의하게 높았다(p=0.013). ∑As는 식수로 지하수를 마시는 경우에서 환경오염 취약지역(203.49 μg/g)이 비교지역(124.99 μg/g)보다 유의하게 높았다(p=0.005). ∑As는 농어업이 아닌 직업군에서 환경오염 취약지역(166.88 μg/g)이 비교지역(100.42 μg/g)보다 유의하게 높았다(p=0.003). 무기비소 노출지표는 생선 섭취 빈도가 주 2회 이상인 경우(p=0.038)와 식수로 지하수를 마시는 경우(p=0.005)에서 환경오염 취약지역이 비교지역보다 유의하게 높았다(Table 2).

최대값 인근 표본에서 환경오염 취약지역과 비교지역간의 무기비소 노출지표는 유의한 차이가 없었지만, ∑As는 환경오염 취약지역에서 비교지역보다 유의하게 증가하였다(p=<0.001). ∑As는 성별, 연령, 흡연 유무, 생선 섭취 빈도, 식수 형태, 현재 직업에 따라 유의한 차이가 나타났다. 특히 연령에 따라 층화하였을 때 50대 이하 연령군에서는 환경오염 취약지역과 비교지역간 유의한 차이가 없었지만, 60대 이상 연령군에서는 환경오염 취약지역이 비교지역보다 유의하게 증가하였다. 하지만 무기비소 노출지표는 환경오염 취약지역과 비교지역간의 유의한 차이가 없었다.

Table 4은 비소의 환경 노출 및 요중 비소 농도에

Table 2. Geometric means and 95% CI of urinary arsenic in the study population using median sampling
(unit: μg/g of creatinine)

		$As^{5+}+As^{3+}+MMA+DMA$			Σ As		
		NICA	NNICA	p-value	NICA	NNICA	p-value
Total		(n=100)	(n=40)		(n=100)	(n=40)	
	GM (GSD)	46.85 (2.14)	36.51 (2.24)	0.087	173.57 (1.55)	124.41 (2.10)	0.011
	GM 95% CI	40.36-54.39	28.44-46.88		159.29-189.13	98.80-156.66	
Sex							
M		(n=55)	(n=20)		(n=55)	(n=20)	
	GM (GSD)	46.70 (2.22)	41.00 (2.15)	0.531	171.07 (1.54)	127.59 (1.74)	0.018
	GM 95% CI	37.80-57.68	29.31-57.36		152.70-191.65	100.21-162.45	
F		(n=45)	(n=20)		(n=45)	(n=20)	
	GM (GSD)	47.04 (2.06)	32.51 (2.34)	0.076	176.69 (1.57)	121.31 (2.49)	0.093
	GM 95% CI	38.11-58.06	22.41-47.15		154.83-201.63	81.37-180.85	
Age							
≤59		(n=36)	(n=14)		(n=36)	(n=14)	
	GM (GSD)	43.11 (2.14)	37.81 (2.22)	0.591	152.95 (1.53)	113.75 (2.42)	0.249
	GM 95% CI	33.63-55.25	24.90-57.40		133.15-175.70	71.55-180.84	
60-69		(n=32)	(n=17)		(n=32)	(n=17)	
	GM (GSD)	48.46 (2.31)	31.03 (2.52)	0.093	181.98 (1.56)	120.45 (2.13)	0.020
	GM 95% CI	36.27-64.73	20.01-48.10		156.14-212.09	84.06-172.59	
≥70		(n=32)	(n=9)		(n=32)	(n=9)	
	GM (GSD)	49.75 (2.01)	47.02 (1.74)	0.825	190.88 (1.54)	152.03 (1.59)	0.175
	GM 95% CI	39.07-63.34	32.75-67.49		164.53-221.44	112.14-206.11	
Current tobacco use							
No		(n=89)	(n=34)		(n=89)	(n=34)	
	GM (GSD)	48.76 (2.15)	38.28 (2.11)	0.117	180.15 (1.53)	129.18 (2.04)	0.014
	GM 95% CI	41.60-57.16	29.79-49.19		164.85-196.87	101.66-164.15	
Yes		(n=11)	(n=6)		(n=11)	(n=6)	
	GM (GSD)	33.90 (1.96)	27.91 (3.13)	0.661	128.47 (1.53)	100.51 (2.58)	0.467
	GM 95% CI	22.77-50.48	11.21-69.45		99.87-165.25	47.10-214.49	
Fish consumption							
Once a week or less		(n=50)	(n=20)		(n=50)	(n=20)	
	GM (GSD)	39.19 (1.99)	36.10 (2.69)	0.694	154.05 (1.55)	128.83 (2.09)	0.215
	GM 95% CI	32.38-47.42	23.40-55.72		136.37-174.02	93.24-178.00	
At least twice a week		(n=50)	(n=20)		(n=50)	(n=20)	
	GM (GSD)	56.01 (2.21)	36.92 (1.81)	0.038	195.57 (1.50)	120.14 (2.15)	0.013
	GM 95% CI	44.94-69.81	28.44-47.93		174.73-218.90	85.83-168.17	
Type of water comsumed							
Tap water, etc.		(n=63)	(n=25)		(n=63)	(n=25)	
	GM (GSD)	44.12 (2.23)	41.45 (2.59)	0.757	158.10 (1.51)	124.06 (2.16)	0.146
	GM 95% CI	36.17-53.81	28.54-60.20		142.84-174.99	91.78-167.71	
Ground water		(n=37)	(n=15)		(n=37)	(n=15)	
	GM (GSD)	51.90 (1.97)	29.54 (1.53)	0.005	203.49 (1.56)	124.99 (2.07)	0.005
	GM 95% CI	41.69-64.60	23.81-36.65		176.48-234.64	86.56-180.49	
Occupational category							
Others		(n=48)	(n=13)		(n=48)	(n=13)	
	GM (GSD)	42.95 (2.30)	30.08 (3.18)	0.215	166.88 (1.63)	100.42 (1.95)	0.003
	GM 95% CI	33.91-54.38	16.04-56.41		145.40-191.52	69.85-144.38	
Farmer/fisherman		(n=52)	(n=27)		(n=52)	(n=27)	
	GM (GSD)	50.77 (1.98)	40.08 (1.78)	0.129	180.00 (1.48)	137.93 (2.16)	0.100
	GM 95% CI	42.15-61.15	32.27-49.78		161.94-200.06	103.24-184.27	

*Log-transformed variables used in t-test
NICA, Near by industrial complex area; NNICA, Not near by industrial complex area
GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; 95% CI GM, 95% confidential interval for geometric mean

Table 3. Geometric means and 95% CI of urinary arsenic in the study population using maximum sampling (unit: μg/g of creatinine)

		$As^{5+}+As^{3+}$+MMA+DMA			Σ As		
		NICA	NNICA	p-value	NICA	NNICA	p-value
Total		(n=126)	(n=80)		(n=126)	(n=80)	
	GM (GSD)	65.26 (2.29)	59.09 (2.03)	0.377	422.88 (1.71)	259.76 (2.05)	<0.001
	GM 95% CI	56.48-75.41	50.58-69.04		385.14-464.32	222.03-303.89	
Sex							
M		(n=55)	(n=52)		(n=55)	(n=52)	
	GM (GSD)	63.99 (2.25)	54.91 (1.81)	0.267	404.96 (1.69)	234.73 (1.95)	<0.001
	GM 95% CI	51.62-79.31	46.75-64.50		352.79-464.85	195.73-281.49	
F		(n=71)	(n=28)		(n=71)	(n=28)	
	GM (GSD)	66.27 (2.33)	67.71 (2.42)	0.911	437.31 (1.73)	313.53 (2.17)	0.018
	GM 95% CI	54.44-80.66	48.78-93.99		385.07-496.63	235.32-417.74	
Age							
≤59		(n=49)	(n=26)		(n=49)	(n=26)	
	GM (GSD)	61.94 (2.29)	66.89 (1.79)	0.675	385.13 (1.76)	292.45 (1.94)	0.063
	GM 95% CI	49.10-78.12	53.45-83.72		328.66-451.29	226.68-377.30	
60-69		(n=44)	(n=31)		(n=44)	(n=31)	
	GM (GSD)	67.70 (2.50)	58.72 (2.34)	0.497	480.56 (1.66)	267.78 (2.36)	0.001
	GM 95% CI	51.62-88.78	43.54-79.18		413.60-558.37	197.95-362.26	
≥70		(n=33)	(n=23)		(n=33)	(n=23)	
	GM (GSD)	67.17 (2.04)	51.81 (1.89)	0.167	409.72 (1.66)	218.05 (1.71)	<0.001
	GM 95% CI	52.68-85.66	39.97-67.15		344.86-486.79	175.13-271.48	
Current tobacco use							
No		(n=101)	(n=64)		(n=101)	(n=64)	
	GM (GSD)	67.99 (2.33)	61.63 (1.98)	0.436	440.68 (1.70)	271.60 (1.97)	<0.001
	GM 95% CI	57.65-80.19	52.11-72.88		397.21-488.92	230.00-320.73	
Yes		(n=25)	(n=16)		(n=25)	(n=16)	
	GM (GSD)	55.30 (2.10)	49.95 (2.24)	0.681	357.99 (1.69)	217.32 (2.34)	0.025
	GM 95% CI	41.32-73.99	33.67-74.12		291.50-439.64	143.22-329.77	
Fish consumption							
Once a week or less		(n=52)	(n=40)		(n=52)	(n=40)	
	GM (GSD)	63.45 (2.26)	53.65 (2.01)	0.301	367.11 (1.66)	263.00 (1.80)	0.004
	GM 95% CI	50.83-79.20	43.23-66.59		319.93-421.23	219.09-315.70	
At least twice a week		(n=74)	(n=40)		(n=74)	(n=40)	
	GM (GSD)	66.57 (2.32)	65.08 (2.05)	0.886	467.07 (1.71)	256.56 (2.30)	<0.001
	GM 95% CI	54.96-80.63	52.09-81.31		413.35-527.78	198.29-331.95	
Type of water comsumed							
Tap water, etc.		(n=99)	(n=61)		(n=99)	(n=61)	
	GM (GSD)	67.76 (2.24)	56.60 (2.06)	0.156	424.35 (1.73)	253.02 (2.01)	<0.001
	GM 95% CI	57.81-79.42	47.22-67.83		381.03-472.58	212.28-301.57	
Ground water		(n=27)	(n=19)		(n=27)	(n=19)	
	GM (GSD)	56.87 (2.47)	67.87 (1.96)	0.475	417.56 (1.65)	282.63 (2.18)	0.045
	GM 95% CI	40.41-80.04	50.18-91.78		345.57-504.54	198.94-401.52	
Occupational category							
Others		(n=75)	(n=22)		(n=75)	(n=22)	
	GM (GSD)	63.10 (2.22)	47.45 (2.22)	0.143	408.05 (1.73)	229.60 (2.05)	<0.001
	GM 95% CI	52.71-75.55	33.98-66.26		360.68-461.65	170.19-309.75	
Farmer/fisherman		(n=51)	(n=58)		(n=51)	(n=58)	
	GM (GSD)	68.57 (2.41)	64.22 (1.94)	0.664	445.67 (1.68)	272.20 (2.05)	<0.001
	GM 95% CI	53.88-87.28	54.16-76.15		386.27-514.22	226.36-327.33	

*Log-transformed variables used in t-test

NICA, Near by industrial complex area; NNICA, Not near by industrial complex area

GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; 95% CI GM, 95% confidential interval for geometric mean

Table 4. Adjusted geometric mean ratio (95% CI) of urinary arsenic species† from multiple regression analysis‡

	Median sampling			Maximum sampling		
	As^{5+}+As^{3+}	As^{5+}+As^{3+} +MMA+DMA	Σ As	As^{5+}+As^{3+}	As^{5+}+As^{3+} +MMA+DMA	Σ As
Area						
Inland area	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
Coastal area	2.04 (1.02-4.08)*	1.34 (0.81-2.21)	1.86 (1.36-2.56)*	1.25 (0.74-2.09)	1.60 (1.14-2.25)*	2.43 (1.93-3.05)*
Power plant	1.76 (1.00-3.10)	1.61 (1.07-2.41)*	2.22 (1.71-2.87)*	0.87 (0.55-1.40)	1.68 (1.23-2.29)*	2.94 (2.39-3.62)*
Steel-mill	2.07 (1.18-3.63)*	1.38 (0.92-2.08)	1.68 (1.29-2.17)*	1.10 (0.65-1.86)	1.27 (0.90-1.79)	2.44 (1.93-3.08)*
Petrochemical industry	2.03 (1.05-3.93)*	1.34 (0.83-2.16)	1.55 (1.15-2.10)*	1.40 (0.73-2.70)	1.08 (0.70-1.68)	1.70 (1.27-2.27)*
Sex						
Male	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
Female	1.07 (0.73-1.59)	0.93 (0.70-1.23)	0.99 (0.83-1.19)	0.98 (0.66-1.46)	1.16 (0.89-1.51)	1.22 (1.02-1.46)*
Age						
≤59	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
60-69	0.91 (0.59-1.40)	0.96 (0.70-1.31)	1.09 (0.89-1.33)	0.98 (0.67-1.43)	1.00 (0.78-1.29)	1.10 (0.93-1.30)
≥70	1.04 (0.66-1.65)	1.12 (0.80-1.56)	1.18 (0.96-1.46)	1.35 (0.90-2.03)	0.97 (0.74-1.27)	0.95 (0.80-1.14)
Current tobacco use						
No	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
Yes	0.74 (0.41-1.34)	0.69 (0.45-1.06)	0.70 (0.54-0.92)*	0.84 (0.53-1.31)	0.89 (0.66-1.21)	0.92 (0.76-1.13)
Frequency of fish consumption						
Once a week or less	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
At least twice a week	1.10 (0.77-1.59)	1.24 (0.95-1.61)	1.08 (0.92-1.28)	0.97 (0.70-1.34)	1.09 (0.88-1.34)	1.11 (0.96-1.28)
Type of water consumed						
Tap water, etc.	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
Ground water	0.82 (0.55-1.22)	0.93 (0.70-1.23)	1.08 (0.90-1.29)	1.28 (0.86-1.89)	1.00 (0.77-1.29)	1.10 (0.93-1.31)
Occupational category						
Others	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)	1.0 (reference)
Farmer/fisherman	1.23 0.84-1.81)	1.22 (0.92-1.60)	1.15 (0.97-1.37)	1.11 (0.77-1.59)	1.22 (0.96-1.55)	1.16 (0.99-1.37)

*$p<0.05$
†Log-transformed variables used in multiple regression analysis
‡Exponentiated b coefficient from urinary arsenic species' multiple regression analysis adjusted for area, sex, age, current tobacco use, fish consumption, type of water comsumed, occupational category
CI, confidential interval; Σ As, As^{5+} + As^{3+} + MMA + DMA + AsB
MMA, monomethylarsonic acid; DMA dimethylarsinic acid; AsB, arsenobetaine

영향을 줄 수 있는 인자로써 거주 지역, 성별, 연령, 흡연 유무, 생선섭취 빈도, 식수 형태, 현재 직업을 보정한 중회귀 분석을 시행한 결과이다. 각 군별 중앙값 인근에서 표본을 선정한 경우, 무기비소는 해안지역이 내륙지역보다 기하평균이 2.04배(95% CI=1.02-4.08) 유의하게 증가하였다. 내륙지역에 비해 제철소는 기하평균이 2.07배(95% CI=1.18-3.63), 석유화학단지는 기하평균이 2.03배(95% CI=1.05-3.93) 유의하게 증가하였다. 무기비소 노출지표는 발전소가 내륙지역보다 기하평균이 1.61배(95% CI=1.07-2.41) 유의하게 증가하였다. ∑As은 내륙지역에 비해 해안지역(GM ratio=1.86, 95% CI=1.36-2.56), 발전소(GM ratio=2.22, 95% CI=1.71-2.87), 제철소(GM ratio=1.68, 95% CI=1.29-2.17), 석유화학단지

(GM ratio=1.55, 95% CI=1.15-2.10)에서 유의하게 증가하였다. 또한 ∑As의 경우 현재 흡연자에서 유의하게 감소하였다(GM ratio=0.70, 95% CI=0.54-0.92). 각 군별 최대값 인근에서 표본을 선정한 경우, 무기비소는 각 군별 유의한 차이가 나타나지 않았다. 무기비소 노출지표는 내륙지역에 비해 해안지역은 기하평균이 1.60배(95% CI=1.14-2.25), 발전소는 기하평균이 1.68배(95% CI=1.23-2.29) 유의하게 증가하였다. ∑As은 내륙지역에 비해 해안지역(GM ratio =2.43, 95% CI=1.93-3.05), 발전소(GM ratio=2.94, 95% CI=2.39-3.62), 제철소(GM ratio=2.44, 95% CI=1.93-3.08), 석유화학단지(GM ratio=1.70, 95% CI=1.27-2.27)에서 유의하게 증가하였다. 또한 ∑As의 경우 여성에서 유의하게 증가하였다(GM ratio=1.22, 95% CI=0.54-0.92)

IV. 고 찰

비소는 자연적으로 토양, 암석의 풍화 및 침식 작용, 비소계 농약의 사용, 화석연료의 생산 및 연소, 산업용 폐기물의 소각 등에 의해 환경 중으로 배출될 수 있다. 비소의 직업적 노출은 비철금속 제련 과정에서 발생하는데 비소가 금, 아연, 구리, 납 등에 불순물로 함유되어 있어 이들 금속의 제련 과정에서 노출될 수 있다. 비소는 합금제조에 자주 이용된다. 과거에는 농약, 살충제 등에 많이 사용되었으나 최근에는 독성으로 인해 사용량이 줄어들고 있다. 비소화합물은 주로 방부제, 제초제, 동물 사료의 항균첨가제, 금속류의 윤활첨가제, 의약품 등 다양한 분야에서 사용된다.[2] 이렇듯 비소는 우리 주변에서 다양한 방식으로 노출될 수 있다. 따라서 본 연구는 산업단지 인근에 거주하는 주민을 대상으로 화석연료의 연소, 제련 과정에서 발생하는 비소에 의한 건강영향을 조사하였다.[13]

대기 중 비소는 무기비소 형태로 존재한다. 무기비소는 광석들이 가열되면 미세 먼지의 형태로 대기 중으로 방출된다. 대기 중 비소는 대부분 물에 의해 환경으로 유입된다. 충남 지역에서 대기 중 총 중금속의 농도는 제철소, 석유화학단지, 발전소, 비교지역 순으로 나타났다. 중금속이 차지하는 비율은 측정지역 및 시기에 따라 다소 차이가 있었다. 특히 비소는 발전소, 제철소, 석유화학단지에 비해 비교지역에서 상당히 낮은 수준의 비소가 측정되었고, 비교지역 간의 비소 농도 차이는 크게 나타나지 않았다.[13]

산화된 물(지표수)에서는 주로 As^{5+}로서 존재하고 환원된 상태(지하수)에서는 As^{3+}로 더 많이 존재한다. 또한 산화된 토양에서 As^{5+}, 환원된 토양에서 As^{3+}의 형태로 존재한다. 토양에서 미생물 작용으로 비소의 형태가 변형될 수 있다. 해양생물에서는 무기비소가 유기비소(arsenobetaine, arsenocholine, arsenosugar)로 전환되는 것으로 알려져 있다.[14] 본 연구결과에서는 보정하여 분석하였을 때 식수 형태에 따른 유의한 차이가 없었다. 프랑스 국민건강영향조사 자료 분석 결과 생선 섭취 빈도가 주 2회 이상인 경우에서 월 1회 이하인 경우보다 무기비소 노출지표가 더 높게 나타났다.[14] 본 연구에서는 해안지역에서 거주하는 주민의 경우 ∑As이 내륙 지역보다 증가하였는데, 생선섭취 빈도를 보정하고도 높게 나타났다. 이는 생선섭취뿐만 아니라 조개류 포함한 다른 해산물을 먹을 경우가 더 높기 때문일 것으로 추정된다.

As^{5+}에서 As^{3+} 환원되는 과정과 이후 MMA와 DMA로 환원되는 과정은 S-adenosyl methionine(SAM)과 glutathione(GSH)가 중요한 효소로 작용한다. 이러한 생체변영은 주로 간에서 이루어지며, 신장에서도 메틸화 과정이 일부 작용한다.[3] 메틸화 과정은 개인간 차이가 발생할 수 있는데 SAM의 혈중 농도는 남성에서 더 높은 것으로, GSH는 나이가 들수록 감소하는 것으로 알려져 있다.[18,19] 최대값 인근에서 표본을 선정한 경우 ∑As이 여성에서 더 높게 나타났는데 이는 혈중 SAM의 활성화의 차이에 의한 것으로 생각된다.

중간값 인근에서 표본을 선정하였을 때 발전소 인근 주민에게서 측정한 무기비소 노출지표의 기하평균은 50.39 μg/g이었으며 내륙지역보다 유의하게 증가하였다. 독일 일반 인구에서 측정된 무기비소 노출지표의 기하평균인 4.02 μg/g인데 이와 비교시 상당한 차이를 보였다.[1] 중앙값 인근에서 표본을 선정하여 환경오염 취약지역 주민에게서 측정한 ∑As의 기하평균의 범위는 144.2-211.26 μg/g으로 모든 지역에서 내륙지역보다 유의하게 증가하였다. 독일 일반 인구에서 측정된 ∑As의 기하평균인 7.90 μg/g과도 상당한 차이가 나타났다.[20] 국내 강릉 지역주민들을 대상으로 측정한 요중 ∑As의 기하평균인

17.25 μg/g에 비해서도 증가하였다.[12] 비교지역은 산업단지로부터 거리가 10 km 이상인 지역으로 선정하였는데 1999년 슬로바키아에서 발전소로부터 10 km 이상 떨어진 지역의 토양 내 비소 농도는 유럽 지역의 평균 비소 농도 범위(2-20 μg/g)에 포함되는 것으로 나타난 연구 결과를 근거로 하였다.[1]

흡연에 의한 무기비소 노출지표는 각 군별로 차이가 없었는데 이는 최근 담배에 함유된 비소가 상대적으로 적기 때문이다. 농부와 어민의 경우 통계적으로 유의하진 않지만 요중 비소 농도가 일정하게 증가해 있는 것을 볼 수 있는데, 직접 재배한 농작물을 섭취하거나 해산물을 먹을 기회가 더 증가할 수 있기 때문인 것으로 여겨진다.

과거에는 무기비소가 농약류로 많이 사용되었으나 지금은 농업에서 사용할 수 없다.[2] 유럽에서 시행한 연구에서 흡연은 요중 비소에 유의한 관련성이 없는 것으로 알려졌다.[15] 무기비소는 자연식품과 가공식품 모두에 있으며, 해양식품, 가금류와 일부 곡물제품에 함유하고 있는 것으로 알려졌다.

무기비소의 만성노출은 피부, 방광, 폐에서 암을 유발하는 것으로 보고되고 있다. 미국 환경청과 국제암연구소에서는 무기비소를 인체발암물질로 분류하고 있다.[16,17] 유기비소의 경우 랫드와 마우스를 상대로 한 동물시험에서 방광암을 증가하시키는 것으로 보고되었다. 하지만 유기비소의 사람에 대한 발암성 연구의 근거는 아직 명확하지 않다.[2]

이 연구의 제한점은 첫째, 시료를 채취하기 전 48시간동안 해산물 섭취를 제한하지 못 한 것이다. 주민검진 자료를 이용하다 보니 해산물 섭취를 제한하여 대상자를 선정하는데 한계가 있었다. 이를 보완하기 위하여 생선섭취 빈도를 이용하였다. 둘째 요중 비소 농도는 반감기가 짧기 때문에 만성 노출을 추정하는데 한계가 있다. 하지만 만성 노출을 측정하는 방법으로 모발이나 손발톱을 이용할 수 있지만 이들 시료는 외부 물질에 오염이 될 가능성이 크기 때문에 정확하게 노출을 나타내기가 어렵다. 따라서 시료 선정 기준을 엄격하게 적용하는 방법으로 소변 시료가 가지는 한계점을 극복하였다.

V. 결 론

발전소, 제철소, 석유화학단지 인근에 거주하는 주민들은 산업단지의 영향이 없는 내륙 지역에 거주하는 주민들에 비해 환경 노출에 의한 요중 비소 농도가 증가하였다. 특히 발전소 인근에 거주하는 주민들에게서 무기비소 노출지표가 가장 높게 측정되었다. 하지만 해안 지역에 거주하는 주민들은 산업단지에 거주하는 주민들과 유사한 요중 비소 농도가 관찰되었는데 생선섭취뿐만 아니라 다른 해산물을 섭취할 기회가 더 높기 때문인 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 충청남도 도청의 연구지원에 의하여 수행되었습니다.

References

1. Ranft U, Miskovic P, Pesch B, Jakubis P, Fabianova E. EXPASCAN Study Group. Association between arsenic exposure from a coal-burning power plant and urinary arsenic concentrations in Prievidza District, Slovakia. *Environ Health Perspect.* 2003; 111(7): 889-894.
2. Risk assessment of heavy metals-arsenic. National institute of toxicological research; 2008.
3. Watanabe T, Hirano S. Metabolism of arsenic and its toxicological relevance. *Arch Toxicol.* 2013; 87(6): 969-979.
4. Wilhelm M, Pesch B, Wittsiepe J, Jakubis P, Miskovic P, Keegan T, et al. Comparison of arsenic levels in fingernails with urinary As species as biomarkers of arsenic exposure in residents living close to a coal-burning power plant in Prievidza District, Slovakia. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 2005; 15(1): 89-98.
5. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Biologic fate of arsenic in the body. Available: http://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=1&po=9 [accessed 16 May 2016]
6. Morton J, Leese E. Arsenic speciation in clinical samples: urine analysis using fast micro-liquid chromatography ICP-MS. *Anal Bioanal Chem.* 2011; 399(5): 1781-1788.
7. Lee JH, Kang HS, Kim BB. Health effects of the offensive odor in residents living near the petrochemical industries complex area and the thermoelectric power plant. *Kor J Env Hlth.* 2007; 33(2): 83-91.

8. Yom YK, Ji SK, Li SH, Cho TJ, Jeon HL, Jang BK, et al. Concentration of heavy metals in air and soil around the D iron-manufacturing company area in Chungnam, Korea. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering.* 2009; 24(1): 25-33.
9. Cho TJ, Jeong MH, Jeon JM, Son BS. A study on the concentration of fine particles and heavy metals in iron works. *Journal of the Environmental Sciences.* 2009; 18(4): 401-409.
10. Pesch B, Ranft U, Jakubis P, Nieuwenhuijsen MJ, Hergemöller A, Unfried K, et al. Environmental arsenic exposure from a coal-burning power plant as a potential risk factor for nonmelanoma skin carcinoma: results from a case-control study in the district of Prievidza, Slovakia. *Am J Epidemiol.* 2002; 155(9): 798-809.
11. Bencko V, Rames J, Fabiánová E, Pesek J, Jakubis M. Ecological and human health risk aspects of burning arsenic-rich coal. *Environ Geochem Health.* 2009; 31(1): 239-243.
12. Monitoring study on exposure level and biomarkers of environmental pollutants (Gangneung, 3rd year). National Institute of Environmental Research; 2010.
13. Study on the Health Status of the Residents near areas vulnerable to Environmental pollution in Chungnam Province (2nd year). The environmental health center of DKUH; 2014.
14. Saoudi A, Zeghnoun A, Bidondo ML, Garnier R, Cirimele V, Persoons R, et al. Urinary arsenic levels in the French adult population: the French National Nutrition and Health Study, 2006-2007. *Sci Total Environ.* 2012; 433: 206-215.
15. Gebel TW, Suchenwirth RH, Bolten C, Dunkelberg HH. Human biomonitoring of arsenic and antimony in case of an elevated geogenic exposure. *Environ Health Perspect.* 1998; 106(1): 33-39.
16. United States Environmental Protection Agency. Arsenic compound. Available: https://www3.epa.gov/airtoxics/hlthef/arsenic.html [accessed 16 may 2016]
17. IARC. Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man. Geneva: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 100C
18. Poirier LA, Brown AT, Fink LM, Wise CK, Randolph CJ, Delongchamp RR, et al. Blood S-adenosylmethionine concentrations and lymphocyte methylenetetrahydrofolate reductase activity in diabetes mellitus and diabetic nephropathy. *Metabolism.* 2000; 50(9): 1014-1018.
19. van Lieshout EM, Peters WH. Age and gender dependent levels of glutathione and glutathione S-transferases in human lymphocytes. *Carcinogenesis.* 1998; 19(10): 1873-1875.
20. Heinrich-Ramm R1, Mindt-Prüfert S, Szadkowski D. Arsenic species excretion in a group of persons in northern Germany--contribution to the evaluation of reference values. *Int J Hyg Environ Health.* 2001; 203(5-6): 475-7.