

배경 설명

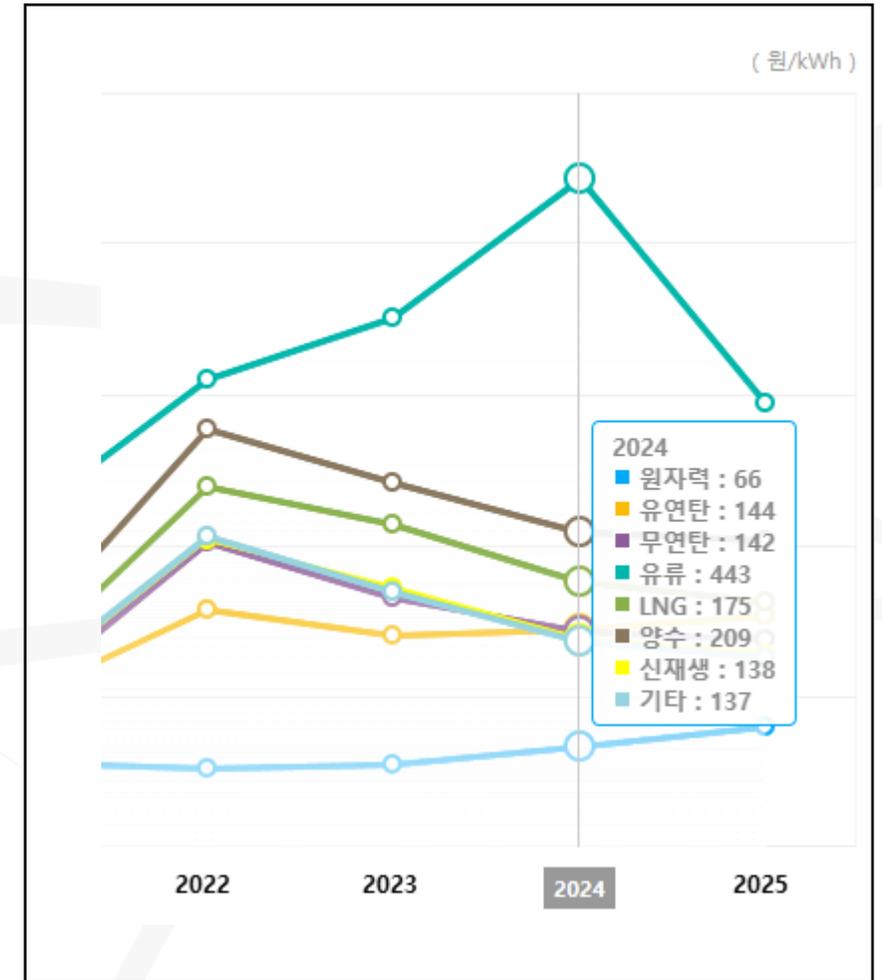
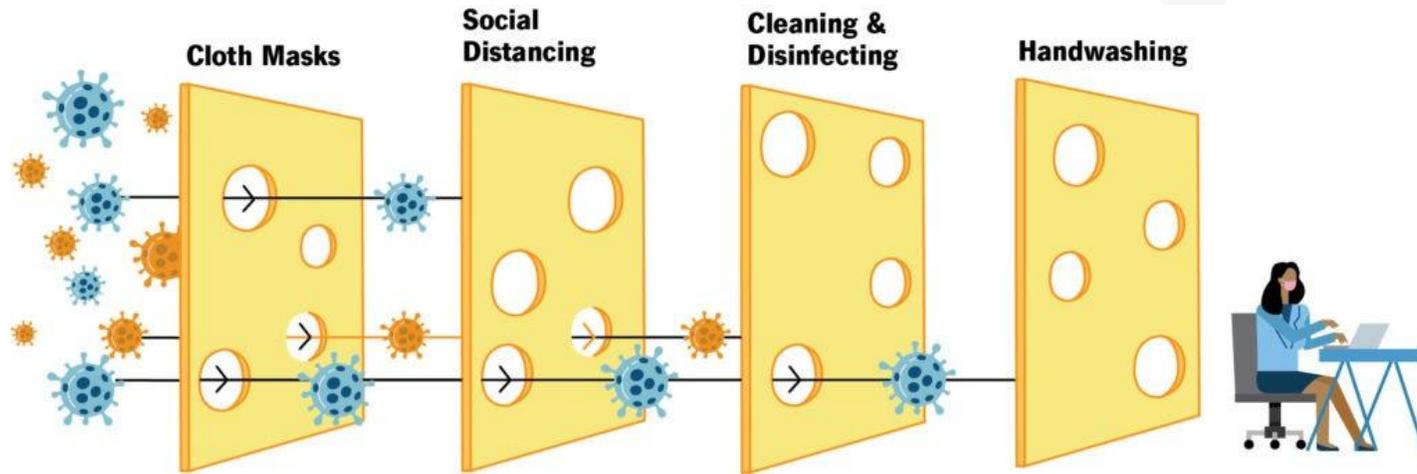
WASH-1400

✓ 분석 단순화 & 보수적 위험도 계산 방법론 제시

■ $Risk = \sum_i l_i \cdot c_i$

■ 보수적인 l_i, c_i 를 활용

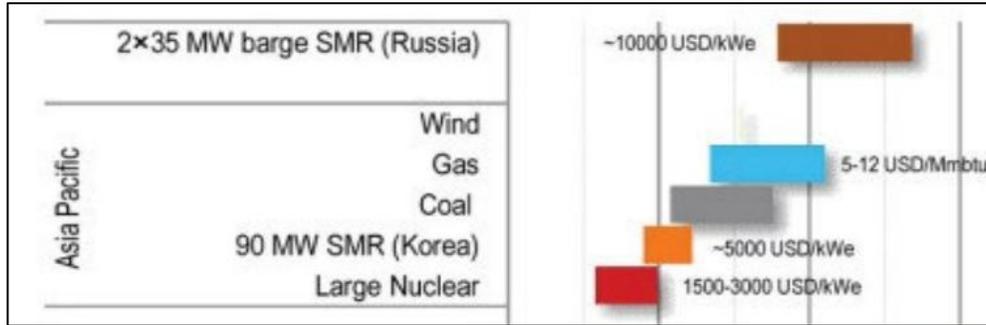
✓ 예: 보수적 고장 확률, 인간 오류 확률, 복구 가능성...



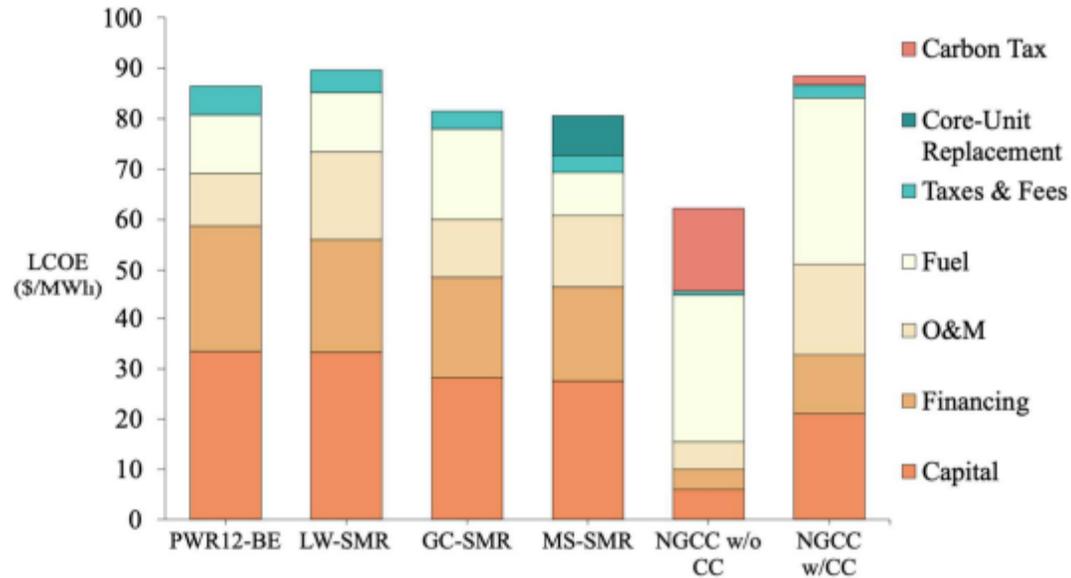
*출처: EPSIS

배경 설명

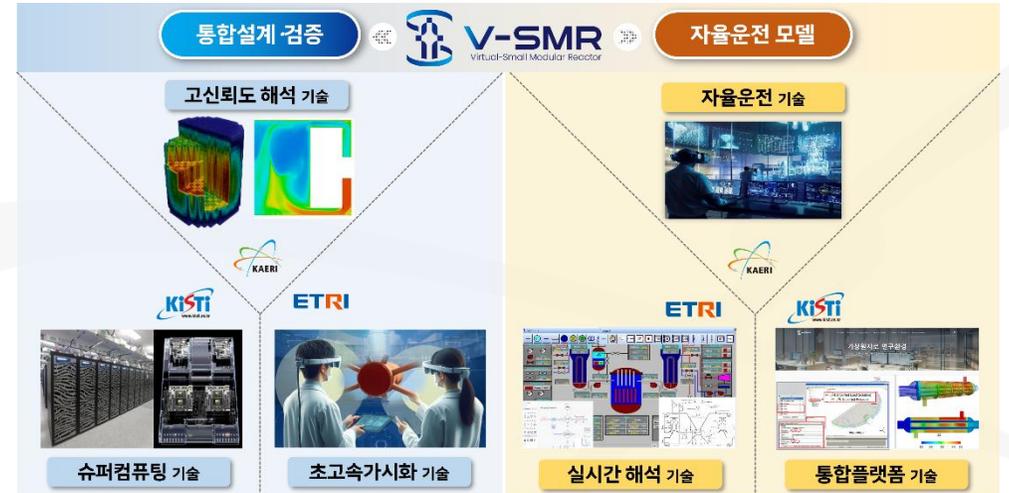
■ 균등화발전비용 (LCOE) 저감 목표, 진행 중 연구과제:



OECD 국가들 에너지별 LCOE 비교 (아시아 부분 발취) [1]



미국 에너지별 LCOE breakdown layout [2]

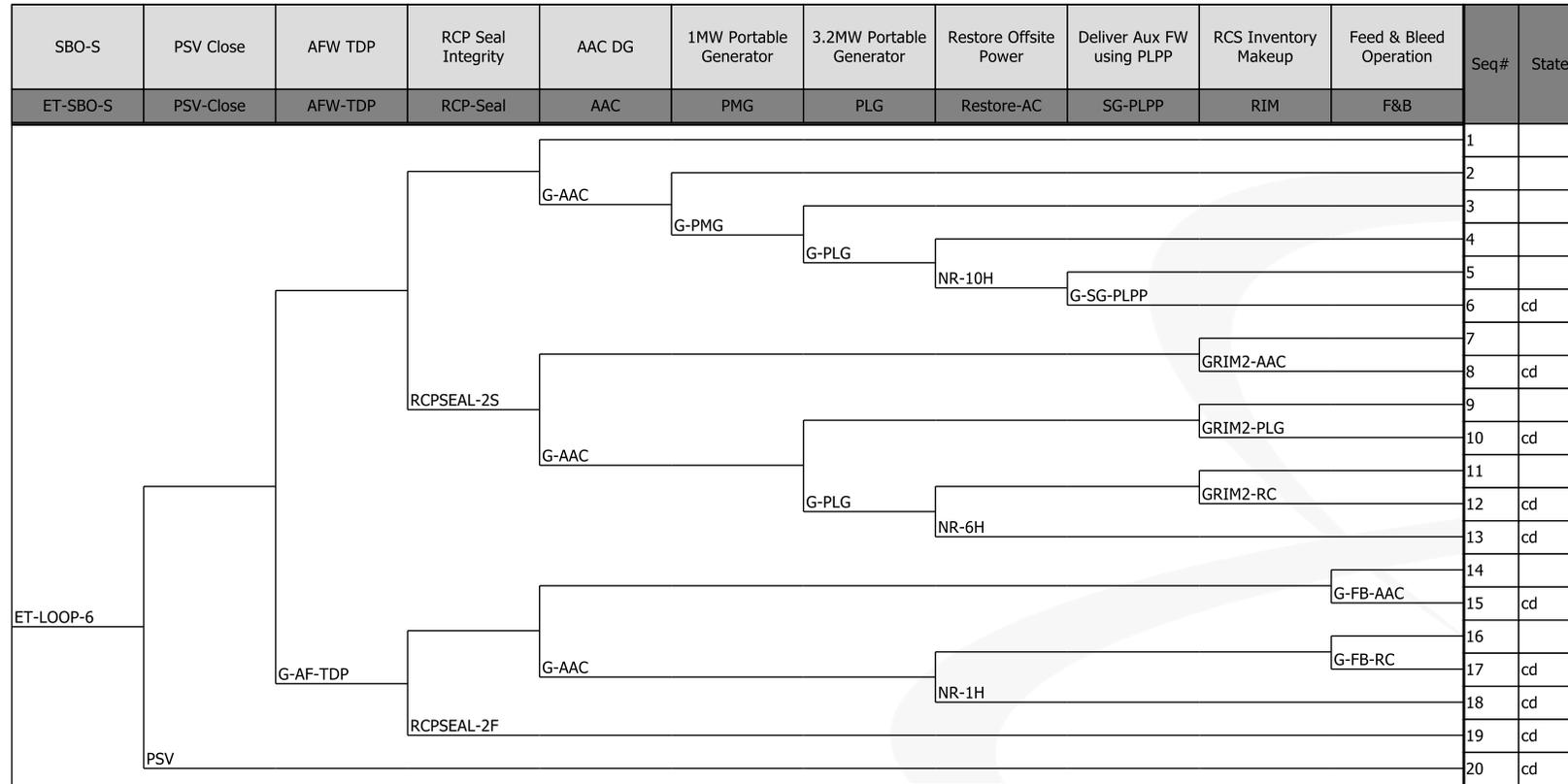


리스크평가연구부

- 비상사고 최적대응 모델 개발
- 시계열 기반 위험도 평가 기술
- **시간 frame 기반 사고 시나리오 분류**

기존 PSA 연구와의 차별성

- 기존 PSA에서는 사고 시퀀스가 순서대로 진행된다고 가정



TITLE

Sample.Data-Sbo.Data-10000

END

INCLUDE ../Sample.Data.Base.inc

PARAMETER CHANGE

Flag_PSV_Stuck = 1

Time_Seal_LOCA = 1.767 HR

Area_Seal_LOCA = 5.749e-5

Time_HPSI1_ON = 0 HR

Time_HPSI1_OFF = 18.134 HR

Time_CSS1_ON = 0 HR

Time_CSS1_OFF = 10.283 HR

Time_Recirculation_OFF = 0 HR

Time_PLPP1_ON = 30.349 HR

Time_PLPP1_OFF = 35.005 HR

Time_AC_power1_ON = 1.517 HR

Time_AC_power1_OFF = 17.265 HR

Time_AC_power2_ON = 22.028 HR

Time_AC_power2_OFF = 27.8 HR

Time_AC_power3_ON = 54.582 HR

Time_AC_power3_OFF = 1000 HR

Time_TDAFW1_ON = 0 HR

Time_TDAFW1_OFF = 21.265 HR

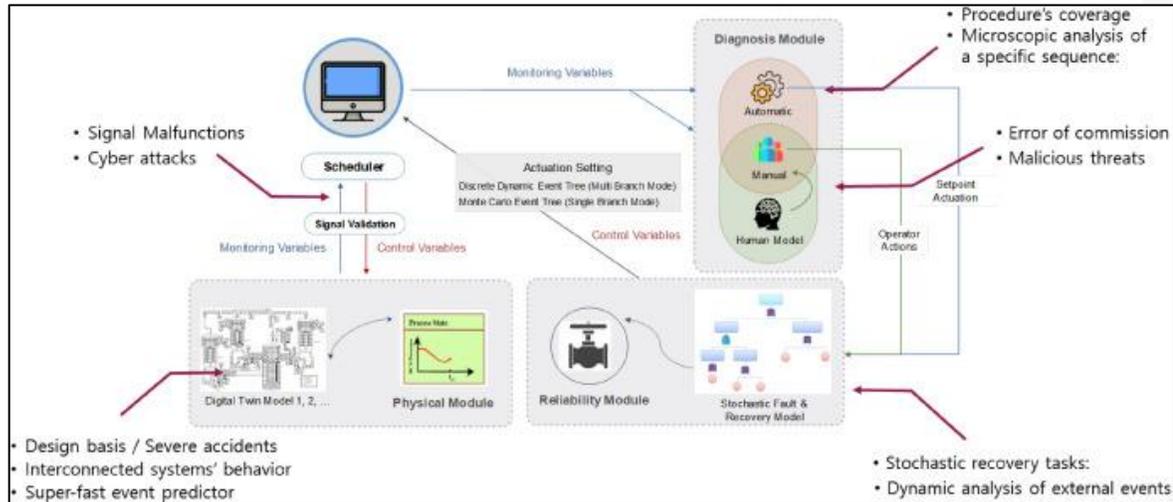
END

연구 목표

■ 시간 frame 기반 사고 시나리오 분류

=Dynamic PSA (DPSA) 기반 대표 사고 시나리오 도출

DPSA: 안전기능별 동작 변화 등을 시간에 따라 모델링 (예시) [3]



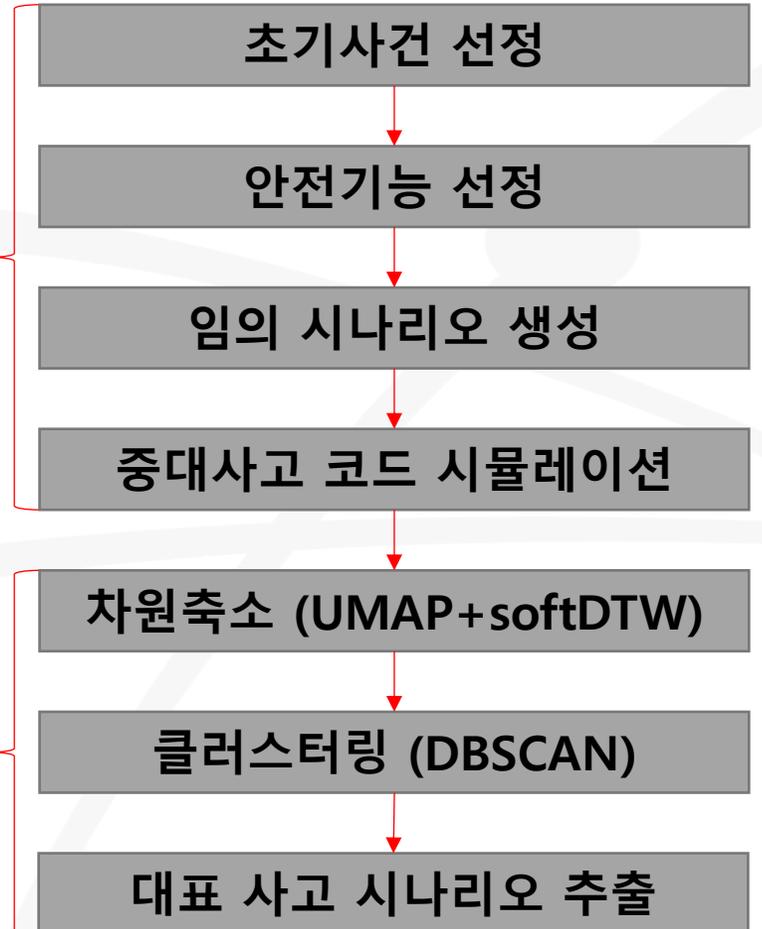
Layout: Dynamic Integrated Consequence Evaluation [3]



목차

1. 초기사건 별 DPSA 기반 임의 사고 시나리오 도출
2. 사고 시나리오 클러스터링 및 대표 사고 시나리오 도출
3. Case study 및 검증
4. 연구 계획

① 초기사건 별 DPSA 기반 임의 사고 시나리오 도출



DPSA 기반 임의 사고 시나리오 도출

- 초기사건 선정
- 초기사건에 관련된 안전기능들 (예: DG, pumps 등) 선정
- 안전기능 실패 확률, 운전원 수행 실패 확률 모델링
- Monte Carlo 기반 random sampling하여 시나리오 생성
- 결과물: 열수력 코드 (MAAP) 입력 데이터

대표 사고 시나리오 도출

- 필요 입력 값: MAAP 입력 데이터 (.inp)
- 중대사고 코드 시뮬레이션 (결과물: 시계열 열수력 데이터)
- 데이터간 거리 계산 (softDTW)
- 차원축소 (UMAP)
- 클러스터링 (DBSCAN)
- 클러스터별 대표 시나리오 추출

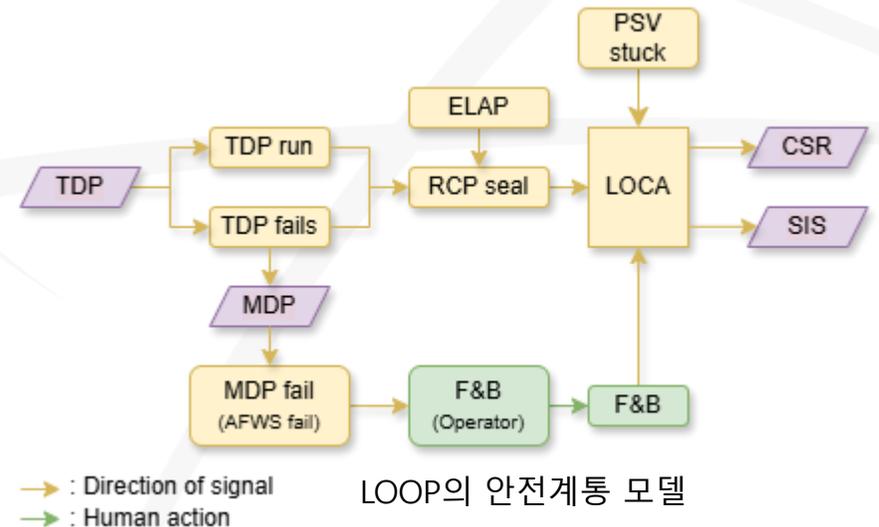
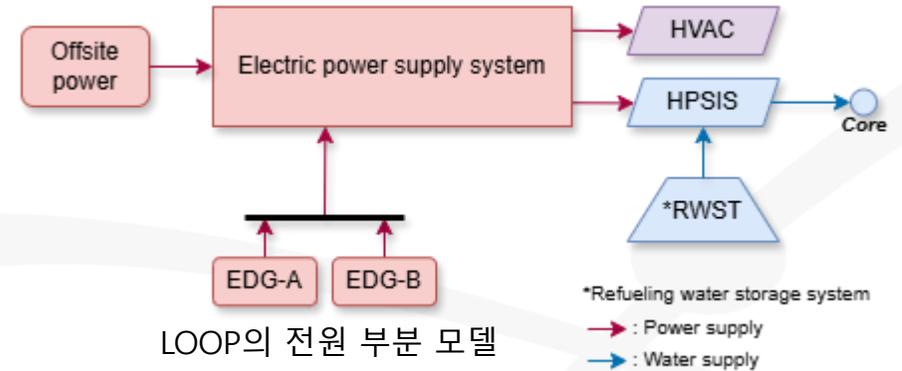
Case study

■ 초기사건 선정: 소외전원상실 (LOOP), 노형: OPR-1000

■ 초기사건 (LOOP) 관련 주요 안전기능 선정:

- 전원 회복: EDG, AAC DG, PLG, PMG
- 보충수 주입 펌프 관련: TDAFW, MDAFW, PLPP
- 재순환: SIS, CSR
- 운전원 조치: Feed-and-bleed
- 그 외: PSV stuck open

■ 검증용 생성 시나리오 생성: 6개 대표 시나리오



Case study

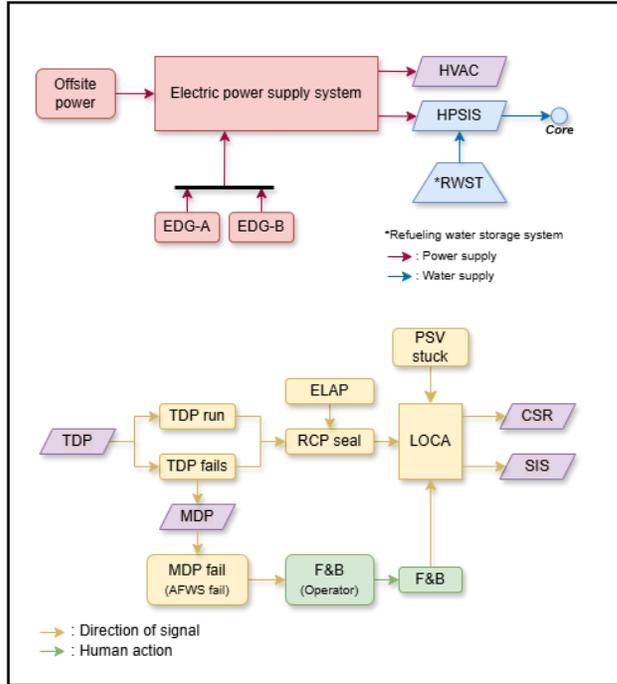
- 검증용 생성 시나리오 생성: 6개 대표 시나리오 (OK 2개, CD 4개) [4]
- OK 2개 (with or without seal-LOCA) ... Scenario 1, 2
- CD 2개 (EDG 정상 작동) ... Scenario 3, 4
- CD 2개 (EDG 실패) ... Scenario 5, 6

Scenario index	1	2	3	4	5	6
EDG	O	O	O	O	X	△*
AFW	O	O	△	X	X	X
SIS	O	O	X	△	△	-
PSV stuck	-	O	-	O	-	-
CSR	O	O	-	X	△	-
Seal LOCA	X	O	-	O	-	-

*EDG가 실패하더라도 후속으로 전원을 공급해줄 요소 (e.g. AAC, PLG, PMG) 들이 작동함을 의미

결과: DPSA 기반 임의 사고 시나리오 도출

- 검증용 600개 코드 인풋 파일 (예시), 사고 시뮬레이션 결과 (PCTs)



Scenario 6 MAAP inp

```

TITLE
  Sample.Data-Sbo.Data-10000
END

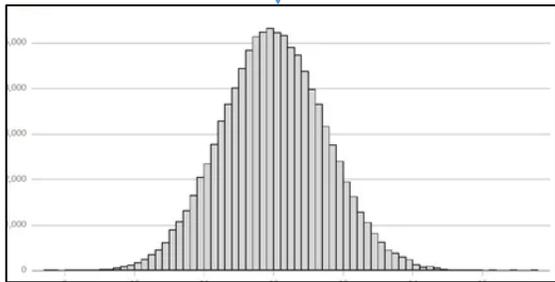
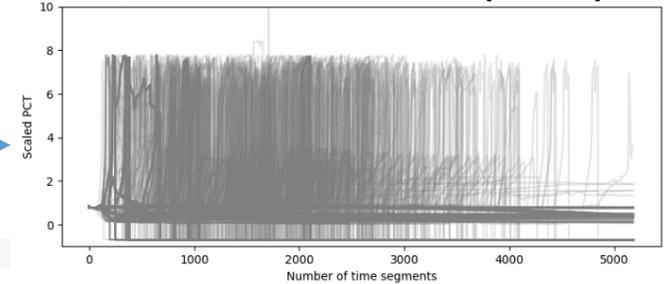
INCLUDE ../Sample.Data.Base.inc

PARAMETER CHANGE
  Flag_PSV_Stuck = 1
  Time_Seal_LOCA = 1.767 HR
  Area_Seal_LOCA = 5.749e-5
  Time_HPS1_ON = 0 HR
  Time_HPS1_OFF = 18.134 HR
  Time_CSS1_ON = 0 HR
  Time_CSS1_OFF = 10.283 HR
  Time_Recirculation_OFF = 0 HR
  Time_PLPP1_ON = 30.349 HR
  Time_PLPP1_OFF = 35.005 HR
  Time_AC_power1_ON = 1.517 HR
  Time_AC_power1_OFF = 17.265 HR
  Time_AC_power2_ON = 22.028 HR
  Time_AC_power2_OFF = 27.8 HR
  Time_AC_power3_ON = 54.582 HR
  Time_AC_power3_OFF = 1000 HR
  Time_TDAFW1_ON = 0 HR
  Time_TDAFW1_OFF = 21.265 HR
END
    
```

x600

MAAP code

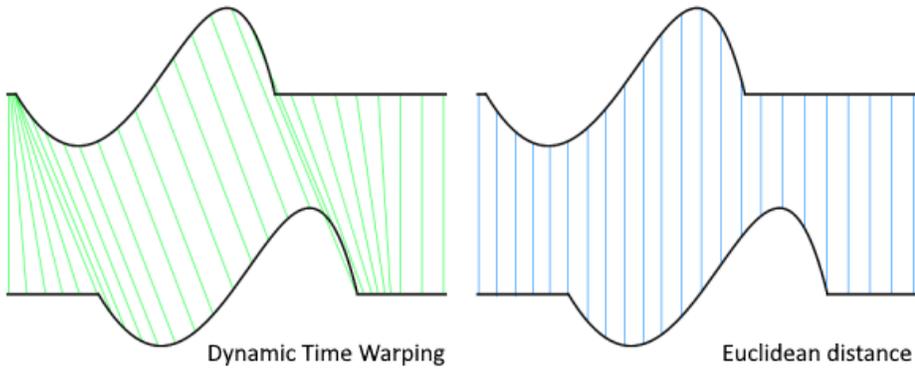
PCT 시뮬레이션 결과 (600개)



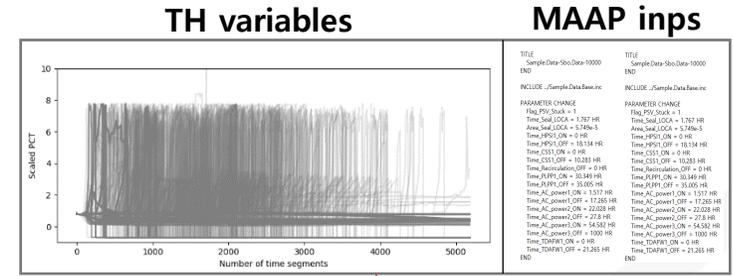
Random sampling

결과: 대표 사고 시나리오 도출

- MinMax Scaling: 데이터 크기 조정
- SoftDTW: 데이터간 거리 측정 방식



- UMAP: 차원 축소 알고리즘 [5]; umap-learn
- DBSCAN: 클러스터링 알고리즘 [6]; scikit-learn
- 군집별 중심부: 대표사고 시나리오



MinMax Scaling

SoftDTW

Distance Matrix (600x600)

UMAP

Embedded points (600x2)

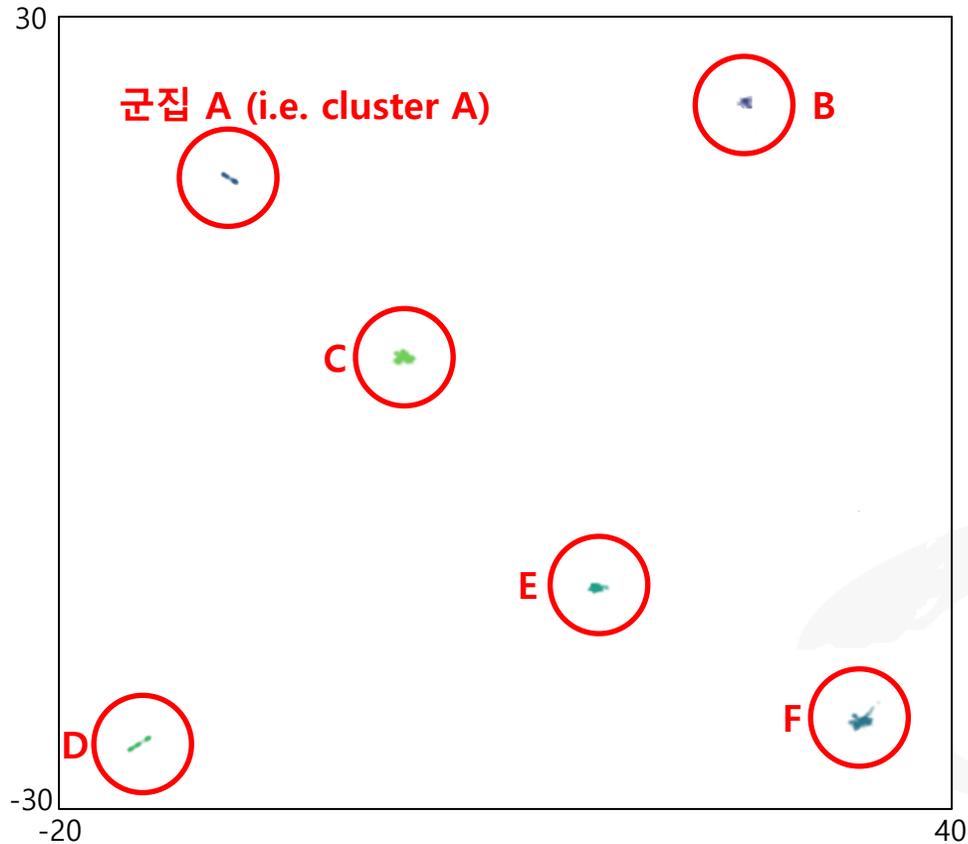
DBSCAN

시나리오 군집들
및 대표사고 시나리오

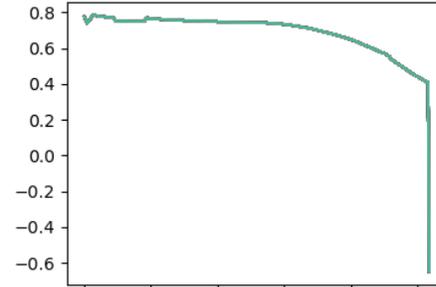
대표 사고 시나리오 도출

■ UMAP, DBSCAN 결과

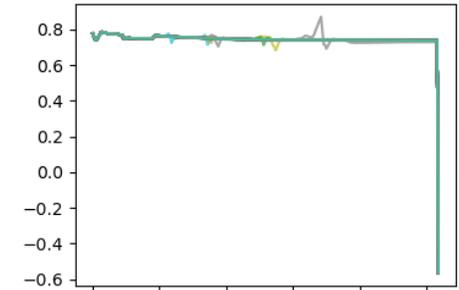
- ✓ 전력 공급이 없으면 CD 시점은 정해져 있음 (5, 6)
- ✓ 전력 공급이 있으면 안전 기능 실패 시점에 따라 다름 (3, 4)



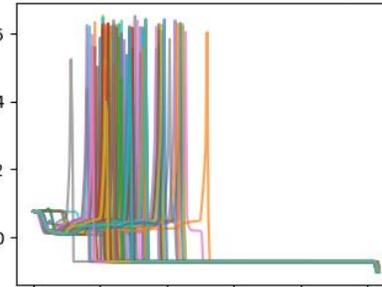
군집 A (=시나리오 1)



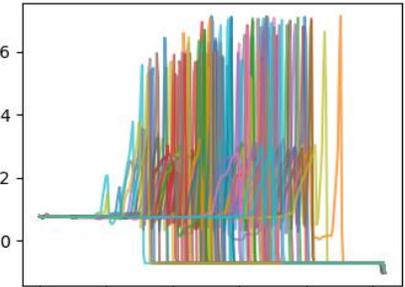
C (=시나리오 2)



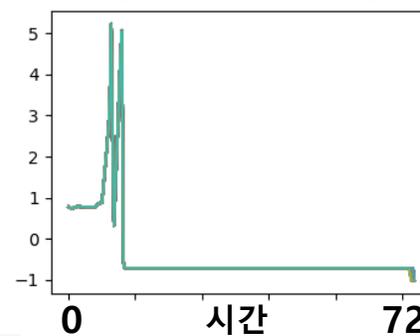
D (=시나리오 3)



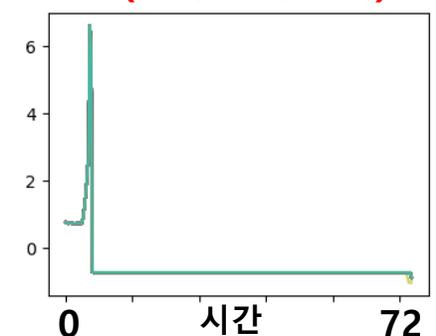
B (=시나리오 4)



E (=시나리오 5)



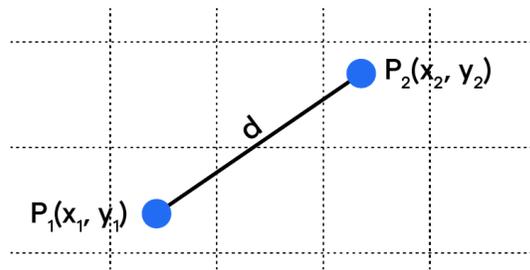
F (=시나리오 6)



비교분석 및 검증

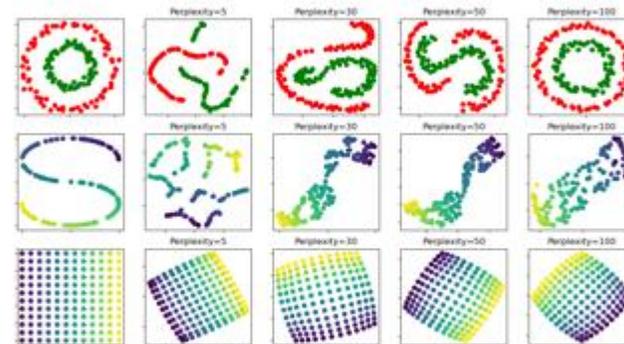
1. 다른 데이터 거리 계산 모델 활용; Euclidean distance model
 2. 다른 차원 축소 알고리즘 활용; tSNE
- 클러스터 결과 비교 모델: Adjusted Rand Index (ARI)

Euclidean Distance



$$\text{Euclidean Distance (d)} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

tSNE



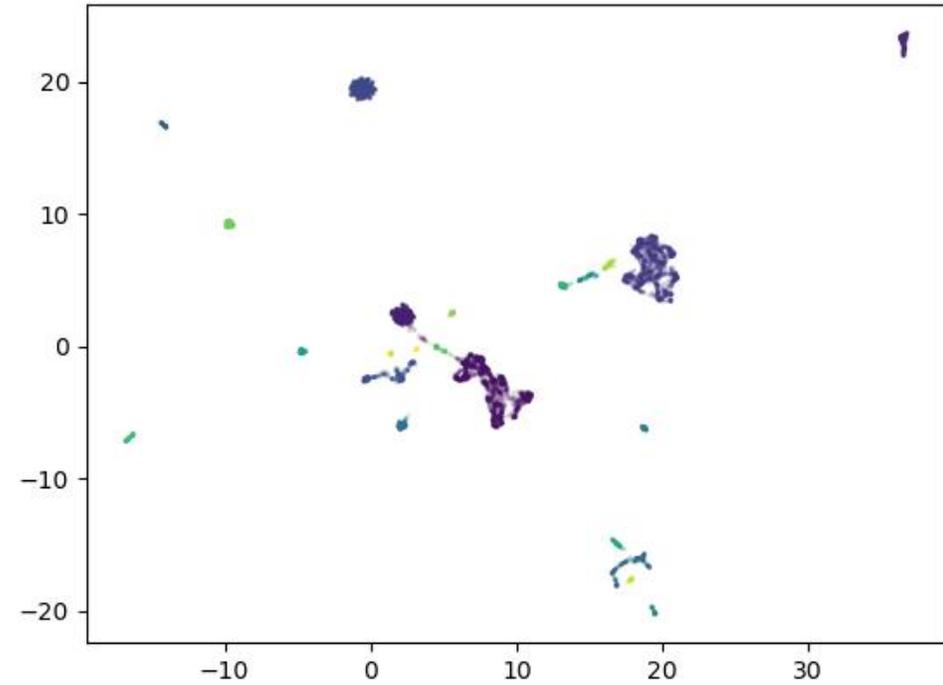
비교분석 및 검증

- 검증 결과 비교
- ARI: 참조 클러스터와 비교, 유사도가 높을수록 1에 가까운 결과
- Euclidean distance model: 계산 속도가 빠르지만 정확도가 낮음 (~5 min)
- tSNE: 정확도는 비교적 높으나, 계산 속도가 느림 (~2 hr)
- SoftDTW: 정확도가 높고 비교적 계산 속도가 빠른 편 (~15 min)

Method	ARI score
This study (SoftDTW)	0.995
Euclidean distance model	0.740
tSNE	0.840

후속 연구

- 연구 진행: LOOP에 대해서 10,000개 임의 시나리오 도출
- 임의 시나리오 생성, 차원 축소, 군집화까지 수행
- 후속 수행 업무:
 - ✓ 사고 시나리오 라벨 부여 방법 개발
 - ✓ 다변수 기반 데이터 거리 계산
 - ✓ 대표 사고 시나리오 도출
 - ✓ 클러스터별 샘플 분석
 - ✓ 기존 PSA 방법 대비 LOOP의 위험도 비교



학술적 기여도

- 시계열 데이터 군집화 성능 개선 및 검증
- 대표 사고 시나리오 추출 및 분석

참고문헌

- [1] Lokhov, A., Cameron, R., & Sozoniuk, V. (2013). OECD/NEA study on the economics and market of small reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 45(6), 701-706. <https://doi.org/10.5516/NET.02.2013.517>.
- [2] Spangler, R. M., Agarwal, V., Primer, C. A., Hansen, J. K., Lawrence, S., Howard, C., ... & Herb, R. (2023). Development of a Technical, Economic, and Risk Assessment Tool for the Evaluation of Work Reduction Opportunities (No. INL/RPT-23-74724- Rev000). Idaho National Laboratory (INL), Idaho Falls, ID (United States).
- [3] Heo, Gyunyoung, and Dohun Kwon. "Korean perspective for integrated deterministic-probabilistic safety assessment and its synergetic strategy with conventional methods." *Nuclear Engineering and Technology* 56.10 (2024): 4031-4041.
- [4] Kim, Kil Yoo, et al. "Updating of Initiating Events Frequencies in the UCN 3, 4 PSA." (2005).
- [5] McInnes, Leland, John Healy, and James Melville. "Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction." arXiv preprint arXiv:1802.03426 (2018).

발표를 마칩니다

- Q&A

