

석조문화재관련 지반침하 방지를 위한 지반진단시스템

김만일¹ · 양동윤² · 이규식³ · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국지질자원연구원

³국립문화재연구소

Geotechnical Diagnosis System for Preventing a Ground Subsidence Relating with Cultural Heritage

Man-Il Kim¹, Dong-Yoon Yang², Kyu-Shik Lee³, and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

³National Research Institute of Cultural Heritage

석조구조물의 주변 지반침하하는 구조물 붕괴의 위험을 내포하고 있어 지반의 모니터링이 반드시 수행되어야 한다. 대표적인 지반침하 원인으로는 지하수위 변동에 의한 지반의 포화와 불포화 현상으로 지반의 공극률 내지 유효공극률 감소에 의해 발생된다. 이러한 지반 물성치의 평가는 유전율상수 반응으로부터 파악이 가능하다. 유전율상수 변화는 매질의 공극, 토입자, 공기 및 물 등의 물리적 특성 변화로부터 추정되기 때문에 지반의 포화 및 불포화 변동에 의한 유전율 반응으로부터 지반침하 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 석조구조물, 수위변동, 지반침하, 유전율 반응

Damages of cultural properties is caused by subsidence of foundation relating stone structures. To prevent of these structures, ground monitoring should be achieved certainly. Representative ground subsidence cause is saturated and unsaturated condition that is produced repeatedly by groundwater level fluctuations. It controls role that decrease porosity or effective porosity of soil media. Estimation of physical properties can predict from reaction of dielectric constant. Variations of dielectric constants are measured from physical characteristics change of pore, soil particle, air and water which are consisted to ground. Therefore, ground subsidence monitoring is thought that quantitative measurement is available using dielectric response of media.

Key words : stone structure, groundwater level fluctuation, ground subsidence, dielectric response

서 언

우리나라의 석조문화재에 포함되는 항목으로는 주로 탑, 부도, 불상, 당간지주, 비석 등으로 건조시키는 삼국 시대로부터 조선말기에 이르기까지 다양하게 분포한다. 석조문화재로 지정된 건수는 2003년도를 기준으로 총 1,658건으로 국가지정 527건과 시도지정 1,128건이며, 국가지정 건조물문화재 중 국보의 74.4%, 보물의

79.7% 그리고 시도지정 문화재의 84.5%를 차지하고 있다 (대한민국학술원, 2005).

석조문화재 훼손에 미치는 요인으로는 크게 나누어 자연적·인위적 풍화작용과 지반 불안정성에 의한 지반 침하 및 지반 염분화에 크게 영향을 받는다.

농경지, 해안가 및 도로변 등의 매우 다양한 지역에 위치해 있는 석조문화재는 다양한 주변지반환경의 변화에 의해 지반 상태가 기후 변화 및 토지 이용 현황에

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

따라 날로 불균질화되는 경향이 많다. 석조문화재의 안정성에 영향을 미치는 물리적 작용은 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로 석조문화재 자체의 풍화열화에 의한 강도열화 및 균열발생으로써 이러한 풍화작용은 빗물, 대기오염물질, 수분동결, 염분 내지 습기 침투 등에 의해 발생된다. 두 번째로 석조문화재 부지 인근의 집중호우 및 인위적 환경 변화에 의한 지하수위변동에 따른 지반의 유효공극률 감소이다. 지반의 포화 및 불포화 조건에서 유효공극률은 공극률에 비해 약 75~93% 정도의 범위 내 분포하는 것으로서 실질적으로 수분이 이동할 수 있는 통로를 의미한다(Wilson *et al.*, 1995). 또한 이러한 지반 변화 요인으로는 지반의 이차압력, 지하수위 변동에 의한 압력, 차량 하중 및 진동, 그리고 지반을 대상으로 다양한 공사 등에 기인한 지반침하 발생 요인이 날로 증대되고 있는 실정이다. 일반적으로 지반침하 현상이 순간적으로 발생하는 것이 아니라 지반의 불균일성에 의해 발생하는 부등침하가 구조물 파괴의 주요 원인으로 알려져 있다(Young, 1984; Attewell, 1984).

따라서 우리나라의 대부분의 석조문화재들에게 미치는 훼손요인으로는 대기오염물질이 포함된 빗물, 지반의 불안정과 지반 습기침투에 의한 석조구조물의 구조적 피해 및 이들 표면의 균열 및 암석조직의 약화 현상이 가장 큰 훼손요인으로 볼 수 있다(대한민국학술원, 2005).

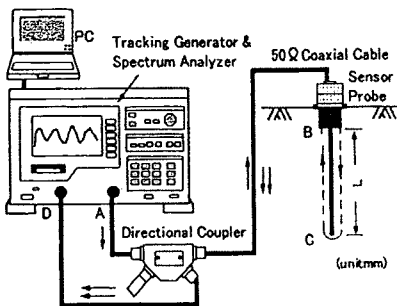
석조문화재와 관련하여 석조구조물의 암석학적 및 풍화관련 정성적인 연구는 다수 수행되었으나 석조문화재가 위치한 주변 지반의 침하 및 변위-응력집중에 의한 붕괴 관련된 연구는 체계적으로 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 석조구조물의 안정성에 영향을 미치는 요인 중 지하수위 변동에 의한 지반침하 관련한 모니터링 측정장치와 이의 적용성에 관하여 수행하였다.

연구 방법

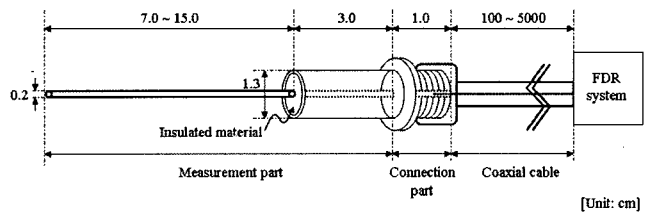
측정장치

Frequency Domain Reflectometry (FDR) 측정장비는 전자기파의 인피던스 반응에 따라 매질의 유전율을 측정하는 것으로서, 전자파 발생기(tracking generator), 스펙트럼 분석기(spectrum analyzer), 방향성 결합기(directional coupler), FDR 측정센서 및 자료 수집기(data logger)로 구성되어 있다(Fig. 1). 실제 설치된 FDR 장비 내에는 방향성 결합기가 포함되어져 있어 현장시험 등을 위해 휴대 이동성이 우수하다. 특히, 한 대의 FDR 장비에 연결할 수 있는 측정센서는 총 20개 채널을 이용하여 동시에 서로 다른 위치에 설치되어 있는 측정센서로부터 각각의 유전율상수를 측정할 수 있는 장점도 함께 가지고 있다. 제작된 FDR 장비의 크기는 가로 57 cm, 세로 45 cm, 폭 40 cm 정도이며, FDR 장비의 조작 및 측정자료 저장을 위한 데이터로거가 함께 부착되어 있다. 이러한 FDR 장비의 운영은 데이터로거에서 측정방법의 설정이 가능할 뿐만 아니라 측정된 자료를 실시간으로 확인할 수 있어 효율적인 관리도 함께 수행될 수 있다.

매질의 유전율 측정은 FDR 측정센서를 측정매질에 삽입한 후, 전자파 발생기에서 0.1~1.7 GHz의 고주파의 전자기파를 측정매질로 방출한다. 전자파의 진행속도는 매질 주변의 유전특성에 의해 변하기 때문에 매질에 설치된 FDR 측정센서에서의 입사파와 선단까지의 반사파를 발생시킨다. 이 두 파들은 합성간섭파를 발생시켜 방향성 결합기를 경유해 스펙트럼 분석기에서 관찰된다. 여기서 FDR 측정센서 선단부터의 반사파 신호는 FDR 측정센서를 왕복하기 때문에 위상이 늦어져 측정된 두



(a) FDR measurement set



(b) FDR measurement probe

Fig. 1. Schematic setup diagram of Frequency Domain Reflectometry measurement system.

파의 합성간섭파는 일정한 주파수 간격에서 sin곡선과 비슷한 굴곡형태의 주파수 파장을 보이게 된다.

다공질매질 내에서 전자파의 전달속도는 그 매질의 유전율상수(Dielectric constant, ϵ)와 밀접한 관계를 가지고 있다.

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 다공질 매질의 유전율상수, C 는 유전율상수 ϵ 의 매질 내에서 전자파의 전달속도, C_0 는 광속도 (3×10^8 m/s)이다.

분석된 주파수 형태상의.凹과 凹, 그리고 凸과 凸 부분에서의 주파수차를 Δf 로 하여 다음의 관계가 성립된다. FDR 측정장치에서 측정된 주파수차를 이용하여 유전율상수 ϵ 을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon = \left(\frac{C_0}{2L \cdot \Delta f} \right)^2 \quad (2)$$

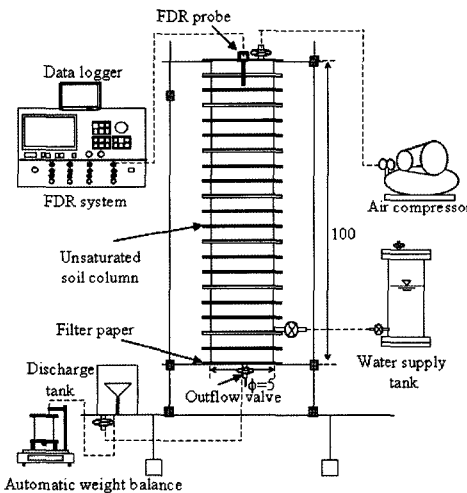
여기서, Δf , L 및 C_0 는 각각 스펙트럼 피크(spectrum peak) 주파수차(Hz), FDR 측정센서의 길이(m), 진공중의 광속(3×10^8 m/s)이다. 식 (2)를 이용하여 합성 간섭파의 주파수 간격으로부터 매질의 유전율상수를 계산할 수 있다.

시험방법

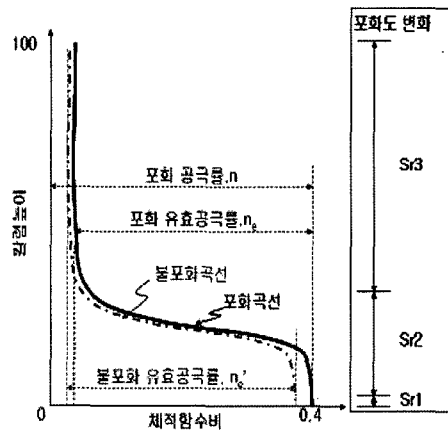
포화된 지반매질 내에서의 지하수 흐름은 연결된 공극인 유효공극을 통해서만 이루어지게 되며, 이들 공극은 지하수위 변동에 따라 공극률이 감소하게 된다. 이러한 지하수위 변동은 지반의 포화대(saturated zone)와 불포화대(unsaturated zone) 구간의 반복을 의미하는 것으로 장기간 지속적으로 이러한 상태가 이루어질 경우에는 지반침하와 같은 지반매질의 구조가 재배열하게 된다. 따라서 지반침하의 문제는 공극률의 감소를 의미하며, 공극률의 감소는 상대적으로 유효공극률의 감소와 직결되어 있다.

따라서 지반매질에 침투수로 작용하는 체적함수비의 분포특성 파악과 함께 수위변동에 따른 유효공극률의 변화를 파악하기 위해 포화 및 불포화 조건을 만족할 수 있도록 아크릴칼럼을 제작하여 유전율 측정과 배수시험을 수행하였다.

포화 및 불포화 조건에서의 매질의 유효공극률을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 높이 100 cm, 직경 5 cm의 아크릴 칼럼으로 시험장치를 제작하였다. 시험장치에 공극률 0.42로 압밀 제작한 표준사 시료를 넣은 후 포화 및 불포화 조건을 만족하기 위해 주입수를 아크릴 칼럼 하단부에서 주입과 배수를 반복하였다. 이때 완전 포화상태에서 배수된 물의 양을 칼럼 하단부에 설치한 자동정량저울로 자동 계측하도록 설치하였다.



(a) Soil column with FDR measurement system



(b) Soil water characteristic curve

Fig. 2. Schematic diagram for measuring effective porosity of soil media.

FDR 측정프로브의 길이는 7cm인 것을 사용해 칼럼 상단부에 설치하여 매질의 포화 및 불포화 조건에 따라 유전율상수를 자동 계측하였다. 또한 최종 배수가 종료된 시점에서 100 cm 높이의 칼럼을 5 cm 단위로 분리하여 건조시험을 통해 체적함수비를 각기 측정하였다.

시험결과 및 토의

유전율상수와 체적함수비 변화

초기 제작된 불포화 흙칼럼에 대해 주입과 배수 작업을 통해 유전율상수 변화와 배수된 물의 양을 자동 계측하였다. Fig. 3은 초기 불포화 상태에서의 측정된 유전율상수가 14.93으로 측정되었으며, 흙칼럼 하부로부터 물을 주입하면서 점진적으로 유전율상수가 상승함을 보였다. 흙칼럼이 포화되었을 때의 유전율상수는 30.20으로 일정하게 측정되었으며, 그 후 배수를 시작한 시점부

터 유전율상수가 급격히 감소함을 보여준다. 이는 토입자의 공극 내 분포하는 공극수가 유효공극을 통해 유출되고 있음을 의미한다.

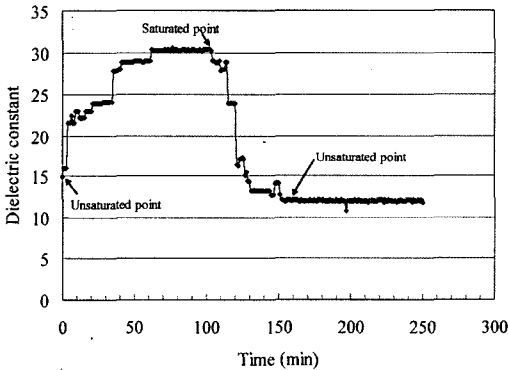
최종 배수가 완료된 시점에서 유전율상수는 11.90 범위 내에서 측정되었다. 이는 흙칼럼이 불포화 상태에 도달함을 의미할 뿐만 아니라 초기 유전율상수와 비교해 낮은 값으로 나타났다. 이러한 원인으로서는 공극의 분포 범위가 수위를 상승시켜 불포화→포화→불포화 조건을 반복적으로 변화되면서 흙의 토입자 공극이 감소함을 의미한다. 따라서 수위변동에 의한 흙의 침하 경향을 유전율 반응으로 충분히 확인할 수 있는 것으로 판단된다.

지반침하 모니터링 기법 제안

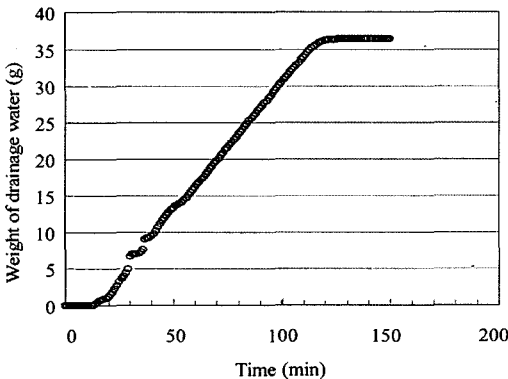
지반 매질의 유전율 반응을 이용한 지반침하 모니터링 기법은 매질 내 체적함수비 분포 특성에 민감하게 반응한다. 일반적으로 체적함수비는 지반 매질이 가지고 있는 매질의 공극 내에 분포하는 수분량으로 대상 매질의 체적에 비례한다. 따라서 지반 내에서 체적함수비에 영향을 주는 요인으로는 크게 강우에 의해 침투한 침투수와 지하수위 변동에 따른 모세관대에 의존한다(Harr, 1991). 즉 지반이 불포화 및 포화조건을 반복적으로 진행됨에 따라 매질의 공극 내 분포하는 체적함수비 변화를 가져온다. 또한 수위변동에 따라 공극의 분포도 밀폐형 내지 개방형 공극으로 나누게 되는데 이러한 물리적 변화로 인해 공극률 및 유효공극률의 감소를 수반하게 된다. 따라서 수위 변동에 따른 매질의 공극률 내지 유효공극률 측정만으로 지반침하 현상을 인지할 수 있을 것이다.

Fig. 4는 수위 변동에 따른 매질의 침하를 나타내는 것이다. 매질의 체적과 공극률이 동일한 시료에 대해 초기 불포화 조건에서의 매질의 높이를 h_1 이라고 하면 수위를 상승시켰을 때는 매질의 높이가 h_2 로 낮아지게 되며, 그 후 수위를 더 낮추면 또 다시 매질의 높이는 h_3 로 낮아지게 된다. Fig. 5는 지반을 구성하는 매질의 물성치 변화를 수위변동에 따라 불포화→포화→불포화 매질에 대한 각각의 변수들이 상대적으로 감소함을 나타낸 것이다. 하지만 일정 기간 동안 수위 변동이 발생될 수록 매질의 높이 변동폭은 초기 변동폭보다 상대적으로 작아져 결국 매질의 압밀도는 증가하여 더 이상의 침하 변동폭은 극히 미미하게만 작용한다(김만일 등, 2006).

이미 포화 및 불포화 매질에 대한 지반 매질의 공극률과 유효공극률 측정은 대상 매질의 유전율 반응 특성



(a) Response of dielectric constant



(b) Variation of drainage water

Fig. 3. Correlation of dielectric constant variations and drainage water by pressure test.

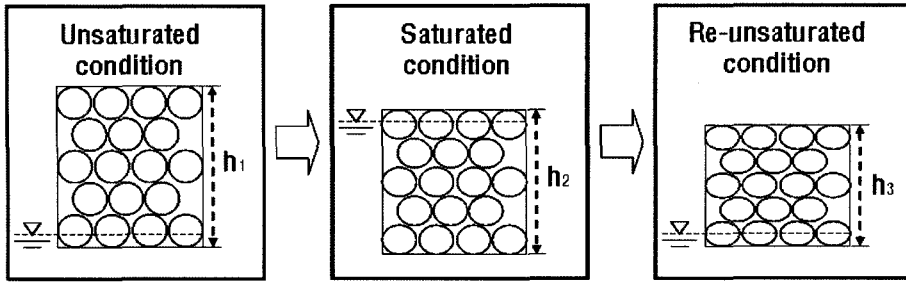


Fig. 4. Conception of ground subsidence due to groundwater level variations.

$$\begin{array}{l}
 \text{Soil height : } \left(\begin{array}{c} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{array} \right) \\
 \text{Soil volume : } \left(\begin{array}{c} V_{unsat} \\ V_{sat} \\ V_{unsat}^{**} \end{array} \right) \\
 \text{Porosity : } \left(\begin{array}{c} n \\ n^* \\ n^{**} \end{array} \right) \\
 \text{Effective porosity : } \left(\begin{array}{c} n_e \\ n_e^* \\ n_e^{**} \end{array} \right) \\
 \text{Dielectric constant : } \left(\begin{array}{c} \epsilon \\ \epsilon^* \\ \epsilon^{**} \end{array} \right)
 \end{array}
 >$$

Fig. 5. Correlation of physical parameters of soil media due to ground subsidence; non-* (first unsaturated condition), *(second saturated condition), ** (third unsaturated condition).

수를 보이지만, 불포화 매질인 경우에는 공극 내 공기의 영향으로 인해 낮은 유전율상수를 갖는다. 또한 토입자의 밀도가 클 때보다는 작은 경우에 유전율상수가 상대적으로 낮게 나타난다.

이러한 다양한 매질의 물리적 특성을 고려해 본다면 수위 변동에 의한 매질 내 공극의 분포 특성에 따라 측정되는 유전율상수의 범위가 낮게 측정될 것이며, 이러한 경향으로 보아 수위 변동에 의한 지반침하 분포 특성을 유전율상수 반응으로 충분히 파악할 수 있다. 결국 지반 침하와 유전율상수의 관계를 Fig. 6으로 요약해 볼 수 있다.

결 언

으로 정량적인 계측이 가능하다. 따라서 지반침하와 관련한 지반의 물리적 변화는 매질의 체적 변화, 공극률 및 유효공극률의 감소, 유전율상수의 감소 등과 같은 물성치의 변동으로 파악이 가능하다. 즉 포화 및 불포화 매질에서의 유전율상수 반응은 토입자, 물, 공기 및 공극의 영향을 민감하게 받는다(Wilson *et al.*, 1995; Noborio, 2001; Reddi, 2003). 포화 매질의 경우 공극 내 물로 완전히 충전되어 있기 때문에 토입자의 유전율상수 영향보다는 물의 영향을 많이 받아 높은 유전율상

석조문화재가 위치한 지반침하로 인해 구조물의 붕괴 등이 발생되어 국가적 손실을 초래하고 있는 실정에서 다수의 현장 모니터링 기법이 이미 소개되어 있지만, 본 연구에서는 지반의 포화 및 불포화 조건을 형성하는 수위변동에 따른 지반침하 모니터링 기법을 제안하였다. 이 기법은 지반이 가지는 고유 유전율 반응을 공학적

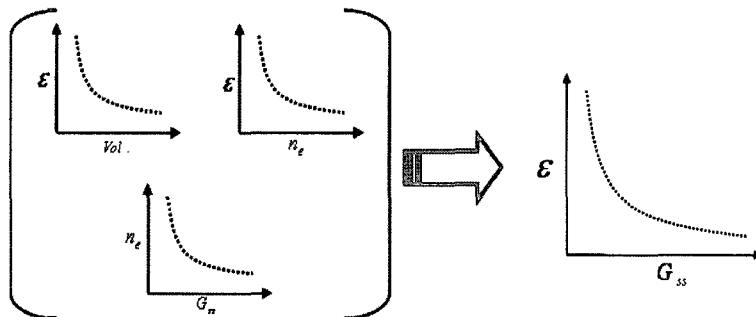


Fig. 6. Detection of ground subsidence using the response of dielectric constant; G_{ss} (ground subsidence), $vol.$ (soil volume), n_e (effective porosity).

개념으로 정립한 것으로서 수위변동에 따른 지반 매질의 유전을 반응을 분석하였다. 다시 말해 지반침하와 관련하여 불포화 및 포화 매질의 유효공극률 변화와 지하수위 변동에 따른 지반침하와 유전율상수의 상호 연관성에 대해 연구를 수행하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1) 표준사 시료를 이용하여 불포화 및 포화조건에서 측정된 유효공극률의 변화는 시료 제작시 설정한 체적함수비가 높을수록 공극률 대비 유효공극률의 측정 범위가 감소함을 알 수 있었다.

2) 체적함수비가 높을수록 유효공극률이 감소하는 것은 토입자의 공극 내 밀폐된 공극의 비율이 연결된 공극의 비율보다 높다는 것을 의미하는 것으로서 이는 지속적인 수위 변동이 발생시 지반침하량이 클 것으로 사료된다.

3) 지반 매질이 갖는 고유 유전율상수는 토입자 내지 공기보다는 물의 유전율상수가 월등히 높기 때문에 대부분의 유전율 반응은 물에 의해 영향을 받는다. 이는 지반이 불포화 조건보다는 포화 조건에서 유전율상수가 높게 나타남을 의미하는 것이다.

4) 수위 변동에 따른 유전율반응은 매질의 공극 내 체적함수비가 높을수록 높은 유전율상수를 가지며, 공극의 분포 범위가 작을수록 낮은 유전율상수를 나타낸다. 따라서 현 지반에서 측정된 유전율상수가 상대적으로 작아질수록 지반침하가 지속적으로 발생하는 것으로 사료된다.

5) 지반의 유전율 반응을 이용한 지속적인 모니터링이 이루어진다면 지반침하의 진행 여부를 충분히 파악할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해서는 유전율 측정장치의 현장 모니터링 적용을 통해 보다 정량적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 국립문화재연구소의 2006년 보존과학 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

김만일, 임헌태, 김형수, 2006, 수위변동에 따른 포화/불포화 매질의 체적함수비 변화 특성 평가, 한국지반공학회 학술발표회, pp.1076-1082.
대한민국학술원, 2005, 2005년도 대한민국학술원 정책토론회.
Attewell. 1984. Ground moements and their effects on

structures, Blackie & Son Ltd.

Harr, M. E., 1991, Groundwater and seepage, Dover publications, INC., 315p.

Noborio, K., 2001, Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, Computers and electronics in agriculture, 31, pp.213-237.

Reddi, L. N., 2003, Seepage in soils - principles and applications, John Wiley & Sons, INC., 402p.

Young, O. C., 1984, Buried rigid pipes, Elsevier applied science publisher, Londong and New York.

Wilson, L. G., Everett, L. G. and Cullen, S. J., 1995, Handbook of vadose zone characterization & monitoring, Lewis publishers, 385p.

2006년 8월 13일 원고접수, 2006년 9월 17일 게재승인

김만일

안동대학교 지구환경과학과

760-749, 경북 안동시 송천동 388

Tel: 054-820-5185

Fax: 054-823-1627

E-mail: mikim@andong.ac.kr

양동윤

한국지질자원연구원

305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3031

Fax: 042-861-9723

E-mail: ydy@kigam.re.kr

이규식

국립문화재연구소

305-380, 대전광역시 유성구 문지동 472

Tel: 042-860-9250

Fax: 042-861-4928

E-mail: hlj3men@nrcip.go.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과

760-749, 경북 안동시 송천동 388

Tel: 054-820-5753

Fax: 054-823-1627

E-mail: jeong@andong.ac.kr