

LTBSBO 중대사고 S-REDAP 반영을 위한 선원항 평가 비교분석

양양희^{1*}, 이갑복¹, 손순환¹, 이용진²

¹한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

²(주)엔에스이, 대전광역시 유성구 가정로 218

*yhyang79@khnp.co.kr

1. 서론

미국 NRC는 1995년 NUREG-1465에서 중대사고 시 선원항을 예측하는 기준과 방법을 발표한 이후, 후쿠시마 사고를 경험하면서 2012년 말 장기정전 사고(LTSBO¹⁾) 포함하는 NUREG-1935 SOARCA²⁾ 보고서를 발간하였다. 이에 따라 국내에서도 2013년부터 후쿠시마 후속조치의 일환으로 LTSBO 중대사고 반영이 고려되었으며 개발중인 원전사고시 방사선량평가프로그램(S-REDAP³⁾)의 선원항 평가에 LTSBO 중대사고를 포함시켰다. 본 연구에서는 자연재해로 인한 LTSBO 사고시 선원항 평가 프로그램에 사용되는 가정과 데이터에 대한 적합성을 확인하고 선원항 평가로직의 타당성을 RASCAL⁴⁾ 4.3 프로그램과 비교한 결과를 기술하였다.

2. 본론

2.1 사고 시나리오

LTSBO 사고분석 시나리오는 후쿠시마 사고를 설정하여 적용하였다. 사고 시나리오는 자연재해로 인한 정상적인 원자로 정지와 운전원 조치가 수행되었으나 전원이 상실되어 배터리 전원으로 원자로 정지등 비상운전조치가 수행되고 이를 제외한 모든 안전계통이 불능인 상태로 가정하였다.

LTSBO 사고에서 Surry 원전에 대해 확률론적 분석으로 예측한 원자로수위 변화를 Fig.1에 나타내었다. 이를 살펴보면 8시간 경과 후에 전원상실로 비상운전조치가 불가능하여 1,2차계통의 압력이 상승된다. 또한 증기발생기 비등현상으로 1차 냉각재계통 밀봉기능 상실로 16시간 후에는 원자로냉각재 수위가 떨어져 노심노출현상이 발생되고 핵연료피복재 간극에 존재하는 방사능방출이 일어난다.

또한 전원상실로 원자로 수위를 정상으로 복구하지 못함에 따라 노심용융에 의한 격납건물의 압력이 상승된다. 28 시간 후에는 설계압력(45psig)에 도달하고 45 시간 후에는 설계압력의 2배까지 상승하며 격납건물 누설량이 증가되어 최대 50%/d율로 누설된다고 가정하여 LTSBO 중대사고를 평가하였다. S-REDAP 프로그램에도 이러한 LTSBO 선원항 평가로직을 적용하였으며, 계산결과를 SOARCA 보고서와 비교하였다.

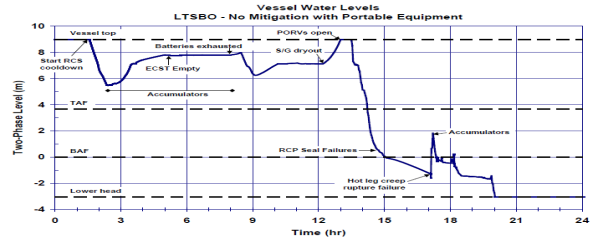


Fig.1. Unmitigated LTSBO vessel coolant level history.

2.2 입력자료

LTSBO 중대사고 선원항 평가에 적용된 가정과 데이터는 원전설계자료, 노심재고량, 노심방출시간 및 핵분열생성물의 그룹별 노심유출율 등을 고려한다. LTSBO 사고를 계산하기 위해 DC배터리 가용시간은 SOARCA 보고서에서 안전여유도를 감안하여 4시간을 기본값으로 설정하였다. 그러나 Surry 원전의 PSA 분석결과에 의하면 약 8시간 후에 방전되는 것으로 평가되었다.

소내외 전원상실로 인한 원자로냉각기능 상실로 원자로노심 노출 및 손상으로 방사능유출이 시작되는 시간은 확률론적 분석결과 배터리 방전 이후 12시간이 소요되는 것으로 보고 있다. 이에 따라 S-REDAP 프로그램에서 배터리 방전과 노심손상 시작시간을 이를 적용하였다.

원자로의 노심재고량은 RASCAL에서 이용하고 있는 PWR형 표준 노심재고량을 S-REDAP 프로그램에도 동일하게 사용하였다.

SOARCA 보고서에서는 LTSBO 중대사고가 발생

1) LTSBO, Long Term Station Blackout
2) SOARCA, State of the Art Reactor Consequence Analysis
3) S-REDAP, Smart Radiological Emergency Dose Assessment Program
4) RASCAL, Radiological Assessment System for Consequence Analysis

하여 노심손상이 일어나는 경과시간을 10단계로 구분하고 손상시간은 최대 24 시간까지 적용하고 있다. 핵종그룹은 Noble Gases 등 11개 그룹으로 구분하였다. 그룹별 방출분율은 불활성기체를 제외한 대부분의 핵종 그룹들이 SOARCA 분석 결과가 NUREG-1465 보다 더 높은 값을 나타낸다. RASCAL에서 LTSBO 중대사고를 평가하기 위하여 적용한 기본데이터를 추출하여 S-REDAP 프로그램에 동일하게 적용하여 핵종 그룹별 유출율을 계산하였다.

2.3 결과 분석

LTSBO 사고시 핵분열생성물의 선원항평가 타당성 검토를 위해 S-REDAP 프로그램과 RASCAL 4.3 프로그램을 이용한 평가결과와 비교하였다. 핵분열생성물은 후쿠시마 사고에서 방재대응활동에 중요한 핵종으로 고려되었던 핵종으로 Kr-85, I-131 및 Cs-137을 선정하였다.

Fig. 2는 LTSBO 사고시 Kr-85 핵종의 선원항평가결과를 나타낸 것으로 S-REDAP과 RASCAL 4.3 선원항 평가결과, 유사한 경향을 나타내었다. LTSBO 사고시 Kr-85 선원항 변화가 원자로정지 이후 12 시간부터 6 시간 동안 집중적으로 일어남을 알 수 있다. 사고발생 6 시간 이후에는 노심 유입량이 적어 방사능붕괴와 격납건물 누설로 인하여 서서히 감소되고, 45 시간 이후에는 격납건물내 압력상승에 의한 건물손상으로 격리기능이 손상됨에 따라 급격한 방출이 일어남을 보여주고 있다.

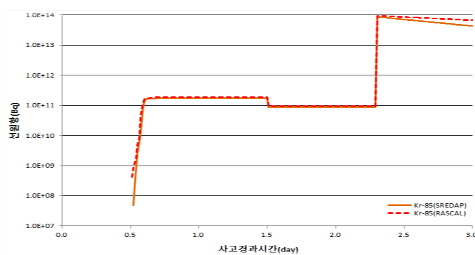


Fig.2. Evaluation results of Kr-85.

Fig. 3은 LTSBO 사고시 I-131 선원항평가 결과를 나타낸 것으로 S-REDAP과 RASCAL 4.3 프로그램의 평가결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 Cs-137에 대한 선원항평가 결과는 사고후 24 시간까지는 서로 비슷한 경향을 나타내다가 시간경과에 따라 Kr-85와 I-131과는 달리 점차 확대되는 경향을 나타내었다. Cs-137에 대한 선원항평가결과를 Fig. 4에 제시하였다.

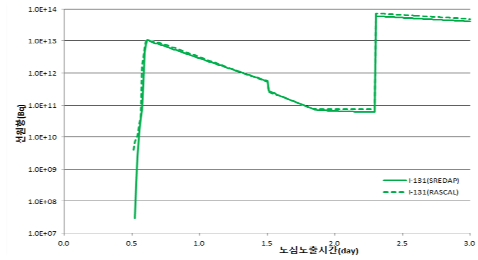


Fig.3. Evaluation results of I-131.

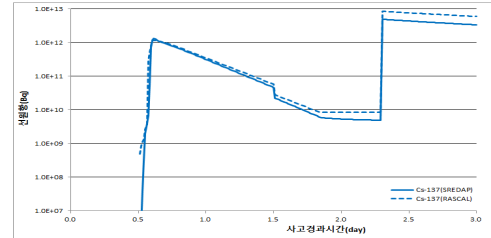


Fig.4. Evaluation results of Cs-137.

3. 결론

LTSBO 중대사고를 S-REDAP 프로그램에 반영하기 위해 선원항에 대해 RASCAL 4.3 평가결과를 비교하였다. S-REDAP은 고리1호기를, RASCAL 4.3은 고리1호기의 참조원전인 Kewaunee 원전을 대상으로 하였다. 평가에 사용된 가정과 입력변수들은 SOARCA 보고서에 제시된 거동현상을 잘 재현함을 확인하였다. 3 일 이상 장기간 선원항을 평가하는 경우 일부 핵종에서 과소 현상을 나타냈으나 전반적으로 잘 일치함을 보여주었다.

따라서 국내원전에서 자연재해에 의한 LTSBO 사고가 발생하여 선원항을 계산해야 하는 경우 S-REDAP 프로그램으로 평가가 가능할 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- [1] US NRC, NUREG-1465, "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants," Washington, DC, 1995.
- [2] US NRC, NUREG-1935, "State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses(SOARCA) Report", Nov. 2012.
- [3] 한수원중앙연구원, "원전 사고시 방사선량 평가 통합시스템 개발(중간보고서)", 2014-50003339-전-0276TM.