

유전율법에 따른 다공질 매질의 특성 파악을 위한 실험적 연구

김만일*¹⁾ · 니시가끼 마코토²⁾

¹⁾오카야마대학 대학원 자연과학연구과, ²⁾오카야마대학 환경이공학부 환경디자인공학과

An Experimental study to estimate physical properties of porous media by a permittivity method

Man-Il Kim*¹⁾ · Makoto Nishigaki²⁾

¹⁾Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Japan

²⁾Dept. of Environmental and Civil Design, Faculty of Environmental Science and Technology,
Okayama University, Japan

요 약

지반을 구성하고 있는 매질에 대한 체적함수비 및 포화 정도를 측정하는 것은 지반의 물리적 성질, 강우에 의한 지하수 함량 및 자연 사면 파괴를 이해하는데 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 이러한 지반의 요소들을 파악하기 위해 전자기파를 이용한 유전율법은 지반의 유전율상수의 특성에 따라 평가되어 지므로 다양한 분야에 적용되고 있다. 본 연구에서는 전자기파의 측정 주파수 범위 1 - 18 GHz를 사용하는 유전율 시스템인 FDR-V (Frequency domain reflectometry with vector network analyzer)를 적용하여 1 GHz와 18 GHz에서의 두 주파수 범위에 대한 표준사 (Standard sand)와 화강풍화토 (Granitic weathered soil)의 밀도, 온도 및 염분농도 의존성에 따른 유전율상수의 반응에 대해 검토하였다. 실험 결과에서, 흙의 밀도 의존성은 체적함수비의 증가에 따라 유전율상수도 증가하는 것으로 측정되었으나, 이들의 밀도 의존성은 다소 낮은 것으로 판단된다. 그리고, 1 GHz 실수부 (Real part)에 대한 온도의 의존성 실험에서는 온도의 증가에 따라 물과 표준사의 유전율상수는 점진적으로 감소하는 경향을 보이거나 에탄올의 유전율상수는 증가하는 것으로 측정되었다. 따라서, 온도 변화에 따른 각 매질의 유전율상수는 측정 온도에 대한 영향을 고려하여야 한다. 염분농도에 따른 유전율상수의 변화는 1 GHz 허수부 (Imaginary part)에서 염분농도의 증가에 따라 유전율상수의 측정치도 함께 증가하는 것으로 나타났다. 이상과 같이, 다양한 조건하에 대한 유전율상수의 의존성들을 기초로 하여 다공질 매질의 특성을 파악하기 위한 FDR-V 시스템의 적용성을 충분히 검토하였다. 결론적으로, 본 연구에서는 1 GHz의 측정 주파수범위 내에서 다공질 매질의 염분오염도를 충분히 정량적으로 측정할 수 있는 것으로 생각된다.

주요어 : 유전율, 유전율상수, 밀도의존성, 온도의존성, 염분의존성, 토양의 염분오염

ABSTRACT: Measurements of volumetric water content and saturation of porous media are very important factors in understanding the physical characteristics of soil, groundwater recharge by rainfall.

*Corresponding author : mikim@gw.civil.okayama-u.ac.jp

pollutant movement, and slope failure. To measure such physical parameters, a permittivity method using electromagnetic wave is applied and use is made of the special permittivity response of understand to water and ethanol. In particular, the estimation is required because permittivity is influenced by the nature of the underground environment. In this study, we carried out experiments on the relative dependency of soil density, temperature and salinity of standard sand and granitic weathered soil using FDR-V system (Frequency domain reflectometry with vector network analyzer) within a frequency range of 1 - 18 GHz. The results of the study showed that the dielectric constants of standard sand and granitic weathered soil increased with increased volumetric water content of soil. However, the dependency of soil density was found to be a little low. Changes of dielectric constant with temperature appeared definitely in the real part of 1 GHz. That is, the dielectric constant of real part at 1 GHz of water and standard sand increased with the rise of temperature. However, ethanol showed decreased tendency. The study also showed that dielectric constant increased with increase in salinity at imaginary part of 1 GHz. It could be concluded from this study. FDR-V system can adequately measure the physical properties of soil and the degree of salinity concentration of porous media within 1 GHz frequency range using dielectric constant.

Key words : Permittivity, Dielectric constant, Density dependency, Temperature dependency, Salinity dependency, Saline contamination of soil

서 론

토양은 대기, 물과 더불어 인간의 생존 기반인 동시에 물질의 순환과 생태계를 유지하는데 주요한 역할을 하고 있다. 그러나 급격한 산업화와 인구의 도시 집중으로 인해 대기오염, 수질오염, 폐기물오염에 이어 최근에 이르러 환경의 최종 귀착지인 토양까지도 각종 유해물질로 오염되어 지구의 전반적인 환경을 위협하고 있는 실정이다. 인간 활동범위가 광범위하게 확대됨으로써 지반오염 중의 하나인 지반의 염분 함유량 또한 증가하고 있다. 특히, 과도한 지하수의 채수는 지반의 침하 뿐만 아니라, 지반의 염분화를 가속화시키는 결과를 초래하고 있다. 또한, 농경지에서 과도한 농약 사용은 토양의 염분 함유량을 증가시키는 요인으로 대두되고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 토양과 지반의 염분 함유량을 체계적인 모니터링을 실시하여 신속하고 정확한 염분에 의한 지반오염을 예측할 수 있는 기술이 절실히 요구된다.

지반을 이루고 있는 다공질 매질은 고유의 유전율상수에 대한 특성을 가지고 있다. 지반을 구

성하고 있는 다양한 매질에 대한 유전율의 특성을 이용하여 지반의 물리적 성질을 파악하는 유전율 측정법은 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 현재까지 소개된 이러한 유전율 측정법은 time domain reflectometry (TDR: Topp et al., 1980), amplitude domain reflectometry (ADR: Miller and Gaskin, 1996; Gaskin and Miller, 1996) 그리고 frequency domain reflectometry (FDR: Beiping et al., 1996a, 1996b) 등 세 가지로 크게 분류할 수 있다. 특히, TDR 측정법은 현장의 체적함수비 및 토양오염의 정도를 측정하기 위해 다방면으로 응용되고 있다 (Jackson, 2003; Huisman et al., 2001, 2002; Nakashima et al., 1998; Mojid et al., 1998). 또한 강우에 의한 사면 파괴를 정량적으로 파악하기 위해서 사면에 대한 함수비의 측정이 가능한 ADR 측정법을 이용하여 함수비 모니터링과 사면파괴 해석에도 적용되었다 (天野 등, 2002; Adrin, 2002).

본 연구에서는 지반의 염분오염에 대한 지속적인 모니터링을 실시하여 예측할 수 있는 새로운 유전율 측정법을 제시하였다. 동축측정프로브 (Coaxial Measurement Probe)를 이용한 이 측정

유전율법에 따른 다공질 매질의 특성 파악을 위한 실험적 연구

법은 1 GHz에서 18 GHz의 주파수 범위 내 전자 기파의 반응 인피던스에 따라 지반의 오염 정도를 측정할 수 있다. 따라서, 지반에 대한 염분농도 측정을 위한 기초연구로서, 다공질 매질의 특성 및 유전율상수에 대한 흙의 밀도, 온도 그리고 염분의존성도 함께 검토하였다. 이러한 의존성은 다공질 매질을 구성하고 있는 흙 입자, 물 그리고 오염물질에 대한 유전율상수의 특성 파악에 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 특히, 표준사에 대한 염분농도의 측정을 실시하여 야외에서의 토양에 대한 염분농도를 측정할 수 있는 측정법을 제시하였다.

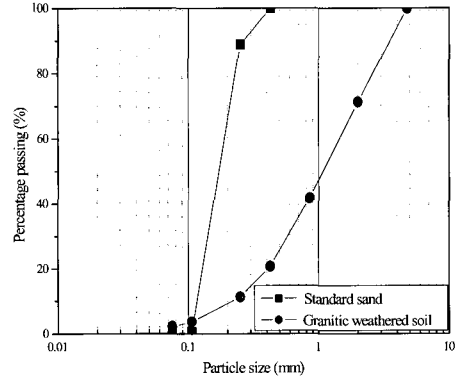


Fig. 1. Grain size distribution curve of the sands.

실험시료 및 방법

실험시료

실험에 사용된 흙은 표준사 (Standard sand)와 화강풍화토 (Granitic weathered soil)를 사용하였다. 이 두 종류의 흙의 입도분포와 기본물성치는 Table 1과 Figure 1에 나타내었다. 일반적으로 체분석을 통해 유도된 입도분포곡선 결과치는 유효입경 (D10), 균등계수 (Uniformity coefficient, Cc), 그리고 곡률계수 (Curvature coefficient, Cu) 등의 파라미터를 이용하여 흙의 투수성과 입도분포의 상태를 파악할 수 있다. 측정된 곡률계수와 균등계수의 결과로부터 표준사는 입도가 전반적으로 불량한 상태이지만 화강풍화토는 입도 분포가 다소 양호한 것으로 판단된다.

실험방법

유전율 측정법은 지반을 구성하고 있는 다공질 매질의 전자기파에 의해 반응하는 유전율을 이용하는 측정법이다. 본 연구에 적용된 유전율 측정 시스템은 frequency domain reflectometry with vector network analyzer (FDR-V) 시스템을 적용하여 측정 주파수 1 - 18 GHz 범위 내에서 매질의 유전율을 신속하게 측정할 수 있는 장치를 사용하였다. FDR-V 시스템은 기본적으로 벡터 네트워크 어날라이저 (Vector Network Analyzer, VNA), 스위치 유닛 (Switch Unit, SU), 그리고 측정프로브 (Coaxial Measurement Probe, CMP) 등 총 세 가지의 장비로 구성되어 있다 (Figure 2). 각각의 특성 인피던스는 50 ohm의 동축 전송

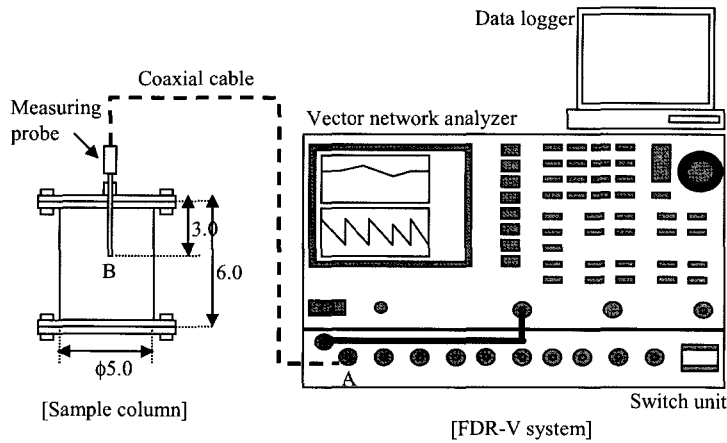
Table 1. Physical characteristics of soils.

| | | Standard sand | Granitic weathered soil |
|--------------------------------|--------|---------------|-------------------------|
| Specific gravity | | 2.65 | 2.69 |
| Distribution of grain size (%) | Coarse | 0.0 | 28.7 |
| | Sand | 99.9 | 69.2 |
| | Silt | 0.1 | 2.1 |
| | Clay | 0.0 | 0.0 |
| Uniformity coefficient, Cu | | 1.727 | 6.905 |
| Curvature coefficient, Cc | | 0.938 | 1.105 |

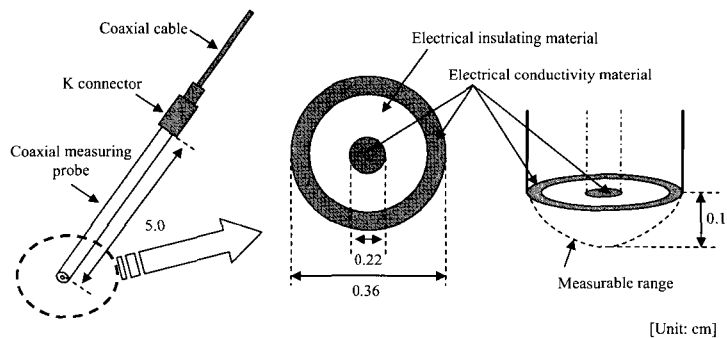
선 (Coaxial Transmission Line, CTL)에 접속되어
져 있으며, VNA 및 SU를 컴퓨터 (Data logger)
와 GP-IB로 접속되어서 SU의 각 채널의 컨트롤
및 CMP에서 측정된 데이터를 저장할 수 있는 기
능을 수행한다.

Figure 2에서와 같이, VNA에서 발생된 전자기
파는 본체의 A 지점으로부터 SU으로 전달된다.
여기서, 각 채널의 포트를 통하여 CTL을 따라
CMP의 측정부분에 전달되며, 시료 내부까지 전
달된 전자기파는 유전율 측정부분인 CMP 끝부분
의 B 지점에서 완전히 반사되어 SU으로 되돌아
간다. SU에서는 증폭기와 방향성 결합기가 내장

되어져 있어, 반사파와 직진파를 선별하여 반사파
만이 증폭되어 VNA에서 각각의 주파수 영역에
대해 실수부 (Real part, ϵ')와 허수부 (Imaginar
part, ϵ'')의 유전율상수가 측정되어진다. 유전율
상수는 매질이 가지고 있는 고유의 유전 특성을
전기학적 성질을 나타낸다. 일반적으로 유전율상
수는 하나의 주파수 범위에서 반사되는 매질의
특성을 갖는 실수부 유전율상수 (real part of
dielectric constant)와 매질의 측정부분에서 흡수
되어져 감쇠되는 허수부 유전율상수 (imaginary
part of dielectric constant)로 쌍을 이루어 존재하
는데, 이들을 복소 유전율상수 (complex dielectric



(a) Set-up of the experimental apparatus.



(b) Coaxial measurement probe of the FDR-V system.

Fig. 2. Schematic diagram of the FDR-V system.

constant)라고 한다 (Bekefi and Barrett, 1987). 따라서, 측정하는 매질의 성질에 따라서 복소 유전율상수는 상대적인 측정 범위를 나타낸다. 또한, VNA는 전자기파 측정물질 내의 반사계수를 S 파라미터에 의해 직접 구해지기 때문에, 어떠한 물질에 대해서도 유전율의 측정이 가능하다는 특징이 있다. 또한, 측정 주파수범위가 1 GHz 에서 18 GHz까지 매우 광범위하게 넓기 때문에, 지금까지 측정이 불가능했던 다양한 매질에 대한 유전율상수의 측정 및 흡 입자 구조 및 내부에 존재하는 미량의 수분량의 측정에도 적용할 수 있는 가능성이 있다.

다공질 매질의 유전율의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j(\epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \cdot \epsilon_0}) \quad (1)$$

여기서, ϵ^* 은 매질의 유전율상수 (dielectric constant)를 나타내며, ϵ' 와 ϵ'' 는 각각 전기장 (electric capacity)에 의존하는 실수부 유전율상수 (real part)와 유전율 손실의 영향에 의존하는 유전율상수의 허수부 (imaginary part)를 의미한다. 또한, 전기장은 매질에 포함된 물 체적의 영향에 의해 나타나며, 유전율 손실은 흡과 물에서 용질의 혼합에 의한 비율과 동일하게 고려되어 진다.

σ_{dc} 는 dc전도도이며, ω 는 전파의 주파수를 나타낸다. 그리고, ϵ_0 와 j 는 각각 진공에서의 유전율상수와 $-1^{1/2}$ 의 값을 의미한다.

본 실험은 지반을 구성하고 있는 다양한 다공질 매질에 대한 유전율 의존성을 측정하기 위해, 표준사 및 화강풍화토, 그리고 염분수용액의 농도에 따른 유전율상수의 변화로부터 유전율 시스템의 적용성을 평가하였다. 시스템의 CMP의 측정 범위는 직경 0.36cm의 측정센서 끝부분에서 유전율상수가 측정되어 측정범위가 비교적 작기 때문에 아크릴 칼럼은 직경 5 cm, 높이 6 cm로 CMP의 측정범위를 고려하여 제작하였다. CMP의 삽입은 칼럼 상부의 중앙부분에서 3 cm 삽입하여 각 매질에 대한 유전율상수의 측정을 수행하였다. 또한, 유전율 측정치는 1 GHz와 18 GHz의 실수

부와 허수부에 대한 측정치를 선택하여 각 시료의 유전율상수의 변화를 검토하였다. 여기서, 각 매질에 대한 실험은 유전율의 적용성에 관한 검토를 위하여 흡의 밀도 의존성, 온도 의존성, 그리고 염분농도에 대한 의존성에 관하여 실험을 실시하였다.

유전율상수 변화에 따른 흡의 밀도 의존성을 측정하기 위해, 표준사는 체적함수비 0.04, 0.14, 0.24 그리고 0.29로 제작하였으며, 화강풍화토는 체적함수비 0.10, 0.17 및 0.25로 각각 제작하였다. 흡에 대한 건조밀도는 표준사 1.45 - 1.57 g/cm³, 그리고 화강풍화토 1.28 - 1.9 g/cm³의 범위 내에서 각기 설정하여 총 45개의 흡 칼럼을 제작하여 실험을 실시하였다. 그리고, 물, 에탄올 수용액 및 표준사에 대한 온도 의존성을 확인하기 위해, 섭씨 5 - 45 °C 범위 내에서 5 °C 씩 상승시켜 각 설정 온도에 따른 유전율의 변화도 함께 검토하였다. 이 때, CMP의 칼리브레이션을 위해 표준 교정용액인 아세톤 ($\epsilon_{acetone} = 21.20$)를 사용하여 시스템의 칼리브레이션을 실시하였다. 마지막으로 지반 오염의 원인 중의 하나인 염분 오염도를 측정하기 위해, 시스템의 염분농도에 대한 측정 가능성에 대해서도 검토를 실시하였다. 제작된 염분농도 0 - 40,000 ppm의 범위에 대해 2,500 ppm 이내의 저농도영역에서는 500 ppm 씩 염분농도를 증가시켜 제작하였다. 또한 5,000 ppm 이상에서는 5,000 ppm, 10,000 ppm, 20,000 ppm 그리고 40,000 ppm으로 각기 제작하여 염분농도에 따른 유전율상수의 변화를 측정하였다. 이 때, 염분 수용액의 온도는 20 °C로 일정하게 유지된 상태에서 실시하였으며, CMP의 교정용액은 정수 ($\epsilon_{water} = 80$)를 사용하여 실시하였다. 뿐만 아니라, 시스템의 적용성의 확대와 실제 지반 측정 가능성을 검토하기 위하여 각 농도별 염분 수용액을 함유한 표준사의 유전율 영향에 대한 검토도 실시하였다. 실험 장치와 방법은 밀도 의존성 검토에 사용된 것과 동일한 방법으로 적용하였으며, CMP의 표준 교정용액은 아세톤을 사용하였다. 건조밀도 1.50 g/cm³ 및 초기 공극률 0.40을 가지는 압밀된 표준사 칼럼을 제작하였다. 염분수용액의 농도는 5,000 ppm, 10,000 ppm, 15,000 ppm, 20,000 ppm 그리고 30,000 ppm으로 제작하여 각각의 포화도 (Sr, %)

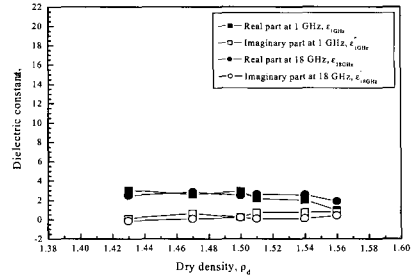
를 10 - 90 %의 범위 내에서 10 % 씩 증가시키면서 제작하였다. 이 때, 실내온도는 지반의 온도 범위와 비슷한 15 °C로 일정하게 유지된 상태에서 실험을 실시하였다.

실험결과 및 토의

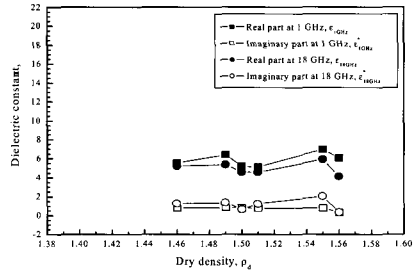
유전율의 밀도 의존성

지반의 밀도는 퇴적과정과 지반을 구성하는 다공질 매질에 의해 매우 다양한 구조를 가지고 있다. 특히, 지반의 밀도는 지표에 존재하는 액상의 물질에 대한 침투특성을 결정하는 중요한 물성치 중의 하나로써, 오염물질의 지반 내 거동은 지반의 공극률 및 유효공극률에 의해 크게 좌우된다. 즉, 지반의 이러한 파라미터를 원위치에서 정확하게 측정할 수 있다면, 오염물질의 거동을 파악할 수 있다는 중요한 요소를 제공해 줄 것이다. 따라서, FDR-V 측정법을 실내 및 원위치 측정에 적용하기 위해 건조밀도의 차이에 따른 유전율 변화에 대한 검토를 실시하였다.

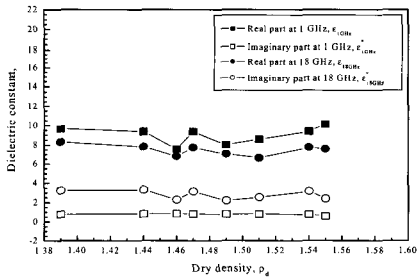
유전율상수의 밀도 의존성은 각각의 체적함수비와 건조밀도를 갖는 흙 칼럼에 대해 측정 주파수인 1 GHz와 18 GHz에서의 측정된 실수부와 허수부의 관계를 비교하였다. Figure 3은 표준사에 대한 측정결과를 실수부 (ϵ')와 허수부 (ϵ'')의 유전율상수인 ϵ'_{1GHz} , ϵ''_{1GHz} , ϵ'_{18GHz} 그리고 ϵ''_{18GHz} 의 관계로 도시하였다. 표준사에 대한 실험결과, 건조밀도 의존성은 다소 낮게 나타났다지만, 체적함수비의 증가에 따라 전반적으로 실수부의 유전율상수가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 실수부의 유전율상수 중에서 18 GHz보다는 1 GHz의 측정 주파수 범위에서 확연히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이에 비해서 허수부의 유전율상수는 체적함수비의 증가폭에 비해 측정치의 변화폭은 다소 낮게 측정되었다. 화강풍화토의 측정결과는 각 건조밀도의 범위에 따라 체적함수비 0.10, 0.17 및 0.25에 대한 유전율상수의 변화를 Figure 4에 도시하였다. 측정된 유전율상수의 변화는 체적함수비의 증가에 따라 1 GHz에 대한 실수부의 측정치가 크게 증가



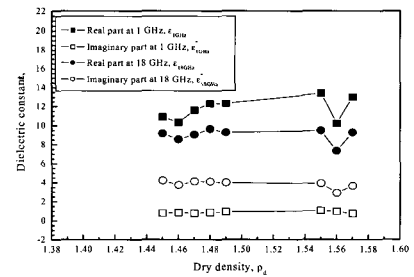
(a) Volumetric water content 0.04.



(b) Volumetric water content 0.14.



(c) Volumetric water content 0.24.



(d) Volumetric water content 0.29.

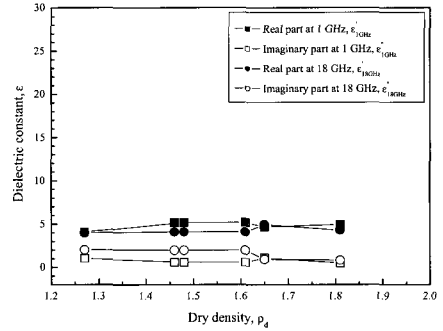
Fig. 3. Variation of dielectric constant between volumetric water content and dry density of standard sand.

하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 체적함수비 0.10 및 0.17에서는 주파수 범위에서 유전율 측정치의 변화는 거의 비슷하게 측정되었지만, 체적함수비 0.25의 높은 체적함수비 영역에서는 밀도가 높아질수록 유전율 측정치는 감소하는 경향을 보이고 있다 (Figure 4). 이러한 유전율 측정치의 감소는 건조밀도가 커짐에 따라 CMP 측정부에서 흙 입자의 비율이 증가되고, 또한 측정부분의 수분량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 화강풍화토에 대해서도 밀도 변화에 따른 유전율의 영향은 극히 미미함으로 유전율에 따른 밀도의 의존성은 낮은 것으로 판단할 수 있다. 그러나, 제작된 흙의 건조밀도와 체적함수비의 관계에서는 체적함수비의 증가에 따라 1GHz의 실수부의 유전율상수 (ϵ'_{1GHz})가 다른 유전율상수 (ϵ'_{18GHz} , ϵ''_{18GHz} 및 ϵ''_{1GHz})보다 측정치의 변화가 크게 나타났다. 따라서, 본 시스템의 측정 주파수에 따른 유전율상수의 변화를 고려해 보면, 다공질 매질에서의 밀도 내지 체적함수비의 측정에 있어 1 - 18 GHz 주파수 범위 중 단지 1 GHz의 실수부에 대한 유전율상수만으로 측정이 가능할 것으로 판단된다.

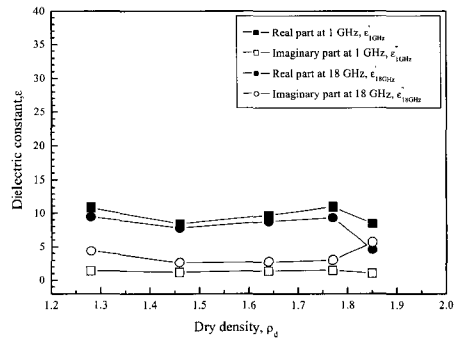
유전율의 온도 의존성

지반 내의 온도는 계절, 기후 및 지형 등의 여러 가지 요인에 의해 영향을 받아 지속적으로 변한다. 특히, 지표의 경우는 이러한 요인에 의해 급격한 온도 변화를 보이지만, 지하 심부로 갈수록 온도의 변화폭은 미미하여 거의 일정한 온도를 나타낸다. 따라서, 각 매질의 온도 변화에 따른 유전율상수의 영향을 검토하고, 온도에 대한 보정 방법을 제시함으로써 정확한 유전율 데이터를 획득할 수 있을 것으로 판단한다.

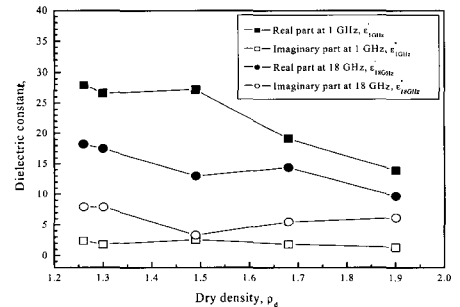
온도 의존성에 대한 유전율의 변화를 확인하기 위해, 물, 에탄올 수용액 및 공극률 0.40으로 제작된 표준사에 대해 각각 실시하였다. 특히, 유전율의 변화는 수분 함량에 영향을 받기 때문에 표준사 시료는 24시간 건조로에서 건조한 시료를 사용하였다. 여기서는 1 GHz에서 18 GHz까지의 측정 주파수 범위 중에서 1 GHz의 실수부에 해당하는 유전율상수만을 선별하여 유전율상수의 변화를 검토하였다 (Figure 5). 세 종류의 매질에 대한 측정결과, 물과 표준사 ($n = 0.40$)에서 온도 상승에 따라 유전율이 감소하는 것으로 측정되었다.



(a) Volumetric water content 0.10.



(b) Volumetric water content 0.17.



(c) Volumetric water content 0.25.

Fig. 4. Variation of dielectric constant between volumetric water content and dry density of granitic weathered soil.

이에 반하여 에탄올 수용액의 유전율은 온도 상승과 함께 유전율도 상승하는 것으로 나타났다.

이처럼 물과 에탄올 수용액은 온도의 상승에 따라 큰 폭의 변화를 나타내기 때문에 유전율의 측정시 온도 보정이 필요할 것으로 판단된다. 이와 반대로 표준사의 경우, 온도 상승에 따른 유전율의 변화가 미미하게 감소하기 때문에 온도 의존성은 매우 낮은 것으로 판단된다. 그러나, 유전율 상수는 온도 및 수분 등에 의한 영향이 크기 때문에 측정시 온도 보정이 반드시 필요할 것으로 사료된다. 따라서, ϵ'_{1GHz} 의 유전율상수의 측정치에 대한 일차방정식의 온도 보정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\epsilon'_{1GHz}(water) = -0.52T + 91.28 [R = -0.98] \quad (2)$$

$$\epsilon'_{1GHz}(ethanol) = 0.15T + 11.06 [R = 0.97] \quad (3)$$

$$\epsilon'_{1GHz}(S.Sand) = -0.04T + 3.76 [R = -0.68] \quad (4)$$

여기서, T 는 측정 온도 ($^{\circ}C$)이며, $S.Sand$ 는 표준사를 나타낸다.

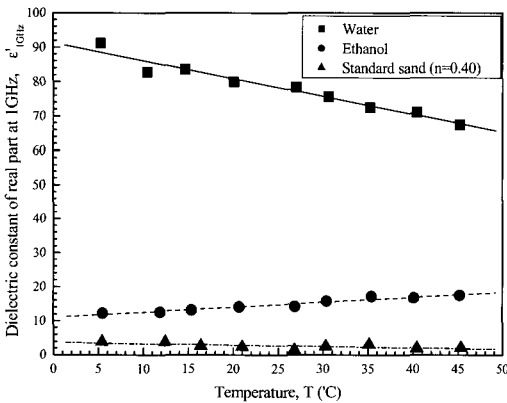


Fig. 5. Variation of dielectric constant with temperature.

유전율의 염분농도에 따른 의존성

지하수의 과도한 채취 및 농경지의 부적절한 이용으로 인해 실제 지반 내에는 염분 함유량이 증가되고 있으며, 이로 인해 지반의 산성화 및 지반 오염이 광범위하게 발생되고 있는 실정이다. 다공질 매질의 염분 오염도를 측정하기 위해서 TDR 측정법에 의해 연구가 진행되어졌다 (Nadler and Ward, 2001; Sun and Young, 2001). 이것은 일반적으로 2분 내지 3분으로 구성된 측정 로드를 사용하기 때문에 다공질 매질에 삽입하기가 다소 어려울 뿐만 아니라, 측정로드가 휘어질 경우에는 측정되는 유전율상수에 영향을 미친다. 그러나, 본 연구에 적용된 FDR-V 시스템의 측정 프로브는 측정범위가 CMP 끝부분에서 이루어지고, 연구 목적에 맞게 CMP의 길이를 조절할 수 있기 때문에 TDR 측정법 보다는 보다 정확한 다공질 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 장점이 있다.

본 실험에서는 FDR-V 시스템의 적용 범위 내에서 염분농도를 측정하기 위해 염분수용액을 각 농도별로 제작하여 유전율의 염분농도 의존성에 대해서 검토하였다. 염분수용액 0 - 40,000 ppm의 농도에 대한 유전율의 변화를 측정된 결과는 다음과 같다. 측정된 주파수 범위 내에서 1 GHz와 18 GHz의 두 지점에 대한 유전율의 결과로부터, 염분농도의 증가에 따라 ϵ'_{1GHz} , ϵ'_{18GHz} 그리고 ϵ''_{18GHz} 의 유전율상수의 측정치는 거의 변화가 없이 일정한 지수관계의 결과를 보이고 있으나, ϵ''_{1GHz} 의 유전율상수에 대한 측정치는 염분농도가 3,000 ppm 이하에서는 거의 유전율상수의 변화가 나타나지 않았지만, 4,000 ppm 이상부터는 유전율상수가 급격히 상승하는 것을 확인하였다 (Figure 6). 따라서, 염분농도에 대한 유전율상수의 변화는 1 GHz의 허수부 (ϵ''_{1GHz})에서만 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 이에 ϵ''_{1GHz} 의 측정치에 대한 염분농도의 관계를 일차 방정식으로 근사시켜 나타낸 결과, 유전율 측정치의 증가에 대한 관계를 다음과 같이 나타내었다 (Figure 7).

$$\epsilon''_{1GHz} = 0.002C + 6.523 [R = 1.00] \quad (5)$$

유전율법에 따른 다공질 매질의 특성 파악을 위한 실험적 연구

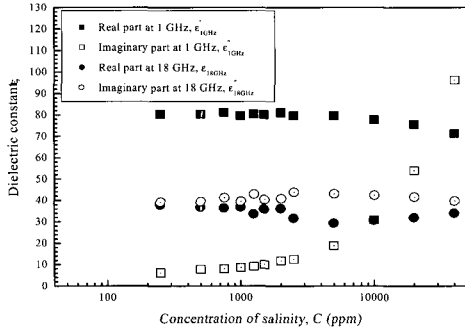


Fig. 6. Variation of dielectric constant between 1 GHz and 18 GHz of real and imaginary part.

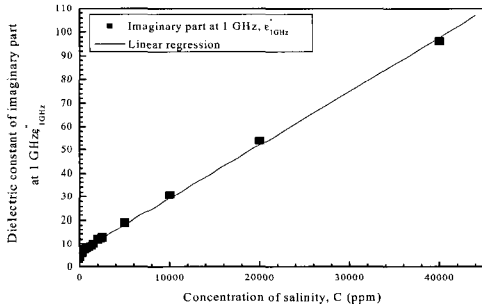
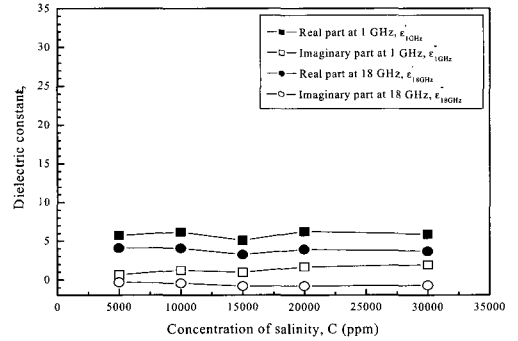


Fig. 7. Relationship of imaginary part of dielectric constant at 1 GHz.

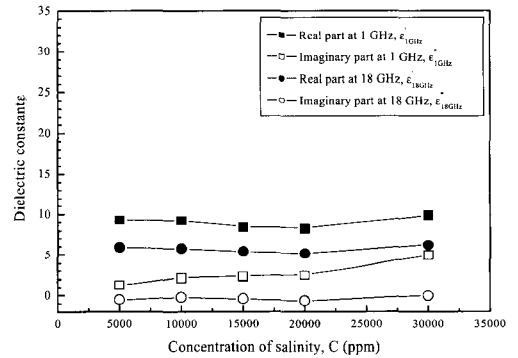
여기서, C 는 염분수용액의 농도 (ppm)을 나타낸다. 그러므로, 식 (5)에 의해 측정된 1 GHz의 허수부 유전율상수에 의한 염분수용액의 농도 측정 가능성을 확인할 수 있다.

염분농도에 따른 유전율의 변화

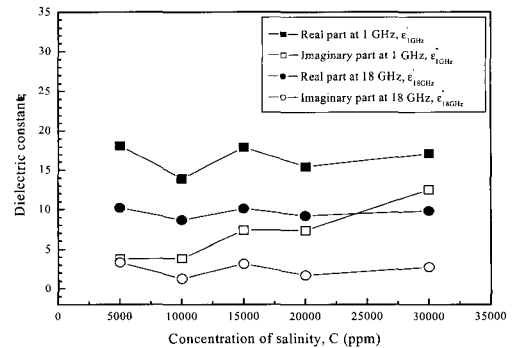
FDR-V 시스템 측정법에 따른 실제의 지반 측정을 가정하고, 염분농도에 따른 표준사의 유전율상수에 대한 영향을 검토하였다. Figure 8은 염분수용액에 따른 표준사의 포화도 30 %, 60 % 및 90 %에 대한 측정 주파수 1 GHz와 18 GHz의 유전율상수 결과치를 도시하였다. 염분수용액을 함유한 표준사의 유전율상수는 포화도 60 %까지는 염분수용액의 농도에 관계없이 일정하게 분포를 보이고 있으나, 포화도 90 %에 대한 유전율상수의 변화는 ϵ'_{1GHz} , ϵ'_{18GHz} 그리고 ϵ''_{18GHz} 에서는



(a) Saturation 30 %.



(b) Saturation 60 %.



(c) Saturation 90 %.

Fig. 8. Variation of dielectric constant due to salinity concentration.

염분농도의 변화에 따른 측정치는 일정한 범위를 유지하고 있으나, 1 GHz 허수부 (ϵ''_{1GHz})의 유전율 측정치는 염분농도의 증가에 따라 급격히 증

가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 유전율상수의 변화는 염분수용액의 농도에 따른 결과치와 거의 동일한 양상을 보이고 있다.

Figure 9는 ϵ''_{1GHz} 의 유전율의 변화와 포화도의 관계를 나타내었다. 여기에서, 염분농도의 상승에 따라 포화도도 함께 상승하는 것을 알 수 있으며, ϵ''_{1GHz} 의 유전율 측정치의 증가를 나타내는 방정식의 기울기 또한 배수로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 유전율은 염분농도의 감소에 따라 작아짐으로, 염분농도 0 ppm에 대한 각 방정식의 절편의 관계는 포화도의 관계로부터 약 0.885에서 평균 절편치로 고려할 수 있다. 그러므로, ϵ''_{1GHz} 의 유전율상수의 측정치와 염분농도와 관계는 다음 식으로 유도되어졌다.

$$C = \frac{(\epsilon''_{1GHz} - 0.885)}{a} \quad (6)$$

여기서, C 는 염분농도, a 는 각 포화도에 따른 기울기이다.

포화도와 기울기의 관계를 삼차 방정식으로 근사시킨 결과, 아래의 식으로 나타내었다 (Figure 10).

$$a = 6.97 \times 10^{-10} Sr^3 - 3.15 \times 10^{-8} Sr^2 + 1.24 \times 10^{-6} Sr + 7.49 \times 10^{-6} [R^2 = 0.971] \quad (7)$$

여기서, a 는 각 포화도에 따른 기울기, Sr 은 포화도 (%)이다.

각 염분농도에 따른 ϵ''_{1GHz} 의 유전율 측정치가 포화도 및 염분 함유량이 높을수록 지속적으로 증가하는 것으로 측정되었다. 따라서, 표준사 내의 염분농도를 측정하기 위해, ϵ''_{1GHz} 의 유전율 측정치로부터 각 시료의 포화도의 관계를 비교하였다. Figure 11은 염분수용액을 함유한 표준사의 포화도와 ϵ''_{1GHz} 의 관계를 나타내는 것으로써 유전율 측정치를 비교해보면, 포화도의 상승에 따라 유전율상수의 측정치도 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 각 포화도에 대한 ϵ''_{1GHz} 의 유전율 측

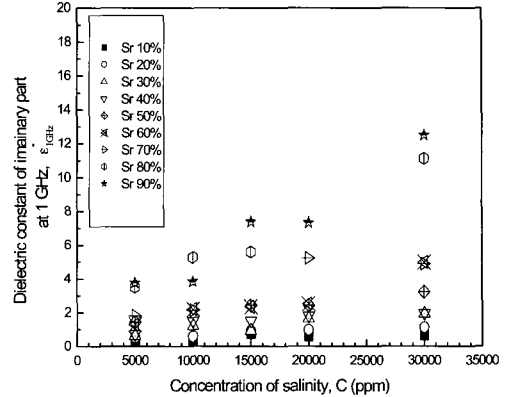


Fig. 9. Relationship of salinity concentration and dielectric constant of imaginary part at 1 GHz at saturation state.

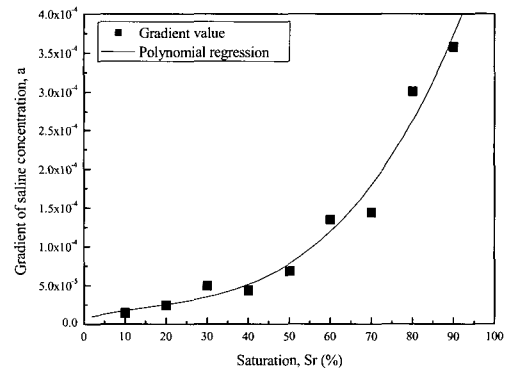


Fig. 10. Relationship of saturation and gradient of dielectric constant of imaginary part at 1GHz.

정치와 포화도의 관계를 이차 방정식으로 근사하였다. 염분수용액의 포화도에 따른 ϵ''_{1GHz} 의 유전율 측정치에 대해서는 동일 포화도의 각 염분농도에 대한 유전율 측정치를 평균하여 구하였다. 그 결과, ϵ''_{1GHz} 의 유전율 측정치와 포화도의 관계는 다음과 같은 식으로 유도되었다.

$$Sr = -0.429 \epsilon''_{1GHz} + 15.07 \epsilon''_{1GHz} - 41.618 [R^2 = 1.00] \quad (8)$$

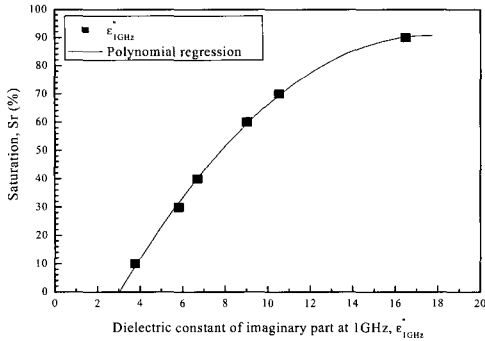


Fig. 11. Relationship of saturation and dielectric constant of imaginary part at 1 GHz.

표준사에 함유된 염분수용액의 농도에 따른 유전율상수의 변화로부터 위에 유도된 세 가지의 관계식 ((6), (7), (8))으로 다공질 매질에 대한 염분농도의 측정이 가능한 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 FDR-V 시스템을 적용하여 측정 주파수 영역의 유전율상수를 연속적으로 측정함으로써, 다공질 매질의 물리적 특성을 파악할 수 있는 가능성에 대해 검토하였다. 구체적으로, 측정 주파수 영역 1 - 18 GHz의 전자기파를 이용하여 동축측정프로브(CMP)의 측정부에서 전자기파의 반사 특성으로부터 진폭과 위상에 따른 반사계수를 벡터 네트워크 어날라이저(VNA) 내에서 검출하여 복소유전율(complex dielectric constant)의 특성에 따라 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)의 유전율상수가 측정되었다. 유전율상수의 변화에 따른 매질의 의존성 검토는 밀도, 온도 및 염분농도에 대한 실험을 실시하였다. 밀도 의존성에 대해서는 표준사와 화강풍화토, 온도 의존성은 물, 에탄올 수용액 및 공극률 0.40으로 압밀된 건조 상태의 표준사에 대해 실시하였으며, 염분농도 의존성의 검토는 염분농도별 염분수용액과 표준사에 대해서 측정하였다. 본 실험 연구의 결과는 각 유전율상수의 의존성에 따라 네 가지 항목으로 요약하여 나열하였다.

1) 밀도 의존성의 검토에서 표준사와 화강풍화토의 밀도에 대한 의존성은 낮은 것으로 확인되었으나, 체적함수비의 증가에 따른 유전율상수의 측정치는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 다공질 매질 내에 존재하는 물의 체적함량에 따라 유전율상수의 측정치가 민감하게 상승한다는 것을 나타내고 있다. 따라서, 동일한 조건하에서 제작된 흙 시료에 대해 체적함수비만을 변화시켜 유전율상수의 변화를 측정할 후, 이들의 관계로부터 유도된 식을 이용한다면 다양한 매질에 대한 유전율상수의 측정만으로 체적함수비의 추정이 신속하게 이루어질 것으로 생각한다.

2) 온도 의존성의 검토에서는 물과 표준사의 측정된 유전율 1GHz 실수부 (ϵ'_{1GHz})에서 온도의 상승에 대해 유전율상수의 감소를 확인하였으며, 에탄올수용액의 온도 의존성은 온도 상승에 따라 유전율도 함께 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 물과 에탄올의 온도 의존성에 대해서는 온도의 영향을 매우 민감하게 받기 때문에 온도 보정이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

3) 염분농도 의존성의 검토에서는 염분수용액의 유전율에 대한 주파수 1GHz의 허수부 유전율상수 (ϵ''_{1GHz})에서 염분농도의 증가에 따른 유전율상수의 상승이 확인되었다. 따라서, 다공질 매질의 염분농도 측정을 시도할 경우, 위의 유도된 식 ((6), (7), (8))을 적용한다면 충분히 대상 매질의 염분농도 측정에 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

4) FDR-V 측정법에 따른 다공질 매질의 염분농도 측정법을 제안하였으며, 실험결과에서 매질의 물리적 특성에 따른 유전율상수의 변화를 충분히 확인하였다.

참 고 문 헌

天野 淨行, 松山 裕幸, 緒方 健治, 2002. 新しい土壤水分計を用いたのり面監視技術に関する検討, 土木學會第57回年次學術講演會, p. 801-802.

Adrin, T., 2002. Shear strength behavior and hydrologic response of residual soil slope to

- rainfall, Ph.D. thesis, Okayama University, Japan.
- Beiping, J., Mitsuno, T., Akae, T., and Nagahoria, K., 1996a, Determination of field soil water content by frequency domain reflectometry (FDR) technique, *Trans. of JSIDRE*, 182, p. 31-38 (in Japanese).
- Beiping, J., Mitsuno, T., Akae, T., and Nagahoria, K., 1996b, Measurement of soil dielectric constant by frequency domain reflectometry and its application to soil moisture measurement of specified depth, *Trans. of JSIDRE*, 182, p. 25-30 (in Japanese).
- Bekefi, G., and Barrett, A.H., 1987, *Electromagnetic vibrations, waves, and radiation*, Cambridge, MA: MIT Press, p. 418-420.
- Gaskin, G.J., and Millker, J.D., 1996, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(2), p. 153-159.
- Huisman, J.A., Sperl, C., Bouten, W., and Verstraten, J.M., 2001, Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar, *Journal of hydrology*, 245, p. 48-58.
- Huisman, J.A., Snepvangers, J.J.J.C., Bouten, W., and Heuvelink, G.B.M., 2002, Mapping spatial variation in surface soil water content: comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry, *Journal of hydrology*, 269, p. 194-207.
- Jackson, S.H., 2003, Comparison of calculated and measured volumetric water content at four field sites, *Agricultural water management*, 58, p. 209-222.
- Miller, J.D., and Gaskin, G.J., 1996, The development and application of the ThetaProbe soil water sensor, MLURI Technical Note, Macaulay Land Use Research Institute, Aberdeen, U.K.
- Mojid, M.A., Wyseure, G.C.L., and Rose, D.A., 1998, The use of insulated time-domain reflectometry sensors to measure water content in highly saline soils, *Irrigation Science*, 18, p. 55-61.
- Nakashima, M., Inoue, M., Sawada, K., and Nicholl, C., 1998, Measurement of soil water content by Amplitude Domain Reflectometry method and its calibration, *Journal of groundwater hydrology*, 40(4), p. 509-519 (in Japanese).
- Nadler, A., and Ward, A.L., 2001, Using the formation factor to calibrate TDR for water content and salinity measurements in drip irrigated fields, *Proceeding of the symposium TDR 2001: Innovative Applications of TDR Technology*, Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois, September 5-7, 2001.
- Sun, Z.J., and Young, G.D., 2001, Saline clayey soil moisture measurement using time domain reflectometry, *Proceeding of the symposium TDR 2001: Innovative Applications of TDR Technology*, Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, Evanston, Illinois, September 5-7, 2001.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16(3), p. 574-582.

| | |
|-------|---------------|
| 투 고 일 | 2003년 9월 19일 |
| 심 사 일 | 2003년 9월 20일 |
| 심사완료일 | 2003년 10월 18일 |

유전올법에 따른 다공질 매질의 특성 파악을 위한 실험적 연구

김만일 (Man-Il Kim)

Graduate School of Natural Science and
Technology,

Okayama University, 3-1-1, Tsushimanaka,
Okayama 700-8530, JAPAN

TEL : +81-90-8249-3549

FAX : +81-86-251-8160

E-mail : mikim@gw.civil.okayama-u.ac.jp

니시가끼 마코토 (Makoto Nishigaki)

Department of Environmental and Civil Design,
Faculty of Environmental Science and echnology,
Okayama University, 3-1-1, Tsushimanaka,
Okayama 700-8530, JAPAN

TEL : +81-86-251-8164

FAX : +81-86-251-8866

E-mail : n__makoto@cc.okayama-u.ac.jp

김만일 · 니시가끼 마코토