

중금속으로 오염된 지반의 침하계측을 위한 수치사진측량의 적용성 평가

A Study on Applicability Evaluation of digital Photogrammetry for Settlement Measurement of Soil Contaminated with Heavy Metals

한중근¹, 박정준², 유승경³, 윤중만⁴, 홍기권^{5*}

Jung-Geun Han¹, Jeong-Jun Park², Seung-Kyong You³, Jung-Mann Yun⁴, Gigwon Hong^{5*}

¹Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang University, 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

²Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03656, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Dept. of Construction Information System, ShinAnsan University, 135 Shinansandeahak-ro Danwon-gu, Ansan, Republic of Korea

⁵Member, Director, Institute of Technology Research and Development, Korea Engineering & Construction, 3-16, Jungdae-ro 25-gil, Songpa-gu, Seoul, 05661, Republic of Korea

ABSTRACT

This study describes the results of laboratory model test on settlement of soil contaminated with heavy metals, in order to evaluate the applicability of VMS to the measurement of ground settlements generated during the purification of contaminated soil. The measurement results for settlement of contaminated soil were compared using a 3D-Visual Monitoring System (VMS) based on digital photogrammetry and a total station. The test result showed that the settlement of the soil contaminated with heavy metals occurred a lot in the experimental condition in which the hydrophilic filter was applied. The minimum and maximum error ranges of VMS were calculated as $\pm 0.36\text{mm}$ and $\pm 0.87\text{mm}$, respectively, and the error of VMS was satisfied in all experimental conditions. The average error rate of VMS was lower in the hydrophilic filter condition than in the hydrophobic filter condition. Therefore, it was evaluated that VMS can be applied to measure the settlement of contaminated soil.

요 지

본 연구에서는 오염된 지반의 정화 시에 발생하는 침하량 계측에 대한 VMS의 적용성을 평가하기 위하여, 오염지반의 침하에 대한 실내실험을 수행하였다. 즉, 수치사진측량기법을 기반으로 개발된 3D-Visual Monitoring System(VMS)와 기존 계측장비인 토탈스테이션을 이용하여, 오염지반 침하에 대한 계측결과를 비교하였다. 실험결과, 중금속으로 오염된 지반의 침하량은 친수성 필터가 적용된 실험조건에서 많이 발생하였다. 계측결과를 바탕으로 VMS의 오차범위를 산정한 결과, 최소 및 최대 오차범위는 각각 $\pm 0.36\text{mm}$ 와 $\pm 0.87\text{mm}$ 산정되었고, VMS의 오차량은 모든 실험조건에서 오차범위를 만족하는 것으로 확인되었다. VMS의 평균오차율을 산정한 결과, 소수성 필터조건에 비하여 친수성 필터 조건에서 낮은 평균오차율을 보였다. 이를 바탕으로 오염된 지반의 침하량 계측에 있어서 VMS의 적용이 가능한 것으로 평가되었다.

Keywords : Ground deformation, Digital photogrammetry, 3D measurement, Monitoring system

Received 9 Dec. 2020, Revised 19 Dec. 2020, Accepted 22 Dec. 2020

*Corresponding author

Tel: +82-2-2038-5670; Fax: +82-2-404-3090

E-mail address: gigwon_hong@kecgroup.kr (G. Hong)

1. 서론

토목구조물의 안정성 평가 및 유지관리를 위해 다양한 계측장비들이 사용되고 있으며, 이를 통한 계측결과는 구조물의 변형해석이나 안정해석에 적용되고 있다. 최근의 계측방법은 수동계측에서 자동화계측으로 변화/적용되어 오고 있으며, 정밀기계 및 초소형 계측장치들을 이용한 대형구조물의 안정평가에서의 활용이 점점 확산되고 있다. 이와 같은 계측방법 중, 영상을 이용한 수치사진측량기법의 적용은 소프트웨어 사진측량에서 디지털 사진측량으로 변화되었다. 특히, 수치영상을 통한 3차원 데이터 획득을 통해, 동체의 움직임에 대한 실시간 측정이 가능해졌으며, 이와 같은 방법에 대하여 다양한 산업에서의 자동화 측정 활용방안들이 지속적으로 연구되고 있다(Hannah, 1989; Lee et al., 2006). 또한 다양한 실내실험과 비탈면, 옹벽, 지반굴착 및 댐 등과 같은 토목구조물에도 그 적용성이 확대되고 있다. Han et al.(2001)은 비탈면의 표면 거동을 평가하기 위하여 수치사진측량기법을 적용하였으며, Han and Song(2003)은 사진측량의 장점을 활용한 소프트웨어 사진측량의 매카니즘을 비탈면의 변위계측을 위해 적용되었으며 이는 접근하기 어려운 위험 사면의 3차원 지반데이터를 효과적으로 획득·분석할 수 있는 방법으로 제시한 바 있다. Han et al.(2007)은 3차원 디지털 이미지를 통한 구조물의 변형계측이 가능한 시스템을 개발하여 적용한 사례를 보고한 바 있으며, Han et al.(2008)은 디지털 이미지 기반의 실시간 모니터링 시스템을 이용하여 용접된 부재의 거동을 평가하였다. 그리고 Stewart and Tsakiri(2001)은 대규모 댐에서 GPS를 이용하여 구조물 표면의 변위량을 측정하여 안정성을 평가한 바 있다. 이와 같이 디지털 사진측량기법은 자동화시스템을 이용한 대형구조물(댐, 저수지, 산악지대의 터널, 도로, 사면, 방대한 해안 및 연안의 대규모 항만시설 등)의 안정성 평가와 함께, 미소변형계측이 요구되는 실내실험의 적용이 가능하다.

한편, 전 세계적으로 인구증가 및 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해화학물질로 인하여 지반 및 지하수의 오염의 심각성이 고조되어 지반환경에 대한 중요성이 인식되고 있다. 오염물에 의한 지반 및 지하수의 오염은 다양한 경로를 통해 발생되는데 폐기물 매립장의 침출수, 공장 폐수, 농약 및 폐광 등에서 발생하는 오염물질은 처리공정을 거치지 않고 배출할 경우 심각한 문제를 야기할 수 있다. 특히, 지중에서의 오염물질 확산은 그 범위를 예측하기 힘

들고 한번 오염된 지반 및 지하수의 복원은 대단히 어려운 일이라 할 수 있다. 또한 최근에는 유효부지 확보를 위한 준설매립이 활발하게 진행되고 있는 과정에서 다양한 오염원으로 오염된 퇴적토도 함께 매립되는 경우가 많다. 이와 같이 오염된 준설매립 연약지반은 부지가용 차원에서 압밀침하 촉진공법과 더불어, 이차적으로 오염원 정화기술을 적용하기도 하는데, 이는 경제성을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 최근에는 오염된 연약지반의 정화 및 복원을 위하여 연직배수재를 이용한 오염원 제거기술에 많은 연구가 진행되고 있다. 먼저, Shin et al.(2008)은 오염된 지반에서 연직배수재를 토양중기추출복원시스템에 적용한 실험결과를 바탕으로 수치해석 모델을 수립하여 검증하였다. 또한 Shin et al.(2011)은 오염지반 복원을 위한 연직배수시스템의 적용성 평가를 실시하였다. 이에 다양한 영향 인자 평가를 위한 파일럿 규모의 오염복원 실내실험을 수행하여 오염물질의 복원 효율을 분석한 결과, 추출배수재 주변에서는 오염물의 농도가 더 높게 나타남을 확인한 바 있다. 그리고 Park et al.(2013)은 생분해 배수재를 이용한 오염토양 정화기술의 현장적용성을 평가하기 위하여 생분해 배수재의 물리적 특성과 현장실험 기반의 중금속 오염토양에 대한 정화효율을 평가하였다. Chung(2006)은 유기물질로 오염된 최적토에서 동전기 침전 및 정화기법을 바탕으로 초연약 최적지반의 침하 특성을 평가하였으며, Ji et al.(2016)은 해저에 퇴적된 오염 침전물질을 제올라이트와 모래로 피복하여 오염물질을 격리한 대상지역의 해저지반에 대한 역학적 안정성 및 변형을 예측하였다. Kim(2006)은 GIS를 이용하여 폐탄광 지역에서 발생하고 있는 지반침하의 위험 범위를 정량적으로 예측하고자 하였고, Kim et al.(2012)는 연약지반의 계측을 위해 적용된 계측시스템들의 통합관리 및 분석을 일원화하고자 IT기반의 통합계측관리시스템을 구축하고, 이에 대한 적용성을 평가하였다. 그리고 Jeon et al.(2012)은 연약지반에 대하여 기존 수동계측 방식의 문제점을 통해 홀센서 기반의 지반침하 자동계측시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템을 준설매립된 초연약지반 개량 현장에 적용함으로써 개발기술을 검증한 바 있다. 이와 같이 오염지반 및 연약지반의 계측 자동화를 위한 다양한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 중금속으로 오염된 연약지반의 정화를 목적으로 연직배수재의 필터 표면특성에 따른 중금속 오염물의 거동을 평가한 기존 연구(Han et al., 2015)를 바탕으로, 중금속으로 오염된 세립토 지반의 함수비에 따른 침

하계측에 관한 실내실험 수행하였다. 즉, 수치사진측량기법을 기반으로 개발된 3D-Visual Monitoring System(이하 VMS)와 기존 계측장비인 토탈스테이션을 이용하여, 오염지반 침하에 대한 계측결과를 비교/분석하였다. 이를 통해 오염지반의 정화 시에 발생하는 지반침하 계측에 대한 VMS의 적용성을 평가하였다.

2. 수치사진을 이용한 3D-Visual Monitoring System(VMS) 개요

VMS는 수치사진측량기법을 활용한 실시간 모니터링 시스템으로 구조물에 대한 연속된 이미지 획득을 통해 변형여부를 판단함으로써, 구조물의 효율적인 유지관리에 기여할 수 있다(Han et al., 2007). 즉, 영상을 획득하여 좌표를 생성하고 해석도화를 통한 분석을 거쳐 3차원좌표를 생성한 후, 변화벡터를 추출하는 과정을 통합하면 구조물의 변형을 해석할 수 있음을 의미한다. 따라서 CCD 카메라와 같은 영상획득장치를 이용하여 얻어진 이미지가 3차원영상구축 과정을 거치게 되면, 구조물 또는 지반의 변형해석이 가능하다.

본 연구에서는 오염된 지반의 침하계측에 있어서 수치사진측량기법의 적용성을 평가하고자 기존에 개발된 VMS를 이용하였기에, 이미지 기반의 디지털 수치사진측량기법과 VMS의 원리 및 해석과정은 각각 Fig. 1 및 Fig. 2 와 같고, 기존 연구(Han et al., 2012)를 통해 자세히 확인할 수 있다.

3. 오염지반의 침하계측을 위한 모형실험

3.1 실험장치 및 재료

중금속으로 오염된 지반의 침하계측을 위한 모형실험에 요구되는 실험장치는 크게 토조, 이미지 획득용 영상장치, 토탈스테이션(Total station), 전류 공급장치이다. 먼저, Fig. 3(a)와 같이, 지반모사를 위해 사용된 토조는 정방형이고, 크기는 0.5m(L)×0.5m(W)×0.45m(H)이다. 그리고 중금속 종류 및 필터 표면특성에 따른 실험을 위하여 토조 내부는 4등분하였으며, 분리된 재료 및 오염물의 상호간섭이 없도록 경계면에 유출방지처리를 실시하였다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이, VMS 계측을 위한 이미지 획득용 영상장치는 130만 화소의 CCD 카메라 2대를 이용하였고, VMS의 계측결과와 비교하기 위한 기존 계측장치로는 sokkia사의 토탈스테이션(모델; set510)을 활용하였다. 마지막으로 세립토로 이루어진 오염지반 상에 별도의 하중을 재하하지 않기 때문에, 침하유도를 위해 중금속으로 오염된 간극수의 이동을 촉진시켜 침하를 유발할 수 있도록 전극봉과 전류 공급장치를 이용하 동전기를 적용하였다(Fig. 3(c)). 이때 전극봉을 삽입하기 위한 다공질관을 토조 중앙부와 코너부 4개소에 설치하였고, 코너부 4개소의 다공질관 표면에는 필터를 부착하였다.

중금속 오염물 종류에 따른 간극수의 흡수 및 배출의 다양성을 확보하기 위하여, 다공질관 표면에 부착되는 필

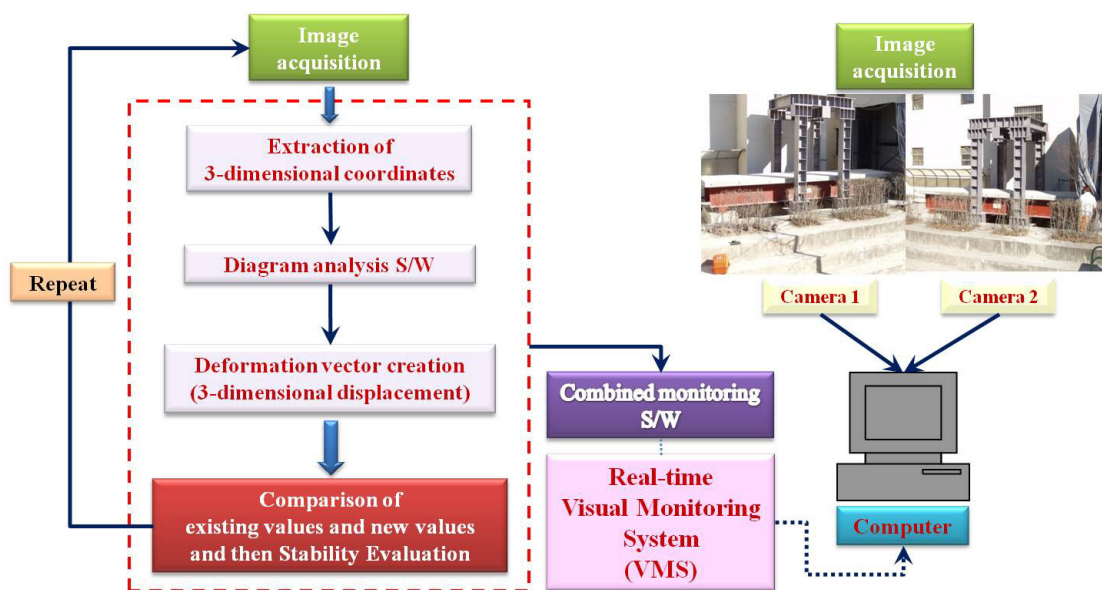


Fig. 1. Analysis procedure of digital photogrammetry (Han et al., 2012)

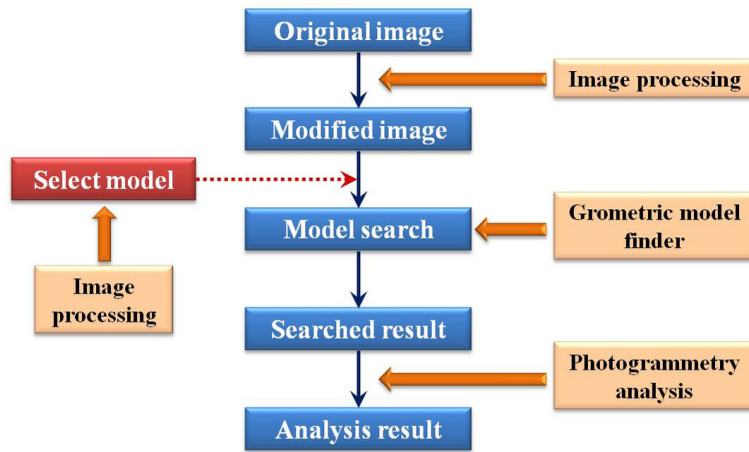
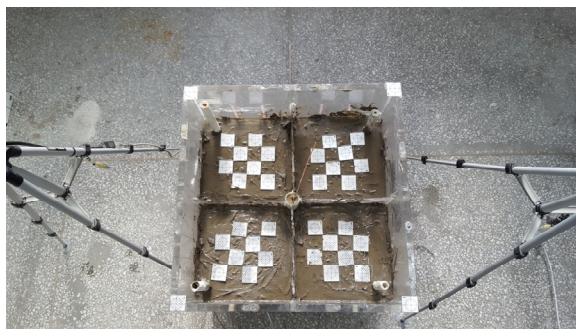


Fig. 2. Measurement analysis procedure of VMS (Han et al., 2012)



(a) Soil box



(b) CCD camera



(c) DC Power supply



(d) hydrophobic filter

Fig. 3. Experimental apparatus and materials

터의 표면특성은 각각 친수성 및 소수성의 성질을 갖도록 하였다. 실험에 적용된 필터는 친수성으로 생산된 제품을 이용하였기 때문에, 소수성의 필터 표면특성을 확보하기 위해 친수성 필터를 소수성 용액에 일정시간 침지하여 표면 접촉각이 $120^{\circ} \sim 125^{\circ}$ 범위를 갖도록 하였다. 일반적으로 친수성과 소수성은 재료 표면의 습윤정도(wettability)로 평가하는데, 습윤정도는 용액에 대한 재료 표면의 접촉각으로 확인이 가능하다. 즉, 표면의 접촉각에 따라 친수성($0^{\circ} \leq$ 표면 접촉각 $< 90^{\circ}$) 또는 소수성($90^{\circ} \leq$ 표면 접촉각

Table 1. Soil properties

LL (%)	PL (%)	LL (%)	U.S.C.S.
42.2	33.8	8.4	ML

$< 180^{\circ}$)으로 구분되며(Han et al., 2015), Fig. 3(d)는 소수성이 적용된 필터를 나타낸 것이다. 오염된 모형지반의 모사는 세립토(황토)에 구리(Cu)와 납(Pb)으로 오염된 간극수를 함수비 조건에 부합하도록 조성하였으며, 세립토의 역학적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 2. Test cases

Classification	Contaminant	Filter type	Water content (%)	Voltage slope (V/cm)	Measerument	Measerument time (hr)
Case 1	Cu	Hydrophobic	30	1	4 point	0 (Initial) 24 48 96 192
Case 2		Hydrophilic				
Case 3	Pb	Hydrophobic				
Case 4		Hydrophilic				
Case 5	Cu	Hydrophobic	50			
Case 6		Hydrophilic				
Case 7	Pb	Hydrophobic				
Case 8		Hydrophilic				

※ Measurement apparatus: Total station, VMS

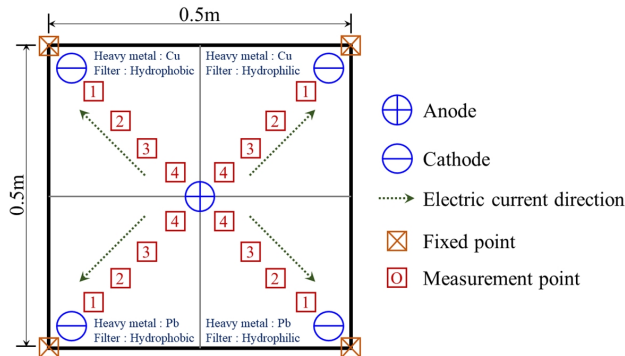


Fig. 4. Model test schematic

3.2 실험방법 및 내용

오염된 모형지반은 세립토에 구리와 납으로 각각 용해된 용액을 함수비 조건(30%, 50%)에 맞춰 교반하여 토조 내에 0.3m 높이로 조성하였고, 구리와 납의 농도는 동일한 조건으로 적용하였다. 그리고 오염물이 용해된 간극수의 배출과 오염물 종류에 따른 침하경향을 파악하기 위하여, 전극봉이 설치되는 코너 4개소의 다공질관에 동일한 오염물질별로 각각 친수성 및 소수성 필터를 부착하였다. 또한 오염지반 침하 시에 토조 벽면과의 마찰을 최소화하기 위하여 마찰저감처리를 실시하였다.

전술한 바와 같이, 모형지반의 침하는 별도의 하중조건이 적용되지 않았기 때문에, 전압경사를 이용한 동전기 방법으로 유도하였으며, 침하계측은 토탈스테이션과 VMS를 적용하였다. 이때, 동일한 위치에서의 침하계측을 위하여 계측타겟을 제작/적용하였으며, 계측타겟이 오염지반과 일체거동을 할 수 있도록 타겟 하부에 얇은 핀을 부착하여 지반 내에 관입하였다. 계측위치는 각각의 오염지반과 필터조건에 따라 오염지반의 시간경과별 상대변위를 확인하기 위하여, 고정점 4개소와 변위발생 지점 4개소를 적용하였다. 그리고 계측시간은 세립토 지반의 침하변형

에 소요되는 시간을 고려하여 초기계측 이후 24시간(1일), 48시간(2일), 96시간(4일), 192시간(8일)으로 하였다. Fig. 4는 모형실험 개요도를 나타내 것이다.

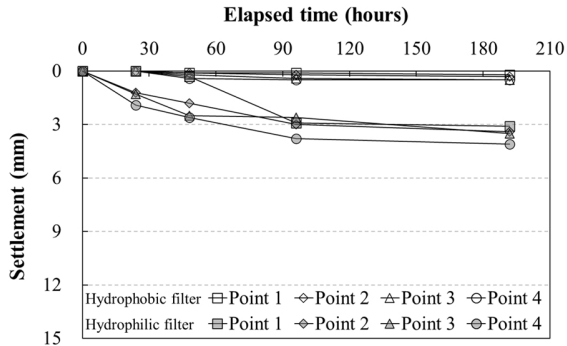
실험은 오염용액에 의한 함수비, 오염물 종류 및 필터조건을 바탕으로 총 8case가 수행되었으며, 내용을 요약하면 Table 2에 나타난 바와 같다.

4. 실험결과 및 분석

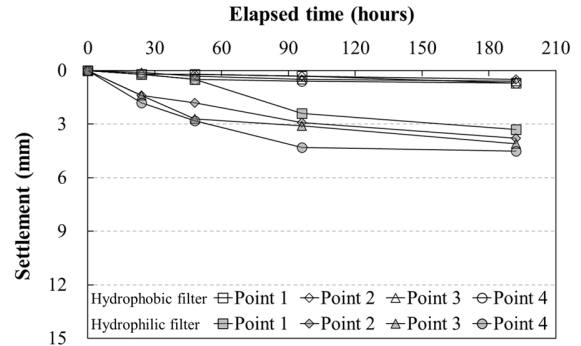
4.1 함수비와 필터조건에 따른 침하계측 결과

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 함수비에 따라 계측장비 및 필터 조건을 고려한 계측결과를 도식화한 것이고, 계측값을 요약한 결과는 Table 3에서 보는 바와 같다.

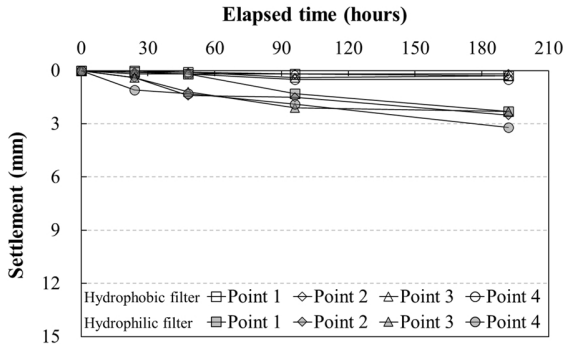
먼저, Fig. 5와 같이 함수비가 30%인 경우, 구리로 오염된 지반의 침하량은 토탈스테이션 계측값을 바탕으로 소수성 필터 조건일 때보다 친수성 필터 적용조건에서 300%~2,900% 정도 크게 발생되었다. 그리고 VMS를 이용한 계측값은 친수성 필터 조건이 약 100%~1,400% 큰 침하량을 보였다. 이는 소수성 필터에 비하여 친수성 필터 조건에서 오염 간극수 배출이 크게 발생되었기 때문이다. 그리고 최대 침하량은 필터로부터 원거리인 계측위치(point 4)에서 나타났으며, 실험시작 후 48시간이 경과한 이후부터 침하량 증가율이 증가함을 알 수 있었다. 납으로 오염된 지반의 침하량은 구리 오염지반의 경우와 마찬가지로 친수성 필터 적용조건에서 토탈스테이션 계측값이 200%~1,250%, VMS 계측값이 300%~1,050% 크게 발생된 것으로 파악되었다. 또한 침하량 증가율도 다소 차이는 있지만 48시간이 경과한 이후부터 증가하는 경향을 보였으며, 4번 계측위치(point 4)에서 오염 간극수가 가장 크게 배출된 것으로 확인되었다.



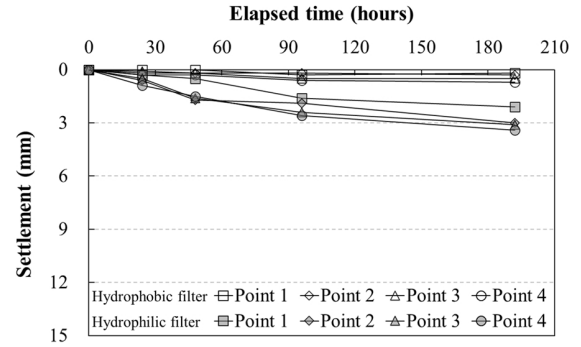
(a) Measurement results of total station for Cu



(b) Measurement result of VMS for Cu

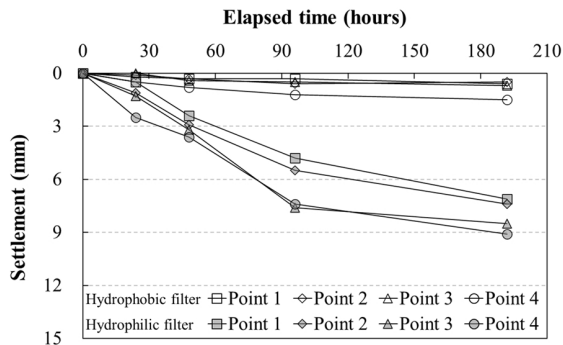


(c) Measurement results of total station for Pb

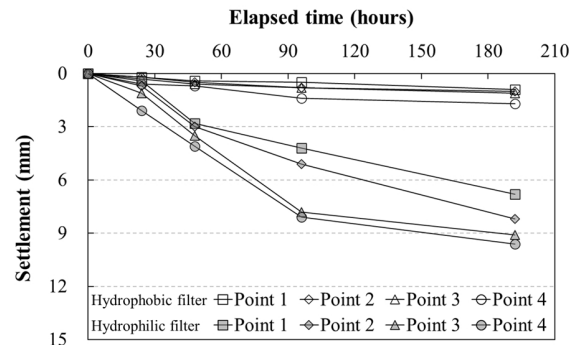


(d) Measurement result of VMS for Pb

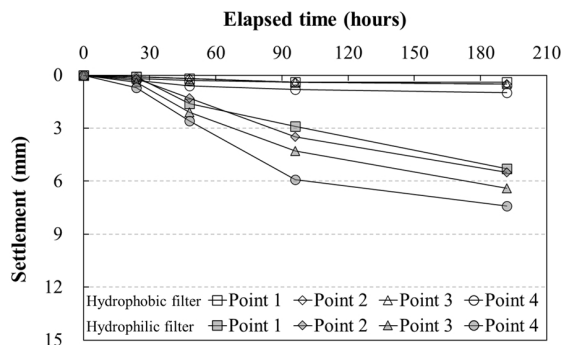
Fig. 5. Test results – water content 30%



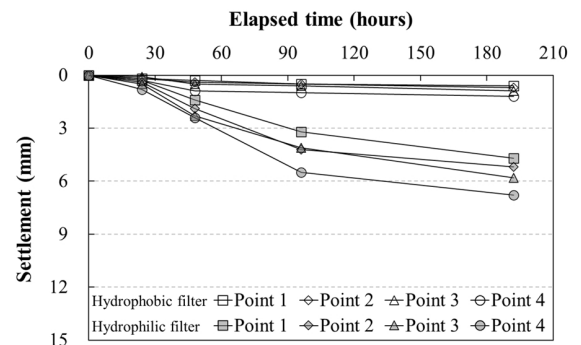
(a) Measurement results of total station for Cu



(b) Measurement result of VMS for Cu



(c) Measurement results of total station for Pb



(d) Measurement result of VMS for Pb

Fig. 6. Test results – water content 50%

Fig. 6에서 보는 바와 같이, 함수비가 50%인 경우의 침하량은 오염물 종류와 관계없이 함수비 30%인 경우와 동일하게 소수성 필터가 적용된 오염지반에 비하여 친수성

필터가 적용된 오염지반에서 침하량이 크게 발생된 것을 알 수 있었다. 즉, 구리로 오염된 지반에서 토탈스테이션에 의해 측정된 침하량은 친수성 필터 조건이 소수성 필터

Table 3. Summary of measurement value

Water content (%)	Contaminant	Filter type	Elapsed time (hr)	Total station (mm)				VMS (mm)				
				point 1	point 2	point 3	point 4	point 1	point 2	point 3	point 4	
30	Cu	Hydrophobic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	
			48	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3	0.5	
			96	0.1	0.2	0.4	0.5	0.3	0.3	0.5	0.6	
		192	0.2	0.3	0.5	0.5	0.7	0.5	0.6	0.7		
		Hydrophilic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			24	0.0	1.2	1.3	1.9	0.2	1.4	1.4	1.8	
			48	0.3	1.8	2.5	2.6	0.5	1.8	2.7	2.8	
	96		2.9	3.0	2.6	5.4	2.4	2.9	3.1	4.3		
	192	3.1	3.4	3.5	4.1	3.3	3.8	4.1	4.5			
	Pb	Hydrophobic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			24	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.1	0.3	
			48	0.1	0.2	0.1	0.2	0.0	0.2	0.2	0.3	
			96	0.2	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	0.5	0.6	
		192	0.3	0.2	0.3	0.5	0.2	0.3	0.5	0.7		
		Hydrophilic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
24			0.1	0.4	0.4	1.1	0.3	0.6	0.5	0.9		
48			0.2	1.4	1.2	1.3	0.5	1.7	1.6	1.5		
96	1.3		1.5	2.1	1.9	1.6	1.9	2.4	2.6			
192	2.3	2.5	2.3	3.2	2.1	3.0	3.1	3.4				
50	Cu	Hydrophobic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			24	0.2	0.1	0.0	0.5	0.2	0.2	0.3	0.6	
			48	0.3	0.3	0.4	0.8	0.4	0.5	0.6	0.7	
			96	0.3	0.6	0.5	1.2	0.5	0.8	0.8	1.4	
		192	0.6	0.5	0.7	1.5	0.9	1.0	1.1	1.7		
		Hydrophilic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			24	0.5	1.1	1.3	2.5	0.4	0.7	1.1	2.1	
			48	2.4	2.9	3.2	3.6	2.8	3.0	3.5	4.1	
	96		4.8	5.5	7.6	7.4	4.2	5.1	7.8	8.1		
	192	7.1	7.4	8.5	9.1	6.8	8.2	9.1	9.6			
	Pb	Hydrophobic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
			24	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	
			48	0.2	0.2	0.3	0.6	0.3	0.4	0.5	0.9	
			96	0.4	0.4	0.4	0.8	0.5	0.5	0.6	1.0	
		192	0.4	0.5	0.5	1.0	0.6	0.7	0.9	1.2		
		Hydrophilic	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
24			0.1	0.2	0.4	0.7	0.3	0.4	0.5	0.8		
48			1.6	1.3	2.1	2.6	1.4	1.9	2.3	2.4		
96	2.9		3.5	4.3	5.9	3.2	4.2	4.1	5.5			
192	5.3	5.5	6.4	7.4	4.7	5.2	5.8	6.8				

조건에 비하여 250%~1,600% 크게 발생되었으며, VMS에 의해 계측된 침하량은 친수성 필터 조건에서 200%~980%가 더 발생된 것으로 확인되었다. 그리고 납으로 오염된 지반에서도 친수성 필터 적용조건에서 토탈스테이션과 VMS가 각각 100%~1,330%, 150%~840% 범위의 큰 침하량을 보였다.

계측결과와 같이, 중금속으로 오염된 간극수는 오염물에 따라 다소 차이는 나타났지만, 소수성의 표면성질을 갖

는 필터보다 친수성 필터에서 많은 침하량이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 VMS 계측결과에 의한 침하량 증가 범위가 토탈스테이션에 의한 결과보다 작은 것으로 나타났다.

4.2 계측결과의 비교/분석

Fig. 7은 동일한 오염물 조건에서 함수비에 따른 VMS

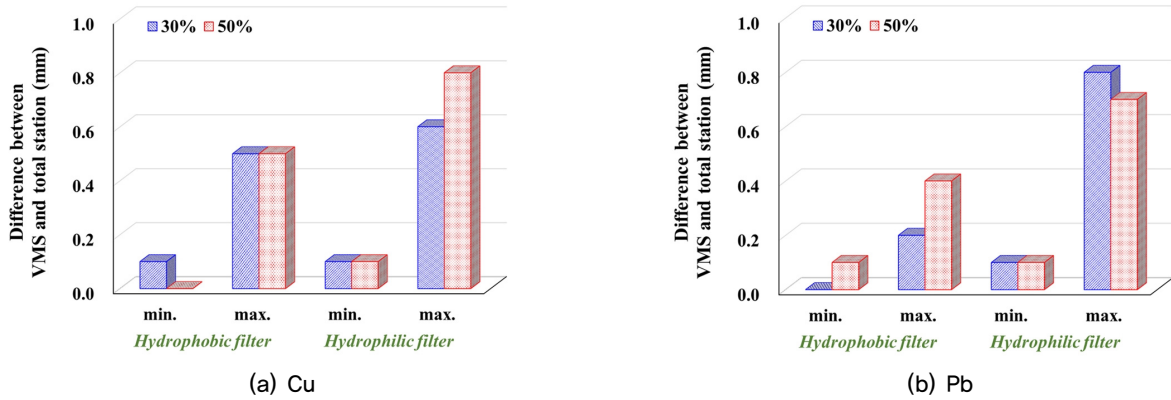


Fig. 7. Difference between VMS and total station

Table 4. Average error rate calculation of VMS

Water content (%)	Average error rate (%)			
	Cu		Pb	
	Hydrophobic	Hydrophilic	Hydrophobic	Hydrophilic
30	84.0	7.1	27.3	19.2
50	49.6	1.4	39.4	1.9

와 토탈스테이션의 최소 및 최대 침하량 계측값에 대한 오차량을 나타낸 것이다. 먼저, 구리로 오염된 지반의 경우, VMS와 토탈스테이션에 의한 계측값의 오차량은 친수성 필터가 적용된 경우에서 0.2mm인 것으로 나타났다. 그리고 납으로 오염된 지반에서 오차량은 소수성 필터가 적용된 경우에서 0.2mm가 나타났다. 이는 각 조건에서 발생된 전체 침하량을 고려하면 미미한 수준이라 판단되었으며, VMS의 오차량에 대하여 정량적으로 평가하기 위하여 오차범위를 평가하였다.

오차범위는 기존 연구(Han et al., 2007)에서 제시된 이미징 획득장치의 화소수와 계측 대상물의 실제 거리의 관계를 바탕으로 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$\text{error range} = (\text{measurement distance}[\text{camera-target}] \times \text{target pixels}) / \text{total pixels of image} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 VMS의 오차범위를 산정한 결과, 최소 및 최대 오차범위는 각각 $\pm 0.36\text{mm}$ 와 $\pm 0.87\text{mm}$ 평가되었다. 이를 바탕으로 각각의 동일한 실험조건에서 발생한 VMS와 토탈스테이션의 오차량을 평가한 결과, 모든 조건에서 오차범위를 만족하는 것으로 확인되었다.

Table 4에서 보는 바와 같이, 각 실험조건에서 토탈스테이션 대비 VMS의 오차율을 시간이력 및 계측위치에 따라

평균값으로 산정한 결과, 침하량이 크게 발생한 친수성 필터 적용조건인 VMS 계측결과가 상대적으로 적은 침하량이 발생한 소수성 필터조건에 비하여 매우 낮은 평균오차율을 보였으며, 특히, 함수비가 높은 경우에는 2% 미만의 평균오차율이 산정되었다. 이를 바탕으로 오염된 지반의 오염 간극수 배출에 따른 침하량 계측에 있어서 VMS의 적용가능성이 높을 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 중금속으로 오염된 지반의 정화 시에 발생하는 침하량 계측에 대한 VMS의 적용성을 평가하기 위하여 일련의 실내실험을 실시하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 중금속으로 오염된 간극수는 오염물에 따라 다소 차이는 나타났지만, 소수성의 표면성질을 갖는 필터보다 친수성 필터에서 많은 침하량이 발생하는 것을 알 수 있었고, VMS 계측결과에 의한 침하량 증가범위는 토탈스테이션에 의한 결과보다 작은 것을 확인하였다. 이는 상대적으로 수동적인 계측으로 수행되는 토탈스테이션의 계측결과가 다소 불규칙적이기 때문인 것으로 판단된다.

- (2) 계측결과를 바탕으로 VMS의 오차범위를 산정한 결과, 최소 및 최대 오차범위는 각각 $\pm 0.36\text{mm}$ 와 $\pm 0.87\text{mm}$ 산정되었으며, 이를 바탕으로 토탈스테이션에 대한 VMS의 오차량을 평가한 결과, 모든 실험조건에서 오차범위를 만족하는 것으로 평가되었다.
- (3) VMS의 오차율을 시간이력 및 계측위치에 따라 평균값으로 산정한 결과, 소수성 필터조건에 비하여 친수성 필터 조건에서 낮은 평균오차율을 보였으며, 이를 통해 오염된 지반의 침하량 계측에 있어서 VMS의 적용이 가능한 것으로 평가되었다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2013R1A1A2013432), and by a grant (MSIP, NRF-2019R1A2C2088962)

References

1. Chung, H. I. (2006), "The Variation of Density and Settlement for Contaminated Sediments During Electrokinetic Sedimentation and Remediation Process", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.9, pp.5-14.
2. Han J., Hong, K. and Kim, S. (2012), Application of a Photogrammetric System for Monitoring Civil Engineering Structures, SPECIAL APPLICATIONS OF PHOTOGRAMMETRY, pp. 73-96. (Book chapter)
3. Han, J. G. and Song, Y. S. (2003), "Displacement Measuring System for the Slope Stability Analysis Using the Softcopy Photogrammetry", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.4, pp.23-32. (in Korean with English abstract)
4. Han, J. G., Bae, S. H. and Oh, D. Y. (2001), "Application of photogrammetry method to measurement ground-surface displacement on the slope", *J. Korean Env. Res & Reveg. Tech*, Vol.4, No.3, pp.10-18.
5. Han, J. G., Chang, K. H., Jang, G. C., Hong, K. K., Cho, S. D., Kim, Y. S., Kim, J. M. and Shin, Y. E. (2008), "Development of a Visual Monitoring System for Deformation Measuring of Welded Members and Its Application", *Materials Science Forum*, Vols.580-582, pp.557-560.
6. Han, J. G., Hong, K. K., Kim, Y. S., Cho, S. D. and Kwak, K. S. (2007), "Development of Automatic Displacement Measuring System using 3D Digital Photogrammetry Image and Its Application", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.5, pp.53-62. (in Korean with English abstract)
7. Han, J. G., Kim, D. C. and Hong, K. K. (2015), "The Effects of pH on Microfluidics Flow Characteristics of Heavy Metals", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.1, pp.23-32.
8. Hannah, M. J. (1989), "A system for digital stereo image matching", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.55, No.12, pp.1765-1770.
9. Jeon, J. S., Lee, K. H. and Yoon, D. G. (2012), "Development of Automated Monitoring System for Soft Ground Settlement Based on Hole Sensor", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.39-52.
10. Ji, S. B., Lee, K. C., Lee, J. G. and Kim, D. W. (2016), "Evaluation of Stability and Settlement of In-Situ Capping of Contaminated Sediments Using Zeolites and Sands", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.17, No.11, pp.23-33.
11. Kim, J. Y., Kim, Y. S., Kwon, S. I., Kwon, H. I., Kim, J. H., Kang, S. W., Jang, H. S., Kim, T. H. and Kwon, H. H. (2012), "Integrated Instrumentation Management System for Prediction and Alarm of Ground Subsidence", *The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol.49, No.6, pp.822-834.
12. Kim, K. D. (2006), "Prediction and verification of ground subsidence at abandoned underground coal mine area using GIS : examples from Samcheok City, Kangwon-Do, Korea", Ph. D thesis, Yonsei University, Korea.
13. Lee, S. C., Hwang E. J. and Han J. G. (2006), "Efficient Image Retrieval Based on Minimal Spatial Relationships", *Journal of Information Science and Engineering*, Vol.22, No.2, pp.447-459.
14. Park, J. J., Choi, C. H. and Shin, E. C. (2013), "Analysis of Heavy Metal Contaminated Soils Remediation Using Reactive Drains", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.12, No.1, pp.29-38.
15. Shin, E. C., Lee, S. C. and Park, J. J. (2011), "The Comparison of Remediation Efficiency for Contaminated Soils under Vertical Drain System by Numerical Analysis Method", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.1, pp.29-36.
16. Shin, E. C., Park, J. J. and Lee, K. W. (2008), "Numerical Analysis of Soil Vapour Extraction Remediation System using Prefabricated Vertical Drain", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.7, No.4, pp.1-8.
17. Stewart, M. and Tsakiri, M. (2001), "Long-term dam surface monitoring using the global positioning system", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.6, pp.1-19.