

Development of an Enhanced Uncertainty Analysis for the Level 2 PSA Results

Baehyeuk Kwon ^{a*}, Inchul Ryu ^b and Changhwan Lim ^b

^{a, b} KEPCO-E&C, 269 Hyeoksin-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do 39660, Republic of Korea

*Corresponding author: kbh1@kepco-enc.com

PO6H04

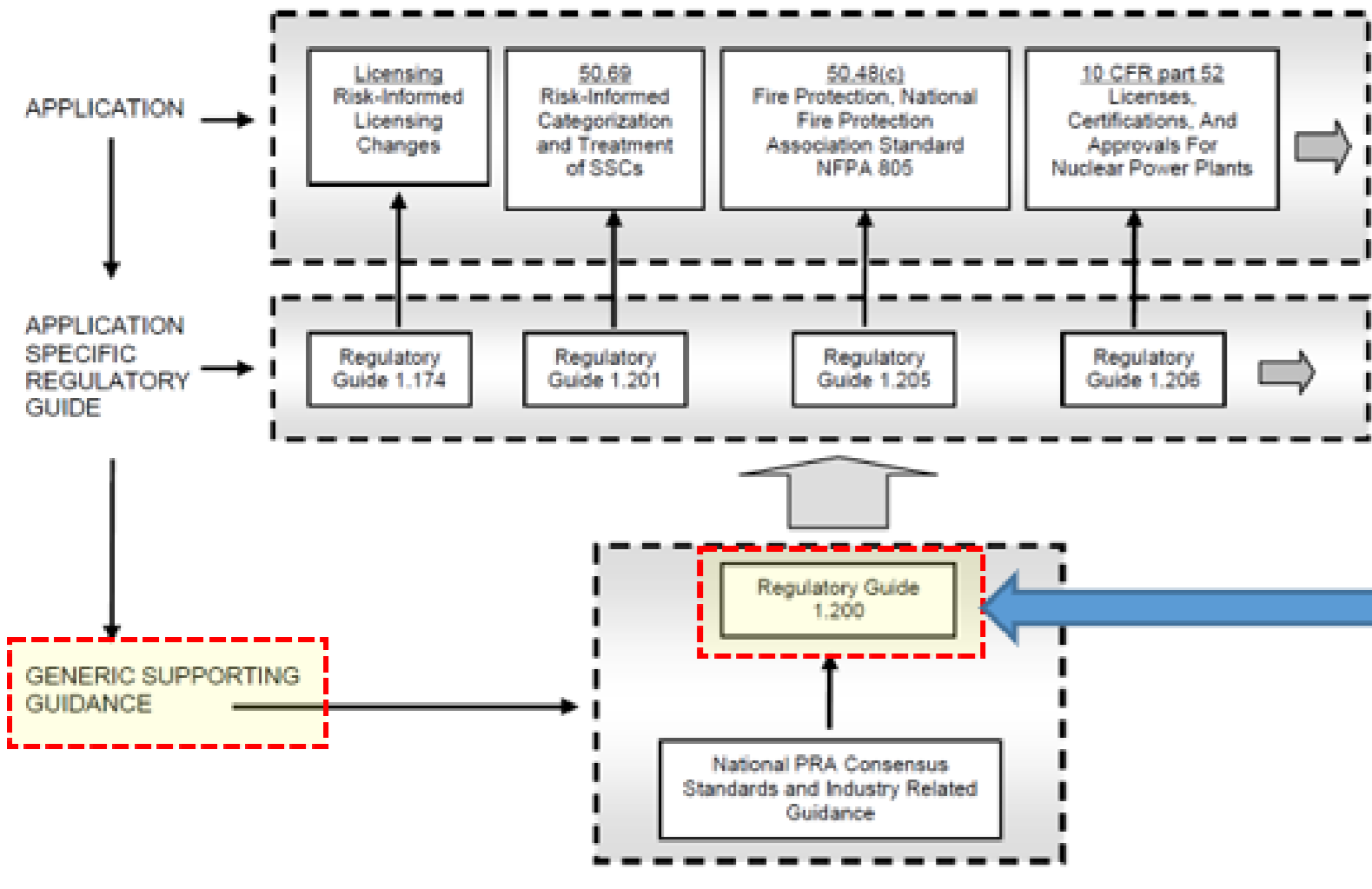
26S-130



1. Introduction

◆ Regulatory Guide 1.200, Rev.2, 2008 (An approach for determining the technical adequacy of probabilistic risk assessment results for risk-informed activities)

- RG 1.200은 리스크 정보를 활용한 다른 NRC 규제 가이드 (RG 1.174, RG 1.201, RG 1.205, RG 1.206)를 지원하는 문서임.
- PRA의 기술적 타당성을 결정하는데 필요한 지침을 제공
- 해당 RG 1.200에는 PRA 분석 및 결과에 대한 불확실성 분석 처리에 대한 지침을 제공하고 있음.



불확실성 분석 처리 (NUREG-1855)

- ❖ **인식론적 불확실성 (epistemic uncertainty)**
 - NUREG-1855는 인식론적 불확실성 (지식 부족과 관련된 불확실성)에 초점을 맞추고 있음.
 - 인식론적 불확실성의 유형을 식별하고 불확실성을 처리하는 방법을 포함
 - 인식론적 불확실성은 다음 3가지로 분류하고 있음.
 - 완전성 불확실성 (completeness uncertainty)
 - 모수 불확실성 (parameter uncertainty)
 - 모델 불확실성 (model uncertainty)

● '완전성 불확실성'의 처리 방법

- 불완전성을 의미 [평가시 '생략 (예, 기여도가 미미)' 또는 '누락 (예, 합의가 없거나 인식되지 않음)'에 의한 불확실성]
- '보수적 (conservative)' 또는 '경계형 분석 (bounding-type analyses)'을 통해 누락된 요소인자들이
- 중요한 위험 기여인자가 아님을 입증
- PRA의 범위나 상세수준에서 누락된 경우
 - : 해당 항목을 포함하도록 범위 및 상세수준을 확장
 - : 해당 항목이 중요한 기여인자가 아님을 입증하기 위한 경계 분석 (bounding analysis)을 수행

● '모수 불확실성'의 처리 방법

- PRA 논리 모델에서 사건의 빈도 및 확률을 정량화하기 위해 사용되는 입력 모수 값에 대한 불확실성
- 모수 (parameter)의 예로는 초기조건 빈도, 기기 고장률 및 확률 그리고 인적오류확률 등이 있음.
- 모수 값에 대한 분석자의 '믿음의 정도 (degree of belief)'와 관련한 '확률분포'로 특성화 될 수 있음.
- NRC에 의해 승인된 표준 (standard)에 따르면, CDF와 LERF의 경우 주요 입력 모수의 평균 값 (mean value)을 기반으로 계산되어야 하며, 정량화 값에 대한 불확실성을 확률론적 수치로 표현을 요구

: 주요 사건 빈도 또는 확률 간의 'SOKC'를 고려

(현재 사용중인 PRA 프로그램은 SOKC 처리 방식이 포함되어 있음)

: CDF 또는 LERF 계산시 해당 모수에 대한

불확실성 분포를 전파 (propagate)하기 위한 방법은 논의

➢ EPRI-1016737, 2008

(Treatment of Parameter and Modeling Uncertainty for PRA)

: Monte Carlo (or similar) 방식을 사용한 불확실성 분포 전파 (propagate)

: "ASME/ANS PRA standard SR - 2009" 관련 "QU-A3, QU-E3, LE-E4, LE-F3"

● '모델 불확실성'의 처리 방법

- 지식 부족에 의한 모델링과 관련한 불확실성을 의미 (Lack of knowledge 에서 비롯)
- 불확실성 인자들 (모델링 및 평가시 가정사항)의 식별 및 평가
- NUREG-1855의 섹션 7에서 모델 불확실성 처리에 대한 상세한 지침 제공
 - : 모수 불확실성 분석 방법은 모수 값에 대한 확률분포 사용을 통해 적절하게 다루는 것이 가능
 - 하지만 모델 및 완전성 불확실성 분석은 공식적인 방식과 같이 전형적 (일반적)으로 다루어 지지 않음
 - : 모델 불확실성에 대한 일반적인 대응은 PRA 모델 개발에 사용되는 고유 모델링 접근 방식을 선택하는 것임.
 - : 고유 모델 불확실성을 다루는 방법으로는 모델 불확실성을 해결할 필요를 본질적으로 제거하는 "합의된 모델 (consensus model)"을 채택하는 것임.

[consensus model]

- '합의된 모델'은 아래 3가지로 가진 모델임.
 - 공개적으로 이용 가능한 출판된 근거가 있고,
 - 제3자 검토 (동료 검토, peer review)를 가졌으며,
 - 적절한 이해관계자 그룹 (stakeholder group)에 의해 널리 채택된
- 널리 일반적으로 용인된 PRA 관행 (widely accepted PRA practices)도 합의된 모델로 간주됨.
- 리스크 정보를 활용한 규제결정에서 "합의된 모델" 접근 방식은 "NRC"가 제안한 고유 리스크 정보를 활용한 어플리케이션 (Risk-informed Application, RIA)에 대해 사용하거나 승인한 방식임.
- "NRC"에서 발행한 문서
 - 합의된 안전성평가보고서 (Safety Evaluation Report, SER)
 - (하지만 이미 SER의 발행 없이도 합의된 모델로 간주되는 것들이 많이 존재함)

➢ 현재 합의된 모델 (consensus model)의 합의 목적은 존재하지 않음.

➢ 이러한 합의 모델과 관련한 첫 단계로 EPRI에서는 모델 불확실성의 소스 및 관련 가정사항을 식별하는 접근법 및 일반 목록을 제공

: EPRI-1016737 (EPRI, 2008 - Treatment of Parameter and Modeling Uncertainty for PRA)

: EPRI-1026511 (EPRI, 2012 - Practical Guidance on the Use of PRA in RIA)

3. Conclusion

- 새울3,4호기 한수원 종합설계 용역에서 ASME/ANS PRA Standard CC-II를 수준을 만족하기 위한 목표의 일환으로 2단계 PSA 결과에 대한 불확실성 분석 방법을 개선함.
- 기존 불확실성 분석은 원자로건물사건수목(Containment Event Tree, CET) 정량화를 위해 작성된 분해사건수목 (Decomposition Event Tree, DET) 분기확률에 대한 모수 불확실성만을 평가함.
- 이에 본 용역에서는 2단계 PSA 평가시 고려되는 모든 인자(정량화 CUTSET, DET 분기확률)들에 대하여 불확실성 분석이 가능하도록 아래와 같이 개발함.
 - 발전소손상군사건수목(Plant Damage State Event Tree, PDSET) 정량화 CUTSET에 대한 모든 분포정보 고려를 위해 SAREX 2.0 기반의 Database (DBS) 개발
 - PDSET 정량화 CUTSET들에 대하여 발전소손상군집화논리도(Plant Damage State Grouping Logic Diagram, PDSGLD)를 통한 유사 사고경위 CUTSET 군집화 및 CET/DET를 통한 정량화 및 불확실성 분석이 가능하도록 SAREX 프로그램 개정
 - CET의 하부사건수목인 DET에 고려된 분기확률에 대하여 불확실성 분석시 이산분포(Discrete Distribution)만으로 자동 적용되어 분석된 사항을 SAREX 프로그램 개정을 통해 다양한 분포를 적용할 수 있도록 개정
 - DET 분기확률에 대한 분포를 가정 또는 결정하기 위해 합의된 모델(consensus model) 접근방식을 참조하여 분기확률 값에 대한 분포 적용 방법 정립
- 이렇게 개발된 2단계 PSA 결과 (LERF, CFF, CS-137 등)에 대한 불확실성 분석은 ASME/ANS PRA Standard CC-II 수준을 만족하였으며, 이에 따라 2단계 PSA 불확실성 분석 신뢰 수준이 향상됨.
- 다만, 여기서 DET 분기확률 값에 대한 분포 가정/결정시 주의해야 할 사항은 아래와 같음.
 - DET 분기확률 값은 분석자의 공학적 판단에 의해 결정되므로, 분포 가정/결정시 분석자의 공학적 판단 근거 수준을 고려하여야 함.
 - 유사원전의 참고문헌만으로 결정된 경우, 분포의 불확실성 수준을 보수적으로 적용해야 함 (예, 로그정규분포의 오차인자(Error Factor, EF) '10' 적용).
 - 유사원전의 참고문헌 및 발전소 고유 정보를 반영한 평가 결과를 기반으로 공학적 판단을 한 경우, 본 논문에서 제시한 로그정규분포 EF는 95% 백분위 수의 확률값이 '1.0'을 초과하지 않도록 적용

2. Methods and Results

● 기존 2단계 PSA 결과 불확실성 분석

➢ CET/DET 불확실성 분석

- ✓ CET에 대한 DET 분기확률 불확실성 분석
- ✓ DET 분기확률에 이산분포 (Discrete Distribution) 적용 ("0" or "1")
- ✓ Monte-Carlo 표본추출을 통한 불확실성 분석 (using SAREX 전산코드)
- ✓ SAREX 1.3 기반의 Database (MDB) 사용 (인자들의 분포정보를 가지고 있음)

● 개정된 2단계 PSA 결과 불확실성 분석

➢ Step 1_PDSET 정량화 Cutset 도출

- : 정량화된 PDSET 파일 (XXX.SET)
- : 사고경위별 정량화 Cutset 파일 (예., GTRN_XXX.SMS)
- : 정량화 DB (XXXTotal.mdb - (변환) -> XXXTotal.DBS)
- (SAREX 2.0 기반의 Database (DBS) 사용)

➢ Step 2_발전소손상군 군집화 (PDSGLD)

- : 발전소손상군 군집화 논리도를 통한 유사 사고경위 군집화

➢ Step 3_DET 분기확률 분포 결정 및 작성 파일

- : DET 분기확률 분포 결정 및 기입
- : DET 분기확률 분포 기입

➢ Step 4_Monte-Carlo 표본추출을 통한 불확실성 분석

- : SAREX 전산프로그램을 통한 불확실성 분석

```

[UNCERTAINTY]
UNC_SCOPE = 1 ; 0 for L2 uncertainty only, 1 for both PDS ETs and L2 uncertainty
UNC_SAMP_METHOD = 0 ; 0 for MCL, 1 for LHS(Reserved)
UNC_TRIALS = 50000 ; More larger, more cIgars
    
```

: PDSET (CUTSET) -> PDSGLD -> CET/DET -> STCLD

● 개정된 2단계 PSA 결과 불확실성 분석시 고려된 분포 정보

➢ PDS ET/FT 평가시 고려인자 분포 정보

- : NUREG-6928 (with 고유데이터 베이저안 처리), EPRI HRA Calculator (Log-normal Distribution), NUREG/CR-5497 (CCF), 등

➢ CET/DET 평가시 고려인자 분포 정보 적용 방법

- : 대수정규분포 (Log-normal Distribution)로 가정 (주요참조 문헌: EPRI-1013491)
- : 분기확률 값을 'Mean'으로 가정 (주요참조 문헌: NUREG-1855)
- : 오차인자 (Error Factor, EF)는 최소 1 ~ 10을 넘지 않는 범위에서 95% 백분위수의 확률 값이 '1.0'을 초과하지 않는 수준에 해당하는 최대 정수 값을 오차인자 값으로 가정 (주요참조 문헌: EPRI-3002000703)
- : 여기서 중대사고완화계통에 대한 이용불능도의 경우, 모델링된 고장수목을 가지고 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 활용한 표본추출을 통해 수행된 불확실성 분석 결과를 가지고 "Range Factor (RF)" 방법을 적용하여 "대수정규분포의 오차인자 값을 결정" (주요참조 문헌: EPRI-1009652) $RF = \sqrt{95\% \text{ 신뢰도 구간값} / 5\% \text{ 신뢰도 구간값}}$

4. References

- [1] ASME/ANS RA-Sa-2009, Addenda to ASME/ANS RA-S-2008 Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications, The American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [2] Baehyeuk Kwon, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, "Introduction of updated CET/DET in the Level 2 PSA for APR1400 NPPs", May, 2022.
- [3] NUREG-1855, "Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated With PRAs in Risk-informed Decision Making, U.S. NRC, 2009.
- [4] EPRI-1013491, "Guideline for the Treatment of Uncertainty in Risk-Informed Applications", EPRI, 2006.
- [5] EPRI-3002000703, "Level 2 Probabilistic Risk Assessment - An Education of Risk Professionals Advanced Module", EPRI, 2013.
- [6] EPRI-1009652, "Guideline for the Treatment of Uncertainty in Risk-Informed Applications", EPRI, 2004.