

단일/다수기 지진 PSA 수행 방법 및 현안

Issues of Seismic PSA for Single/Multi units

임 학 규

KINGS

2018.5.16

배경: Seismic PRA

• 부지고유 지진크기별 발생빈도

• 지반거동

• 구조물거동 \Rightarrow 기기거동

$$P_f(\alpha) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{\alpha}{A_m}\right) + \beta_U \Phi^{-1}(Q)}{\beta_R}\right)$$

- Capacity Factor
 $F_C = F_S F_\mu$
- Equipment Response Factor
 $F_{RE} = F_{QM} F_D F_M F_{MC} F_{ECC}$
- Structural Response Factor
 $F_{RS} = F_{GM} F_D F_M F_{MC} F_{TH} F_{FSI} F_{IR}$
- Median Capacity
 $F_m = F_C F_{RE} F_{RS}$
- Median Ground Acceleration Capacity
 $A_m = F_m \cdot SSE$
- Uncertainty
 $\beta_R = \sqrt{\sum(\beta_R^2)_i}$
- Randomness
 $\beta_U = \sqrt{\sum(\beta_U^2)_i}$

• 대상호기 사고시나리오 검토

• 지진 취약도분석 대상 선정
• 지진유발 초기사건 파악

– 초기사건유발 지진손상조
합 개발

• 초기사건 시나리오 개발

– 사고완화 불가능 시나리오
– [직접노심손상]

– 사고완화 가능 시나리오
– [사고완화 기기의 무작
위고장 반영]

• 사고완화 불가능 시나리오

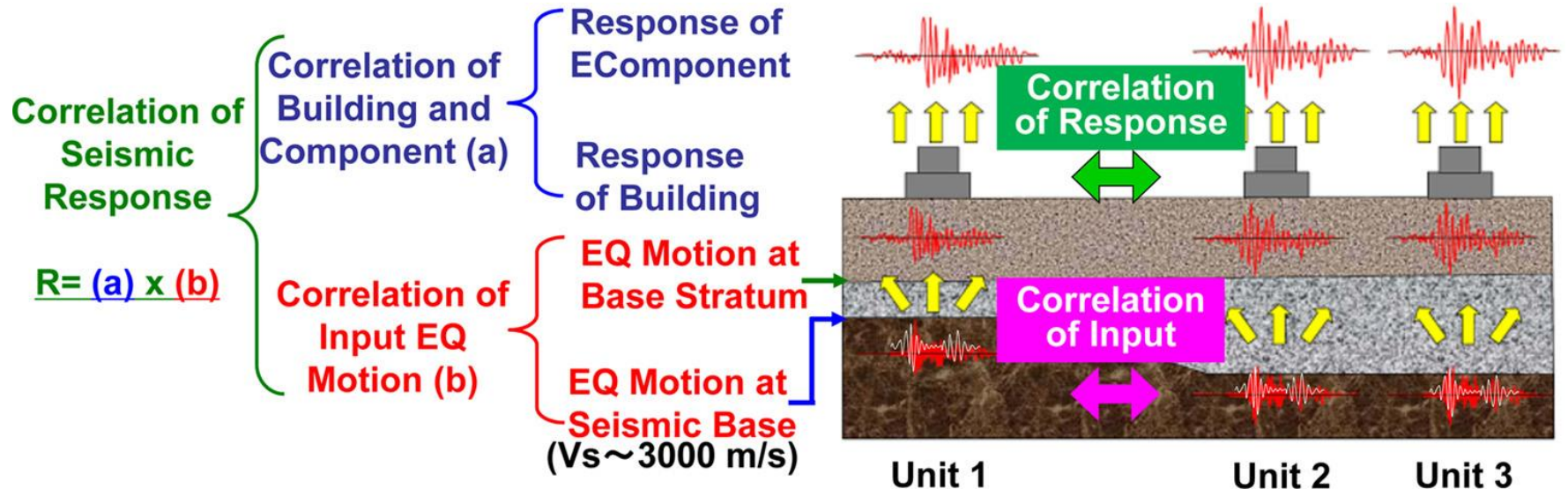
– PRASSE, EQESRA, ...

• 사고완화 가능 시나리오

– AIMS, SAREX, ...

배경: 지진상관성 (Seismic Correlation)

- Response Correlation (Ebisawa, et al., NED, 2015)



- Capacity Correlation (by Googling)



배경: 지진상관성-단순규칙 [Bohn, NUREG-1150]

- 근접하지 않은 비유사 기기: independency
- 근접한 동일 기기: total dependency

- 근접한 비유사 기기
- 근접하지 않은 동일 기기

지진상관성 반영 필요

- 다중성을 위한 동일기기
예) 4개일 경우,
- 2/4, 3/4, 4/4의 파손확률 필요

배경: 용어 “Correlation” vs. “Dependency”

- 다수의 자료에서 “Correlation” 사용 (SSMRP)
 - Joint probability of two (or more) seismic caused failures
 - Parameters: mean, standard deviation, and correlation coefficient
 - If correlation coefficient = 0, the failures are independent
 - $-1 \leq \rho_{12} \leq 1$

$$\rho_{12} = \frac{\beta_{R1} \beta_{R2}}{\sqrt{\beta_{R1}^2 + \beta_{F1}^2} \sqrt{\beta_{R2}^2 + \beta_{F2}^2}} \rho_{R1R2} + \frac{\beta_{F1} \beta_{F2}}{\sqrt{\beta_{R1}^2 + \beta_{F1}^2} \sqrt{\beta_{R2}^2 + \beta_{F2}^2}} \rho_{F1F2}$$

- 최근의 논의 개념은 “Dependency” 에 해당
 - [특정 지반가속도에서] 1번 기기가 손상되면, 2번 기기가 손상될 확률은?
 - CCF 개념과 유사
 - Split Fraction, Conditional Probability

배경: 지진상관성

- 지진취약도분석 방법론: 변수분리법 (Separation of Variables)
- Reed-McCann 방법 (NUREG/CR-7237)
 - 변수를 공통 변수 (common variables)와 독립적인 변수로 분류
 - 공통 변수의 무작위성과 불확실성 평가

예) 3개 변수

	Am	BR	BU
A	0.7	0.25	0.25
B	0.7	0.25	0.25
C		0.30	0.40

	BR*	BU*
A,B	0.15	0.15
A,C	0.10	0.12
B,C	0.10	0.12

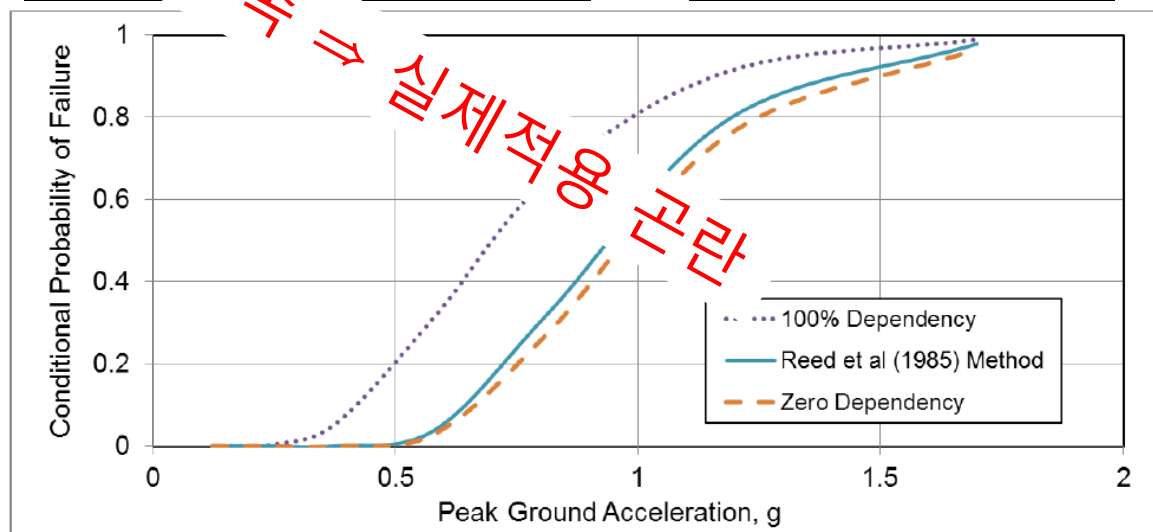


Figure 8-2 Fragility for Joint Failure of Three Components (Case 1) for Three Models: Zero Dependency, 100% Dependency, and Reed-McCann Method

연구 범위

- 지진사건 PSA 논리 모델 개발 방법
 - 지진 초기사건 논리구성을 위한 사건수목과 고장수목 연계
 - 지진 초기사건 이후 사고전개를 위한 사건수목과 고장수목 연계
- 지진사건 PSA 논리 모델 정량화 방법
- [정량화방법에 따른 전산도구 개발 – 세종대와 연계)

- 다음은 연구범위에서 제외
- Seismic Hazard – 별도 국가과제 수행 중
- Seismic Fragility – 사업자 Propriety Information
 - Seismic Correlation – 국제적으로 연구기반 미비
- Seismic Scenario – 내부사건 분석과 연계
- Seismic HRA – 인간신뢰도분석과 연계

현안 파악

- **지진사건 정량화 결과의 의미**
 - **지진 재해도**
 - 지반가속도 발생 빈도 (재래주기)
 - 최대지반가속도의 발생빈도로 표시
 - **지진 취약도**
 - 주어진 힘과 SSC 내진성능의 무작위성 및 불확실성을 반영한 파손확률
 - 주어진 힘은 지반가속도로 정규화
 - **취약도와 재해도 Convolution** → 초기사건빈도 및 노심손상빈도
 - 지반가속도 발생빈도와 해당 지반가속도에 의한 SSC 조합의 파손확률 Convolution
 - **초기사건빈도와 고장확률의 곱** → 노심손상빈도
 - 초기사건빈도와 여러 독립고장사건 발생확률의 곱
- **PSA 결과의 의미**
 - **최소단절집합**
 - 조건(노심손상)을 만족하는 최소 사건의 집합
 - **최소단절집합의 빈도**
 - 단일 초기사건 빈도와 여러 독립고장사건 발생확률의 곱

단순 예제

• 예제 (PRASSE)

– 재해도

PGA(g)	0.102	0.204	0.306	0.408	0.51	0.612	0.714
빈도(/yr)	0.00082	0.00021	9.00E-05	4.30E-05	2.50E-05	1.50E-05	9.00E-06

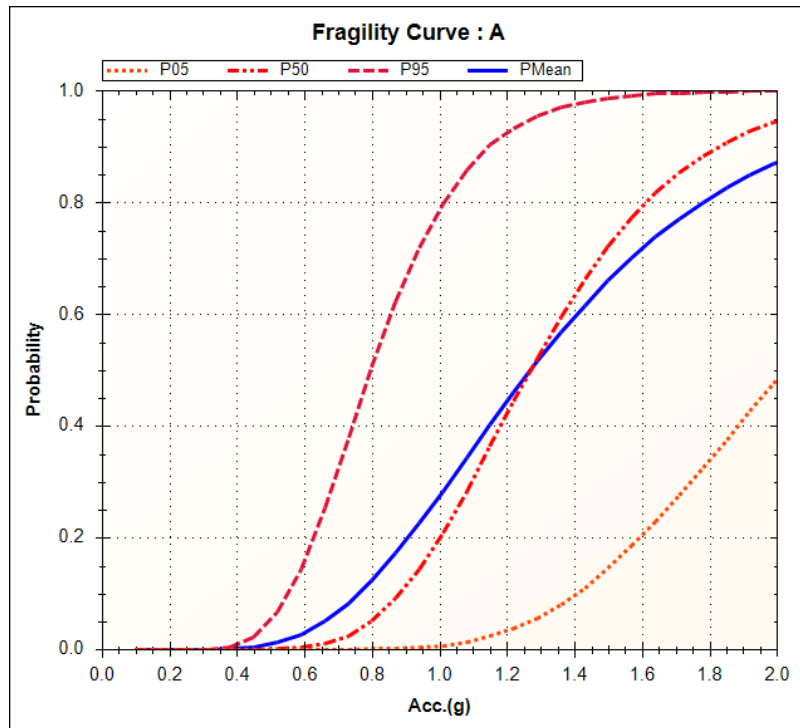
– 취약도

	Am(g)	BR	BU	BC	HCLPF(g)
S1	1.27	0.283	0.283	0.400222	0.500547
S2	1.27	0.283	0.283	0.400222	0.500547
S3	1.27	0.283	0.283	0.400222	0.500547

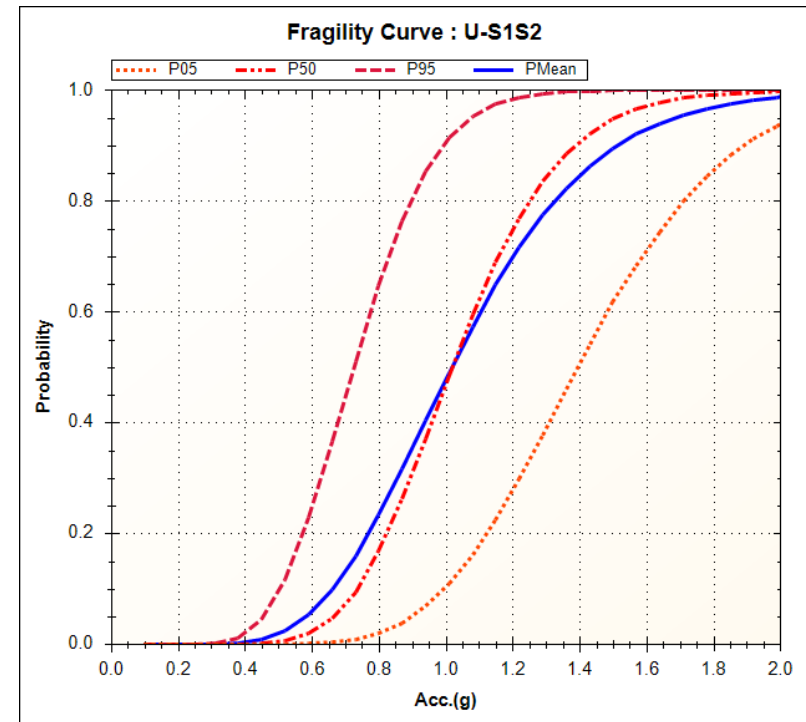
– Case: 개별 SSC의 파손확률 합, SSC 조합의 파손확률

- S1, S2, S3 : Not correlated events
 - 예) 펌프, 캐비닛, 탱크
- U-S1S2: $S1 \cup S2$ (개별 SSC 파손확률의 합)
- I-S1S2: $S1 \cap S2$ (SSC 조합의 파손확률)

취약도비교

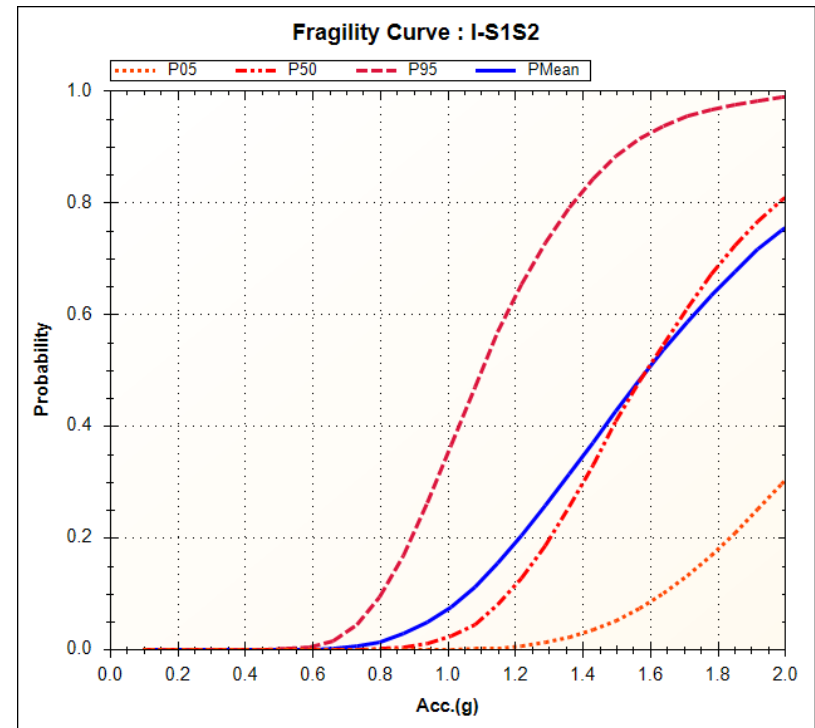
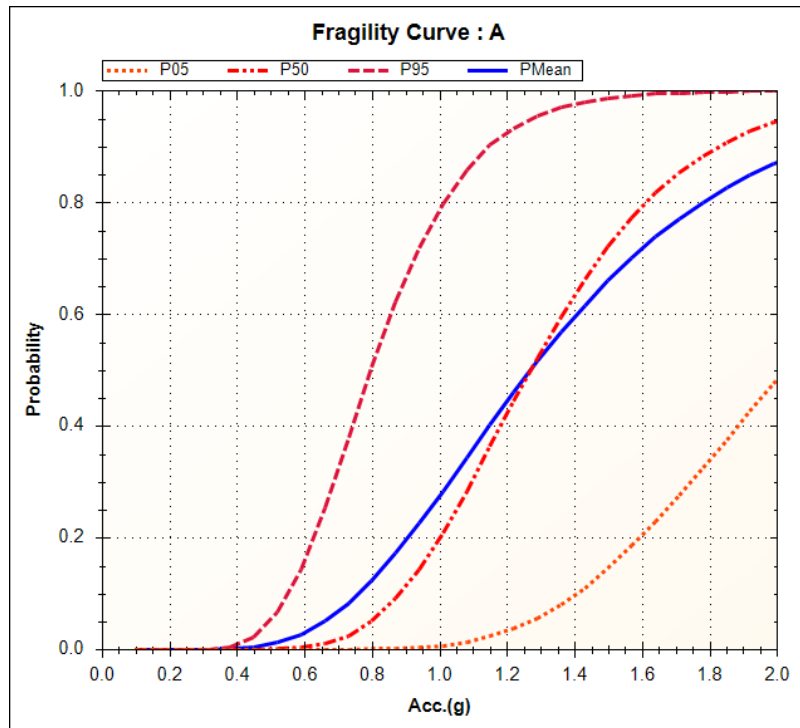


$$A = S1$$



$$U = P(S1 \cup S2) \text{ (S1 또는 S2 파손확률)}$$

취약도비교



A = S1

I = P(S1 ∩ S2) (S1과 S2 동시 파손확률)

단순 예제 결과

- 결과: 빈도 = 재해도의 빈도 * SSC 조합 파손확률

	HCLFP	빈도			
		5%	50%	95%	Mean (Cutset 개념)
A (S1)	0.5	9.98E-08	1.42E-06	8.38E-06	2.53E-06
U-S1S2	0.458	7.87E-07	3.34E-06	1.16E-05	4.49E-06 (5.07E-06)
U-S1S2S3	0.429	1.87E-06	4.64E-06	1.43E-05	6.08E-06 (7.06E-06)
I-S1S2	0.741	3.01E-08	3.13E-07	1.91E-06	5.83E-07
I-S1S2S3	0.902	1.56E-08	1.31E-07	9.53E-07	2.24E-07
IU-S1S1	0.458	1.87E-07	2.38E-06	1.26E-05	3.98E-06
II-S1S1	0.642	1.25E-08	4.54E-07	4.12E-06	1.09E-06

	빈도 (재해도*취약도)					파손확률 (취약도)				
	0.2-0.4 (g)	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0-1.2	0.3(g)	0.5	0.7	0.9	1.1
A (S1)	2.92E-08	2.45E-07	6.40E-07	6.51E-07	4.52E-07	1.03E-04	9.53E-03	6.81E-02	1.95E-01	3.60E-01
U-S1S2	5.83E-08	4.88E-07	1.21E-06	1.17E-06	7.60E-07	2.05E-04	1.90E-02	1.32E-01	3.56E-01	6.00E-01
U-S1S2S3	8.74E-08	7.24E-07	1.76E-06	1.66E-06	9.33E-07	3.08E-04	2.84E-02	1.92E-01	4.79E-01	7.36E-01
I-S1S2	1.73E-11	1.84E-09	6.67E-08	1.32E-07	1.45E-07	6.81E-10	4.14E-05	3.61E-03	3.34E-02	1.20E-01
I-S1S2S3	1.38E-15	7.74E-11	5.99E-09	1.53E-08	5.60E-08	5.64E-15	1.79E-07	1.91E-04	6.08E-03	4.32E-02
IU-S1S1	5.78E-08	4.61E-07	1.10E-06	1.03E-06	6.52E-07	2.05E-04	1.81E-02	1.18E-01	3.06E-01	5.15E-01
II-S1S1	5.46E-10	2.90E-08	1.77E-07	2.76E-07	2.53E-07	3.79E-07	9.69E-04	1.85E-02	8.37E-02	2.05E-01

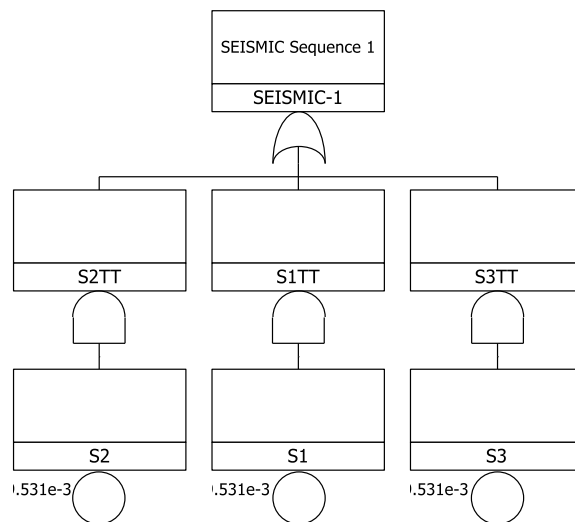
취약도와 고장수목

- 지진유발 파손사건 군에 대한 PRASSE 계산(파손확률)과 AIMS 계산(고장수목) 비교

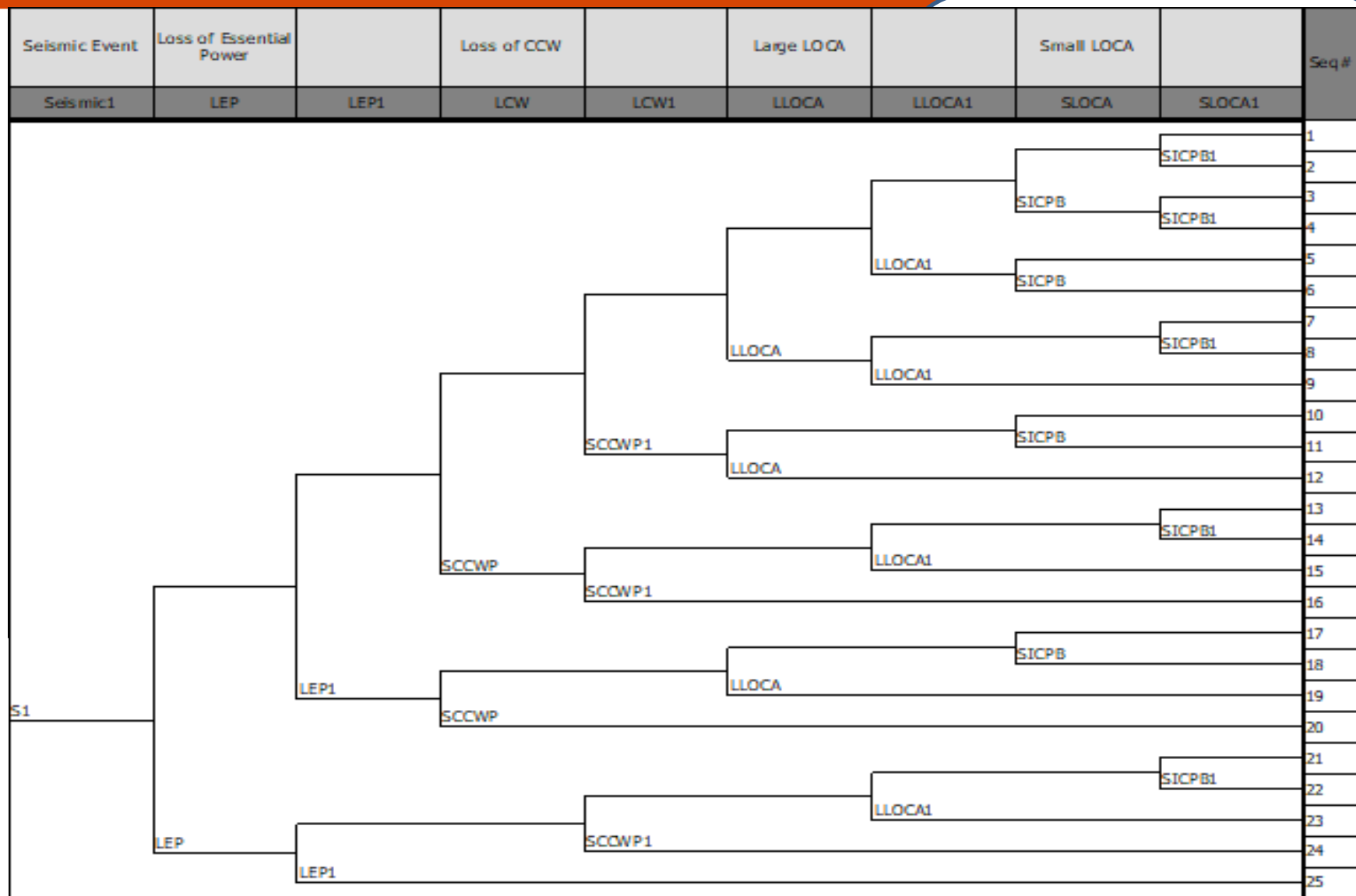
	Prob (PRASSE)		MCUB (AIMS)	
	05	11	05	11
A (S1)	9.53E-03	3.60E-01		
U-S1S2	1.90E-02	6.00E-01	1.91E-02	5.90E-01
U-S1S2S3	2.84E-02	7.36E-01	2.83E-02	7.38E-01
I-S1S2	4.14E-05	1.20E-01	9.08E-05	1.30E-01
I-S1S2S3	1.79E-07	4.32E-02	8.66E-07	4.66E-02
IU-S1S1	1.81E-02	5.15E-01	9.53E-03	3.60E-01
II-S1S1	9.69E-04	2.05E-01	9.53E-03	3.60E-01

Sima(Sequence)

U-S1S2S3
+ S1
+ S2
+ S3



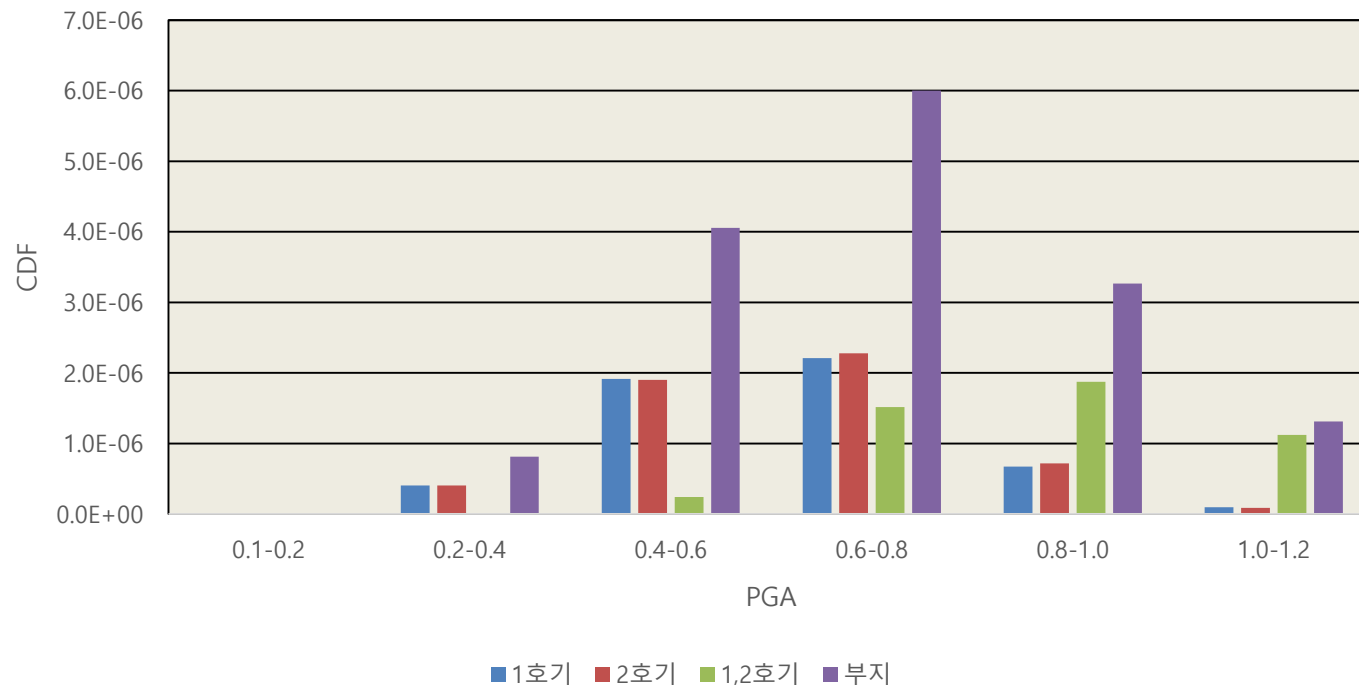
예제



정량화 결과

• 1호기, 2호기 완전독립

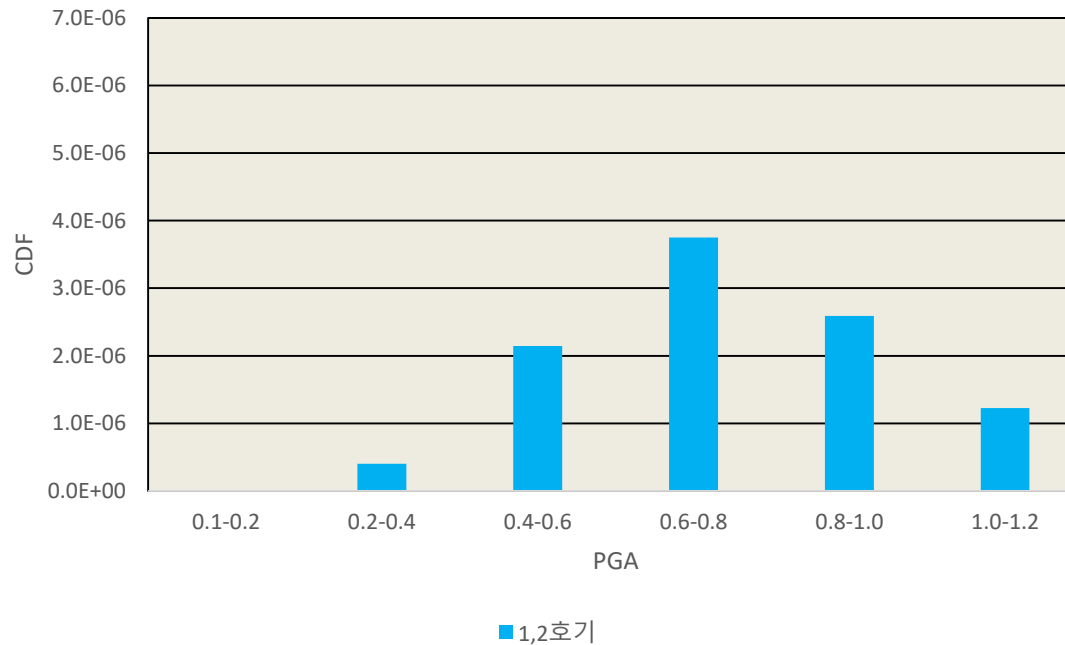
Acc. range (g)	0.1-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0-1.2	total
1호기	1.03E-09	4.03E-07	1.91E-06	2.21E-06	6.71704E-07	9.8561E-08	5.48225E-06
2호기	1.18E-09	4.06E-07	1.9E-06	2.28E-06	7.18905E-07	9.0127E-08	5.44702E-06
1,2호기	1.99E-14	4.03E-09	2.43E-07	1.52E-06	1.8758E-06	1.12231E-06	4.93148E-06
부지	2.21E-09	8.14E-07	4.06E-06	6E-06	3.26641E-06	1.311E-06	1.58608E-05



정량화 결과

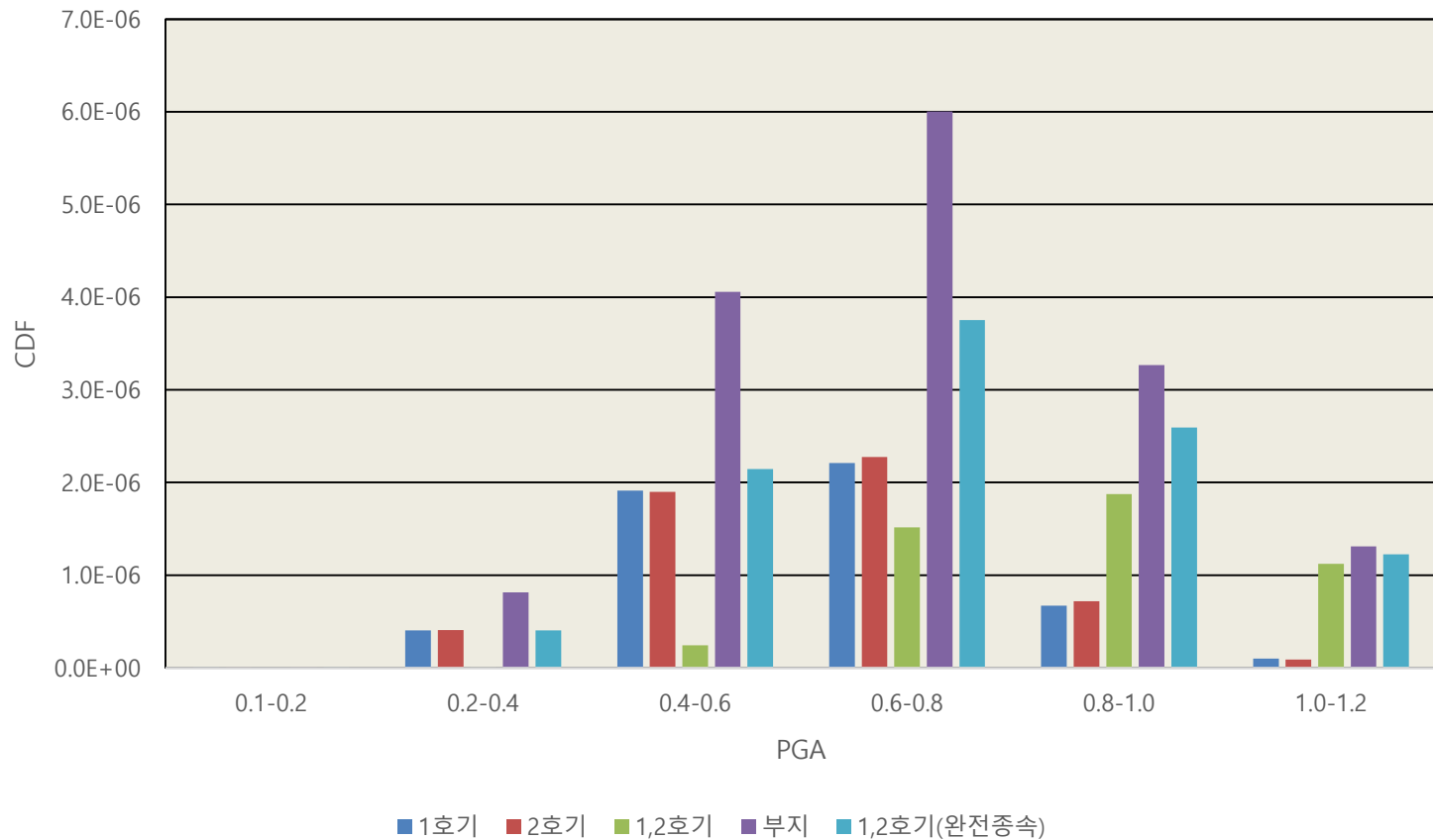
- 1호기, 2호기 완전종속

Acc. range (g)	0.1-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0-1.2
1,2호기(완전종속)	1.11E-09	4.05E-07	2.14E-06	3.75E-06	2.5915E-06	1.22477E-06



정량화 결과

- 완전독립 vs. 완전종속 비교



현안 – 정량화 방법

①지진발생 – ②지진유발 초기사건발생 – ③사고완화 실패시나리오

① 지진발생: 가속도구간 구분 (?)

- 지진상관성, 지진 HRA 등은 가속도크기의 영향이 있음
- OBE or LOOP 발생, SSE, Plant HCLFP 목표, 0.7g, 1.0g, 1.5g

② 지진유발 초기사건발생:

- 지진재해도*지진유발고장집합 취약도: PRASSE 코드로 Convolution
- 옵션0**: 재해도구간별 지진유발손상 기본사건으로 사건수목/고장수목 개발
 - AIMS 코드적용

③ 사고완화실패시나리오 – 사고완화실패원인: 무작위고장, 지진유발고장

- 옵션1**: AIMS 코드 적용 (ACUBE 후처리 적용)
초기사건빈도*사고완화실패(무작위고장확률 및 지진유발고장확률)
- 옵션2**: PRASSE 코드, AIMS 코드 적용
PRASSE 코드: 지진재해도*지진유발고장(초기사건) \cap 지진유발고장(사고완화 실패) – ①
AIMS 코드: ① * 사고완화실패(무작위고장)

현안 – 지진상관성

- **필요성 – 내진등급 안전계통기기의 다중성 고려**
 - 단일호기의 경우 보수적으로 완전종속 가정 적용
 - 과도한 보수성(NUREG/CR-7237)
 - 다수기의 경우, 완전종속 가정 적용은 무리
 - 다중성 기기 중 동시손상 기기대수 별 취약도평가 방법 필요
- **“근접”의 정의**
 - 미국은 100m 정도를 예로 제시
 - 일본은 수십 km를 예로 제시 – 지질/지반 특성 고려 필요
- **기기 유사성의 정의**
 - 미국은 동일기기가 아니면 상이한 기기로 간주. 단, 정착부 비교 필요.
 - 일본도 유사한 관점(?)

제안

- **Sister Plants는 근접, 동일기기 조건 충족**
 - 그렇더라도, 모든 다중성 기기의 동시 손상은 과도한 보수성임.
- **이외 원전은 response 및 capacity correlation 이 없을 것으로 추정**
 - 지반 및 구조물 거동 특성 비교 필요
 - 기기 유사성은 없을 것으로 추정되나, 정착부 유사성 검토 필요.

감사합니다.