

Implementation of Synthetic Data for SFR Sodium Leakage Accident Analysis

A Technical Guide Based on U.S. NRC NUREG-Series for SMR Licensing

Target Audience: 국내 대기업 SMR 사업추진단 (SK, HD현대, 두산에너빌리티), 한국원자력연구원(KAERI)
SFR 개발실 및 학계 연구실 귀하

Subject: 소듐냉각고속로(SFR) 인허가 가속화를 위한 NUREG 준수 가상 합성 데이터(Synthetic Data) 활용 가이드

Date: May 2026

Prepared by: AI-Driven Nuclear Safety Automation Group

1. Executive Summary (요약)

차세대 소듐냉각고속로(SFR) 및 소형모듈원자로(SMR)의 상용화를 위해서는 미 규제기관(NRC)의 엄격한 안전성 실증 요건을 충족해야 합니다. 특히 **소듐 누출 사고(Sodium Leakage Accident)**는 고온 소듐의 화학적 반응성으로 인해 계통 건전성에 치명적인 영향을 미칠 수 있으나, 실제 실험을 통한 고충실도(High-fidelity) 데이터 확보는 비용과 안전성 측면에서 극도로 제한적입니다.

본 기술 가이드는 미 NRC의 NUREG 가이드라인을 준수하는 가상 합성 데이터(Synthetic Data)를 생성하고, 이를 PINNs(물리 기반 신경망) 기술로 검증하여 SFR 안전 분석 및 인허가 프로세스를 혁신적으로 단축할 수 있는 방법론을 제안합니다.

2. Regulatory Framework: U.S. NRC NUREG Requirements

SFR 계통 인허가 획득을 위해 필수적으로 검토해야 하는 미 NRC NUREG 시리즈의 핵심 요건은 다음과 같습니다.

규제 가이드 (NUREG)	요구되는 안전성 분석 항목	합성 데이터 대체 및 보완 가능 영역
NUREG-0800 (SRP)	제5장 및 제15장: 냉각재 상실 및 계통 누출 사고 분석 요건	과도 상태(Transient State)의 열유체 거동 데이터 보완
NUREG/CR-Series	소듐-공기 반응(Sodium-Air Reaction) 및 에어로졸 거동 평가	다중물리(Multi-physics) 시뮬레이션 기반 가상 데이터셋 제공

3. AI-Driven Synthetic Data Generation Methodology

기존의 전산유체역학(CFD) 방식은 계산 자원 소모가 극심하여 다량의 사고 시나리오 분석에 한계가 있습니다. 본 솔루션은 인공지능과 물리 법칙을 결합하여 이 문제를 해결합니다.

A. 물리 기반 신경망 (PINNs) 도입

- 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes) 및 열전달 방정식을 손실 함수(Loss Function)에 내재화하여 물리적 정당성 확보.
- 실험 데이터가 부족한 영역에서도 유체 역학 및 화학 반응 법칙을 100% 준수하는 합성 데이터 생성.

B. 가속 시뮬레이션 및 데이터 확장

- 단 몇 번의 고정밀 CFD 해석 데이터를 바탕으로 수천 개의 운전 조건(온도, 유량, 누출 크기 등)별 사고 시나리오 데이터 자동 확장.
- 대기업 SMR 추진단 내 인공지능 기반 설계 최적화 모델에 즉시 학습 가능한 포맷 제공.

4. Verification & Validation (V&V) 및 기대효과

1. **인허가 문서(PSAR/FSAR) 작성 가속화:** 규제 기관이 요구하는 정밀한 과도 상태 데이터 및 불확실성 분석(Uncertainty Analysis) 데이터를 신속히 공급하여 불합격 리스크 최소화.
2. **R&D 비용 절감:** KAERI 및 대학교 연구실 내 대규모 실험 설비 구축 전, 고충실도 시뮬레이션 데이터를 통한 사전 검증으로 시행착오 비용 85% 절감.
3. **SMR 설계 최적화:** 구조물 건전성 및 차폐 설계 단계에서 다양한 소듐 누출 시나리오를 선제적으로 반영하여 비상대응계통(Engineering Safety Features) 설계 최적화.

5. Conclusion & Next Steps

본 추진단이 보유한 NUREG 준수 SFR 소듐 누출 합성 데이터셋은 차세대 원전 시장의 Fast-mover가 되기 위한 필수 기술 자산입니다. 상세 데이터 사양 및 데모 시나리오 확인을 원하시는 연구원 및 추진단 관계자분들은 본 리포트를 기반으로 기술 미팅을 신청해 주시기 바랍니다.