

## 매설 배관 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 인접 정류기 및 접지 구리망 간섭의 영향

김민기<sup>1</sup> · 임부택<sup>1,2</sup> · 김기태<sup>1</sup> · 장현영<sup>2</sup> · 박흥배<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 8월 16일 접수, 2020년 8월 24일 수정, 2020년 8월 24일 채택)

## Effects of Rectifier and Copper Grid Interference on the Detection Reliability of Coating Flaws on Buried Pipes

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 August 16, 2020; Revised August 24, 2020; Accepted August 24, 2020)

The external corrosion of buried piping can be controlled using both coating and cathodic protection. Several factors are involved in the damage and deterioration of the coating on pipes. There are many detection methods for coating defects on pipes and the direct current voltage gradient (DCVG) method is one of the most powerful methods. However, the detection reliability of DCVG can be affected by interferences such as stray current, metal objects connected to rectifiers, and copper grids. Therefore, this study focused on the interference effects of rectifiers and a copper grid on the reliability of coating flaw detection. As the length of the interference pipe connected to the rectifier increased, the reliability decreased. In contrast, as the distance between the pipe and the copper grid increased, the reliability of the coating flaw detection increased. The detection results produced by the DCVG method were discussed using current and potential simulations for a pipe with a rectifier and copper grid interference in the soil.

**Keywords:** Buried pipe, Coating flaw detection, Interference, Rectifier, Copper grid

### 1. 서론

토중 매설 배관의 외부 부식은 보편적으로 배관 표면에 보호 물질을 피복하여 사용하며, 그 효과를 극대화하기 위해서 음극방식을 병행하여 사용하고 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) 실시

간으로 방식전위를 감시하는 경우, (5) 실시간으로 방식상태를 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].

일반적으로는 배관 외면의 피복 결함 탐상 기술은 직류 전원을 이용하는 방법과 교류전원을 이용하는 방법이 있다. 직류를 이용하는 방법은 배관의 전위를 측정하기 위하여 사용되는 근간격 전위 조사법(CIPS, Close Interval

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

김민기: 석사과정, 임부택: <sup>1</sup>박사과정 <sup>2</sup>부장, 김기태: 박사후 과정, 장현영: 실장, 박흥배: 부장, 김영식: 교수

Potential Survey) [11] 및 두개의 전극을 통해 전극 사이의 전위차를 측정하여 배관 피복 결함의 위치를 결정하기 위한 직류 전압 기울기 측정법(DCVG, Direct Current Voltage Gradient) 등이 있다 [12-14]. 또한, 교류를 이용하는 방법은 6 ~ 8 m 간격으로 송신기 주파수에 맞춰 수신기 간격 사이의 거리에 대한 전위 기울기를 측정하는 피어슨 조사법(Pearson survey) [15], 서로 떨어진 접지점 사이에 교류전류를 가하여 생기는 교류 신호의 강도를 측정하는 방법인 우드베리 조사법(Woodberry Survey), 저주파 교류전류를 인가하여 배관 주변에 발생하는 교류 전위 기울기를 측정하는 방법인 교류전압 기울기 측정법(ACVG, Alternating Current Voltage Gradient) [16] 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 [17]. 이상에서 소개한 방법은 필요에 따라서 적절한 방법을 선택하여 사용할 수 있으며, 토중매설 피복배관의 결함 위치 탐상을 위한 방법은 직류를 이용하는 방법 중 DCVG를 많이 사용한다 [14]. 그러나, DCVG의 경우 널리 사용되는 것에 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 수직한 위치에 대한 정확도 비교를 통하여 매설 깊이에 따라서 피복결함을 100% 탐상할 수 있는 조건식을 제안한 바 있다 [18].

한편, 일반 배관은 토양 중에 일정한 깊이로 비교적 간단한 구조로 매설되어 있다 [19-21]. 그러나 원자력 발전소의 배관 라인은 다양한 매설 깊이와 다층 및 교차 구조로 복잡하게 매설되어 있다 [22-25]. 뿐만 아니라, 원자력 발전소 내의 좁은 지역에 많은 인접 정류기가 설치되어 운전되고 있으며, 낙뢰 등 안전사고 예방을 위하여 토중에 구리망 접지 등이 다수 매설되어 있어서 매우 다양한 간섭이 발생할 수 있다 [26-28]. 특히, 접지 구리망의 경우, 주 건물 아래는 기본 접지도체망을 매설하고, 큰 건물이나 구조물 주위에는 외곽 접지도체를 설치한다 [29]. 대부분의 원자력 발전소에서는 이러한 넓은 형태의 접지망을 설계상의 이유로 다수의 양극을 설치한 후 배관과 접지망을 같이 연결하여

방식 하고 있다. 따라서, 원자력 발전소의 매설 배관 피복 결함 탐상을 위해서 다양한 접근이 필요하다. 즉, 최근 FEM 방법을 사용하여 코팅된 배관의 보호 성능 시뮬레이션 [30], 3D FEM을 이용한 매설 배관의 손상 감지 분석 [31], 매설 배관의 실시간 부식 제어 시스템[4]을 보고하였다. 또한, 배관의 구조 및 직류에 의한 간섭 [32], 미주 전류에 의한 간섭 [33] 등 간섭에 대한 다양한 연구가 되었으나, 인접 정류기에 의한 간섭 및 접지 구리망에 의한 간섭 등에 대해서 연구가 많이 보고되고 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 피복 결함 탐상에 미치는 여러 가지 인자 중에서 인접 정류기 및 접지 구리망에 의한 간섭 효과에 중점을 두고, 3대의 인접 정류기를 통한 음극방식 및 3개의 접지 구리망을 매설하여 인접 정류기의 On/Off 조합에 의한 간섭효과와 접지 구리망에 대한 직접 및 간접 음극 방식을 통한 간섭효과에 대하여 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 매설 배관 시험장 구축

Fig. 1은 시험장에 매설된 배관의 구성을 보여준다. 배관 매설 시 사용된 배관은 ASME SA 106 Gr. B 규격 [34]을 만족하는 탄소강관을 사용하였으며 폴리켄(Polyken) 코팅을 하였다. 폴리켄 코팅은 배관의 표면처리 후 Primer초벌칠, Polyken #930-35 랩핑, Polyken #954-15 랩핑 순서로 진행하였다. 도면에서, 배관의 적색 선은 고의로 생성시킨 피복 결함의 위치를 의미한다. Fig. 1a는 시험장의 측면도를 보여주며, 폴리켄 코팅된 탄소강 배관을 2.2 m 및 3.5 m 깊이에 다양한 길이(6 m 길이의 배관을 각각 전기적으로 연결)로 매설하였으며 (Table 1 참조), 8 m길이의 접지 구리망(순동) 3개를 0.5 m깊이에 거리별로 매설하였다. Fig. 1b는 시험장의 상면도를 보여준다. 배관에 대한 음극 방식은 Anode 1, 2, 3의 양극을 사용하였으며, 접지 구리망에 대한 음극 방식은 Anode 4의 양극을 사용하였다. 또한, 가로 1 m, 세로 8 m 크기의 접지 구리망 3개를 배관으로부터 구리망 중심선이 각각 1 m, 2 m, 3 m 떨어진 위치에 매설하였다. 음극 방식의 상태는 실시간으로 모니터링 되었으며, 방식 배관의 On-Off 전위를 측정하기 위해 전류 차단

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	1.7	10	12	37,698	1,130	3
CS-2	1.7	10	18	56,547	1,695	3
CS-3	3.0	10	30	94,245	2,825	3

\* CS (Polyken coated carbon steel)

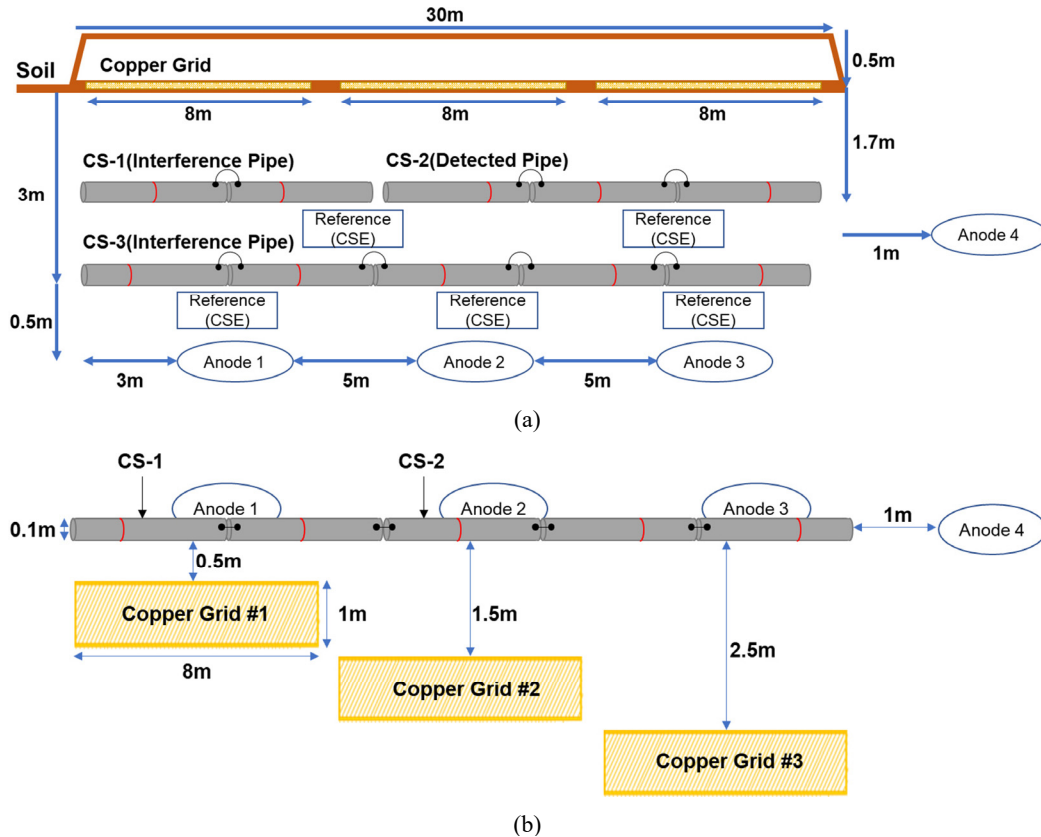


Fig. 1 Configuration of buried pipes in test bed (Red lines means the location of the coating flaws); (a) side view on the test bed (polyken coated carbon steel pipes), (b) top view on the test bed.

기가 설치되었다. 매설된 기준 전극은 황산동 전극(CSE, Cu/CuSO<sub>4</sub>)이다. 모든 배관에서 피복 결함은 565 cm<sup>2</sup> 크기로 형성되었다. Table 1은 매설된 배관의 정보를 요약한 것이다.

### 2.2 피복 결함 측정 방법

2개의 Cu/CuSO<sub>4</sub> 기준 전극을 사용하며 DCVG 방법(MC Miller, GX Voltmeter/GPS Receiver)에 의해 코팅 결함을 탐상하였다. 인가 탐상 전압은 이전 논문 [18]의 100% 탐상식에 의거하여 설정하였다. DCVG 측정 시, 2개의 전극 중 기준이 되는 전극이 측정 방향 뒤에 위치하게 하였으며, 이때 전위차의 부호가 (-)에서 (+)로 역전되는 지점을 결함 신호로 간주하였다. 본 연구에서는 DCVG 방법에 의한 결함 신호가 실제 결함의 위치에서 ±1 m 오차 범위 내에 있을 때 결함이 검출되었다고 정의하였다[18].

### 2.3 피복 결함 탐상 정확도 계산

DCVG 측정에 의한 피복 결함의 위치는 토양에 매설된 배관 라인을 따라 측정된 전위 부호의 역전에 의하여 결정된다. 그러나 부호 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 [18]. 다음 식에서 ‘탐상신호’는 결함 신호의 위치와 실제 결함의 위치가 같음을 의미한다.

$$\text{탐상정확도, \%} = \frac{\text{탐상신호의 수} \times 2}{\text{실제 결함의 수} + \text{측정결함신호의 수}}$$

### 2.4 인접 정류기 간섭 측정 방법

Table 2는 인접 정류기 간섭을 측정하기 위한 방법을 요약한 것이다. 인접 정류기 간섭의 측정 대상 배관은 ‘CS-2’ 배관이며, 간섭 배관은 ‘CS-1’(Interference Pipe #1), ‘CS-3’(Interference Pipe #2)이다. Case 1은 인접 정류기 간섭이 없을 때의 측정 배관 결함 탐상, Case 2는 1단 측면 배관 인접 정류기 간섭 시 측정 배관 결함 탐상, Case 3는 2단 배관 인접 정류기 간섭 시 측정 배관 결함 탐상, Case 4는 1단 측면 배관과 2단 배관의 인접 정류기 간섭 시의 측정 배관 결함 탐상을 의미한다.

**Table 2** Detection condition by the rectifier interference

	Detected Pipe (CS-2)	Interference Pipe #1 (CS-1)	Interference Pipe #2 (CS-3)
Case 1 (No Interference)	On	Off	Off
Case 2 (#1-On, #2-Off)	On	On	Off
Case 3 (#2-On, #1-Off)	On	Off	On
Case 4 (#1-On, #2-On)	On	On	On

**2.5 접지 구리망 간섭 측정 방법**

접지 구리망 간섭 측정은 ‘CS-1’배관과 ‘CS-2’배관을 전기적으로 연결을 하여 1단 배관 전체를 대상으로 진행되었다. 간섭 측정은 배관과 접지 구리망을 연결하지 않고 각각의 정류기를 이용하여 전압을 인가하는 방법 및 접지 구리망과 배관을 같은 인접 정류기에 연결하여 측정하는 방식으로 진행되었다. Table 3은 구리망 간섭 측정 방법을 요약한 것이다.

**2.6 음극방식 시뮬레이션 방법**

본 연구에 사용된 음극방식 시뮬레이션 프로그램은 COMSOL Multiphysics 내의 2차 전류 분포(Secondary current distribution)을 사용하였다. 이는 재료계면에서의 활성화 분극을 고려하고, 옴(Ohm)의 법칙에 지배되는 전하 이동으로 전해질의 전도도를 가정하여 전기화학 셀에서 전류 및 전위 분포를 도출하는 모듈이며 적용된 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot i_l = Q_l, i_l = -\sigma_l \nabla \phi_l$$

$$\nabla \cdot i_s = Q_s, i_s = -\sigma_s \nabla \phi_s$$

- $i_l$  = Current density in liquid
- $i_s$  = Current density in solid
- $Q_l$  = Total charge in liquid
- $Q_s$  = Total charge in solid
- $\phi_l$  = Potential in liquid
- $\phi_s$  = Potential on solid

**2.6.1 모델 기하구조 구성**

본 연구에서 수행한 모델링의 기하구조는 인접 정류기 간섭 모델링과 접지 구리망 간섭 모델링 2가지로 나누어 진행하였다. Fig. 2a는 인접 정류기 간섭 기하구조, Fig. 2b는 접지 구리망 간섭 기하구조를 나타내었다. 모델링 된 배관, 양극, 접지 구리망 등은 실제 매설된 것과 동일한 사이즈

**Table 3** Detection condition by 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.

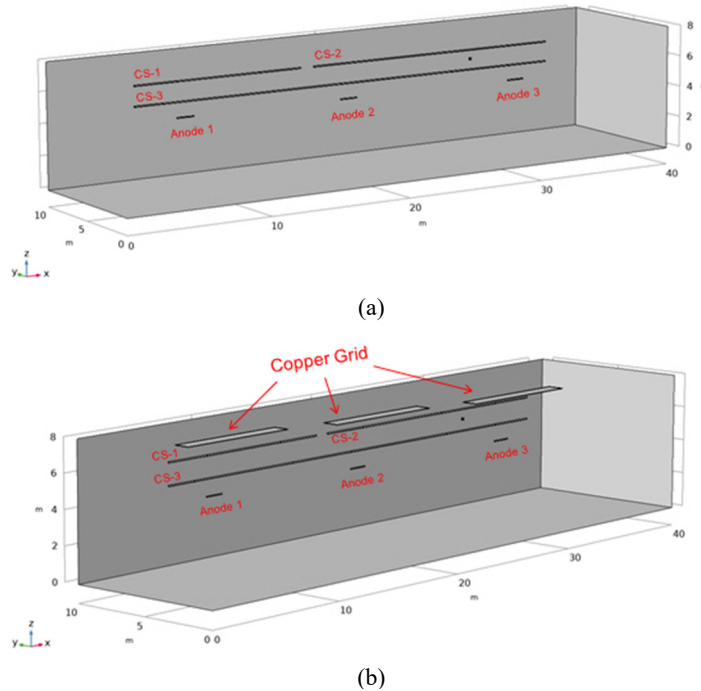


Fig. 2 Geometry of cathodic protection modelling; (a) rectifier interference, (b) interference of the copper grid.

Table 4 Parameters for simulation runs

Sigma	Electrolyte conductivity	0.02 S/m
E <sub>CS</sub> vs ref	CS potential vs reference	-4.5 V(CSE)
E <sub>CG</sub> vs ref	CS potential vs reference	-0.95 V(CSE)
E <sub>eq_CS</sub>	Equilibrium potential, CS	-0.6 V(CSE)
E <sub>eq_CG</sub>	Equilibrium potential, CG	-0.32 V(CSE)
i <sub>o_CS</sub>	Exchange current density, cathode	3.09×10 <sup>-7</sup> A/cm <sup>2</sup>
i <sub>o_CG</sub>	Exchange current density, anode	1×10 <sup>-7</sup> A/cm <sup>2</sup>

로 기하구조를 구성하였다.

### 2.6.2 전기화학적 파라미터

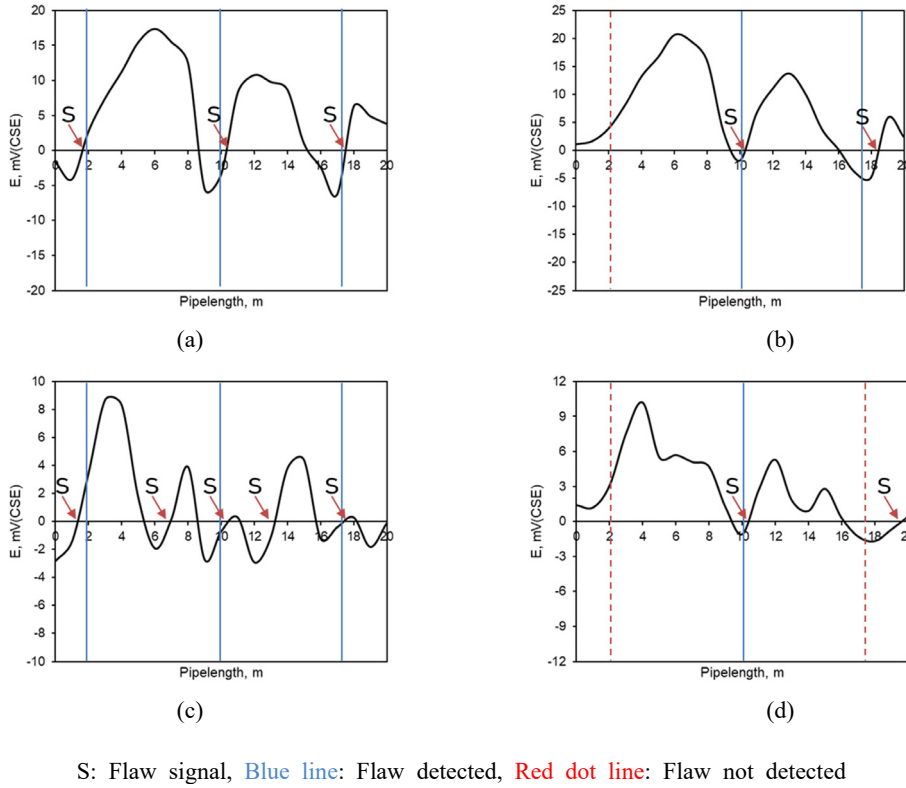
본 모델링에 사용된 전기화학적 파라미터들은 실제 배관들이 매설되어 있는 토양에서 전기전도도를 측정하고, 그 토양을 모사한 토양모사용액 중에서 양극분극시험을 진행하여 부식전위, 교환전류밀도 등을 도출하였으며, Table 4에 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 매설배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 인접 정류기 간섭의 영향

Fig. 3는 결함 측정 배관의 탐상 정확도에 미치는 인접 정류기

간섭의 영향을 보여준다. 탐상 배관의 매설 깊이는 2.2 m이며, 100% 탐상식에 의거하여 [18] 탐상 전위를 -4.8 V(CSE)로 설정하였다. 또한, 간섭 배관의 전위는 기준 방식 전위에 맞게 -0.85 V(CSE)로 설정하였다. 그림에서 S는 결함 신호, 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 [18]. Fig. 3a는 인접 정류기 간섭이 없는 경우로서, 3 개의 결함 중 결함 신호는 3 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 3b는 'CS-1' 배관의 인접 정류기 간섭만 있는 경우로서, 'CS-2' 배관의 3 개 결함 중 결함 신호는 2 개, 탐상 된 결함은 2 개로 나타났다. Fig. 3c는 'CS-3' 배관의 인접 정류기 간섭만 있는 경우로서, 'CS-2' 배관의 3 개 결함 중 결함



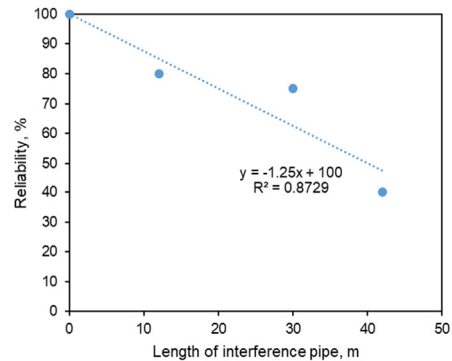
S: Flaw signal, Blue line: Flaw detected, Red dot line: Flaw not detected

**Fig. 3** Effect of rectifier interference on the reliability of flaw detection on the pipe ‘CS-2’; (a) No Interference, (b) #1-On, #2-Off, (c) #2-On, #1-Off, (d) #1-On, #2-On.

신호는 5 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 3d는 ‘CS-1’ 및 ‘CS-3’ 배관의 인접 정류기 간섭이 있는 경우로서, ‘CS-2’배관의 3 개 결함 중 결함 신호는 2 개, 탐상 된 결함은 1 개로 나타났다. 탐상 정확도를 계산한 결과, 인접 정류기 간섭이 없는 경우는 100 % 탐상, ‘CS-1’ 배관의 인접 정류기 간섭만 있는 경우는 80 % 탐상, ‘CS-3’ 배관의 인접 정류기 간섭만 있는 경우는 75 % 탐상, ‘CS-1’ 및 ‘CS-3’ 배관의 인접 정류기 간섭이 있는 경우는 40 %로 나타났다.

Fig. 4는 매설 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 간섭 배관 길이의 영향을 보여준다. 이 그림은 Fig. 3에서 얻은 탐상 정확도를 각 간섭 배관의 길이에 대하여 그린 것이다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 간섭 배관의 길이가 증가함에 따라 탐상 정확도가 감소하고 있다. 즉, 간섭 배관의 길이가 탐상 배관 길이보다 약 2 배 이상 증가하면 탐상 정확도가 약 3배 감소하는 것으로 나타났다.

인접 정류기에 의한 간섭효과를 간접적으로 확인하기 위하여 탐상조건에 대하여 전류분포를 시뮬레이션하였다. Fig. 5는 Fig. 3의 탐상 조건과 같은 조건에서의 전류 밀도 벡터 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션은 Anode 3 를 사용하여 ‘CS-2’배관에 전류를 인가, Anode 1을 사용



**Fig. 4** Effect of the interference-pipe length on the reliability of coating flaw detection on the pipe ‘CS-2’.

하여 ‘CS-1’배관에 전류를 인가, Anode 2를 사용하여 ‘CS-3’배관에 전류를 인가하는 조건으로 진행되었다. Fig. 5a는 인접 정류기 간섭이 없을 때 전류 밀도 벡터를 시뮬레이션한 결과이다. Anode 3에서 나오는 전류가 온전히 ‘CS-2’배관으로 흐르는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 3a의 결함 탐상 시의 토중 전류분포를 보여준다. Fig. 5b는 ‘CS-1’배관의 간섭이 있을 때 전류 밀도 벡터 시뮬레이션 결과이며, Anode 3에서 흘러나온 전류가 ‘CS-2’배관의

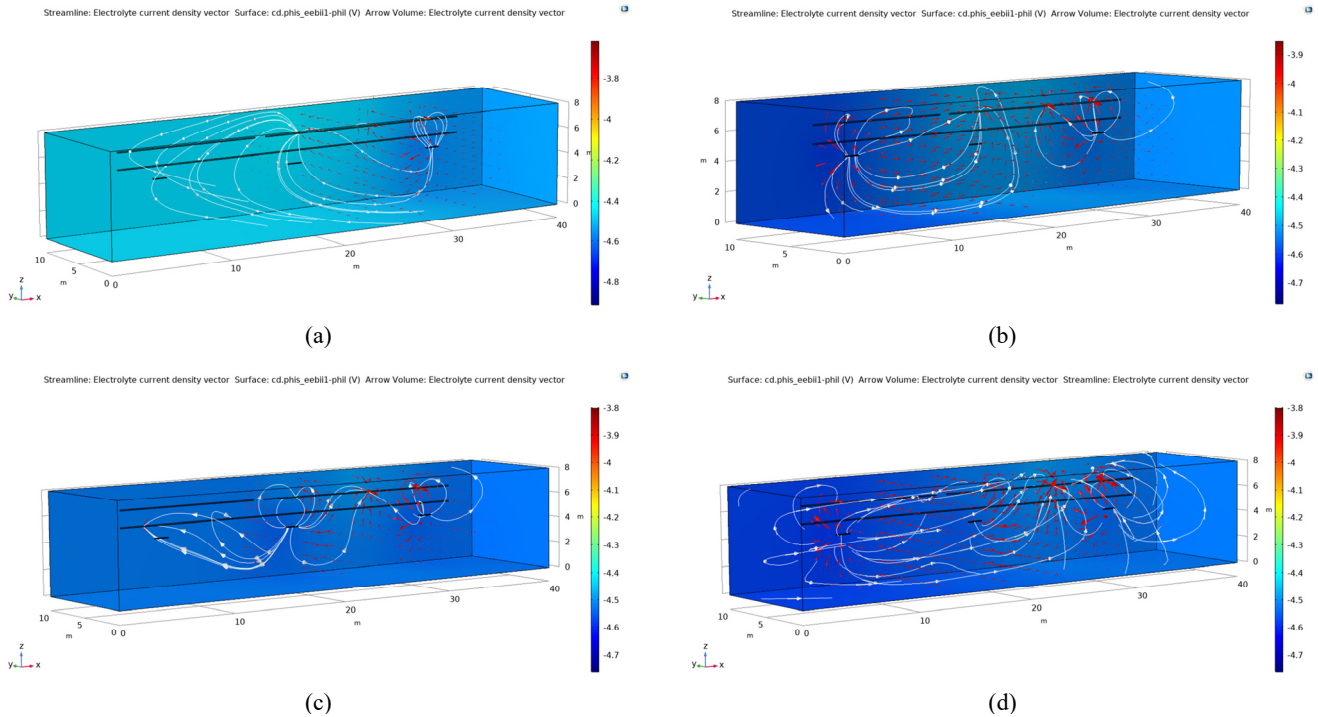


Fig. 5 Simulation results of current density vector according to each type of rectifier interference; (a) No Interference, (b) #1-On, #2-Off, (c) #2-On, #1-Off, (d) #1-On, #2-On.

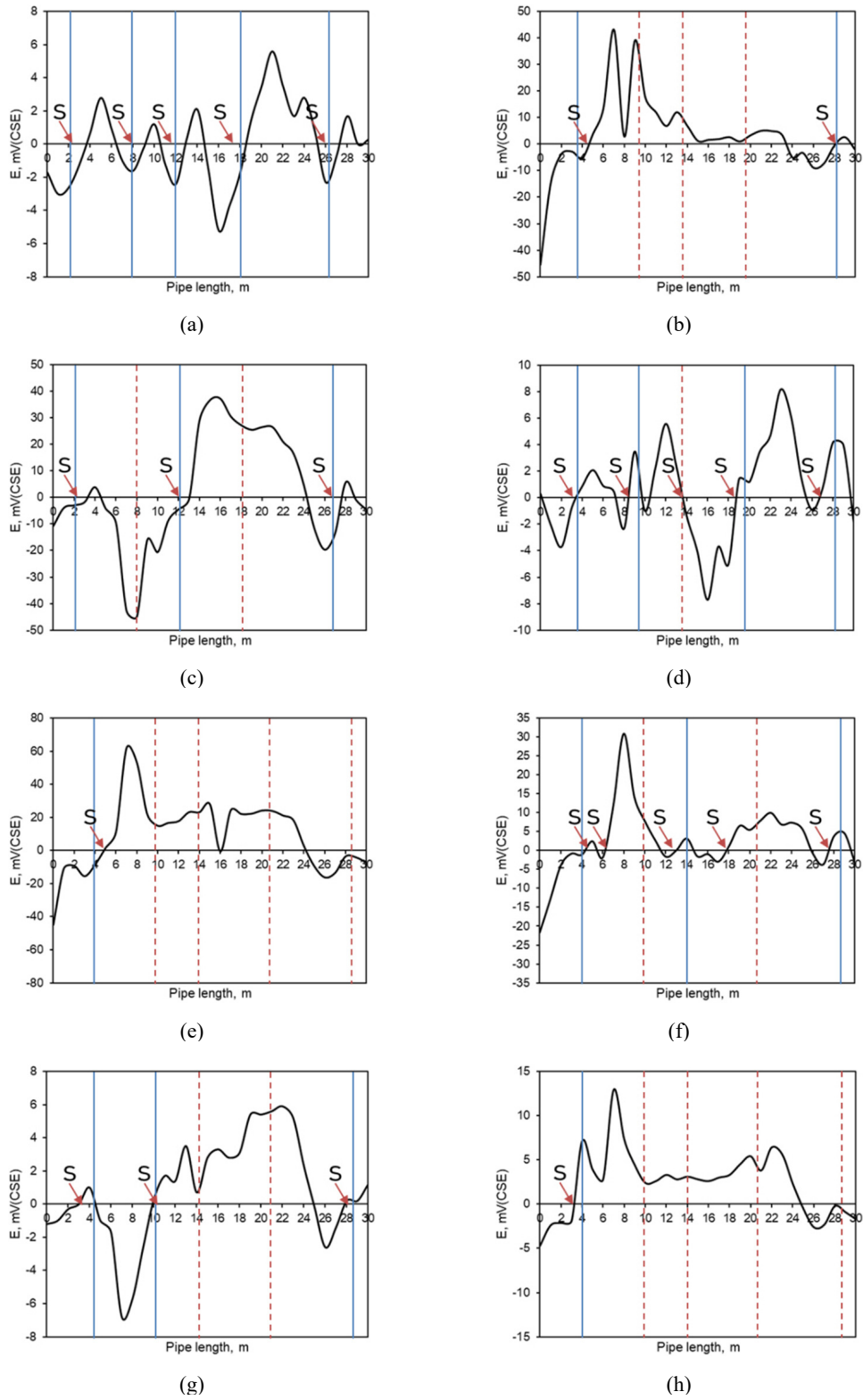
좌측 결함에 들어가지 않고 Anode 1에서 나오는 전류가 ‘CS-2’배관의 결함으로 들어가는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3b의 결함탐상 시, 좌측 결함이 탐상 되지 않는 것과 일치된 경향을 보여준다. Fig. 5c는 ‘CS-3’배관의 간섭이 있을 때 전류 밀도 벡터 시뮬레이션 결과이며, Anode 2에서 나오는 전류가 ‘CS-2’배관의 좌측과 중간 결함에 들어가는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 Anode 3에서 나오는 전류가 ‘CS-3’배관의 결함에도 들어가는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 Fig. 3c의 탐상 신호의 수가 많이 나오는 것으로 판단된다. Fig. 5d는 ‘CS-1’배관 및 ‘CS-3’배관의 정류기 간섭이 있을 때의 전류 밀도 벡터 시뮬레이션 결과로서, Fig. 5a에 비하여 복잡한 전류의 방향을 보여준다. Anode 3에서 나오는 전류의 동선이 방향이 없는 Fig. 5a와 다르게 좁게 퍼져 결함으로 들어가며, ‘CS-2’배관의 좌측 결함으로 들어가는 전류가 거의 없다.

이상에서 검토된 바와 같이, 인접 정류기가 차단되지 않은 상태에서 매설배관의 피복결함을 탐상하게 될 때는 인접 정류기로부터 발생하는 전류가 토중에서 간섭을 일으키기 때문에 탐상정확도가 급격히 감소하게 된다.

### 3.2 매설 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 간섭의 영향

Fig. 6는 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망

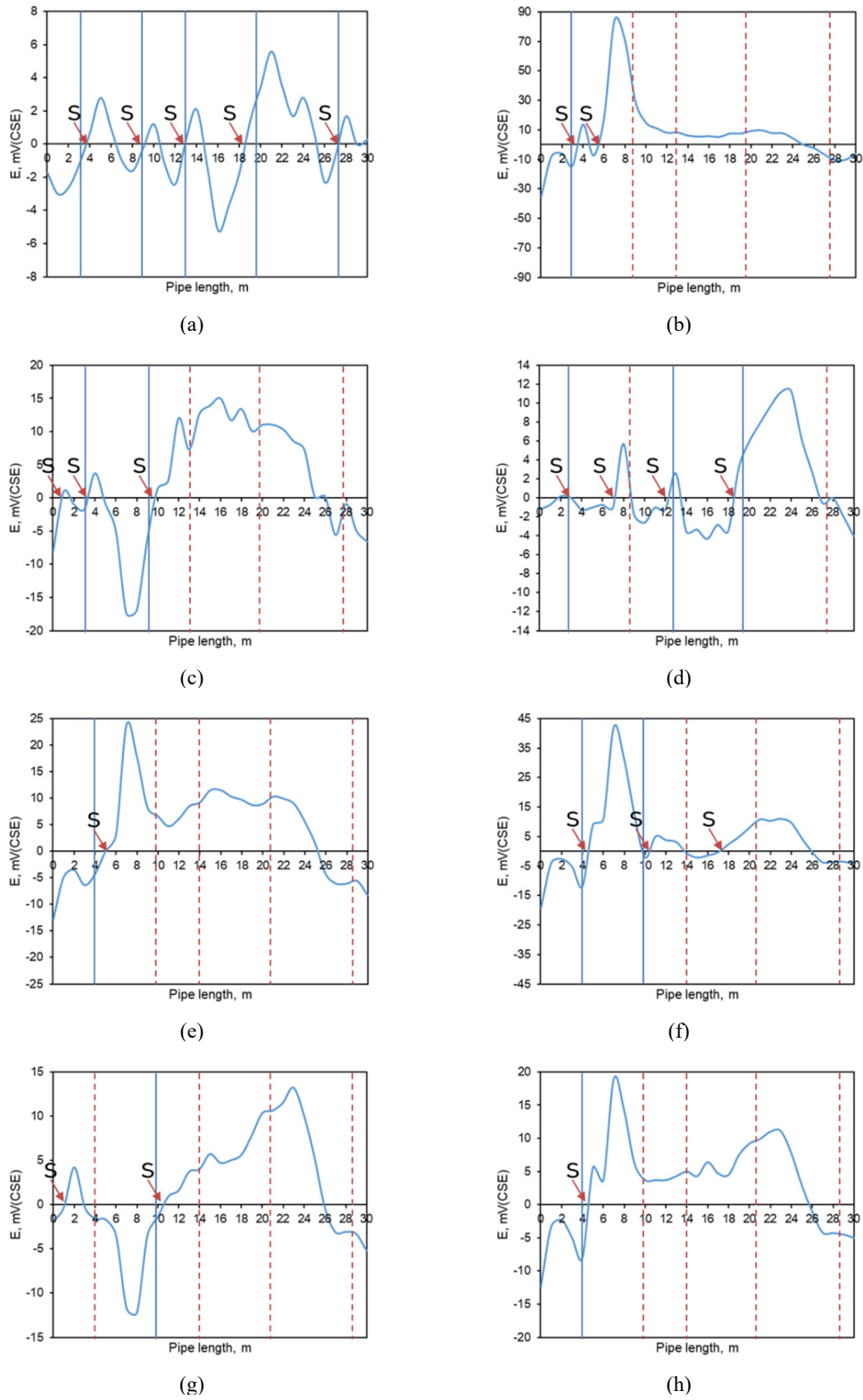
간섭의 영향을 보여준다(접지 구리망이 탐상배관과 연결되지 않고 별도로 방식 되고 있는 상태임). 탐상 배관의 매설 깊이는 2.2 m이며, 100 % 탐상식을 이용하여[18] 탐상 전위를  $-4.8$  V(CSE) 로 설정하였다. 한편, 접지 구리망의 전위는 별도의 인접 정류기로 전압을 인가하여 방식 전위를  $-0.85$  V(CSE) 로 설정하였다. 그림에서 S는 결함 신호, 파란 실선은 고의 결함이 탐상 된 것을, 붉은 점선은 고의 결함이 탐상 되지 않은 것을 의미한다(본 연구진은 DCVG에 의한 결함의 신호가 실제 고의 결함 위치에 대하여  $\pm 1$  미터 범위 내에 있을 때 결함이 탐상 되었다고 정의하였다 [18]). Fig. 6a는 접지 구리망 간섭이 없는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 5 개, 탐상 된 결함은 5 개로 나타났다. Fig. 6b는 #1 접지 구리망의 간섭만 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 2 개, 탐상 된 결함은 2 개로 나타났다. Fig. 6c는 #2 접지 구리망의 간섭만 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 3 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 6d는 #3 접지 구리망의 간섭만 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 5 개, 탐상 된 결함은 4 개로 나타났다. 탐상 정확도를 계산한 결과, 간섭이 없는 경우는 100 % 탐상, #1 접지 구리망의 간섭만 있는 경우는 57.1 % 탐상, #2 접지 구리망의 간섭만 있는 경우는 75.0 % 탐상, #3 접지 구리망의 간섭만 있는 경우는 80.0 % 탐상 되었다. Fig. 6e는 (#1 + #2) 접지 구리망 간섭이 있는



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

**Fig. 6** Effect of the interference of the copper grid (CP for copper grid) on the flaw detection reliability of the pipe 'CS-2'; (a) Grid all-Off, (b) Grid #1 On, (c) Grid #2 On, (d) Grid #3 On, (e) Grid #1 & #2 On, (f) Grid #1 & #3 On, (g) Grid #2 & #3 On, (h) Grid #1, #2 & #3 On.





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

**Fig. 7** Effect of the interference of the copper grid (CP for pipe + copper grid) on the flaw detection reliability of the pipe ‘CS-2’; (a) Grid all-Off, (b) Grid #1 On, (c) Grid #2 On, (d) Grid #3 On, (e) Grid #1 & #2 On, (f) Grid #1 & #3 On, (g) Grid #2 & #3 On, (h) Grid #1, #2 & #3 On.

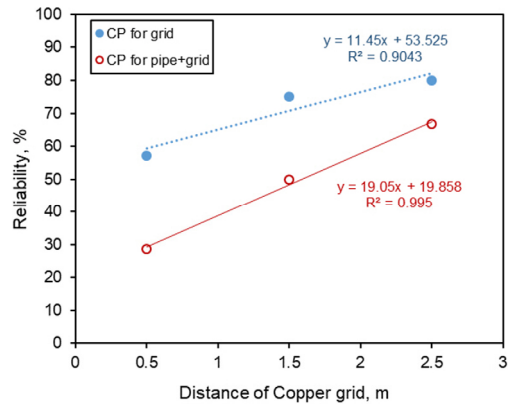
경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 1 개, 탐상 된 결함은 1 개로 나타났다. Fig. 6f는 (#1 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 5 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 6g는 (#2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 3 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 6h는 (#1 + #2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 1 개, 탐상 된 결함은 1 개로 나타났다. 탐상 정확도를 계산한 결과, (#1 + #2) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 33.3 % 탐상, (#1 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 60.0 % 탐상, (#2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 75.0 % 탐상, (#1 + #2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 33.3 % 탐상 되었다.

한편, Fig. 7은 피복 결함의 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 간섭의 영향(배관과 접지 구리망이 동일한 정류기로 방식 되고 있는 상태)을 보여준다. 탐상 배관 및 접지 구리망의 전위는 -1.2 V(CSE) 로 설정하였으며, 인가 전압은 10 V이다. Fig. 7a는 접지 구리망 간섭이 없는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 5 개, 탐상 된 결함은 5 개로 나타났다. Fig. 7b는 #1 접지 구리망의 간섭만 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 2 개, 탐상 된 결함은 1 개로 나타났다. Fig. 7c는 #2 접지 구리망의 간섭만 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 3 개, 탐상 된 결함은 2 개로 나타났다. Fig. 7d는 #3 접지 구리망의 간섭만 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 4 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. 탐상 정확도를 계산한 결과, 간섭이 없는 경우는 100 % 탐상, #1 접지 구리망의 간섭만 있는 경우는 28.6 % 탐상, #2 접지 구리망의 간섭만 있는 경우는 50.0 % 탐상, #3 접지 구리망의 간섭만 있는 경우는 66.7 % 탐상 되었다. Fig. 7e는 (#1 + #2) 접지 구리망 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 1 개, 탐상 된 결함은 1 개로 나타났다. Fig. 7f는 (#1 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 5 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 7g는 (#2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 3 개, 탐상 된 결함은 3 개로 나타났다. Fig. 7h는 (#1 + #2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우로서, 5 개 결함 중 결함 신호는 1 개, 탐상 된 결함은 1 개로 나타났다. 탐상 정확도를 계산한 결과, (#1 + #2) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 33.3 % 탐상, (#1 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 50.0 % 탐상, (#2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우는 28.6 % 탐상, (#1 + #2 + #3) 접지 구리망의 간섭이 있는 경우 33.3 % 탐상 되었다.

Table 5는 접지 구리망 간섭 거리에 따른 결함 탐상 정확도를 요약한 것이며, 이 데이터를 이용하여 배관과 간섭 접지 구리망 간의 거리에 따른 영향을 그림으로 작성하였다.

**Table 5 Average flaw detection reliability with the distance of copper grid from the pipe**

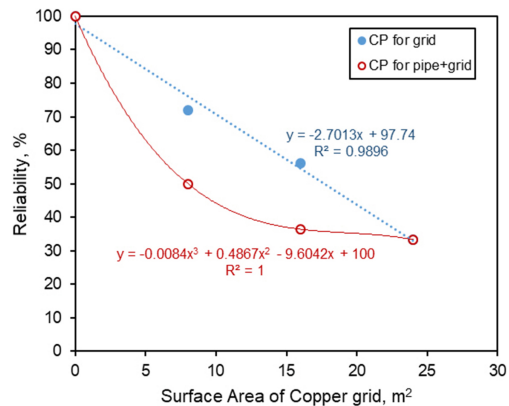
Distance between Detection Pipe and Interference Copper Grid, m		0.5	1.5	2.5
Average flaw detection reliability, %	CP for Grid	57.1	75.0	80.0
	CP for Pipe+Grid	28.6	50.0	66.7



**Fig. 8 Effect of the distance between the pipe and copper grids on the reliability of flaw detection in buried pipe.**

**Table 6 Average flaw detection reliability with surface area of the copper grid**

Surface area of grids, m <sup>2</sup>		8	16	24
Average flaw detection reliability, %	CP for Grid	72.0	56.0	33.3
	CP for Pipe+Grid	50.0	36.4	33.3



**Fig. 9 Effect of the surface area of copper grid on the reliability of detection of coating flaw in buried pipe.**

Fig. 8은 매설 배관의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 거리의 영향을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 배관과 접지 구리망 간의 거리가 가까울수록 접지 구리망 간섭 유형에 관계없이 탐상 정확도가 감소하였다. 추세식을 이용하여 100% 결함이 탐상될 수 있는 접지 구리망과 배관과의 거리를 구해보면, 구리망을 별도로 방식하는 경우(CP for grid)는 4.1 m 이상 그리고 배관과 구리망을 동일정류기로 방식하는 경우(CP for pipe + grid)는 4.2 m 이상이면 구리망 간섭이 없는 것으로 계산되었다.

Table 6는 접지 구리망 간섭 면적에 따른 결함 탐상 정확도를 요약한 것이며, 이 데이터를 이용하여 매설배관의 피복결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 면적에 따른 영향을 그림으로 작성하였다. Fig. 9은 매설 배관(배관의 표면

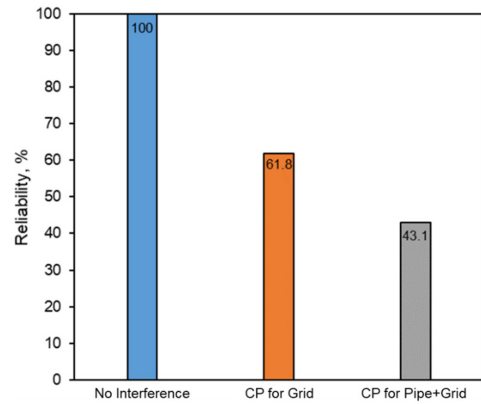


Fig. 10 Effect of copper grid interference types on the average reliability of coating flaw detection in buried pipe.

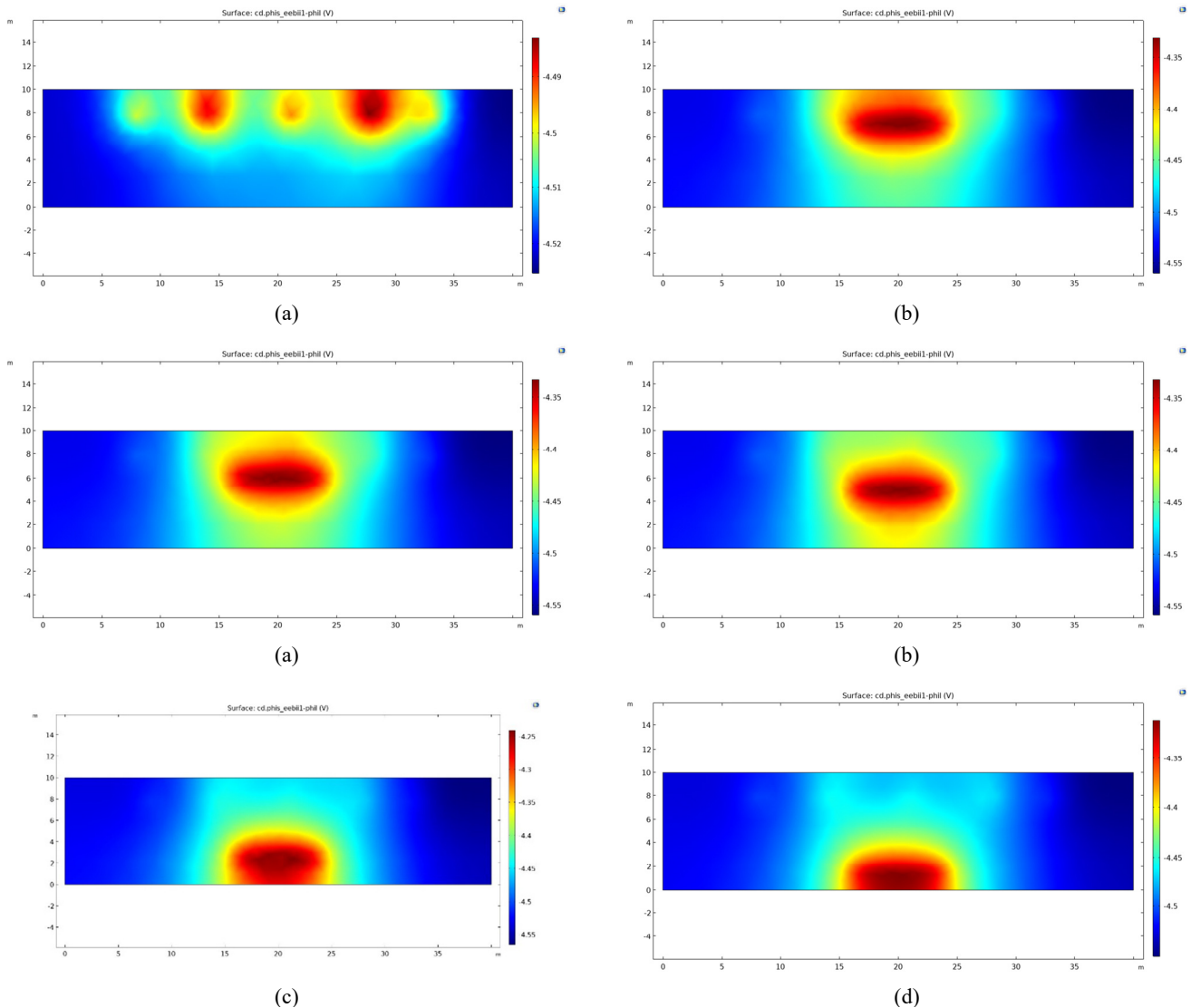


Fig. 11 Surface potential distribution simulation result according to the distance between pipe and copper grid; (a) No interference, (b) 0.5 m, (c) 1.5 m, (d) 2.5 m, (e) 4.5 m, (f) 5.0 m.

적:  $9.5 \text{ m}^2$ )의 피복 결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 면적의 영향을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 접지 구리망의 면적이 증가함에 따라 접지 구리망 간섭 유형에 관계없이 탐상 정확도가 감소하였다. 특히, 배관과 접지 구리망이 서로 연결되어 동일한 인접 정류기로 방식 되고 있는 경우, 접지 구리망의 면적이 증가함에 따라 급격하게 탐상 정확도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 매설 배관 피복 결함 탐상 정확도(평균값)에 미치는 접지 구리망 간섭 유형의 영향을 보여준다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 간섭이 없는 경우 탐상 정확도가 100 % 인 것에 비하여 접지 구리망 간섭이 있을 경우 유형에 따라 탐상 정확도가 43.1 %까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 별도로 접지 구리망에 음극 방식을 가하고 있는 경우(CP for grid)에 비하여 배관과 접지 구리망이 직접 연결될 경우(CP for pipe + grid)의 평균 탐상 정확도가 18.7 % 더 낮아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 배관과 접지 구리망 사이의 거리에 따른 지표면 전위 분포 시뮬레이션 결과를 보여준다. 배관은 x축 방향 5 ~ 35 m, y축 방향 9 m 지점에 위치하며 각각의 결함은 x축 방향으로 7 m, 14 m, 22 m, 28 m, 32 m 지점에 위치한다. Fig. 11a는 간섭이 없는 경우에 대한 배관의 지표면 전위 분포이며, Fig. 11b는 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 0.5 m일 때 지표면 전위 분포, Fig. 11c는 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 1.5 m일 때 지표면 전위 분포, Fig. 11d는 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 2.5 m일 때 지표면 전위 분포, Fig. 11e는 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 4.5 m일 때 지표면 전위 분포, Fig. 11f는 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 5.0 m일 때 지표면 전위 분포를 나타낸다. 접지 구리망의 간섭이 없는 Fig. 11a는 5개의 피복 결함 위치에서 동심원 전위분포가 보이는 것을 확인할 수 있다. 배관과 접지 구리망의 거리가 0.5 m인 Fig. 11b는 접지 구리망의 간섭으로 인하여 중간 지점의 결함 위치는 나타나지 않으나, 배관 길이 방향 7 m, 32 m 지점의 결함 2개의 결함이 어느 정도 동심원 전위분포가 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 11c 및 Fig. 11d에서도 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 6b-d의 결함탐상 결과와 유사한 경향을 보여준다. 앞에서 검토된 바와 같이, 배관과 접지 구리망 간의 거리가 4.2 m 이상 이격되면 접지 구리망의 간섭 영향이 없는 것으로 계산되었다. 그래서 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 4.5 m에 대하여 시뮬레이션한 결과인 Fig. 11e를 보면, 7 m, 32 m 지점뿐만 아니라 14 m, 22 m, 28 m 지점의 결함 위치도 동심원 전위분포가 확인된다. 더군다나 배관과 접지 구리망 사이의 거리가 5.0 m에 대한 시뮬레이션 결과인 Fig. 11f 에서는 결함위치에서 분명한 동심원 전위분포를 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 토양에 매설된 배관의 피복 결함 탐상정확도에 대한 간섭 조건의 영향에 초점을 맞추어 인접 정류기 간섭과 접지 구리망 간섭이 배관의 피복 결함 탐상정확도에 미치는 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다:

- 1) 매설배관의 피복결함 탐상 정확도에 미치는 인접 정류기의 간섭을 측정된 결과, 인접 정류기에 의한 간섭 배관의 길이가 증가함에 따라서 탐상 배관의 피복 결함 탐상정확도가 감소하였다. 그 원인은 토중에서의 인접 정류기에 의한 전류분포를 시뮬레이션한 결과, 토중에서 인접 정류기로부터 유입되는 전류에 의해서 탐상 배관의 전류분포가 왜곡된 것에 기인한 것으로 확인되었다.
- 2) 매설배관 피복결함 탐상 정확도에 미치는 접지 구리망 간섭의 영향을 평가한 결과, 접지 구리망 간섭 면적이 증가하거나 간섭 거리가 가까울수록 피복 결함 탐상정확도가 감소하였으며, 배관과 접지 구리망을 동일한 정류기로 방식하는 경우에 탐상정확도가 더욱 크게 감소하였다. 한편, 탐상배관과 접지 구리망 간의 거리가 일정 거리(본 연구에서는 대략 4.2 m) 이상으로 이격 되면 접지 구리망 간섭의 영향이 거의 없는 것으로 계산되었으며, 지표면 전위분포를 시뮬레이션한 결과와 일치된 경향을 보였다.

## 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, *J. Mater. Process. Tech.*, **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 and 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. M. E. Orazem, *Underground Pipeline Corrosion, 1st ed.*, p. 227, Woodhead Publishing, Cambridge (2014).  
<https://doi.org/10.1533/9780857099266.2.227>
  12. 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)
  13. 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).
  14. 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)
  15. M. Norm, *Mater. Performance*, **52**, 96 (2013).
  16. 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>
  17. A. Smart, G. Lupia, A. Iuga, and J. Cavallo, APEC Validation for Reasonable Assurance of Buried Piping Integrity, EPRI (2014).
  18. 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>
  19. J. H. Park, H. M. Kim, and G. S. Park, *J. Korean Magn. Soc.*, **26**, 24 (2016).  
<https://doi.org/10.4283/JKMS.2016.26.1.024>
  20. S. L. Shin, G. H. Lee, U. Ahmed, Y. K. Lee, and C. H. Han, *J. Hazard. Mater.*, **342**, 279 (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.029>
  21. 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>
  22. 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>
  23. S. Xie, Z. Duan, J. Li, Z. Tong, M. Tian, and Z. Chen, *Sensor. Actuat., A-phys.*, **309**, 112030 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112030>
  24. Y. D. Ryou, J. H. Lee, Y. D. Jo, and J. J. Kim, *J. Korean Ins. Gas*, **20**, 50 (2016).  
<https://doi.org/10.7842/kigas.2016.20.4.50>
  25. K. J. Satsios, D. P. Labridis, and P. S. Dokopoulos, *Eur. T. Electr. Power*, **8**, 193 (1998).  
<https://doi.org/10.1002/etep.4450080307>
  26. Y. B. Cho, K. W. Park, K. S. Jeon, H. S. Song, D. S. Won, S. M. Lee, and Y. T. Kho, *Proc. Int. Pipeline Conf.*, paper no. IPC 1996-1851, p. 463, Calgary, Alberta, Canada (1996).  
<https://doi.org/10.1115/IPC1996-1851>
  27. M. Magura and J. Brodniansky, *Procedia Engineer.*, **40**, 50 (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.054>
  28. 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. Kor.*, **24**, 167 (1995).  
[http://www.corrosionkorea.org/publication/publication04\\_1\\_vol\\_result.php?page=2&cs\\_code=10001&cs\\_year=1995&cs\\_issue=1&cs\\_volume=24&cs\\_row=10](http://www.corrosionkorea.org/publication/publication04_1_vol_result.php?page=2&cs_code=10001&cs_year=1995&cs_issue=1&cs_volume=24&cs_row=10)
  29. K. S. Kim, B. T. Lim, H. Y. Chang, and H. B. Park, *Journal of Power Engineering*, **30**, 3, 116 (2019).
  30. 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>
  31. H. Y. Chang, H. B. Park, K. T. Kim, Y. S. Kim, Y. Y. Jang, *Trans. Korean Soc. Press. Vessel. Pip.*, **11**, 61 (2015).  
<https://doi.org/10.20466/KPVP.2015.11.2.061>
  32. 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>
  33. Z. G. Chen, C. K. Qin, J. X. Tand, and Y. Zhou, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, **15**, 76 (2013).  
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2013.09.003>
  34. ASME, ASME boiler & pressure vessel section II-Part A, Ferrous Materials Specifications (Beginning to SA-450) (2011).