

## 3D 유한요소법을 이용한 원전 매설배관 부식결함 탐상기술 개발

김재원<sup>1</sup> · 임부택<sup>2</sup> · 박흥배<sup>1</sup> · 장현영<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>KEPCO E&C, 미래기술연구소, 경상북도 김천시 혁신로 269

<sup>2</sup>KEPCO E&C, 재료기술그룹, 경상북도 김천시 혁신로 269

(2018년 12월 04일 접수, 2018년 12월 13일 수정, 2018년 12월 13일 채택)

## Technology for the Detection of Corrosion Defects in Buried Pipes of Nuclear Power Plants with 3D FEM

Jae-Won Kim<sup>1</sup>, Bu-Taek Lim<sup>2</sup>, Heung-Bae Park<sup>1</sup>, and Hyun-Young Chang<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Power Engineering Research Institute, KEPCO Engineering & Construction Company, 269, Hyeoksinro, Gimcheon, Gyeongbuk, 39660, Korea

<sup>2</sup>Materials Engineering Department, KEPCO Engineering & Construction Company, 269, Hyeoksinro, Gimcheon, Gyeongbuk, 39660, Korea

(Received December 04, 2018; Revised December 13, 2018; Accepted December 13, 2018)

The modeling of 3D finite elements based on CAD data has been used to detect sites of corrosion defects in buried pipes. The results generated sophisticated profiles of electrolytic potential and vectors of current distributions on the earth surface. To identify the location of defects in buried pipes, the current distribution on the earth surface was projected to a plane of incidence that was identical to the pipe locations. The locations of minimum electrolytic potential value were found. The results show adequate match between the locations of real and expected defects based on modeling. In addition, the defect size can be calculated by integrating the current density curve. The results show that the defect sizes were 0.74 m<sup>2</sup> and 0.69 m<sup>2</sup>, respectively. This technology may represent a breakthrough in the detection of indirect damage in various cases involving multiple defects in size and shape, complex/cross pipe systems, multiple anodes and stray current.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Buried Pipe, Indirect Inspection, FEM, Corrosion

### 기호설명

$i_l$  = Current density in liquid

$i_{loc}$  = Local current density

$Q_l$  = Total charge in liquid (soil)

$\sigma_1$  = Conductivity of liquid (soil)

$i_0$  = Exchange current density

$\phi_1$  = Potential in liquid

### 1. 서론

원자력발전소의 운전연수가 증가함에 따라 발전소 매설 배관 경년열화로 인한 손상사례가 많이 보고되고 있다. 미국에서는 원전 매설배관의 건전성 관리를 위해 NSIAC (Nuclear Strategic Issues Advisory Committee)가 조

직되었으며, NEI 09-14 (Guideline for the Management of Underground Piping and Tank Integrity) 지침이 공포되어 세 차례 개정된 바 있고, 2015년도부터는 국내에서도 각 발전소별 매설배관 관리프로그램의 적용이 본격적으로 시작되었다 [1].

매설배관은 지표면 (earth surface) 아래에 매설되어 있기 때문에 검사를 위해 재료표면에 직접 접촉해야 하는 전통적인 NDE (비파괴검사법)와는 달리, 굴착 없이 배관의 외부 상태를 파악할 수 있는 간접검사법의 필요성이 대두되고 있다. 북미와 유럽에서의 원전 매설배관 관리는 위험도순위 평가, 지속사용 또는 보수 결정을 위한 사용적합성 평가, 굴착 후 직접검사를 시행하고 있고, 간접검사법으로는 DCVG (Direct Current Voltage Gradient), ACVG (Alternate Current Voltage Gradient), APEC (Area Potential Earth Current), CIPS (Close Interval Potential Survey) 등을 적용하고 있다. 그러나 DCVG, ACVG 및 CIPS에 대한

<sup>†</sup> Corresponding author: hychang@kepco-enc.com

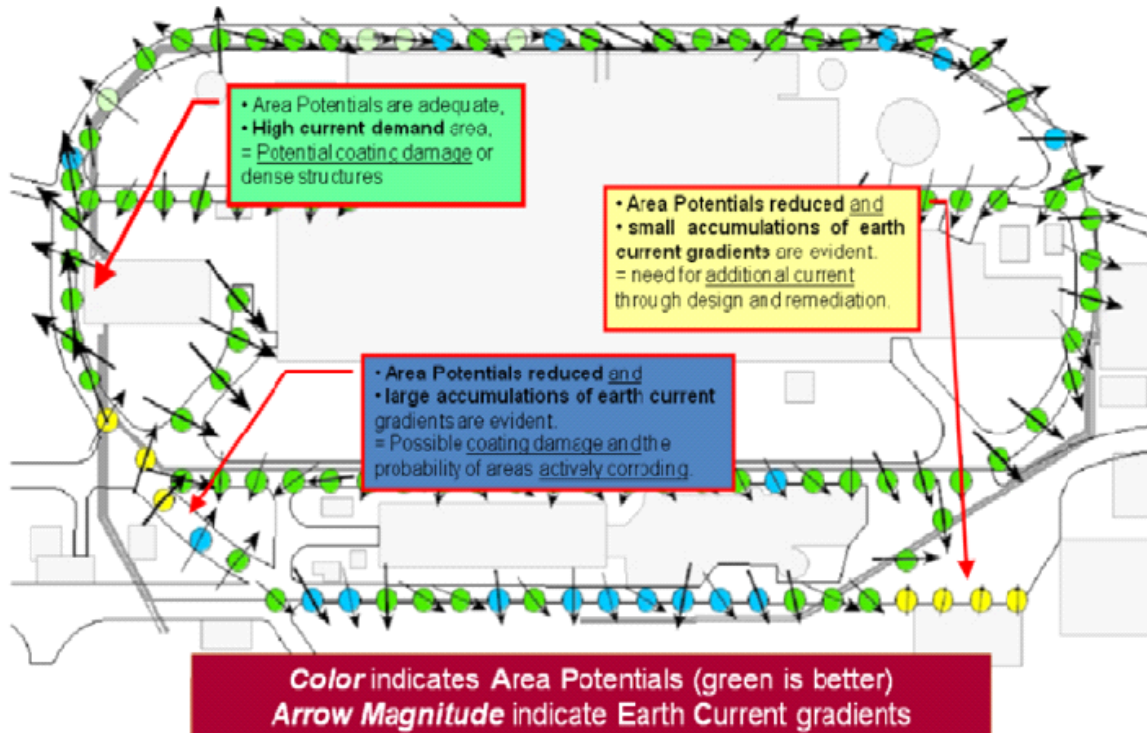


Fig. 1 Example of test APEC indications on buried pipes of from brochure of Structural Integrity Associate, Inc. [4].

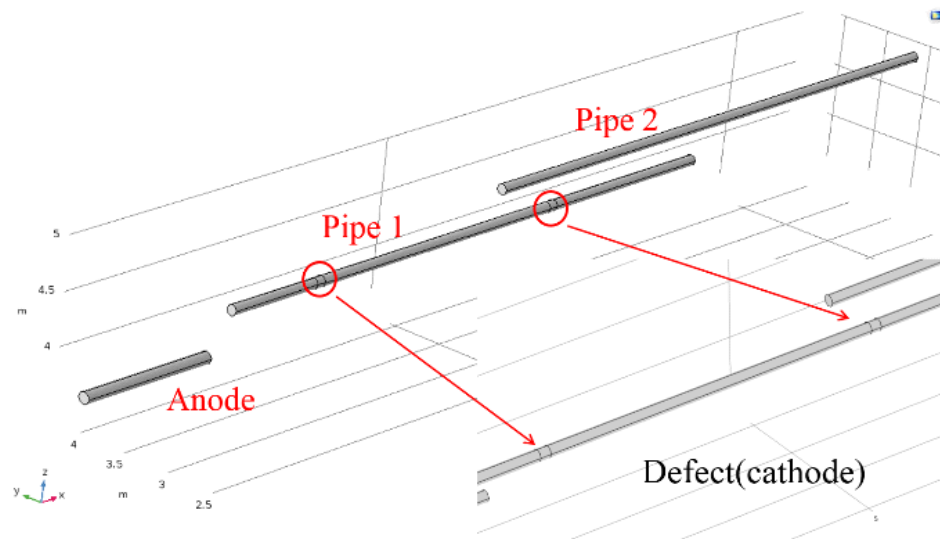


Fig. 2 Geometric model of an anode and pipes.

EPRI 연구보고서에 따르면 결함탐지의 성능은 간섭물 및 형상구조에 따라 그 정확도가 저하되는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 원전 매설배관에서의 결함징후를 탐상하는 신뢰성 있는 비굴착식 간접검사 시스템 개발이 필요하다 [2-4].

본 연구진은 매설배관의 전기방식 상태에 대한 전위분포

시뮬레이션 연구 및 시뮬레이션을 통한 간접적인 결함 탐상 기술 등에 대하여 최근 보고한 바 있다 [5,6].

본 연구에서는 음극방식시스템 (CP, Cathodic Protection) 으로 방식 되고 있는 매설배관의 지표면 전위데이터를 기반으로 3D 전기화학 모델링을 수행하여 매설배관 외부 결함 위치를 판단할 수 있는 연구를 수행하였다.

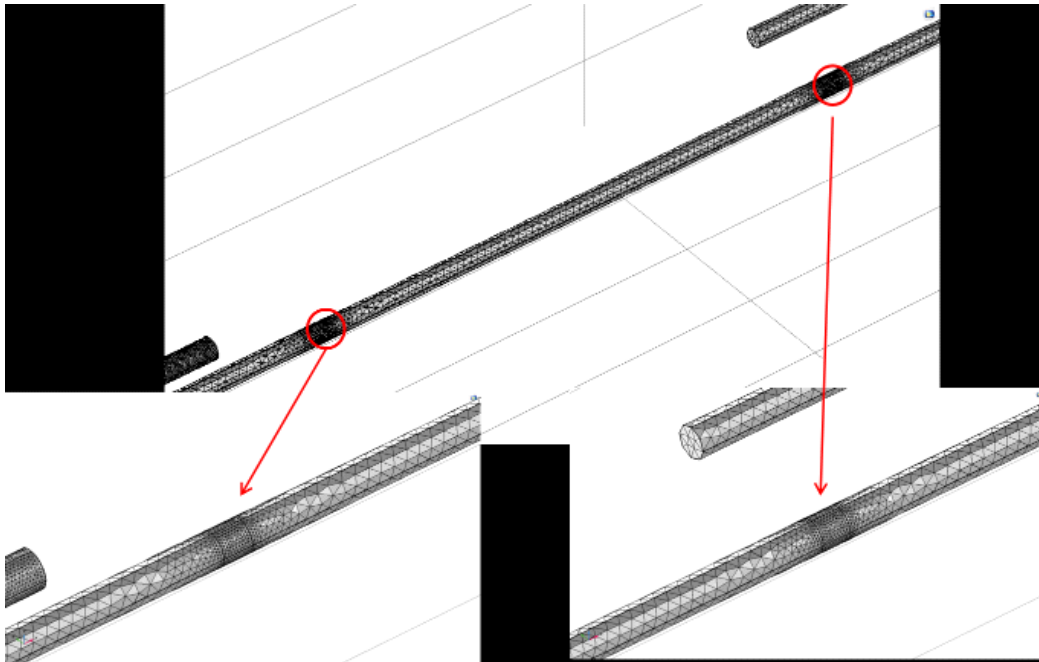


Fig. 3 Mesh generation of an anode and pipes.

## 2. 본론

### 2.1 APEC과 3D FEM의 접목성

미국의 SIA (Structural Integrity Associates)사가 개발하여 미국 원전 현장에서 적용되고 있는 APEC 기술은 대표적인 매설배관 결함에 대한 최신 간접검사법이다. APEC 기술은 다수의 황산동 참조전극 (CSE)을 사용하여 전극간 전위차를 측정하는 기술로서 매설배관 음극방식 대지전류 벡터를 수집할 수 있다 [6].

APEC 기술의 전위구배 측정은 DCVG와 유사한 맥락이다. 미국의 현장에서 수행한 APEC 검사결과의 예시를 Fig. 1에 도시하였다. 화살표는 전류의 방향과 세기를 나타내는 벡터이고 원안의 색은 대지 전위를 나타냄과 동시에 손상부를 직관적으로 파악할 수 있도록 도식화하였다.

APEC 기술은 3차원의 지하 매설배관 구조물의 결합신호

(전류벡터와 전위분포)를 지표면의 수직방향에서 바라본 2차원 프로파일이므로 다중/교차 배관집합체에서는 탐침에 한계를 가질 수밖에 없다. 또한 토양 내에 매설된 양극의 분포와 주변 콘크리트 구조물 등 간섭물의 기하구조로부터 지전위 분포가 영향을 받을 수 있다. APEC 기술의 한계는 3차원 유한요소해석을 통해 2차원 (x,y)이 아닌 3차원 (x,y,z)으로 전류벡터와 전위분포를 나타냄으로써 다중/교차 매설배관 표면상의 결합 위치를 추적할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.2 평가 모델

평가대상은 지표면 전위분포 데이터를 확보하기 위해 연구용으로 매설한 탄소강 배관 2개와 양극 1개이며, Fig. 2는 실제 매설배관과 양극의 크기 및 위치를 동일하게 구성한 기하조건을 나타낸 것이다. 1개의 배관에 2개의 인공결함을 만들어 음극방식을 수행하였다. 정확한 모델링 계산을 위해 결합부 요소 (mesh)를 조밀한 크기로 분할하였다 (Fig. 3).

### 2.3 적용 이론 및 계산 조건

본 연구에 적용된 전기화학기구는 2차 전류분포 (secondary current distribution)로서 재료계면에서의 분극을 고려하고, 전하의 이동과 분극의 관계 또한 수식에 의해 정의된다. 전극과 전해질에서 전류의 전도를 모사하기 위해 전하보전 법칙과 결합된 Ohm's law를 적용한다. 시간에 따른 계의 변화를 모사할 필요가 없으므로 정적 (stationary) 해석을

Table 1 Governing equation of the secondary current distribution

	Governing equation
Secondary Current Distribution	$i_l = -\sigma_l \phi_l, \nabla \cdot i_l = Q_l$
Electrode Surface	$n \cdot i_l = i_{total}$
	$i_{total} = \sum_m i_{loc,m}$
Electrolyte Potential	$\phi_l = \phi_{l,bnd}$

**Table 2 Parameters for simulation runs**

Parameter	Value	Description
$\sigma_1$	0.02 S/m	Soil conductivity
$E_{eq\_CS}$	-0.71 V	Equilibrium potential of carbon steel (vs. CSE*)
$i_{0\_CS}$	$9.31e^{-4}$ A/m <sup>2</sup>	Exchange current density of carbon steel
$i_{app}$	0.025 A	Applied total current

\*CSE: Copper-Copper Sulfate Electrode (Cu/CuSO<sub>4</sub>)

수행하였으며, 적용된 지배방정식은 Table 1에 나타내었다.

초기조건으로서 토양의 전위와 배관 등 고체의 전위는 0으로 가정하였다. 본 모델에는 다양한 형태의 경계조건이 필요한데, 우선 모델의 도메인 전 구역이 균질한 것으로 가정하며, 토양 전해질 전도도 ( $\sigma$ )는 실측치인 0.02 S/m을 적용하였다.

양극 (anode)에는 전해질 전류 (electrolytic current) 조건이 적용되었으며, 배관 (Fig. 2의 Pipe 1) 상의 결함부가 적절한 방식이 이루어지는 조건을 총합 전류값 ( $i_{app}$ ) 변화를 통해 찾고자 하였다.

배관은 결함부 2개소를 제외하고 모두 코팅제에 덮여 절연된 것으로 가정하였으며, 결함부는 전극표면 (electrode surface) 경계조건이 적용되었다. 평형전위 ( $E_{eq}$ )는 탄소

강의 전위이다.

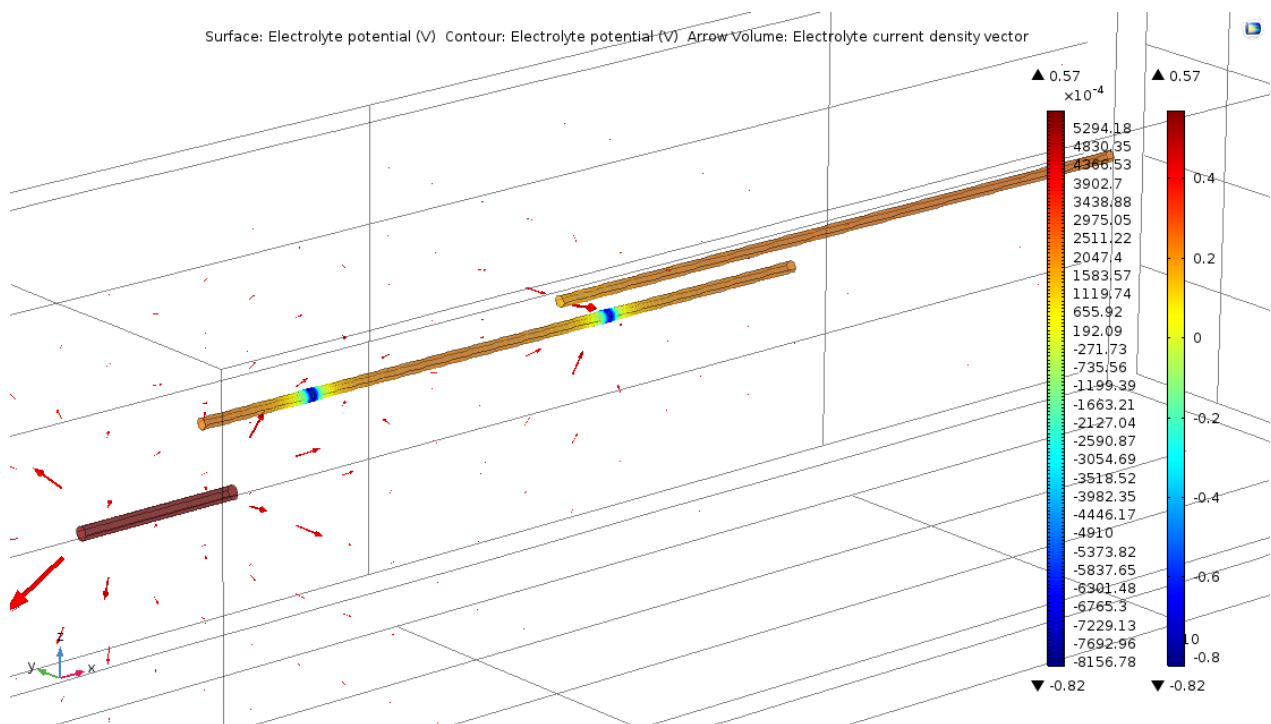
주 도메인 경계들 중 지표면을 제외한 토양의 연속된 면들은 모두 무한전해질 조건으로서 무한전해질로 드나드는 전류이동의 합은 0이라는 조건을 적용하였다. 계산을 위해 적용된 주요 상수 및 변수값은 Table 2에 정리하였다.

먼저 지표면 전위분포 데이터 추출을 위한 모델링을 수행하였으며, 추출된 지표면 전위분포 데이터 값을 결함탐상 모델링에 역으로 적용하였다. 결함탐상 모델링은 배관 상의 결함부 경계조건을 삭제하고 지표면 모델링 전위결과를 경계조건으로 하여 배관 결함부의 결함 위치 및 크기를 대조하기 위하여 수행하였다.

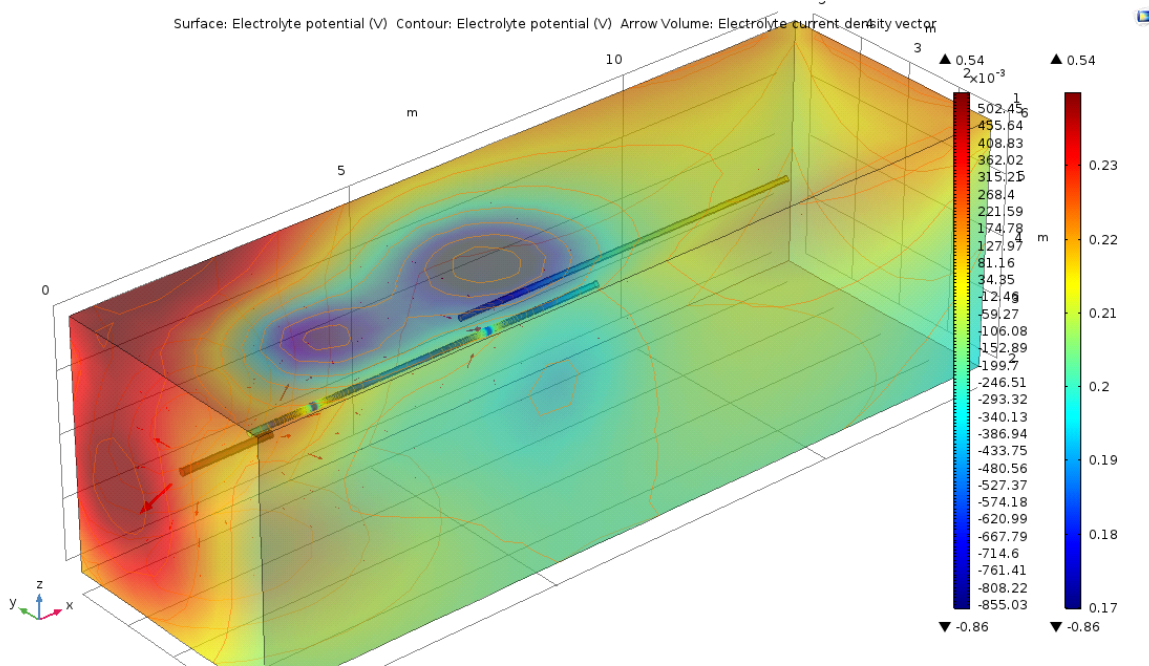
**2.4 지표면 전위데이터 추출 모델링 결과**

실제 간접검사 측정장비를 통해 지표면 전위/전류분포 데이터를 확보하기 전이므로, 배관계 모델을 동일한 기하조건으로 적용하고 3D FEM 전기화학 해석을 수행하여 가상의 지표면 전위데이터를 확보하고자 하였다. Fig. 4는 배관에 인공결함을 도입한 후 음극방식 상태를 구현한 것이다. 결함부 방식전위가 -850 mV[vs. CSE]로 적절한 방식이 이루어지고 있는 것을 확인하였다.

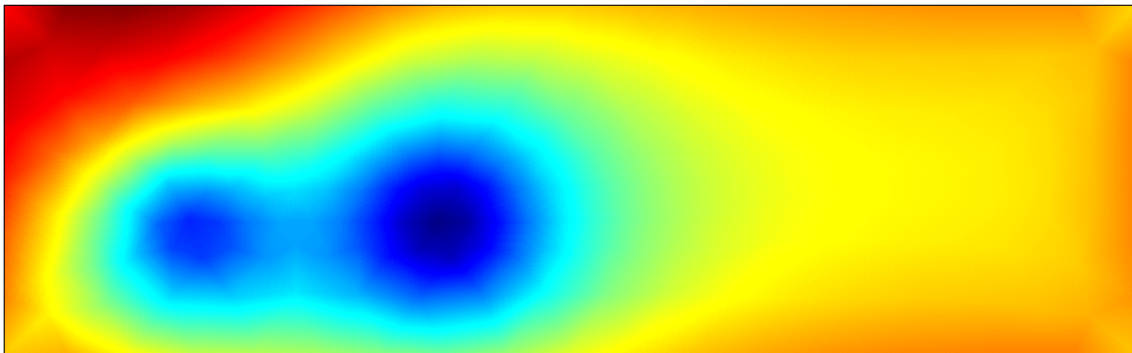
이때 양극에 인가된 총 방식전류는 0.025 A이다. 실제 토양에 매설된 배관의 방식전류는 모델링에 적용된 값보다 크게 하여, 지표면에 나타나는 결함위치의 변별력을 높이도록 하였다.



**Fig. 4 Electrolytic potential distribution on buried pipes (applied current: 0.025 A).**



(a)



(b)

Fig. 5 Electrolytic potential distribution on earth surface; (a) 3D plot, (b) 2D plot.

Fig. 5는 Fig. 4의 음극방식이 이루어진 상태에서의 지표면 전위분포를 나타낸 것이다. Fig. 5b와 같이 2차원 (x,y) 지표면 전위분포를 추출하여 결합탐상 모델링의 경계조건으로 활용하였다.

### 2.5 결합탐상 모델링 결과

상기 모델링 결과를 통해 확보된 전위분포 데이터를 기반으로 배관부의 결함위치를 역으로 찾는 해석을 수행하였다. Fig. 6은 배관 내 결함위치를 탐상하기 위한 모델링의 기하조건으로서 이때 인공결함의 경계조건을 삭제하고 지표면 전위분포를 경계조건으로 하였다. 또한 양극의 중심을 기점으로 하여 지표면 각 모서리를 직선으로 연결하고 배관위치와 z축 방향으로 동일한 좌표의 접점 4곳을 연결한 가상의

투사면 (plane of incidence)을 만들고 경계조건으로 하였다. 가상의 투사면은 전위구배가 구 (sphere)의 형태로 퍼져나가는 개념에서 착안한 것이다 [7].

배관부 투사면에 지표면 전위분포를 인가하기 위해서는 모델링 기능 중 모델연동 (component coupling) 기능을 활용할 수 있다. 본 연구에서 활용한 General extrusion은 Extrusion 기능 중 일반적으로 사용되는 기능으로서, Source (도메인, 경계, 모서리, 점)에서 정의한 식 (또는 값)을 Destination (도메인, 경계, 모서리, 점)이 되는 임의의 영역에서 사용할 수 있으며, 해석하고자 하는 구조체의 크기, 형상이 달라도 그 값을 주고 받을 수 있는 장점이 있다 [8].

Fig. 7은 결합탐상 모델링을 해석한 후 지표면 및 가상의 투사면에 전위분포를 나타낸 것이다. 지표면의 전위분포와

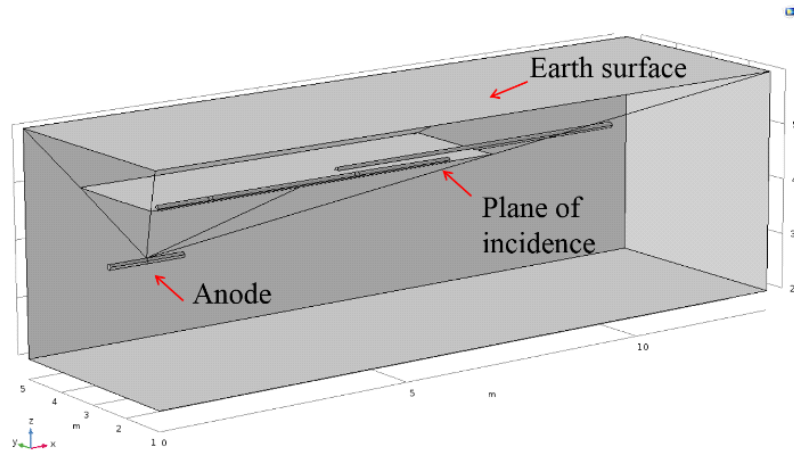


Fig. 6 Geometric design for detecting defect locations on buried pipes.

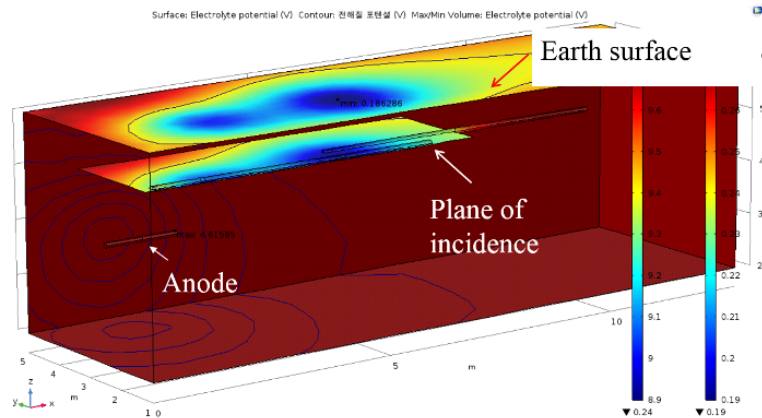


Fig. 7 Electrolytic potential distribution on earth surface and plane of incidence.

유사한 전위분포가 가상의 투사면에 투과된 것을 관찰할 수 있었다. 본 모델링에서는 우선적으로 결함의 위치를 찾기 위한 해석을 수행하였기에 전위값은 고려하지 않고 전위 분포만을 고려하였다. 일반적인 간접검사법에서는 전위값이 변곡되는 위치를 결함으로 예측한다. Fig. 8a는 이를 구현하고자 배관부와 z축으로 동일한 위치에 있는 투사면의 2차원 (x,y) 프로파일을 나타낸 것이고 Fig. 8b는 y축은 전위값, x축은 배관 (Fig. 2의 Pipe 1)의 길이방향 좌표를 1차원 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 8b를 통해 전위값이 변곡되는 배관부 좌표 (빨간색 원)를 관찰할 수 있었으며, 이 두 변곡된 위치의 좌표를 추출하여 실제 결함의 위치와 비교하였다.

### 2.6 결함 위치비교 및 면적 계산을 위한 모델링 결과

Fig. 9는 결함 위치비교 및 결함 면적 계산을 위한 모델링의 기하조건을 나타낸 것이다. 상기 Fig. 8b의 전위가 변곡되는 위치 좌표 (Fig. 8b 빨간색 원)를 추출하여 배관부에

구형대의 결함 기하조건을 설정하였다. 기하조건을 구형으로 선정 한 이유는 추후 결함의 면적 및 소모 전류량의 계산을 쉽게 하기 위해서이다. 그 다음 단계에서는 가상의 투사면 경계조건을 삭제하고, 지표면 전위분포와 구형의 결함을 경계조건으로 설정하였다. Fig. 10a의 지표면과 배관부의 전위분포를 관찰한 결과 배관 상의 두 곳이 가장 낮은 전위값을 가지며 이곳에 결함이 있다고 판단할 수 있다. Fig. 10b ~ c를 통하여 실제 결함의 위치 (흰색 띠)와 모델링을 통해 예측된 결함의 위치 (구형)가 동일 혹은 유사함을 관찰하였다. Fig. 10c와 같이 결함의 위치 차이가 발생한 원인은 투사면을 구현할 때 기준이 되는 시작점을 양극 전체가 아닌, 양극의 중심점을 투사원으로 지정하였기 때문이며, 이는 추후에 보정을 통하여 정확한 위치를 찾을 수 있도록 할 예정이다.

Fig. 11은 구형 결함을 경계조건으로 한 배관부의 전류밀도를 나타낸 것이다. 결함의 면적은 전류밀도에서 소모된 전류량의 적분한 값을 나누면 산출할 수 있다. 두 결함부의

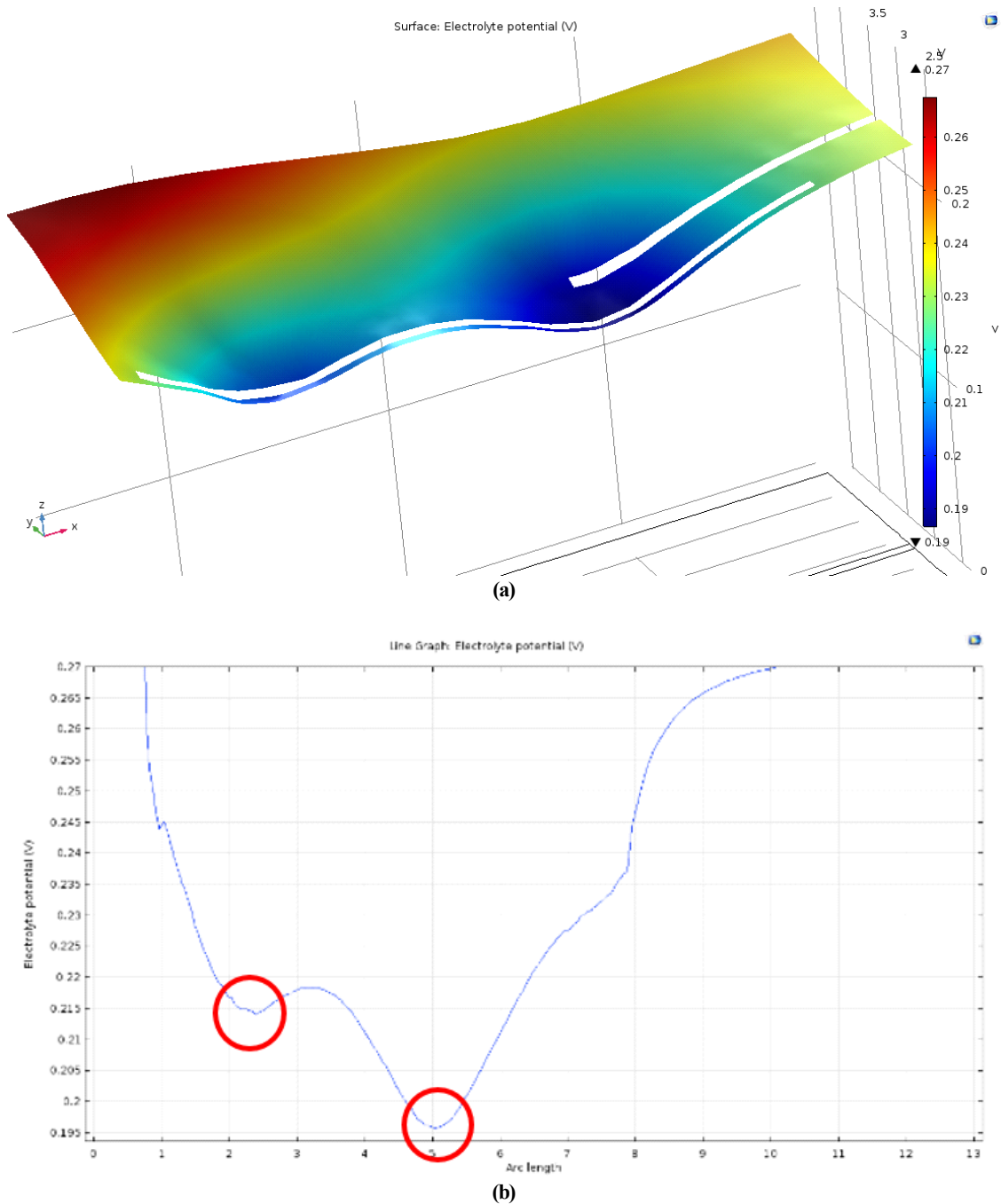


Fig. 8 Electrolytic potential distribution on a plane of incidence; (a) 2D plot, (b) 1D plot.

전류밀도는 Fig.11의 결함부 좌표의 값으로 선정하였으며, Fig. 10b의 결함부 전류밀도 값은 0.27 A/m<sup>2</sup>이다. 결함부 (구형)에서 소모된 전류량의 적분값은 모델링 소프트웨어의 적분 함수(integration)를 사용하여 도출하였으며, 자동 계산된 전류값은 0.018 A이다. Fig. 10b의 위치에 있는 결함부 면적을 아래의 계산식으로 계산한 결과 약 0.74 m<sup>2</sup>인 것으로 확인하였다. Fig. 10c의 결함부 면적도 같은 방식

으로 계산한 결과 약 0.69 m<sup>2</sup>이다.

$$\text{면적}[m^2] = \frac{\text{소모된 전류량}[A]}{\text{전류밀도}[A/m^2]}$$

### 2.7 향후 기술개발 방향

현재까지의 결과로부터 지표면 전위데이터를 토대로 배관상의 결함 위치를 예측할 수 있음을 3D 유한요소법을 통

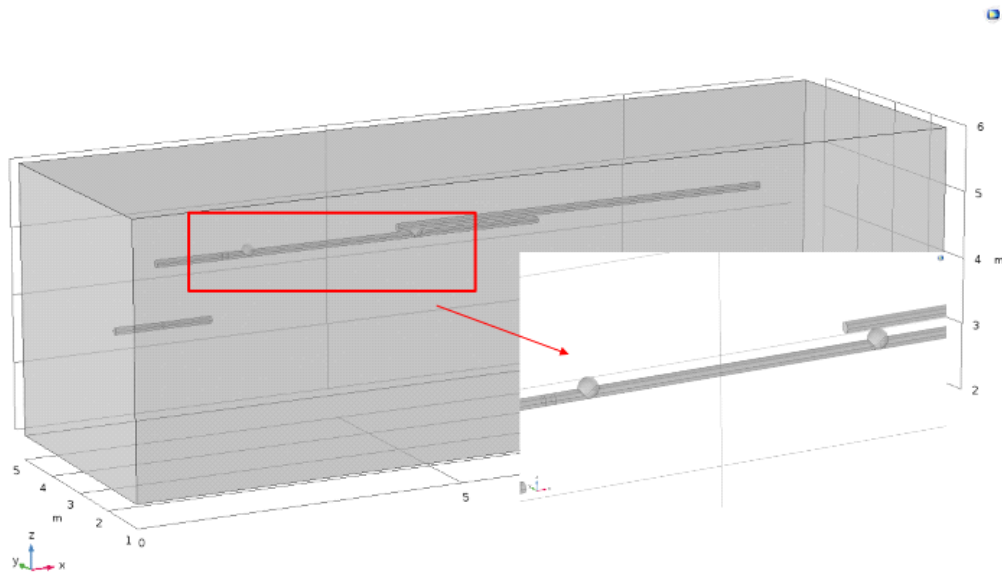


Fig. 9 Geometric realization for defect locations comparison and defects size calculation.

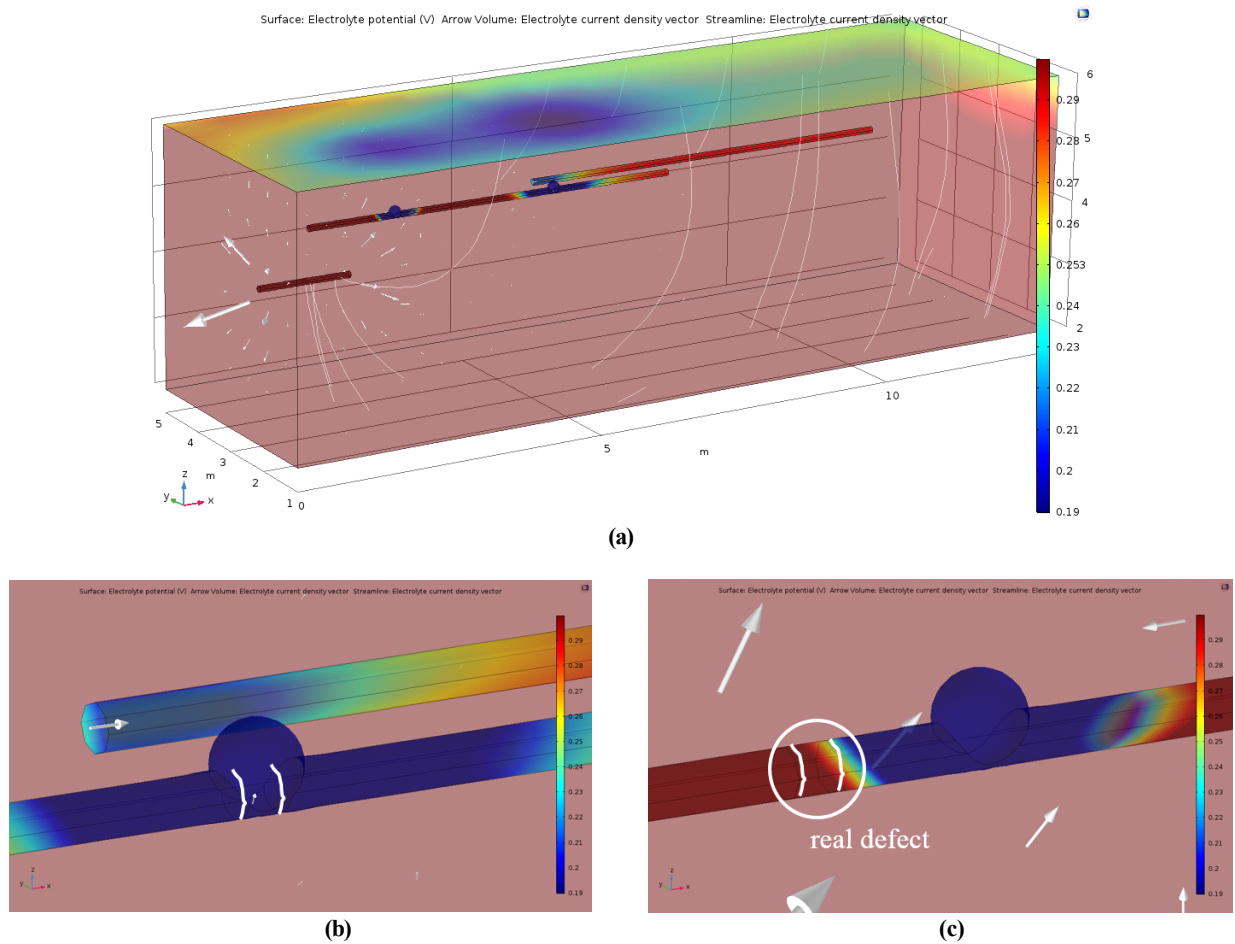


Fig. 10 Comparison between locations of a real defect and expected defect after modeling; (a) Electrolytic potential of earth surface and buried pipes, (b) Comparison of defect locations (right), (c) Comparison of defect locations (left).



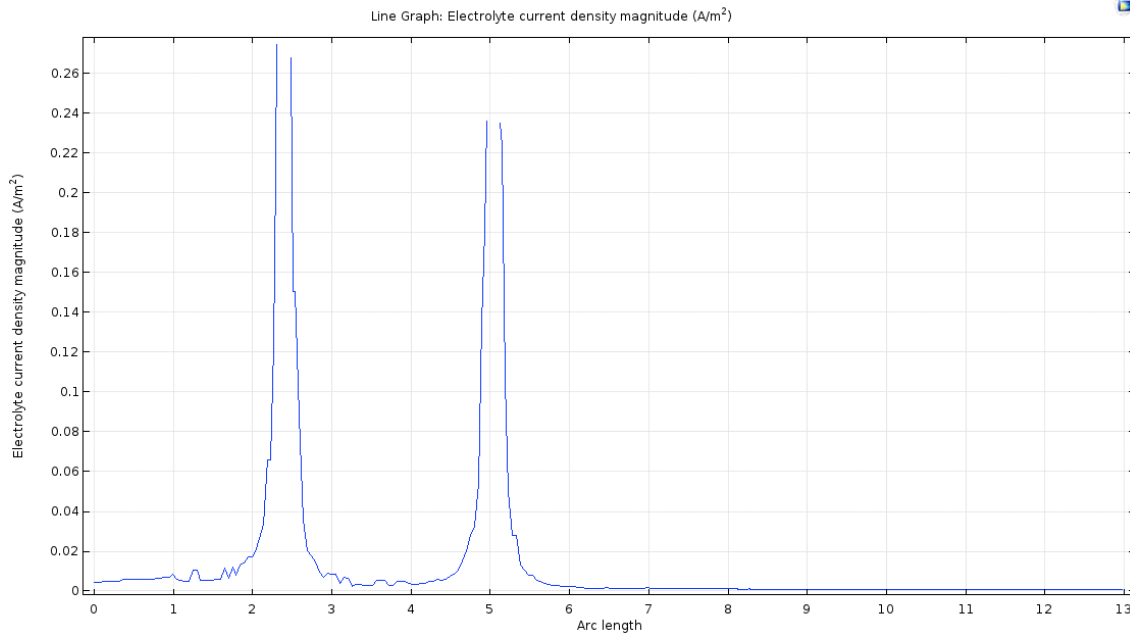


Fig. 11 Current density curve on buried pipe with defects.

해 확인하였다. 이 기술을 기반으로 다중 결함, 복잡한 배관계, 다중 양극, 외부 유입전류 (미주전류) 등 국내 원전 매설 배관의 다양한 사례들에 대하여 모델링을 수행할 예정이며, 최종적으로는 실제 측정된 지표면 전위분포 데이터를 입력 데이터로 활용하여 3D 모델링과 융합한 신개념 비굴착식 간접검사 기술을 개발할 예정이다.

### 3. 결론

현장 시험용 매설배관의 부식결함 위치 추적을 위해 3D 모델링을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 현재 가장 범용적으로 적용되는 매설배관 결함 탐침용 간접검사법과 3D 모델링을 융합하여 새로운 비굴착식 간접검사 기법을 개발중임
- (2) 3D 모델링을 통해 얻은 지표면 전위 데이터를 General extrusion 기능을 이용하여 역으로 투사하고 최소 전위값을 갖는 좌표와 교차하는 배관부위를 결함 위치로 판단할 수 있음
- (3) 지표면 전위데이터를 통해 역추적한 결함과 실제 결함의 위치가 동일 혹은 유사한 것을 관찰하였으며, 결함의 전위강하와 전류밀도를 통해 결함 크기를 계산한 결과, 결함부의 면적이 각각 0.74 m<sup>2</sup> 과 0.69 m<sup>2</sup>인 것으로 확인하였음

### 감사의 글

This work was supported by the Nuclear Power Core Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 20171520000350).

### References

1. EPRI 1016456, Recommendations for an Program to Control the Degradation of Buried and Underground Piping and Tanks, Revision 1 (2010).
2. KISTEK, Development of corrosion environment survey and analysis method for buried pipe II (1999).
3. KOGAS, Protection technique handbook, p. 18 (2003).
4. EPRI 1022962, Plant Engineering: Evaluation of Indirect Assessment Techniques for Coating Flaw Detection (2011).
5. H. Y. Chang, H. B. Park, K. T. Kim, Y. S. Kim, and Y. Y. Jang, *KPVP*, **11**, 61 (2015).
6. 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).
7. Elizabeth Nicholson, B.Eng., Coatings and Cathodic Protection, <http://www.cath-tech.com> (2012).
8. COMSOL<sup>TM</sup>, *Guidebook of COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics (Chemistry-Electrochemistry)*, p. 174, ALTSOFT (2014).