

## 수위변동에 따른 포화/불포화 매질의 체적함수비 변화 특성 평가 Properties of the variations of volumetric water content on the saturated/ unsaturated media by water-level fluctuations

김만일<sup>1)</sup>, Man-Il Kim, 임헌태<sup>2)</sup>, Heon Tae Lim, 김형수<sup>3)</sup>, Hyoung-Soo Kim

<sup>1)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 연구원, Researcher, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

<sup>2)</sup> (주) 소암컨설팅, Soam Consultant Co., Ltd.

<sup>3)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소 소장, Director, Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO

**SYNOPSIS** : This study measured the change of media properties using Time domain Reflectometry (TDR) and Tensionmeter (TM) to measure volumetric water content of soil affecting in land subsidence and pollutant diffusion under saturation/unsaturated condition by water-level fluctuations. Also, actual water content compared their changes aspect by dry oven test for quantitative determinations of these measured values. In the case of TM, initial unsaturated condition confirmed that range in dimension of each other different according to their establishment depth, but measured values of TM can know that is shown measured value in almost similar measuring range under drain condition after the first injection. Also, the results of TDR showed that can measure enough change of volumetric water content in saturation/unsaturated condition by water-level fluctuations. Therefore, we are judged that TDR measurement equipment is very effective to measure the variations of volumetric water content and water-level being caused in groundwater level fluctuations.

**Key words** : Time Domain Reflectometry (TDR), Tensionmeter, Water-level fluctuation, Volumetric water content

### 1. 서 론

지하수와 지표수를 포함하는 수자원은 국내에서 지난 40여 년간 국가 산업발전과 고도 경제성장을 안정적으로 뒷받침하기 위한 수자원개발의 노력이 활발히 진행되어 왔다. 강우와 강설 등에 의해 발생된 지표수는 수문환경시스템을 통해 지반내로 유입되어 최종적으로 지하수 함양으로 이루어진다. 지하

수는 일반적으로 암반의 파쇄대와 같은 구조지질학적 불연속면에 존재하는 암반지하수, 충적층 내 분포하는 충적지하수 등으로 나누어 볼 수 있다. 특히 충적지하수의 경우 지하수위가 비교적 지표면에 가까이 있어 지표수의 영향을 매우 민감하게 받는다. 잉여 수자원으로 고려했던 충적지하수의 이용 방안은 직접 인공함양, 지하수담 건설, 강변여과취수 등과 같은 다양한 방면에서 용수 확보 기술이 발전되어 중요한 수자원으로 인식되고 있다(한국수자원공사, 2004; Huisman & Olsthoorn, 1983). 따라서 충적지하수는 지표수 유입과 지하수 이용에 의해 지하수위 변동을 발생시키게 된다.

충적층 내에서의 지하수위 변동은 지반침하 내지 오염물질의 확산을 촉진시키는 결과를 초래하게 될 것이며, 더 나아가 충적지하수의 저류능력을 결정하는 충적층 주변 지질매질의 공극률 내지 유효공극률을 감소시켜 지하수 함양능력을 저해하는 요인으로 작용될 가능성을 내포하고 있다. 표토층을 포함한 충적층 주변 매질의 경우 강우 등에 의해 발생한 지표수가 지하로 침투하여 지속적인 지하수 함양이 이루어진다. 지반 매질이 가진 2가지 특성은 포화/불포화 상태로 존재해 있으며, 이들의 영역은 지하수 함양 특성에 따라 지하수위 상승과 하강을 반복함에 따라 포화/불포화 영역에서의 체적함수비 변화를 보인다.

본 연구에서는 지하수위 변동에 따른 포화 및 불포화 조건하에서 지반침하 및 오염물질 확산 등에 영향을 미치는 지질매질의 체적함수비 거동특성을 파악하기 위하여 체적함수비만을 측정할 수 있도록 고안된 Time Domain Reflectometry 측정 프로브(이하 TDR)와 흡의 suction을 측정하는 Tensionmeter를 이용하여 포화 및 불포화조건을 발생시키는 수위변동에 따른 매질의 물성치 변화를 실시간으로 측정하였으며, 이들 측정치의 정량적 검토를 위하여 건조시험을 통해 체적함수비의 변화를 실내 칼럼시험을 통하여 비교검토하였다.

## 2. 시료 및 방법

시료는 표준사료써 시험 전 24시간동안 건조기에 넣어 건조시킨 후 48시간 실내에 방치하였다. 표준사는 주문진에서 생산된 것으로써 조립질의 균등한 입도분포를 가지고 있다. 최대 압밀 및 최소 압밀상태에서 투수시험을 실시한 결과, 각각  $0.38 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 와  $0.63 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 로 약 2배 이상의 차이를 나타내었다.

시험에 사용된 아크릴칼럼의 크기는 가로 132cm, 세로 78cm, 폭 7cm의 크기이며, 실제 시료가 적재되는 칼럼의 크기는 가로 120cm, 세로 76cm, 폭 5cm로써 아크릴칼럼 양쪽에 다공질 판을 설치하여 시료와 격리시켜 정량펌프를 이용하여 일정한 유속으로 물의 주입과 배출이 원활히 이루어질 수 있도록 공간을 설치하였다. 그림 1은 측정장치가 설치된 칼럼의 모식도와 설치도를 보여주고 있다.

표준사 내에서 수위변화에 따른 물성치를

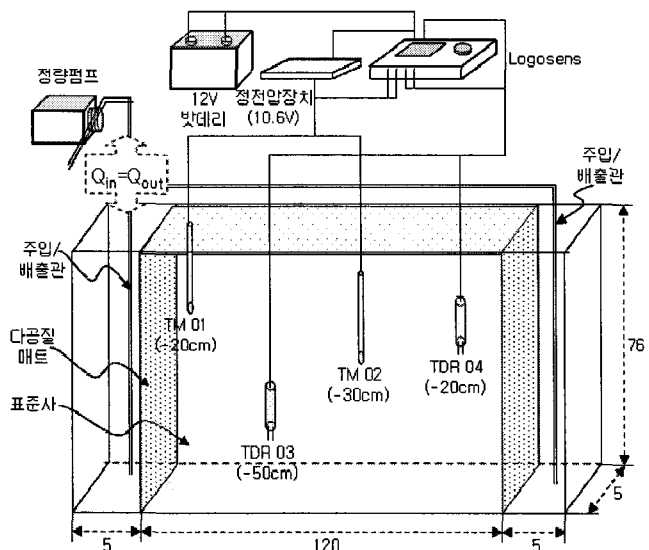


그림 1. 시험장치 설치 (unit:cm)

측정하기 위한 장치로는 시료의 함수비를 측정할 수 있는 TDR 센서 프로브(TRIME-IT, IMKO Micromodultechnik GmbH, 체적함수비 측정범위: 0~100%)와 suction을 측정하는 Tensionmeter (Eijkelkamp, Agrisearch Equipment), 이 측정장치의 제어 및 측정자료를 실시간으로 저장할 수 있는 logoSens(OTT Hydrometrie), 그리고 전원공급을 하기 위한 12V 배터리로 구성되어 있다. 여기서 TDR 센서 프로브는 일반적으로 알려진 TDR 계측장치(O'Connor and Dowding, 1999)의 측정 프로브만을 특수 제작하여 체적함수비만을 측정할 수 있다. 특히 체적함수비를 측정할 수 있는 TDR 센서 프로브는 두 개의 50mm 로드가 측정대상 매질 내 설치됨과 동시에 물성치를 측정할 수 있다. 이 측정장치들은 외부에서 전원을 공급받아 동축케이블로 각기 연결되어 있기 때문에 실내 및 실외에서 운영이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

칼럼 내 시료의 적재방법은 높이 76cm 아크릴칼럼을 4구간(20cm, 20cm, 20cm, 16cm)으로 구분하여 시료를 칼럼 상단부에서 부어 넣었으며, 이 때 이미 설정된 측정장치의 설치깊이에 맞추어 TDR 센서 프로브와 Tensionmeter를 불포화 상태의 표준사 내에 각기 설치하였다. 각 측정장치의 설치깊이는 표준사의 표층을 기준으로 하였으며, TRIME-TDR (이하 TDR로 기재) 센서 프로브의 경우는 -50cm (TDR03)와 -20cm(TDR02), Tensionmeter의 경우는 -20cm(TM01)와 -30cm(TM02)의 하단부에 각기 설치하였다. 각 깊이에 따라 다르게 측정장치를 매설한 것은 인위적인 수위변화에 따른 체적함수비 및 suction을 파악함과 동시에 변동되는 수위를 실측하기 위함이다. 또한 깊이 -20cm에 TDR과 Tensionmeter를 동일한 수평방향으로 설치한 것은 동일한 위치에서 수위가 접했을 때 두 측정장치에서 수위 변동의 측정 정도를 파악하기 위함이다.

시험 칼럼의 제작은 노건조된 표준사 시료를 사용하였으며, 시료 내 함수비를 변화시키기 위해 정량펌프(Peristaltic pump)를 설치하여 물의 주입 및 배수가 가능하도록 하였다. 주입과 배수는 10리터당 4분이 소요되도록 동일한 조건으로 수행하여 불포화 및 포화조건을 수위 조절만으로 가능하도록 하여 2회에 걸쳐 실시하였다(표 1). 물이 주입되는 동안 각각의 깊이에 설치되어 있는 TDR 센서 프로브와 Tensionmeter에서 수위 변화에 따른 체적함수비와 suction을 5분 단위로 측정할 수 있도록 고정시켰다. 측정된 자료는 LogoSens에 측정시간 단위로 자동 저장되며, 시험이 종료된 후 LogoSens 전용 소프트웨어를 사용하여 자료를 취득하였다.

표 1. 주입/배수 시험간격

시간 (분)	주입/배수 방법	기타
0	1차 주입시작	
135	1차 주입완료 후 배수시작	
1080	배수완료 후 2차 주입시작	주입/배수시
1200	2차 주입완료	정량펌프를 사용
1260	배수시작	(25rpm: 2.5ℓ/min)
1380	배수완료	
1665	시험 측정완료	

### 3. 시험결과 및 토의

제작된 칼럼에 대해 일정시간 간격으로 물의 주입과 배수를 2회 수행하는 동안 수위 변화에 따른 표준사 시료 내에서 발생하는 표준사 시료의 압밀침하 및 체적함수비 변화를 파악하였다.

### 3.1. 수위변동에 따른 압밀침하

초기 건조상태로 제작된 칼럼의 경우 칼럼 상단부에서부터 표준사를 일정 높이까지 단계적으로 부어 넣었기 때문에 표준사가 가지는 공극률이 매우 클 뿐만 아니라 느슨한 상태를 보였다. 이 조건하에서 칼럼 양단의 하단부로부터 물을 2.5ℓ/min으로 주입하여 서서히 수위를 상승시켰다. 건조 상태에서 물을 주입하였기 때문에 하단부의 표준사에서 관찰된 물의 침투는 양쪽 주입부 주변에서 수위 상승폭이 다소 높게 나타났지만 주입수가 칼럼 중앙부에서 서로 합류한 후부터는 거의 일정한 수위를 보이며 함께 상승함을 확인하였다. 또한 칼럼의 주입부 양단에서의 수위보다 시료의 공극 내로 침투한 수위가 약 2.0~2.5cm 가량 높게 나타났다. 이는 흡입자의 장력과 모세관 현상에 의해 상승한 결과로써 이들의 포화도는 실제 수위 하단부보다 낮을 것으로 판단된다.

건조상태의 표준사에 주입수가 약 30% 정도 주입되었을 때 칼럼 상단부와 경계를 이루던 표준사가 서서히 침하하는 경향을 보여주었다. 그림 2는 2회에 걸쳐 주입과 배수를 통해 이루어진 시료 내 수위변화에 따른 압밀침하 분포 특성을 나타낸 것으로써 2차 주입/배수과정보다 1차 주입/배수과정에서 가장 큰 압밀침하 형태를 보여주었다. 이는 표준사의 공극 내로 주입수가 침투 및 배수되면서 칼럼 하단부에서부터 압밀침하가 발생되었기 때문이다. 이러한 현상은 칼럼 내에서 수위가 상승할수록 압밀침하량이 증가함을 보여주었다. 특히 1차 주입/배수가 완료된 후 최대 침하량은 약 6cm 정도 진행되었으며, 최대 침하현상을 보이는 지점은 칼럼의 중앙부에서 발생되었다. 또한 2차 주입/배수 과정에서의 최대 침하량은 약 3.4cm 가량으로 1차 주입/배수 단계보다 작게 나타났다.

결과적으로 함수비가 낮은 시료에서의 주입/배수과정은 시료의 압밀침하에 매우 큰 영향을 주며, 칼럼의 양단에서 보다는 중앙부에서 압밀침하 현상이 크게 나타남을 확인하였다. 그리고 초기 수위 변동에 의해 압밀침하량이 가장 크며, 2차 수위변동에 따른 압밀침하량은 초기에 비해 50% 가량 감소함을 알 수 있다.

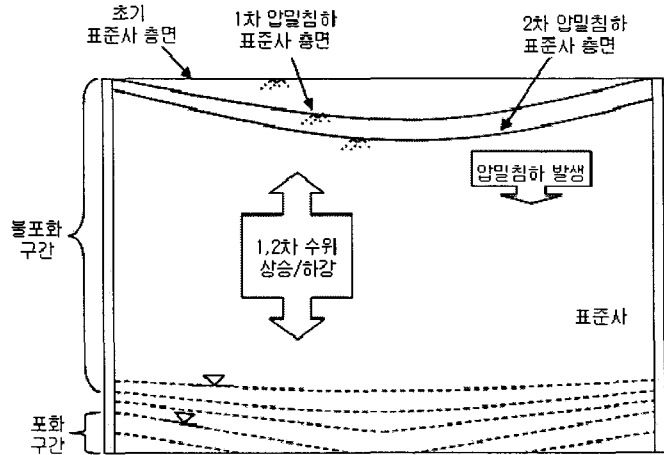


그림 2. 수위변화에 따른 압밀침하 분포 특성 (1차>압밀침하>2차)

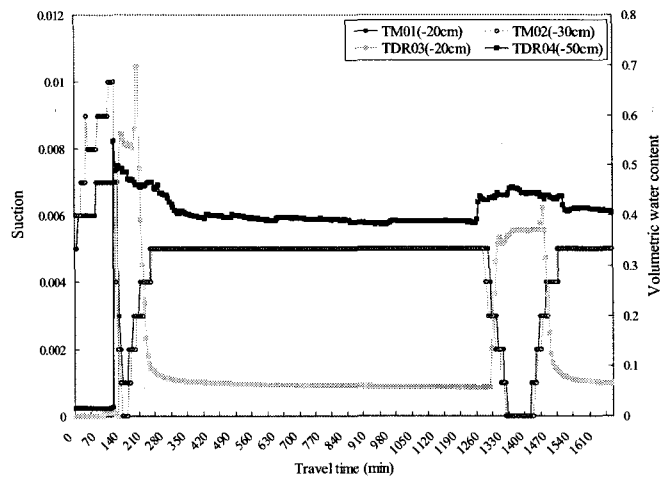


그림 3. 수위변동에 따른 함수비와 suction의 변화

### 3.2. 수위변동에 따른 체적함수비 변화

제작된 칼럼에서의 초기 체적함수비가 0.009로서 거의 건조상태와 비슷한 불포화 상태에서 서서히 물을 주입하여 표준사 표층까지 수위를 상승시켜 포화상태가 될 때까지 수위를 상승시켰다. 그 후 주입과 동일한 조건으로 배수한 후 다시 2차 주입과 배수를 반복하였다. 이 작업을 수행하는 동안 표준사 표층에서의 침하와 수위 상승과 함께 각 센서가 설치된 깊이에서 물성치의 변화를 파악할 수 있었다.

그림 3은 주입과 배수시 표준사 시료에서의 체적함수비와 suction 변화를 나타낸 것이다. -20cm와 -30cm에 설치된 tensionmeter에서는 초기 체적함수비 0.009로써 거의 건조상태에서 칼럼 하단부에서부터 1차 주입과 동시에 각 깊이에 매설된 tensionmeter에서의 suction 측정치가 1차 주입 전에는 TM01이 0.007, TM02이 0.01의 범위에 분포해 있었으나 주입에 의해 수위가 상승함에 따라 측정치는 급격히 하강(TM01: 0.001, TM02: 0.000)하는 경향을 보였다. 그 후 1차 배수 동안 각 지점의 suction 측정치는 다시 상승하여 0.005 범위 내에서 동일한 값을 보였다(그림 3).

1차 배수가 완료된 상태로 약 900분간 유지한 상태에서 2차 주입을 실시한 후 두 tensionmeter에서 측정된 suction은 0.005로 일정하게 나타났으며 이러한 현상은 2차 주입이 완료되는 시간까지 지속된 후 2차 배수 시작과 동시에 급격히 감소하여 suction이 0으로 내려갔다. 배수가 완료된 후 약 300분간 유지한 상태에서는 다시 suction이 상승하여 0.005의 범위 내에 분포함을 알 수 있다.

여기서 주입완료 후 수행된 배수과정에서 중력배수가 이루어졌기 때문에 표준사 입자사이에 분포하는 공극수의 배수가 느리게 작용하여 tensionmeter에서 측정된 suction 값이 1차 주입/배수시보다 2차 주입/배수과정에서 느리게 측정되었다.

-20cm와 -50cm에 설치된 TDR 센서 프로브에서는 tensionmeter에서 측정된 suction의 변화 구간과 비교해 유사한 변화 양상을 보여주고 있다. 건조된 표준사에 매설된 TDR 센서 프로브에서 측정된 체적함수비는 건조시험에서 측정된 초기 체적함수비와 거의 비슷한 결과값을 보이고 있으며, 주입과 배수를

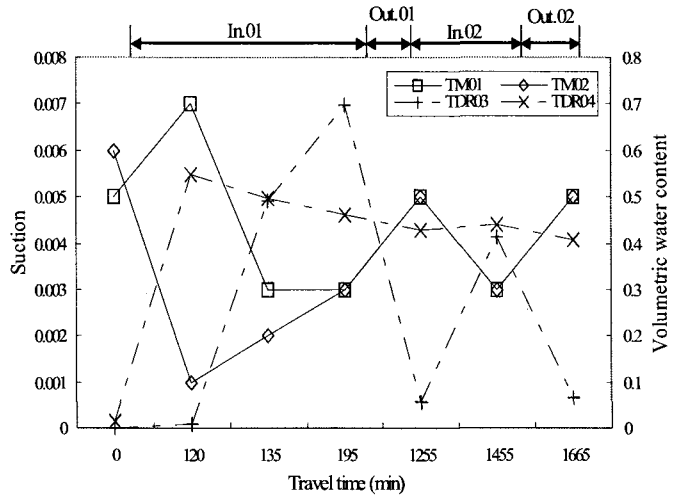


그림 4. 주입/배수에 따른 suction-함수비 변화(In.:inflow, Out.:outflow)

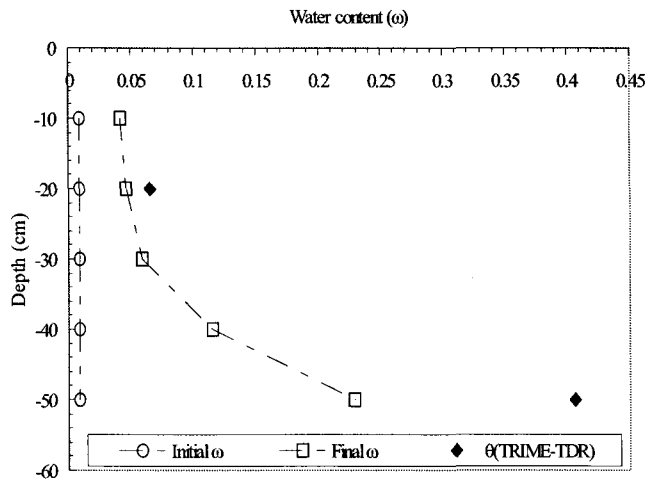


그림 5. 건조시험을 통해 산정된 초기 및 최종 함수비 변화( $\theta$ : volumetric water content)

2회 반복한 시험에서 각 TDR 센서 프로브가 설치된 깊이에 수위가 올라왔을 때 측정값의 급격한 상승을 확인하였다. 특히 -20cm에 설치된 TDR03의 경우에는 주입과 배수시 측정된 체적함수비 차이가 가장 크게 나타났으며, -50cm의 TDR04는 체적함수비 차이가 거의 보이지 않고 있다. 이러한 원인은 표준사 시료에 대해 주입이 완료된 시점에서 중력 배수시켰기 때문에 칼럼의 상단부보다는 하단부에서 보 유수(중력 배수되지 않는 물)가 다량 존재하기 때문이다.

그림 4는 tensionmeter와 TDR 센서 프로브에서 측정된 결과를 수위변동에 따른 변화를 도시한 것으로 주입과 배수시 두 측정장치에서 유사한 시간대에 측정값의 변화를 명확히 확인하였다. 이는 수위 변화에 따른 표준사 시료 내에서의 체적함수비 내지 suction 변화를 충분히 파악할 수 있기 때문에 본 측정장치의 활용도는 매우 높을 것으로 판단된다. 하지만 tensionmeter에서의 측정값이 초기 건조상태에서는 suction이 0에 가까운 값을 가지지만 포화상태와 불포화상태를 반복적으로 수행되는 동안 suction이 5배 정도 증가함을 알 수 있었다. 이는 시료가 포화상태에서 불포화상태로 배수가 이루어지더라도 매질 내에는 일정량 이상의 물을 포함하게 됨에 따라 suction이 높게 나타난 것으로 판단된다.

1차, 2차 주입 및 배수시험에서 측정된 suction과 체적함수비 변화를 시험 초기와 최종단계의 관계를 나타낸 것으로써 TDR 센서 프로브의 경우 칼럼 상단부(-20cm)와 하단부(-50cm)에서 배수작업 후 매우 큰 차이를 보이고 있다. 하지만 tensionmeter의 결과는 1차 주입시 suction의 차이를 보일 뿐 최종단계로 갈수록 동일한 측정값을 나타낸다. 이는 포화상태와 불포화상태를 반복하면서 이미 표준사 매질 내 일정조건의 체적함수비를 갖고 있는 상태로 바뀌었기 때문에 더 이상의 suction이 변하지 않기 때문이다.

TDR 센서 프로브에서 측정된 체적함수비 변화를 건조시험을 통해 얻어진 함수비와의 관계를 그림 5에 도시하였다. 건조시험으로 얻어진 함수비 변화는 건조상태에서의 초기 함수비(initial water content)와 시험이 종료된 후인 최종 함수비(final water content)이다. 그리고 주입/배수시험이 종료된 후 -20cm와 -50cm에 설치된 TDR 센서 프로브에서 측정된 측정된 체적함수비를 함께 나타낸 것이다. 일반적으로 하단부로 배수를 할 경우 중력배수상태를 그대로 유지하기 때문에 상단부보다는 매질이 보유하고 있는 함수비가 높게 나타났다. 이는 시험 종료 후 각 심도에서 10cm 간격으로 채취된 시료의 함수비 변화곡선에서도 이러한 관계를 보이고 있다. 특히 -50cm에서 채취된 시료의 함수비와 실제 TDR 센서 프로브에서 측정된 체적함수비가 약 2배 이상 차이를 보이는 것은 시험 종료 후 원활한 시료 채취가 이루어지지 않았기 때문에 함수비가 낮게 나타난 것으로 사료된다. 이러한 문제를 최소화하기 위해서는 시료 채취에 사용되는 도구의 고안이 필수적이며, 높은 체적함수비 함량에서의 TDR 센서 프로브 측정값의 정확도를 고려해야만 할 것이다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 실험연구에서는 포화 및 불포화상태가 반복적으로 변화할 경우, 표준사 매질 내에서 발생하는 압밀침하 현상 및 함수비 변화를 측정하였다. 이러한 물리적 현상은 강우에 의해 침투수가 발생되어 지하수로 함양 방식의 인공함양과 충전층 대상 강변여과 등에서 지하수위 변동에 따른 포화 및 불포화 영역이 발생된다. 특히 함수비 변화를 측정하기 위하여 표준사 칼럼 제작 전과 시험이 종료된 시점으로 나누어 건조시험을 통하여 표준사의 함수비를 직접 측정하였다. 그리고 체적함수비 측정장치인 TDR 센서 프로브 및 suction 측정장치인 tensionmeter를 적용해 수위 변동에 따른 포화 및 불포화상태에서의 물 성치 변화를 측정장치가 설치된 심도에 대해서 실시간으로 측정하였다.

Tensionmeter 측정결과에의 경우, 초기 불포화조건에서는 이들의 설치심도에 따라 서로 상이한 범위 내에 분포함을 확인하였으나, 1차 주입 후 배수조건 하에서 Tensionmeter의 측정치가 거의 동일한 측정

범위에서 측정치를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 측정범위의 상태를 고려해 볼 때, 포화 및 불포화를 반복할 경우에는 Tensionmeter의 사용 범위가 제한적임을 지시하는 것으로 사료된다. 반면 TDR의 측정결과에서는 수위 변동에 따른 포화 및 불포화 조건에서 정확한 체적함수비의 변화를 충분히 파악할 수 있음을 확인하였다. 따라서 지하수위 변동에 따른 체적함수비 변화 내지 수위의 상승과 하강 여부를 파악하기 위해서는 TDR 측정장치의 적용이 매우 효과적일 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발, 과제번호 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

1. 한국수자원공사, 2004, 수자원의 지속적 확보기술개발사업: 지속가능한 지하수 개발 및 함양기술개발 (3-4-1), 과학기술부, 850p.
2. Huisman, L. and Olsthoorn, T. N., 1983, Artificial Groundwater Recharge, Pitman Advanced Publishing Program, Pitman Publishing INC., 320p.
3. O'Connor, K. M. and Dowding, C. H., 1999, GeoMeasurements by pulsing TDR cables and probes, CRC Press, 424p.