

청결 사암 및 탄산염암의 물 포화도 산출을 위한 수정 Archie 경험식의 제안

이상희¹ · 고은지² · 김진후^{1*}

¹동아대학교 에너지·자원공학과
²동남권 건설교통기술 지역거점센터

Suggestion of the Modified Archie's Formula for Calculating Water Saturation of Clean Sandstone and Carbonate Rocks

Sang-Hee Lee¹, Eun-Ji Ko², and Jin-Hoo Kim^{1*}

¹Energy and Mineral Resources Dept., Dong-A University
²Dongnam Regional Infrastructure Tech. Management Center

요약: 저류층의 탄화수소 매장량 평가에 있어서 매우 중요한 물 포화도(S_w)는 Archie의 경험식을 이용하여 전기비저항 지수(RI)로부터 구할 수 있다. 그러나 많은 경우, Archie 경험식에 사용되는 포화도 지수 n 은 상수가 아니며, 물 포화도에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 또한 RI vs. S_w 자료를 log-log 축에서 회귀분석하면 원점을 지나지 않는 경우도 흔히 발생한다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고자 수정 Archie 경험식을 제안하였는데, 이 식은 RI vs. S_w 대비도표의 추세가 직선이든 곡선이든, 원점을 지나든 아니든 모두 표현할 수 있는 장점을 갖는다. 수정 Archie 경험식을 사용하기 위해서는 전도성 지수 μ , 임계 물 포화도 S_c , 포화 분포 계수 b 등의 계수를 결정해야 하는데, 이들 계수를 실내실험을 통하여 결정하는 방법을 제시하였다. 수정 Archie 경험식은 청결 사암 및 탄산염암 등 저류암의 공극 구조, 공극수 분포, 습윤성 등을 반영할 수 있어 현장 적용성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

주요어: 전기비저항 지수(RI), 물 포화도(S_w), 수정 Archie 경험식, 포화도 지수(n)

Abstract: The water saturation (S_w), which is very important to estimate hydrocarbon reserves in the reservoir, has been determined from resistivity index (RI) by using the Archie's formula. However, in many cases, it has been reported that n is not constant for a given formation and it could be varied with water saturation. In addition, it frequently happens that the line obtained by linear regression analysis on log-log scale does not pass through the origin. In order to overcome these drawbacks, we suggested a modified Archie's formula, which can handle almost all the RI vs. S_w cross-plots whether the trend is straight or curved and whether it passes through the origin or not. We also demonstrated that how to determine conductivity exponent μ , critical water saturation S_c , and saturation distribution factor b in the laboratory to use the modified Archie's formula. Since the modified Archie's formula takes into account pore structure, pore water distribution, and wettability of reservoir such as clean sandstone and carbonate rocks, it might improve field applicability.

Keywords: Resistivity index (RI), Water saturation (S_w), Modified Archie's formula, Saturation exponent (n)

서 론

전기비저항검층은 지층 대비뿐만 아니라 저류층 내 유체 존

재 여부 및 유체의 상대적 함량 등을 평가하는 데 사용되고 있다. 그러나 지층수와 탄화수소가 함께 존재하는 저류층 내의 물 포화도를 정확히 산출하기 위해서는 시추공의 크기, 이수의 전기비저항, 이수의 지층 내 침투효과, 저류층의 두께 및 불균질성, 지층수의 염도 또는 전기전도도 등 여러 가지 시추 및 저류층 환경을 고려해야 하며, 무엇보다도 전기비저항검층 값과 물 포화도 사이의 명확한 상관관계가 요구된다(Archie, 1942). 시추와 물리검층 기술의 발전에 힘입어 대부분의 시추 및 저류층 환경에 대한 효과는 무시할 수 있을 정도로 적거나 보정 가능하기 때문에 전기비저항검층 값으로부터 지층의 진 비저항을 상당한 정확도로 유추할 수 있게 되었으나, 전기비저항검층 값과 물 포화도 사이의 상관관계를 얻기 위해서는 지

Received: 23 July 2015; Final version Received: 17 August 2015;

Accepted: 24 August 2015

*Corresponding author

E-mail: jkim@dau.ac.kr

Address: Energy and Mineral Resources Engineering Dept., Dong-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan, 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.

층의 전기적 물성에 관한 많은 실험적 자료가 축적되어야 한다. Archie (1942)는 몇몇 연구자들이 사암을 대상으로 얻은 실험 자료를 이용하여 다공성 청결 사암의 NaCl 농도가 15% 이상인 경우 Archie의 경험식이라고 불리는 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$S_w = \left(\frac{R_0}{R_t} \right)^{1/n} \quad (1)$$

또는

$$RI = \frac{R_t}{R_0} = \frac{1}{S_w^n} \quad (2)$$

여기서 S_w 는 물 포화도를, R_t 는 지층의 전기비저항을, R_0 는 지층이 공극수로 포화되어 있을 때의 전기비저항을 각각 나타내며, n 은 포화도 지수로서 미고결 또는 고결 사암에서 2에 근사한 값을 갖는다. 한편, R_t/R_0 를 전기비저항 지수 RI (Resistivity Index)로 정의하면 식 (2)와 같이 RI 를 S_w 와 n 으로 표시할 수 있으며, 물 포화도가 1일 때 RI 는 1, 즉 RI vs. S_w 를 log-log 축으로 나타낼 경우 원점을 지나게 되며, 포화도 지수 n 은 원점을 지나는 직선의 기울기로 결정된다.

청결 사암(clean sand) 뿐만 아니라 점토질 사암이나 탄산염암 지층의 물 포화도를 추정하기 위한 Archie 경험식의 적용성에 관한 연구는 꾸준히 이어져 왔다(Anderson, 1986; Koerperic, 1975; Longeron *et al.*, 1989; Longeron, 1990; Worthington and Pallatt, 1992). Ara *et al.* (2001)은 Archie의 경험식이 물-습윤(water-wet)이고, 점토가 없는 청결 사암에만 적용가능하며 탄산염암에는 적용이 곤란하다고 밝히고, RI vs. S_w 의 회귀 직선이 원점을 지나지 않는 경우를 고려할 수 있도록 다음과 같은 수정식을 제안하였다.

$$RI = \frac{b}{S_w^n} \quad (3)$$

여기서 b 는 상수 1을 대체하는 변수 계수이다. 이 후 Galiuk *et al.* (2011)은 탄산염암이 매우 불균질하며, 대부분 오일-습윤(oil-wet) 또는 중간-습윤(intermediate-wet) 형태로 존재할 뿐만 아니라 포화도 지수 n 역시 공극의 기하학적 구조 변화, 점토 함량, 공극의 굴곡 특성, 지층압력, 습윤성 등에 의해 변하기 때문에 적용에 한계가 있음을 밝히고 저류암 환경과 동일한 환경에서 포화도 지수 n 을 얻어 식 (3)을 검증하였으며, 식 (3)에 사용된 계수 b 를 ‘포화 분포 계수(saturation distribution factor)’로 지칭하였다. 식 (3)을 사용할 경우 RI vs. S_w 의 회귀 직선이 원점을 지나지 않는 경우도 고려할 수 있게 되었으며, RI 축의 절편 ‘ b ’를 통하여 공극 구조, 공극수 분포, 습윤성 등도 고려할 수 있게 되었다. 비록 식 (3)을 이용하여 전기비저항에 미치는 일부 영향이 고려되긴 했지만 포화도 지수 n 을 직선의 기울기로부터 구하기 때문에 많은 선행 연구자들이 지

적한 ‘포화도 지수 n 은 상수가 아니며, 물 포화도에 따라 변한다’는 문제(Swanson, 1985; Givens, 1986; Rasmus, 1986; Longeron *et al.*, 1989; Longeron, 1990; Worthington and Pallatt, 1992)는 여전히 해결되어야 할 과제로 남아 있었다.

Montaron (2007)은 저류암의 습윤성을 고려하면서 동시에 포화도 지수 n 이 물 포화도에 따라 변하는 현상을 설명할 수 있는 ‘연결성 방정식(connectivity equation)’을 다음과 같이 제안하였다.

$$RI = \left(\frac{1 - S_c}{S_w - S_c} \right)^\mu \quad (4)$$

여기서 S_c 는 임계 물 포화도를 나타내며, 지수 μ 는 전도성 지수를 나타낸다. $S_c = 0$, $\mu = n$ 인 경우 식 (4)는 Archie의 경험식 (2)와 같으나, 이 식에서 S_c 를 고려함으로써 공극 구조 내에서의 물의 연결 효과를 반영할 수 있다.

이밖에도 물 포화율과 전기비저항의 상관관계를 밝히기 위해 물 포화율 뿐만 아니라 공극 구조, 공극수의 분포 및 전기비저항, 온도, 압력의 변화, 습윤성 등 다양한 물성에 따른 전기비저항 변화에 관한 많은 선행 연구가 발표되었다(Grattoni and Dawe, 1995; Keller, 1953; Lee and Lee, 2008; Lewis *et al.*, 1988). 선행 연구들에 의하면 Archie 경험식은 제한된 조건 하에서 도출되었으며, 포화도 계수 n 은 여러 물성 요인들에 의해 영향을 받으나, 공극 구조, 습윤성, 외부 및 경계 조건 등 많은 요인들이 고려되지 않아 적용에 한계가 있음을 알 수 있다.

국내의 연구는 외국에 비해 활발한 편은 아니다. Park (2004)은 농도가 다른 NaCl용액으로 공극을 포화시킨 후 전기비저항을 측정하고, 그 결과를 기존의 경험식과 비교한 결과 Archie의 경험식은 glass beads와 세립분의 함량이 5% 이하인 흙 시료에 대해 잘 일치하나, 그 외의 시료에는 잘 일치하지 않음을 보였다. Lee and Lee (2009a, 2009b)는 항온 항습 환경에서 시멘트 시험편의 무게와 전기비저항을 측정해 함수율에 대한 전기비저항의 변화를 변형된 Archie 경험식으로 설명했으며, 또한 기존의 병렬저항모델에 함수율을 포함시킨 변형된 병렬저항모델의 적용 가능성을 제시하였다.

이상의 연구에서 보듯이, 전기비저항 지수 n 은 물 포화율, 공극 구조, 습윤성, 공극수의 분포 및 전기비저항, 압력 및 온도조건, 포화 방법 등 여러 요인들에 의해 달라지므로 전기비저항측정 자료로부터 정확한 물 포화도 또는 탄화수소 포화도를 산출하기 위해서는 최소한의 계수 또는 지수를 사용하는 수정된 Archie 경험식의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 선행 연구를 통하여 제시된 전기비저항 모델을 통합한 수정 Archie 경험식을 제시하고자 한다. 수정 Archie 경험식은 물 포화도 S_w 를 산출하기 위하여 전기비저항 지수 RI , 전도성 지수 μ , 임계 물 포화도 S_c , 포화 분포 계수 b 등 4개의 변수를 사용한다. 또한 수정 Archie 경험식을 일반

화하여 적용성을 검증하기 위해서 임의의 다공성 암석 시료를 대상으로 전기비저항 모니터링 시스템(Lee and Lee, 2008)을 구축하여 물 포화도에 따른 전기비저항의 변화를 측정하고 분석하였다.

Archie 경험식 사용에 따른 문제점

Archie의 경험식은 다음과 같은 몇 가지 가정을 내포하고 있다(Longeron *et al.*, 1989).

(1) 지층 비저항계수(F)와 공극률(ϕ) 그리고 전기비저항 지수(RI)와 물 포화율(S_w)은 1:1의 관계를 갖는다. 그러나 공극수로 포화된 다공성 매질에서 전기의 흐름은 고체 입자 표면의 불규칙성에 의해 영향을 받으므로 유체 통로나 공극의 반경 등이 고려되어야 한다. 또한 매질 내에서의 유체의 포화도 뿐만 아니라 유체의 분포도 고려되어야 한다.

(2) 포화도 지수 n 은 주어진 다공성 매질과 유체에서 상수(constant)이다.

(3) 다공성 매질과 자연 상태에 놓여 있는 오일은 완전한 절연체이다. 또한 Archie 경험식에 사용되는 각종 계수 및 지수들은 실험실 조건 하에서 얻어지는데 이 값들은 저류층의 조건 하에서 얻어지는 값들과 같을 것으로 가정한다.

이 밖에도 Archie의 경험식은 점토 성분이 없는 청결 사암이 NaCl 농도가 15% 이상의 고농도의 염수를 함유하고 있는 경우 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다.

따라서 탄산염암과 점토질 사암 등의 암석 등에 Archie의 경험식을 적용하기 위해서는 그에 맞는 계수들을 따로 구해야 하는데, 최근에는 저류층의 온도와 압력 환경에서 코어 시료와 지층수의 전기적 물성분석을 통해 얻는다(Ara *et al.*, 2001; Jing and Archer, 1991; Longeron, 1990).

그러나 이렇게 정밀하게 구한 각종 계수들도 Archie의 경험식에 대입하여 사용하는 경우 크게 두 가지 문제점을 안고 있다. 즉, RI vs. S_w 를 log-log 그래프에 표시할 경우 원점을 지나는 회귀 직선으로만 분석이 가능하여 (1) 곡선 상으로 표현되는 값들을 정확히 대변할 수 없으며, (2) RI vs. S_w 관측치에 대한 회귀 분석 결과 원점을 지나지 않는 직선으로 나오더라도 강제로 원점을 지나는 식에 적합(fitting) 시켜야 하는 문제점을 안고 있다.

Fig. 1은 Kumar *et al.* (2011)이 Fontainebleau 사암($\phi = 13.5\%$, $\kappa = 1,800$ mD)으로 실험실에서 측정된 물 포화도에 따른 전기비저항 지수 RI 의 변화(과란 원)와 3D μ -CT (micro-computer tomography) 자료를 이용해 유한요소법으로 모사하여 얻은 결과(빨간 사각형)를 보여주고 있다. 동일한 시료를 대상으로 하였지만 실내실험 결과와 모의실험 결과를 비교해 보면, 물 포화도 약 70% 이상에서는 두 RI 값이 상당히 일치하고 있지만 물 포화도가 감소함에 따라 두 값의 차이는 점차 커지는 것을 볼 수 있다.

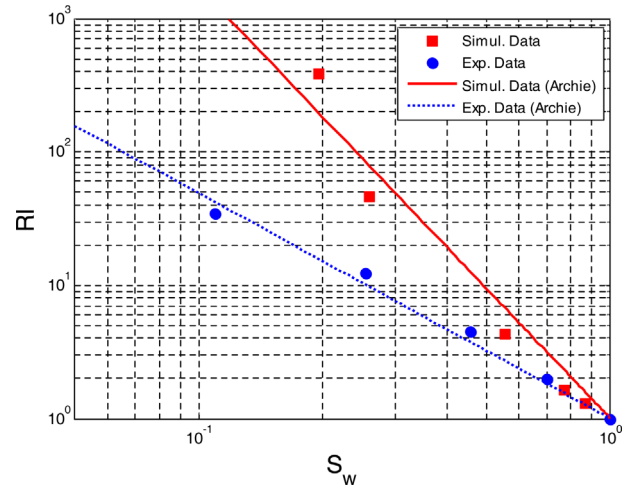


Fig. 1. RI vs. S_w for a sample of Fontainebleau sandstone (Kumar *et al.*, 2011).

상온, 상압, 물-습윤 상태 하에서 수행된 실내실험 결과, 물 포화도가 작은 경우 $n < 2$ 를 보이며, 물 포화도가 작아짐에 따라 회귀 직선의 기울기가 감소(n 값 감소)하는 경향을 보인다. 실내실험 결과에 Archie의 경험식을 적용시키면 그림에서 보는 바와 같이 약 $n = 1.69$ 가 얻어진다.

동일 시료에 대한 모의실험 결과 $n > 2$ 를 보이며, 물 포화도가 작아짐에 따라 회귀 직선의 기울기가 증가(n 값 증가)하는 경향을 보인다. 모의실험 결과를 Archie의 경험식에 적용시키면 그림에서 보는 바와 같이 약 $n = 3.23$ 이 얻어진다.

이상의 두 자료에서 보듯이 RI vs. S_w 는 직선적이 추세를 따르기 보다는 곡선적인 추세를 보이므로 물 포화율을 정확하게 산출하기 위해서는 Archie의 경험식과 같은 회귀 직선보다는 회귀 곡선으로 곡선 적합을 하는 것이 필요할 것으로 보인다. 이 경우 Montaron (2007)이 제시한 식 (4)를 이용하면 곡선적 추세를 보이는 RI vs. S_w 에 대한 곡선 적합을 수행할 수 있으며, 물 포화도에 따라 변하는 포화도지수 n 을 구할 수 있다.

Fig. 2는 Ara *et al.* (2001)이 탄산염암을 대상으로 실험실에서 측정된 물 포화도에 따른 전기비저항 지수 RI 의 변화를 보여준다. 이들은 포화도 지수 n 을 산출함에 있어 물 포화도가 높은 구간, 중간 구간, 낮은 구간 등 3개 구간으로 나누어 3개의 n 값을 각각 제시하였다. 이들의 측정 결과를 하나의 Archie 경험식에 적용시키면 그림에서 보는 바와 같이 약 $n = 1.74$ 가 얻어진다. 그러나 이들의 측정결과를 직선 회귀분석하면 원점을 지나지 않는 직선이 얻어지는데, 이를 강제로 원점을 지나도록 회귀 분석함으로써 RI 를 이용한 물 포화도 산출에 오차가 발생하게 된다. 따라서 측정 자료의 본질을 최대한 반영하기 위해서는 Archie의 경험식과 같이 원점을 지나지 않는 직선으로 회귀 분석하는 것보다는 원점을 지나지 않는 직선으로 회귀 분석하는 것이 더 타당한 것으로 보인다. 이런 점에 착안하여 Ara *et al.* (2001)은 RI vs. S_w 의 회귀 직선이 원점을 지

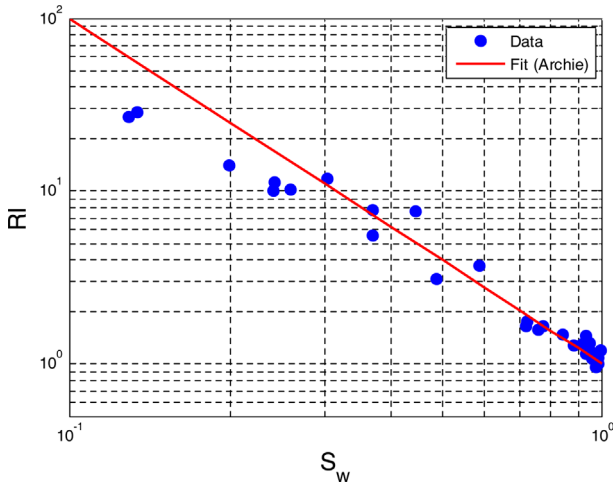


Fig. 2. RI vs. S_w plot obtained from a carbonate rock sample (Ara *et al.*, 2001).

나지 않는 경우를 고려할 수 있도록 앞서 기술한 바와 같이 식 (3)을 제안하였다.

수정 Archie 경험식

수정 Archie 경험식의 제안

앞서 제기한 Archie 경험식이 안고 있는 두 가지 문제점을 동시에 해결하고자 Ara *et al.* (2001)의 수정식과 Montaron (2007)의 연결성 방정식을 통합한 다음과 같은 수정 Archie 경험식을 제안하고자 한다.

$$RI = b \left(\frac{1 - S_c}{S_w - S_c} \right)^\mu \quad (5)$$

여기서 b 는 포화 분포 계수로서 Archie 경험식 (2)의 분자 1을 대체하는 변수 계수이며, S_c 는 임계 물 포화도를, μ 는 전도성 지수를 각각 나타낸다. RI vs. S_w 를 log-log 축에 표시할 경우 회귀식이 원점을 지나지 않을 경우 $b \neq 0$ 인 값을 갖게 되며, $S_c > 0$ 인 경우 물 포화도 감소에 따라 위로 휘는(bend upward) 곡선을, $S_c = 0$ 인 경우 직선을, $S_c < 0$ 인 경우 아래로 휘는(bend downward) 곡선을 각각 나타낸다. 따라서 $b = 1$, $S_c = 0$ 이면 원점을 지나는 직선을 나타내게 되며, 아울러 $\mu = n$ 인 경우에는 식 (2)와 동일하게 되어 Archie의 경험식이 갖는 근본적인 가치는 유지된다고 볼 수 있다.

식 (5)를 물 포화도 산출식으로 다시 쓰면

$$S_w = S_c + (1 - S_c) \left(\frac{b}{RI} \right)^{1/\mu} \quad (6)$$

과 같다. 이와 같이 수정 Archie 경험식을 이용하면 RI , μ , S_c , b 등 4개의 변수로부터 물 포화도 S_w 를 산출할 수 있으며, RI 는 전기비저항검층으로부터, μ , S_c , b 등의 계수는 코어 시

료를 이용한 실내실험으로 구할 수 있다. 수정 Archie 경험식은 공극 구조, 공극수 분포, 습윤성 등을 반영할 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 Archie 경험식이 원점($S_w = 1$, $RI = 1$)을 지나며, n 값이 물 포화도와 상관없이 상수이어야 한다는 제한 조건을 동시에 해결할 수 있어 현장 적용성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

수정 Archie 경험식의 적용

수정 Archie 경험식의 장점은 RI vs. S_w 의 회귀식이 원점을 지나는 경우와 직선인 경우는 물론이고, 원점을 지나지 않는 경우와 곡선인 경우에도 적용이 가능하다. Fig. 1과 같이 RI vs. S_w 자료가 곡선의 경향을 보이는 경우 Fig. 3과 같이 수정 Archie 경험식을 이용하여 회귀분석하면 측정 자료를 더욱 잘 표현할 수 있는 회귀곡선을 얻을 수 있다. Kumar *et al.* (2011)의 실내실험 결과에 수정 Archie 경험식을 적용시키면 $\mu = 2.60$, $S_c = -0.19$, $b = 0.93$ 이 얻어지며, $R^2 = 1$ 로 거의 완벽한 결정계수를 보인다. 또한 이들의 모의실험 결과에 Archie의 경험식을 적용시키면 $\mu = 1.67$, $S_c = 0.17$, $b = 1.11$ 이 얻어지며, $R^2 = 1$ 로 이 역시 거의 완벽한 결정계수를 보인다.

Fig. 4는 $RI = 1 \sim 500$ 범위의 값에 대하여 Archie 경험식으로 구한 물 포화도, $S_{w(Archie)}$ 와 수정 Archie 경험식으로 구한 물 포화도, $S_{w(Mod. Archie)}$ 의 차이($S_{w(Archie)} - S_{w(Mod. Archie)}$)를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경험식 사이에는 대략 $-5 \sim 10\%$ 포인트의 물 포화도 차이가 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 2와 같이 RI vs. S_w 자료가 구간에 따라 기울기가 다르고, 원점을 지나는 직선으로 자료를 표현하기가 곤란한 경우, 수정 Archie 경험식을 이용하여 회귀분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 회귀분석 결과 $\mu = 1.68$, $S_c = -0.04$, $b = 1.32$ 를

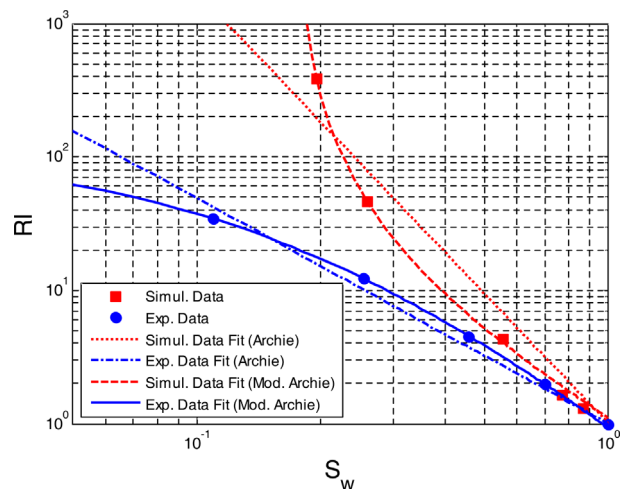


Fig. 3. Comparison of curve fittings for data obtained from experiment and numerical simulation by Kumar *et al.* (2011). Solid line and dashed line represent curve fittings with modified Archie's formula, while dotted line and dash-dot line represent curve fittings with conventional Archie's formula.

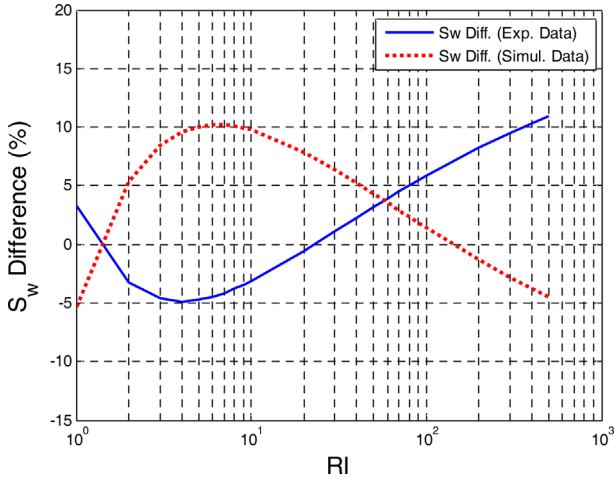


Fig. 4. Differences between S_w 's estimated by conventional Archie's formula and modified Archie's formula according to RI by using data obtained by Kumar *et al.* (2011).

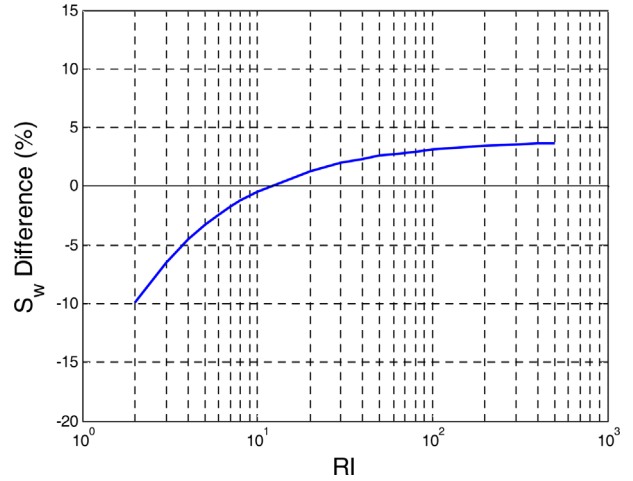


Fig. 6. Differences between S_w 's estimated by conventional Archie's formula and modified Archie's formula according to RI by using data obtained by Ara *et al.* (2001).

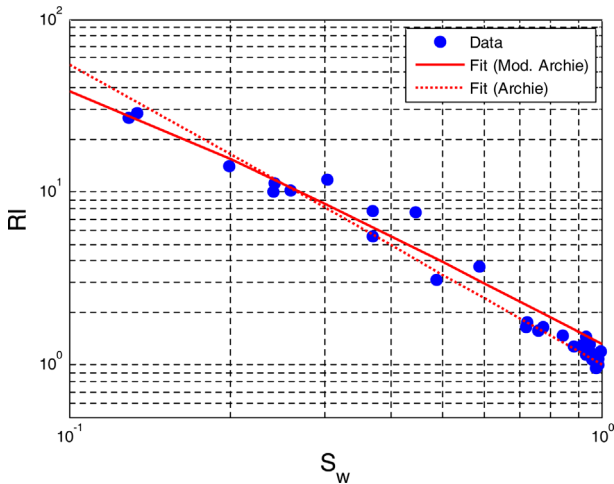


Fig. 5. Comparison of curve fittings for data obtained by Ara *et al.* (2001). Solid line represent curve fitting with modified Archie's formula, while dotted lines represent curve fitting with conventional Archie's formula.

얻을 수 있으며, $R^2 = 0.98$ 로 상당히 높은 결정계수를 보인다. Fig. 6은 $RI = 2 \sim 500$ 범위의 값에 대하여 Archie 경험식으로 구한 물 포화도와 수정 Archie 경험식으로 구한 물 포화도의 차이($S_{w(Archie)} - S_{w(Mod. Archie)}$)를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 두 경험식 사이에는 대략 $-10 \sim 3\%$ 포인트의 물 포화도 차이가 발생함을 볼 수 있으며, RI 값이 작은 경우 차이가 크게 발생하고 있다.

수정 Archie 경험식의 계수 산출

전기비저항검층 자료로부터 수정 Archie 경험식을 이용해 지층의 물 포화도를 산정하기 위해서는 식 (5) 사용에 필요한 각종 계수 b , S_c , μ 등을 실내실험을 통해 구해야 한다. 본 연구에서는 임의의 다공성 매질을 이용하여 이들 계수를 결정하고, 이를 통해 코어 시료가 채취된 지층에 대한 물 포화도를 산출하는 과정을 수행하여 제안한 Archie 경험식의 적용성을 검토하였다.

본 실험에 사용한 코어 시료는 Berea 사암으로 공극률은 18.01%, 투수계수는 145 mD이며, 직경 25.17 mm, 길이 35.98 mm로 가공하였다. 코어 시료의 XRF 분석결과는 Table 1에 기술하였으며 SiO_2 함량이 88% 이상을 보이고, 그밖에 Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 주성분으로 구성되어 있다.

코어 시료를 초순수($1.9 \mu S/cm @45^\circ C$)로 진공 수침을 한 후, 은 전극판이 부착된 코어 홀더에 삽입하고, $60^\circ C$ 의 온도에서 건조시키면서 저항과 무게 변화를 2-전극법으로 2분마다 동시에 측정하였다. 저항은 HIOKI사의 RM3544-01 저항측정기로 측정하였으며, 무게는 Satorius사의 CPA623S 전자저울을 이용하여 0.001 g의 정밀도로 측정하였다. 진공 수침 과정과 건조에 따른 저항과 무게 동시 모니터링은 Sai (2014)의 실험 방법대로 수행하였다. 측정된 저항은 코어시료의 단면적과 길이를 이용해 전기비저항으로 환산하였고, 물 포화도 S_w 는 건조시간 t 가 경과한 후 측정된 시료의 무게(M)와 건조무게(M_s), 포화무게(M_{sat})를 이용해 다음의 식 (7)로부터 구했다.

Table 1. Geochemical components of the core sample obtained by the XRF analysis.

Mineral composition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	MnO	P_2O_5
%	88.87	4.05	2.57	0.91	0.77	0.40	0.05	0.02

$$S_w = \frac{M - M_s}{M_{sat} - M_s} \times 100\% \quad (7)$$

여기서 $M_{sat} - M_s = M_w$ 로 공극수의 무게를 나타낸다.

전기비저항 지수 RI 는 건조시간 t 가 경과한 후 측정된 시료의 전기비저항 R_t 와, R_t 의 초기($t = 0$) 측정값(R_{t_0})을 건조 온도로 보정하여 구한 R_0 를 이용해 다음의 식 (8)로부터 구했다.

$$RI = \frac{R_t}{R_0} = \frac{R_t}{R_{t_0(@Drying Temp.)}} \quad (8)$$

식 (8)에서 건조 온도에서의 R_0 , 즉 $R_{t_0(@Drying Temp.)}$ 는 수침 온도에서의 R_0 , 즉 $R_{t_0(@Sat. Temp.)}$ 에 온도 보정식(Schlumberger, 1991)을 적용하여 다음과 같이 구했다.

$$R_{t_0(@Drying Temp.)} = R_{t_0(@Sat. Temp.)} \times \frac{Sat. Temp. (^{\circ}C) + 21.5}{Drying Temp. (^{\circ}C) + 21.5} \quad (9)$$

여기서, $Sat. Temp.$ 는 수침 온도를, $Drying Temp.$ 는 건조 온도를 각각 나타낸다. R_0 를 결정함에 있어서 온도 보정을 수행한 이유는 시료의 수침 온도(45°C)가 건조 온도(60°C)보다 낮음에 따라 R_0 가 측정 초기에 높게 측정되는 것을 보정하기 위함이다.

또한 본 실험에서는 코어 시료가 장착된 코어 홀더를 건조기 안에 넣고 시간에 따른 무게와 전기비저항 변화를 동시에 측정함으로써 외부의 환경적 요인에 의한 오차를 극소화 하는 등 측정값의 정확도를 높이는 방안을 강구하였다.

Fig. 7에 식 (7)과 (8)로부터 구한 S_w 와 RI 를 대비도표로 도시하고, 여기에 선행 연구에 의한 경험식(식 (2)~(4))과 수정 Archie 경험식(식 (5))을 이용한 곡선 적합을 함께 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 S_w 가 80% 이하인 경우 S_w 가 감소

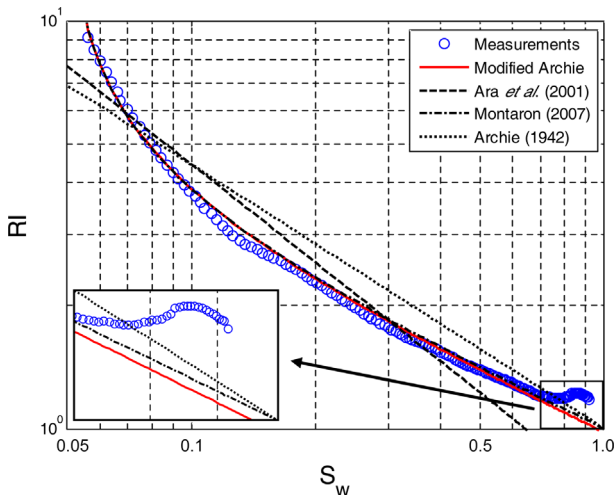


Fig. 7. Comparison of curve fittings on measurements of RI versus S_w . Plots of right bottom corner are magnified in the left bottom box.

Table 2. Comparison of curve fitting results.

Model	Formular and Coefficients	R^2
Archie (1942)	$RI = \frac{1}{S_w^n} = \frac{1}{S_w^{0.65}}$	0.8958
Ara <i>et al.</i> (2001)	$RI = \frac{b}{S_w^n} = \frac{0.7}{S_w^{0.80}}$	0.9294
Montaron (2007)	$RI = \left(\frac{1 - S_c}{S_w - S_c}\right)^\mu = \left(\frac{1 - 0.05}{S_w - 0.05}\right)^{0.46}$	0.9954
Modified Archie (This Study)	$RI = b \left(\frac{1 - S_c}{S_w - S_c}\right)^\mu = 0.98 \left(\frac{1 - 0.05}{S_w - 0.05}\right)^{0.47}$	0.9955

함에 따라 RI 는 점차 증가하는 것을 볼 수 있으며, 곡선은 상향으로 휘어져 S_w 가 약 5%로 떨어지면 RI 는 무한대로 발산하는 형태를 보인다. 이는 $S_w = 5\%$ 이하에서는 공극수 연결성이 끊어져 전기비저항이 급격히 증가하기 때문으로 생각되며, 이 값은 식 (5)의 임계 물 포화도 S_c 에 해당한다. 한편 곡선이 상향으로 휘어져 있으므로 S_c 의 부호는 (+)이다. 비록 S_w 가 약 80% 이상인 측정 초기에는 코어 시료의 표면과 내부의 온도차에 따른 열평형 상태가 불안정하여 RI 의 급격한 변화를 보이기는 하지만, S_w 가 1에 근접할 때 RI 역시 1에 근접할 것으로 예상된다. 이와 같은 정보는 RI vs. S_w 를 식 (5)로 곡선적합 시킬 때 초기값의 설정과 값의 범위를 설정하는데 요긴하게 사용될 수 있다. 즉, S_c 의 초기값을 0.05, 범위를 $0 < S_c < \infty$, b 의 초기값을 1, 범위를 $0 < b < \infty$ 로 설정하면 빠른 시간 내에 정확한 계수를 얻을 수 있다. 수정 Archie 경험식을 이용하여 곡선 적합한 결과 $\mu = 0.47$, $S_c = 0.05$, $b = 0.98$ 를 얻었으며, 결정계수는 $R^2 = 0.9955$ 로 상당히 높은 값을 보였다.

Table 2에 동일한 측정 자료에 대해 선행 연구에 의한 경험식들을 이용하여 구한 곡선 적합한 결과와 결정계수들을 비교하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 Archie의 경험식과 Ara *et al.* (2001)의 경험식은 log-log 축 상에서 직선으로 표현되기 때문에 곡선의 형태를 보이는 측정 자료를 곡선 적합하는 데 부적합한 것으로 보인다. 한편, Table 2에 기술한 바와 같이 수정 Archie 경험식의 계수 μ , S_c 는 Montaron (2007) 경험식의 계수와 거의 유사하며, 수정 Archie 경험식의 계수 b 역시 1에 근접한 값을 보이므로, 두 경험식에 의한 곡선은 S_w 가 약 80% 이상인 경우를 제외하고는 차이를 보이지 않을 정도로 중첩되어 나타난다. 두 경험식 사용에 따른 결정계수 또한 의미 있는 차이를 보이지 않는다. 그러나 곡선 적합으로 구한 곡선이 원점을 지나지 않고, 계수 b 가 1로부터 점차 멀어질수록 수정 Archie 경험식에 의한 곡선 적합이 더욱 유용할 것으로 예상된다.

결 론

Archie의 경험식을 이용해 전기비저항검층 자료로부터 청결 사암 및 탄산염암의 물 포화도를 산출함에 있어서 실내실험 및 모의실험 결과를 보다 정확하게 반영하기 위하여 기존의 수정식과 연결성 방정식을 결합한 새로운 수정 Archie 경험식을 제안하였다. 수정 Archie 경험식은 포화도 지수 n 이 물 포화도에 따라 변하는 경우와 RI vs. S_w 의 회귀곡선이 원점($S_w = 1, RI = 1$)을 지나지 않는 경우에도 적용이 가능한 장점을 지닌다. 또한 이 식은 선행 연구결과에서 보였듯이 기존의 Archie 경험식이 고려하지 못한 공극 구조, 공극수 분포, 습윤성 등에 의한 효과를 반영하고 있는 것으로 보인다. 특히, 본 연구에서 제안한 수정 Archie 경험식은 공극수의 비저항(R_w)이 매우 높은 환경에서도 적용성이 좋아 일반적으로 R_w 가 작은 석유가스 분야는 물론, R_w 값이 50 ~ 100 ohm-m인 국내의 일반적인 지하수환경에도 적용성이 좋을 것으로 기대된다.

일부 선행 연구결과 얻어진 RI vs. R_w 자료를 Archie 경험식과 수정 Archie 경험식을 이용하여 물 포화도를 산출한 결과 두 경험식 사이에 최대 ± 10% 포인트의 차이가 있음을 볼 수 있었다.

수정 Archie 경험식을 사용하기 위해서는 코어 시료에 대한 실내 실험을 통하여 μ, S_c, b 등 계수를 결정해야 하는데, 이들 계수는 코어 시료를 코어 홀더에 삽입하고 시간변화에 따른 무게와 저항을 동시에 측정하여 S_w 와 RI 를 우선 산출하고, 이들의 RI vs. S_w 대비도표로부터 회귀분석을 통하여 구할 수 있음을 제시하였다. 선행 연구에서는 S_w 와 RI 를 별도로 측정함에 따라 한 시료 당 기껏해야 5 ~ 20개의 RI vs. S_w 자료를 얻는데 비해서 본 연구에서는 시간변화에 따른 무게 및 저항 모니터링 방법을 사용함으로써 수십~수백 개의 자료를 연속적으로 얻을 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 수정 Archie 경험식에 사용되는 계수를 상온, 상압 하에서 시료의 건조과정을 통해 결정함으로써 액체상 오일이 포함된 지층의 실제 환경을 모사하지 못했으므로 후속 연구에서는 이에 대한 검토 및 추가 실험이 필요해 보인다. 또한 본 연구에서 사용한 공극수의 건조 온도에서의 비저항이 4,300 ohm-m로 높고 공극률도 약 18% 정도로 일정 조건에서 수행 된 결과로, 다양한 범위의 R_w 나 공극률에 따른 시험도 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술 지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(과제번호: 13 RDRP-B066470)에 의해 수행되었습니다. 또한 본 논문의 완성도를 높이기 위해 귀중한 시간을 할애하여 심사하여 주신 익명의 심사자분들께 고마움을 표합니다.

References

Anderson, W. G., 1986, Wettability literature survey-Part 3: The effects of wettability on the electrical properties of porous media, *Journal of Petroleum Technology*, 1371-1377.

Ara, T. S., Talabani, S., Vaziri, H. H., and Islam, M. R., 2001, In-depth investigation of the validity of the Archie equation in carbonate rocks, *SPE* 67204.

Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, **146**, 54-62.

Galiuk, H. S., Saadat, K., and Kazemzadeh, E., 2011, A case study of saturation exponent measurement on some carbonate cores at full reservoir conditions, *International Symposium of the Society of Core Analysts held in Austin, Texas, U.S.A.*, 18-21 September, 2011, SCA2011-42

Givens, W. W., 1986, Formation factor, resistivity index, and related equations based upon a Conductive Rock Matrix Model (CRMM), *Trans. SPWLA 27th Annual Logging Symposium*, Paper P.

Grattoni, C. A., and Dawe, R. A., 1995, Influence of fluid distribution upon electrical resistivity of partially saturated media, *SPWLA 36th Annual Logging Symposium, Paris, France*, June 26-29, 1995.

Grattoni, C. A., and Dawe, R. A., 1996, Electrical resistivity and fluid distribution of coexisting immiscible phases, *SCA Conference*, Paper No. 9625.

Jing, X. D., and Archer, J. S., 1991, Special core analysis considerations in the determination of electrical properties of shaly rocks at reservoir conditions, in Worthington, P. F., and Longeron, D., eds., *Advances in core evaluation II reservoir appraisal*, Gordon and Breach Science Publishers, Philadelphia, pp. 309-330.

Keller, G. V., 1953, Effect of wettability on the electrical resistivity of sand, *Oil and Gas Journal*, **51**, 62-65.

Koerperic, E. A., 1975, Utilization of Waxman-Smits equations for determining oil saturation in a low-salinity, shaly sand reservoir, *Journal Petroleum Technology*, **27**, 1204-1208.

Kumar, M., Senden, T. J., Sheppard, A. P., Arns, C. H., and Knackstedt, M. A., 2011, Probing the Archie's exponent under variable saturation conditions, *Petrophysics*, **52**, pp. 124-134.

Lee, S. K., and Lee, T. J., 2008, Electrical resistivity versus water contents of core samples from a geothermal borehole in Pohang, Korea, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, **45**, 526-535.

Lee, S. K., and Lee, T. J., 2009a, Characteristics of electrical resistivity of cylindrical cement core with respect to the conductivity and contents of pore water, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, **46**, 553-562.

Lee, S. K., and Lee, T. J., 2009b, Electrical resistivity of cylindrical cement core with successive substitution by electrolyte of different conductivity, *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, **12**, 328-337.

Lewis, M. G., Sharma, M. M., Dunlap, H. F., and Dorfman, M. H., 1988, Techniques for measuring the electrical properties

- of sandstone cores, *The 63rd Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE No. 18178,
- Longeron, D. G., Argaud, M. J., and Feraud, J. P., 1989, Effect of overburden pressure and the nature and microscopic distribution of fluids on electrical properties of rock samples, *SPE Formation Evaluation*, **4**, 194-202.
- Longeron, D. G., 1990, Laboratory measurements of capillary and electrical properties of rock samples at reservoir conditions: Effect of some parameters, *CSA Conference*, Paper Number 9023.
- Montaron, B., 2007, A quantitative model for the effect of wettability on the conductivity of porous rocks, *The 15th SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Bahrain*, SPE No. 105041.
- Park, S. G., 2004, Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface, *Mulli-Tamsa*, **7**, 130-135.
- Rasmus, J. C., 1986, A summary of the effects of various pore geometries and their wettabilities on measured and in-situ values of cementation and saturation exponents, *Trans. SPWLA 27th Annual Logging Symposium*, Paper PP.
- Sai, F. L., 2014, *A study on the influence of water saturation on the resistivity index of water-wet porous sandstone*, MSc. Thesis, Dong-A University.
- Schlumberger, 1991, *Log Interpretation Chart*, Schlumberger Educational Services, U.S.A., p. 5.
- Swanson, B. F., 1985, Microporosity in reservoir rocks-Its measurement and influence on electrical-resistivity, *The Log Analyst*, **26**, 42-52.
- Worthington, P. F., and Pallatt, N., 1992, Effect of variable saturation exponent upon the evaluation of hydrocarbon saturation, *SPE Formation Evaluation*, SPE No. 20538. 331-336.