환경방재

구리로 오염된 세가지 토양에 대한 하이퍼스펙트럴 센서의 적용 가능성 평가

Evaluation of Applicability of Hyperspectral Sensor to Three Copper Contaminated Soils

강성주* · 이금영** · 전의익*** · 신인환**** · 장민***** · 권오섭*****

Kang, SeongJoo*, Lee, Keum-Young**, Jeon, Eui-Ik***, Shin, In Hwan****, Jang, Min*****,
and Kwon, Oh-Seob*****

Abstract

In this study, we evaluated the possibility of detecting heavy metal contaminated soils in three soil types using a hyperspectral sensor. For this purpose, we constructed three contamination scenarios based on measured concentrations using artificially contaminated soil and contaminated soil mixed with copper with known concentrations and two or more heavy metals. Then, we tried to verify the possibility of detecting copper contaminated soil based on copper-sensitive wavelength using the SAM algorithm. As a result, soil spiked with Copper in artificially contaminated soils was detected first. Field contaminated soil 1 was the first detected with the highest concentration of copper in the scenario, and it was confirmed that the soil was detected sequentially from high to low concentrations. However, field contaminated soil 2 was not detected in the case of copper contaminated with the highest concentration owing to the high organic matter concentration. In all the concentration gradient scenarios except this, it was confirmed that the concentration was detected in order of concentration.

Key words : Heavy metal, Contamination Scenario, Hyperspectral, Soil Texture, Spectral Angle Mapper

요 지

본 연구에서는 하이퍼스펙트럴 센서를 활용한 중금속오염토양 탐지에 있어서 세가지 종류의 토양에서의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 실측하여 농도를 알고 있는 구리와 두가지 이상의 중금속으로 혼합된 인공오염토양 및 철도 부지의 현장오염토를 이용하여 실측 농도 기반의 세가지 오염 시나리오를 구축하였다. 이후 구리의 특정파장대역을 기반으로 분광각맵퍼법(SAM) 알고리즘을 이용하여 구리로 오염된 토양의 분류 가능 여부를 확인하였다. 그 결과 인공오염토에서는 목표물인 순수 Cu로 스팅킹 된 토양을 가장 먼저 탐지하였다. 현장 오염토 1에서는 시나리오상 가장 고농도로 오염된 토양을 가장 먼저 탐지하였으며 점차 낮은 농도 순으로 탐지하는 것을 확인할 수 있었다. 현장 오염토 2에서는 높은 유기물농도로 인해 가장 고농도로 오염된 경우에는 탐지가 되지 않았으나 이를 제외한 나머지 농도구배에서는 고농도에서 저농도 순으로 탐지되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 중금속, 오염시나리오, 하이퍼스펙트럴, 토성, 분광각맵퍼법

*정회원, 아세아항공 부설연구소 선임연구원(E-mail: ksjdol@gmail.com)

Member, Research Engineer, R&D Institute, Asia Aero Survey

**아세아항공 부설연구소 책임연구원

Senior Research Engineer, R&D Institute, Asia Aero Survey

***아세아항공 부설연구소 전임연구원

Associate Research Engineer, R&D Institute, Asia Aero Survey

****교신저자, 정회원, 광주과학기술원, 지구환경공학부 연구교수(Tel: +82-62-715-3720, Fax: +82-62-715-7225, Email: shininhwan@naver.com)

Corresponding Author, Member, Research Professor, School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of science and Technology

*****광운대학교 환경공학과 교수

Professor, Kwangwoon University, Department of Environmental Engineering

*****아세아항공 부설연구소 연구소장

Research Director, R&D Institute, Asia Aero Survey

1. 서 론

중금속으로 오염된 토양오염조사를 위해서는 개황조사 단계에서부터 오염된 현장에 대한 현장 평가가 필수적이다. 우선적으로 실제로 오염된 현장의 오염원과 오염 정도에 대한 샘플링 및 실험실 분석이 필요하며, 오염의 특성 및 범위 등 오염 현황의 공간 분포에 대한 정확한 추정이 필수적이라 할 수 있다. 공간적인 오염 현황에 대한 정보의 정확성은 향후 샘플링 되지 않은 곳의 오염도를 일반화하여 정화사업을 위한 실질적인 비용을 산정하는데도 핵심적인 역할을 할 수 있다. 중금속으로 오염된 토양은 특성상 공간적인 이질성으로 인해 기존의 화학분석법은 시간이 많이 소요되고 대규모지역의 모니터링을 하는데 비효율적인 면이 있다. 따라서 토양 중금속의 오염을 보다 간단하고 저렴하며, 신속하게 모니터링 하는 것은 중요한 과제라고 할 수 있다(Liu et al., 2011; Shi et al., 2014).

400~2500 nm의 스펙트럼 범위의 가시근적외선(VNIR, Visible and Near-Infrared) 영역을 사용하는 하이퍼스펙트럴 센서를 활용하여 토양의 분광학적 반사도 특성을 해석하는 다양한 연구들이 축적되고 있다. 기초적인 토양의 물리화학적 특성에 대한 스펙트럼 특징의 해석에서부터 수학적 알고리즘을 이용한 토양오염에 대한 정량적인 분석 등 다양한 연구들이 진행되고 있다(Fabre et al., 2015; Vohland et al., 2009; Viscarra et al., 2006). Schwartz 등(2012)은 하이퍼스펙트럴 센서를 이용하여 토양의 분광특성을 토대로 다양한 탄화수소계 유류 오염물질을 검출할 수 있는 가능성을 평가하였다. 한편 중금속에 대해서는 주성분회귀분석(PCR), 부분최소자승법(PLSR), 인공신경망(ANN) 등 다양한 통계분석 모델들을 적용하여 중금속 함량을 추정하는 연구들이 수행되어 오고 있다(Kemper and Sommer, 2002; Pandit et al., 2010; Vohland et al., 2009; Wang et al., 2017). 일반적으로 가시 근적외선 영역을 활용하는 하이퍼스펙트럴 센서의 경우 주로 고농도의 토양 내 중금속을 대상으로 직접적으로 검출할 수 없으며 중금속과 유기물, 점토물질 및 Fe/Al 산화물의 흡착특성을 토대로 간접적으로 탐지할 수 있다고 알려져 있다(Liu et al., 2011; Pandit et al., 2010; Schwartz et al., 2012; Vohland et al., 2009; Rathod et al., 2013; Winkelmann, 2005). 또한 중금속의 특정 파장 대역을 높은 유기물질이나 해당 중금속의 농도가 낮을 경우 특정 중금속 스펙트럼의 고유 파장을 선택하여도 예측의 정확성을 떨어트린다고 하였다(Wu et al., 2007; Omran et al., 2016).

하이퍼스펙트럴 센서를 활용한 중금속 오염토양 탐지에 있어 최종적인 목표인 항공 및 위성의 의한 모니터링은 아직까지는 항공 및 위성 센서의 수분흡수밴드, 프레임 속도, 센서의 기하학적 왜곡 등 낮은 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR)로 성공 사례가 드문 것으로 알려져 있다. 따라서 무엇보다 지상의 실험실 단계에서부터 토양 표층의 피복 상태,

토성, 수분, 분광학적 간섭현상 등 여러가지 변수들에 대한 문제를 해결하기 위한 기술개발들이 여전히 과제로 남아있는 상황이기 때문에 이 부분에 대한 다양한 기초 연구들이 절실하다고 할 수 있다. 특히 대기 효과를 제거한 가까운 거리에서 높은 스펙트럼 분해능과 더 나은 신호 대 잡음비보다 정확한 실험실 수준의 하이퍼스펙트럴 데이터 해석을 통해 잠재적인 변수들에 대한 검증이 필요하다(Schwartz et al., 2011).

본 연구에서는 기 선행된 연구(Kang et al., 2018)의 후속으로 하이퍼스펙트럴 센서를 활용한 중금속오염토양 탐지에 있어서 다양한 토양에서의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 선행연구에서는 유기물 및 pH가 중금속으로 오염된 토양에 대한 탐지에 주는 영향을 고찰하였다면 본 연구에서는 각각 세가지 유형의 구리로 오염된 토양에서 구리를 탐지하는 것에 목적을 두었다. 이를 위해 실측하여 농도를 알고 있는 중금속과 두가지 이상의 중금속으로 혼합된 인공 오염토양과 현장오염토에서 스펙트럼의 특정파장대역을 중심으로 특정 중금속으로 오염된 토양을 정성적으로 구별해낼 수 있는 지와 서로 다른 토성을 지닌 토양에서도 탐지할 수 있는지를 검증하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 토양시료 준비 및 분석

실험에 사용된 토양은 총 세가지로 인공오염토양으로 사용된 토양은 경기도 동두천의 오염된 이력이 없는 전형적인 밭토양에서(37°56'04.4"N 127°03'48.8"E) 채취하였으며, 나머지 두 종류의 토양은 철도 부지가 있는 현장의 오염토로 주로 구리와 납으로 오염된 토양을 사용하였다. 토양 시료 전처리에는 풍건 및 2 mm 체질을 통한 전처리 후, 토양 샘플의 중금속 함량을(ICP-OES, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, Perkin-Elmer Inc.)로 분석 하였다. 인공오염토는 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, PbCl_2 를 이용하여 조제하였다. 인공오염토는 농도 수준별로 나누어 용액을 제조하였고 오염 토양을 20일간 3번으로 나누어 점진적으로 스파이킹 하였고 이를 순차적으로 혼합하여 조제하였다. 토양의 물리화학적 특성 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법에 준하여 분석하였다(NIAST, 2000).

2.2 스펙트럼 데이터 수집

실내테스트베드 내 토양 시료의 하이퍼스펙트럴 데이터는 ASD FieldSpec 4 Spectroradiometer (ASD Inc., Boulder, CO, USA)를 사용하여 분광데이터를 취득하였다. 99% 표준 백색 반사판(Spectralon)을 사용하여 각 토양 샘플 스펙트럼을 수집하기 전에 장비를 교정(Calibration)하였다. 샘플링은 오염토의 표면에 대해 Turn table, Muglight, Contact Probe 방식 중 재현성이 가장 뛰어난 Contact Probe 방식을 적용하여

각 토양 샘플에 대해 20개의 스펙트럼 곡선을 Fig. 1과 같이 토양 샘플을 90° 각도로 수집하였다. 토양의 취득된 스펙트럼 프로파일은 ASD사의 View Spec Pro 소프트웨어를 사용하여 스펙트럼 라이브러리에 저장된 반사 스펙트럼을 얻었으며 로그합수 및 1차미분식으로 변환하였다. 이후 ENVI 5.3 + IDL 8.5 및 Pixel based mosaicking 기능을 활용하여 20개의 스펙트럼 프로파일을 픽셀화 하였다. 따라서 이미지의 각 픽셀은 지상의 단일 영역 단위를 대표하며 각각의 스펙트럼으로 표시된다. 향후 각 토양 시료에 대한 20개의 스펙트럼 곡선의 평균은 Outlier를 제거한 후 토양 시료의 표준 반사 스펙트럼으로 사용하여 SAM분류 분석에 적용하였다.

2.3 SAM 알고리즘을 활용한 영상분석

우선 전처리단계로서 선행연구를 통해 확보된 특정 파장 대역을 통계분석을 통해 특정밴드영역으로 축소한 후 로그 및 미분합수를 적용하여 변환 후 평균값을 기준라이브러리로 지정하여 영상 내에서 분광각맵퍼법(SAM)을 적용하여 영상 분류를 시도하였다. 분광각맵퍼법은 ENVI상에서 이미지 스펙트럼(Image spectrum)을 기준 라이브러리 스펙트럼(Reference library spectrum)과 비교하는 자동화된 방법으로 스펙트럼 수를 밴드 수와 동일한 차원으로 스펙트럼 공간에서 단위 벡터로 처리하여 두 스펙트럼 간 유사도를 계산하게 되며 분광 데이터의 값이 유사할수록 SAM 값이 0에 수렴하는 분포를 보인다. $\cos^{-1}$ 로 결정되는 각도 α 는

0°와 90°사이의 임의의 위치에서 변화를 나타내며 다음과 같은 식을 이용하여 계산한다(Kruse et al., 1993).

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i R_i}{(\sum_{i=1}^n T_i^2)^{1/2} (\sum_{i=1}^n R_i^2)^{1/2}} \right) \quad (1)$$

$n = \text{band}$, $T_i = \text{Test spectrum}$, $R_i = \text{Referencespectrum}$

중금속에 민감한 파장 대역의 식별은 실측된 중금속 농도와 변환 된 분광반사도 간의 상관 관계를 계산하여 수행되었으며 연구진의 선행연구(Kang et al., 2018)를 통해 지상분광계로 얻은 분광자료 중 outlier들은 제외시킨 후 토양의 분광 스펙트럼과 양의 상관관계가(R^2) 90% 이상을 보이는 구간을 재선별 하였고 구리의 경우 615-822 nm, 1992~2032 nm 구간을 주요 민감 파장대역으로 지정하였다.

2.4 중금속 오염 시나리오 구축

토양 내에서 특정중금속으로 오염된 토양을 탐지해내는 것, 복합적으로 오염된 토양 내에서 특정중금속을 탐지해내는 것, 또한 토성이 다른 환경 속에서 특정 중금속을 탐지해낼 수 있는 지를 검증하고자 실측농도기반의 오염토를 농도구배를 두어 중금속 오염 시나리오를 구성하였다. 먼저 스파이킹하여 조제된 중금속 4종류(As, Cd, Cu, Pb)가 포함된 인공오염토양을 농도구배별로 배치하였고, 구리와 납으로 주로 오염된 실제 현장 오염 토양을 확보하여 농도 구배가 되도록 배치하였다. 이에 대한 그림과 범례는 Fig. 2와 같다.

Fig. 1. Obtained by Repeating 20 Times by using Contact Probe Method and Pixelated Spectroscopic Data of Points Are Produced as an Image

Fig. 2. Heavy Metal Detection Scenario at Three Types of Different Soil Texture. (a) Artificial spiking soil mixed with one or more heavy metals. (b) Field soil 1 contaminated mainly with copper and lead (c) Field soil 2 contaminated mainly with copper and lead

준비한 시나리오는 기기분석하여 실측한 농도를 기반으로 한 세가지 그룹으로서 첫번째 그룹은 Fig. 2a와 같이 같은 토성이면서 각 중금속 단독으로 오염된 토양과, 네가지 중금속으로 복합 오염된 토양, 두번째 그룹은 Fig. 2b와 같이 구리와 납으로 오염된 철도부지의 현장오염토 1, 세번째 그룹은 Fig. 2c와 같이 구리와 납으로 오염된 철도부지의 현장오염토 2로 각각 구분하였다. 오염토양의 배치는 모두 마름모 형태로 정중앙이 고농도 Hotspot이 되고 바깥쪽으로 갈수록 저농도가 되도록 배치하여 구성하였다.

네가지 중금속으로 오염된 토양은 Fig. 2a의 범례와 같이 단일 중금속 As806, Cd889, Cu1097, Pb1050 mg/kg으로 기기분석으로 실측한 토양을 사용하였고 복합 오염된 중금속오염토양의 함량은 순차적으로 고농도에서 저농도로 배치하였다. 철도 부지의 현장 오염토 1은 Fig. 2b의 범례와 같이 역시 실측한 오염 토양을 가지고 농도 구배를 구리는 677, 348, 235, 104, 58 mg/kg 순서로, 납은 5841, 2634, 1664, 649, 193 mg/kg 순서가 되도록 배치하였다. 철도 부지

의 현장오염토 2는 Fig. 2c와 같이 농도 구배를 구리는 1630, 905, 430, 249 mg/kg 순으로, 납은 2307, 1276, 552, 287 mg/kg 순서가 되도록 배치하였다. 현장오염토 1,2 토양의 경우 모두 토양오염우려기준(“3” 지역)을 초과한 전형적인 복합오염 철도토양으로 특히 현장오염토 2의 경우 다른 두 토양에 비해 토색이 다소 어두운 것을 확인할 수 있었다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 토양의 물리화학적 특성

Table 1은 중금속 오염시나리오에 사용된 세 종류의 인공 오염토양과 현장오염토의 물리화학적 특성 및 중금속 오염 농도의 범위를 나타내고 있다. 인공오염토양의 경우 Cu의 농도 범위가 112에서 1151 mg/kg의 범위를 보였으며 현장오염토 2는 현장오염토 1에 비해 중금속의 농도 범위가 넓은 249에서 1630 mg/kg으로, 토양 유기물은 5.2%에서 14.4%까지 넓은 범위를 보였다.

Table 1. Physicochemical Characteristics of Three Types of Heavy Metal Contaminated Soil Used in this Study

Category	Artificial Soil	Field Soil 1	Field Soil 2
Soil Texture	Sandy loam	Loamy sand	Loamy sand
pH	7.28±0.6	7.2±0.8	7.6±0.03
Organic matter content(%)	4.3-5.9	2.5-5.5	5.2-14.4
As (mg/kg)	56-999	-	-
Cd (mg/kg)	62-889	-	-
Cu (mg/kg)	112-1151	58-677	249-1630
Pb (mg/kg)	99-1050	193-5841	287-2307

3.2 중금속 오염 시나리오에 따른 SAM분류 결과

3.2.1 인공오염토 시나리오에 따른 SAM 분류 결과

Fig. 3은 2.2절의 중금속 오염 시나리오 중 인공오염토에서 SAM의 분광 임계각을 각각 0.027, 0.035, 0.041을 적용하였을 때의 탐지 결과를 나타내고 있다.

인공오염토양 시나리오를 가지고 SAM angle을 변화를 주어 SAM 알고리즘을 적용하여 구리 1097 mg/kg을 참조라 이브러리로 적용하고 구리에 민감한 파장 대역인 615~ 822 nm, 1992~2032 nm을 반영하여 탐지한 결과, Fig. 3b와 같이 SAM angle 0.027에서 목표물인 순수 Cu1097 mg/kg으로 스카이핑 된 토양을 가장 먼저 탐지하였으며 구리를 중심으로 점차 낮은 농도 순으로 탐지하는 것을 확인할 수 있었다. 이후 Fig. 3c와 같이 SAM angle 0.035에서 구리 농도 Cu1151

mg/kg, Cu562 mg/kg 순으로 오염된 토양들이 탐지되다가 Fig. 3d와 같이 SAM angle을 0.041까지 증가시켰을 경우 구리로 오염되지 않은 Pb1000 mg/kg 토양 일부가 함께 탐지가 되기 시작하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Pb1000 mg/kg 토양 일부가 오염지 되는 임계각 0.041이 최대치라고 할 수 있다.

3.2.2 현장오염토 1 시나리오에 따른 SAM 분류 결과

Fig. 4는 2.2절의 중금속 오염 시나리오 중 현장오염토 1에서 SAM의 분광 임계각을 각각 0.222, 0.240, 0.260을 적용하였을 때의 탐지 결과를 나타내고 있다.

현장오염토 1 시나리오를 가지고 SAM angle을 변화를 주어 SAM 알고리즘을 적용하여 구리 1097 mg/kg을 참조라 이브러리로 적용하고 구리에 민감한 파장 대역인 615~

Fig. 3. SAM Classification Results of Copper Contaminated Artificial Soil. (a) spectral angle threshold 0.027, (b) spectral angle threshold 0.035, (c) spectral angle threshold 0.041

Fig. 4. SAM Classification Results of Copper Contaminated Field Soil 2. (a) spectral angle threshold 0.222, (b) spectral angle threshold 0.240, (c) spectral angle threshold 0.260

822 nm, 1992~2032 nm을 반영하여 탐지한 결과, Fig. 4b와 같이 SAM angle 0.222에서 시나리오상 가장 고농도인 순수 Cu677 mg/kg으로 스카이킹 된 토양을 가장 먼저 탐지하였으며 점차 낮은 농도 순으로 퍼져나가는 양상으로 탐지하는 것을 확인할 수 있었다. 이 탐지 패턴은 Fig. 4c와 같이 SAM angle 0.260까지 올렸을 때도 이어지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.3 현장오염토 2 시나리오에 따른 SAM 분류 결과

Fig. 5는 2.2절의 중금속 오염 시나리오 중 현장오염토

2에서 SAM의 분광 임계각을 각각 0.170, 0.184, 0.205를 적용하였을 때의 탐지 결과를 나타내고 있다. 현장오염토 2 시나리오를 가지고 SAM angle을 변화를 주어 SAM 알고리즘을 적용하여 구리 1097 mg/kg을 참조라이브러리로 적용하고 구리에 민감한 파장 대역인 615~822 nm, 1992~2032 nm을 반영하여 적용한 결과, Fig. 5b와 같이 SAM을 적용한 결과 SAM angle을 0.170을 부여하였을 때 가장 고농도인 Cu1630 mg/kg를 제외한 Cu905 mg/kg이 먼저 탐지가 되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5. SAM Classification Results of Copper Contaminated Field Soil 2. (a) spectral angle threshold 0.170, (b) spectral angle threshold 0.184, (c) spectral angle threshold 0.205

한편 SAM angle을 0.205까지 증가시켰음에도 불구하고 가장 고농도로 오염된 Cu1630 mg/kg의 경우에는 탐지가 되지 않는 것을 확인할 수 있었다. Cu1630 mg/kg으로 오염된 토양이 탐지가 되지 않은 것은 연구진의 선행연구(Kang et al., 2018)에서 확인된 유기물의 특정 파장 대역의 범위인 596.27-1019.21 nm에 의한 간섭현상으로 판단된다. 이는 중금속 오염토분류에서 유기물농도가 10.5%이상에서 분류에 제한이 되었던 것과 상응하는 결과로서 현장 오염토 2는 이 농도를 초과한 14.4%로서 이는 유기물에 민감한 파장 대역에 의해 구리의 특정 파장이 가려지는 것으로 판단된다. 기존 다수의 선행연구 등에서도 유기물의 특정 파장에 의한 중금속의 분광신호(Spectral signature)의 간섭 효과에 대해 보고하였다(Galvão and Vitorello, 1998; Liu et al., 2011; Omran et al., 2016). 하지만 실용적인 측면에서 본 기법을 적용하여 산림토양과 같은 지역을 제외하고는 표층 유기물의 농도가 10% 이상을 초과하는 지역은 드물 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 고농도의 유기물에 의한 간섭 효과를 제거하기 위해서는 고농도의 유기물이 함유된 중금속 오염 토양의 경우, 동일한 토성을 가지면서 동시에 중금속 탐지에 영향을 주지 않는 수준의 유기물 농도를 가진 토양의 분광곡선으로 맞추어 보정한다면 인위적으로 고농도의 유기물에 의한 간섭 효과를 극복할 수 있을 것으로 보인다.

향후 좀 더 다양한 토성환경에서 중금속의 탐지 여부를 검증할 필요가 있을 것으로 보이며, 여러가지 간섭효과들을 고려하여 이 방법론을 고도화한다면 향후 고농도 Hotspot 중심으로 구리로 오염된 토양 탐지가 가능할 것으로 보인다. 또한 정량적 분석 가능성 평가를 통해 연구의 실용 가능성을 높일 필요가 있다. 예를 들어 본 연구와 같이 SAM angle에 비례하여 고농도 핫스팟 중심에서 저농도로 확장해가는 SAM 분류 결과 패턴을 참조로 하여 SAM angle과 농도분포와의 상관식을 구축하고 기존의 여러가지 정량분석 모델과의 비교 등을 통한 실제현장도에서의 정량 분석의 가능성을 검증할 필요가 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 논문은 중금속으로 복합 오염된 실측 기반의 인공오염 토양과 현장 오염토 시나리오 내에서 서로 다른 중금속이 혼합된 조건과 토성이 다른 조건에서 중금속 오염 토양의 분류 가능 여부를 확인하였다. 또한 구리로 오염된 중금속 기준스펙트럼으로 하여금 하이퍼스펙트럴 영상 상에서 분광 각맵퍼법(SAM) 알고리즘을 이용하여 구리의 특정 파장 대역인 615~822 nm, 1992~2032 nm를 적용하여 구리로 오염된 토양을 탐지한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 인공오염토양에서는 SAM angle 0.027에서 목표물인 순수 Cu1097 mg/kg으로 스파이킹 된 토양을 가장 먼저 탐지하였으며 SAM angle을 0.041까지 증가시켰을 경우

구리로 오염되지 않은 Pb1000 mg/kg 토양 일부가 함께 오탐지가 되기 시작하는 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 현장오염토 1에서는 SAM angle 0.222에서 시나리오상 가장 고농도인 순수 Cu677 mg/kg으로 오염된 토양을 가장 먼저 탐지하였으며 점차 낮은 농도 순으로 탐지하는 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 현장오염토 2에서는 가장 고농도로 오염된 Cu1630 mg/kg의 경우 SAM angle을 0.205까지 증가시켰음에도 불구하고 분류가 되지 않았으며 이를 제외한 나머지는 고농도에서 저농도순으로 탐지되는 것을 확인할 수 있었는데 이는 높은 유기물농도로 인한 간섭효과로 인한 것으로 판단된다.

본 연구결과를 토대로 실험실 기반의 인공스파이킹 토양을 포함한 제2, 제3의 토성에서 구리로 오염된 토양이 탐지 가능함을 확인하였으며 특성상 고농도인 Hotspot을 중심으로 우선적으로 분류되고 순차적으로 저농도 순으로 정성적인 분류가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 및 한국환경산업기술원의 「토양지하수 오염 방지 기술 개발사업(Geo-Advanced Innovative Action, GAIA) - 2015000540009」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Fabre, S., Briottet, X., and Lesaignoux, A. (2015). Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4–2.5 μm domain. *Sensors*, Vol. 15, No. 2, pp. 3262-3281.
- Galvão, L.S., and Vitorello, I. (1998). Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 10, pp. 1969-1979.
- Kang, S., Lee, K.Y., Jeon, E.I., Shin, I.H., Yu, S.J., and Kwon, O.S. (2018). A study on interference effect by pH and organic matter in heavy metal contaminated soil detection using hyperspectral image. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 375-383.
- Kemper, T., and Sommer, S. (2002). Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, Vol. 36, No. 12, pp. 2742-2747.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A., Boardman, J., Heidebrecht, K., Shapiro, A., Barloon, P., et al. (1993). The spectral image processing system (SIPS): Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer

- data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 44, No. 2-3, pp. 145-163.
- Liu, Y., Li, W., Wu, G., and Xu, X. (2011). Feasibility of estimating heavy metal contaminations in floodplain soils using laboratory-based hyperspectral data: A case study along Le'an River, China. *Geo-spatial Information Science*, Vol. 14, No. 1, pp. 10-16.
- NIAST. (2000). *Methods of soil and plant analysis*. National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Omran, E.-S.E. (2016). Inference model to predict heavy metals of Bahr El Baqar soils, Egypt using spectroscopy and chemometrics technique. *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 2, No. 4, Article No. 200.
- Pandit, C.M., Filippelli, G.M., and Li, L. (2010). Estimation of heavy-metal contamination in soil using reflectance spectroscopy and partial least-squares regression. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31, No. 15, pp. 4111-4123.
- Rathod, P.H., Rossiter, D.G., Noomen, M.F., and van der Meer, F.D. (2013). Proximal spectral sensing to monitor phytoremediation of metal-contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, Vol. 15, No. 5, pp. 405-426.
- Schwartz, G., Ben-Dor, E., and Eshel, G. (2012). Quantitative analysis of total petroleum hydrocarbons in soils: Comparison between reflectance spectroscopy and solvent extraction by 3 certified laboratories. *Applied and Environmental Soil Science*, Vol. 2012, Article ID 751956.
- Schwartz, G., Eshel, G., and Ben-Dor, E. (2011). Reflectance spectroscopy as a tool for monitoring contaminated soils. *Soil Contamination*, InTech. doi:10.5772/23661
- Shi, T., Chen, Y., Liu, Y., and Wu, G. (2014). Visible and near-infrared reflectance spectroscopy: An alternative for monitoring soil contamination by heavy metals. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 265, pp. 166-176.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D., McBratney, A., Janik, L.J., and Skjemstad, J. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, Vol. 131, No. 1-2, pp. 59-75.
- Vohland, M., Bossung, C., and Fründ, H.-C. (2009). A spectroscopic approach to assess trace-heavy metal contents in contaminated floodplain soils via spectrally active soil components. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 172, No. 2, pp. 201-209.
- Wang, F., Li, C., Wang, J., Cao, W., and Wu, Q. (2017). Concentration estimation of heavy metal in soils from typical sewage irrigation area of Shandong Province, China using reflectance spectroscopy. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, No. 20, pp. 16883-16892.
- Winkelmann, K. (2005). *On the applicability of imaging spectrometry for the detection and investigation of contaminated sites with particular consideration given to the detection of fuel hydrocarbon contaminants in soil*. Ph.D. dissertation, Brandenburgischen Technischen Universität, Cottbus, Germany.
- Wu, Y., Chen, J., Ji, J., Gong, P., Liao, Q., Tian, Q., et al. (2007). A mechanism study of reflectance spectroscopy for investigating heavy metals in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 71, No. 3, pp. 918-926.

Received	May 2, 2018
Revised	May 4, 2018
Accepted	May 16, 2018