

현장 모니터링 적용을 위한 풍화토와 함수비센서의 접촉체적에 따른 지반물성 연구

김만일* · 채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

A Study on the Geotechnical Property caused by Contact Volume between Weathered Soils and Moisture Sensor for Application of Field Monitoring

Man-Il Kim* and Byung-Gon Chae

Geological & Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

주파수 인피던스를 이용하는 ThetaProbe ML2x인 ADR 형식의 토양함수비센서를 적용하여 주문진 표준사, 상주 화강 풍화토, 장수 편마암풍화토를 대상으로 실험을 수행하였다. 시험의 목적은 측정센서의 측정 정밀도를 측정로드부 삽입 깊이에 따른 변화 양상을 파악하였다. 흙매질은 체적함수비 함량과의 관계를 비교하기 위하여 건조상태와 습윤상태로 구분하여 수행하였다. 측정결과에서 측정로드부가 흙매질 내 5 cm 이상 삽입되면 측정전압의 변화폭이 크게 감소하는 것을 파악하였다. 또한, 표준사와 같이 균질한 입자를 가진 흙보다는 점토와 실트 등과 같은 세립질을 함유한 화강풍화토와 편마암풍화토에서 측정전압이 안정적인 형태를 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 측정치는 측정로드부가 다공질매질과의 접촉 면적이 커질수록 안정적인 값을 제공한다.

주요어 : 토양함수비센서, 풍화토, 측정전압, 체적함수비

Evaluation of an amplitude domain reflectometry (ADR) type soil moisture sensor as ThetaProbe ML2x using the response of frequency impedance was performed in a variety of soil porous media such as Jumunjin standard sand, weathered granite soil at Sangju area, and weathered gneiss soil at Jangsu area. The tested soils were classified with a dried condition and a wetted condition for comparing with soil volumetric water content under different installed depths of the measurement sensor. In the results the part of measurement rod including one signal rod and three shield rod 6 cm in length was found to decrease the variation of measurement output voltage with insert 5 cm over into the soil porous media. The measurement output voltage was verified to more stable output voltage under weathered granite soils and weathered gneiss soils contained the fine grain materials such as clay and silt minerals than the gradual grain material like as the standard sands. Therefore, measurement values by soil moisture sensor can be offered the more stable values when an contact volume between soil porous media and measurement sensor increase.

Key words : soil moisture sensor, weathered soils, output voltage, volumetric water content

서 론

지반의 최상층인 지표면을 이루고 있는 표층은 원지반의 풍화작용에 의해 풍화 퇴적된 매질로써 이들은 식생의 성장권역을 이루고 있으며 불포화 상태로 존재한다. 하절기 강우와 동절기 강설에 의해 표토층을 통하여 수분이 침투함으로써 전반적으로 이들 영역에서의 함수비를

상승시키는 요인이 된다(Angelaki *et al.*, 2004; Muntohar and Liao, 2008; Kargas and Kerkides, 2008). 불포화 표층부에서의 이러한 복합적인 물리적 작용은 지반 변형을 발생시키는 원인 인자로 작용하게 된다. 이러한 지반 내에서 물성 변화를 장기적인 계측을 통하여 지반 변형의 예측 및 장기적인 관리가 가능할 것이다(Zhang *et al.*, 2000; 김만일과 Nishigaki, 2007; Kim *et al.*, 2008).

*Corresponding author: mikim@kis.kigam.re.kr

Table 1. Calibration equation for tested soils.

	$Y = AX^3 + BX^2 + CX + D$				R^2
	A	B	C	D	
Standard soil	0.85	-1.54	1.20	-0.09	0.97
Weathered granite soil	1.41	-2.32	1.58	-0.22	0.95
Weathered gneiss soil	0.74	-1.16	0.93	-0.07	0.98

는 표준사, 화강풍화토 및 편마암풍화토에 대한 측정전압에 따른 체적함수비 변화를 나타낸 것이다. 이러한 보정곡선으로부터 Table 1과 같은 각 흙매질에 대한 3차 다항식인 보정방정식을 유도하였다. 본 연구에서는 이들 보정방정식을 이용하여 측정 대상 흙매질의 체적함수비를 측정전압으로부터 산정하였다.

측정로드의 설치깊이는 시그널로드 끝부분에서 센서 본체쪽으로 4.0 cm, 5.0 cm, 5.5 cm, 6.0 cm로 각기 구분하여 매질의 전압을 측정하였다. 매질에 측정로드의 삽입 상태를 전체 측정로드 길이와 비교하면, 67%, 83%, 92%, 100%에 해당한다. 여기서, 아크릴 칼럼에 장착되는 측정로드의 길이 변화를 고려하여, 아크릴 칼럼과의 영향을 검토하였다. 아크릴 칼럼의 두께는 3 mm이며, 측정로드가 설치될 수 있도록 직경 4 mm 구멍을 4개 뚫었다. 이 구멍은 측정센서의 측정로드가 정확하게 아크릴 칼럼을 관통하여 설치될 수 있도록 한 것이다.

결 과

공기

측정센서부를 흙매질에 삽입하지 않고, 공기 중에 방치된 상태에서 측정센서의 측정전압을 측정하였다. 12볼트

정전압을 사용하기 때문에 측정센서부의 로드 사이에 매질이 접촉되지 않은 상태에서는 측정전압의 변화를 없었다. 즉, 측정센서를 매질에 삽입하지 않은 상태의 공기의 측정전압은 0.000 V로 나타났다. 이는 본 ADR 측정센서의 초기값으로 설정할 수 있다.

물

측정센서의 측정센서부를 매질인 물(tap water)과 접촉할 수 있도록 센서를 크게 4 구간으로 구분하였다. 6 cm 길이의 시그널로드와 월드로드에 대해 a 지점 4 cm, b 지점 5 cm, c 지점 5.5 cm, d 지점 6 cm로 구분하였으며, d 지점은 측정센서를 완전히 삽입시켰을 때의 최대 측정범위이다. 총 길이 6 cm인 4분의 스테인레스 로드 를 단계별로 물에 부분적으로 접촉시켜 측정전압의 변화를 측정하였다. 물에 대한 측정결과는 Fig. 3과 같다.

측정센서를 대기 중에 방치한 후 측정전압은 0.000 V이며, 물에 완전히 삽입시켰을 때 측정전압은 0.134 V로 측정되었다. Fig. 3에서와 같이 이 측정전압은 측정센서를 4.0 cm 삽입시 0.121 V였으나, 5.0 cm부터 6.0 cm까지의 측정전압은 0.134 V로 변화가 없었다. 측정센서가 도체인 물과 접촉했을 때는 정전압의 흐름이 매우 양호한 상태를 유지하였다. 따라서, 도체인 물과 부도체인 공기의 상반되는 조건 하에서 측정전압의 극단적인 변화를 확인할 수 있었다. 이는 불포화토를 구성하고 있는 흙매질과 공극 내의 공극수(pore-water)와 공기(pore-air) 등의 함량 정도에 따른 측정 물성변화를 충분히 파악할 수 있다. 또한, 측정센서가 5 cm 이상 매질 내 삽입시 측정전압의 손실이 거의 없는 것으로 나타났다. 물이 완전 도체인 점을 고려해 볼 때, 전기전도도가 낮은 매질에 대한 추가적인 특성을 파악할 필요가 있다.

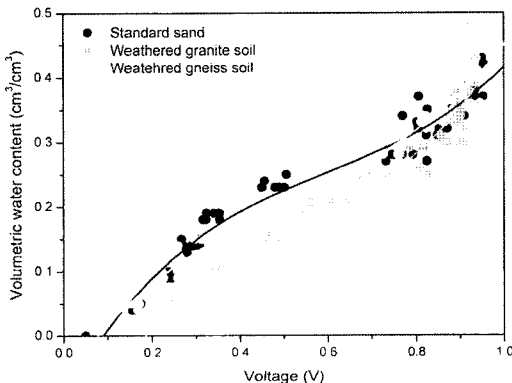


Fig. 2. Relationship between output voltage and volumetric water content for tested soils.

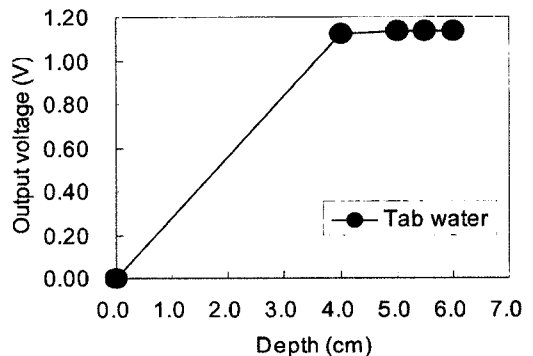


Fig. 3. Variations of output voltage for tap water with different measurement point.

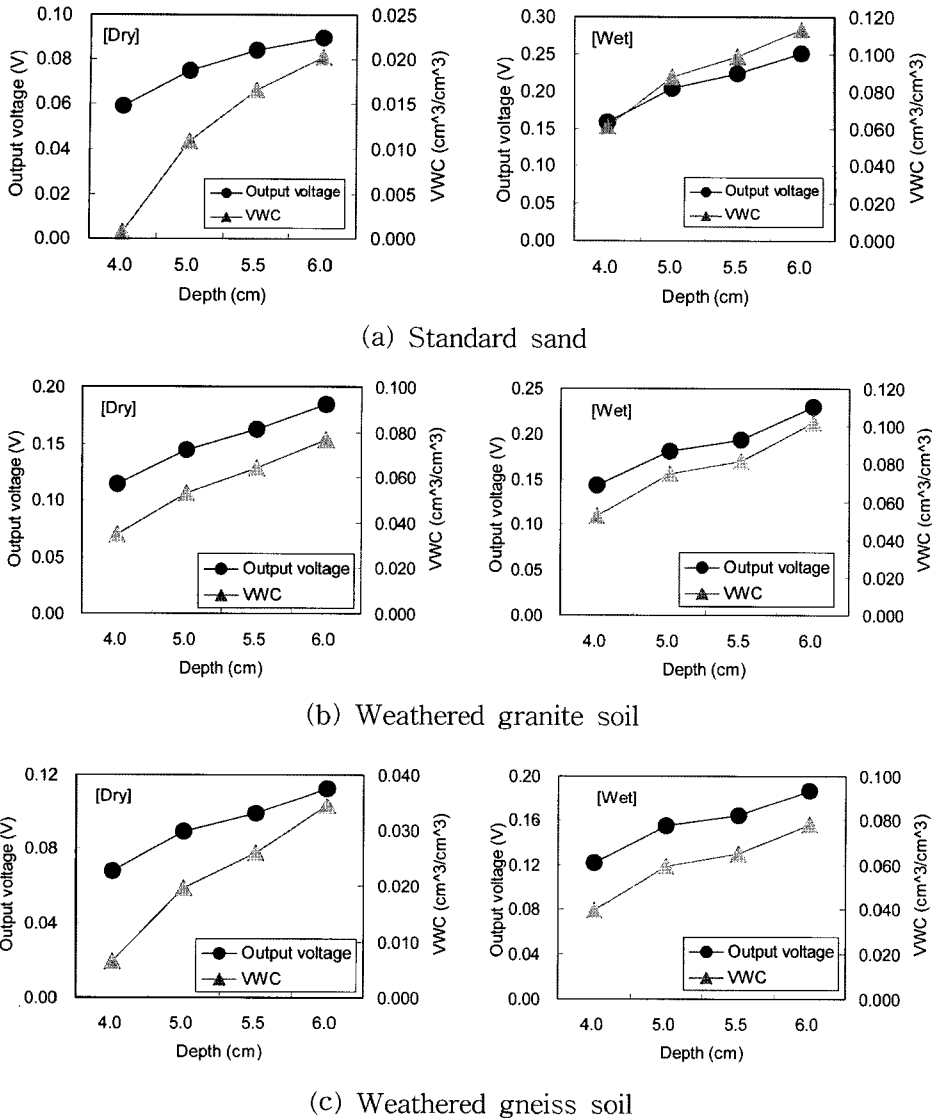


Fig. 4. Variations of volumetric water content and output voltage caused by inserted depth of 4.0 cm, 5.0 cm, 5.5 cm and 6.0 cm into the tested soils.

불포화 흙매질

표준사, 화강풍화토 및 편마암풍화토에 대한 측정센서의 측정로드 깊이별 측정전압의 변화를 측정하였다. 삽입 깊이는 앞서 실시한 실험조건과 동일하게 수행하였다. 실험은 흙매질의 표면에 수직으로 측정로드를 실험 깊이까지 삽입한 후 측정을 하였으며, 단계별로 동일 지점에 연속 삽입하여 각각에 대한 측정전압을 측정하였다.

Fig. 4는 건조 및 습윤 흙매질에 대한 측정 깊이별 측정전압의 변화를 도시한 것이다. 측정로드 깊이가 증가

할수록 측정전압이 증가하는 것으로 측정되었다. 측정전압은 건조상태 보다는 습윤상태가 약 2배 이상 큰 것을 확인하였으며, 이로부터 체적함수비도 약 1.5~2.3배 이상 차이를 갖는 것으로 나타났다. 측정센서의 측정깊이가 증가할수록 측정결과가 안정적인 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 측정로드에서 방출된 정전압이 흡입자와 흡입자 사이의 공극과 이들 내부에 존재하는 공기(pore-air)와 공극수(pore-water)에 의해 흡수 내지 반사되는 전압의 차이에 의해 좌우되는 것으로 판단된다.

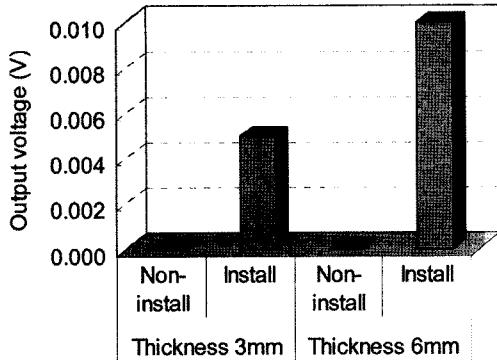


Fig. 5. Variation of output voltage caused by acrylic plate without insert the soils.

측정 민감도

측정센서의 측정로드부에 다공질매질이 아닌 아크릴판과 접촉되었을 때, 측정전압의 변화를 파악하기 위하여 측정 민감도를 평가하였다. 측정로드와 접촉된 아크릴판의 영향을 분석하여 향후 수행될 칼럼실험에 보다 정확한 실험조건을 재현하기 위한 목적으로 수행하였다. 또한, 제작된 칼럼에 측정센서의 설치 방법에 대해서도 함께 고려하였다.

아크릴판은 두께 3 mm로 사각형 형태로 성형하였으며, 아크릴판과 수직으로 ADR 측정센서가 설치될 수 있도록 측정로드 위치에 맞도록 직경 3 mm인 4개의 구멍을 뚫었다. 이렇게 제작된 아크릴판은 측정센서가 정확하게 장착될 수 있도록 제작하였다.

아크릴판을 이용한 측정센서의 측정전압 변화는 건조 및 습윤 표준사에 대해 수행하였으며, 아크릴판 미설치 및 설치에 따른 초기 측정전압의 측정치를 고려하여 시험 결과를 비교하였다. Fig. 5는 아크릴판 설치 유무에 따른 측정센서의 측정전압 변화를 보여준다. 3 mm 두께의 아크릴판을 설치하였을 때가 아크릴판 미설치보다 높은 측정전압을 가지는 것으로 측정되었으며, 아크릴판 6 mm 두께를 설치한 것이 3 mm 두께의 아크릴판을 설치한 상태보다 측정전압이 약 두 배로 크게 나타났다. 이러한 측정결과와 변화는 ADR 측정센서의 측정센서부 전 구간에서 정전압이 방출하여 정중앙부의 시그널로드에서 쉴드로드로 아크릴판을 따라 반사되어 되돌아오는 것으로 판단된다. 아크릴판을 따라 흡수된 측정전압의 크기가 0.005 V에서 0.010 V를 체적함수비로 환산하여도 대략 음의 값 내지 0 cm³/cm³을 가지기 때문에 실질적인 체적함수비 환산시에는 초기값의 변동폭으로 고려할 수 있을 것이다.

아크릴 두께에 따른 물성변화

두께 3 mm인 정사각형 형태의 아크릴판을 측정센서의 측정로드부에 완벽하게 밀착되도록 설치한 후, 측정센서에 아크릴판을 설치하지 않았을 때와 비교해 측정전압이 약 0.005 V 가량 증가하였다. 여기서는 아크릴판 설치 후 측정전압을 영점(zero setting)을 맞추지 않은 상태와 측정전압 0.005 V를 0.000 V로 영점을 한 경우 모두를 고려하여 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 건조 및 습윤 흙매질에 대한 측정센서 깊이별 측정전압과 체적함수비의 변화를 나타낸 것이다. 모든 흙매질에서 보는 바와 같이, 측정로드의 삽입 깊이가 깊어질수록 측정전압과 체적함수비가 함께 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 측정로드의 설치 깊이가 깊어질수록 측정전압의 변화폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 일정 깊이까지 측정로드가 매질과 접촉해야만 안정적인 측정전압을 측정할 수 있음을 나타내는 것이다. 아크릴판을 장착하고 데이터로거를 통해 수동으로 측정센서를 영점(0.000 V) 조정후, 건조 및 습윤 표준사를 깊이별로 측정후의 결과와 비교해볼 때, 측정 깊이 5 cm 이상에서 비교적 안정적인 측정전압 결과로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한, 흙매질의 체적함수비도 비교적 안정적인 값을 보이고 있다.

측정센서의 측정로드부에 두께 6 mm인 아크릴판을 설치하여 이전과 동일한 시험 조건하에서 실험을 수행하였다. 측정매질은 건조 및 습윤 표준사, 화강풍화토 및 편마암풍화토로 나누어 각기 깊이별로 측정하였다. 측정센서의 삽입 깊이는 4 cm, 5 cm, 6 cm 구간에서 측정후, 이들의 측정전압 변화를 파악하였다. 공기 중에서 아크릴판 미설치 및 설치에 의한 측정전압의 변화는 0.000 V에서 0.010 V로 증가됨을 확인하였다. 3 mm 두께의 아크릴판을 설치하였을 때는 측정전압이 0.005 V 였으나, 6 mm 두께의 아크릴판 설치 시에는 측정전압이 0.010 V로 두 배가량 증가하였다. 이는 두께 3 mm의 아크릴판을 통해 12볼트의 정전압이 측정센서 로드부로 방출하였을 때에는 측정전압이 0.005 V씩 증가되도록 기여하는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 두께 6 mm 아크릴판을 설치한 후 측정센서에서 측정된 측정전압의 변화를 삽입 깊이별로 나타낸 것이다. 건조 흙매질의 경우, 측정전압과 체적함수비 모두 증가하는 경향을 가지고 있으며, 측정로드의 깊이가 깊어질수록 측정결과 곡선의 기울기가 완만해지는 경향을 보인다. 습윤 흙매질에서도 동일한 결과를 보이고 있으며, 특히, 측정전압과 체적함수비의 기울기가 거의 동

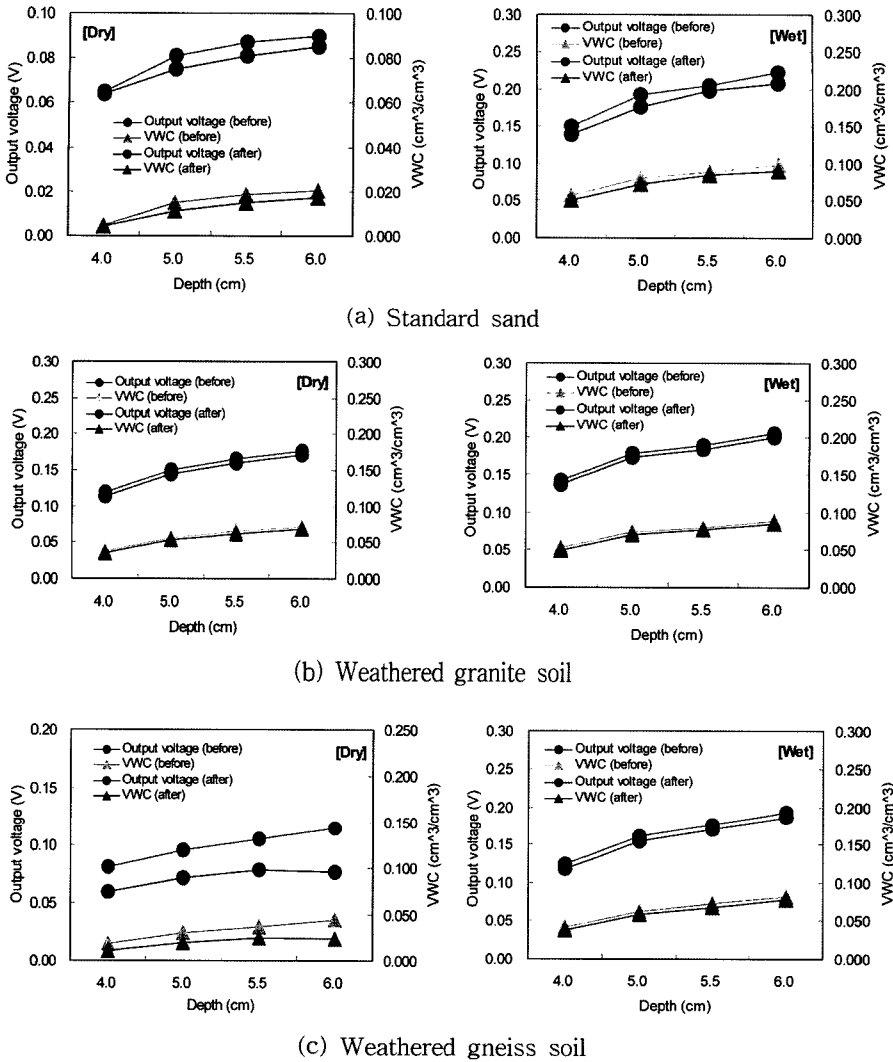


Fig. 6. Relationship between non-install plate and install plate by 3 mm thickness under dried and wetted soil conditions; notations of “before” and “after” are non-zero setting and modified zero setting of output voltages on the initial condition.

일한 것으로 나타났다.

초기 측정전압인 0.010 V를 0.000 V로 영점 조절한 후, 건조 및 습윤 흙매질에 대한 측정전압과 체적함수비 변화를 Fig. 7에서와 같이 영점 전(before)과 영점 후(after)로 나누어 비교하였다. 측정결과에서 측정센서의 영점 후를 기준으로 하여 측정전압과 체적함수비의 관계로 영점 전과 비교해 측정전압은 약 0.006 V 가량 감소, 체적함수비는 약 0.004 cm³/cm³ 가량 감소함을 알 수 있었다. 측정전압의 변화폭이 대기 중에서 측정된 0.010 V와 비교해 약 40% 감소하였으나 체적함수비 변화에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

토 의

아크릴판 설치에 따른 측정센서의 측정전압 영향을 건조 및 습윤조건을 갖는 세 종류의 흙매질로부터 분석하였다. 3 mm 두께의 아크릴판이 측정로드부를 관통하여 측정센서 본체부에 밀착되게 설치하였을 때, 측정전압은 0.005 V로 설치 전과 비교해 다소 높게 나타났으며, 6 mm 두께의 아크릴판을 설치하였을 때에는 측정전압이 0.010 V로 3 mm 두께보다 두 배가량 높은 측정전압을 나타내었다. 이는 측정대상 매질과 접촉하기 전인 공기 중에서 측정된 값으로 아크릴판의 접촉면을 통해 정

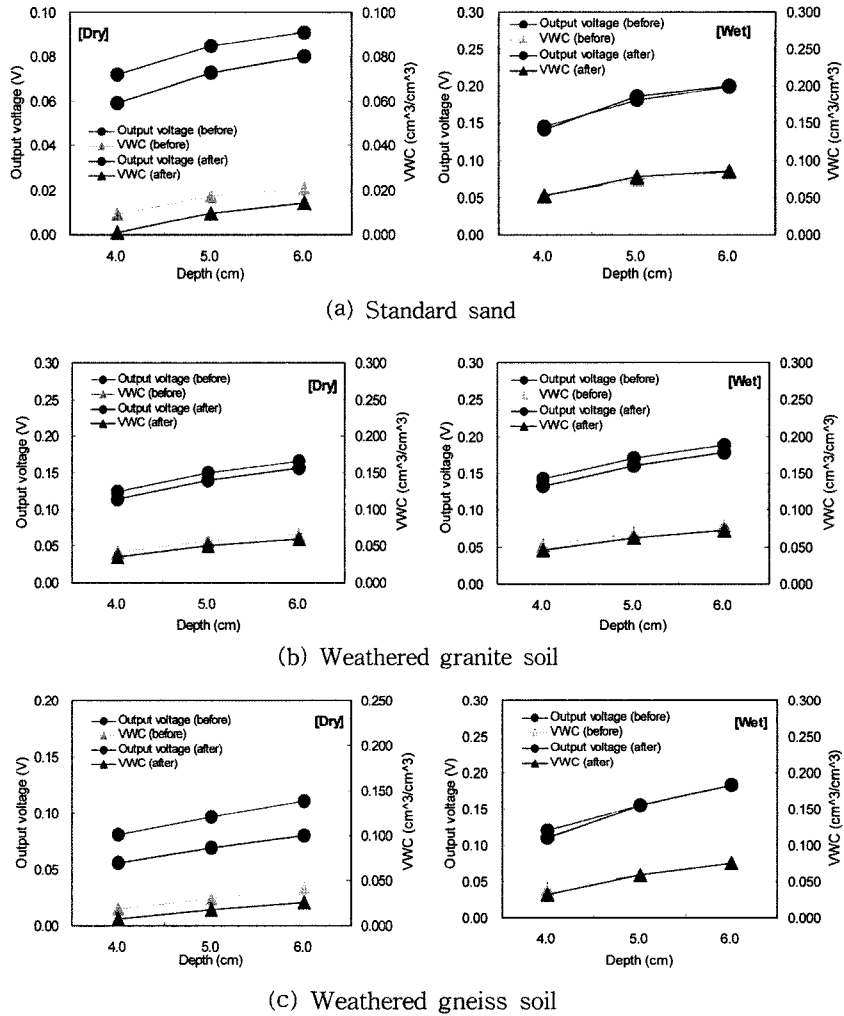


Fig. 7. Relationship between non-install plate and install plate by 6 mm thickness under dried and wetted soil conditions; notations of "before" and "after" are non-modified and zero setting of output voltages on the initial condition.

전압이 방출되고 있음을 보여주는 것이다.

Miller and Gaskin (1997)는 측정센서의 측정전압 변화로부터 다공질매질의 체적함수비 환산법을 제안하였으며, 이를 Fig. 8에 도시하였다. 다공질매질을 유기질 흙 (organic soil)과 무기질 흙(mineral soil)으로 구분하여 각각의 측정전압 분포에 따른 체적함수비를 산정하였다. 여기서, 유기질 및 무기질 흙매질의 체적함수비가 $0 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 인 경우, 측정전압이 유기질 흙은 약 0.040 V , 무기질 흙은 약 0.090 V 의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 근거로 볼때, 측정센서의 초기 측정전압이 최대 0.010 V 로 공기 중에서 측정된 0.000 V 보다 높게 나타났으나, 이를 Table 1에 제시한 보정방정식을

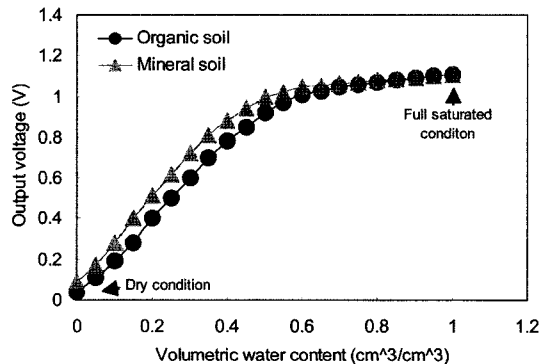


Fig. 8. Variations of volumetric water content between organic soils and mineral soils.

이용해 체적함수비를 계산하면 체적함수비 변화에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

측정대상 흙매질에 대한 측정결과가 아크릴판을 설치한 후 측정전압의 초기값과 영점으로 수정한 수정값과의 관계에서 측정전압은 건조상태에서 평균 0.005 V, 습윤상태에서 평균 0.013 V, 체적함수비는 건조상태에서 평균 0.002 cm³/cm³, 습윤상태에서 평균 0.006 cm³/cm³ 범위 내 분포함을 확인하였다. 측정결과와 분포는 전반적으로 측정센서의 측정로드부가 매질과 접촉 면적이 커질수록 안정적인 측정전압을 갖는 것을 알 수 있다.

측정센서의 측정로드 길이가 6 cm이나 본 실험결과 5 cm 이상 매질과 접촉하였을 때는 안정적인 측정전압을 측정할 수 있는 것으로 판단된다. 특히, 측정 대상매질의 체적함수비 함량 정도에 따라 측정전압이 점진적으로 증가하며, 건조시료보다는 습윤시료가 매우 높은 측정전압을 갖는다. 흙매질의 입도분포와 비교해 보면 균질한 모래질 성분을 다량 함유한 표준사보다는 세립질인 점토와 실트를 함유한 화강풍화토와 편마암풍화토에서 측정전압이 더 안정적인 양상을 갖는 것으로 나타났다. 이는 부도체인 다공질 시료보다는 도체인 물의 함량이 높을수록 전압의 전달 환경이 우수하기 때문인 것으로 판단된다.

결 론

자연사면과 인공사면 등 급경사지를 대상으로 하는 지반변형을 파악하기 위해서는 불포화토 내에서 강우 발생의 초기단계부터 침투시간에 따른 침투수 거동을 지배하는 침윤선 분포를 신속하고 정확하게 측정할 필요가 있다. 이를 위해 정전압의 인피던스 반응을 이용하여 매질의 체적함수비를 측정할 수 있는 토양함수비 측정센서를 적용하여 불포화 흙매질에 대한 측정 정도를 측정센서의 설치 환경을 고려하여 파악하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 공기 중에서 측정전압은 0.000 V, 물에 대해서는 측정센서의 삽입 깊이에 따라 증가하였으나, 측정센서부가 5 cm 이상 삽입시점부터는 동일한 측정값을 나타내었다.

2) 불포화토의 경우, 각각의 삽입 깊이에 따라 측정치가 점진적으로 증가하였으며, 측정센서가 5 cm 이상부터 측정전압의 변화폭은 절대적으로 감소하였다.

3) 두께 3 mm와 6 mm의 아크릴판을 각기 설치하였을 때, 측정센서의 측정치는 0.005 V와 0.010 V로 약 2배

이상 증가함을 확인하였다. 이는 아크릴판과 접촉된 측정센서의 측정로드부에서 정전압이 방출되고 있음을 의미한다. 이 측정치 범위에 대해 체적함수비 변화와 비교한 결과, 측정전압이 0.010 V 이하에서는 흙매질의 체적함수비 변화에 거의 영향을 주지는 않는다.

4) 측정로드부가 다공질매질과의 접촉 체적이 증가할수록 측정치도 함께 증가하기 때문에, 향후 측정센서의 설치 환경이 측정결과에 영향을 줄 것으로 판단된다. 특히, 압편이 많은 지역의 풍화토층을 대상으로 측정센서를 설치 시에는 측정로드부와의 접촉 체적을 최대한 확보하는 것이 중요하다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태재해 예측 및 저감기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김만일, 채병곤, 조용찬, 서용석, 2008, 국내 풍화토의 강우 침투특성 분석을 위한 실험연구: 토양 체적함수비 분석 및 적용성 평가, 지질공학, 18(1), 83-92.
- 김만일, Makoto Nishigaki, 2007, 불포화토 유효공극 내 추적자 침윤선 거동 특성 평가, 지질공학, 17(1), 41-47.
- Angelaki, A., S.-Makrantonaki, M. and Tzimopoulos, C., 2004, Laboratory experiments and estimation of cumulative infiltration and sorptivity, Water, Air, and Soil Pollution: Focus 4, pp.241-251.
- Delta-T Devices, ThetaProbe soil moisture sensor: user manual ML2-UM-1.
- Gaskin, G.J. and Miller, J.D., 1996, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, Journal of Agricultural Engineering Research 63, 153-159.
- Kargas, G. and Kerkides, P., 2008, Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theat probe, Irrigation and Drainage, DOI: 10.1002/ird.364.
- Kim, M.-I., Chae, B.-G. and Jeong, G.-C., 2008, Correlation of unsaturated soil and dielectric property for monitoring of subsurface characteristics: development of unsaturated dielectric mixing models and its application, Environmental Geology, DOI 10.1007/s00254-008-1281-5.
- Miller, J.D. and Gaskin, G.J., 1997, The development and application of the ThetaProbe soil water sensor, MLURI Technical note.
- Muntohar, A.S. and Liao, H.-J., 2008, Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon using a hydrological-geotechnical model, Environmental Geology, DOI 10.1007/s00254-008-1215-2.

Quinones, H. Ruelle, P. and Nemeth, I., 2003, Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors, *Irrigation and Drainage*, 52, pp.203-217.
Zhang, J., Jiao, J.J. and Yang, J., 2000, In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China, *Engineering Geology*, 57, pp.31-38.

2008년 8월 16일 원고접수, 2008년 9월 17일 게재승인

김만일

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 과학로 92
Tel: 042-868-3117
Fax: 042-868-3415
E-mail: mikim@kis.kigam.re.kr

채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 과학로 92
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-868-3415
E-mail: bgchae@kigam.re.kr