



국내원전 화재 PSA 수행시 지진화재 상호작용 평가 방법론 제안

오해철, 김형택, 문찬국
한수원 중앙연구원

Suggestion of Seismic-Fire interaction Assessment method for the Fire PSA of Domestic Nuclear Plant

Oh, Hae Cheol · Kim, Hyung Taek, Moon, Chan Kook
KHP-CRI

요 약

기존 국내원전의 화재 PSA는 EPRI가 개발한 방법론을 이용하여 화재 PSA를 수행하여 오고 있다. 미국 NRC는 EPRI와의 공동연구를 통하여 새로운 화재 PSA 방법론(NUREG/CR-6850)을 개발하였고, NFPA-805 코드를 적용하는 미국 원자력발전소들에 대해서 이 방법론을 적용한 PSA를 수행하는 것을 권고하고 있다. 본 논문에서는 국내원전에 신규 PSA 방법론 적용시 논의되어야 할 사항들 중 지진화재 연계성(또는 지진-화재 상호작용)평가 방법론에 대한 제안 및 고려사항을 기존 해외 사례를 참고하여 기술하였다.

1. 서 론

원자력 발전소에서 화재사고의 중요성은 실제 경험뿐만 아니라 국내외 원자력발전소에 대한 화재사건 확률론적안전성평가 (PSA)를 통하여 확인되고 있다. 그동안 국내 원전에 대한 화재사건 PSA에서는 EPRI의 화재위험도 분석방법들[1]을 적용하여 노심손상빈도를 계산하고 설계 취약점에 대해서는 설계 개선 대안을 제시하는 방법을 적용해오고 있다. 최근 NFPA-805 코드의 적용을 받는 미국 원전들은 그림 1에 예시된 신규 PSA 방법론(NUREG/CR-6850)[2]을 적용하고 있다. 신규 방법론은 기존 국내적용 방법론과는 상세분석 깊이나 화재모델링 등에서 일부 차이가 있지만, 분석절차나 과정은 대부분 유사하다. 다만, 신규방법론에는 국내원전의 PSA 분석시 다루지 않은 업무가 추가되어 있는 데, 그림 1에 예시된 업무흐름도에서 13번째 수행업무인 지진-화재 연계성 평가업무이다. 그동안 국내에서는 지진 PSA업무나, 화재 PSA 업무에서도 상세하게 다루지 않았던 업무이다. 신규 PSA 방법론 절차를 기술하고 있는 NUREG/CR-6850 보고서에서도 이 업무에 대한 상세 절차가 예시되어 있지 않기 때문인지, 미국 시범원전에 대한 화재 PSA 동렬검토(Peer Review)시 주요 개선항목으로 자주 지적된 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 신규방법론에서 제시된 지진-화재 상호작용 평가방법을 살펴보고, 향후 국내원전 적용시 적합한 방법론과 논의되어야

할 사항들에 대해서 제안하였다.

2. 지진-화재 상호작용 사례 검토

2.1 지진에 의해 유발된 화재 특성

심각한 지진사건 발생시 원전의 외부에서 또는 내부에서 화재를 야기할 수 있는 가능성이 있다. 지진 후 발생하는 화재사건은 가연성기체 혹은 액체(휘발유, 연료오일, 등)를 담고있는 저장탱크들 또는 배관등과 관련된다. 그러나 가연성 액체나 기체만이 잠재적 화재사건 대상이 되는 건 아니다. 지진발생동안 전기 기기의 고장으로부터 야기되는 화재 가능성도 존재한다. 전기 기기들이 고정 장치로부터 이탈되어 전기케이블, 전기공급 기기 연결장치등에 물리적 손상을 야기할 수 있다. 게다가 지진 사건에서는 화재진압 대응행위도 불리한 상황에 처하거나 복잡해질 수 있기 때문에 일반 원전 화재사건보다 오래 지속될 가능성이 크다.

2.2 지진에 의해 유발된 화재 사례 검토

1990년에 미국 EPRI는 18개의 주요 지진사건 이후 100 개 이상의 원전시설의 조사 [EPRI NP-6989]를 수행하였는 데, 단 4건의 화재가 발생한 것으로 나타났기 때문에 지진 후화재 발생은 보편적 현상은 아니라고 언급하였다. 그와 같은 사건들의 발생가능성이 희박하기 때문에 원전에 대한 지진화재 발생빈도를 계산하기 위한 시도가 없었다.

2007년 7월16일 일본 니가타(新潟)현을 중심으로 리히터규모 6.8의 지진이 발생하였다. 이 지진으로 니가타현 가시와자키(柏崎)시에 있는 가리와 원전 7기 중2, 3, 4, 7호기의 가동이 자동정지된 가운데 3호기의 보조변압기에서 화재가 발생하였고, 1호기와 2호기의 변압기에서 절연유 누설등이 발생하였다. 또한 5개 지역에서 화재방호계통의 배관이 손상되어 소화수 방출을 초래하였다. 지진후 발생한 3호기 변압기 화재는 변압기 기초(Foundation)와 부스 덕트 2차 접속부 바닥 사이의 지반침하로 인한 단락으로 스파크가 발생되어 화재 발생이 시작되었다(그림 2 참조). 이때 발생한 스파크가 변압기로부터 누유된 절연유를 발화시켰다. 소화수 배관이 손상되었기 때문에 발전소 근무자가 화재를 진압할 수 없었으며, 화재가 발생한 후 약 2시간 뒤에 3호기를 관장하는 지역소방대(Local Fire Department)에 의해 화재가 진압되었다. 주제어실 운전원 전체의 조치행위는 모범적으로 이루어졌는 데, 이는 2004년 10월에 대형 지진발생시 발전소 대응조치에 대한 운전원 경험이 성공적인 행동을 하게 하는데 기여하였다. 예를 들면, 지진발생시 공기중에 있는 먼지 때문에 많은 화재 경보가 발생할 것이라는 것을 운전원이 예상하였다. 주제어실 대응에 도움을 주었던 또다른 조건은 지진발생 당시 및 이후에도 스위치야드에 있는 500 kV 가스절연 스위치가 어 때문에 소의진원이 운전가능하였다는 것이다.[3] 그림 3에 예시된 것처럼 국내원전의 지진 PSA 결과를 보면 지진 발생시 필수전원상실사건이 노심손상빈도(CDF, Core Damage Frequency)에 가장 큰 영향을 갖는 것으로 나타났다.

3. 지진-화재 상호작용 평가 방법론 검토

화재 확률론적안전성평가(PSA)업무는 화재로 인한 주요 리스크를 노심손상빈도 수치로

정량화하여 나타내는 업무이다. 그러나, 신규방법론에서는 13번째 업무인 지진-화재 상호작용평가는 정량화 평가 대신 현장답사(Walkdown)와 같은 정성적 평가방법 적용을 권고하고 있다. 신규방법론에서 제시된 지진-화재 상호작용 평가 절차는 다음과 같은 일곱 단계를 포함한다.

1 단계 : 핵심 지진-화재 상호작용 분석 구역을 식별

- 지진후 안전정지에 요구되는 기기와 케이블들을 담고 있는 화재 구역 식별
- 지진 대응 조치시 현장 수동제어 또는 수리 작업이 요구되는 화재 구역을 식별

2 단계 : 지진으로 유발된 화재의 잠재적 영향을 평가

- 1 단계에서 식별된 각 핵심 지진-화재 상호작용 분석 구역들에 대해서 지진 발생시 화재 점화원의 존재 여부를 평가

3 단계 : 지진시 화재진압계통 기능 저하를 평가

- 현장답사를 통하여 다중화재방호계통의 공통원인고장을 야기할 수 있는 보조계통의 내진성을 평가

4 단계 : 가짜 화재 감지 신호의 잠재적 영향을 평가

- 발전소 지진 대응 절차를 검토하고 다수의 화재경보신호를 처리할 수 있는 조항이 있는지 확인

5 단계 : 화재진압계통 오작동의 잠재적 영향을 평가

- 1 단계에서 식별된 지진후 안전정지를 위해 요구되는 계통과 기기를 위협하는 화재 진압제의 오작동 방출에 대한 가능성을 평가

6 단계 : 화재 수동진압시 지진으로 인한 잠재적 영향을 평가

- 수동 소방조치와 관련된 발전소 지진 대응 절차를 검토 및 평가

7 단계 : 문서화 작업

비록 신규 PSA 방법론 보고서에서는 7단계의 정성적인 지진-화재 상호작용 평가 절차가 기술되어있지만, 실제 현장답사 적용시 지침은 구체화 되어있지 않기 때문에 국내 적용시에는 그림 4에 예시된 EPRI에서 개발한 현장답사 체크리스트를 활용하여 적용하는 것이 훨씬 실용적일 것으로 판단된다.

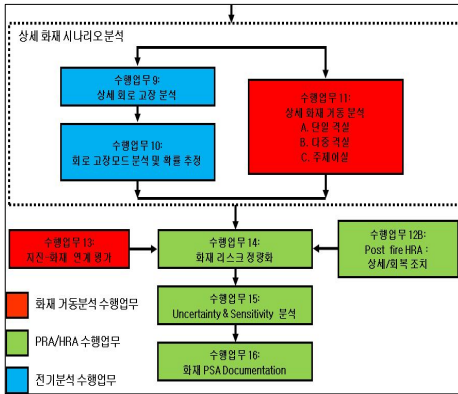
후쿠시마 원전 사고후 미국의 대응조치를 권고하고 있는 NTTF(Near Term Task Force)는 지진유발 화재는 안전 관련 계통 다수 고장을 야기시킬 가능성이 있고, 발전소 부지의 여러 위치에서 별도의 화재를 유발시킬 잠재력을 무시할 수 없다. 따라서 지진유발 화재와 홍수의 결과로 발전소 안전 장비의 공통모드고장에 대한 가능성을 재평가해야 한다고 결론 맺고, 이에 대한 권장사항을 Tier 3 항목(장기 평가 확인)으로 분류하였지만, 미국 NRC 위원회는 정책성명 SECY-12-0025[4] 에서 지진유발 화재/홍수를 평가하기 위한 확률론적위험도평가(PRA) 방법론 개발은 Tier 1 활동(단기조치사항)으로 수행 할 것을 지시하였고, 2012년 6월까지의 PSA 방법론 개발을 위한 기본계획을 수립할 것이라고 명시하고 있다. 지진으로 유발된 화재/홍수에 대한 정량적 PSA 방법론 개발은 원전에서 적용할 수 있는 수준정도로의 개발까지는 단시일 내 완성되기는 어려울 것으로 예상된다. 통일된 PSA 방법론이 개발된 후 국내에 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 지진유발 화재에 대해서 살펴보았고, 향후 국내 원전에 신규방법론을 적용한 화재 PSA 수행시에는 현장답사를 통한 정성적 방법을 시범 적용하여 국내 적용성을 검증한 후 향후 통일된 정량적 평가 방법론이 개발되면 적용할 것을 제시하였다.

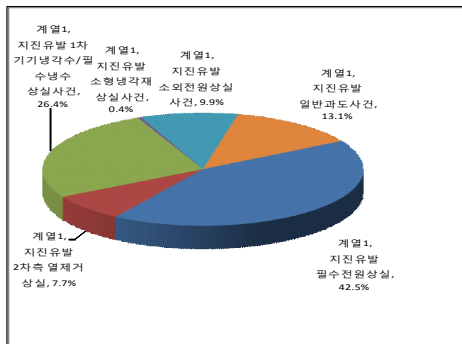
참고문헌

1. EPRI TR-105928, Fire PRA Implementation Guide, December 1995
2. NUREG/CR-6850, "EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities" August 2005.
3. INPO SEN-296 "Earthquake at Kashiwajaki-Kariwa" October, 2007
4. NRC SECY-12-0025,, "Proposed Orders And Request Proposed Orders and Requests for Information in Response to Lessons Learned from Japan's March 11, 2011, Great Tohoku Earthquake and Tsunami", February, 2012



<그림 1. 신규 PSA 방법론 업무흐름도>

<그림 2. 일본 K원전 변압기 화재사진>



<그림 3. 국내원전 지진 CDF 프로파일>

| EPRI NP-6095 Post-Shutdown Inspection and Test Checklist | |
|--|-------------------------------------|
| MEDIUM VOLTAGE SWITCHGEAR - 6900V M/C B1 | Check box if acceptable |
| 1. Check equipment anchorage for damage, e.g., stretching or loosening of anchor bolts or nuts, rocking or sliding of equipment. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2. Check for damage to attached conduit and ground straps. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3. Check for distortion of cabinet structure. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4. Open cabinets, check to see that internally mounted components, including relays and contacts, are secure and undamaged. | <input type="checkbox"/> |
| 5. Check for damage due to impact or earthquake induced flooding or spraying. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 6. Check local alarms, breakers and protective devices for actuation/trips. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7. Reset any trips. Investigate any re-trips after reset. | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Withdrawal Notes/Comments: Opened 35 B-2 Picture Numbers: <u>INSGP0601</u> <u>INSGP0602</u> <u>INSGP0603</u> <u>INSGP0604</u> | |

<그림 4. EPRI 현장답사 체크리스트>