Environment Parameters Affecting Heavy Metal Concentration in Sand Collected from Children Playground in Seoul Metropolitan Area

Hyunsun An, Juhee Kim¹, and Seunghun Hyun^{1*}

*Building Planning & Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology,
Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Korea*

¹Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea

(Received: May 27 2013 Accepted: June 5 2013)

The concentrations of heavy metals such as cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), lead (Pb), zinc (Zn), nickel (Ni), and arsenic (As) in sand samples collected from selected children's playground and their correlation with environmental parameters, such as concentration of particulate matter in the atmosphere (PM₁₀), apartment age (> 5 years), clay and organic matter contents in sand samples, were analyzed. The average heavy metal concentration in samples was 0.040 mg kg⁻¹ for Cd, 0.200 mg kg⁻¹ for Cr, 1.75 mg kg⁻¹ for Cu, 15.1 mg kg⁻¹ for Ni, 3.42 mg kg⁻¹ for Pb, 66.7 mg kg⁻¹ for Zn and 0.750 mg kg⁻¹ for As, all of which were below the environmental regulatory level established by Korea Ministry of Environment. However, in the consideration of direct and oral exposure by children to playground sand, the risk of the concentration range in the samples might be greatly enhanced. Heavy metal concentration in samples collected from high PM₁₀ (> 70 µg m⁻³) area was slightly greater than in samples from low PM₁₀ (< 70 µg m⁻³), indicating the contribution of particulate matter in air phase to heavy metal concentration in playground sand samples. The concentrations of both Cd and Pb were the highest in apartments older than 21 years (0.050 mg kg⁻¹ and 5.28 mg kg⁻¹ for Cd and Pb respectively) and showed positive correlation with apartment age (p<0.01 and p<0.001 for Cd and Pb, respectively). Clay content in playground sands ranged 3.8~11.2% and was positively correlated with heavy metal concentration. Organic matter content was negligible (mostly < 0.1%) and showed poor correlation with heavy metal concentration. In conclusion, concentration of heavy metals in playground sand was found to be predominantly influenced by the apartment age and clay content in sand samples and supplemented by dust deposition of particulate matter (PM₁₀) from atmosphere.

Key words: Heavy metals, Playground sand, PM₁₀, Apartment age

- The heavy metal concentrations in sand samples collected from selected children's playground were below the environmental regulatory level established by Korea Ministry of Environment.
- The concentration of heavy metals in playground sand was predominantly influenced by the apartment age and clay content.

*Corresponding author : Phone: +82232903068, E-mail: soilhyun@korea.ac.kr

Introduction

21세기에 산업 기술의 발달로 인하여 인간 생활은 풍요롭게 되었지만, 각종 환경오염물의 다량 배출로 환경이 크게 오염되었다. 특히, 토양 중 중금속 오염은 생태계의 먹이사슬을 파괴하고 인간생활과 자연환경에 대한 독성 및 위험성을 가져올 수 있기 때문에 주요 관심사가 되고 있다 (Hanmon et al., 2007; Meuser, 2010). 토양오염에 의해 그 기능을 수행할 능력을 손실하였을 경우 결과적으로 토양은 사막화가 되어가고, 지하수 오염을 수반하는 등 제반 문제를 야기한다. 특히 서울시와 같은 도심지역에서는 토양 내 오염물질은 먼지의 섭취, 피부접촉 또는 호흡에 의하여 쉽게 노출이 되기 때문에 주요한 건강의 위협요소가 된다 (Abrahams, 2002; Brewer et al., 2001; NIER, 2007; De Miguel et al., 2007).

환경부는 전국 토양에 대한 토양오염 추세와 오염실태를 종합적으로 파악하고, 오염토양의 정화·복원 등의 대책을 수립·추진하기 위하여 17개 토양오염기준항목 또는 오염가능성이 높은 물질에 대하여 토양측정망조사 (1500여 지점)와 토양실태조사 (2000여 지점)를 매년 실시하고 있다 (MOE, 2002, NIER, 2004). 2002년 토양측정망 및 실태조사 결과 전체 조사지점 중 1.5% 지점만이 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 나타났다 (MOE, 2003). 이에 국공립연구기관과 대학을 중심으로 조사지역이 한정적이긴 하나 주로 금속성분에 대한 오염도 조사가 수행되었다. 그러나 환경오염에 대한 저항력이 약한 어린이들이 주로 이용하고 있는 놀이터의 토양오염에 대한 연구는 전무한 실정이며, 어린이들은 토양을 일종의 놀이도구로 생각하는 경향이 있다 (Lee et al., 2001). 그로 인하여 토양을 직접 손으로 만지고, 그 손을 입에 접촉하는 경우가 많기 때문에 토양 내 오염물질에 작간접적으로 노출되어 있다. 실제로 어린이들이 어린이 놀이터, 공원 등에서 의도적 또는 비의도적으로 섭취 또는 흡입하는 양은 일평균 40–200 mg으로 토양에 가장 많이 접촉하고 있으며 (Table 1), 위생에 대한 개념이 미흡하기 때문에 토양오염물질에 대한 노출위험이 가장 크다 (MOE, 2003). 더욱이 토양 중의 중금속이 어린이들의 섭취와 흡입을 통하여 건강상에 미칠 우려가 있기 때문에 어린이 놀이터 토양의 중금속 농도를 조사하고 오염실태를 파악할 필요가 있다 (Ljung et al., 2006).

대기 중에 부유하고 있는 총부유 분진 (TSP, Total suspended

particle: 대기에 떠 있는 모든 입자)과 모래먼지 내 중금속이 폐포 내에 침착되면 천식이나 기관지염 등 호흡기 질환이 발생되고 특히 10 μm 이하의 미세입자들은 호흡기를 통하여 기관지 깊숙이 도달하여 침착될 수 있다. 따라서 어린이 놀이터의 모래에 노출이 많이 되는 10세 미만의 어린이의 경우 기도질환의 발생 빈도 증가가 초래될 가능성이 있다 (Koh, 2002). 환경부에서 먼지는 1983년에 총 부유 분진 연평균 농도 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 기준으로 정하였으나 크기가 작은 미세입자의 인체 위해성에 대한 중요도가 알려지면서, 1995년 미세먼지 (PM_{10} , Particulate matter-10 μm 지름)로 바뀌어 연평균 80 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 하였고, 이후 2001년부터 연평균 70 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 강화되었다.

여러 연구에서 어린이 놀이터의 모래 중 중금속 오염도 조사연구를 살펴보면 지역별 (주거지역, 공업지역), 토양입경별 (모래층, 토양층), 놀이기구별 (목재, 철재, 플라스틱)로 나누어 조사한 자료는 있으나 대기오염도와 관련하여 놀이터 모래 중 중금속 오염도를 조사한 연구는 미흡하다. Lee et al. (2001)은 어린이 놀이터의 토양 중 중금속 오염에 관한 연구를 통해 미세먼지가 모래 중 중금속오염의 원인에 영향을 미칠 수 있다고 언급하였다. 또한 놀이터 모래 오염 실태조사에서는 다른 지역에 비해 공단지역의 어린이 놀이터 오염도가 높아 각종 산업시설에서 유해물질이 대기로 방출되어 토양 중 중금속에 영향을 준다는 연구결과도 나타났다 (Lee, 2003). 이는 대기 중의 미세먼지 (PM_{10})와 중금속이 오랜 시간 체류하면서 모래층에 침착하여 어린이 놀이터 모래 중 중금속에 영향을 미칠 것이라 판단된다.

본 연구는 환경부에서 규제대상 토양오염물질로 규정하고 있는 중금속 중 카드뮴, 구리, 비소, 크롬, 니켈, 아연, 구리를 2006년 환경부 대기환경연보에 수록된 서울시 23개 지역의 미세먼지 (PM_{10}) 오염도 측정결과 (MOE, 2006)와 14개 지역의 5년 이상 된 아파트 어린이 놀이터 모래 중 중금속 농도를 파악하여, 미세먼지 농도별 모래 중 평균 중금속 농도를 비교하였다. 또한 대기 중 중금속 농도와 모래 중 평균 중금속 농도와 유의성을 판단하고, 대기환경기준에 의해 미세먼지 (PM_{10}) 연평균 70 $\mu\text{g m}^{-3}$ 을 기준에 따른 모래 중금속 농도와 토양 내 점토함량별에 따른 평균 중금속 농도를 비교하였다. 놀이터 모래에 흡착된 대기 중 미세먼지와 중금속이 어린이의 건강 장애를 일으킬 수 있다고 판단되므로, 본 연구를 통해 놀이터 모래 중 중금속과 대기오염인자 (중금속, 미세먼지 등)와의 상관관계를 파악하고 놀이터 모래 시설 유지와 설치 시 외부조건 등의 판단자료로 활용되고자 한다.

Materials and Methods

연구대상 2006년 환경부 대기환경연보 (MOE, 2006)에

Table 1. Human's average ingestion amount (MOE, 2003)

Component	Ingestion amount (mg day ⁻¹)
Adult	about 40
Child (>5 age)	about 40
Child (1-5 age)	200
Geophagia Child	20,000

Fig. 1. Points of soil sampling location across Seoul Metropolitan area.

수록되어 있는 서울시 23개 지역의 미세먼지 (PM_{10}) 오염도 측정결과와 놀이터 모래 중 중금속과의 상관관계를 평가하였다. 서울시 14개 지역의 중금속 오염도 측정결과에서 오염도가 높은 지역 4구 (성동구, 도봉구, 중구, 동대문구)과 낮은 지역 4구 (은평구, 서초구, 강남구, 마포구)를 선정하여 5년 이상된 아파트 어린이 놀이터를 대상으로 각 구청별로 5개 지점씩 총 40개 지점에서 대기 중 미세먼지와 상관관계를 평가하였다. 놀이터의 지반 중 상층 0–20 cm의 모래층 시료를 채취하여 중금속 규제대상물질인 카드뮴 (Cd), 크롬 (Cr), 납 (Pb), 비소 (As), 구리 (Cu), 니켈 (Ni), 아연 (Zn)을 분석하였다. 또한 대조군으로 2개 지점 (S 공원, E 공원)의 놀이터 모래성분과 비슷한 공원 놀이터의 시료를 채취하여 중금속 분석을 하였다. 시료채취지점은 Fig. 1과 같다.

시료 채취 시기는 2007년 10월부터 12월까지 약 3개월에 걸쳐 채취하였고 그 시기에 강수량은 전년도 강수량 평균 33.9 mm와 비슷하게 나타났다. 한 달 중 중순 전반에는 이동성고기압의 영향을 주로 받아 대체로 맑은 날씨를 보였고, 후반에는 찬 대륙성고기압이 확장하며 기온이 낮아지면서 비를 동반하였다. 이 시기는 강수량이 적게 나타나 토양시료의 채취에 영향을 주지 않았으며 시료채취 후 풍건하였다.

시료채취 및 조제 모래시료 채취는 어린이들이 가장 많이 이용하는 놀이기구인 미끄럼틀과 그네 부근을 중앙 1 지점으로 하고, 주변 4방위의 5–10 m 거리에 있는 1개 지점씩 총 5개 지점에서 상층 0–20 cm 깊이로 채취하여 혼합 후 혼합 토양시료 1건을 채취하였다. 채취한 토양시료에서 자갈이나 나무 조각 등의 이물질을 제거한 후, 균일한 두께로 펼쳐 놓고 직사광선이 닿지 않고 통풍이 잘되는 장소에서

건조시켰다. 풍건시료를 2 mm의 표준체 (10 mesh)로 체 걸음 하여 카드뮴 (Cd), 크롬 (Cr), 납 (Pb), 비소 (As), 구리 (Cu) 분석용 시료로 하였으며, 0.15 mm의 표준체 (100 mesh)로 체 걸음 한 것을 니켈 (Ni), 아연 (Zn)은 분석용 시료로 사용하였다. 체 걸음 한 시료를 각각 균등량 (약 200 g)씩 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합하여 분석 전까지 보관하였다.

시료의 전처리 카드뮴, 납, 구리, 크롬의 경우 조제방법에 따라 조제한 분석용 시료 10 g을 정밀히 취하여 토양 오염공정시험기준 (MOE, 2008)에 따라 0.1N 염산으로 추출한 여액을 분석하였다. 니켈, 아연의 경우 시료의 조제방법에 따라 조제한 시료 3 g을 정밀히 취하여 토양오염공정시험기준 (MOE, 2008) 전처리 방법에 따라 염산과 질산을 3:1의 비율로 넣어 가열 반응하여 여과액을 분석하였다. 비소는 조제방법에 따라 조제한 분석용 시료 10 g을 정밀히 취하여 토양오염공정시험기준 (MOE, 2008)에 따라 1N 염산으로 추출한 여액을 분석하였다.

토성 분석 (Pipet method) 샘플링한 시료를 2 mm의 표준체 (10 mesh)에 체 걸음 후 풍건 토양 10 g을 30% H_2O_2 로 유기물을 제거 후 피펫법 (Klute, 1986)을 사용하여 토양 입자 크기를 분석하였다.

중금속 분석 위의 방법으로 준비한 시험용액 카드뮴 (Cd), 크롬 (Cr), 납 (Pb), 비소 (As), 구리 (Cu), 니켈 (Ni), 아연 (Zn)은 ICP-OES (Varian Vista PRO, USA)으로 분석하였다.

분석자료 통계처리 분석자료는 SPSS 통계 프로그램을 이용하였고, ANOVA test를 실시하여 유의성 여부를 검토하였고, T-test와 Chi-square test를 하였다. 또한 실험 데이터의 그래프는 Sigmaplot 7.0 프로그램을 이용하여 작성하였다 (Norusis, 1995).

Results and Discussion

아파트 놀이터 모래 중 중금속 오염도 조사대상 지역별 아파트 놀이터 모래의 중금속 농도를 Table 2에 나타내었다. 항목별 평균농도는 카드뮴 (Cd) 0.040 mg kg^{-1} , 크롬 (Cr) 0.200 mg kg^{-1} , 구리 (Cu) 1.75 mg kg^{-1} , 니켈 (Ni) 15.1 mg kg^{-1} , 납 (Pb) 3.42 mg kg^{-1} , 아연 (Zn) 66.7 mg kg^{-1} , 비소 (As) 0.750 mg kg^{-1} 으로 나타났다. 이러한 수치는 2007년도 환경부가 발표한 서울시내 어린이 놀이터 토양 중 중금속 농도 카드뮴 (Cd) 0.147 mg kg^{-1} , 크롬 (Cr)

Table 2. Concentration of heavy metals on children's playground sand samples in Seoul metropolitan area.

Site [†]		Cd (1.5) [‡]	Cr (4)	Cu (50)	Ni (40)	Pb (100)	Zn (300)	As (6)
		mg kg ⁻¹						
Dobong-gu	S ₁	0.021	0.074	1.18	7.5	0.71	53.4	0.382
	S ₂	0.036	0.154	1.26	9.6	2.09	64.9	0.387
	S ₃	0.030	0.122	0.79	2.67	1.73	43.5	0.316
	S ₄	0.030	0.175	1.16	5.0	7.08	56.9	0.374
	S ₅	0.044	0.214	1.56	12.5	5.65	68.9	0.486
	T [§]	0.032	0.148	1.19	7.5	3.45	57.5	0.389
Jung-gu	S ₆	0.032	0.142	1.41	8.1	4.65	42.1	1.120
	S ₇	0.073	0.089	1.70	7.7	3.48	104.0	1.410
	S ₈	0.041	0.243	2.95	19.5	6.23	128.0	0.509
	S ₉	0.010	0.353	1.47	20.8	7.81	72.2	0.506
	S ₁₀	0.106	0.407	4.84	12.7	11.40	165.0	0.736
	T	0.070	0.247	2.47	11.2	6.71	102.0	0.856
Eunpyeong-gu	S ₁₁	0.037	0.275	2.20	16.2	2.04	60.1	1.280
	S ₁₂	0.020	0.118	1.31	10.9	1.45	55.0	0.504
	S ₁₃	0.041	0.320	1.48	14.1	3.05	46.3	0.544
	S ₁₄	0.039	0.296	2.40	13.2	2.65	59.8	0.373
	S ₁₅	0.027	0.099	1.08	17.8	1.78	45.1	0.371
	T	0.033	0.222	1.69	14.4	2.19	53.3	0.614
Seongdong-gu	S ₁₆	0.029	0.215	1.26	18.0	2.37	74.0	0.343
	S ₁₇	0.027	0.315	2.67	14.4	3.40	130.0	0.498
	S ₁₈	0.025	0.153	0.91	13.2	2.43	47.5	0.303
	S ₁₉	0.041	0.187	8.27	19.4	6.47	209.0	0.583
	S ₂₀	0.029	0.484	1.97	16.8	2.17	57.1	0.679
	T	0.030	0.271	3.02	16.4	3.37	103.0	0.481
Seocho-gu	S ₂₁	0.017	0.096	1.24	7.0	2.91	52.1	0.225
	S ₂₂	0.019	0.080	1.06	17.6	2.57	83.3	0.284
	S ₂₃	0.039	0.562	2.35	14.4	2.80	75.2	0.571
	S ₂₄	0.043	0.106	1.62	13.9	4.06	74.6	0.456
	S ₂₅	0.047	0.112	1.64	13.8	4.12	104.0	0.298
	T _c	0.033	0.191	1.58	13.3	3.29	77.8	0.367
Mapo-gu	S ₂₆	0.014	0.073	0.62	8.2	1.09	40.2	0.330
	S ₂₇	0.018	0.164	0.758	7.5	2.03	6.5	0.699
	S ₂₈	0.014	0.158	0.81	12.5	1.17	63.8	0.682
	S ₂₉	0.034	0.151	1.30	6.3	2.35	69.9	0.290
	S ₃₀	0.017	0.096	0.99	9.0	1.32	64.2	0.712
	T	0.019	0.128	0.90	8.7	1.59	48.9	0.543
Gangnam-gu	S ₃₁	0.064	0.542	2.77	25.1	3.74	111.0	0.878
	S ₃₂	0.033	0.187	1.55	14.1	5.00	72.6	0.761
	S ₃₃	0.034	0.222	1.87	13.8	4.61	73.5	0.678
	S ₃₄	0.015	0.133	0.58	8.1	1.32	32.4	0.389
	S ₃₅	0.024	0.090	0.79	20.5	3.82	95.7	0.329
	T	0.034	0.235	1.52	16.3	3.70	77.0	0.607
Dongdeamun-gu	S ₃₆	0.027	0.153	0.87	8.6	2.35	76.5	1.040
	SS	0.033	0.202	1.87	7.0	4.49	64.4	0.793
	S ₃₈	0.032	0.129	3.75	16.0	2.52	57.4	0.385
	S ₃₉	0.019	0.144	1.43	15.0	1.61	46.5	0.431
	S ₄₀	0.032	0.122	2.28	13.1	2.33	65.6	0.395
	T	0.029	0.150	2.04	11.9	2.66	62.1	0.601
Contrast	S ₄₁	0.023	0.521	3.17	28.3	1.40	122	4.53
	S ₄₂	0.062	0.464	3.74	12.7	3.35	85.7	0.798
	T	0.045	0.493	3.46	20.5	2.38	103	2.66

[†]Soil sample site, a total of 40 sites-five in each of 8 eight districts-and two areas in the control group[‡]soil contamination warning standards of heavy metals[§]a total average of five sites in each of districts

0.028 mg kg⁻¹, 구리 (Cu) 5.30 mg kg⁻¹, 납 (Pb) 6.50 mg kg⁻¹, 비소 (As) 0.300 mg kg⁻¹에서 카드뮴 (Cd), 구리 (Cu), 납 (Pb)를 제외하고 유사하거나 다소 낮은 수치이며 (NIER, 2007), 이러한 차이는 시료채취 지점, 시료수의 차이에서 기인된 편차라고 판단된다.

카드뮴 (Cd)은 중구 S₇, S₉, S₁₀이 각각 0.073 mg kg⁻¹, 0.010 mg kg⁻¹, 0.106 mg kg⁻¹으로 다른 지역에 비해 높게 나타났다. 납 (Pb)도 중구 S₉, S₁₀이 각각 7.81 mg kg⁻¹, 11.4 mg kg⁻¹으로 가장 높았으며 그 외 대부분 중구 (S₆–S₁₀)가 더 높았다. 이는 서울 도심 주변 높은 빌딩과 혼잡한 이동차량 등에 의한 주변의 대기오염물질의 영향에서 기인한 것으로 판단된다.

대조군 (S₄₁, S₄₂)은 중금속 농도가 낮은 것으로 예상하였으나 공원의 입지 (한강주변)적으로 대기오염에 많이 노출되어 있어 대부분 평균값과 비슷한 결과를 나타냈다.

지역별 미세먼지와 놀이터 모래 중 중금속 오염도

비교 대기오염물질이 대기 중에 미세먼지와 함께 모래에 흡착되어 중금속 오염도에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 공기 중에 부유하고 있는 분진은 입자상 물질의 하나로 입경이 0.1–500 μm의 입경범위를 가지며, 10 μm이하의 입자를 미세먼지로 분류한다 (Kim, 2006). 부유분진 중에서도 기관지 침착성 분진 (Thoracic Particulate)은 폐 내의 통기관과 가스교환부위에 침착되어 유해하며 대기 중 중금속과 함께 낙하분진을 하는 경우도 있다.

PM₁₀ 오염도가 낮은 지역의 놀이터 모래 중 중금속의 평균값에 비해 미세먼지 (PM₁₀) 오염도가 높은 지역 (70 μg m⁻³ 이상)에서 중금속 농도도 높게 나타났다 (Table 3). 이를 토대로 조사대상 지역의 놀이터 모래 중 중금속 오염도와 대기 중 미세먼지 오염도의 관련성이 있다고 판단된다.

시료채취 지점과 모래 중금속 농도 상관관계를 파악하고

자 회귀분석을 실시하였다 (Table 4). 중금속 별 지역 내 평균 중금속 농도를 살펴보면 Cd은 중구가 0.080 mg kg⁻¹로 가장 높은 반면, 다른 지역은 모두 0.030 mg kg⁻¹ 수준으로 Cd 함량이 중구보다 낮았다 (p<0.001). Cr는 성동구 0.310 mg kg⁻¹, 중구 0.270 mg kg⁻¹, 강남구 0.220 mg kg⁻¹ 순으로 나타났으며 지역별로 유의미한 차이를 보였다. 사후검증 (Scheffe) 결과 성동구가 마포구보다 Cu함량이 높은 것으로 나타났다 (p<0.001). Cu는 성동구 3.26 mg kg⁻¹, 중구 2.59 mg kg⁻¹, 동대문구 1.94 mg kg⁻¹의 순으로 나타났으며, 사후검증 결과 성동구가 강남구보다 높은 것으로 나타났다 (p<0.001). Ni도 살펴보면 성동구와 중구의 Ni 함량이 각각 16.4 mg kg⁻¹, 14.6 mg kg⁻¹으로 가장 높게 나타났다 (p<0.001). 사후검증 결과 성동구와 중구가 강남구보다 Ni 함량이 높은 수준으로 나타났다. Pb는 중구가 7.22 mg kg⁻¹로 가장 높았으며 As는 마포구 2.42 mg kg⁻¹, 중구 0.820 mg kg⁻¹ 순으로 나타났다 (p<0.001). Zn는 성동구 110 mg kg⁻¹, 중구 105 mg kg⁻¹ 순으로 높은 수준임을 알 수 있었다 (p<0.001).

위의 결과에서 지역별 놀이터 모래 중 평균 중금속 농도는 대부분 성동구와 중구가 높게 나타났다. 이는 미세먼지 오염도가 높은 성동구와 중구지역이 모래 중 평균 중금속 농도와 유의한 관계가 있음을 나타낸다.

대기 중 중금속과 놀이터 모래 중 중금속 오염도

2006년 대기환경연보에 수록되어있는 서울시 일부지역의 대기 중 중금속 오염도 (1991–2005년)와 놀이터 모래 중 중금속 오염도를 비교·분석한 결과, 놀이터 모래 중 구리 (Cu), 카드뮴 (Cd), 크롬 (Cr), 니켈 (Ni)은 대기 중 중금속 오염도와 영향이 있는 것으로 판단되나, 납은 대기 중 중금속 오염도와 관계가 없는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 이는 대기 중 중금속 오염도와 관계보다 놀이기구 (목재, 철재,

Table 3. Arrangement of heavy metal concentrations on playground sand samples based on the PM10 concentration level in air samples reported for sampling locations.

PM ₁₀ Concentration	Site	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As
		----- mg kg ⁻¹ -----						
<70 μg m ⁻³	Eunpyeonggu	0.033	0.222	1.69	14.4	2.20	53.2	0.780
	Seochogu	0.033	0.191	1.58	13.3	3.29	77.9	0.400
	Gangnamgu	0.033	0.235	1.51	16.3	3.70	77.1	0.607
	Mapogu	0.019	0.128	0.90	8.7	1.59	48.9	0.542
	Average	0.030	0.194	1.42	13.2	2.70	64.3	0.582
≥70 μg m ⁻³	Seongdonggu	0.030	0.271	3.02	16.4	3.37	105.0	0.500
	Dobonggu	0.032	0.148	1.19	7.5	3.45	57.6	0.389
	Junggu	0.078	0.247	2.47	22.3	8.04	102.0	0.967
	Dongdeamungu	0.047	0.171	2.04	12.0	2.66	62.1	0.608
	Average	0.047	0.209	2.18	14.5	4.38	81.7	0.616

Table 4. Statistic analysis between average heavy metal concentrations in playground sand samples and their sampling locations.

Metal	Area	N [†]	Mean [‡]	Stdev. [§]	F-value [¶]	p-value [‡]	Scheffe [‡]
			mg kg ⁻¹				
Cd	Dobonggu	5	0.030	0.007	16.5***	<0.001	B
	Junggu	5	0.080	0.031			A
	Eunpyeonggu	5	0.030	0.008			B
	Seongdonggu	5	0.030	0.006			B
	Seochogu	5	0.030	0.013			B
	Mapogu	5	0.020	0.009			B
	Gangnamgu	5	0.030	0.016			B
	Dongdeamungu	5	0.030	0.004			B
	Total	40	0.040	0.020			
Cr	Dobonggu	5	0.150	0.042	3.47**	0.002	AB
	Junggu	5	0.270	0.127			AB
	Eunpyeonggu	5	0.210	0.097			AB
	Seongdonggu	5	0.310	0.131			A
	Seochogu	5	0.210	0.203			AB
	Mapogu	5	0.130	0.042			B
	Gangnamgu	5	0.220	0.159			AB
	Dongdeamungu	5	0.140	0.025			AB
	Total	40	0.200	0.126			
Cu	Dobonggu	5	1.18	0.267	6.30***	<0.001	BC
	Junggu	5	2.59	1.46			AB
	Eunpyeonggu	5	1.71	0.551			ABC
	Seongdonggu	5	3.26	2.70			A
	Seochogu	5	1.93	0.768			ABC
	Mapogu	5	0.850	0.280			C
	Gangnamgu	5	1.23	0.256			BC
	Dongdeamungu	5	1.94	0.938			ABC
	Total	40	1.75	1.26			
Ni	Dobonggu	5	7.33	3.72	11.1***	<0.001	C
	Junggu	5	14.6	5.67			A
	Eunpyeonggu	5	13.7	3.97			AB
	Seongdonggu	5	16.4	2.21			A
	Seochogu	5	13.0	3.63			ABC
	Mapogu	5	7.83	1.65			C
	Gangnamgu	5	8.07	3.61			BC
	Dongdeamungu	5	11.9	3.42			ABC
	Total	5	15.1	4.82			
Pb	Dobonggu	5	3.57	2.42	10.3***	<0.001	B
	Junggu	5	7.22	2.98			A
	Eunpyeonggu	5	2.14	0.574			B
	Seongdonggu	5	3.40	1.59			B
	Seochogu	5	3.28	0.669			B
	Mapogu	5	1.73	0.562			B
	Gangnamgu	5	3.52	2.48			B
	Dongdeamungu	5	2.52	0.739			B
	Total	40	3.42	2.34			
As	Dobonggu	5	0.390	0.059	5.11***	<0.001	B
	Junggu	5	0.820	0.355			AB
	Eunpyeonggu	5	0.620	0.366			B
	Seongdonggu	5	0.530	0.134			B
	Seochogu	5	0.400	0.137			B
	Mapogu	5	2.420	3.04			A
	Gangnamgu	5	0.400	0.059			B
	Dongdeamungu	5	0.630	0.307			B
	Total	40	0.750	1.19			
Zn	Dobonggu	5	57.6	9.75	10.1***	<0.001	B
	Junggu	5	105	45.9			A
	Eunpyeonggu	5	41.1	22.5			B
	Seongdonggu	5	110	61.8			A
	Seochogu	5	75.5	16.9			AB
	Mapogu	5	36.4	29.0			B
	Gangnamgu	5	59.1	9.29			B
	Dongdeamungu	5	65.2	9.76			AB
	Total	40	66.7	37.1			

** p<0.01, ***p<0.001

[†]The number of soil sample site[‡]Average of heavy metal concentration[§]Standard deviation of heavy metal concentration[¶]Comparison of average to the dispersion analysis[‡]Significance test[‡]Post Hoc Multiple Comparisons, Statistical method to addition in several group

Fig. 2. Linear regression between air quality and concentration of heavy metals (Cd, Cr, Cu, and Ni) in playground sand samples.

플라스틱)의 영향을 더 크게 작용했을 것이라 추측된다. 2007년 환경부가 실시한 전국 실외놀이터 중금속 농도조사 결과에 따르면, 철재시설 표면의 페인트 중 납 농도가 미국 EPA의 어린이 놀이터 토양기준보다 64배나 높은 것으로 나타났다 (NIER, 2007).

아파트 건립년도에 따른 놀이터 모래 중 중금속 오염도 Table 5와 같이 아파트 건립년도 (노후정도)에 따른 중금속 농도 비교를 조사한 결과, Cd를 살펴보면 21년 이상이 평균 0.05 mg kg^{-1} 으로 가장 높게 나타났으며 10-15년은 0.032 mg kg^{-1} , 16-20년은 0.026 mg kg^{-1} , 10년 미만은 0.024 mg kg^{-1} 순으로 나타났다. 이는 유의수준 $p < 0.01$ 수준에서 유의하였으며, 사후검증 결과는 21년 이상이 가장 높게 나타났다.

Pb를 살펴보면 21년 이상이 평균 5.27 mg kg^{-1} 으로 가장 높게 나타났으며 16-20년이 3.05 mg kg^{-1} , 10-15년이 2.53 mg kg^{-1} , 10년 미만은 2.01 mg kg^{-1} 순으로 나타났다. 유의수준 $p < 0.001$ 수준에서 유의함을 알 수 있고 사후검증 결과는 21년 이상된 아파트의 모래 중 중금속이 가장 높게 나타났다. 나머지 중금속 Cr, Cu, Ni, Zn도 21년 이상이 중금속 농도가 가장 높게 나타났다.

이와 같이 아파트의 건립년도 (노후정도)와 어린이 놀이터 모래 중 중금속 오염도가 관계있음을 알 수 있다. 오래된 아파트일수록 놀이터 모래에 축적된 중금속 함량이 높은 것은, 놀이터 모래의 교체가 제대로 이루어지지 않았을 가능

성을 시사한다 (Kim et al., 2007). 특히 중금속 중 인체에 치명적인 Cd와 Pb의 농도는 유의수준 $p < 0.01$ 에서 유의함을 보여 주어 오래된 아파트의 놀이터 모래가 그렇지 않은 아파트의 놀이터 모래보다 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

아파트 건립년도에 따른 중금속 농도와의 선형상관 관계를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 서울시 일부지역의 5년 이상 된 아파트의 노후정도에 따라 카드뮴 (Cd)과 납 (Pb), 니켈 (Ni)은 미약하지만 유의관계를 보여준 반면 나머지 아연 (Zn), 크롬 (Cr), 구리 (Cu), 비소 (As)는 유의성이 거의 나타나지 않았다. 이는 시간이 지남에 따라 중금속의 축적은 자연의 자정작용과 기상변화 (강우, 강수 등)에 의해 어느 정도 희소될 수 있으며, 아파트별 놀이터 모래의 교체 정도에 따라 모래 중 중금속 농도의 차이가 나타날 수 있다고 판단된다. 시료채취시기의 강수량 변화조사 결과, 시료채취시기는 10월~12월로 비가 거의 내리지 않았고 단기적인 (약 3개월) 영향으로는 지역 차이를 나타내지 않았다.

토양의 점토함량에 따른 모래 중 평균 중금속 농도 비교 아파트 놀이터 모래에 함유되어있는 점토는 대부분 3-10%로 나타났으며 이를 중간값인 점토함량 6%기준으로 중금속의 오염도 관계를 비교하였다.

토양의 점토함량에 따른 중금속 농도 비교를 조사한 결과 Cd는 점토함량 6.0%이상인 지역이 $0.0746 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 점토함량 6.0%미만 지역의 $0.0334 \text{ mg kg}^{-1}$ 보다 높게 나타났으며, Cr은 점토함량 6.0%미만 지역이 0.141 mg kg^{-1} 로 나

Table 5. Statistic analysis between average heavy metal concentrations in playground sand samples and the apartment's age.

Metal	Apartment's age (year)	N [†]	Mean [‡]	Stdev. [§]	Min [¶]	Max [‡]	F-value [‡]	p-value	Scheffe
mg kg ⁻¹									
Cd	<10	7	0.024	0.01	0.01	0.04	4.59**	0.01	B
	10-15	12	0.033	0.02	0.01	0.07			
	16-20	9	0.026	0.01	0.02	0.04			
	≥21	12	0.050	0.03	0.02	0.11			
Cr	<10	7	0.17	0.09	0.07	0.32	0.44	0.72	-
	10-15	12	0.19	0.12	0.09	0.48			
	16-20	9	0.18	0.15	0.07	0.56			
	≥21	12	0.23	0.14	0.09	0.54			
Cu	<10	7	1.32	0.81	0.62	2.67	0.97	0.41	-
	10-15	12	2.09	2.13	0.58	8.27			
	16-20	9	1.38	0.38	1.06	2.35			
	≥21	12	2.30	1.04	0.79	4.84			
Ni	<10	7	9.76	4.51	2.70	16.1	2.91	0.05	-
	10-15	12	13.1	3.91	7.74	19.4			
	16-20	9	11.0	5.17	4.98	18.0			
	≥21	12	15.6	4.91	6.98	25.1			
Pb	<10	7	2.01	0.74	1.09	3.40	6.81***	0.00	B
	10-15	12	2.53	1.43	1.17	6.47			
	16-20	9	3.05	1.85	0.71	7.08			
	≥21	12	5.28	2.39	2.33	11.4			
Zn	<10	7	65.4	30.9	40.2	130	1.62	0.20	-
	10-15	12	71.0	46.8	32.4	209			
	16-20	9	61.5	14.4	42.1	83.3			
	≥21	12	91.4	31.1	64.4	165			
As	<10	7	0.56	0.35	0.30	1.28	0.50	0.68	-
	10-15	12	0.57	0.30	0.30	1.41			
	16-20	9	0.45	0.27	0.22	1.12			
	≥21	12	0.58	0.18	0.33	0.88			

p<0.01 *p<0.001

[†]The number of soil sample site.[‡]Average of heavy metal concentration.[§]Standard deviation of heavy metal concentration.[¶]Minimum concentration of heavy metal.[‡]Maximum concentration of heavy metal.[‡]Comparison of average to the dispersion analysis.^{||}significance test.^{|||}Post Hoc Multiple Comparisons, Statistical method to addition in several group. **Fig. 3. Linear regression between apartment's construction years and concentration of heavy metals (Cd, Pb, Cr, and Ni) in playground sand samples.**

Fig. 4. Linear regression between apartment's construction years and concentration of heavy metals (Cu, Zn, and As) in playground sand samples.

Table 6. Statistic analysis between average heavy metal concentrations in playground sand samples and the content (%) of clay size particles.

Metal	Clay content (%)	N [†]	Mean [‡]	Stdev. [§]	Min [¶]	Max [‡]	t-test [‡]	p-value (both)
mg kg ⁻¹								
Cd	< 6.0	12	0.03	0.03	0.01	0.11	-0.807	0.425
	≥ 6.0	30	0.06	0.18	0.01	0.10		
Cr	< 6.0	12	0.14	0.05	0.08	0.56	-0.678	0.502
	≥ 6.0	30	1.32	5.96	0.07	0.54		
Cu	< 6.0	12	1.77	2.08	0.58	8.27	-0.569	0.573
	≥ 6.0	30	2.07	1.31	0.62	3.75		
Ni	< 6.0	12	11.40	4.54	2.70	19.40	-1.100	0.278
	≥ 6.0	30	14.90	10.7	4.98	25.10		
Pb	< 6.0	12	2.53	2.06	1.32	11.40	-1.210	0.234
	≥ 6.0	30	3.83	3.47	0.71	7.81		
Zn	< 6.0	12	68.90	45.10	32.40	209.00	-0.623	0.537
	≥ 6.0	30	76.70	32.90	40.20	128.00		
As	< 6.0	12	0.44	0.14	0.28	0.76	-1.510	0.139
	≥ 6.0	30	0.80	0.81	0.22	1.41		

[†]The number of soil sample site.

[‡]Average of heavy metal concentration.

[§]Standard deviation of heavy metal concentration.

[¶]Minimum concentration of heavy metal.

[‡]Maximum concentration of heavy metal.

[‡]Statistical method to decide for two-sample's average gap.

^{||}significance test.

타났고 점토함량 6.0% 이상 지역은 1.32 mg kg⁻¹로 차이를 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 그러나 대부분 점토함량이 6.0%이상인 지역에서는 모래 중 중금속 농도가 높았다. 이는 점토함량이 높을수록 표면적이 상대적으로 크기 때문에 양이온을 띠는 중금속을 더 많이 흡착할 수 있기 때문으로 사료된다 (Table 6).

Conclusion

본 연구에서는 2006년 환경부 대기환경연보에 수록되어 있는 서울시 23개 지역의 미세먼지 (PM₁₀) 오염도 측정결과와 14개 지역의 중금속 오염도 측정결과에서 오염도가 높은

지역과 낮은 지역을 선정하여 서울시 일부지역 5년 이상 된 아파트 어린이 놀이터를 대상으로 놀이터 모래 중 중금속 (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, As) 오염도를 조사하고 그에 영향을 미치는 환경인자와의 관계를 살펴보았다. 상관관계의 유의성을 살펴보기 위해 SPSS프로그램으로 통계 처리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 어린이 놀이터 모래 중 중금속의 농도 측정결과 토양 오염기준이하로 측정되었지만 놀이시설의 모래는 어린이들의 피부 접촉 또는 구강 투여 등의 노출 경로를 고려한 관리가 필요하다고 판단된다.
2. 미세먼지 (PM₁₀)오염도가 70 μg m⁻³ 미만인 지역의 놀이터 모래 중금속의 평균값이 미세먼지 (PM₁₀) 오염도

가 $70 \mu\text{g m}^{-3}$ 을 초과하는 지역의 평균값보다 낮게 나타났다으며, 이는 조사대상 지역의 놀이터 모래 중 중금속 오염도와 대기 미세먼지와와의 관련성을 나타낸다.

3. 아파트의 건립년도 (노후정도)와 어린이 놀이터 모래 중 중금속 오염도 간에 상관관계가 있었으며, 이는 놀이터 모래의 교체가 정기적으로 이루어지지 않아 오래된 아파트 일수록 놀이터 모래에 대기분지 낙하 또는 기타 요인에 의해서 중금속 축적이 일어났을 가능성을 시사한다.
4. 아파트 놀이터 모래의 상층 0-20 cm 깊이를 대상으로 채취한 시료의 점토입자 함량에 따라 중금속 농도를 비교분석한 결과 점토함량 6% 이상인 곳의 중금속 농도가 6% 미만인 곳보다 높았으며, 이는 점토함량이 높은 시료가 상대적으로 표면적이 크기 때문에 중금속을 더 많이 흡착한 결과라고 판단된다.

이상으로, 어린이 놀이터 모래 중 중금속의 농도는 토양 오염기준이하로 측정되었으며 대기 중 미세먼지 오염도와 모래 중 점토함량 그리고 아파트 건립년도에 따른 모래 내 중금속 오염도의 연관성을 보여주었다. 토양오염은 지속성 및 잔류성이 있기 때문에 어린이 놀이터의 세심한 관리가 무엇보다 중요하며, 이를 위한 모래의 교체주기, 노출경로를 고려한 어린이 놀이터에 관한 환경 기준 등 세부지침 마련을 위한 관련 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

References

- Abrahams, P.W. 2002. Soil: their implications to human health. *Sci. Total Environ.*, 291:1-32.
- Brewer, R. and W. Belzer. 2001. Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake. *British Columbia, Canada, Atmos. Environ.* 35:5223-5233.
- De Miguel, E., I. Iribarren, E. Chacón, A. Ordóñez, and S. Charlesworth, 2007. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain). *Chemosphere* 66:505-513.
- Hamon, R., M. McLaughlin, and E. Lombi, 2007. *Natural Attenuation of Trace Element Availability in Soils*. CRC Taylor & Francis. Pensacola, FL, USA.
- Kim, Y.H., J.I. Ro, H.G. Gang, S.M. Lee, and C.S. Choi, 2007. Study on exchange period of children-playground sand soil by evaluation of heavy metal pollution. *Journal of Korea solid wastes engineering society*. 24:323-329.
- Kim, Y.P., 2006. Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 22:535-553.
- Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy, USA.
- Koh, I.H. 2002. Analysis on the concentrations and existing forms of heavy metals in the soils of Ulsan area. Master Thesis, Ulsan University, Korea.
- Lee, C.D., Y.J. Lee, and N.Y. Cho, 2001. Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soil on the Playgrounds for Children in I area. *Korean Journal of Environmental Health Sciences*. 27:57-62.
- Lee, T.G. 2003. Survey Study on Sand Pollution at the Children's Playground. *Journal of Nakdonggang Environmental Research Institute*. 8:1-6.
- Ljung, K., O. Selinus, and E. Otabbong, 2006. Metals in soils of children's urban environments in the small northern European city of Uppsala. *Sci. Total Environ.*, 366:749-759.
- Meuser, H. 2010 *Contaminated Urban Soils*. Springer. New York, USA.
- MOE (Korea Ministry of Environment). 2002. White paper of environment. p. 361-363. Korea Ministry of Environment.
- MOE (Korea Ministry of Environment). 2003. Operational Results of Soil Network and Investigation of Actual Conditions in Korea, 2002. Korea Ministry of Environment.
- MOE (Korea Ministry of Environment). 2006. Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2005. Korea Ministry of Environment.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2004. Evaluation and Establishment of the Soil Pollution Standards (I). Korea Ministry of Environment.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2007. A Study on the Soil Pollution in the Children's Playground of Tenement. Division of Waste Analysis, Korea Ministry of Environment.
- Norusis, M.J. 1995. *SPSS Professional Statistics version 6.1*. SPSS, Chicago, Illinois, USA.
- Ure, A.M. 2000. Method of analysis for heavy metals in soils. p. 261-279. In Alloway et al. (ed.) *Heavy Metals in Soils*, John Wiley and Sons, New York, USA.