creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000279315

2020년 2월

석사학위 논문

원자력 발전소 지진사건 확률론적 안전성 분석의 인간신뢰도분석

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

박 가 영

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

원자력 발전소 지진사건 확률론적 안전성 분석의 인간신뢰도분석

Human Reliability Analysis in the Probability Safety Assessment of Seismic Events in Nuclear Power Plants

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

박 가 영

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

원자력 발전소 지진사건 확률론적 안전성 분석의 인간신뢰도분석

지도교수 김 종 현

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조선대학교 대학원

원 자 력 공 학 과

박 가 영

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

박가영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 종 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

2019년 11월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT ····· iv

제1장 서론 ····· 1

제2장 지진사건 인간신뢰도분석 방법 선정 ····· 3

제1절 지진사건 HRA ····· 3

제2절 지진사건 HRA 지침 및 방법론 ····· 10

제3절 지진사건 HRA 사례 ····· 22

제4절 지진사건 HRA 비교 ····· 30

제3장 EPRI 지진사건 인간신뢰도분석 수행 ····· 32

제1절 구체적인 지침 제안 ····· 32

제2절 OPR1000 노형 지진사건 HRA 수행 예제 ····· 36

제4장 결론 ····· 42

참고문헌 ····· 43

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목차

표 1. ASME/ANS standard RA-Sa-2009 Guidance의 HRA 요건 ····· 11
표 2. Feasibility 평가를 위한 Damage state 정의 및 예시 ····· 17
표 3. Feasibility 평가 항목의 정의와 평가 방법 ····· 18
표 4. Diablo Canyon 원자력발전소의 지진재해도 ····· 22
표 5. Diablo Canyon 원자력발전소의 HEP 보정 값 ····· 24
표 6. San Onofre 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값 ····· 25
표 7. Columbia 원자력발전소의 지진재해도 ····· 27
표 8. Columbia 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값 ····· 28
표 9. Surry 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값 ····· 29
표 10. 지진사건 HRA 방법론 PSF 비교 ····· 30
표 11. 비상운전절차서 예시 ····· 33
표 12. 주제어실 정보전달 관련 기기의 HCLPF 범위 ····· 34
표 13. OPR1000 노형에 대한 손상상태 ····· 36
표 14. 충분한 시간 평가 ····· 38
표 15. CST 고갈시 수원 교체하는 운전원 행위의 접근성과 환경인자 평가 ····· 38
표 16. Screening 정량화 결과 ····· 41

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림 1. HRA 과정 ····· 3
그림 2. 운전원 행위 종류 ····· 5
그림 3. 운전원 오류 평가 방법 ····· 6
그림 4. ENSI-A05/e의 HEP 보정 방법 ····· 13
그림 5. EPRI 지진사건 HRA 수행 절차 ····· 15
그림 6. Screening HEP할당 규칙 ····· 19
그림 7. Cue 가용성 평가 수목 ····· 32
그림 8. CST 수원교체 운전원 행위의 Cue 이용가능성 평가 수목 ····· 37
그림 9. CST 수원교체 운전원 행위의 Screening 결정 수목 수행 결과 ····· 40

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Human Reliability Analysis in the Probability Safety Assessment of Seismic Events in Nuclear Power Plants

Park Ga Young
Advisor : Prof. Kim Jong Hyun, Ph D.
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

After the Fukushima accident, the safety assessment of NPPs has been proposed by regulators using PSA, one of the safety assessment methods. Institutes such as ASME and IAEA suggest performing seismic event HRAs because earthquakes increase the task that operators must perform manually. For example, there is the operator action of restoring functions or, relay chatter recovery.

Seismic event HRA should be carried out to the operator, taking into account the impact of the earthquake. Previously, seismic event HRAs were simply applied to the probability of an internal event human error. Such an analysis does not take into account the effects of the driver from the earthquake. Therefore, it is possible to overestimate or underestimate the probability of operator error.

The particular guideline was developed based on the experience of carrying out the selected EPRI seismic event HRA by selecting the seismic event HRA methodology. In the EPRI seismic event HRA methodology, a qualitative assessment by a feasibility assessment is performed, and a quantitative assessment by screening assessment is performed. The EPRI seismic event HRA methodology

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

provides assessment items, but does not provide evaluation criteria or methods. The particular guideline developed can be applied to reduce differences between analysts and to improve consistency in the analysis results.

It was also proposed that the EPRI seismic event HRA methodology be applied to the OPR1000 plant and the EPRI seismic event HRA methodology be performed for the actual plant.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서론

외부사건은 발전소 설비 고장과 같은 발전소 내부적인 요인에 의한 사고가 아니라 지진, 화재, 홍수, 및 내부/외부 침수와 같은 내부적인 요인이 아닌 모든 사건을 의미한다 [1]. 지진으로 인한 쓰나미로 중대사고까지 이어진 후쿠시마 원자력발전소 사고는 지진사건의 원자력발전소 안전성 향상에 대한 관심을 증가시키는 계기가 되었고, 이러한 지진사건의 원자력 발전소 안전성 향상시키는 방법 중에서는 지진사건 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)가 있다. 그 중에서도 인간신뢰도분석(Human Reliability Analysis, HRA) 원자력발전소에서 발생할 수 있는 운전원의 오류에 대해 정성적 그리고 정량적으로 분석하는 방법 중 하나이다. HRA는 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)에 입력을 제공하기 위해 수행되고 있다.

지진발생 시 운전원은 동작이 정지된 기기의 기능회복, 릴레이 채터 복구와 같은 직무를 수행하여 발전소의 안전성을 유지해야한다. 하지만 지진이 운전원에게 스트레스를 유발하여 운전원의 직무 수행 오류 또는 지연이 발생할 수 있다. 실제로 지진으로 사고가 발생한 일본의 카시와자키 발전소에서는 운전원 사고 대응을 지연시킨 원인 중 하나가 지진으로 인한 스트레스로 밝혀졌다 [2]. 지진사건은 내부사건 보다 운전원에게 정신적, 육체적 영향을 주어 운전원의 인적 오류 발생에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지진사건 HRA는 내부사건에서는 고려하지 않는 추가적인 수행도영향인자(Performance Shaping Factor, PSF)를 고려하여 분석해야한다. 예를 들어 지진으로 인한 정신적인 충격, 천장의 조명파손으로 인한 추가적인 도구, 알람 또는 경보의 오작동으로 인한 혼동이 있다. 그러므로 지진사건 HRA 방법론은 지진에 의한 영향이 PSF로 적절하게 반영되어 있는 방법론을 사용하여 인적오류확률(Human Error Probability, HEP)을 계산해야한다.

그러나 지진사건 HRA 방법에서 해결해야 할 여러 가지 문제들도 존재한다. 구체적으로 어떤 PSFs를 고려할 것인지, 보정 값은 어떻게 줄지 등에 대한 구체적인 가이드라인이나 방법론들이 현재까지 거의 존재하지 않고, 대부분의 개발된 방법들이 전문가 판단에 의존하고 있다 [3]. 또한, 일반적으로 적용이 가능한 방법론이 존재하지 않는다. 예를 들어 국내 발전소에서는 단순히 내부사건 HEP에 보정 값 10을 적용하였고, 미국에서는 단순히 내부사건 HEP에 지진 규모별로 나눈 보정 값을 적용하는 발전소가 있

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

는 반면에, 지진의 규모, 운전원 수행 시간, 운전원이 직무를 수행하는 건물의 내진 설계까지 고려하여 지진사건 HRA를 수행한 발전소도 있다.

따라서 본 연구는 원자력발전소에 적용해 왔던 지진사건 HRA의 PSFs, 지진의 규모, HEP 보정 값을 비교하여 지진사건 HRA 방법을 선정하였다. 다음으로 선정한 방법론을 적용하여 분석한 경험으로 구체적인 지침을 제안하고, OPR1000 노형의 운전원 행위를 예를 들어 구체적인 지침을 적용한 방법을 기술하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 지진사건 인간신뢰도분석 방법 선정

후쿠시마와 같은 중대사고 또는 다수호기 사고를 유발할 수 있는 지진사건 HRA를 수행하기 위해서는 지진사건 HRA방법을 선정해야한다. 지진발생시 운전원에 미치는 영향을 고려한 방법론을 선정하기 위해서 먼저 1) 기본적인 HRA에 대한 배경을 설명하고, 다음으로 2) 지진사건 HRA에 대해 기술하고, 분석을 수행할 방법론 선정을 위해 3) 지진사건 인간신뢰도분석 지침 및 접근법을 조사하고, 지진이 자주 발생하는 미국의 원자력발전소에서 수행한 3) 지진사건 HRA사례를 조사하였다. 마지막으로 기술 조사한 지진사건 HRA방법론을 비교하여 지진사건 HRA 방법론을 선정하고자 한다.

제1절 지진사건 HRA

1. 수행 과정

일반적으로 HRA의 과정은 체계적 운전원행위 신뢰도 절차(Systematic Human Action Reliability Procedure, SHARP) [4]에 근거하면 그림 1과 같이 다섯 단계로 구성할 수 있다. 다음은 각각 단계에 대해 간단히 기술하고자 한다.

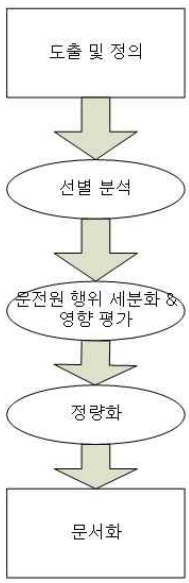

그림 1. HRA 과정

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가. 운전원 행위 도출 및 정의

계통분석과 사건수목분석에서 모형화 된 운전원 행위를 도출 및 정의하는 작업이다. 계통분석 및 사건수목 분석에서 운전원과 계통 사이에 존재하는 상호작용을 파악하기 위하여 발전소의 계통 운전절차서, 비정상운전절차서, 비상운전절차서(회복 포함), 그리고 시험 절차서를 검토하며, 기기의 정비작업과 계기교정 작업 시 발생 가능한 운전원 오류 또한 파악하게 된다.

나. 선별분석

선별분석의 주목적은 앞에서 정의된 운전원 행위 가운데 상세분석을 수행하는 운전원 행위를 줄이기 위한 목적으로 수행한다. 상세분석은 절차서, 운전원의 면담, 훈련의 정도와 같은 많은 정보가 요구된다. 따라서 노심 손상 빈도에 영향을 미치는 인적 오류를 선별하고, 나머지 운전원 행위는 보수적인 값을 할당한다. 선별분석은 정성적, 정량적 기준을 적용하는 단계로서, PSA 사건수목에서 도출과 정의된 인적오류가 PSA 정량화 결과에 큰 영향을 주는지를 확인하여 상세분석 운전원 행위를 선정하기 위한 사전분석 단계이다.

다. 운전원 행위 세분화 & 영향 평가

상세분석을 목적으로 운전원 행위를 세분화하고, PSA 모델에서 운전원 행위의 영향 평가를 수행한다. 운전원 행위는 한 가지 이상의 세부수행직무로 이루어져 있는 경우가 많다. 정확한 운전원 행위 분석을 위해서 세부수행직무의 명확한 분류와 이에 대한 이해가 필요하며, 보통 HRA 전문가와 고장수목 및 사건수목 분석자가 함께 작업한다. 이를 통해, 운전원 행위가 세분화되고 PSA 모델에 적절히 모형화가 되었다면, 다음은 분석대상 운전원 행위가 초기사건, 계통운전 및 사고경위에 미치는 영향을 평가하고, 타 사고경위 논리에 영향이 없는지 확인하는 과정을 거친다.

라. 정량화

운전원 행위사건의 오류확률을 정량화하는 작업을 수행한다. 운전원 오류확률은 도출 및 정의에서 조사한 정보와 데이터를 이용하여 계산된다. 또한, 발전소의 열 수력학적 계산에 의한 운전원 조치필요시간, 시뮬레이터를 통한 운전원 반응시간, 운전원과의

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

면담내용 및 수행도형성인자와 같은 정보가 사용된다. 여기서 수행도영향인자는 운전원의 수행도에 영향을 미치는 요소로서, 운전원의 경험이나 스트레스와 같은 인자를 의미한다.

마. 문서화

마지막 단계는 운전원 행위의 정성적 & 정량화 과정에 대한 설명을 기술하여 문서화하는 것이다. 이 문서에는 분석방법, 가정사항, 데이터 및 종속성 등이 포함되어야 한다.

2. 운전원 행위의 종류

운전원 행위의 종류를 구분하는 것은 발전소 상황마다 수행하는 운전원의 직무성격, 오류 유형, 발생가능성에 차이가 있다 [6,7]. 그러므로 HRA를 수행하기 위해 운전원 행위를 구분해야한다. 운전원 행위의 종류는 발생 시점에 따라 다음의 그림 2와 같이 3가지로 구분된다 [5].

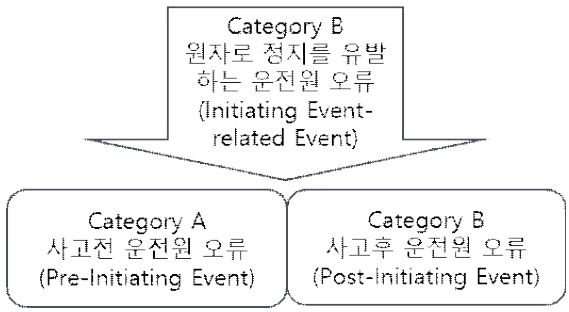

그림 2. 운전원 행위 종류

가. 사고 전 운전원 오류(Pre-Initiating Event)

Category A action는 사고전 운전원 오류(Pre-Initiating Event)을 의미하며, 정비시험 또는 정기적인 정비나 계기의 교정작업 수행 중에 발생하는 운전원 오류이다. 그 중에서 대표적인 오류의 예로는 Three Mile Island 발전소 사고의 원인 중에 하나인 정비 시험 후 밸브를 원위치로 복구시키지 않은 운전원 오류(not restored after test and maintenance)나 계기의 오보정(miscalibration) 오류가 있다. 이러한 운전원 행위의

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경우 사전계획에 의하여 작업을 시작하며, 대부분은 절차서를 사용하여 체계적으로 작업을 수행하게 된다. 이때에는 운전원이 사전에 작업의 목적, 방법 및 필요한 조건이 무엇인지를 알고 있고, 수행경험이 많은 작업이므로 상황을 판단하고 대응조치를 결정하는 인지과정에서의 오류는 거의 발생하지 않는다.

나. 원자로 정지를 유발하는 운전원 오류(Initiating Event-related Event)

Category B action는 원자로 정지를 유발하는 운전원 오류(Initiating Event-related Event)를 의미하며, 운전원의 행위로 원자로가 정지되는 오류이다. 예를 들어 스위치야드 점검 중 소외전원이 상실되어 원자로가 정지되는 사고가 있다. 하지만 이러한 운전원 오류는 해당 초기사건의 빈도에 포함되어 계산되기 때문에 HRA에서 분석하지 않는다.

다. 사고 후 운전원 오류(Post-Initiating Event)

Category C action은 사고후 운전원 오류를 의미하며, 원자로에 사고발생 후(정지된 후) 사고를 완화하기 위한 조치나 복구 조치에서 발생하는 오류이다. 예를 들어 사고대응 절차서를 수행하는데 절차를 누락하거나, 잘못된 조치를 수행하는 오류에 해당한다. 이때의 운전원은 상황을 판단하고 발전소 상태를 파악하여, 비상운전절차서에 근거하여 적절한 대응조치를 수행하는 것이다. 이런 직무에서는 인지단계(Cognition)에서 의사결정을 수행하는 사고 진단을 수행하기 때문에 중요하다.

3. 운전원 오류 평가 방법

운전원 오류 평가는 하나의 운전원 행위에 그림 3과 같이 진단 오류와 수행 오류로 나누어 평가하고, 계산된 오류 확률을 더하여 최종오류확률을 계산한다.

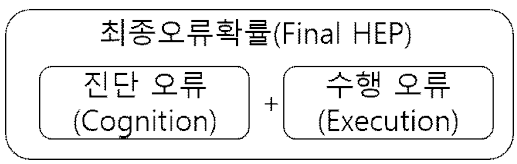

그림 3. 운전원 오류 평가 방법

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이러한 운전원 오류 평가 방법은 운전원 행위 종류에 따라 달라지는데, 사고 전 운전원 오류는 앞에서 기술한 것 과 같이 수행경험이 많고, 사전계획에 의해 수행하기 때문에 진단 및 의사결정 행위에 대한 평가는 생략하고, 조치 및 수행에 대한 평가만을 수행한다. 그러므로 진단 오류 평가는 수행하지 않고, 수행 오류만 평가한다. 사고 후 운전원 오류는 원자로 사고후 많은 정보를 처리하여 원자로 정지의 이유를 진단하고 사고 완화 방법을 결정하는 과정과 그에 따른 수행을 모두 평가하여 운전원 오류 확률을 평가한다.

4. 수행도영향인자

수행도영향인자(Performance Shaping Factor, PSF)는 운전원의 인적수행도에 영향을 주는 요소를 말한다 [6]. 원자력발전소를 대상의 HRA 방법론들은 발전소의 보통 상태에서 운전원의 오류확률을 가정하는 기본오류확률(Basic Human Error Probability, BHEP)에 오류원인을 강조하고, 반영하기 위해 PSF를 사용하고 있다 [7]. 예를 들어 경험, 훈련, 절차서, 스트레스, 직무 복잡성과 같은 PSF를 고려하고 있다. 다음은 몇몇의 HRA 방법론들과 각 방법론에서 고려하고 있는 PSF들 이다.

- Technique for Human Error Rate Prediction(THERP): Time line, Stress, Location, Task Type, Complex, Environment
- Standardized Plant Analysis Risk HRA(SPAR-H): Available Time, Stress, Complexity, Experience/Training, Procedure, Ergonomics/HSI, Fitness for Duty, Work Processes
- Korea Human Reliability Analysis(K-HRA): 진단여유시간(직무허용시간, 직무인지시간, 작업소요시간), HSI(경보/계기), 절차서 수준, 직무친숙도(시간 여유 포함), 교육/훈련 수준, 의사결정 부담감, 작업유형, 스트레스, 오류 복구
- Cause-Based Decision Tree Method(CBDTM) and Human Cognitive Reliability/Operator Reliability Experiment(HCR/ORE): Time line, Procedure, Training, Human System Interface(HSI), Task Type (Check or Monitor), Deliberate, Action Type (CP1, CP2, CP3)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 지진사건 HRA 분석대상 운전원 행위 도출 및 정의

지진사건 HRA을 위해서는 분석대상 운전원 행위를 도출하는 것이 필요하다. 분석대상 운전원 행위 도출은 크게 2가지가 있다. 1) 내부사건 HRA에서 고려한 운전원 행위 중에 재분석이 필요한 행위와 2) 지진사건에 새롭게 추가된 운전원 행위를 도출해야한다. 첫 번째는 지진사건과 내부사건 운전원 행위가 같은 운전원 행위이기 때문에 지진사건의 수행도영향인자를 고려하여 재분석하는 운전원 행위를 도출한다. 예를 들어 같은 사고흐름으로 진행 하여 사건수목에 모델링 되어있는 운전원 행위가 동일한 경우에 해당한다. 두 번째는 지진상황에 새롭게 추가된 운전원 행위 도출이다. 이 운전원 행위는 내부사건 HRA에서 고려되지 않은 것으로, 지진사건으로 수행되는 운전원 행위를 의미한다.

가. 내부사건 운전원 행위 중 재분석 대상 도출

(1) 사고 전 운전원 행위

내부사건 분석에서 사고 전 운전원 오류의 경우 초기사건과는 독립적인 것으로 평가한다. 따라서 지진사건에서도 사고 전 운전원 오류는 지진사건과 무관한 것으로 평가하여 사고 전 운전원 행위의 경우 내부사건 HRA 결과를 그대로 사용하고 재분석하지 않는다.

(2) 지진사건과 관련 없는 내부사건에 포함된 운전원 행위 제외

지진사건과 연관이 낮은 내부사건에 포함된 운전원 행위의 경우 제외한다. 예를 들어 대형냉각재상실사고(Large Loss of Coolant Accident, LLOCA)의 경우 일반적인 외부사건 PSA의 분석대상에서 제외된다. 하지만 분석대상의 시나리오가 내부사건에서 운전원 행위의 제한조건(Limiting case)으로 사용될 경우 재분석이 필요하다. 내부사건 분석에서 소형, 중형, 대형 냉각재 상실사고의 운전원 행위에 대한 조치시간을 고려할 때 가장 심각한 상황인 대형냉각재상실사고를 가정하여 평가하고 이를 중형, 소형냉각재사고에도 동일하게 적용한다. 하지만 지진 PSA에서는 대형냉각재 상실사고는 고려하지 않으므로 제한조건을 중형냉각재사고나 소형냉각재사고로 하여 운전조건을 재평가할 필요가 있다.

(3) 고장수목과 사건수목의 재검토

이 단계는 내부사건에서는 모델 되지 않았으나 외부사건에서는 고려할 필요가 있는 운전원 행위를 찾는 단계이다. 이러한 운전원 행위는 절차서에 따라 수행되며, 낮은 기

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기 고장 확률로 인해 기기에 대한 수동 동작 운전원 오류 분석이 수행되지 않는 경우이다. 대표적인 예는 내부사건 분석에서 사고 시 자동 동작하는 시스템의 고장 확률이 낮을 때 이에 대한 운전원의 수동동작 오류는 무시되는 경우가 있다. 하지만 지진 상황에서는 지진으로 인해 자동동작 시스템의 고장이 발생하거나 신뢰도가 떨어질 가능성이 있으므로 이에 대한 운전원 수동동작 오류 분석을 수행할 필요가 있다.

나. 지진 사건에 대응하는 운전원 행위

지진사건으로 일어난 사고를 완화하는 데 필요한 운전원 행위의 경우 추가로 지진사건 HRA에서 분석해야 할 필요가 있는 행위들이다. 일반적으로 이러한 행위는 비상운전절차서(Emergency Operating Procedure, EOP), 비정상운전절차서(Abnormal Operating Procedure, AOP)에 포함되어 있지 않으며, 별도의 지진대응 절차서에 기술되어 있다. 이러한 행동은 운전원 회복행위(Recovery Action)이라고도 불리며, 지진으로 인한 기기의 고장으로 운전할 수 없을 때 운전원이 다른 대체 기기를 사용하여 수행하거나, 기기까지 접근 경로가 막혀 대신해서 가용한 경로를 사용하여 기기 조작을 수행하는 운전원 직무가 여기에 포함된다. 회복행위에는 다음과 같은 운전원 직무가 있다.

- 손상 평가: 지진의 영향을 평가하기 위해 발전소 영역, 시스템, 기기의 상태를 조사하는 행위이다.
- 지진사건의 영향을 종결하는 행위: 지진으로 인해 비정상적인 상태에 있는 기기를 판별하고 보호하는 행위이다. 예를 들어, 전기구동밸브의 경우 지진으로 인해 원치 않는 열림 상태로 놓일 수가 있는데, 이러한 고장은 운전원이 밸브의 전원을 차단함으로써 복구될 수 있다. 다른 예로는 릴레이 채터로 인해 차단밸브가 원치 않게 열리는 경우가 있다.
- 영향 받은 기기를 이용하여 지진사건의 결과를 완화하는 조치: 이 행위는 운전원이 대체할 수 있는 성공경로를 통해 고장이 난 기기를 복구하는 행위이다. 예를 들어, 릴레이 채터로 인한 정전사고 시에 운전원이 주 제어실에서 회로나 릴레이를 리셋하거나, 비상 디젤발전기를 기동하는 행위가 이에 해당한다.
- 대체기기를 이용하여 지진사건의 결과를 완화하는 조치: 이 행위는 대체가능한 성공 경로를 통해 고장 난 기기를 복구하는 행위이다. 위의 행위의 경우 고장 난 기

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기에 대해 운전원이 조치를 하여 복구하는 행위라면, 이 행위는 동일한 기능을 할 수 있는 대체기기를 활용하여 기기를 복구하는 경우이다. 예를 들어 이동형 발전기를 사용하여 비상 디젤발전기 고장 시 전원을 복구하는 행위가 이에 해당한다.

제2절 지진사건 HRA 지침 및 방법론

해외에서는 후쿠시마 사고이후로 지진사건에 대한 안전성 향상을 위해 지진사건 HRA 지침 및 방법론을 개발하여 수행하고 있다. 그 중 대표적인 ASME/ANS Standard Guidance, IAEA Standard, 스위스 규제 지침, 그리고 EPRI에서 제안한 지진사건 HRA 방법론에 대해 제시하도록 하겠다.

1. ASME/ANS Standard RA-Sa-2009 Guidance

ASME/ANS Standard의 PSA Guidance에서는 표 1과 같이 지진사건 HRA 관련 요건들을 제안하고 있다 [8]. 본 지침에서는 상위수준의 요건들과 그에 해당하는 하위의 상세 요건들을 제시하고 있는데, 지진사건 HRA를 대상으로 하는 요건 2가지에 대해 기술하고자 한다. 전출력 내부사건 PSA에서 고려된 사항들과 함께 지진사건에 HRA에서 고려해야 하는 사항에 대해 기술하고 있다. 예를 들어, 지진으로 인한 발전소 손상으로 운전원이 기기 및 장비에 대한 접근성이 떨어질 경우, ‘SPR-B8’에서는 지진으로 인해 운전원들이 안전 장비나 조작 장치에 접근하지 못하여 직무를 수행하지 못할 가능성에 대해 검토를 요구하고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 1. ASME/ANS Standard RA-Sa-2009 Guidance의 HRA 요건 [8]

상위수준 요건(High Level Requirement, HLR)		상세 요건	
HLR-SPR-A	지진 PSA 모델에서는 지진으로 인한 구조, 계통, 기기(Structure, System, Component, SSC)기능 상실, 내진설계 미흡으로 인한 기기 사용 불가, 중대사고를 초래하는 인적 오류 등이 포함되어야 한다.	SPR-A4	PSA 모델은 지진으로 인해 발생한 고장과 내진설비 미흡으로 인해 발생한 고장, 인적 오류 등을 반영하여, 사고 Sequence가 주요 운전원 오류를 잘 반영하는지 확인한다.
HLR-SPR-B	지진 PSA 모델에서는 전 출력 내부사건 PSA의 HRA결과에 지진 관련 분석 결과를 충분히 반영한 후, 이를 지진 PSA 모델에 반영해야 한다.	SPR-B2	지진 후 추가적인 스트레스는 인적 오류 가능성을 증가시킬 수 있고, 이는 내부사건 HRA에 할당된 실패 확률과 비교한다. 예를 들어, 밸브를 수동으로 작동하는 같은 수행임에도 지진 시나리오에서는 지진 후 스트레스로 인해 더 높은 확률로 실패할 수 있음을 반영해야 한다.
		SPR-B8	큰 규모의 지진으로 인해 운전원들이 안전 장비나 조작 장치에 접근하지 못하여 직무를 수행하지 못할 가능성을 검토한다.
		SPR-B8	지진의 경우 Recovery가 불가능하거나 그 가능성이 더 낮아질 수 있으므로, 전 출력 내부사건에 모형화 된 시스템 Recovery를 검토하고 이를 지진 PSA 모델에 충분히 반영해야 한다.
		SPR-B11	지진 PSA Walk down에는 NUREG-1407에 제시된 지침에 따라 지진 발생 화재 및 침수 가능성을 반영해야 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. IAEA Safety Standards Series-3

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서 출판한 “Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants”의 안전 표준 관련 지침에서는 지진이 발생한 후 운전원 직무와 관련하여 발생할 수 있는 상황들을 평가하는 지침을 제안하고 있다 [9]. 대표적인 내용은 지진의 영향으로 성공할 가능성이 낮은 운전원 대응 조치에 관하여 PSA모델에서 삭제하거나 운전원 실패 확률을 높이는 방향으로 조정해야 한다고 제시하고 있다. 또한, 전 출력 내부사건 Level 1 PSA에서 고려된 초기사건에서 발생할 수 있는 모든 사고 후 인적 오류들을 대상으로 특정 지진 조건들에 대한 영향을 반영하여 수정 및 조정하는 것 을제안하고 있다. 다음은 IAEA에서 제안하는 구체적인 내용에 관해 기술하고 있다.

- 지진 발생 후에는 원자력발전소 건물이나 계통 또는 기기에 대한 접근성이 떨어질 수 있다. 예를 들어, 지진으로 인한 장해물로 운전원이 조작기기에 접근이 불가하거나, 사용하고자 하는 계통 또는 기기가 내진 설계가 되어 있지 않은 건물에 있어 지진으로 인해 해당 건물이 파괴되었다면 기기나 계통이 가용하다고 하더라도 운전원이 접근이 불가하므로 불가능한 직무가 된다.
- 지진 발생 후에 운전원의 스트레스가 증가 될 수 있다. 지진으로 인해 운전원은 육체적 또는 정신적으로 영향을 받을 수 있다. 육체적인 영향은 경미한 부상이 있을 수 있고, 정신적인 영향으로는 수많은 알람으로 인해 운전원의 스트레스가 증가하거나, 운전원이 수행을 인지하는데 더 많은 시간이 소요될 수 있다.
- 지진 발생으로 인해 주제어실 지시계가 고장 나거나 비정상적인 값을 표시할 가능성이 있다. 내부사건과는 달리 지진사건은 발전소에 전반적으로 영향을 미칠 수 있고, 지진 진동으로 인해 전기기기의 연결이 끊어지거나 오작동하는 릴레이 채터 현상이 발생 할 수 있다.
- 지진사건에서 전신주 손상으로 전력상실로 인해 통신시스템이 기능을 상실을 고려해야 한다.
- 지진으로 인한 이차적인 사고로 침수와 화재가 발생할 수 있다. 후쿠시마 원전사고는 지진으로 인한 쓰나미 발생으로 원자력발전소가 침수되어 중대사고까지 이어진 대표적인 사례로 볼 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 스위스 규제기관의 PSA Quality 지침

스위스 연방 원자력 안전 규제기관(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)는 스위스 원자력발전소에 지진사건 PSA지침을 ENSI-A05/e에서 제공하고 있다 [10]. 이 지침에서는 지진사건 HRA 방법도 함께 제시하고 있고, ASME/ANS지침과는 달리 구체적인 방법론을 제안하고 있다. 그림 4는 ENSI-A05/e에서 HEP 보정 방법을 보여주고 있다.

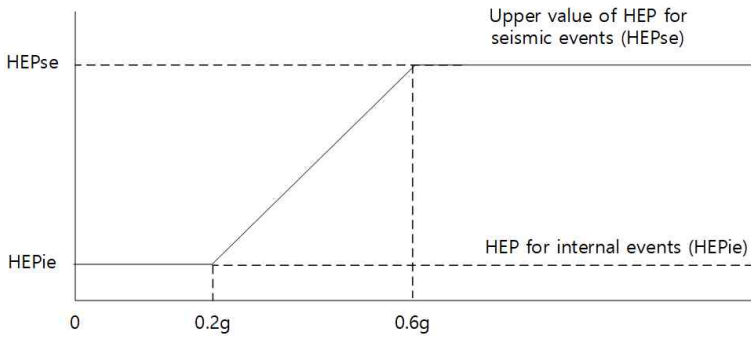

그림 4. ENSI-A05/e의 HEP 보정 방법

ENSI에서 제안하는 지진사건 HRA 방법론을 정리하면 다음과 같다.

- 지진가속도 0.2g 이하는 내부사건 HEP을 적용한다(HEP 보정 값=1).
- 지진가속도 0.2g~0.6g일 때 0.2g~0.6g의 값 사이에 HEP의 선형 보정을 수행한다. 단, 0.6g 이하의 지진사건 발생 1시간이 지난 뒤 수행된 행위의 경우, 내부사건 HEP(HEP 보정 값=1)을 적용한다.
- 0.6g 이상일 경우, 모든 운전원 직무는 실패로 간주한다(HEP=1).

추가적으로 ENSI는 최근에 개정을 수행하여 방법론을 더욱 구체적으로 적용하는 방법을 제시하였다.

- 지진사건 PSA의 운전원 행위는 계측기 또는 비상운전절차서의 절차가 있어야한다. 운전원이 진단, 수행, 감시가 필요할 때, 이용불가능하다면 HEP=1로 평가한다.
- 위의 조건이 만족한다면, 아래의 사항으로 HEP를 결정하라.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

- 0.2g 이하의 지진에서는 내부사건 PSA 모델의 HEP를 그대로 사용한다.
- 0.2g 이상의 지진에서는 HEP를 결정하기 위해 단기(지진 발생 후 1시간 이내), 중기(지진 발생 후 1시간 이후~12시간 전까지), 장기(지진 발생 후 12시간 이후)를 평가한다. 단, 지진사고가 근무시간 이외에 발생했을 경우 외부 지원을 보수적으로 적용하기 위해 장기 범위의 시간인 12시간을 8시간으로 적용할 수 있다.
- 지진가속도가 0.2g 이상인 경우, 내부사건 HEP에서 HEP는 로그 정규 분포를 통해 함수로 모델링 된다. 여기서 0은 표준 정규 분포의 누적 분포 함수이다.

$$HEP = HEP_{\text{내부}} + (1 - HEP_{\text{내부}})\Phi[\frac{\ln(\frac{PGA - 0.2g}{0.273g})}{0.566}], \text{단기}$$

$$HEP = HEP_{\text{내부}} + (1 - HEP_{\text{내부}})\Phi[\frac{\ln(\frac{PGA - 0.2g}{0.4g})}{0.566}], \text{중기}$$

$$HEP = HEP_{\text{내부}} + (1 - HEP_{\text{내부}})\Phi[\frac{\ln(\frac{PGA - 0.2g}{0.586g})}{0.566}], \text{말기}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. EPRI Seismic HRA 수행 지침

EPRI는 최근에 개발한 화재사건 방법론인 NUREG-1921[11] 연구 결과와 수행 경험을 기반으로 지진사건에 초점을 맞춘 외부사건 HRA방법을 개발하였다 [12]. 그림 5는 EPRI 지진사건 HRA(이하 EPRI 지진사건 HRA 방법론)수행 절차이다.

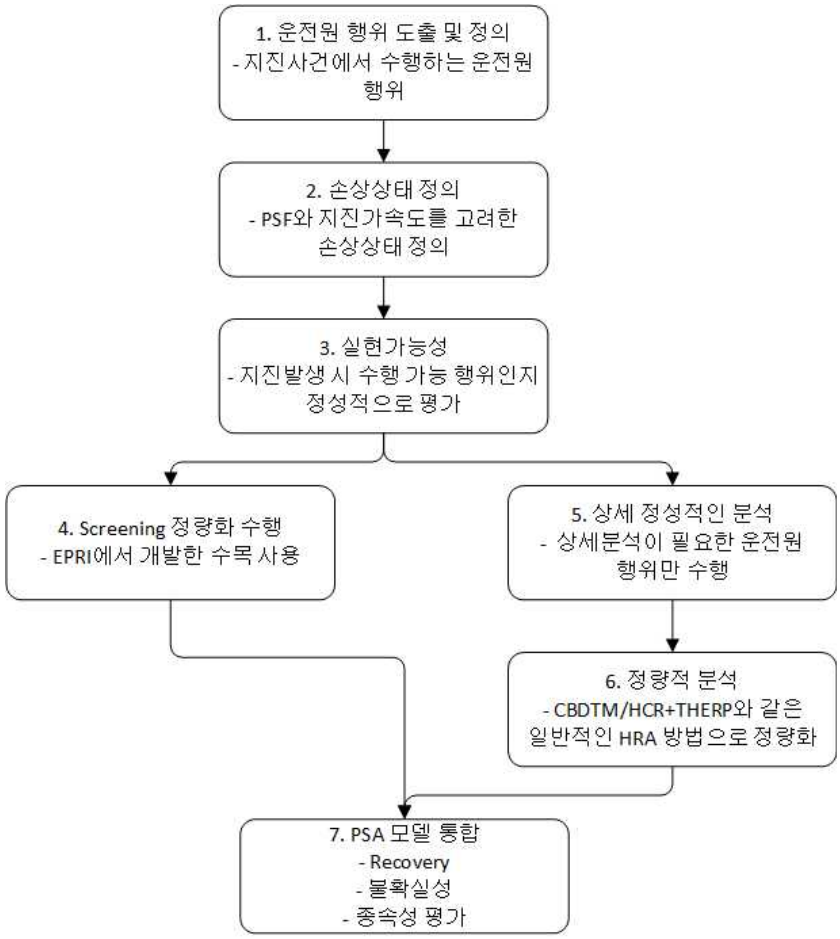

그림 5. EPRI 지진사건 HRA 수행 절차

그림 5에서와 같이 EPRI 지진사건 HRA의 수행 절차는 총 7개의 단계로 구성되어 있다. 먼저 지진사건에서 수행하는 운전원 행위 도출 및 정의를 수행하여 지진사건 분석대상을 선정한다. 다음으로 원자력발전소 구조, 시스템, 기기(Structure, System, Component, SSC)를 고려하기 위한 손상상태 정의한다. 다음으로 내부사건과 달리 지

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

진 발생 시에 운전원의 직무가 수행이 불가능할 수 있기 때문에 실현가능성으로 정성적인 분석을 수행한다. 지진상황에서도 수행 가능한 운전원 행위는 EPRI에서 개발한 수목으로 Screening 정량화 수행한다. 그 중에서 지진사건 PSA 노심손상빈도에 영향이 큰 운전원 행위는 정성적, 정량적 상세분석을 수행한다. 이렇게 얻어진 운전원 오류확률은 지진사건 PSA 분석가에게 전달하여 지진사건 PSA 모델에 통합하고 지진구간에 따라 모델 정량화를 수행한다. 모델의 정량화로 얻어진 최소단절집합으로 회복행위와 불확실성 분석, 현실적인 운전원 오류 확률을 위한 종속성 평가를 수행한다. 다음은 각 단계의 수행방법을 자세히 기술하고자 한다.

가. 운전원 행위 도출 및 정의

지진사건에서의 운전원 행위는 2가지로 도출될 수 있다. (1) 내부사건과 동일하게 지진사건에서 수행되는 운전원 행위와 (2) 지진사건에서 새롭게 추가된 운전원 행위가 있다. 다음은 각 운전원 행위에 대한 설명이다.

(1) 내부사건과 동일하게 지진사건에서 수행되는 운전원 행위

지진사건에서도 내부사건과 동일한 운전원 행위가 수행된다. 내부사건에서 운전원 행위는 내부사건 사건수목에 모델링된 운전원 행위를 도출하여 분석대상을 선정한다. 지진사건 사건수목이 내부사건 사건수목과 거의 동일하면 해당 사건에 수행하는 운전원의 행위도 같다. 예를 들어 내부적인 결함으로 냉각재상실사고가 발생하면 운전원은 냉각재 유출을 격리시켜야한다. 마찬가지로 지진으로 인해 냉각재상실사고가 발생하면 운전원은 냉각재 유출을 격리해야한다. 따라서 내부사건과 동일한 사건수목으로 모델링 된 운전원 행위는 분석대상으로 선정할 수 있다.

(2) 지진사건에서 새롭게 추가된 운전원 행위

지진사건은 내부사건과 다르게 지진대응절차서와 같은 절차서를 추가로 수행한다. 이때 지진대응절차서에 있는 운전원 행위가 추가된다. 지진으로 발생할 수 있는 운전원 행위에는 지진으로 인해 작동을 멈춘 기기나 릴레이 채터가 발생하여 기능을 회복하거나 강한지진의 발생으로 후쿠시마와 같이 쓰나미, 화재와 같은 추가적인 사고 발생 할 때 운전원의 완화조치를 분석대상으로 선정할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 손상상태 정의

원자력발전소 손상상태에 따라 운전원이 수행하는 대응 조치에 미치는 영향이 달라질 수 있기 때문에 EPRI 방법론에서는 주어진 HFE에 대한 영향을 4가지 구간으로 나누어 지진가속도에 따른 손상상태를 정의하도록 제안하고 있다. EPRI 지진사건 HRA에서 개발된 손상상태 평가는 운전원은 사고의 원인이 아닌 사고로 인한 결과에 영향을 받는다는 가정을 기반을 두어 개발되었다 [13]. 예를 들어 사고가 발생하면 운전원은 원자력발전소에 지진으로 인해 냉각재상실사고가 발생하였는지, 배관의 부식에 의해 발생하였는지에 따라 직무를 수행하는 것이 아니라 파단의 크기, 냉각재 유출량과 같은 손상정도에 따라 운전원의 직무와 영향이 달라진다. 다음의 표 2는 EPRI 지진사건 HRA에서 제시하는 손상상태 정의와 지진가속도에 따른 발전소 SSC의 지진재해도로 환산한 예시이다.

표 2. Feasibility 평가를 위한 Damage state 정의 및 예시

구분	외부사건으로 인한 손상 상태 정의	지진재해도 환산 예시
1	No damage to the plant safety-related SSCs or non-safety SSCs required for operation. Limited damage to non-safety, non-seismic designed SSCs like residences and office buildings.	Hazard < Plant SSE(Safe shutdown Earthquake)
2	No expected damage to the plant safety-related SSCs or to rugged industrial type non-safety SSCs required for operation. Damage may be expected to non-safety SSCs not important to plant operations and to the switchyard(e.g., LOOP expected). Some falling of suspended ceiling panels.	SSE≤Hazard<The lowest HCLPF of any safety-related SSC on the SEL
3	Widespread damage to non-safety related SSCs and/or some damage expected to safety related SSCs. Significant number of vibration trips and alarms requiring resetting.	The lowest HCLPF of any safety-related SSC on the SEL≤ Hazard< HCLPF of critical instrumentation
4	Substantial damage to safety related and non-safety SSCs. This is particularly applicable to external events susceptible to a cliff-edge effect.	Wide-spread damage to critical instrumentation

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 실현가능성 평가

지진상황에서 수행 가능한 운전원 행위인지 평가하는 단계이다. EPRI 지진사건 HRA 방법에는 실현가능성 평가를 위해 표 3과 같은 총 7개의 항목을 모두 만족하는지 확인하고 있다. 운전원 행위가 실현이 불가능하면 HEP에 1을 할당하여 해당 행위는 실패한다고 평가한다.

표 3. Feasibility 평가 항목의 정의와 평가 방법

평가 항목	실현가능성 정의	Screening 평가 방법
충분한 시간	직무 수행을 위해 충분한 여유시간 (Time margin)이 있는지 평가	Screening 방법에 정의된 시간 마진 요구사항을 충족
충분한 인력	지진 초기사건에 따른 운전원에게 요구되는 추가적인 조치를 처리 가능하고, 완화 조치를 수행하는 충분한 인력 있는지 평가	지진 발생 시 추가적인 기기 및 장비의 이동이 있는지 검토
알람 또는 절차서의 이용가능성	HFE와 관련된 직무 수행의 필요성을 인지할 수 있는 정보의 여부와 관련하여 지진사건 HRA수행 지침서는 충분한 primary cue제공여부를 평가	Primary cue 이용가능성
절차서와 훈련	모든 지진사건 HFE는 절차서에 따라 수행해야하고, 이러한 절차서에 따라 직무를 수행하는 훈련을 받았는지 평가	절차서가 없어도 수행 가능할 정도로 충분히 숙달된 직무를 제외하고, 운전원의 직무와 관련된 최소한의 절차서나 훈련의 제공
접근성과 환경인자	현장운전원이 직무를 수행하는데 영향을 미치는 접근성과 환경 인자를 평가	가장 우선순위의 이동경로가 이용 불가능하면 실현불가능하다고 평가
기기 또는 도구의 접근가능성& 이용가능성	기기 또는 도구는 반드시 이용가능하고 접근 가능해야한다.	접근성과 환경인자와 비슷하게 이동경로가 이용불가능하거나 기기를 사용할 수 있도록 충분한 시간

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. Screening 정량화

실현가능성 평가를 수행하여 지진상황에서 실현가능한 운전원 행위는 Screening 정량화를 수행하여 운전원 오류 확률 값을 구한다. 정량화는 EPRI 지진사건 HRA에서 그림 6과 같은 5개의 항목을 포함한 결정수목을 제시하고 있다.

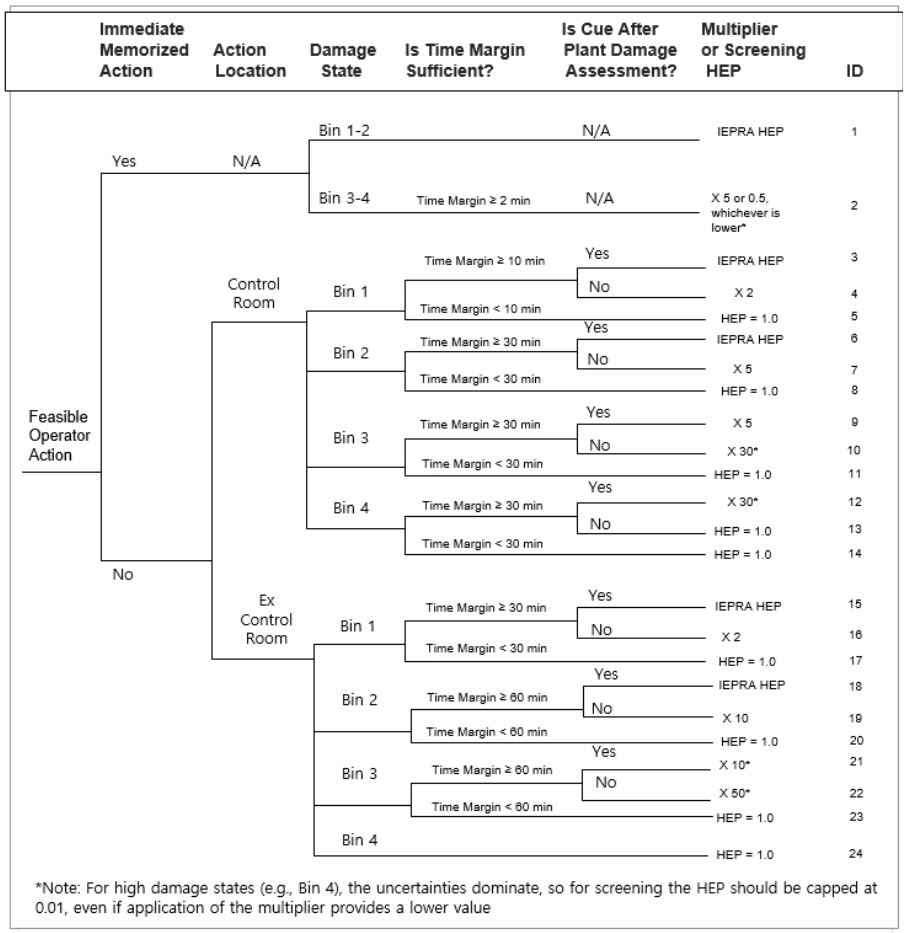

그림 6. Screening HEP할당 규칙

위의 기준들 중에 손상 상태(Damage State)와 여유 시간(Time Margin)에 대한 설명은 실현가능성 부분에서 설명. 또한 수행 장소(Action Location)는 HFE 관련 직무의 수행 장소가 주 제어실인지, 현장인지 여부를 질문하는 것이기 때문에 추가적인 설명이 필요하지 않다. 이들을 제외한 Immediate Memorize Action과 Cue의 발생 시점에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가. Immediate Memorize Action

지진사건 HRA수행 지침서에 따르면, 이 기준은 오직 주 제어실에서 수행되는 직무에만 해당되고, 원전 정지 후 처음 5분에서 10분에 발생하는 단시간에 수행해야 하는 직무나 자주 훈련을 수행하여 익숙해진 운전원 조치를 의미한다. 예를 들어 대형냉각제상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA)의 경우, 사고가 발생하면 가압기 압력이 급격히 떨어져 SIAS가 발생해야하는데 발생하지 않으면 운전원이 수동으로 기동하는 조치가 있다. 이러한 조치들은 주로 경보대응절차서(Alarm Response Procedure, ARP), 비정상 운전절차서(Abnormal Operating Procedure, AOP) 및 EOP 등에 기술되어 있다. 또한 절차서에는 명시적으로 나타나지는 않으나 원전 운영, 교육 및 훈련 등에도 포함될 수 있기 때문에 운전원들과의 면담을 통해서 결정될 수 있다.

나. Is Cue after Plant Damage Assessment?

이 기준은 HFE와 관련된 직무의 Cue 발생 시점이 원전 손상상태 평가(Plant Damage Assessment) 완료 이전 혹은 이후에 나타나는지를 판단하는 것이다. 지진사건 HRA수행지침서에서는 원전의 손상상태평가를 수행하면 사고 진단 시 운전원이 원전의 손상상태를 전반적으로 파악하게 될 뿐만 아니라 작업 부하와 복잡성이 낮아질 가능성이 있다.

마. 상세 정성적인 분석

이전에 설명한 바와 같이 Feasibility를 평가한 후, 운전원이 수행할 가능성이 없는 HFE는 HEP값을 1로 할당한다. 그러나 상황에 따라서는 HEP값을 1로 할당하기 어려운 경우가 발생한다. 예를 들어 노심 손상 빈도에 큰 영향을 미치는 운전원 행위는 상세분석을 수행하여 운전원 오류를 계산해야 한다. 정성분석 단계에서는 앞서 수행된 Feasibility 평가단계에서 고려한 항목에 대해 비교적으로 완화된 판단기준을 고려하여 평가한다.

바. 상세 정량화

운전원 오류확률은 지진사건에서 조사한 정보와 데이터를 이용하여 계산한다. 또한 내부사건과 동일하게 발전소의 열 수력학적 계산에 의한 조치필요시간, 시뮬레이터를 통한 운전원 반응시간, 운전원과의 면담 내용 및 수행도형성인자 등이 정량화에 필요

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한 정보로써 사용된다. EPRI 지진사건 HRA에서는 정량 분석단계에서 CBDTM/HCR+THERP와 같은 일반적인 HRA 방법을 통해 HEP 값을 계산하고 있다.

사. PSA 모델 통합

Screening 정량화나 상세 정량화를 통해 계산된 HEP 값은 지진사건 PSA모델에 통합하고 정량화한다. 지진사건 PSA모델 정량화 결과로서 얻어진 최소단절집합에 대한 분석을 수행하여 HFE간의 회복이나 종속성 분석을 통해 현실적인 HEP 값으로 보정한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 지진사건 HRA 사례

미국에서 지진이 자주 발생하는 원자력발전소에서 수행한 지진사건 HRA사례를 기술하고자 한다. 주로 사용한 방법론은 통합수행도영향인자(Integrated Performance-Shaping Factors, IPSFs)를 적용하고 있다. IPSFs는 지진상황에서 운전원에게 영향을 줄 수 있는 복수의 인자들을 동시에 고려하여 HEP의 보정 값을 결정하는 방법이다 [14]. 다음에서는 Diablo Canyon을 포함한 4개 발전소의 지진사건 HRA사례에 대해 기술하고자 한다.

1. Diablo Canyon [15, 16]

Diablo Canyon원자력발전소의 Long Term Seismic Program은 현재까지 수행된 대표적인 지진사건 PSA사례 중의 하나이다. 이 프로그램은 해당 발전소의 계속운전허가를 위해 미국의 규제기관인 NRC의 요구에 따라 여러 차례 수행되었다. 지진사건 PSA에서는 원자력발전소 부지의 지진재해도 분석을 수행한다. 지진재해도 분석은 특정 부지 또는 전체 지역을 대상으로 발생 가능한 모든 규모와 거리의 지진에 대한 연초과 확률을 산출하는 것이다. Diablo Canyon에서 고려한 지진 가속도에 따른 지진재해도는 다음 표 4와 같다.

표 4. Diablo Canyon 원자력발전소의 지진재해도 [15]

Diablo Canyon Seismic Hazard		
Peak spectral acceleration(g)	Peak ground acceleration(g)	Mean exceedance frequency(/y)
0.2	0.1	1.85E-02
0.5	0.25	7.44E-03
0.8	0.4	3.56E-03
1.0	0.5	2.19E-03
1.2	0.6	1.35E-03
1.5	0.75	6.26E-04
2.0	1.0	1.61E-04
2.5	1.3	3.73E-05
3.0	1.5	7.89E-06
4.0	2.0	2.42E-07

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Diablo Canyon원자력발전소 지진사건 PSA는 지진재해도 분석에서 스펙트럼 가속도를 고려했다. 이 가속도는 지진사건 PSA에 일반적으로 사용되는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)의 약 2배이다. Diablo Canyon 지진사건 PSA를 수행할 때, 원자력발전소 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF)는 약 2.0E-04/y였고, 지진사건 PSA는 위험에 0.1% 이상 차지할 수 없는 이유로 스펙트럼 가속도 4.0g까지 고려하였다. Diablo Canyon 지진사건 PSA에는 지진에 의한 손상 및 릴레이 채터와 관련이 있는 상당수의 작업을 포함하여, 운전원 대응 및 복구 작업 등 60개가 넘는 사고 후 운전원 직무에 대한 광범위한 분석이 수행되었다. 이러한 조치에는 수동 작동, 기기 정렬, 실패한 시스템의 수리가 포함되어 있다. 또한 현장운전원이 필요한 조치를 수행하기 위해 제어실 외부의 장소로 이동할 수 있는지에 대한 현장조사 또한 수행되었다. 현장조사에서는 다음의 항목을 점검해야한다.

- Weak doors with the potential for jamming
- Equipment that could fill and block pathway
- Fire and smoke hazards
- Flooding
- Electrical hazards
- Chemical hazards
- Steam line breaks
- Waterline jets(jets)

Diablo Canyon지진사건 HRA에서는 지진에 의한 운전원의 영향을 고려하기 위해 내부사건 HEP에 대한 보정 값을 표 5와 같이 적용하였다. 첫 번째 1.75g 미만의 스펙트럼 가속도에 대한 HEP은 내부사건 HEP과 같다. 이 구간에서의 지진은 원자로 및 터빈정지를 발생시키고 일부 기기 성능에 영향을 미치지만, 운전원의 수행도에 큰 영향을 주지는 않는다고 가정하였다.

두 번째로 1.75~2.5g 사이의 스펙트럼 가속도의 경우, 운전원은 주변에서 일어나는 장비 및 구조 떨림으로 인해 정신적으로 혼란스러울 수 있지만, 신체적으로 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 이 범위에서는 HEP 보정 값이 5로 할당되었다. 마지막으로 스펙트럼 가속도가 2.5g를 초과하면 운전원이 정신적으로 불안해지거나, 신체적으로 영향을 받을 수 있다고 가정하였다. 운전원은 바닥에 쓰러지거나 천장에서 떨어지는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

물체에 맞을 수 있고, 먼지로 인해 시야가 제한되거나, 산소 호흡기를 착용해야 할 수도 있다. 이러한 영향으로 운전원이 떨어지는 물체에 의해 갇히거나 작동하고자 하는 기기에 접근이 불가능할 때, 30배의 보정 값을 적용하였다. 중요도가 낮은 인적행위의 경우 모든 가속도구간에서 보정 값 30을 적용하여 보수적으로 선별분석 하였다.

Diablo Canyon 지진사건 PSA에 HRA에서는 광범위한 릴레이 채터의 영향이 포함되었다. 민감도 분석에서는 릴레이 채터에 대한 운전원의 복구(Recovery action)가 분석대상에서 제외된다면, 디젤 발전기 및 4kV 개폐기 계전기로 인해 CDF가 100배 이상 증가한다는 사실을 보여줬다. 이는 지진사건 PSA에서 운전원 회복 행위가 중요함을 보여주고 있다. 지진 가속도구간에 따라 릴레이 채터 복구 HEP은 1.0E-02에서 0.36까지로 적용되었다. 대표적 복구 조치 중 하나는 지진으로 인해 연결이 끊어진 배터리 충전기를 교체하는 것이었다.

또 다른 예는 소외 전력을 복구하기 위해 세라믹 절연체와 부싱을 교체하는 것이었다. 마지막으로 전력을 공급하기 위해 이동형 발전기를 사용하는 것도 포함된다. 지진사건에서 원자로 정지 후에 바로 수행해야하는 운전원 조치는 릴리프 밸브가 열리지 않도록 수동으로 발전소를 15초 동안 운전(HEP=2.0E-02 적용)하는 것이 포함되어 있다.

표 5. Diablo Canyon 원자력발전소의 HEP 보정 값 [16]

Diablo Canyon Seismic HRA Multipliers		
Spectral Acceleration	Peak Ground Acceleration(g) (estimated)	Seismic HEP Multiplier
< 1.75g	< 0.88g	1.0
1.75g to 2.5g	0.88g to 1.25g	5
>2.5g	>1.25g	30

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. San Onofre [17]

San Onofre 지진 PSA는 최초 외부사건개별발전소조사(Individual Plant Examination of External Events, IPEEE)에 대한 규제기관 요구사항에 의해 수행되었다. 그 후, 발전소 의사결정 및 라이선스를 지원하기 위해 여러 번 수행되었다. San Onofre 발전소는 캘리포니아 로스앤젤레스의 남쪽에 있으며 위에 제시된 Diablo Canyon 발전소와 유사한 지진재해도를 가지고 있다. 발전소의 안전정지 지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)은 PGA 기준 0.67g로 설계되었다. 지진사건 HRA에서는 직무를 수행하는 위치, 가용시간을 PSF로 고려하였다. 표 6은 San Onofre 원자력발전소의 IPSFs방법론을 적용한 보정 값을 보여주고 있다. San Onofre 발전소는 매우 심각한 지진 발생을 가정하였으며, 심각하지 않은 지진 발생의 경우에는 보정되지 않은 내부사건 HEP를 적용하였다.

표 6. San Onofre 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값

Location of Action	Time Available to Start Action		
	Short (t < 20min)	Medium (20min = t < 60min)	Long (1hr = t <24hr)
In Control Room	10	5	1
Ex Control Room	30	10	5

't'는 지진 발생 후 운전원 행동을 시작해야 하는 시간을 나타낸다. 예를 들어 운전원 작업에 가용한 시간이 25분이고 사고를 진단하고 장비에 접근하여 작업을 수행하는데 10분이 소요되는 경우 15분 안에 작업을 시작해야 하므로 이는 “Short”에 해당한다. 또한, 수행하는 장소(제어실 내부 또는 외부)에 따라 다른 보정 값을 적용하였다. HEP 보정 값은 심한 지진 발생을 가정하였기 때문에 지진 가속 수준은 HEP 보정 값 선택에 영향을 미치지 않는다.

HEP 보정 값은 지진 PSA전문가, 인간 신뢰도 전문가를 포함한 위원회 합의에 따라 결정되었다. 이후 해당 HRA 방법과 보정 값은 US NRC에 의해 검토되었다. 미국의 Surry IPEEE, 핀란드의 Olkiluoto 1 및 2 지진 PSA, 슬로베니아의 Krško 지진 PSA를 비롯한 여러 가지 지진 PSA에서 이와 같거나 또는 매우 유사한 보정 값이 사

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

용되었다. 또한 지진 상황에서 각 운전원 작업에 대해 다음 고려 사항이 검토되었다.

- 조치가 필요하다고 진단할 수 있는 적절한 경보 또는 표시할 수 있는가? (계기 고장 가능성에 대한 고려 포함)
- 절차와 훈련은 운전자에게 필요한 조치를 하도록 지시하는가?
- 모든 작업을 수행하는 데에 필요한 운전원이 가용한가?
- 직무 및 조치가 주 제어실 외부에서 필요하면, 직무를 수행 하는 위치는 지진 발생 후 접근 할 수 있으며 가용 시간 내에 접근 할 수 있는가?
- 가용시간 내에 필요한 조치를 진단하고 수행할 수 있는가?

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. Columbia Generating Station [18]

콜롬비아 발전소는 2005년 지진 PSA에 대한 업데이트를 수행하였다. 아래 표 7은 Columbia 원자력발전소에서 고려한 지진재해도를 보여준다. 고려된 지진 위험도는 위에 언급된 두 개의 캘리포니아 발전소의 경우보다 작지만, 다른 미국 발전소의 위험도보다 크며 다음의 Surry 원자력발전소 지진재해도 보다 크다.

표 7. Columbia 원자력발전소의 지진재해도

Columbia Seismic Hazard			
Peak Ground Acceleration(g)	Exceedance Frequency(/y)	Peak Ground Acceleration(g)	Exceedance Frequency(/y)
0.1	1.3E-03	0.9	2.8E-06
0.2	3.0E-04	1.0	1.8E-06
0.3	1.1E-04	1.1	1.1E-06
0.4	4.7E-05	1.2	7.1E-07
0.5	2.3E-05	1.3	4.5E-07
0.6	1.3E-05	1.4	2.8E-07
0.7	7.4E-06	1.5	1.8E-07
0.8	4.5E-06		

콜롬비아 지진사건 HRA에서는 규모가 큰 지진에 대해서만 보정 값을 적용하고, 0.9 이하의 지진은 내부사건 HEP를 적용한다. 콜롬비아 지진 PSA에 사용된 HEP 보정 값의 경우 세 가지 PSFs(즉, 수행위치, 지진발생 후 수행시간과 직무를 수행하는 장소의 내진설계등급)를 고려하여 결정된다. 아래 표 8은 Columbia 원자력발전소의 IPSFs 방법론에 적용된 보정 값을 보여준다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 8. Columbia 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값

In control Room	Ex control Room	Non-Category I Building	< 30 min	30 - 60 min	> 1 hr	보정 값
X			X			5
X				X		2
X					X	1
	X	X				HEP = 1.0
	X		X			10
	X			X		5
	X				X	2

이 방법은 San Onofre와 같이 운전원 수행 시간, 지진크기, 운전원 수행 장소를 고려했다는 측면에서는 비슷하지만, 건물의 내진등급을 고려했다는 차이점이 있다. 구분하는 시간과 보정 값에서 San Onofre 발전소와 차이가 나며, 보정 값의 경우 상대적으로 작은 값이 적용되었다. 또한, Columbia Seismic PSA에서는 비내진 설계 건물의 외부작업에 대해 HEP 1.0(즉, 항상 실패)을 적용하였다. 이는 심한 지진 발생 시, 비 내진 건물로의 접근성이 떨어지거나 건물이 붕괴할 수 있다는 우려를 반영했다. San Onofre 지진 PSA와 마찬가지로 콜롬비아 발전소의 보정 값은 매우 심각한 지진을 가정하여 개발되었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. Surry [19]

Surry 발전소에서는 여러 발전소의 지진 PSA에 대한 HRA를 검토하여, 지진 사건 이후 운전원 조치를 위한 Surry 보정 값을 다음을 고려하여 개발했다.

- 지진 발생 후 시간 (Time after The Seismic Event)
- 운전원 행위 위치 (Location of The Operator Action)
- 지진 심각도 (Earthquake Severity Based on PGA)

San Onofre 발전소 지진 PSA가 US NRC에 의한 검토를 받았기 때문에 Surry에서는 San Onofre 발전소의 분석 사례를 주요 기준으로 사용하였다. Surry 지진 HRA는 지진의 심각성을 0.8g를 기준으로 나누었다. 지진 가속도 구간을 0.8g를 기준으로 나눈 것은 Diablo Canyon 지진 HRA를 참고하여 결정하였다.

0.8g이상의 경우 San Onofre의 HRA 보정 값이 사용되었다. 0.8g미만의 경우 보정 값은 0.8g이상의 약 1/3 값을 적용하였다. 위에서 언급했듯이 0.8g미만의 경우에 대한 Diablo Canyon 보정 값은 1(내부사건 HEP)이므로, 0.8g미만에 대한 Surry 보정 값은 Diablo Canyon 보정 값보다 더 보수적이다. 아래 표 9는 Surry 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값을 보여준다. 지진 보정 값 사용 외에도, San Onofre와 동일하게 지진 상황에서 각 운전원 작업에 대해 고려된 조건을 평가하였다.

표 9. Surry 원자력발전소의 IPSFs 방법론 적용 보정 값

Surry Seismic HRA Multipliers			
Location of Action & Earthquake Acceleration Level	Time After the Seismic Event		
	Short (time < 20min)	Medium (20min ≤ time < 60min)	Long (1hr ≤ time < 24hr)
In Control Room:			
-PGA ≤ 0.8g	3	2	1
-PGA >0.8g	10	5	1
Ex Control Room:			
-PGA ≤ 0.8g	10	3	2
-PGA >0.8g	30	10	5

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4절 지진사건 HRA 비교

지진사건 HRA지침 및 접근법, 사례 기술조사를 기반으로 지진사건 HRA방법론 선정을 위해 수행도영향인자 비교 분석을 수행했다. 지진사건 HRA에서는 지진사건으로 발생하는 추가적인 영향(예를 들어, 지진으로 인한 정신적인 충격, 천장의 조명 파손으로 인한 추가적인 손전등 필요, 알람, 경보의 오작동)을 수행도형성인자로 반영해왔다. 다음 표 10은 IPSF적용방법에 따른 지진사건 HRA의 PSF를 비교한 것이다.

표 10. 지진사건 HRA 방법론 PSF 비교

IPSFs application Approach	Institutions	PSFs Considered
Interpolating for HEP values	Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate	Action start time, Earthquake intensity (PGA)
Using Specific Seismic HEP Multipliers	San Onofre	Earthquake intensity(PGA), Time available to start action, Location of action
	Columbia	Earthquake intensity(PGA), Location of the operator action, Fragility analysis of non-safety building, Action time frame
	Surry	Location of the operator action, Time after seismic event, Earthquake intensity(PGA)
	EPRI	Immediate memorized action, Action location, Damage state, Time margin, Plant damage assessment

Diablo Canyon원자력발전소는 지진가속도만 운전원의 PSF로 고려했기 때문에 방법론 PSF 비교에서 고려하지 않았다. PSFs 방법에서는 Interpolating방법을 사용하여 특정 HEP값이 주어지는 경우와 내부사건 HEP값에 지진의 영향을 보정할 수 있도록 배수를 제시하는 방법이 있다. 그 중에서 많은 지진사건 HRA의 수행은 특정 배수를 구하여 내부사건에 적용하는 방법을 주로 사용하였음을 알 수 있다. 또 지진사건 HRA 방법이 운전원의 지진에 대한 영향을 포괄적으로 평가할 수 있도록 많은 PSF를 고려하고 있는지 확인하였다. 표 10에서 본 바와 같이 EPRI 지진에 초점을 맞춘 외부사건

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

접근방법이 지진상황 시 운전원의 수행도영향인자를 가장 많이 고려하는 것을 알 수 있다. EPRI 지진사건 방법론은 2012년 개발된 NUREG-1921[11] 화재방법론에 기반하여 개발되었고 비교적 다른 방법론보다 최근에 개발하여 지진사건 HRA를 수행하는데 적합한 방법으로 선정하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 EPRI 지진사건 인간신뢰도분석 수행

제1절 구체적인 지침 제안

EPRI 지진사건 HRA는 정성적, 정량적인 지진사건 HRA 방법론으로 구체적인 방법을 제안하고 있다. 하지만 실제 지진사건 HRA를 수행할 때 구체적으로 요구되야 하는 항목들이 있어, 기존의 EPRI 지진사건 HRA에 개선하여 수행하는 방법을 제안하고자 한다.

1. 알람 또는 절차서의 이용가능성

주 제어실에서 운전원들이 직무 수행 필요성을 인식하는데 활용될 수 있는 정보로는 크게, 1. 절차서에 기술된 정보, 2. 경보나 지시계를 통해 제공되는 정보로 나누어진다. 다음 그림 7은 Cue 가용성을 결정하는 수목을 보여주고 있다. 해당 수목에서는 Cue availability를 평가하기 위해 가. Cue의 타입, 나. 요구되는 운전원 행위 유형, 다. 현장운전원의 대체 확인 가능 여부를 평가한다.

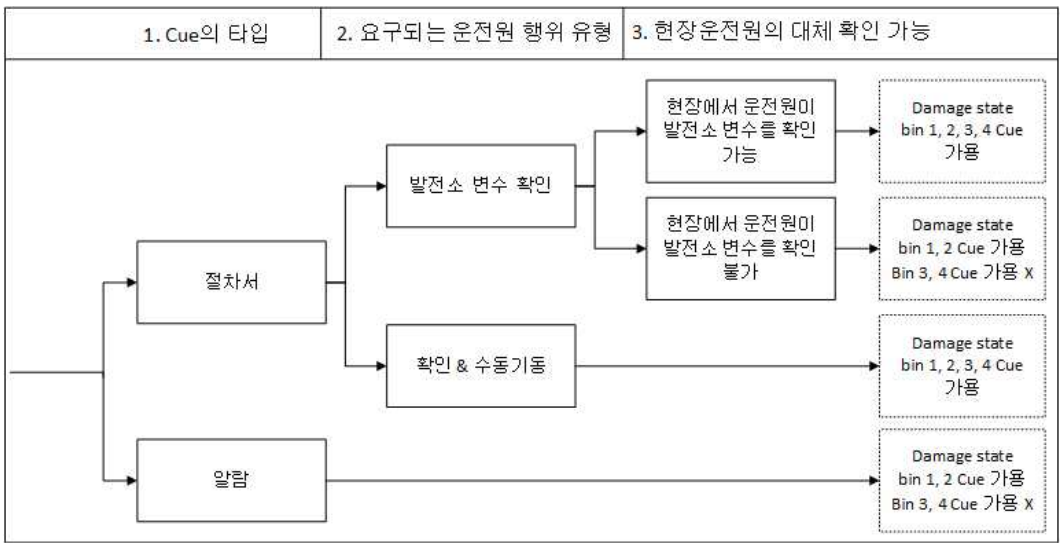

그림 7. Cue 가용성 평가 수목

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가. Cue의 타입

운전원이 조치를 수행해야하는 필요성을 인식하는 cue는 크게 절차서와 경보(및 지시계)로 나눌 수 있다. 예를 들어 냉각제상실사고에서 오랜 시간 안전 주입을 수행하면 붕산석출물로 인해 안전주입유로가 막혀 유로가 사용 불가능할 수 있다. 이러한 유로 막힘을 방지하기 위해 운전원이 사고 발생 후 2 ~ 5시간이내에 재순환운전을 수행해야 하는 경우, 운전원은 LOCA 비상운전절차서 42단계에서 해당 직무를 수행하게 된다. 이 경우 조치에 대한 Cue는 절차서가 된다. 다른 예로 동작 중인 기기냉각수펌프가 어떤 결함으로 작동하지 않는 경우, 운전원은 “Pump DSCH Flow Lo” 또는 “PMPPSCH HDR Press Lo”와 같은 경보를 통해 해당 조치의 필요성을 인식하게 된다. 이 경우 운전원 행위에 대한 Cue는 경보가 된다. 만약 절차서와 경보 (알람)가 모두 가용한 경우에는 지진 발생 시 릴레이 채터가 발생할 수 있기 때문에 절차서에 우선순위를 둔다.

나. 요구되는 운전원 행위 유형

Cue가 절차서인 경우에는 요구되는 조치가 기기 상태확인 확인 또는 수동 기동과 같은 On/Off Control 직무인지, 변수 값을 계속해서 확인하면서 운전을 해야 하는 직무인지를 평가한다. 만약 조치가 기기 상태 확인 또는 On/Off Control 직무의 경우 해당기기와 관련한 지시계가 가용하지 않더라도 직무 수행이 가능하다. 하지만, “RCS 압력이 96Kg/cm2이하를 만족하면 운전원이 원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump, RCP)를 정지하는 조치를 수행한다”(표 11)와 같이 변수 값을 지속적으로 확인을 해야 할 경우 지시계가 가용하지 않을 경우 직무수행이 불가능하게 된다.

표 11. 비상운전절차서 예시

예상반응 및 조치사항	불만족시 조치사항 (RNO)
1.0 RCP가 정지되어야 하는지 점검한다.	
1.1 CHG/SI P/P: 최소 1대 운전 중	1.1 단계 2.0으로 간다.
1.2 RCS 압력: 96Kg/cm^2	
1.3 모든 RCP를 정지한다.	

지시계의 가용성은 다음과 같이 평가한다. 계측기로부터 주제어실로 정보가 전해지는 경로를 크게 “Transmitter -> Relay -> Process cabinet -> Main control board

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(주제어실 제어반)"로 구분할 수 있으며, 각각의 경로에서 요구되는 기기의 지진취약도는 표 12과 같다 [20]. Transmitter나 Main control board의 경우 상대적으로 강한 지진이 발생해도 기능상 손상이 없는 것으로 가정할 수 있다. 하지만, Relay나 Process Cabinet의 경우 각각 0.36g, 0.38g의 HCLPF 값을 가지고 있다. 따라서, 0.36g 이상의 지진이 발생할 경우 주제어실의 지시계는 확인이 불가한 것으로 가정하였다.

따라서 0.36g 이상의 지진에서는 변수 값을 계속해서 확인하면서 운전해야 하는 직무의 경우 주제어실의 정보를 통해서는 수행이 불가한 것으로 가정한다.

표 12. 주제어실 정보전달 관련 기기의 HCLPF 범위 [20]

기기	HCLPF 범위	설명
Transmitter	1.24g - 2.79g	
Relay	0.38g	Cabinet-ESFAS Auxiliary Relay 단일 값
Process cabinet	0.36g - 1.82g	- CPC/CPCS Cabinet - Protection Cabinet(D) - Annunciator Isolation Channel A Cabinet - Plant Control System Logic Cabinet
Main control board	0.94g	단일 값

다. 현장운전원의 대체 확인 가능 여부

주제어실에서 지시계를 통한 정보확인이 불가능할 경우 현장운전원이 현장에서 확인이 가능한지 여부를 평가한다. 예를 들어 재순환수 탱크 수위가 주제어실에서 확인이 되지 않을 경우 WH900 노형의 경우 현장에서 직접 수위 확인이 가능하게 된다. 따라서 주제어실에서 정보 확인이 불가능하더라도 현장에서 확인이 가능할 경우 해당 운전원 행위는 Credit을 줄 수 있게 된다.

2. 충분한 시간

지진과 같은 사건이 발생했을 경우 운전원이 느끼는 스트레스 수준은 기존의 내부사건보다 증가할 것으로 알려져 있다. 이에 따라, 내부사건 HRA보다 좀 더 보수적인 관점에서 여유시간을 평가할 필요가 있다. 이러한 이유로 EPRI 지진사건 지침서에서는 지진을 포함한 외부사건 발생 시 운전원의 여유시간 (Time margin)을 평가하고 이를 기반으로 HEP를 계산하고 있다. 본 연구에서는 지진의 세기에 따라 운전원이 수행

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에 걸리는 시간이 내부사건 보다 증가하는 것으로 가정하였다. KAERI에서 수행한 연구에 따라서 Damage Bin 3, 4의 경우 운전원이 수행에 걸리는 시간이 내부사건 보다 3배 더 오래 걸리는 것으로 가정하였다 [20]. 또한, 운전원이 Cue를 인지하는 데에 걸리는 시간도 Damage Bin 2, 3, 4에서 초기사건 보다 3배 더 오래 걸리는 것으로 가정하였다.

3. 접근성과 환경인자

다음은 현장운전원이 직무를 수행하기 위한 장소에 대한 접근성을 평가한다. 지진 발생의 경우 건물이 손상되거나 장애물로 인해 현장운전원이 기기에 접근하는 것이 불가능 할 수 있다. 또한 중대사고 발생이나 방사선이 누출되었을 경우에는 방사능으로 인해 운전원이 접근하는 것이 불가능할 수도 있다. 따라서 이 항목에서는 시나리오에서 운전원이 현장기기로의 접근이 가능한 지 여부를 평가한다. 이를 위해서 발전소 운전원과의 인터뷰를 통해서 현장기기의 위치를 파악하고 지진 규모에 따라 건물의 HCLPF를 고려하여 접근성을 평가하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 OPR1000 노형 지진사건 HRA 수행 예제

본 절에서는 1절에서 제안한 구체적인 지침을 사용하여 OPR1000의 CST가 고갈되었을 때, 대체 수원으로 교체하는 운전원 행위를 EPRI 지진사건 HRA로 분석한 예제를 기술하고자 한다.

1. 운전원 행위 도출 및 정의

내부사건 운전원 행위와 동일하게 지진사건에서도 요구되는 직무

2. 손상상태 정의

안전정지지진(Seismic Safety Earthquake, SSE): 0.2g

- OPR1000의 SSE는 0.2g로 설계되어 있기 때문에 0.2g를 선정

가장 취약한 안전관련 SSC의 HCLPF(High Confidence Low Probability Failure, HCLPF): 0.41g

- 가장 낮은 HCLPF 값을 갖는 것 다른 기기이지만 전출력 내부사건 PSA 분석 결과 계통별 중요도 측면으로 전력공급계통에서 주요한 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator, EDG)의 HCLPF를 선정

필수계측기의 HCLPF: 0.74g

- EPRI Generic Data를 사용하여 안전관련 계측기를 포함한 모든 계측기의 HCLPF로 선정

표 13. OPR1000 노형에 대한 손상상태 정의

구분(Bin)	OPR1000 손상상태 정의
1	Hazard<0.2g
2	0.2g≤Hazard<0.41g
3	0.41g≤Hazard<0.74g
4	Hazard≥0.74g

3. 실현가능성 평가

가. 충분한 인력

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

예(Yes): 내부사건과 동일한 운전원 행위로 이동형 기기와 같은 추가적인 운전원이 요구되는 조치가 아니기 때문에 구분 1, 2, 3, 4에서 충분한 인력이 있다고 평가함.

나. 절차서와 훈련

예(Yes): 내부사건에서 평가한 결과에 따라 훈련의 수준과 절차서 수준을 사용하여 평가, 비상운전절차서에 포함되어있는 운전원 행위(비상-02 단계26), 훈련수준은 높음(훈련을 자주 수행함.)으로 평가함.

다. Cue 이용가능성

(1) Cue의 타입

절차서: 비상-02 단계26, 붙임 5.4와 붙임 5.5를 참조하여 이용 가능한 CST 재고량이 충분한지 확인한다.

(2) 요구되는 운전원 행위 유형

발전소 변수 확인: 붙임 5.4, 5.5의 CST 수위곡선을 CST 수위 변수를 확인하여, 해당하면 조치를 수행해야함.

(3) 현장운전원의 대체 확인 가능

현장에서 운전원이 발전소 변수를 확인가능: CST가 격납용기 안에 있지 않고, 발전소 부지내에 현장운전원이 접근 가능한 위치에 있음.

예(Yes): 평가수목결과에 따라 손상상태 1, 2, 3, 4에서 모두 Cue가 이용 가능함.

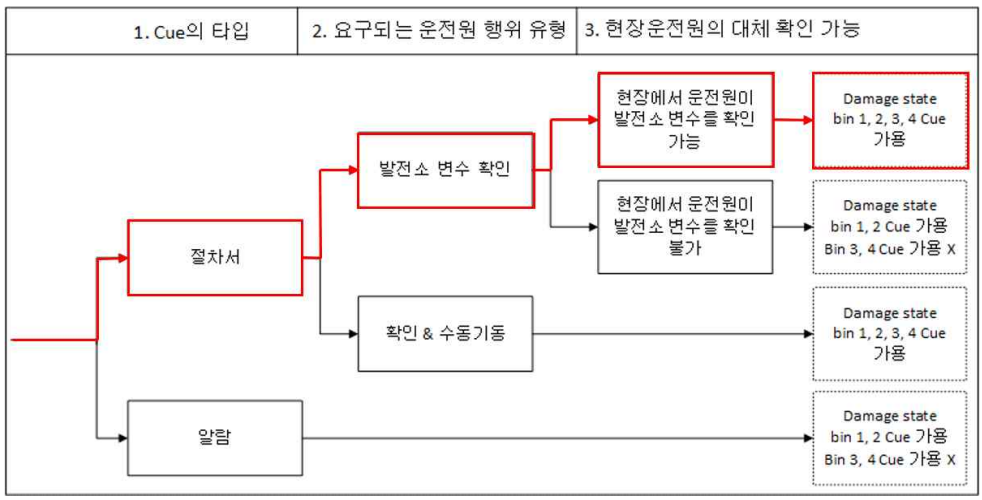

그림 8. CST 수원교체 운전원 행위의 Cue 이용가능성 평가 수목

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. 충분한 시간

Yes(예): $T_{sw}-T_{1/2}-T_m-T_d=T_{margin}$, $T_{margin}>0$로 평가함. 구체적인 지침에서 가정한 것과 같이 Td시간은 Bin 2~4에서 3배를 하고, Tm은 Bin 3, 4에서 3배를 적용하여 30분에서 90분으로 계산함.

표 14. 충분한 시간 평가

구분	Hazard Level	Time line (분)					충분한 시간
		T_{sw}	$T_{1/2}$	T_m	T_d	T_{margin}	
Bin1	Hazard<0.2g	275	20	30	0	225	O
Bin2	0.2g≤Hazard<0.41g	275	20	30	0	225	O
Bin3	0.41g≤Hazard<0.74g	275	20	90	0	165	O
Bin4	Hazard≥0.74g	275	20	90	0	165	O

마. 기기 운전가능성

N/A(해당 없음): PSA 모델에서 지진가속도에 따라 기기실패를 평가하여 모델링하기 때문에 PSA 모델에서 반영되어 있음.

바. 접근성과 환경인자

예(Yes): 표 15와 같이 수행 행위는 세부작업 중 ② Removable Pool 설치 RWT로 전환 밸브 개방하는 직무는 현장운전원이 접근이 가능하고, 건물에서 수행하는 작업이 아님.

표 15. CST 고갈시 수원 교체하는 운전원 행위의 접근성과 환경인자 평가

설 명	수행 장소	세부 작업	수행하는 건물	구조물 HCLPF
CST가 고갈 되었을 때, 대체 수원으로 교체하는 직무	MCR/LOCAL	① CST로 전환밸브개방	주제어실	O
		② Removable Pool 설치 RWT로 전환 밸브 개방	발전소 부지	X

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. Screening 평가

가. Immediate Memorize Action

No(아니오): 안전작동신호를 기동하는 운전원 행위가 아니고, 원자로 정지로 바로 수행하는 직무가 아닌 장기 2차측 열제거를 수행할 때 요구되는 운전원 행위임.

나. Action Location

Ex Control Room: 이 운전원 행위는 표 14와 같이 2가지 세부직무로 나뉘어 있는데, ① CST로 전환밸브개방은 주제어실에서 수행하고, ② Removable Pool 설치 RWT로 전환 밸브 개방은 발전소 부지에서 수행하기 때문에 현장직무를 기준으로 평가함.

다. 손상상태

표 13과 같이 4구간으로 정의함.

라. 시간 여유가 충분한지

표 14의 T_{margin}시간을 평가함.

마. 발전소 손상상태 평가 후에 운전원의 직무를 인지하는 Cue가 발생했는지

No(아니오): Bin 1, 2[T(3.75시간)<8시간], Bin 3, 4[T(2.75시간)<8시간]

- 한국원자력발전소에서 지진 발생 시에는 운전원이 지진대응절차서에 지진발생시 조치사항에 따라 발전소 손상상태 평가를 8시간 이내에 수행해야하기 때문에 T_{sw}>8시간으로 평가함.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

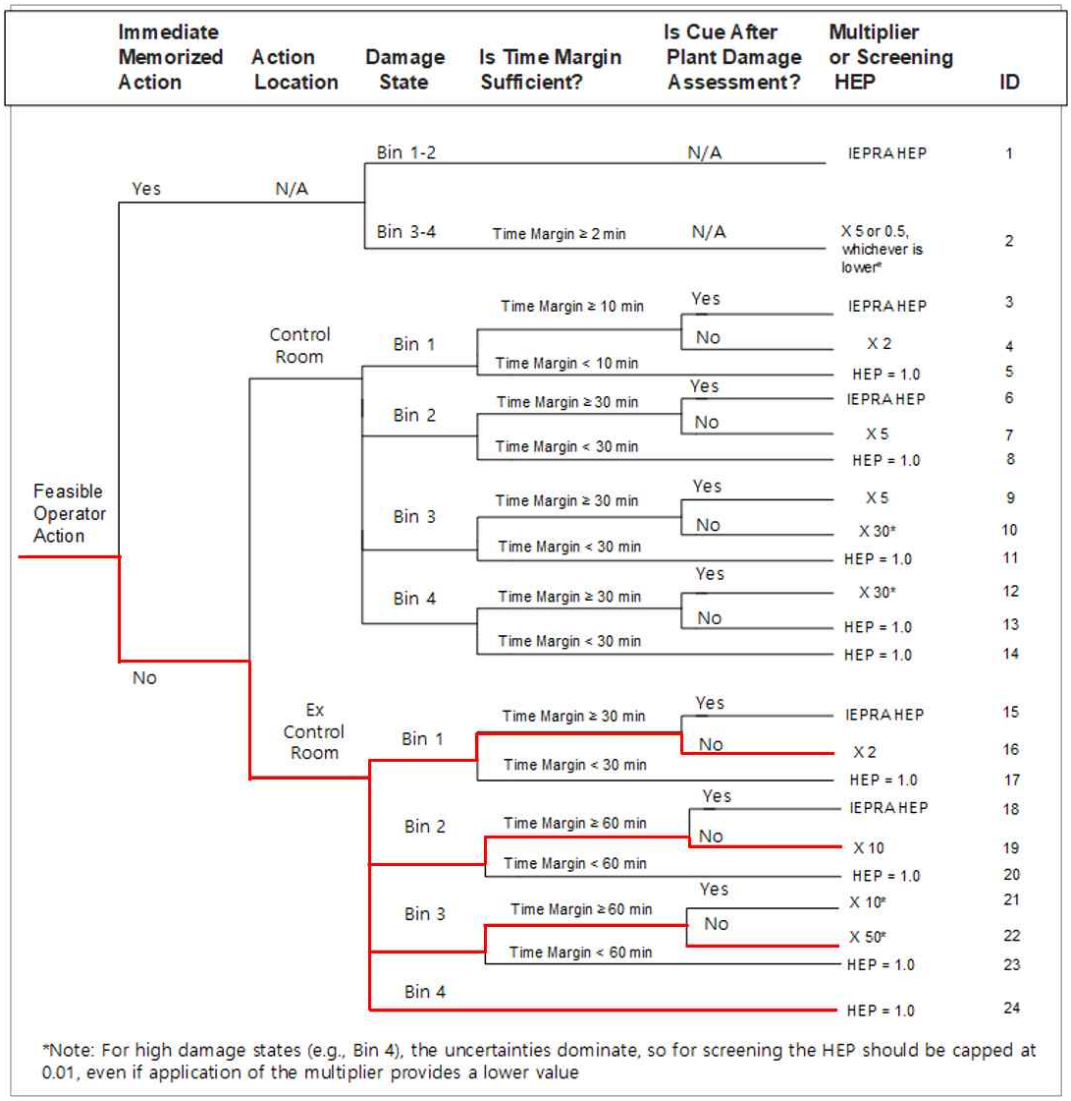

그림 9. CST 수원교체 운전원 행위의 Screening 결정 수목 수행 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

결정수목으로 선정된 보정 값을 SPAR-H 내부사건 운전원 오류 확률 값에 적용하였음. 표 16은 적용하여 계산한 결과를 보여주고 있음.

표 16. Screening 정량화 결과

No	설 명	Damage state			
		Bin1: Hazard<0.2g	Bin2: 0.2g≤Hazard<0.41g	Bin3: 0.41g≤Hazard<0.74g	Bin4: Hazard≥0.74g
1	CST가 고갈되었을 때, 대체 수원으로 교체하는 직무	6.60E-05	3.30E-04	1.65E-03	1.00E+00

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 결론

후쿠시마 사고 이후, 지진발생에 대한 NPP의 안전성이 향상이 대두되자 규제 기관은 안전평가 방법 중 하나인 PSA를 사용하여 안전성 평가를 제안하고 있다. 또한 ASME와 IAEA와 같은 기관들은 운전원들이 수동으로 수행해야 하는 직무를 증가시키는 지진사건 HRA를 수행할 것을 제안하고 있다. 예를 들어 기능 복구 및 릴레이 체터 복구가 있다.

지진으로 운전원에게 미치는 영향을 고려한 지진사건 HRA를 수행해야한다. 기존에 지진사건 HRA는 내부사건 운전원 오류 확률에 단순히 보정값을 적용하는 방식이 었다. 하지만 이러한 분석 방법은 지진으로 인해 운전원에게 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문에 오류 확률을 과대평가하거나 과소평가할 수 있다.

지진사건 HRA 방법론을 선정하여, 선정된 EPRI 지진사건 HRA를 수행한 경험을 바탕으로 구체적인 지침을 개발하였다. EPRI 지진 사건 HRA 방법론에서는 실현가능성 평가에 의한 정성적 평가가 수행되고, Screening 평가에 의한 정량적 평가가 수행된다. EPRI 지진사건 HRA 방법론에는 평가항목이 제시되어 있지만 평가기준이나 방법이 제공되지 않는다. 개발된 구체적인 방법론은 분석가 간의 차이를 줄이고 분석 결과의 일관성을 개선하기 위해 적용할 수 있다.

또한 OPR1000 발전소에 적용하여 EPRI 지진사건 HRA 방법론의 분석 예를 설명하였으며, 실제 발전소에 대한 EPRI 지진 사건 HRA 방법론을 수행하는 것이 제안되었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] KINS, 제 16장 중대사고 및 리스크 평가, KINS/RS-N16.00.

[2] HRA Methods for Seismic PSA, 2015.

[3] 한국원자력연구원, 원자력발전소 인간신뢰도분석(HRA) 표준 방법 개발 - 전출력 PSA 내부사건 HRA, 2005.

[4] Swain AD, Human reliability analysis: need, status, trends and limitations, Journal of Reliability Engineering and System Safety, 29:301-313, 1992.

[5] 정원대 외, 원자력발전소 비상직무의 인간신뢰도분석을 위한 구조적 정보 분석, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1493, 2000.

[6] 한국수력원자력, 신고리 1, 2호기 확률론적안전성평가보고서, Part 1. 내부사건 분석(본문).

[7] 한국수력원자력, 고리 2호기 확률론적 안전성 평가 (최종 보고서), 제 1권 내부사건 분석(본문), 2007.

[8] ASME/ANS, “Addenda to ASME/ANS RA-S-2008: Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications, an American National Standard”, RA-Sa-2009, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2009.

[9] IAEA Safety Guide SSG-3, “Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants”, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2010.

[10] Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI), “Probabilistic Safety Assessment (PSA): Quality and Scope”, Guideline for Swiss Nuclear Installations, Brugg, Rev 1, Switzerland: ENSI-A05/e, 2019.

[11] S. Lewis and S. Cooper, EPRI/NRC-RES Fire Human Reliability Analysis Guidelines, NUREG-1921, 2012.

[12] EPRI, “An Approach to Human Reliability Analysis for External Events with a Focus on Seismic”, 3002008093, Final Report, December, 2016.

[13] A context based approach to human reliability analysis fo seismic PSA

[14] EPRI, “Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide”, TR-101711, Palo Alto, 1992.

[15] PG&E, “Final Report of the Diablo Canyon Long Term Seismic Program”, 1988.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[16] PG&E, “Individual Plant Examination of External Events Report for Diablo Canyon Power Plant Units 1 and 2 in Response to Generic Letter 88-20 Supplement 4”, 1994.

[17] Southern California Edison, “Nuclear Generating Station Individual Plant Evaluation of External Events”, Rosemead, 1995.

[18] Energy Northwest, “Columbia Generating Station Seismic PSA”, Richland, WA, 2005.

[19] EPRI, “Seismic Probabilistic Risk Assessment Pilot Plant Review”, 1020756, Palo Alto, 2010.

[20] KAERI, 신 지진 HRA 방법론 원전 적용 연구, KAERI-TR-5643, 2014.

[21] 박창석, 지진 발생시 원전 안전성 검토 및 조치에 관한 연구, 2019.