

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

**실증용 중저준위 방사성폐기물 처분 덮개내 수분이동 특성
측정 시스템**

Soil Moisture Monitoring System in Soil Cover of LILW Disposal Test Facility

*박세문, 이찬구, 이은용, 염유선, 김창락

한수원(주) 원자력환경기술원

305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 149

*Tel: 042-870-0376, Fax: 042-870-0354

*e-mail: smpark@khnp.co.kr

요 약

중저준위 방사성폐기물 처분 실증 설비의 다층 덮개내 수분 이동 특성을 측정하고자 토양수분 함량 측정 시스템을 구성하였다. 시스템은 TDR, Neutron probe법, Tensiometer, Heat Dissipation, Thermocouple psychrometer, Gypsum block 등에 대하여 고려되었으나 국내 기후 조건과 경제성을 고려하여 토양수분 함량 전 범위를 측정할 수 있는 TDR 시스템과 토양수분 장력 측정을 위하여 Tensiometer 측정 시스템이 선정되어 설계되었다.

Abstract

The soil monitoring system for the soil moisture movement characteristics in the soil cover of the low and mid-level radioactive waste disposal test facility is designed. To design the system, the methods of TDR, Neutron probe, Tensiometer, Heat Dissipation, Thermocouple psychrometer and Gypsum block are compared one another. However the weather and economical points of view, TDR System which can measure whole soil moisture range and Tensiometer System are chosen and designed in this study.

개 요

과거에는 저준위 방사성폐기물에 대한 처분방식이 확립되어 있지 않아 미국등 선진국에서 조차 공학적 안전 설비 없이 단순히 방사성폐기물을 매립하는 단순 천층처분 방식으로 방사성폐기물을 처분하여 왔다. 그러던 중 이러한 처분방식으로 처분되던 폐기물처분장에서 방사성 물질이 검출되면서 문제점을 인식한 미국 원자력규제위원회와 환경보호국에서는 1980년대에 들어와서 이를 보완할 수 있는 다층덮개에 대한 연구결과들을 반영하여 관련규정을 강화함으로써 더 이상 안전상의 문제가 야기되지 않도록 노력하였다. 최근 미국에서는 이와 같이 강화된 안전규정을 토대로 도출된 환경복원 프로그램에 따라, 진행되고 있는 많은 쓰레기 매립장과 유해폐기물 처분장의 성능 개선을 위해 다층구조의 처분덮개를 설치하는 방식을 권하고 있어 앞으로는 이 방식이 주로 사용될 것으로 예상되고 있다. (T. E. Hakonson, 1998)

다층덮개의 활용성을 높이기 위해서는 성능에 대한 입증의 수반되어야 하므로 시험시설을 이용한 실증연구가 여러 나라에서 진행되고 있으며 특히 중·저준위 방사성폐기물을 천층처분하고 있는 미국, 프랑스 및 스페인 등에서 장기간에 걸쳐 활발히 수행되고 있다. 우리나라에서도 이의 필요성을 인식하여 추후 처분장 확보에 대비하여 그 동안 추진해 왔던 인공방벽 천층처분 방식의 개념 설계를 바탕으로 다층구조의 토양덮개에 대한 연구를 수행하고자 계획을 수립하고 관련 연구를 진행하고 있다.

본 연구에서는 인공방벽 처분시설 실증연구를 통해 다층덮개의 성능을 분석하고자 실증용 다층덮개를 구성하였다. 실증용 다층덮개는 IAEA(IAEA, 2001)와 NRC 및 EPA(40 CFR 264와 265)에서 제시한 성능요건과 설계지침을 준수하였으며 그중 가장 엄격한 지침인 EPA의 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act) C를 바탕으로 개념 설계의 틀을 마련하였다.

다층덮개의 주요 기능 중 하나인 수리방벽으로서의 성능을 시험하기 위하여 HELP 코드를 사용하여 층별 및 토양별 물수지 분석을 수행한 후 실증용 다층덮개의 개념설계를 수립하였다.(이찬구 et al., 2001) 본 연구에서는 덮개의 수리 특성 및 그 성능을 파악하고자 층별 다짐 공사 시 토양 수분 측정 센서와 토양수분 장력 측정 센서를 매설하여 처분덮개의 수분 이동 특성에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 또한 수분 이동 특성 계측 시스템을 구성하기 위하여 다층 덮개에 매설될 센서로는 본 처분덮개의 특성에 맞는 센서를 선정하고 우리 기상 특성을 고려하여 수분 이동 특성 장기 계측 시스템을 고안하였다.

다층 덮개 개념 설계

처분덮개의 주요 기능이 수리방벽으로서의 기능인 점을 고려하여 실증시험용 처분덮개 모델로

그림 1과 같이 다층구조로 된 두 가지 type을 선정하였다. type 1은 아스팔트와 geomembrane의 차수층을 포함하는 정상적인 주 모델이고, type 2는 일정기간 경과 후의 두 차수층이 완전히 열화되어 기능을 상실한 최악의 경우를 가정한 것이다. 이 두 type에서의 HELP 코드를 사용한 물 수지분석 결과 type 1은 물론 type 2의 누수량도 외국의 적용기준 범위 이내로 나타나 안전성에는 별 영향이 없을 것으로 평가되었다.

전체적인 시험시설은 두 type의 시험고를 각각 두 개씩 4개를 배치하고 현장시험용 시험고와 장기 관측 후 시험고를 절개하여 각 층의 다짐상태의 변화나 차수층의 물성변화 등을 직접 확인하기 위한 시료채취용 시험고를 각각 하나씩 배치하여 총 6개의 시험고로 구성되도록 하였다. 각각 3×3×3.3m 크기인 이 6개의 시험고를 그림 2와 같이 현장실험실 좌우에 각각 3개씩 배치하여 정상강수조건과 설계강수조건에서의 성능시험이 구분, 수행될 수 있도록 설계하였다.

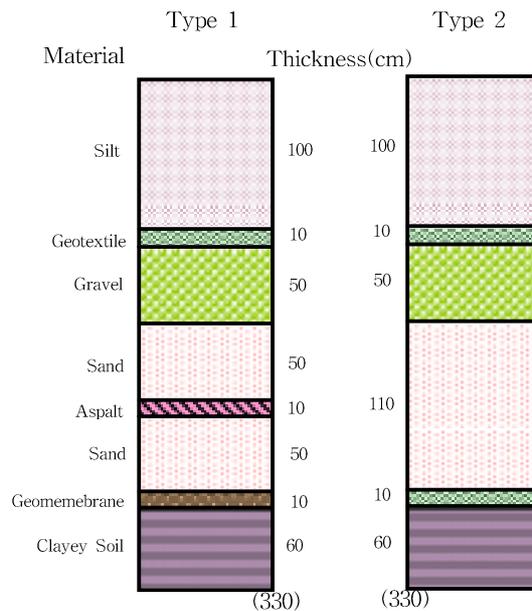


그림 1. 다층덮개의 type별 단면도

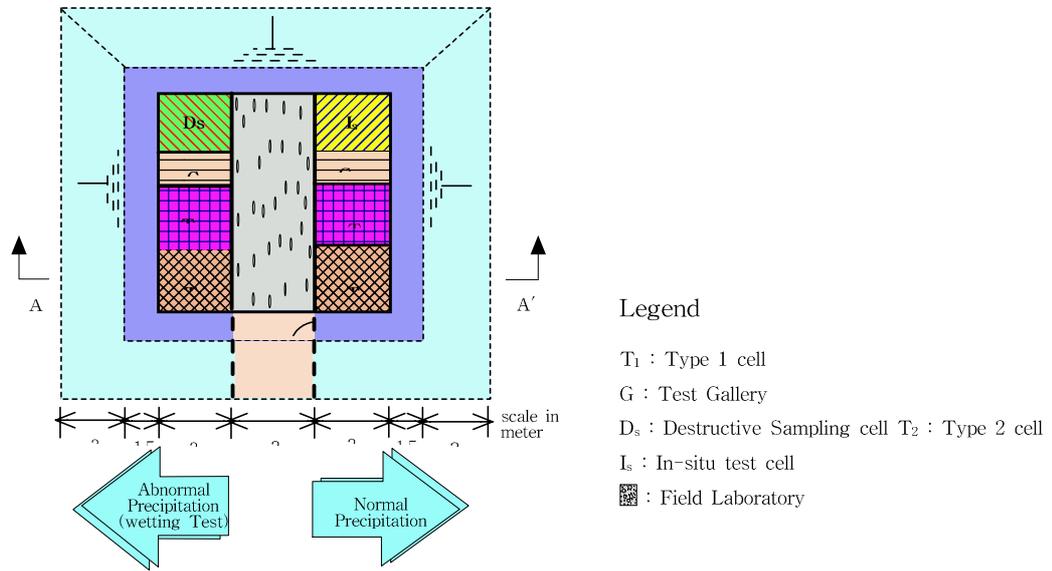


그림 2. 실증용 처분덮개의 단위 Cell 배치도

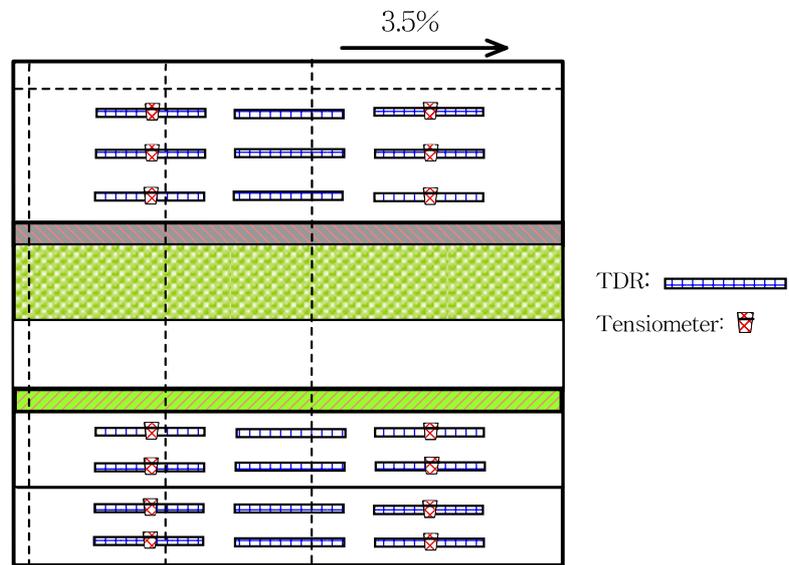


그림 3. 측정 센서의 매설 위치 단면도

방 법

토양 중에 있는 물의 상태를 측정하는 경우에는 토양중에 있는 수분 함량(soil moisture content)을 측정하는 것과 토양중에 있는 물의 에너지(soil matric potential)를 측정하는 것으로 대별할 수 있다.

토양 수분 함량 측정장비로는 Time Domain Reflectometry (TDR)와 Neutron Probe가 있고, 토양 수분 에너지 측정장비로는 토양 수분장력(tension)을 측정하는 것으로써 불포화 조건에서는 Tensiometer, Heat Dissipation Sensor, Gypsum Block 그리고 Thermocouple Psychrometer 등이 있다.

본 연구에서는 국내 기상 조건을 고려하고 가장 효율적인 측정 시스템을 구성하기 위하여 각 sensor들의 특성을 비교 검토하였다.

1. TDR 법

Time Domain 방식은 한 개의 빠른 속도를 가진 펄스신호가 한 구획의 전송선을 따라서 이동하는데 걸리는 시간을 측정하는 방식이다. 즉, TDR에서는, 전송된 펄스신호가 전송선을 따라서 이동하다가 전송선로 중 임피던스의 불연속을 만나게 되면 반향을 일으키게 되고 전송선의 동일한 끝점에서 전송된 신호와 겹치게 되는데, 이 신호를 관찰하여 그 동안의 시간을 측정한다. 그러므로 측정되는 시간은 왕복전송시간(round-trip propagation time)으로 필수 측정항목은 소요시간이다. 주어진 길이의 전송선을 따라서 하나의 전자파가 전송되는 시간은 전송선이 잠겨있는 주변 매질의 유전율의 제곱근(square root)에 비례한다. 만일 매질이 토양/물/공기의 혼합이라면, 물의 유전율이 그 혼합물의 유전율을 지배하게 된다. 따라서, 이 때의 측정은 곧 그 혼합물의 수분함량을 결정하는데 이용될 수 있는 것이다. 즉, 이런 원리를 이용하여 고주파의 전자파동을 끝이 열려 있는 waveguide(센서)를 통하여 토양수분 대상체에 쏘고 후 변화된 파동이 되돌아오는 시간을 측정하여 토양 수분 함량을 측정하도록 응용된 방법이다. 측정은 자동으로 이루어지고 수분 함량은 일반적으로 토양수분 함유량 전체 범위에 해당되는 0~100%까지 측정이 가능하며 측정 가능한 주변 온도범위는 $-25^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 이다.

TDR data logger는 apparent dielectric constant, K_a 의 제곱근을 기록하도록 프로그램 되어있다. 토양 수분함량(volumetric soil moisture content : θ_v)은 1980년 Topp에 의해 제시된 방정식으로 산출한다.

2. Neutron Probe 법

속도가 빠른 속중성자를 토양 속에 투과시키면 속중성자는 물의 수소(H) 원자와 서로 충돌하여 그 에너지를 상실하고 느린 열중성자로 변화된다. 즉 토양속을 투과한 속중성자는 물질내의 수분 함량 증가에 따라 에너지를 잃으며 열중성자로 변하게 되는데 본 probe는 이러한 열중성자를 계측함으로써 수분함량을 알아낸다.

방사선 source는 주로 Cf-252나 Am-241/Be 등을 사용한다. 측정 가능한 수분 함량 범위는 1%~30%이며 기기작동 온도 범위는 -10°C~50°C이다.

Neutron probe 기록계는 수동으로 작동한다. neutron probe 기록계는 thermalized neutron의 수를 기록하고 Bishop(1996)이 제안한 다음 방정식을 사용하여 volumetric soil moisture content(θ_v)로 환산한다.

$$\theta_v(m^3/m^3) = \frac{2.396 \times 10^{-3} \times Counts + 4.627}{100}$$

3. Tensiometer 법

Porous Cup(다공질 Cup)을 토양 중에 매설한 후 그 Porous Cup과 연결된 압력 Gauge의 눈금을 읽음으로써 수분장력을 직접 측정하는 방법이다. Tensiometer는 0에서 -65kPa (0.6bar 이하) 범위의 측정에 적합하며 강수 침투량이 큰 습윤상태의 토양조건에서 측정에 효과적이다. tensiometer data loggers는 pressure transducer로 측정된 전압을 기록하도록 되어있다. tensiometer pressure transducer는 transducer에 압력(P) 변화를 주어서 이에 대응되는 전압을 기준으로 보정한다. 압력(0에서 15psi)은 전압(0에서 100mV)과 선형관계에 있다. Matric potential은 아래와 같이 계산된다.

$$\Psi(bars) = voltage(mV) \times \frac{-15psi}{-100mV} \times \frac{1bar}{14.504psi}$$

4. Thermocouple Psychrometers 법

토양시료의 상대습도를 Sensor에 흐르는 전기적 전압으로 측정하여 전압과 수분장력과의 Calibration Curve를 사용하여 수분장력을 측정하는 방법이다. -500kPa 이하 범위(0.9~72bar)의 측정에 적합하며 건조토양에서 측정에 효과적이다.

Thermocouple Psychrometer data logger는 각 thermocouple psychrometer로부터 온도 보정된 전압을 기록하도록 되어있으며 matric potential(ψ)는 다음 방정식을 사용하여 결정한다.

$$\Psi(-bars) = A \times \text{temperature corrected voltage}(\mu V) - B$$

여기서 A와 B는 경험적으로 결정되는 상수이다. thermocouple psychrometer는 염화나트륨 물용액으로 보정한다. (D.B. Stephens & Associates, Inc., 1996)

5. Heat Dissipation Sensor 법

토양장력은 -30에서 -1000kPa 범위에서 측정되며 Heat Dissipation Sensor data logger는 temperature differential을 기록하도록 되어있고 matric potential(ψ)은 다음 방정식을 사용하여 산출한다.

$$\Psi(-bars)=A \times \text{temperature differential } (^{\circ}C)^B$$

여기서 A와 B는 경험에 의해 결정되는 상수이다. Heat Dissipation sensor는 pressure pot extractor를 사용하여 보정한다 (D.B. Stephens & Associates, Inc.,1996).

6. Thermocouples 또는 Thermistor

Thermocouple data loggers는 thermocouple이나 Thermistor로 측정된 기온이 직접 기록된다.

7. Gypsum Block 법

전도체를 석고 Block내에 고정시킨 후 전선을 연결하여 석고 Block내에 고정되어 있는 전도도체 간의 전기저항을 측정한 후 실험실에서 미리 구한 전기저항과 토양수분 장력간의 보정선 (Calibration Curve)을 사용하여 수분장력을 측정하는 방법이다.

결 과

토양수분 측정 시스템 구성은 인공방벽 처분덮개의 수문학적 성능분석(hydrologic performance analysis)에 필요한 현장자료를 수집하고 실증시설 규모에서의 감시와 시험 (field-scale monitoring & testing)을 수행하여 수문 수치모델의 교정(calibration)과 검증(validation)에 필요한 자료를 비롯하여 다층 덮개의 토양별 성능 평가 자료를 생산함이 목적이다.

특히 처분 덮개의 수문 수치모델 해석과 검증을 위하여 필요한 현장자료의 하나인 덮개 심도에서의 시간대별 수분함량과 수분장력의 분포와 변화의 자동 측정은 필수적이다.

처분덮개에 대한 장기 관측을 수행할 경우 처분덮개는 우기를 제외하고는 대부분의 시험기간 중 불포화상태로 있게 된다. 불포화상태가 지속되는 시험기간 중 수리방벽으로서의 덮개 성능을 관측하기 위해서는 수분의 이동 현상을 계측하여야 한다. 본 연구에서 이렇게 생산된 계측 자료를 이

용하여 numerical code 인 HELP(Hydrologic Evaluation of Landfill Performance)를 적용하여 덮개 성능 평가를 수행할 예정이다.

토양 내에서의 수분 이동 특성을 규명하기 위해서는 함수비의 변화와 matric potential의 변화를 측정하여야 하나, 현재까지 상용화된 함수비와 matric potential의 측정기기는 많지 않은 편이다. 함수비를 측정할 수 있는 기기로는 TDR(Time Domain Reflectometry probe)과 중성자 검침봉(Neutron probe)이 있는데 이중 중성자 검침봉은 매설용이 아니며 정밀도도 떨어져 제외하였으며, 함수비는 온도변화에 의한 영향을 크게 받으므로 온도도 같이 측정하여야 하는 점을 고려하여 체적함수비와 온도를 동시에 측정할 수 있는 센서를 계측기기로 선정하였다.

Matric potential의 측정기기로는 앞서 검토한 tensiometer, heat dissipation sensor 및 thermocouple psychrometer와 Moisture Gypsum block 등이 있는데 이 중에 tensiometer가 가장 정밀도가 높고 사용 실적이 많으며 측정 범위가 다른 기기보다 우리나라의 습한 기후조건에 잘 맞아 이를 선정하였다. Moisture Gypsum block은 석고 sensor와 cable, 판독기의 연결로 voltage 단위로 직접 읽을 수 있어 편리하나 sensor 부위에 해당하는 석고 block이 토양속에 매설될 경우 점차 부식되므로 단기간의 토양수분 측정에는 효과적이거나 장기간 측정에는 적절치 못하다. 수분 측정 범위도 TDR의 측정 범위내에 있다. Thermocouple은 온도 변이폭이 심하여 data의 신뢰도가 떨어지며 유지관리가 까다롭다. Heat Dissipation Sensor는 현재 계속 개발 중으로 그 정밀도에 있어서 신뢰도가 떨어진다. 따라서 각 센서들의 이러한 특징을 검토 후 결정된 토양수분 이동 특성을 파악하는데 필요한 센서로서 TDR과 tensiometer가 선정되었다.

TDR과 tensiometer는 그림 3에서와 같이 각각 단위 cell 중앙부의 3개소와 대각선 방향의 2개소에 매설되도록 하였고 심도에 따라서는 각각 7개씩 매설되도록 하였다. 각각의 TDR과 tensiometer의 측정결과는 그림 4와 같이 여러개의 multiplexer를 통해 data logger에 자동 기록되고 컴퓨터에 저장할 수 있도록 하였다.

1. TDR + 온도 계측 시스템

TDR 토양수분 센서와 토양온도 thermistor를 함께 내장한 센서(AQUA-TEL-TDR+T)를 활용하여 시스템을 구성하였다. 본 센서는 토양내의 수분 함량을 %로 읽으며 수감부의 길이가 비교적 긴편인 18inch(약 45cm)로서 이의 평균수분을 측정하므로 짧은 센서(표준형 30cm)에 비해 측정오류가 적을 것으로 기대된다. 특히 동절기에도 손상되지 않는 센서로 특별관리가 불필요하다. 시스템 구성상 편리성과 효율성 및 경제성을 고려하여 체적함수비와 온도를 함께 측정할 수 있는 온도 센서 일체형인 AQUA-TEL-TDR+T를 설치함으로써 thermocouple의 설치를 불필요하게 하였다. thermocouple의 경우 온도 fluctuation이 심하여 사후 관리가 까다로운 반면 본 센서에 내장된

thermistor는 그러한 결점을 보완하여 온도 data에 대한 신뢰도를 높여준다. 또한 AQUA-TEL-TDR은 TDR과 센서가 함께 내장된 type이라 표준형의 센서와 TDR을 연결할 필요도 없으며 일체형 센서를 logger에 직접 연결하면 TDR 자동 측정 및 data 저장이 가능하다. 또한 토양수분판독기(AQUA-TEL-METER)를 이 센서에 직접 연결하면 TDR의 수동 측정도 가능하도록 하였다.

전체 개념은 선정된 TDR+T sensor 120개를 덮개내에 매설·설치 후 sensor cable과 온도 cable을 각각 32개의 channel로 구성된 다채널 확장기 7대와 연결한 후 이를 logger와 computer에 연결하여 TDR과 온도를 자동으로 계측하고 분석할 수 있도록 구성한 data acquisition system이다 (그림 4).

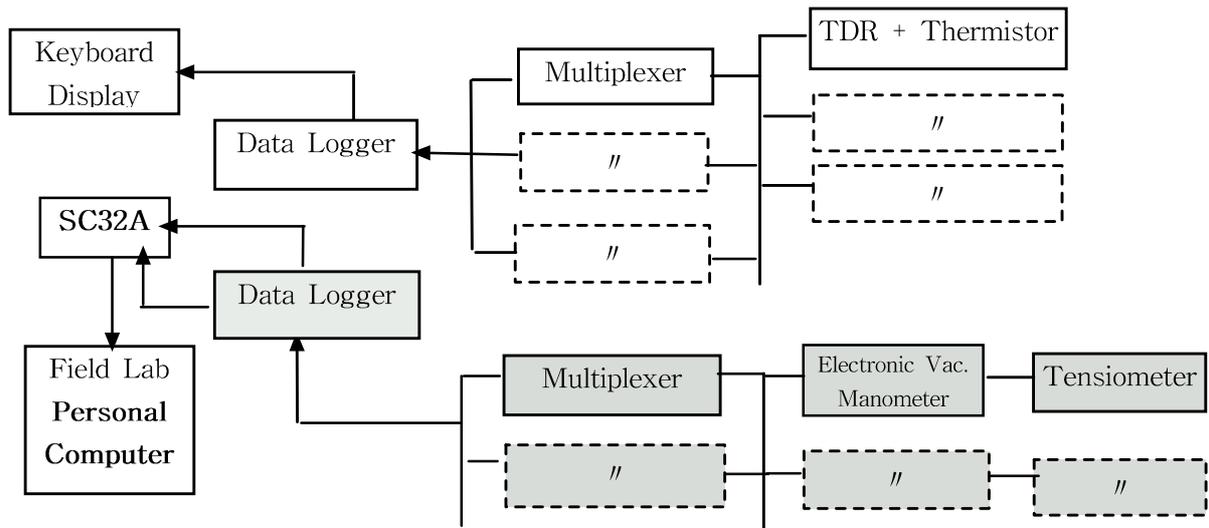
2. Tensiometer 계측 시스템

일반적인 표준형 tensiometer는 주로 농업 관개 조절용으로 사용된다. 이는 수직 설치만이 가능하며 최고 깊이가 제한되어 있어서 (최고 220cm) 본 연구의 토양수분 측정을 위한 매설용으로는 적합하지가 않아서 특별한 구조의 tensiometer가 필요하다.

본 연구에서는 다양한 깊이(30~300cm)에 tensiometer의 ceramic cup과 tube head의 길이 조절이 가능하고 필요 시 고품이 될 수 있는 연성 tube(micro-tensiometer용)로 연결하여 토양층에 매설하고 tube head 부위(reservoir tube 포함)를 현장시험실로 돌출되도록 설치하여 중앙집중식의 자동 측정이 가능하게 하였다. micro-tensiometer는 토양의 부피가 너무 적어서 표준 tensiometer를 사용하기 곤란한 곳에서 사용되며, 그 유연성 때문에 수감부를 토양내 어느 곳이나 위치시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 tensiometer에 유입되는 물의 양이 매우 적기 때문에 응답 시간이 훨씬 빨라지고 고온의 대기온도인 경우에도 그 영향을 훨씬 적게 받는다. 표준형 tensiometer는 자동 측정을 하기 위해서는 dial gauge 대신에 각 tensiometer에 transducer를 설치하여야 하는데 이 transducer의 비용이 높아서 많은 수의 tensiometer를 설치할 경우 아주 비경제적이다.

본 Tensiometer의 porous ceramic cup은 직경이 12mm이며 길이가 35mm인 것으로 표준형의 기능과 같으므로 어떤 soil type에서도 정상적인 성능을 유지할 수 있도록 하였다. 이 tensiometer는 end cap을 실리콘 마개를 사용하여 주사바늘로 뚫고 내장된 압력센서를 이용하여 측정할 수 있는 전자식 tensiometer 판독기를 사용할 수 있는 것이 큰 장점이다. 경우에 따라 수동측정이 필요 시 transducer 없이 위의 판독기 한 개만을 사용하여 여러 개의 tensiometer 값을 측정할 수 있어서 비교적 고가인 transducer의 비용을 절감할 수 있다. 자동 측정과 자동 monitoring system을 원할 경우 tensiometer tube head 부위에 전자 진공 장치를 부착한 후 다채널 확장기와 logger에 연결하여 자동화가 가능하도록 하였다.

본 시스템의 전체 개념은 매설된 82개의 tube head 부분에 자동 진공 압력계를 설치한 후 각각의 sensor를 32개의 channel로 구성된 다채널 확장기 3대와 연결하여 logger와 computer에 연결하여 Tensiometer를 자동으로 계측하고 분석할 수 있는 자동측정 및 data aquisition system이다.



TDR: Time Domain Reflectometry, 토양수분측정

Termistor: 토양내 온도 측정

Tensiometer: 토양수분장력 측정

그림 4. data aquisition 시스템 계통도

결론

본 연구 목표인 배수량, 강수량, 유출량 특히 덮개심도에서의 시간대별 수분함량과 matric potential 분포 변화를 측정하기 위해서 여러 측정장비를 검토해 본 결과 우리나라 기상 특성상 위에 열거했던 여러 측정장비들 중 Psychrometer나 Heat Dissipation Sensor, Moisture Gypsum

Block 등은 아주 건조한 토양의 수분 측정 시 유용한 장비로서 우리 토양환경에 있어서는 불필요한 장비라고 판단되어 경제성을 고려하여 이들의 활용을 배제하였다. 특히 Heat Dissipation Sensor는 현재 계속 개발 중으로 그 정밀도에 있어서 신뢰도가 떨어진다. 따라서 각 측정 sensor의 장·단점을 비교 검토하여 최적의 시스템 구성에 토양수분 함량 측정 장비로 TDR을, 토양수분 장력 측정 장비로 Tensiometer만을 설치하여 그림 4와 같이 시스템을 구성하였다.

본 시스템은 실증연구 시설의 시공 시 단위 cell에 매설되어 국내 최초로 처분 덮개의 성능평가에 필요한 신뢰성이 높은 현장자료를 생산할 것으로 기대된다.

References

- Hakonson, T. E., 1998, Capping as an alternative for landfill closures-Perspectives and approaches in the United States, IAEA, advisory group meeting report(draft), 20
- INEEL(Idaho National Engineering and Environmental Laboratory), 1996, RWMC(Radioactive Waste Management Complex) SDA(Subsurface Disposal Area) engineered-barrier test plan, 33
- Porro, Indrek and Keck, Karen N., 1997, "Summary of Activities at the Engineered Barriers Test Facility, October 1, 1995, to January 31, 1997, and Initial Data", INEEL/EXT-97-00239, Lockheed Martin Idaho Technologies Company, Idaho Falls, Idaho.
- 이찬구, 이은용, 박세문, 김창락, 염유선, 2001. "중·저준위 방사성폐기물 천층처분을 위한 처분덮개의 성능실증 시험시설 개념설계", 지질공학회지, 12, 2001 (심사중)
- 한국수력원자력주식회사 원자력환경기술원, 2000, 중저준위 방사성폐기물 천층처분시설 개념설계 종합보고서, 255
- 40 CFR 264.310, 265.310, 2000, Closure and post-closure care, 316-317, 512