

울릉도 시추 코어의 상온 전기비저항과 물성 간의 상관성

이태종^{1*} · 이상규¹ · 연관희²

¹한국지질자원연구원

²한전 전력연구원

Electrical Resistivity at Room Temperature and Relation between Physical Properties of Core Samples from Ulleung Island

Tae Jong Lee^{1*}, Sang Kyu Lee¹, and Kwan-Hee Yun²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

²Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

요약: 울릉도 지열조사 시추공에서 채취한 암석코어 중 약 20 m 간격으로 수집한 23개의 코어시료에 대하여 수포화 전기비저항과 건조 전기비저항, 건조밀도와 유효공극률을 측정하고, 암석코어 별 전기비저항 범위를 제시하였으며 물성 간 상관성을 분석하였다. 암석코어의 건조과정 말미에 질소가스를 주입함으로써 습기의 공극내 유입 및 흡착을 지연시켜 건조 전기비저항을 측정할 수 있는 전처리 방법을 고안하였다. 측정된 물성 상호간의 상관성을 분석한 결과, 울릉도 암석코어의 건조밀도는 유효공극률과 매우 높은 상관성을 보였는데, 특히 ‘건조밀도 감소에 대한 유효공극률 증가율’이 압중에 따라서 큰 차이를 보여서 현무암질 화산쇄설암이 가장 크고 조면암질 화산쇄설암, 조면암의 순으로 작아진다. 따라서 울릉도 암석코어는 건조밀도와 유효공극률의 상관성 분석만으로도 암종 구별이 용이한 특징을 나타내었다. 수포화 전기비저항은 유효공극률 및 건조 밀도와 매우 높은 상관성을 보이는 반면 건조 전기비저항은 이들과 특별한 상관관계를 찾을 수 없었다.

주요어: 울릉도, 코어 시료, 수포화 전기비저항, 건조 전기비저항, 밀도, 유효공극률, 상관성

Abstract: Electrical resistivity of 23 core samples from Ulleung Island at dry or saturated condition has been measured along with dry density and effective porosity, and the relations between the properties has also been discussed. Upper and lower bounds of electrical resistivity at room temperature can be provided by the dry- and saturated- resistivity, respectively. Injecting nitrogen gas to the pore space at the very end of drying process can prevent humid air from getting into the pore space, so that measurement of dry-resistivity can be less affected by humidity in the air. Dry density and porosity have very close correlation; the ratio between increase of porosity and the decrease of density showed distinct relation to the rock types, such that basaltic rocks showed higher ratio while trachytic rocks showed lower. Saturated resistivity showed close correlation to density and effective porosity of the rock sample, while dry resistivity didn't.

Keywords: Ulleung Island, core sample, saturated resistivity, dry resistivity, density, effective porosity, correlation

서 론

전기비저항은 여러 암석의 물성 중에서 한편으로는 가장 변

화가 큰 물성인 반면에 그만큼 지하 환경의 차이에 민감하게 반응하는 물성으로서 지열자원의 탐사에는 매우 유용하게 사용되는 물성 중 하나이다. 특히, 국내외에서 지열자원의 조사 및 탐사를 위해 전기비저항탐사, 시간영역 전자탐사 및 자기지전류(Magnetotelluric; MT) 탐사가 많이 활용되고 있다 (Arnason *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2009; Fiordelisi *et al.*, 1995). 국내에서는 포항(Lee *et al.*, 2007), 석모도(Lee *et al.*, 2010), 제주도(Lee *et al.*, 2009; Nam *et al.*, 2009) 등에서 지열자원 조사를 위해 MT 탐사가 수행된 적이 있으며, 2014년 6월부터 2년에 걸쳐 울릉도 지열자원 탐사 프로젝트가 시작되어, 울릉도 전역에 대한 MT 탐사와 2개의 시추공 굴착을 통한 코어 회수가 진행되고 있다(Yun *et al.*, 2015).

Received: 14 September 2015; Final version Received: 7 October 2015;

Accepted: 12 October 2015

*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 124 Gwahangno, Yuseong, Daejeon 305-350, Korea

©2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

화산섬인 울릉도의 시추코어에서 출토되는 암석의 종류는 제한적이며 이들이 향후 지열개발에 있어서 지열수를 배태하는 저류암(reservoir)으로서 역할을 수행할 것이므로 회수된 코어를 이용하여 다양한 환경에서 물성을 측정하고 물성 상호간의 관계를 파악해 두는 것은 향후 지열개발에 있어서, 그리고 지열 저류층의 해석에 있어서 도움이 될 것이다(Lee and Lee, 2008; Roberts and Lin, 1997; Longeron *et al.*, 1989).

하나의 암석코어의 전기비저항은 포화도, 공극수 등을 포함하는 그 암석의 상태와 측정시의 온도 및 습도 등 측정하는 환경에도 매우 민감하므로 암석 코어의 전기비저항을 제시할 때는 측정환경과 암석의 상태 등의 정보를 함께 제공하는 것이 바람직하다. Knight (1991)은 100% 포화상태에서 건조과정을 거쳐 완전 건조상태에 이르면 다시 물을 주입해서 100% 포화상태에 이를 때까지 완전한 한 주기의 전기비저항을 모니터링하여 전기비저항 이력곡선(resistivity hysteresis)을 제시한 바 있다. 즉, 모든 측정 조건과 포화도가 같아도 건조과정에서 측정되는 것과 포화과정에서 측정되는 전기비저항이 차이를 보이는데 이로부터 포화도는 같아도 공극내에서 수분의 분포상태에 따라 측정되는 전기비저항이 차이를 보일 수 있다는 것을 보인 바 있다.

이 연구에서는 23개의 울릉도 코어시료에 대해 공극률과 밀도, 그리고 건조상태의 전기비저항과 포화상태의 전기비저항을 측정하고 이들의 상호 상관관계를 분석하고자 하였다. 이때, 완전 건조시료의 전기비저항은 그 측정이 매우 어려운데, 그 이유는 1) 일반적으로 전기비저항이 매우 높아서 실험실내 전기비저항 계측기의 측정한계를 넘는 경우가 많아 측정이 불가능하거나 부정확하다는 것이다. 이 문제는 Lee and Lee (2014)에서 구축한 고비저항 시료에 대한 전기비저항 측정 시스템을 사용하여 해결 가능하다. 다른 이유로는 2) 전기비저항을 측정하고자 오븐에서 꺼내는 순간 건조코어의 공극으로 실험실내 공기가 유입되어 공기 중의 습도가 측정 전기비저항에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 실험실 습도의 영향 없이 건조시료의 전기비저항을 측정하는 것이 매우 중요하며, 이 연구에서는 건조한 시료가 실내 공기의 습도의 영향을 최소화할 수 있는 방안을 고안하고 이를 토대로 시료의 “건조 전기비저항(dry resistivity)”을 정의하기 위하여 몇 가지 예비실험을 먼저 수행하였다. 그리고 정의된 건조 전기비저항과 100% 수포화상태에서의 전기비저항을 측정하고 이들과 공극률 혹은 밀도의 상관관계를 고찰하였다.

실험장치 및 시험편

연구에서 사용한 전기비저항 측정장치는 건조시료의 전기비저항 모니터링 시스템(Lee and Lee, 2014)과 수포화 암석코어의 전기비저항 모니터링 시스템(Lee *et al.*, 2015)을 목적에 맞도록 약간씩 수정하여 사용하였다. 즉 건조시료의 경우, 전류

발생기(Model 6221, Keithley), 나노전위계(Model 2182A, Keithley)로 이루어지는 전기비저항측정기, 이를 제어하는 PC, 전극과 연결선, 일정하중 유지기능이 있는 전기비저항 측정 홀더와 제어 PC, 그리고 온·습도 모니터링 시스템(Model TH300, KIMO; midi LOGGER GL220, GRAPHTEC and standard sensor)등으로 구성되며 Lee and Lee (2014)이 사용한 것과 큰 틀에서 같다. 수포화 암석코어의 전기비저항 측정을 위해서는 수포화 암석코어의 수포화 상태를 오랫동안 유지하도록 하는 조치를 포함하여 수포화 전기비저항을 측정하기 편리하도록 실험장치를 다소 보완하였다. 암석코어 표면의 열전대 온도 측정은 멀티미터(Multimeter/Data Acquisition System; Model 2700, Keithley)로 측정하였고 이때 저항과 온도 측정은 하나의 프로그램으로 제어하였다(Lee *et al.*, 2015).

실험에 사용한 암석 코어는 2014년에 울릉도 지역 지열조사를 목적으로 굴착된 지열조사공(GH-3)에서 회수된 코어 중 길이 약 20 m의 간격으로 샘플링한 것으로서 각각의 채취 심도와 암종, 그리고 건조밀도(dry density) 및 유효공극률(effective porosity)은 Table 1과 같다. 23개의 암석코어에 대하여 건조밀도와 유효공극률은 한국암반공학회의 “암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법”의 부력 이용 방법에 준하여 측정하였다. 이때, 시험편의 물속질량은 수조 받침대의 높이를 위치센서로 미리 설정한 위치에서 멈출 수 있게 고안된 물속질량 측정장치

Table 1. Characteristics of Ulleung core samples used for resistivity measurements in this study.

core ID	Depth (m)	Rock type	Dry density (g/cm ³)	Effective porosity (%)
3	32.0-32.7	Basaltic pyroclastic	2.44	15.40
5	57.8-58.2	Basaltic pyroclastic	2.37	17.83
8	104.8-105.3	Basaltic pyroclastic	2.45	15.88
10	120.0-120.4	Basalt	2.69	2.53
11	138.4-138.7	Trachyte	2.51	8.17
17	215.5-216.0	Trachyte	2.51	8.50
19	246.2-246.6	Basaltic pyroclastic	2.54	9.27
21	277.4-277.8	Trachyte	2.62	3.94
22	286.8-287.2	Basaltic pyroclastic	2.65	3.42
25	329.2-329.6	Trachyte	2.38	9.71
26	349.6-350.2	Trachytic pyroclastic	2.52	7.78
27	364.4-364.8	Trachyte	2.13	16.22
30	410.2-410.6	Trachytic pyroclastic	2.52	9.52
31	426.2-426.6	Trachytic pyroclastic	2.37	13.98
33	450.8-451.4	Trachyte	2.34	11.18
34	461.2-461.8	Trachyte	2.36	9.47
36	495.0-495.5	Basaltic pyroclastic	2.70	5.07
37	511.0-511.4	Trachytic pyroclastic	2.50	9.59
38	520.4-520.7	Trachyte	2.34	9.37
39	534.2-534.6	Trachyte	2.18	13.40
40	540.0-540.7	Trachyte	2.56	6.34
41	558.6-559.0	Basaltic pyroclastic	2.64	4.85
42	569.2-569.7	Trachytic pyroclastic	2.71	2.54

(Lee et al., 2014)를 이용하여 측정하였다.

예비실험

암석코어의 수포화 전기비저항은 수포화된 시료를 물속에 보관하다가 꺼내어 전기비저항을 측정하면 실험실내 대기 중 습도의 영향은 무시하고 측정할 수 있지만 완전 건조한 암석의 경우는 상황이 다르다. 코어를 105°C의 오븐에서 건조시킨 후, 상온에서 전기비저항을 측정하고자 오븐에서 꺼내는 순간 건조코어의 공극으로 실험실내 공기가 유입되어 공기 중의 습도가 측정 전기비저항에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 실험실 습도의 영향 없이 건조시료의 전기비저항을 측정하기는 매우 어렵다. 이 연구에서는 시료의 “건조 전기비저항(dry resistivity)”을 정의하기 위하여 몇 가지 예비실험을 먼저 수행하였다.

온도 및 습도의 영향

우선 실내의 온도 및 습도가 전기비저항 측정에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 임의의 상태로 보관 중이던 코어를 어떠한 전처리 과정도 거치지 않고 그대로 코어홀더에 장착하고 실험실내 온도 및 습도의 변화와 함께 전기저항을 모니터링하였다.

Fig. 1은 울릉도의 암석코어 중에서 임의의 상태로 보관중이던 시료 #5의 저항 변화를 근접한 위치(약 10 cm 거리)에서의 온도-습도 변화와 함께 보인 것이다. 시료 #5는 Table 1에 표시된 23개의 시추코어 중에 유효공극률이 비교적 큰 암석코어로서 약 한달 전에 습식진공으로 수포화 했던 이력이 있는 후에 계속 상온환경의 실험실에 보관되어 있었다. Fig. 1에서 암석코어의 저항 변화는 온도에는 대체적으로 비례하고 습도에

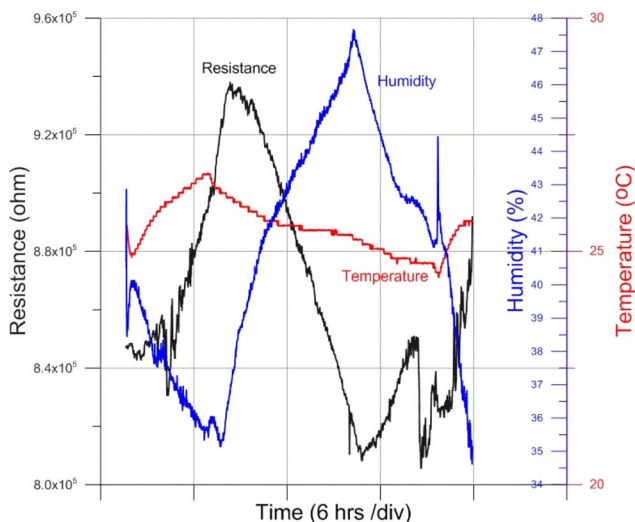


Fig. 1. Monitoring of resistance of a core sample from Ulleung Island for about 24 hours simultaneously with temperature and humidity changes.

는 반비례하는 양상을 보이며, 온도보다 습도의 변화에 더 큰 영향을 받고 있음을 볼 수 있다. 24시간 동안 실험실내 공기의 상대습도가 35 ~ 47.7% 변화하는 동안 저항은 $8.08 \times 10^5 \sim 9.38 \times 10^5$ ohm으로 16.1% 차이를 보였다. 이 경우는 실험실에 보관되던 시료를 그대로 이용하여 모니터링 하였으므로 포화도 등은 알 수 없었지만, 완전 건조 시료가 아니고 임의의 포화도를 갖는 시료의 경우에도 실험실내 공기의 습도에 매우 민감한 영향을 받는다는 사실을 보여준다. 즉, 모니터링 하는 24시간 동안의 온도-습도 뿐 아니라 암석코어의 환경이력에 따른 시추코어 내부의 수분 함량에 따라서 측정 저항에는 많은 차이가 있을 것이 분명하다.

유효공극률의 영향

특정 암석코어의 전기비저항 범위 중에 최대값을 보일 것으로 예상되는 ‘건조한 때의 전기비저항’을 정의하기 위하여 유효공극률이 다른 3종류 암석코어(#5, #37, #42)를 다음과 같은 서로 다른 세 가지 방법으로 전처리한 후 상온환경에서 전기비저항을 모니터링 하였다.

- ① **미지의 상태(d1):** 어떠한 전처리도 하지 않은 경우로 시험편이 상온 환경에 방치되어 있어서 환경이력을 확인할 수 없는 상태에서 전기비저항을 모니터링;
- ② **건조시료(d2):** 암석코어를 105°C 건조오븐에서 24시간 건조시킨 후에 상온에서 24시간 방치하였다가 전기비저항을 모니터링;
- ③ **건조 후 질소 주입(d3):** 암석코어를 105°C 건조오븐에서 22시간 40분 동안 건조시킨 다음 105°C의 진공오븐으로 옮겨서 6 torr로 80분 동안 건식진공 한 다음(따라서 총 건조시간은 d2와 동일하게 24시간), 질소가스를 주입한 후에 상온에서 24시간 방치하였다가 상온환경에서 전기비저항을 모니터링;

건조 후 전기비저항을 측정하기 전에 상온에서 24시간 동안 방치한 이유는 105°C로 가열했던 열의 영향을 암석 코어의 환경 이력에서 배제하기 위함이다. 암석코어 #5, #37, #42의 유효공극률은 각각 17.83%, 9.59%, 2.54%로 #5가 가장 크고, #42가 가장 작다(Table 1).

Fig. 2는 유효공극률이 가장 큰 코어시료 #5에 대하여 전술한 d2, d3의 전처리 후에 얻은 저항 모니터링 결과를 전처리 없이 측정된 것(d1; Fig. 1 참조)과 비교한 것이다. 건조한 시료의 경우 온도의 영향보다는 습도의 영향이 커서 습도에 따른 전기저항만을 비교했으며, d1의 경우와 마찬가지로 전기저항이 습도의 변화에 매우 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있다.

건조시료인 d2의 저항은 습도가 34.0 ~ 50.2%로 16% 포인트 높아질 때 $8.42 \times 10^6 \sim 3.39 \times 10^6$ ohm으로 148.4% 차이가 났다. d2의 경우 105°C 오븐에서 24시간 건조시킨 후 24시간을 상온에 방치하였으므로 가열되었던 암석코어는 상온환경

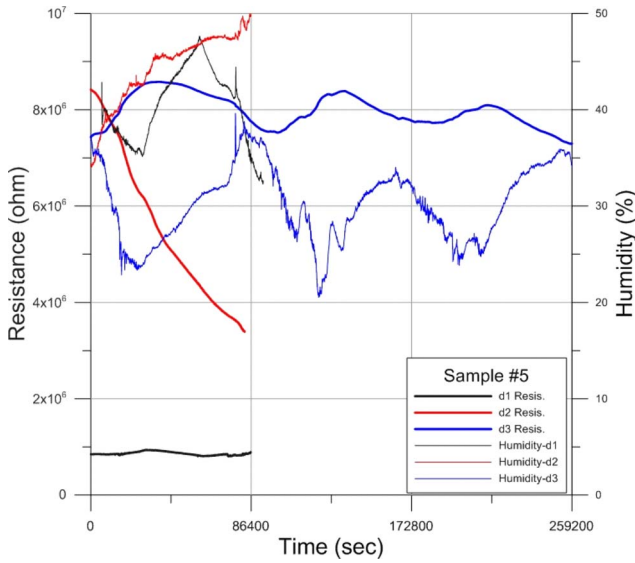


Fig. 2. Monitoring of resistance of core sample #5 simultaneously with temperature and humidity changes.

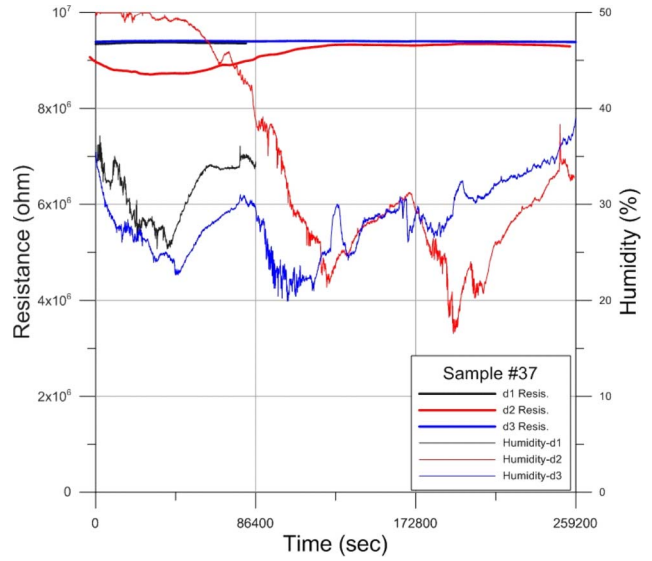


Fig. 3. Monitoring of resistance of core sample #37 simultaneously with temperature and humidity changes.

과 충분히 평형을 이루었을 것으로 생각되지만 건조되었던 암석코어는 상온에 방치된 24시간 동안 대기 중의 습기를 흡착했을 것으로 추측되며 전기저항을 모니터링 하는 동안에도 지속적으로 대기 중의 습기를 취하고 있어서 ‘습도 증가에 따른 저항 감소율’이 d1의 경우보다 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 한편, d3는 건조 과정의 말미에 질소를 주입하는 전처리를 거친 후에 72 시간 동안의 저항 변화를 보인 것인데 3일 동안 습도가 20.5 ~ 39.6%로 19.1% 변할 때 저항은 $7.29 \times 10^6 \sim 8.58 \times 10^6$ ohm 범위에서 변해 17.7%의 상대적으로 적은 차이를 보였다. d1의 경우와 비교해보면 매우 적은 차이로 d3의 경우 공극에 주입된 질소에 의해 공기 중의 습기가 공극으로 유입되는 것이 방해받는 것으로 보인다. d3의 경우는 3일간 모니터링을 수행하였는데 습도의 영향을 받아 주기성을 보이는 저항의 진폭은 수포화 이력으로 내부에 남아있는 수분의 영향이 지속되는 d1의 경우보다 크지만 2 일째, 3 일째로 갈수록 진폭이 작아지면서 저항은 서서히 작아지는 경향을 보인다.

Fig. 3은 환경 이력을 모르는 #37(유효공극률: 9.59%)에 대하여 전처리를 달리한 d1, d2, d3의 저항 모니터링 결과를 비교한 것이다. d1을 보면 상대습도가 25.3 ~ 37.2%로 변하는 동안 저항은 $9.34 \times 10^5 \sim 9.38 \times 10^5$ ohm 으로 0.45% 밖에 차이가 나지 않는다. 건조과정을 거친 d2는 3일 동안 습도가 16.5 ~ 51.3%로 변할 때 저항은 $8.71 \times 10^6 \sim 9.35 \times 10^6$ ohm 으로 변한다. d3의 경우 72시간 동안의 저항 변화는 습도가 19.9 ~ 39.0%로 변할 때 저항은 $9.38 \times 10^6 \sim 9.41 \times 10^6$ ohm 범위에서 0.3% 변한다. 앞의 코어 #5와 비교할 때, 세 가지 경우 모두 습도의 변화에 전기저항의 변화가 상대적으로 둔감하게 반응함을 알 수 있는데 이는 유효공극률이 작기 때문으로 판단된다. 건조시료인 d2의 경우가 가장 큰 변화를 보이고, 질

소를 주입한 d3의 경우는 3일간 습도가 20% 포인트 이상 변화했음에도 불구하고 전기저항의 변화가 0.3%로 매우 미미한 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 유효공극률이 가장 작은 #42(유효공극률: 2.54%)에 대하여 d1, d2, d3의 저항 모니터링 결과를 비교한 것이다. d1은 이틀 동안 상대습도가 26.9 ~ 49.0% 변하는 동안 저항은 $8.06 \times 10^6 \sim 9.02 \times 10^6$ ohm으로 11.9% 차이가 났다. d2는 72 시간 동안 습도가 17.6 ~ 45.4%로 변할 때 저항은 $9.33 \times 10^6 \sim 9.40 \times 10^6$ ohm으로 0.8% 변하고 d3는 72시간 동안 습도가 27.1 ~ 65.3%로 변할 때 저항은 $9.15 \times 10^6 \sim 9.43 \times 10^6$ ohm

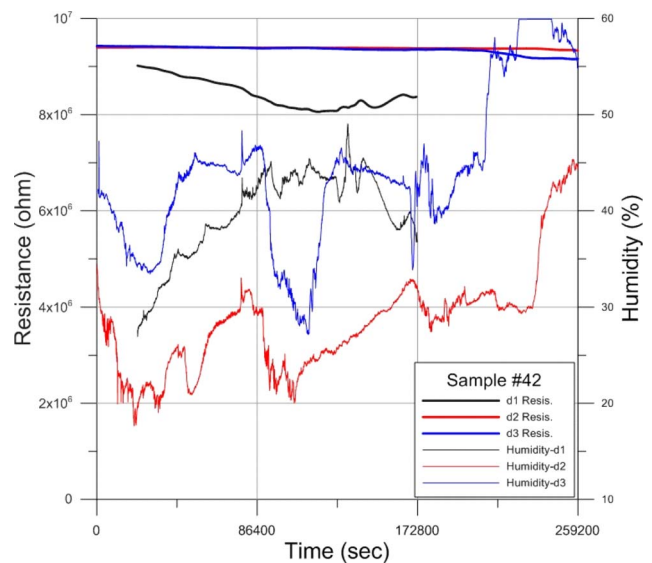
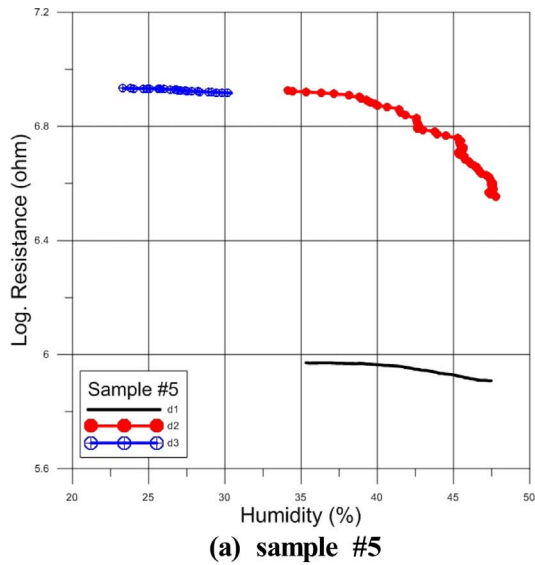
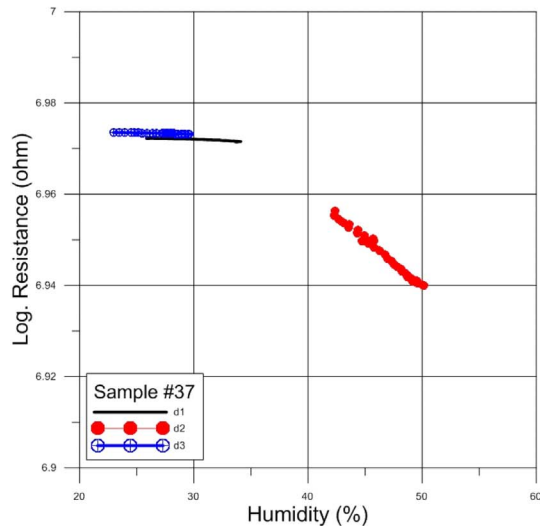


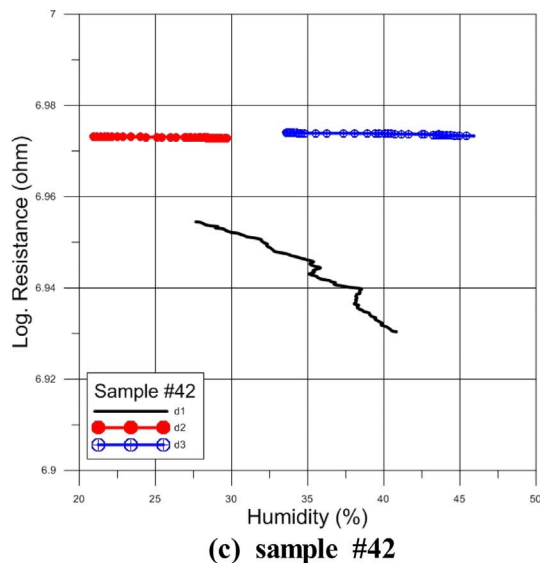
Fig. 4. Monitoring of resistance of core sample #42 simultaneously with temperature and humidity changes.



(a) sample #5



(b) sample #37



(c) sample #42

Fig. 5. Humidity dependency of measured resistance with respect to three different dry-history for the three different core samples.

범위에서 3.1% 차이를 보였다.

건조 전기비저항의 정의

이상의 결과를 종합해보면, 상온 상태 있었던 d1은 외견 상 암석코어가 건조한 상태처럼 보이지만 코어가 겪은 환경 이력 (포화도 포함)이나 저항 측정 당시의 습도 변화에 따라서 저항 변화가 매우 크므로 ‘건조한 때의 전기비저항’으로 채택할 수 없다. 건조과정만 거친 d2는 특히 40% 이상의 높은 습도에서 저항이 민감하게 저하되는 경향이 있는 반면 건조 후 질소를 주입한 d3의 경우에는 유효공극률이 큰(17.83%) #5가 습도 변화에 민감하여 저항을 측정한 72시간 동안에 최대 17.7% 차이가 나지만 유효공극률이 작은 #37, #42는 큰 차이를 보이지 않는다.

암석코어 주변의 상대습도가 변화하면 특정한 시간이 지연되어 암석코어의 저항에 영향을 미치게 된다. 예를 들어 코어 #5의 d1의 경우 약 35분(2,100 sec)만큼 지연되어 습도의 영향이 전기저항에 반영되어 나타난다. 이 지연시간만큼 평행 이동한 후에 시간을 소거함으로써 상대습도와 전기저항의 관계를 도출하여 Fig. 5에 보였다. 이때, 측정 첫째 날의 습도가 높아지는 구간의 자료만을 이용하였다. 암석코어 #5, #37, #42에 대하여 앞서 설명한 3 가지 서로 다른 전처리 후 측정된 자료 중에 습도의 범위가 동일한 구간이 별로 없어서 단정적으로 주장할 수는 없으나 대체로 건조 후 질소를 주입한 경우(d3)의 저항이 d1, d2보다 높으며, 습도의 영향을 가장 적게 받는 경향이 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 건조과정 말미에 주입한 질소가 코어시료의 공극을 채우고 있어서 대기 중의 습기가 공극으로 침투하는 것을 방해하기 때문으로 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 암석코어를 105°C 건조오븐에서 22시간 40분 동안 건조시킨 다음 105°C의 진공오븐으로 옮겨서 6 torr로 80분 동안 건식 진공한 직후에 질소가스를 주입하는 과정을 거친 후, 전기비저항을 측정하고 이를 ‘건조한 때의 전기비저항’으로 정의하였다.

전기비저항의 범위

개별 암석코어의 전기비저항 범위를 제시할 목적으로 최저 전기비저항은 수포화 암석코어를 이용하여, 최고 전기비저항은 건조 암석코어를 이용하여 상온 환경에서 측정하였다.

수포화 전기비저항

암석코어의 수포화 전기비저항은 Lee *et al.* (2015)의 방식대로 암석코어의 수포화 상태를 오랫동안 유지할 수 있도록 한 상태에서 측정하였다. 암석코어를 수포화시키기 위해서는 우선 공내수의 평균적인 전기전도도인 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (참조 온도: 20°C)의 소금물에 24시간 암석코어를 담가 두었다가 2 torr 진공력으로 120분 동안 습식진공으로 수포화시킨다. 이후에 72

시간 동안 동일한 전기전도도의 물에 보관한 후, 하나씩 꺼내어 원주 둘레에 열수축튜브를 씌운다. 그리고 열수축튜브를 씌우는 동안 훼손된 수포화 상태를 만회하기 위해서 다시 2 torr 진공력으로 120분간 습식진공으로 수포화시킨 후에 다시 동일한 물속에 24시간 보관하였다가 순차적으로 꺼내어 전기비저항을 측정하였다. 암석코어의 전기저항을 측정할 때는 금속망 전극에 덧댄 종이필터에 주사기를 이용하여 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 물을 충분히 적신 다음 100 kg의 수평 하중을 가한 상태로 상온 환경에서 10분 동안 측정하고 수평하중과 측정 저항이 모두 안정된 후반 2.5분의 자료를 평균하여 사용하였다.

건조 전기비저항

건조 전기비저항을 측정하기 위해서 앞의 예비실험의 d3와 같이 질소를 주입한 건조시료를 준비하는 것이 필요하다. 우선, 울릉도의 시추코어에서 채취한 23개의 암석코어를 유효공극률이 큰 순서에 따라서 정리하고 두 개의 그룹으로 나눈 후, 각각의 그룹에 대하여 105°C 건조오븐에서 22시간 40분 건조한 다음 105°C 진공오븐으로 옮겨서 1시간 20분 더 건조한 후에 질소가스를 주입하였다. 이를 상온에서 방치하다가 15시간 30분이 경과한 다음 날 아침부터 유효공극률이 큰 순서로 전

기저항을 측정하였다. 전기저항을 측정할 때는 매우 신속한 행동으로 첫 번째 저항 측정 암석코어와 마지막 측정 암석코어의 상대습도 차이를 줄이려고 노력하였으며 상온 환경에서 100 kg의 수평 하중을 가한 상태로 10분 동안 측정하고 수평 하중과 측정 저항이 모두 안정된 후반 2.5분의 자료를 평균하여 암석코어 별 건조 전기비저항을 산출하였다.

이렇게 얻은 울릉도 암석코어의 수포화 전기비저항과 건조 전기비저항, 그리고 “건조 전기비저항/수포화 전기비저항의 비”를 정리하여 Table 2에 나타내었다. Table 2의 막대그래프는 수포화 전기비저항을 최소값으로 건조 전기비저항을 최대값으로 간주하여 그린 것이다.

수포화 전기비저항은 32.8(#5 현무암질 화산쇄설암) ~ 596.4(#42, 조면암질 화산쇄설암) ohm-m의 범위에 분포하며 평균은 216.8 ohm-m으로 측정되었다. 암종 별로는 현무암질 화산쇄설암이 평균 173.7 ohm-m, 조면암이 평균 214.8 ohm-m, 조면암질 화산쇄설암이 222.5 ohm-m, 그리고 현무암이 508.8로 나타났으나 암종 별로 큰 차이가 있는 것으로 보이지는 않는다. 건조 전기비저항은 19,206.0(#8, 현무암질 화산쇄설암) ~ 98,102.3(조면암) ohm-m(평균 68,954.0 ohm-m)의 범위에 있으며, 현무암질 화산쇄설암이 다른 암종에 비해 다소

Table 2. Dry and saturated resistivity and their ratio of the Ulleung core samples.

core ID	Depth (m)	Rock type	Electric resistivity			Bar chart
			Saturated resistivity (ohm-m)	Dry resistivity (ohm-m)	Dry/Saturated resistivity ratio	
3	32.0-32.7	Basaltic pyroclastic	53.8	30,553.3	568	
5	57.8-58.2	Basaltic pyroclastic	32.8	79,975.9	2,437	
8	104.8-105.3	Basaltic pyroclastic	55.2	19,206.0	348	
10	120.0-120.4	Basalt	508.8	51,880.6	102	
11	138.4-138.7	Trachyte	150.6	64,376.9	428	
17	215.5-216.0	Trachyte	192.0	83,805.4	437	
19	246.2-246.6	Basaltic pyroclastic	94.4	73,545.0	779	
21	277.4-277.8	Trachyte	515.1	80,207.7	156	
22	286.8-287.2	Basaltic pyroclastic	370.5	49,468.9	134	
25	329.2-329.6	Trachyte	194.9	98,102.3	503	
26	349.6-350.2	Trachytic pyroclastic	155.3	71,852.7	463	
27	364.4-364.8	Trachyte	75.4	67,454.0	894	
30	410.2-410.6	Trachytic pyroclastic	154.9	73,933.6	477	
31	426.2-426.6	Trachytic pyroclastic	61.9	71,040.7	1,149	
33	450.8-451.4	Trachyte	187.8	92,094.5	490	
34	461.2-461.8	Trachyte	150.9	81,380.5	539	
36	495.0-495.5	Basaltic pyroclastic	357.0	19,329.3	54	
37	511.0-511.4	Trachytic pyroclastic	144.0	83,116.4	577	
38	520.4-520.7	Trachyte	195.9	78,544.2	401	
39	534.2-534.6	Trachyte	122.6	64,273.6	524	
40	540.0-540.7	Trachyte	362.9	96,240.2	265	
41	558.6-559.0	Basaltic pyroclastic	252.4	73,969.9	293	
42	569.2-569.7	Trachytic pyroclastic	596.4	81,592.2	137	

낮은 경향이 있다. 암석코어 별 전기비저항의 범위는 현무암질 화산쇄설암인 #36이 357.0 ~ 19,329.3 ohm-m(건조/수포화 전기비저항 비: 54)으로 가장 좁고, 역시 현무암질 화산쇄설암인 #5가 32.8 ~ 79,975.9 ohm-m(건조/수포화 전기비저항 비: 2,437)로 가장 넓다. 따라서 울릉도에서 산출된 개별 암석코어의 전기비저항 범위의 차이는 조암광물의 함량의 차이보다는 물리적 구조의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

전기비저항과 물성 간의 상관성

이상에서 측정된 23개 암석코어의 건조밀도, 유효공극률, 건조 전기비저항, 수포화 전기비저항, 그리고 건조/수포화 전기비저항의 비의 각각의 상관관계로부터 암종별 특성을 살펴보고자 한다.

우선 울릉도 시추코어에서 채취한 암석 시험편의 건조밀도와 유효공극률의 상관관계를 Fig. 6에 보였다. 건조밀도와 유효공극률은 꽤 밀접한 상관성을 보이는데, 대체로 건조밀도가 클수록 유효공극률이 작아지는 반비례 관계를 보인다. 건조밀도가 크면 유효공극률의 대소 편차가 작아지고 건조밀도가 작으면 유효공극률의 편차가 커지는 경향이 있다. 또한, 건조밀도 감소에 대한 유효공극률 증가율이 암종에 따라서 현저한 차이를 보이며, 현무암질 화산쇄설암이 가장 크고 조면암질 화산쇄설암, 조면암의 순으로 작아진다. 따라서 울릉도 암석코어는 건조밀도와 유효공극률의 상관성만으로도 암종이 비교적 잘 구분되는 특징을 갖는다.

Fig. 7은 암석코어의 건조 전기비저항과 수포화 전기비저항

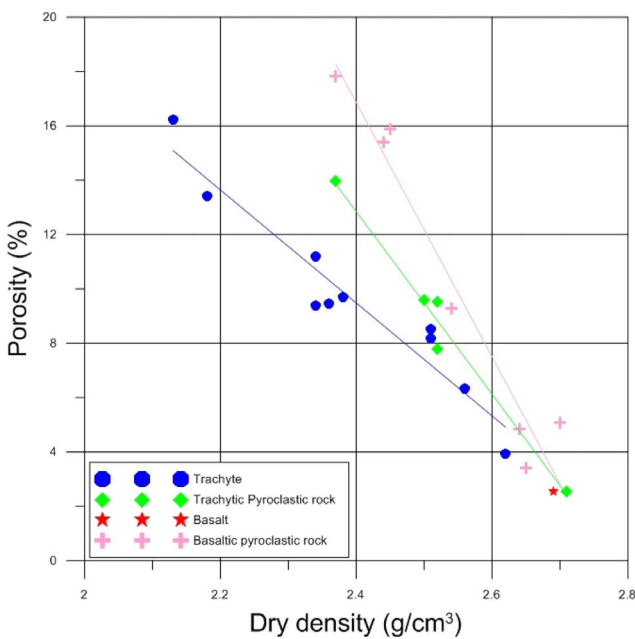


Fig. 6. Dry density versus porosity for the 23 core samples from Ulleung Island.

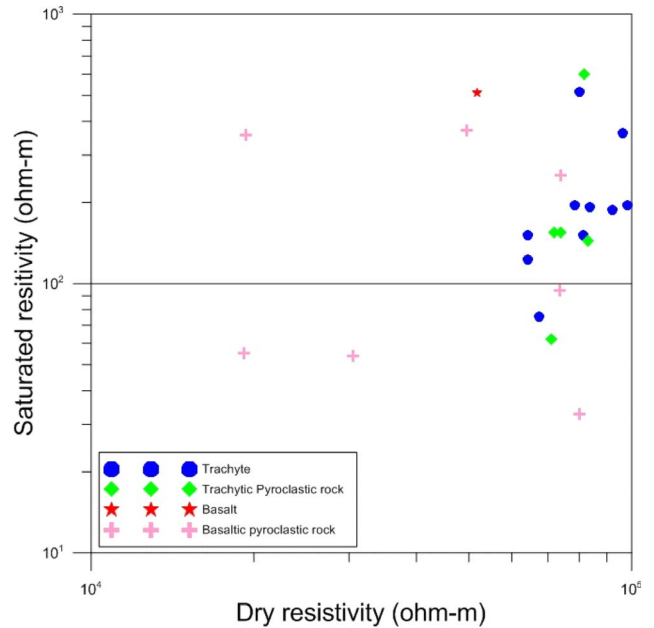


Fig. 7. Relation of resistivities between dry and saturated samples.

관계를 보인 것인데, 둘 사이의 특별한 상관성을 추출하기는 어렵지만 조면암 계열의 암석(조면암과 조면암질 화산쇄설암)과 현무암 계열의 암석(현무암과 현무암질 화산쇄설암)과는 매우 다른 특성을 나타낸다. 즉, 현무암 계열의 암석은 건조 전기비저항이 $10^4 \sim 10^5$ ohm-m 사이에서 상대적으로 다양하게 측정되는 반면, 조면암 계열의 암석은 현무암 계열에 비해 건조 전기비저항이 상대적으로 크고 매우 좁은 범위에 분포한다. 건조한 상태에서 측정한 전기비저항이 암석의 석기(matrix), 즉 조성 광물의 영향을 많이 받는 것을 감안하면 조면암 계열의 암석코어들은 광물 조성이 서로 유사하다고 볼 수 있겠다.

Fig. 8의 유효공극률과 전기비저항의 상관관계를 보면, 암종에 관계없이 유효공극률이 클수록 수포화 전기비저항은 대상의 분포를 보이면서 감소하는 반면(a), 건조 전기비저항은 조면암과 조면암질 화산쇄설암에서 유효공극률의 크기에 상관없이 일정하고, 현무암질 화산쇄설암의 건조 전기비저항은 유효공극률과 상관성이 희박하다(b). 건조 전기비저항과 조면암 계열 암석의 건조 전기비저항을 좀 더 면밀히 살펴보면 유효공극률이 클수록 건조 전기비저항이 미약하나마 작아진다고 해석할 수 있는 여지가 있는데, 절연체로 작용하는 공극이 많아질수록(즉, 유효공극률이 커질수록) 건조 전기비저항은 다소나마 커져야함에도 불구하고 같거나 작아지는 느낌이 있는 것은 전기비저항을 측정할 당시에 이미 실내 공기 중의 습기를 상당부분 흡착한 영향으로 해석된다. 이와 같은 결과는 105°C에서 건조한 말미에 질소가스를 주입한 후 전기비저항을 측정할 때까지 실내에 방치한 시간(15시간 30분 이상)이 다소 길었다는 점을 반증하는 것으로 보인다. 따라서 향후 건조 전기비저항을 보다 더 정확히 측정하기 위해서는 질소가스를 주입한

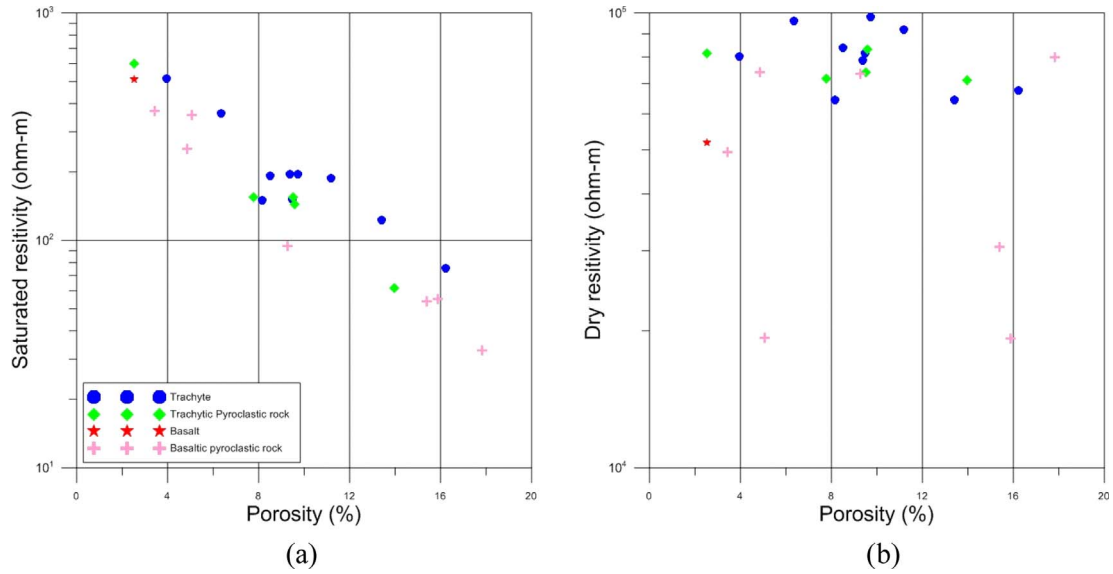


Fig. 8. Porosity dependence of (a) saturated resistivity and (b) dry resistivity.

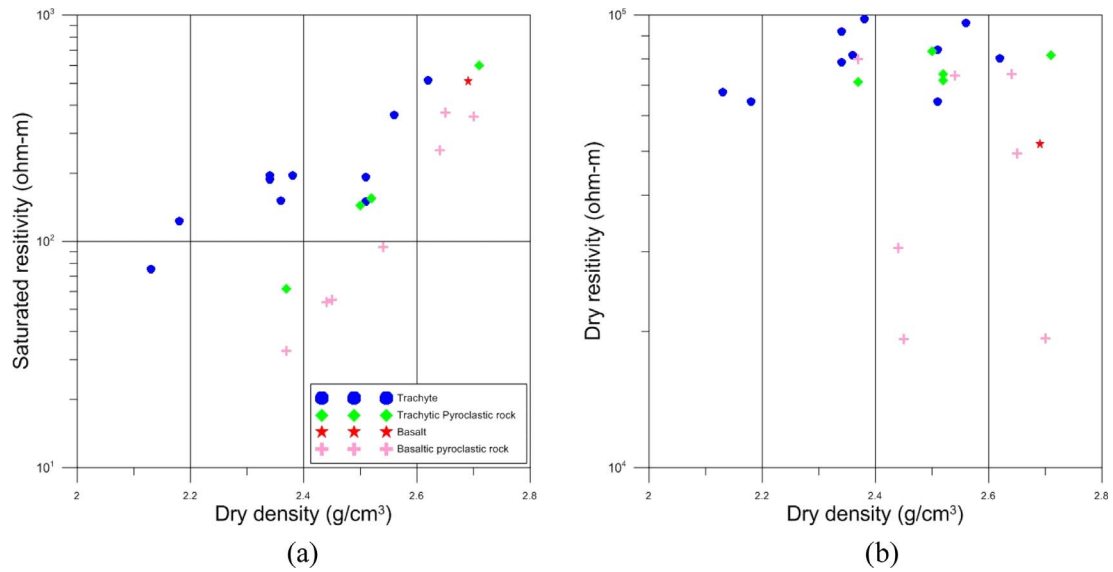


Fig. 9. Dry density dependence of (a) saturated resistivity and (b) dry resistivity.

암석코어가 상온으로 떨어지는 즉시 전기비저항을 측정할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 9는 건조밀도와 수포화 전기비저항(a) 및 건조 전기비저항(b)의 상관성을 보인 것으로, Fig. 6에 보인 바와 같이 유효공극률과 건조밀도 간의 상관성이 매우 양호하여 Fig. 8의 유효공극률과 전기비저항 간의 상관성에서 보인 특징과 유사하지만 건조밀도와 수포화 전기비저항 간의 상관성에서는 조면암, 조면암질 화산쇄설암, 현무암질 화산쇄설암 등 암종 별로 기울기 다른 특징적인 상관성을 보이고 있어서 암종 구분이 용이한 이점이 있다. 밀도와 건조 전기비저항은 특별한 상관성을 찾아보기 어렵다.

Fig. 10은 최대(건조)최소(수포화) 전기비저항 비와 건조밀

도 및 유효공극률 간 상관성을 보인 것인데, 건조 전기비저항과 건조밀도 혹은 유효공극률의 상관성이 거의 없는 관계로 수포화 전기비저항과 건조밀도 또는 유효공극률과의 상관성 분석 보다 나은 장점을 얻을 수는 없었다. 다만, 암석코어의 최대 전기비저항과 최소 전기비저항의 비가 대체적으로 건조밀도에 반비례, 공극률에 비례하는 양상은 확인할 수 있다.

결론

울릉도 지열조사 시추공에서 채취한 암석코어 중 약 20 m 간격으로 수집한 23개의 코어시료에 대하여 수포화 전기비저항과 건조 전기비저항, 건조밀도와 유효공극률을 측정하고 암

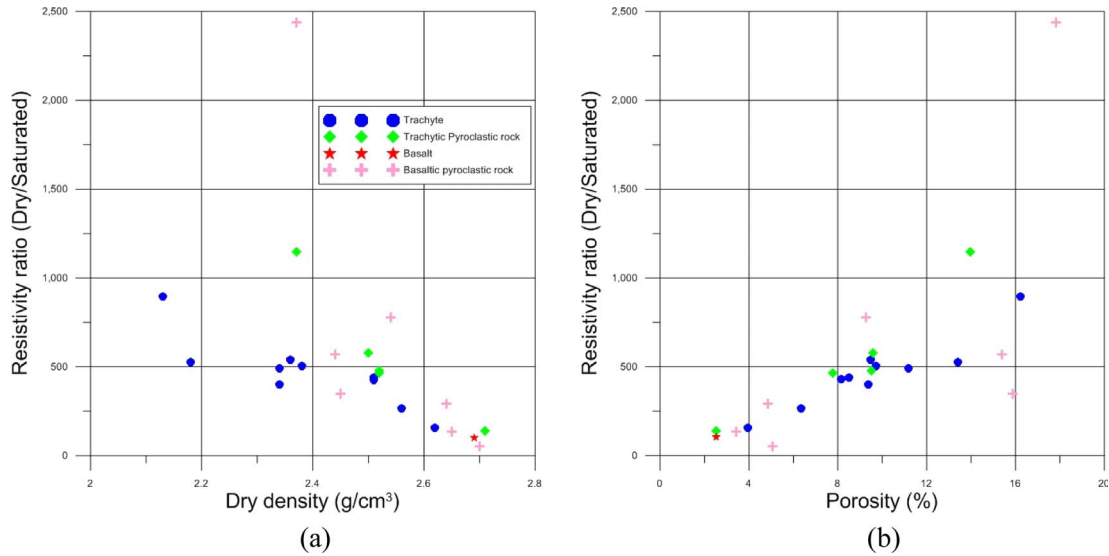


Fig. 10. Resistivity ratio between dry and saturated samples as a function of dry density (a) and porosity (b).

석코어 별 전기비저항 범위를 제시하였으며 물성 간 상관성을 분석하였다.

상온환경에서 측정하는 암석코어의 건조 전기비저항은 실내 온도 뿐 아니라 상대습도의 영향도 강하게 받기 때문에 일관성 있게 제시하기가 쉽지 않은 물성 중의 하나이다. 이 연구에서는 암석코어의 건조과정 말미에 질소가스를 주입함으로써 습기의 공극내 유입 및 흡착을 지연시켜 건조 전기비저항을 측정할 수 있는 전처리 방법을 고안하였다. 즉, 암석코어의 건조질량을 얻을 수 있을 때까지 105°C 건조오븐에서 충분히 건조하다가 같은 온도의 진공오븐으로 옮겨서 건식진공 한 후 24 시간이 경과하는 순간에 질소가스를 주입함으로써 상온·상습의 실험실 환경에서도 습기의 흡착을 지연시킬 수 있고, 이 상태에서 전기비저항을 측정함으로써 건조 암석코어의 전기비저항을 일관성 있게 제시할 수 있었다.

측정된 물성 상호간의 상관성을 분석한 결과, 울릉도 암석코어의 건조밀도는 유효공극률과 매우 높은 상관성을 보였는데, 특히 ‘건조밀도 감소에 대한 유효공극률 증가율’이 암중에 따라서 큰 차이를 보여서 현무암질 화산쇄설암이 가장 크고 조면암질 화산쇄설암, 조면암의 순으로 작아진다. 따라서 울릉도 암석코어는 건조밀도와 유효공극률의 상관성 분석만으로도 암종 구별이 용이한 특징을 나타내었다. 건조밀도와 수포화 전기비저항 간의 상관성도 암중에 따른 민감도가 커서 조면암, 조면암질 화산쇄설암, 현무암질 화산쇄설암에서의 기울기가 다른 특징적인 상관성을 나타내었다. 울릉도 암석코어의 수포화 전기비저항은 유효공극률 및 건조 밀도와 매우 높은 상관성을 보이는 반면 건조 전기비저항은 이들과 특별한 상관관계를 찾을 수 없었다.

암석코어 별 전기비저항의 범위는 현무암질 화산쇄설암인 #36이 357.0 ~ 19,329.3 ohm-m(건조/수포화 전기비저항 비:

54)으로 가장 좁고, 역시 현무암질 화산쇄설암인 #5가 32.8 ~ 79,975.9 ohm-m(건조/수포화 전기비저항 비: 2437)로 가장 넓다. 따라서 개별 암석코어의 전기비저항 범위의 변화는 암종 혹은 조암광물의 함량 변화에 기인하기보다 개별 암석코어의 물리적 구조에 기인하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 한국에너지기술평가원 산업기술혁신사업(과제번호: 20143030110950)의 지원을 받아 수행되었다.

References

Arnason, K., Karlsdottir, R., Eysteinnsson, H., Flovenz, O. G., and Gudlaugsson, S. T., 2008, The resistivity structure of high-temperature geothermal systems in Iceland, *Short Course III on Exploration for Geothermal Resources at Lake Naivasha, Kenya, Oct.24-Nov.17, 2008*.

Fiordelisi, A., Mackie, R., Madden, T., Manzella, A., and Rieven, S., 1995, Application of magnetotelluric method using a remote-remote-reference system for characterising deep geothermal system, *Proc. of World Geothermal Congress 2*, 893-898.

Knight, R., 1991, Hysteresis in the electrical resistivity of partially saturated sandstones, *Geophysics*, **56**, 2139-2147.

Lee, T. J., Song, Y., and Uchida, T., 2007, Three-dimensional magnetotelluric surveys for geothermal development in Pohang, Korea, *Exploration Geophysics*, **38**, 89-97.

Lee, S. K., and Lee, T. J., 2008, “Electrical resistivity versus water contents of core samples from a geothermal borehole in Pohang, Korea,” *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **45**, 526-535.

- Lee, T. J., Nam, M. J., Lee, S. K., Song, Y., and Uchida, T., 2009, The Jeju dataset: three-dimensional interpretation of MT data from mid-mountain area of Jeju Island, Korea, *Journal of Applied Geophysics*, **68**, 171-181.
- Lee, T. J., Han, N., and Song, Y., 2010, Magnetotelluric survey applied to geothermal exploration: An example at Seokmo Island, Korea, *Exploration Geophysics*, **41**, 61-68.
- Lee, T. J., and Lee, S. K., 2014, "Characteristics of electrical resistivity of dry sandstone with respect to temperature and humidity," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, **51**, 30-40.
- Lee, S. K., Lee, T. J., and Park, S. G., 2014, Apparatus for measuring submerged mass and method for measuring submerged mass using thereof, Rep. of Korea patent 10-1382251.
- Lee, S. K., Lee, T. J., and Yi, M.-J., 2015, Resistivity monitoring of saturated rock cores at room temperature, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **18**, 1-10.
- Longeron, D. G., Argaud, M. J., and Feraud, J. P., 1989, Effect of overburden pressure and the nature of microscopic distribution of fluids on electrical properties of rock samples, *SPE Form. Eval.*, **4**, 194-202.
- Nam, M. J., Kim, H. J., Song, Y., Lee, T. J., and Suh, J. H., 2009, Three-dimensional topographic and bathymetric effects on magnetotelluric responses in Jeju Island, Korea, *Geophysical Journal International*, **176**, 457-466.
- Roberts, J. J., and Lin, W., 1997, Electrical properties of partially saturated Topopah Spring Tuff: Water distribution as a function of saturation, *Water Resources Research*, **33**, 577-587.
- Yun, K.-H., Shim, J.-T., Jung, E.-J., Lee, T. J., Jeong, H.-S., and Kim, K.-H., 2015, Assessment of deep geothermal resources for geothermal power generation in Ulleung Island, *Proceeding, spring meeting of Korean Society for New and Renewable Energy*, 109.