

충적대수층 조사를 위한 모래와 점토의 유도분극 특성 고찰

최상혁¹ · 김형수² · 김지수^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과, ²한국수자원공사 수자원연구원

IP Characteristics of Sand and Silt for Investigating the Alluvium Aquifer

Sanghyuk Choi¹, Hyoung-Soo Kim², and Ji-Soo Kim^{1*}

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

충적층의 구성물질 중에서 포화된 실트 또는 점토층은 다른 층들에 비해 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 나타낸다. 따라서 자료해석에 있어서 실트 및 점토층이 전기비저항이 작고 투수성이 높은 대수층으로 오인될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하고 충적층 내 포화된 실트 또는 점토층과 모래 또는 자갈 대수층을 구분하기 위해 충적층을 구성하고 있는 물질의 전기비저항 및 유도분극 값을 함께 측정하는 실내실험을 실시하였다. 실험결과 실트 또는 점토시료가 모래시료보다 충전성이 높게 나타났으며, 또한 모래와 점토 혼합시료에서 점토함량이 증가함에 따라 전기비저항은 감소하고 충전성은 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다.

주요어 : 충적대수층, 전기비저항, 유도분극, 충전성, 지하수

In general, water-saturated silt or clay alluvium is characterized with relatively low-resistivity. Thus we often encountered the problem that such a low-resistivity layer is misguided to be good aquifer of high-permeability and low-resistivity in the development of groundwater. This research was conducted with an emphasis on the identification of saturated silt or clay layer from the aquifer by performing the laboratory experiment of IP and resistivity methods on the various materials consisting of alluvium aquifer. Silt or clay layer is found to be characterized with the higher chargeability zone, compared to the sand layer. Regarding the mixture of sand and clay, the higher clay volume, the lower resistivity and the higher chargeability. Subsequently chargeability decreases.

Key words : alluvium aquifer, electrical resistivity, induced polarization, chargeability, groundwater

서 론

유도분극(IP, induced polarization) 탐사는 분극현상이 넓게 분포하는 분산상의 금속광물의 탐사에 주로 이용하던 탐사기법이다(Pelton *et al.*, 1978; Fink *et al.*, 1990). 최근으로서 공학 및 환경분야로 그 적용분야가 확대되고 있다. Vacquier 외(1957)와 Ogilvy and Kuzmina (1972)는 전기비저항 및 IP 탐사를 동시에 실시함으로써 해수침투지역을 구분하였으며, 국내에서도 송영수(1995)와 이상규 외(2002) 등이 해수침투대 연구를 논의한 바 있다. 또한 폐광산의 토양오염영역 탐지 및 폐석의 분포

확인(이상규 외, 1997) 및 점토로 이루어진 벤토나이트 분포확인(송영수 외, 1993)을 위한 IP 탐사의 적용 사례도 있었다. IP 탐사는 전기비저항 탐사, 전자 탐사, 레이더 탐사에 비해 널리 사용되지 않고 있지만 최근 환경분야의 적용에 그 수요가 증가하고 있다(Slater and Lesmes, 2002).

전기비저항 탐사는 지하수 조사 및 오염탐지에 적극 활용되고 있을 뿐만 아니라 단층 및 파쇄대 파악, 지하 공동 파악 등 여러 분야에 적용된다. 무엇보다도 전기비저항 탐사는 IP 탐사에 비해 이론이 간단하고 자료획득이 비교적 간편하다는 장점이 있다. 그러나 전기비저항

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

반응은 여러 암석들의 전기비저항이 증첩효과로 나타나므로(Keller and Frischknecht, 1966), 전기비저항 탐사를 통하여 직접적으로 지하의 암상을 파악하는 것은 매우 어려운 실정이다. 그 예로 충적층을 구성하고 있는 실트층 또는 점토층 등은 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 보여 간혹 지하수가 풍부한 대수층으로 오인되어 지하수개발 과정에서 어려움을 발생시킨다(최상혁 외, 2008a). 다시 말해 충적층 전기비저항 탐사 결과 가장 낮은 전기비저항을 보이는 지층이 항상 지하수 개발에 유리한 조건을 가지고 있지 않을 수 있다는 것이다(최상혁 외, 2008b).

이 논문은 위와 같은 문제점을 극복하기 위해, 전기비저항 및 IP 실내실험을 통하여 충적층을 구성하고 있는 물질의 충전성 기준을 마련하고자 하였다. 실험은 수분함량 변화에 따른 점토, 실트, 모래의 IP 반응을 측정하였으며, 모래 내의 점토 함량 증가에 따른 IP 반응을 함께 관찰하였다. 그동안 국내에서 수행한 IP 실내실험은 평체의 무게 백분율 및 입자크기에 관한 SIP 반응효과 연구(조두현, 1984)와 모형수조를 제작하여 국내 4개 탄전의 분탄시료와 암반시료들의 SIP 반응효과 연구(유한진, 1986)가 있었지만, 충적층 매질의 시간영역 IP 효과에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 논문에서 수행한 실험 자료는 수분함량에 따른 충적층 매질의 IP 값의 기준 마련에 도움이 될 것으로 보여 궁극적으로 충적대수층 지하수 개발에 하나의 참고자료를 제공할 것으로 기대된다.

유도분극(IP)

IP 탐사는 지하에 흘려보낸 일정한 전류를 갑자기 차단할 때 발생하는 2차 전위를 측정함으로써 지반상태를 파악하는 방법이다. 측정방법에 따라서 크게 시간영역 측정법과 주파수영역 측정법으로 나누어진다(김지수 외, 2003).

시간영역 측정법은 전류를 차단하는 순간에 전위전극간의 전위차로부터 겉보기 충전성(apparent chargeability)을 측정하는 방법이며, 주파수영역 측정법은 2개 이상의 저주파(대략 0.1~10 Hz)를 사용하여 겉보기 비저항을 측정하고 이로부터 주파수 효과(FE, frequency effect), 백분을 주파수 효과(PFE, percent frequency effect), 금속계수(MF, metal factor) 등을 정의하여 겉보기 충전성을 측정하는 방법이다. 또한 장비가 정밀해짐에 따라 넓은 범위의 주파수 입력전류에 따른 복소비저항의 크기와 분

극전압의 위상을 측정하는 광대역 IP 탐사(SIP, spectral induced polarization)방법도 있다.

본 논문에서 수행된 IP 탐사는 시간영역 측정법을 이용하였다. 전류를 흘려보낸 후 잠시 뒤에 차단하면 과전압 감쇠(overvoltage decay)가 일어난다. 측정전압의 크기(V_0)는 입력전류에 의한 실제 전압(V)과 분극과정에 의해 발생하는 분극전압(V_p)의 합과 같다. 전류를 끊으면 순간적으로 V 만큼 전압이 떨어지고 과전압 V_p 만 남아 시간에 따라 감쇠한다. IP 효과를 측정하는 방법은 V_p/V_0 를 구하는 것으로, 이를 충전성(chargeability; M)이라 하고 그 단위는 mV/V 또는 %를 사용한다. 이 과정은

$$M = \frac{V_p}{V_0} (\text{mV/V of } \%) \quad (1)$$

으로 표현된다. 그러나 기기적으로 전류를 차단하는 순간의 V_p 를 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 또 다른 방법으로 전류 차단 후 일정시간 뒤부터 적당한 시간에 걸쳐 전압 값을 적분하여 전압곡선 하부의 면적을 구한다. 이 적분값을 V_0 로 나누면 그 값을 겉보기 충전성(apparent chargeability: M_a)라 하고, 이것도 감쇠곡선을 정의할 수 있는 또 하나의 방법으로 단위는 milliseconds (ms)를 쓴다. 식으로 이 과정을 나타내면

$$M_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{A}{V_0} \quad (\text{ms}) \quad (2)$$

이다. 측정에서는 2초간의 전류흐름을 차단하고, 0.26, 0.52, 0.78, 1.04, 1.30, 1.56초 후의 전압을 합산하는 방법으로 V_p 를 측정하여 겉보기 충전성을 측정하였다.

실험재료 및 방법

실내실험의 재료는 충적층을 구성하고 있는 점토, 실트, 모래시료를 준비하였다. 점토시료는 카올리나이트(kaolinite)와 할로이사이트(halloysite)가 주성분인 고히토(kaolin)를 사용하였으며, 실트와 모래시료는 통일분류법(unified soil classification system)에 따라 각각 사질토를 200번체(0.075 mm), 일반 모래를 4번체(4.75 mm)와 200번체(0.075 mm)에 체가름하여 준비하였다.

실험은 일반적인 수평전류 흐름을 가정하여 측정하였다. 일반적인 수평전류 흐름은

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (3)$$

로 표현되고, 여기서 ρ 는 비저항이고, R 은 저항을 나타

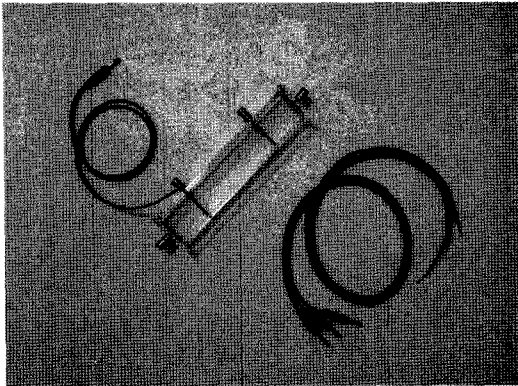


Fig. 1. Soil sampler and cables.

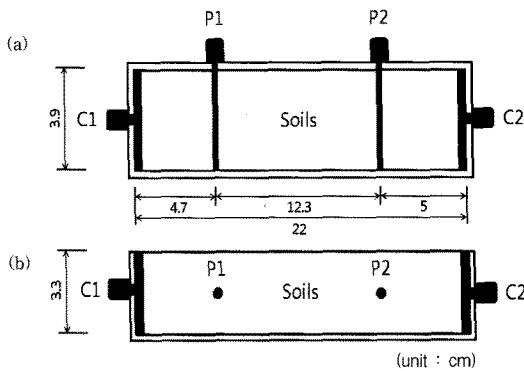


Fig. 2. Schematic view of soil sampler with the unit of measurement of cm: (a) plan view and (b) front view. C1, C2 and P1, P2 are current electrode and potential electrode, respectively.

낸다. 실험은 수평전류 흐름을 유도할 수 있는 토양 샘플러(soil sampler)에 시료를 담아 실시하였다. Fig. 1은 토양 샘플러의 모습이고, Fig. 2는 토양 샘플러의 평면도와 정면도이다. 토양 샘플러는 단면적(A)이 12.48 cm^2 ($3.9 \text{ cm} \times 3.2 \text{ cm}$), 길이(L)가 22 cm 인 직육면체 모형이고, 재질은 투명 아크릴이며, 양 끝에 전류전극 2개와 내부에 전위전극 2개가 연결되어 있다. 전위전극 사이의 거리는 12.3 cm 이다. 수평적인 전류흐름을 유도하기 위해 전류전극의 내부는 단면적과 넓이가 같은 직사각형 금속판으로 이루어져 있다.

그러나 토양 샘플러에 시료를 담을 경우 시료의 다짐 정도에 따라 측정값의 차이가 클 것으로 예상되어 다짐의 기준을 정하였다. 다짐의 기준은 일정하다고 말할 수는 없지만, 인위적으로 가장 강하게 다지는 방법을 선택하였다. 시료가 건조 상태이거나 수분을 많이 함유하고

Table 1. Data acquisition parameters for the experiments.

Menu	Operational setting
Mode	resistivity/IP
Array type	resistance
Time constant	2 second
Stack cycle	2 cycle
Maximum voltage	200 V
Set max current	10 mA
Set accuracy	2.0 %

Table 2. Contents of soil samples for the Experiment-1.

Sample No.	Materials	Contents (%)		
		Clay	Silt	Sand
Soil-1	clay	100	0	0
Soil-2	silt	0	100	0
Soil-3	sand	0	0	100
Soil-4	clay + silt	50	50	0
Soil-5	silt + sand	0	50	50
Soil-6	clay + sand	50	0	50
Soil-7	clay + silt + sand	33.3	33.3	33.3

있을 경우에는 시료의 점착력이 약해서 강하게 다지기에 다소 어려움이 있었다.

실험장비는 전기비저항과 충전성을 함께 측정할 수 있는 Advanced Geoscience Inc.의 Sting RI/IP를 사용하였다. 실험에서 사용한 장비의 설정값(Table 1)의 모드는 전기비저항과 충전성을 함께 측정하기 위하여 “resistivity/IP” 로 설정하였으며, 전극배열은 “resistance” 로 설정하여 전위차에 의한 저항값을 얻고 식 3에 의하여 전기비저항을 계산하였다. 그리고 최대전류는 토양 샘플러 내부공간이 협소하여 작은 전류 흐름만으로도 전위차 측정이 가능하여 10 mA 로 낮게 설정하였다.

실험은 총 4가지의 변화에 따른 IP 효과를 분석하는데 초점을 두었다: (1)성분과 수분함량 (2)점토함량 (3) 점토층의 두께(양쪽확장) (4) 점토층의 두께(한쪽확장).

Experiment-1: 성분과 수분함량의 변화에 대한 실험

시료의 성분에 따른 전기비저항 및 충전성을 측정하기 위해 먼저 점토, 실트, 모래 3가지 시료를 준비하였다. 그리고 3가지 시료 외에, 각 시료들을 일정한 비율로 혼합한 4가지 시료를 추가적으로 준비하여 총 7가지 시료를 준비하였다(Table 2). 시료 혼합 과정에서 비율은 부피비로 혼합하였다. 각 시료들의 입도분석을 하기 위해 체분석 및 비중계시험을 실시하여 입도분포곡선을 작성하였다(Fig. 3). 입도분포곡선은 모래가 포함된 시료

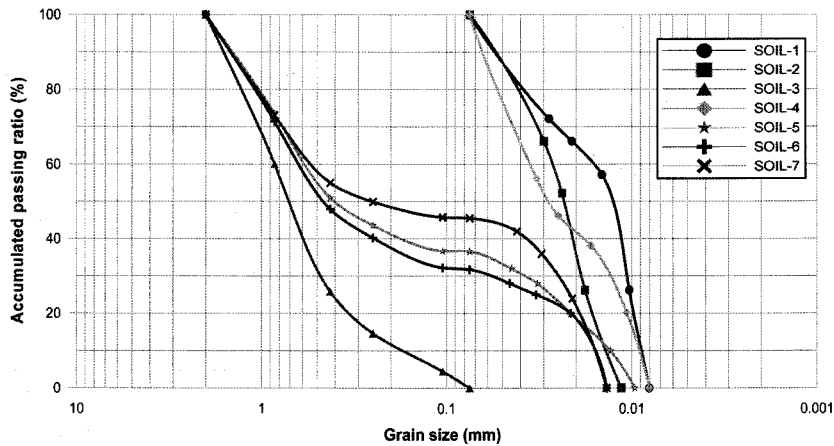


Fig. 3. Grain-size distribution curve of soil samples.

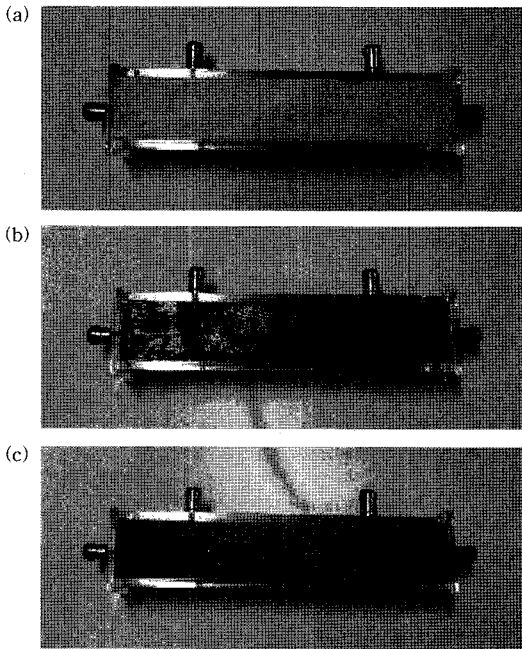


Fig. 4. Photographs of soil samples: (a) soil-1 (clay), (b) soil-2 (silt), and (c) soil-3 (sand).

(Soil-3, 5, 6, 7)와 포함되지 않은 시료(Soil-1, 2, 4)로 크게 두 가지 그룹으로 분류되는데 전반적으로 시료가 입자 크기에 맞게 잘 준비되었음을 입도분포곡선에서 확인할 수 있다.

수분함량의 변화가 IP 효과에 끼치는 영향을 알아보기 위하여 각 시료마다 함수비를 변화시켜가며 측정하였다. 완전히 건조시킨 시료에 수분을 첨가시켜가며 전기비저

Table 3. Contents of soil samples for the Experiment-2.

Sample No.	Volume (cm ³)		Contents (%)	
	Sand	Clay	Sand	Clay
Soil-1	500	0	100	0
Soil-2	500	100	83.3	16.7
Soil-3	500	200	71.4	28.6
Soil-4	500	300	62.5	37.5
Soil-5	500	400	55.6	44.4
Soil-6	500	500	50.0	50.0

항 및 충전성을 측정하였고, 각 시료의 함수비 측정은 수분을 첨가할 경우마다 시료를 채취하여 측정하였다. 수분함량의 변화는 각 시료가 포화될 때까지 수분을 첨가하였다. 수분은 전기전도도가 약 14 mS/m, 즉, 전기비저항이 약 71 Ωm를 나타내는 일반 수돗물을 사용하였다. 각 실험은 5번 실시하여 그 평균값을 대표 자료로 사용하였다. Fig. 4는 포화된 점토(Soil-1), 실트(Soil-2), 모래(Soil-3) 시료를 토양 샘플러에 담은 모습이다.

Experiment-2: 점토함량의 변화에 대한 실험

모래에 포함된 점토성분의 함량에 따른 전기비저항 및 충전성을 측정하였다. 시료는 점토를 혼합하지 않은 모래시료 1가지, 모래 500 cm³에 점토를 각각 100, 200, 300, 400, 500 cm³를 첨가한 모래/점토 혼합시료 5가지, 총 6가지를 준비하였다(Table 3). 모래/점토 혼합 시료는 점토가 골고루 잘 분포하도록 건조한 상태에서 혼합하여 제작하였고, 모든 시료는 함수비에 변화를 주지 않고 포화상태에서만 측정하였다. 한 시간 가량 일반

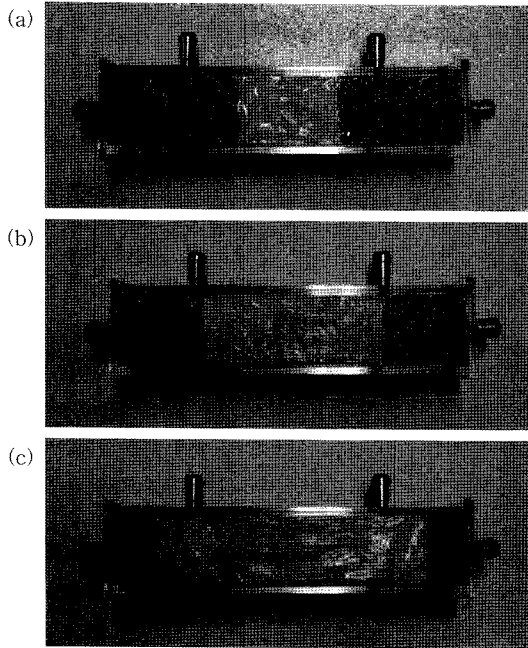


Fig. 5. Photographs of soil samples for the Experiment-3: (a) soil-3 (clay thickness : 6.5 cm), (b) soil-5 (clay thickness : 11.2 cm), and (c) soil-7 (clay thickness : 16.4 cm).

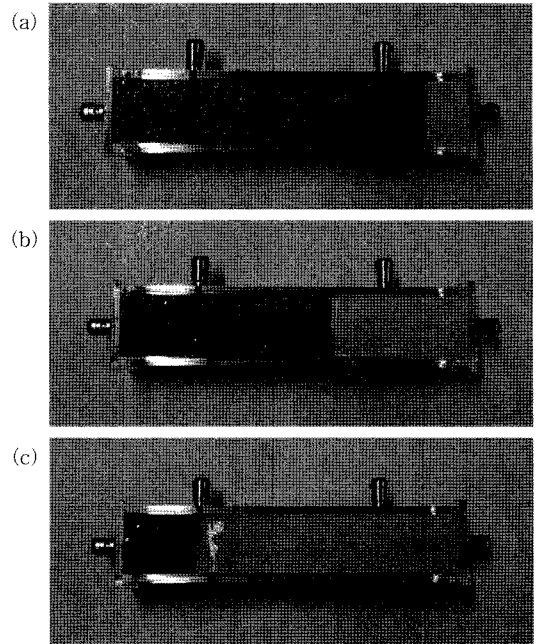


Fig. 6. Photographs of soil samples for the Experiment-4: (a) soil-2 (clay thickness : 2.8 cm), (b) soil-4 (clay thickness : 8.6 cm), and (c) soil-6 (clay thickness : 17.5 cm).

Table 4. Contents of soil samples for the Experiment-3.

Sample No.	Thickness (cm)		Contents (%)	
	Clay	Sand	Clay	Sand
Soil-1	0.0	22.0	0	100
Soil-2	2.7	19.3	12.3	87.7
Soil-3	6.5	15.5	29.5	70.5
Soil-4	8.6	13.4	39.0	61.0
Soil-5	11.2	10.8	50.9	49.1
Soil-6	13.5	8.5	61.4	38.6
Soil-7	16.4	5.6	74.5	25.5
Soil-8	22.0	0	100	0

수돗물에 완전히 포화시킨 후 실험을 실시하였으며, 실험 결과는 3회 측정된 평균값으로 기록하였다.

Experiment-3: 점토층 두께의 변화(양쪽 확장)에 대한 실험

모래층 내에 점토층이 있는 모형으로 점토층 두께에 따른 전기비저항 및 충전성을 측정하였다. 성분변화에 따른 측정을 한 앞선 두 번의 실험과는 달리 모형두께에 의한 측정이라서 현장 효과가 보다 잘 반영될 것

로 보인다.

각 시료의 모형은 토양 샘플러 안에 포화된 모래를 먼저 채워 넣고, 나머지 부분을 포화된 점토로 채워서 제작하였다. 실험은 토양 샘플러의 중앙 위치에서 양쪽으로 점토층의 길이를 늘려가며 모형을 먼저 제작한 후, 점토의 두께를 재는 방법으로 실시하였다(Fig. 5). 시료는 점토를 전혀 담지 않은 모래시료 1가지, 모래층 내에 점토층 두께가 2.7 cm, 6.5 cm, 8.6 cm, 11.2 cm, 13.5 cm, 16.4 cm인 모래/점토시료 6가지, 전부 점토로 채운 점토시료 1가지, 총 합계 8가지를 준비하였다(Table 4).

Experiment-4: 점토층 두께의 변화(한쪽 확장)에 대한 실험

점토층의 두께의 변화에 대한 실험을 Experiment-3과는 달리, 점토층이 토양 샘플러 한쪽에 위치하도록 제작하였다. 마찬가지로 토양 샘플러의 한쪽 위치에서 반대쪽으로 점토층의 길이를 늘려가며 모형을 먼저 제작한 후, 점토의 두께를 재는 방법으로 실시하였다(Fig. 6). 시료는 토양 샘플러에 점토를 전혀 담지 않은 모래시료 1가지, 모래층 내에 점토층 두께가 2.8 cm, 5.2 cm, 8.6 cm, 13.5 cm, 17.5 cm, 19.8 cm인 모래점토시료 6가

지, 전부 점토로 채운 점토시료 1가지, 총 합계 8가지를 준비하였다(Table 5).

6, 7 시료와 모래가 포함되지 않은 Soil-1, 2, 4 시료의 두 가지 그룹으로 뚜렷이 구분되고 있다.

이와 달리 충전성 곡선(Fig. 7(b))은 함수비 증가에

실험결과에 대한 해석

성분과 수분함량의 변화

7가지 시료의 함수비에 따른 전기비저항 및 IP 반응 결과(Fig. 7)는 7가지 시료 모두 완전히 건조한 경우에는 전류가 전혀 흐르지 않아 자료를 얻을 수 없었으며, 모래의 높은 비중으로 인하여 모래가 포함된 시료는 포화 상태의 함수비가 20% 미만으로 낮게 측정되었다. 전기비저항 곡선(Fig. 7(a))은 전반적으로 함수비 증가에 따라 전기비저항이 감소하다 일정한 값에 수렴하는 특성을 보였다. 또한 전기비저항 곡선은 모래가 포함된 Soil-3, 5,

Table 5. Contents of soil samples for the Experiment-4.

Sample No.	Thickness (cm)		Contents (%)	
	Clay	Sand	Clay	Sand
Soil-1	0.0	22.0	0	100
Soil-2	2.8	19.2	12.7	87.3
Soil-3	5.2	16.8	23.6	76.4
Soil-4	8.6	13.4	39.0	61
Soil-5	13.5	8.5	61.4	38.6
Soil-6	17.5	4.5	79.5	20.5
Soil-7	19.8	2.2	90.0	10.0
Soil-8	22.0	0	100	0

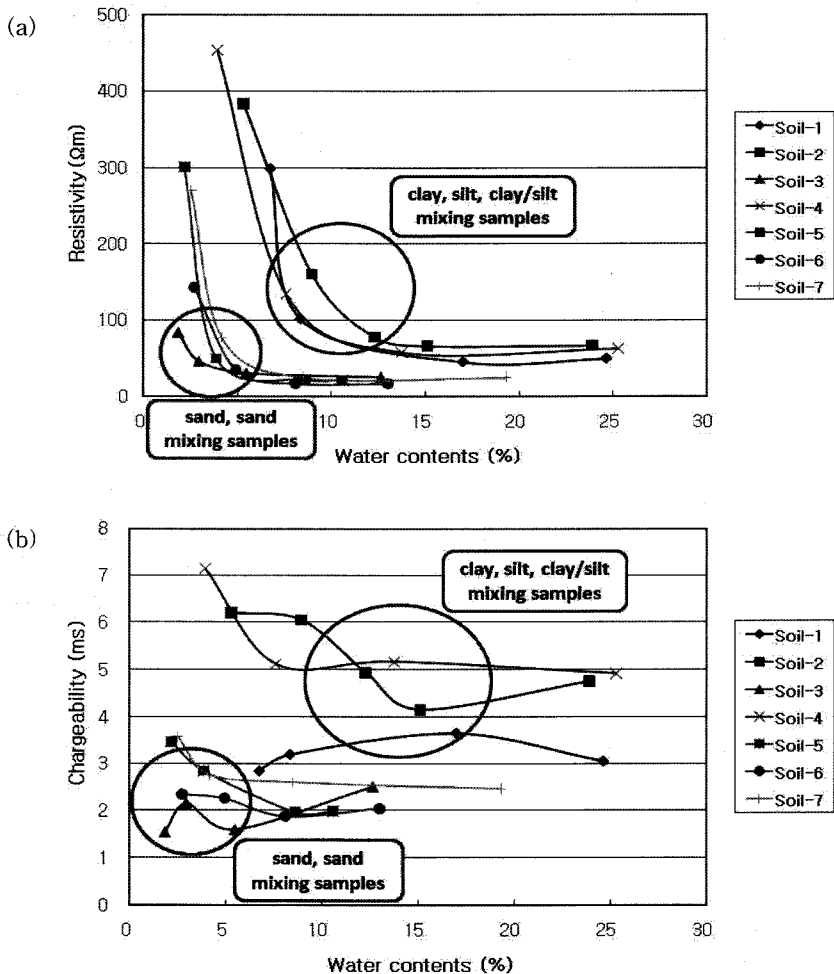


Fig. 7. (a) Resistivity and (b) chargeability curves of soil samples with variation of water contents.

따른 일반적인 특성을 찾을 수 없었지만, 대체로 점토와 실트로 구성된 Soil-1, 2, 4 시료가 전체적으로 높게 측정된 것을 알 수 있다. 특이한 점은 IP 현상의 주 발생 원인인 점토로 이루어진 Soil-1 시료보다 실트로 이루어진 Soil-2 시료가 충전성이 높게 측정되었다. 그리고 점토와 실트로 이루어진 Soil-3 시료가 가장 큰 IP 반응을 보였다. 이로써 점토뿐만이 아니라 실트도 IP 효과에 높은 반응을 보이는 것을 알 수 있으며, 점토와 실트가 함께 있을 경우 IP 효과가 더욱 증가할 수 있다는 점을 유추할 수 있다. 함수비에 따른 각 시료들을 보면 Soil-1, 3 시료를 제외한 나머지 5개의 시료들은 함수비 증가에 따라 충전성이 감소하는 특징을 보인다. 다른 특징을 보이는 Soil-1, 3 시료는 보다 더 낮은 함수비의 시료를 측정할 경우, 그 특징은 나머지 5개 시료와 유사할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이러한 특성곡선들을 관찰한 결과, 함수비 증가에 따른 충전성의 경향을 파악하기는 쉽지 않으며, 또한 충전성은 함수비보다 매질의 특성에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다.

점토함량의 변화

점토의 함량에 따른 6가지 시료의 실험 결과(Fig. 8)에서 Soil-1 시료를 제외하고 점토 함량이 증가할수록 전기비저항이 감소하다가 약 65 Ωm 값에 수렴하는 경향을 보였다. 점토 함량이 전혀 없는 Soil-1 시료가 Soil-2, Soil-3 시료보다 전기비저항이 낮게 측정된 이유는 점토의 함량이 많지 않은 Soil-2, Soil-3 시료의 점토에 의한 전기비저항의 감소폭보다 유효공극이 많은 Soil-1 시료를 채우고 있는 수분에 의한 전기비저항의 감소폭이 더 커서 나타난 효과로 보인다.

충전성은 점토 함량이 증가할수록 계단식으로 증가하는

경향을 보인 점을 미루어 점토 함량의 증가가 충전성을 증가시킨 것을 알 수 있다. 그러나 점토 함량 50%인 Soil-6 시료의 충전성이 약 4ms를 나타내고, Experiment-1에서의 포화된 100% 점토의 충전성이 약 3ms를 나타낸 것으로 보아 계단식의 증가 추세가 더 이상 증가하지 않고 감소할 것으로 예상된다. 이는 순수한 점토 매질보다 모래와 점토가 혼합되어 있는 매질이 더 높은 충전성을 나타낼 수 있다는 것을 보여주며, 또한 포화된 모래 매질의 충전성만으로 점토 함량을 결정하기에는 어려움이 있다는 것을 시사한다.

점토층 두께의 변화(양쪽 확장)

점토층 두께에 따른 8가지 시료의 실험 결과(Fig. 9)에서 전기비저항은 점토의 두께가 증가할수록 감소하다가 약 50 Ωm에서 수렴하였다. 다시 말하면 모래층 내의 점토층 두께가 11.2 cm(약 50%)를 넘어서면서 전기비저항은 수렴하고 있다. 실제 현장에서 점토층으로 주로 이루어진 현장은 드물지만, 점토층이 50% 이상이 되는 지반도 점토층이 약 50%를 차지하고 있는 지반과 비슷한 전기비저항을 나타낼 것으로 보인다.

충전성은 점토층이 두꺼워질수록 증가하다 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 점토층의 두께가 11.2 cm(약 50%)인 Soil-5 시료의 충전성은 매우 높게 측정되었다. 이 현상이 실험 오차로 인한 것인지 판단하기 위하여, 시료를 새로 제작하여 다시 실험하였으나 비슷한 값이 측정되었다. 이는 충전성이 상대적으로 매우 높게 나타나는 점토층의 두께가 있다는 것을 시사한다. 이 실험에서는 전체 매질의 약 40~60%를 점토층이 차지하고 있을 때 충전성이 매우 높게 나타났다.

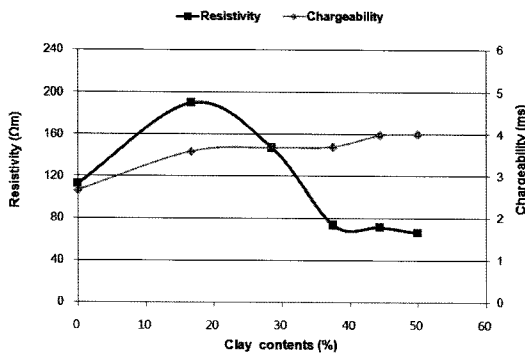


Fig. 8. Resistivity and chargeability curves with variation of clay contents.

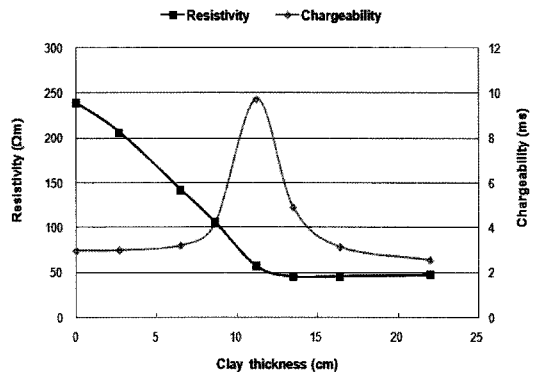


Fig. 9. Resistivity and chargeability curves with variation of clay thickness for the Experiment-3.

실험 결과 점토층 두께에 따른 전기비저항과 충전성의 분포는 3가지 특성으로 구분할 수 있었다. 즉, ①전기비저항은 높고 충전성이 낮은 주 모래층, ②전기비저항은 낮고 충전성이 높은 모래와 점토의 비율이 비슷한 모래점토층, ③전기비저항도 낮고 충전성도 낮은 주 점토층 등으로 구분된다. 따라서 점토층의 백분율에 의한 충전성 값의 기준을 절대적으로 결정하기는 어렵지만, 전기비저항과 충전성의 상대적인 경향을 분석함으로써 점토층의 함량을 어느 정도 파악할 수 있을 것으로 보인다. 흥미로운 점은 충전성 값이 매우 높게 나타나는 Soil-5 시료는 전위전극 2개의 위치가 바로 모래에서 점토, 점토에서 모래로 매질이 바뀌는 지점과 일치한다는 점이다. 이로 인해 전위전극의 위치에서의 매질 변화가 충전성의 증가에 영향을 끼쳤을 것으로 예측되었다. 실제로 IP 효과는 집중형 광상보다 분산형 광상에서 더 크게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 또한 같은 양의 점토를 함유하고 있더라도 두꺼운 하나의 사암층 보다는 여러 개의 얇은 층으로 구성된 사암층에서 IP 효과가 더 크게 나타난다는 연구도 있었다(Draskovits *et al.*, 1990). 전위전극 위치에서의 매질의 변화가 충전성 값을 높이게 되는지 확인하기 위해, 점토의 두께를 한쪽 방향에서부터 늘려나가는 실험을 실시하게 되었다.

점토층 두께의 변화(한쪽 확장)

점토층 두께의 한쪽 확장에 따른 8가지 시료의 조사 결과(Fig. 10)에서 전기비저항은 모래 매질로 이루어진 Soil-1 시료가 조금 낮게 측정되었지만, 전반적으로 앞선 실험과 마찬가지로 점토층이 두꺼워질수록 전기비저항이 감소하다가 약 50 Ωm에 수렴하는 경향을 보였다.

충전성은 점토층이 두꺼워질수록 증가하다가 다시 감

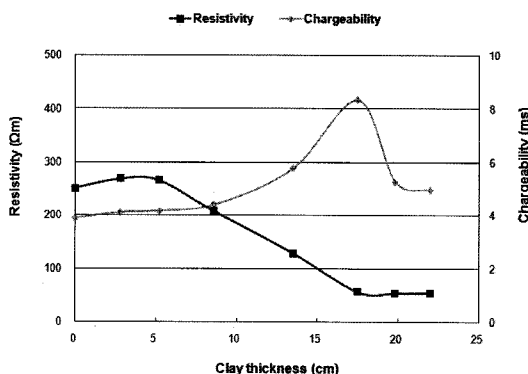


Fig. 10. Resistivity and chargeability curves with variation of clay thickness for the Experiment-4.

소하는 경향을 나타냈다. 충전성이 증가하다가 감소하는 경향은 Experiment-3과 유사하나, 매우 높게 측정된 점토층의 두께가 Experiment-3에서는 11.2 cm(약 50%)이었으며(Fig. 9), 이번 실험에서는 17.5 cm(약 80%)이었다. 두 가지 실험 모두 충전성이 가장 높게 측정되는 점토층의 두께는 차이가 있었으나, 모래 내 점토층으로 이루어진 매질이 전부 점토층으로 이루어진 매질보다 IP 효과가 크게 측정된 것을 확인할 수 있다.

전위전극 위치에서 모래와 점토의 매질이 바뀌는 시료는 Soil-3 시료와 Soil-6 시료이다. 매질이 바뀌는 위치에 전위전극이 위치할 경우 충전성이 높게 측정되는지 확인하기 위한 실험이었으나, Soil-6 시료만 높게 측정되고 Soil-3 시료는 높게 측정되지 않았다. Soil-3 시료가 높게 측정되지 않은 것으로 보아 전위전극의 위치에서의 매질 변화가 충전성의 영향을 주지 않는 것으로 해석하였다. 그러므로 Soil-6 시료의 높은 충전성은 두께에 의한 영향으로 해석된다. 즉, 모래 내 점토의 두께에 의한 충전성은 증가하다 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 토양 샘플러에서의 전류의 수평흐름과 실제 현장에서의 전류흐름을 비슷하게 생각하기에는 무리가 있다. 실제 지표에서와 같은 전류 흐름을 유도할 수 있는 실내 모형을 크게 만든다면, 실내실험에서 더욱 신빙성 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

결론

이 연구에서는 실내실험으로 충전층을 구성하고 있는 매질의 전기비저항 및 IP 반응을 측정하였다. 실험은 매질의 수분함량 변화에 따른 실험 1가지, 모래 내 점토함량 변화에 따른 실험 1가지, 그리고 모래 내 점토층 두께 변화에 따른 실험 2가지, 총 4가지의 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 매질별 수분함량 변화에 따른 IP 실내실험을 통해, 수분함량이 전기비저항 및 충전성에 미치는 영향을 알아보았다. 수분함량이 증가할수록 전기비저항이 작아짐을 확인하였으나, 수분함량과 충전성과의 일정한 경향을 찾기에는 어려움이 있었다. 그러나 점토와 실트시료가 모래시료보다 IP 반응이 확연히 크게 나타나는 결과를 얻었다. 따라서 IP 반응은 수분에 의한 영향보다 매질의 특성에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있었다.

(2) 모래 내 점토함량 변화에 따른 실내실험으로, 점토함량이 증가할수록 전기비저항이 감소하고, 충전성이 증가하였다.

(3) 모래 내 점토층 두께 변화에 따른 실내실험에서 점토층의 두께가 증가할수록 전기비저항은 감소하고, 충전성은 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 충전성이 가장 높게 측정되는 점토층의 두께는 차이가 있었으나, 모래 내 점토층으로 이루어진 매질이 전부 점토층으로 이루어진 매질보다 IP 현상이 크게 측정되는 것으로 해석된다.

(4) 향후 신뢰도 있는 충전성 기준을 마련하기 위해서는, 실제 지표에서와 같은 전류흐름을 유도할 수 있는 모형을 크게 제작하여 IP 현상을 측정하는 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단(과제번호 3-4-3)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003, 물리탐사의 활용, 시그마프레스, 515-544.
 송영수, 1995, 해수 침입에 의한 지하수 오염 지역에서 전기비저항 및 유도분극 탐사, 한국자원공학회지, 32, 400-408.
 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤혜수, 1993, 유도분극, 전기비저항, VLF전자탐사법을 이용한 벤토 나이트 광상탐사 연구, 한국자원공학회지, 30, 102-107.
 유한진, 1986, 국내 산지별 함탄층의 SIP 반응에 관한 비교 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
 이상규, 황세호, 이태식, 1997, 폐광산의 토양오염영역 및 폐기된 광미의 탐지, 자원환경지질학회지, 30(4), 371-377.
 이상규, 황학수, 황세호, 박인화, 신제현, 2002, 참조채널 유도분극탐사 기술에 의한 해수침투대 인지, 물리탐사학회지, 5(1), 56-63.
 조두현, 1984, 전극 분극에 의한 SIP 반응의 모형 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
 최상혁, 김형수, 김지수, 2008a, 충적층 조사를 위한 모래와 점토의 유도분극 특성 고찰, 한국지구물리물리탐사학회 학술발표 논문집, 199-204.
 최상혁, 정재훈, 김영식, 김형수, 2008b, 수분함량별 모래 점토 시료의 전기비저항 및 유도분극 실내 실험, UN이 정한 지구의해 학술발표논문 초록집, 310.
 Draskovits, P., Hobot, J., Vero, L. and Smith, B. D., 1990, Induced polarization surveys applied to evaluation of

groundwater resources, Pannonian Basin, Hungary, in Induced polarization: Applications and case histories eds by Fink, J.B., et al. SEG special publication, 379-396.
 Fink, J. B., McAlister, E. O., Sternberg, B. K., Wieduwilt, W. G., and Ward, S.H., 1990, Induced polarization, Applications and case histories, Investigations in Geophysics, No. 4 Soc. Expl. Geophys., 150-178.
 Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966, Electrical methods in geophysical Prospecting, Pergamom.
 Ogilvy, A. A. and Kuzmina, E. N., 1972, Hydrogeologic and engineering-geologic possibilities for employing the method of induced potentials, Geophysics, 37, 839-861.
 Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R., and Nelson, P. H., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP, Geophysics, 43, 588-609.
 Slater, L. D. and Lesmes, D., 2002, IP interpretation in environmental investigations, Geophysics, 67, 77-88.
 Vacquier, V., Holmes, C. R., Kintzinger, P. R. and Lavergne, M., 1957, Prospecting for groundwater by induced electrical polarization, Geophysics, 22, 660-687.

2008년 11월 25일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인

최상혁

충북대학교 지구환경과학과
 361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
 Tel: 043-261-3136
 Fax: 043-273-9645
 E-mail: zzangguy2000@naver.com

김형수

한국수자원공사 수자원연구원
 305-703, 대전광역시 유성구 전민동 462-1
 Tel: 042-870-7640
 Fax: 042-870-7629
 E-mail: hskim@kwater.or.kr

김지수

충북대학교 지구환경과학과
 361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
 Tel: 043-261-3201
 Fax: 043-273-9645
 E-mail: geop22@cbnu.ac.kr