

## 토지이용상태에 따른 하남산업단지 토양오염물질 분포 특성에 관한 연구

공화진\* · 위 환 · 김승호 · 박옥현 · 장길식 · 정희윤 · 배석진 · 정숙경 · 조영관

광주광역시 보건환경연구원

### Distribution Characteristics of Soil Contaminants in Hanam Industrial Complex, Gwangju by land use

Hwa-jin Kong\* · Whan Wi · Seung-ho Kim · Ok-hyun Park · Gil-sik Jang

Hee-yun Jung · Seok-jin Bae · Suk-kyung Jeong · Young-gwan Cho

Health and Environment Research Institute of Gwangju

#### ABSTRACT

Soil contamination survey was conducted during March - July, 2017 to obtain soil contamination profile of 16 organic and inorganic contaminants in Hanam industrial complex located in Gwangju, Korea. The concentrations of all surveyed contaminants except Cd showed were within 0.3~1.5 times of their natural background levels. Cd showed concentrations as high as 6.9 times of the background level, signifying the influence of the metal processing facilities in the complex. The concentrations of Zn, Pb and Hg in areas nearby industrial facilities were 1.3~5.5 times higher than those within the facility and green area. The concentration of Cu in the green area was 1.4~2.9 times higher than in other areas. The Soil Pollution Index (SPI) analysis revealed 54% of the total area belong to first-grade soil, 43% to second-grade, and 3% to third-grade. The Enrichment Factor (EF) of Zn, Pb, and Cd were 9.2, 15.6, and 88.5, respectively, indicating high accumulation and contamination of the soil with Cd.

**Key words :** Industrial complex, Soil contaminants, Heavy metal, Enrichment Factor (EF), Soil Pollution Index (SPI)

#### 1. 서 론

토양은 물이나 공기와 같은 이동성이 없기 때문에 오염 물질이 토양에 흡착되면 쉽게 외부 환경으로 유출되지 않고 장기간에 걸쳐 토양에 잔류하는 것으로 알려져 있다 (Ha et al., 2004). 이러한 특성에 의해 토양오염은 다른 환경오염과 달리 쉽게 눈에 보이지 않는 잠재성과 오염과 문제 발생 시간의 시간차를 가지기 때문에 오염이 상당히 진전될 때까지 인식이 어렵고 피해를 입은 후에야 알게 된다. 또한 토양오염은 오염물질의 종류에 따라 오염의 양상이 달라지고 오염지역의 입도 등 토양특성에 의해서도 큰 영향을 받으며, 대기나 수질오염에 비해 개선하는데 훨씬 더 많은 시간과 비용을 필요로 하는 특징을 가지고 있다(Ministry of Environment(MOE), 2014).

산업단지의 경우 유해화학물질을 보관 및 취급하는 사

업장이 많아 환경오염이 발생할 가능성이 높아 토양에 대한 영향을 파악하기 위한 토양오염 실태에 대한 연구가 필요하다. 이러한 이유로 환경부에서는 산업단지에 대한 토양오염실태를 파악하고 오염 원인을 규명하고 정화방안을 제시할 목적으로 「산업단지 토양환경조사 계획」을 수립하여 전국 75개 국가 및 일반산업단지 중 오염우려 가능성이 높은 25개 산업단지를 대상으로 토양지하수 환경조사사업을 수행해 오고 있다(MOE, 2004). 또한, 산업단지의 토양 중 중금속 등 토양오염물질의 분포 특성에 대한 연구가 발표되었다(Park et al., 2007; Jung et al., 2012; Jeong et al., 2015).

광주광역시 광산구에 위치한 하남산업단지는 금속가공업종이 주를 이루는 산업단지로서, 입주업체 총 999개 업체 중 주물업, 비철금속 처리업 등 금속관련 업종이 40%를 차지하고 있다. 최근 하남산업단지의 전구공장에서 Hg

\*Corresponding author : khj0926@korea.kr

Received : 2018. 1. 2 Reviewed : 2018. 1. 30 Accepted : 2018. 4. 30

Discussion until : 2018. 6. 30

이 유출되고, 도금업체에서 화재가 발생하여 폐수가 방류되는 등 크고 작은 환경오염사고들이 발생하였다. 이로 인해 산업단지 토양에 대한 중금속 등 환경오염의 우려가 높아지고 있다.

따라서 본 연구에서는 하남산업단지의 토양오염물질 분포 실태를 종합적으로 판단하기 위해 토양환경보전법(MOE, 2017)에서 토양오염물질로 규정한 중금속 및 유기화합물질 등 17항목에 대해 사업장 내부와 외부에서의 농도분포특성을 조사하여, 토양오염지수(Soil Pollution Index, SPI)와 부하지수(Enrichment Factor, EF)를 통해 토양 중금속의 축적정도 및 토양오염등급을 통해 하남산업단지 토양의 오염실태를 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상

하남산업단지는 1981년부터 총 3차에 걸쳐 광주광역시 광산구 일대에 조성된 총 면적 5,944천  $m^2$  부지의 일반산업단지이다. 산단 내 산업시설구역으로 지정된 면적은 총 면적의 76.6%인 4,551천  $m^2$ 이며 2017년 9월 기준으로 999개 업체가 입주해있다. 하남산업단지 입주 업체들의 업종은 조립금속, 비금속, 화학, 식품 등으로 다양하지만 그 중 금속업종이 40%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 화학업종이 13%로 두 번째로 높은 비율을 차지한다. 녹지면적은 371천  $m^2$ 로 산단 부지의 6.2%를 차지한다. 산

업단지 가장자리에 산단과 주변지역의 경계를 짓는 녹지지역과 안청공원, 하남공원 등이 있다. 하남산업단지의 지질은 시생대와 원생대의 변성암복합체로 구성되어 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1985).

본 연구는 2017년 3월부터 7월까지 5개월간 사업장에서 발생하는 오염물질의 토양오염에 대한 영향을 파악하기 위해 토지이용실태에 따라 3가지 용도로 구분하여 사업장내부 10개소, 사업장주변 26개소, 녹지지역 13개소 등 총 49개소 100개 지점을 대상으로 토양시료를 1회씩 채취하였으며, 조사지점을 Fig. 1에 나타내었다. 사업장내부 지점은 산단 업종 분포에 따라 주물업종이 4개소, 비철금속 수집 및 처리업종이 3개소, 금속가공업종이 2개소, 화학업종이 1개소로 산업활동으로 인해 토양오염의 가능성이 있는 사업장을 선정하였다. 사업장은 모두 콘크리트로 포장되어 있고, 초지로 구성되어 있는 사업장주변 지점은 사업장 부지 경계로부터 3m~5m 거리의 지점을 대상으로 하였으며, 녹지지역은 빗고을산들길과 안청공원 등 하남산단 내부의 수목과 초지로 조성된 녹지지역을 선정하였다.

### 2.2. 연구방법

#### 2.2.1. 시료채취

전체 49개소 100지점 중 사업장내부, 사업장주변, 녹지지역으로 구분하여 사업장내부 10개소에 대해 1개소당 오

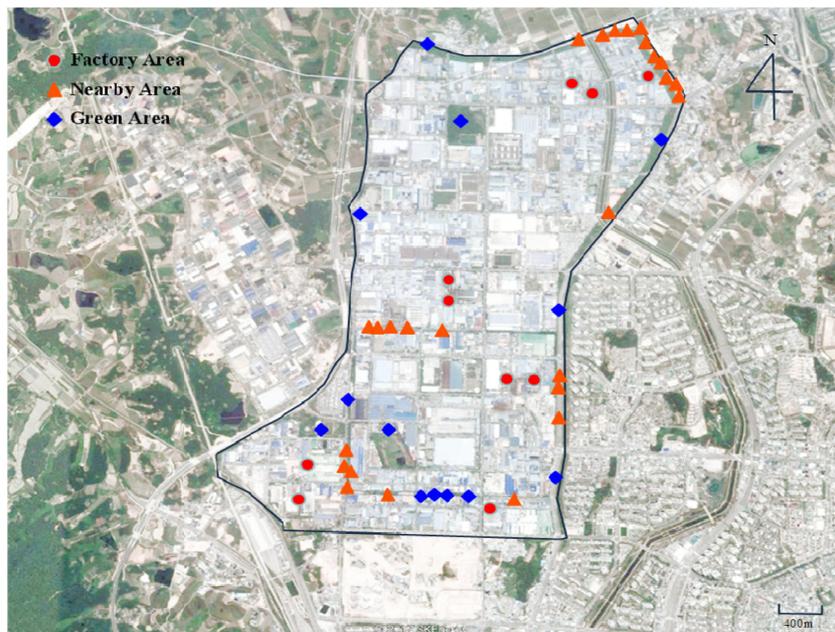


Fig. 1. Sampling sites of the study area.

염이 우려되는 1개~3개 지점을 선정하여 타격식 시료채취장비(Geoprobe)를 이용하여 콘크리트 하단의 토양을 심도별로 채취를 하였다. 콘크리트 하단에서 30 cm까지를 1심도, 30 cm에서 2 m까지를 2심도, 2 m에서 4 m까지를 3심도로 분류하였으며, 암반에 의하여 더 이상 채취가 불가능한 지점은 채취 가능한 지점까지만 시료를 채취하였다. 사업장주변과 녹지지역은 사업장으로부터의 오염물질 비산가능성을 확인하기 위해 해당 지점의 중앙 1곳과 그 중앙을 중심으로 주위 3곳의 표토(0~10 cm)를 채취하여 시료의 대표성을 확보하였다.

시료채취는 토양오염공정시험기준에 따라 표면의 이물질층을 제거한 후 토양시료채취기를 이용하여 0.5 kg을 채취하였으며, 스테인리스 재질의 스크프를 이용하여 채취한 토양시료 중 약 300 g을 분취하여 폴리에틸렌봉투에, 유기물질 시험용 시료는 갈색 유리병에, 휘발성유기화합물 시험용 시료는 앞이 막혀있지 않은 주사기를 이용하여 3 g~5 g을 분취하여 미리 메틸알코올 10 mL를 넣어둔 바이알에 옮겨 담았다. 채취한 시료는 아이스팩과 아이스박스틀 이용하여 0°C~4°C 냉암상태를 유지하며 실험실로 운반하여 토양오염우려기준 21개 항목 중 16개와 pH를 추가하여 총 17개 항목을 분석하였다. 2010년부터 2016

년까지 광주지역 토양오염실태조사 결과 불검출항목인 Phenol, Cyanide, 유기인, PCBs, 벤조(a)피렌은 조사항목에서 제외하였다(MOE, 2010~2016).

### 2.2.2. 분석방법

각 시료는 폴리에틸렌 재질의 바트(vat)에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되도록 펼쳐놓고 7일간 풍건시킨 다음 분석항목에 적합하도록 토양pH용 시료는 10 mesh(2 mm), 중금속 분석용은 100 mesh(0.15 mm), F 분석용은 200 mesh(0.075 mm) 표준체로 체거름 하였다. Cr의 경우 Cr<sup>6+</sup>을 토양오염물질로 지정하여 기준을 정하고 있으나 토양오염실태조사결과에 의하면 Cr<sup>6+</sup>은 대부분 불검출로 나타나 그 의미를 찾기 어려워(MOE, 2014) 본 연구에서는 총Cr으로 분석하였다. 분석조건은 Table 1과 Table 2에 나타내었다(MOE, 2015).

### 2.2.3. 정도관리(QA/QC)

중금속 및 유기화합물질의 분석결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 토양오염공정시험기준에 따라 방법검출한계 등 재현성을 확인하였다.

중금속의 경우 표준물질을 희석하여 7개의 표준시료

**Table 1.** Instrument conditions of GC/GC-MS

Item	GC	GC-MS
System	Agilent 6890N	Agilent 6890/5973N
Column	HP-5, 5% phenyl methyl siloxane	DB-5MS (60 m × 250 μm × 1.0 μm)
Carrier gas	N <sub>2</sub> (1.0 mL/min)	N <sub>2</sub> (1.0 mL/min)
Oven	50°C (2 min) → 8°C/min → 320°C (15 min)	40°C (5 min) → 10°C/min → 100°C (1 min)
Injection mode	split ratio 2:1	split ratio 10:1
Detector	FID	GC/MS SIM

**Table 2.** Analysis method of soil contaminants

Item	Method	Instrument
Zn, Cu, Ni, Cd, Cr, As, Pb	Inductively Coupled Plasma-Atomic emission spectrometry	ICP-OES (Perkinelmer, USA)
Hg	Thermal decomposition amalgamation atomic absorption spectrophotometry	DMA-80, (MILESTONE, Italy)
F	Ultraviolet/Visible spectrometry	UV-2550 (Shimadzu, Japan)
BTEX*, TCE, PCE	Gas Chromatography-Mass Spectrometry	GC/MS (Agilent,6890/5973N, USA)
TPH	Gas Chromatography	GC (Agilent 6890N, USA)
pH	Glass electrode method	STAR A211, (Thermo, USA)

\*BTEX : Benzene, Toluene, Ethyl-benzene, Xylene

(0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mg/L)로 검량선을 작성하여 직선성 평가결과 결정계수( $r^2$ )가 0.999 이상으로 나타났다. 재현성 및 방법검출한계 평가결과 표준편차가 0.1% 이하, 방법검출한계가 Zn이 0.02 mg/kg 등 중금속 항목별 정량한계 이하로 나타났다.

휘발성유기화합물질(Benzene, Toluene, Ethyl-benzene, Xylene, TCE, PCE)의 경우 5개의 표준시료(5, 10, 20, 40, 60  $\mu\text{m/L}$ )로 검량선을 작성하였다. 직선성 평가결과, 결정계수( $r^2$ )가 0.994 이상이었으며, 표준편차가 0.1% 이하, 방법검출한계가 Benzene이 0.022 mg/kg 등 정량한계 이하로 나타났다. TPH는 6개의 표준시료(170, 425, 850, 1700, 2550, 3400 mg/kg)로 결정계수( $r^2$ )가 0.994 이상이었으며, 표준편차가 2.0%, 방법검출한계가 6.3 mg/kg으로 정량한계 이하로 매우 양호하였다.

#### 2.2.4. 통계 및 자료분석

##### (1) 통계분석

본 연구에서는 하남산업단지의 토양오염물질을 조사지역별로 평균, 표준편차, 최소값, 최대값을 산출하였으며, 분산분석을 통해 조사지역별 오염농도가 통계학적으로 유의한 차이를 보이는지 SPSS(ver.20.0)를 활용하여 확인하였다.

##### (2) 토양오염지수(SPI)

조사대상 지역의 토양오염 정도를 파악하기 위하여 토양오염지수(SPI, Soil Pollution Index)를 산출하여 오염도를 평가하였다. 중금속 항목에 대하여 토양오염점수(SPS, Soil Pollution Score)를 산출하고, 이를 토대로 나온 토양오염지수(SPI)를 사용하여 토양오염도를 평가한다. 토양오염점수는 토양 중 중금속 분석농도에 각 중금속의 토양오염 우려기준(1지역)으로 나눈 값을 백분율하여 산출한다.

$$SPS = \sum_i \frac{C_i}{TV_i} \times 100$$

$C_i$  : Heavy metal concentration,  $TV_i$  : Soil pollution concerns standards for heavy metals

Table 3에 나타난 바와 같이 토양오염점수가 300점 이상이면 4등급으로 오염된 지역으로 구분한다. 300점~200점 사이는 3등급, 200점~100점 사이는 2등급으로 토양오염이 우려되는 지역이다. 100점 미만은 1등급으로 토양상태가 양호한 지역으로 분류한다(Chang et al., 2003).

##### (3) 부하지수(EF)

부하지수(EF, Enrichment Factor)란 지각 보존성 원소의 농도 대비 연구대상 토양의 중금속 농도를 이용해서 중금속 축적정도를 평가할 수 있는 지수이다. 아래 계산식과 같이 연구대상 지역의 중금속 X의 농도와 보존성 원소인 AI의 농도비를 지각 평균 중금속 X 농도와 AI의 농도비로 나눈 값으로 계산할 수 있으며(Michael and Sheldon, 2000; Xinwei et al., 2016), 본 연구에서는 Mason과 Moore(1982)이 제시한 평균 지각 함량값을 사용하였다.

$$EF = \frac{(X/AI)_{soil}}{(X/AI)_{earth's crust}}$$

X : Heavy metal concentration

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 토양오염물질 농도 분포

연구대상의 토양 중 중금속 및 유기화합물질 17종을 분석하여 평균값, 표준편차, 최소값 및 최대값을 Table 4에 나타내었으며, 조사 항목 중 As, Benzene, Toluene, Ethyl-benzene, Xylene, PCE, TCE는 검출한계 이하로 불검출로 나타났다. 연구대상은 공장지역으로 토양환경보전법에 따라 토양오염우려기준(3지역) 기준을 적용하면 모든 항목이 기준치 이내이며, 기준 농도의 0%~30%로 매우 낮은 수준을 보인다. 그런데 연구 대상지역의 경우 인근에 주거지역, 학교, 노인복지시설 등 주민들의 생활공간과 약 100 m 가까이 인접해있어 환경오염 발생 시 주민 건강에 직접적으로 영향을 미칠 가능성이 있으므로 1지역 기준과 비교 평가하였다. Cd을 제외한 전체 항목이 토양

**Table 3.** SPI and description based on SPS

Soil Pollution Score	Soil Pollution Index	Description
< 100	1	good soil condition
100 ≤ SPS < 200	2	concern for soil contamination
200 ≤ SPS < 300	3	concern for soil contamination
≥ 300	4	considered as contaminated soil

**Table 4.** Concentration of soil contaminants in the study site

(unit : mg/kg)

	Mean	S.D	Min	Max	Standard	Natural Background*	Soil Measurement Network**
Zn	75.1	47.3	19.6	334.3	300	54.3	-
Cu	8.8	12.6	0	73.1	150	15.3	-
Cd	2.01	1.18	0	4.53	4	0.29	-
Cr	14.1	22	0.7	210.3	-	25.4	-
As	0	0	0	0	25	6.83	-
Pb	27.1	19.2	0.8	115.2	200	18.4	-
Ni	5.4	7.6	0	58.1	100	17.7	-
Hg	0.02	0.04	0	0.38	4	-	0.08
F	236	127	2	523	400	-	209
Benzene	0	0	0	0	1	-	0
Toluene	0	0	0	0	20	-	0
Ethyl-benzene	0	0	0	0	30	-	0
Xylene	0	0	0	0	15	-	1.1
TPH	88	107	22	787	500	-	158
PCE	0	0	0	0	4	-	0
TCE	0	0	0	0	8	-	0
pH	6.3	1.1	4.6	8.6	-	-	6.6

\* Yoon et al. (2009)

\*\* Ministry of Environment (2015)

오염우려기준(1지역)의 1%~59% 수준으로 낮은 농도를 보이며, Yoon 등(2009)이 발표한 자연배경농도와 하남산업단지 인근 토양측정망 배경농도지점의 평균(MOE, 2014, 2016) 및 2015년 토양측정망 전국 평균(MOE, 2015)과 농도비 0.3~1.5로 낮거나 유사한 수준을 보였다. Cd의 경우 토양오염기준의 50%로 기준을 초과하지 않았지만, 자연배경농도와 농도비 6.9로 높은 농도를 보였다.

중금속 항목 중 Zn, Cr Pb, Cu, Ni, Hg의 평균농도는 Jeong 등(2015)이 발표한 울산국가산업단지와 시화국가산업단지의 중금속 농도와 유사한 수준을 보였는데, 이는 울산과 시화국가산업단지의 입주업체 중 금속관련 업종의 비율이 각각 36%와 66%로 하남산업단지와 유사한 업종비율을 보이기 때문으로 판단된다(Korea Industrial Complex Cooperation, 2017).

Cd의 평균농도는 2.01 mg/kg으로 Jeong 등(2015)이 발표한 울산, 시화국가산업단지와 농도비 1.6~2.9로 다른 중금속 항목에 비해 높은 농도를 보였으며, 여수국가산업단지 중 비철금속공정 및 제강공정이 분포한 지역의 평균농도 2.0 mg/kg와 유사하였다. 또한, Golia 등(2008)은 금속가공업종이 주를 이루는 공업지역 중금속 중 Cd 농도가 가장 높다고 하였다. 이와 같이 Cd의 농도가 높게 나타난 것은 주물, 도장 등의 금속공정에서 발생하는 산업폐수의 영향으로 판단되나, 명확한 오염원 및 오염경로에 대해서

는 앞으로 추가 조사가 필요할 것으로 보인다.

F의 평균농도는 236 mg/kg으로 2015년 토양측정망(MOE, 2015) 평균농도 209 mg/kg과 유사한 농도를 보였으며, TPH는 평균농도 88 mg/kg으로 2015년 토양측정망 평균농도 158 mg/kg 보다 낮은 수준을 보였다.

본 연구에서 pH는 평균 6.3으로 2015년 전국 토양오염 실태조사 평균 pH인 6.6보다 약간 낮은 것으로 나타났다(MOE, 2015). Jeong(2003)의 연구에 따르면 pH 6~8인 토양환경에서 Cd은 침전 또는 토양으로의 흡착이 증가하며 As나 Pb 등도 착화합물을 형성하거나 토양층에 유착하여 이동성이 비교적 낮은 상태로 존재하여 토양 pH가 중금속의 존재형태 및 거동에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

### 3.2. 토지이용실태별 토양오염물질 농도 분포

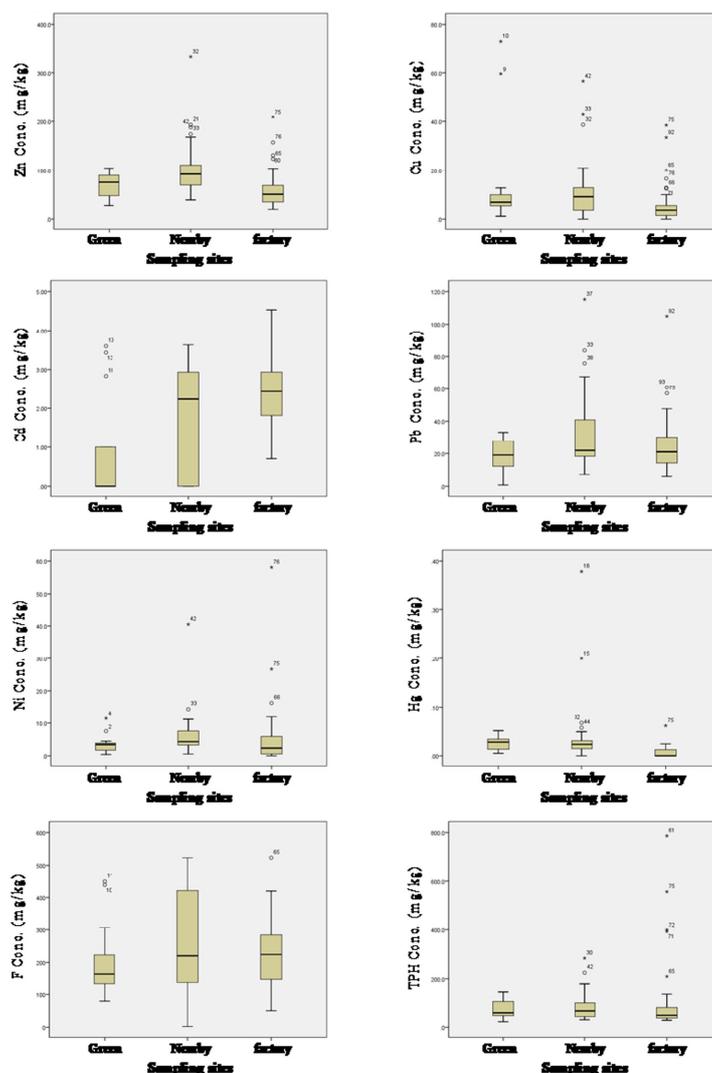
토지이용실태에 따라 토양오염물질의 분포특성에 차이를 보이는지 알아보기 위해 실시한 분산분석 결과를 Table 5에 나타내었다. Zn, Pb, Hg은 사업장주변지역의 농도가 사업장내부와 녹지지역보다 높았으며, Cu는 녹지지역이, Cd은 사업장내부의 농도가 높게 나타났다. 그 외 항목들은 p-value 값이 0.05 이상으로 조사지역에 따른 농도차이를 보이지 않았다. 조사지역별 토양오염물질 분포 diagram은 Fig. 2에 나타내었다.

Zn의 경우 사업장주변지역의 평균농도는 101.5 mg/kg으

**Table 5.** Concentration of soil contaminants by the study areas

(unit : mg/kg)

		Zn	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni	Hg	F	TPH	pH
Green area	Mean	68.7	15.5	0.96	10.4	19.4	3.7	0.02	205	73	6.5
	S.D	24.7	22.9	1.39	6.6	10.2	3	0.01	123	38	1
	Min	27.4	1.2	0	2.9	0.8	0.4	0.01	79	22	5.2
	Max	104.1	73.1	3.6	29.2	33.2	11.5	0.05	449	143	8.6
Nearby area	Mean	101.5	11.4	1.84	14.1	33.1	6.5	0.04	274	83	6.3
	S.D	56.2	12.4	1.29	7.5	24	6.7	0.07	157	57	0.9
	Min	38.8	0	0	3.5	7.2	0.5	0	2	31	4.6
	Max	334.3	56.6	3.63	38	115.2	40.5	0.38	523	284	8.3
Factory area	Mean	58.9	5.4	2.38	15	25	5	0.01	219	95	6.3
	S.D	36.7	7.4	0.85	29.9	16.2	8.9	0.01	99	140	1.2
	Min	19.6	0	0.7	0.7	6	0	0	50	28	4.6
	Max	209.3	38.5	4.53	210.3	104.9	58.1	0.06	523	787	8.6
F	10.182	4.781	9.444	0.220	3.201	0.766	6.114	2.536	0.295	0.375	
p-value	0.000	0.010	0.000	0.803	0.045	0.467	0.003	0.082	0.745	0.688	



**Fig. 2.** Distribution of soil contaminants by the study sites.

로 사업장내부와 녹지지역이 각각 58.9 mg/kg와 68.7 mg/kg으로 사업장주변의 농도가 조사지역 중 가장 높았으며 p-value 값이 0.000로 통계학적으로도 지역별 농도차이를 보이는 것으로 나타났다.

Pb은 사업장주변의 평균농도가 33.1 mg/kg로 사업장내부의 25.0 mg/kg와 녹지지역의 19.4 mg/kg보다 높았으며, Hg은 사업장주변이 0.04 mg/kg, 녹지지역이 0.02 mg/kg, 사업장내부가 0.01 mg/kg으로 사업장주변이 가장 높았다. p-value 값은 각각 0.045, 0.003으로 통계학적으로 지역별 농도차이를 확인하였다. 사업장주변의 Zn, Pb, Hg의 농도가 사업장내부와 녹지지역에 비해 높은 이유는 콘크리트로 포장되어 있는 사업장내부와 오염원인 사업장들과 거리가 있는 녹지지역에 비해 오염물질이 더 침적될 여지가 있는 것으로 판단된다.

Cu의 경우 녹지지역의 농도가 15.5 mg/kg으로 사업장내부와 사업장주변지역에 비해 가장 높았으며 p-value 값 또한 0.010으로 통계학적으로 지역별 농도차이를 확인하였다. 하지만 녹지지역 Cu의 농도가 자연함유량 평균농도 15.26 mg/kg(Yoon et al., 2009)과 유사한 수준으로 연구대상 토양의 Cu 함유량이 인위적 오염에 의한 것으로 판단하기 어렵다.

Cd은 사업장내부가 2.38 mg/kg로 사업장주변 1.84 mg/kg, 녹지지역 0.96 mg/kg에 비해 높았으며 통계학적 분석 결과 조사지역간 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 이와 같이 산업지역의 Cd이 높은 이유는 Cd이 금속의 부식을 막기 위해 산업 전반에 사용되고 있으며, 제련공장, 도료 공장, 분진 등에 의해 오염이 발생하는 것으로 알려져 있으며(Shin et al., 2012), 국립환경과학원에서 발표한 산업 폐수 업종별 수질오염물질 배출목록에서 철강제조업 폐수에서 Cd 등 중금속이 배출되지만 Cr<sup>6+</sup> 등 일부 중금속은 배출되지 않았다고 하였다(Kim et al., 2016). 또한 녹지

지역과 사업장주변지역의 경우 근로자들을 위한 벤치, 체육시설 등 휴게공간을 조성하면서 외부의 토양으로 복토를 하면서 혼합 및 희석에 의해 사업장내부보다 농도가 낮게 나타난 것으로 판단하였다.

3.3. 사업장내부 토양의 심도별 농도 분포

심도별로 시료를 채취한 사업장내부 지점에 대하여 깊이 따른 토양오염물질 농도의 차이를 알아보기 위해 분산분석을 하였으며, 결과는 Fig 3와 같다. pH는 표층(0~30 cm)이 6.7, 중층(30 cm~2 m)이 5.8, 심층(2 m~4 m)이 5.6로, 표층이 중층과 심층에 비해 높게 나타났다(p<0.05). 이는 콘크리트의 CaO, CaCO<sub>3</sub> 등 알칼리 성분이 표층의 토양산도에 영향을 미친것으로 판단된다(Oluyemi et al., 2008).

그 외 항목들은 p-value 값이 0.05 이상으로 통계학적으로 심도에 따른 농도 차이를 보이지 않았다. 이러한 이유는 하남산업단지 조성시 사업장 부지를 콘크리트로 포장하여서 이후 발생한 산업활동이 콘크리트 하부에 영향을 미치지 않은 것으로 볼 수 있다.

3.4. 토양오염지수(SPI)를 이용한 토양 오염도 평가

연구대상 지역의 Zn, Cu, Cd, As, Pb, Ni, Hg 등 중금속 7개 항목에 대하여 토양오염점수 및 토양오염지표를 구한 결과, Table 6와 같이 전체 100개 지점 중 54%가 1등급(양호), 43%가 2등급(오염우려), 3%가 3등급(오염우려)으로 비교적 양호한 것으로 나타났다.

사업장내부 52개 지점 중 30지점(58%)이 1등급, 20지점(38%)이 2등급, 2지점(4%)이 3등급으로 전반적으로 사업장내부 토양이 양호하지만 42%가 오염이 우려되는 수준을 보였다. 사업장주변은 35개 지점 중 14지점(40%)이 1등급, 20지점(57%)이 2등급, 1지점(3%)이 3등급으로 나

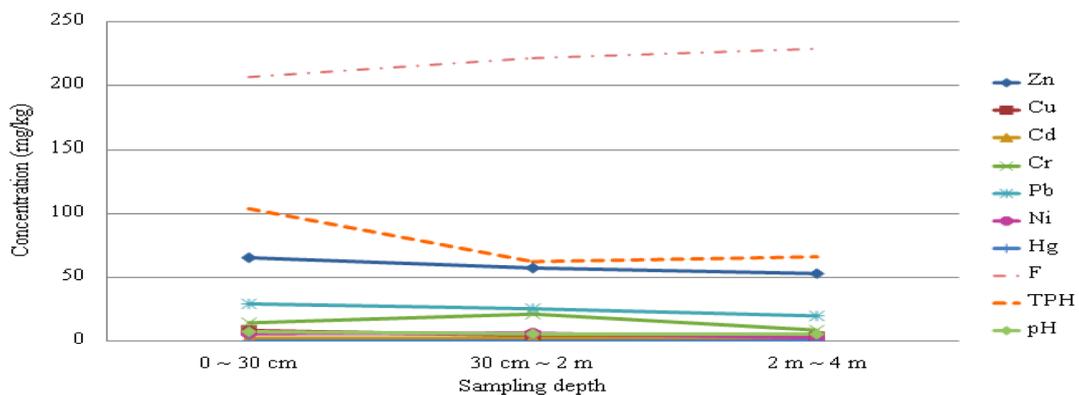


Fig. 3. Distribution of soil contaminants by sampling depth.

**Table 6.** Evaluation of Soil Contamination using Soil Pollution Index (SPI)

	Total	Soil Pollution Index			
		1 (< 100)	2 (100-200)	3 (200-300)	4 (300-400)
Total	100	54 (54%)	43 (43%)	3 (3%)	-
Factory	52	30 (58%)	20 (38%)	2 (4%)	-
Nearby	35	14 (40%)	20 (57%)	1 (3%)	-
Green	13	10 (77%)	3 (23%)	-	-

타났다. 녹지지역은 13개 지점 중 10지점(77%)이 1등급, 3지점(23%)이 2등급으로 토양오염정도가 매우 낮은 것으로 나타났다. 오염이 우려되는 지점(2, 3등급)이 사업장내부와 녹지지역은 각각 42%와 23%인데 반해 사업장주변은 60%로 사업장내부와 녹지지역에 비해 토양 중 중금속 오염도가 높은 수준을 보였다.

이와 같이 사업장주변의 중금속 오염도가 높은 원인은 사업장내부는 주로 콘크리트로 포장되어 있어 산업활동에 의해 중금속이 비산 및 확산되더라도 사업장내부의 토양에 침착 또는 흡착되기 어렵지만 사업장주변의 경우 산업활동이 일어나는 사업장과 인접해 있으면서 콘크리트 포장이 되어 있지 않아 비산되는 중금속이 토양에 흡착되었을 것으로 판단된다.

### 3.5. 부하지수(EF)를 이용한 토양 중금속 축적 평가

연구대상 토양의 중금속 오염정도를 좀 더 효과적으로 파악하기 위해 중금속 7항목(Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Hg, As)의 부하지수를 산출하여 지각평균대비 중금속 축적정도를 알아보았으며, 그 결과는 Table 8에 나타내었다.

Mason와 Moore(1982)는 부하지수가 1보다 높으면 해당 중금속이 지구적 평균농도에 비해 고농도로 존재하여 오염개연성이 다소 높다고 판단하였으며, Xinwei 등(2016)은 부하지수가 5이하는 크게 오염되지 않은 것으로 판단하였다. 축적정도를 분류하거나 판단하는 명확한 기준은 없으나, 본 연구에서는 Table 7과 같이 Han 등(2006)

**Table 7.** Enrichment Factors and its description

Enrichment Factor	Description
< 2	minimal enrichment
2 ≤ EF < 5	moderate enrichment
5 ≤ EF < 20	significant enrichment
20 ≤ EF < 40	very high enrichment
≥ 40	extremely high enrichment

의 5단계 분류방법을 사용하였다(Han et al. 2006; Kartal et al. 2006; Lu et al. 2010; 2014a and b).

Cu, Ni, Hg, Cr의 부하지수는 2 이하로 지각평균에 비해 중금속 축적정도가 낮은 것으로 나타났다. Zn과 Pb의 부하지수는 각각 9.2과 15.6으로 지각 평균값인 1보다 약 10배가량 높으며, 5단계 분류방법에 따라 상당한 축적을 보이는 것으로 나타났다. 사업장내부의 Cd 평균 부하지수는 88.5로 매우 높은 축적정도를 보이며 다른 중금속 항목에 비해 오염개연성이 높은 것으로 판단된다.

Jeong 등(2015)이 보고한 여수, 울산, 시화반월 산업단지 주변 토양의 부하지수는 Cu, Pb, Cr, Ni의 평균 부하지수가 2이하이며 Cd과 Zn이 각각 10.92~13.5와 21.04~33.0 범위로 나타나 중금속 오염이 비교적 높은 것으로 평가하였다.

본 연구대상의 Cd과 Pb의 부하지수가 Jeong 등(2015)이 보고한 세 산업단지에 비해 높게 나타난 이유는 석유 화학업종과 이와 관련된 운송업, 철근가공업 등이 주를 이

**Table 8.** Enrichment Factors(EF) in soil samples by the sampling area

	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Hg	Cr
Total	<b>9.2</b> (1.5-36.6)	<b>1.6</b> (0.0-19.1)	<b>72.4</b> (0.0-133.0)	<b>15.6</b> (0.3-71.3)	<b>0.5</b> (0.0-6.4)	<b>0.3</b> (0.0-6.2)	<b>0.5</b> (0.0-5.1)
Factory	<b>7.0</b> (1.5-17.8)	<b>0.9</b> (0.0-5.8)	<b>88.5</b> (42.0-132.7)	<b>14.6</b> (3.5-66.4)	<b>0.4</b> (0.0-3.5)	<b>0.1</b> (0.0-0.7)	<b>0.5</b> (0.0-5.1)
Nearby	<b>12.6</b> (4.7-36.6)	<b>2.2</b> (0.0-15.9)	<b>63.0</b> (0.0-133.0)	<b>18.2</b> (1.7-71.3)	<b>0.7</b> (0.1-6.4)	<b>0.6</b> (0.0-6.2)	<b>0.5</b> (0.1-1.6)
Green	<b>9.2</b> (2.5-17.6)	<b>3.3</b> (0.1-19.1)	<b>33.3</b> (0.0-127.5)	<b>12.2</b> (0.3-30.4)	<b>0.3</b> (0.0-0.8)	<b>0.4</b> (0.1-1.1)	<b>0.4</b> (0.1-0.8)

루는 세 산업단지에 비해 하남산업단지는 주물업, 비철금속처리업 등의 금속가공업종의 비율이 높으며, 산업공정에 사용되는 페인트 및 산업폐수가 Cd와 Pb의 축적에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

광주광역시 최대 규모의 일반산업단지인 하남산업단지 토양에 대해서 사업장내부, 사업장주변, 녹지지역의 49개소 100개 지점의 토양오염물질 분포를 파악하고, 토양오염지수(SPI)와 부하지수(EF)를 이용하여 토양 오염도를 평가하였다.

연구대상 토양의 Zn, Pb, Cu, Ni, Hg, Cr, F, TPH, 토양pH는 자연배경농도와 2015년 토양측정망 평균과 농도비 0.3~1.5로 낮거나 유사한 수준을 보였으며, Cd은 주물, 도장 등 금속가공업종의 영향으로 자연배경농도와 농도비 6.9로 높은 수준으로 나타났다.

토지이용실태별 토양오염물질의 농도 분포는 사업장주변의 Zn, Pb, Hg이 사업장내부와 녹지지역에 비해 1.3~5.5배 높아 콘크리트 포장되어 있는 사업장내부와 오염원 거리가 먼 녹지지역에 비해 중금속이 침착될 여지가 있는 것으로 판단된다. Cu는 녹지지역이 1.4~2.9배 높게 나왔지만 자연배경농도와 유사한 수준으로 인위적 오염으로 보기 어려우며, 사업장내부의 Cd이 1.3~2.5배 높게 나타난 것은 Cd이 금속부식 방지를 위해 산업 전반에 사용되고 있는 영향으로 판단되나 명확한 오염원 및 오염경로에 대해서는 앞으로 추가 조사가 필요할 것으로 보인다.

토양오염지수(SPI) 평가결과, 토양오염이 우려되는 지점(2, 3등급)이 사업장내부와 녹지지역은 각각 42%, 23%인데 반해 사업장주변은 60%로 중금속 오염도가 1.4~2.6배 높게 나타났다.

Cu, Ni, Hg, Cr의 부하지수(EF)는 2 이하로 중금속 축적정도가 낮았으나 Zn과 Pb의 부하지수는 각각 9.2과 15.6으로 지각 평균값인 1보다 약 10배 가량 높으며 Cd은 88.5로 매우 높은 축적정도를 보여 다른 중금속에 비해 오염개연성이 높은 것으로 판단된다.

본 연구결과 주물, 비철금속처리업 등으로 이루어진 하남산업단지의 경우 콘크리트로 포장된 사업장 내부보다는 초지로 이루어진 사업장 주변지역에서의 토양오염이 높게 나타나 사업장 주변지역의 정기적인 토양오염실태 모니터링이 필요하고, Cd의 경우는 사업장 내부에서 농도가 높아 배출단계에서부터 저감 노력이 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2017년 환경부 환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업과 광주광역시 보건환경연구원 연구역량강화 사업의 지원으로 수행하였습니다.

#### References

- Golia, E.E., Dimirkou, A., and Mitsios, I.K., 2008, Levels of heavy metals pollution in different types of soil of central Greece, *Bull Environ Contam Toxicol.*, **80**(3), 206-210.
- Ha, D.Y., Moon, S.H., and Lee, Y.J., 2004, Effect of pH, humic acid and metal concentration on adsorption of Pb, Hg, and Cd in the soil, *J Korea Soc Waste Manag.*, **21**(6), 535-544.
- Jeong, T.U., Cho, E.J., Jeong, J.E., Ji, H.S., Lee, K.S., Yoo, P.J., Kim, G.G., Choi, J.Y., Park, J.H., Kim, S.H., Hoe, J.S., and Seo, D.C., 2015, Soil contamination of heavy metals in national industrial complexes, Korea, *Korean J Environ Agric.*, **34**(2), 69-76.
- Jeong, S.W., 2003, Environmental impact assessment schemes considering fate and transport of soil contaminants, Korea, Environment Institute.
- Kim, J.H., Lee, J.H., Choi, I.W., Lee, Y.S., Lee, S.K., and Lee, S.H., 2016, Survey on the water pollutants list in industrial wastewater by industrial classification, National Institute of Environmental Research.
- Kim, R.Y., Ok, Y.S., Kim, Y.I., Sung, J.K., Kim, S.C., and Jang, B.C., 2010, Distributional characteristics and ecotoxicological assessment of chromium in Korean soils, *Korean J Soil Sci Fertil.*, **5**, 104-113.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1985, Index map of the published geological atlas of Korea.
- Kwon, H.J. et al., 2016, Comprehensive Evaluation on the Result of four years (2012~2015) Monitoring of Exposure to Environmental Pollutants and Health Effects among Residents Living near Industrial Complex.
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982, Principles of Geochemistry, John Wiley and Sons cop., New York, 352.
- Michael D. Kaminski & Sheldon Landsberger, 2000, Heavy Metals in Urban Soils of East St. Louis, IL, Part I: Total Concentration of Heavy Metals in Soils, *J Air Waste Manag Assoc.*, **50**(9), 1667-1679.
- Ministry of Environment, 2004, Industrial Soil Environmental Investigation Plan.
- Ministry of Environment, 2010~2016, Report of Soil Investigation.

Ministry of Environment, 2014~2016, Report of Soil Measurement Network.

Ministry of Environment, 2017, Soil Environment Conservation Act of Korea.

Oluyemi, E.A., Feuyit, G., Oyekunle, J.A.O., Ogunfowokan, A. O., 2008, Seasonal variations in heavy metal concentrations in soil and some selected crops at a landfill in Nigeria, *Afr J Environ Sci Tech.*, **2**(5), 89-96.

Shin, S.E., Kim, J.Y., and Oh, K.H., 2005, Geochemical behavior and pollution of soils in Gwangju city, *J Environ Impact Assess.*, **14**(6), 415-425.

Shin, E.C., Lee, M.S., and Park, J.J., 2012, A study on the numerical analysis for soil contamination prediction in Incheon Area, *J Korean Geosynth Soc.*, **11**(2), 21-30.

Turekian, K.K. and Wedpohl, K.H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust, *Geol Soc Am Bull.*, **72**(2), 175-192.

Yoon, J.K., Kim, D.H., Kim, T.S., Park, J.G., Chung, I.R., Kim, J.H., and Kim, H., 2009, Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea, *J Soil Groundw Environ.*, **14**(3), 32-39.