

대기중금속 조사

- 부산시의 미세먼지(PM-10) 중 대기중금속 농도에 대한 지속적인 모니터링 실시
- 오염변화 특성 분석을 통한 대기중금속 저감 및 대기질 개선을 위한 정책자료로 활용

1. 조사개요

- 조사기간 : 2023. 1. ~ 2023. 12.(매월 둘째주 5일간)
- 조사지점



지점명	용도지역	구	위치
학장동	공업	사상구	학장초등학교 옥상
덕천동	주거	북구	부산하수관로 운영사무소 옥상
광안동	주거	수영구	한바다중학교 옥상
연산동	주거	연제구	시청 등대광장
부곡동	주거	금정구	부곡2동 주민센터 옥상

- 조사항목 : 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 비소(As), 베릴륨(Be), 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 총 12항목

2. 조사방법

- 시료채취 : 고용량 공기시료채취기(High volume air sampler)로 석영여지에 24시간 간격, 5일 연속으로 미세먼지(PM-10) 시료를 채취
- 시료분석 : 대기오염공정시험기준에 따라 질산-염산혼합액에 의한 초음파 전처리를 실시하여 금속 성분을 추출한 후, 유도결합플라즈마 분광법으로 금속성분 정량분석
- 자료관리 : 각 측정소별 월 5회 측정값을 산술평균하여 지점별 월평균, 도시 월평균 및 연평균 농도를 산출

3. 조사결과

- 연평균 농도
 - 2023년 미세먼지(PM-10) 중 대기중금속 연평균 농도는 전년과 최근 5년 대비 알루미늄(Al)을 제외한 전체 중금속 농도가 감소한 것으로 나타남(그림 1)

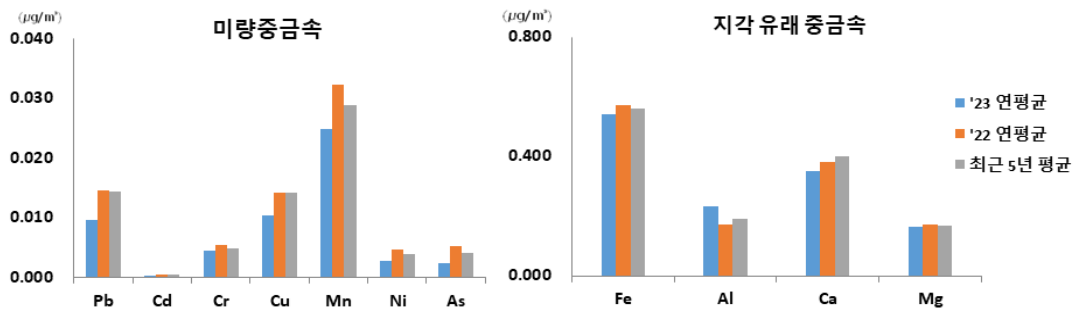


그림 1. 대기중금속 연평균 농도 변화

- PM-10 농도는 지난 5년간 감소 후 안정 추세이며, 대기중금속 중 지각유래 금속인 알루미늄을 제외한 전항목의 농도가 감소한 것으로 나타남(그림 1, 표 1)
- (환경기준) 납(Pb) 연평균 농도는 0.00969 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 국내 대기환경기준(연평균 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 1.9% 수준이며, 카드뮴(Cd) 및 망간(Mn)의 농도는 WHO 권고기준(연평균 각 0.005, 0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 6.0%, 16.5% 수준으로 「만족」하였음(표 1)

표 1. 대기중금속 연평균 농도

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	미세먼지 (PM10)	납 (Pb)	카드뮴 (Cd)	크롬 (Cr)	구리 (Cu)	망간 (Mn)	철 (Fe)	니켈 (Ni)	비소 (As)	베릴륨 (Be)	알루미늄 (Al)	칼슘 (Ca)	마그네슘 (Mg)
대기환경기준		0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(WHO 권고기준)		-	(0.005)	-	-	(0.15)	-	-	-	-	-	-	-
2023년	31	0.00969	0.00030	0.00440	0.01044	0.02476	0.54147	0.00285	0.00247	0.00001	0.23308	0.35074	0.16471
2022년	30	0.0145	0.0005	0.0054	0.0141	0.0322	0.5724	0.0047	0.0052	0.0000	0.1708	0.3809	0.1710
2021년	30	0.0144	0.0005	0.0045	0.0136	0.0249	0.5018	0.0037	0.0044	0.0000	0.1653	0.4018	0.1766
2020년	35	0.0146	0.0005	0.0046	0.0152	0.0278	0.5394	0.0035	0.0030	0.0000	0.1896	0.3790	0.1487
2019년	39	0.0183	0.0007	0.0057	0.0177	0.0349	0.6537	0.0049	0.0058	0.0000	0.1901	0.4814	0.1819

- (항목별 농도비율) 전체 중금속 중 지각 유래 중금속이 94.4%, 미량중금속 5.6%로 구성되어 있으며, 항목별 비율은 지각 유래 중금속 Fe(40.3%) > Ca(26.1%) > Mg, Al(12.2%) 그리고 미량 중금속 Mn(1.8%) > Cu(0.8%) > Pb(0.7%) > Cr(0.3%) > As, Ni (0.2%) > Cd, Be(0.0%) 순으로 나타남(그림 2)
- 23년 중금속 항목별 비율은 전년과 최근 5년 대비하여 Al(■)과 Be(■)을 제외한 모든 항목이 감소한 것으로 나타남(그림 2)

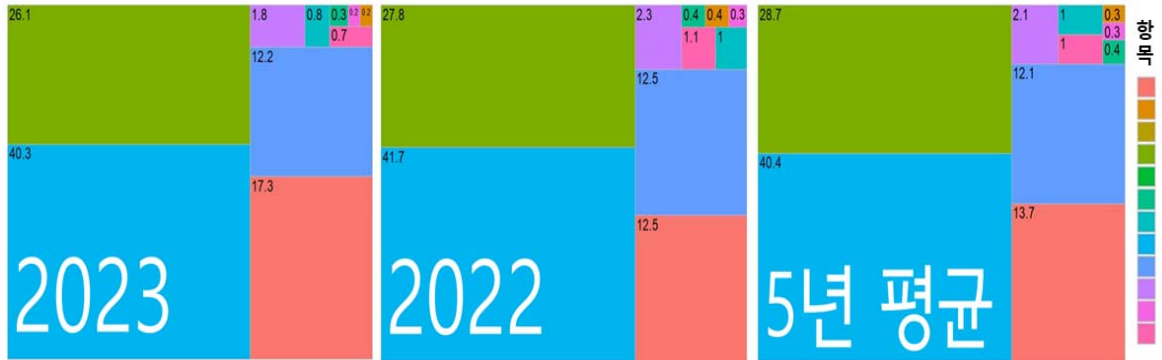


그림 2. 대기중금속 항목별 비율(%)

○ 월별 농도 특성

- 3월에는 대기정체(2일)와 외부유입에 의해 고농도 미세먼지 발생영향으로 지각 유래 중금속(Fe, Al, Ca, Mg)과 미량 중금속(Cu, Mn, Ni, Be)이 최고농도를 나타내었음(표 2)
 - *3/07, 8시~12시_학장동: 최대 122 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기타 4개 지점: 최대 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 평균 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- 7 ~ 12월 하반기 동안 원활한 대기확산 및 평년대비 증가한 강수량(폭우, 태풍, 동절기 강우)으로 대부분의 금속농도가 연중 최저치를 나타내었고 양호한 대기질 상태를 유지하였음(표 2)
 - *봄철(3~5월) 시료채취기간 중 평균 대기정체일수: 1일 [2023년 연 평균: 0.3일, 최대: 2일(3월)]

표 2. 2023년 월별 PM-10 및 대기중금속 농도

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	미세먼지 (PM-10)	납 (Pb)	카드뮴 (Cd)	크롬 (Cr)	구리 (Cu)	망간 (Mn)	철 (Fe)	니켈 (Ni)	비소 (As)	베릴륨 (Be)	알루미늄 (Al)	칼슘 (Ca)	마그네슘 (Mg)
대기 환경기준 (WHO 권고기준)	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		(0.005)			(0.15)								
1월	44	0.00985	0.00020	0.00677	0.01942	0.05478	0.95613	0.00617	0.00222	0.00001	0.30330	0.65698	0.24586
2월	37	0.01025	0.00023	0.00248	0.00896	0.01742	0.38021	0.00138	0.00455	0.00000	0.12172	0.27477	0.09590
3월	73	0.01537	0.00043	0.00902	0.01956	0.05917	1.59921	0.00687	0.00418	0.00004	1.10849	1.15252	0.49106
4월	41	0.00704	0.00021	0.00375	0.00991	0.02717	0.76541	0.00274	0.00239	0.00002	0.53283	0.53002	0.30109
5월	34	0.02094	0.00134	0.00276	0.01450	0.02551	0.48816	0.00251	0.00815	0.00001	0.15012	0.32133	0.13080
6월	27	0.00819	0.00001	0.01257	0.00886	0.02585	0.54182	0.00323	0.00168	0.00000	0.14165	0.27000	0.08939
7월	23	0.00161	0.00005	0.00139	0.00432	0.01241	0.19509	0.00168	0.00009	0.00000	0.02475	0.09364	0.12601
8월	14	0.00642	0.00024	0.00001	0.00221	0.00282	0.06525	0.00014	0.00058	0.00000	0.05917	0.08733	0.08074
9월	16	0.00752	0.00026	0.00239	0.00680	0.01115	0.22601	0.00099	0.00073	0.00000	0.04726	0.09560	0.05062
10월	19	0.01333	0.00015	0.00240	0.01001	0.01498	0.37436	0.00172	0.00261	0.00000	0.09589	0.24327	0.09980
11월	23	0.00740	0.00005	0.00578	0.01401	0.03200	0.58221	0.00506	0.00050	0.00000	0.14852	0.31782	0.16105
12월	17	0.00842	0.00040	0.00350	0.00678	0.01391	0.32379	0.00175	0.00197	0.00000	0.06324	0.16556	0.10418

붉은색: 연중 최고농도, 푸른색: 연중 최저농도

- (월별 변화 추이) 대기중금속은 PM-10 농도 경향과 유사한 것으로 나타났으며, 외부유입과 대기정체(2일) 영향을 받았던 3월에 미량 중금속과 지각 유래 중금속의 농도가 가장 높았으며, 1월은 외부유입의 영향으로 지각 유래 및 미량 중금속이 두 번째로 높았던 것으로 나타났음(그림 3)

- 또한, 4월에는 잦은 황사 유입*의 영향으로 유사한 PM10 농도였던 2월 대비 높은 지각유래금속 농도를 나타냈음(그림 3)

*4월(12~13일, 측정 3~4일차): 고비사막, 내몽골 고원에서 발원한 황사가 유입

4월(21~23일): 몽골 동부와 중국 북동부에서 발원한 황사가 유입

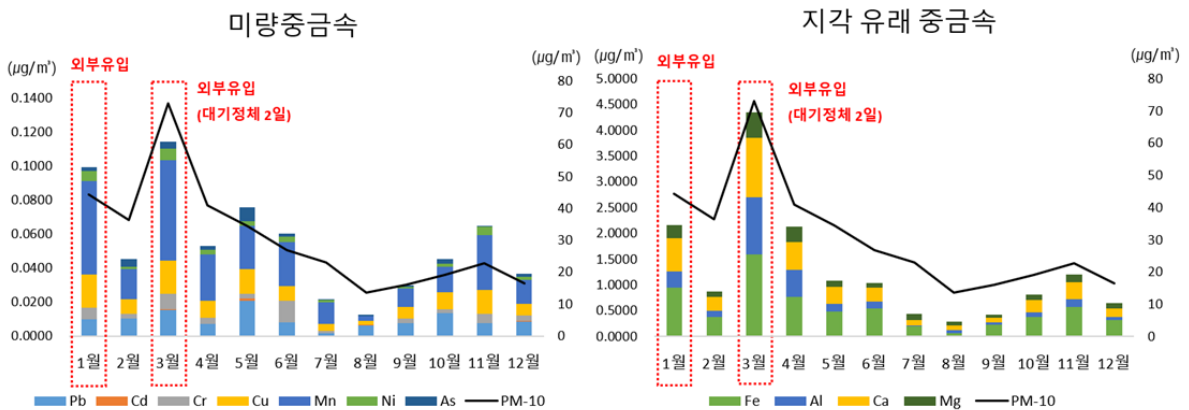


그림 3. 월별 PM-10 농도 변화에 따른 중금속 분포

○ 지점별 농도 변화

- 지점별 납(Pb) 연평균 농도는 공업지역인 학장동에서 최고 0.01651 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기준의 3.3% 수준)를 상업지역인 연산동에서 0.00714 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기준의 1.4% 수준)로 최저를 나타냄(표 3)
- 금속농도는 공업(학장) > 상업(연산), 주거(덕천, 광안, 부곡) 순으로 상업지역과 주거지역의 농도가 유사하였고, 학장(공업)에서 전 항목이 최고농도를 나타냈고, 부곡(주거)에서 대부분의 항목이 최저 농도를 나타냄(표 3)

표 3. 지점별 중금속 농도

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	미세먼지 (PM-10)	납 (Pb)	카드뮴 (Cd)	크롬 (Cr)	구리 (Cu)	망간 (Mn)	철 (Fe)	니켈 (Ni)	비소 (As)	베릴륨 (Be)	알루미늄 (Al)	칼슘 (Ca)	마그네슘 (Mg)
대기 환경기준 (WHO 권고기준)		0.5	- (0.005)	-	-	- (0.15)	-	-	-	-	-	-	-
부곡(주거)	25	0.00758	0.00025	0.00123	0.00735	0.01328	0.34435	0.00085	0.00222	0.00001	0.20299	0.29156	0.14162
학장(공업)	37	0.01651	0.00039	0.01400	0.02192	0.06535	1.25111	0.01000	0.00339	0.00001	0.28056	0.43147	0.19652
덕천(주거)	29	0.00792	0.00027	0.00215	0.00708	0.01832	0.37647	0.00153	0.00215	0.00001	0.22575	0.32002	0.13933
광안(주거)	30	0.01012	0.00038	0.00171	0.00739	0.01408	0.36785	0.00099	0.00289	0.00001	0.25047	0.33124	0.17822
연산(상업)	27	0.00714	0.00026	0.00387	0.00772	0.01366	0.36639	0.00132	0.00212	0.00001	0.19969	0.29220	0.14726

- 중금속 항목에 대한 지점별 기여율에서도 공업지역의 5개 중금속 기여율이 Ni(68%), Cr(61%), Mn(52%), Fe(46%), Cu(43%)로 나머지 6개 중금속에 대한 기여율(평균 27%) 대비 높은 것으로 나타남(그림4)

*공업지역(학장) 소재 대기배출시설 현황(2022년 기준 190개소)

- 금속가공제품제조업 등 금속관련업 40개소(21.1%), 자동차수리업 36개소 (18.9%), 도금 35개소 (18.4%), 강/선철(비철) 주물주조업 15개소(7.9%), 도장 및 기타 피막처리업 9개소(4.7%) 등
- Ni, Cr, Cu은 도금·도장, Mn, Fe은 주물·주조 및 금속가공시설과 관련된 항목

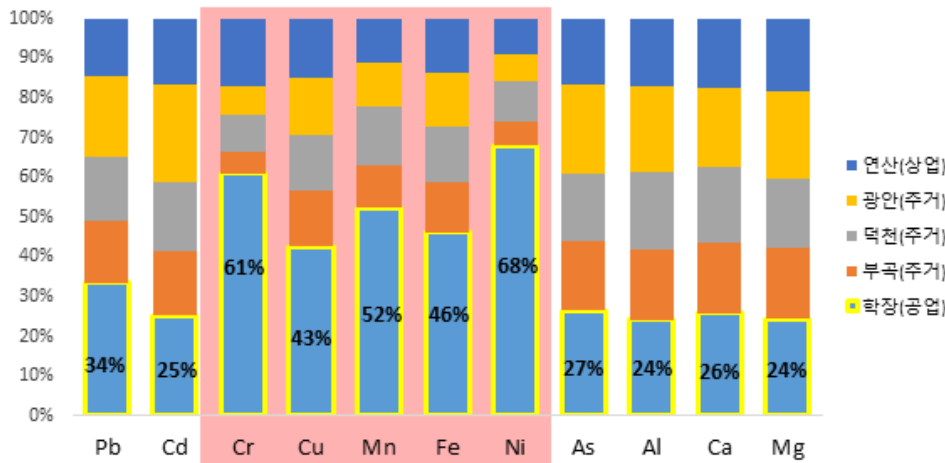


그림 4. 항목·조사지점별 농도 상대비교

○ 황사 시 특성

- 2023년 황사(4월 12일, 4월 21~22일) 시 대기중금속 분석결과
- (정상시) PM-10 평균농도 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 중금속 농도는 1.3449 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 지각 유래 중금속이 전체의 95.9%, 미량 중금속 4.1%를 차지
- (황사시) PM-10 평균농도 268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 중금속 농도는 14.9869 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 지각 유래 중금속이 전체의 98.8%, 미량 중금속 1.2 %를 차지
- 황사 시 지각 유래 중금속, 미량 중금속 비율이 각각 11.5 배, 3.4 배 증가한 것으로 나타남(그림 5)

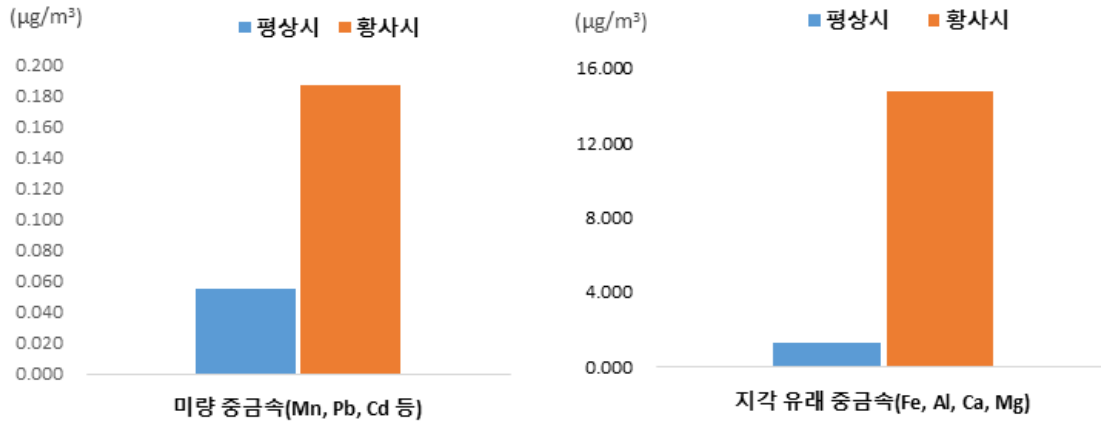


그림 5. 정상시와 황사 시 중금속 농도 비교

○ 7개 특광역시 농도 비교

- 7개 특광역시의 납(Pb) 연평균 농도는 최소 0.00966 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (대전) ~ 최대 0.05254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (울산)으로 대기환경 기준의 1.9 ~ 10.5% 수준인 것으로 나타났으며, 울산 및 서울이 각각 5항목(울산 : Pb, Cd, Ni, As, Mg), (서울 : Cu, Fe, Be, Al, Ca)에서 최고농도를 나타냈고, 광주가 4항목(Cr, Cu, Ni, Be)에서 최저농도를 나타냈음(표 4)

표 4. 2023년 7개 특광역시 대기중금속 농도

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As	Be	Al	Ca	Mg
부산	0.00969	0.00030	0.00440	0.01044	0.02476	0.54147	0.00285	0.00247	0.00001	0.23308	0.35074	0.16471
서울	0.02029	0.00055	0.00309	0.02057	0.02994	0.84326	0.00234	0.00816	0.00002	0.38199	0.86247	0.14621
인천	0.01934	0.00051	0.00342	0.01647	0.21928	0.31093	0.00304	0.00834	0.00001	0.29481	0.32040	0.13188
울산	0.05254	0.00350	0.00221	0.02057	0.04024	0.67197	0.00429	0.01745	0.00000	0.32310	0.54618	0.23445
광주	0.01066	0.00023	0.00139	0.00685	0.02625	0.47778	0.00114	0.00397	0.00000	0.24040	0.44853	0.16883
대구	0.02912	0.00019	0.00261	0.00819	0.01701	0.49072	0.00220	0.00256	0.00000	0.33605	0.56629	0.19674
대전	0.00966	0.00011	0.00224	0.00969	0.01882	0.47759	0.00149	0.00351	0.00000	0.24142	0.44469	0.14416

※ 자료출처: 국가대기오염정보관리시스템(NAMIS)

- 부산은 공업지역(학장) 소재 대기오염 배출원 업종 특성에 기인한 크롬(Cr) 항목이 7개 특광역시 중 최고농도 수준을 나타냄(표 4, 그림 6)
- 크롬(Cr) 항목은 지난 몇 년 동안 부산이 최고농도를 나타낸 항목이며, 그 외 미량 중금속과 지각유래금속의 농도는 확산과 세정 효과가 잘 일어났던 기상조건에 의해 양호한 수준으로 나타난 것으로 추정됨(그림 6, 7)
- 특광역시의 공업지역간 비교(서울은 공업지역이 없어 제외)에서도 부산은 타 공업지역 평균농도3) 대비 Cr(4.5배), Ni(3.2배), Fe(2.1배)로 높은 농도를 나타내고 있으며, 망간(Mn)의 경우 이례적으로 높은 수치를 보여준 인천을 제외하면 2.0배 가량으로 타 공업지역 대비 높게 나왔음(그림 6, 7)

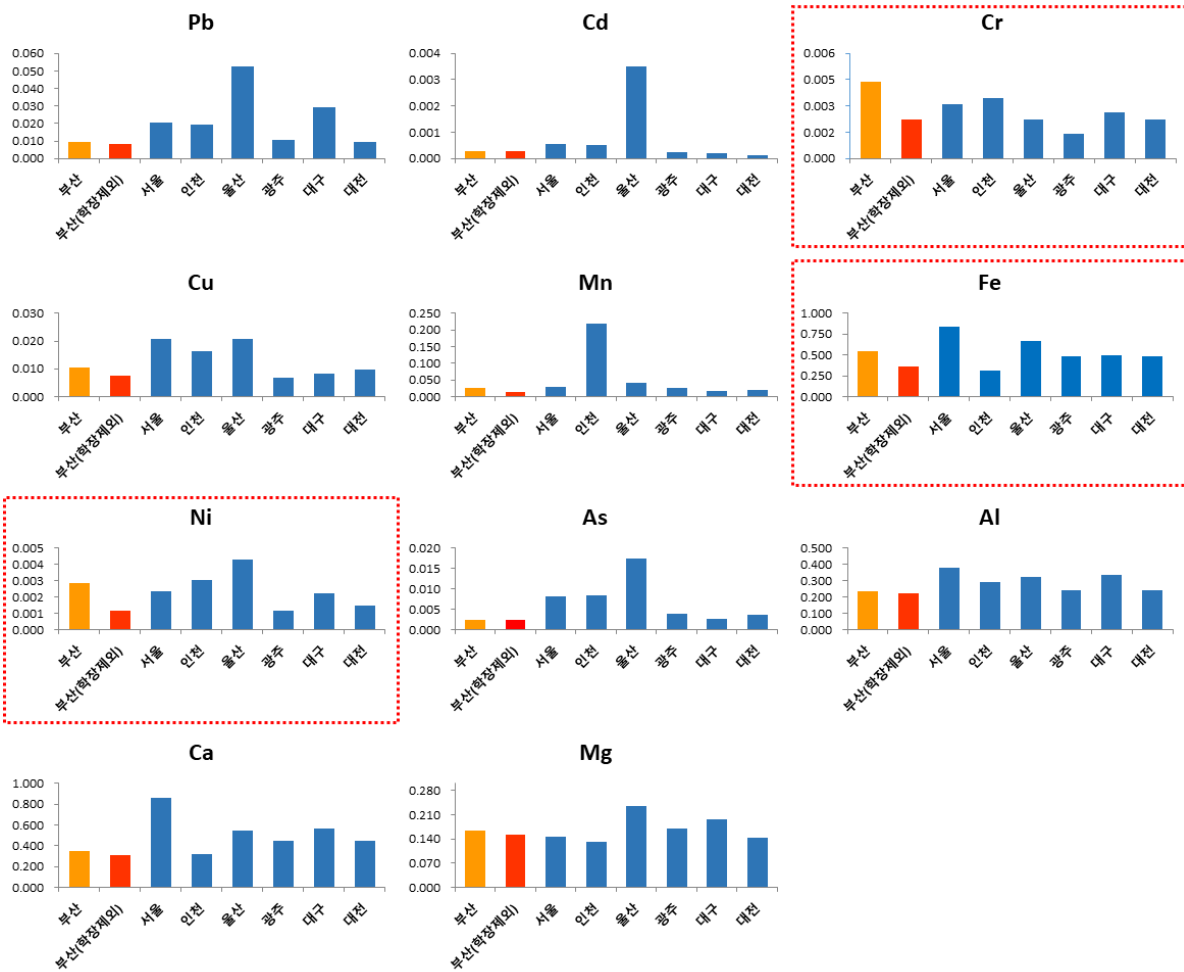


그림 6. 7개 특광역시 대기중금속 농도

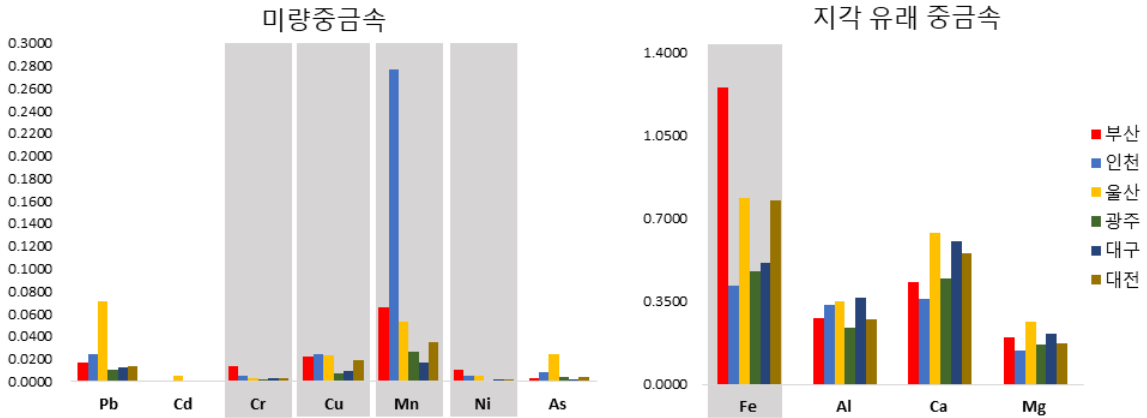


그림 7. 광역시 공업지역간 중금속 농도분포

○ 건강위해도 평가결과

- 건강위해도 평가는 대기 중 호흡으로 인해 발암 또는 비발암(독성)을 일으킬 수 있는 중금속을 대상으로 용도지역별로 수행
- 발암위해도는 2023년 공업지역 4.6×10^{-6} 으로, 주거지역 2.4×10^{-6} , 상업지역 2.2×10^{-6} 으로 위해 없는 수준 10^{-6} (백만명당 1명의 초과발암확률)을 넘겼으나, 위해 있는 수준(10^{-4}) 보다는 훨씬 낮은 허용 가능한 수준으로 나타남(그림 8)

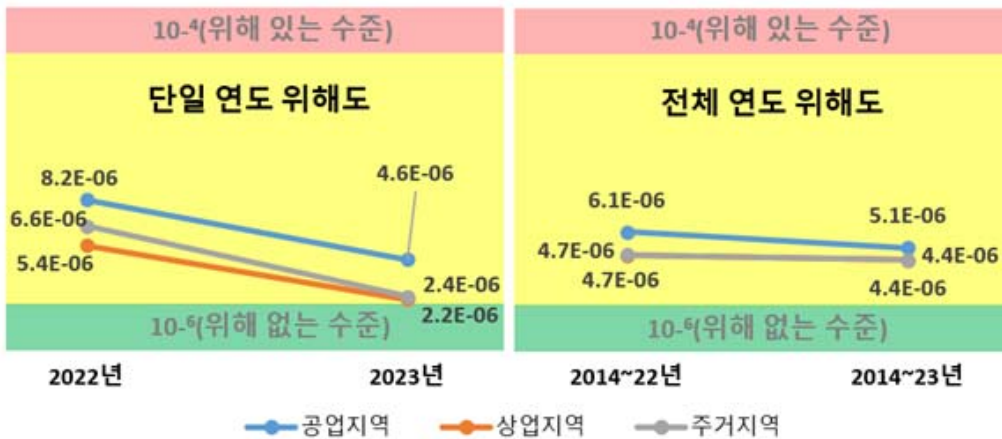


그림 8. 발암위해도 수준

- 발암위해도에 대한 용도지역별 수준은 공업지역이 가장 높고, 평가대상 중금속 중에서는 비소(As)의 위해도가 10^{-6} 이상으로 가장 높은 수준을 나타내며, 니켈(Ni)과 납(Pb)은 용도지역별 큰 차이를 나타냄(그림 8, 9)
- 비발암(독성)위해도¹⁾는 2023년 공업지역 2.8×10^{-4} , 주거지역 7.3×10^{-4} , 상업지역 7.1×10^{-4} 로 각 용도지역별 위해도지수(HI)가 1 이하로 위해영향 발생 가능성이 낮음으로 나타남

1) 비발암위해도는 일정용량 이상으로 노출될 시 유해한 영향(독성)을 일으키는 물질을 대상으로 하며, 위해도는 위해도지수(HI)로 나타내며, HI가 1을 초과할 시 위해영향 발생 가능성이 있고, 1 이하인 경우 위해영향 발생 가능성 낮음으로 나타냄

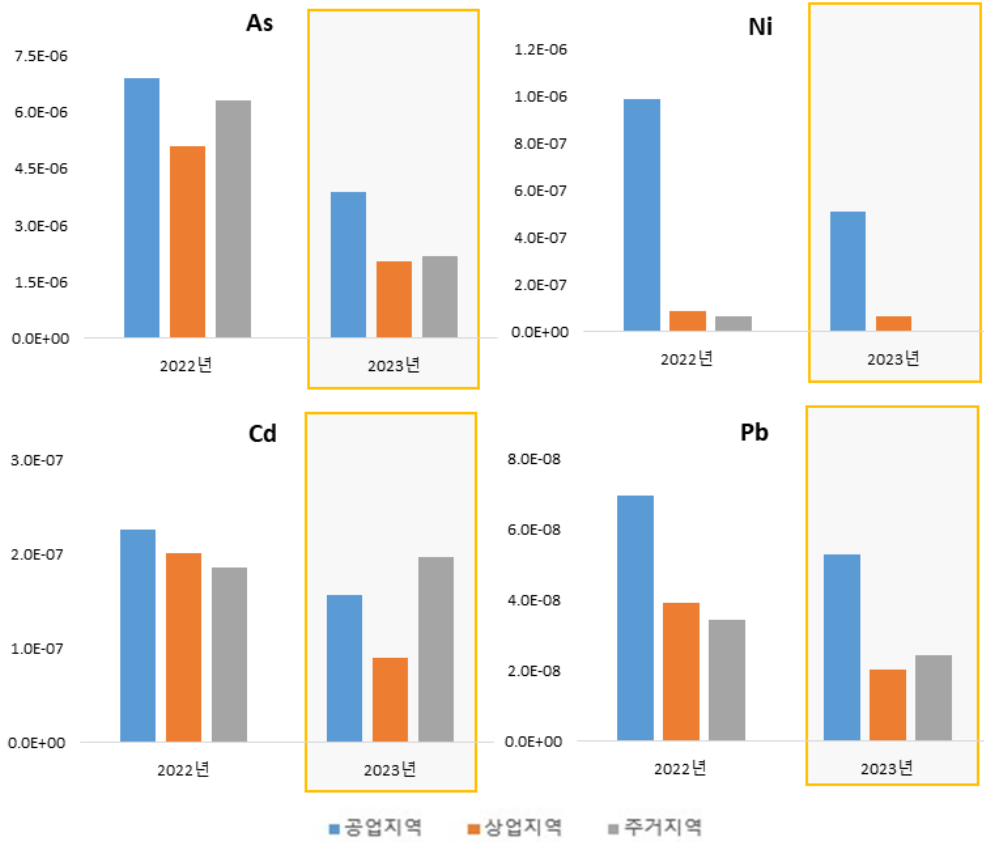


그림 9. 용도지역 및 평가대상별 발암위해도 수준

4. 활용방안

- 지속적인 모니터링을 통한 미세먼지(PM-10) 내 대기중금속 오염도 경향 파악
- 장기간 축적된 데이터를 시민 건강영향 관련 건강위해도 평가 자료로 활용

5. 기대효과

- 대기중금속 오염현황 파악 및 부산지역에 적합한 대기질 관리 대책수립의 기초자료 제공
- 유해 미세먼지저감 등 대기환경개선으로 시민건강증진에 기여