

## 점토광물을 함유하는 한천인공시료를 이용한 전기비저항 특성에 관한 실험적 연구

박미경<sup>1)</sup>, 박삼규<sup>2)</sup>, 김희준<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 지질환경연구소, [mikyung@mail1.pknu.ac.kr](mailto:mikyung@mail1.pknu.ac.kr)

<sup>2)</sup>한국지질자원연구원 지반안전연구부

<sup>3)</sup>부경대학교 환경탐사공학과

## Laboratory study on the electrical resistivity characteristics using an artificial agar specimen with clay minerals

Mi Kyung Park<sup>1)</sup>, Sam Gyu Park<sup>2)</sup>, Hee Joon Kim<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University

<sup>2)</sup>Geotechnical Engineering Div., KIGAM

<sup>3)</sup>Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

**요약** : 일반적으로 단층 파쇄대나 풍화대, 대수층에서는 전기비저항이 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다. 단층 파쇄대가 저비저항대로 나타나는 이유는 풍화 및 변질작용에 의한 점토광물의 함유량이 증가하는 것과 균열 등에 의해 공극률이 증가함으로써 체적 함유수가 증가하는 것을 들 수 있다. 이러한 단층파쇄대의 탐지는 토목공사를 시공함에 있어서 매우 중요하기 때문에 저비저항대가 되는 요인인 점토광물의 종류 및 함유량과 전기비저항의 관계를 밝히는 것은 매우 중요한 일이다.

따라서, 본 연구에서는 실제 암석대신 특별히 고안한 점토광물을 함유한 한천공시체를 이용하여 전기비저항을 측정함으로써, 풍화 인공암으로서의 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계를 고찰하였다. 본 실험에 이용된 점토광물은 Kaolinite와 Montmorillonite이다. 그 결과, Montmorillonite는 Kaolinite에 비해 점토광물의 함유량이 적음에도 불구하고 전기비저항을 현저히 저하시키는 것으로 나타났다. 또한 실험결과를 이용한 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계식을 제안하였고, 그 상관성은 0.89 이상 높게 나타났다.

**주요어** : 전기비저항, 한천공시체, 점토광물의 함유량, Kaolinite, Montmorillonite

**Abstract** : A low resistivity zone is found in many places such as a fractured fault zone, weathered zone and aquifer. The electrical resistivity is influenced mainly by pore fluid as well as the clay mineral types and contents. Hence, it is very important to understand the relationship between the electrical resistivity and clay contents associated with the low resistivity zone for geotechnical applications such as civil engineering.

This study examines the characteristics of clay mineral types and contents to

electrical resistivity through sample measurements, and proposes an expression relating the resistivity and clay content. The electrical resistivity is measured for an artificial agar specimen with clay minerals instead of a natural rock. The clay minerals used are Kaolinite and Montmorillonite. Montmorillonite shows remarkably lower resistivity than Kaolinite, although its clay content is fewer than that of Kaolinite. Also, the proposed expression shows a good correlation coefficient as high as 0.89 or more in all clay minerals.

**Keywords:** Electrical resistivity, agar specimen, clay mineral content, Kaolinite, Montmorillonite

## 1. 서론

일반적으로 단층 파쇄대나 풍화대, 대수층에서는 전기비저항이 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다. 단층 파쇄대가 저비저항대로 나타나는 이유는 풍화 및 변질작용에 의한 점토 광물의 함유량이 증가하는 것과 균열 등에 의해 공극률이 증가함으로써 체적 함수율이 증가하는 것을 들 수 있다. 이러한 단층파쇄대의 탐지는 토목공사를 시공함에 있어서 매우 중요하기 때문에 저비저항대가 되는 요인인 점토광물의 종류 및 함유량과 전기비저항의 관계를 밝히는 것은 매우 중요한 일이다(Archie, 1942; Bussian, 1983; Matsui, 1995; Matsui et al., 1999; Park et al., 1999a; 1999b, Klein and Sill, 1982; Uchida et al. 2001).

따라서, 본 연구에서는 실제 암석대신 특별히 고안한 점토광물을 함유한 한천공시체(agar specimen)를 이용하여 전기비저항을 측정함으로써, 풍화 인공암으로서의 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계를 고찰하였다. 본 실험에 이용된 점토광물은 Kaolinite와 Montmorillonite이다.

## 2. 실험재료

### (1) 한천과 증류수

일반적으로 한천(agar)은 양갱과 같은 과자의 재료나 식용으로 이용될 뿐만 아니라, 세균의 재배지, 조직 배양, 의약품 등 여러 분야에 걸쳐 널리 이용되고 있지만, 본 연구에서는 화학시약으로서 시판되고 있는 분말상태의 한천을 이용하여 증류수와 함께 혼합해서 실험 공시체를 만들었다.

실험에 사용한 한천은 홍조류를 열수로 추출해서 얻어지는 점질성 복합다당류의 물질로서 아가로스(agarose)가 주성분인 공업용 한천이다. 한천은 가열에 의해 용해되고 냉각에 의해 응고되어 겔로 되는 특성을 가지고 있다. 또 한천의 응고점은 40 °C 전후이고 응고한 겔의 용점은 80 °C 이상으로 열가소성의 성질을 띠고 있다. 이러한 성질을 이용하여 공시체내의 점토광물이 균일하게 분산되어 있는 상태의 풍화 인공암을 만들 수 있다. 굳어진 한천은 쇄상고분자의 그물코구조로 형성되어 수분을 많이 함유하게 된다. 그래서 보수성이 뛰어나고 온도변화에 대해서 형상이 변화하지 않는 성질을 가지고 있다.

한편, 본 연구에서는 분말상태의 한천을 여과 및 용해시키기 위한 용액으로써 전기비저항이 약 6,000 ohm-m인 공업용 제품의 증류수를 사용하였다.

## (2) 점토광물

본 연구에 이용된 점토광물은 Kaolinite와 Montmorillonite이다. Kaolinite의 물성은 팽창성과 수축성은 비교적 낮고 입자의 직경은 비교적 크고 입자의 형태는 판막상으로 구성되어 있다. 한편, Montmorillonite는 팽창성과 수축성이 매우 뛰어나고 입자의 직경이 대단히 작고 입자의 형태는 얇은 막상을 띠고 있다. 또한, Montmorillonite의 양이온교환용량 (Cation Exchange Capacity, CEC)은 6.0으로서 0.72인 Kaolinite보다 약 10배 정도 크다.

## 3. 실험방법

### (1) 한천공시체 제작 및 전기비저항 측정시스템

한천공시체 몰드는 아크릴로 제작된 것으로, 단면의 지름과 길이는 각 60 mm와 100 mm이다. 이 크기는 실내실험으로 이용하고 있는 암석 코아의 크기를 고려한 것이다. 한천공시체에 이용되는 제리상태의 한천의 제작방법은 식용 한천제리의 제작방법과 유사하지만, 다른 점으로는 맛을 내지 않는 점, 점토를 첨가하는 점 그리고 분말한천을 여과하는 점 등을 들 수 있다. 여기서, 한천공시체의 제작순서를 정리하면 다음과 같다.

- (i) 분말의 한천을 여과시킨다. 한천을 여과시키는 이유에 대해서는 후술한다.
- (ii) 여과시킨 한천, 점토 그리고 증류수를 비이커에 넣고 잘 섞어서 약 80℃가 될 때까지 증탕시킨다. 이때, 용해된 한천과 점토가 균질상태로 분포할 수 있도록 잘 저어준다.
- (iii) 이렇게 만들어진 실험재료를 공시체 몰드에 부어 넣고, 건조방지를 위해 시중에서 판매하고 있는 비닐랩으로 덮은 뒤, 약 3℃상태의 냉장고에서 12시간 냉장시킨다.
- (iv) 냉장 후, 공시체 모양으로 성형이 된 한천공시체를 인공 풍화암석으로 상정하여, 전기비저항을 측정한다.

전기비저항 측정시스템은 Fig. 1에 나타내고 있듯이, 공시체 몰드부 (specimen), 송신부 (Function generator) 그리고 신호처리부 (Signal conditioner) 데이터 처리부 (Data processor)로 구성되어 있다. 한천공시체에서의 전극배열은 원통으로 된 공시체 몰드의 양 단면에 배치된 동판(두께 3mm)을 전류전극 (C1 과 C2)으로 설정하고, 몰드 길이를 삼등분한 지점에 구멍을 내어 동선 ( $\phi$  0.55mm)을 각각 집어넣은 전위전극 (P1과 P2)으로 구성되어 있다.

한천공시체의 전기비저항 측정은 원통으로 된 양 단면적에 축 방향으로 평행하게 전류가 흐를 때의 각 측정구간에 대한 전위차를 측정하여, 아래의 식 (1)에 의해 전기비저항을 산출한다.

$$\rho_{sp} = \frac{S \Delta V}{L I} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{sp}$  은 한천공시체의 전기비저항 (ohm-m), S는 한천공시체의 단면적 ( $m^2$ ), L은 전위차 측정구간의 길이 (m), I는 한천공시체의 축방향에 평행한 전류 (A),  $\Delta V$ 는 측정구간에서의 축방향의 전위 (V)이다.

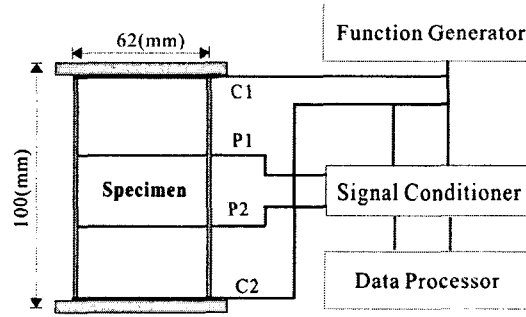


Fig. 1. Resistivity measurement of a specimen.

(2) 한천과 증류수의 중량의 혼합비율과 한천의 여과에 따른 전기비저항의 관계

Fig. 2는 본 실험에 앞서 실시한 예비실험의 결과로서, 한천과 증류수의 중량의 혼합비율에 따른 전기비저항과의 관계와 한천의 여과에 따른 전기비저항과의 관계를 나타낸 것이다. 먼저, 점토광물도 포함하지 않고 여과를 하지 않은 한천공시체에 대해서 한천과 증류수의 중량의 혼합비율에 따른 전기비저항과의 관계는 한천과 증류수의 중량의 혼합비율이 1.6 %에서 약 160 ohm-m였다. 여기서 한천과 증류수의 중량의 혼합비율이 6 % 이상 높아지면, 전기비저항이 약 40 ohm-m 정도로 일정하게 되는 경향을 볼 수 있다. 이렇게 한천과 증류수의 중량의 혼합비율이 6 % 이상 높아지면 전기비저항이 일반의 암석보다 저비저항으로 되고, 혼합비율이 너무 낮으면 한천공시체가 너무 물러져 실험하기가 곤란한 상태임을 파악하게 되었다.

한편, 한천용액을 여과함에 따라 한천 속에 들어있는 각종의 전해질 물질을 제거하여 한천과 증류수의 중량의 혼합비율이 2 %인 공시체에서 전기비저항을 약 90 ohm-m에서 약 245 ohm-m까지 높일 수 있었다. 일반적으로 야외 암석의 비저항은 사암과 화강암은 각각 약 30 ~ 1,000 ohm-m 과 약 800 ~ 10,000 ohm-m 이상이므로 한천공시체의 전기비저항이 245 ohm-m로서 사암과 화강암의 전기비저항의 범위에 속하므로 한천공시체가 인공암으로 설정하여도 그 적용성이 있다고 판단되었다. 여과는 여과지를 이용하였고, 분말한천 6 g에 대해 증류수 100 ml와 혼합하여 5회 측정을 실시하였다. 또한, 한천공시체내의 점토광물이 균일하게 분산되어 있는 가를 확인하기 위해, Fig. 1에서 보여준 한천공시체를 두배의 높이의 공시체로 만들어 그 길이를 사등분하여, 사등분한 각각의 공시체의 전기비저항을 측정하였다. 그 결과, 각 공시체의 전기비저항은 약 ±3 % 정도의 분산성을 나타내고 있으므로 한천공시체에서의 점토광물의 분포상태는 거의 균질상태임을 확인할 수 있었다.

따라서, 본 연구에서는 한천과 증류수의 중량의 혼합비율을 1.6 %로 조절하고, 두 종류의 점토광물인 Kaolinite와 Montmorillonite의 함유량을 각각 변화시키면서 공시체를 성형하였다. 여기서, Kaolinite와 Montmorillonite에 대한 실험 가능한 점토광물의 함유량의 범위는 각각 0 ~ 40 (%)와 0 ~ 16 (%)였다. 또한 예비실험의 결과에 따르면 점토광물이 어느 쪽도 함유하지 않은 상태에서의 한천공시체의 전기비저항은 285 ohm-m였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 한천공시체를 이용한 실험 결과로서, Kaolinite 및 Montmorillonite인 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계를 나타내고 있다.

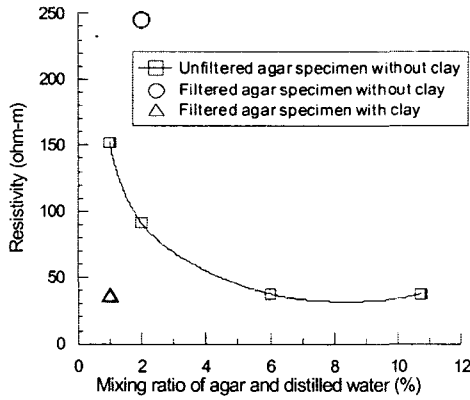


Fig. 2. Resistivity of the agar specimens as a function of the percentage of distilled water.

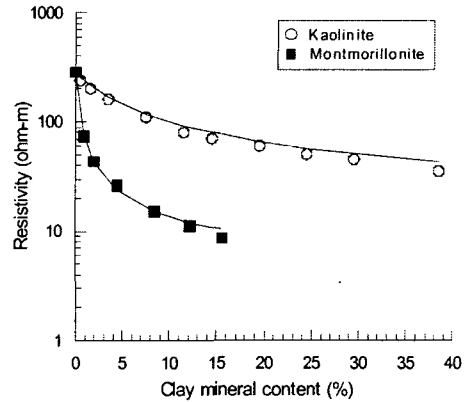


Fig. 3. Resistivity of the agar specimens of Kaolinite and Montmorillonite. Solid curves are obtained from equation (2).

Kaolinite를 함유한 한천공시체는 Kaolinite의 함유량이 0에서 약 40 %까지 증가함에 따라 285 ohm-m에서 33.1 ohm-m까지 감소하였다. Montmorillonite를 함유한 한천공시체의 전기비저항은 함유량이 0에서 약 16 %까지 증가함에 따라, 285 ohm-m에서 9.8 ohm-m까지 전기비저항이 현저히 감소함을 보여주고 있다.

각 점토광물의 함유량이 증가함에 따라 한천공시체의 전기비저항은 낮아지고, 그 감소 폭은 서서히 작아지므로, 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계는 거의 반비례임을 확인하였다. 즉, 점토광물과 같이 전기전도도가 큰 전해질 물질은 그 함유량이 증가함에 따라 전기전도도와는 비례하는 관계이지만, 전기비저항과는 반비례 관계임을 나타낸 것이다. 특히, Montmorillonite는 Kaolinite에 비해 함유량이 적음에도 불구하고 전기비저항을 현저히 낮추는 경향이 있음을 발견하였다. Montmorillonite의 양이온교환용량 (Cation exchange capacity, CEC)이 Kaolinite보다 약 10배정도 높은 전기 전도체이기 때문이라고 판단된다. 또한, 한천을 여과함에 의해 있어 여과정도를 달리하면 동일한 한천과 증류수의 중량의 혼합비율에서도 90 ohm-m에서 245 ohm-m, 285 ohm-m 및 355 ohm-m까지 점토광물을 함유하지 않는 한천공시체 자체의 비저항을 변화시킬 수 있었다. 따라서, 한천공시체는 여과에 의해 전해질 물질의 제거 및 한천과 증류수의 중량의 혼합물의 변화에 따라, 한천공시체가 인공암으로서 이용 가능하도록 전기비저항을 조절할 수 있었고, 점토광물의 함유량도 간단히 조절할 수 있음을 확인하였다.

### 5. 관계식 제안과 고찰

본 연구의 실험결과로부터, 한천공시체를 이용한 점토광물의 함유량과 전기비저항의 관계식으로서 식(2)를 제안한다.

$$\rho_{claySP} = \rho_0 - \frac{aC}{C+b} \quad (2)$$

여기서,  $\rho_{claySP}$ 은 점토광물을 함유한 한천공시체의 전기비저항 (ohm-m)이고,  $\rho_0$ 은 점토광물을 함유하지 않는 한천공시체의 전기비저항 (ohm-m)이다.  $C$ 는 점토광물의 함유

량 (%)이고,  $a$ 와  $b$ 는 점토광물의 종류에 따른 고유상수이다.

이 상수  $a$ 와  $b$ 는 식 (2)로 계산하여 곡선일치 (curve fitting) 에서 얻어진 것으로 각각 Kaolinite는  $a=272$ ,  $b=4.72$ 이며, Montmorillonite는  $a=280$ ,  $b=0.315$ 이다. Fig. 3에서 얻어진 실험결과와 관계식 (2)와 근사결과를 비교해 보면, 본 실험에서 사용한 두 점토광물 모두 측정 데이터와의 상관관계가 0.89 이상으로 높았으며, 한천공시체에서의 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계를 잘 나타내어 주고 있다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 식 (2)는 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계를 유추할 수 있는 근사식으로서 유용하리라 판단된다.

## 6. 결론

본 실험에 이용한 두 종류의 점토광물인 Kaolinite와 Montmorillonite는 양쪽 모두 점토광물의 함유량이 증가함으로써 수백 ohm-m 정도의 공시체의 전기비저항을 수 ohm-m 정도까지 상당히 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, Kaolinite와 Montmorillonite는 양쪽 모두 점토광물의 함유량이 증가함에 따라 전기비저항은 감소하고, 전기비저항의 감소량 폭은 서서히 작아졌다. 특히, Montmorillonite는 Kaolinite에 비해 점토광물의 함유량이 적음에도 불구하고 전기비저항을 현저히 저하시키는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 전기전도도에 영향을 미치는 양이온 교환용량 (CEC)이 Kaolinite보다 약 10배정도 높기 때문으로 판단된다. 이상과 같이 인공풍화암으로 설정한 한천공시체를 이용하여 점토광물의 함유량과 전기비저항과의 관계식을 제안하였고, 그 관계식은 본 연구에서 얻어진 결과와 높은 상관관계가 있음을 밝혔다.

## 감사의 글

본 연구를 수행하게끔 지도해주신 Tamotsu Matsui 교수 (전, 일본 오사카 대학) 와 수 차례의 반복된 실험을 함께 한 Yoshinori Uchida씨(일본 도로공사)에게 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans, A.I.H.E.*, **146**, 54-67.
- Bussian, A. E., 1983, Electrical conductance in a porous medium, *Geophysics*, **48**, 1258-1268.
- Klein, D. J., and Sill, W. R., 1982. Electrical properties of artificial clay-bearing sandstones, *Geophysics*, **47**, 1593-1601.
- Matsui, T., 1995, Needs and application of resistivity-based high-density prospecting to geotechnical engineering, *Butsuri-Tansa*, **48**, 530-538. (in Japanese)
- Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K., and Matsuura S., 1999, Applicability of resistivity-based high-density Prospecting to rock mass survey, *Proc. 99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering*, 141-146.
- Park, S. G., Fujiwara H., Park, M. K., and Matsui, T., 1999a, Fundamental study on resistivity of soils, *Butsuri-Tansa*, **52**, 299-306. (in Japanese)
- Park, S. G., Park, M. K., and Matsui, T., 1999b, Temperature dependency of resistivity in groundwater and water saturated soil, *Butsuri-Tansa*, **52**, 247-253. (in Japanese)
- Uchida, Y., Matsui, T., Tanimoto, T., and Park, M. K., 2001, Effect of clay content on resistivity characteristics of Substitutional rock, *The 36<sup>th</sup> Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, F-00, 161-162. (in Japanese)