

전도성이 다른 공극수로 순차 치환한 시멘트 시험편의 전기비저항

이상규¹ · 이태종^{1*}

¹한국지질자원연구원

Electrical Resistivity of Cylindrical Cement Core with Successive Substitution by Electrolyte of Different Conductivity

Sang-Kyu Lee¹ and Tae Jong Lee^{1*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

요약: 암석 시료의 전기비저항과 공극수의 전기비저항의 관계를 고찰하기 위한 실험에 있어서 일반적으로 코어의 유효공극 내의 공극수를 포화시키고자 하는 전해질 용액이 완전히 치환하였다고 가정한다. 이 연구에서는 용액의 전기전도도가 8, 160, 3200, 64000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 인 4종류의 소금물을 동일한 시멘트 시험편에 각각 4회씩 포화과정을 반복하며 함수율의 변화에 따른 전기비저항을 측정하고, 그 변화로부터 포화과정의 반복에 의해 공극수가 치환되는 정도에 대한 고찰하였다. 용액의 전기전도도를 높여가며 각각 4회씩 반복하고 다시 낮춰가면서 4회씩 포화과정을 반복하였다. 반복 횟수가 많아질수록 용액이 공극수를 더 많이 치환할 것이다. 따라서 용액의 전기전도도를 높여가며 측정한 전기비저항과 낮춰가며 측정한 전기비저항의 기하평균을 용액이 공극수를 완전히 치환하였을 때의 전기비저항으로 간주하고 비교의 기준으로 삼았다. 포화과정을 4회 반복함으로써 공극수가 치환하고자 하는 용액으로 치환되어 이전 공극수의 전기전도도와는 상관없이 암석의 전기비저항을 10% 이내의 편차로 측정할 수 있었다. 반면, 전기전도도가 낮은 용액으로부터 높은 용액으로 순차적으로 포화과정을 1회만 수행했을 경우에는 측정되는 암석의 전기비저항에 있어서 최대 40%의 오차를 보였다. 측정된 시료의 전기비저항과 공극수의 전기비저항의 관계는 변형된 병렬저항모델로 대체적으로 설명되어지나, 이를 일반화하기 위해서는 다양한 공극율을 가지는 암석 시료에 대해 다양한 공극수의 전기비저항에 대한 자료의 축적이 필요하다.

주요어: 전기비저항, 시멘트 시험편, 공극수, 전해질 용액, 치환

Abstract: To investigate the relation between pore fluid conductivity and bulk resistivity of a rock sample, it is assumed that electrolyte solution perfectly substitute the pore fluid that occupied the pore space within the sample in general. In this study, it is investigated that how much can the electrolyte solution substitute the pore fluid by repeating the same saturation process. Four kinds of NaCl solutions of 8, 160, 3200, 64000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ are used. The saturation process has repeated four times for each electrolyte in increasing conductivity order first then four times each in decreasing order. The more the saturation process repeated with the same electrolyte, the more electrolyte solution substitute the pore fluid. Geometric mean of bulk resistivity in increasing and decreasing orders with the same electrolyte solution is assumed to be mostly close to the bulk resistivity with perfect substitution. Bulk resistivity measurements for both increasing and decreasing order differs within 10 % to the geometric mean when repeating the saturation process 4 times, while maximum 40 % difference is observed when single saturation process for each electrolyte solution with increasing order. The modified parallel resistant model can generally represent the relations between pore fluid resistivity and bulk resistivity in the experiment, but more experimental data with various rock samples with different porosity is needed to generalize the model.

Key words: Resistivity, Cement core, Water content, Electrolyte solution, Substitution

서론

지반을 구성하는 암석의 전기비저항은 공극율, 유체 포화도, 공극수의 전기비저항, 입도 조성, 조암광물의 전도성, 온도 및

2009년 10월 10일 접수; 2009년 11월 23일 채택

*Corresponding author

E-mail: megi@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 92 Gwahang-no Yuseong-gu,

Daejeon, 305-350, Korea

압력 조건 등 다양한 요소에 의해 좌우된다(Parkhomenko, 1967; Archie, 1942; Keller and Frischknecht, 1966). 전기비저항을 좌우하는 다양한 요소 중 동일한 암석을 동일한 온도 및 압력 조건하에서 실험실에서 측정하게 되는 경우는 공극을 채우고 있는 공극수의 전기비저항과 포화도가 가장 큰 영향을 미치게 된다(Chiba and Kumata, 1994; Katsube, 1965; Park and Matsui, 1998).

공극수의 전기비저항과 포화도에 따른 암석의 전기비저항의

관계식은 지금까지 많은 연구자들에 의해 제안되었으나 가장 대표적인 관계식으로는 Archie의 식(Archie, 1942)과 병렬저항 모델(parallel resistance model (PRM); Patnode and Wyllie (1950))로 대변할 수 있다. Archie의 식은 공극수의 전기전도도와 포화율이 포함되어 있으나 암석의 석기(matrix)가 부도체라 가정하고 있어서 공극수의 전기비저항이 높거나 전도성이 높은 광물을 포함하는 암석의 경우에 적용이 어렵다. 반면, 병렬저항모델은 Archie의 식에서 이러한 단점을 보완하여 석기의 전기비저항을 포함하도록 하였으나 포화도가 100% 일 경우에만 적용할 수 있는 단점이 있다. 이러한 대표적인 두 관계식의 단점을 보완하고자 이상규와 이태중(2009)은 실험실 내에서 시멘트 시료를 이용하여 공극수의 전기전도도와 함수율의 변화에 따른 암석의 전기비저항의 변화를 관측하고 이로부터 병렬저항 모델에 포화도를 추가한 변형된 병렬저항 모델(modified PRM)을 제안한 바 있다.

이때, 동일한 시험편에 서로 다른 전기전도도를 갖는 용액으로 순차적으로 포화시킬 필요가 있는데, 이를 위하여 일반적으로 전기전도도가 낮은 용액으로부터 높은 용액으로 순차적으로 포화시킨 후 전기비저항을 측정한다(Worthington and Barker, 1972; 박삼규, 2004). 반면, Taylor and Barker (2002)의 경우는 전기전도도의 고저에 상관없이 수침진공을 통하여 약 1시간 동안 포화시킨 후, 대기압 상태에서 약 1주일동안 포화시킨 용액에 담가둠으로써 공극내의 공극수가 치환되었다고 가정하기도 하였다. Worthington and Barker (1972)는 다음과 같은 과정을 거쳐 공극수의 전기비저항을 높여가며 전기비저항을 측정하는 바 있다.

- 1) 100 ppm의 소금물에서 수침진공하고 동일한 용액에 약 1주일간 담가둔다.
- 2) 100 ppm으로 포화된 시료를 우선 60~100 °C의 오븐에서 건조한다.
- 3) 200 ppm의 소금물에서 약 30분 동안 수침진공한다. 이렇게 함으로써 시료는 200 ppm의 용액 속에 담겨져 있지만 실질적으로 코어 내부는 300 ppm으로 포화된다.
- 4) 이온이 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 분산(diffusion) 되는 것을 방지하기 위하여 다시 300 ppm의 소금물에서 약 3시간 동안 수침진공한다.
- 5) 이후 약 1주일 동안 300 ppm의 소금물에 담가둔다

이 방법은 Taylor and Barker (2002)의 방법보다는 실제 공극을 점유하게 되는 공극수의 전기비저항이 포화시키고자 하

는 용액의 전기비저항에 더 가까울 수 있으나 어느 방법도 실제 공극을 점유하고 있는 공극수의 전기비저항이 포화시킨 용액의 전기비저항과 동일하다는 검증이 이루어지지 못했다.

이상규와 이태중(2009)은 수포화 공정의 규격화를 통하여 포화도의 반복성을 확보한 상태에서 포화시킬 용액의 전기전도도를 20배씩 높여가며 전기비저항의 변화를 측정하고 이로부터 공극수의 전기비저항과 암석의 전기비저항의 관계를 고찰하였다. 그러나 이때, 수포화 여부 이외에 시험편의 유효공극 속에 남아 있던 낮은 전기전도도의 공극수가 높은 전기전도도의 용액으로 완전히 치환되었는지에 대한 확신은 가질 수 없다.

따라서 본 연구에서는 전기전도도가 동일한 용액을 이용하여 수침진공을 반복하면서 시험편의 상대함수율의 변화와 전기비저항의 변화를 동시에 측정·분석함으로써 암석의 유효공극내 공극수의 치환 여부에 대해 고찰하였으며, 이로부터 공극수의 전기전도도가 다를 때 동일한 시험편의 함수율에 따른 전기비저항 변화 특성을 고찰하였다.

시험편과 실험 장치

실험에 사용한 시멘트시험편은 같은 무게의 시멘트와 물을 섞어서 만든 몰타르를 아크릴 틀에 부은 후, 20일 이상 충분히 양생하여 얻은 직경 25.76 mm, 길이 50.31 mm의 원주형으로서 그 기초물성(이상규와 이태중, 2008; 2009)은 Table 1과 같다. 이때, 양생시간이 충분하여 고결정도는 시험편의 전기비저항을 좌우하는 요인에서 배제할 수 있다고 가정하였다.

공정을 규격화하면 시멘트시험편의 표면건조수포화(saturat-

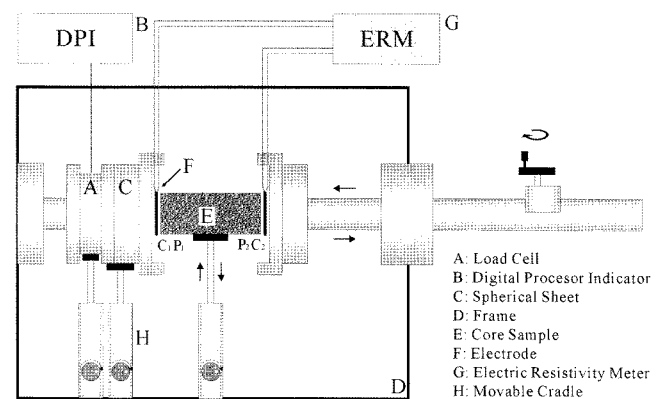


Fig. 1. Schematic diagram of resistivity measurement system for cement core (Lee and Lee, 2009).

Table 1. Basic physical properties of cement core sample.

Core ID	Rock Type	Basic Physical Properties			Dimension	
		Saturated Water Content (%)	Porosity (%)	Dry Density (g/cm ³)	Radius (mm)	Height (mm)
I	Cement Mortar	32.04	45.92	1.43	12.88	50.31

ed-surface-dry)무게의 상대오차를 현격히 줄일 수 있고, 시험편을 항온·항습챔버 내에서 건조하면 건조과정을 정밀하게 재현할 수 있다(이상규와 이태종, 2009). 표면건조수포화무게를 초기값으로 하여 시험편을 항온·항습챔버 내에서 건조시키면서 경과시간에 따른 시험편의 무게와 전기비저항을 별도로 측정 후 경과시간을 소거하여 함수율과 전기비저항의 관계를 도출하였다.

항온·항습챔버 내에서 원주형 시험편의 전기비저항 측정을 위하여 Fig. 1의 전기비저항 측정용 sample holder(이상규와 이태종, 2009)와 OYO사의 전기비저항측정기(Handy Viewer MiniOHM Model-2121)를 사용하였다. 전극은 필터종이의 수분이 시료에 침투됨에 따른 영향(Losito *et al.*, 1991)을 배제하고자 필터종이를 사용하지 않고 전도성 금속망을 사용하는 일체형 전극(2전극법; Lynch, 1964)을 이용하였다. 측정 전위차로부터 전기비저항을 산출할 때는 금속망 전극과 시험편과의 평균 접촉저항인 2000 ohm(이상규와 이태종, 2008)을 보정하였다. 실험에 사용된 순수제조장치 등 각종 기기는 이상규와 이태종(2009)과 동일하다.

전기전도도가 다른 용액으로 한번씩 순차 수침진공 했을 때 함수정도에 따른 시멘트 시험편의 전기비저항

전기전도도가 20배씩 증가하도록 8, 160, 3200, 64,000 $\mu\text{S/cm}$ 의 4종류의 NaCl 용액으로 규격화된 공정에 따라 포화시킨 후, 경과 시간에 따라 증발에 의해 달라지는 함수율과 전기비저항의 변화를 고찰하였다. 전기전도도는 소금물의 농도로 조절하였으며 그 값은 $\pm 1\%$ 의 편차 이내로 하였다.

먼저, 8 $\mu\text{S/cm}$ 의 여과수로 수침진공한 시멘트시험편을 온도와 상대습도가 각각 20 $^{\circ}\text{C}$, 30%인 항온·항습챔버 내에서 건조시키며 무게변화를 매 1분마다 모니터링하고 경과시간에 따

른 상대함수율을 계산하였다. 그 다음, 전기전도도가 낮은 용액(8 $\mu\text{S/cm}$)으로부터 높은 용액으로 순차적으로 한번씩 시험편을 수침진공하고 각각에 대하여 동일한 조건의 항온·항습챔버 내에서 건조시키며 매 2분마다 시험편의 전기비저항을 측정하였다. 경과시간을 소거하여 시멘트 시험편의 상대함수율과 전기비저항의 관계를 Fig. 2a(이상규와 이태종, 2009)에 나타내었다. 이 때, 상대함수율의 계산은 편의상 8 $\mu\text{S/cm}$ 로 수침진공한 무게모니터링 자료를 사용하였으며, 순차 수침진공에 의해 시멘트 시험편 속의 낮은 전기전도도의 공극수가 높은 전기전도도의 용액으로 완전히 치환되었는지는 확인할 수 없었으므로 공극수의 전기전도도(σ_w)는 절대값이 아닌 명목상(nominal)의 값이다.

측정된 값에서 상대함수율이 91.3~93.0%의 범위에서 공극수의 전기비저항에 따른 암석의 전기비저항 측정값을 Fig. 2b에 속이 빈 원 기호로 도시하였다. 도시된 자료를 이용하여 이상규와 이태종(2009)이 제안한 (1)식으로 표현된 변형된 병렬저항모델(modified PRM)을 이용하여 역산한 결과,

$$\frac{1}{\rho'} = \frac{S_w^d}{F\rho_w} + \frac{S_w^{(d-1)}}{\rho_s} \tag{1}$$

지층계수 F 는 1058.29, ρ_s 는 4,659 ohm-m로 나타났다. 이때, 지수 d 는 2로 가정하였다. 역산에 의한 F 와 ρ_s 를 이용하여 포화도(S_w)가 1.0인 경우 Archie의 식과 병렬저항모델에 의한 곡선을 Fig. 2의 검은 실선으로 나타냈으며, 위의 (1)식에 의해 S_w 가 0.8~1.0의 범위로 변할 때의 공극수의 전기비저항과 암석의 전기비저항의 관계는 연한색 그래프로 도시된 영역에 해당된다. 그림에서 측정값의 대부분이 이 영역에 포함되는 것을 확인할 수 있으며 포화도를 포함한 변형된 병렬저항모델이 어느 정도 타당함을 보여준다. 그러나 이때 표시된 공극수의 전기비저항은 포화시키기 위한 용액의 전기비저항이며, 동일한 용액이 공극내에 포화되었다고 가정하였다는 사실에 유념하자.

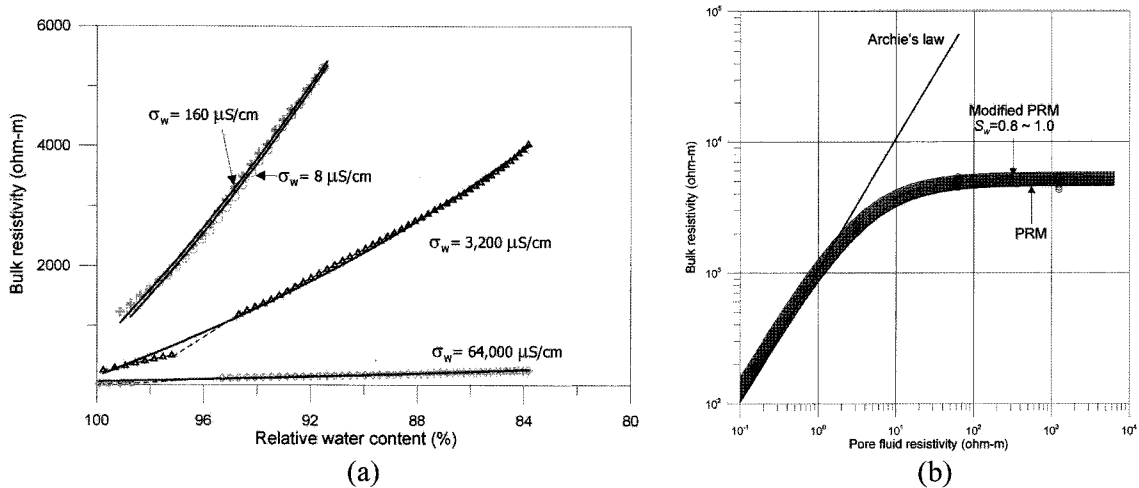


Fig. 2. (a) Resistivity variation as a function of relative water content for 4 different nominal conductivity of pore water (Lee and Lee, 2009), (b) comparison of Archie, PRM, and modified PRM models for the dataset shown in (a).

반복 순차 수침진공한 시멘트 시험편의 상대함수율 변화에 따른 전기비저항

공극수의 전기전도도가 달라질 때 상대함수율이 변함에 따른 전기비저항 변화를 논의하기 위해서는 시험편의 표면건조 수포화 무게에 대한 반복성 확보 - 즉, 시험편의 유효공극이 100% 수포화되었는가에 대한 확신 - 와 이 표면건조수포화 무게를 초기값으로 하는 건조과정(dry process)의 재현이 담보되어야 함은 물론이고, 이외에도 전기전도도가 낮은 용액에서부터 높은 용액으로 1회씩 순차 수침진공(박삼규, 2004; 이상규와 이태중, 2009)할 때 시험편 속의 유효공극을 채우고 있던 낮은 전기전도도의 공극수가 높은 전기전도도의 용액으로 완전하게 치환되었는지에 대한 확신이 필요하다. 전자에 대해서는 이상규와 이태중(2008)에서 공정의 규격화를 통하여 반복성 및 재현성이 확보됨을 보였다. 후자에 대해 살펴보기 위하여 전기전도도가 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 20배씩 증가하는 용액으로 한번씩 순차적으로 수침진공하여 전기비저항을 측정했던 동일한 시멘트 시험편(I)을 이용하여 Table 2의 실험순서에 따라서 반복적으로 수침진공하여 수포화시키고, 온도 20 $^{\circ}\text{C}$, 상대습도 30%의 항온·항습 챔버 내에서 건조시키며 때 2분마다 전기비저항을 측정하였다. 시험편의 전기비저항 측정이나 무게모니터링을 위한 한 주기의 실험일정은 Fig. 3(이상규와 이태중, 2008; Fig. 9 변형)과 같았다. 실험주기와 실험주기 사이에 부득이하게 공백이 있는 경우에는 측정 작업 직전까지 다음 실험에 사용될 용액 속

에 물의 증발을 억제한 상태로 시험편을 보관하였다.

우선 이전 실험(이상규와 이태중, 2009)에서 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 1회 포화된 시멘트 코어를 이용하여 무게모니터링을 수행한 후, 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 Fig. 3의 과정을 4회 반복하며(r1~r4) 전기비저항을 측정하고, 이후 순차적으로 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액을 이용하여 동일한 과정을 각 4회씩 반복하였다.

Fig. 4a는 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물에서 수침·진공함으로써 시멘트시험편을 4회 반복하여 수포화시킨 후 건조시키며 측정된 전기비저항 변화를 실험 pw-1로부터 계산한 상대함수율 변화에 따라서 나타난 것이다. 실험번호 r-1은 그 전 2 주기의 실험에서 사용한 공극수의 전기전도도(64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 영향을 받아서 상대함수율 전 구간(84~100%)에서 가장 낮은 전기비저항 분포를 보인다. 동일한 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물로 수침진공을 2회(실험 r-2), 3회(실험 r-3), 4회(실험 r-4) 반복함에 따라서 상대함수율 변화에 따른 전기비저항 변화 곡선이 단조롭게 증가하는 것이 아니라, 상대함수율이 높은 구간(예: 100%)에서는 r-1, r-4, r-3, r-2의 순으로, 상대함수율이 낮은 구간(예: 84%)에서는 r-1, r-3, r-2, r-4의 순으로 전기비저항이 낮다. 이로부터 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물로 수침진공을 반복함에 따라서 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물과 그 전에 잔존했던 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물(또는 소금)의 치환과 혼합(mixing)이 매우 복잡한 양상으로 이루어짐을 추측할 수 있다. 그러나 수침진공의 횟수를 증가시킬수록 시멘트 시험편 공극 내의 공극수는 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 전기전도도에 접근할 것이므로 이 실험군에서

Table 2. Experiment order for repeated saturation and resistivity measurements with different pore fluid resistivity.

Exp. Order	Pore fluid EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Exp. ID	Figs.	Exp. Order	Pore fluid EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Exp. ID	Figs.	Exp. Order	Pore fluid EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Exp. ID	Figs.
1	8	pw-1	Fig.8	12	160	r-6	Fig.5a	23	3,200	r-17	Fig.4b
2	8	pr-1	Fig.2	13	160	r-7		24	3,200	r-18	
3	160	pr-2		14	160	r-8		25	3,200	r-19	
4	3,200	pr-3		15	8	r-9	26	3,200	r-20		
5	64,000	pr-4		16	8	r-10	27	64,000	r-21		
6	64,000	w-1	Fig.8	17	8	r-11	Fig.6a	28	64,000	r-22	Fig.7a
7	3,200	r-1	Fig.4a	18	8	r-12		29	64,000	r-23	
8	3,200	r-2		19	160	r-13		30	64,000	r-24	
9	3,200	r-3		20	160	r-14	31	64,000	r-25		
10	3,200	r-4		21	160	r-15	32	64,000	w-2	Fig.8	
11	160	r-5		22	160	r-16					

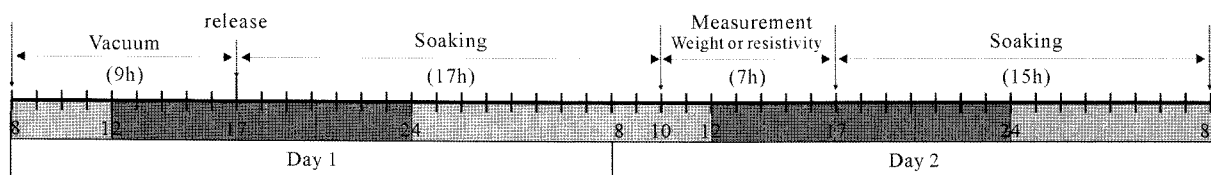


Fig. 3. Optimal experimental schedule for resistivity measurement or weight monitoring of a core sample (modified from Lee and Lee, 2008).

는 r-4 곡선(+)이 참값 - 유효공극 내 공극수의 전기전도도가 정확히 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 일 때의 전기비저항 값 - 일 확률이 가장 높을 것으로 판단된다. 상대함수율 100% 때의 r-1과 r-4의 비저항 차이에 비하여 상대함수율 84% 때의 비저항 차이가 확대되는 것은 수침진공을 반복할수록 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 공극수가 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 공극수를 시멘트시험편 깊숙이 치환하고 있음을 나타내는 것으로 해석된다.

Fig. 4b는 이와는 반대로 실험 r-16에서 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 포화된 시멘트 코어를 이용하여 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물로 수침진공을 4회(r-17~r-20) 반복했을 경우에 상대함수율 변화에 따른 전기비저항 변화 곡선을 보인 것이다. 실험이 반복될수록 당초 공극을 점유하고 있던 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액 대신 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 치환되어 측정되는 전기비저항이 증감을 반복하면서도 점차 낮아짐을 확인할 수 있다. 따라서 수침진공의 횟수를 증가시킬수록 시멘트시험편 공극 내 공극수는 보다 많이 치환될 것이라는 판단에 따라 r-20 곡선을 참값에 가까운

대표 곡선으로 간주하였다. 이 곡선과 동일한 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 반복 포화시킨 Fig. 4a의 r-4와 비교하면 두 곡선이 상당히 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 4c는 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수포화시킨 실험의 결과로서 공극수의 전기전도도가 낮아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 실험 r-4곡선과 공극수의 전기전도도가 높아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 실험 r-20곡선이 이들의 기하평균에 대하여 갖는 편차는 상대함수율 86.26% 때 최대 $\pm 8.7\%$ 를 나타낸다. 그러나 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 수침진공한 이후 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 한번만 수침진공한 pr-3의 경우는 이전의 낮은 전기전도도의 공극수 영향을 받아서 기하평균 곡선으로부터 상대함수율에 따라서 ~40%까지 높은 전기비저항 차이를 보였다.

Fig. 5a는 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물에서 수침·진공으로 시멘트 시험편을 4회 반복하여 수포화시킨 후 건조시키며 측정된 전기비저항을 상대함수율 변화에 따라서 보인 것이다. 실험번호

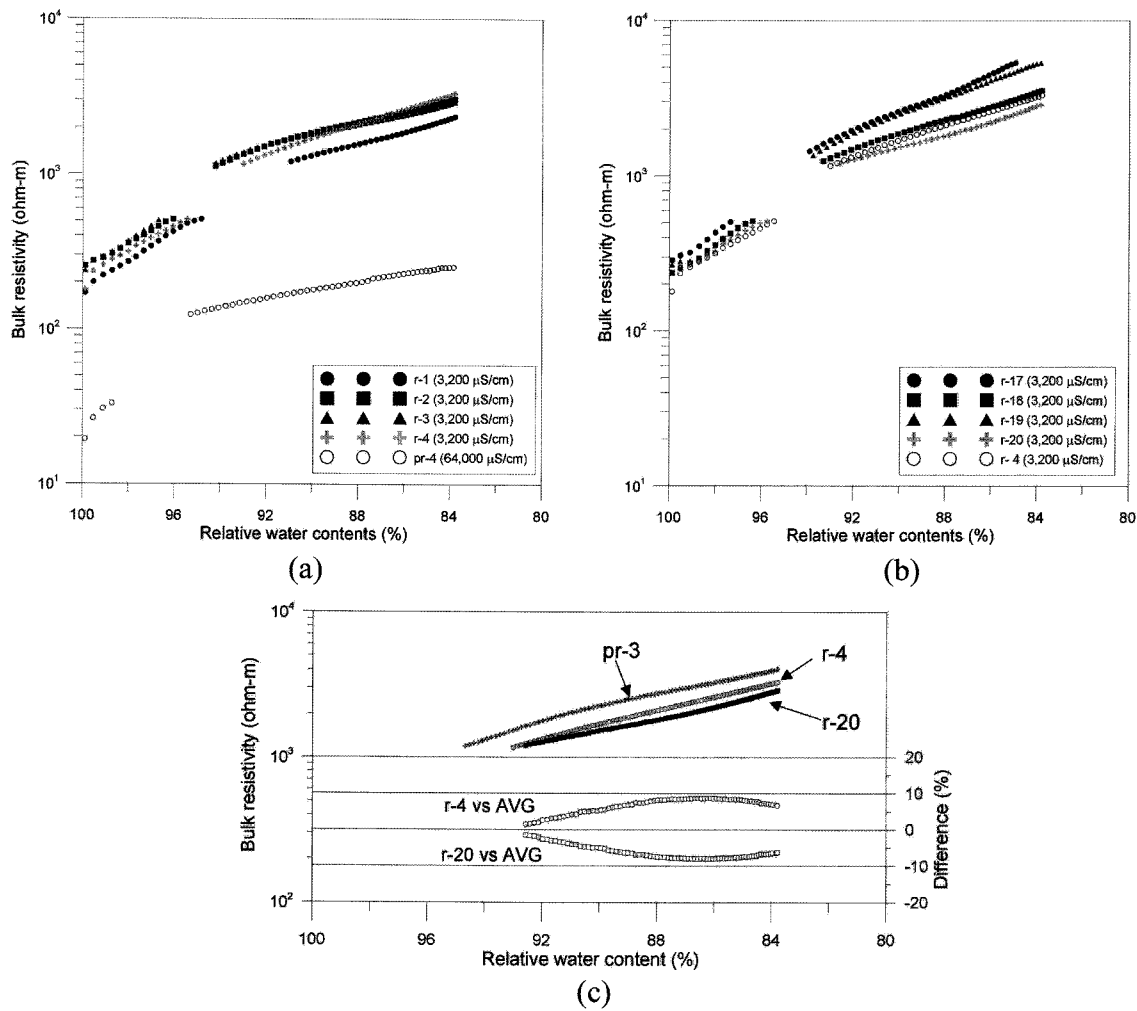


Fig. 4. Variation of resistivity versus relative water contents by repeating vacuuming and soaking of the cement sample with NaCl solution of 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The core is initially saturated with (a) 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (pr-4) and (b) 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (r-16), respectively. (c) Comparison of resistivity versus relative water content between experiments pr-3, r-4, and r-20 in Table 2 for 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ solution. Note that maximum difference to the average of r-4 and r-20 is less than 10%.

r-5는 이전 4 주기의 실험에서 사용한 공극수 전기전도도 (3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 영향을 받아서 상대함수율을 거의 전 구간(84 ~ 100%)에서 가장 낮은 전기비저항 분포를 보인다. 수침진공을 2회(실험 r-6), 3회(실험 r-7), 4회(실험 r-8) 반복할수록 상대함수율 변화에 따른 전기비저항 변화곡선이 고비저항 쪽으로 이동하는 것이 아니라 상대함수율이 높은 구간(예: 96%)에서는 r-5, r-7, r-8, r-6의 순으로, 상대함수율이 낮은 구간(예: 90%)에서는 r-5, r-6, r-7, r-8의 순으로 전기비저항이 높아진다. 역시, 수침진공을 반복함에 따라서 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물과 이전에 잔존했던 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물(또는 소금)과의 혼합 또는 치환과정이 단순하지 않음을 추측할 수 있다. 수침진공의 횟수를 증가시킬수록 시멘트시험편 공극 속 공극수의 전기전도도는 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 접근할 것이므로 이 실험 군에서는 r-8 곡선이 참값에 가까운 확률이 가장 높다고 판단된다. 상대함수율 96% 때의 r-5와 r-8의 비저항 차이에 비하여 상대함수율 90% 때의 비저항 차이가 확대되는 것은 수침진공을 반복할수

록 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 공극수가 시멘트시험편의 깊숙이 침투해 있는 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 공극수를 치환하기 때문으로 해석된다.

Fig. 5b는 r-12 실험이 끝나 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 포화된 시료에 대해 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액을 이용하여 포화과정을 4회 반복할 경우의 전기비저항과 상대함수율의 관계를 도시한 것이다. 마찬가지로, 실험이 반복될수록 당초 공극을 점유하고 있던 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액 대신 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 치환되어 반복이 거듭됨에 따라 측정되는 전기비저항이 점차 감소함을 확인할 수 있다. 또한 4회 반복한 r-16과 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로부터 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 치환한 결과인 r-8의 전기비저항 곡선이 매우 근접함을 알 수 있다. 따라서 r-16을 참값에 가까운 대표 곡선으로 간주하기로 한다.

Fig. 5c는 전기전도도가 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 인 용액으로 수포화시킨 후 측정된 전기비저항 곡선 중에서 4회 반복하여 수침진공함으로써 해당 실험군 중에서는 참값일 확률이 높은 실험 r-8과 r-16의 결과를, 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액 이후에 한번만 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용

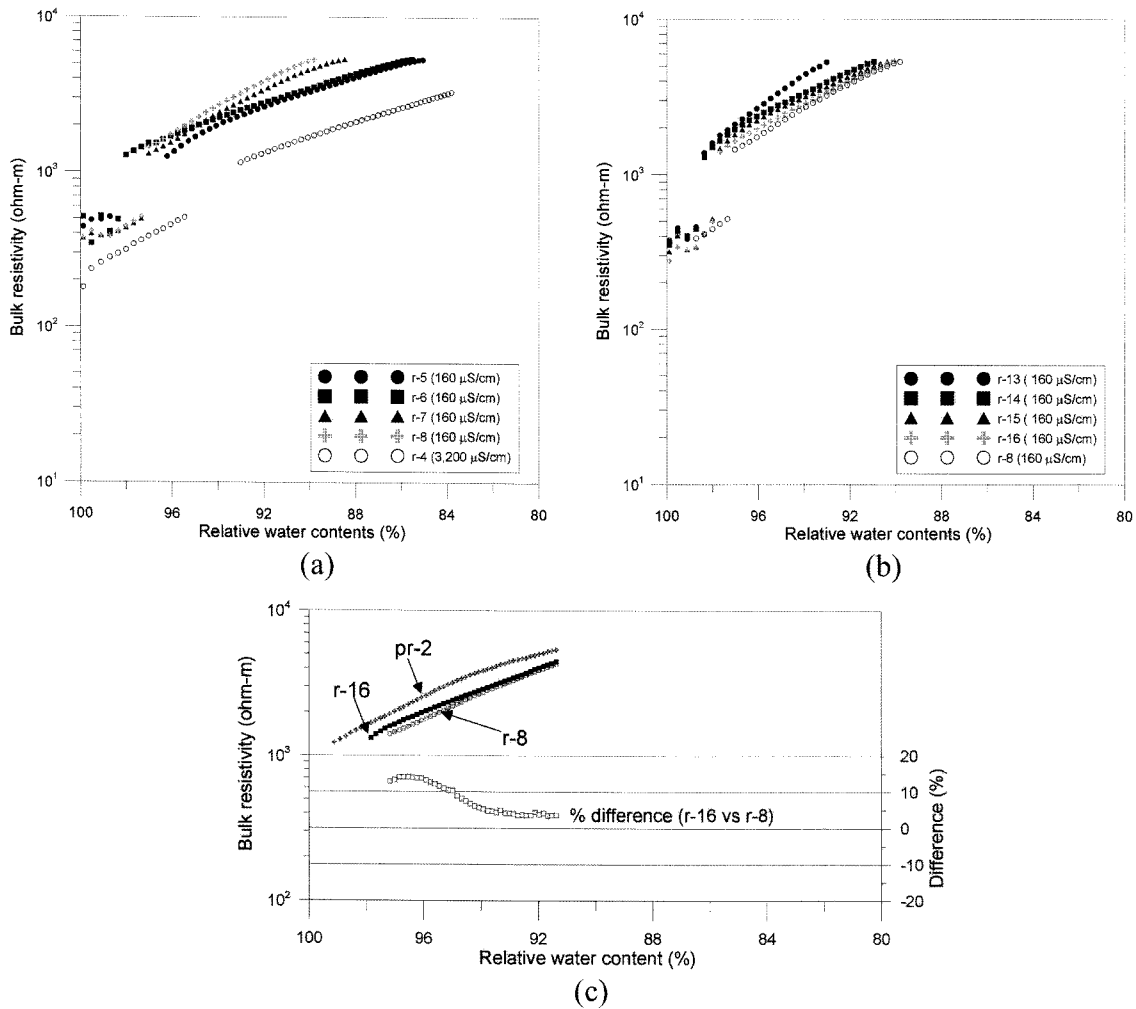


Fig. 5. Variation of resistivity versus relative water contents by repeating vacuuming and soaking of the cement sample with NaCl solution of 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The core is initially saturated with (a) 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (r-4) and (b) 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (r-12), respectively. (c) Comparison of resistivity versus relative water content between experiments pr-2, r-8, and r-16 in Table 2 for 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ solution. Note that maximum difference of the two curves is about 14 %.

액으로 수침진공하고 측정된 실험 pr-2와 비교한 것이다. r-8과 r-16은 매우 유사하고 그 차이는 최대 약 14%의 차이를 보이는 반면, pr-2의 경우는 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 공극수의 영향이 많이 남아 있어서 이들 둘과는 상당한 차이를 보인다. 이전의 수포화 이력 때문에 전기전도도가 낮은 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 공극수의 영향이 남아 있을 r-8과 전기전도도가 높은 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 영향이 남아 있을 r-16의 기하평균을 취하면 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 공극수로 포화된 시멘트 시험편의 전기비저항 참값에 보다 더 근접하게 될 것이다. 이 기하평균 전기비저항 곡선을 기준으로 할 경우, 공극수의 전기전도도가 낮아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 실험 r-8곡선과 공극수의 전기전도도가 높아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 실험 r-16곡선이 이들의 기하평균에 대하여 갖는 편차는 상대함수율 96.6% 때 최대 $\pm 6.7\%$ 를 나타낸다. 그러나 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 수침진공한 이후 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 한번만 수침진공한 pr-2의 경우는 기하평균 곡선으로부터 상대함수율에 따라서 20~40% 높은 전기비저항값을 나타낸다. 따라서 전기전도도가 높은 방향으로 한번만 순차 수침진공할 경우에는 유효공극 속의 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 공극수가 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 공극수로 완전히 치환되지 못했음을 알 수 있다.

Fig. 6a는 r-8 실험에서 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 포화된 시멘트 시험편을 다시 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 여과수로 수침진공하여 얻은 결과이다. 실험번호 r-9는 이전 4 주기의 실험에서 사용한 공극수(EC: 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 영향을 받아서 상대함수율의 넓은 구간에서 가장 낮은 전기비저항 분포를 보인다. 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물로 수침진공을 2회(실험 r-10), 3회(실험 r-11), 4회(실험 r-12) 반복함에 따라서 상대함수율 변화에 따른 전기비저항 변화곡선이 단조롭게 증가하지는 않는다. 수침진공의 횟수를 증가시킬수록 시멘트 시험편 공극 내 공극수는 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 점근할 것이므로 이 실험 군에서는 r-12 곡선이 참값일 확률이 가장 높

을 것이다. 높은 상대함수율(예: 96%)에서의 r-9와 r-12의 비저항 차이에 비하여 낮은 상대함수율(예: 92%) 때의 비저항 차이가 커지는 정도가 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 나 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 공극수 때에 비하여 현저히 줄어들었다.

Fig. 6b는 시험편의 유효공극을 포화시키는 용액의 전기전도도가 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이외의 값을 가진 적이 없는 실험 pr-1과 전기전도도가 다른 4종의 용액으로 Table 2와 같이 다양하게 수침진공했던 이력을 갖고 있으면서 직전에는 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 4회 반복하여 수침진공한 것 중에 4번째 실험인 r-12를 비교하고 pr-1을 기준으로 한 r-12의 편차를 백분율로 나타낸 것이다. 실험 pr-1은 동일한 시멘트 시험편을 pr-1 이전부터 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 여과수로 연속하여 20 주기 이상 반복 수침진공했던 이력이 있으므로 시험편의 공극수 전기전도도는 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 일 확률이 제일 높으며 따라서 공극수를 포함한 시험편의 전기비저항 곡선은 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 공극수로 포화된 시멘트 시험편의 상대함수율 변화에 따른 전기비저항 곡선을 올바르게 나타낸다고 볼 수 있다. r-12 곡선은 이전에 160, 3,200, 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 여러 차례 수침진공 했던 영향이 남아 있어서 pr-1 보다 전기비저항이 최대 약 12% 정도 낮게 나타난다. 최고 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지의 여러 전기전도도를 갖는 용액으로 수포화시켰던 이력에도 불구하고 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 4회 반복하여 수침진공하면 상대함수율에 따른 전기비저항을 10% 내외의 편차로 얻을 수 있음을 알 수 있다.

같은 전기전도도의 소금물로 한 번 더 수침진공할 때 전기비저항이 얼마나 달라지는지 확인하기 위하여 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 소금물로 5회 반복 수침진공하고 그 결과를 Fig. 7a에 나타내었다. 5회 반복한 r-25 곡선과 4회 반복한 r-24 곡선의 편차가 그렇게 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 160, 3,200, 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 20배 씩 높아지는 용액으로 시멘트

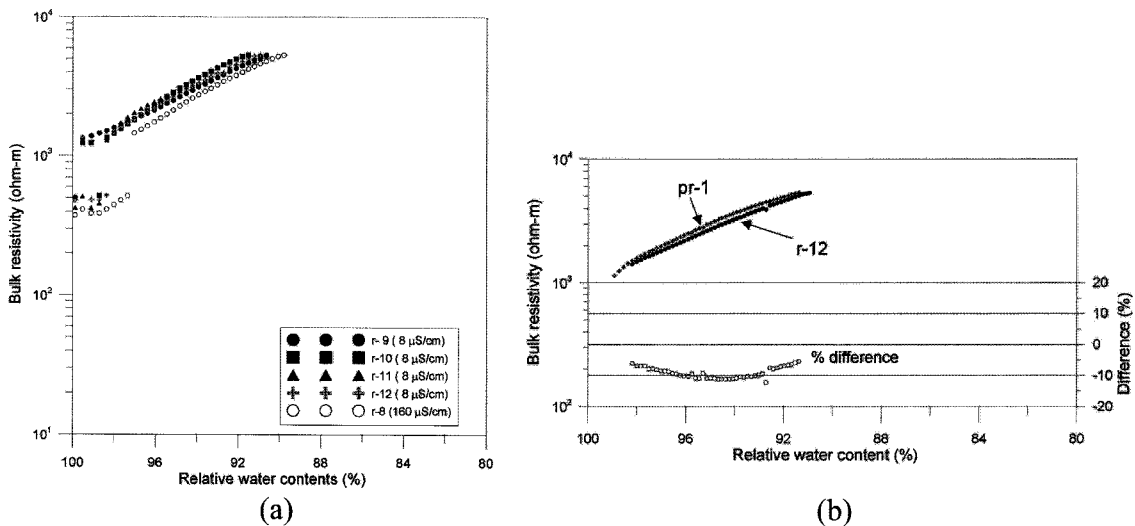


Fig. 6. (a) Variation of resistivity versus relative water contents by repeating vacuuming and soaking of the cement sample with NaCl solution of 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (b) Comparison of resistivity versus relative water content between experiments pr-1 and r-12 in Table 2 for 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ solution. Note that maximum difference of the two curves is about 12%.

시험편을 수침진공할 때 4회 정도 반복하여 수침진공하면 공극수가 대부분 치환되는 것으로 판단되며 각각의 공극수 전기전도도를 대표하는 참값에 근접한 전기비저항 곡선을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7b는 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수포화시킨 실험의 결과를 보인 것이다. 공극수의 전기전도도가 높아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 실험 r-24 곡선을 기준으로 할 때 한 번 더 수침진공 한 실험 r-25 곡선은 상대함수율에 따라서 10% 미만의 편차를 보이고 있으며, 특히 상대함수율 88%에서부터 96%까지는 2% 이내의 매우 작은 편차를 보인다. 그러나 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 수침진공한 이후 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 한번만 수침진공한 pr-4의 경우는 대표곡선으로 선택한 r-24보다 상대함수율에 따라서 20% 내외의 편차를 보인다. 상대함수율이 96% 이하인 전 범위에서 음(-)의 편차를 보이는 것은 실험 pr-4 이전에 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 낮은 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수침진공했던 이력을 감안할 때 Fig. 4~Fig. 6의 pr-1, pr-2, pr-3처럼 pr-4도 양(+)의 편차를 보일 것이라는 예상을 빚나가는 현상이다.

토 의

Fig. 8은 시멘트 시험편을 전기전도도가 다른 용액으로 수침진공하여 포화시킨 후 온도 20°C, 상대습도 30%를 유지하는 항온·항습챔버 속에서 건조시키며 매 1분마다 측정된 무게 변화 곡선이다. 따라서 $t=0$ 때의 무게는 시험편의 표면건조수포화 무게를 나타낸다. pw-1은 시험편의 수침진공 이력(Table 2 참조) 중에서 용액의 전기전도도가 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이외의 값을 가진 적이 없는 경우이고, w-1은 8, 8, 160, 3200, 64000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수침진공했던 이력을 갖고 있으면서 무게를 측정

할 당시에는 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수침진공한 경우이며, w-2는 Table 2에서와 같이 8, 160, 3200, 64000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 반복·순차 수침진공했던 이력을 갖고 있으면서 무게를 측정할 당시에는 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수침진공한 경우이다. 같은 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수침진공한 w-1과 w-2의 표면건조수포화무게가 각각 51.341 g, 51.172 g으로 0.169 g 차이가 있으며 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 수침진공한 pw-1의 표면건조수포화무게 보다는 각각 0.349 g, 0.180 g 무겁다. 이것은 유효공극 속 공극수의 소금농도에 따른 비중 차이, 건

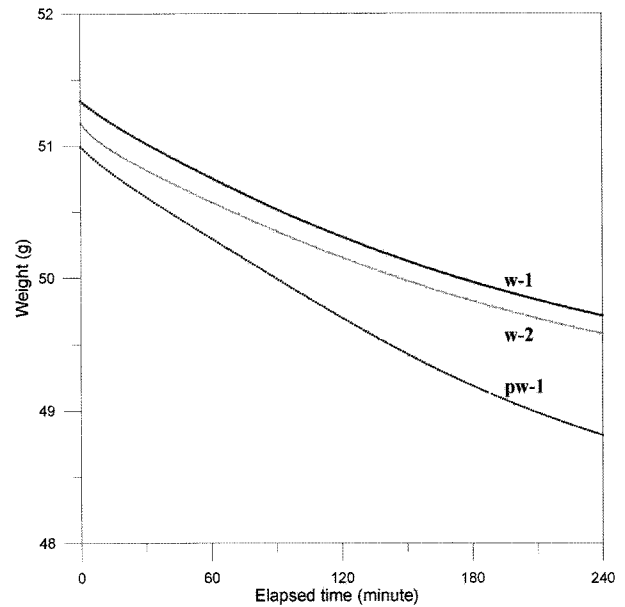
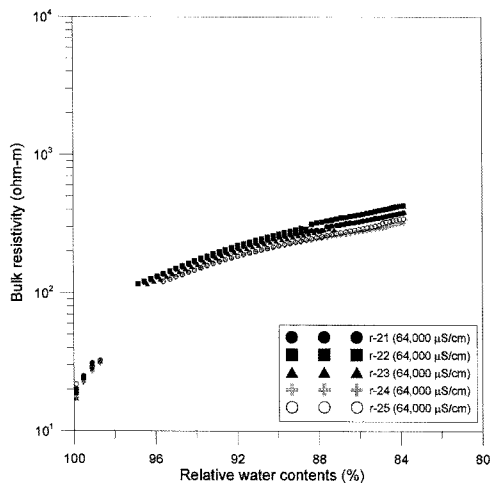
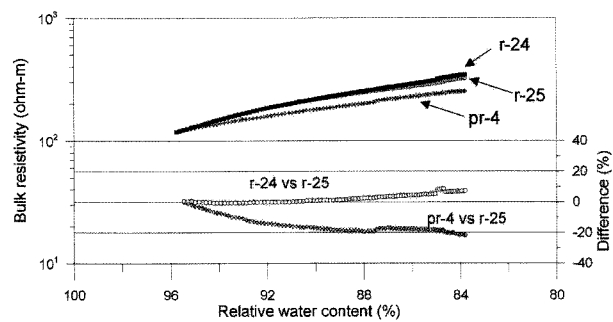


Fig. 8. Temporal variation of weight of the cement sample under the constant temperature 20°C, and relative humidity 30%. The sample is saturated by 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for w-1 and w-2, and 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for pw-1, respectively.



(a)



(b)

Fig. 7. (a) Variation of resistivity versus relative water contents by repeating vacuuming and soaking of the cement sample with NaCl solution of 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (b) Comparison of resistivity versus relative water content between experiments pr-4, r-24, and r-25 in Table 2 for 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ solution.

조과정 중에 유효공극 속에 잔존한 고체소금 등에 기인되었을 것으로 추정된다. 이러한 경우에는 완전히 건조했을 때의 입자 질량 M_s 도 달라질 것이므로 공극수의 전기전도도가 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 와 같이 매우 높은 경우에는 상대함수율에 따른 전기비저항 변화를 관찰하는데 허용오차를 크게 하여야 할 것으로 생각된다.

시멘트 시험편을 전기전도도가 다른 용액으로 수침진공에 의해 포화시킬 때, 전기전도도가 낮은 용액에서 높은 용액으로 한번씩 순차적으로 포화시켜 전기비저항을 측정된 pr-1 ~ pr-4의 경우는 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 변형된 병렬저항모델(modified PRM)에 의해 잘 설명될 수 있다. 그러나 이 측정값은 이상과 같은 실험에서 알 수 있듯이 포화에 사용된 용액의 전기비저항과 공극을 채우고 있는 공극수의 전기비저항이 다를 수 있다.

반면, 시험편을 동일한 전기전도도를 갖는 용액으로 Fig. 3과 같은 동일한 공정을 각 4회씩 반복하여 얻어진 r-4, r-8, r-12, r-16, r-20 및 r-25의 경우는 공극수가 대부분 치환되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 사용된 용액의 전기비저항이 공극수의 전기비저항과 같거나 거의 유사한 근사값으로 볼 수 있다.

Fig. 9는 이러한 2가지의 실험에서 얻어진 공극수의 전기비저항과 시멘트 시료의 전기비저항의 관계를 보인 것으로, 측정된 값에서 상대함수율이 91.3 ~ 93.0%의 범위에 해당되는 측정값을 기호로 도시하였다. 수침진공을 4회씩 반복하여 측정된 결과(○)는 1회씩 수행한 경우(◆)에 비해 전반적으로 전기비저항이 낮아짐을 확인 할 수 있다. 이는 수침진공을 한번만 수행할 때 전기비저항이 높은 용액부터 순차적으로 포화시켰기 때문에 1회의 수침진공으로는 공극내에 잔류하던 이전 용

액의 영향을 받았기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 1회 수침진공한 경우 공극수의 전기비저항은 용액의 전기비저항보다 높을 것이며 따라서 그림의 ◆로 표시된 자료는 전체적으로 일정 정도씩 오른쪽으로 이동하여 도시되어야 할 것이다.

수침진공을 4회씩 반복하여 측정된 결과를 이용하여 (1)식으로 표현된 변형된 병렬저항모델을 이용하여 역산한 결과, 지층계수 F 는 782.09, ρ_s 는 3,639 ohm-m로 나타나 1회 반복에 의해 얻어진 $F=1,058.29$, $\rho_s=4,659$ ohm-m와는 큰 차이를 보였다. 이때, (1)식의 포화도지수 d 는 2로 가정하였다. 또한 이에 의한 F 와 ρ_s 를 이용하여 포화도(S_w)가 1.0인 경우 Archie의 식과 병렬저항모델에 의한 곡선을 Fig. 9의 실선으로 나타냈다. 또한, 위의 (1)식에 의해 S_w 가 0.8 ~ 1.0의 범위로 변할 때의 변형된 병렬저항모델에 의해 계산된 공극수와 시료의 전기비저항 관계는 연한색 그래프로 도시된 영역에 해당된다.

그림에서 변형된 병렬저항모델 혹은 병렬저항모델로는 4회의 수침진공 반복에 의해 측정된 공극수와 시멘트시료의 전기비저항 관계를 어느 정도는 설명할 수 있을 것으로 보이지만 공극수의 전기전도도가 높은 경우에 대해서는 측정자료와 변형된 병렬저항모델의 계산값이 오차를 보인다. Worthington and Barker (1972)는 실내에서 4종류의 각기 다른 시료를 가지고 서론에 설명한 과정을 통해서 공극수의 전기비저항과 시료의 전기비저항을 측정하고 이를 가장 잘 설명하기 위해서는 다음과 같이 우변에 3개 항이 필요하다는 결과를 발표한 바 있다.

$$\frac{1}{\rho_r} = \frac{1}{F\rho_w} + a_1 + a_2\rho_w \quad (2)$$

이를 병렬저항모델과 비교할 경우 $a_1=1/\rho_s$ 에 해당된다. Fig. 9와 Worthington and Barker (1972)의 연구결과를 종합하면, 공극수의 전기비저항에 따른 시료의 전기비저항의 관계를 더욱 명확히 표현하기 위해서는 변형된 병렬저항 모델이 (2)식에 따라 좀 더 일반화되어야 할 필요가 있다고 판단된다. 그러나 하나의 시멘트 시료에 대해서 공극수의 전기전도도를 4가지로 변화시켜 측정된 본 연구만의 자료를 가지고 일반화하기는 어려울 것으로 판단되며, 향후 다양한 압중에 대해서 지속적인 실험 자료의 축적이 이루어져 각각의 모델에 대한 평가가 이루어질 수 있기를 기대한다.

결 론

전기전도도가 8, 160, 3200, 64000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 20배 씩 높아지는 용액으로 시멘트시험편을 수침진공할 때 4회 정도 반복하여 수침진공하면 공극수가 대부분 치환되며, 각각의 공극수 EC를 대표하는 참값에 근접한 전기비저항 곡선을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 최고 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지의 여러 전기전도도를 갖는 용액으로 수포화시켰던 이력에도 불구하고 8 $\mu\text{S}/$

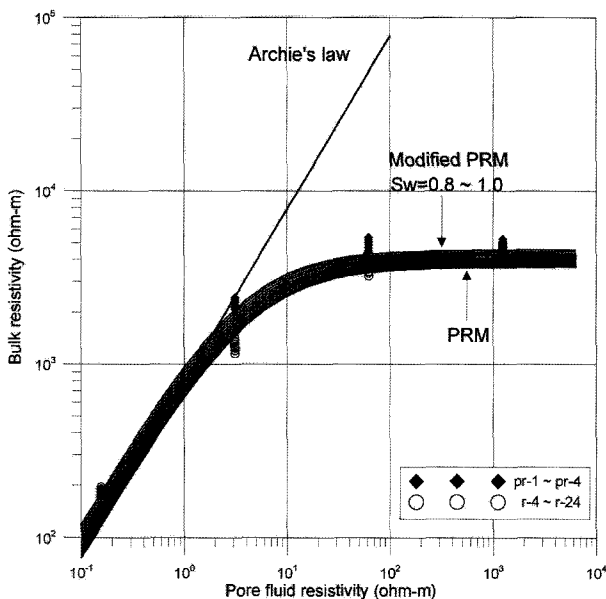


Fig. 9. Resistivity of cement core as a function of pore fluid resistivity and best fits using Archie, PRM, and modified PRM models for the dataset of experiments r-4 ~ r-24.

cm 용액으로 4회 반복하여 수침진공하면 상대함수율에 따른 전기비저항을 10% 내외의 편차로 얻을 수 있음을 알 수 있다.

공극수의 전기전도도가 낮아지는 방향으로 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 4회 반복 수침진공한 전기비저항곡선과 공극수의 전기전도도가 높아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 전기비저항곡선은 이들의 기하평균에 대하여 상대함수율 96.6% 때 최대 $\pm 6.7\%$ 편차를 나타낸다. 그러나 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 수침진공한 이후 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 한번만 순차 수침진공한 경우의 전기비저항 곡선은 기하평균 곡선으로부터 상대함수율에 따라서 20~40%의 오차를 나타낸다.

공극수의 전기전도도가 낮아지는 방향으로 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 용액으로 4회 반복 수침진공한 전기비저항곡선과 공극수의 전기전도도가 높아지는 방향으로 4회 반복 수침진공한 전기비저항곡선이 이들의 기하평균에 대하여 갖는 편차는 상대함수율 86.26% 때 최대 $\pm 8.7\%$ 를 나타낸다. 그러나 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 수침진공한 이후 3,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 용액으로 한번만 순차 수침진공한 경우의 전기비저항곡선은 이전의 낮은 전기전도도의 공극수 영향을 받아서 기하평균 곡선으로부터 상대함수율에 따라서 최대 40%까지 오차를 보였다.

공극수의 전기전도도가 64,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 와 같이 매우 높은 경우에는 유효공극 속 공극수의 비중이 무시할수 없을 만큼 증가할 것이고 건조과정 중에는 유효공극 속에 고체소금이 잔존할 수도 있을 것이다. 또한 시험편을 완전히 건조했을 때의 입자질량 M_s 도 달라질 것이므로 상대함수율에 따른 전기비저항 변화를 관찰하는데 허용오차를 크게 하여야 할 것으로 생각된다.

변형된 병렬저항 모델은 이러한 실험결과 얻어진 공극수의 포화율과 전기전도도에 따른 암석의 전기비저항의 변화를 어느 정도는 잘 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 하나의 시멘트 시료를 가지고 4가지의 공극수의 전기전도도에 대해서만 실험한 자료를 가지고 모델을 평가하기는 어려울 것이다. 향후, 다양한 공극율을 가지는 암석 시료에 대해 다양한 공극수의 전기비저항을 사용하여 실험 자료의 축적이 이루어지면 좀더 일반화된 관계식의 도출이 가능할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원의 기본 연구사업인 “저온 지

열 열병합 발전에 활용 가능한 지열수 자원 확보 기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 박삼규, 2004, 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인, 물리탐사, **7**, 130-135.
- 이상규, 이태종, 2008, 함수율 변화에 따른 포항 지열 시추코어의 전기비저항, 한국지구시스템공학회지, **45**, 526-535.
- 이상규, 이태종, 2009, 전도성 간극수의 함수 정도에 따른 원주형 시멘트 시험편의 전기비저항 특성, 한국지구시스템공학회지, **46**, 553-562.
- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petr. Trans. AIME*, **146**, 54-62.
- Chiba, A. and Kumata, M., 1994, “Resistivity measurement for granite and tuff samples -Influence of pore fluid resistivity on rock resistivity-,” *Butsuri-Tansa*, **47**, 161-172. (In Japanese)
- Katsube, T., 1965, “A basic study on the electric and electrochemical transient phenomena in rock and mineral ore sample,” *Butsuri-Tansa*, **18**, 25-34. (In Japanese)
- Keller, G. V. and Frischknecht, F. C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon press, 519p.
- Losito, G., Muschietti, M., and Trova, A., 1991, Laboratory electrical resistivities of rock samples under geothermal temperature-hydrostatic pressure conditions, *Geothermics*, **20**, 165-178.
- Lynch, E. J., 1964, *Formation evaluation*, Harper & Row and John Weatherhill Inc., 422p.
- Park, S. G. and Matsui T., 1998, “Basic study on resistivity of rocks,” *Butsuri-Tansa*, **51**, 201-209. (In Japanese)
- Parkhomenko, E. I., 1967, *Electrical properties of rocks*, translated from Russian to English by Keller, G. V., Plenum press, 314p.
- Patnode, G. E. and Wyllie, M. R. J., 1950, The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation, *Trans. A. I. M. E.*, **189**, 47-52.
- Taylor, S. and Barker, R., 2002, Resistivity of partially saturated Triassic sandstone, *Geophysical prospecting*, **50**, 603-613.
- Wothington, P. F. and Barker, R. D., 1972, Methods for the calculation of true formation factors in the Bunter sandstone of northwest England, *Engineering Geology*, **6**, 213-228.