

# Sampling Based Method for Estimating Functional Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors

Yongjoon Lee, Gyunyoung Heo\*

Department of Nuclear Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University

Corresponding author: gheo@khu.ac.kr

Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 22-23, 2025

# 00. 목차

I. 서론 및 연구배경

II. 이전 연구

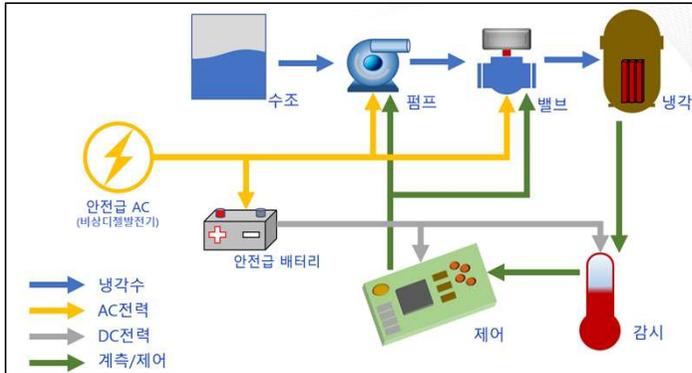
III. 방법론

IV. 사례연구

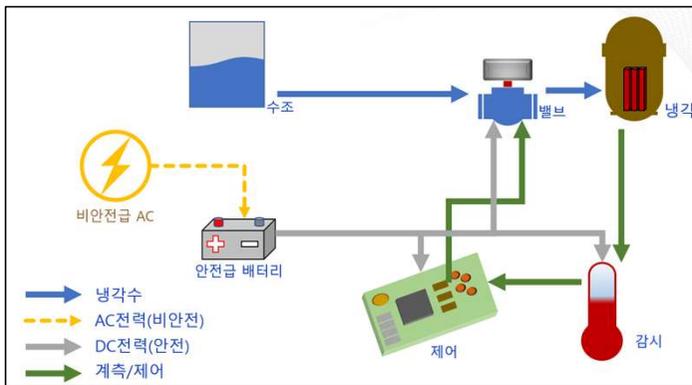
V. 결론



# I. 서론 및 연구배경



<능동계통>



<피동계통>

## ❖ 능동계통

- 외부전원에 의존한 안전주입펌프 혹은 솔레노이드 밸브 등으로 구성되어 있음
- 기기고장, 운전원 조작 실패, 외부전력 공급 중단에 대한 위험이 존재함

## ❖ 피동계통

- 외부 전원의 공급 없이도 작동하며, 자연력(Natural Force)에 의해 안전기능을 수행하도록 설계된 계통
- 주로 자연순환(Natural Circulation), 중력(Gravity), 증기압력 차이 등 저구동력(Low-Driving Force)을 이용하여 냉각수의 공급, 열제거 및 압력완화 등의 안전기능을 수행

<IAEA 피동안전계통 분류>

분류	신호 입력	외부 전원 공급	작동 기계	작동 유체	사례
A	X	X	X	X	Fuel Cladding
B	X	X	X	O	Surge Line of PWR
C	X	X	O	O/X	Accumulator
D	O	Stored Energy Source (Battery)	I&C Part, Valve	O/X	Gravity Driven ECCS

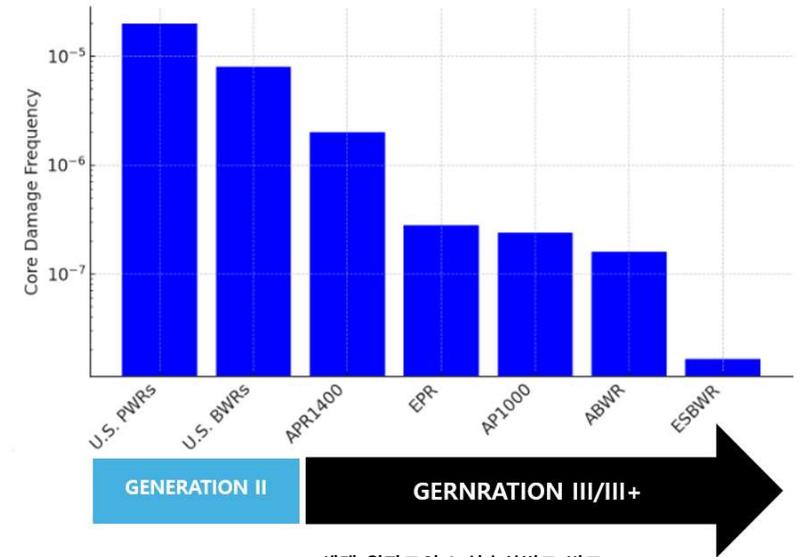
※ IAEA-TECDOC-626, "Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants" (1991), IAEA-TECDOC-1624, Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA (2009년).

※ 임상규, "혁신형 SMR 설계현황", 혁신형 SMR 기술개발사업단 (2025).

# I. 서론 및 연구배경

<Generation III/III+ 대형경수로의 피동안전계통 현황>

모델	국가	주요 피동안전계통
ESBWR (General Electric)	미국	피동열제거계통 피동격납건물냉각계통 격리냉각계통 자동감압계통
AP1000 (Westinghouse)	미국	피동노심냉각계통 피동안전주입계통 피동격납건물냉각 계통 노심보충탱크
EPR (AREVA)	프랑스	피동노심냉각 및 격납계통 피동열제거계통
APR1400 (KEPCO)	대한민국	피동잔열제거계통 원자로 내 잔류물 보유(IVR, In-Vessel Retention)
VVER-1200 (Rosatom)	러시아	피동열제거계통 피동안전주입계통



<II, III/III+세대 원자로의 노심손상빈도 비교>

- 피동계통의 이점을 활용하여 현재 운영중인 Generation II 원자로에 대비해 한국의 APR1400, WH의 AP1000, GE의 ESBWR, 프라마툼의 ERP, 로사툼의 VVER 같은 Generation III/III+ 원자로의 안전목표를 크게 확보하려는 노력이 지속되고 있음

※ IAEA-TECDOC-626, "Safety Related Terms for Advanced Nuclear Plants" (1991), IAEA-TECDOC-1624, Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA (2009년).  
 ※ OECD/NEA Workshop on innovations in water-cooled reactor technologies, GE Hitachi's ABWR and ESBWR: safer, simpler, smarter

# I. 서론 및 연구배경

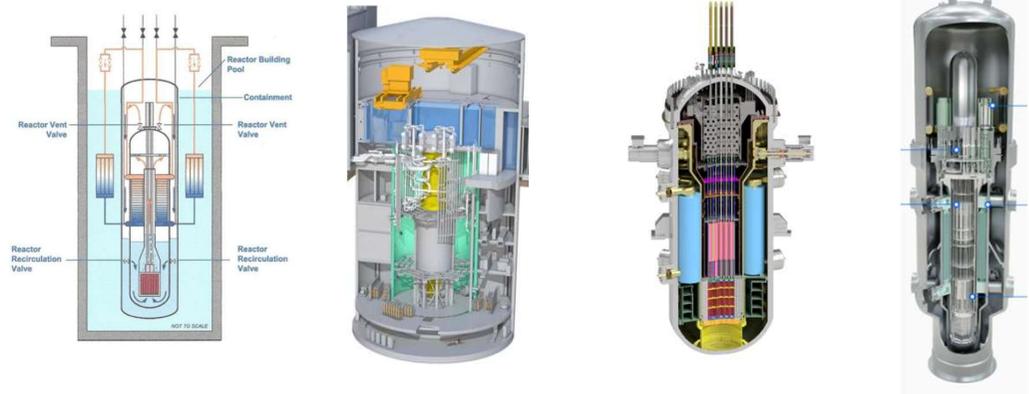


<세계 각국의 SMR 설계 현황 >

- 최근 SMR(Small Modular Reactor) 설계가 세계 각국에서 활발히 이루어지고 있으며, 설계과정에서 피동계통의 이점을 적극적으로 활용하여 설계하고 있음

<세계 각국의 SMR 안전계통설계 >

구분	VOYGR (NuScale)	BWRX-300 (GE-Hitachi)	SMART100 (KAERI)	i-SMR
노형/출력 [MWe]	PWR/77	BWR/300	PWR/110	PWR/170
냉각수 순환	자연순환	강제순환	강제순환	강제순환
안전주입	재순환+방출밸브	없음(RPV Isolation 밸브)	ADS + CMT + SIT	자연순환 (감압밸브, 재순환밸브)
잔열제거	2차측 피동 열교환기	BWR 피동 열교환기	2차측 피동 열교환기	2차측 피동 열교환기 (PAFS 적용)
격납용기	철제CV+침수	철제CV+상부침수	철제 CV	철제 CV
노심손상빈도	1.0E-9	1.0E-7	1.0E-7	1.0E-9



※ <https://ismr.or.kr/eng/>  
 ※ Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022), IAEA  
 ※ 임상규, "혁신형 SMR 설계현황", 혁신형 SMR 기술개발사업단 (2025).

# I. 서론 및 연구배경



- 능동안전계통에 비해 피동안전계통은 다양한 장점이 존재하지만 추가적으로 고려해야 할 부분이 존재함

## ❖ 피동계통 신뢰도분석에서 고려해야 할 현안

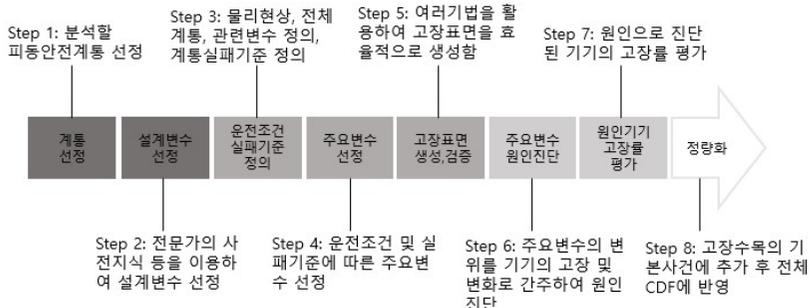
- ❖ 기능적 실패 (Functional, Phenomenal Failure) 개념
- ❖ 열수력학 모델링의 복잡성과 한계
  - 복잡한 물리 현상
  - 정밀한 열수력 코드 필요
- ❖ 피동계통의 불확실성
  - 입력 변수의 불확실성
  - 모델 자체의 불확실성
- ❖ 실패확률 계산의 기술적 어려움
  - 비교적 매우 낮은 확률 추정
  - 계산량 폭증 → 대체기법 필요

※ Di Maio, Francesco, et al. "Reliability assessment of passive safety systems for nuclear energy applications: State-of-the-art and open issues." *Energies* 14.15 (2021): 4688.  
 ※ 박진희. "SMR PSA". 리스크평가연구부 (2024)

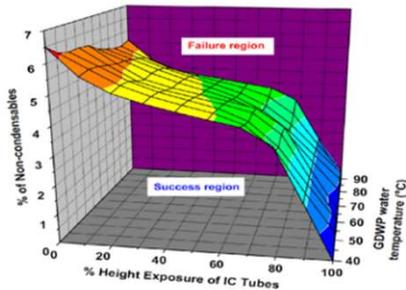


# I. 서론 및 연구배경

## ❖ Assessment of Passive System Reliability(APSRA)



< APSRA 방법론 다이어그램 >

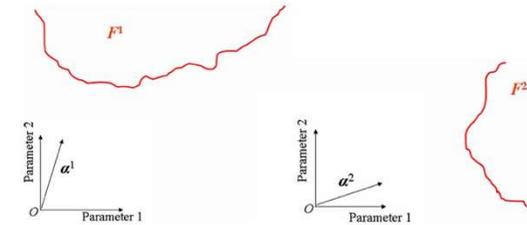


< APSRA 방법의 실패표면 >

※ Nayak, A. K., Gartia, M. R., Antony, A., Vinod, G., & Sinha, R. K. (2007, May). Reliability Analysis of a Boiling Two-phase Natural Circulation System Using the APSRA Methodology. In Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2007), Nice, France.

## ❖ Line Sampling

- 실패표면에 가까운 Importance Direction을 찾아내고, 해당 방향에 따라 샘플을 생성하여 실패표면을 추정

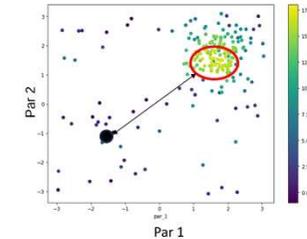


< Line Sampling 예시 >

※ Zio, E., & Pedroni, N. (2009). Functional failure analysis of a thermal-hydraulic passive system by means of Line Sampling. Reliability Engineering & System Safety, 94(11), 1764-1781.

## ❖ Adaptive Sampling

- LHS 등과 같은 기존 샘플 데이터를 기반으로 실패표면을 예측하고 불확실성 큰 영역에서 추가 샘플을 선택하는 방법



< Adaptive Sampling 예시 >

※ Florian Berchtold, Tanja Eraerds, Manuel Obergfell. Reliability Assessment of Passive Systems Using Adaptive Sampling to Reduce Uncertainties, International Workshop on Treatment of Uncertainties for Novel Aspects of Risk Analyses, CSN, Madrid, 2025.

※ Nayak, A. K., Gartia, M. R., Antony, A., Vinod, G., & Sinha, R. K. (2007, May). Reliability Analysis of a Boiling Two-phase Natural Circulation System Using the APSRA Methodology. In Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2007), Nice, France.

※ Zio, E., & Pedroni, N. (2009). Functional failure analysis of a thermal-hydraulic passive system by means of Line Sampling. Reliability Engineering & System Safety, 94(11), 1764-1781.

※ Florian Berchtold, Tanja Eraerds, Manuel Obergfell. Reliability Assessment of Passive Systems Using Adaptive Sampling to Reduce Uncertainties, International Workshop on Treatment of Uncertainties for Novel Aspects of Risk Analyses, CSN, Madrid, 2025.

# II. 이전 연구

## ❖ 변수들간의 독립

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n) = p(x_1) p(x_2) p(x_3) \dots p(x_n) \quad (1)$$

## ❖ 중첩의 원리(Principle of Super Position)

### • 동차성 (Homogeneity)

$$f(ax) = af(x) \quad (2)$$

### • 가산성 (Additivity)

$$f(ax_1 + \dots + a_n x_n) = a_1 f(x_1) + a_2 f(x_2) + \dots + a_n f(x_n) \quad (3)$$

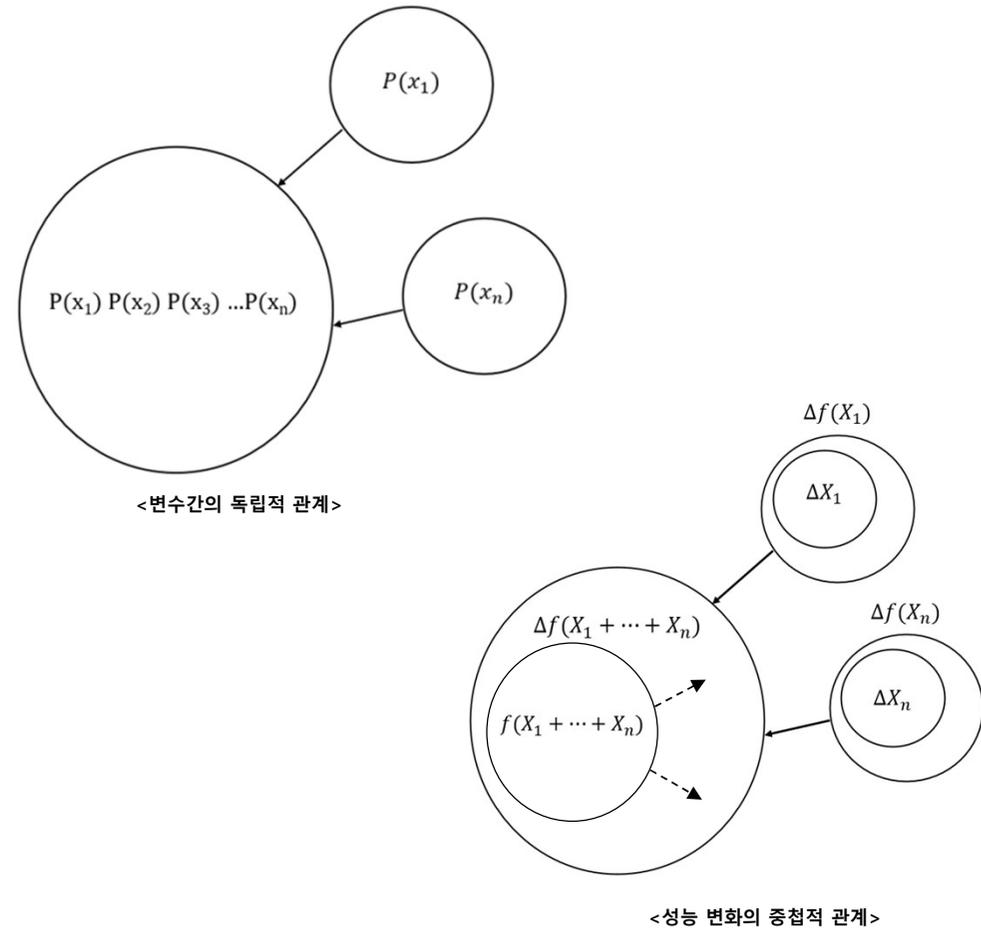
## ❖ 독립성 + 중첩의 원리

### • 시스템의 전체 성능변화

$$f(x_i)_T = \sum_{i=1}^n f(x_i) \quad (4)$$

### • 시스템의 전체 성능변화량

$$\Delta f(x_i)_T = \sum_{i=1}^n \Delta f(x_i) \quad (5)$$



# II. 이전 연구

## ❖ 결합확률밀도함수(변수간의 독립)

$$p(V_1, V_2, \dots, V_n) = p(V_1) p(V_2) p(V_3) \dots p(V_n) \quad (6)$$

## ❖ 변수들의 분포 정의

$$V_i \sim N(\mu, \sigma^2)$$

or

$$V_i \sim U(a, b), \quad \sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$$

## ❖ 계통의 성능 변화량

$$\Delta S_T = \sum_{i=1}^n \Delta f(V_i) = \sum_{i=1}^n (\Delta S_i) \quad (8)$$

## ❖ 민감도분석의 입력을 표준편차로 정의

$$\Delta f(V_i) = \frac{f(\mu+n\sigma) - f(\mu-m\sigma)}{(n-m)\sigma} \quad (9)$$

## ❖ 다수의 변수에 의한 계통의 성능변화

$$S_T = S_{\text{nominal}} + \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (10)$$

## ❖ 중첩의 원리 진단 (실제 열수력 분석)

$$|S_T^{\text{real}} - S_T^{\text{expected}}| \leq \epsilon \quad (11)$$

$\epsilon$ : 허용 오차 값 (Tolerance)

## ❖ 내삽(interpolation)과 중첩을 이용한 예측

$$S_T^{\text{expected}} = S_{\text{nominal}} + \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (12)$$

### Input:

1: D = {X, Y} # Data: X = {input variables}, Y = {system output}

2: k = User\_Input, p = User\_Input # Input sigma interval for deterministic, probabilistic analysis

3: failure\_criteria = User\_Input # User-defined failure criteria

### Procedure:

4: FOR each X<sub>i</sub> in X:

5: X<sub>i</sub> ~ Normal (μ<sub>i</sub>, σ<sub>i</sub><sup>2</sup>), X<sub>i</sub> ~ Uniform (a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>), X<sub>i</sub> ~ Discrete {v<sub>1</sub>, ..., v<sub>k</sub>}

6: FOR each X<sub>i</sub> in X:

7: Define R<sub>i</sub> = {x | x ∈ [μ<sub>i</sub> - kσ<sub>i</sub>, μ<sub>i</sub> + kσ<sub>i</sub>] # Adjust the value by k

8: FOR each X<sub>i</sub> in X:

9: Compute Δx<sub>i</sub> = f(X<sub>nominal</sub>) - f(X<sub>i</sub>) # Individual Performance deviation function

10: X<sub>combined</sub> = Σ Δx<sub>i</sub> for i in {1, ..., n} # total performance deviation

11: IF |Σ Δx<sub>i</sub> - f(X<sub>combined</sub>)| <= tolerance: CONTINUE

12: C = {(x<sub>1</sub>, ..., x<sub>n</sub>) | x<sub>i</sub> ∈ R<sub>i</sub>[p:p] for all i in {1, ..., n}}

13: |C| = Π |R<sub>i</sub>| # total number of combinations

14: FOR each combination (x<sub>1</sub>, ..., x<sub>n</sub>) in C:

15: Y<sub>expected</sub> = f(x<sub>1</sub>, ..., x<sub>n</sub>) # expected performance deviation

16: f"Combination: {combination}, Expected Performance Deviation: {Y<sub>expected</sub>}"

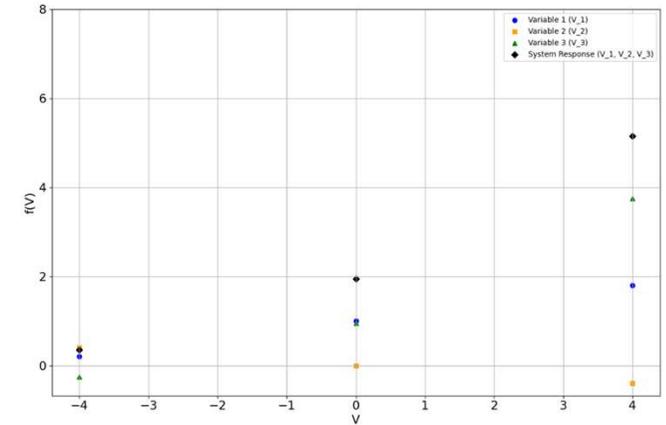
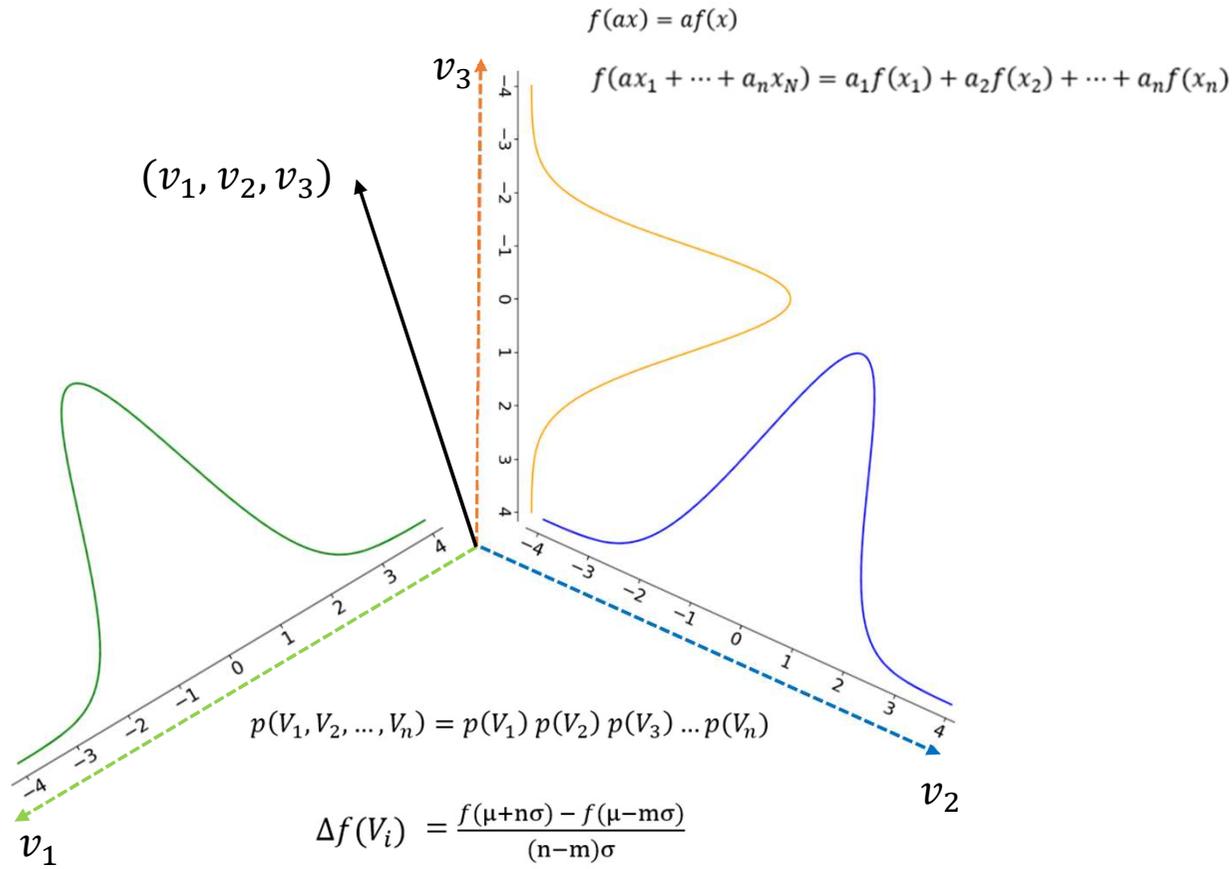
17: FOR each Y<sub>expected</sub> in C:

18: IF Y<sub>expected</sub> <= failure\_criteria: Status = "Failure"

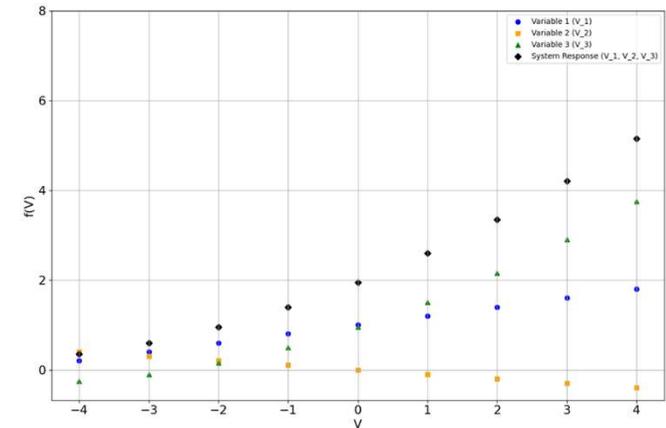
19: ELSE: Status = "Success"

<피동계통의 실패 확률 추정을 위한 의사 코드>

# II. 이전 연구



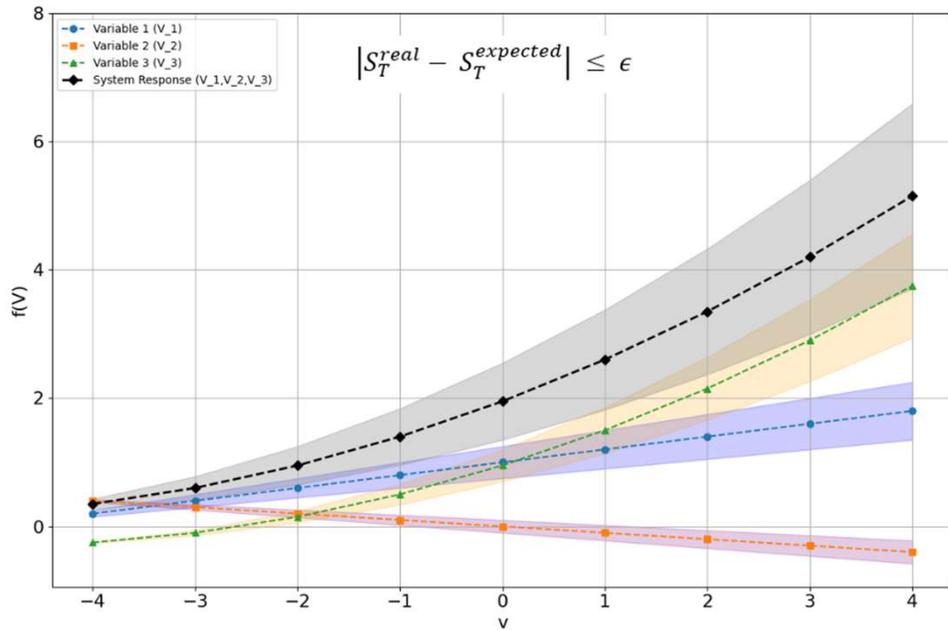
<결정론적 분석을 이용한 중첩의 원리 예시, -4σ, N, +4σ>



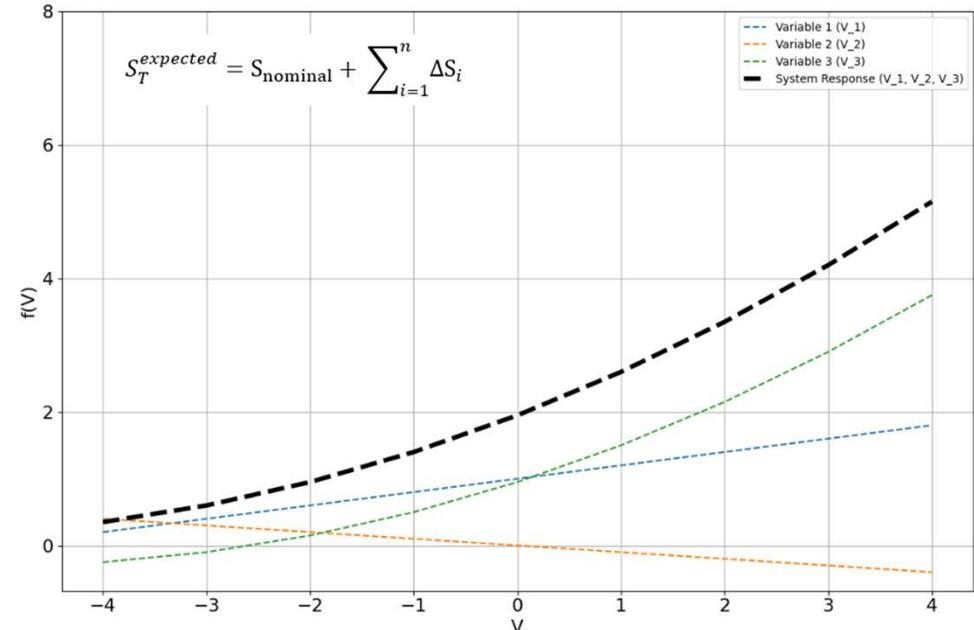
<결정론적 분석을 이용한 중첩의 원리 예시, 27case>

※ Lee, Y., & Heo, G. (2024). Preliminary Study for Estimating Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors. December 3, 2024.

# II. 이전 연구



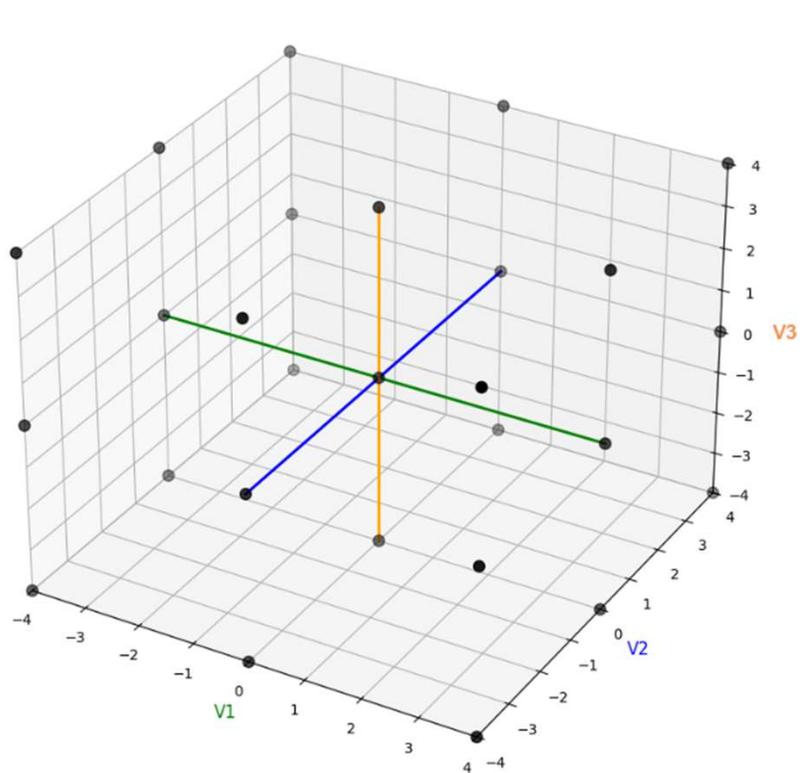
<중점의 원리 진단 예시>



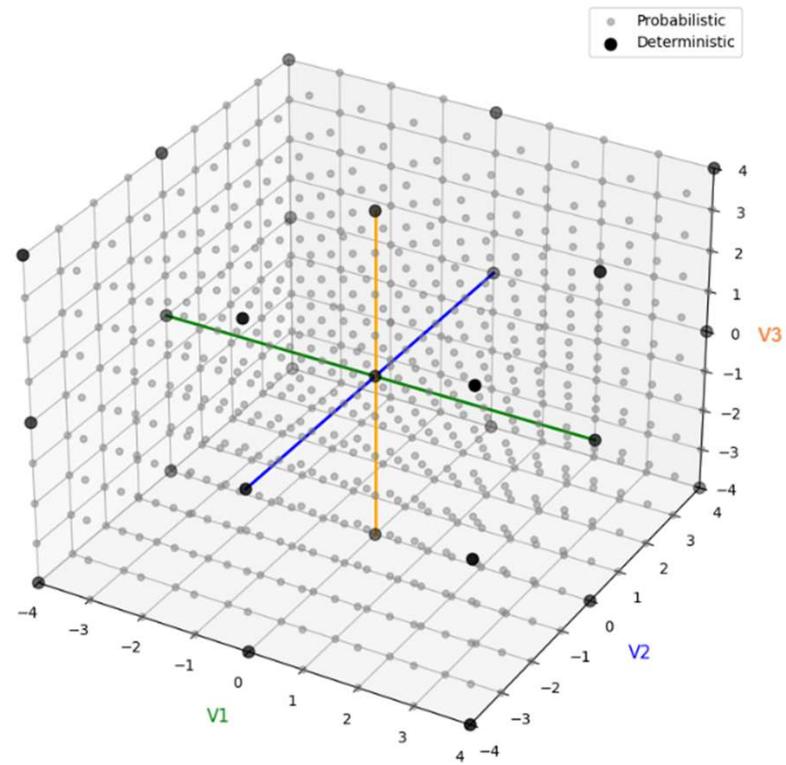
<내삽(interpolation)과 중점을 이용한 성능변화 예측 예시>

※ Lee, Y., & Heo, G. (2024). Preliminary Study for Estimating Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors. December 3, 2024.

# II. 이전 연구



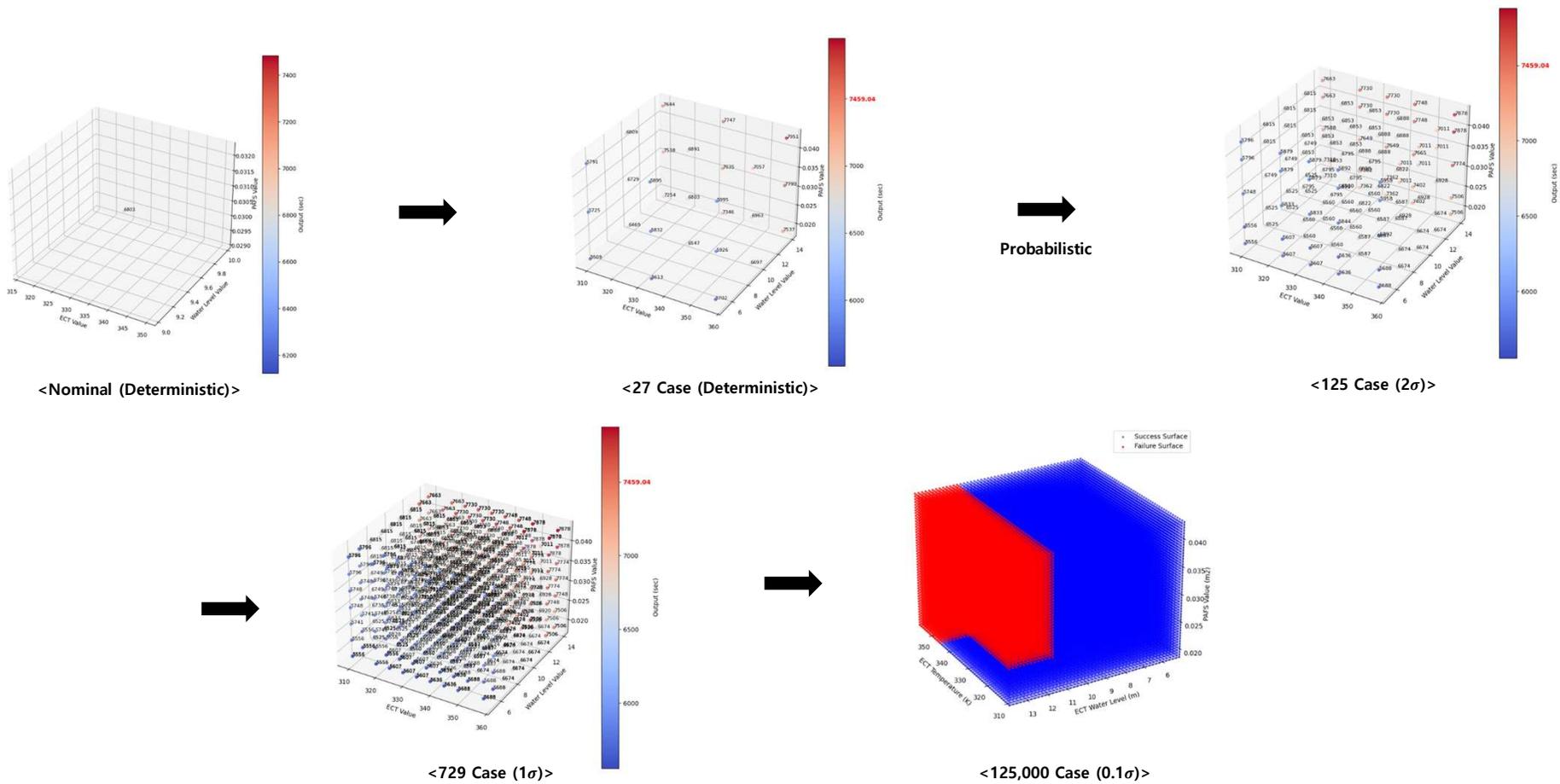
<피동안전계통 결정론적 분석 예시>



<내삽(interpolation)과 중첩을 이용한 예측 예시>

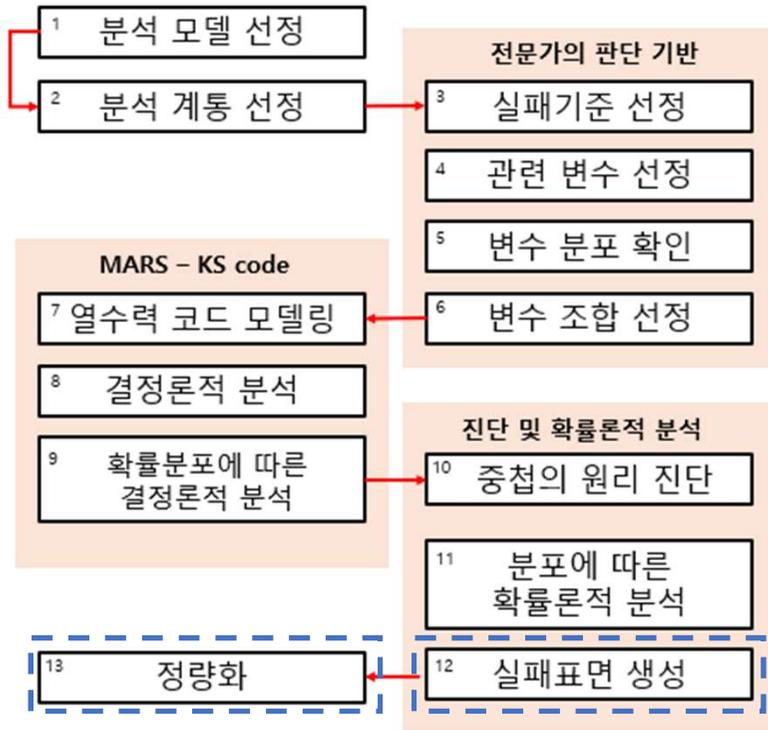
※ Lee, Y., & Heo, G. (2024). Preliminary Study for Estimating Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors. December 3, 2024.

# II. 이전 연구



※ Lee, Y., & Heo, G. (2024). Preliminary Study for Estimating Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors. December 3, 2024.

# III. 방법론



<알고리즘 다이어그램>

## ❖ 상황 선정

1. 분석모델 선정 : 분석할 모델을 선정.
2. 분석 계통 선정 : 분석할 모델에 채택되어 있는 피동안전계통을 선정

## ❖ 전문가의 판단 기반

3. 실패기준 선정 : 선정된 상황을 기반으로 피동안전계통의 실패기준을 선정
4. 관련 변수 선정 : 선정된 상황을 기반으로 피동안전계통의 성능에 영향을 미칠 수 있다고 판단된 변수를 선정
5. 변수 분포 확인 : 이전에 선정된 변수들을 실험기반 혹은 참고문헌을 참고하여 각 변수들의 분포를 확인
6. 변수 조합 선정 : 선정된 변수들의 조합 선정하여 경우의 수를 확인

## ❖ MARS - KS code

7. 열수력 코드 모델링 : 검증된 최적해석코드를 활용하여 기준조건에 대한 피동안전계통 성능평가를 수행
8. 결정론적 분석 : 상세모델링을 통해 기준조건에 대한 결정론적 성능평가를 실시. 명목 값에 대한 조건에서 기본적인 성능을 파악
9. 확률분포에 따른 결정론적 분석 : 선정된 변수들의 조합을 이용하여 확률분포에 따른 결정론적 분석을 수행

## ❖ 진단 및 확률론적 분석

10. 중첩의 원리 진단 : 단일 변수의 변화와 다수의 변수가 동시에 변할 때의 성능변화를 확인하여 중첩의 원리가 적용되는지 진단하고, 그에 따른 잔차 혹은 오차 확인
11. 분포에 따른 확률론적 분석 : 중첩의 원리를 활용하여 선정된 전체 분포의 성능변화를 확률론적 접근법을 통해 추정

12. 실패표면 생성 : 중첩의 원리의 잔차를 실패기준에 보수적인 접근 방법을 적용하여 실패표면을 생성 → RMSE

## ❖ 정량화

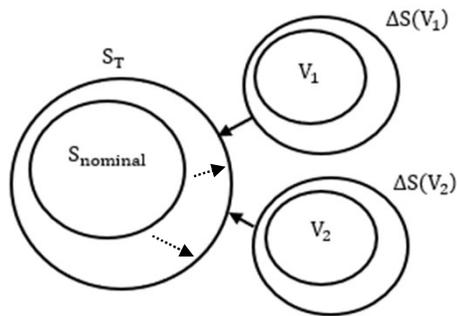
13. 정량화 : 전체 공간의 실패표면에 Monte-Carlo 방법을 활용하여 정량화를 수행 → Importance Sampling

# III. 방법론

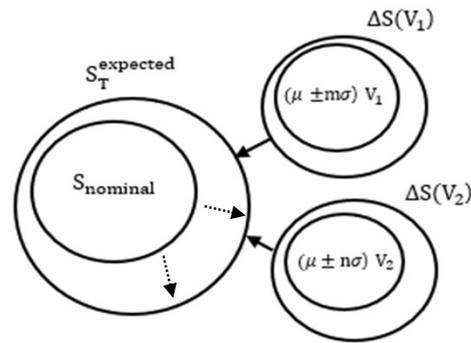
## 3.1. Generate a failure surface

### ❖ 두개의 변수( $V_1, V_2$ )를 이용한 예제

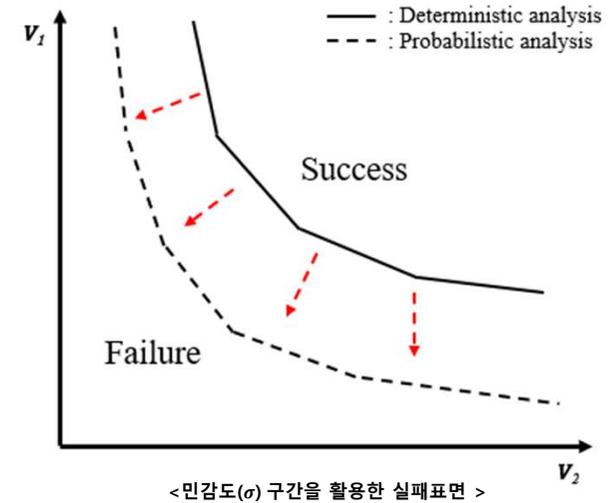
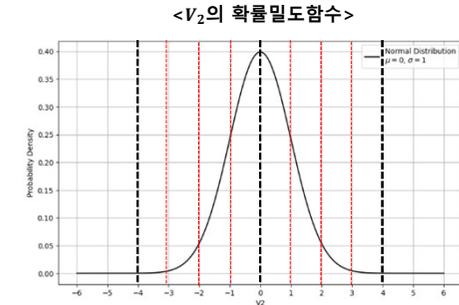
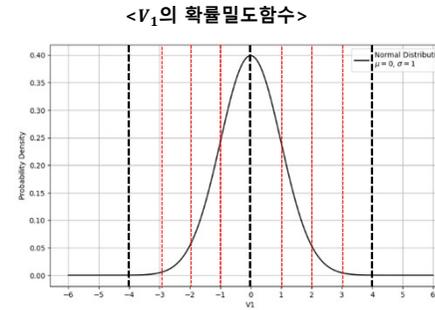
- $V_1, V_2 \sim N(\mu, \sigma^2)$
- $S_{nominal}$  : 명목값에 의한 계통 성능변화
- $S_1, S_2$  : 단일 변수  $V_1, V_2$  의 민감도에 의한 성능변화
- $S_T$  : 변수 두개의 민감도에 의한 성능변화



$$S_T = S_{nominal} + (\Delta S_1 + \Delta S_2)$$



$$S_T^{expected} = S_{nominal} + \{\Delta(\mu \pm n\sigma)S_1 + \Delta(\mu \pm m\sigma)S_2\}$$



# III. 방법론

## 3.1. Generate a failure surface

### ❖ 실패표면에 보수적인 접근법 적용

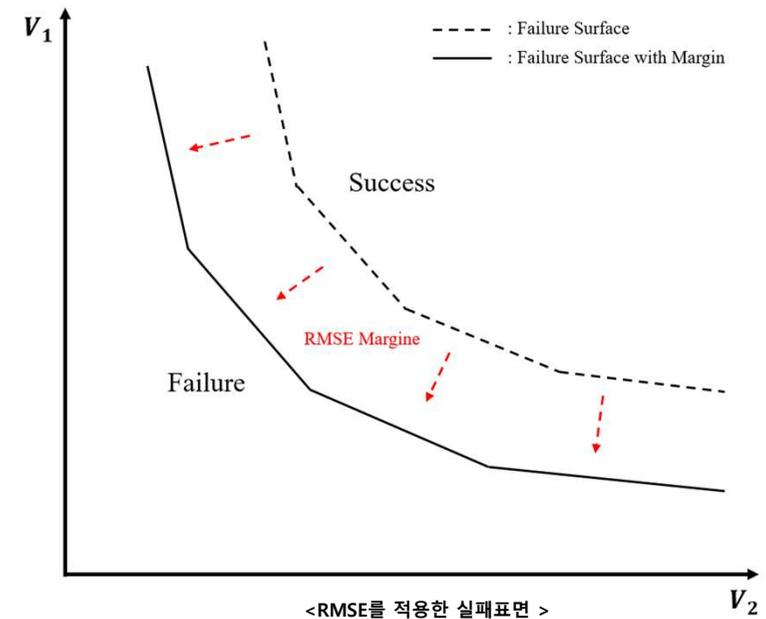
- 예측 사례 수가 증가할수록 보수성 감소
- 실제 실패 경계에 근접한 표면 생성 가능

### ❖ RMSE(Root Mean Square Error) 기반 Margin 적용

- 실패/성공을 단순 이분법적으로 분류하여 기존 Event Tree에 적용은 어려울 수 있음
- 따라서, 검증된 중첩 원리를 기반으로 Margin을 설정하여 보수적 실패표면 보완

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

- $Y_i$  = 관측값      •  $\hat{Y}_i$  = 예측값



# III. 방법론

## 3.2. Quantification with the Importance Sampling

### ❖ Importance Sampling 필요성

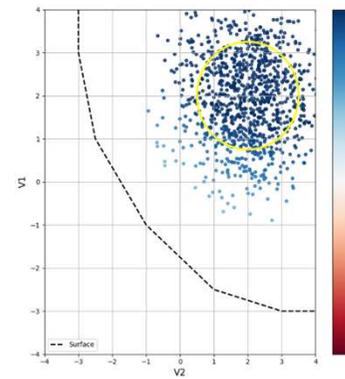
- 실패표면이 생성된 이후, 몬테카를로 샘플링을 통해 변수공간을 무작위로 샘플링
- 피동안전계통의 특성상 기존 확률분포에서의 샘플링만으로는 실패확률이 매우 작아 수렴이 어려움
- 이에 따라 **Importance Sampling 기법**을 도입하여 효율적으로 실패확률을 추정

### ❖ Importance Sampling 개요

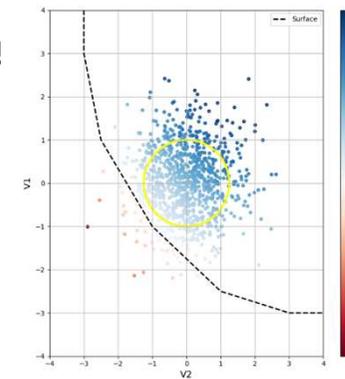
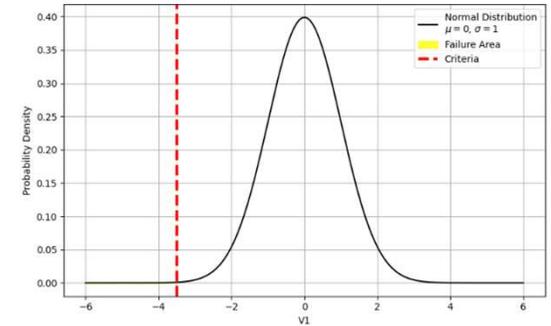
- 무작위 샘플링과 달리, **실패 영역에 샘플을 집중**시키기 위해 변수의 확률분포를 조정

$$P_{\text{failure}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I(S_k \geq S_{\text{failure}})$$

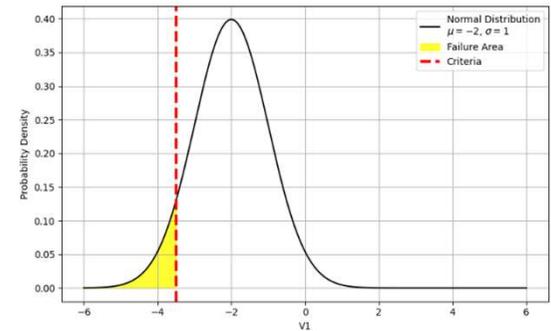
- 샘플 결과에 가중치(Weight)를 부여하여 기존의 확률분포에 보정



<Random Sampling 예시 >



<Importance Sampling 예시 >



# III. 방법론

## 3.2. Quantification with the Importance Sampling

### ❖ Importance Sampling 기반 실패확률 계산

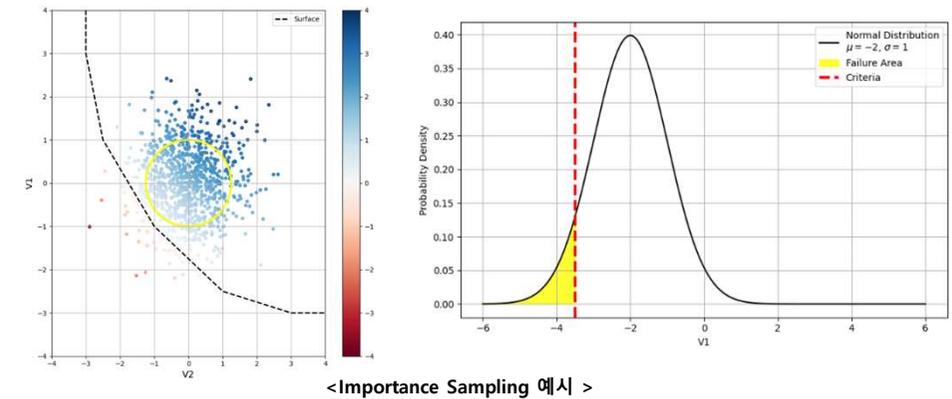
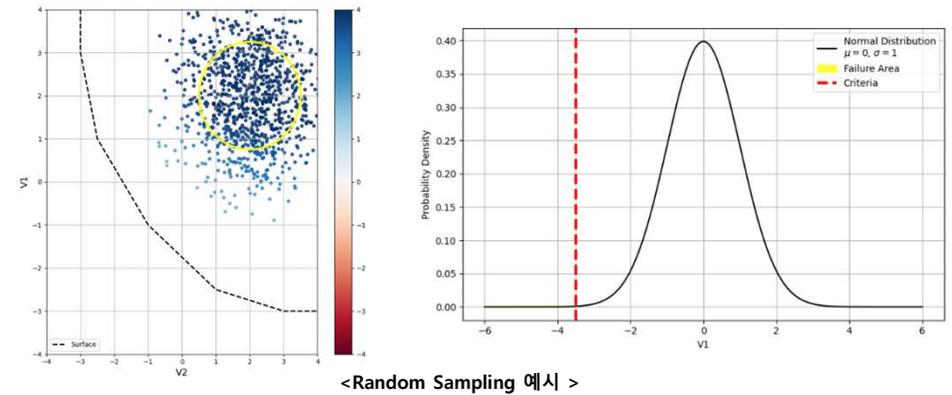
$$P_{failure} = \frac{Weight_{failure}}{Total_{weights}} = \frac{\sum_{i=1}^{10^n} weight_i \cdot Failure_i}{\sum_{i=1}^{10^n} weight_i}$$

- 실패 샘플의 가중치 합 / 전체 가중치 합으로 실패확률 보정

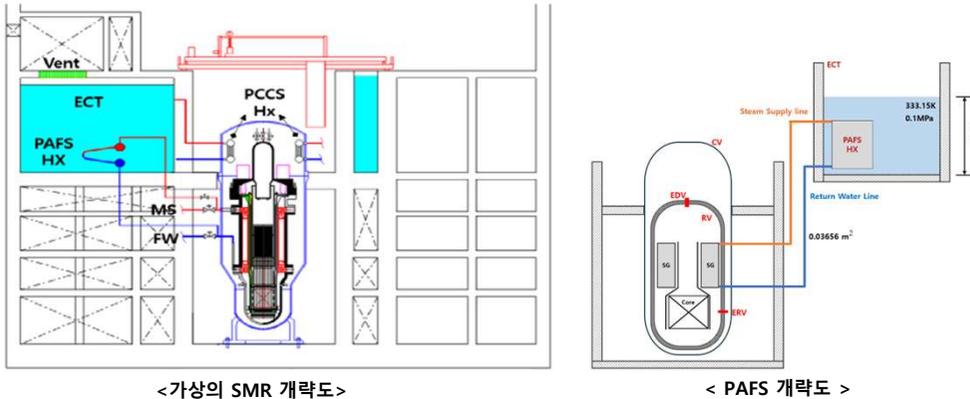
### ❖ 가중치 계산

$$\omega(x) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_i^2}\right)}$$

- 기존의 확률밀도함수(PDF)와 변경된 Importance 분포의 PDF 비율
- 이를 통해 각 샘플의 기존 분포상 기여도 보정



# IV. 사례연구



<가상의 SMR 개략도>

< PAFS 개략도 >

General Transient	Reactor Trip	DHR by PAFS	PSV Opening	Feed by PECCS	GNV Cooling By PCCS	Seq#	State	
GIE-GTRN	RT	PAFS	PSV	PECCS	PCCS			
							1	OK
							2	OK
							3	CD
							4	CD
							5	CD
							6	OK
							7	CD
							8	CD
							9	CD

<과도사건 예상 사건수목>

$$[\tau(at P_{SG} = 4Mpa)] = 7500 \text{ sec}$$

과도사건 시 증기발생기의 압력이 4MPa 까지 도달하는 시간이 7500 초

<APR+ PAFS 관련 주요변수 >

번호	관련 변수	변수 이름	단위
1	노심 관련 변수	Core power	MW
2		Decay heat	MW
3	열전달 계수 관련 변수	Dittus-Boelter HTC (liquid)	
4		Dittus-Boelter HTC (vapor)	
5		Chen-nucleate boiling HTC	
6		Bromley film boiling heat transfer	
7		Groeneveld-CHF	
8		Chen transition boiling criteria	
9	초기 계통 상태 변수	Initial PZR Pressure	MPa
10		Initial RCS mass flow rate	kg/s
11		Initial cold leg temperature	K
12		Initial PCCT temperature	K
13		Initial PCCT water level	m
14	압력강하 및 손실계수 변수	Pressure drop coefficient in PAFS	
15		Pressure drop coefficient in Primary loop	

<분석 변수 데이터 분포>

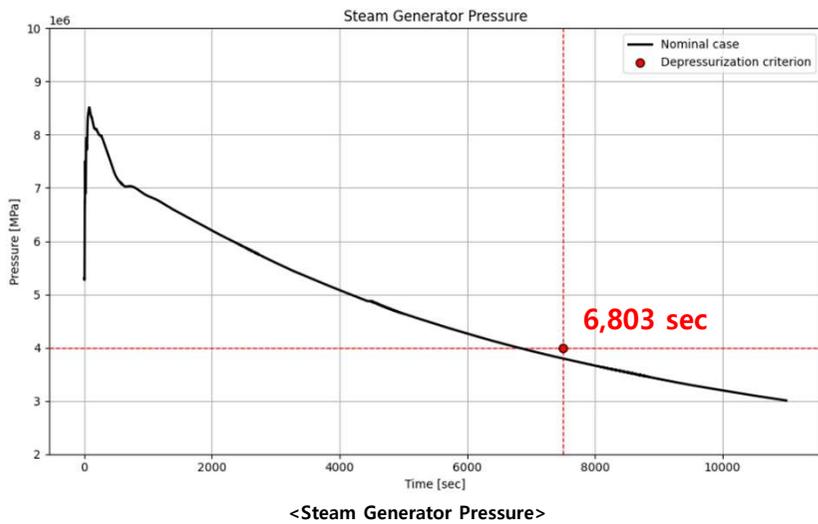
변수	명목 값	확률 분포	범위
ECT_T	313.15K	Truncated Normal ( $\mu : 313.15, \sigma : 6$ )	[273.15 - 373.15]
ECT_L	9.5m	Truncated Normal ( $\mu : 9.5, \sigma : 1.2$ )	[3 - 15]
PIPE_A	0.030656m2	Truncated Normal ( $\mu : 0.030656, \sigma : 0.003054$ )	[0.01 -0.05]

※ Lee, Y., & Heo, G. (2024). Preliminary Study for Estimating Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors. December 3, 2024.

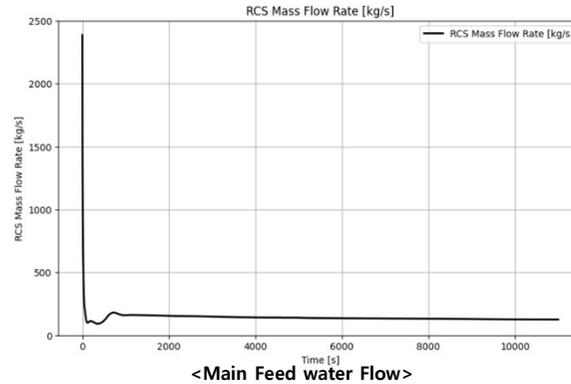
※ Hwang, M. J., Marigomena, R., Yoo, T. H., Kim, Y. S., Sim, S. K., & Bang, Y. S. Uncertainty Evaluation of a Postulated LBLOCA for APR+ using KINS Realistic Evaluation Methodology and MARS-KS. 2014.

# IV. 사례연구

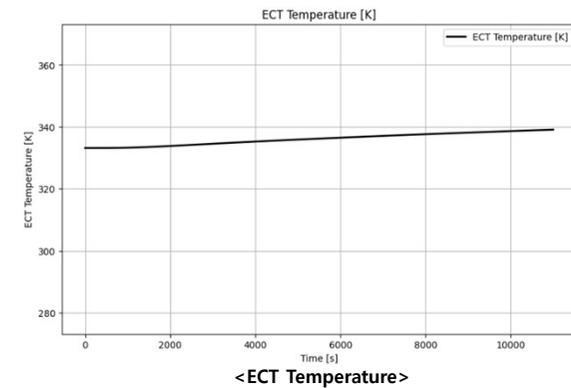
## ❖ MARS-KS



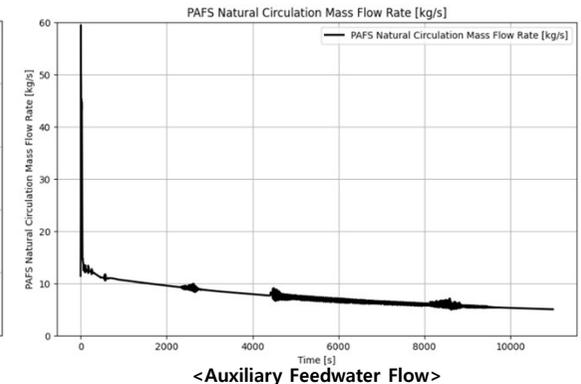
- 과도사건 발생 → 원자로트립 → PAFS 작동
- 증기발생기 압력 4MPa 까지 감압되는 시간 약 6,803 초



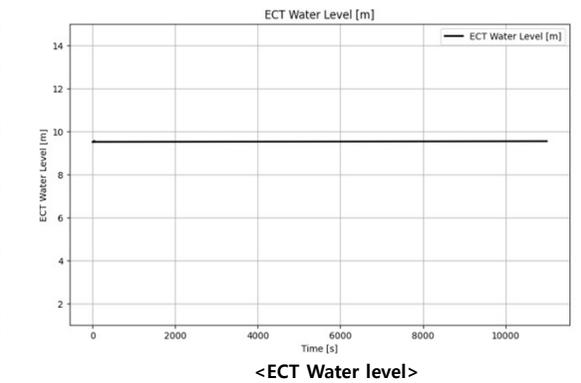
- 주급수상실



- ECT (333.15K) 온도 큰 변화 없음



- PAFS가 작동하여 보조급수 공급



- ECT 수위 (9.5m) 큰 변화 없음

# IV. 사례연구

<관측값과 예측값의 절대오차와 상대오차>

CASE	T(K)	L (m)	A (m2)	Absolute Error(sec)	Relative Error (%)
5	N	+4σ	+4σ	24 sec	0.31%
6	N	+4σ	-4σ	33 sec	0.44%
8	N	-4σ	+4σ	25 sec	0.42%
9	N	-4σ	-4σ	<b>37 sec</b>	<b>0.66%</b>
11	+4σ	N	+4σ	6 sec	0.08%
12	+4σ	N	-4σ	10 sec	0.14%
13	+4σ	+4σ	N	4 sec	0.05%
14	+4σ	+4σ	+4σ	<b>68 sec</b>	<b>0.86%</b>
15	+4σ	+4σ	-4σ	2 sec	0.025%
16	+4σ	-4σ	N	<b>66 sec</b>	<b>1.09%</b>
17	+4σ	-4σ	+4σ	<b>85 sec</b>	<b>1.29%</b>
18	+4σ	-4σ	-4σ	34 sec	0.59%
20	-4σ	N	+4σ	8 sec	0.11%
21	-4σ	N	-4σ	4 sec	0.06%
22	-4σ	+4σ	N	23 sec	0.30%
23	-4σ	+4σ	+4σ	5 sec	0.06%
24	-4σ	+4σ	-4σ	<b>51 sec</b>	<b>0.70%</b>
25	-4σ	-4σ	N	33 sec	0.57%
26	-4σ	-4σ	+4σ	<b>55 sec</b>	<b>0.94%</b>
27	-4σ	-4σ	-4σ	7 sec	0.12%

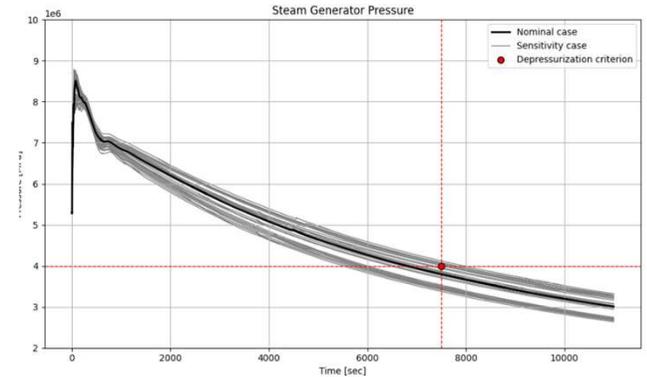
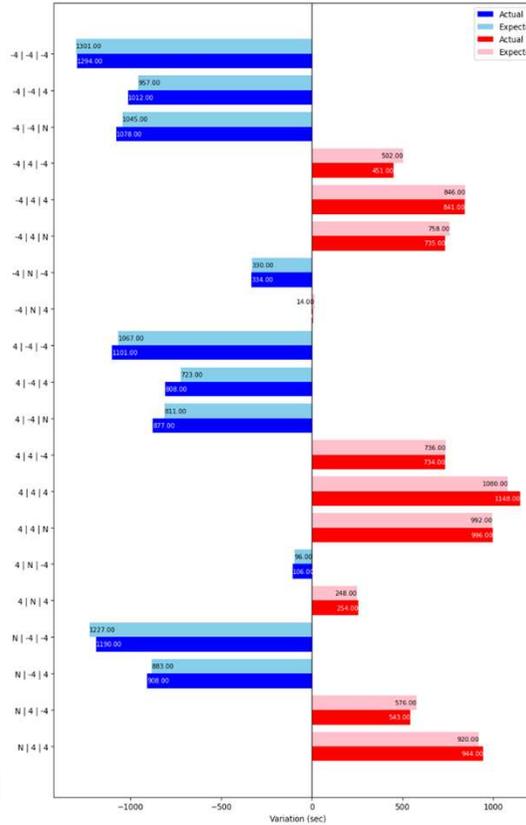
• 절대 오차(sec) = |관측값 - 예측값|

• 상대 오차(%) =  $\left| \frac{\text{관측값} - \text{예측값}}{\text{관측값}} \right| \times 100$

## ❖ 중첩의 원리 진단 관찰

• 중첩의 원리가 완벽히 적용되는 것은 아니지만 허용오차범위 **이내의 값**이라고 판단함

<관측값과 예측값 비교 그래프>



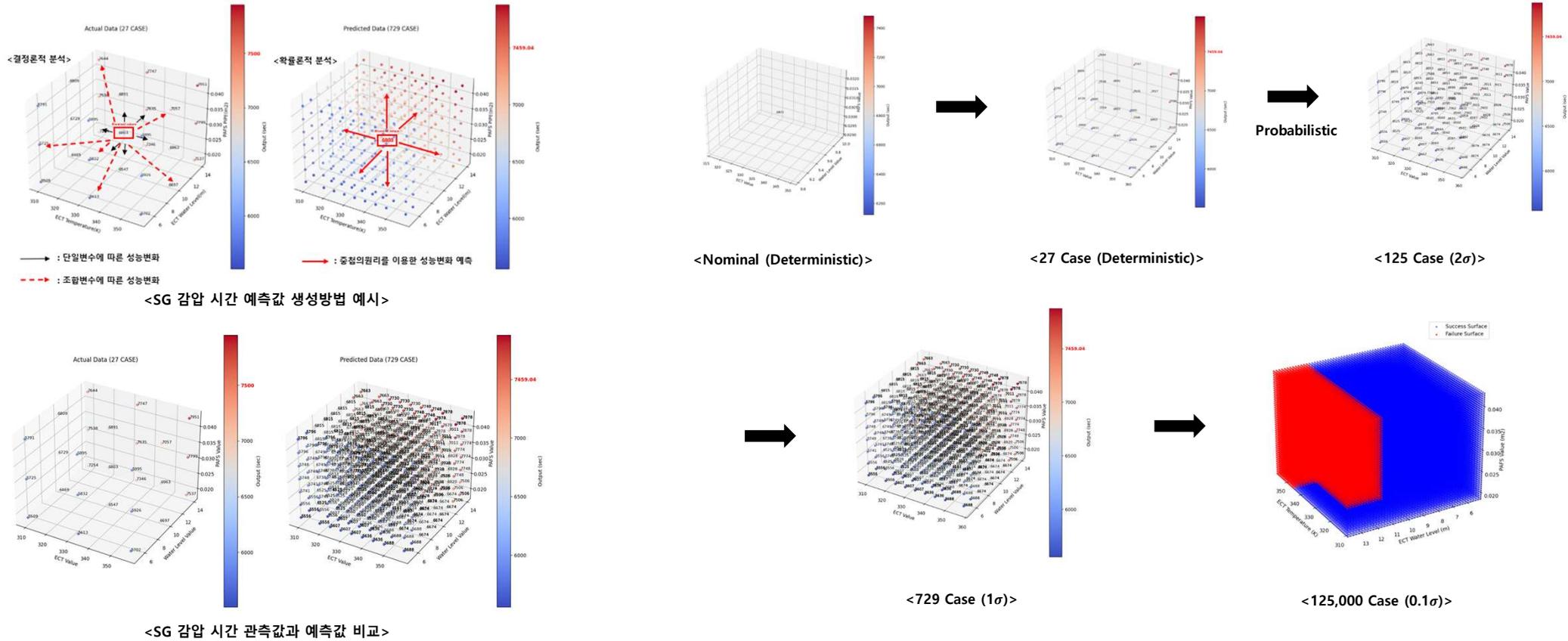
<실제 관측 데이터 (27 Case) SG 압력>

<특정 범위의 중첩 원리 진단>

Range (sec)	Value (MPa)	RMSE (sec)	R <sup>2</sup>
0 - 1000	7	135.3	0.469
1001 - 6000	5.3	67.3	0.975
6001 - 10000	4	<b>40.96</b>	0.997

- $Y_i =$  관측값
- $\bar{Y} =$  관측값의 평균
- $\hat{Y}_i =$  예측값
- $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$
- $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$

# IV. 사례연구



※ Lee, Y., & Heo, G. (2024). Preliminary Study for Estimating Failure Probability of Passive Safety Systems in Small Modular Reactors. December 3, 2024.

# IV. 사례연구

## ❖ 실패기준에 RMSE 적용

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

$$[\tau(at P_{SG} = 4Mpa)] = 7500 \text{ sec}$$

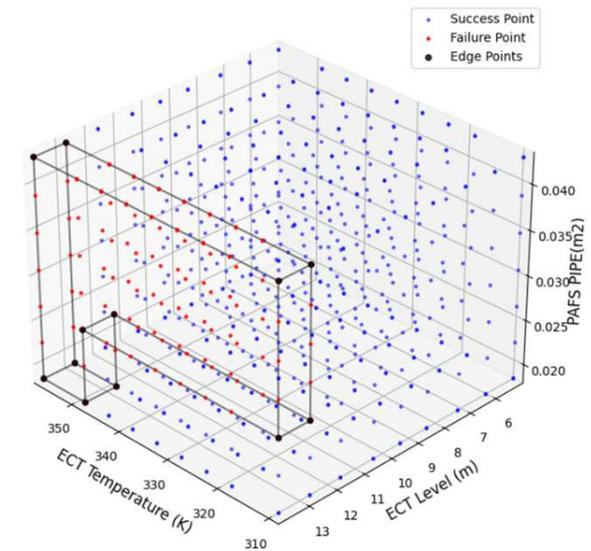


**RMSE : 40.96 sec**

$$[\tau(at P_{SG} = 4Mpa)] = 7459.04 \text{ sec}$$

<CONVEX HULL을 이용한 실패영역의 경계점>

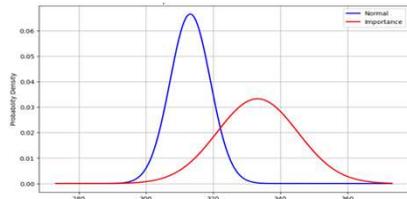
Edge points	ECT_T (K)	ECT_L (m)	PAFS_A (m <sup>2</sup> )
1	357.15	12.8	0.42918
2	357.15	13.9	0.42918
3	309.15	13.9	0.42918
4	309.15	12.8	0.42918
5	357.15	12.8	0.018394
6	357.15	13.9	0.018394
7	348.15	13.9	0.018394
8	348.15	12.8	0.018394
9	348.15	12.8	0.26594
10	348.15	13.9	0.26594
11	309.15	13.9	0.26594
12	309.15	12.8	0.26594



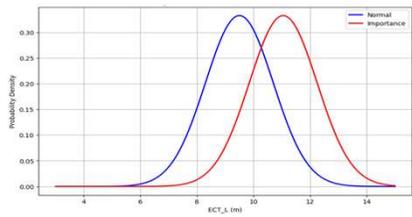
<CONVEX HULL을 이용한 실패영역의 경계>

- 볼록껍질 (Convex Hull) : 경계표면에 집합의 점들을 포함하는 가장 작은 볼록 다각형 또는 볼록다면체

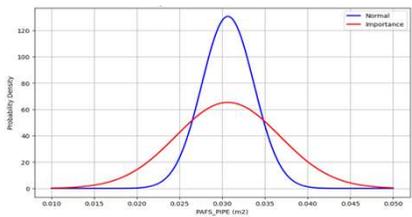
# IV. 사례연구



< ECT\_T Importance sampling distribution >



< ECT\_L Importance sampling distribution >



< PAFS\_pipe Importance sampling distribution >

$$ECT\_T \sim N(313.15, 6^2)$$

$$ECT\_L \sim N(9.5, 1.2^2)$$

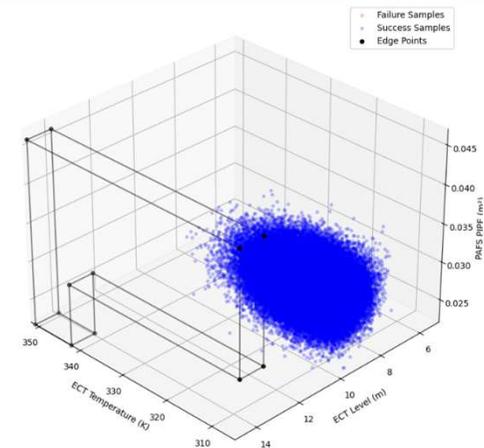
$$PIPE\_A \sim N(0.030656, 0.003054^2)$$



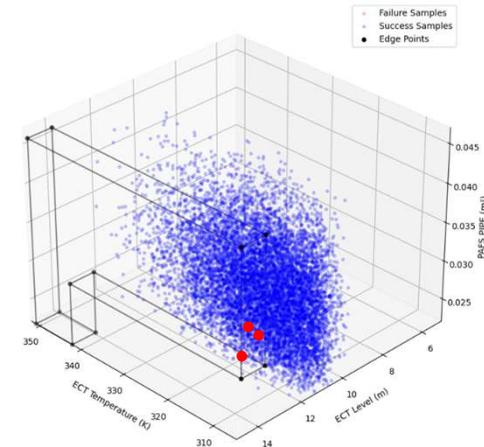
$$ECT\_T\_importance \sim N(333.15, 12^2)$$

$$ECT\_L\_importance \sim N(11.05, 1.2^2)$$

$$PIPE\_A\_importance \sim N(0.030656, 0.006108^2)$$



< Random Sampling 예시 >



< Importance Sampling 예시 >

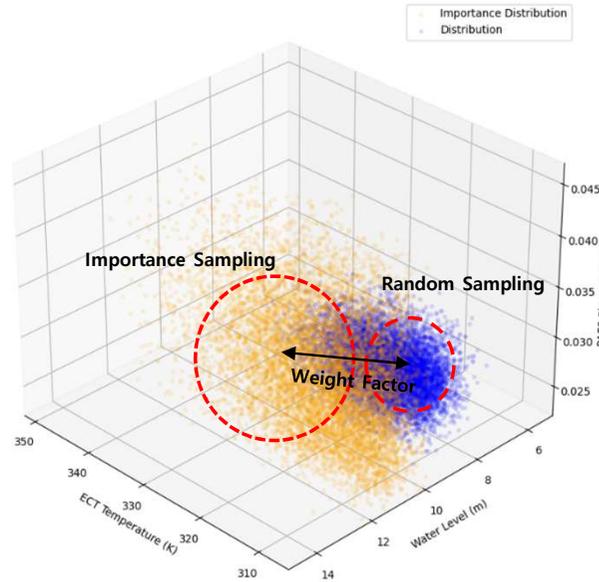
# IV. 사례연구

## ❖ 가중치 (Weight Factor)

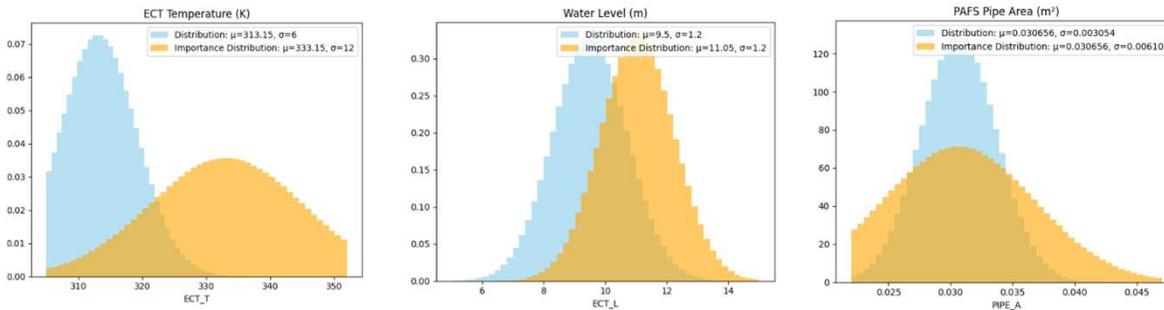
$$\omega(x) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_i^2}\right)}$$

## ❖ 실패확률 계산

$$P_{failure} = \frac{Weight_{failure}}{Total_{weights}} = \frac{\sum_{i=1}^{10^8} weight_i \cdot Failure_i}{\sum_{i=1}^{10^8} weight_i}$$



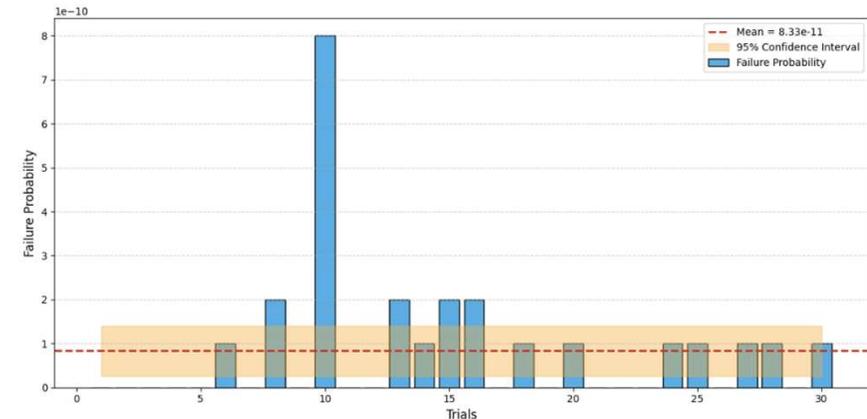
<Random Sampling vs Importance Sampling 예시 >



## ❖ 정량화 결과

$8.33 \times 10E-11 \pm 1.53 \times 10E-10$   
(95% 신뢰도 구간, 30회)

➡ Only this Case With Modified Conditions



<10<sup>8</sup>번을 30회 시행 >

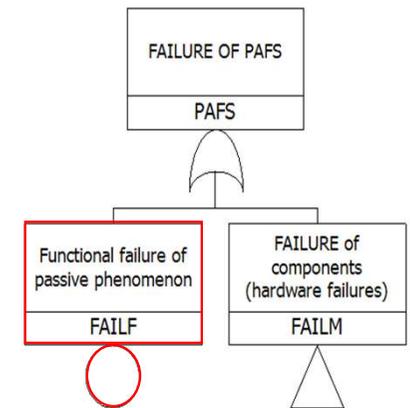
# V. 사례연구

## ❖ 결론

- 본 연구는 SMR에서의 PAFS의 기능적 실패 확률을 추정하기 위해 **수학적 가정으로 단순화하여** 열수력 시뮬레이션 횟수에 대한 시간적 비용을 개선하고자 예측하였음
- **MARS-KS**를 활용하여 총 **27회**의 시뮬레이션이  $\pm 4$  표준편차 범위 내에서 3개의 변수에 대해 수행되었으며, 변수 독립성과 중첩 원리의 적용 가능성을 검증하기 위해 오차를 평가하였음
- 이를 기반으로 보간법을 통해 증기발생기 감압 시간에 대한 **729회의 사례를 예측하여** 실패표면을 이용한 정량화를 수행하였음
- 중첩의원리 기법을 기반으로 피동안전계통의 기능적 실패확률을 정량화하는 데 필요한 **실패표면을 생성하고, 중요도 샘플링(Importance Sampling)**을 적용하여 샘플링 시간적 비용을 개선하는 데 중점을 두고 있음

시뮬레이션 횟수= $N^3$

$N =$  분석할 변수의 개수  
 $3 = [-4\sigma, nominal, +4\sigma]$



< 기능적 실패를 OR게이트로 고장수목에 적용 >

# V. 결론

## ❖ 논의점

- 본 방법은 **중첩 원리가 적용되는 영역에 국한될 수 있으며**, 변수 간 **상호의존성**은 고려하지 못한다는 한계가 존재함
- PSA 체계에 통합하기 위한 구체적인 방법은 없는 실정이며, 사고의 종류 혹은 표제에 따라 열수력학적 조건이 다르게 변하기 때문에 **피동안전계통 자체만의 실패확률**을 정량화 하기 어려움
- 실패표면 생성 과정에서의 불확실성 고려에 한계가 있으며, 또한 중요도 분포(importance distribution)가 실제 분포와 크게 차이가 날 경우, **샘플링 과정에서 편향이 발생하여 결과의 정확도가 저하될 수 있음**
- 기능적 실패확률 정량화의 결과를 **비교 검증 할 방법이 현재 없는 실정임**
- **비록 보수적인 접근을 채택**하였지만, 본 연구는 SMR의 기능적 실패 확률을 효율적으로 도출할 수 있는 실용적인 방법을 제공함으로써 **기초 시도**로 기여할 것으로 기대됨

# Thank for your attention

Yongjoon Lee  
(Presenter)  
[jkh7542@gmail.com](mailto:jkh7542@gmail.com)

Gyunyoung Heo\*  
(Corresponding Author)  
[gheo@khu.ac.kr](mailto:gheo@khu.ac.kr)

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Regulatory Research Management Agency for SMRS (RMAS) and the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (No. 1500-1501-409).

This research was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. GTL24031-500).