

전위구배법을 이용한 매설배관의 피복손상부 탐지(I)

조용범 · 박경완 · 전경수 · 송홍석 · 원덕수 · 이성민 · 고영태

한국가스공사 연구개발원

Coating Defects Survey on Buried Pipelines by Voltage Gradient Technique

Y. B. Cho, K. W. Park, K. S. Cheon, H. S. Song, D. S. Won, S. M. Lee, Y. T. Kho
R&D Center/Korea Gas Corporation 277-1, Il-Dong, Ansan, Kyunggi, Korea

The control of external corrosion on buried pipeline is achieved using a combination of a protective coating and cathodic protection. In principle, the coating system is the primary defence against corrosion, with cathodic protection applied to protect any minor coating defects. However the coating is sometimes damaged and as pipeline ages, the condition of the protective coating deteriorates. So it is important to locate coating defects. The locations of defects were investigated by examining the voltage gradient in the ground above a buried pipeline. In this article, three different methods are used to investigate the coating defects. Of these methods, DC pulse method is the most useful to investigate the coating defects.

1. 서 론

일반적으로 지하에 매설한 배관은 부식 방지를 위하여 배관 표면에 polyethylene과 같은 비전도성 물질을 피복하여 사용하며 실제 운전시에는 피복의 자연 손상을 고려하여 외부전원을 이용한 전기방식을 병행하여 사용하고 있다. 그러나 원치 않은 타시설물 공사 혹은 피복의 물성 변화 등으로 인한 피복손상이 발생하였을 때, 손상부위를 정확히 진단하여 이후에 나타날 지도 모르는 배관의 부식을 예방하여야 한다.

피복손상부위의 탐지 방법으로는 음극방식전류에 의해 형성되는 피복손상부 주위의 전위구배를 알아냄으로서 가능하다^{1,2)}. Fig. 1은 외부전

원을 이용한 음극방식의 기본설치와 pipe to soil 전위(이하 P/S전위라 한다)를 측정하는 원리를 나타내고 있다. 이때 음극방식전류는 배관 전체에 균일하게 흐르는 것이 아니고 금속 표면이 노출된 피복손상부위에 편중되어 흐르게 된다³⁾, 이는 손상부위의 토양에 대한 저항이 피복이 양호한 부분에 비하여 매우 작기 때문이다. 이로 인하여 손상부위 주위에는 전류밀도가 크게 되어 이 부분에 전류의 흐름에 의한 IR 형태의 전위구배가 생기게 되며, 손상부위가 없는 부분에서의 음극방식전류의 흐름은 매우 작기 때문에 전위구배는 무시할 만큼 작게 된다. 피복손상부위에서 형성되는 전위구배는 P/S전위를 측정하여 알아낼 수 있다. Fig. 2와 같이 음극방식이 시

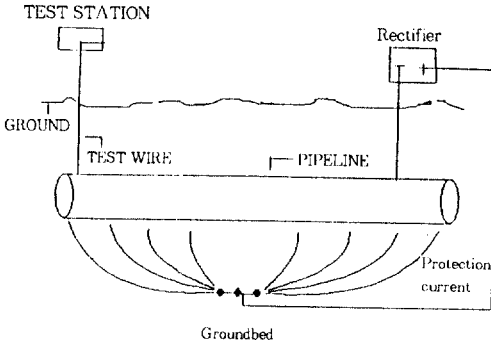


Fig. 1. Basic cathodic protection installation.

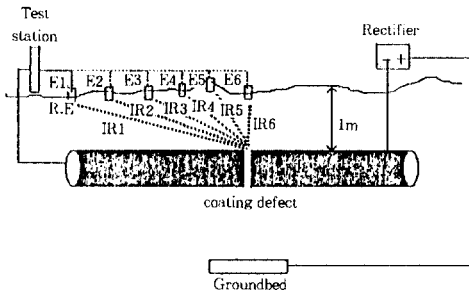


Fig. 2. Pipe to soil potential variation due to IR type potential of protection current in the presence of coating defect.

행되고 있는 배관에 피복손상부가 있을 경우 매설배관의 P/S전위를 측정한다고 하면, P/S전위는 다음과 같은 식으로 구성되어 있다⁴⁾.

$$E_{on} = E_0 + E_p + E_s = E_0 + IR_p + IR_s$$

여기서 E_{on} = 방식전류가 흐를때의 P/S전위 (이하 전위라 함은 Cu/CuSO₄ 전극을 기준으로 한다),

E_0 = natural potential,

E_p = electrochemical polarization,

E_s = voltage drop in soil,

R_p = polarization resistance,

R_s = soil resistance,

I = constant protective current

즉, 측정된 P/S전위 값은(E_{on}) 기준 전극의

위치에 따라 IR drop의 영향으로⁵⁾ 피복손상부 직상에서 가장 큰 P/S전위를 나타내며 피복손상부에서 멀어질 수록 작은 값을 나타낸다 ($E1 < E2 < E3 < E4 < E5 < E6$). 이와 같이 피복손상부 주위에는 방식전류가 편중되게 흐름에 따라 전위구배가 생기게 되는데⁶⁾ 이러한 전위구배를 실측한 결과를 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다.

Fig. 3은 길이 4m, 관경 5cm의 polyethylene 피복강관의 중간 지점 (2m 지점)에 인위적으로 10cm 폭으로 피복을 벗겨 놓은 상태로 매설한 후에 음극방식전류를 변화 시키면서 배관주위에 형성되는 등전위선을 나타내고 있다. 가로축은 배관직상부에서의 길이를 나타내며 세로축은 지표면에서 배관의 수직방향으로의 길이를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 피복손상부 주위에는 전위구배가 나타나고 있으며 음극방식전류가 커질수록 이러한 전위구배는 커지고 있다. Fig.4는 Fig.3의 (c)일 경우에 배관주위에 형성되는 P/S전위를 나타내고 있는데 피복손상부에서 가장 큰 값을 갖는 형태로 전위구배가 형성되고 있고, 같은 음극방식전류 상태에서는 배관의 수직 방향으로 멀어질수록 전위구배가 작아지고 있다. 이상에서 알 수 있듯이 음극방식 상태하에서는 피복손상부 주위로 전위구배가 형성되므로 이를 정확히 측정할 수 있다면 피복손상부 위치를 찾을 수 있는 것이다. 본 연구에서는 피복손상부 주위에 형성되는 전위구배를 측정함으로써 손상부 위치를 탐지해내는 제방법들에 대하여 각각 현장에 적용하여 보고, 적용시 문제점들을 비교 분석해보고자 한다.

2. 실험 방법

실험은 전위구배를 측정할 수 있다고 생각되는 3가지 방법으로 수행하였다.

2.1 모의 실험용 배관의 매설

피복손상부의 위치를 탐지하기 위하여 실험용

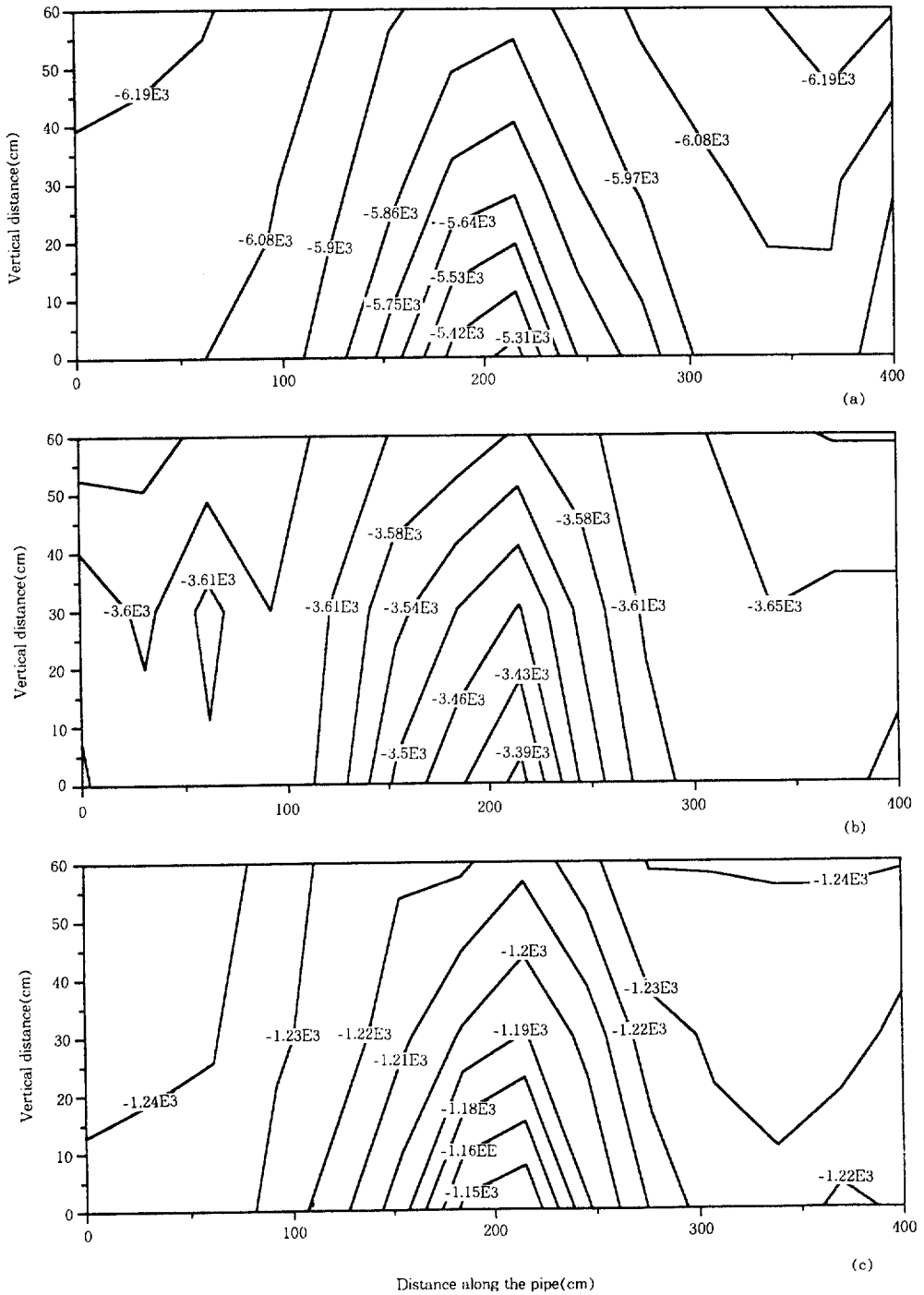


Fig. 3. Equipotential lines around pipeline including coating defect under the presence of protection current (a) 32.5mA, (b) 18.3mA, (c) 3.7mA.

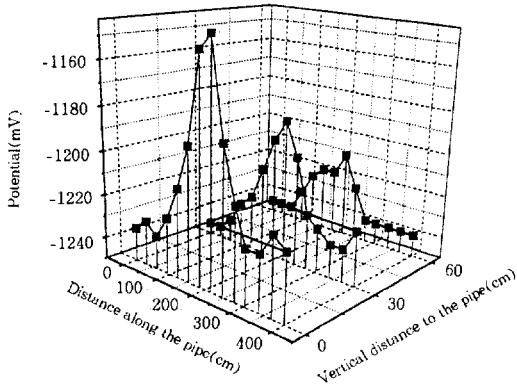


Fig. 4. Potential variation With distance along the pipe and vertical distance from top of pipe.

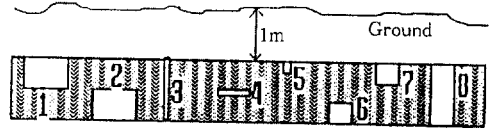
배관을 매설하였는데, 배관의 크기는 길이 48m, 관경 5cm로서 관 표면은 polyethylene으로 피복되어 있으며 매설깊이는 1m로 하였다. 피복손상부위는 Fig.5와 같이 최초 3m 지점에서 6m 간격으로 8가지 종류의 크기(1cm²~600cm²)와 위치로 인위적으로 피복을 벗겨 놓은상태로 매설하였다.

2.2 One electrode method

이 방법은 Fig.6과 같이 외부전원식 음극방식이 수행되고 있는 실험용 배관에 대하여 피복손상부에 형성되는 전위구배를 배관직상부를 따라 포화황산동 전극을 이용하여 1m 간격으로 P/S 전위를 측정하여 알아 보았다. 이 경우 손상부위의 전위구배를 변화시키기 위하여 test box에서의 P/S전위를 -1000mV, -3000mV로 변화시키며 실험하였다. 이 방법의 경우 손상부에 가까워질 수록 P/S전위값이 커졌다가 손상부 지점을 지남에 따라 P/S전위값이 작아지게 되는데 바로 이 지점이 손상부위치가 되는 것이다.

2.3 Two electrode method

이 방법은 Fig.7과 같이 손상부주위에 형성되는 전위구배를 P/S전위를 측정하여 알아내는 것이 아니고 두개의 기준전극 사이에 전위차계



| 손상부 번호 | 손상부 위치 | 손상부 크기 |
|--------|-----------------|--------------------|
| 1 | 45m, 배관상부 지점 | 100cm ² |
| 2 | 39m, 배관하부 지점 | 100cm ² |
| 3 | 33m, 배관과 수직인 옆면 | 18cm ² |
| 4 | 27m, 배관과 평행한 옆면 | 18cm ² |
| 5 | 21m, 배관상부 지점 | 1cm ² |
| 6 | 15m, 배관하부 지점 | 10cm ² |
| 7 | 9m, 배관상부 지점 | 10cm ² |
| 8 | 3m, 배관둘레로 벗기 | 600cm ² |

Fig. 5. Experimental pipeline with various simulated defects.

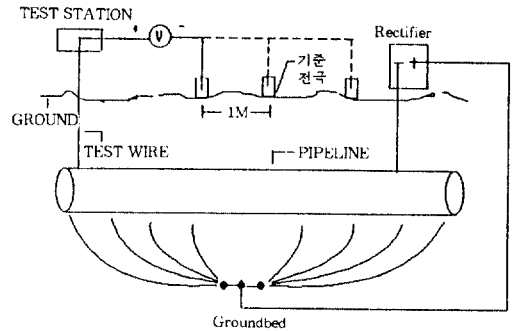


Fig. 6. Coating defect survey by one electrode method.

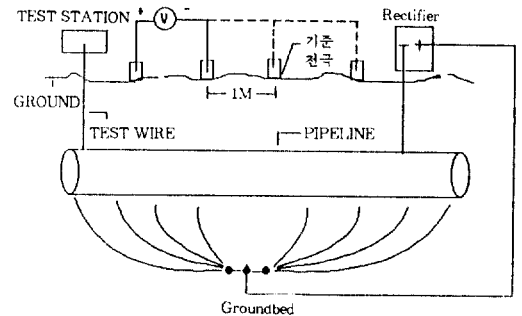


Fig. 7. Coating defect survey by two electrode method.

를 연결한 후(두 전극사이의 거리는 보통 1m) 두 전극을 1m씩 배관 직상부를 이동하며 두 전극사이에 나타나는 배관의 전위구배를 측정하여 손상부 위치를 탐지하는 것이다. 이 경우 두 전

극의 단자를 Fig.7과 같이 연결하였을 경우 손상부주위로 가까워짐에 따라 두 전극사이의 전위차이가 음의 값으로 커지다가 손상부를 지남에 따라 전위차이가 양의 값으로 반전하게 되므로 두 전극 사이의 전위차이가 음의 값에서 양의 값으로 변하는 지점이 바로 피복손상부인 것이다.

2.4 DC pulse method

이 방법은 전류차단계를 이용하여 방식전류를 주기적으로(on 2초, off 4초) on-off 시키는 것 이외에는 two electrode method와 같다. 방식전류를 주기적으로 on, off 시키는 이유는 두 기준전극사이에 위치하는 전위차이 값 중에서 토양의 부분적인 특성차이로 생기는 전위차이를 제거하고 오직 방식전류에 의해 형성되는 손상부주위의 전위구배를 측정하기 위한 것이다. 이 방법에서도 역시 손상부 주위를 전후해서 두 전극 사이의 전위차이가 음의 값에서 양의 값으로 바뀌게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 One electrode method

Fig. 8과 Fig. 9는 test box에서 관대지 전위를 각각 -1000mV와 -3000mV로 유지하면서 1m 간격으로 P/S전위 값을 측정한 결과를 나타낸다. 수직선으로 나타낸 지점이 코팅손상부위이다. 우선 관대지 전위가 -1000mV 일 경우 피복손상부 주위에서 전위값은 그 주위보다 높은 값을 나타내고 있으며 특히 가장 큰 손상부위(600cm²)에서의 전위값 변화는 뚜렷이 나타나 손상부 위치임을 알 수 있었다. 그러나 피복손상부가 아닌 곳에서도 주위의 전위값 보다 높은 값을 나타내는 경우도 상당히 많았다(그림에서 ↓부분). 따라서 이 경우에는 손상부 크기에 따라서 그 위치를 파악할 수 있는 경우도 있었으나 손상부 위치를 오판할 수 있는 데이터도 많이 나타나게 됨을 알 수 있다. 이러한 이유로는 P/S

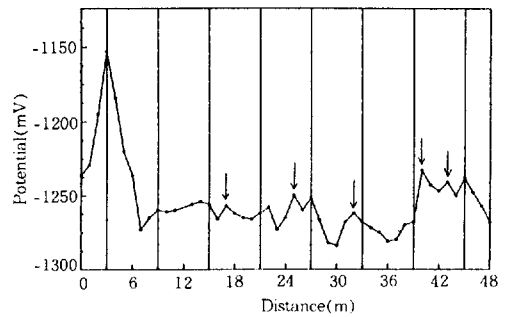


Fig. 8. Measured P/S potential along distance using one electrode method(P/S potential : about -1000mV).

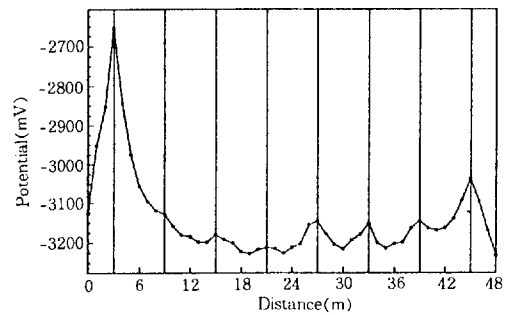


Fig. 9. Measured P/S potential along distance using one electrode method(P/S potential : about -3000mV).

전위 값은 토양의 부분적인 특성에 따라 변하며, 또한 음극방식전류가 기기상의 문제로 시간에 따라 약간씩 변하는데 이러한 변화량 만큼보다 손상부 주위에서의 전위구배가 작다면 제대로 손상부 위치를 알 수 없기 때문이다. 따라서 test box에서의 관대지 전위가 -1000mV 일 경우에는 손상부가 600cm² 정도되는 부위만을 찾아낼 수 있었지만 토양의 부분적인 특성에 따른 P/S전위 값의 변화로 손상부가 아닌 곳에서도 손상부에서 나타나야 하는 전위변화 모습을 나타내고 있었으므로 이 상태에서 코팅손상부 위치를 찾아내기는 불가능하였다.

이번에는 test box에서의 P/S전위 값이 -3000mV 일때의 전위변화 모습을 살펴보자. Fig.9에서 알

수 있듯이 이 경우에는 피복손상부 위치에서 아주 정확히 전위값이 주위의 값보다 크게 나타남을 알 수 있다. 손상부위치에서의 전위변화값은 손상부크기와 위치에 따라 수백 mV에서 수십 mV까지 변화하고 있었으며 1cm² 크기의 손상부도 찾아낼 수 있었다. 즉 test box에서의 P/S 전위 값이 -3000mV 일때 코팅손상부 주위에서 발생하는 전위구배는 토양의 부분적인 특성에 따른 전위변화값이나, 기기상의 문제로 생기는 방식전류의 시간에 따른 변화로 인한 전위변화값보다 훨씬 커서 손상부위치를 정확히 알아낼 수 있었던 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 one electrode method에 의해 피복손상부를 탐측할 경우에는, 대상 배관에 충분한 방식전류를 공급하여 주어야만 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 배관의 길이는 48m에 불과하여 P/S 전위 값을 -3000mV까지 분극시켜 방식전류를 충분히 공급하는 것은 쉬운 일이었지만 실제 지하매설 배관망처럼 상당히 긴 배관을 이렇게 크게 분극시키는 것은 거의 불가능하며 경제적으로도 소모전력이 커지는 문제가 있다. 따라서 one electrode method를 이용하여 코팅손상부 위치를 찾기 위해서는 배관을 -3000mV 정도 분극시켜야만 하므로 이 방법을 실제 현장에 적용시키기란 매우 어렵다고 할 수 있다.

3.2 Two electrode method

이 방법을 사용하면 손상부위를 전후로해서 두 전극사이에서 생기는 전위값의 부호가 반대로 되게된다. 따라서 두 전극사이의 전위차의 부호가 역전되는 부분을 알아내면 그 곳이 바로 손상부라고 판단하는 것이다. 먼저 test box에서의 관대지 전위를 -1200mV 유지한 후에 1m 간격으로 두 전극사이의 전위차이를 측정해본 결과를 Fig.10에 나타내고 있다. 이 그림에서 보던 전위차이의 부호가 역전되는 부분은 코팅손상부 위치와 거의 일치하지 않는것을 알 수 있다. 이

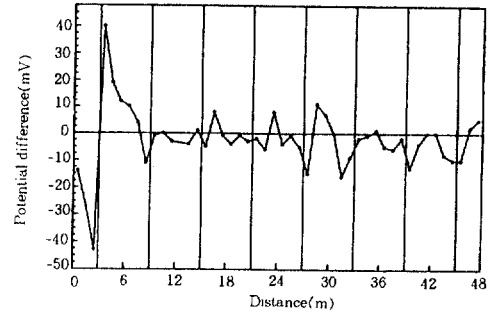


Fig. 10. Measured potential difference between two electrodes along distance using two electrode method(P/S potential : about -2000mV).

러한 현상은 두 전극사이에서 측정되는 전위값이 배관의 코팅손상부에서 생기는 전위구배를 측정할 뿐 아니라 토양의 부분적인 특성으로 인해서 생기는 전위차이도 함께 측정되는 것이기 때문이다. 이때 토양의 부분적인 특성으로 생기는 전위차가 배관의 전위구배로 생기는 전위차이보다 클 때 손상부에서는 전위차이의 부호가 역전되어야 함에도 불구하고 역전되지 않고 전위차이의 부호가 역전되지 않아야 될 부분에서 역전되는 현상이 발생하게 되는 것이다. 이러한 현상은 방식전류가 작아 손상부에서의 전위구배가 작을때 발생할 수 있는 것이다. 부연하여 설명하면 피복손상부에서의 전위구배로 인한 두 전극사이의 전위차이가 "+4mV" 이고 부분적인 토양의 특성으로 생기는 두 전극사이의 전위차이가 "-5mV" 라면 두 전극사이에서 측정되는 전위값은 -1mV가 될 것이다. 따라서 두 전극사이에서 측정되는 전위값의 부호는 의미가 없어지게 되는 것이다. 만약 방식전류가 커져 코팅손상부 주위에서 전위구배가 부분적인 토양으로 생기는 전위차이보다 훨씬 크다면 피복손상부에서만 전위차이의 부호가 역전될 것이다.

Fig.11은 test box에서의 P/S전위를 -2000mV로 유지하고 나서 1m 간격으로 두 전극사이의 전위차이를 그려본 것이다. 방식전류가 앞에서 본 경우보다 커져 대체적으로 피복손상부에서

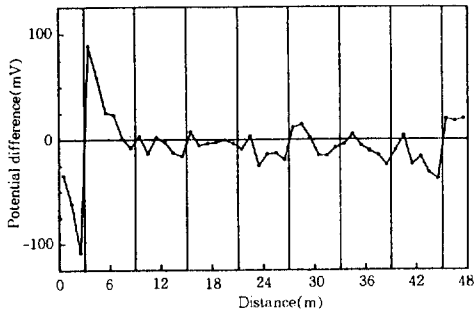


Fig. 11. Measured potential difference between two electrodes along distance using two electrode method(P/S potential : about -1000mV).

전위차이의 부호가 역전되는 것을 알 수 있었다. 하지만 아직까지도 코팅손상부가 아닌곳에서도 전위차이의 역전현상이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 즉 아직까지는 부분적인 토양에 의해서 생기는 전위차이를 극복할 만한 손상부에서의 전위구배가 형성되지 못했기 때문이라고 생각한다. 물론 손상부의 크기가 가장 큰(600cm²) 곳에서는 전위차이의 부호가 분명히 역전되는 현상을 알 수 있었다.

Test box에서의 P/S전위를 -3000mV로 유지한 후에 1m 간격으로 두 전극사이의 전위차이를 나타낸 것이 Fig.12이다. 그림에서 보면 매우 정확히 피복손상부 위치에서 두 전극사이의 전위차이의 부호가 역전되고 있음을 뚜렷이 알 수 있다. 즉, -3000mV 정도로 배관을 분극시키게 되면 코팅손상부 주위에 생기는 전위구배가 부분적인 토양의 특성에 의해 생기는 전위차이보다 훨씬커서 손상부위치에서 정확히 전위차이의 부호가 역전되는 현상이 나타난 것이다. 하지만 이 방법 역시 배관을 -3000mV까지 분극시켜야만이 코팅손상부 위치를 알아낼 수 있기 때문에 현장에 적용 시킬 수 있는 방안으로는 거의 불가능하다 할 수 있다.

3.3 DC pulse method

DC pulse method는 two electrode method와 방법상 같으나 한가지 다른점이 있다면 두 전

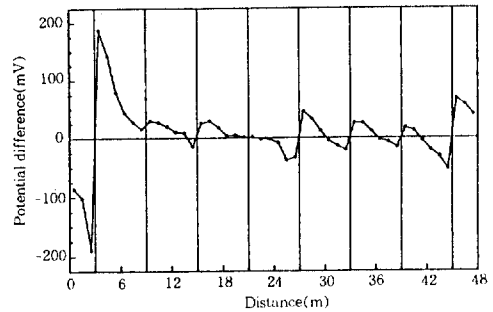


Fig. 12. Measured potential difference between two electrodes along distance using two electrode method(P/S potential : about -3000mV).

극사이의 전위차이를 측정함에 있어서 방식전류가 흐를 때(on potential)의 전위차이를 측정하고 방식전류가 흐르지 않을때(off potential) 두 전극사이의 전위차이를 측정한다는 점이 다르다. 이때 방식전류가 흐를때와 흐르지 않을때 측정한 두 전극사이의 전위차이의 차이(on-off potential 차이)를 측정한 결과를 Fig.13~15에 나타내었다. On-off potential 차이의 의미를 살펴보면 다음과 같다. On potential에서의 두 전극사이에서 측정되는 전위차이는 앞서 살펴보았듯이 코팅손상부의 전위구배로 생기는 전위차이와 토양의 부분적인 특성으로 생기는 전위차이가 함께 측정되는 것이다. 한편 off potential에서의 두 전극사이에서 측정되는 전위차이는 오직 토양의 부분적인 특성으로 인해 생기는 전위차이만을 측정하는 것이다. 따라서 on-off potential 차이란 본 실험에서 측정하고자 하는 코팅손상부에서의 전위구배에 의한 전위차이만을 측정한다는 의미인 것이므로 가장 정확한 코팅손상부 탐지방법이 될 것이다. Fig.13은 on potential과 off potential의 차이가 400mV 일때 두 전극사이에서 측정되는 on-off potential 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 피복손상부 주위에서 정확히 전위차이의 부호가 역전되고 있다. 이 경우 1cm² 크기의 피복손상부도 감지되고 있음을 알 수 있다. Fig.14와 Fig.15는 on potential과 off potential의 차이가 각

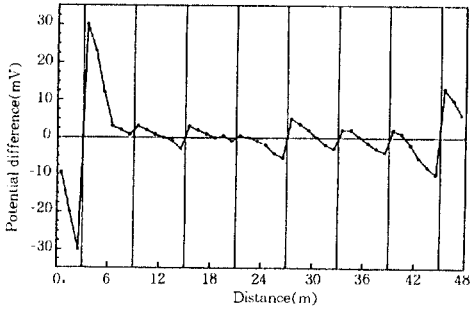


Fig. 13. Measured potential difference between DC pulse method(on potential : -1200mV, off potential : -800mV).

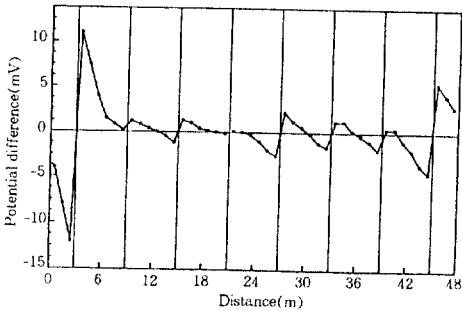


Fig. 14. Measured potential difference between DC pulse method(on potential : -1400mV, off potential : -1200mV).

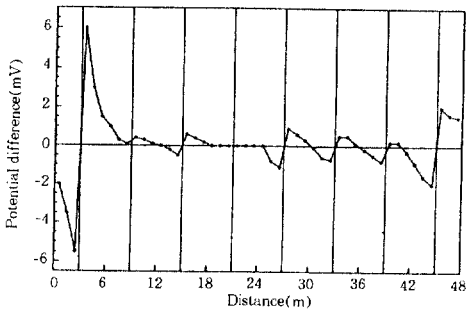


Fig. 15. Measured potential difference between DC pulse method(on potential : -1300mV, off potential : -1200mV).

각 200mV와 100mV일 경우에 on-off potential 차이를 측정 한 결과를 나타낸다. 이들 경우에도

코팅손상부 위치에서 정확히 두 전극사이의 전위차이의 부호가 역전되고 있음을 알 수 있다. 이 방법의 가장 큰 장점은 on-off potential 차이가 100mV 이더라도 충분히 손상부위를 찾아 낼 수 있다는 것이며, on potential값이 -1200mV정도이면 가능하다는 것이다. 따라서 현장 적용에 적합 하였으며, 이 방법을 실험용 배관이 아닌 음극방식이 수행되고 있는 피복된 매설배관에 적용하여 손상부위라고 추정되는 부위를 실제 굴착하여 그 정확성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 매설배관의 피복손상부위의 위치를 굴착하지 않은 상태에서 음극방식전류에 의해 형성되는 손상부주위에서의 전위구배를 측정함으로써 탐지해내는 세가지 방법에 대하여 고찰해 보았으며 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피복손상부 주위에 형성되는 전위구배는 손상부에서 가장 큰 전위값을 갖는 형태로 이루어져 있다.

2) One electrode method를 사용하여 손상부 위치를 찾기 위해서는 배관의 P/S전위를 약 -3000mV로 분극 시켜야만 가능하였다. 이는 실험배관이 수십 m에 이르는 짧은 거리이기 때문에 이처럼 분극시키는 것이 가능하였지만 실제 매설된 배관처럼 수백 km에 이르는 긴 배관은 이처럼 분극시키기가 힘들기 때문에 현장에 적용하기에는 부적합 하였다.

3) Two electrode method를 사용하여 손상부 위치를 찾기 위해서는 토양의 부분적인 특성으로 생기는 두 전극사이의 전위차이를 상쇄하고 남은 만큼 배관을 크게 분극 시켜야만 손상부주위의 전위구배를 바르게 탐지해 낼 수 있었다. 본 연구에서는 배관의 P/S전위를 -3000mV정도로 분극 시켜야 손상부를 찾아낼 수 있었기 때문에 이 방

법 역시 현장에 적용하기에는 부적합하였다.

4) DC pulse method를 이용하여 매설배관의 손상부위치를 탐지할 경우 on-off 전위차이가 100mV 정도이면 미세한 크기의 손상부도 탐지해 낼 수 있었으며, 이 경우 배관의 P/S전위를 약 -1200mV 정도만 분극시키면 가능하였기 때문에 현장에 적용하기에는 가장 적합한 방법이라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. P. Davies, M. Richert, Oil & Gas Journal, p.40-43, Aug.1, 1988
2. J. M. Leeds, PIPELINE INDUSTRY, p.48-52, Dec., 1992
3. J. D. Slatter, M. C. Davidson, and J. P. Grapiglia, Materials Performance, p.35-38, Feb., 1993
4. R. D. Webster, Materials Performance, p. 38-41, Oct., 1987
5. J. B. Bushman and F. E. Rizzo, Materials Performance, p.9-13, July, 1978
6. J. F. Chmilar and W. B. Holtsbaum, Materials Performance, p.16-22, March, 1994

1. P. Davies, M. Richert, Oil & Gas Journal,