

## 충적층 조사를 위한 모래와 점토의 유도분극 특성 고찰

최상혁<sup>1)</sup>, 김형수<sup>2)</sup>, 김지수<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>충북대학교 지구환경과학과, [zzangguy2000@naver.com](mailto:zzangguy2000@naver.com)

<sup>2)</sup>한국수자원공사 수자원연구원

## A study on induced polarization characteristics of sand and clay for alluvium investigation

Sanghyuk Choi<sup>1)</sup>, Hyoungh-Soo Kim<sup>2)</sup>, Jisoo Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>2)</sup>Korea Institute of Water and Environment, Kwater

**요약** : 충적층 구성 물질 중 포화된 실트 혹은 점토층은 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 나타낸다. 낮은 전기비저항 값은 이 지층을 투수성이 높은 대수층으로 오인하는 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 극복하고 충적층 내 포화된 실트 혹은 점토층과 모래 혹은 자갈 대수층을 구분하기 위해 전기비저항 조사와 함께 유도분극 조사를 활용하는 방안을 검토하였다. 본 연구에서는 우선, 실내 실험을 통해 충적층 구성 물질별 전기비저항(resistivity)과 충전성(chargeability)을 조사하였고, 비분극 전극을 활용한 현장 수직 전기비저항/유도분극 조사를 수행하였다. 실내 실험을 통해 모래/점토 혼합층에서 점토 함량이 증가함에 따라 비저항은 낮아지고, 충전성은 높아짐을 확인하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 강변여과 현장에서 전기비저항/유도분극 조사를 수행하였다. 자료의 정량적 해석을 통해, 낮은 비저항과 낮은 충전성을 갖는 지층이 상대적으로 투수성이 우수하고 지하수 산출성이 높은 충적 대수층에 해당되는 것으로 최종 해석하였다.

**주요어** : 충적층, 전기비저항, 유도분극, 충전성, 지하수

**Abstract** : Silt or clay alluvium fully saturated with water generally shows low resistivity. Sometimes it is believe that the low resistivity layer is considered as good aquifer but this makes problems in the development of groundwater. To overcome this problem, we adopted induced-polarization(IP) method with resistivity method. Laboratory experiments and resistivity/IP field surveys with non-polarization electrodes were conducted for the study. Laboratory experiments shows that the increase of clay contents in the sample mixed with sand and clay give low resistivity and high chargeability. We used this experiment results in the interpretation of resistivity/IP field data which were obtained in riverbank filtration. Finally, the layer which has low resistivity and chargeabilty would be regarded as a good aquifer for the development of groundwater intake.

**Keywords** : Alluvium, resistivity, induced polarization, chargeability, groundwater

## 1. 전기비저항 및 유도분극 일반

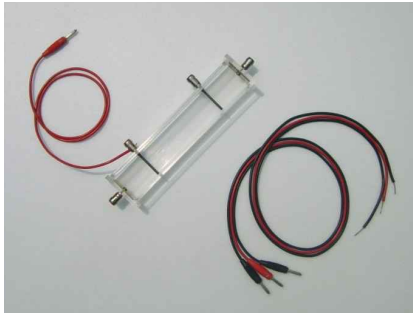
전기 탐사는 일반적으로 전기비저항을 조사하여, 광물자원, 지하수, 지반 등에 대한 정보를 얻기 위한 목적으로 수행되며, 다른 지구물리 방식에 비해 자료 획득이 용이하고, 주변 환경에 크게 영향을 받지 않는 특성 때문에 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 지구물리 조사 방식이다. 그러나 각종 암석들의 전기비저항 값이 많은 중첩을 보이므로 (Keller and Frischknecht, 1966), 전기비저항 탐사를 통하여 직접적으로 지하의 암상을 유추하기는 또한 매우 어렵다. 유도분극 탐사는 과거 주로 광상을 찾기 위한 목적으로 수행되어 왔으나, 장비의 특성, 활용되는 전극 상태, 지표면의 조건 등에 민감한 결과를 나타내는 문제 등으로 인해 현재에는 많이 활용되지 않고 있는 실정이다. 그러나 최근 들어 많은 전기탐사 장비들이 전기비저항과 유도분극 현상을 모두 조사할 수 있게 만들어져 보급되고 있어, 이 두 가지 방식의 조사를 현장에서 동시에 수행하는 일이 보다 수월해졌다. 다만, 유도분극 조사는 전술한 바와 같이 전극의 종류, 특히 금속 전극을 사용할 경우, 지하 매체에 대한 영향보다 전극 자체의 영향으로 인한 측정값 변화가 커지므로, 특별히 고안된 비분극 전극을 활용하는 것이 바람직하다. 이러한 비분극 전극은 보통 전해액이 소량으로 흘러나오는 도기를 활용하므로, 현장에서 전극의 설치에 다소 시간이 많이 소요되며, 이동 등이 용이하지 않다는 불편함을 초래하기도 한다.

그러나 전기비저항 탐사는 지하 매질의 전기전도도 변화에 민감하게 반응하므로, 염수로 포화된 사암 또는 자갈층이나, 신선한 물로 포화된 점토층은 모두 낮은 전기비저항 이상을 나타내기 때문에 (Van Dam, 1976), 전기비저항 탐사만으로 이들을 구별하는 것은 사실상 어려움이 많다. 또 다른 예로 충적층을 구성하고 있는 실트 또는 점토층 등은 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 보이지만, 실제 투수성은 매우 낮아 지하수 개발에 곤란을 야기 시키기도 한다(최상혁 등, 2008). 다시 말해 충적층 전기탐사 결과 가장 낮은 전기비저항을 보이는 지층이 항상 지하수 개발에 유리한 조건을 가지고 있지 않을 수 있다는 것이다.

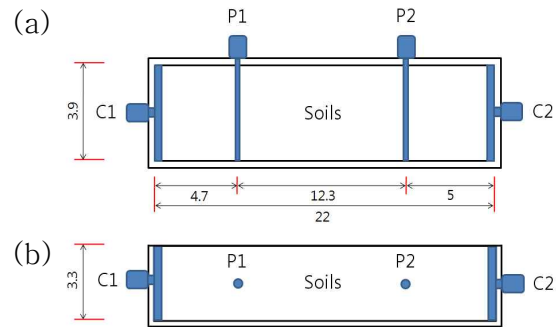
따라서 본 논문은 위와 같은 어려움을 극복하기 위해, 전기비저항 조사와 유도분극 조사를 병행하는 지구물리 조사 기법으로 충적층 내의 가장 적합한 지하수 개발 대상 지층을 파악하고자 하였다. 실내실험으로 모래와 점토 시료를 이용하여, 점토 함량에 따른 전기비저항 및 유도분극 실험을 실시하였고, 연구지역 수직탐사를 실시하여 시추자료와 비교 분석 하였다.

## 2. 실내실험

본 연구에서 실내실험은 모래 내 점토의 함량에 따른 비저항 및 충전성 값을 측정하였다. 실내실험에 사용된 시료는, 점토는 카올리나이트(Kaolinite)와 할로이사이트(Halloysite)가 주성분인 고령토(Kaolin)를 준비하였으며, 모래는 통일분류법(Unified Classification System)에 따라 일반 모래를 4번체(4.75mm)와 200번체(0.075mm)에 체가름하여 분류하였다. 실험은 수평전류 흐름을 가정한 soil sampler(Fig. 1)에 시료를 담아 실시하였다. Fig. 2는 soil sampler의 평면도와 정면도이다. soil sampler는 단면적이  $12.48\text{cm}^2$  ( $3.9\text{cm} \times 3.2\text{cm}$ ), 길이가 22cm인 직육면체 모형이고, 재질은 투명 아크릴이며, 양 끝에 전류전극 2개와 내부에 전위전극 2개가 연결되어 있다. 전위전극 사이의 거리는 12.3cm이다. 수평적인 전류흐름을 유도하기 위해, 전류전극의 내부는 단면적과 넓이가 같은 직사각형 철판으로 이루어져 있다.



**Fig. 1.** Soil sampler and cables.



**Fig. 2.** Schematic view of soil sampler.

(a) Plane view. (b) Front view.

#### (1) 모래와 점토 비율에 따른 실내실험

모래에 포함된 점토 성분의 양에 따른 전기비저항 및 유도분극 값을 측정하였다. 시료는 점토를 혼합하지 않은 모래시료 1가지, 모래 500cm<sup>3</sup>에 점토를 각각 100, 200, 300, 400, 500cm<sup>3</sup>을 첨가한 모래점토 혼합시료 5가지, 총 6가지 준비하였다(Table 1). 모래 점토가 혼합된 시료는 점토가 골고루 분포하도록 건조한 상태에서 혼합하여 제작하였다. 실험은 함수비 변화를 인자에 포함하지 않고, 전기비저항이 약 71Ωm를 나타내는 수돗물을 사용하여 포화상태에서 측정하였다. 한 시간 가량 물속에서 완전히 포화시킨 후 실험을 실시하였다. 실험 데이터는 3번 측정한 평균으로 기록하였다.

실험 결과를 Fig. 3에 그래프로 나타내었다. 전기비저항 그래프는 Soil(1-1) 시료를 제외하고 점토 함량이 증가할수록 비저항 값이 감소하다가 약 65Ωm 값에서 일정해지는 경향을 나타내었다. 점토 함량이 전혀 없는 Soil(1-1) 시료가 Soil(1-2), Soil(1-3) 시료보다 전기비저항이 낮게 측정된 이유는 점토의 함량이 많지 않은 Soil(1-2), Soil(1-3) 시료의 점토에 의한 비저항 감소보다 유효공극이 많은 Soil(1-1) 시료 내의 물에 의한 비저항 감소가 더욱 크게 작용하였기 때문으로 사료된다. 유도분극 그래프는 점토 함량이 증가할수록 충전성이 증가하는 경향을 나타냄으로서, 점토가 IP 효과를 증가시키는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 점토의 함량 변화를 모래와 점토를 혼합하는 방법으로 시료를 제작하는 것으로는, 실제 충적층 현장의 점토층을 표현하기에는 부족하다고 판단하여, 모래층 내에 점토층이 있는 모형으로 두 번째 실내실험을 실시하였다.

#### (2) 모래 내 점토 두께에 따른 실내실험

모래층 내에 점토층이 있는 모형으로서, 점토층 두께에 따른 전기비저항 및 유도분극 실내실험을 실시하였다. 앞선 실험과는 달리, 점토 함량에 의한 시료가 아닌 점토층 모형에 의한 시료로서 현장의 모습을 더욱 잘 표현할 것으로 생각되었다. 시료는 모래시료 1가지, 모래층 내에 점토층 두께가 2.7cm, 6.5cm, 8.6cm, 11.2cm, 13.5cm, 16.4cm인 모래점토시료 6가지, 점토시료 1가지, 총 합계 8가지 준비하였다(Table 2). 첫 번째 실험과 마찬가지로, 수돗물에 포화된 상태에서 실험을 실시하였다. 실험 데이터는 3번 측정한 평균으로 기록하였다.

실험 결과를 Fig. 4에 그래프로 나타내었다. 전기비저항 그래프는 1차 실험과 비슷한 경향을 나타내었다. 점토 두께가 두꺼워질수록 비저항 값이 감소하다가 약 50Ωm에서 일정해졌다. 모래층 내의 점토층 두께에 의한 전기비저항 값의 영향은 점토층 두께가 50%를 넘으면 더 이상 증가하지 않음을 나타낸다. 실제 현장에서도 점토층이 50%를 넘게

차지하더라도 50%일 때와 비슷한 값을 나타낼 것으로 사료된다. 유도분극 그래프는 점토층의 두께가 증가할수록 충전성이 증가하다 감소하는 경향을 나타내었다. 점토층의 두께가 11.2cm인 Soil(2-5) 시료의 충전성이 매우 높게 측정된 점이 실험의 오차라고 판단하여 다시 실험하였으나 비슷한 값을 나타내었다. 이는 전체 층의 40~60%를 점토층이 차지하고 있을 때 충전성이 상대적으로 매우 높게 나타날 수 있음을 시사한다.

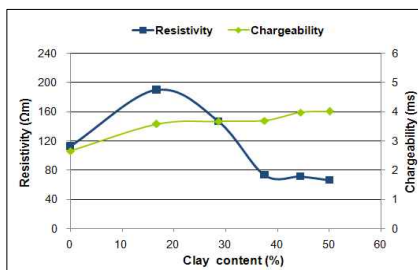
두 번째 실험에서의 점토층 두께에 따른 비저항과 충전성의 분포는 3가지로 확연히 구분된다고 할 수 있다. 3가지 분포는 ① 비저항은 높고 충전성은 낮은 주 모래층, ② 비저항은 낮고 충전성은 높은 모래와 점토의 비율이 비슷한 모래점토층, ③ 비저항도 낮고 충전성도 낮은 주 점토층 등이다. 점토의 양에 의한 충전성의 기준을 정하기는 어렵지만, 비저항과 충전성의 상대적인 경향을 분석함으로써 충적층 내의 점토층을 파악하는데 유용할 것으로 사료된다.

**Table 1.** Clay contents of soil samples at test-1.

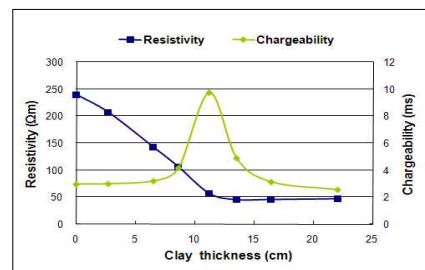
| Sample No. | Volume (cm <sup>3</sup> ) |      | Content (%) |      |
|------------|---------------------------|------|-------------|------|
|            | Sand                      | Clay | Sand        | Clay |
| Soil(1-1)  | 500                       | 0    | 100         | 0    |
| Soil(1-2)  | 500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

**Table 2.** Clay contents of soil samples at test-2.

| Sample No. | Thickness (cm) |      | Content (%) |      |
|------------|----------------|------|-------------|------|
|            | Sand           | Clay | Sand        | Clay |
| Soil(2-1)  | 22.0           | 0.0  | 100         | 0    |
| Soil(2-2)  | 19.3           | 2.7  | 87.7        | 12.3 |
| Soil(2-3)  | 15.5           | 6.5  | 70.5        | 29.5 |
| Soil(2-4)  | 13.4           | 8.6  | 61          | 39   |
| Soil(2-5)  | 10.8           | 11.2 | 49.1        | 50.9 |
| Soil(2-6)  | 8.5            | 13.5 | 38.6        | 61.4 |
| Soil(2-7)  | 5.6            | 16.4 | 25.5        | 74.5 |
| Soil(2-8)  | 0              | 22.0 | 0           | 100  |



**Fig. 3.** The variation of resistivity and chargeability under clay content.



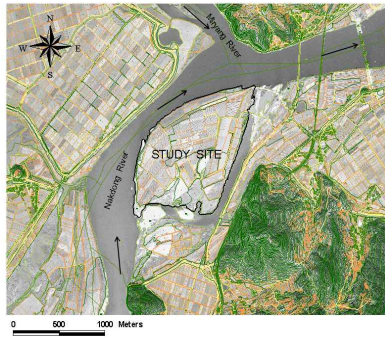
**Fig. 4.** The variation of resistivity and chargeability under clay thickness.

### 3. 현장 조사

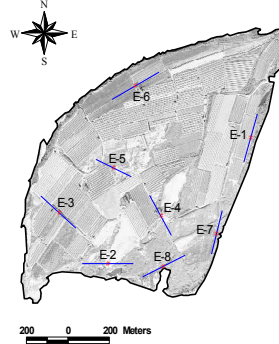
#### (1) 연구지역

연구지역은 김해시 생림면 마사리에 위치한 낙동강 내 하중도인 판섬 일원이다. 이 지역은 현재 약 18만m<sup>3</sup>/day의 강변여과 취수 시설이 설치되고 있는 지역이다. 연구 지역을 Fig. 5에 항공사진과 수치지형도를 중첩하여 나타내었다. 판섬은 면적이 1.02km<sup>2</sup>, 둘레 길이가 4.76km이다. 판섬 북동쪽에서 밀양강이 낙동강에 합류한다. 낙동강은 남쪽에서 동쪽으로 흐르며, 판섬 주변 낙동강의 최심 하상고는 E.L-17.75m이고, 판섬의 남동쪽에서 유하하는 셋강의 최심 하상고는 E.L-6.41m이다(김해시, 2006). 연구지역의 시추조사자료(김해시, 2006)에 의하면 충적층 상부에는 주로 모래 및 실트가 퇴적되어 있으며, 점토층은 약 20m 깊이에 1.5~6m 두께로 분포하고 있다. 그 점토층 하부에는 약 10~

15m 두께의 모래자갈층이 기반암 위에 퇴적되어 있으며, 이 모래자갈층은 연구지역의 주요 대수층으로 간주된다.



**Fig. 5.** Location map of the study area.



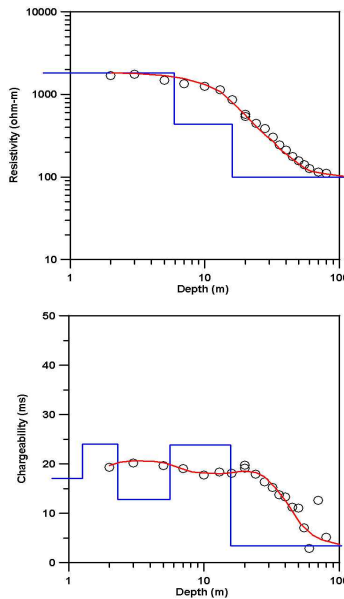
**Fig. 6.** The distribution of Electrical sounding surveys.

## (2) 자료 획득 및 결과 고찰

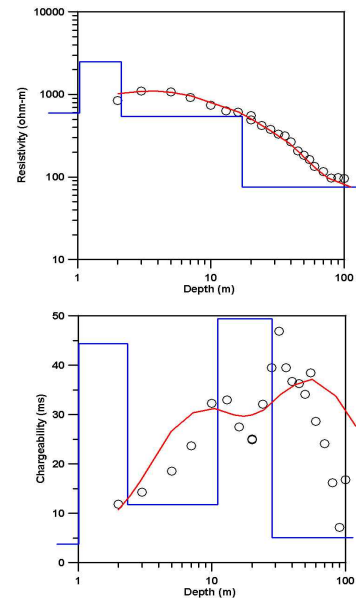
비분극 전극을 사용하고, 슬럼버저 배열을 이용하여 100m 깊이까지의 수직탐사 데이터를 얻었다. 신호 대 잡음비가 높은 슬럼버저 배열임에도 불구하고 지하심부로 갈수록 Stack 2번에 대한 편차가 증가하여서 2~3번 이상 측정하여 양질의 자료를 획득하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 E-2, E-3 지점의 수직탐사 역산 결과이다. E-2, E-3 지점은 기존에 김해시가 시추를 실시한 위치로서, 시추자료와 비교분석하였다. 자료처리는 ESII(김형수, 이기화, 1993)를 이용하여 비저항을 역산하였고, IPI2Win (Alexey, 2006)을 이용하여 충전성을 역산하였다.

E-2 지점 해석결과,  $100\Omega m$ 에 가까운 저비저항대가 10m 깊이 이하에 위치하지만, 그 깊이에서 고충전성을 확인할 수 없었다. 즉, 점토의 특징인 저비저항-고충전성대가 나타나지 않았다. 시추자료에는 28.5m 깊이에 두께 1.5m의 점토층이 있는 것으로 나타나지만, 그 깊이에 높은 충전성 반응은 볼 수 없었다. 그러나 약 6~15m 깊이의 매질이 20ms 이상을 나타내는 상대적으로 높은 충전성을 보였다. 이 반응은 28.5m 깊이에 위치한 점토층에 의한 영향인 것으로 사료된다.

E-3 지점 해석결과, 저비저항-고충전성대가 약 18~25m 깊이에 위치하였다. 시추자료에는 깊이 22.5m에 1.5m 두께의 실트층과 1.5m 두께의 점토층이 있는 것으로 나타나 있다. 이는 전기비저항/유도분극 조사를 통해 실트 또는 점토층의 깊이 추정 가능성이



**Fig. 7.** The inversion result of sounding survey for the E-2.



**Fig. 8.** The inversion result of sounding survey for the E-3.

나타낸다. 그리고 깊이 25.5m에 위치한 주 대수층으로 판단되는 15m 두께의 자갈층을 저비저항-저충전성으로 파악할 수 있었다. E-2 지점과 마찬가지로 실제 점토층의 깊이보다 낮은 깊이에서 높은 유도분극 반응이 해석되었다. 이는 수직탐사에서 유도분극 반응은 실제 깊이보다 낮은 깊이에서 측정될 가능성을 있음을 시사한다.

#### 4. 예비 결론

모래와 점토의 비율에 따른 실내실험으로 점토의 함량이 많아질수록 비저항을 낮추고 충전성을 높이는 것을 확인하였다. 그러나 모래 내 점토 두께에 따른 실내실험에서는 점토 두께가 약 50%인 Soil(2-5) 시료가 충전성이 제일 높고 50%를 넘어서면 다시 감소하는 것으로 나타났다. Soil(2-5) 시료는 전위전극 위치에서 모래와 점토의 층이 바뀌었다. 매질이 바뀌는 지점에 전위전극이 위치하면 분극현상이 크게 일어나는 것인지, 아니면 실험결과처럼 전부 점토로 이루어진 매질보다 모래층 내 점토층이 약 50% 차지하고 있는 매질이 분극현상이 더 크게 일어나는지 알 수 없었다. 이를 확인하기 위해서는 soil sampler의 크기를 바꾸어 추가적인 실험을 실시해야 하겠다.

또한 실내실험에서는 충전성이 10ms 이상으로는 측정되지 않았으나, 현장에서는 50ms 까지 측정되었다. 제일 높은 측정값 외에도 전반적으로 현장 데이터가 더 크게 측정되었다. 실내실험으로 모래와 점토 시료의 충전성 기준을 마련하고자 하였으나, 현장 충전성과 차이가 크므로 더 많은 실내실험 데이터가 필요할 것으로 보인다. 실내모형이 너무 작다는 점과 soil sampler에서의 전류흐름과 실제 땅에서의 전류흐름이 다른 점이 현장 데이터와 큰 차이를 보인 원인으로 추정된다. 실제 지표에서의 전류흐름을 유도할 수 있는 실내모형을 크게 만든다면, 더욱 좋은 데이터를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 연구지역 데이터의 비저항과 충전성의 증가 감소 경향만으로도 점토층과 대수층을 추정할 수 있었다. 본 지구물리 조사기법이 향후 대수층 조사에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

- 김형수, 이기화, 1993, 대화식 방법을 이용한 Schlumberger 전기 탐사 및 Magnetotelluric 탐사 자료의 1차원적 해석, 대한지질학회지, 제29권, pp. 493-506.
- 김해시, 2006, 김해시 강변여과수 개발사업 토질보고서, pp. 49-90.
- 최상혁, 정재훈, 김영식, 김형수, 2008, 수분함량별 모래 점토 시료의 전기비저항 및 유도분극 실내 실험, UN이 정한 지구의해 학술발표논문 초록집, pp. 310.
- Alexey B., 2006, Resistivity sounding interpretation-IPI2Win Ver 3.1.1b, Moscow state university.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966, Electrical methods in geophysical Prospecting, Pergamon.
- Van Dam, J.C., 1976, Possibilities and Limitation of the Resistivity Method of Geoelectrical Prospecting in the Solutions of Geohydrological Problems, Geoexploration, Vol. 14, pp. 179-193.