

# 국토지반정보시스템을 이용한 3차원 토양오염지도 구축 Construction of Three Dimensional Soil Cadmium Pollution Map Using Geotechnical Information DB System

황대영\* · 강인준\*\* · 장용구\*\*\* · 김수겸\*\*\*\*

Hwang, Dae Young · Kang, In Joon · Jang, Yong Gu · Kim, Soo Kyum

## 要 旨

토양오염은 인간의 활동에 의해 만들어진 물질로 인해 발생하고 있으며, 인간뿐만 아니라 모든 생물에게 피해를 주고, 정화비용이 크다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 정밀한 토양오염분석 활용을 위한 심도별 3차원 토양오염지도 구축을 제시하였다. 이를 위해 연구대상지인 부산광역시 동래구에서 기존 토양오염조사 지점의 최근린분석을 실시하였고, 0.72로 군집되는 경향을 알 수 있었으며, 이는 군집지역 이외에는 오염 값의 정확도가 보다 낮다. 이에 조사지점을 1km × 1km 격자의 중심을 조사할 것을 제시하였고 일정한 조사지점으로 균일한 정확도를 나타낼 수 있도록 하였다. 또한, 지표면 및 지하공간에서 토양오염 기준은 5단계로 나뉘었으며 지표면의 경우 토양 단위 무게 당 오염물질의 양을 IDW 보간법을 이용하여 지도를 구축을 하였다. 지하공간에서의 토양오염분석은 지표면의 오염, 지형을 통한 오염물질의 흐름과 국토지반정보시스템에서 504개의 시추정보로 투수계수, 지하수위를 영향인자로 선정하였으며, 영향인자의 특성을 종합점수로 나눠 0~20점으로 산정하였다. 토층에 특성을 고려한 지표면-지하공간의 심도별 3차원 토양오염지도 구축이 가능하였고, 이후 토양오염의 지반 침투 시 전체적인 침투 분석이 가능할 것으로 판단되었다. 또한, 심도별 영향분석과 지하수 오염에 대한 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 국토지반정보시스템, 지하공간, 토양오염, 토양오염지도

## Abstract

This study presented the build-up of three-dimensional soil pollution map for precise analysis. To do this, survey on the existing pollutant region on Dongnae-gu, Busan that is the study subject, showed that it tended to produce 0.72 clusters. So, this study suggested to investigate center of 1km × 1km grid and, as the results of comparing the pollution map that input pollution figure values based on the actually investigation point showed precise results. And, it divided the standard of pollution into 5 levels in surface and underground space and the map was built up using IDW interpolation against the amount of polluted substance. The pollution of ground surface, flow of polluted substance, coefficient of permeability and ground water level that are 504 geotechnical informations were selected as the influential parameters in pollution analysis of underground space, and it calculated that to 0~20 points by dividing the characteristics. It enables the build-up of pollution map of ground surface-underground with depth that considers the characteristics of soil layers and it is considered that it is possible to analyze the general infiltration. And, it was considered that it enables more accurate forecast about influential analysis per depth and pollution of underground water.

**Keywords :** Geotechnical Information DB System, Undergroud Space, Soil Pollution, Soil Pollution Map

Received: 2016.07.12, revised: 2016.08.25, accepted: 2016.10.26

\* 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Member, Master Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, [hwang@naver.com](mailto:hwang@naver.com))

\*\* 교신저자 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수(Corresponding Author, Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, [ijkang@pusan.ac.kr](mailto:ijkang@pusan.ac.kr))

\*\*\* 한국건설기술연구원 ICT융합연구소 연구위원(Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, [wkddydrn@kict.re.kr](mailto:wkddydrn@kict.re.kr))

\*\*\*\* 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사수료(Ph. D, Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, [power7750@hanmail.net](mailto:power7750@hanmail.net))

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

토양은 생명현상의 근원이며, 분야 별로 다양하게 정의를 내릴 수 있는 인간과 생물의 터전이다. 그러나 토양은 인간의 활동에 의해 만들어진 물질로 인해 오염이 되어 생물들이 살아가는데 있어 물리적 피해를 주고 있으며, 토양 정화를 위한 비용이 크다는 문제점을 가지고 있다. 토양오염은 Fig. 1과 같이 2010년 이후로 큰 수치를 나타내고 있어 주의를 기울일 필요가 있다. 최근 인천광역시 문학산 일대 유류 오염으로 인한 토양오염을 파악하여 벤젠, 톨루엔, 토양가스가 기준치 이상으로 나타나 심각성을 보이고 있는 것으로 확인되었다. 또한, 강릉 포스코 공장에서 폐놀 유출 사고가 발생하여 인근 주민에게서 폐놀과 비소가 기준치 이상 검출되는 사고도 있었다. 이러한 문제로 국내에서는 토양오염의 예방과 관리를 위해 다음과 같이 많은 노력을 기울이고 있다. 1987년부터 토양측정망을 전국적으로 522개 지점을 설치하여 현재는 약 1,500개의 토양측정망을 운영하고 있으며, 매년 토양오염실태조사를 하고 있다. 그러나 토양오염 가능성이 있는 공장단지, 광산지역 등 특정조사지점의 현황만을 파악하고 있어 우리나라의 전체적인 토양 오염 지도 구축이 어려운 실정이다. 그렇기 때문에 전체적인 토양오염을 파악한 지도구축을 위해서는 지표면뿐 아니라 지하공간에서의 오염 분석도 필요하며, 토양오염 조사방법의 문제점을 파악하고 해결해 나가야한다. 또한, 지하공간오염에 영향을 미치는 각 각의 요소를 고려하기 위해, 심도별 3차원 토양오염지도구축이 필요하다.

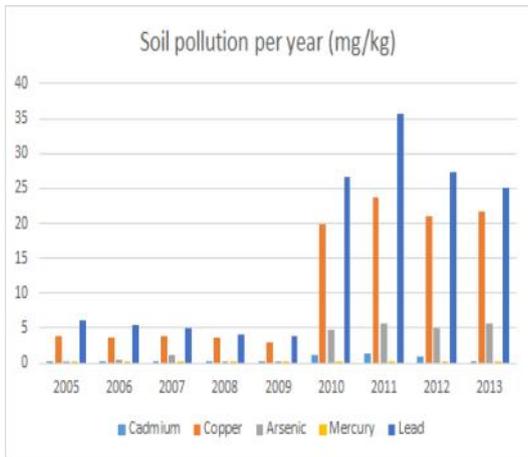


Figure 1. Soil pollution per year

1.2 연구동향

토양오염에 대한 국내의 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

Lee and Choi(2014)는 국내연구 동향의 경우 휴대용 X선 형광 분석기와 GIS를 이용하여 부산 폐 광산 지역의 구리와 납에 대한 토양오염지도를 작성 하였으며, 폐 광산 주변빗물의 흐름을 파악하고 조사를 하였고, Jeong et al.(2014)은 GIS를 이용하여 강원도 지역의 오염을 오염물질별로 분포 및 분석을 하고 문제점을 지적, Park(2010)은 대전지역의 중금속 원소들의 분산양산과 오염특성을 파악하여 시료를 분석하고 GIS로 활용 가능한 공간데이터베이스를 구축, Hyun(2011)은제주지역 토양 환경을 고려한 토양 및 지하수 오염 특성을 고려한 연구, Jun(2011)은대전지역 대기 및 토양의 오염특성을 파악하여 오염도 현황과 오염 배출원의 상관성을 알기위한 특성 분석, Jeong et al.(2011)은국내 실정에 맞는 토양-지하수오염원 관리우선순위 선정을 위한 개략평가기법 구축하여 적합성을 검증하고 국가적 차원의 인벤토리 구축을 제안을 하였다.

국내에서의 기술동향을 살펴보면 서울특별시의 비오름이 있다. 비오름은 서울특별시의 토지이용현황도, 불투수토양포장도, 현존식생도, 유형평가도 등으로 토양 이용과 생태적인 특성을 분석한 지도이다. 비오름 유형 평가도에서는 5등급으로 나누어, 절대적으로 보전이 필요한 비오름유형에서 부분적 개선이 필요한 비오름유형으로 분류하고 있다. 그리고 개별 비오름 평가도에서는 3등급으로 나누어, 특별히 보호가치가 있는 비오름에서 한정적인 가치를 가지는 비오름으로 분류하고 있다. 또한, 흙토람에서는 토양환경지도를 통해 작물재배 적지(63가지 작물), 농경지 화학성(7가지 화학성), 토양 특성을 GIS 지도로 서비스하고 있다. 그리고 환경부에서 제공하는 국가환경지도시스템은 자연환경, 물환경, 기후대기, 생활환경의 주제도를 제공하고 있으며 토양 지하수 섹션은 아직 주제도를 구축하지 않은 상태이다. 토양지하수종합정보시스템에서는 토양측정망, 토양실태조사, 국가지하수수질측정망, 지역지하수수질측정망 등을 서비스 하고 있으며 2006년부터 체계적인 관리를 하고 있다.

국외의 연구동향을 살펴보면 Guagliardi et al.(2015)는 이탈리아 남부지역의 도시 근교 납에 대한 오염 지도 작성을 하였으며, Srivastava et al.(2015)는 비소 오염의 기준을 설정한 후 논과 평원의 비소 오염의 지도 작성을 하였다. 또한, Prado and Novo(2015)는 유역에서의 오염 가능성을 GIS의 다중적인 분석을 통하여 브라질 상파울루 지역을 모델링, Bozhi et al.(2015)는 토

양광 물이 광산의 망간의 오염에 대하여 상관계수 및 오염의 발생원인을 찾고 분석한 연구를 수행하였다.

국내의 연구동향을 살펴보면 토양오염에 관련한 연구가 활발히 진행 중임을 확인 할 수 있었으나, 오염지도 작성에 대한 연구는 미미하였으며, 대부분 오염특성을 파악한 배출원의 상관성에 관한 연구가 주를 이뤘다. 또한, 토양의 적절한 활용을 위한 주제도가 서비스 중임을 확인 할 수 있었다. 그러나 이러한 시스템은 토양오염에 대한 기존의 정책이나 활용성 측면에서 미비하였으며, 국내에서 조사한 토양오염은 특정 지점에 대한 오염만을 나타내고 있어, 지표면과 지하공간을 통합한 3차원 토양오염지도 구축에 관한 연구의 필요성을 인식할 수 있었다.

### 2. 3차원 토양오염도구축을 위한 이론적 고찰

#### 2.1 오염물질 종류 및 특징

국내 『토양환경보전법』에서 건강 및 환경상의 위해를 줄 수 있는 물질로 21가지의 항목을 지정하여 관리 중이다. 지목별로 오염기준을 세 가지로 구분하며, 1지역은 전, 답, 과수원, 목장용지, 광천지, 대(주거의 용도), 학교용지, 구거(溝渠), 양어장, 공원, 사적지, 묘지인 지역과 어린이 놀이시설(실외 설치)부지이며, 2지역은 임야, 염전, 대(1지역 외), 창고용지, 하천, 유지, 수도용지, 체육용지, 유원지, 종교용지 및 잡종지 그리고 3지역은 공장용지, 주차장, 주유소용지, 도로, 철도용지, 제방, 잡종지(2지역 외)이다. Table 1에서는 『토양오염 우려기준』(토양환경보전법 제1조의5 관련)을, Table 2에서는 『토양오염대책기준』(토양환경보전법 제20조 관련)을 보여준다. 우려기준과 대책기준 분석결과 1지역에서 3지역으로 갈수록 오염수치 기준이 완화됨을 확인 할 수 있었다.

카드뮴에 노출되면 골연화증, 골격장애, 심혈관 질환 등이 심한 통증과 함께 나타난다. 일본 가미오카 광산에서 아연을 제련할 때 카드뮴을 제거하지 않고 버리는 사건이 발생하여 많은 사람들이 카드뮴에 중독되어 100여 명이 사망에 이르렀다. 또한, 수은에 노출되면 신경마비, 언어장애, 평형감각상실 등을 일으키며, 신일본 질소주식회사에서 무기 수은이 함유된 폐수를 바다에 무단 방류하여 2266명이 수은 중독이 되고 938명이 사망하였다. 크롬의 경우는 도금공장에서 주로 발생하며, 피부 궤양, 비중격천공 등을 일으킨다. 국내 도금업체 노동자 627명을 대상으로 조사한 바에 따르면 55.5%가 크롬중독 증상을 보였으며, 이 중 31.7%는 코속에 구멍이 뚫리는 증세를 보였다. 그리고, 납은 부식

Table 1. Anxiety criterion of soil pollution

(unit : mg/kg)

Matter	1 Area	2 Area	3 Area
Cadmium	4	10	60
Copper	150	500	2,000
Arsenic	25	50	200
Mercury	4	10	20
Lead	200	400	700
Cr <sup>6+</sup>	5	15	40
Zinc	300	600	2,000
Nickel	100	200	500
Fluorine	400	400	800
organophosphorus compound	10	10	30
PCB	1	4	12
Cyanogen	2	2	120
Phenol	4	4	20
Benzene	1	1	3
Toluene	20	20	60
Ethylbenzene	50	50	340
Xylene	15	15	45
TPH	500	800	2,000
TCE	8	8	40
TCE	4	4	25
Benzo(a)pyrene	0.7	2	7

Table 2. Measure criterion of soil pollution

(unit : mg/kg)

Matter	1 Area	2 Area	3 Area
Cadmium	12	30	180
Copper	450	1,500	6,000
Arsenic	75	150	600
Mercury	12	30	60
Lead	600	1,200	2,100
Cr <sup>6+</sup>	15	45	120
Zinc	900	1,800	5,000
Nickel	300	600	1,500
Fluorine	800	800	2,000
organophosphorus compound	-	-	-
PCB	3	12	36
Cyanogen	5	5	300
Phenol	10	10	50
Benzene	3	3	9
Toluene	60	60	180
Ethylbenzene	150	150	1,020
Xylene	45	45	135
TPH	2,000	2,400	6,000
TCE	24	24	120
TCE	12	12	75
Benzo(a)pyrene	2	6	21

에 강하고 가공이 쉬워 많이 사용되는 중금속으로 각종 뇌신경 질환, 관절통, 빈혈 등의 증상을 일으킨다.

### 3. 3차원 토양오염지도 구축

#### 3.1 연구범위 및 방법

본 연구에서는 부산광역시 동래구 일대를 연구대상지로 선정하였으며 지표면에서의 오염지도 작성은 환경부에서 제공한 2012년 토양오염실태조사DB에서 조사된 동래구 11지점, 동래구 이외의 60지점을 이용하였다. 또한 오염지도 작성을 위해 GIS프로그램인 ArcGIS10.1를 이용하였으며, 지번주소로 관리되는 토양오염조사지점을 좌표로 지오코딩(geocoding)하기 위해 구글 맵을 기반으로 작동하는 x-ray map을 이용하였다. Table 3는 토양오염실태조사의 동래구 11지점을 지오코딩한 결과이며, GRS80좌표계 TM동부원점의 좌표 결과이다.

지하공간에 대한 토양오염지도 구축을 위해서 국토지반정보 포털시스템에서 제공하는 정보 중 3차원 토양오염지도구축에서 활용 가능한 인자를 선별하고, 지표면 영향 인자를 함께 고려하였다. 이후 5가지 범주를 나누어 지하공간의 오염을 등급별로 평가하였다.

또한, 지도구축을 위해서 현재 조사된 지점과 새로운 조사방식을 제시한 후 비교평가하였다.

#### 3.2 토양오염지도 작성계획

현재 토양오염 조사지점은 지번주소로 명시되어 있다. 그렇기 때문에 필지의 크기에 따라 위치오차가 다르며, 이로 인해 토양오염지도의 정확도와 신뢰도가 낮아 질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 오염조사지역을 지번주소와 좌표를 동시에 명시해야한다. 지번주소를 기반으로 좌표를 획득하는 방법은 여러 가

지가 있으나, 시간적, 비용적 측면에서 가장 효율적인 방법인 GPS활용이 필요하다고 판단된다.

『토양환경보전법』(토양환경보전법 제1조의5, 제20조 관련)에 따른 지목별 토양오염은 21가지 오염물질에 대한 우려기준 3단계와 대책기준 3단계로 나누어지고 있다. 우려기준의 경우 생육에 지장을 줄 우려가 있는 오염수치를 기준으로 하며 대책기준은 생육에 지장을 주어 토양오염에 대한 대책이 필요하다고 판단하는 기준이다. 본 연구에서는 지목을 고려치 않고 5단계로 나타내었다. 기존의 토양오염조사는 지목별 기준치 초과 여부가 주된 조사 내용이었지만, 토양오염지도 구축은 전체적인 지역의 오염현황을 파악하여 제공을 하는 것으로 1등급 양호, 2등급 보통, 3등급 관리, 4등급 우려, 5등급 대책으로 나누었다. 5등급의 기준은 기존 지목별 토양오염 1지역의 대책기준을 이용하였고, 4등급의 기준은 기존 지목별 토양오염 1지역의 우려기준의 기준치를 선정하였다. 또한, 기준치를 초과하지 않는 지역은 1~3등급으로 분류하여 오염기준 미만지역으로 선정하였다. 특히, 3등급 지역은 우려기준초과 등급은 아니지만 우려기준에 근접한 오염수치로 지속적인 관리가 필요한 지역으로 나타내었으며, 오염기준 미만지역의 등급 세분화는 비 오염지역에 대한 관리에 활용이 가능할 것으로 생각된다.

현재 국내에는 약 1,500개의 토양측정망이 운영되고 있으며, 토양오염이 우려되는 지역에 대하여 토양오염 실태조사를 하고 있으나, 오염지도의 작성에 있어 데이터가 부족한 실정이다. 반면에 유럽, 중국, 일본 등, 국외의 경우 오염지도나 화학지도 작성을 위해 일정 크기의 격자를 이용하여 격자마다 토양조사를 실시하고 있으며, 조사지점의 위치가 균일한 밀도로 형성된다는 특징이 있었다. 본 연구에서도 이와 같이 격자로 지역을 나눈 뒤 토양오염을 조사하는 방법을 이용하여, 한 지

Table 3. Geocoding point of investigation

	Address	Coordinate	
		X	Y
1	136-13, Myeongjang 1-dong, Dongnae-gu, Busan	189729.59051	209532.39935
2	506-18, Myeongjang 2-dong, Dongnae-gu, Busan	190341.64917	209154.51167
3	506-3, Myeongjang 2-dong, Dongnae-gu, Busan	190687.96315	209125.29214
4	532, Myeongjang 2-dong, Dongnae-gu, Busan	190756.93963	208661.01714
5	532, Myeongjang 2-dong, Dongnae-gu, Busan	190756.93963	208661.01714
6	532, Myeongjang 2-dong, Dongnae-gu, Busan	190756.93963	208661.01714
7	16-7, Sajik 1-dong, Dongnae-gu, Busan	189304.79499	205385.52510
8	3-12, Sajik-dong, Dongnae-gu, Busan	189295.39368	207169.19653
9	3-12, Sajik-dong, Dongnae-gu, Busan	189295.39368	207169.19653
10	3-12, Sajik-dong, Dongnae-gu, Busan	189295.39368	207169.19653
11	15-7, Suan-dong, Dongnae-gu, Busan	188636.78620	208273.56686

Table 4. Cadmium pollution classified by use district (unit : mg/kg)

rocaation	quantity
main road, railway, factory, parking lot, tunnel	4
sewage disposal plant, warehouse	3
lane, marketplace, park	2
residential district, school	1
mountain	0.5

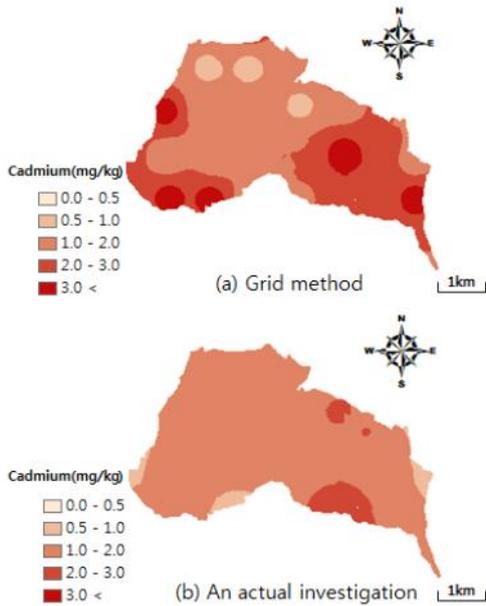


Figure 2. Pollution map using IDW interpolation

점으로 편중된 데이터를 방지할 수 있었다. 또한, 격자의 면적이 작을수록 조사지점 밀도가 높아져 정확한 토양오염지도 제작이 가능하다. 격자의 크기는 국외에서 토양환경지도제작시 영국에서 이용한 비도심지역을 조사방법과 중국의 표토 토양 및 도시 지역에서 조사방법인 1km<sup>2</sup> 격자를 근거로 하여 국내에서 적절한 격자범위라 판단하였다. 이에 1km × 1km의 격자를 설정하였고, 1km × 1km내의 격자의 중심에 해당하는 곳에는 직접 토양오염을 조사할 수 없어 임의로 도로, 공장, 주거지역, 어린이시설 등을 분류하여 이에 상응하는 토양오염수치를 입력하였다. Table 4는 격자 중심의 위치하는 지역의 용도를 분류하여 카드뮴에 대한 오염수치를 나타내었다.

Fig. 2는 IDW(inverse distance weighting)보간법으로 분석한 오염지도로 Fig. 2(a)는 1km × 1km의 격자

의 중심에 토양오염조사를 할 경우이며 오염수치는 조사하지 않고 무작위로 하였으며, 위치에 오염 수치는 Table 4를 이용하여 제작한 지도이다. 또한, Fig. 2(b)는 환경부에서 제공하는 2012년 토양실태조사 일반현황 정보로 분석한 경우이며, 위치정보는 주소로 되어 있어 지오코딩을 통해 위치정보를 입력하였다. 그 결과 Fig. 2(a)에서 17개의 격자 중심이 동래구에 포함되었으며, 기존 조사된 11지점보다 지점이 많았다. 또한 기존 조사된 Fig. 2(b)는 최근린 분석(average nearest neighbor)을 한 결과 0.72로 나타났다. 최근린 분석결과 값이 1이하인 경우 군집되는 경향이 나타난다고 설명할 수 있으며, 실제로, 11지점의 위치가 가까운 장소거나 주변의 위치에 군집되어 있었으므로 조사지점과 먼 지역의 경우는 오염에 대한 정보신뢰성이 떨어진다. Fig. 2(a)와 같이 격자방법을 이용하면 균일한 신뢰성을 가질 수 있으며, 정밀한 오염지도 제작이 가능하다. 또한 격자방법의 중심점 이 외에 추가조사가 필요한 오염우려지점을 별도로 지정하여 조사하는 것이 데이터의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

지하공간의 경우 지반투수성, 지하수위, 지표면의 오염도, 물의 흐름을 고려하여 각 인자마다 점수를 부여하고 점수별로 지하공간토양의 오염위험성 및 예측 주제도 작성을 실시하였다. 투수성, 지하수위의 경우 국토지반정보 포털시스템에서 제공하는 504지점의 시추조사 자료를 활용하였다. 투수계수의 경우 10m간격으로 각 심도별로 투수층을 나누어 IDW 보간법으로 분석하였고, 지하수위는 각 지점의 심도를 입력한 다음 IDW 보간법으로 분석하여 전체적인 지하수위의 높이를 계산하였다. 각 인자의 종류는 4가지로 분류하였으며, 오염물의 경우 강우에 의해 지반에 흡수되거나, 흐르는 점 등을 고려하였다. 투수의 특성에 따라 지반 내 오염물의 이동이 다르게 나타나는데 이를 가장 잘 나타낼 수 있는 것은 투수계수이며, 오염물의 지상에서 이동은 수계분석인 flow direction, flow accumulation을 통해 오염물의 이동을 유추하였다. 또한, 지하에서의 오염은 지표면 층에서의 오염정도가 중요하며, 지하수가 존재하는 층의 지반에 따라 오염의 확산정도가 다르다.

지반 투수층의 경우 불투수층을 포함한 모래, 실트, 점토질 등을 고려한 지반특성에 의한 투수계수로 0~6 점의 점수를 부여하였다. 지반 특성에 따른 투수계수는 Table 5에서 보여준다.

지하수는 오염될 경우 지하수의 흐름에 따라 오염물질이 도달되기 쉬운 지하수는 오염위험이 크다. 이에 지하수위의 위치를 압반층, 점토층, 실트층, 모래층으로

Table 5. Score of pollution factors in underground space

Hydraulic conductivity( $10^{-4}$ cm/sec) impermeability layer		Underground water level		Soil Pollution		Flow Accumulation	
0.00001~0.001	0	Rock	0	Grade 1	0	Grade 1	0
0.01~1	1	Clay	2	Grade 2	1	Grade 2	1
1~20	2			Grade 3	2	Grade 3	2
20~150	3	Silt	4	Grade 4	3	Grade 4	3
150~1000	4			Grade 5	4	Grade 5	4
1000~	5	Sand	6	Grade 5	4	Grade 5	4
	6						

분류하여 각 층마다 0~6점의 점수를 부여하였다.

또한 지표면에서의 오염도가 지하에 미치는 영향을 고려하여 0~4점의 점수를 부여하였으며, 위치의 분포와 오염에 대한 속성 값을 IDW보간법을 이용하여 5등급으로 나타내었다.

마지막으로, 강수 시 지상에서 오염물질의 흐름을 파악하였다. ArcGIS10.1을 이용하여 물의 흐름 방향과 물이 모이는 지점을 분석하였다. 분류는 30가지 범위로 나누어 상위 1~6등급은 4점, 7~12등급은 3점, 13~18등급은 2점, 19~24등급은 1점, 25~30등급은 0점으로 분류하였다.

각 4가지 요인을 통합하면 0~20점으로 지하공간의 오염 위험성 및 예측현황을 점수로 나타낼 수 있었으며, 높은 점수일수록 오염 위험성이 큰 것을 나타낸다. Table 5는 지하공간오염요인들의 점수를 보여준다.

3.3 3차원오염지도 구축

지표면에서에서 오염분석은 IDW 보간법을 이용하였다. 이는 오염물질 조사지점의 속성 값에 거리에 따라 가중치를 주기 때문에 단순히 오염물질거리 상관성이 없으므로 오염지도를 작성하는데 유리하다. 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 오염지도구축을 할 수 있었다.

첫째, 각 물질에 대한 단계별 수치를 지정하고 2차원 지도로 표현하였다. Fig. 3는 동래구와 동래구 주변 일대의 71개의 조사지점을 보간 분석한 카드뮴 오염 지표-지도이다. 각 물질별로 5가지 지역의 오염기준을 설정하였으며, 오염정도는 색의 진하기로 분류하여 지도에 표현하였다.

둘째, 3차원오염지도는 지표면에서 토양오염지도를 통한 심도에 따른 지반층, 투수계수, 오염물질의 흐름을 고려하여 구축이 가능하였으며, Fig. 4는 심도별로 점수를 나타낸 오염지도를 보여준다. 지표면에서의 오염은 토양 단위 무게 당 오염물질 양을 나타냈지만, 지하에서는 직접적으로 오염물질의 측정을 하기는 경제적이므로 오염 위험성 및 예측현황을 점수로 구분하여 나타냈다.

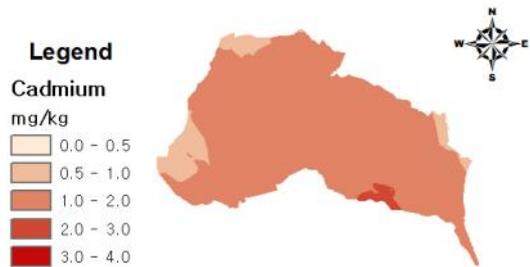


Figure 3. Soil pollution map of cadmium

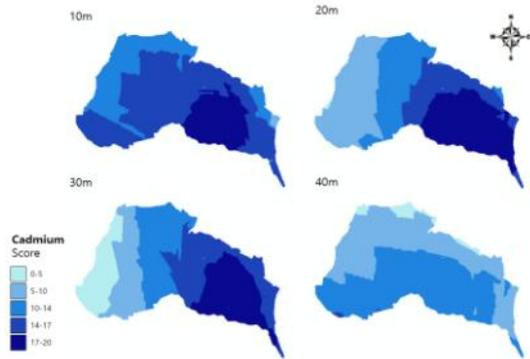


Figure 4. Soil pollution map of the depth

3.4 토양오염지도 비교평가

본 절에서는 심도별 3차원 토양오염지도의 활용성검토를 실시하였으며, 다음과 같은 활용성을 제시하였다.

기존의 토양오염지도는 일반적으로 지표면의 오염을 나타내었으며, 지하공간에서의 오염정도를 다루지 않았다. 그러나, 국토지반정보시스템을 통해 시추자료를 이용하여 각 심도별 투수계수와 지하수위를 보간법으로 분석하였고, 토양오염정도와 지상에서의 수계분석을 통해 지하공간에서의 오염지도를 제작할 수 있었다. 기존의 토양오염지도와 달리 지하공간 내의 오염위험성을 보다 정확하게 예측이 가능한 근거자료가 되며, 토양오염에 취약한 지하수관리와 식생관리 등에 활용이 가능하다.

#### 4. 결 론

본 연구는 정밀 토양오염분석을 위한 3차원 토양오염지도의 구축방안을 제시하고 필요성을 강조하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 기존의 토양오염조사 지점은 최근근분석결과 0.72로 군집된 경향이 나타났으며, 이것은 군집 지역 이외의 지역에서는 정확한 토양오염량을 나타내기 어렵다. 이에 토양오염 조사지점을 1km × 1km격자로 나눠 조사 하는 방법을 제시하였고, 정확 정밀한 토양오염지도구축을 할 수 있었다. 또한, 격자 내 중심을 조사 하는 것 이외에 추가적으로 오염이 의심되는 지역을 조사하여 보다 정확한 토양오염지도구축이 가능하다.

둘째, 토양오염지도는 일반적으로 지표면 상의 오염도를 나타냈으나, 국토지반정보시스템의 시추조사 자료를 이용하여 전체적인 지하공간의 토양오염분석이 가능하며 심도별 오염현황을 예측할 수 있었다.

셋째, 국내에서 조사하는 지표면-지하 토양오염등급을 5단계로 분류하여 지표면오염등급과 지하공간오염등급을 나타낼 것을 제시하였고, 토양오염대책기준 및 우려기준의 이하 지역에서도 3단계로 나누어 비 오염 지역을 체계적으로 관리가 가능할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 지하공간오염에 영향을 미치는 영향인자 기준의 추가가 필요하며, 정확하고 정밀한 토양오염지도 제작에 대한 연구가 지속적으로 필요하다 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2006185)의 지원으로 연구되었습니다.

#### References

1. Bozhi, R., Qian, W., Yangbo, C., Wenjie, D. and Xie, Z., 2015, Analysis of the metals in soil-water interface in a manganese mine, *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, Vol. 2015, pp. 1-9.
2. Guaqliardi, I., Cicchella, D., De Rosa, R. and Buttafuoco, G., 2015, Assessment of lead pollution in topsoils of a southern Italy area: Analysis of urban and peri-urban environment, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 33, pp. 179-187.
3. Hyun, G. T., 2011, Studies on the contamination

properties of soil and groudwater in a densely populated livestock area in Jeju island, Doctoral thesis, Jeju National University, pp. 1-111.

4. Jeong, S. W., Kim, Y. J., Kim, J. H. and Hwang, S. I., 2011, Development of preliminary assessment methodology for priority listing of soil and groundwater contamination sources, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 16, No. 6, pp. 106-112.
5. Jeong, W. G., Kim, K. W., Huh, B. N., Kim, S. R., Choi, G. J., Bae, S. H. and Kim, S. H., 2014, Analysis of soil contamination survey result using GIS for Gangwon-Do, *Institute of Health & Environment*, Vol. 25, pp. 179-192.
6. Jun, Y. J., 2011, Study on characterization of air and soil pollution in Daejeon area using GIS, Master's thesis, Hanbat National University, pp. 1-44.
7. Lee, H. G. and Choi, Y. S., 2014, A study on the soil contamination(maps) using the handheld XRF and GIS in abandoned mining areas, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 17, No. 3, pp. 195-206.
8. Park, S. S., 2010, Analysis on heavy metal contamination in soils of the Daejeon area using GIS, Master's thesis, Hanbat National University, pp. 1-65.
9. Prado, R. B. and Novo, E. M. L. M., 2015, Modeling pollution potential input from the drainage basin into Barra Bonita reservoir, São Paulo - Brazil, *Brazilian Journal of Biology*, Vol. 75, No. 2, pp. 314-323.
10. Srivastava, P. K., Singh, M., Gupta, M., Singh, N., Kharwar, R. N., Tripathi, R. D. and Nautiyal, C. S., 2015, Mapping of arsenic pollution with reference to paddy cultivation in the middle Indo-Gangetic Plains, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 187, No. 4, pp. 187-198.