

국내원전에 매설된 콜타르 코팅 배관의 음극방식과 FEM법을 이용한 방식성능 시뮬레이션

장 현 영¹ · 김 기 태² · 임 부 택¹ · 김 경 수¹ · 김 재 원¹ · 박 흥 배¹ · 김 영 식^{2,†}

¹KEPCO E&C, 미래전력기술연구소, 경상북도 김천시 혁신로 269

²안동대학교 신소재공학부, 청정에너지소재기술 연구센터, 경상북도 안동시 경동로 1375

(2016년 12월 21일 접수, 2017년 6월 20일 수정, 2017년 6월 20일 채택)

Protection Performance Simulation of Coal Tar-Coated Pipes Buried in a Domestic Nuclear Power Plant Using Cathodic Protection and FEM Method

H. Y. Chang¹, K. T. Kim², B. T. Lim¹, K. S. Kim¹, J. W. Kim¹, H. B. Park¹, and Y. S. Kim^{2,†}

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

²Materials Research Centre for Energy and Clean Technology, School of Materials Science and Engineering,
Andong National University, 1375 Gyeongdongro, Andong 36729, Korea

(Received December 21, 2016; Revised June 20, 2017; Accepted June 20, 2017)

Coal tar-coated pipes buried in a domestic nuclear power plant have operated under the cathodic protection. This work conducted the simulation of the coating performance of these pipes using a FEM method. The pipes, being ductile cast iron have been suffered under considerably high cathodic protection condition beyond the appropriate condition. However, cathodic potential measured at the site revealed non-protected status. Converting from 3D CAD data of the power plant to appropriate type for a FEM simulation was conducted and cathodic potential under the applied voltage and current was calculated using primary and secondary current distribution and physical conditions. FEM simulation for coal tar-coated pipe without defects revealed over-protection condition if the pipes were well-coated. However, the simulation for coal tar-coated pipes with many defects predict that the coated pipes may be severely degraded. Therefore, for high risk pipes, direct examination and repair or renewal of pipes are strongly recommended.

Keywords: nuclear power plant, coal tar-coated buried pipe, FEM, cathodic protection

1. 서 론

매설배관의 경우 다양한 사용재료 및 환경의 영향으로 거의 모든 종류의 부식이 발생할 수 있는데, 매설배관 주위의 다른 토양조건, 피복결함, 제조과정에 형성된 밀스케일의 불균일성 등의 결과로 외부로는 균일부식, 틈새부식, 미생물부식, 미주전류부식 등이 발생할 수 있고 내부에서는 유체에 의한 침식부식, 공식 등의 부식으로 인해 누설, 파단, 막힘 등의 손상이 발생한다. 이러한 부식손상을 막기 위한 제어방법으로는 설계, 피복, 내식성 재료 선정, 미주전류 제어, 음극방식 등이 있으며 일반적으로 한 가지 또는 두 가지

이상 적용하고 있다. 주로 매설배관에서는 피복과 음극방식을 동시에 적용하여 방식을 진행하고 있으며 원전의 경우 검사 절차를 작성하여 관리 중에 있다. 원자력발전소의 경우 EPRI를 중심으로 매설배관의 경년열화를 체계적으로 관리하고자 2008년에 매설배관 손상관리 지침서, EPRI-1016456이 최초로 발간되었으며, 미국 원전산업계에서는 매설배관 건전성 그룹(Buried Pipe Integrity Group: BPIG)을 결성하여 주기적으로 기술회의를 통해 기술적인 문제점과 현안을 논의하여 문제를 해결하고 있다 [1].

일반적으로 피복방법은 그 분류 방법도 다양하고 상업적인 종류도 수많이 나와 있으나, 근본적으로 부식매체를 차단한다는 1차적인 목적을 갖고 있으며, 경우에 따라서는 희생양극성 기능 등을 부여하기도 한다. 피복은 배관 매설 시에나

[†] Corresponding author: yikim@anu.ac.kr

Table 1 Inspection of buried and underground piping and tanks [8]

Condition	Current AMP XI.M41			LR-ISG-2015-01		
	Years 30-40	Years 40-50	Years 50-60	Years 30-40	Years 40-50	Years 50-60
C	1	1	1	1	1	1
D	2	2	2	2	2	2
E	7	10	12	3	3	3
F	15	20	25	6	6	6

Conditions:

C : CP operational and meeting operational and effectiveness goals in AMP XI.M41

D: CP demonstrated to be not required

E: CP operational but does not meet operational and effectiveness goals in AMP XI.M41; however, coatings and backfill meet preventive action recommendations of AMP XI.M41, operating experience does not reveal leaks, significant coating degradation, or metal loss, and the soil is not corrosive.

F: Condition C, D, or E not met, and either: (a) plant-specific operating experience has revealed leaks, significant coating

사용시간이 증가함에 따라서 열화 발생에 따른 손상부위가 발생하며 부식성 환경에 금속재료가 직접 노출되는 것을 의미한다. 현재 비굴착식 매설배관의 피복손상 의심부를 탐측하는 간접검사 기술로는 Pearson method, Electromagnetic Current Attenuation Survey, Close Interval Potential Survey, ACVG(Alternating Current Voltage Gradient), DCVG(Direct Current Voltage Gradient), APEC(Area Potential Earth Current) 등이 있다 [2-4].

미국에서는 인허가갱신을 신청하는 원전의 신청 서류를 검토하기 위한 기술적 근거문서로서 NUREG-1801 (GALL, Generic Aging Lessons Learned Report)을 활용한다. 본 지침서에서 매설배관 관리와 관련된 내용은 XI.M41, “Buried and Underground Piping and Tanks Inspection” 에 기술되어 있다. NUREG-1801은 미국 NRC가 계속운전을 신청하는 발전사업자를 대상으로 인허가갱신(License Renewal) 심사를 위한 지침서로써 안전관련 및 위험물질 배관/탱크를 대상으로 한다. 상기 경년열화 관리 프로그램 지침 XI.M41, “Buried and Underground Piping and Tanks Inspection” 의 부속 검사지침서인 LR-ISG-2011-03의 개정판 LR-ISG-2015-01에서는 음극보호시스템의 유효성을 기준으로 다소 완화된 검사 대상 수를 제시하고 있음을 최근에 발표한 바 있으며 Table 1에 나타내었다 [5-8].

또한 음극방식 성능기준에도 변화가 있는데, 기존의 일률적으로 적용되던 황산동 기준전극(CSE, Cu/CuSO₄ Electrode) 대비 -850 mV 또는 포화감홍기준전극 (SCE, Saturated Calomel Electrode) 대비 -800 mV는 세분화 되어 다음과 같은 기준이 마련되었다.

- 10k ~ 100 kΩ · cm 토양 비저항의 경우;

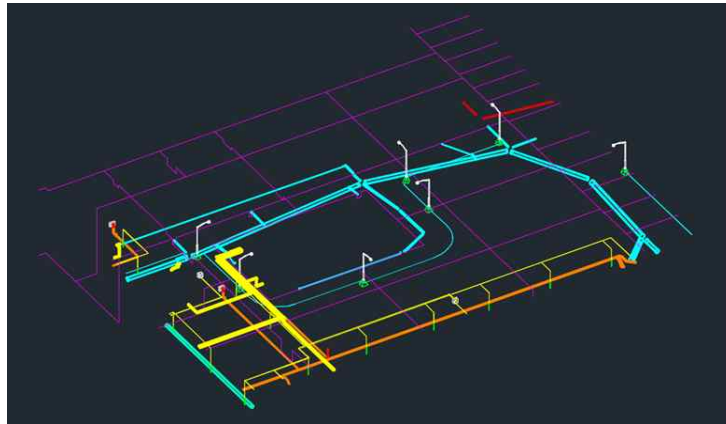
-750 mV(CSE) 또는 -700 mV(SCE)

- 100 kΩ · cm 초과 토양 비저항의 경우;
-650 mV(CSE) 또는 -600 mV(SCE)
- 전기저항 부식속도 센서로 재료의 부식속도가 1 mpy 이하임을 입증해야 함

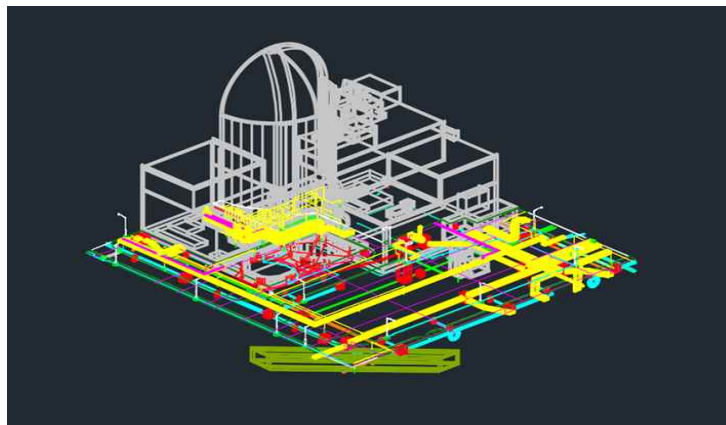
국내에서는 원자력안전법 시행규칙 제20조 및 제21조의 경년열화에 관한 사항, “요구되는 안전 여유도 유지를 위하여 평가대상 구조물, 계통 및 기기의 경년열화 관리계획이 확립되어 있어야 함” 을 기술기준으로 매설 및 지하배관의 경년열화 관리계획을 수립 및 이행하여 매설배관의 건전성을 입증하고 있다 [9].

한편 원전 기기의 부식 열화기구로서 선택적 침출(Selective Leaching) 혹은 선택적 부식(Selective Corrosion)의 대상재료는 회주철, 황동 및 청동 등 일부 구리계 합금에 국한되었으나, 최근 USNRC의 GALL-SLR에서는 구상흑연주철(Ductile Cast Iron)에 대해서도 이러한 경년열화 현상에 민감한 재료로 포함할 것을 권고하고 있다 [10]. 구상흑연주철은 우리나라 원전의 소화수배관 계통의 옥외 소화전 관로에 적용 중이다. 본 연구진은 매설배관의 전기방식 상태에 대한 전위분포 시뮬레이션 연구 [11] 및 시뮬레이션을 통한 간접적인 결함 탐지 기술 [12] 등에 대하여 최근 보고한 바 있다; 3D FEM 모델링법을 이용하여 매설배관에 대한 전기방식 상태 및 코팅 건전성을 예측할 수 있는 가능성이 있음을 확인하였다.

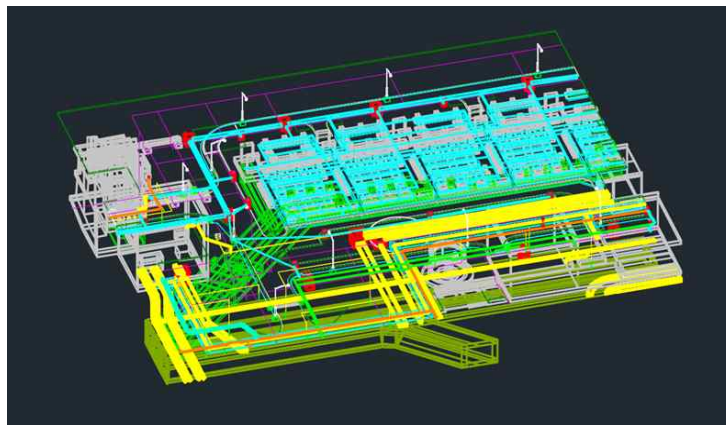
상기와 같은 매설배관 음극방식 기준의 변화 및 경년열화 평가 대상의 변화에 따른 국내 원전의 매설배관 적합성을 평가하기 위해서 본 연구에서는 국내 원전 특정 호기의 실제



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 3D layout of domestic nuclear power plant; (a) Area 1, (b) Area 2, (c) Area 3.

매설배관을 대상으로 3D FEM 모델링을 수행하여 현재 적용중인 음극방식 설비 및 운전조건의 적절성을 평가하였으며, 실제 측정 방식전위와 모델링과의 비교를 통해 매설된 구상흑연주철 배관의 표면 코팅에 건전성 등을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 매설배관에 대한 방식상태 현장 측정시험

국내 원전의 매설배관의 방식상태 점검을 위해 임의의 원전을 선정하여 #1~#3 구역의 매설배관에 대한 전위 분

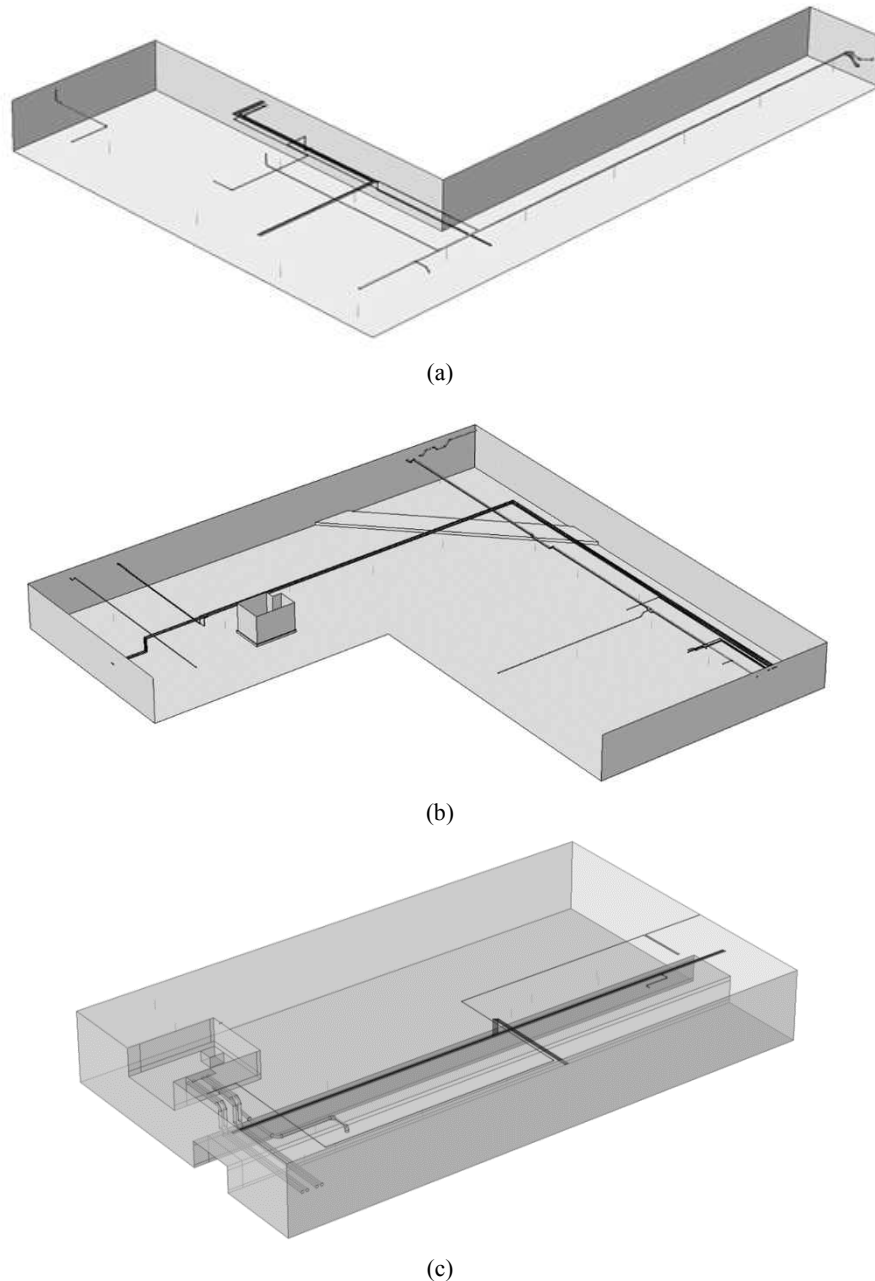


Fig. 2 3D FEM model domain extracted from 3D CAD data base; (a) Area 1, (b) Area 2, (c) Area 3.

포를 측정하였다. 측정방법으로는 매설배관에서 인출한 전선과 토양 표면에 접촉시킨 황산동 기준전극 사이에 볼트메타를 연결시켜 기준전극에 대한 배관의 On 전위를 측정하였다.

2.2 국내 원전매설배관의 3D 모델화

본 해석에 사용된 모델은 현재 운전 중인 국내 원전 특정 호기에 현장적용 연구를 위해 특별히 제작된 정류기와 모니터링 시스템 그리고 기준전극이 적용된 현장의 배관망이며, 이 중

일부 영역을 3등분하여 3D CAD 데이터를 모델 기하조건으로 적용하였다. 3D 배관망 데이터는 Bentley사의 Microstation으로 작성되어 관리 중에 있으며 Microstation의 확장자 파일인 dgn 파일을 AutoCAD파일인 dwg로 변환시켜 COMSOL Multipysics로 불러들여 모델화 하였다.

Fig. 1에는 모델링에 적용된 실제 원전 3D CAD 도면으로서 위상(level)별로 층상화(layered)되어 있고, 각 층상 내에 포함된 배관과 건물 및 구조물과 같은 여러 요소들이 함께 배치되어 있다. 기존 정류기 및 전극들에 더하여 현장

적용 연구용 정류기 및 전극들이 영향을 줄 수 있는 부위를 선별하여 대상 구역을 선정하였고, 이 구역을 3개로 나누어 모델링을 진행하였다.

2.3 1차전류분포를 통한 음극방식 시뮬레이션

음극방식 유한요소 모델링은 COMSOL Multiphysics를 이용하였으며, 전기화학 기구로 1차전류분포(Primary Current Distribution Physics)를 적용하여 거시적인 전위 분포를 해석하였고 지배방정식 및 경계조건은 Table 2(a)와 Table 3과 같다 [13]. 1차전류분포 기구에서는 토양 내 화학종이나 화학반응 및 전극계면반응에 관계없이 외부에

서 인가된 방식전류가 모두 배관의 결합부로 흘러 들어간다는 가정하에 진행하는 계산이다.

배관을 제외한 모든 구조물은 절연이라 가정하였으며 Fig. 1에서 모든 구조물을 제외하고 Fig. 2와 같이 토양에 매설된 배관과 양극을 배치하여 모델 기하조건을 구성하였다. 대상의 하부 도메인에서 매설배관 실체(양각)들은 모두 삭제하고 음각(intaglio)화하여 모델링할 대상인 토양 및 배관과의 계면만 남기게 된다 [14]. 음각화된 모델은 부위 별로 적절한 크기의 요소(mesh)로 나누었다. 방식전위는 포화감홍전극(Saturated Calomel Electrode: SCE)으로 나타내었다.

Table 2(a) Govern equations for 3D simulation using a primary current distribution

	Govern equation
Primary Current Distribution	$\nabla \cdot i_l = Q_l, i_l = -\sigma_l \nabla \phi_l$ $\nabla \cdot i_s = Q_s, i_s = -\sigma_s \nabla \phi_s$
Electrolyte-Electrode Boundary	$\phi_{s,ext} - \phi_l = E_{ec}$
Electrolyte Potential	$\nabla \cdot i_l = Q_l, i_l = \sigma_l \nabla \phi_l$

Table 2(b) Govern equations for 3D simulation using a secondary current distribution

	Governed equation
Secondary Current Distribution	$i_l = -\sigma_l \phi_l, \nabla \cdot i_l = 0$
Electrolyte-Electrode Boundary	$n \cdot i_l = i_{total}$ $i_{total} = \sum_m i_{loc,m}$
Electrolyte Potential	$\phi_l = \phi_{l,bnd}$

Key

- i_l = Current density in liquid
- i_s = Current density in solid
- i_{loc} = Local current density
- Q_l = Total charge in liquid(Soil)
- Q_s = Total charge in solid
- σ_l = Conductivity of liquid(Soil)
- σ_s = Conductivity of solid
- i_0 = Exchange current density
- a_a = Anodic transfer coefficient
- a_c = Cathodic transfer coefficient
- η = Overpotential
- ϕ_l = Potential in liquid
- ϕ_s = Potential on solid

Table 3 Parameter for simulation runs

Parameter	Value	Description
σ	0.02 S/m	Soil conductivity
$E_{eq,CS}$	-0.72 V	Equilibrium potential of carbon steel (vs. SCE)
I_0_{CS}	$9.31e^{-4}$ A/m ²	Exchange current density of carbon steel
a_a	0.5	Butler-Volmer coefficient (+)
a_c	0.5	Butler-Volmer coefficient (-)
i_{app}	1.2 A	Applied total current

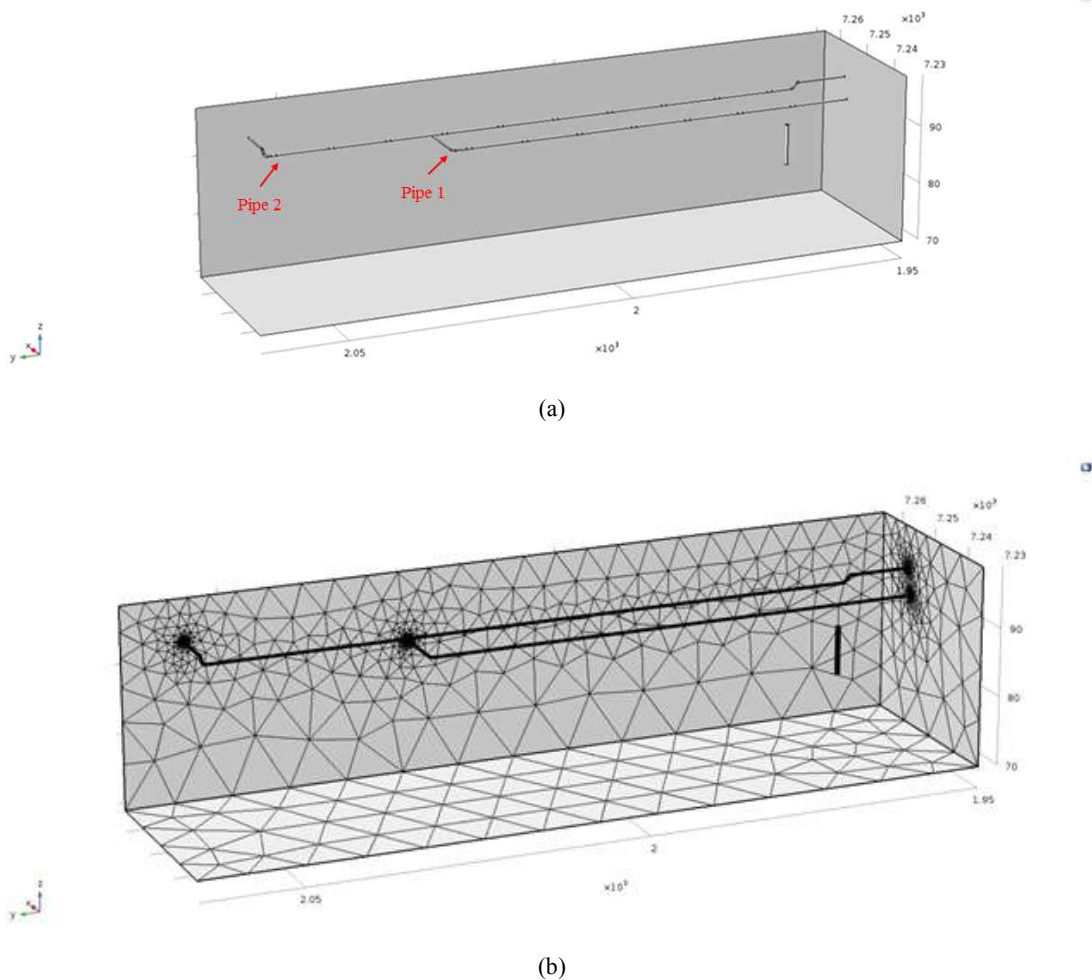


Fig. 3 Configuration and mesh for 3D modelling; (a) Configuration of buried pipe and anode, (b) mesh formation.

2.4 2차전류분포를 통한 음극방식 시뮬레이션

모델링 결과와 현장 측정데이터를 부합시킬 수 있도록 매 설배관 코팅제의 상태를 변화시켜 가며 전해질 전위값을 계산하였다. 이 계산을 위해서는 코팅제의 상태에 따라 배관 표면의 분극상황 등 전기화학적 상태가 변하기 때문에 기구학적 지배방정식으로서 2차전류분포 (Secondary Current Distribution Physics)를 적용하였다. 2차전류분포 기구는 재료계면에서의 활성화 분극을 고려하고, 전하의 이동과 분극과의 관계 또한 수식에 의해 정의된다. 전극과 전해질에서 전류의 전도를 묘사하기 위해 전하보존법칙과 결합된 Ohm's law를 적용한다. 시간에 따른 계의 변화를 묘사할 필요가 없으므로 정적(Stationary) 해석을 수행하였으며, 계산에 적용된 지배방정식은 Table 2(b)와 Table 3에 정리하였다 [13].

이 계산에서도 앞서 사용했던 실제 원전 3D CAD 도면을 사용하였으며, 계산의 복잡성과 이에 따른 계산시간을 줄이

기 위해 모델은 1구역 중 2개의 배관 및 1개의 양극 그리고

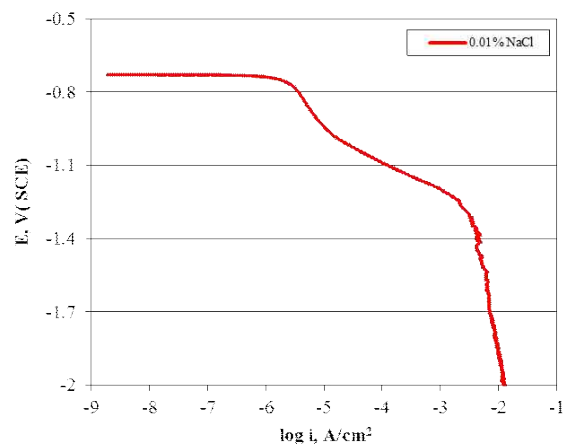


Fig. 4 Cathodic polarization curve of ductile cast iron in aerated 0.01% NaCl solution at room temperature (scan rate; 0.33 mV/s).

Table 4 Cathodic protection status of domestic nuclear power plant

Areas	Applied voltage, V	Applied current, A	V vs. SCE		
			Maximum value	Minimum value	Mean value
Area 1	12	1.2	-0.61	-1.83	-0.90
Area 2	12	1.2	-0.49	-0.69	-0.55
Area 3	6.9	0.12	-0.50	-1.13	-0.70

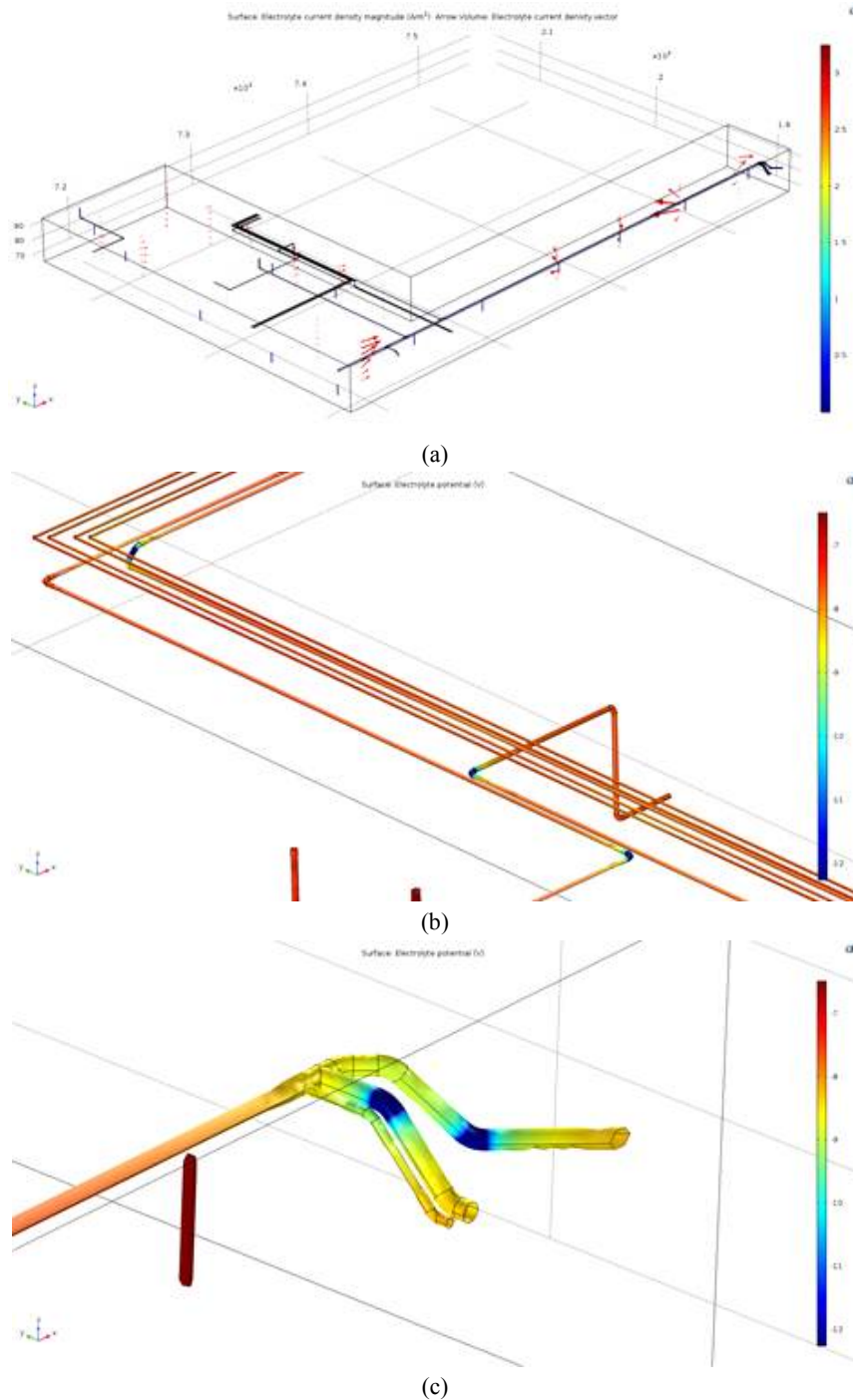


Fig. 5 Simulation result for area 1 using a primary current distribution; (a) current density and its vector, (b) electrolyte potential of defect #1, (c) electrolyte potential of defect #2.

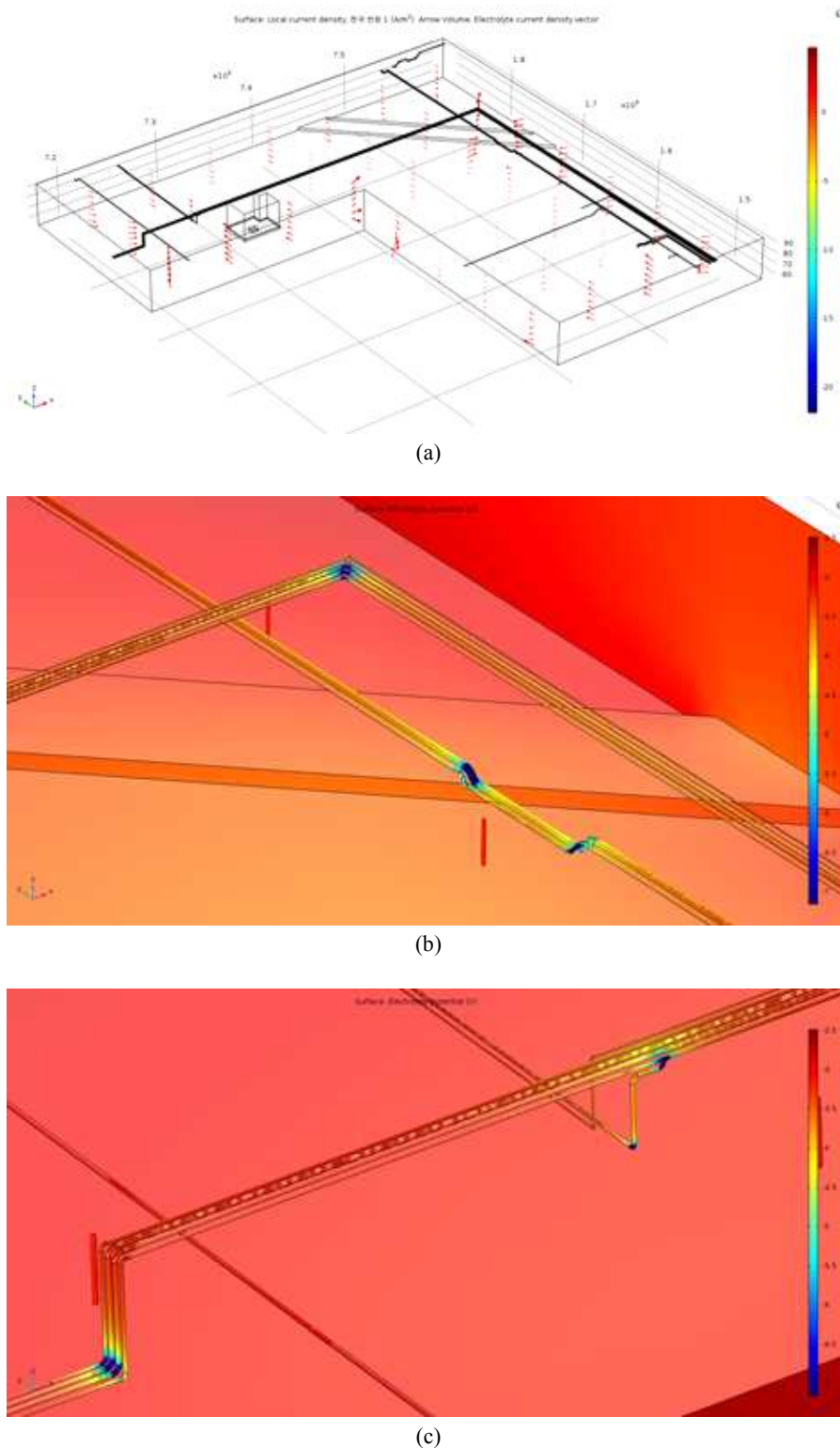


Fig. 6 Simulation result for area 2 using a primary current distribution; (a) current density and its vector, (b) electrolyte potential of defect #1, (c) electrolyte potential of defect #2.

이들을 둘러싼 토양으로 국한하여 모델링 하였다.
 Fig. 3에 계산에 사용하기 위해 3D CAD 도면에서 추출

하여 모델화된 도메인 및 메쉬를 나타내었다. 코팅제가 손상된 배관 결합부 (부식부)의 부식속도는 금속표면 전기화

학 반응에 의해 결정되는데, 이러한 현상을 모사하기 위한 경계조건으로 몇 가지 방정식을 적용할 수도 있으나, 본 연구에서는 보다 실제 환경에 가까운 조건을 입력하기 위해 토양모사용액(호기성 0.01% NaCl)에서 구상흑연주철의 음극분극 시험을 수행하였고, Fig. 4와 같이 그 데이터를 함수화하여 경계조건으로 적용하였다. 방식전위는 포화감홍전극 (Saturated Calomel Electrode: SCE)으로 나타내었다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 현장 측정 전위 데이터

상기 모델링 결과와의 비교를 위해 1구역 ~ 3구역에 해당하는 매설배관에 대하여 황산동구리전극 대비 전위 값(On potential)을 측정하였고, 운전 중인 정류기 상의 인가전압, 인가전류 값을 Table 4에 정리하였다. Table 4에서 나타난 바와 같이 측정된 전위값이 상기 모델링의 전해질 전위와 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 이유는 크게 3가지로 유추해볼 수 있는데, 첫째는 매설배관 표면을 덮고 있는 코팅제가 열화 되어 절연성이 크게 저하되었거나 코팅제에 무수한 결함이 발생한 경우이고, 둘째는 방식전류 대부분이

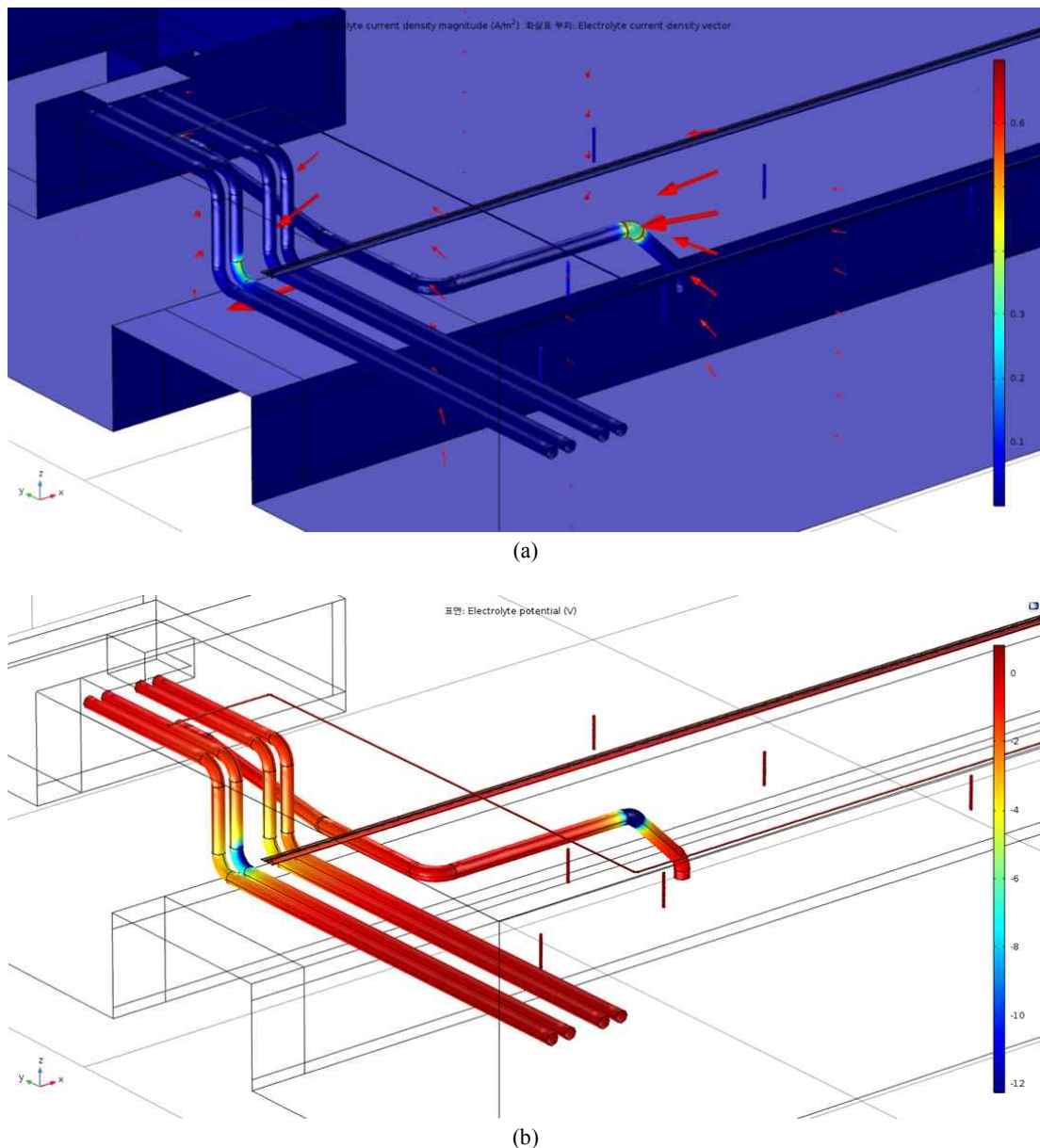


Fig. 7 Simulation result for area 3 using a primary current distribution; (a) current density and its vector, (b) electrolyte potential of defect #1, (c) electrolyte potential of defect #2.

주변의 특정 구조물이나 기기로 흘러 들어가는 경우, 셋째는 방식시스템과 양극들의 결선이 단절되어 있는 경우이다. 두 번째의 경우는 이러한 많은 전류가 지속적으로 흘러 들어가면 특정 구조물이나 기기가 급속히 부식되어 손상을 주게 되므로, 아직까지 이와 같은 현상이 보고된 바 없어 가능성이 적은 것으로 판단할 수 있다. 또한 결선 단절의 경우는 굴착 외에 정확히 확인하기는 어려우나 정류기상에 각각의 양극별로 차이는 크지만, 각 채널별 양극 전류값이 읽히는 것으로 보아 다량의 양극에 결선이 단절된 것으로 판단되지는 않는다. 따라서, 현재로서는 매설배관상 피복제(코팅제)가 열화 되었거나 박리 등에 의해 다량의 결함부가 존재하고 있는 것으로 판단되어 이에 대한 확인 평가를 수행하였다.

3.2 1차전류분포 시뮬레이션 해석결과

인가전압 중심의 모델링의 해석을 위해 1차전류분포를 이용하여 3가지 구역에 대해서 모델링을 진행했다. Fig. 5는 1 구역에 대한 음극방식 모델링 결과이다. 현장의 방식조건과 동일하게 인가전압 12 V 및 인가전류 1.2 A를 입력변수로 적용하였다. Fig. 3의 (a)는 결함부의 전류밀도 및 전류밀도벡터를, (b)는 결함부-1의 전위, (c)는 결함부-2의 전위를 보여주고 있다.

인가전압과 인가전류는 대상의 실제 원전에서 운전 중인 값을 적용하였으나, 이 정도 방식 전압과 전류에서는 결함부의 전해질 전위가 인가전압 (-12 V)이하로 형성되어 심한 과방식이 진행중임을 알 수 있다. 적절한 방식기준은 포

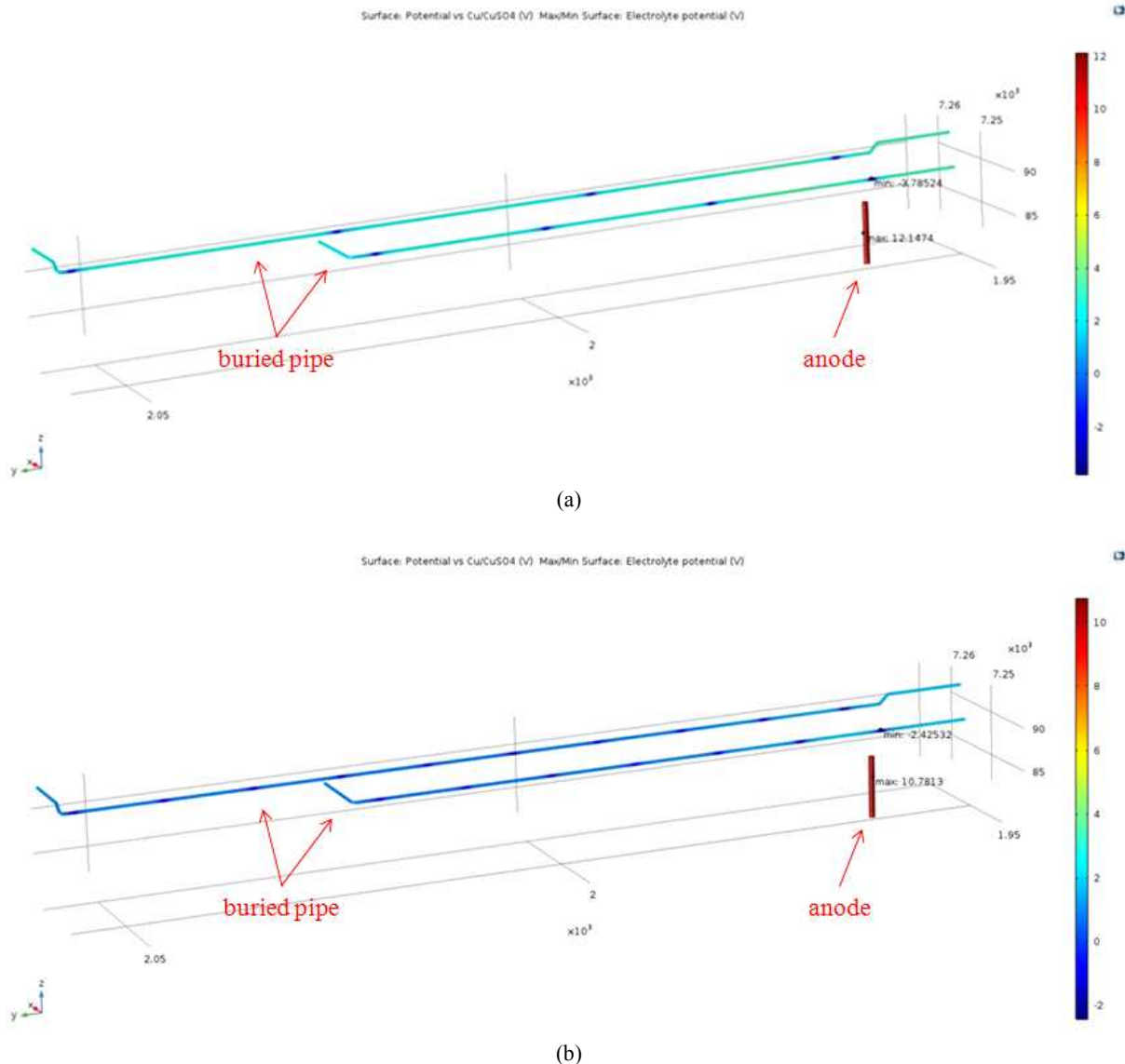


Fig. 8 Effect of the number of coating defect on the cathodic potential (applied current: 1.2A, total defect area: 0.9546ft²); (a) defect number; 8, (b) defect number; 16.

화감홍전극 기준으로 $-0.75\text{ V} \sim -1.2\text{ V}$ 내외이다.

Fig. 6은 2 구역에 대한 음극방식 모델링 결과로서 (a) 전류밀도 및 전류밀도 벡터, (b) 결함부-1의 전해질 전위, (c) 결함부-2의 전해질 전위를 도시하고 있다. 인가전압 및 인가전류는 현장과 동일한 $12\text{ V}/1.2\text{ A}$ 로서 1구역과 마찬가지로 전해질 전위가 방식기준을 현격히 초과하고 있어 과방식이 발생하는 것으로 해석되었다.

3구역에 대한 음극방식 모델링 결과는 Fig. 7과 같다. 1구역 및 2구역과 마찬가지로 매설배관 표면의 코팅층이 이상

적인 상태로 절연이 잘되고 있다면 결함부는 상당한 과방식 현상으로 수소취성 및 코팅 박리 등의 현상이 발생할 것으로 예측할 수 있다.

3.3 2차전류분포 시뮬레이션 해석결과

Fig. 8은 대상모델 매설배관의 코팅결함증가에 따른 전해질 전위 분포변화로서 (a)는 0.9546ft^2 면적의 결함수가 8개, (b)는 같은 면적 결함수를 16개 도입하여 계산을 수행한 결과이다. 배관상의 코팅결함수가 증가함에 따라 방식전

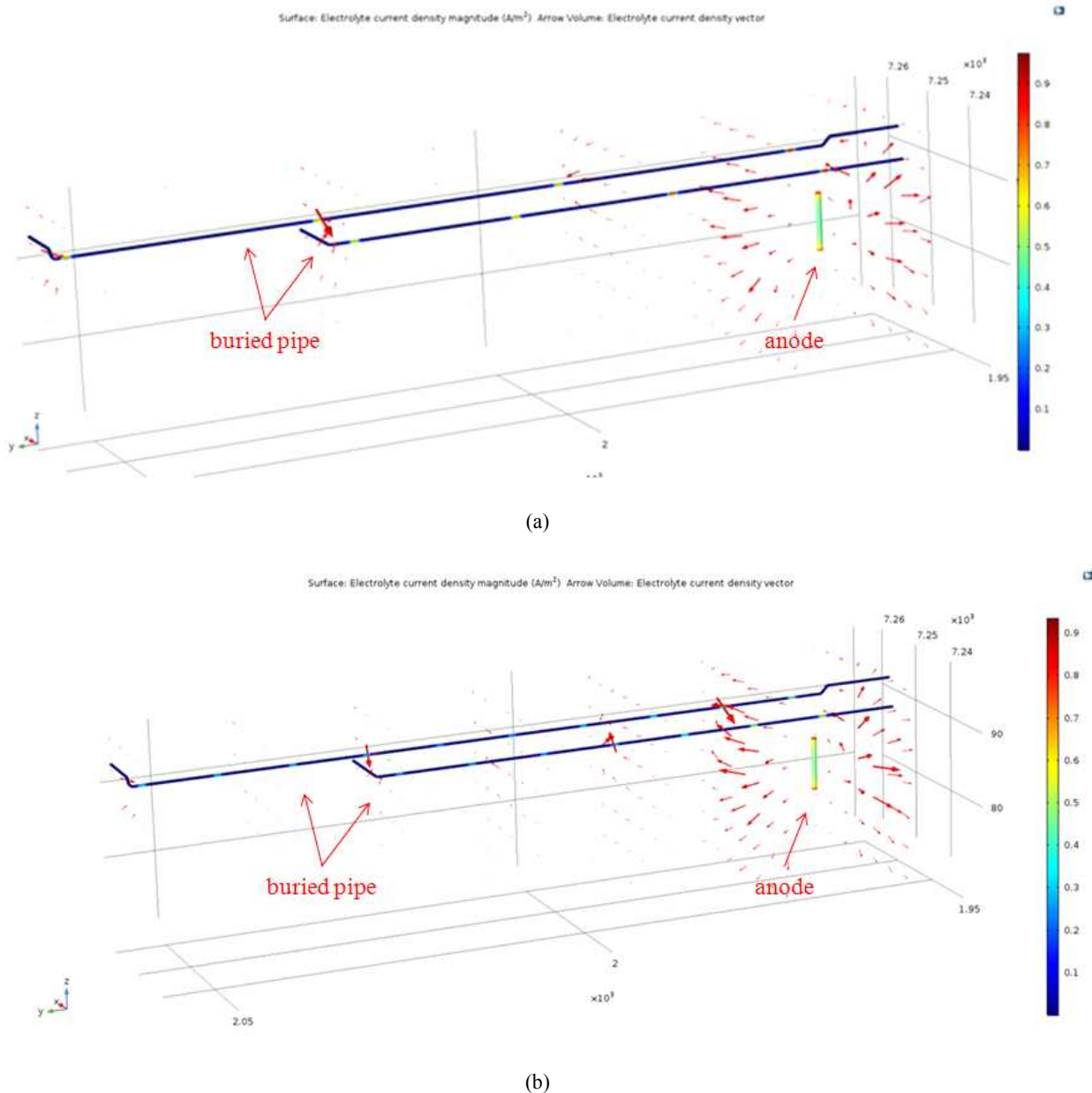
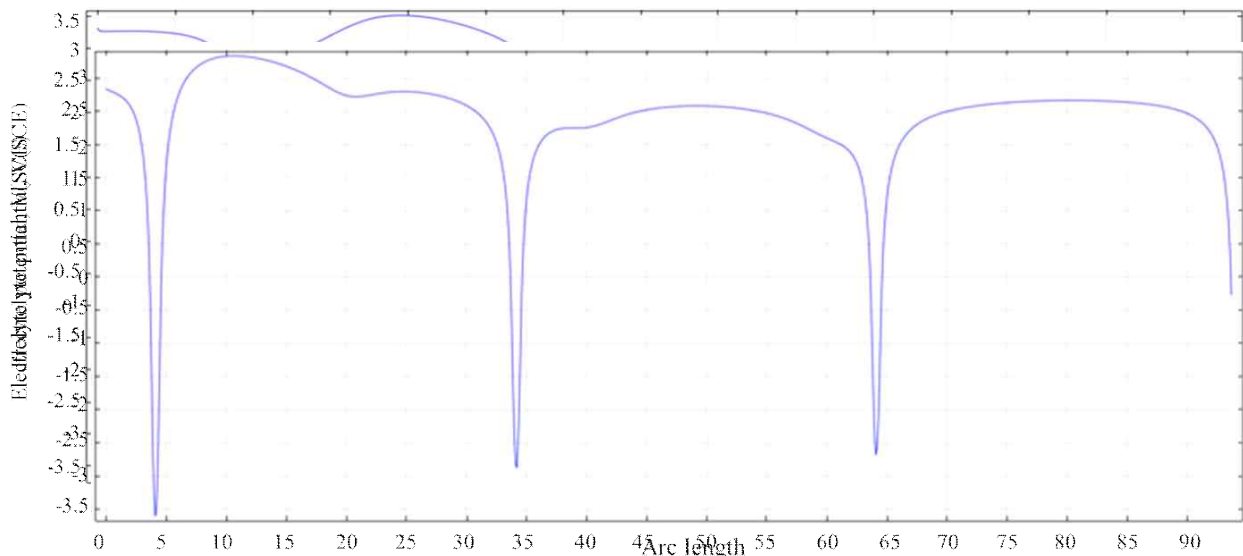


Fig. 9 Effect of the number of coating defect on the cathodic potential vector (applied current: 1.2A, total defect area: 0.9546ft^2); (a) defect number; 8, (b) defect number; 16.

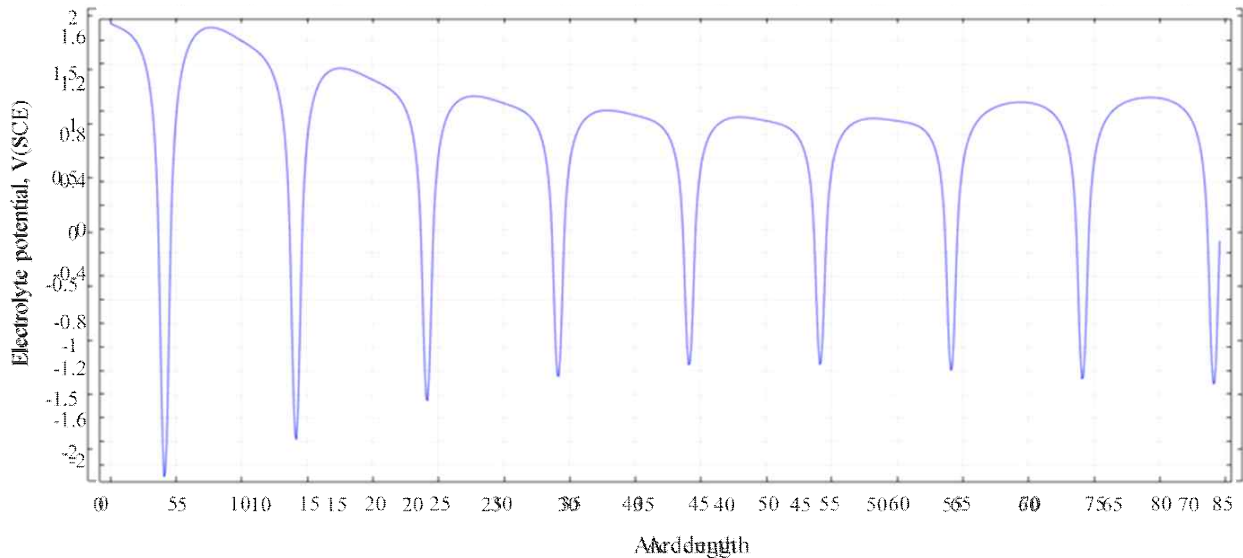
위는 토양 전반에 걸쳐 + 방향으로 상승하는데, 이것은 결함수가 증가할수록 소모되는 전류의 양이 많아지기 때문이다. 배관상의 코팅 결함수 증가에 따른 방식 전류벡터를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서와 같이 결함수가 증가할수록 결함을 보호하기 위해 결함방향으로 진행되는 전류벡터의 크기와 굽기가 증가하고 그 수도 증가함을 알 수 있다. 한편, 배관 표면에서 전위분포를 더욱 세밀하게 관찰하기 위해 1D Line Plot을 사용하여 배관1과 배관2의 표면전위를

를 도시하였다. Fig. 10은 배관 1의 코팅결함 증가에 따른 표면전위 분포로 결함수가 8개인 (a)의 경우 양극과 가까운 부분 전위는 -3.6 V(SCE)이며, 거리가 가장 먼 결함은 약 -2.6 V(SCE)의 방식전위를 보이고 있다.

배관 2의 코팅결함 증가에 따른 표면전위 분포를 Fig. 11에 나타내었으며, 결함수가 8개인 (a)의 경우 양극과 가까운 부분 전위는 -2.3 V(SCE)이고, 거리가 가장 먼 결함은 약 -1.2 V(SCE)의 방식전위를 보이고 있다. 이것은 앞서



(a) Arc length
(a)



(b)

Fig. 10 1D line plot of potential distribution by increasing defects of pipe #2 (applied current: 1.2A, total defect area: 0.9546ft²); (a) defect number; 8, (b) defect number; 16.

예측한 바와 같이 매설배관의 코팅결함이 증가함에 따라 소모되는 전류의 양이 많아져 방식전위가 +방향으로 상승하는 현상이다. 따라서 상기 Table 4의 실제 원전 매설배관 구역의 전위측정과 비교하여 보면, 현재 매설된 배관 표면의 코팅에 사용연수 증가에 따라 다량의 결함이 존재하거나 코팅/배관 계면부가 박리 내지 탈리 되어 있어 토양 혹은 토양 내 수분과 접촉함으로써 다량의 방식전류가 소모되고 있을 것으로 추정할 수 있다. 또한, 코팅제에 문제가 없다면 적절량을 10배 이상 초과하는 높은 방식전위로부터 발생되는 과잉 방식전류는 주변의 다른 기기 혹은 구조물로 유입되어 부식을 야기하고 고장을 초래할 수 있기 때문에 매설배관 주변에 배치된 주요 기기 및 구조물에 대한 주의 깊은 관찰이 필요하다.

4. 결론

국내 가동원전 1개 호기에 설치한 시험용 정류기/모니터링/제어 시스템 및 전극류의 3D CAD 도면을 이용하여 매설배관의 3D FEM 전기화학 해석을 수행한 결과와 배관의 방식전위 실측을 통해 얻은 데이터를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 현재 대상 호기에 적용되어 운전중인 음극방식 시스템에서는 적정 방식 조건보다 매우 높은 조건으로 방식을 행하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 상태를 매설배관 코팅제의 경년열화에 기인된 것으로 가정하고 FEM법으로 3D 시뮬레이션을 행한 결과, 손상된 코팅층이 다수 존재하는 것으로 예측되었다.

2) 매설배관상의 코팅제가 건전하다면 잉여 방식전류는 주변의 기기 및 구조물에 부정적 영향을 줄 수 있으므로 지속적인 주의와 관찰이 필요하며, 매설배관에 대한 모델링, 간접검사 및 위험도 평가를 통해 고위험 배관에 대해서는 직접검사를 수행하고 보수/교체를 시행해야 할 것으로 판단된다.

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. 20131520000100).

References

1. EPRI 1016456, Recommendations for an Effective 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. NUREG-1801, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Revision 2, USNRC, Dec. (2010).
6. License Renewal Interim Staff Guidance, Changes to Buried and Underground Piping and Tank Recommendations, LR-ISG-2015-01, USNRC (2015).
7. B. Allik, U.S. NRC Update on Buried and Underground Piping and Tanks, BPIG-CPUG Meeting, EPRI, July (2016).
8. W. C. Holston, Changes to Buried and Underground Piping and Tank Recommendations, BPIG Meeting, EPRI, July (2015).
9. Act No. 13616, Nuclear Safety Act, Article 20 and 21, Periodic Safety review (2017).
10. ML16041A090, Selective Leaching of Ductile Iron for GALL-SLR(Generic Aging Lessons Learned-Subsequent License Renewal), USNRC (2015).
11. K. T. Kim, H. W. Kim, Y. S. Kim, H. Y. Chang, B. T. Lim, H. B. Park, *Corros. Sci. Tech.*, **14**, 12 (2015).
12. H. Y. Chang, H. B. Park, K. T. Kim, Y. S. Kim, Y. Y. Jang, *KPIV*, **11**, 61 (2015).
13. COMSOL™, Guidebook of COMSOL™ Multiphysics (Chemistry-Electrochemistry), ALTSOFT (2014).
14. M. Tabatabaian, COMSOL™ for Engineers, Mercury Learning and Information (2014).