

COMSOL을 이용한 매설배관 음극방식 3D 모델링에 관한연구

장 현 영

2015. 11. 27



KEPCO ENGINEERING & CONSTRUCTION COMPANY, INC.

목 차

1

서 론

2

자체 연구개발 현황

3

매설배관 외부 음극방식 모델링

4

향 후 연구개발 방향

5

매설배관 내부 국부부식 모델링

6

결 론

서론

매설배관 손상유형

- 매설배관에서 나타날 수 있는 손상의 유형은 누설, 파단, 막힘 기계적 충격에 의한 구조적 손상
 - 누설 : 부식(일반부식, 공식, 미생물부식 등), 피로
 - 파단 : 부식(일반부식, 공식, 미생물부식 등), 피로
 - 막힘 : 부식에 의한 스케일, 수중서식물의 증식 등
 - 콘크리트 파열 : 내부 강재의 부식(콘크리트 균열 및 탈리)

누설



막힘



파단





© Xinhua News Agency/REX



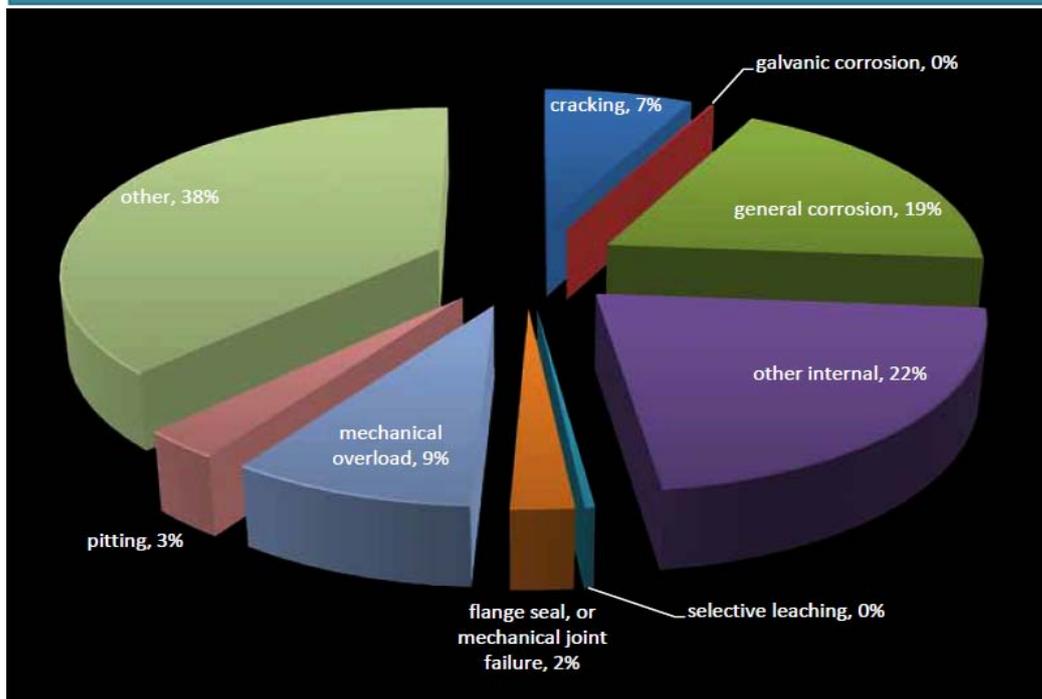
- In 2009 there were several well publicized leaks of radioactive material from buried and underground pipe: The US Congress got involved
 - Feb 2009 – Indian Point
 - April 2009 – Oyster Creek
- Industry looked at other significant leaks of radioactive material:
 - Hatch 1986
 - Palo Verde 1993
 - Seabrook 1999
 - Salem 2002
 - Dresden 2004
 - Brunswick 2007
 - Quad Cities 2008
 - Vermont Yankee 2010

NSIAC: Nuclear Strategic Issues Advisory Committee



NEI 09-14 (Regulatory & Legislative interface)

◎ UPTI Task Force Failure Cause Codes (2013 FEB 기준)

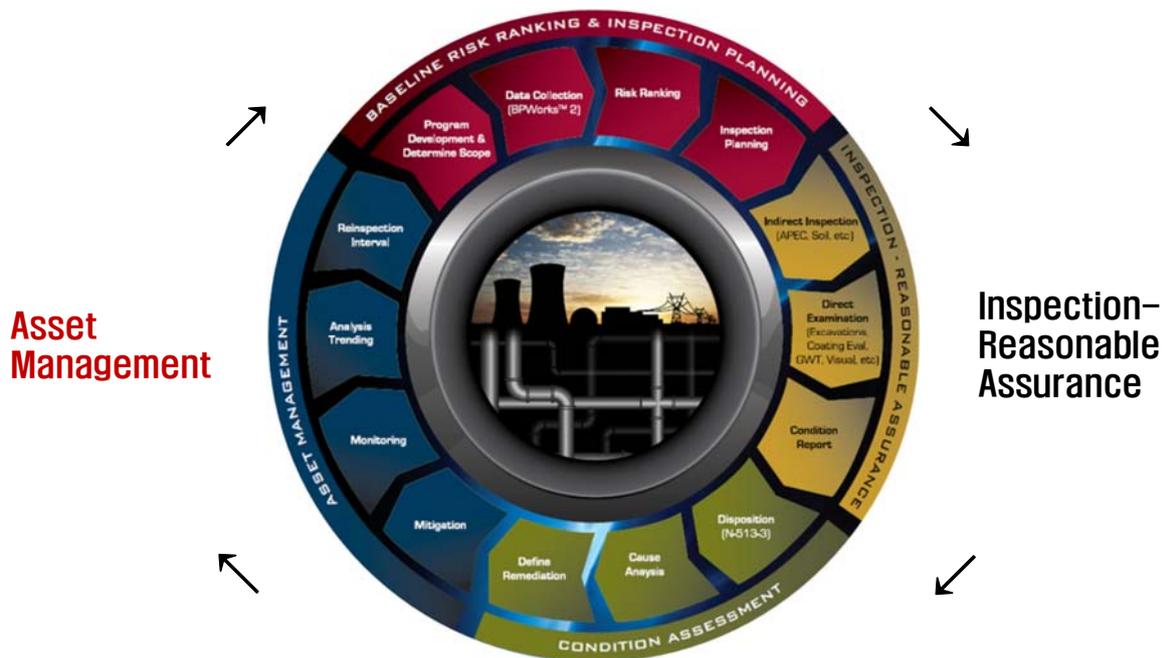


UPTI : Underground Piping and Tanks Initiative
(2013년 7월 EPRI BPIG Meeting, NEI 발표자료 인용)

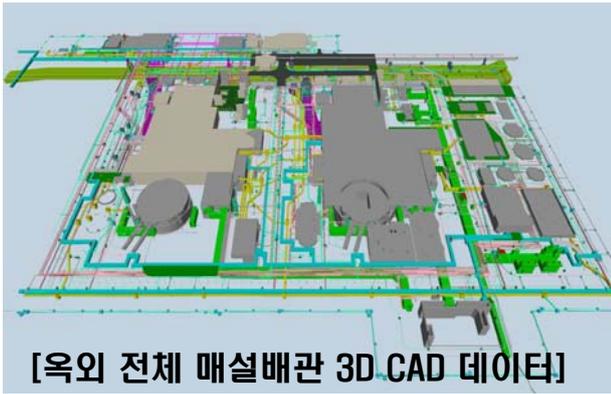
자체 연구개발 현황

원전 매설배관 관리 연구 방향

Baseline Risk Ranking & Inspection Planning



Condition Assessment



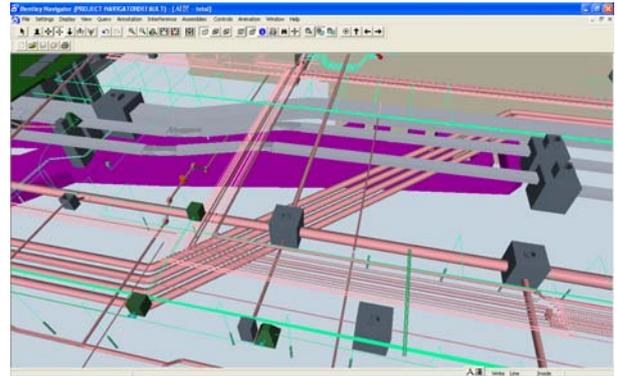
[옥외 전체 매설배관 3D CAD 데이터]



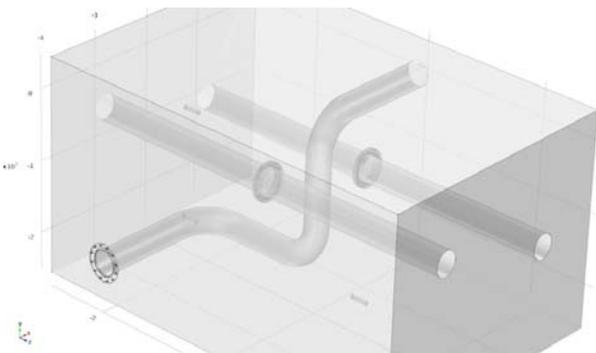
[매설배관 3D 도면 속성정보 추출]



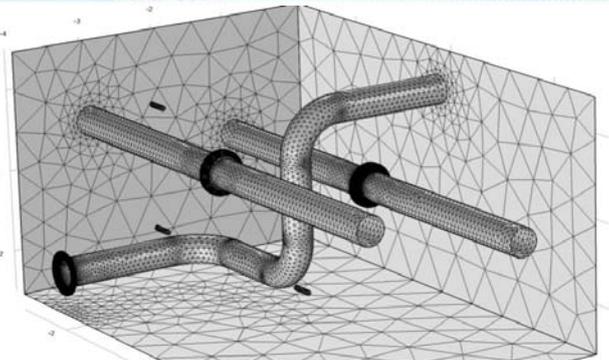
[각 계통 2D 데이터]



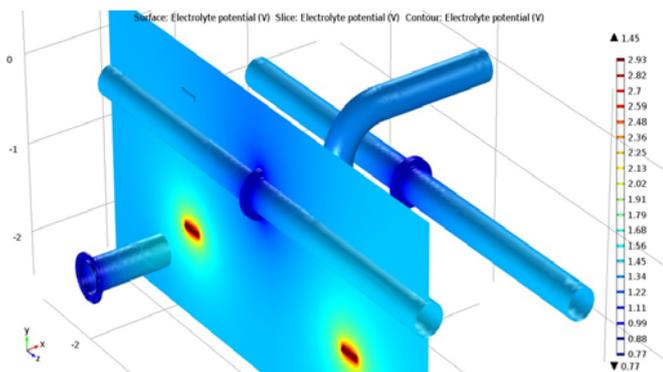
[각 계통 3D 도면화]



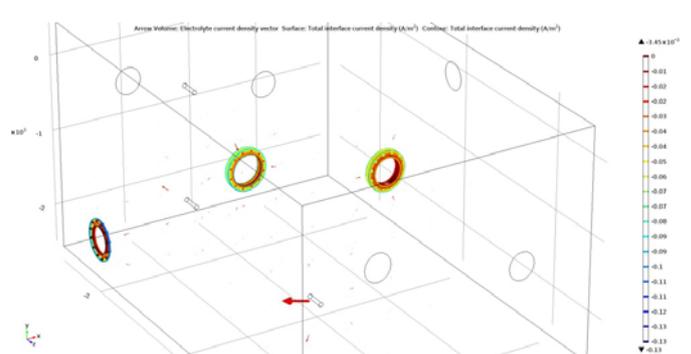
[토양 매설배관 모델 구성]



[모델에 적용된 Mesh]



[배관 및 전극들 표면에 대한 전해질 전위결과]

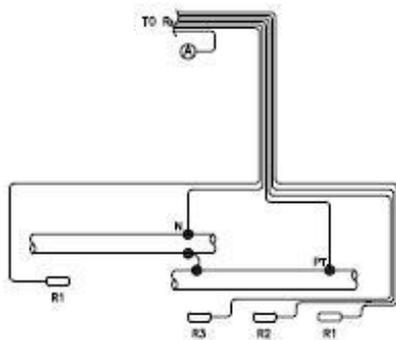


[전해질 표면방식전류밀도 결과]

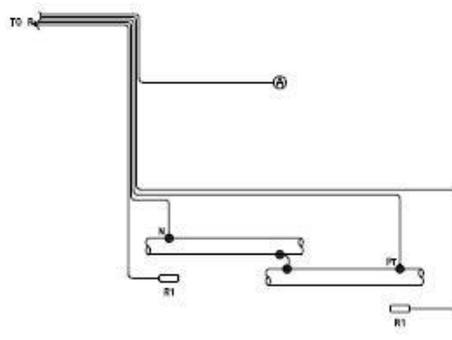
매설된 배관 및 Reference

	ASME SA106 Gr.B	KS D4311 Ductile Cast Iron	매설 PCCP 배관
Re - 1	Zn	Zn	Zn
Re - 2	Zn	Zn	(Pt)
Re - 3	Ag/AgCl	[Cu/CuSO ₄]	
Re - 4	Pt/Ti	[Pt]	

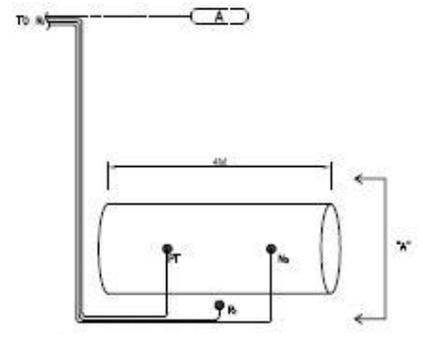
각 장치별 System 개략도



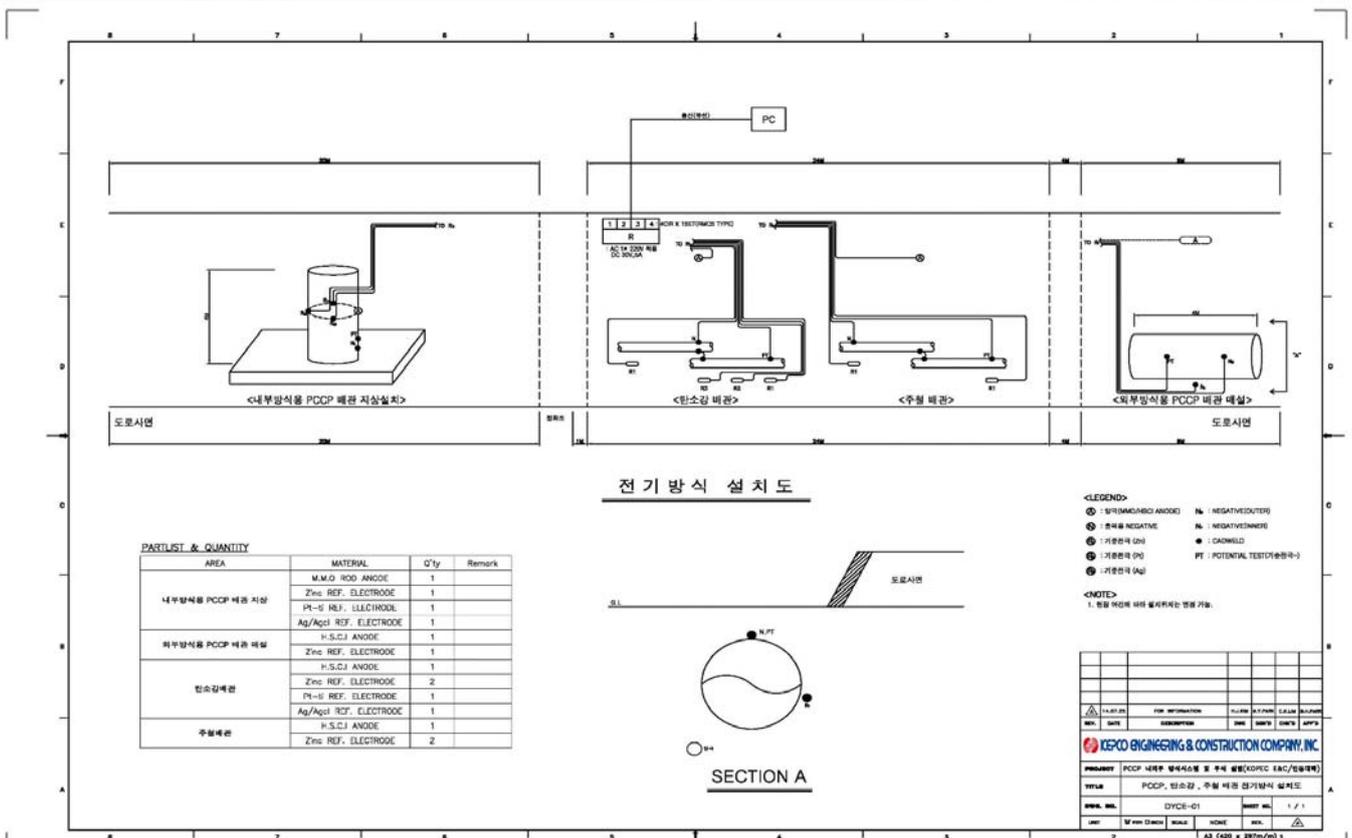
ASME SA106 Gr.B

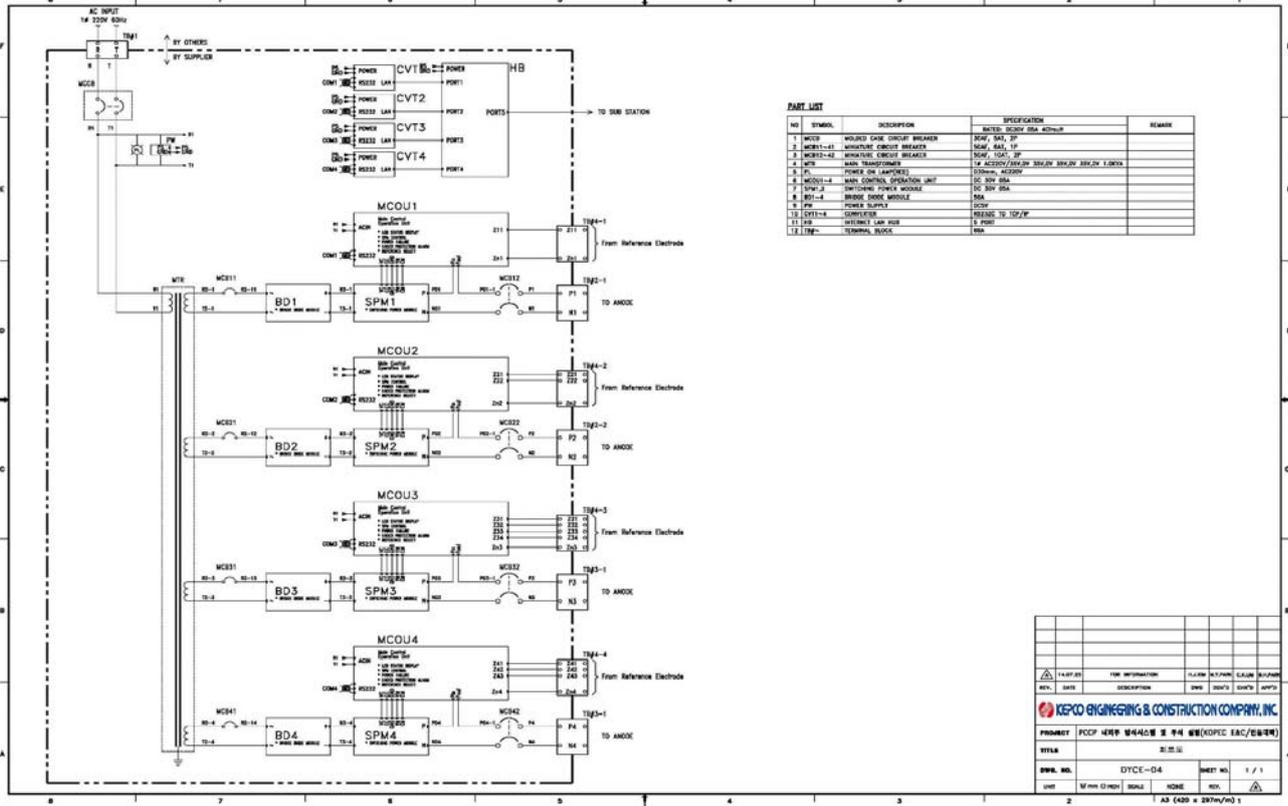


KS D4311 Ductile Cast Iron



매설 PCCP 배관





탄소강 피복관 및 시험용 방식시스템 매설



Primer 초벌



Polyken #930-35 랩핑



Polyken #954-15 랩핑

4" Seamless, ASTM A 106 Gr. B / ASME SA-106 Gr. B



KS D4311 덕타일 주철 아스팔트 피복관, 300mm



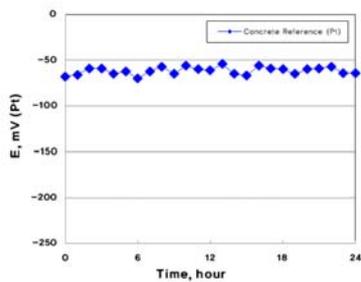
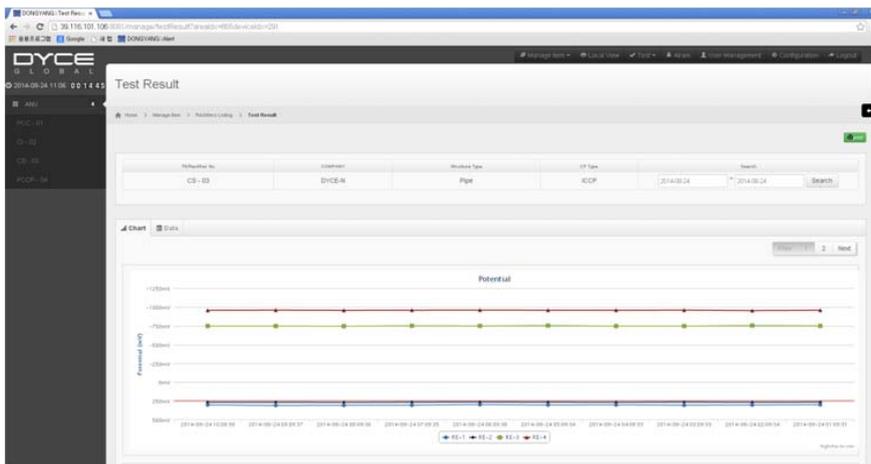
PCCP관 설치 기단 제작



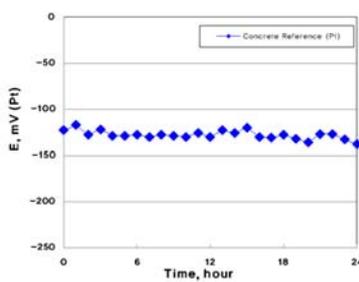
PCCP관 천공, 커플링 용접 및 PCCP관 설치



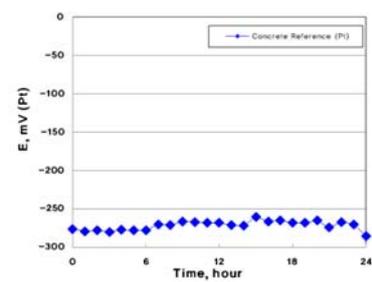
방식 모니터링 시스템



인가 전압 : 0.1 V



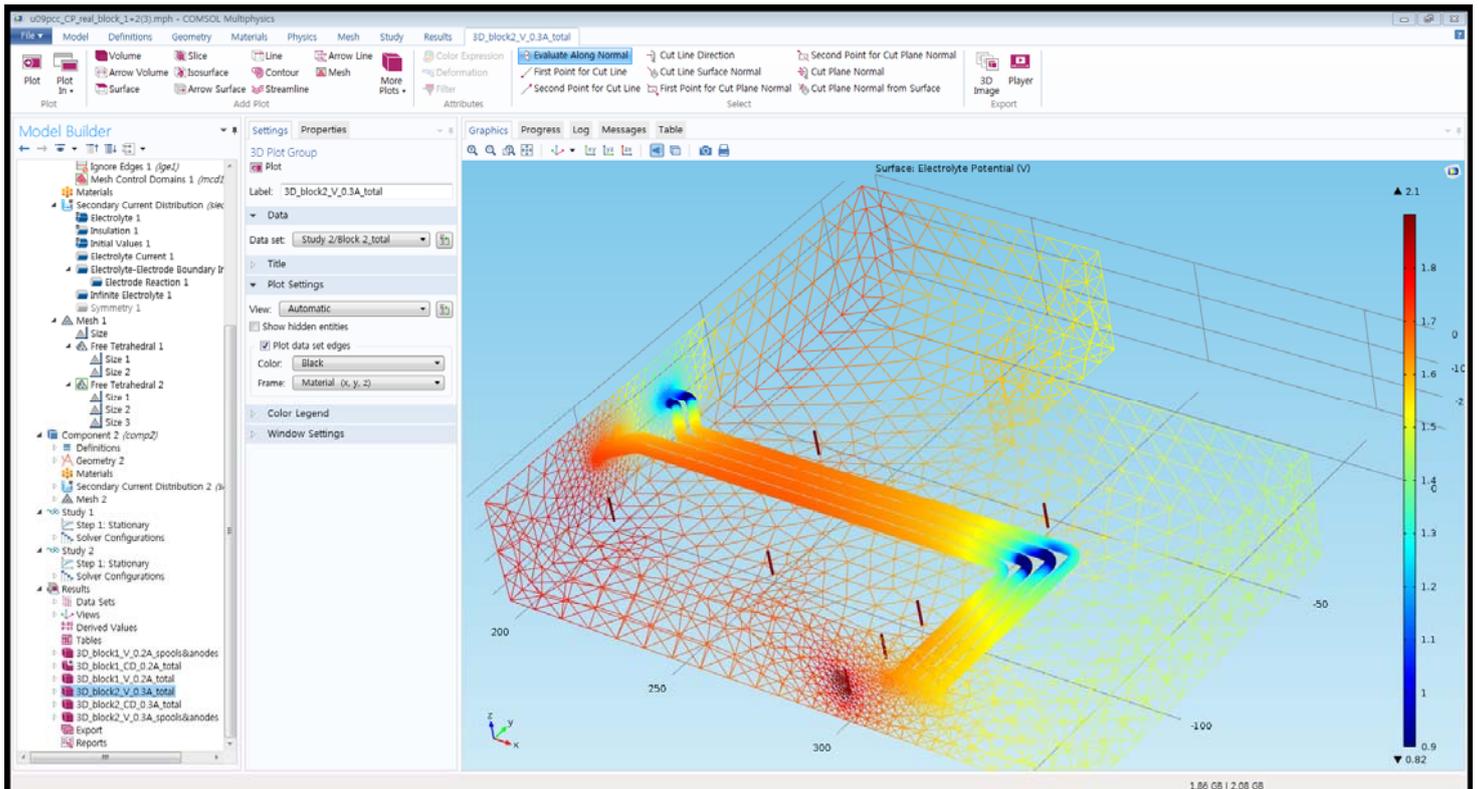
인가 전압 : 2 V

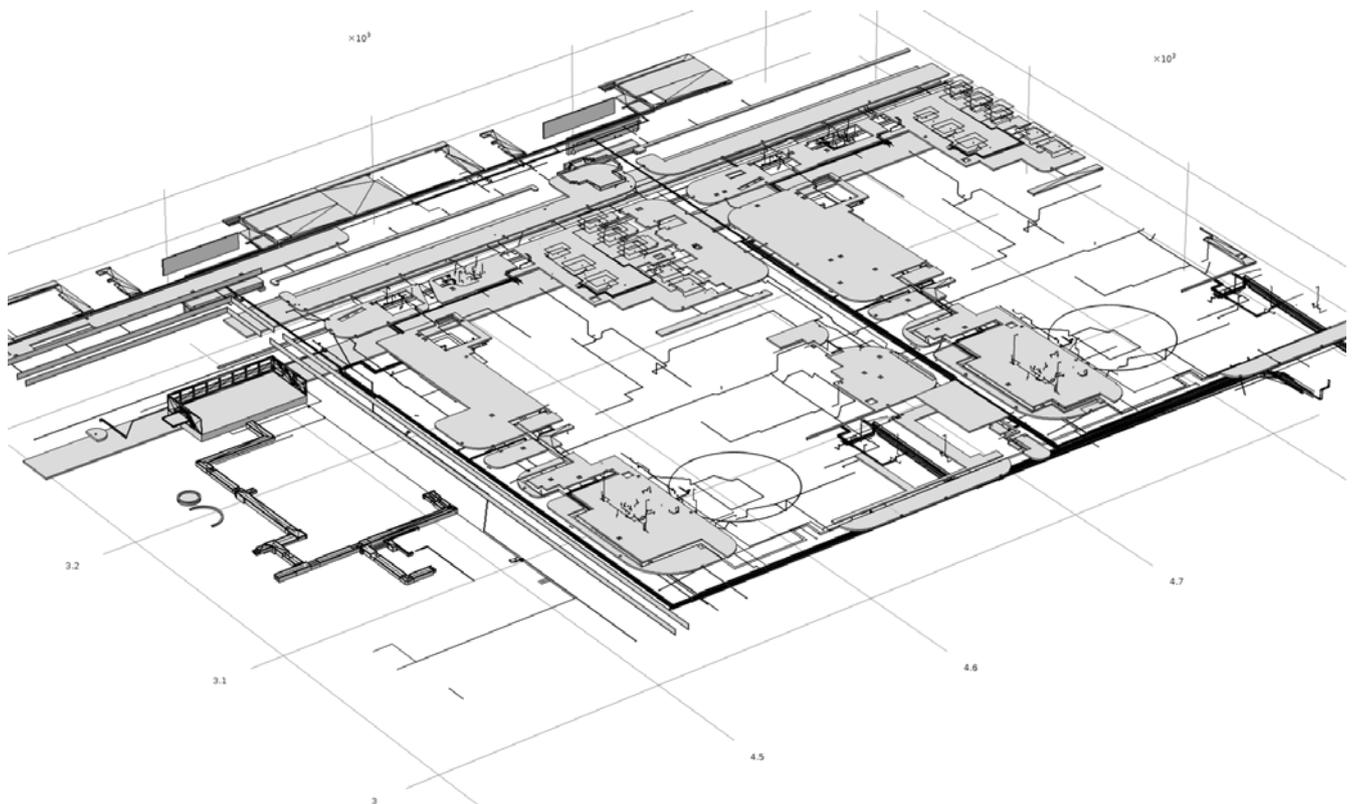
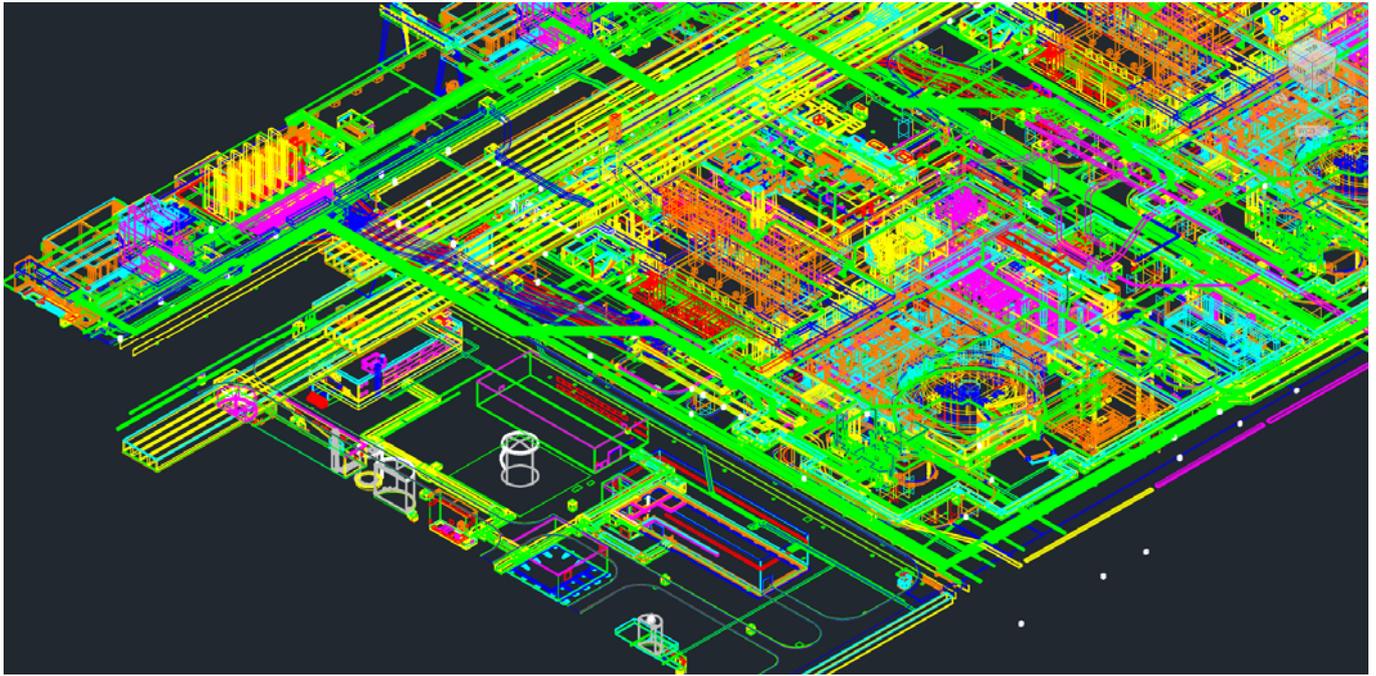


인가 전압 : 5 V

매설배관 외부 음극방식 모델링

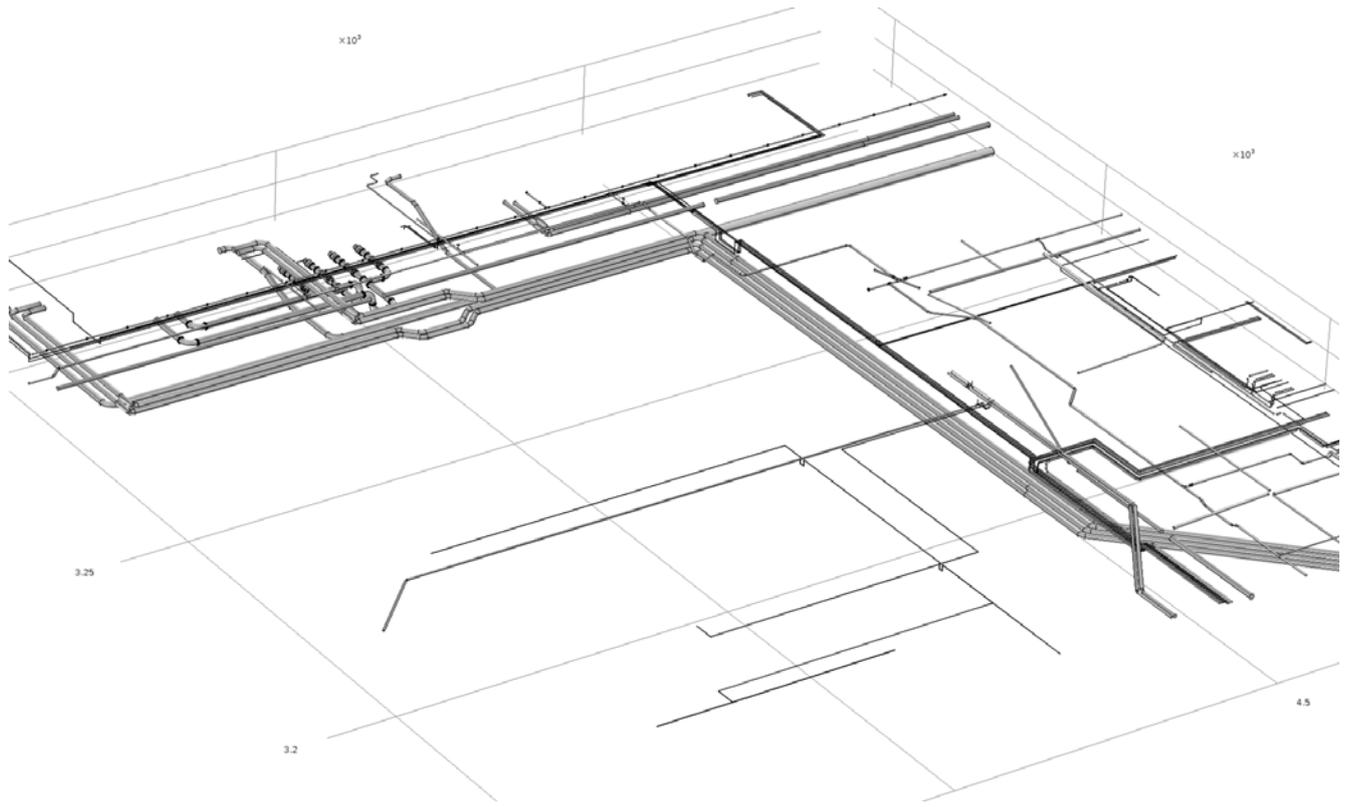
매설배관 외부 음극방식 3D 모델링 기술개발



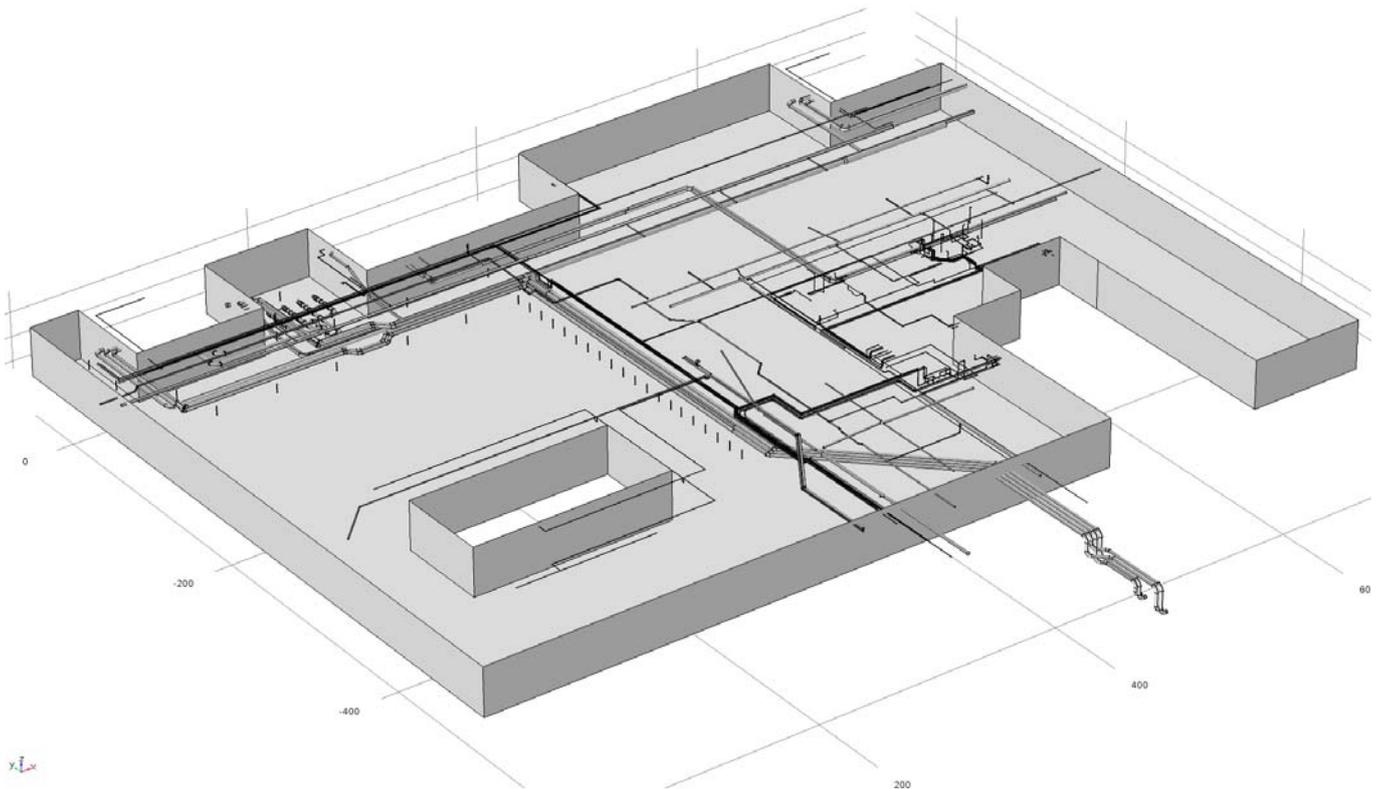


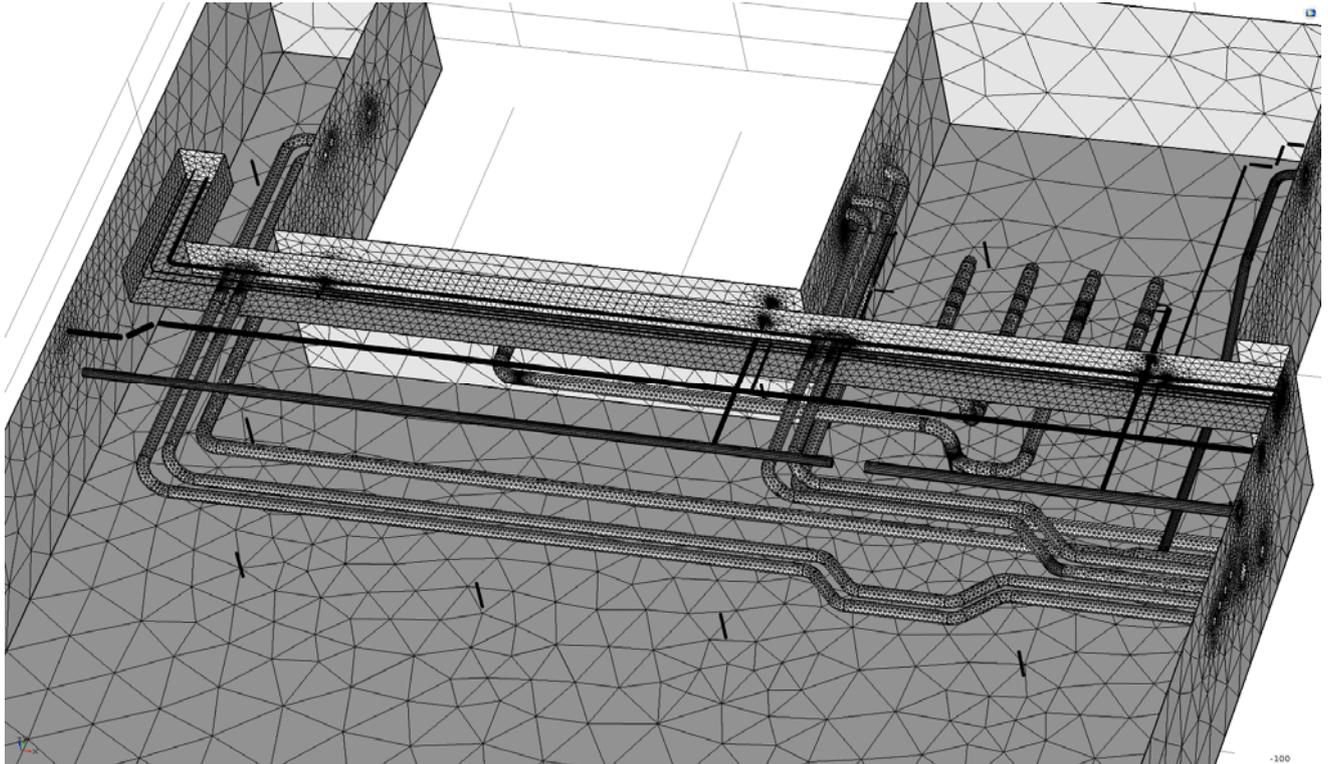


매설배관 추출

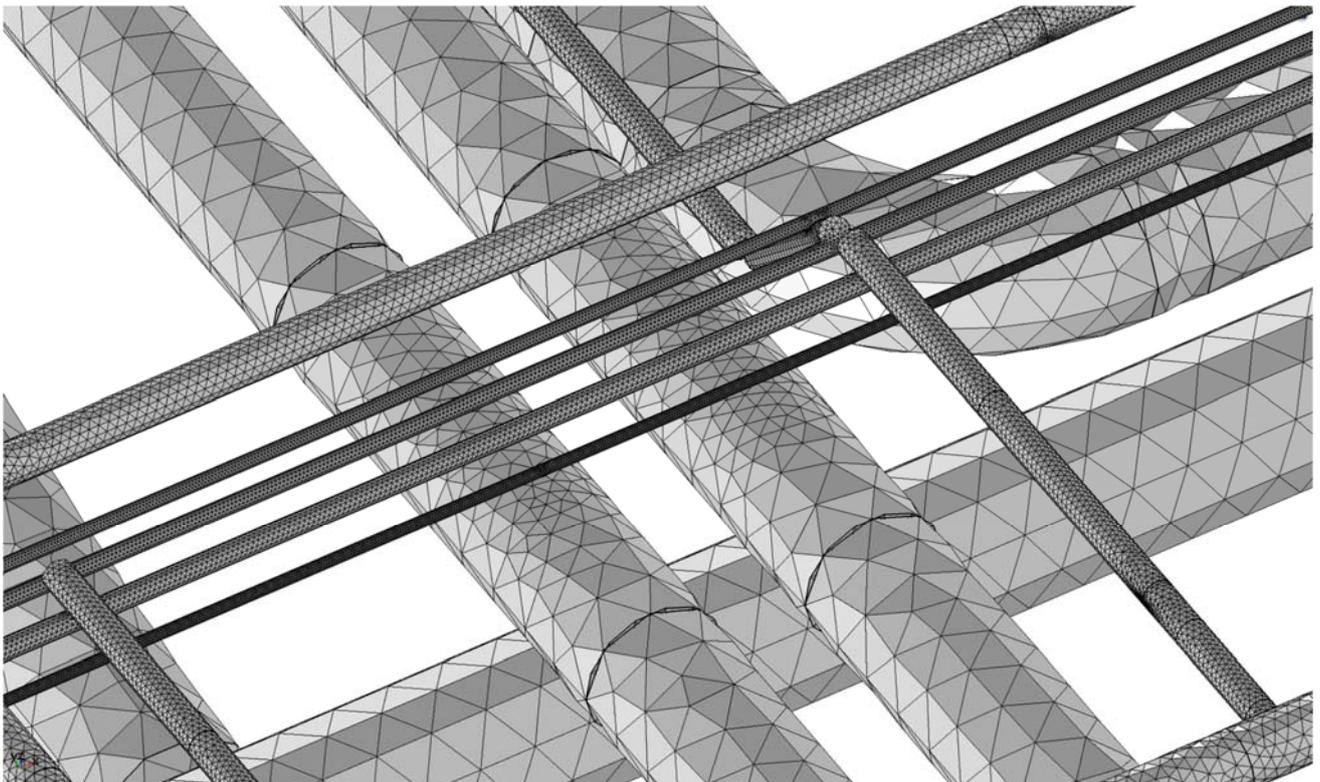


토양도메인 적용 및 양극 배치

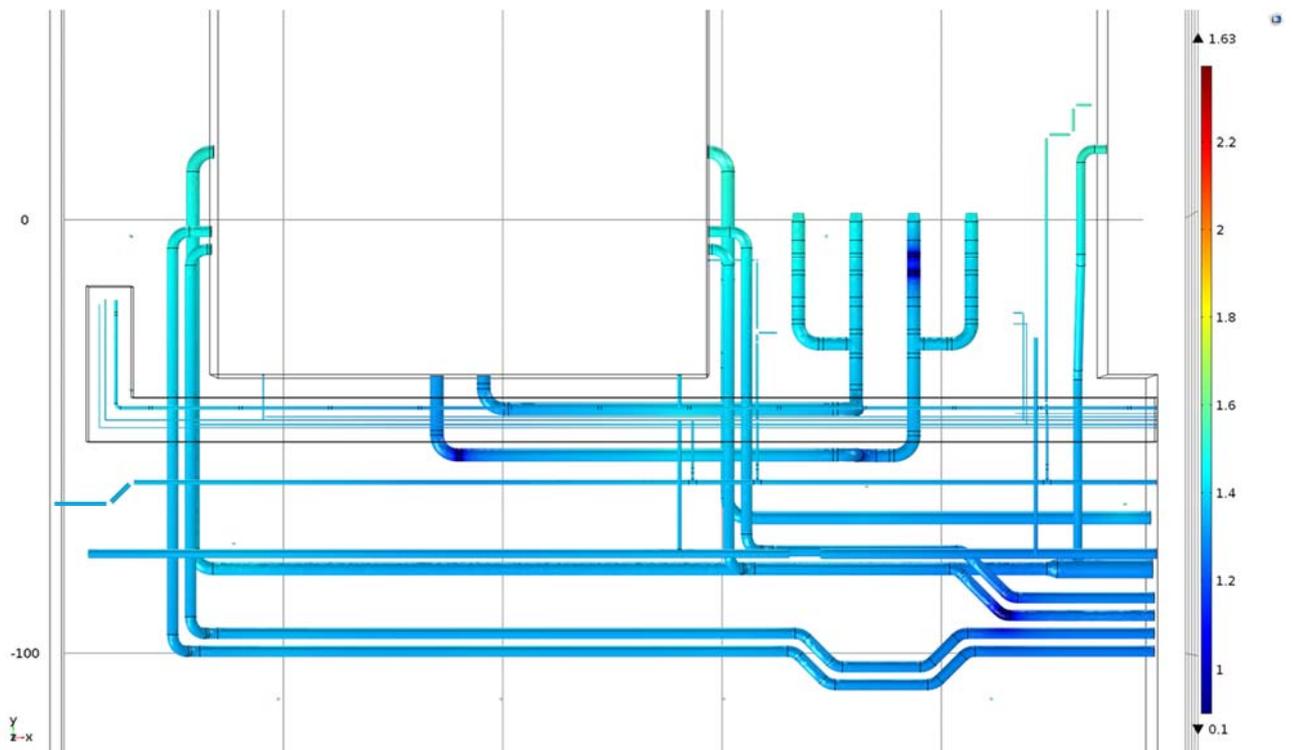


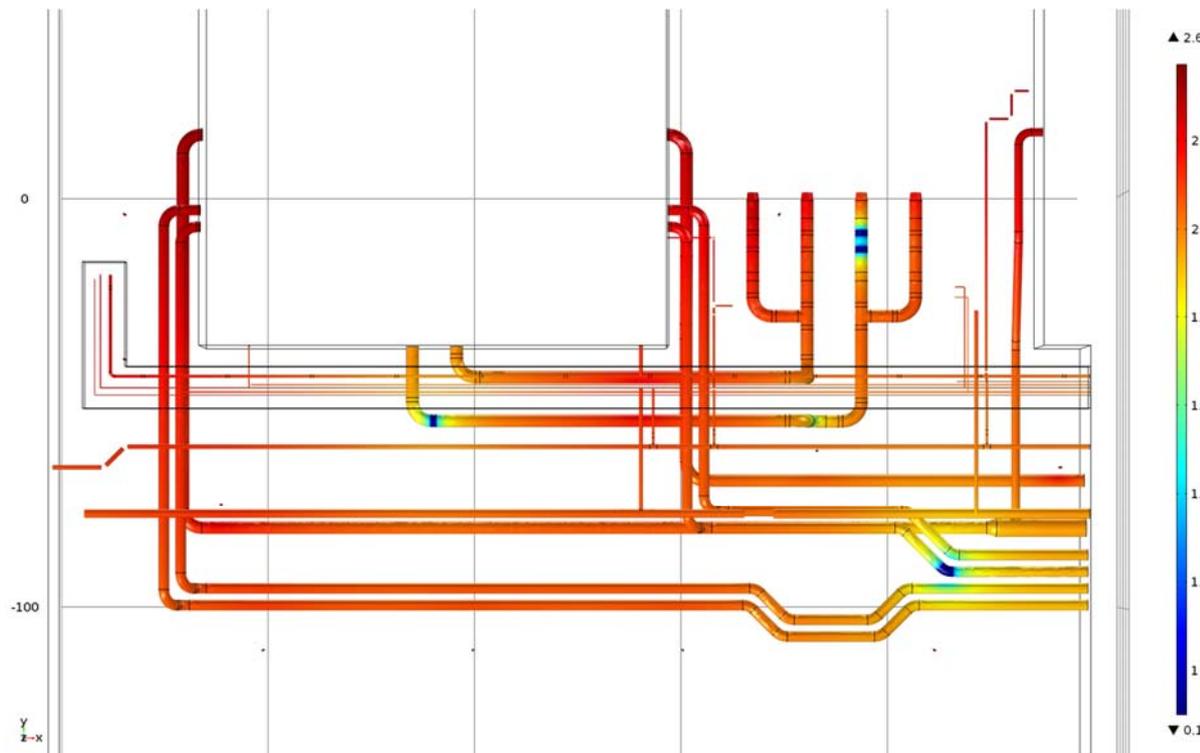
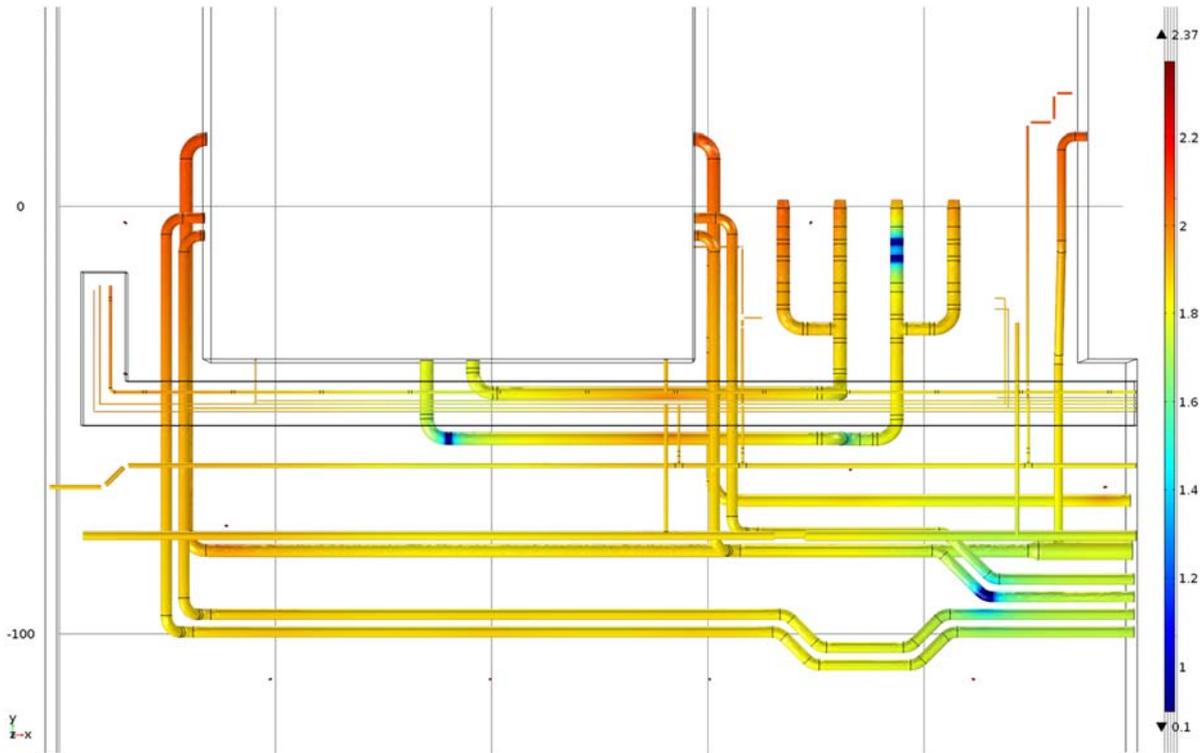


-100

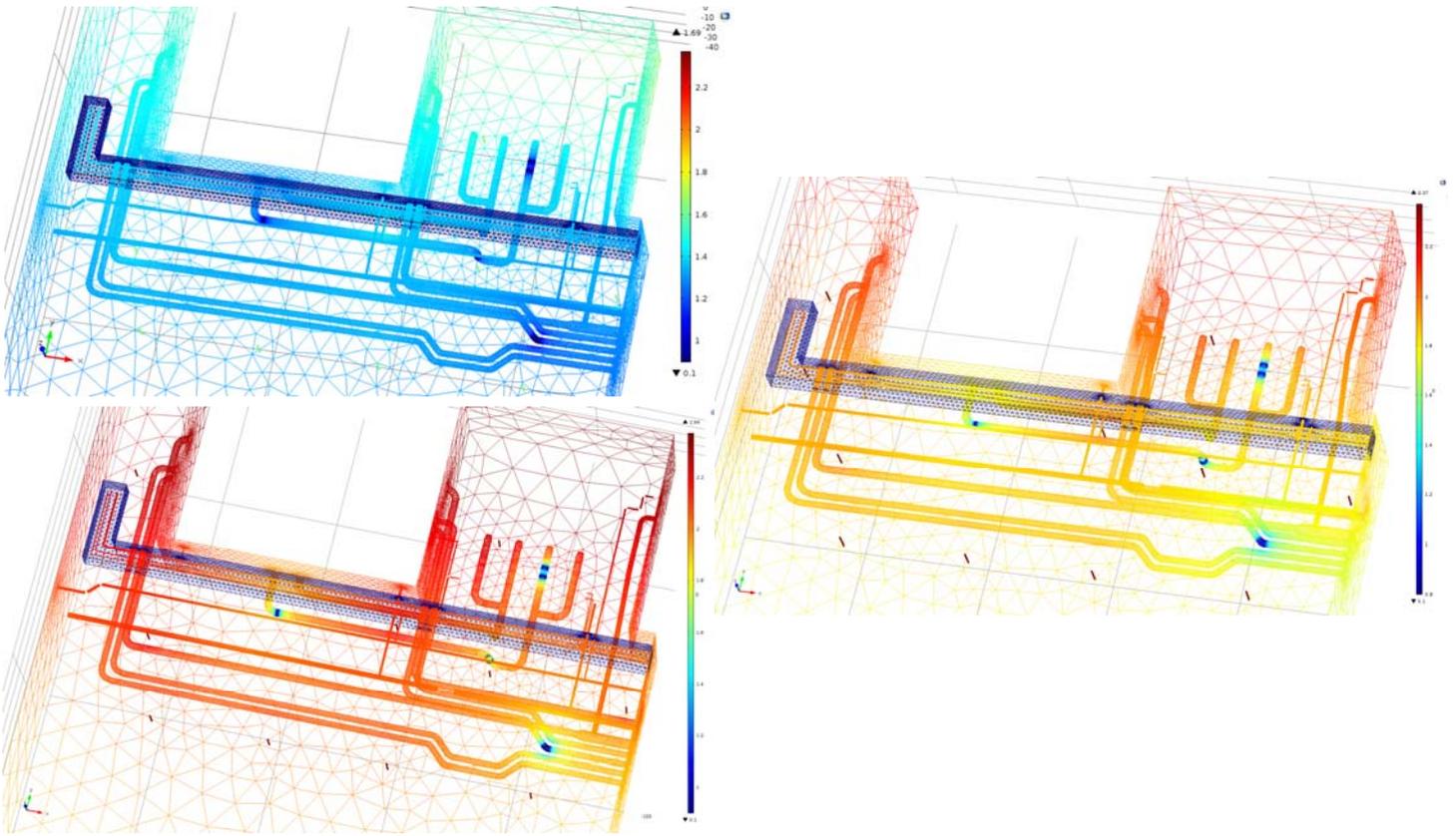


- 토양의 전기전도도 : $\sigma = 0.02[\text{S/m}]$
- 토양 내 전기화학특성
 - 탄소강 배관 평형전위 : $-0.71[\text{V}]$
 - 탄소강 교환전류밀도 : $9.31\text{e-}4[\text{A/m}^2]$
 - 양극 전달 상수 : $\alpha_a = 0.5$
 - 음극 전달 상수 : $\alpha_b = 0.5$
- 양극 총전류 : $I_{\text{tot}} = 0.3\sim 0.65[\text{A}]$
- 음극방식 금속 분극전위 : 기준전위 대비 $-850[\text{mV, SCE}]$
- 기하조건
 - 3D CAD 도면 입력
 - 전체 모델링 영역을 여러 구간으로 분할하여 각각 독립적으로 모델링 후 모델 연동법을 적용 후, 전체 영역 결과 도출
- 적용 전기화학 기구 및 물리현상
 - Secondary Current Distribution : 전해질 내 조성변화가 무시할 수 있을 만큼 적은 경우에 전류/전위 분포 묘사. 전극 흡착 및 반응 이온종의 계면현상은 묘사가능

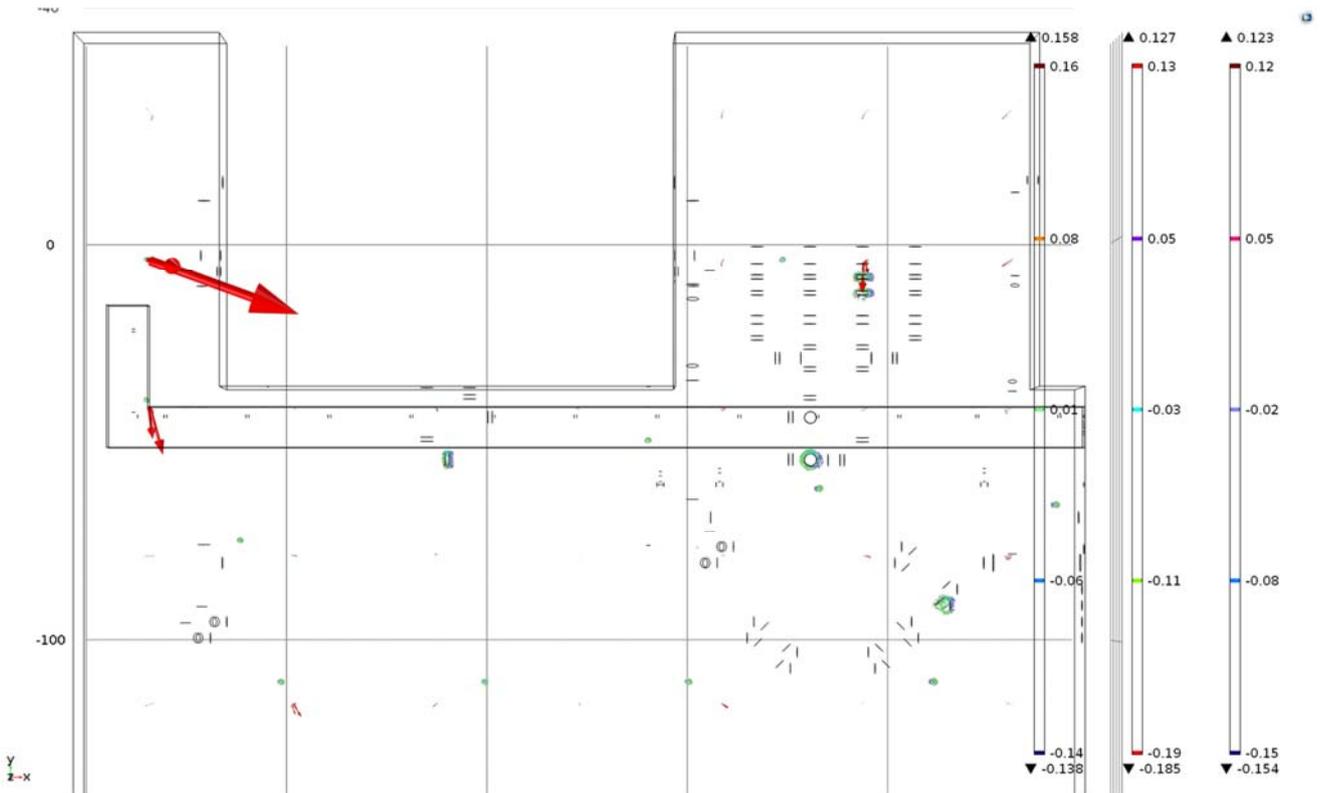


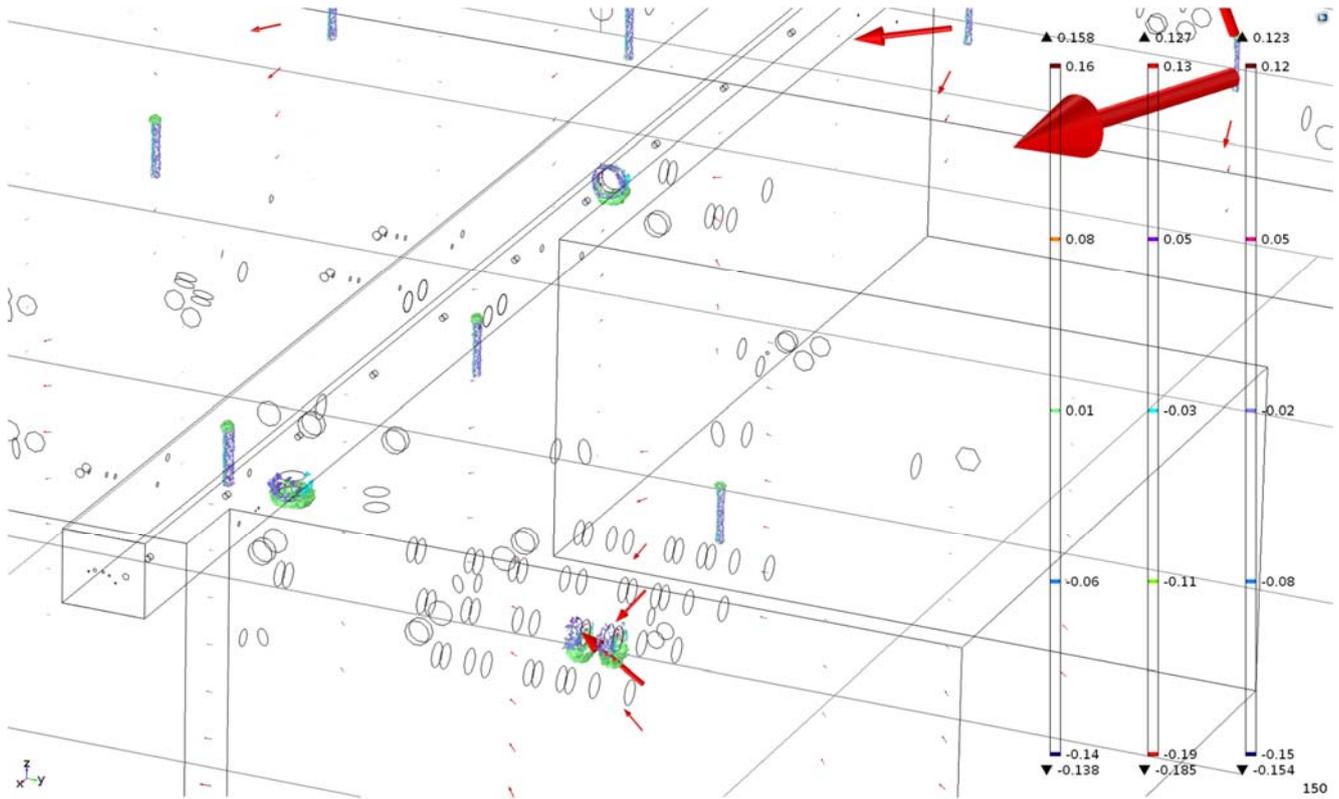


모델링 결과 분석 (방식 전위 분포 비교)

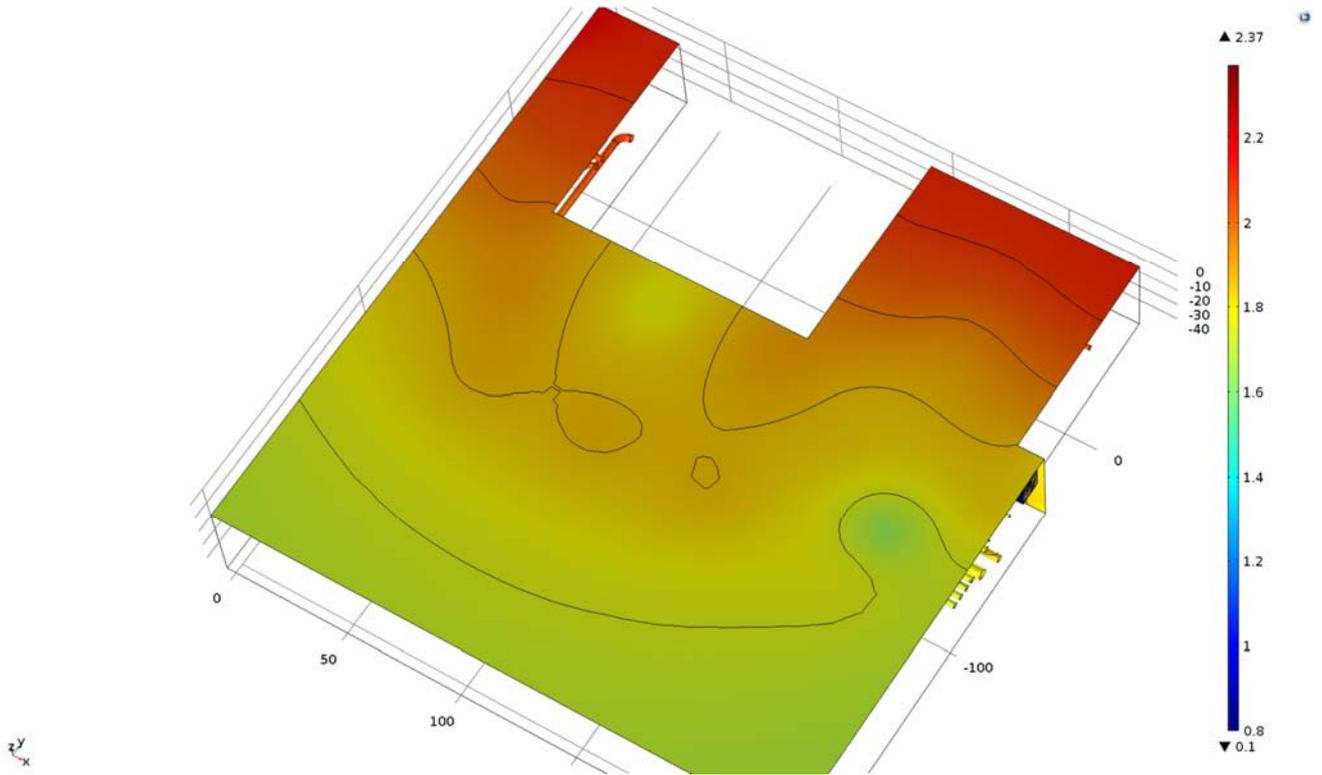


부피 전류벡터 및 등표면 전류성분(i_x, i_y, i_z) 분포 (xy면, 0.65A)

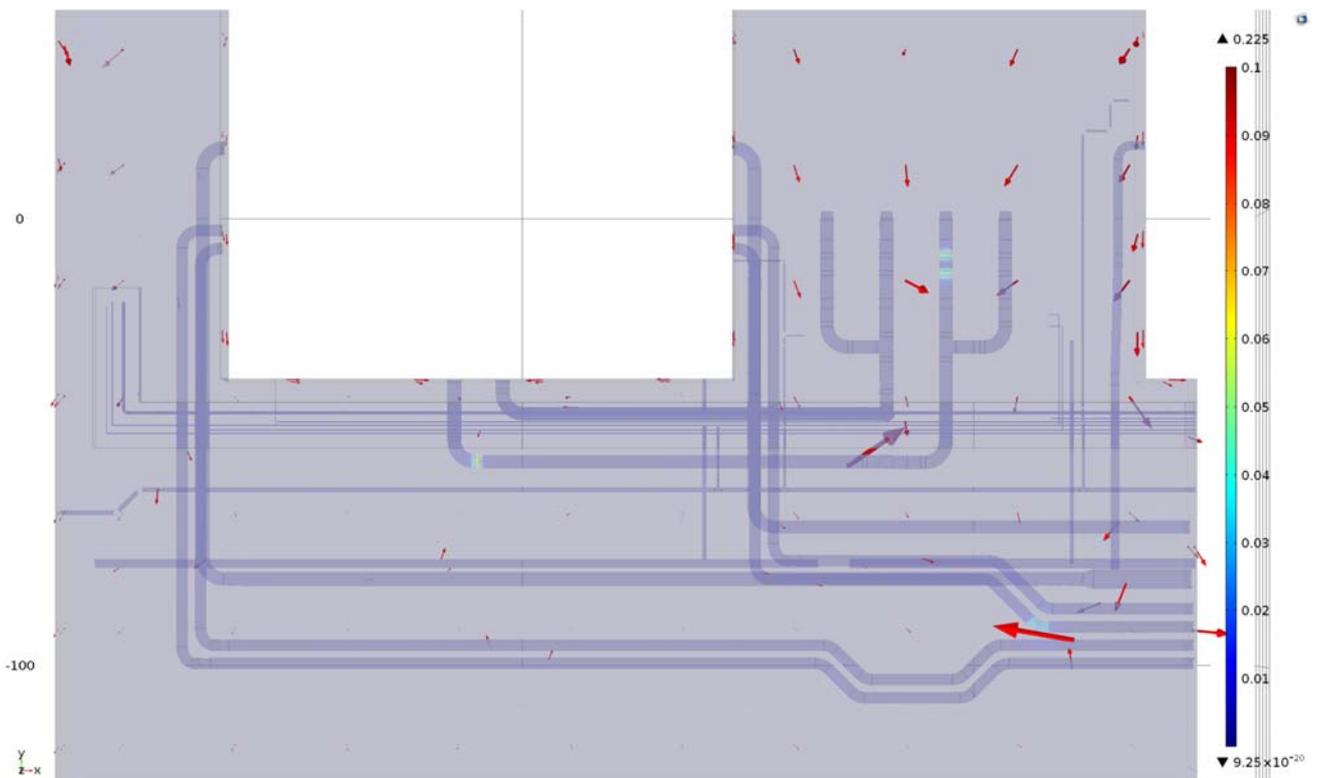


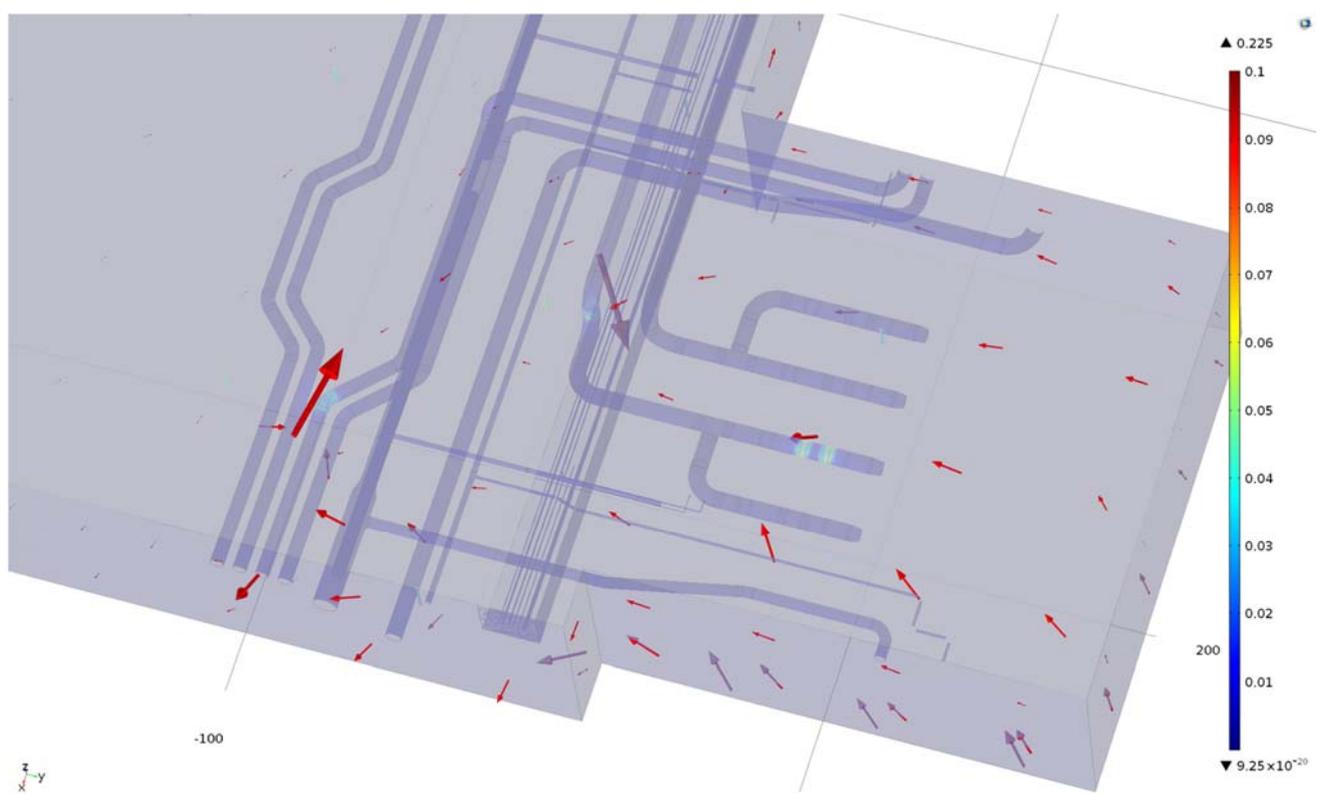
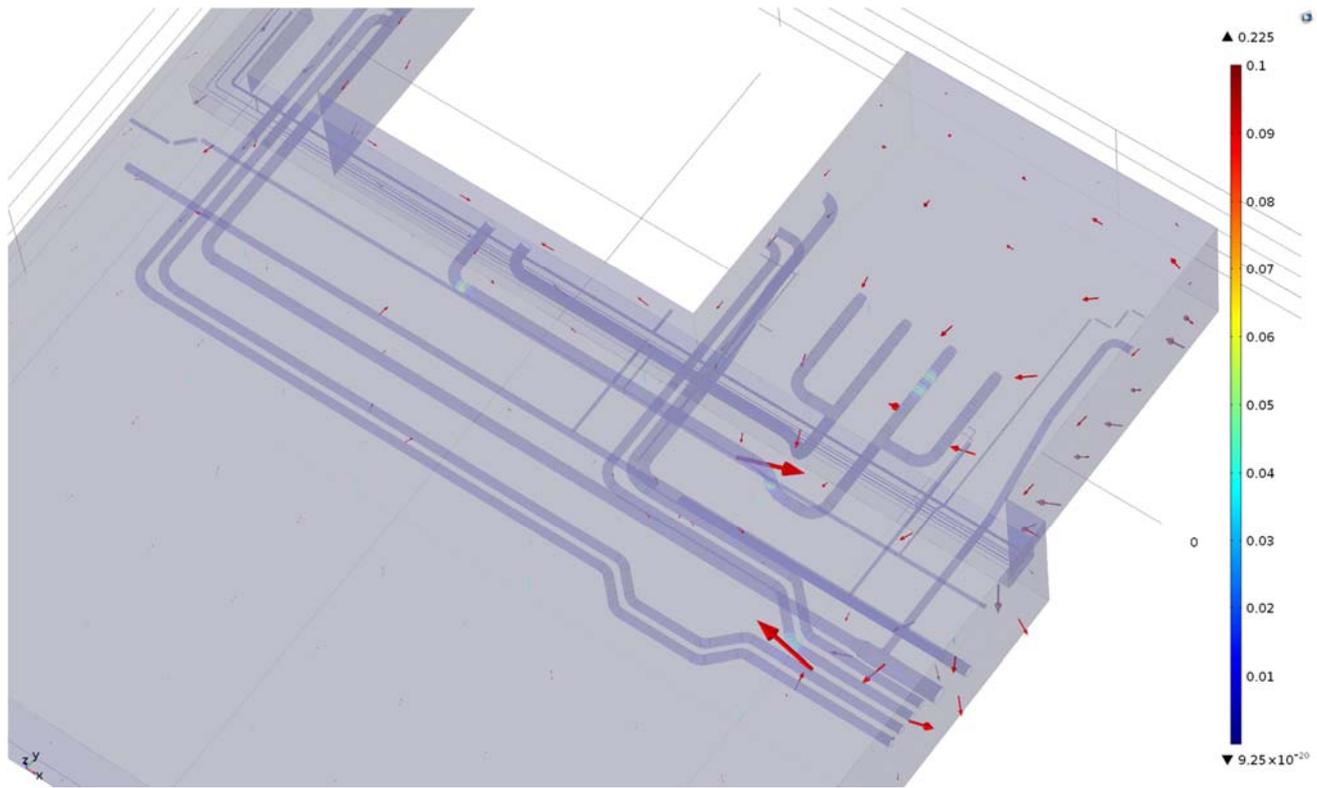


향후 연구개발 방향



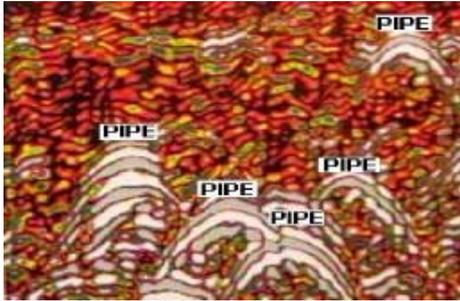
● 표면전류벡터 및 표면전류밀도 분포





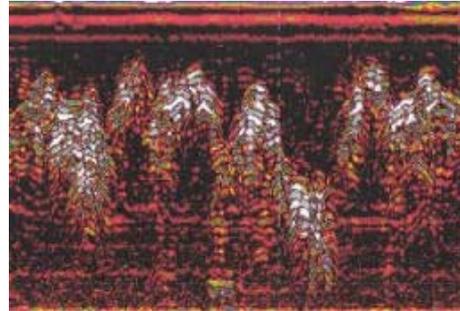
● **경계조건 강화 : GPR (Ground Penetrated Radar)**

배관위치 보정



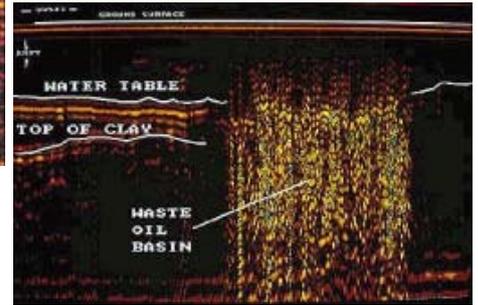
배관 좌표 변경/추가 등

이물질/구조변화



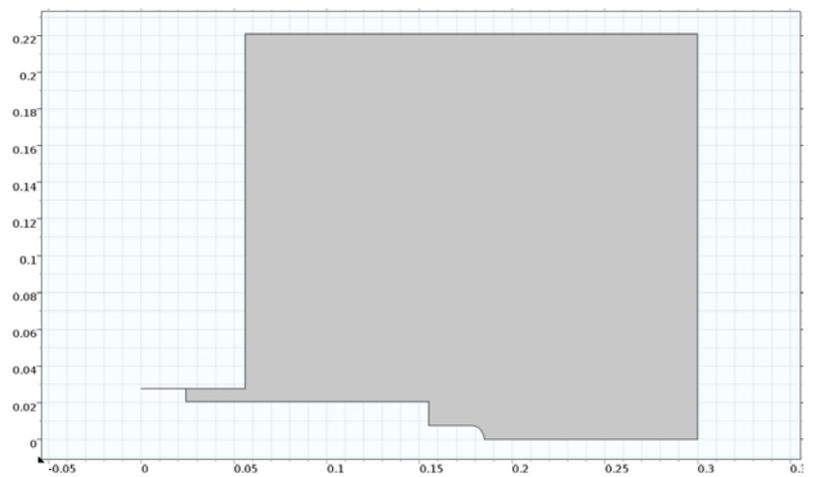
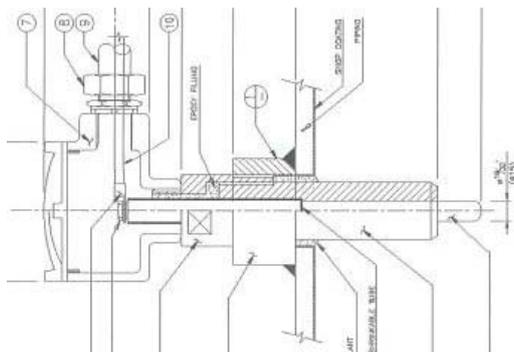
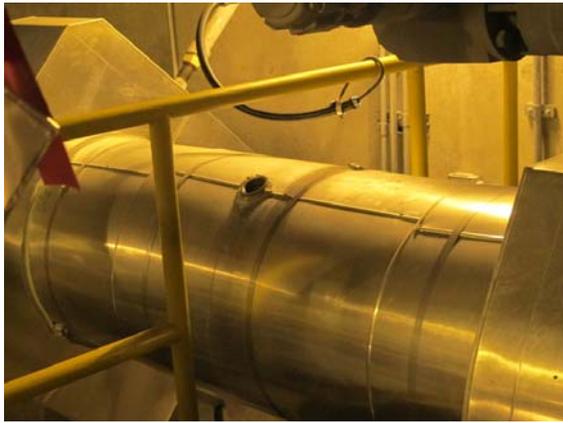
기반암/증개축 구조물 등

매질 물리적 성질변화



토양오염 등 환경변화

매설배관 내부 국부부식 모델링



● 해수의 전기전도도 : $\sigma = 53[\text{S/m}]$

● 해수 내 전기화학특성

- 탄소강/코팅제 자연전위 : 600 mV vs. Zn (-441 mV vs. SCE)
- 음극방식시 탄소강/코팅제 강제전위 : 200 mV vs. Zn (-800 mV vs. SCE)
- 25 °C 탄소강의 양극분극곡선 적용
- 25 °C SS 316L의 음극분극곡선 적용

● Pt-Ti 양극 방식전극전류: 1.4 A/개(최대치)로 가정

● 음극방식 금속 분극전위 : -800[mV, SCE]로 가정

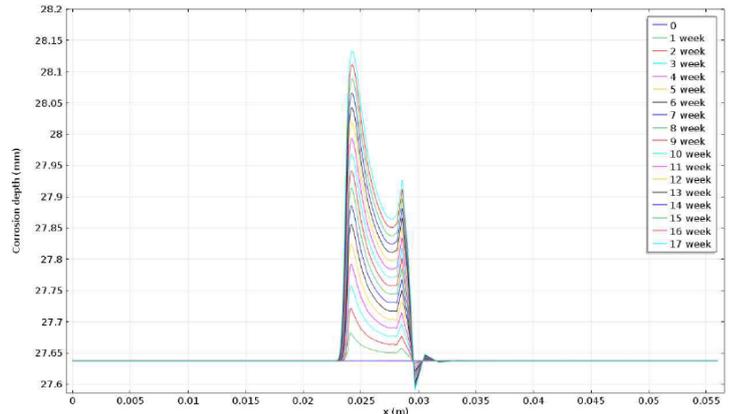
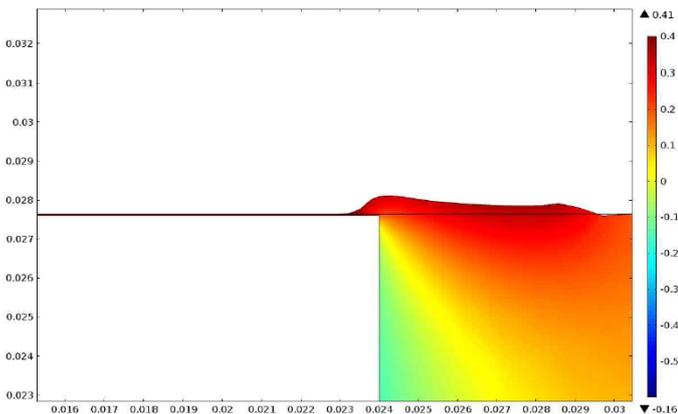
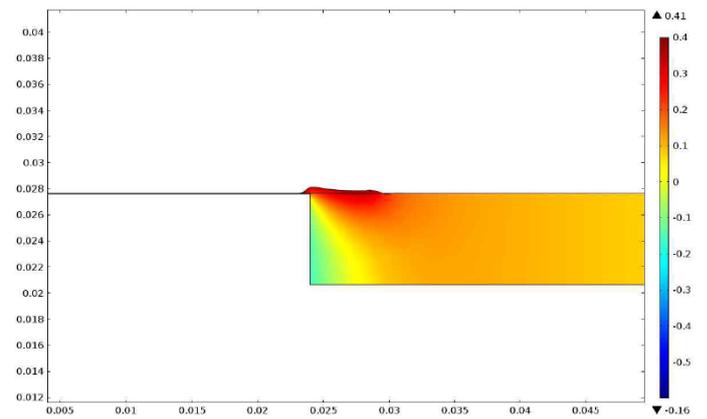
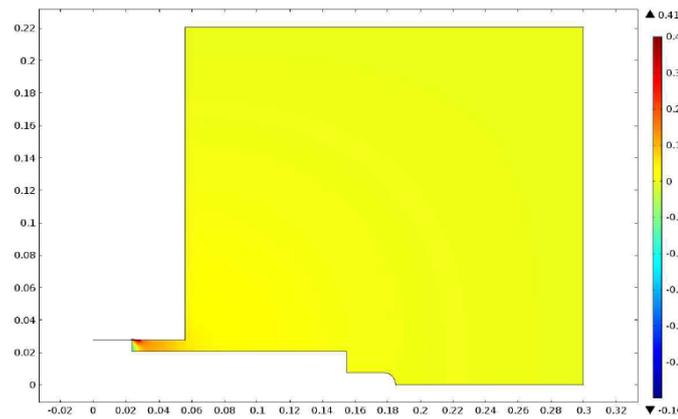
● 기하조건

- 2D 단순화, 나사산은 평행틀(35 μm)로 묘사
- 테플론 테잎 절연/테플론 테잎 유실 묘사; 노출부외 고체부는 절연상태로 묘사
- Moving boundary mesh 적용하여 시간별 부식부 변형 묘사

● 적용 전기화학 기구 및 물리현상

- Secondary Current Distribution : 전해질 내 조성변화가 무시할 수 있을 만큼 적은 경우에 전류/전위 분포 묘사. 전극 흡착 및 반응 이온종의 계면현상은 묘사가능

배관 내부 부식 모델링 평가사례



결론

COMSOL 적용성 평가 및 개선점

- **COMSOL의 원전 매설배관 방식시스템에 대한 응용**
 - 여타 FEM, BEM 및 FVM 상용틀에 비해 섬세한 모델링과 정확성을 확인
 - 전기화학 모델링 툴로서는 현존하는 상용틀 중 가장 활용도가 큼
 - 배관 내외부 부식 및 방식에 대한 2D 및 3D 모델의 우수성 확인
- **향후 원전 매설배관 결함 탐침을 위한 COMSOL 적용계획**
 - 차기 매설배관 결함 탐침 연구개발과제에 대해 COMSOL 3D 모델 적용 본격화
 - APEC 및 GPR 기술과 접목될 경우 COMSOL은 강력한 결함 탐침 툴로 이용가능
 - 각 원전별 3D 매설배관 도면이 탑재되어야 하며, 사용자 편의성을 갖춘 UI 개발, 입력변수창 개발 및 COMSOL 전기화학 모델링 엔진 탑재한 상품도 가능
- **COMSOL 개선 필요사항**
 - 상용 CAD 등 3D graphic 툴과의 적합성, 호환성 및 정확도 개선필요
 - 원통형 메쉬 등 배관 라우팅 모델용 메쉬 적용 필요
 - 전기화학 및 부식모듈에 대한 개량과 발전이 타 분야에 비해 느림