

2023 Korean Nuclear Society Spring Meeting
Jeju, Korea, 18-19 May, 2023



Comparison of various methods for Seismic PSA quantification (지진 PSA 정량화 방법들 정확도 측면)

2023.5.18

Sang Hoon HAN



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

개요 및 목차

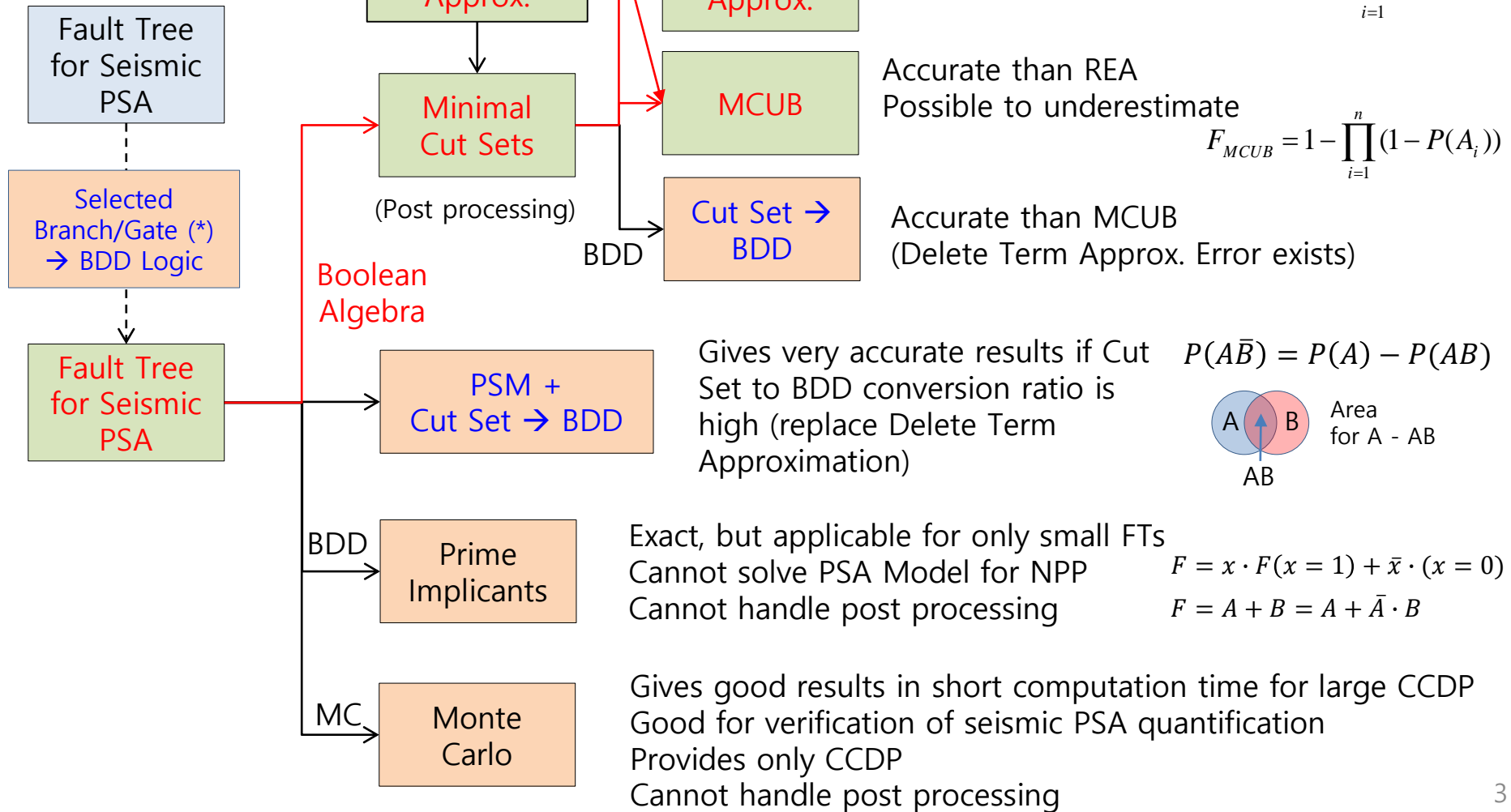
- 개요
 - 최근 개발/소개된 다양한 PSA 정량화 방법들을 이용
 - Seismic PSA 시범 모델에 대해 정량화를 수행
 - Seismic PSA 정량화의 정확도 비교

- 목차
 1. PSA 정량화 방법들
 2. Seismic PSA 참고사항
 3. Seismic PSA 정량화 시험
 4. 요약

1. PSA 정량화 방법들

REA : Rare Event Approximation
 MCUB : Minimal Cut Upper Bound
 BDD : Binary Decision Diagram
 PSM : Probability Subtraction Method
 (*) Success Branch → BDD : Negate_Down in FTREX

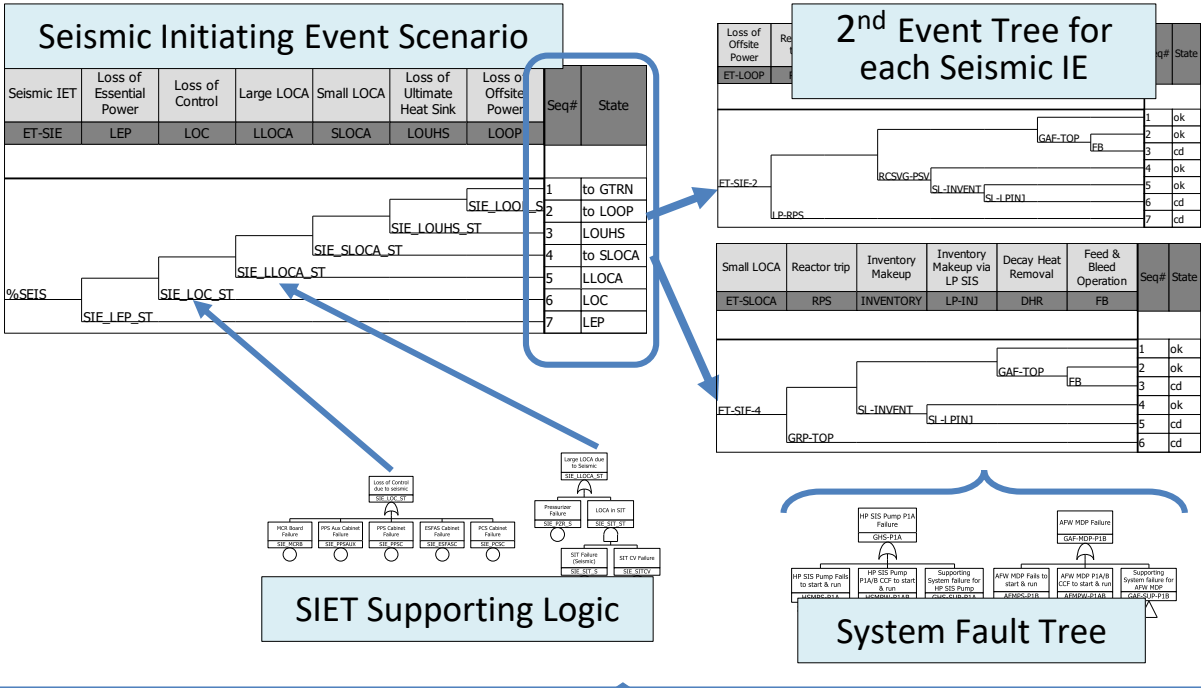
PSA 정량화 오차 원인



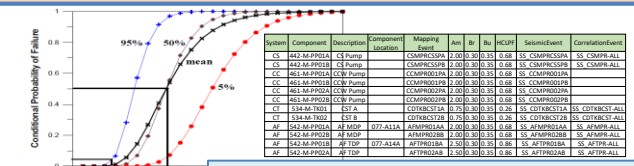
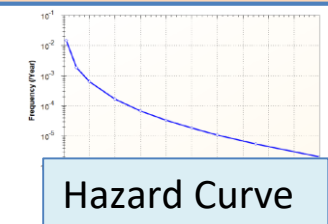
2. Seismic PSA 참고 사항

Typical Seismic PSA Procedure

Plant Response Model

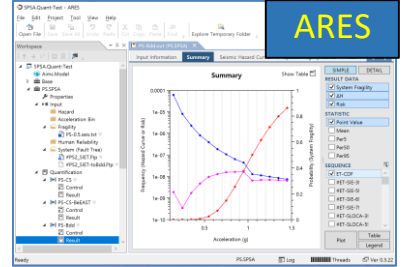
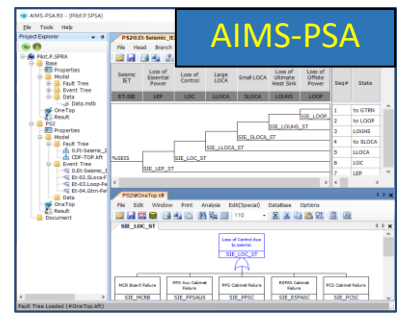


Seismic Hazard & Fragility Data



Seismic Fragility + Correlation

- ### Seismic PSA 정량화 특징
- Fragility → SSC 고장 확률 → 높은 고장 확률
 - Seismic Correlation → Seismic CCF
 - Hazard → 지진 빈도
 - Hazard Bin 별 계산
 - Large Uncertainty



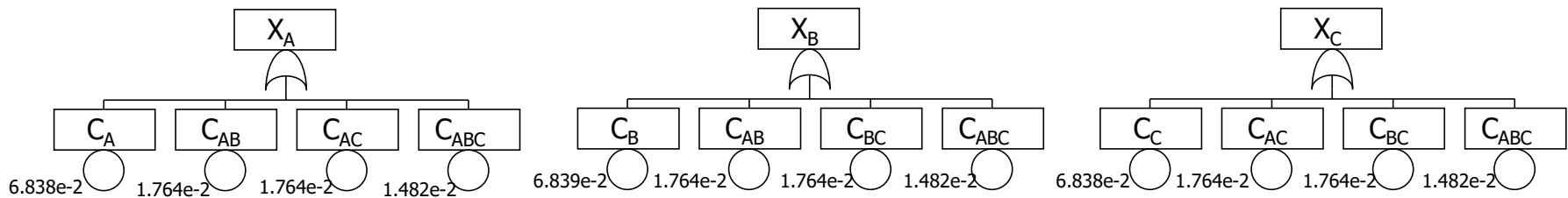
Seismic Correlation → Seismic CCF Approach

- Seismic Correlation in Redundant Components
 - 현재 PSA 에서는 Redundant Component 들에 대해 Complete Dependency 가정
- Partial Seismic Correlation 에 대해
 - Seismic Correlation → CCF Style 로 변환하는 기법 개발 (*)
 - PSA 모델과 결합

Seismic CCF Model for each Component

- $X_i = C_i + \sum_{j=1, j \neq i}^m C_{ij} + \sum_{j=1, j \neq i}^m \sum_{k=j+1, k \neq i}^m C_{ijk} + \dots$
 - EX) $X_A = C_A + C_{AB} + C_{AC} + C_{ABC}$
 - C_e : CCF Events (# of CCF Events = $2^m - 1$)

Xi	Ce (CCF Events)						
A	A	AB	AC	ABC			
B	B	AB	BC	ABC			
C	C	AC	BC	ABC			
A+B	A	B	AB	AC	BC	ABC	
A+C	A	C	AB	AC	BC	ABC	
B+C	B	C	AB	AC	BC	ABC	
A+B+C	A	B	C	AB	AC	BC	ABC



*) Woo Sik JUNG, Kevin Hwang, Seong Kyu Park, A new methodology for modeling explicit seismic common cause failures for seismic multi-unit probabilistic safety assessment, Nuclear Engineering and Technology 52 (2020)

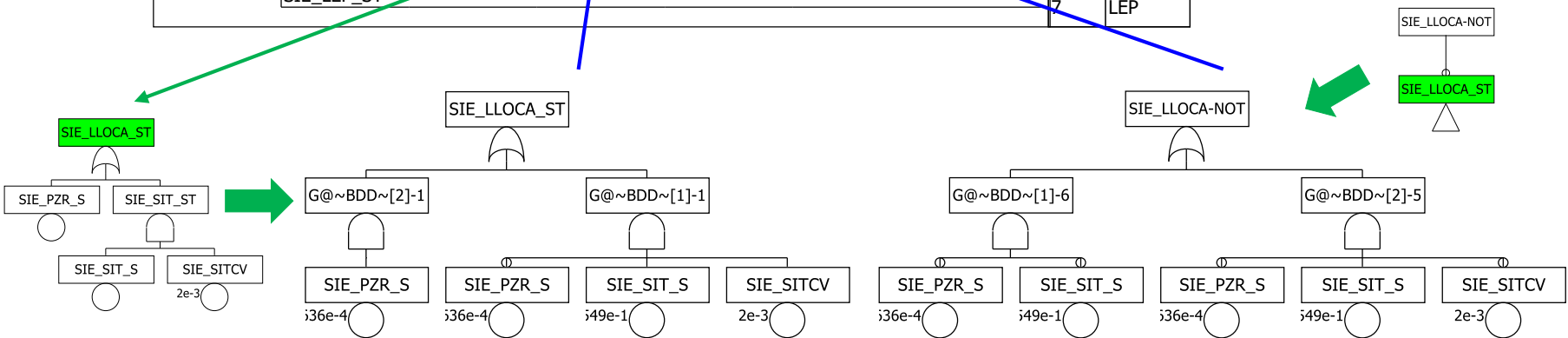
Partial BDD : SPSA 정량화 오차 저감

- 원하는 Gate 를 BDD 로 변환
- 원안위 다수기 과제 지진 정량화 (Negate_Down 기능)

• Selected Branch/Gate → BDD 변환

- SIET : Success/Failure Branch 모델을 BDD 로 변환 → FT 변환
- Secondary ET : Seismic Failure 포함, 기존 PSA 방식 (Delete Term)

Seismic IET	Loss of Essential Power	Loss of Control	Large LOCA	Small LOCA	Loss of Ultimate Heat Sink	Loss of Offsite Power	Seq#	State
ET-SIE	LEP	LOC	LLOCA	SLOCA	LOUHS	LOOP		
							1	to GTRN
							2	to LOOP
							3	LOUHS
							4	to SLOCA
							5	LLOCA
							6	LOC
							7	LEP



3. Seismic PSA 정량화 시험

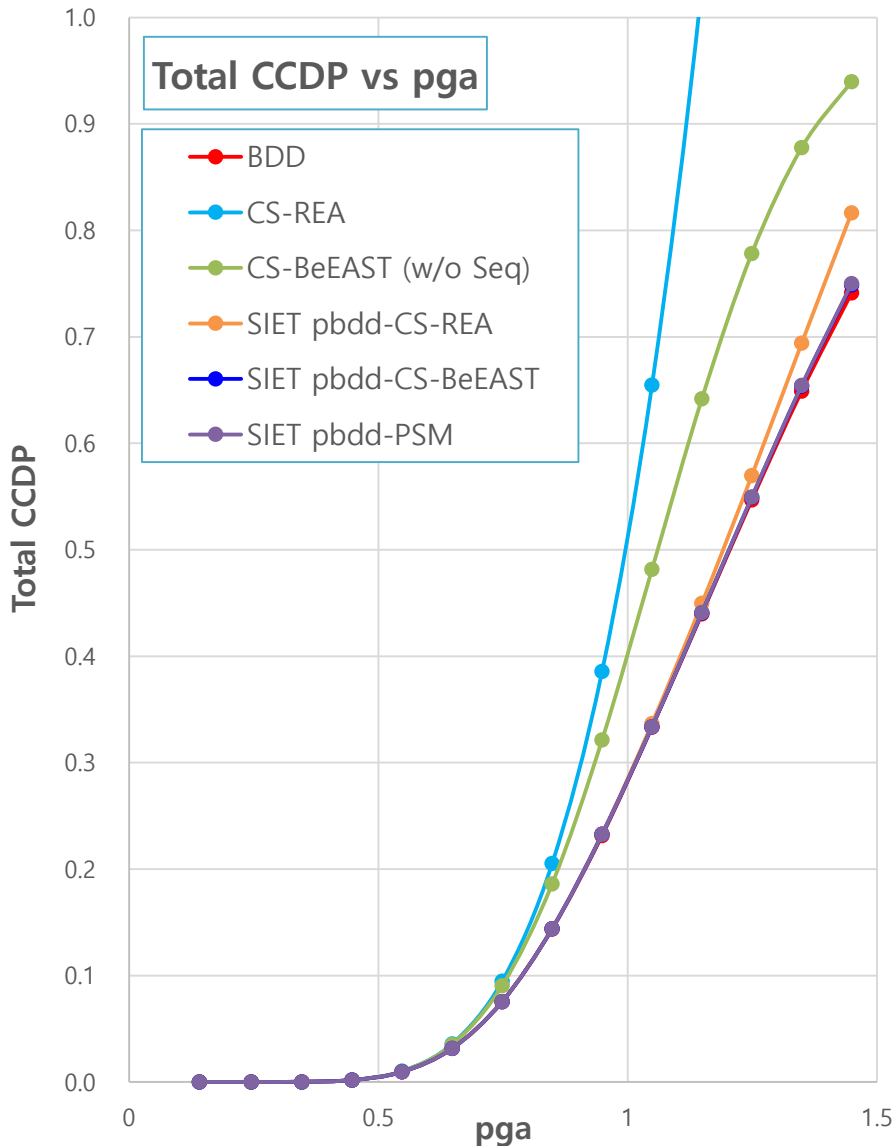
예제 모델

- Primary Event Tree – Seismic Initiating Event Tree (SIET) : 주요 핵심 기기들의 고장을 모델
- Secondary Event Tree (2nd ET) : EDG, Pump, Chiller, CST 등에 대해 Seismic CCF 모델

- A. Pilot.SPSA 예제 (SIET $\rho=1$, 2nd ET $\rho=0.5$)
 - 모델 특징
 - Pilot Plant Seismic PSA 예제 - 작은 교육용 모델, BDD 로 Solve 가능
 - 정량화 시험
 - pga 별 Total CCDP
 - pga=1.225g (★) 에서 Sequence 별 CCDP
- B. MP.SPSA 예제 (SIET $\rho=1$, 2nd ET $\rho=0.5$)
 - 모델 특징
 - MPAS 모델 기반 Seismic PSA 예제 - BDD 로 Solve 불가능
 - 정량화 시험
 - pga=1.225g (★) 에서 Sequence 별 CCDP
- C. Pilot.SPSA 예제 (SIET $\rho=1$, 2nd ET $\rho=1$, HEP 변경)
 - 모델 특징
 - 2nd ET 에 포함된 Component 들의 Correlation = 1
 - HRA Bin 에 따라 HEP Screening Value 이용
 - 정량화 시험
 - 2nd ET 에 Partial BDD 기능 부분 적용
 - pga=1.225g (★) 에서 Sequence 별 CCDP

★) Seismic Group : 1 ~ 1.5g 에 대한 Geometric Mean 값

A. Pilot.SPSA 예제 - Total CCDP 비교



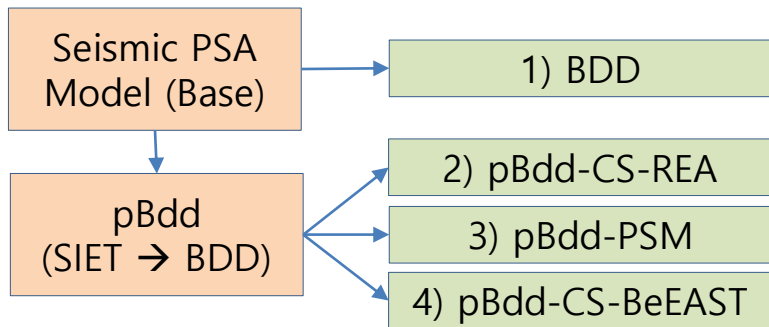
- BDD (정확하나, 소형 모델만 가능)
- CS-REA : Cut Set \rightarrow REA (pga 큰 구간에서 오차 매우 커짐)
- CS-BeEAST : Cut Set \rightarrow BDD (CS-REA 보다 정확)
- SIET pBdd-CS-REA : SIET 부분은 BDD \rightarrow Cut Set \rightarrow REA (주요 Gate Logic 을 BDD 로 변환하는 방법, 효과적이며 비교적 정확, 사용하기 용이한 방법)
- SIET pBdd-CS-BeEAST : SIET 부분은 BDD \rightarrow Cut Set \rightarrow BDD (상당히 정확)
- SIET pBdd-PSM : Probability Subtraction Method (상당히 정확)
- Monte Carlo : (CCDP 크면 정확)

A. Pilot.SPSA 예제 - Sequence 별 CCDP 비교

BDD, Partial BDD, PSM 방법들 비교 – Sequence 별 결과

pga = 1.225g, cutoff = 1e-10

Seq	(1) BDD	(2) pBdd-CS-REA	Diff	(3) pBdd-PSM	Diff	(4) pBdd-CS-BeEAST	Diff
ET-SIE-3!	9.31E-02	9.31E-02	0.0%	9.31E-02	0.0%	9.3119E-02	0.0%
ET-SIE-5!	1.71E-03	1.71E-03	0.0%	1.71E-03	0.0%	1.7067E-03	0.0%
ET-SIE-6!	2.28E-01	2.28E-01	0.0%	2.28E-01	0.0%	2.2820E-01	0.0%
ET-SIE-7!	1.25E-01	1.25E-01	0.0%	1.25E-01	0.0%	1.2483E-01	0.0%
ET-GTRN-3!	3.80E-09	1.05E-08	174.9%	9.39E-09	147.0%	1.0204E-08	168.4%
ET-LOOP-3!	3.05E-03	3.81E-03	24.6%	3.07E-03	0.6%	3.0765E-03	0.8%
ET-LOOP-6!	2.67E-06	3.76E-06	40.7%	3.13E-06	17.0%	3.2287E-06	20.8%
ET-LOOP-7!	1.49E-07	1.49E-07	0.0%	1.49E-07	0.0%	1.4891E-07	0.0%
ET-SLOCA-3!	4.56E-03	5.91E-03	29.6%	4.58E-03	0.6%	5.4940E-03	20.6%
ET-SLOCA-5!	6.78E-02	8.28E-02	22.2%	6.79E-02	0.2%	6.7920E-02	0.2%
ET-SLOCA-6!	1.43E-06	1.43E-06	0.1%	1.43E-06	0.0%	1.4325E-06	0.0%
Sum	5.232E-01	5.404E-01	3.3%	5.234E-01	0.0%	5.243E-01	0.2%



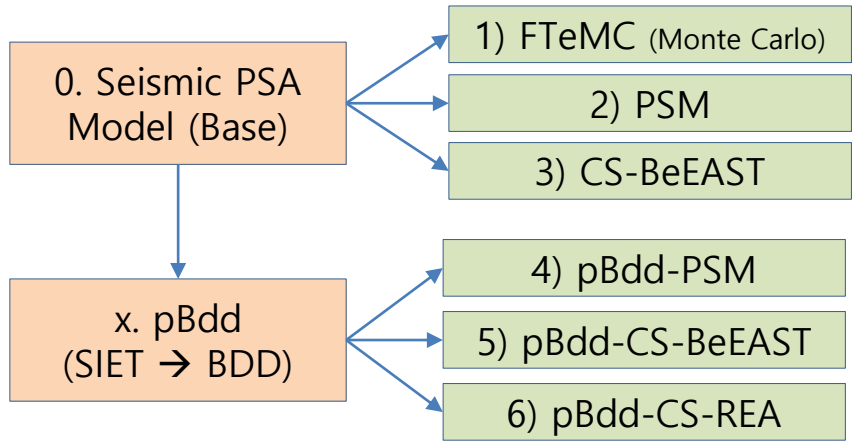
요약

- 1) BDD 계산 : 주어진 Cutoff 에서 정확한 결과
- 2) SIET BDD 변환 → Cut Set/REA : SIET 는 정확, 2nd ET 는 오차 있음 (비교적 정확)
- 3) PSM (BeEAST/C=100000), 상당히 정확
- 4) (2) 를 BeEAST/C=100000 계산 : (2)보다 정확.

B. MP.SPSA 예제 결과 (Sequence > 1e-5, pga=1.225g)

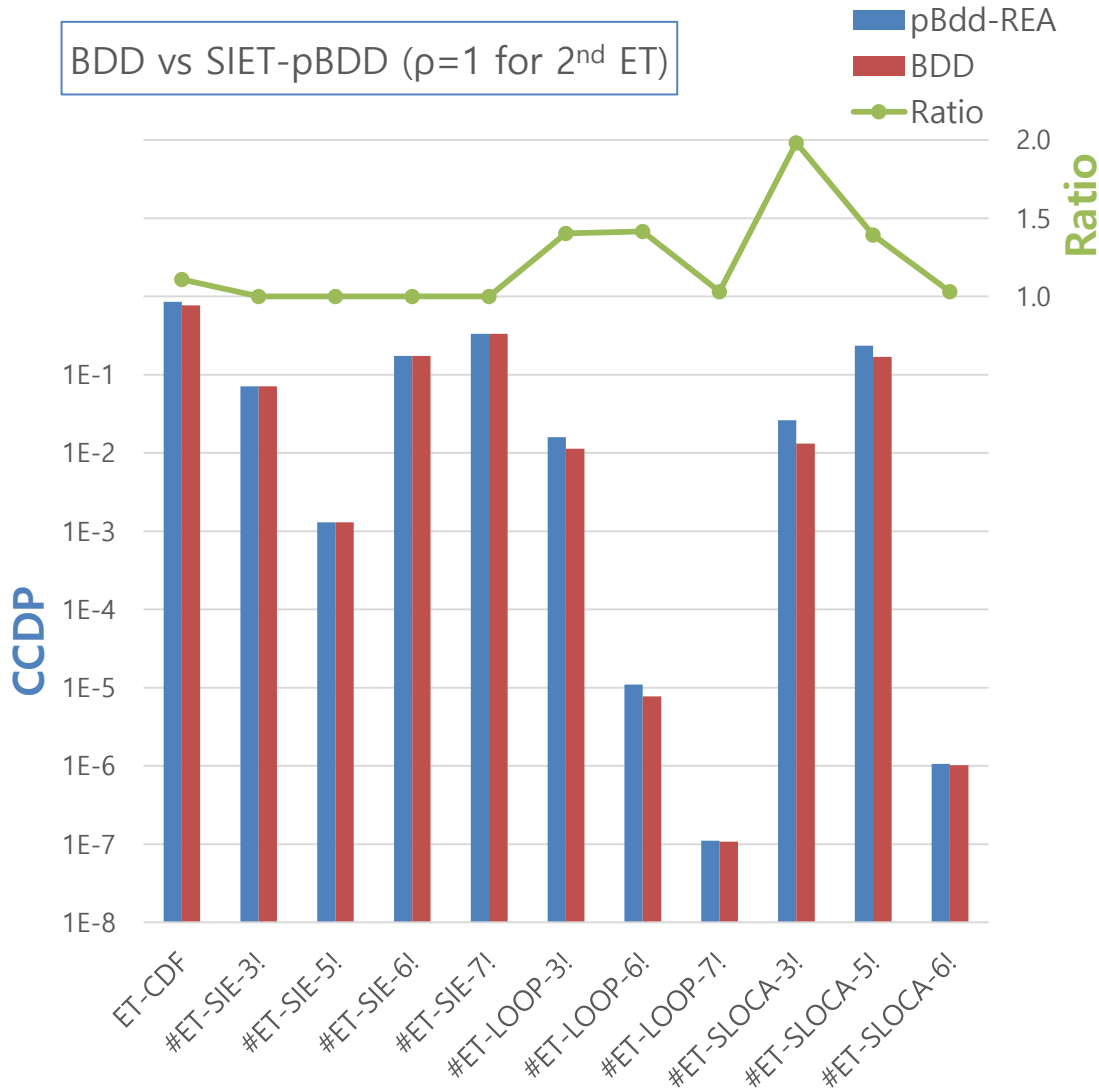


Seq	(1) FTeMC n=1e9	Std.Dev/ Mean	(2) 0. PSM C=3000	Ratio	(3) 0. CS- BeEAST C=3000	Ratio	(4) x. pBdd -PSM C=10000	Ratio	(5) x. pBdd-CS -BeEAST C=10000	Ratio	(6) x. pBdd-CS- REA	Ratio
SEIS-09!	4.58e-1	0.0001	4.58e-1	1	4.58e-1	1	4.58e-1	1	4.58e-1	1	4.57e-1	1
SEIS-10!	3.48e-1	0.0001	3.48e-1	1	3.48e-1	1	3.48e-1	1	3.48e-1	1	3.48e-1	1
GIE-LOFB-2!	3.12e-3	0.0015	3.12e-3	1	1.05e-2	3.36	3.12e-3	1	3.13e-3	1	3.15e-3	1.01
GIE-SLOCA-20!	1.36e-3	0.0012	-6.54e-4	-0.48	1.63e-2	11.95	1.38e-3	1.01	1.38e-3	1.01	1.56e-3	1.14
GIE-LOCCW-2!	5.82e-4	0.0042	5.78e-4	0.99	6.90e-3	11.84	5.82e-4	1	5.84e-4	1	5.89e-4	1.01
GIE-LOFB-3!	3.21e-4	0.0047	3.45e-4	1.07	1.16e-3	3.63	3.27e-4	1.02	3.27e-4	1.02	3.69e-4	1.15
GIE-LOCCS-2!	1.75e-4	0.0059	1.76e-4	1	2.09e-3	11.92	1.77e-4	1.01	1.77e-4	1.01	1.78e-4	1.02
GIE-SLOCA-04!	1.26e-4	0.0089	-3.05e-4	-2.42	1.89e-3	14.97	1.32e-4	1.05	1.58e-4	1.25	1.83e-4	1.45
GIE-LOCCW-4!	6.01e-5	0.0135	-3.03e-5	-0.5	7.19e-4	11.97	5.90e-5	0.98	5.90e-5	0.98	6.83e-5	1.14
SEIS-08!	3.00e-5	0.0147	2.99e-5	1	1.00e-4	3.34	2.99e-5	1	2.99e-5	1	2.99e-5	1
GIE-LOCCS-3!	1.82e-5	0.0205	-7.43e-6	-0.41	2.17e-4	11.93	1.74e-5	0.96	1.74e-5	0.96	2.02e-5	1.11
GIE-LOOP-19!	1.26e-5	0.0234	7.14e-6	0.57	1.51e-4	11.94	1.24e-5	0.98	1.25e-5	0.99	1.29e-5	1.02
Sum	8.11e-1		8.09e-1	1.00	8.46e-1	1.04	8.11e-1	1.00	8.11e-1	1.00	8.11e-1	1.00



- 요약**
- 1) FTeMC (비교용 Base 로 사용)
 - 2) PSM (일부 negative 값 나타남)
 - SIET에 BDD 적용 → 정확도 향상
 - 4) pBdd-PSM, 5) pBdd-CS-BeEAST 상당히 정확
 - 6) pBdd-CS-REA 도 비교적 정확
 - 일부 Sequence 오차 큼

C. Pilot.SPSA (2nd ET $\rho=1$, HEP 변경)



• 모델 및 정량화 방법

- 2nd ET $\rho=1$, HEP 변경
- SIET pBdd 방법
 - SIET : $\rho = 1$, BDD 방법
 - 2nd ET : $\rho = 1$, DelTerm/REA 방법

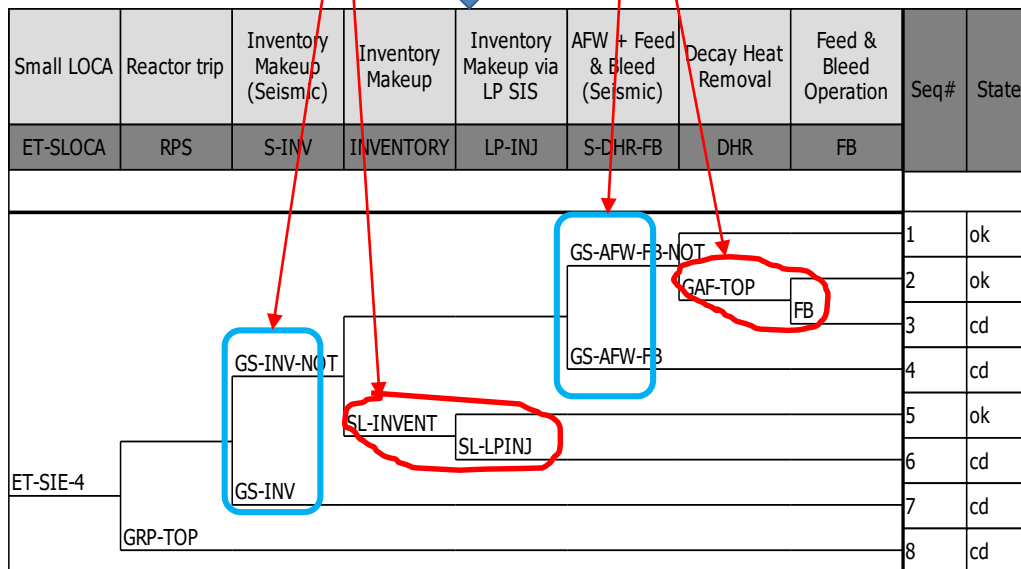
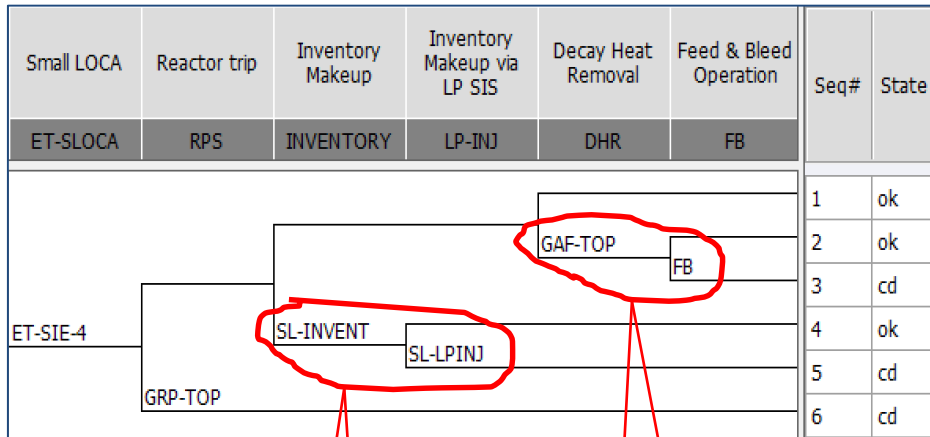
• 결과

- 2nd ET Seq 오차 커짐
 - 1.5~2배 정도
- Total CCDDP ~ 10% 크게 계산

• 참고

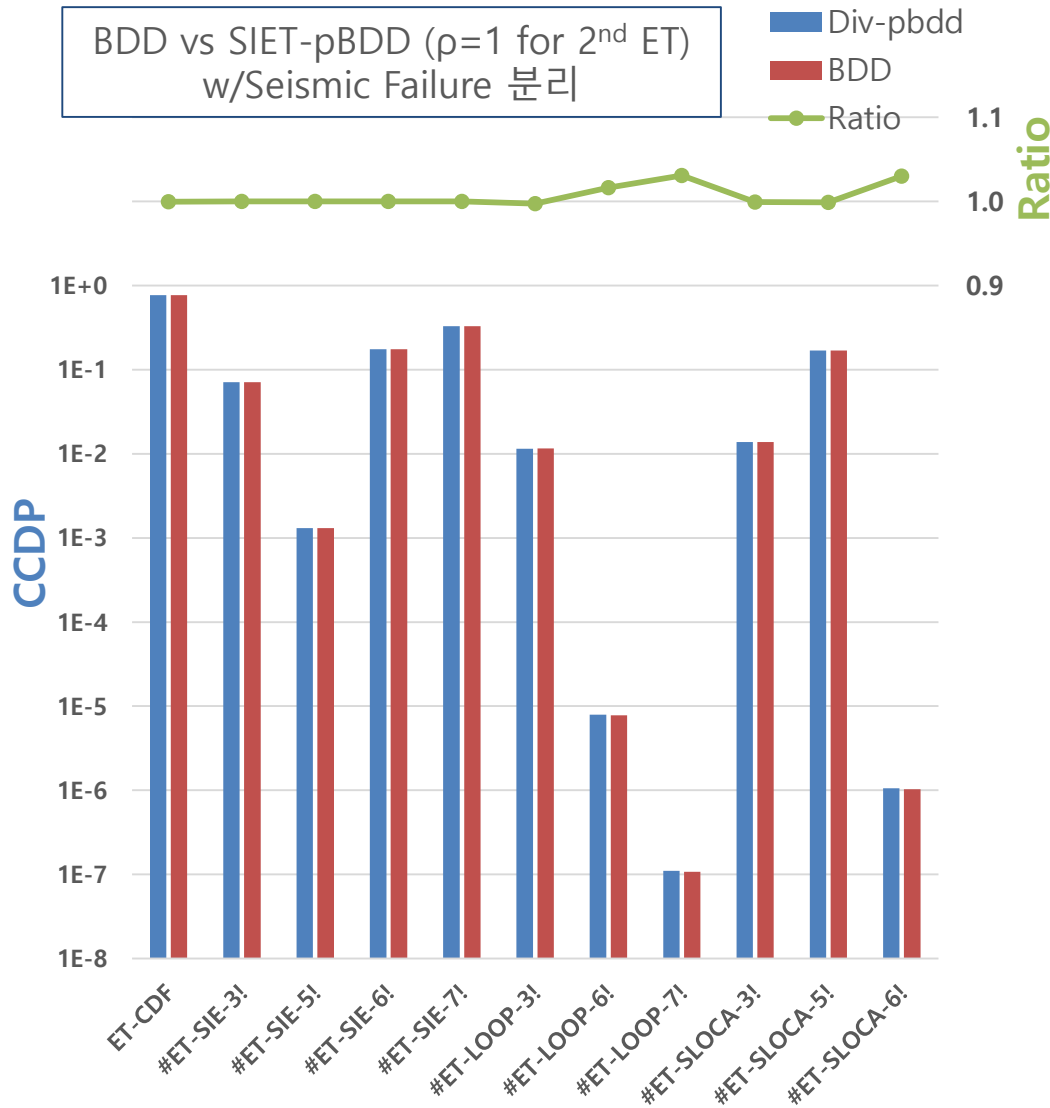
- pga = 1.225g

C. Pilot.SPSA (HEP 변경) : 2nd ET 의 pBDD 처리



- 2nd ET 의 Seismic Failure 를 정리하여 BDD 처리
 - 붉은 색 부분의
 - Seismic Event/주요 HEP 들을 분리 → 별도의 Branch (파란색 부분) → BDD 적용
 - 붉은 색 부분에서 Seismic Failure/주요 HEP 제외
 - 기존 Branch에서 Seismic Failure + Non-Seismic Failure 의 조합 포함하지 않음

C. Pilot.SPSA (HEP 변경) - Seismic Failure 분리



- 2nd ET 의 Seismic Failure/주요 HEP 분리
 - 분리한 부분은 BDD 화
 - pBdd 방법의 Total CCDF (ET-CDF) ~ BDD와 거의 동일
 - 2nd ET 의 Seq 를 0.997~1.03 배 정도로 상당히 정확하게 계산
- 참고
 - Seismic Failure + Non-Seismic Failure 의 조합 포함하지 않음

4. 요약

- 최근 새로운 PSA 정량화 방법 및 기법 개발됨
 - BDD 기법의 부분적 적용
 - Cut Set → BDD (BeEAST)
 - Success Branch → BDD (Negate_Down in FTREX, FT 에서 변환)
 - Selected Branch/Gate → BDD (FT 에서 변환)
 - 정량화 결과 점검용
 - Monte Carlo Approach
 - PSM (Probability Subtraction Method)
- Seismic PSA 정량화 기술 발전
 - BDD 기법의 활용 (Cut Set → BDD, Branch → BDD)
 - Seismic Correlation → Seismic CCF
 - Monte Carlo Method w/Seismic Correlation (FTeMC)
 - Seismic PSA 정량화 Software 들 (ARES, COREX)
- Seismic PSA 정량화 정확도 향상 가능
 - 단, Seismic PSA Model, 정량화 방법에 대한 이해 필요

End

참고 자료

- 확률계산

- Inclusion-Exclusion 법칙

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_{i=1}^n P(A_i) \\
 &- \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i A_j) \\
 &+ \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(A_i A_j A_k) \\
 &\dots \\
 &+ (-1)^{n-1} P(A_1 A_2 \dots A_n)
 \end{aligned}$$

- Approximation

- REA $F_{REA} = \sum_{i=1}^n P(A_i)$
- MCUB $F_{MCUB} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(A_i))$

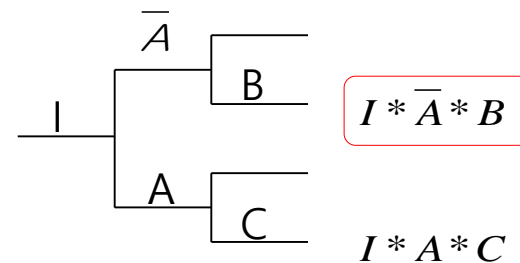
- 대안

- Cut Set \rightarrow BDD (BeEAST)
- 주요 Logic \rightarrow BDD (PI) 변환

REA : Rare Event Approximation
MCUB : Minimal Cut Upper Bound

- Success Branch

- BDD 또는 Negate의 적절한 처리



- Approximation

- Delete Term Approximation

$$I * \bar{A} * B \rightarrow I * B \ominus A$$

*B를 계산한 후
A에 나타나는 항을 제거

- 대안

- Negate_Down (Success Branch \rightarrow BDD/PI) (* 원안위 다수기 정량화 연구)
- Probability Subtraction Method

PI : Prime Implicants
BDD : Binary Decision Diagram

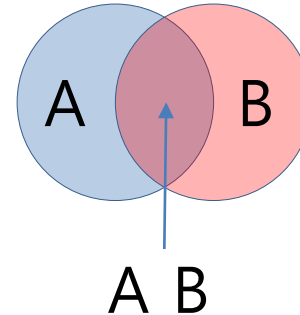
PSA 정량화 방법들

Track	장점	단점
Cut Set Approach (FTREX)	<ul style="list-style-type: none"> Cut Set에서 많은 정보 제공 Post Processing 가능 	<ul style="list-style-type: none"> Delete Term Approx. 및 Rare Event Approx. 으로 인한 오차
<ul style="list-style-type: none"> Cut Set to BDD (BeEAST) Partial BDD 	<ul style="list-style-type: none"> Cut Set → BDD 변환 지정한 Gate (Failure/Success Branch) 를 BDD 로 변환 (FTREX Negate_Down 기능 확장) 	<ul style="list-style-type: none"> Delete Term Approx. 오차 BeEAST 정량화 결과를 AIMS-PSA와 연계 어려움 (값만 제공) Small FT Gate 만 가능
<ul style="list-style-type: none"> PSM 	<ul style="list-style-type: none"> DelTerm Approx. 사용 안함 → 비교적 정확한 정량화 가능 Post Processing 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 값만 제공 Cut Set → BDD 변환을 중요 (잘못된 경우 오차가 매우 커짐)
BDD (SBDD)	<ul style="list-style-type: none"> 정확한 정량화 가능 Prime Implicant 정리하면 Cut Set 과 유사한 정보 도출 가능 	<ul style="list-style-type: none"> Small FT 만 적용 가능 (실제 원전 PSA 에 사용 불가) Post Processing 처리 못함
Monte Carlo Approach (FTeMC)	<ul style="list-style-type: none"> 지진 PSA와 같이 CCDP가 큰 모델은 비교적 정확한 정량화 	<ul style="list-style-type: none"> Cut Set 정보 부재. 값만 제공 Post Processing 처리 못함

- BeEAST : Cut Set 을 BDD 로 변환하는 S/W (정우식 교수 개발)
- Partial BDD : FTREX의 Negate_Down 을 확장. 특정 Gate를 BDD 로 변환후 FTREX 계산 (Aims-PSA, ARES 에 구현)
- PSM : Probability Subtraction Method (박성규 박사 개발 방법, AIMS-PSA의 Tool (PSM Calculator)로 개발)
- SBDD : 작은 FT의 BDD 계산용 엔진으로 AIMS-PSA의 Tool로 개발

- Probability Subtraction Method

- $P(A / B) = P(A) - P(A \cap B)$



A / B

- A 에서 AB 부분을 제외한 영역

- PSA 정량화의 주요 오차 원인을 어느정도 해결 가능

- Delete Approximation 을 PSM 으로 대체
 - Rare Event Approximation 을 BDD 로 대체 (BeEAST 사용)
 - 다만, Cut Set-BDD 변환율이 매우 중요

Reference

S.K. Park, W.S. Jung, Probability subtraction method for accurate quantification of seismic multi-unit probabilistic safety assessment, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 53, 2021.