

Risk Assessment of Heavy Metals in PM₁₀ in Ulsan
Using the Spatial Analysis of GIS

박지연, 김윤신*

한양대학교 환경대학원 대기공학과, 한양대학교 의과대학 계량외과*

1. 서론

근래 여천을 비롯한 공단지역의 환경오염문제가 가시화되면서, 사회·경제적으로 대두되고 있다. 공단지역에서 주로 대기중으로 배출되는 오염물질은 6종류의 대기오염기준물질을 비롯해 휘발성 유기화합물, 방향족 탄화수소, 중금속 등으로 구성되어 있으며, 이러한 미량 유해오염물질 등은 국내에서 그 인체 위해성이 확인된 바가 없으며, 농도현황과약 또한 부족한 실정이다. 본 연구대상지인 울산지역은 우리나라 대표적인 복합공단지역으로 자동차, 조선, 석유화학, 비철금속 공업단지가 조성되어 있다.

공단지역은 대부분 불분명한 면 단위의 발생원을 가진 대도시지역에 비해 주요 발생원이 공장, 도로 등과 같이 분명하여, 효율적인 환경위해 관리시스템을 구축할 수가 있다. GIS(Geographic Information System)는 이러한 환경오염문제를 공간적으로 접근하여 분석하는데 사용되어 질수 있고, 또한 지속적인 관리를 위한 구체적 방법을 제시할 수 있다.

본 연구에서는 울산지역 PM₁₀ 중의 미량 유해 중금속을 분석하였으며, 중금속의 위해도 평가에 GIS 공간분석 기능을 도입하여 일반적으로 점단위로 계산되어진 위해도를 대상지역 전역에 걸쳐 면단위로 계산하였다. 지역별로 산출된 중금속 위해도 결과를 공간자료와 중첩분석하여 위해도 기여원을 분석하였다. 공간분석과 위해도 계산은 pcARC/INFO, ArcView, ArcView Spatial Analyst(ESRI, USA), CADCORE, AutoCAD와 SmartRISK(PIONEER Environmental Consulting, USA)를 사용하였다.

2. 연구방법

2.1 중금속 농도분석

2.1.1 시료포집

포집장소는 울산시를 대상으로 주요 발생원이라 추정되는 특성별 공단지역 3개, 주요 시가지 2개 장소로 설정하였으며, 도로에서 직접적인 영향을 받지않도록 2층 이상의 높이에 PM₁₀ mini-vol. air sampler (5 l/min), High-vol. air sampler(1.14m³/min)와 각각 Cellulose nitrate membrane filter(0.8μm, 47mm), Quartz filter로 포집하였다. 포집기간은 1997년 4월 23일부터 7월 22일까지이며, 4개 장소의 mini-vol. sampler는 1주일 간격으로 연속포집하였고, 1개 장소의 High-vol. sampler는 1주일에 24시간씩 2일 포집하였다.

2.1.2 분석방법

포집필터는 시료포집시 만든 컨트롤 필터와 함께 측정 전·후에 항온·항습시켜 항량이 되게 한 후 감도 0.01mg 화학저울로 칭량하였다. PM₁₀ 농도는 포집전·후의 필터 무게차이를 총 포집유량으로 나눠 산출하였다. 전처리는 standard method(18th edition 1992, USA)의 microwave를 사용하였다. 분석은 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy ; Sciex Elan 5000, Perkin-Elmer)을 사용하여, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Sr, Ti, V, W, Zn 21종의 중금속 농도를 측정하였다.

2.2 GIS를 이용한 중금속 농도의 공간내삽(Spatial Interpolation)

2.2.1 지형자료 구축방법

울산시 1:50,000 지형도를 전지 스캐닝한 후 CADCORE에서 행정구역, 주요도로, 개발제한구역 등 4

개의 층으로 나누어 수치지도를 작성하였으며, 편집은 AutoCAD v13을 이용하였다. pcARC/INFO에서 좌표를 변환하고, TM좌표를 이용하여 중금속 측정지점과 공단위치를 층으로 구성하였으며, 총 6개의 층을 coverage로 변환하였다. 또한 Landsat TM 위성자료를 이용하여 입체지형도과 토지이용도를 생성하였다.

2.2.2 중금속 농도의 공간내삽법

5개 지점의 중금속 농도를 거리 ArcView Spatial Analyst에서 지원하는 공간내삽방법인 거리 반비례평권법(IDW : Inverse Distance Weighting)을 이용하여 미측정지점에 대한 값을 추정하였다. 미측정 지점의 중금속 농도는 주변의 실측자료 Zi의 가중평균에 의해 계산되어지며, 실측치에 대한 가중치 wi를 추정하고자 하는 지점에서 주변 측정지점까지의 거리 di에 반비례하여 결정된다.

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i, \quad w_i = \frac{d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-2}}$$

5개 실측지점이 주요 발생원이라는 가정하에 각 중금속별로 3개 지점을 이용해 내삽한 후 근거리 추정치를 2차 실측점으로 변환시켰다. 고른 분포를 위해 2차 실측치를 3개씩 늘려 4번의 내삽을 실시하였고, 20개 지점의 2차 실측점을 구하였다.

2.3 중금속의 위해성 계산

2.3.1 대상물질 선정 및 위험성 확인

위험성 확인을 통해 22개의 중금속 항목중 발암성 있는 As, Be, Cd, Cr⁶⁺, Ni(subsulfide)와 비발암위해성을 가진 Pb, Mn, Ni, V, Zn을 대상물질로 선정하였다.

2.3.2 노출평가 및 용량-반응평가

대기중의 오염물질은 다양한 매개체에 흡수, 변환되므로 노출평가시 다중 노출경로(multi-media)가 고려되어야 하나, 실측의 어려움으로 실내와 실외로 나누어 평가하였다. 울산시 주민 350명을 대상으로 설문조사하여 실내외 거주시간을 구하였고, 20개 지점에서 물질별로 거주자 RME(The Goal of the Reasonable Maximum Exposure)를 계산하였다.

2.3.3 위해도 결정

최종 위해도는 발암성 물질과 비발암성물질, 실내와 실외로 나누어 각 중금속별로 20개 장소에 대해 SmartRISK를 이용해 계산하였으며, ArcView Spatial Analyst에서 다시 공간내삽하여 면으로 추정하고 물질별 및 전체 위해도 지표와 발암위해도를 계산하였다.

2.3.3.3 위해도 기여분석

면으로 산출되어진 위해도 지도를 울산시 Landsat 위성자료, 공단위치도, 인구, 토지이용, 등고의 공간 수치자료와 중첩분석하여 위해기여도를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

공간내삽은 오차를 줄이기 위해 개발제한구역내에 있는 9개 행정지역을 대상으로 하였으며, 중금속 농도는 온산 비철금속단지와 남구 석유화학단지에서 전체적으로 높게 나타났다. 위해도 결과는 상대적으로 높은 중금속 농도값을 보인 온산 비철금속단지 주변지역인 온산면, 온양면에서 HI (Hazard Index : 위해도 지수) 0.4283, 0.4292이 나타났다. CR(Cancer Risk : 발암위해도) 또한 온산면과 온양면에서 각각 1.86×10^{-4} , 1.36×10^{-4} 로 가장 높았으며, 가장 낮은 지역은 농소읍 4.35×10^{-5} 으로 나타났다. 전체 지역에 대한 발암 및 비발암 위해도는 점추정 위해도 7.08×10^{-5} , 0.290 보다 먼 추정위해도 값이 7.22×10^{-4} , 0.304로 다소 높게 나타났다. 중금속 물질별로 위해도 기여율은 비발암 위해도의 경우

Pb이 64.1%, 발암위해도는 As이 48.3%로 가장 높게 나타났다.

본 연구에는 5개 지점을 각 지역별 발생원이라 가정하였으며, 농도값을 기상이나 지형조건을 고려하지 않고 단순히 공간적으로 내삽하여 사용하였으므로, 다른 발생원이나 기상조건에 따라 농도분포의 차이가 있을 것으로 기료된다. 따라서 5개 측정지점에서 크게 벗어나는 8개 행정지역을 제외시켰다.

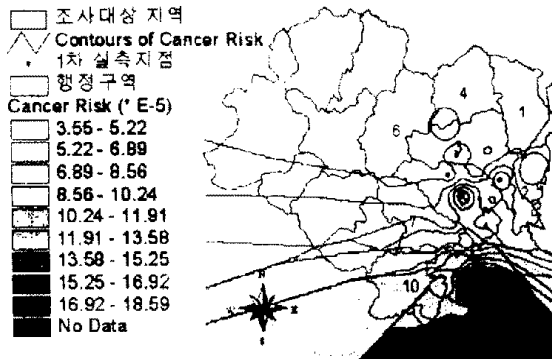


Figure 1. The Map of Cancer Risk in Ulsan.

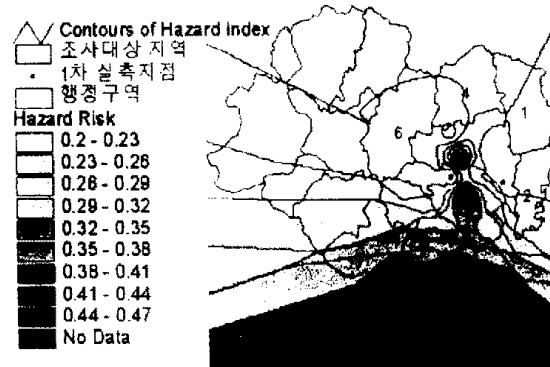


Figure 2. The Map of Hazard Index in Ulsan.

Table 1. Mean concentrations of heavy metals by sampling sites

Sites	As	Be	Cd	Cr	Pb	Ni	Mn	V	Zn	mean
신시가지	7.25	0.03	8.88	11.82	94.17	12.91	27.52	8.06	172.30	38.10
구시가지	10.16	0.03	10.60	11.64	249.89	10.98	28.75	6.85	137.27	51.80
석유화학단지	11.84	0.05	88.00	17.80	540.70	26.38	36.11	12.15	364.87	121.99
중공업단지	10.72	0.02	15.77	10.29	148.98	14.81	52.26	14.47	701.19	107.61
비철금속단지	65.06	0.06	33.74	26.78	566.97	56.78	69.67	19.64	1313.05	239.08
Mean	21.01	0.04	31.40	15.67	320.14	24.37	42.86	12.23	537.74	111.72
Std. Deviation	24.69	0.02	33.14	6.86	220.72	19.08	17.94	5.14	487.76	79.61

Table 2. Regional cancer risk and hazard index in Ulsan

Site No.	Region	Cancer Risk				Hazard Index			
		max	min	mean	Std. De.	max	min	mean	Std. De.
1	강동면	5.25×10^{-3}	4.04×10^{-3}	4.71×10^{-3}	0.0300	0.2500	0.2123	0.2288	0.0377
2	동 구	6.91×10^{-3}	4.39×10^{-3}	5.46×10^{-3}	0.0616	0.2854	0.2210	0.2371	0.0644
3	중 구	7.77×10^{-3}	3.55×10^{-3}	4.81×10^{-3}	0.0897	0.3794	0.2001	0.2412	0.1793
4	농소읍	4.36×10^{-3}	3.61×10^{-3}	4.21×10^{-3}	0.0144	0.2501	0.2035	0.2407	0.0466
5	남 구	9.61×10^{-3}	4.19×10^{-3}	6.30×10^{-3}	0.1266	0.4198	0.2101	0.2895	0.2097
6	범서면	5.28×10^{-3}	4.04×10^{-3}	4.34×10^{-3}	0.0116	0.2438	0.2112	0.2293	0.0326
7	청량면	9.56×10^{-3}	4.84×10^{-3}	6.82×10^{-3}	0.1268	0.3903	0.2296	0.3035	0.1607
8	온산면	1.86×10^{-4}	8.48×10^{-5}	1.27×10^{-4}	0.2460	0.4697	0.3581	0.4283	0.1116
9	온양면	1.36×10^{-4}	8.48×10^{-5}	1.12×10^{-4}	0.1290	0.4700	0.3608	0.4292	0.1092

4. 참고문헌

- 한희정의 외 9인, "GIS를 이용한 도시개발사업의 환경영향평가 기술개발에 관한 연구", 환경기술개발원, 1995.
- 윤성원, "GIS Interpolation 기법의 대기환경분야 적용에 관한 연구", 한양대학교 환경대학원, 1997.
- Lawrence B. Gratt, "Air Toxic Risk Assessment and Management", ITP, USA, 1996.
- Michael F. Goodchild et al., "Environmental Modeling with GIS", Oxford Univ. Press, 1993.
- PIONEER Environmental Consulting, "SmartRISK User's Guide", USA, 1996.
- ESRI, "Working with the ArcView Spatial Analyst", USA, 1996.