대한지하수환경학회 · 한국토양환경학회
공동 심포지엄 및 추계학술대회 논문집
1998년 11월 20일 서울대학교 교수회관

토양내 탄화수소계 화합물의 농도측정 기법에 대한 TDR(Time Domain Reflectometry)적용 가능성 연구

박민수 · 김동주

고려대학교 지구환경과학과

ABSTRACT

Leakage of hydrocarbon compound from underground storage tank has been a significant issue to the hazard of environmental contaminants. It is therefore necessary to develop the measurement technique of hydrocarbon compound concentration. In this study, the possibility of TDR application to measure concentration of hydrocarbon compound, especially diesel, in a sandy soil was investigated. Experiments were conducted in two different conditions. The first one was to measure the resistances of the soil columns packed according to the various ratios of tab water and diesel content in the total voids. The other was to measure the resistance of the soil under the flow condition where diesel oil was allowed to infiltrate into the KCl-saturated soil column. The experimental results showed that there exists a significant relationship between oil% and TDR-measured resistance. This suggests that TDR can be an effective device to measure the concentration of hydrocarbon compound in a soil.

주제어 : TDR, hydrocarbon compound, resistance, soil column

Ⅰ. 서언

탄화수소계 화합물은 환경적으로 중요한 토양오염원이다. 특히 주유소 등의 지하저장탱크로부터 유류의 유출에 대한 문제는 환경적 · 사회적으로 중요한 의미를 가지고 있다. 미국의 경우 환경오염원으로 가장 큰 발생률을 보이는 것이 지하저장탱크에서부터 기인한 것들이다(U.S. EPA 1990). 마찬가지로 지하저장탱크에서의 유류유출은 국내의 경우에서도 심각한 문제를 야기시킬 것이다. 오염의 특성인 원인-피해-복구간의 시차성을 고려한다면 오염의 발생과 동시에 이를 감지해내고 바로 복구를 하는 것이 환경적으로나 경제적으로나 유리하다. 그러므로 탄화수소계 화합물의 거동에 대한 효과적인 모니터링 기법에 대한 개발과 연구가 절실하다. 본 연구에서는 토양내의 수분함량과 농도측정에 주로 사용되고 있는 TDR을 이용하여 유류에도 이를 적용하므로써 새로운 농도측정기법에 대한 가능성을 확인하는데 그

목적이 있다. 이를 위하여 두 가지 조건의 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 유류의 함량에 따른 저항치의 변화를 알아내기 위하여 물과 유류의 혼합비를 달리해가며 토양시료를 제작한 후 포화상태에서 시료별 저항을 측정하였다. 두 번째의 경우는 유동하는 지하수내에서의 적용가능성을 확인하기 위하여 흐름조건(flow condition)에서 유류의 침입량에 따른 시간별 저항을 관찰하였다.

Ⅱ. 재료 및 실험방법

1. TDR

TDR은 광전자파 발생장치로부터 발진된 광전자파가 매질을 거친 후 반향되었을 때의 파형을 분석함으로써 매질에 대한 정보를 얻어내는 장치이다. 토양내의 함수량 측정과 오염물질의 농도 측정에 주로 쓰였으나 현재는 단층의 감지, 하천의 퇴적심도 측정 등에도 쓰일 수 있다는 것이 밝혀지면서 그 응용분야가 확장되고 있다.

토양내에서 전기적으로 부전도체인 물질의 양이 증가하면 토양내 총전기전도도(bulk soil electrical conductivity)가 감소하게 된다. 또한 전도체의 양이 증가할 경우는 총전기전도도는 증가하게된다. 총전기전도도(EC_a)와 토양의 저항값(R_s)은 Eq.1과 같은 관계에 있다 (Heimovaara 1993).

$$EC_a=K_pT_c/R_s \qquad \text{(Eq.1)}$$

여기서 K_p는 TDR이 가지는 고유의 cell constant이고 T_c는 온도보정상수이다. K_p와 T_c가 모두 상수이므로 Eq.1으로부터 EC_a와 R_s는 반비례 관계에 있음을 알 수 있다. 그러므로 저항은 토양내에 전도성이 큰 물질이 유입될 경우 감소하고 부전도체의 유입이 있을 경우는 증가한다는 것을 알 수 있다. 토양내에 부전도체인 공기의 유입이 있을 경우와 전도체인 KCl용액이 유입될 경우 저항의 변화가 Fig. 1에 도시적으로 나타나 있다. oil에 대해서는 공기와 마찬가지로 부전도체의 역할을 할 것으로 생각되므로 토양시료내에서 oil%가 증가할 경우 저항값은 올라갈 것이다. EC_a와 $1/R_s$ 사이의 기울기를 나타내는 K_p는 보존성 화학물질에 대해서만 성립한다고 알려져 있으나 경유(diesel oil)를 사용하여 비보존성 물질에 대해서도 검증하는 것이 이번 연구목적 중의 하나이다.

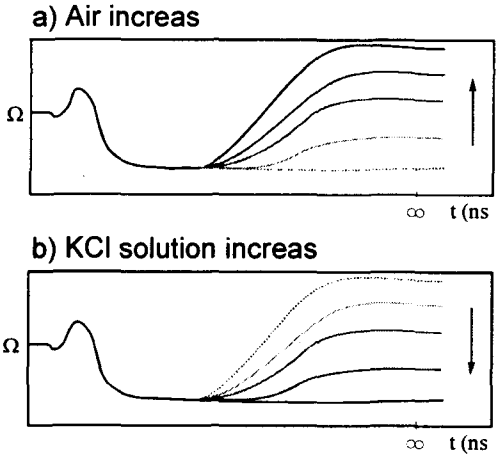

Fig. 1. Resistance change in a soil upon the increase of air KCl solution in the void of soil sample initially saurated with water.

2. 사용시료

탄화수소계 화합물의 농도에 따른 TDR저항의 변화를 알아보기 위하여 실험에 사용한 토양은 USDA(U.S. Department of Agriculture)에서 제안한 토양 분류법에 의해 사질토양(sandy soil)으로 구분되어진다. 토양의 입도를 분석한 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. 토양을

높이 15㎝, 내경 7.6㎝의 아크릴 실린더에 채워 넣은 후 TDR을 수직으로 설치하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 TDR은 길이 150㎜, metallic rod간의 간격 25㎜, metallic rod의 지름 5㎜의 규격을 가진다.

정지흐름(no flow condition)상태에서의 사질토양으로 채운 실린더에서 공극부피는 평균 250㎤로써 약 0.388의 공극률을 나타내었다. 아크릴 실린더내에 같은 질량의 토양을 채워 압밀의 정도가 같게 유지해주었다. 토양의 공극률(n)은 Eq.2로부터 구하였다.

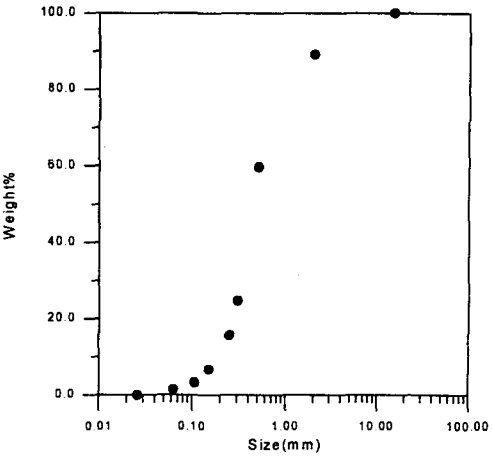

Fig. 18. Size distribution of soil material.

$$n(\%)=\left(1-\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)\times 100 \qquad (\rho_b\text{: bulk density } \rho_s\text{: soil density}) \qquad \text{(Eq.2)}$$

정지흐름 실험에서는 경유와 5g/L의 농도를 가지는 KCl용액을 총량이 250㎤가 되도록 유지시키고 혼합비를 달리해서 총 7개의 포화시료를 제작하였다. 그 후 시료별로 TDR을 사용하여 저항을 측정, 기록하였다. 농도가 있는 KCl용액을 사용한 것은 저항치가 측정기(Tectronix 1502B)의 측정한계인 1000Ω을 넘지 못하게 하고 초기 저항을 낮추어 측정범위를 넓히기 위한것이다. 두 번째 실험은 흐름조건에서의 적용가능성 확인을 위한 것이다. 공극부피는 280㎤로 0.435의 공극률을 나타냈다. 시료에 KCl용액을 정상류 상태로 투입하여 저항이 최저치인 27.4Ω에서 평형에 도달하였을 때 KCl용액 투입을 중지한 후 시료표면 상부의 잔존 KCl용액이 침입완료되기를 기다렸다. 침입이 완료된 후 경유를 시료상부 표면에 부과하여 흐름상태에서 토양시료 내의 경유와 KCl용액의 비를 달리하였다. oil투입 시간을 기준으로하여 oil의 침입량에 따른 시간별 저항값을 측정, 기록하였다. oil의 침입량은 KCl용액과 oil이 정상류 조건이라는 가정하에 시료 상부에서의 경유유입량에서 시료하단에서 경유유출량의 차를 이용하여 구하였다. oil%는 시료내의 oil의 양과 공극부피와의 비를 사용하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 토의

토양내 KCl용액과 경유의 혼합비를 달리해가며 정지흐름조건에서 수행한 실험과 흐름조건의 실험결과가 Fig. 3에 비교되어 있다. 정지흐름조건의 경우 oil이 84%까지 증가할동안 저항은 28.8Ω에서 1000Ω이상까지 변화하였으며 흐름조건의 경우 oil이 97%까지 증가하는 동안 저항은 27.4Ω에서 566Ω까지 증가하였다. 공극내 경유의 양이 증가함에 따라 저항값도 정의 상관관계를 가지고 뚜렷이 커짐을 알 수 있다. 정지흐름조건 실험의 결과는 회귀분석에 의해서 oil%와 logR은 기울기 0.018의 선형관계를 보여주며 결정계수는 0.981로 높은 상관관계를 나타낸다. 흐름조건에서 수행된 실험은 0.014의 기울기와 0.931의 상관관계를 보이는데 0.981에 비해서는 상대적으로 낮은 상관관계를 보였다. 이는 전자가 후자보다 이상적인 조건을 유지하기가 쉬웠고 시간별로 측정해야하는 흐름조건에 비해 측정 오차의 영향이 적

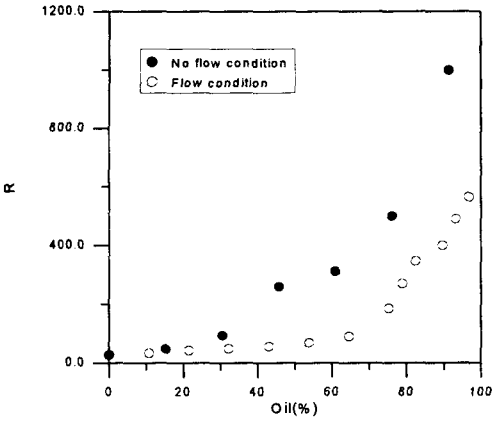

Fig. 3 Relationship between resistance and oil% in a void.

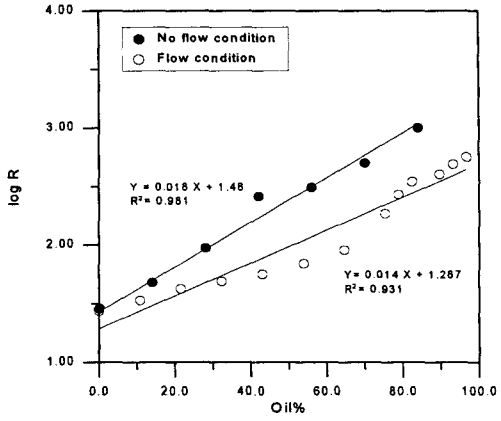

Fig. 4 Relationship between logR and oil% in a void.

었기 때문이라고 생각된다. Fig. 4에 oil%와 logR과의 회귀분석의 결과가 나와 있다. 두 경우 모두에서 oil%와 logR은 강한 선형관계를 보이고 있다. 두 실험의 결과로부터의 토양내 oil의 함량과 TDR측정치인 저항과의 상관식은 정지흐름과 흐름조건에서 Eq.3, 4와 같다.

$$Oil\% = \frac{\log\left(\frac{R}{10^{1.48}}\right)}{0.018} \qquad \text{(Eq.3)}$$

$$Oil\% = \frac{\log\left(\frac{R}{10^{1.287}}\right)}{0.014} \qquad \text{(Eq.4)}$$

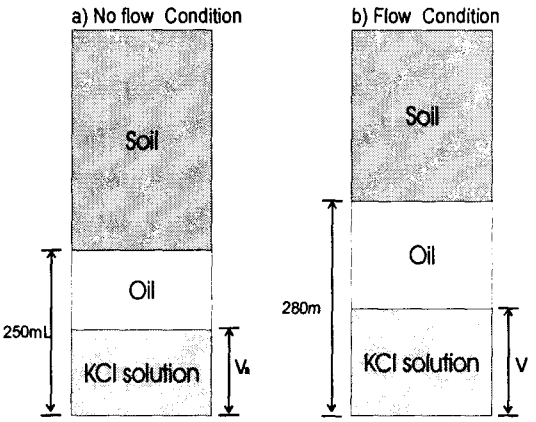

Fig. 21 Schematic comperison of volume of KCl solution in samples with different pore volume..

같은 사질토양에 대하여 R과 oil%와의 상관식이 차이가 나는 것은 공극부피에서 기인한다. 공극부피가 더 클 경우 같은 oil%라 하더라도 KCl용액의 절대량이 항상 더 많게된다. 즉 Fig. 5에서처럼 항상 $V_b > V_a$가 되어 같은 oil%일 경우 더 낮은 저항치를 보이게 되는 것이다. 이 두 실험의 결과로부터 TDR로 측정한 저항과 토양내의 탄화수소계화합물의 농도와의 관계는 명백한 정의 상관관계에 있음을 알 수 있다. 이는 토양내에서 탄화수소계화합물에 의한 오염발생시 TDR이 농도측정장치로서의 역할을 충분히 수행할 수 있음을 의미한다.

Ⅳ. 결언

이와같이 TDR로부터 측정한 저항값과 토양내 탄화수소계 화합물, 경유의 농도와의 상관성을 알아보기 위하여 실내 주상실험을 수행하였다. KCl용액과 경유 그리고 사질토를 혼합성형한 정지흐름상태에서 저항치는 경유의 농도에 따라 현저한 변화를 보였으며 흐름조건에서도 시간에 따른 뚜렷한 저항의 변화가 있었다. 본고에서 사용된 사질토양에 대하여 경유

의 양은 Oil%=(logR-1.48)/0.018과 Oil%=(logR-1.287)/0.014로 저항과 높은 상관관계를 보여주었다. 이로부터 TDR의 토양내 탄화수소계 화합물의 농도측정 기법에 대한 적용가능성을 확인할 수 있었다.

TDR이 토양내 탄화수소계 화합물의 농도측정에 이용될 경우 오염물질의 비파괴적인 인지, 저비용, 간단한 측정·설치 등의 효과를 수반할 것으로 생각된다. 그러나 임의의 토양에 TDR을 적용할 수 있는 조건을 알아내기 위해서는 구체적인 연구가 좀 더 필요하다. 즉 토양의 종류, 공극률, oil의 종류, 수분함량, 초기저항치 조건 등에 따른 보완과 비보존성화학물질에 대한 cell constant(K_p) 결정이 향후연구과제로 남아있다.

참 고 문 헌

U.S. Environmental Protection Agency. 1990. *National water quality inventory.*:1998 Report to Congress. EPA440-490-003. 187 pp.

Heimovaara, T.J. 1993 *Time domain reflectometry in soil science*: Theoretical backgrounds, measurements and models. Ph.D. diss. Univ. of Amsterdam

Table 1. Result Data of Resistance measured by TDR

No flow condition		**Flow condition**	
Oil%	Resistance(Ω)	Oil%	Resistance(Ω)
0	28.8	0	27.4
14	48	11	33.7
28	94.5	32	49.1
42	260	43	56.3
56	312	54	69.6
70	501.5	75	186.3
84	1000이상	82	347.8

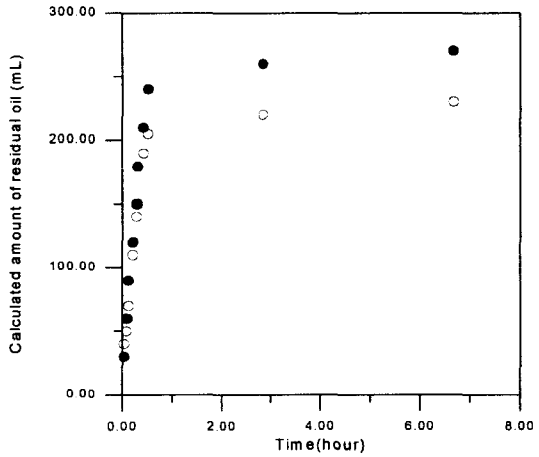

Fig. 22 Comperisonof residual oil calculated by two different method(●: Input oil -output oil, ○: Output KCl solution).