

토양 매설 배관의 음극방식과 환경인자 간의 상관관계

최승헌 · 원석연 · 유영란 · 김영식[†]

국립안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터 36729 경북 안동시 경동로 1375
(2022년 10월 21일 접수, 2022년 10월 26일 수정, 2022년 10월 27일 채택)

Relationship between the Cathodic Protection of Pipe Buried in Soil and Environmental Factors

S. H. Choi, S. Y. Won, Y. R. Yoo, and Y. S. Kim[†]

Materials Research Centre for Energy and Clean Technology, School of Materials Science and Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong, Gyeongbuk, 36729, Korea

(Received October 21, 2022; Revised October 26, 2022; Accepted October 27, 2022)

The external corrosion control of buried pipes can be achieved by a combination of coatings and cathodic protection to maximize effectiveness. One of the factors affecting cathodic protection is the environmental soil conditions. Because soil is a kind of electrolyte, the environmental conditions of soil may be changed by the atmospheric environment. Therefore, in this study, changes in environmental soil factors by atmospheric environmental factors were monitored. In cathodic protection, on-potential and off-potential were measured from December 2021 to July 2022. The effects of external environmental factors and soil environmental factors on cathodic protection were analyzed. Changes in outdoor temperature affected soil temperature, and soil conductivity had a proportional relationship with soil humidity, but outdoor humidity and precipitation did not significantly affect humidity and conductivity of the soil. In contrast, in cathodic protection, the on-potential was affected by temperature, humidity, the conductivity of the soil, and the anode used, but the off-potential was little affected by these factors.

Keywords: Buried pipe, Cathodic Protection, Temperature, Humidity, Conductivity

1. 서론

토양 중에 매설되어 있는 배관의 외면부식은 주로 토양 환경에 의하여 영향을 받는다. 부식은 환경과의 반응으로 인해 재료의 특성이 열화 되는 것으로 정의된다. 토양 부식은 많은 요인 및 변수들을 포함하는 복잡한 현상이다. 토양 부식에 영향을 미치는 인자는 부식성 토양, 이종 금속, 토양 환경 인자(습도, 비저항, 온도, 산소, 미생물 유무 등), 배관 피복의 상태, 그리고 미주전류 등을 고려할 수 있다. 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 노후화, 장기간 사용, 부적절한 유지보수로 인해 매설된 배관 또는 코팅의 열화가 일어나며 최종적으로 매설된 배관은 설계되었던 수명 전에 손상 및 누설 등으로 환경의 파괴 및 시스템의 기능상실 등으로 인해

심각한 피해를 줄 수 있다 [1]. 이러한 토양 부식으로 인한 매설배관의 손상을 방지하기 위해서는 일반적으로 배관 표면에 보호 물질인 피복 및 코팅을 행하며, 배관에서 토양으로의 양극 전류 흐름을 방지하기 위하여 음극방식(Cathodic Protection)을 추가적으로 사용한다 [2-5].

음극방식은 금속의 전위를 인위적으로 음극화 함으로써 부식반응이 일어나는 전위 이하로 낮추어 양극 반응을 억제시키는 방법이다. 토양에 매설되어 있는 배관은 주로 음극 방식 중 하나인 외부전원법을 사용한다. 국제기준 등에서 방식을 위한 전위는 -0.85 V(CSE) 이하가 되도록 하고 있으며, 방식 전류가 흐르는 상태에서 토양 중에 있는 배관의 방식 전위(On-potential)와 방식 전류가 일시적으로 흐르지 않는 상태에서의 방식 전위(순간정전전위, Instant Off-potential) 등에 대한 기준을 규정하고 있다 [6,7]. 일반적으로 피복 및 음극방식의 성능을 알아보기 위해 여러 전기적 조사를 행한다 [8-10].

토양 부식과 마찬가지로 토양의 환경적인 변화에 따라 음극방식 조건이 달라지며, 이로 인하여 실제로 음

[†]Corresponding author: yikim@anu.ac.kr

최승헌: 석박사 통합과정, 원석연: 석사과정, 유영란: 전임연구원, 김영식: 교수

극방식 조건이 부적절한 설정으로 이어질 수 있다 [2,11]. 토양의 환경적 변화는 기후변화에 따라 영향을 받으며 그에 따라 특성이 달라진다 [12,13]. 토양의 환경적인 요인은 대표적으로 온도, 습도, 전도도 등으로 구분된다. 토양 온도의 경우, 기후 변화에 따라 토양 표면온도가 크게 변화되는 것을 확인할 수 있다 [14,15]. 또한, 토양 온도는 표면과 내부가 다르며, 표면의 경우에는 온도변화가 크게 있는 반면, 토양 내부는 온도변화가 적다 [16-18]. 토양의 수분함량에 따라서 음극방식 전압이 부적절하게 설정이 될 수도 있다. 토양의 수분함량은 주로 기후 변화에 따라 변화되지만, 토양의 종류에도 영향이 미친다 [19]. 토양은 일반적으로 특정 크기/입자 직경의 범위에 따라 이름이 지정되고 분류되며, 종류에 따라 토양 수분 흡수량이 다르다 [20].

대부분 음극방식을 진행하면 배관의 환경적 조건에 따라 방식 전위 기준을 설계하여 전압을 설정해준다. 하지만 실제 환경 변화에 따라 동일한 방식 전압을 인가하였을 때, 배관의 전위 변화에 대한 연구는 보고되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 지표면으로부터 2.5 m 깊이에 매설된 폴리켄 피복 탄소강관에 대해 매립형 기준전극을 이용하여 정전압 방식을 행하고 실시간 모니터링을 통해 외부 환경 인자 및 토양의 환경 인자와 배관의 방식 전위의 변화에 대하여 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 매설배관 목업시험장 구축

Fig. 1은 시험장에 매설된 배관 및 토양 센서에 대한 음극방식 시스템 구성을 보여준다. 배관 매설 시 사용된 배관은 ASTM A106 Gr. B 규격을 만족하는 탄소강관을 사용하였으며 [21], 폴리켄(Polyken) 코팅을 하였다. 폴리켄 코팅된 탄소강 배관을 2.5 m 깊이에 매설하였다. 배관에 대한 음극방식은 Anode 1, 2, 3(Pt/Ti Anode) 또는 Anode 4, 5(MMO-Ti Anode)의 양극을 사용하였다. Anode 1, 2, 3은 겨울(12월부터 2월)에 사용하였으며, 나머지 봄(3월부터 5월), 여름(6월, 7월)은 Anode 4, 5를 사용하였다. 음극방식의 상태는 매설된 기준전극인 포화황산동 전극(CSE, Cu/CuSO₄)으로부터 실시간으로 모니터링 되었으며, 방식 배관의 On-Off-전위를 측정하기 위해 전류차단기가 설치되었다.

안동대학교 목업시험장의 토양에 대하여, ASTM G57 [22]에 의거하여 3개의 다른 지역에서 각각의 토양 비저항을 토양상자(soil box)를 이용하여 측정 후 평균하였다. 안동대학교 목업시험장의 평균 토양 비저항은 25.8 kΩ·cm이며, 전기전도도는 38.8 μS/cm이다.

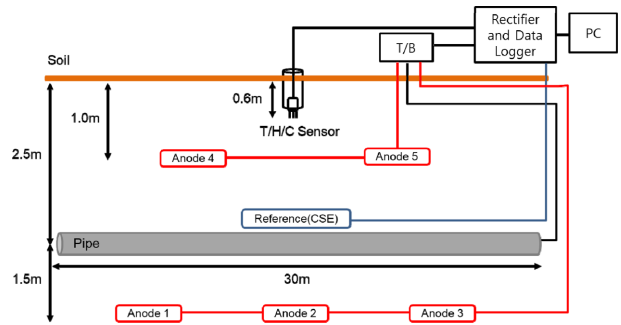


Fig. 1. Configuration of buried pipe and cathodic protection system in test bed

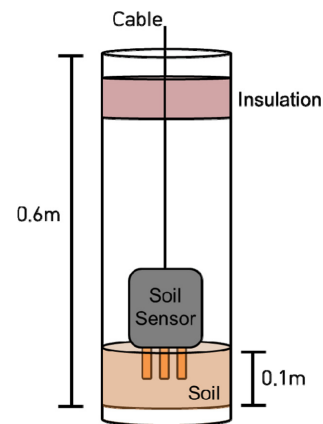


Fig. 2. Sensors embedded in the soil for temperature, humidity, and conductivity

2.2 음극방식 및 토양 환경 인자

Fig. 2는 탐상보호관(PVC pipe) 안에 토양으로부터 0.6 m 깊이로 매립된 온도, 습도, 전도도 센서를 보여준다. 토양 센서를 통해 토양 내부 환경인자 데이터를 얻었으며, 토양 센서를 포함한 탐상보호관 입구에는 단열재를 이용하여 수분이 빠져나가지 않도록 하였다. 음극방식의 경우, 정류기로부터 배관의 전위 값을 데이터로 거를 통해 실시간으로 측정 후, 온라인 프로그램에 저장하였다. 토양 환경 인자는 토양 온도, 토양 상대습도, 토양 전도도를 측정하였으며, 측정 주기는 하루에 4번 정기검사를 통해 측정하였다. 이렇게 측정된 토양 환경 인자는 평균하여 외부 환경 인자 및 배관전위와 비교하였다. 외부 환경 인자(외부 온도, 대기 중 상대습도)의 경우, 기상청 데이터를 이용하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 외기 기후 조건이 토양 환경 인자에 미치는 영향

Fig. 3은 겨울(12월, 1월, 2월), 봄(3월, 4월, 5월), 여름(6월, 7월)의 외기 온도와 토양 온도 간의 상관관계에

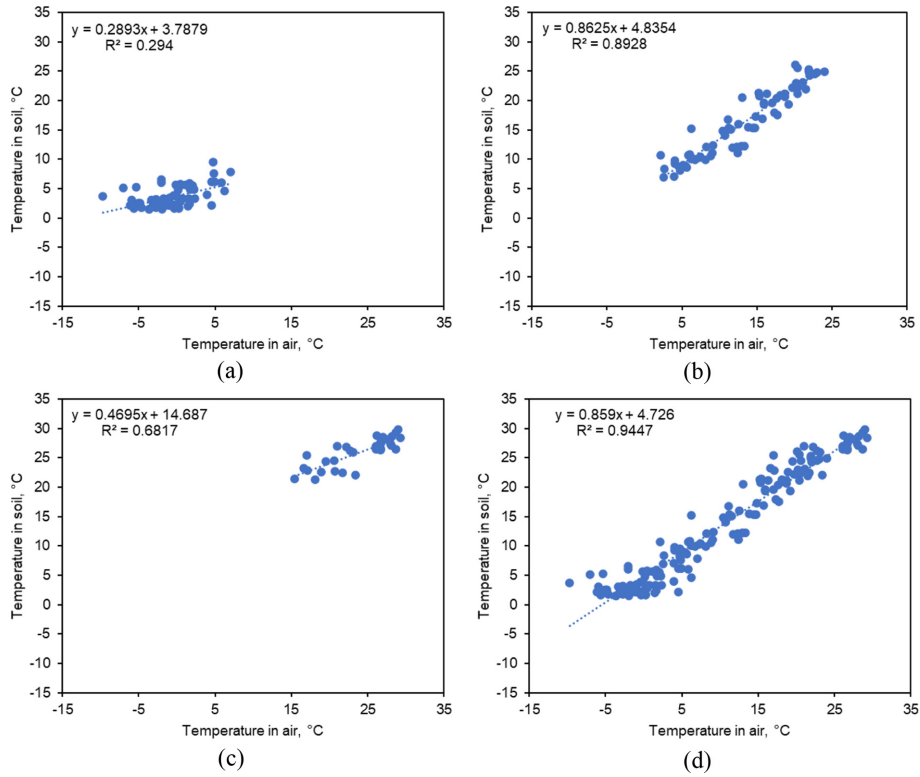


Fig. 3. Relationship between temperature in air and temperature in soil according to season; (a) Winter (Dec., Jan., Feb.), (b) Spring (Mar., Apr., May), (c) Summer (Jun., Jul.), (d) Total (Dec. ~ Jul.)

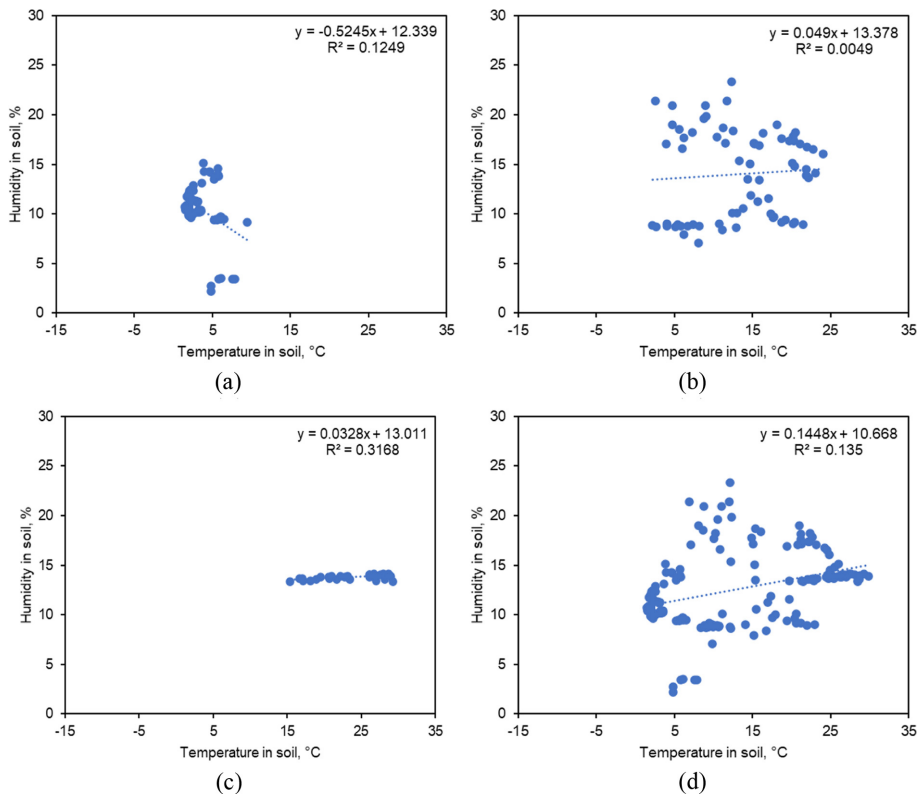


Fig. 4. Relationship between temperature in soil and humidity in soil according to season; (a) Winter (Dec., Jan., Feb.), (b) Spring (Mar., Apr., May), (c) Summer (Jun., Jul.), (d) Total (Dec. ~ Jul.)

관한 결과이다. 겨울의 경우(Fig. 3a), 외기 온도가 증가함에 따라 토양 온도도 다소 상승하였다. 또한 외기 온도는 영하임에도 불구하고 토양 온도는 항상 영상을 유지하였다. 봄(Fig. 3b)과 여름(Fig. 3c)의 경우, 외기 온도가 상승할수록 토양의 온도가 크게 상승하는 결과가 나타났다. 즉, 겨울에는 외기 온도에 따라 토양 온도의 상승이 크지 않았으나, 봄과 여름에는 외기 온도에 따라 토양 온도가 크게 영향을 받았다. Fig. 3d에 모든 데이터를 종합하여 나타낸 결과, 대기의 온도에 따라서 토

양의 온도가 직선적 관계를 보이고 있음을 알 수 있다 (여기서 유의하여야 할 점은 토양의 온도를 측정하는 센서의 깊이가 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 지상에서 60 cm의 깊이라는 점이다).

Fig. 4는 계절에 따른 토양 온도와 토양 상대습도 간의 상관관계에 관한 결과이다. 겨울의 경우(Fig. 4a), 외기 온도가 저하할수록 토양 중의 습도가 다소 증가하는 경향을 보이는데 이슬 맺힘 현상 등과 관련이 있어 보인다. 봄의 경우(Fig. 4b), 두 인자 간의 상관관계는 거

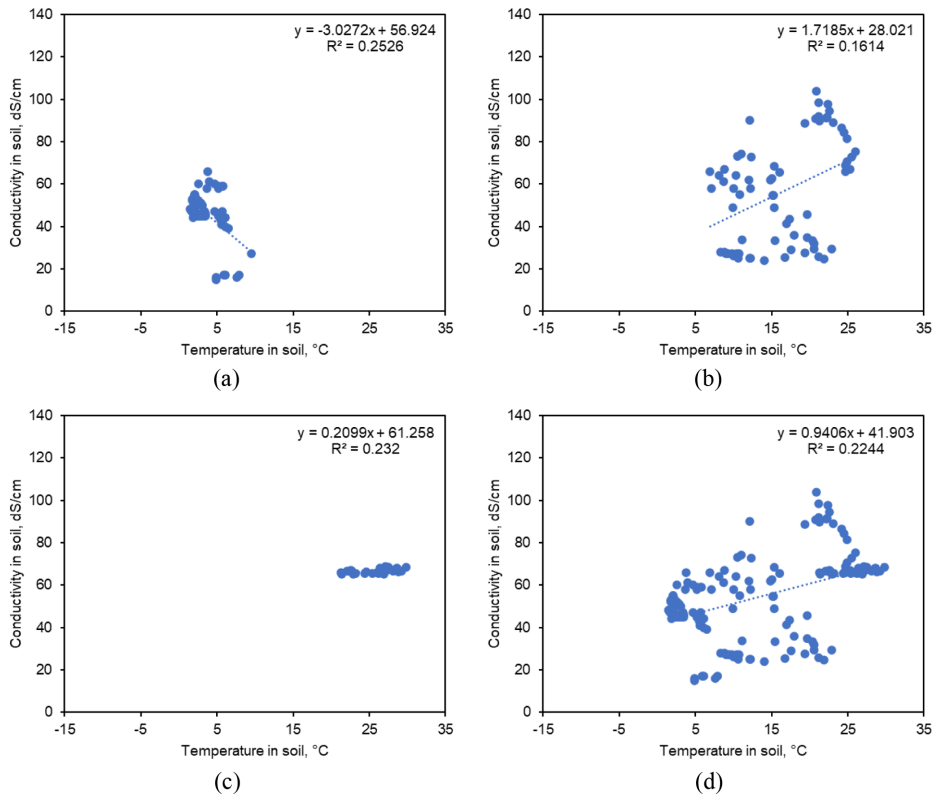


Fig. 5. Relationship between temperature in soil and conductivity in soil according to season; (a) Winter (Dec., Jan., Feb.), (b) Spring (Mar., Apr., May), (c) Summer (Jun., Jul.), (d) Total (Dec. ~ Jul.)

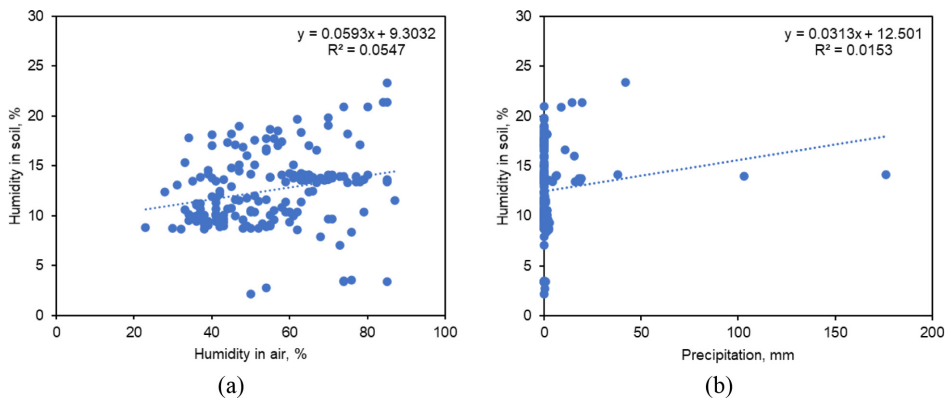


Fig. 6. Relationship between humidity in soil and (a) humidity in air / (b) precipitation

의 없는 산포를 보이고 있다. 여름의 경우(Fig. 4c), 외기 온도가 상승해도 토양의 습도는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 전체적인 결과를 보면(Fig. 4d), 토양 온도가 높아질수록 토양의 상대습도는 다소 증가하는 경향이나 산포가 매우 심해서 토양 온도와 토양 상대습도 간의 상관 관계는 거의 없는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 겨울(12월, 1월, 2월), 봄(3월, 4월, 5월), 여름(6월, 7월)의 계절에 따른 토양 온도와 토양 전도도 간의 상관관계에 관한 결과이다. 겨울의 경우(Fig. 5a), 외기 온도가 저하할수록 토양 전도도가 다소 증가하는 경향을 보인다. 봄의 경우(Fig. 5b), 두 인자 간의 상관 관계는 거의 없는 산포를 보이고 있다. 여름의 경우(Fig. 5c), 외기 온도가 상승해도 토양의 전도도는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 전체적인 결과를 보면(Fig. 5d), 토양 온도가 높아질수록 토양의 전도도는 다소 증가하는 경향이나 산포가 매우 심해서 토양 온도와 토양 전도도 간의 상관 관계는 거의 없는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 토양의 습도와 외기 상대습도 및 강수량 간의 상관관계에 관한 결과이다. Fig. 6a는 외기 상대습도와 토양 상대습도에 관한 상관관계 결과이다. 외기 상대습도와 관계없이 토양 상대습도는 일정하지 않고 산포가 심한 결과가 나타났다. 이는 외기 상대습도가 토

양 상대습도에 직접적인 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. Fig. 6b는 외부 강수량과 토양 상대습도 간의 관계를 나타내고 있다. 토양 상대습도는 강수량이 거의 없을 경우에도 그 편차가 매우 크게 나타났으며, 강수량이 증가하면 토양 상대습도가 증가하는 경향을 보이기는 하지만 직접적 상관관계가 크지 않다. 이는 토양 자체의 성분 및 토질 차이에 의해 수분 함량 및 수분이 건조되는 시간이 달라지는 이유로 토양의 습도는 외부 습도에 의한 영향이 크게 없는 것으로 판단되었다.

Fig. 7은 겨울(12월, 1월, 2월), 봄(3월, 4월, 5월), 여름(6월, 7월)의 계절에 따른 토양 습도와 토양 전도도 간의 상관관계에 관한 결과이다. 겨울의 경우(Fig. 7a), 토양 중의 습도가 높을수록 토양의 전도도가 상승하는 것으로 나타났으며, 결정계수가 0.9087로 매우 높다. 봄의 경우(Fig. 7b), 토양의 습도와 토양의 전도도가 비례하는 관계이나 그 관계성이 다소 낮아졌다. 여름의 경우(Fig. 7c), 토양의 습도와 토양의 전도도 간의 상관관계가 매우 우수하게 나타났다. 전체적인 결과를 보면(Fig. 7d), 토양 습도가 상승할수록 토양 전도도는 비례적으로 증가하는 결과가 나타나고 있어 토양 습도가 토양 전도도에 대한 직접적인 영향인자라고 판단된다.

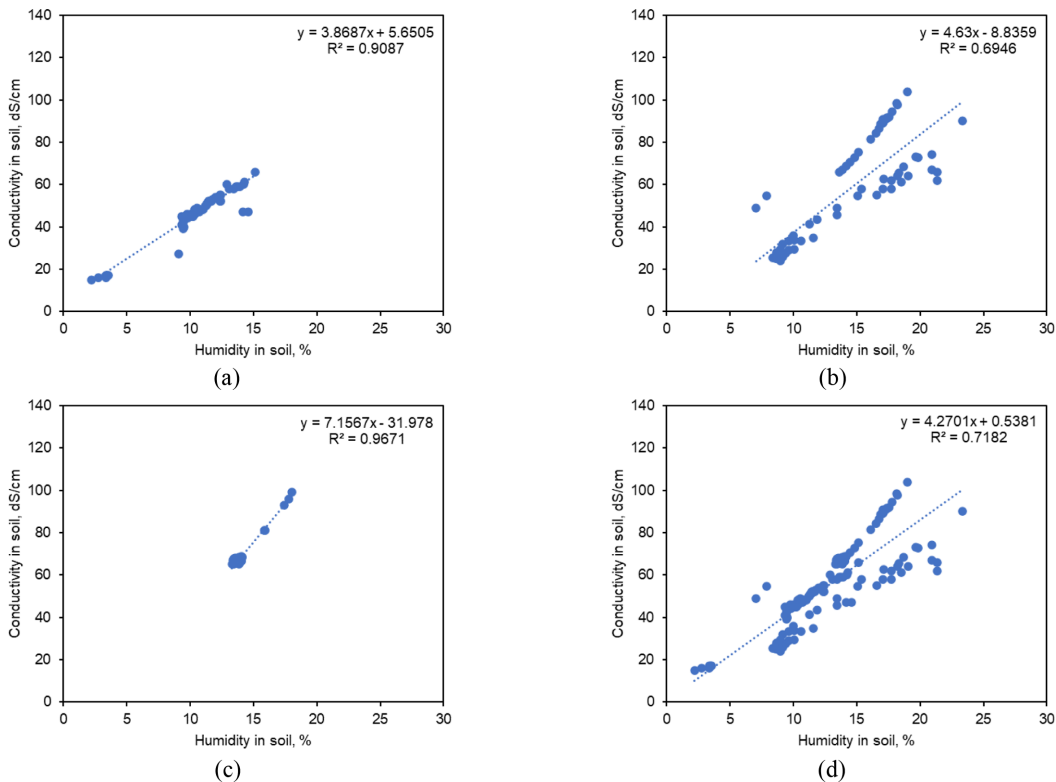


Fig. 7. Relationship between humidity in soil and conductivity in soil according to season; (a) Winter (Dec., Jan., Feb.), (b) Spring (Mar., Apr., May), (c) Summer (Jun., Jul.), (d) Total (Dec. ~ Jul.)

계절에 따라 토양 온도와 토양 전도도의 관계가 다른 이유는 토양의 상대습도 및 강수량에 의해 관계가 달라졌다고 판단된다. 토양 상대습도와 토양 전도도는 비례적인 관계를 가진다. 겨울에는 강수량 및 토양 습도가 적어 토양 전도도 또한 감소하는 결과가 나타났다고 판단된다. 봄과 여름의 경우에는 겨울에 비해 강수량이 증가하였으나, 여름의 경우 강수량이 가장 높지만 일조량 또한 커서 토양이 빠르게 건조되어 토양 상대습도 및 토양 전도도가 크게 변하지 않아 토양 온도가 높아져도 토양 전도도는 거의 일정하게 나타났다고 판단된다. 봄의 경우에는 여름에 비해 강수량과 일조량이 적으며, 또한 토양 온도도 낮아 토양의 건조가 비교적 느려 토양 온도에 따라 토양 전도도의 값이 매우 불안정하게 나타났다고 판단된다.

외기 기후 조건과 토양 환경 인자 간의 상관관계를 요약하면, 직접적 관련성이 있는 인자들은 외기 온도와 토양 온도 간의 관계 및 토양 습도와 토양 전도도 간의 관계이며, 상호 관련성이 부족한 인자들은 토양 온도와 토양 상대습도 간의 관계 및 토양 온도와 토양 전도도 간의 관계이다.

3.2 매설배관의 방식 전위에 미치는 토양 환경 인자의 영향

Fig. 8은 토양에 매설된 폴리켄 코팅 탄소강관(매설 깊이가 2.5 m)에 대한 겨울(12월, 1월, 2월), 봄(3월, 4월, 5월), 그리고 여름(6월, 7월)에 측정된 방식 전위(On-전위(On-potential) 및 Off-전위(Off-potential))를 보여주고 있다. 매설 깊이가 2.5 m인 탄소강관에 대해 음극방식을 적용한 결과, 모든 계절에서 비교적 일정한 Off-전위를 보이고 있는데, 대부분 -850 ~ -950 mV (CSE)의 범위 안에서 제어되고 있으며, 수소 취성의 위험성을 최소화 하였다.

Fig. 9는 토양 온도와 방식 전위에 관한 상관관계를 나타낸 결과이다. 음극방식에 사용된 양극은 겨울(12월부터 2월)에는 Anode 1, 2, 3을 사용하였으며, 봄(3월부터 5월)과 여름(6월, 7월)에는 Anode 4, 5를 사용하여 방식을 진행하였다. 점선으로 된 동그라미는 Anode 1, 2, 3을 사용하여 측정된 결과이다. On-전위의 경우(Fig. 9a), 모든 계절에 측정된 결과에서 토양 온도가 상승함에 따라 전위 또한 증가하는 결과가 나타났다. 하지만 이는 겨울 그리고 봄, 여름에 사용한 양극의 차이로 인해 방식 전압이 달라졌기 때문에 On-전위의 값이 다르게 나타난 것으로 보이며, 봄과 여름에는 토양 온도가 상승함에 따라 On-전위가 다소 감소하는 경향을 보인다. 반면에 Off-전위의 경우(Fig. 9b), 사용 양극의 차이에 따라서 방식 전압이 달라졌음에도 불구하고 일정한

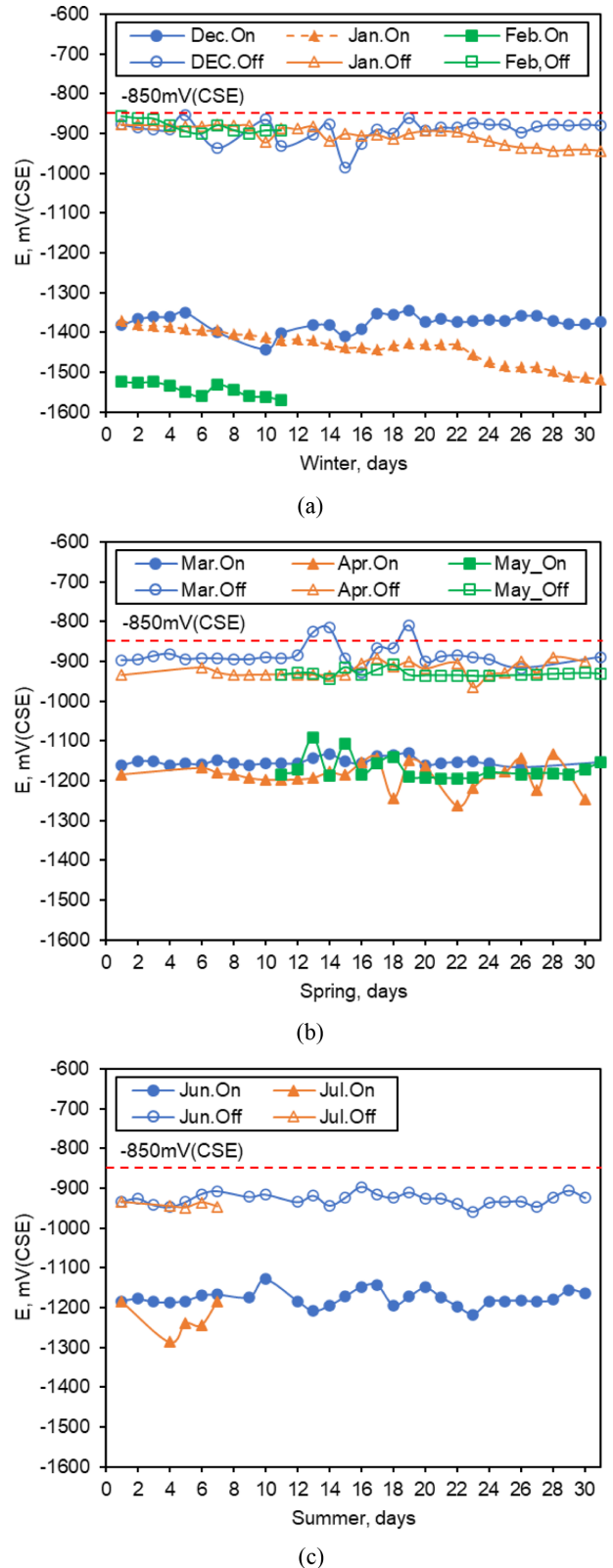


Fig. 8. On-potential (solid) and Off-potential (open) of polyken-coated pipe buried in 2.5 m (red dotted line means the criterion of cathodic protection of -850 mV(CSE)); (a) Winter (Dec., Jan., Feb.), (b) Spring (Mar., Apr., May), (c) Summer (Jun., Jul.)

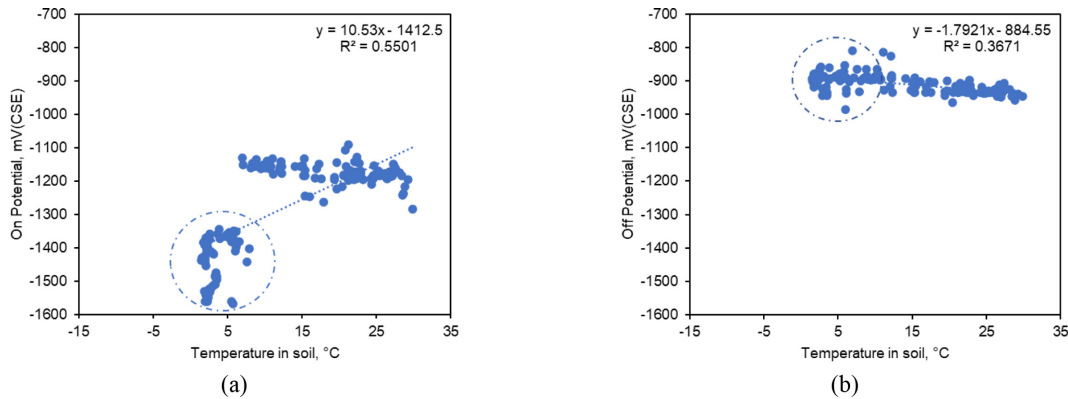


Fig. 9. Relationship between temperature in soil and cathodic potentials according to season (dotted circle means the potentials measured using Anode 1, 2, 3); (a) On-potential (Dec. ~ Jul.), (b) Off-potential (Dec. ~ Jul.)

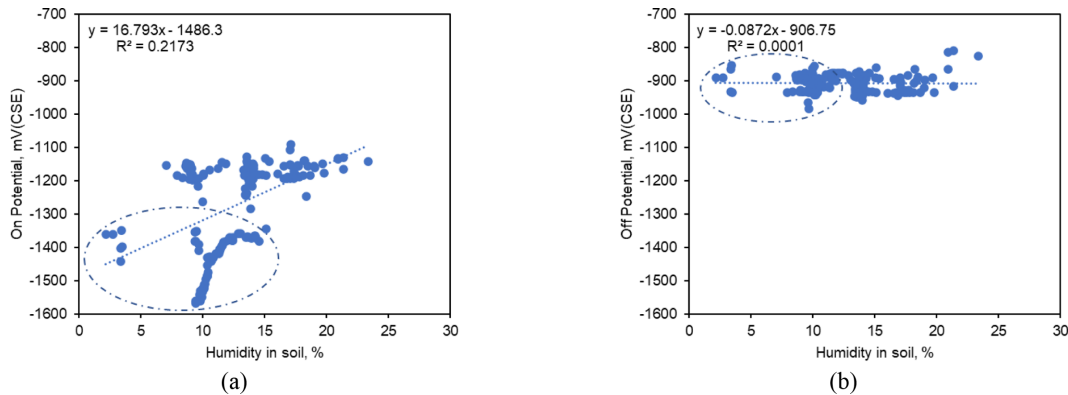


Fig. 10. Relationship between humidity in soil and cathodic potentials according to season (dotted circle means the potentials measured using Anode 1, 2, 3); (a) On-potential (Dec. ~ Jul.), (b) Off-potential (Dec. ~ Jul.)

분포를 가진 값이 나타났으며, 토양 온도가 상승하면 전위는 다소 감소하는 결과가 나타났다. 요약하면, 토양 온도 및 사용한 양극 위치에 따라 On-전위는 영향을 받지만, Off-전위는 크게 영향을 받지 않는다고 판단된다.

Fig. 10은 토양 상대습도와 방식 전위에 관한 상관관계 결과이다. 음극방식용 양극은 겨울(12월부터 2월)에는 Anode 1, 2, 3을 사용하였으며, 봄(3월부터 5월)과 여름(6월, 7월)에는 Anode 4, 5를 사용하여 방식을 진행하였다. 점선으로 된 동그라미는 Anode 1, 2, 3을 사용하여 측정된 결과이다.

토양 습도에 따라 On-전위의 경우(Fig. 10a), 전위 분포가 불규칙적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 겨울 그리고 봄, 여름에 사용한 양극의 차이로 인하여 방식 전압이 달라졌기 때문이다. 토양 습도가 증가함에 따라 On-전위는 겨울을 제외하면, 거의 일정한 결과가 나타났다. 하지만 겨울의 경우에는 습도가 낮아 On-전위 결과 값이 다소 불안정한 분포를 보인다. Off-전위의 경우(Fig. 10b), 사용 양극에 의해 방식 전압이 달라졌음에도 불구하고 토양 습도가 증가하여도 Off-전위는 계

결과 관계없이 거의 일정한 값이 나타났다. 따라서 토양 습도 및 사용한 양극 위치에 따라서 On-전위는 영향을 받지만, Off-전위는 크게 영향을 받지 않는다.

Fig. 11은 토양 전도도와 방식 전위에 대한 상관관계 결과이다. 음극방식용 양극은 겨울(12월부터 2월)에는 Anode 1, 2, 3을 사용하였으며, 봄(3월부터 5월)과 여름(6월, 7월)에는 Anode 4, 5를 사용하여 방식을 진행하였다. 점선으로 된 동그라미는 Anode 1, 2, 3을 사용하여 측정된 결과이다.

토양 전도도에 따라 On-전위의 경우(Fig. 11a), 다소 전위 값의 분포가 불규칙적으로 나타났다. 이는 겨울과 봄 그리고 여름에 사용한 양극의 영향으로 인하여 방식 전압이 달라졌기 때문이다. 토양 전도도가 증가함에도 불구하고 On-전위는 겨울을 제외하면, 거의 일정하게 나타났다. Off-전위의 경우(Fig. 11b), 토양 전도도가 증가함에도 불구하고 방식 전위는 계절과 관계없이 변하지 않고 일관성 있는 값이 나타났다. 따라서 토양 전도도 및 사용한 양극 위치에 따라 On-전위는 영향을 받지만, Off-전위는 거의 영향을 받지 않는다.

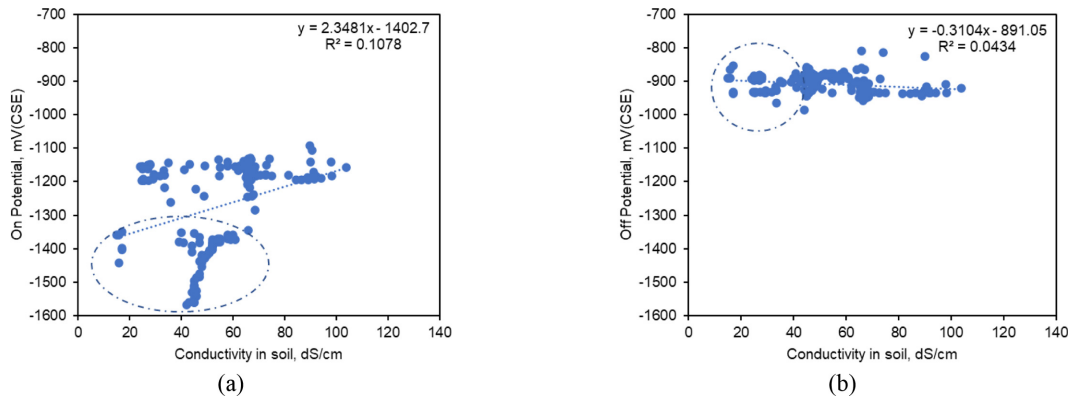


Fig. 11. Relationship between conductivity in soil and cathodic potentials according to season (dotted circle means the potentials measured using Anode 1, 2, 3); (a) On-potential (Dec. ~ Jul.), (b) Off-potential (Dec. ~ Jul.)

4. 결론

본 연구는 토양에 매설된 탄소강 배관(매설 깊이 2.5 m, 토양 비저항 25.8 kΩ·cm, 전기 전도도 38.8 μS/cm)에서의 음극방식에 미치는 외부 환경 인자와 토양 환경 인자의 영향에 대하여 분석하고 방식전위와의 상관관계를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 외기 기후 조건이 토양 환경 인자에 미치는 영향을 분석한 결과, 외기의 온도 변화는 토양 내부의 온도에 영향을 미치며, 토양의 전도도는 토양의 습도와 비례관계를 보이나, 외기의 상대습도 및 강수량은 토양의 습도 및 전도도 변화에 큰 영향을 미치지 않았다.

2) 음극방식 시 On-전위는 토양 온도, 토양 습도, 토양 전도도 및 사용 양극의 위치에 따라서 영향을 받지만, Off-전위는 이러한 인자들의 영향을 거의 받지 않았다. 따라서 토양 중의 매설배관에 대한 음극방식은 Off-전위를 기준으로 관리되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20217910100010).

References

1. N. Yahaya, N. M. Noor, M. M. Din and S. H. M. Nor, Prediction of CO₂ Corrosion Growth in Submarine Pipelines. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, **21**, 61 (2009). Doi: <https://doi.org/10.11113/mjce.v21.15778>
2. A. Osella and A. Favetto, Effects of Soil Resistivity on Currents Induced on Pipelines, *Journal of Applied Geo-*

- physics*, **44**, 303 (2000). Doi: [https://doi.org/10.1016/s0926-9851\(00\)00008-2](https://doi.org/10.1016/s0926-9851(00)00008-2)
3. J. G. Kim and Y. W. Kim, Cathodic Protection Criteria of Thermally Insulated Pipeline Buried in Soil, *Corrosion Science*, **43**, 2011 (2001). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00015-4)
4. I. Gurrappa, Cathodic Protection of Cooling Water Systems and Selection of Appropriate Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, **166**, 256 (2005). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.074>
5. E. S. Ibrahim, Corrosion Control in Electric Power Systems, *Electric Power Systems Research*, **52**, 9 (1999). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00133-3)
6. BS EN 12954, General Principles of Cathodic Protection of Buried or Immersed Onshore Metallic Structures (2019).
7. ISO 15589-1, Petroleum and Natural Gas Industries Cathodic Protection of Pipeline Transportation Systems (2003).
8. R. A. Gummow and P. Eng, GIC Effects on Pipeline Corrosion and Corrosion Control Systems, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **64**, 1755 (2002). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00125-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00125-6)
9. M. E. Orazem, The Close Interval Potential Survey (CIS/CIPS) Method for Detecting Corrosion in Underground Pipelines, *Underground Pipeline Corrosion, 1st ed*, p. 227, Woodhead Publishing, Cambridge (2014). Doi: <https://doi.org/10.1533/9780857099266.2.227>
10. Y. B. Cho, Y. T. Kho, S. Y. Li, K. S. Jeon, and K. W. Park, Coating Defects Survey on Buried Pipelines by Voltage Gradient Technique, *Journal of Corrosion Science Society of Korea*, **26**, 400 (1997). http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=J00260500400

11. F. M. Song, Predicting the Effect of Soil Seasonal Change on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Buried Pipelines at High pH, *Corrosion*, **66**, 095004 (2010). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3490309>
12. Z. Qin, A. Karnieli, P. Berliner, A Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM data and its Application to the Israel-Egypt Border Region, *International Journal of Remote Sensing*, **22**, 3719 (2001). Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>
13. D. Eleftheriou, K. Kiachidis, G. Kalmintzis, A. Kalea, C. Bantasis, P. Koumadoraki, M. E. Spathara, A. Tsolaki, M. I. Tzampazidou and A. Gemitzi, Determination of Annual and Seasonal Daytime and Nighttime Trends of MODIS LST over Greece - Climate Change Implications, *Science of the Total Environment*, **616**, 937 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.226>
14. C. E. Ki, Relationship between Air Temperature and Soil and Plant Surface Temperatures, *Journal of Climate Change Research*, **12**, 755 (2021). Doi: <https://doi.org/10.15531/kscrcr.2021.12.6.755>
15. Z. L. Li, F. Becker, Feasibility of Land Surface Temperature and Emissivity Determination from AVHRR Data, *Remote Sensing of Environment*, **43**, 67 (1993). Doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90065-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90065-6)
16. X. Yin, P. A. Arp, Predicting Forest Soil Temperatures from Monthly Air Temperature and Precipitation Records, *Canadian Journal of Forest Research*, **23**, 2521 (1993). Doi: <https://doi.org/10.1139/x93-313>
17. M. Bayatvarkeshi, S. K. Bhagat, K. Mohammadi, O. Kisi, M. Farahani, A. Hasani, R. Deo, Z. M. Yaseen, Modeling Soil Temperature using Air Temperature Features in Diverse Climatic Conditions with Complementary Machine Learning Models, *Computers and Electronics in Agriculture*, **185**, 106158 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106158>
18. M. A. Islam, R. Lubbad, S. A. G. Amiri, V. Isaev, Y. Shevchuk, A. V. Uvarova, M. S. Afzal, A. Kumar, Modelling the Seasonal Variations of Soil Temperatures in the Arctic Coasts, *Polar Science*, **30**, 100732 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100732>
19. A. M. E. Shamy, M. F. Shehata, A. I. M. Ismail, Effect of Moisture Contents of Bentonitic Clay on the Corrosion Behavior of Steel Pipelines, *Applied Clay Science*, **114**, 461 (2015). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.041>
20. M. N. Norhazilan, Y. Nordin, K. S. Lim, R. O. Siti, A. R. A. Safuan, M. H. Norhamimi, Relationship between Soil Properties and Corrosion of Carbon Steel, *Applied Sciences Research*, **8**, 1739 (2012). Doi: <https://www.researchgate.net/publication/259760804>
21. ASTM A106, Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service (2002).
22. ASTM G57, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner Four-Electrode Method (2012).