

광양만권역의 토양오염 현황과 특성

나춘기[†]

목포대학교 환경공학과

Status and Characteristics of Soil Pollution in Gwangyang Bay Area

Choon-Ki Na[†]

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

Abstract

The concentration of pollutants in the soil obtained from the Gwangyang Bay area were statistically analyzed to assess the degree of soil pollution and its characteristics. The levels of As, Cr⁶⁺, Ni and Zn present in the soils of Gwangyang Bay area enriched higher than the averages in nationwide. The combined pollution index, calculated using the concerning guideline for soil pollution at 1st region represented by a farm land, ranged from 0.02 to 8.51 and their average was higher than those of Incheon or Ulsan area. Using multivariate statistic approaches(principal components analysis and hierarchical cluster analysis), three factors controlling the pollutant variability were obtained; F1 included Cd, Cu, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni and F, F2 included Cu, Hg and TPH, and F3 included only As. This implies that some of the Cu, Hg, TPH and As in the soils may originate from different pollution sources. The spatial distributions of maximum pollution index indicated that the soil pollutions occurred strongly at around the abandoned metal mine area and waste dump-landfill area. All pollutants in soils showed no significant secular change except for As. The concentration of As showed a significant increasing trend with time, indicating a progressive and cumulative pollution.

Keywords : Gwangyang bay, Soil pollution, Pollution index, Spatial distribution, Secular change

1. 서론

오늘날 도시화와 산업단지화로 인해 인구 및 산업시설이 집중됨에 따라 다양한 종류의 유해성 물질들의 배출량이 한정된 공간에서 급격히 증가되어 대기, 수질, 토양을 포함하는 생태계의 오염이 더욱 심각해지고 있다. 특히 토양오염은 오염현상이 누적되고 느리게 나타나 오염경로를 파악하기 어렵고 오염지역 및 오염물질에 따른 특이성 때문에 효율적으로 관리하기가 매우 어려울 뿐만 아니라

복원이 어렵다. 따라서 토양오염을 효율적으로 관리하기 위해서는 기본적인 현황파악을 바탕으로 지속적인 관리와 개선이 중요하다.

환경부는 전국 토양에 대한 토양오염실태와 오염추세를 종합적으로 파악하고 오염토양의 정화, 복원 등의 대책을 수립, 추진하기 위해서 1987년에 250개 지역에 토양측정망을 설치하여 카드뮴 등 9개 항목에 대해 토양오염도 조사를 시작하였으며, 1996년부터는 전국망과 지역망으로 이원화한 토양측정망을

매년 운영하고 있다. 2010년 현재 전국망인 토양측정망 1,521지점과 지역망인 토양오염 실태조사 2,514지점을 운영하고 있으며, 2009년 개정된 토양환경보전법에 따라 토양오염 기준을 17개 항목에서 21개 항목으로 늘렸으며 토양오염기준 적용 지역구분이 2개 지역에서 3개 지역으로 확대되었다¹⁾. 특히 2010년도부터 그동안 용출법으로 조사하던 6개 중금속(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺)의 시험방법을 왕수를 이용하는 함량법으로 변경하고, 그에 따라 중금속 항목의 토양오염기준을 조정하여 적용하고 있다²⁾.

광양만권역에는 광양산업단지, 여수산업단지 및 울촌산업단지 등 대규모 산업단지가 위치하고 있어 전남지역 산업단지 지정면적의 52.4%를 차지할 정도로 집중되어 있다. 따라서 광양만권역은 다른 지역보다 유해물질의 배출량 증가와 함께 이들의 토양유입에 따른 토양오염 가능성이 높은 지역으로 이에 대한 현황 파악 및 적정 관리대책이 필요한 지역이다. 국내에서 토양오염 연구는 대부분 폐금속광산지역³⁻⁷⁾과 도시지역⁸⁻¹¹⁾을 대상으로 활발하게 진행되었지만 산업단지를 대상으로 한 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 광양만권역의 토양오염 현황 조사는 여천산업단지를 조사한 김옥배 등의 연구¹²⁾와 광양광산 주변을 조사한 박천영 등의 연구¹³⁾를 제외하고는 거의 전적으로 토양측정망과 토양오염실태조사에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 토양측정망과 토양오염실태조사는 조사지점이 제한적이고 대부분 특정 지역에 밀집되어 있어, 토지이용 지역별 토양오염도를 파악하는 데에는 유용한 정보를 제공하지만 토양오염의 확산·분포 등을 파악하는데에는 한계가 있다. 특히 중금속의 경우 2010년부터 공정시험법이 용출법에서 함량법으로 변경되어 토양오염 현황에 대한 재평가가 불가피한 실정이다.

본 연구에서는 개정된 함량법을 적용한 2010년도 토양측정망 자료와 토양오염실태조

사 자료를 바탕으로 광양만권역의 토양오염 현황과 특성을 재평가하였으며, 62개의 조사지점을 추가로 조사하여 광양만권의 토양오염 분포도를 작성하고 이를 바탕으로 토양오염범위를 추정해보았다. 또한 광양만권역의 토양오염 변화추이를 살펴보기 위하여 2001년부터 2010년까지의 토양측정망 및 토양실태조사 자료를 바탕으로 각 토양오염성분의 경시변화를 산술평균과 함께 가우시안 정규분포곡선 및 Box-Whisker plot를 이용하여 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 및 조사지점

연구대상지역은 우리나라 남해안에 위치하는 광양만을 중심으로 행정구역상 전라남도에서 속하는 여수시, 광양시 및 순천시를 광양만권역으로 설정하였다. 광양만권은 소백산육괴 남서부에 위치하고 있으며, 주로 선캄브리아기의 변성암류가 분포하며 편마암류로 구성되어 있다¹³⁻¹⁴⁾. 이 지역에 가장 넓게 분포하고 있는 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 중금속 함량은 Cr 183~392 mg/kg, Cu 7~30 mg/kg, Ni 10~42 mg/kg, Pb 15~38 mg/kg, Zn 52~112 mg/kg으로 Cr을 제외하고는 대체로 낮은 편이다¹³⁾.

광양만권역에서는 2010년 기준 여수시 16개 지점, 광양시 16개 지점 및 순천시 12개 지점으로 총 44개의 토양오염실태조사 지점과 여수시 17개 지점, 광양시 8개 지점 및 순천시 16개 지점으로 총 41개의 토양측정망 지점이 설정되어 토양오염도를 평가하고 있다. 본 연구에서는 연구대상지역의 토양오염 실태조사 지점과 토양측정망 지점의 위치를 고려하여 조사지점이 가능한 공간적으로 균일하게 분포되도록 여수시 16개 지점, 광양시 24개 지점 및 순천시 21개 지점을 추가로 선정하여 토양오염도를 평가하였다¹⁾. Fig. 1은

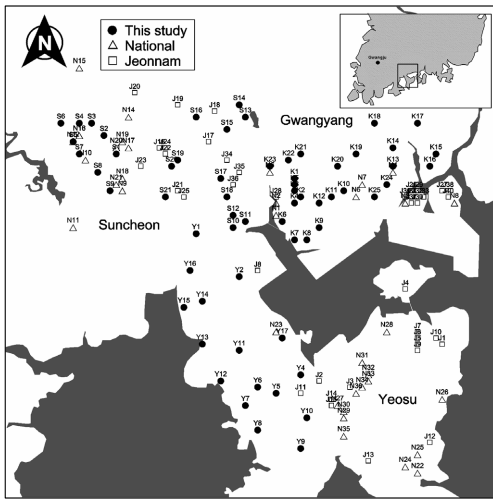


Fig. 1. Map showing the study area and sampling sites.

토양오염실태조사 지점, 토양측정망 지점 및 자체 조사지점을 보여주고 있다.

2.2. 시료채취 및 분석방법

자체 토양오염도 조사지점에서의 토양시료 채취는 지표하 10~20 cm의 토양을 대상으로 각 채취점을 대표할 수 있도록 1 m² 정도의 면적에서 소량씩 채취하여 혼합한 것을 하나의 채취점 시료로 하였다. 채취된 토양은 실험실에서 약 1주간 자연건조 시키고 전기건조기(100±5 °C)를 이용하여 완전건조 시킨 후 체분리를 통해 10 mesh 이하 만을 분석용 시료로 이용하였다. 10 mesh 이하의 토양시료는 사분법에 의해 분리하여 그 일부를 pH 측정에 사용하였으며, 나머지는 100 mesh 이하로 분쇄하여 화학분석용 시료로 사용하였다. 토양시료는 분말시료 3 g에 염산 21 mL와 질산 7 mL를 순차적으로 가하고 환류조건에서 2시간동안 분해하는 토양오염공정시험기준에 따라 처리하였으며,¹⁵⁾ ICP-AES를 이용하여 Cu, Pb, Ni, As, Zn, Cd을 정량분석 하였다. 각 시료 중의 중금속 함량은 건조중량을 기준으로 환산하였다.

2.3. 토양오염도 평가

토양오염도는 2010년도 토양측정망과 토양실태조사 자료와 자체 토양오염도 분석 결과를 이용하여 평가하였다. 지역간 토양오염도는 각 지역별 토양측정망과 토양실태조사 자료의 산술평균과 가우시안 정규분포곡선을 이용하여 비교하였다. 가우시안 정규분포곡선은 로그 변환한 데이터의 도수분포도를 바탕으로 작성하였다. 토양오염도는 토양오염 우려기준을 바탕으로 각 상분의 오염도지수(Pi)와 누적오염도지수(CPI)를 계산하여 평가하였다. 각 오염지수 평가 계산식은 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$PI_i = \frac{\text{concentration of } i \text{ component}}{\text{guideline for } i \text{ component}} \quad (1)$$

$$CPI = (\sum PI_i) / n \quad (i = 1 \sim n) \quad (2)$$

광양만권역의 토양오염 경시변화는 2001년~2010년의 토양측정망자료와 토양오염실태조사 자료를 대상으로 Box-Whisker plot와 가우시안 정규분포곡선을 이용하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양오염 현황

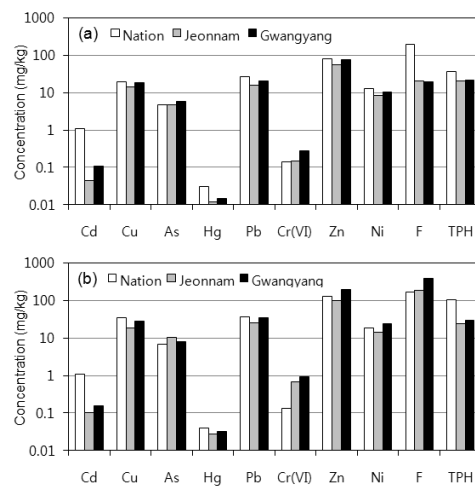
2010년도 광양만권역의 토양측정망과 토양오염실태조사 결과는 Table 1에 요약된 바와 같이 Cd 0~2.5 mg/kg, Cu 0~148.4 mg/kg, As 0~35.7 mg/kg, Hg 0~0.14 mg/kg, Pb 3~292 mg/kg, Cr⁶⁺ 0~7.0 mg/kg, Zn 9.18~1,690 mg/kg, Ni 0~185 mg/kg, F 0~4,358 mg/kg, TPH 0~243 mg/kg의 범위에서 검출되었으며, 대체로 토양측정망에 비해 토양오염실태조사에서 모든 성분이 최소 1.3배에서 최대 19.9배 높게 검출되었다. 각 성분별 검출값을 1지역 토양오염우려기준과 비교하면 토양측정망의 5%와 토양오염실태조사의 23%가 하나 이

Table 1. Results of soil pollution monitoring in Gwangyang Bay area at 2010 (Unit : mg/kg)

		Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr6+	Zn	Ni	F	TPH
N	Valid	85	85	85	85	85	85	85	85	50	50
	Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	35	35
	Mean	0.13	24.07	6.94	0.02	27.59	0.61	140.36	17.32	226.00	26.58
	Std. Deviation	0.37	22.85	6.06	0.03	36.28	1.16	211.03	23.01	621.32	46.06
	Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	9.18	0.00	0.00	0.00
	Maximum	2.50	148.40	35.73	0.14	292.00	7.00	1,690	185.00	4,358	243.00

상의 오염성분에 의해 기준을 초과하였으며, 성분별로는 As, Cr⁶⁺, Cu, Ni와 Pb가 각각 1개 지점씩, Zn이 8개 지점, F가 6개 지점에서 기준을 초과하였다. 지역별로는 광양지역 6개 지점, 순천과 여수지역 각각 3개 지점에서 1 지역 토양오염우려기준을 초과하는 성분이 검출되었다. 가장 토양오염도가 높은 곳은 여수시 낙포동에 위치한 남해화학 석고매립장으로 Cr⁶⁺, F, Ni, Pb, Zn이 1지역 우려기준을 초과하였으며, F의 경우 3지역 토양오염대책 기준을 2배 이상 초과할 정도로 그 오염도가 심각하였다.

Fig. 2는 토양측정망과 토양오염실태조사 자료의 전국, 전남 및 광양만권의 평균값을 비교한 것으로 토양측정망에서의 F, 토양오염실태조사에서의 As와 Cr⁶⁺를 제외하고 모든 성분에서 전남평균에 비해 광양만권 평균이 높았다. 또한 전국평균과 비교할 때 전남평균의 경우 대부분 낮았지만 광양만권의 경우 토양측정망에서는 As와 Cr⁶⁺가, 토양오염실태조사에서는 As, Cr⁶⁺, Zn, Ni, F가 높은 평균값을 나타내었다. 그러나 본 연구에서 사용한 자료는 평균값보다 표준편차가 훨씬 클 정도로 강한 분산도를 보여(Table 1) 산술평균이 일부 지점에서 나타나는 높은 함량에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 분산도가 큰 자료집단간 비교의 유의성을 확보하기 위해서는 가능한 자료집단간의 등분산성을 확보하고 잔차의 분포가 정규분포에 가깝도록 자료를 변환할 필요가 있다. 자료의 변

**Fig. 2.** Mean concentrations of pollutants in soil. a) national and b) regional soil pollution monitoring data at 2010.

환은 일반적으로 분산의 정도에 따라서 $\sigma \propto 1/y$ 일 때는 역수변환을, $\sigma \propto \sqrt{y}$ 일 때는 제곱근변환을 실시할 경우 등분산성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다¹⁶⁾. 본 연구에서 사용한 토양분석자료는 모두 $\sigma \propto \sqrt{y}$ 이므로 분산을 최소화하기 위한 방법으로 대수변환을 실시해야 함을 알 수 있다. Fig. 3은 전국에 비해 광양만권에서 높은 평균값을 보이는 성분들의 분석값을 대수변환한 후 전국, 전남, 광양만권으로 분류하여 작성한 가우시안 정규분포를 보여주고 있다. As 경우 토양측정망 및

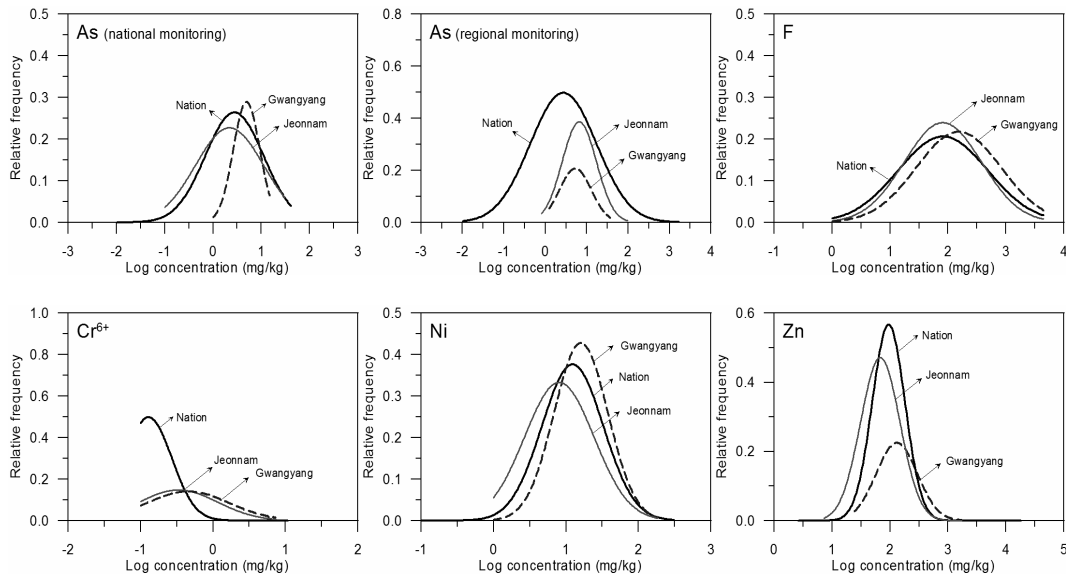


Fig. 3. Gaussian normal distributions of soil pollutants with higher mean at Gwangyang Bay area than at nationwide.

토양오염실태조사 모두 산술평균과 마찬가지로 광양만권에서 높은 중앙값을 보였지만 그 분포범위가 전국 또는 전남의 정규분포 영역 내에 포함되고 있어 오염도가 높다고 보기는 어려웠다. 한편 토양오염실태조사의 Cr^{6+} , Zn, Ni, F는 전국에 비해 광양만권에서 상대적으로 높은 농도영역을 갖는 정규분포를 보였다. 이는 광양만권에서 이들 성분들이 전국에 비해 상대적으로 부화되어 있음을 시사한다.

지역별 토양오염도를 비교하기 위해 각 지역별 토양오염실태조사 자료와 1지역 토양오염우려기준을 바탕으로 누적오염지수(CPI)를 산출하여 Fig. 4에 나타내었다. 광주와 대전을 제외하고는 상대적으로 인구와 산업이 밀집된 광역시에서 높은 CPI를 나타내 일반 지자체에 비해 토양오염도가 높음을 알 수 있다. 도별로는 경기>충남>경남>전남>강원>경북>제주>충북>전북 순으로 높은 CPI를 보였다. 특히 광양만권역의 CPI는 전남 전체에 비해 1.5배 이상 증가하여 인천이나 울산보다 상대적으로 더 높은 토양오염도를 나타냈다.

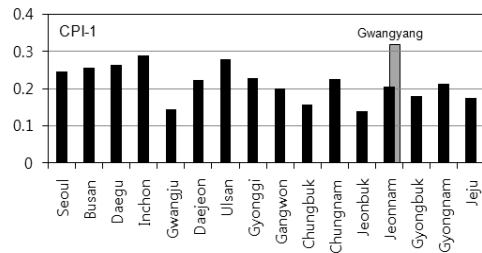


Fig. 4. Cumulative pollution index calculated from regional soil pollution monitoring data.

이는 상대적으로 산업단지 밀도가 낮은 전남 서부지역(목포, 나주, 영암)의 토양과 비교하여 전남 동부지역인 광양만권의 토양에서 As와 Pb를 제외한 모든 성분의 함량이 높은 점 (Fig. 5)으로 미루어 밀집된 산업단지에 의해 광양만권의 토양오염부하가 가중되고 있기 때문으로 판단된다.

3.2. 토양오염 특성

광양만권에서 토양오염성분들의 상호작용과 유사성을 분석하기 위해서 2010년도 토양

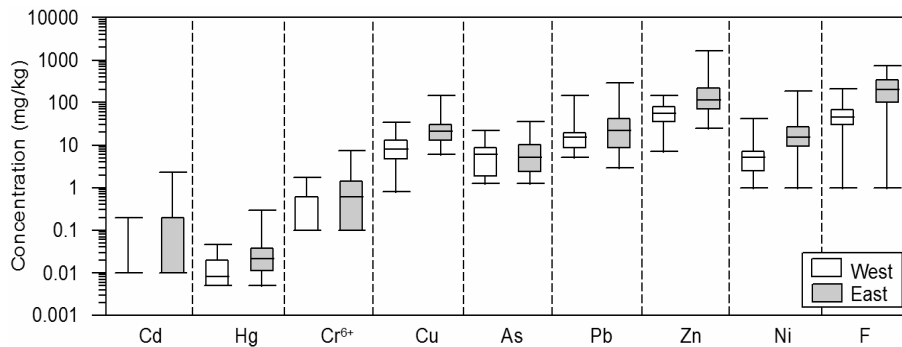


Fig. 5. Concentration range of soil pollutants between western and eastern part of Jeonnam.

측정망과 토양실태조사 자료를 대상으로 SPSS 통계 프로그램을 이용하여 주성분분석과 군집분석을 실시하였다. 주성분분석 결과, 광양만권 토양조사 자료는 Kaiser-Meyer-Olkin Measure값이 0.797로 계산되어 그 상관행렬이 요인분석에 적합하였으며, 상관행렬의 고유값인 eigenvalue가 1 이상인 3개의 요인이 추출되었다. 이들 요인에 의해 설명되는 변동량은 요인 1이 46.039%, 요인 2가 17.126%, 요인 3이 11.420% 정도였다. 추출된 각 요인에 대한 변수들의 VARIMAX 회전요인행렬은 요인 1은 변수 Cd, Cu, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni, F에서 비교적 큰 적재 값(>0.5)을 나타냈고, 요인 2에서는 변수 Cu, Hg, TPH에서 큰 적재 값을 나타냈다. 한편 요인 3에는 As만이 유일하게 큰 적재 값을 나타내어 타 변수와는 독립적인 특성을 나타냈다. 각 변수의 유사성을 측정하여 유사성이 높은 대상 집단을 분류하기 위해 계층적 군집분석(hierarchical cluster analysis)을 워드법(Ward's method)을 사용하여 실시하였다. 그 결과 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 F-Pb-Cu-Ni, Zn-TPH-Cr⁶⁺-(Cd), Cu-THP, As, Hg 등의 군집으로 분류되어 As와 Hg이 개별 군집에 속하는 상이성을 나타내었다. 군집분석의 결과는 주성분분석에서 요인 1에 포함되는 변수들과 요인 2 및 요인 3에 포함되는 변수들 간의 공통누적분포 차이를 명확히 보여주고 있다.

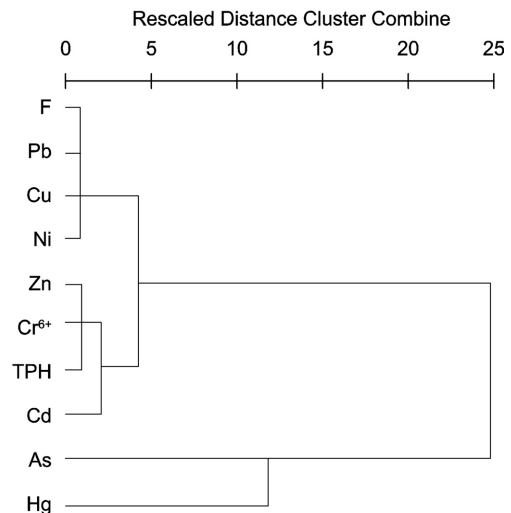


Fig. 6. Dendrogram constructed from cluster analysis.

3.3. 토양오염의 공간분포

광양만권 토양오염의 공간적 분포현황을 파악하기 위해 각 조사지점의(Fig. 1) 토양오염지수를 토양오염기준별로 산출하여 토양오염도를 작성하였다. 토양오염도는 Win surfer 7.0을 이용하여 작성하였으며 gridding method는 inverse distance to a power법을 이용하였다. 1지역 토양오염우려기준에 대한 누적오염지수 CPI-1은 0.02~8.51(0.38±0.81), 2지역 토양오염우려기준에 대한 CPI-2는 0.01~4.21(0.20±0.42), 3지역

토양오염우려기준에 대한 CPI-3은 $0.00\sim1.08$ (0.06 ± 0.13)의 범위를 보였다. 한편 최대오염지수(PI_{max})는 각 지점의 중금속 성분 중 최대오염지수를 나타내는 값만을 취한 것으로 토양오염의 평가는 한 종류의 중금속만이라도 기준을 초과할 경우 오염된 것으로 판별하기 때문에 그 지점의 오염여부를 평가하는데 보다 유효한 정보를 제공한다. 1지역 토양오염우려기준에 대한 $PI-1_{max}$ 는 $0.04\sim46.3$ (1.17 ± 4.17)의 범위로 계산되어 전체의 21.6%가 오

염지수 1 이상으로 농경지, 공원, 학교용지가 중심인 1지역 토양오염우려기준을 초과하였다. 2지역 토양오염우려기준에 대한 $PI-2_{max}$ 는 $0.02\sim23.14$ (0.71 ± 2.26)의 범위로 9.4%가 오염지수 1이상으로 임야로 대표되는 2지역 토양오염우려기준을 초과하였다. 3지역 토양오염우려기준에 대한 $PI-3_{max}$ 는 $0.01\sim5.79$ (0.23 ± 0.69)의 범위로 계산되었으며, 공장용지로 대표되는 3지역 토양오염우려기준을 초과하는 지점은 광양시 초남리와 사곡리, 여수시 낙포동

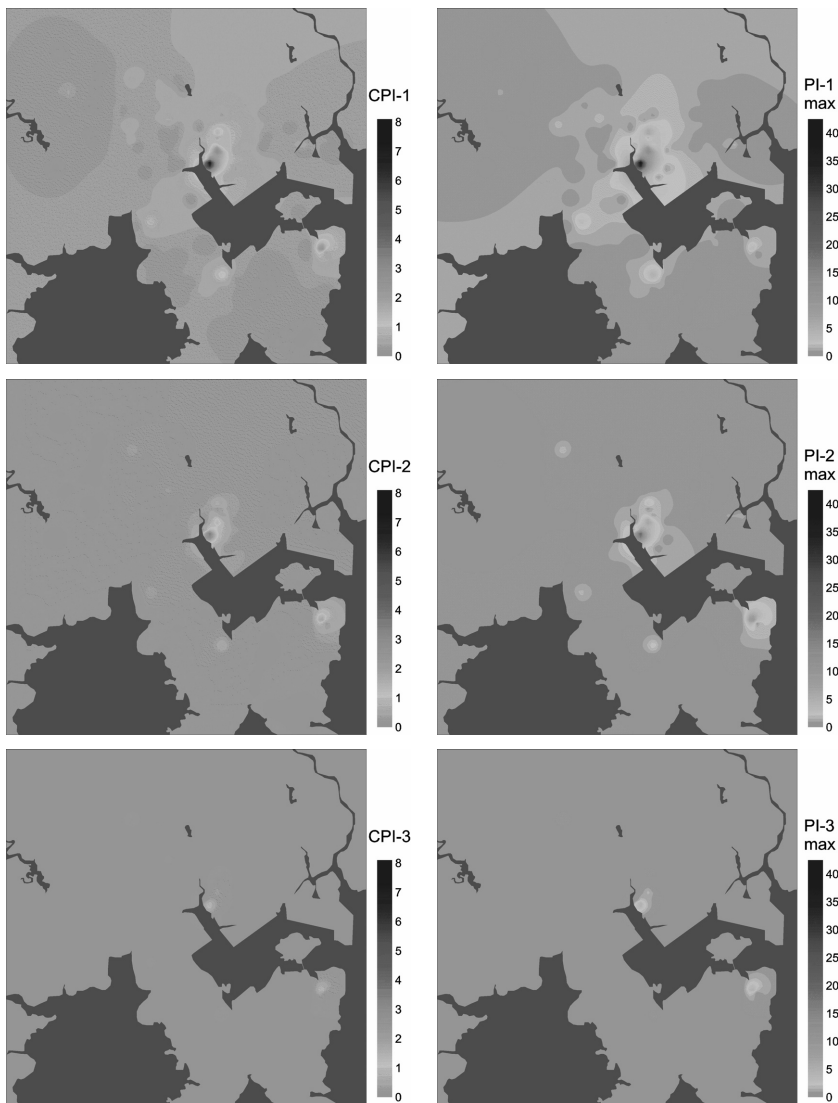


Fig. 7. Spatial distributions of cumulative pollution index and maximum pollution index.

단 3지점에 불과하였다. Fig. 7은 1, 2 및 3지역 토양오염우려기준 대비 누적오염지수(CPI) 및 최대오염지수(PI_{max})의 공간분포도를 보여주고 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 광양만권에서 토양오염이 강하게 진행되고 있는 지역은 광양광산(초남산단) 주변과 여수공항 주변 및 여수시 낙포동의 남해화학 석고매립장 주변이었으며, 특히 광양광산 주변과 여수시 낙포동 석고매립장 주변은 3지역 토양오염우려기준을 초과하고 있어 토양오염 방지 및 정화대책 등을 수립하여 관리할 필요가 있다.

3.4. 토양오염의 경시변화

광양만권의 토양오염 경시변화를 알아보기 위해 Box-Whisker plot를 이용하여 2001~2010년의 토양측정망 및 토양오염실태조사 자료를 연도별로 비교하여 보았다. Box-Whisker plot은 1~3사분위수의 Box와 범위를 나타내는 Whisker로 구성되며, Box 내에는 자료의 중앙값(median)인 2사분위수를 세로 줄로 나타낸다. Box-Whisker plot에서는 사분위범위의 1.5배 이상인 값을 보통 이상값(outlier)으로 보며 2배 이상이면 Whisker 범위에서 제외시킨다. 따라서 Box-Whisker plot은 자료의 분포와 중앙값을 제공하면서 어떤 데이터가 이상값에 속하는지를 쉽게 알 수 있다는 장점이 있다. Fig. 8은 광양만권에서 일부 토양오염성분의 연도별 Box-Whisker plot으로 가능한 정규분포에 가까운 형태에서 자료집단을 비교하기 위하여 Y축을 로그스케일로 하였으며, 표시한 점선과 실선은 각각 2010년 이전과 이후의 1지역 토양오염우려기준을 나타내고 있다. 2010년에 As, Cu 및 Pb의 함량이 급격히 증가하는 것은 이들 원소에 대한 토양공정시험법이 용출법에서 함량법으로 바뀌었기 때문이다. Box-Whisker plot에서 모든 성분의 Box범위와 중앙값이 자료집단에 관계없이 조사연도에 따라 불규칙하게 달라지는 경향을 나타내 뚜렷한 경시변화

를 추출해내기 어려웠다. 다만 As의 경우 불규칙하지만 연차적으로 증가하는 경시변화를 보였다. 이는 가우시안 정규분포곡선을 이용한 경시변화 분석에서도 확인되었다. Fig. 9는 각 연도별 As와 Cu의 가우시안 정규분포곡선을 비교한 것으로 Cu의 경우 Box-Whisker plot에서와 마찬가지로 경시변화 추이를 추출하기 어려운 반면 As는 2008년을 제외하고는 그 농도가 연차적으로 증가하는 경시변화가 비교적 뚜렷하였다. Box-Whisker plot과 가우시안 정규분포곡선에서 나타난 As의 경시변화는 광양만권 토양 중에 As가 축적되고 있음을 시사한다. 특히 As는 Table 2와 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 타 성분과는 상관성이나 유사성이 낮은 그룹으로 분류되었음을 상기할 필요가 있다. 이는 As가 타성분과는 다른 오염원 또는 오염경로를 통해 토양에 유입되고 있음을 나타내는 것으로 As에 의한 토양오염을 방지하기 위해서는 이에 대한 확인과 관리방안이 모색되어야 한다.

Table 2. Result of principal component analysis

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Eigenvalue	4.604	1.713	1.142
% of Var.	46.039	17.126	11.420
Cd	0.684	-0.128	0.184
Cu	0.506	0.623	0.248
As	0.019	0.072	0.930
Hg	-0.038	0.744	0.286
Pb	0.911	0.191	0.082
Cr(VI)	0.709	0.175	-0.047
Zn	0.928	0.131	-0.007
Ni	0.891	-0.031	-0.070
F	0.944	-0.055	0.003
TPH	-0.020	0.813	-0.294

* Rotation method: Varimax with Kaiser normalization.

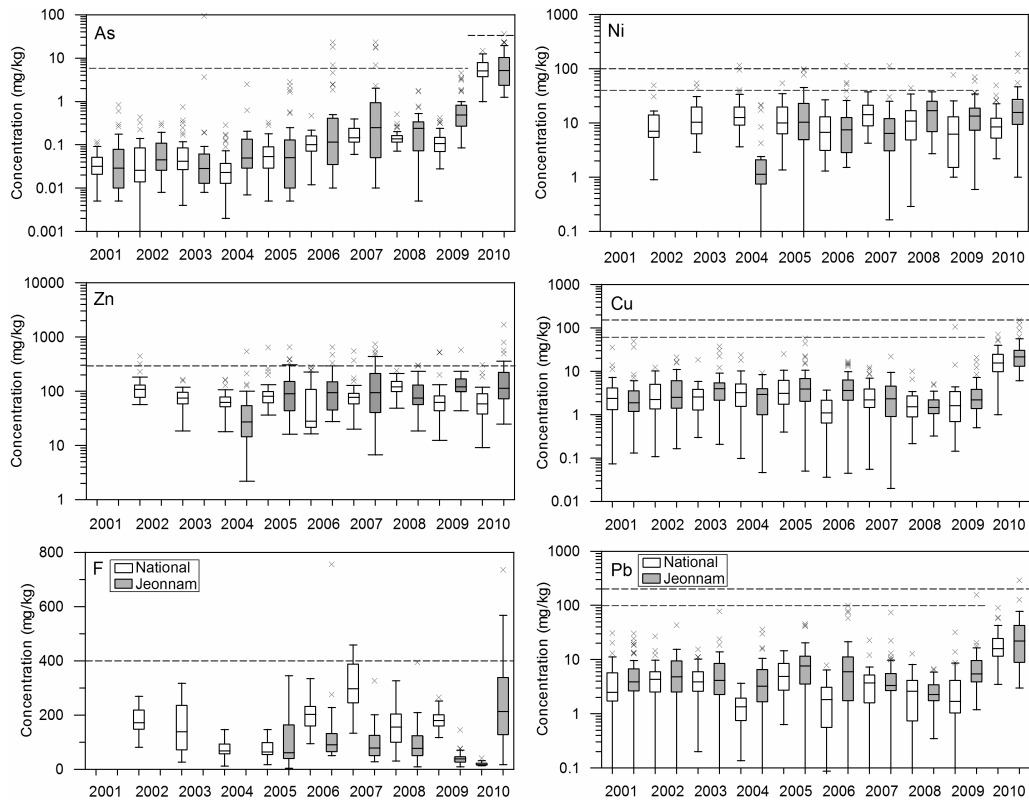


Fig. 8. Box-Whisker plots showing secular change of pollutants in soil from 2001 to 2010.

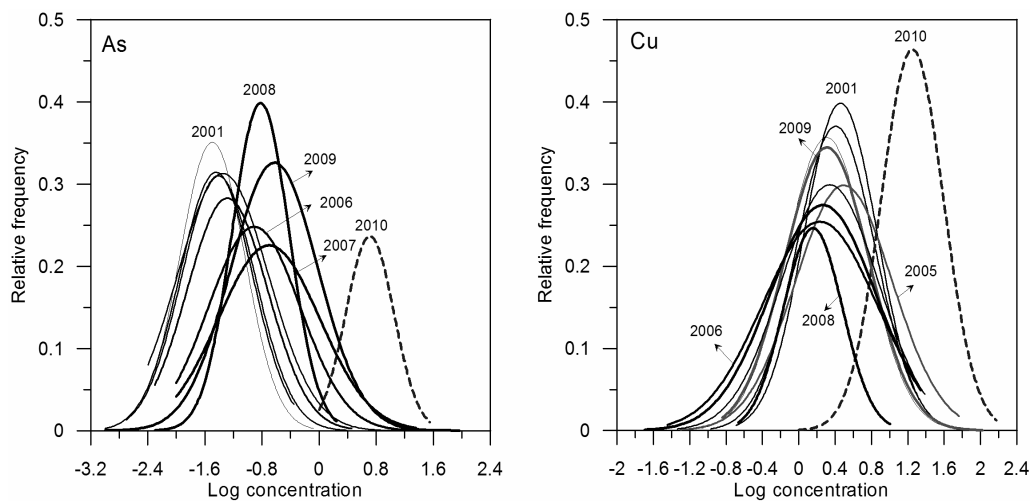


Fig. 9. Gaussian normal distributions of As and Cu concentration in soil from 2001 to 2010.

4. 결 론

광양만권역의 토양오염 현황과 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 광양만권역의 토양은 As, Cr⁶⁺, Ni, Zn이 전국평균에 비해 부화되어 있는 특성을 보였으며, 누적오염지수가 전남 평균에 비해 1.5배 이상 높아 인천이나 울산보다 상대적으로 더 높은 토양오염도를 나타냈다.
- 2) 주성분분석에서 3개의 요인이 추출되었으며, 요인 1은 Cd, Cu, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni, F, 요인 2는 Cu, Hg, TPH, 요인 3은 As에서 큰 적재 값을 나타냈다. 군집분석에서는 F-Pb-Cu-Ni, Zn-TPH-Cr⁶⁺-(Cd), Cu-THP, As, Hg 등의 군집으로 분류되어 As와 Hg이 개별 군집에 속하는 상이성을 나타내었다.
- 3) 토양오염 우려기준을 바탕으로 각 오염성분별 오염지수를 산출한 결과, 21.6%가 1지역 기준을, 9.4%가 2지역 기준을, 2.8%가 3지역 기준을 초과하였다.
- 4) 토양오염의 경시변화를 분석한 결과 As 함량이 연차적으로 증가하는 추세를 보여 토양 중에 점점 축적되어 가고 있음을 나타내었다.
- 5) 결론적으로 광양만권의 토양오염은 국부적으로 우려할 수준은 아니지만 산업단지의 밀집 등 지역특성을 고려할 때 가속화될 가능성이 높아 이를 방지하기 위한 적극적인 관리가 필요하다.

사 사

이 논문은 전남녹색환경지원센터에서 시행한 2011년도 환경기술연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

References

1. 환경부(2011), 2010년도 토양측정망 및 토양오염실태조사 결과.
2. 환경부(2009), 내년부터 달라지는 「토양환경보전법」 관련 제도.
3. 정철현, 박현주, 정일현, 나춘기(2007), 경남 고성 구리광산 지역의 중금속 오염특성, 자원환경지질학회지, 40(4), pp. 347-360.
4. 김정대(2005), 강원도 폐금속광산지역의 광미와 주변토양의 중금속 오염현황 및 오염도 평가, 대한환경공학회지, 27, pp. 625-634.
5. 이평구, 강민주, 최상훈, 신성천(2004), 광미 및 오염된 토양에서 중금속의 존재형태 및 잠재적인 이동도, 자원환경지질학회지, 37, pp. 87-98.
6. 안주성, 전효택, 손아정, 김경웅(1999), 구봉 금은광산 주변지역의 비소 및 중금속에 의한 환경오염과 비작물의 흡수특성, 한국자원공학회지, 36, pp. 159-169.
7. 나춘기, 이무성, 정재일(1997), 폐금속광산하부 농경지 토양의 중금속 오염과 그 복구방법으로서 반전개토의 효율성, 자원환경지질학회지, 30(2), pp. 125-135.
8. 박정준, 신은철(2008), GIS 기법을 이용한 인천지역의 토양오염도 작성에 관한 연구, 한국환경복원녹화기술학회지, 11(4), pp. 1-11.
9. 손창인, 나춘기(2007), 목포지역 도로변 퇴적물의 중금속 함유 특성과 위해성 평가, 한국폐기물자원순환학회지, 24(5), pp. 428-440.
10. 신상은, 김주용, 오강호(2005), 광주광역시 토양의 지화학적 거동 특성과 오염, 환경영향평가, 14(6), pp. 415-425.
11. 이병규, 고일하, 김행아(2005), 단계별추출법에 의한 울산지역 토양 중의 중금속 Partitioning 특성연구, 대한환경공학회지, 27(1), pp. 25-35.

12. 김옥배, 이무성, 박희열, 박정용, 나춘기 (1997), 공업단지 주변 토양의 중금속 오염에 관한 환경 지화학적 연구-여천과 전주 공업단지를 대상으로-, 한국자원공학회지, 34, pp. 1-10.
13. 박천영, 김희남, 정연중(1998), 광양광산 섬록암과 주변 토양에서 중금속 원소의 지구화학적 분산에 관한 연구, 한국지구과학회지, 19(1), pp. 35-55.
14. 박배영, 서구원(2008), 광양-하동지역에 분포하는 편마암류의 지구화학 및 변성작용, 한국지구과학회지, 29(3), pp. 221-245.
15. 환경부(2009), 토양오염공정시험기준.
16. 전홍석, 이재준, 고광백(1997), 환경통계학, 동화기술.