

DRM 진단기술을 이용한 열수송관의 절연체결합 진단사례

손대홍^{1,†} · 이상혁¹ · 배근호¹ · 이해용²

¹㈜카이웨어, 경기도 성남시 분당구 매화로 38

²한국지역난방공사, 경기도 성남시 분당구 분당로 368

(2025년 2월 09일 접수, 2025년 4월 01일 수정, 2025년 4월 06일 채택)

Application of Insulator Damage Survey of Heat Transport Pipes Using DRM Techniques

Dae-Hong Sohn^{1,†}, Sang-Hyuk Lee¹, Geun-Ho Bae¹, and Hae-Yong Lee²

¹Caiware Co Ltd., 3floor, 38, Maehwa-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13504, South Korea

²Korea District Heating Corp., Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13487, South Korea

(Received February 09, 2025; Revised April 01, 2025; Accepted April 06, 2025)

The corrosion control methods for buried pipelines typically involve insulation techniques such as coating application, supplemented by cathodic protection. Non-destructive survey technologies for detecting defects in the insulation of buried pipelines are essential for safety management. Existing ground-based measurement technologies are influenced by soil parameters, making it challenging to detect defects in deeper sections of the pipeline and in areas such as waterways and roads. A new survey technology, Differential Reflectometry Mapping (DRM), utilizes the reflection measurement method to directly assess the pipeline itself. Due to its minimal influencing parameters, DRM maintains high sensitivity, allowing for the detection of early corrosion defects and the ability to assess the extent of these defects. DRM surveys and field verification were conducted on heat pipes in an urban environment. This method proved effective for measuring buried pipelines, which are difficult to assess with existing ground-based technologies, and field verification indicated an accuracy of approximately ± 1 meter. Additionally, the size of the pipeline defects was quantified, enabling effective prioritization of the issues.

Keywords: DRM technology, Heat transport pipe, Buried pipeline, Coating detection, Insulator detection

1. 서론

토양에 매설된 금속시설물은 대기에 있는 금속시설물과 비교하여 부식가능성이 높은 환경이라고 할 수 있다. 토양에는 물, 용존산소, 가스 및 그들의 조합으로 구성된 많은 물질들이 존재하기 때문에 대기환경과 비교하여 부식속도가 수백 배에 이르기도 한다 [1]. 토양매설 환경에 있는 난방, 가스, 상하수도 등의 매설배관은 사전진단작업에 의해 사고를 최소화할 수 있으며, 특히 도심지역에서의 누출사고는 이전상태로의 복구비용이 사전진단비용 보다 매우 큰 만큼 비파괴 진단기술의 중요성은 크다고 할 수 있다.

매설배관 현장에서는 비파괴 진단기술에 대해 고려하

는 3가지 요건이 있다. 첫 번째는 배관보수작업은 진단 위치를 기준으로 ± 2.5 m 굴착작업이 수행되기 때문에 굴착범위내의 진단거리 정확성이 요구된다. 두 번째는 배관결합 손상크기를 구분할 수 있는 진단기술은 보수 정비 시점이 계획적으로 관리되어 보수비용 및 관리 관점에서 유용하다. 세 번째는 감도가 우수한 진단기술은 결함손상을 놓치지 않고 찾아내는 것 이외에도 안전관리 관점에서 중요하다. 배관 절연체의 열화현상으로 발생하는 CUI (Corrosion under Insulation)을 찾아낼 뿐만 아니라 음극방식의 효율을 높이는 데 도움이 된다. 음극방식은 보호할 금속에 대해 일정기준 이상의 음극전위가 유지되어야 하지만 CUI에서 발생한 부식생성물에 의해 원치 않게 전압강하가 발생하여 일정기준의 음극전위를 충족하지 못할 수도 있기 때문이다.

한국지역난방공사의 열수송관은 부식 제어방법으로

[†]Corresponding author: willysohn@caiware.com

손대홍: 대표, 이상혁: 이사, 배근호: 이사, 이해용: 팀장

일반적인 코팅도포 대신 절연재질을 사용하여 외부의 부식환경을 차단하는 이중절연체 구조로 Fig. 1의 내용과 같다. 열수송관에 적용중인 진단기술로는 감시시스템과 열화상 카메라 진단이 있다. 감시시스템은 Fig. 1의 외부절연체(폴리에틸렌)의 열화현상으로 수분이 침투하면 우레탄폼내에 설치된 전용전선을 이용하여 그 정도를 구분해낸다. 부식의 초기상태를 찾아내고 구분하는 진단기술이다. 한편 열화상 카메라 진단은 매설된 배관을 따라 지면에서 측정이 진행되며 결함이 있는 구간과 없는 구간과의 상대적인 온도 차를 이용하여 이중절연체의 결함을 진단하는 기술이다. 온도 차를 이용한 지상측정기술은 지면과 배관 사이 토양의 열전도도와 배관의 매설 깊이가 진단 구간별로 다르고, 지면의 온도가 계절마다 달라지기 때문에 절연체의 손상크기를 구분해낼 수는 없다. 연구에 따르면 토양의 공극률과 수분 함유량이 토양의 열전도도에 미치는 영향이 크다는 것을 보여준다 [2].

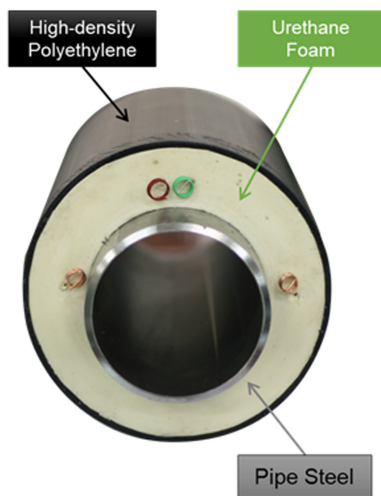


Fig. 1. Double insulator structure of heat pipe

금번에 소개하는 새로운 진단기술은 미국의 텍사스 A&M 대학교에서 개발하여 국제특허 등록된 Differential Reflectometry Mapping (DRM)이다 [3]. 이 진단기술은 미국 뉴욕 Con Edison 에너지공급업체의 개발요청에 의해 완성되었다. 해당업체는 지상측정의 기존진단기술 DCVG (Direct Current Voltage Gradient)에 대한 개선사항으로 도심환경에서 측정의 어려움 [4]과 배관네트워크 전체에 적용되는 음극방식 장치를 DCVG 진단 동안 지속적으로 on/off 하기 어려움, 진단감도에 대한 불만족으로 CUI를 찾아내지 못하는 경우가 포함되었다. DCVG는 배관으로 전압을 인가하고 매설된 배관을 따라 지면에서 측정이 진행되며 결함이 있는 구간과 없는 구간의 상대적인 전위 차를 이용하여 이중절연체의 결함을 진단하는 기술이다. 하지만 전위 차를 이용한 지상측정기술은 지면과 배관 사이 토양의 유전상수와 배관의 매설 깊이가 진단 구간별로 다르기 때문에 절연체의 손상크기를 구분해낼 수는 없다 [5]. 따라서 DRM 기술개발은 지상측정기술이 아닌 매설된 배관으로부터 직접 측정하는 기술로 개발이 진행되었다. 이를 실현하기 위해서는 배관의 결함 부위에서 발생하는 전류누출을 감지할 수 있는 기술이 필요하였으며 이에 대한 해결방법으로 반사측정법이 선택되었다. Fig. 2의 내용은 지상측정기술(Fig. 2a)과 반사측정기술(Fig. 2b)을 비교하여 나타내었다. 지상측정기술은 배관결함에서 발생된 전자신호를 토양을 거쳐서 지상에서 측정하는 방법이고 반사측정기술은 배관결함에서 발생한 반사파(Reflected Signal)를 배관에서 직접 수집하는 방법이다.

반사측정기술의 배경에는 전송선 이론이 있다. 이 이론은 길고 평행한 두 개의 도체(전송선로)가 구성될 때 전송선로 내로 전파되는 전자신호의 특성을 정량적으로 설명한다. 이를 위해 전송선로의 미소구간을 단위길이당 회로량 저항(R), 유도용량(L), 컨덕턴스(G), 전기용량(C)으로 상호 연결하여 Fig. 3의 내용과 같이 나타내었

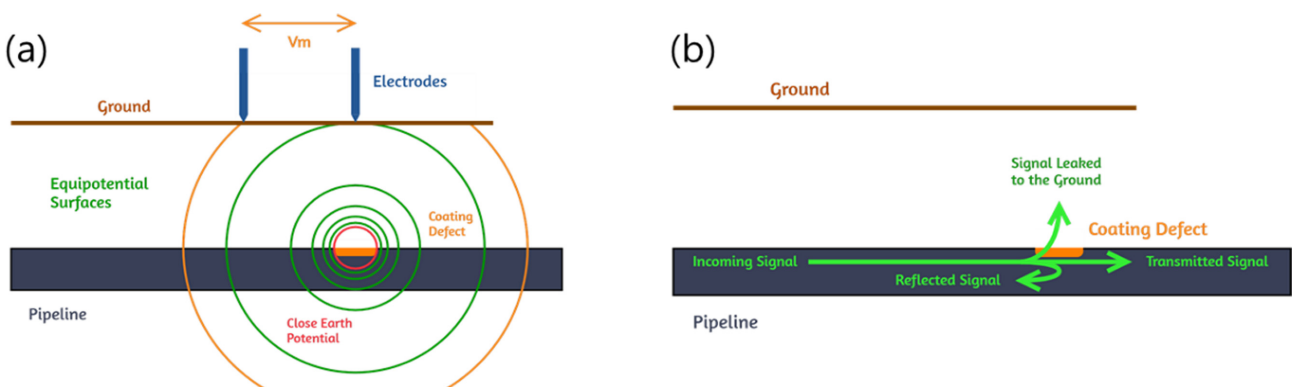


Fig. 2. (a) Surface Methods Framework (b) Reflectometry Theory Framework

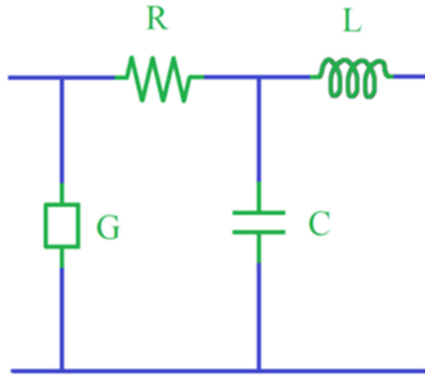


Fig. 3. Distributed elements of a transmission line

다. 전송선로 내로 진행되는 전압파와 전류파를 음의 법칙으로 정리하여 나타내면 equation (1)과 같이 전송선로의 특성임피던스를 정의할 수 있다. 이는 전송선로를 따라 흐르는 전압파와 전류파가 존재하면 이 비율은 항상 일정하며 R, L, G, C와 주파수에만 관계되는 양이다. 특성임피던스는 전송선로의 반사특성을 알려주는 중요 지표이다.

$$Z_c = \frac{V}{I} = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}} \quad (1)$$

반사측정법은 전송선로 내의 공간적인 불균형을 파악하기 위해 전송선로로 전송된 전자신호의 반사를 연구하는 것이다. 즉 전송선로의 특성임피던스 변화와 같은 공간의 불연속성이 반사를 유도한다. 전송선로에 적절한 감쇄 및 왜곡 계수가 있다는 점을 고려하면 전송선로 내로 전송된 전자신호는 수 km정도 양방향으로 이동할 수 있다. 반사측정법으로 알려진 응용분야로는 대기에서 전자신호의 반사를 이용하는 RADAR (Radio Detection and Ranging)이다.

하지만 개발이전까지 반사측정법을 이용하여 매설배관 진단에 적용한 사례나 관련된 문헌은 극히 제한적이었으며 이는 반사측정법의 측정방법 정의에 어려움이 있었기 때문이었다. 배관 결함부위에서 발생하는 전류 누출을 감지하기 위해 오래되고 논쟁의 여지가 있는 기존측정방법 [6]으로는 매설배관 진단에 적용하는 것이 명확하지 않다는 것을 개발과정에서 확인하였다. 매설배관 진단에 적용할 수 있는 측정방법은 기술개발을 통하여 새로이 정의하게 이르렀다. 배관에서 직접 수집하는 측정기술이기 때문에 진단감도가 우수하여 CUI를 감지할 수 있으며, 교류신호를 사용하기 때문에 진단 동안 음극방식장치를 on/off할 필요가 없으며, 측정하기 어려운 도심매설 환경에서도 진단이 가능한 방법으로 제시되었다. 새로운 측정방법에 대한 기술개발과 수행된

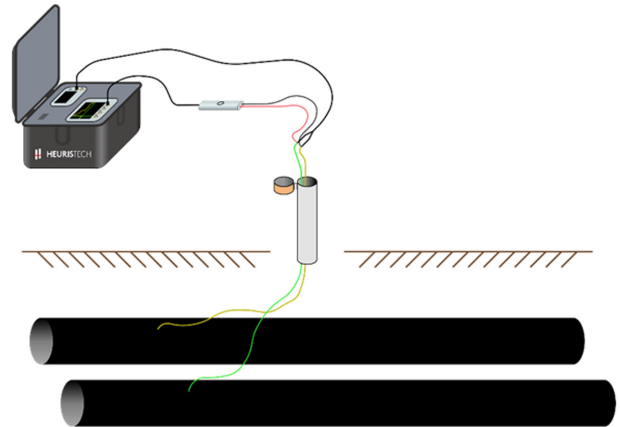


Fig. 4. Multiple pipeline configuration

현장사례를 근간으로 2021년 AMPP (Association for Materials Protection and Performance)로부터 기존 진단 기술 대비 개선사항이 인정되어 올해의 부식혁신상에 선정되었다 [7].

일반적인 매설배관은 약 400 um 두께의 에폭시 피복이 사용되는데 반하여 열수송관은 약 10 cm 두께의 이중절연체를 사용하여 약 250배의 절연두께 차이를 나타내는 에너지수송배관이다. 이 논문의 목적은 국내에 설치된 열수송관에 DRM 진단기술을 이용하여 결함을 찾아내고 그 결함 정도를 구분하여 나타내고 이를 검증하여, 지상측정기술로 진단하기 어려운 도심지의 매설환경에서 진단이 가능하다는 설득력 있는 사례를 제시하는 것이다.

2. 연구방법

DRM 측정방법은 매설배관의 구성 즉 단일배관 또는 다수배관에 따라 측정방법이 서로 다르게 적용되며, 열수송관은 공급관(온수공급)과 회수관의 다수배관(2열배관) 구성이기 때문에 Fig. 4의 측정방법이 적용되었다.

측정에 사용되는 장치는 배관강관으로 진단신호 전달을 위한 신호발생기(Signal Generator)와 진단신호로부터 반사파를 수집하는 오실로스코프(Oscilloscope)로 구성된다. 상기 장치는 맨홀을 통하여 Fig. 4와 같이 전선으로 배관강관과 연결한다. Fig. 5의 내용은 진단신호의 배관내 전파 개략도를 나타낸다.

신호발생기에서 출력된 진단신호는 연결된 전선을 따라 배관강관으로 전달되고 (가)와 같이 배관길이 방향으로 신호가 진행되다가 결함손상과 같은 특성임피던스 변화를 인지하게 되면 진단신호의 일부는 (나)와 같이

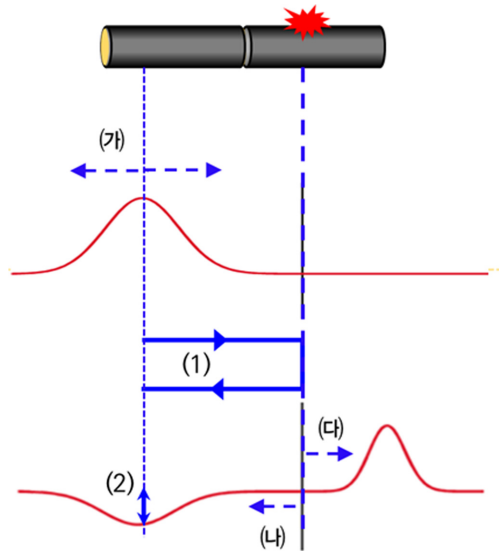


Fig. 5. A schematic diagram of signal propagation

반사되고 일부는 배관을 따라 (다)로 계속 진행된다. 반사신호 (나)는 반대방향으로 되돌아와서 측정지점에 있는 오실로스코프에서 수집된다. 반사신호는 진단신호와 같은 속도로 이동하기 때문에 맨홀과 같은 측정지점에서 결함위치까지 거리를 계산할 수 있다. 거리 계산은 equation (2)와 같다.

$$L = \frac{v \times (1)}{2} \quad (2)$$

L은 측정지점에서 결함위치까지 거리이고, $v(m/sec)$ 는 신호의 전파속도를 나타내며, $(1)(sec)$ 은 신호발생기에서 오실로스코프로 반사파가 수집될 때까지 소요된 왕복시간으로 1/2은 편도시간을 나타내는 계수이다. 배관 내 신호의 전파속도는 현장측정을 통하여 구하는 수치로서 대개 $40 \sim 150 m/\mu s$ 내에 있다. 배관을 둘러싸고 있는 이중절연체와 토양은 전자신호 관점에서 모두 유전체에 해당하고 그 유전체의 고유 값을 유전상수라고 한다. 유전상수는 equation (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (3)$$

ϵ 은 유전상수를 나타내고, $c(m/sec)$ 는 진공에서 전파속도를 나타내는 상수이며, $v(m/sec)$ 는 신호의 전파속도를 나타낸다. 실제사례에서 유전상수는 유전체의 수분함량에 의해 지배되기 때문에 유전체의 수분함량이 높아지면 유전상수는 커지고 신호의 전파속도는 느려지게 되는 관계식이다. 배관과열 또는 외부 누수 등의 이유로 인하여 유전체 수분함량이 구간별로 달라질 수

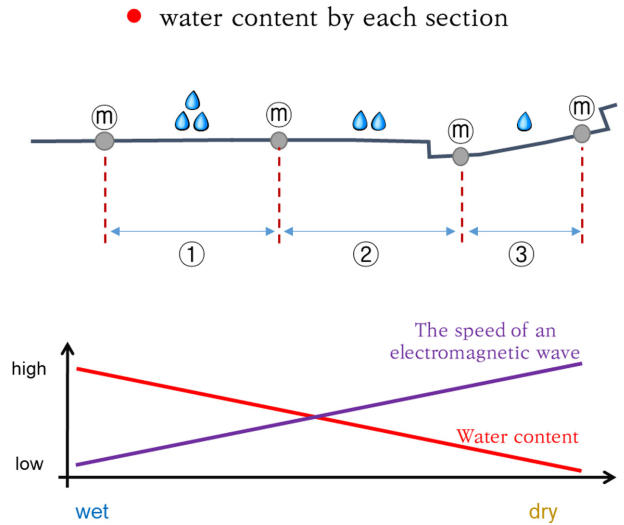


Fig. 6. DRM survey method for moisture content of the dielectric

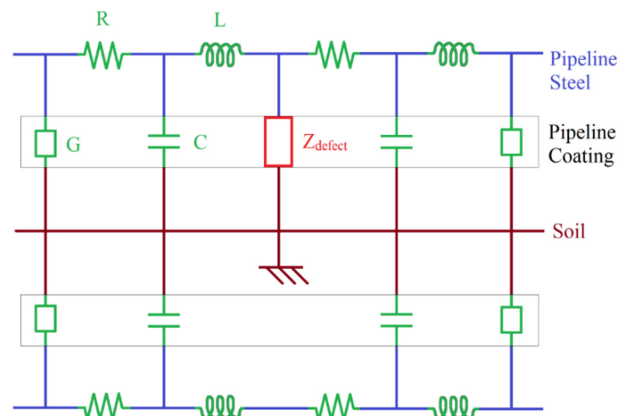


Fig. 7. The three media transmission line

있기 때문에 측정구간 별로 전파속도를 구하고 그 값을 비교하여 상대적으로 느린 구간은 유전체에 해당하는 이중절연체 또는 토양의 수분함량이 높은 구간으로 판단할 수 있다. Fig. 6은 해당 내용을 도식화하여 나타내었다.

한편 반사신호의 크기(진폭)는 equation (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_c}{Z_c + 2Z_{defect}} \quad (4)$$

γ 는 반사도(반사계수), E_i 는 입력신호전압, E_r 은 반사신호전압, Z_c 는 배관강관의 특성임피던스, Z_{defect} 는 배관절연체의 결함임피던스를 나타낸다. 반사계수는 입력(진단)신호의 크기와 반사신호의 크기에 대한 단순비율로서 반사신호가 없으면 반사계수는 0으로 반사신호가 없

는 무결함 전송선로가 되고, 반사신호의 크기가 진단신호와 같으면 전송선로는 개방이나 단락을 의미한다. 이를 임피던스와 관계식으로 나타내면 반사계수의 변화를 정량적으로 평가할 수 있다. 여기서 특성임피던스는 equation (1)에서 정의한 바와 같이 회로요소와 관련된 양으로서 전송선로의 매질과 물리적 구조에 의해 결정된다. Fig. 7의 내용은 두 개의 평행한 전송선로를 모형화하였으며 결함임피던스도 함께 나타내었다. 결함임피던스는 전송선로로 전달된 진단신호가 결함부위를 통하여 외부로 향하여 흘러나갈 때 만나는 임피던스로 정의한다. 이는 진단신호 전압의 누설로 인해 유도되는 전위를 평가하기 위해 배관과 접지 사이의 간단한 직렬저항회로로 볼 수 있다. 저항은 절연체 손상부위의 단면적에 반비례하기 때문에 손상면적이 작으면 결함 임피던스 수치는 크며 반사계수는 작아진다. 반대로 손상면적이 크면 결함임피던스 수치는 작아지고 반사계수는 커진다.

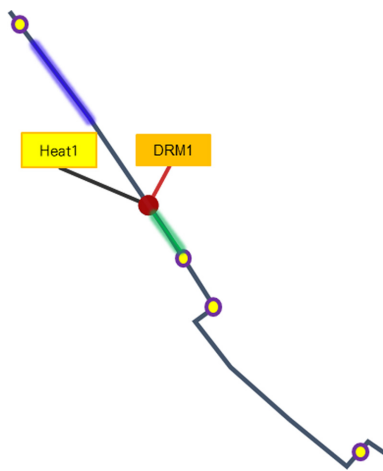


Fig. 8. Pipeline layout of DRM survey section #1

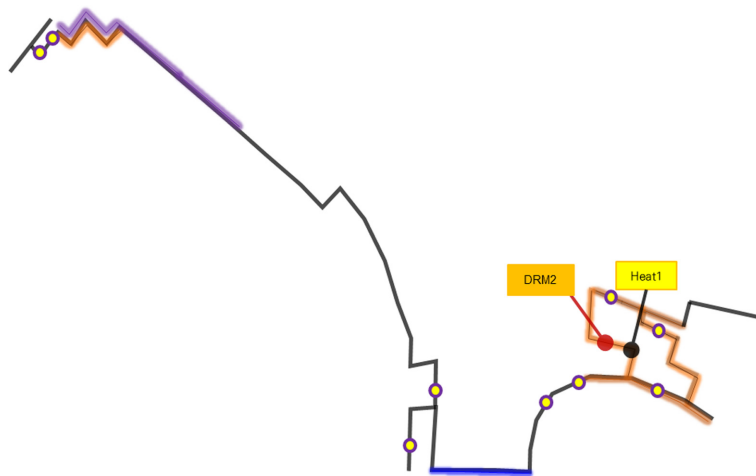


Fig. 9. Pipeline layout of DRM survey section #2

3. 연구결과 및 고찰

DRM 진단기술이 적용된 현장은 국내 열수송관 두 구간으로 2023년 1월부터 4월까지 약 4개월간 열화상 카메라 진단과 함께 수행되었으며 진단결과에 대한 현장 검증이 진행되었다. 첫 번째 구간은 직경 600 mm 배관, 500 m 거리구간으로 습지생태원이 조성된 파란색 구간을 포함하여 배관배치도는 Fig. 8의 내용과 같다.

두 번째 구간은 직경 300 mm 배관, 1 km 거리구간으로 강을 가로지르는 파란색 구간, 도로를 가로지르는 밤색 구간, 토피 3 m 깊이 이상의 보라색 구간을 포함하여 배관배치도는 Fig. 9의 내용과 같다.

두 구간에 표기된 동그라미는 맨홀과 같은 배관으로 신호전달이 가능한 DRM 측정지점이며 이 지점에서 진단신호를 보내고 반사신호를 받는 방법으로 일정거리만큼 떨어진 배관의 결함 여부를 진단하기 때문에 파란색 구간, 밤색 구간, 보라색 구간에 대한 측정과 진단이 가능하다. 각 측정 지점에서 수집된 신호를 이용하여 분석작업이 수행되었다. Fig. 10은 Fig. 8의 DRM1에 가까운 1개소 측정지점에서 수집된 신호이다. 수평 축은 측정지점으로부터 배관을 따라 전파된 거리를 미터 단위로 나타내고, 수직 축은 수집된 신호의 강도를 전압으로 나타낸다.

도시된 수집신호는 진단신호로부터 되돌아오는 반사신호로서 즉 배관강관을 둘러싸고 있는 이중 절연체에 결함이 발생하면 그 위치에서의 임피던스 변화정보를 포함하고 있다. 이와 같은 정보는 인근 다른 측정지점으로부터 얻은 반사파신호와 비교를 통하여 교차 검증하여 진단의 정확도를 향상시킬 수 있으며 Fig. 11의 내용과 같다.

최종 결정된 진단결함 위치는 측정지점으로부터 약

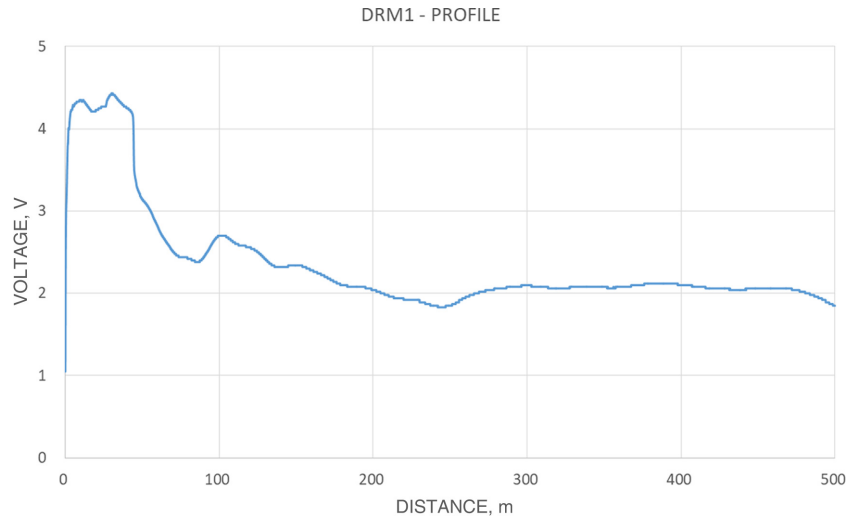


Fig. 10. Reflectometry profile at DRM1 location

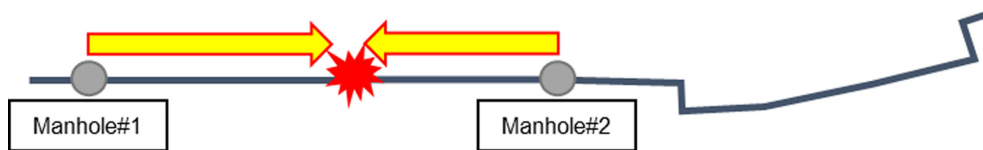


Fig. 11. Accurate remote location with crossfire

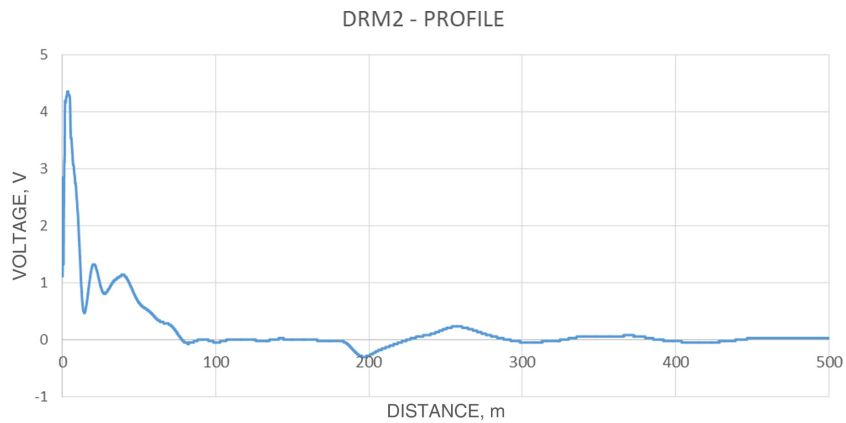


Fig. 12. Reflectometry profile at DRM2 location

100 m 떨어진 Fig. 8의 DRM1 결함위치이다. 해당 결함의 크기는 결함임피던스 69Ω 로 equation (4)로 계산되었다. 일반적으로 결함임피던스가 40Ω 보다 낮은 수치는 ‘매우 큰 결함’으로 $40 \sim 80 \Omega$ 은 ‘큰 결함’으로 분류하고 있기 때문에 DRM1은 ‘큰 결함’으로 진단하였다. Fig. 12는 Fig. 9의 DRM2에 가까운 1개소 측정지점에서 수집된 신호이다. 교차검증을 통하여 결정된 진단결함 위치는 측정지점으로부터 약 20 m 떨어진 Fig. 9의 DRM2 결함위치이다. 해당 결함의 크기는 결함임

피던스 26Ω 으로 계산되었으며 DRM1 보다 큰 손상면적이 예상되며 ‘매우 큰 결함’으로 분류되기 때문에 즉시 보수작업이 필요한 지점으로 진단하였다.

DRM 진단결과는 DRM1, DRM2를 예상결함으로 열화상 카메라 진단결과는 Heat1, Heat2를 예상결함으로 진단하였다. Fig. 8의 DRM1과 Heat1은 정확하게 일치하기 때문에 해당위치에서 굴착검증을 진행하였으며 추가로 Fig. 8의 초록색구간을 모두 굴착하여 실제로 결함이 있음에도 불구하고 결함이 없는 배관으로 진단하



Fig. 13. Excavation result for false negative verification



Fig. 14. Excavation result at 'DRM1'

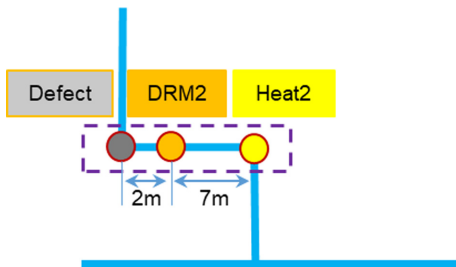


Fig. 15. Indication given for survey results

는 위음성에 대해 확인하였다. 일반적으로 진단위치를 굴착하여 검증하는 방법은 배관결함이 없음에도 불구하고 결함손상이 있다고 진단하는 위양성을 확인하기 위함이다. Fig. 13은 위음성 확인을 위하여 굴착이 수행되었으며 특히 육안으로 확인하기 어려운 배관과 배관 사이의 접합부위는 정밀 검사를 실시한 결과 DRM1 결함 위치 이전까지는 결함이 없는 것을 확인하였다. Fig. 14는 DRM1위치에서 실제 결함 손상크기를 나타내며 약 20 cm 정도 이중절연체가 모두 벗겨져 토양에 그대로 노출된 상태이고 일부는 외부절연체(폴리에틸렌)는 존재하지만 우레탄폼이 약 1 m 정도 소실된 손상크기이다. 한편 DRM2와 Heat2는 Fig. 15의 내용과 같이 진단



Fig. 16. Excavation result at 'Defect'



Fig. 17. Excavation result at 'Heat2'

위치에서 7 m 거리오차가 발생하였다. 이 진단결과에 대한 현장검증을 위하여 점선구간 전체 굴착이 수행되었다. Fig. 16의 내용은 Defect위치에서 굴착결과를, Fig.17의 내용은 Heat2위치에서 굴착결과를 나타낸다. Defect는 외부절연체(폴리에틸렌)가 1 m 이상 벗겨지고 우레탄폼은 수분에 의해 가수분해가 진행중인 단계의 손상 크기로서 특이점은 물기가 상당히 흘러나왔다는 현장설명이 있었다. 한편 Heat2는 약 20 cm 정도 이중절연체가 모두 벗겨져 토양에 그대로 노출된 상태이고 우레탄폼은 탄화되었으며 건조한 상태였다는 현장설명이 있었다. DRM 진단은 원거리로부터의 반사파를 수집하고 분석하는 진단기법으로 2개 이상의 결함이 비교적 가까운 거리(10m 거리)에 있으면 1개의 결함으로 나타내는 Clustering Bias기능이 있다. 이는 2개 이상의 결함 사이 중심점에 1개의 결함위치로 나타내며 각 결함크기를 비교하여 결함이 큰 위치로 가중치만큼 가깝게 거리가 조정된다.

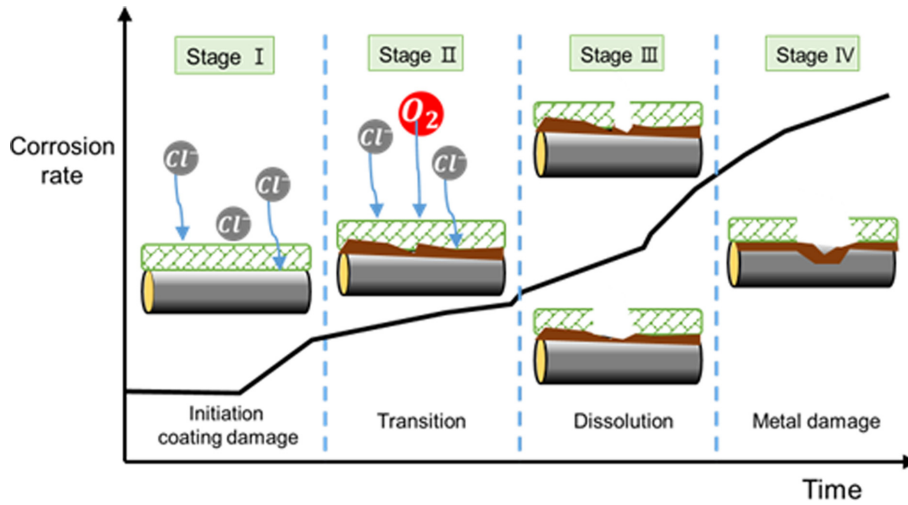


Fig. 18. Damage evolution stages for buried pipeline

Fig. 18의 내용은 매설배관이 설치되어 교체되기까지 배관생애주기를 그래프로 나타내고 있다. 최초 설치부터 파열로 교체될 때까지 배관부식상태를 4단계로 구분하고, 단계별로 부식속도를 나타내었다. 첫 번째는 부식 초기단계로 절연체의 열화현상으로 토양에 존재하는 수분, 염화이온 등이 배관으로 침투되기 시작한다. 두 번째 단계는 침투된 부식인자들이 배관강관과 접촉하여 부식 생성물이 생기며 세 번째 단계는 절연체가 소실되거나 벗겨져 배관강관이 외부토양과 직접 접촉이 되어 배관강관의 부식속도가 증가한다. 네 번째 단계는 부식이 확산되어 배관 파열단계에 도달한다.

3곳 굴착작업으로 드러난 실제결함손상은 절연체가 모두 소실되거나 벗겨진 Fig. 18의 Stage III에 해당한다. 조금 더 세밀하게 진단한다면 Fig. 14에서 이중절연체가 벗겨진 20 cm 구간은 Stage III이고 우레탄폼만 소실된 구간은 Stage II이지만 전체결함은 Stage III이다. Fig. 16은 우레탄폼이 상당량 남아있는 것으로 관찰되지만 군데군데 소실되었으며 물기로 인하여 전기절연체로서 역할을 하지 못하는 것으로 진단되어 Stage III이다.

4. 결론

도심지역에서 자주 관찰되는 수로구간, 도로구간, 토피 3m 이상 매설구간이 전체거리에 차지하는 비율은 첫 번째 구간은 20%, 두 번째 구간은 50%에 이른다. 지상측정기술을 수행하면 수로구간은 측정자체가 어려우며, 도로구간은 민원이 발생될 수도 있으며, 토양의 매개변수 때문에 배관매설 깊이에 따라 진단감도가 저하되어 현장에서는 토피 2.5m 이상을 진단이 어려운 구간으로 분류하고 있다. 토양이 매개변수가 되는 이유

는 온도진단은 토양의 열전도도에 따라 전압진단은 토양의 유전상수에 따라 영향을 받으며, 특히 수분함량에 따라 가장 영향을 많이 받기 때문이다. 한편 배관으로부터 직접 측정하는 DRM진단은 토양 및 절연체의 수분함량에 따라 배관에서 이동하는 전파속도가 3~4배 영향을 받기 때문에 측정지점 간의 전파속도를 구하는 추가적인 절차가 필요하며 이와 같은 절차를 생략하게 되면 결함위치에 대한 거리오차가 발생하게 된다. 즉 지상측정기술은 토양을 가로질러 측정하는 기술이고, 배관측정기술은 토양과 수평으로 진행되는 신호를 측정하는 기술의 차이점 때문이다. 금번 DRM2 위치가 포함된 구간은 다른 구간과 비교하여 약 2배 느린 전파속도를 확인하였다.

DRM 진단기술의 근간을 이루는 반사측정법은 진단하고자 하는 배관강관으로 진단신호 즉 에너지를 가하면 배관내부의 결함과 같은 임피던스 변화가 발생한 부위에서 에너지의 일부가 반사되어 되돌아오며 그 반사파는 진행파와 같은 속도로 이동하기 때문에 결함위치를 계산할 수 있으며 반사파 에너지의 양은 배관내부 임피던스의 변화량에 비례하기 때문에 결함 정도를 정량적인 수치로 나타내는 진단방법이다. 두 진단구간을 통하여 기존 지상측정기술로 진단이 어려운 매설 구간에 대해 DRM기술은 진단이 가능하였으며 해당 구간에는 결함이 없음을 확인하였다. 한편 결함이 발견된 위치는 현장검증을 통하여 한국지역난방공사의 거리오차 기준 이내에 해당하는 $\pm 1m$ 정도의 의미 있는 수준을 나타내었다. 또한 절연체결함 손상크기를 결함임피던스로 정량화하여 구간2의 결함이 구간1의 결함보다 크다고 진단하였으며, 굴착결과 구간2는 비교적 가까운 거리(10m)에 다중결함이 있었으며 구간1과 비교하여 실

제결함손상이 크다는 것을 확인하였다.

DRM진단에서 제시한 결함임피던스는 배관으로 전달되는 진단신호가 결함 손상부위를 통하여 외부토양으로 흘러나갈 때 만나는 임피던스로 정의되기 때문에 사람들이 직관적으로 느끼는 실제결함 손상크기와 다소 차이가 발생할 수도 있다. 또한 결함 손상부위가 토양으로 덮여있는지 공기에 노출되어 있는지 물속에 잠겨있는지에 따라 임피던스가 달라지기 때문에 향후 추가진단 및 검증작업을 통하여 결함임피던스 수치와 실제손상크기와의 상관관계를 찾아내는 추가 연구가 필요하다. 배관생애주기 그래프와 같이 단계별로 배관부식상태가 변화되는 만큼 초기단계에서부터 일정기간 반복적으로 DRM 진단을 통하여 배관강관에 대한 결함관리를 대안으로 제시한다. 측정지점에서 수집된 신호는 측정지점으로부터 일정거리까지 떨어진 이중 절연체의 결함정보가 저장되어 있기 때문에 일정기간 이후 재 측정을 통하여 수집된 신호와 비교하여 결함손상에 대한 관리가 가능하기 때문이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국지역난방공사의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

References

1. H. S. Song, Y. G. Kim, S. M. Lee, Y. T. Kho, Y. S. Park, Corrosion Rate of Buried Pipeline by Alternating Current, *Corrosion Science and Technology*, **4**, 1 (2005). <https://koreascience.kr/article/JAKO200521161658056.pdf>
2. J. H. Cha, S. J. An, and M. H. Koo, Effects of Porosity and Water Content on Thermal Conductivity of Soils, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, **13**, 27 (2008). <https://koreascience.kr/article/JAKO200807653006550.pdf>
3. Homero Castaneda-Lopez, Tristan Petit de Servins, Reflectometry Devices and Methods For Detecting Pipe Defects, US2020/0110050 A1 (2020.04.09)
4. K. T. Kim, B. T. Lim, H. Y. Chang, Y. R. Yoo, S. H. Choi, Y. S. Kim, D. Y. Lee, Analysis of Potential Gradient According to Defect Location in Buried Pipe Using 3D Modeling, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 587 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.6.587>
5. Yong-Beom Jo, Yeong-Tae Go, Seon-Yeop Lee, Gyeong-Su Jeon, Gyeong-Wan Park, Coating Defects Survey on Buried Pipelines by Voltage Gradient Technique, *Journal of the Corrosion Science Society of Korea*, **26**, 400 (1997). https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=J00260500400
6. Z. M. Pal and R. H. Johnston, Simulation of Pipeline Holiday Detection by Time Domain Reflectometry, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **26**, 961 (1990), Doi: <https://doi.org/10.1109/28.60068>
7. Tristan de Servins, Materials Performance, <https://www.materialsperformance.com> (2021).