

## 다전극 탐상을 통한 토중 매설배관 피복결함 탐상 정확도의 개선

김민기<sup>1</sup> · 임부택<sup>1,2</sup> · 김기태<sup>1</sup> · 장현영<sup>2</sup> · 박홍배<sup>2</sup> · 김영식<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>경북 안동시 경동로 1375, 안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터

<sup>2</sup>경북 김천시 혁신로 269, 한국전력기술주식회사

(2020년 10월 15일 접수, 2020년 10월 22일 수정, 2020년 10월 22일 채택)

## Enhancing the Reliability of Coating Flaw Detection for Pipes Buried in Soil Using a Multi-Electrode Detector

M. G. Kim<sup>1</sup>, B. T. Lim<sup>1,2</sup>, K. T. Kim<sup>1</sup>, H. Y. Chang<sup>2</sup>, H. B. Park<sup>2</sup>, and Y. S. Kim<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Materials Research Center for Energy and Green Technology, School of Materials Science and Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong, 36729, South Korea

<sup>2</sup>Power Engineering Research Institute, KEPCO E&C, 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon, 39660, South Korea

(Received October 15, 2020; Revised October 22, 2020; Accepted October 22, 2020)

External corrosion of buried pipes can be controlled using both coating and cathodic protection. However, deterioration of the coating can occur due to several reasons. The detection reliability of coating flaw detection methods is affected by interference such as metal objects connected to rectifiers and copper grids. When performing parallel direct current voltage gradient (DCVG) inspection, a sine wave form without potential reversal in voltage gradient appears in the area where the interference exists. However, this area may be not identified using existing methods. The objective of this study was to determine the effect of analyzing direction on the reliability of coating flaw detection of pipes buried in soil using a multi-electrode detector. DCVG on the buried pipe was measured along the buried pipe. This measurement parallel to the pipe was repeated. Measured data were analyzed for parallel, vertical, and diagonal directions. The reliability of coating flaw detection was improved by up to 46.4% compared to the conventional method.

**Keywords:** Buried pipe, Coating flaw detection, Multi-electrode detector, Interference, Reliability

### 1. 서론

토중 매설 배관의 외부 부식은 일반적으로 배관 표면에 보호 물질을 피복하여 사용하며, 그 효과를 극대화하기 위해서 음극방식을 병행하여 사용할 수 있다 [1-3]. 그런데 산업현장에서 발견할 수 있는 부식방지 현황은 다음과 같이 요약할 수 있다; (1) 음극 방식을 사용하지 않는 경우, (2) 방식전압만 인가하고 관리를 하지 않는 경우, (3) 데이터 로거를 이용하여 방식전위를 모니터링하는 경우, (4) 실시간으로 방식전위를 감시하는 경우, (5) 실시간으로 방식상

태를 감시하고 제어를 하는 경우 등이 있다 [4]. 이상과 같이 다양한 방법으로 매설배관을 관리하고 있으나, 매설배관 외면의 피복 열화 및 손상이 유발될 수 있다. 예를 들어, 배관 설치 시 손상, 운전 및 작동 중 손상, 부적절한 표면 청소로 인한 손상 등이 있다 [5-7]. 따라서 피복의 손상 및 열화가 유발되었을 때 손상부위를 정확히 탐상하여 이후에 나타날지도 모르는 배관의 부식을 예방하는 것이 중요하다 [8-10].

원자력 발전소의 경우, 매설된 배관의 피복 결함에 대한 평가시 적절한 검사법을 사용하여야 한다. 가장 정확한 방법은 배관에 대하여 직접 검사를 수행하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 검사 면적이 커짐에 따라 비효율적이므로 일반적으로는 비 파괴적인 피복 결함 탐상을 실시한다 [11]. 배관 외면의 피복 결함 탐상 기술은 직류전원을 이

<sup>†</sup>Corresponding author: yikim@anu.ac.kr

김민기: 석사과정, 임부택: <sup>1</sup>박사과정 <sup>2</sup>부장, 김기태: 박사후과정, 장현영: 실장, 박홍배: 부장, 김영식: 교수

용하는 방법과 교류 전원을 이용하는 방법이 있다; 직류를 이용하는 방법은 배관의 전위를 측정하기 위하여 사용되는 근간격 전위조사법(CIPS, Close Interval Potential Survey) [12] 및 두개의 전극을 통해 전극 사이의 전압 기울기를 측정하여 배관 피복 결함의 위치를 결정하기 위한 직류 전압 기울기측정법(DCVG, Direct Current Voltage Gradient) 등이 있다 [13-15]. 또한, 교류를 이용하는 방법은 6 ~ 8 m 간격으로 송신기 주파수에 맞춰 수신기 간격 사이의 거리에 대한 전위 기울기를 측정하는 피어슨 조사법(Pearson survey) [16], 서로 떨어진 접지 점 사이에 교류 전류를 가하여 생기는 교류 신호의 강도를 측정하는 방법인 우드베리 조사법(Woodberry Survey), 저주파 교류전류를 인가하여 배관 주변에 발생하는 교류 전위 기울기를 측정하는 방법인 교류전압 기울기측정법(ACVG, Alternating Current Voltage Gradient) [17] 등이 있다. 한편, 전류의 분포를 결정하기 위한 방법으로 면전위 및 지전류측정법(APEC, Area Potential and Earth Current)이 있으며, 이 방법은 3개의 기준 전극을 사용한다[18]. 이상에서 소개한 방법은 필요에 따라서 적절한 방법을 선택하여 사용할 수 있으며, 토중 매설 피복 배관의 결함 위치 탐상을 위한 방법은 직류를 이용하는 방법 중 DCVG법을 많이 사용한다 [15]. 그러나, DCVG법 및 ACVG법의 경우, 전압 기울기를 이용하는 탐상기술이기 때문에 배관 근처에 외부 금속 구조물이 있을 경우 특정 피복 결함을 탐상하는 것에 있어 부정적인 영향을 많이 받는다 [11]. 또한 DCVG법의 경우, 피복 결함 및 결함의 상대적 크기를 확인할 수 있으며, ACVG에 비하여 더 높은 강도의 신호를 받기에 널리 사용되지만 그것에 비하여 각 배관의 구조, 매설 깊이, 양극의 위치 등 구체적인 조건에 대한 관련연구가 부족한 상태이다. 최근 본 연구진은 배관의 매설 깊이에 따른 적절한 인가 전압 및 양극의 수평 또는 수직의 위치에 대한 정확도 비교를 통하여 매설깊이에 따라서 피복결함을 100% 탐상할 수 있는 조건식을 제안한 바 있다 [19].

한편, 일반 배관은 토양 중에 일정한 깊이로 비교적 간단한 구조로 매설되어 있다 [20-22]. 그러나 원자력 발전소의 배관 라인은 다양한 매설 깊이와 다층 및 교차 구조로 복잡하게 매설되어 있다 [23-26]. 뿐만 아니라, 원자력 발전소 내의 좁은 지역에 많은 인접 정류기가 설치되어 운전되고 있고, 낙뢰 등 안전사고 예방을 위하여 토중에 구리망 접지 등이 다수 매설되어 있어서 매우 다양한 간섭이 발생할 수 있다 [27-29]. 특히, 접지 구리망의 경우, 주 건물 아래는 기본 접지도체망을 매설하고, 큰 건물이나 구조물 주위에는 외곽 접지도체를 설치한다 [30]. 대부분의 원자력 발전소에서는 이러한 넓은 형태의 접지망을 설계상의 이유로 다수의 양극을 설치한 후 배관과 접지망을 같이 연결하여 방식하고 있다. 따라서, 원자력 발전소의 매설 배관 피복 결

함 탐상을 위한 다양한 접근이 이루어지고 있다; 즉, 최근 FEM 방법을 사용하여 코팅된 배관의 보호 성능 시뮬레이션 [31], 3D FEM을 이용한 매설 배관의 손상 감지 분석 [32], 매설 배관의 실시간 부식 제어 시스템 [4]을 보고하였다. 또한, 배관의 구조 및 직류에 의한 간섭 [33], 미주 전류에 의한 간섭 [34] 등 간섭에 대한 다양한 연구가 되어 있다. 또한, 본 연구진은 매설 배관 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 인접 정류기 및 접지 구리망 간섭의 영향 연구를 통하여 정류기 간섭 효과 및 접지 구리망에 의한 간섭의 효과가 없어지는 거리에 대하여 보고한 바 있다 [35].

그러나 현실적으로 설치된 다수의 정류기와 접지 구리망에 의한 간섭을 제거하는 것은 불가능하므로 간섭 조건 하에서 측정을 하더라도 탐상정확도를 개선할 방법이 필요하다. DCVG법을 이용한 대부분의 연구는 배관과 평행한 방향으로 탐상을 진행하여 전압 기울기 극성 역전이 일어나는 지점을 결함으로 간주한다. 본 연구는 접지 구리망 간섭이 존재할 때, 다전극 탐상기를 이용하여 평행 방향으로 직류전압 기울기를 탐상한 후, 극성 역전이 나타나지 않더라도 전압 기울기가 사인파형(sine wave form)으로 나타난 지점에 대하여 수직 방향 및 대각 방향으로 해석하여 2전극 탐상기로 측정된 결과와 비교하여 탐상정확도를 분석하였다.

## 2. 연구 방법

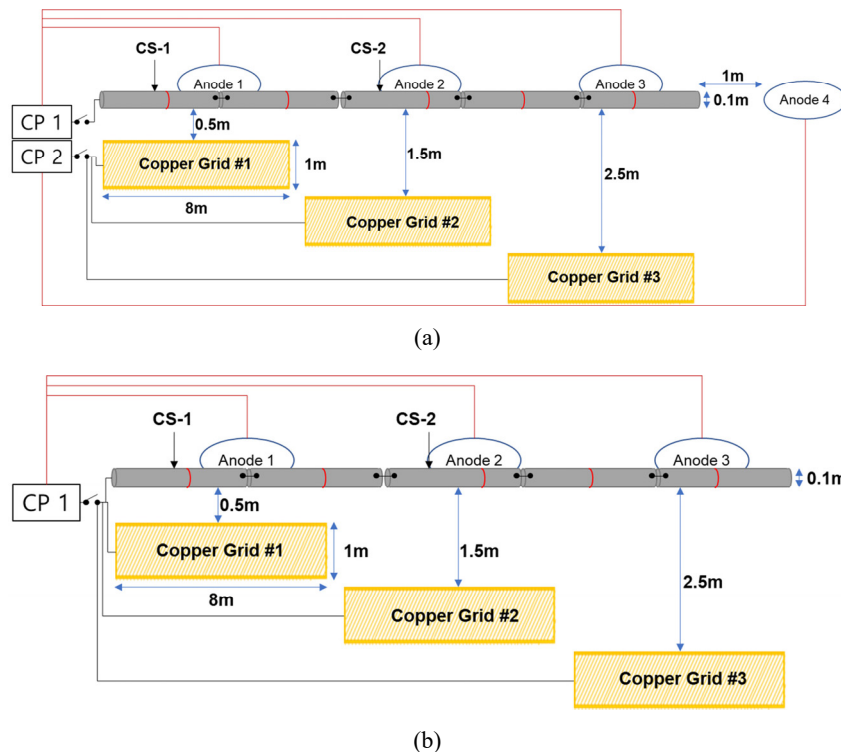
### 2.1 매설 배관 시험장 구축

Fig. 1은 시험장에 매설된 배관의 구성을 보여준다. 도면에서, 배관의 적색 선은 고의로 생성시킨 피복 결함의 위치를 의미한다. 폴리켄(Polyken) 코팅된 탄소강 배관을 2.2 m 깊이에 6 m 길이의 배관을 총 30 m 까지 각각 전기적으로 연결하여 매설하였으며 (Table 1 참조), 8 m 길이의 접지 구리망 3개를 0.5 m 깊이에 각 거리별로 매설하였다. Fig. 1a는 배관과 구리망이 각각 다른 정류기에 연결되어 별도로 음극방식 하는 것을 보여주며, 본 논문에서는 접지 구리망 간섭의 유형 중 'CP for Grid'로 명명하였다. Fig. 1b는 배관과 구리망이 동일한 정류기에 함께 연결되어 음극방식 하는 것을 보여주며, 본 논문에서는 접지 구리망 간섭의 유형 중 'CP for [Pipe + Grid]'로 명명하였다. 'CP for Grid' 간섭 유형의 경우, 배관에 대한 음극 방식은 Anode 1, 2, 3의 양극을 사용하였으며, 접지 구리망에 대한 음극 방식은 Anode 4의 양극을 사용하였다. 한편, 'CP for [Pipe + Grid]' 간섭 유형의 경우, 배관과 접지 구리망에 대한 음극 방식은 Anode 1, 2, 3의 양극을 사용하였다. 또한, 너비 1 m, 길이 8 m 크기의 접지 구리망 3개를 배관으로부터 각각 0.5 m, 1.5 m, 2.5 m 떨어진 위치에 매설하였다. 음극 방식의 상태는 실시간으로 모니터링 되었으며, 방식 배관의 On-Off 전위를 측정하기 위해 전류 차단기를 설치하였다.

**Table 1 Buried pipes and flaws in the test bed**

Pipe*	Buried depth (m)	Diameter (cm)	Length (m)	Total Surface Area (cm <sup>2</sup> )	Total Flaw Area (cm <sup>2</sup> )	Flaw ratio (%)
CS-1	2.2	10	12	37,698	1,130	3
CS-2	2.2	10	18	56,547	1,695	3

\*CS (Polyken coated carbon steel)



**Fig. 1 Configuration of buried pipes in test bed (Red lines above the pipe means the location of the coating flaws); (a) Copper grids were separately cathodic protected, (b) Pipes and grids were cathodic protected.**

**Table 2 Detection condition under the copper grid interference**

Flaw detection method		Copper Grid #1	Copper Grid #2	Copper Grid #3
CP for Grid or CP for [Pipe+Grid]	Case 1 (No Interference)	Off	Off	Off
	Case 2 (1 On - 2 Off)	On	Off	Off
		Off	On	Off
		Off	Off	On
	Case 3 (2 On - 1 Off)	On	On	Off
		Off	On	On
		On	Off	On
	Case 4 (3 On)	On	On	On

\*'CP for Grid' means that pipes and copper grids were separately cathodic protected

\*'CP for [Pipe + Grid]' means that pipe and copper grid were cathodic protected by the same rectifier

매설 기준 전극은 황산동 전극(CSE, Cu/CuSO<sub>4</sub>)이다. 피복 결함의 총 면적은 565 cm<sup>2</sup>이었다. Table 1은 매설된 배관의 정보를, Table 2는 구리망 간섭 탐상 조건을 요약한 것이다.

### 2.2 피복 결함 측정 방법

6개의 Cu/CuSO<sub>4</sub> 기준 전극을 사용한 다전극 탐상기(BPCD system, ANSCO, Korea)를 사용하여 피복 결함을 탐상하였다. 인가 탐상 전압은 아래의 100% 탐상식에 의거하여 설정하였다 [19].

$$\text{탐상 전위, } V(\text{CSE}) = -0.59 \times [\text{매설 깊이, m}] - 3.53$$

탐상기의 6개의 전극 중 (+) 단자(통상 적색 단자)에 연결된 기준전극이 3개, (-) 단자(통상 흑색 단자)에 연결된 전극이 3개이다(Fig. 2 참조). Fig. 2에서처럼 측정 방향은 (-) → (+) 단자 방향으로 진행하며, 이때 Fig. 3에 나타난 바와 같이 전압 기울기가 (-)에서 (+)로 극성이 역전되는 지점을 결함 신호로 간주하였다(평행 및 대각 방향에서의 해석기준). 또한 수직방향 해석에서의 결함 위치는 전위차

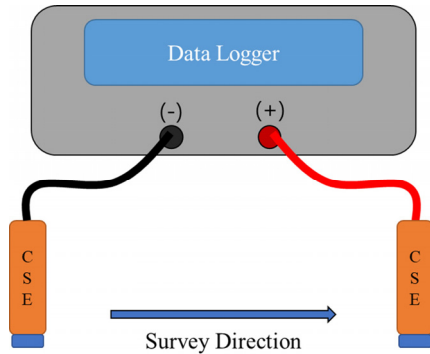


Fig. 2 Detector configuration and survey direction ((-) → (+)).

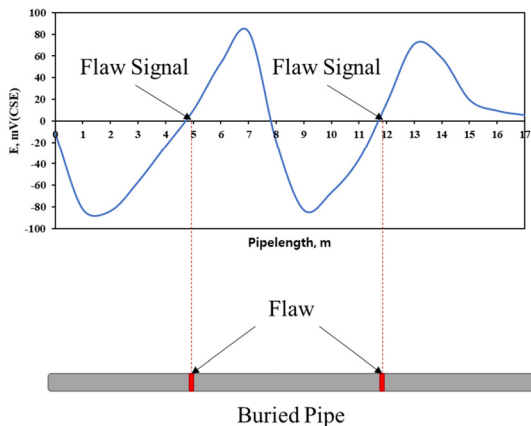


Fig. 3 Potential Reversal and flaw identification in surveying from (-) electrode to (+) electrode direction.

가 최대값을 보이는 위치에 상응한다 [36–38]. 본 연구에서는 전압기울기 측정법에 의한 결함 신호가 실제 결함의 위치에서 대략 ±1m오차 범위 내에 있을 때 결함이 검출되었다고 정의하였다 [19].

### 2.3 피복 결함 탐상 정확도 계산

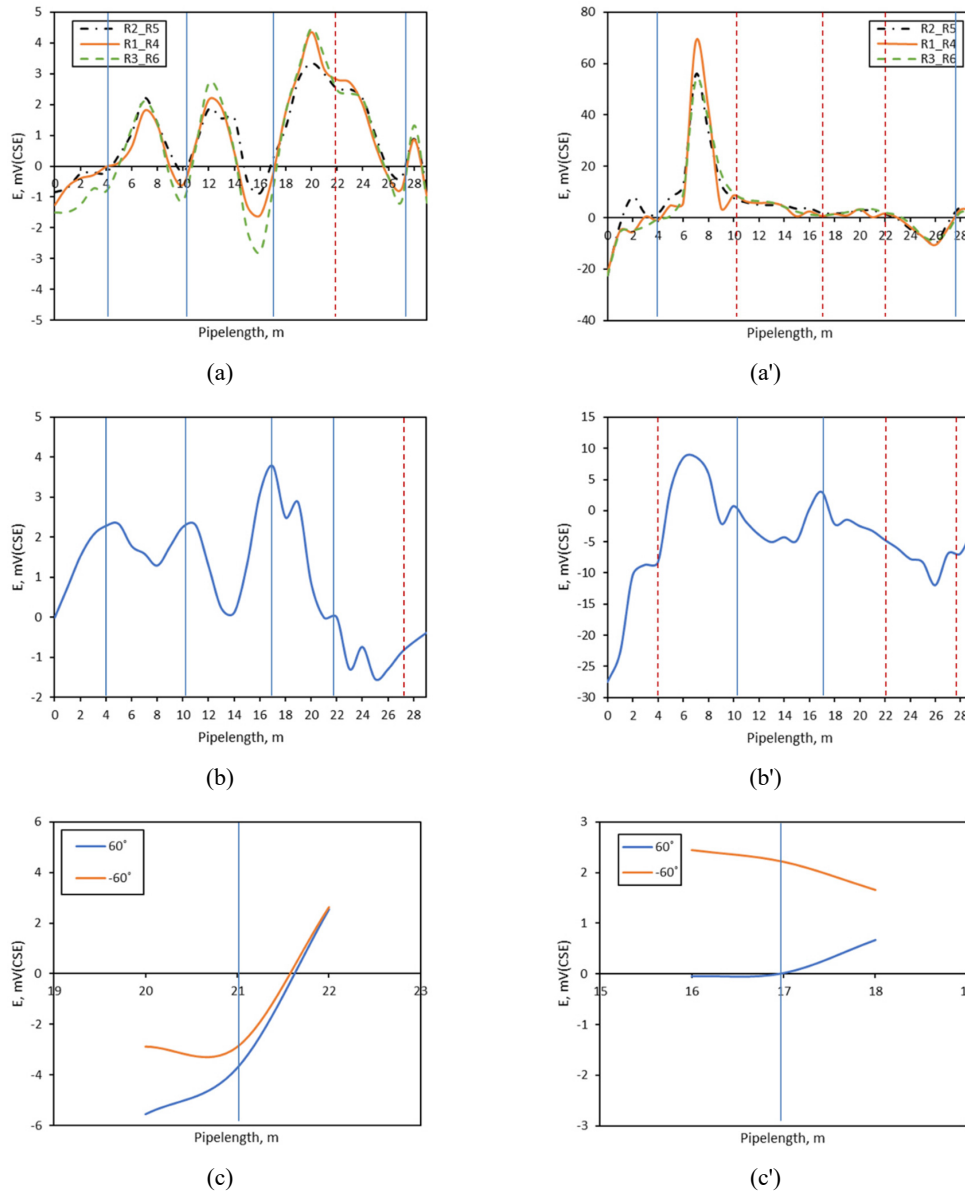
다전극 탐상기를 이용한 피복 결함의 위치는 도면에 매설된 배관 라인을 따라 측정된 전압기울기의 극성 역전에 의하여 결정된다. 그러나 극성 역전의 신호수는 실제 결함 수보다 많거나 적을 수 있으므로 불가피한 오류가 나타날 수 있어서 측정 정확도를 신중하게 계산하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 다음 식에 따라 측정 정확도를 계산하였다 [19]. 다음 식에서 ‘탐상 신호’는 결함 신호의 위치와 실제 결함의 위치가 같음을 의미한다.

$$\text{탐상 정확도, \%} = \left( \frac{\text{탐상 신호의 수} \times 2}{\text{실제 결함의 수} + \text{측정 결함의 수}} \right) \times 100$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 매설 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 간섭의 영향: ‘CP for Grid’의 경우

Fig. 4는 배관과 구리망이 서로 각기 다른 정류기에 연결되어 방식 중에 있는 ‘CP for Grid’에 대한 다전극 탐상 및 해석 결과이다. 탐상 배관의 매설 깊이는 2.2 m로서, 100 %탐상식을 이용하여 [19] 탐상 전위를 -4.8 V(CSE)로 설정하였다. 한편, 접지 구리망의 전위는 별도의 인접 정류기로 전압을 인가하여 방식 전위를 -0.85 V(CSE)로 설정하였다. 그림에서 파란 실선은 피복 결함이 탐상된 것을, 붉은 점선은 피복 결함이 탐상 되지 않은 것을 의미한다(본 연구진은 DCVG에 의한 결함의 신호가 실제 고의 결함 위치에 대하여 ± 1 미터 범위 내에 있을 때 결함이 탐상되었다고 정의하였다 [19]). Fig. 4a,b,c는 접지 구리망 간섭이 없는 경우이며, Fig. 4a',b',c'는 접지 구리망 #1의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 4a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관방향으로 배열된 3쌍의 기준 전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한, 다전극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 4b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 4c,c'는 대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 간섭이 없는 Fig. 4a는 5개의 결함 중 결함 신호는 4개 그리고 탐상된 결함은 4개로 나타났다. 결함이 탐상되지 않은 22 m 결함의 경우, 전압 기울기가 사인 파형(sine wave form)의 변화를 보이고 있기 때문에 그 지점에 대하여 Fig. 4b의 수직 DCVG 및 Fig. 4c의 대각 DCVG 해석을 실시하여 결함을 탐상하였다. 한편, 접지 구리망 #1의 간섭이 있는 Fig. 4a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 2개,



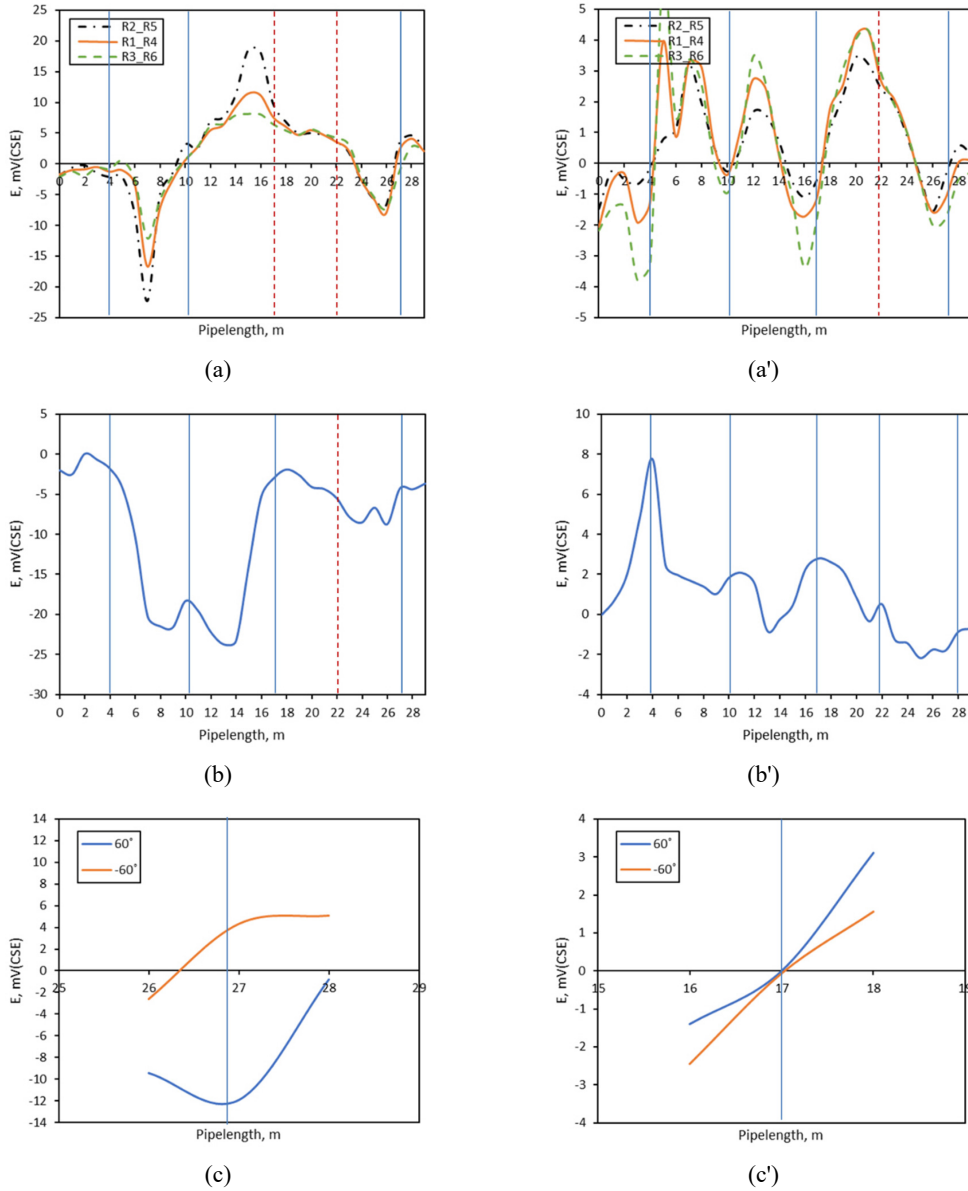
Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

Fig. 4 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) CP-off for Grids, (a')(b')(c') Interference by CP-on for Grid #1 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

탐상 된 결함은 2개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 10, 17, 22 m 결함 중 10, 17 m 결함의 경우, Fig. 4b'의 수직 DCVG 및 Fig. 4c'의 대각 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG 해석을 통한 탐상 정확도는 간섭이 없는 경우 100% 탐상, 접지 구리망 #1의 간섭이 있는 경우 88.9 % 탐상 되었다.

Fig. 5는 배관과 구리망이 서로 각기 다른 정류기에 연결 후 방식 중에 있는 'CP for Grid'에 대한 것으로서, Fig. 5a,b,c는 접지 구리망 #2의 간섭이 있는 경우이며, Fig.

5a',b',c'는 접지 구리망 #3의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 5a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관 방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한 대전극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 5b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 5c,c'는 대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 #2의 간섭이 있는 Fig. 5a의 평행 DCVG 해석결과, 5개의 결함 중 결함 신호는 3개, 탐상 된 결함은 3개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 17, 22 m 결함 중 17 m 결함의 경우, Fig. 5b의

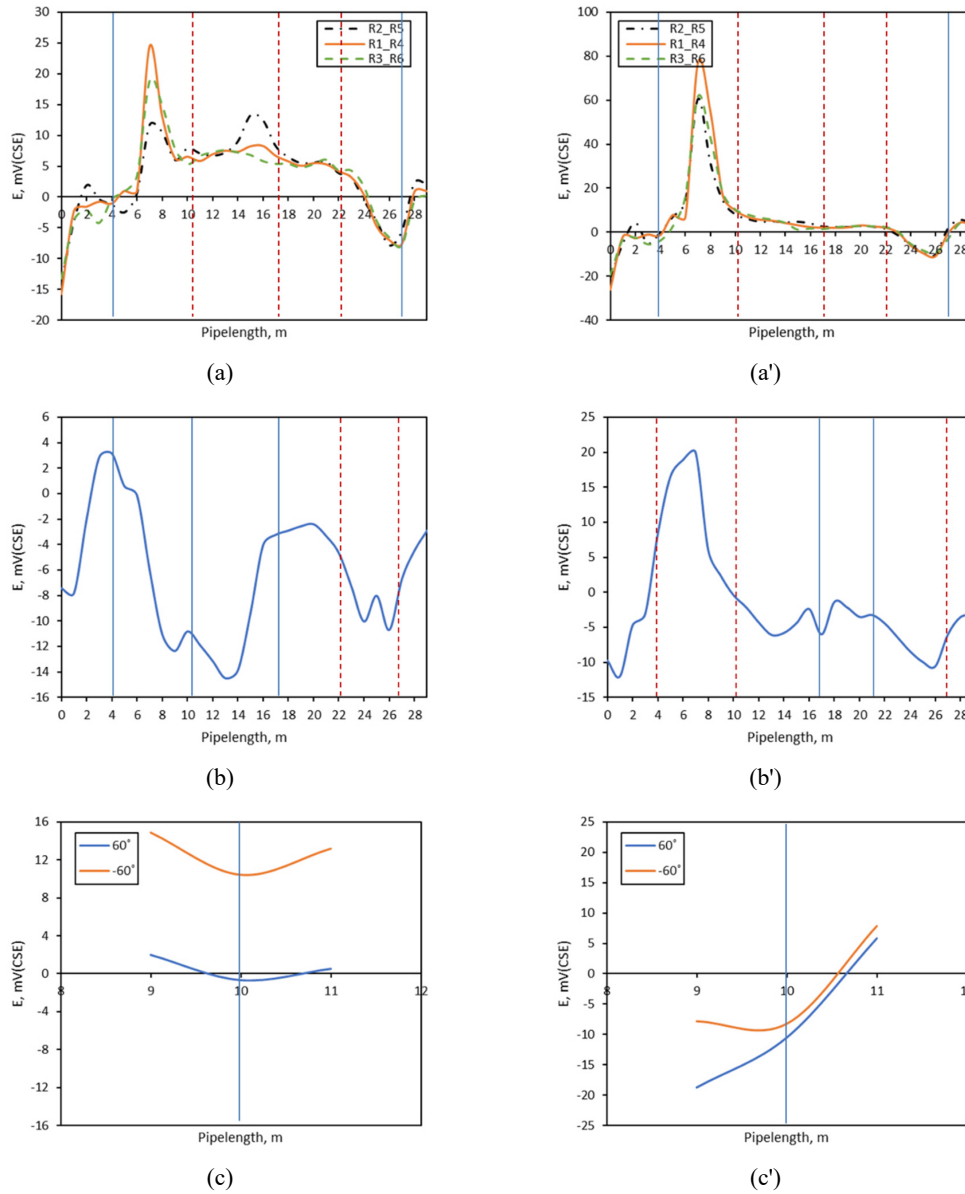


Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

**Fig. 5** 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) Interference by CP-on for Grid #2, (a')(b')(c') Interference by CP-on for Grid #3 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

수직 DCVG 및 Fig. 5c의 대각 DCVG 해석결과, 결함이 탐상되었다. 한편, 접지 구리망 #3의 간섭이 있는 경우인 Fig. 5a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 4개, 탐상된 결함은 4개로 나타났다. 결함이 탐상되지 않은 22 m 결함의 경우, Fig. 5b'의 수직 DCVG 해석을 통하여 결함이 탐지되었다. 이상의 결과를 요약하면, 접지 구리망 #2의 간섭이 있는 경우에 대한 평행, 수직 및 대각 DCVG 해석을 통한 탐상 정확도는 88.9 % 탐상, 접지 구리망 #3의 간섭이 있는 경우는 100 % 탐상되었다.

Fig. 6a,b,c는 접지 구리망 (#1 + #2)의 간섭이 있는 경우이며, Fig. 6a',b',c'는 접지 구리망 (#1 + #3)의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 6a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한, 다전극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 6b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 6c,c'는 대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 (#1 + #2)의 간섭이 있는 Fig. 6a는 5개의 결함 중 결함 신호는 2개, 탐상된 결함은 2개로 나타났다. 결함



Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

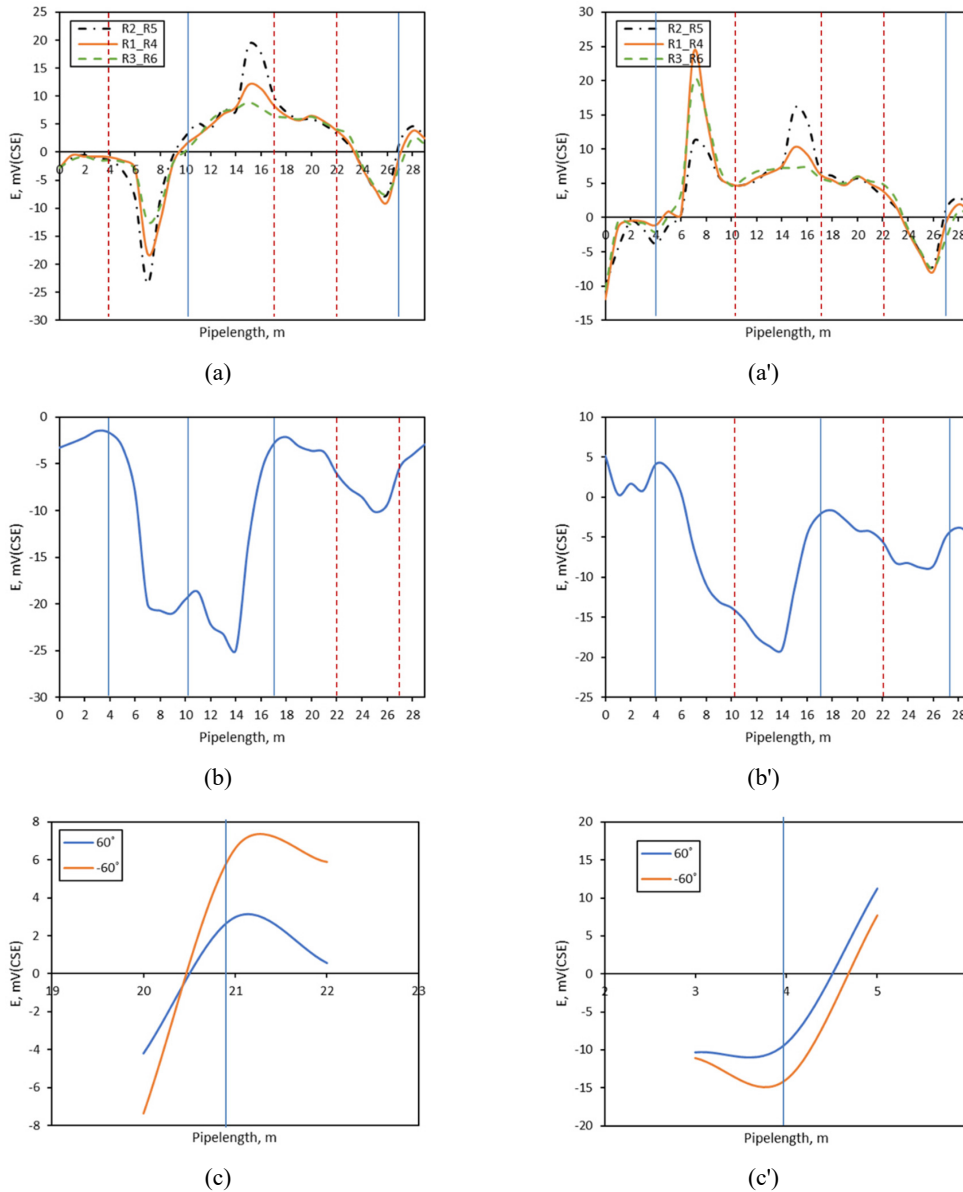
Fig. 6 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) Interference by CP-on for Grid #1 & #2, (a')(b')(c') Interference by CP-on for Grid #1 & #3 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

이 탐상 되지 않은 10, 17, 22 m 결함 중 10, 17 m 결함의 경우 Fig. 6b의 수직 DCVG 및 Fig. 6c의 대각 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 한편, 접지 구리망 (#1 + #3)의 간섭이 있는 Fig. 6a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 2개, 탐상 된 결함은 2개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 10, 17, 22 m 결함의 경우 Fig. 6b'의 수직 DCVG 및 Fig. 6c'의 대각 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 이상의 결과를 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG 해석을

통한 탐상 정확도는 접지 구리망 (#1 + #2)의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상, 접지 구리망 (#1 + #3)의 간섭이 있는 경우는 100 % 탐상 되었다.

Fig. 7a,b,c는 접지 구리망 (#2 + #3)의 간섭이 있는 경우이며, Fig. 7a',b',c'는 접지 구리망의 간섭 (#1 + #2 + #3)의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 7a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한, 다전





Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

**Fig. 7** 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) Interference by CP-on for Grid #2 & #3, (a')(b')(c') Interference by CP-on for Grid #1, #2 & #3 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis

극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 7b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 7c,c'는 대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 (#2 + #3)의 간섭이 있는 Fig. 7a는 5개의 결함 중 결함 신호는 2개, 탐상 된 결함은 2개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 4, 17, 22 m 결함의 경우 Fig. 7b의 수직 DCVG 및 Fig. 7c의 대각 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 한편, 접지 구리망의 간섭 (#1 + #2 + #3)의 간섭이 있는 Fig. 7a'는 5개의 결함 중 결함

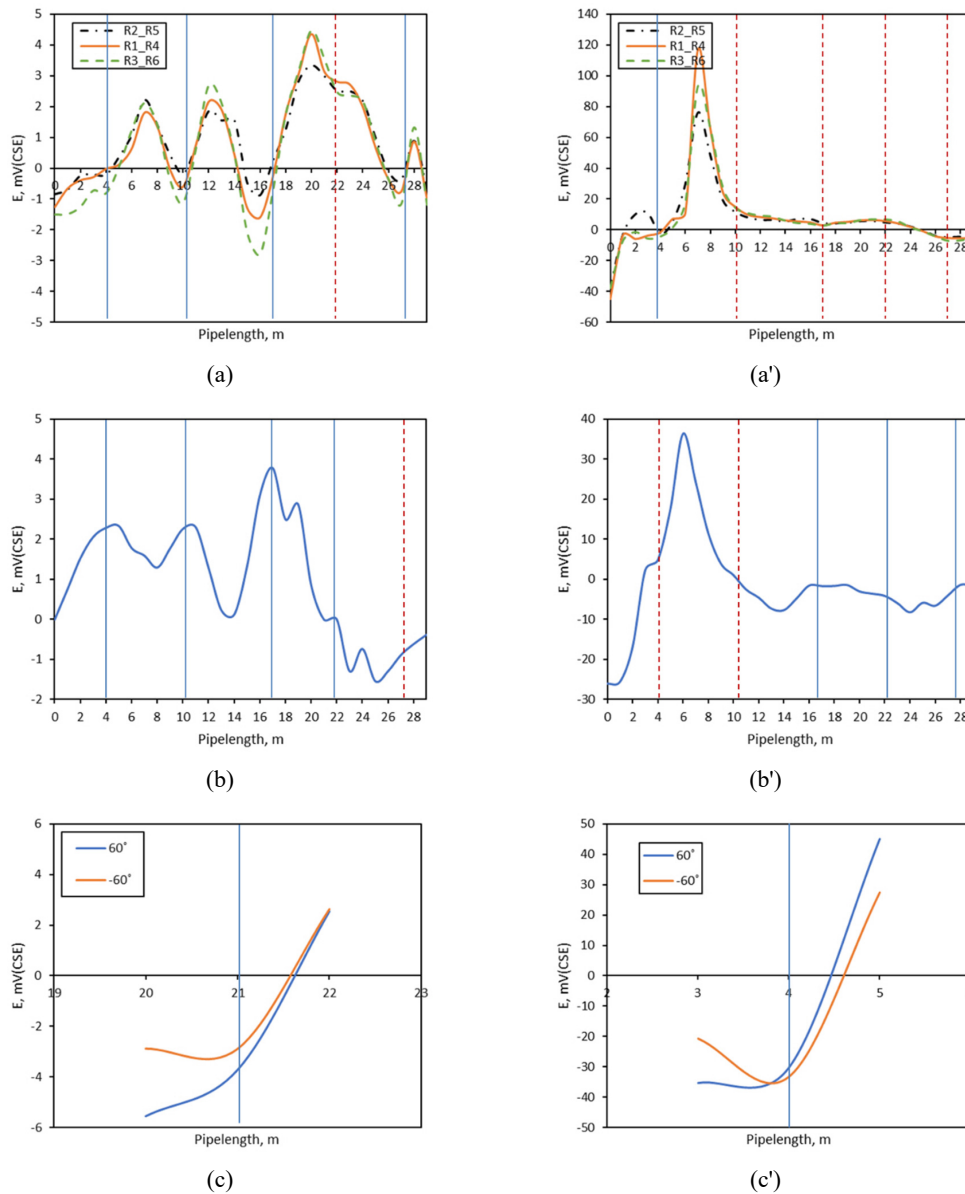
신호는 2개, 탐상 된 결함은 2개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 10, 17, 22 m 결함 중 17 m 결함의 경우, Fig. 7b'의 수직 DCVG에서 결함을 탐상한 것으로 나타났다. 이상의 결과를 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG 해석을 통한 탐상 정확도는 접지 구리망 (#2 + #3)의 간섭이 있는 경우는 100 % 탐상, 접지 구리망 (#1 + #2 + #3)의 간섭이 있는 경우는 75.0 % 탐상 되었다.



3.2 매설 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리 망 간섭의 영향; 'CP for [Pipe + Grid]'의 경우

Fig. 8은 배관과 구리망이 서로 동일한 정류기에 연결 후 방식 중에 있는 'CP for [Pipe + Grid]'에 대한 것으로서, 다전극 탐상기로 측정된 탐상 결과이다. 탐상 배관의 매설 깊이는 2.2 m로서, 탐상 배관 및 접지 구리망의 전위는 -1.2 V(CSE)로 설정하였다. 그림에서 파란 실선은 고의 결함이 탐상 된 것을, 붉은 점선은 고의 결함이 탐상 되지

않은 것을 의미한다(본 연구진은 DCVG에 의한 결함의 신호가 실제 고의 결함 위치에 대하여 ± 1 미터 범위 내에 있을 때 결함이 탐상 되었다고 정의하였다 [19]). Fig. 8a,b,c는 접지 구리망 간섭이 없는 경우이며, Fig. 8a',b',c'는 접지 구리망 #1의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 8a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한 다전극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 8b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 8c,c'는 대각 DCVG 해석



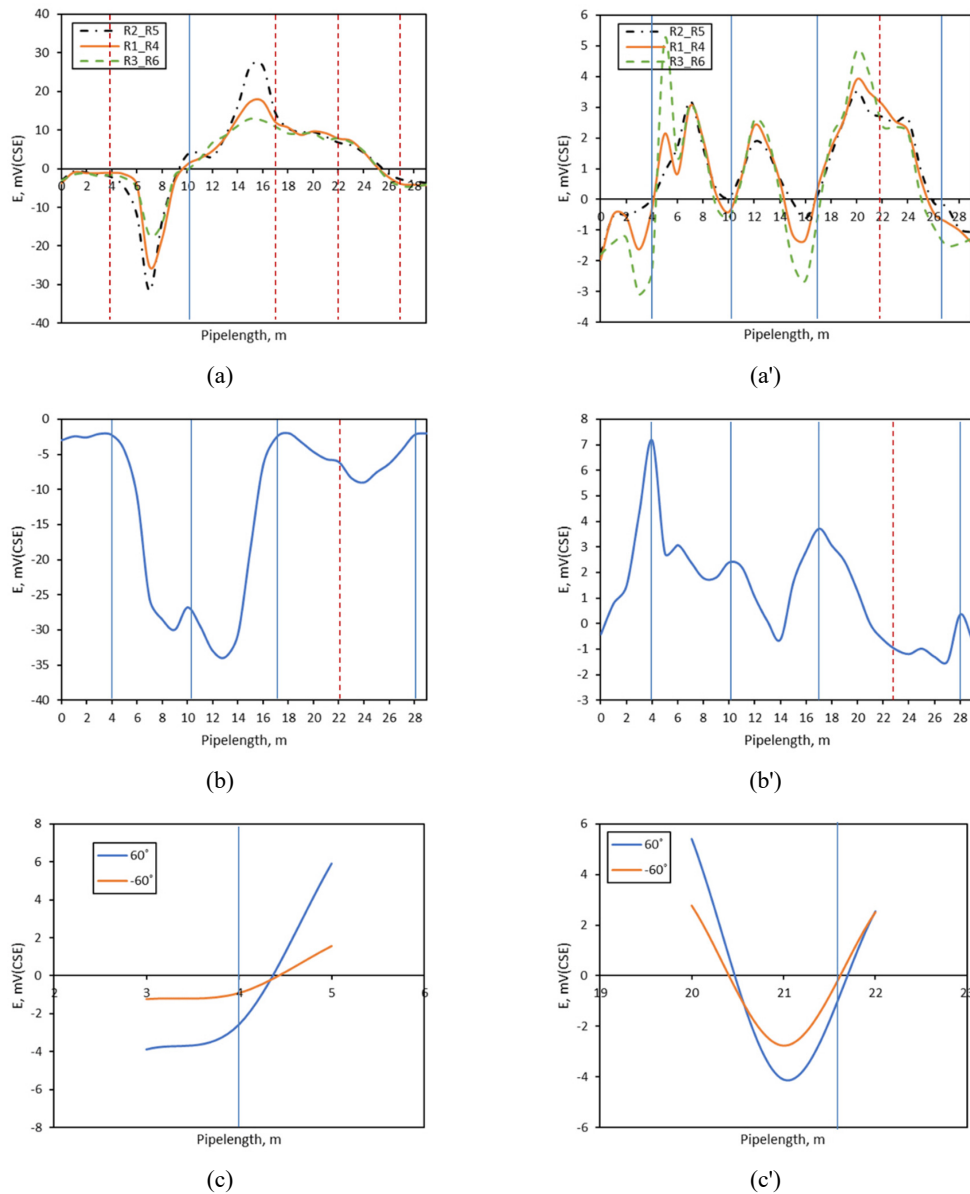
Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

Fig. 8 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) CP-off for [Pipe+Grids], (a')(b')(c') Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #1 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 간섭이 없는 Fig. 8a는 5개의 결함 중 결함 신호는 4개, 탐상 된 결함은 4개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 22 m 결함의 경우, 극성변화는 없으나 전압기울기의 변화가 보이므로 Fig. 8b의 수직 DCVG 및 Fig. 8c의 대각 DCVG해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 한편, 접지 구리망 #1의 간섭이 있는 Fig. 8a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 1개, 탐상 된 결함은 1개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 10, 17, 22, 27 m 결함 중

17, 22, 27 m결함의 경우, Fig. 8b'의 수직 DCVG해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 이상의 결과를 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG해석을 통한 탐상 정확도는 간섭이 없는 경우는 100 % 탐상, 접지 구리망 #1의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상 되었다.

Fig. 9a,b,c는 접지 구리망 #2의 간섭이 있는 경우이며, Fig. 9a',b',c'는 접지 구리망 #3의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 9a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은

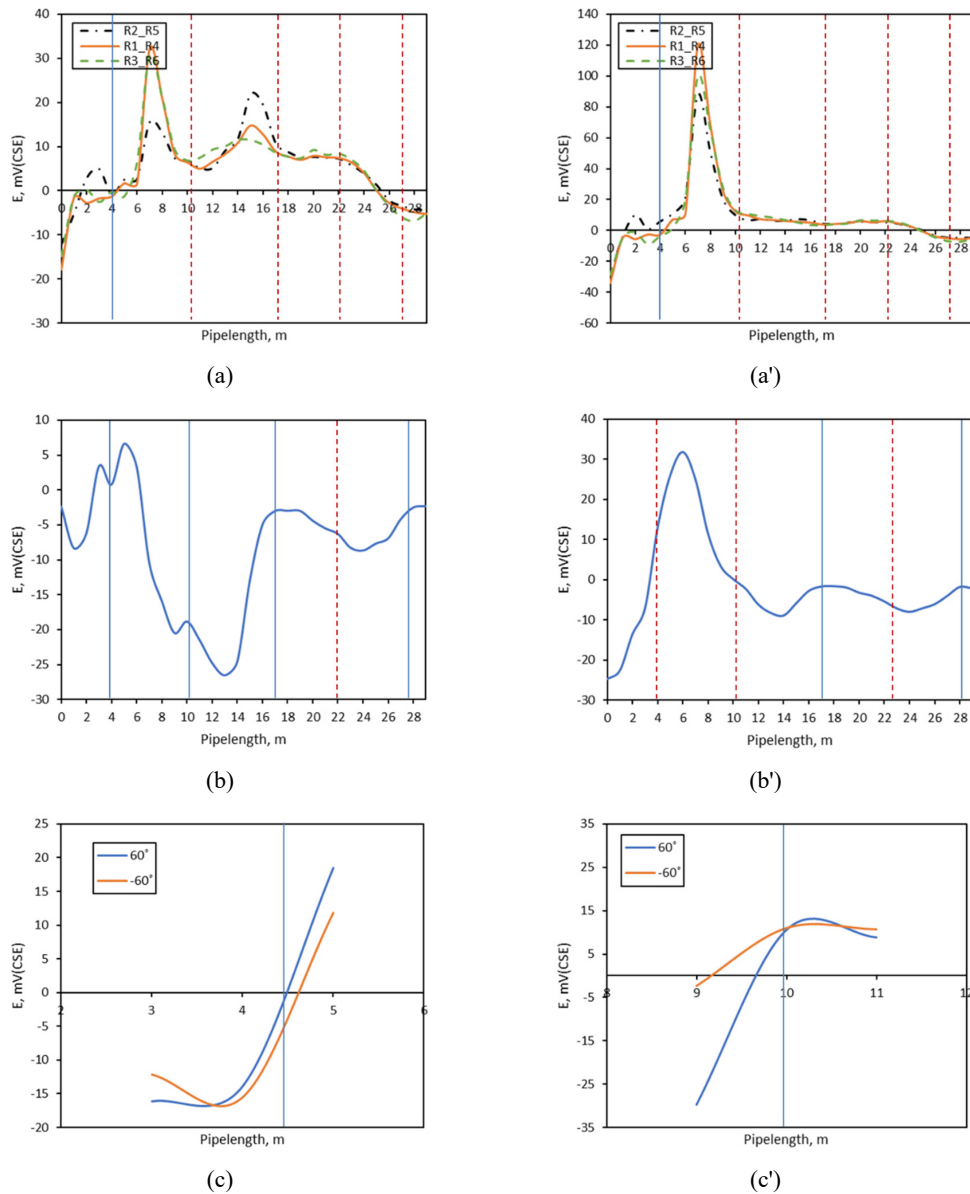


Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

Fig. 9 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #2, (a')(b')(c') Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #3 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

배관방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한, 다전극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 9b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 9c,c'는 대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 #2의 간섭이 있는 Fig. 9a는 5개의 결함 중 결함 신호는 1개, 탐상 된 결함은 1개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 4, 17, 22, 27 m 결함 중 4, 17, 27 m 결함의 경우 Fig. 9b의 수직 DCVG 및 Fig. 9c의 대각 DCVG해석을 통하여 결함을

탐상하였다. 한편, 접지 구리망 #3의 간섭이 있는 Fig. 9a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 4개, 탐상 된 결함은 4개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 22 m 결함의 경우 Fig. 9c'의 대각 DCVG해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 이상의 결과를 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG해석을 통한 탐상 정확도는 접지 구리망 #2의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상, 접지 구리망 #3의 간섭이 있는 경우는 100 % 탐상 되었다. Fig. 10은 배관과 구리망이 서로 동일한 정류기에 연결

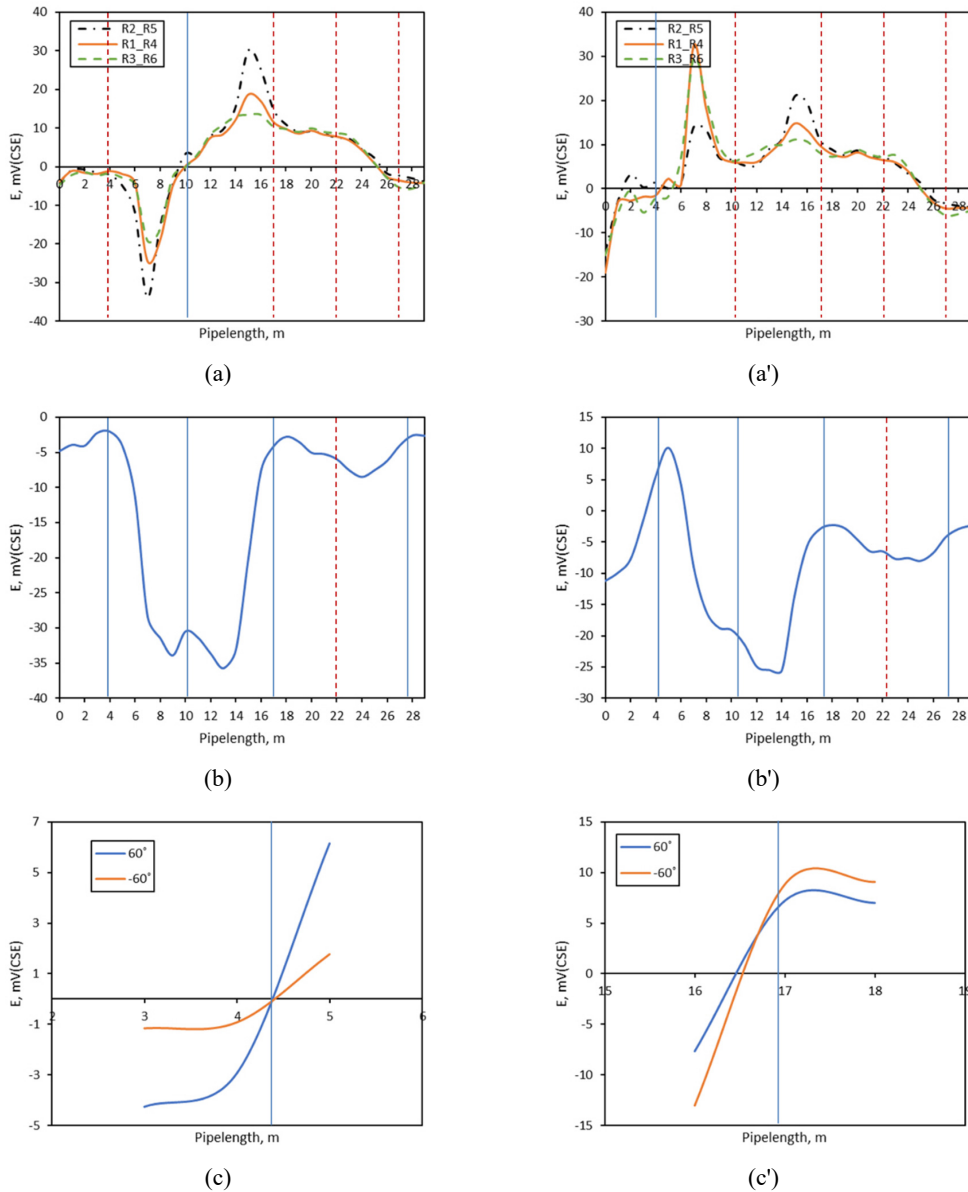


Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

Fig. 10 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #1 & #2, (a')(b')(c') Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #1 & #3 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

후 방식 중에 있는 'CP for [Pipe + Grid]'에 대한 것으로서, 다전극 탐상기로 측정된 탐상 결과이다. Fig. 10a,b,c는 접지 구리망 (#1 + #2)의 간섭이 있는 경우이며, Fig. 10a',b',c'는 접지 구리망 (#1 + #3)의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 10a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한, 다전극 탐상기로 측정된 데이터로부터 Fig. 10b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 10c,c'는

대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 (#1 + #2)의 간섭이 있는 Fig. 10a는 5개의 결함 중 결함 신호는 1개, 탐상된 결함은 1개로 나타났다. 결함이 탐상되지 않은 10, 17, 22, 27 m 결함 중 10, 17, 27 m 결함의 경우, Fig. 10b의 수직 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 한편, 접지 구리망 (#1 + #3)의 간섭이 있는 Fig. 10a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 1개, 탐상된 결함은 1개로 나타났다. 결함이 탐상되지 않은 10, 17, 22, 27



Blue line : Flaw detected, Red dot line : Flaw not detected

Fig. 11 3 kinds of analysis on coating flaw detection of the pipes buried in the soil under (a)(b)(c) Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #2 & #3, (a')(b')(c') Interference by CP-on for [Pipe+Grid] #1, #2 & #3 ; (a)(a') parallel analysis, (b)(b') vertical analysis, (c)(c') diagonal analysis.

m결함 중 10, 17, 27 m결함의 경우 Fig. 10b'의 수직 DCVG 및 Fig. 10c'의 대각 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 이상의 결과를 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG 해석을 통한 탐상 정확도는 접지 구리망 (#1 + #2)의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상, 접지 구리망 (#1 + #3)의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상 되었다.

Fig. 11은 배관과 구리망이 서로 동일한 정류기에 연결 후 방식 중에 있는 'CP for [Pipe + Grid]' 에 대한 것으로서, 다전극 탐상기로 측정된 탐상 결과이다. Fig. 11a,b,c는 접지 구리망 (#2 + #3)의 간섭이 있는 경우이며, Fig. 11a',b',c'는 접지 구리망 (#1 + #2 + #3)의 간섭이 있는 경우이다. 또한, Fig. 11a,a'는 평행 DCVG의 탐상 결과로서 3개의 선은 배관방향으로 배열된 3쌍의 기준전극의 조합으로 측정된 데이터이다. 또한, Fig. 11b,b'는 수직 DCVG 해석 결과 및 Fig. 11c,c'는 대각 DCVG 해석 결과를 도식화한 것이다. 접지 구리망 (#2 + #3)의 간섭이 있는 Fig. 11a는 5개의 결함 중 결함 신호는 1개, 탐상 된 결함은 1개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 4, 17, 22, 27 m결함 중 4, 17, 27 m 결함의 경우 Fig. 11b의 수직 DCVG에서 결함을 탐상한 것으로 나타났다. 한편, 접지 구리망 (#1 + #2 + #3)의 간섭이 있는 Fig. 11a'는 5개의 결함 중 결함 신호는 1개, 탐상 된 결함은 1개로 나타났다. 결함이 탐상 되지 않은 10, 17, 22, 27 m 결함 중 10, 17, 27 m결함의 경우 Fig. 11b'의 수직 DCVG 및 Fig. 11c'의 대각 DCVG 해석을 통하여 결함을 탐상하였다. 이상의 결과를 요약하면, 평행, 수직 및 대각 DCVG 해석을 통한 탐상 정확도는 접지 구리망 (#2 + #3)의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상, 접지 구리망 (#1 + #2 + #3)의 간섭이 있는 경우는 88.9 % 탐상 되었다.

### 3. 고찰

Table 3은 앞에서 구한 토양에 매설된 배관의 피복 결함

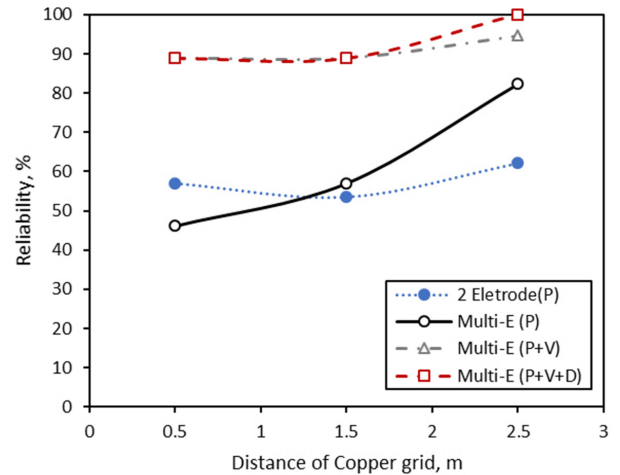


Fig. 12 Effect of the distance between the pipe and the grid on the reliability of coating flaw detection of the pipe buried in the soil.

탐상 정확도를 배관과 접지 구리망 사이의 거리에 따라 요약한 것으로서, 이 데이터를 이용하여 배관과 간섭 접지 구리망 간의 거리에 따른 영향을 그림으로 작성하였다. Fig. 12는 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 토양에 매설된 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 영향을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 전체적으로 배관과 접지 구리망 간의 거리가 가까워질수록 탐상 방법에 관계없이 탐상 정확도가 감소하였다. 특히, 기존 2전극 탐상기를 이용한 피복 결함 탐상 결과, 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 0.5 m로 간섭의 영향이 큰 경우 57.1 %의 낮은 탐상 정확도를 보는 반면, 다전극 탐상기를 이용하면 88.9 %의 탐상 정확도로 개선된 것을 확인할 수 있다.

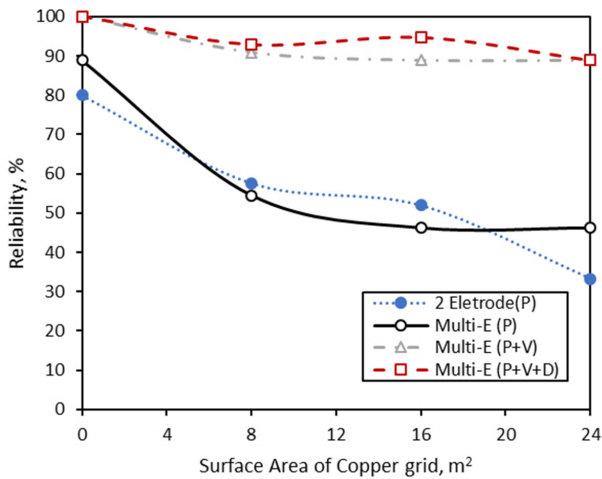
Table 4는 토양에 매설된 배관의 피복 결함 탐상 정확도를 접지 구리망의 표면적에 따라 요약한 것으로서, 이 데이터를 이용하여 접지 구리망의 표면적에 따른 영향을 그림으로 작성하였다. Fig. 13은 접지 구리망의 표면적이 토양에

Table 3 Summary of the reliability of coating flaw detection of the pipe buried in the soil; Effect of the distance between the pipe and the grid

Analysis method	Distance of Copper grid		
	0.5 m	1.5 m	2.5 m
2 Electrode (Parallel) Reliability, %	57.1	53.6	62.2
Multi-Electrode (Parallel) Reliability, %	46.2	57.1	82.4
Multi-Electrode (Parallel+Vertical) Reliability, %	88.9	88.9	94.7
Multi-Electrode (Parallel+Vertical+Diagonal) Reliability, %	88.9	88.9	100.0

**Table 4 Summary of the reliability of coating flaw detection of the pipe buried in the soil; Effect of the surface area of the grid.**

Analysis method \ Surface Area of Copper grid	0 m <sup>2</sup>	8 m <sup>2</sup>	16 m <sup>2</sup>	24 m <sup>2</sup>
2 Eelectrode (Parallel) Reliability, %	80.0	57.6	51.9	33.3
Multi-Eelectrode (Parallel) Reliability, %	88.9	54.5	46.2	46.2
Multi-Eelectrode (Parallel+Vertical) Reliability, %	100.0	90.9	88.9	88.9
Multi-Eelectrode (Parallel+Vertical+Diagonal) Reliability, %	100.0	92.9	94.7	88.9



**Fig. 13 Effect of the surface area of Copper grid on the reliability of coating flaw detection of the pipe buried in the soil.**

매설된 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 영향을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이, 전체적으로 접지 구리망의

표면적이 증가할수록 탐상 방법에 관계없이 탐상 정확도가 감소하였다. 특히, 기존 2전극 탐상기를 사용할 경우, 접지 구리망의 표면적이 증가함에 따라 탐상정확도가 최대 80 %에서 최소 33.3 %로 대략 46.7 % 감소한 반면, 다전극 탐상기를 사용할 경우, 탐상정확도가 100 %에서 88.9 %로 대략 11.1 % 감소하는데 그치고 있다.

Table 5는 도양에 매설된 배관의 피복 결함 탐상 정확도를 접지 구리망의 간섭 유형에 따라 요약한 것이다. 이 데이터를 이용하여 2전극 탐상법과 다전극 탐상해석결과를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 2전극 탐상법보다 다전극 탐상해석법의 탐상정확도가 높게 나타났으며, 이는 다전극 탐상해석법이 다양한 방향의 DCVG해석에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 탐상기법에 관계없이 ‘CP for [Pipe + Grid]’ < ‘CP for Grid’ < No Interference의 순서로 탐상정확도가 증가하였으며, 다전극 탐상기를 사용할 경우, 모든 간섭유형에서 90 % 이상의 탐상정확도가 나타났으며, 2전극 탐상 결과보다 평균 탐상 정확도가 1.8배 개선되었다.

**Table 5 Summary of the reliability of coating flaw detection of the pipe buried in the soil; Effect of the interference type of the grid**

Analysis method \ Interference type	No Interference	CP for Grid	CP for [Pipe + Grid]
2 Eelectrode (Parallel) Reliability, %	80.0	57.5	45.9
Multi-Eelectrode (Parallel) Reliability, %	88.9	65.4	40.9
Multi-Eelectrode (Parallel+Vertical) Reliability, %	100.0	87.1	88.9
Multi-Eelectrode (Parallel+Vertical+Diagonal) Reliability, %	100.0	90.6	92.3



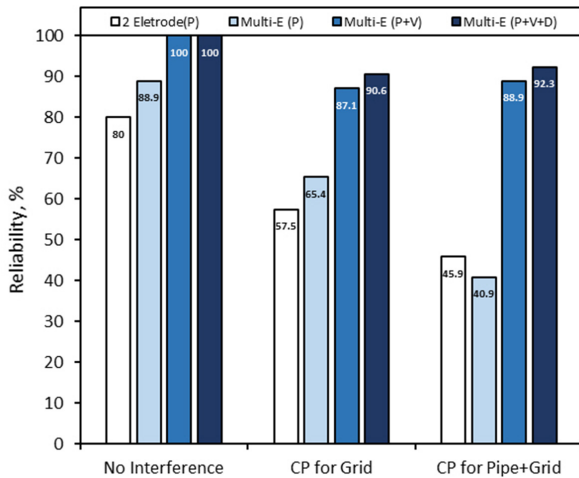


Fig. 14 Comparison of the reliability of coating flaw detection of the pipe buried in the soil by 2 electrode and multi-electrode methods.

#### 4. 결론

본 연구는 배관과 접지 구리망 사이의 거리 및 구리망 면적이 매설 배관의 피복 결함 탐상정확도에 미치는 영향을 2전극 탐상기 및 다전극 탐상기를 사용하여 탐상하고 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 접지 구리망 간섭 거리가 0.5 m일 때, 2전극 탐상법에 비하여 다전극 탐상해석법의 탐상 정확도가 31.8 % 개선되었다. 또한, 접지 구리망 표면적이 24 m<sup>2</sup>일 때, 2전극 탐상법에 비하여 다전극 탐상해석법의 탐상 정확도가 55.6 % 개선되었다. 한편, 구리망 간섭의 경우, 배관과 접지구리망이 동일한 정류기로 음극방식 되는 ‘CP for [Pipe + Grid]’ 간섭 유형에서 탐상정확도가 낮게 나타났으나, 이 경우 2전극 탐상법에 비하여 다전극 탐상해석법의 탐상 정확도가 46.4 % 개선되었다.
- 2) 다전극 탐상기를 사용한 토중 매설 피복 배관의 결함 탐상 정확도가 개선된 이유는 배관에 평행하게 측정된 전압 기울기 중 극성 역전을 보이지는 않으나 전압 기울기가 사인 파형(sine wave form)을 보이는 지역에 대한 평행, 수직 및 대각선 방향의 해석법에 기인한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20171520000350).

#### References

1. J. G. Kim and Y. W. Kim, *Corros. Sci.*, **43**, 2011 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00015-4)
2. I. Gurrappa, *Mat. Pro. Technol.*, **166**, 256 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.074>
3. E. S. Ibrahim, *Elect. Pow. Syst. Res.*, **52**, 9 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00133-3)
4. K. T. Kim, H. W. Kim, Y. S. Kim, H. Y. Chang, B. T. Lim, and H. B. Park, *Corros. Sci. Tech.*, **14**, 12 (2015). <https://doi.org/10.14773/cst.2015.14.1.12>
5. S. Srikanth, T. S. N. Sankaranarayanan, K. Gopalakrishna, B. R. V. Narasimhan, T. V. K. Das, and S. K. Das, *Eng. Fail. Anal.*, **12**, 634 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.02.006>
6. A. Osella, A. Favetto, and E. Lopez, *Appl. Geophys.*, **38**, 219 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00019-0)
7. A. Osella and A. Favetto, *Appl. Geophys.*, **44**, 303 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00008-2)
8. I. A. Metwally, H. M. Al-Mandhari, A. Gastli, and Z. Nadir, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **31**, 485 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2006.11.003>
9. L. C. Wrobel and P. Miltiadou, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, **28**, 267 (2004). [https://doi.org/10.1016/S0955-7997\(03\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0955-7997(03)00057-2)
10. R. A. Gummow and P. Eng, *J. Atmos. Sol. -Terr. Phys.*, **64**, 1755 (2002). [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00125-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00125-6)
11. E. Sisk, *Plant Engineering: Evaluation of Indirect Assessment Techniques for Coating Flaw Detection*, p. 3-8, Technical Report 1022962, EPRI (2011).
12. M. E. Orazem, *Underground Pipeline Corrosion, 1st ed.*, p. 227, Woodhead Publishing, Cambridge (2014). <https://doi.org/10.1533/9780857099266.2.227>
13. Y. B. Cho, Y. T. Kho, S. Y. Li, K. S. Jeon, and K. W. Park, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor.*, **26**, 400 (1997). [http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf\\_viewer.htm?code=J00260500400](http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=J00260500400)
14. D. H. Boteler, L. Trichtchenko, C. Blais, and R. Pirjola, *Proc. Corrosion 2013 Conf.*, p. 2522, ID NACE-2013-2522, NACE International, Orlando, Florida, USA (2013).
15. Z. Masilela and J. Pereira, *Eng. Fail. Anal.*, **5**, 99 (1998). [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(98\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(98)00006-5)
16. M. Norm, *Mater. Performance*, **52**, 96 (2013).



17. Y. D. Ryou, J. H. Lee, Y. K. Yoon, and H. S. Lim, *J. Korean Inst. Gas*, **18**, 12 (2014).  
<https://doi.org/10.7842/kigas.2014.18.5.12>
18. A. Smart, A. Jensen, S. Biagiotti, and E. Elder, *Proc. Corrosion 2011 Conf.*, Paper No. 11181, NACE International, Houston, Texas, USA (2011).
19. B. T. Lim, M. G. Kim, K. T. Kim, H. Y. Chang, and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **18**, 277 (2019).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2019.18.6.277>
20. J. H. Park, H. M. Kim, and G. S. Park, *J. Korean Magnetics Soc.*, **26**, 24 (2016).  
<https://doi.org/10.4283/JKMS.2016.26.1.024>
21. S. L. Shin, G. H. Lee, U. Ahmed, Y. K. Lee, and C. H. Han, *J. Haz. Mat.*, **342**, 279 (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.029>
22. Y. D. Ryou, J. J. Kim, and D. K. Kim, *J. Korean Inst. Gas*, **19**, 38 (2015).  
<https://doi.org/10.7842/kigas.2015.19.3.38>
23. J. J. Kim, M. S. Seo and D. K. Kim, *J. Korean Inst. Gas*, **18**, 66 (2014).  
<https://doi.org/10.7842/kigas.2014.18.5.66>
24. S. Xie, Z. Duan, J. Li, Z. Tong, M. Tian, and Z. Chen, *Sensors and Actuators*, **309**, 1 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112030>
25. Y. D. Ryou, J. H. Lee, Y. D. Jo, and J. J. Kim, *J. Korean Inst. Gas*, **20**, 50 (2016).  
<https://doi.org/10.7842/kigas.2016.20.4.50>
26. K. J. Satsios, D. P. Labridis, and P. S. Dokopoulos, *Eur. T. Electr. Power*, **8**, 193 (1998).  
<https://doi.org/10.1002/etep.4450080307>
27. Y. B. Cho, K. W. Park, K. S. Jeon, H. S. Song, D. S. Won, S. M. Lee, and Y. T. Kho, *Int. Pipeline Conf.*, **1**, 463 (1996).  
<https://doi.org/10.1115/IPC1996-1851>
28. M. Magura and J. Brodniansky, *Procedia Engineer.*, **40**, 50 (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.054>
29. Y. B. Cho, K. W. Park, K. S. Cheon, H. S. Song, D. S. Won, S. M. Lee, and Y. T. Kho, *J. Corros. Sci. Soc. of Kor.*, **24**, 167 (1995).  
[http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf\\_viewer.htm?code=J00240300167](http://www.j-cst.org/opensource/pdfjs/web/pdf_viewer.htm?code=J00240300167)
30. K. S. Kim, B. T. Lim, H. Y. Chang, and H. B. Park, *Journal of Power Engineering*, **30**, 3, 116 (2019).
31. H. Y. Chang, K. T. Kim, B. T. Lim, K. S. Kim, J. W. Kim, H. B. Park, and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **16**, 115 (2017).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2017.16.3.115>
32. H. Y. Chang, H. B. Park, K. T. Kim, Y. S. Kim, and Y. Y. Jang, *Trans. Korean Soc. Press. Vessel. Pip.*, **11**, 61 (2015).  
<https://doi.org/10.20466/KPVP.2015.11.2.061>
33. Y. Chao, L. Jianliang, L. Zili, Z. Shouxin, D. Long, and Z. Chengbin, *Corros. Rev.*, **37**, 273 (2019).  
<https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0089>
34. Z. G. Chen, C. K. Qin, J. X. Tand, and Y. Zhou, *J. Natural Gas Sci. Eng.*, **15**, 76 (2013).  
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2013.09.003>
35. M. G. Kim, B. T. Lim, K. T. Kim, H. Y. Chang, and Y. S. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **19**, 211 (2020).  
<https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.4.211>
36. J. P. Nicholson, *Proc. Eurocorr 2010 Conf.*, p. 9145, Moscow, Russia (2010).
37. DCVG Training Manual, DC-Voltage Gradient (DCVG) Surveys Using MCM's Integrated Pipeline Survey Test Equipment and Database Management Package, pp. 4 - 19, M. C. Miller Co. (2020).
38. E. Naderi and M. H. Moayed, *Anti-Corros. Method. Mat.*, **60**, 312 (2013).  
<https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2013-1248>