

고압안전주입이 실패한 소형 냉각재상실사고에서 일차측 급속냉각에 대한 PSA 민감도 분석

황미정, 정원대, 한성훈, 박수용

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

소형 냉각재상실사고 발생 후 고압안전주입이 작동하지 않는 경우, 국내 원자력발전소의 확률론적 안전성평가 (Probabilistic Safety Assessment: PSA) 에서 고려한 일차측 급속냉각 (Aggressive Cool Down of Reactor Coolant System)의 수행 가능성에 대한 논란이 있다. PSA분석 결과에 의하면, 일차측 급속냉각을 위해서는 운전원 조치가 전체 노심손상빈도에 큰 영향을 주고 있음을 보여주지만, 현재 작성되어 있는 국내 원자력발전소의 비상 운전절차서에 따르면 PSA 모델시 가정된 성공기준으로 일차측 급속냉각의 수행에 실패할 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 이에 따라 본 논문에서는 소형 냉각재상실사고로 인한 노심손상빈도 측면에서 PSA에서 사용한 일차측 급속냉각 성공기준과 인간오류에 대하여 민감도분석을 수행하였다. 또한 열수력학적 분석을 통해 일차측 급속냉각의 타당성과 성공기준을 재검토했다. 이 결과 일차측 급속냉각의 수행 가능성 여부와 노심 손상빈도에 미치는 영향을 도출하였고 일차측 급속냉각의 성공적 수행을 위한 새로운 성공기준을 제시한다.

1. 서론

소형 냉각재상실사고나 증기발생기 세관파열사고시 고압안전주입이 실패하면 원자로냉각재의 고갈로 노심이 손상된다. 이 경우 운전원이 짧은 시간 내에 이차측을 통해 일차측의 압력을 급격히 낮춘 후 안전주입탱크 및 저압안전주입계통을 통해 원자로냉각재를 보충하면 노심손상을 방지할 수 있다는 열수력 분석 결과에 따라, 여러 PSA에서 이를 분석에 반영하였다.

현재까지 수행한 국내 원전에 대한 1단계 PSA에서는 CE 열수력 분석 결과[1]를 근거로, 소형 냉각재상실사고나 증기발생기세관 파열사고 후 고압안전주입이 실패하면, 운전원이 15분 이내에 이차측을 통해 일차측의 압력을 급격히 낮추면 안전주입탱크 및 저압안전주입계통을 통해 원자로냉각재를 보충할 수 있다고 모델링하였다[2]. 그러나 비상운전절차서에 이와 관련된 절차가 명확하게 기술되어 있지 않으므로, 현재의 비상운전절차서에 따르면 원자로정지 후 15분 이내에 운전원이 일차측 급속냉각 운전을 수행하는 것이 시간상으로 매우 어렵다는 주장과 함께 일차측

급속냉각 운전의 고려에 대한 의문이 제기되었다[3]. 그러나 일차측 급속냉각에 대한 가정사항을 PSA모델에서 고려하지 않는다면 노심손상빈도에 미치는 영향이 상당히 크다.

본 논문에서는 소형 냉각재상실사고로 인한 노심손상빈도 측면에서 PSA에 사용한 일차측 급속냉각 성공기준과 인간오류에 대한 민감도분석 결과[4]를 정리하였다. 열수력학적 분석을 통해 일차측 급속냉각의 타당성과 성공기준을 재고해 보았으며, 일차측 급속냉각의 수행가능성 여부와 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하고 새로운 성공기준을 제시하였다.

2. 소형 냉각재상실사고시의 일차측 급속냉각

일차측 급속냉각이란 소형 냉각재상실사고 발생 후 고압안전주입계통이 작동하지 않을 경우, 원자로 냉각을 위해 대기덱프밸브와 보조급수계통을 사용하여 원자로냉각재계통을 급속히 냉각 및 감압시키는 과정이다. 현 PSA에서는 일차측 급속냉각 운전을 통해 일차측 압력을 낮추면 안전주입탱크 및 저압안전주입계통을 통해 원자로냉각재를 보충할 수 있다고 분석하였다. 이는 CE의 사고해석 결과 뿐만 아니라 최근에 OECD/NEA에서 수행한 일차측 급속냉각 가능성에 대한 BETHSY 실험[5]을 근거로 하였다. 이 실험 결과에 의하면 소형 냉각재상실사고 후 고압안전주입이 실패하면, 노심이 일시적으로 노출되지만 안전주입탱크 및 저압안전주입으로 노심 냉각재 재고량을 복구하고 잔열제거계통을 통해 원자로를 안정된 상태로 유지하여 노심손상이 일어나지 않았다.

그림 1은 소형 냉각재상실사고 사건수목에서 일차측 급속냉각 관련 사고경위와 노심손상빈도를 간단하게 보여주고 있다. 고압안전주입, 보조급수계통과 증기방출계통을 통한 이차측 열제거, 일차측 급속냉각, 방출 및 주입 운전, 저압안전주입 등이 사건수목의 표제로 고려되었다. 이 때 일차측 급속냉각의 세부적인 성공기준은 다음과 같다.

- 운전원이 사고 후 15분 이내에 증기발생기 이차측을 통해 허용 최대 냉각율 100 °F/hr 로 일차측 냉각 운전 시작
- 보조급수계통과 증기방출계통 작동
- 두 대 이상의 안전주입탱크에서 냉각수를 일차측으로 공급

그림 1에서 소형 냉각재상실사고가 발생할 빈도는 $3.0e-3/\text{yr}$ 이다. 소형 냉각재상실사고가 발생하고 고압안전주입이 실패할 빈도는 $2.07e-6/\text{yr}$ 이다. 만일 일차측 급속냉각이 가능하고 이의 실패까지 고려하면 고압안전주입 실패와 일차측 급속냉각의 실패로 인한 소형 냉각재상실사고의 노심손상빈도는 $8.12e-7/\text{yr}$ 정도로 낮아진다. 즉, 고압안전주입 실패 후 일차측 급속냉각이 실패할 확률이 최대 0.39정도 된다. 일차측 급속냉각의 실패는 관련계통의 기계적 고장이나 운전원 조치의 실패가 원인이다. 이 때 운전원 오류 확률이 0.35로 기계적 고장보다는 인간오류에 의한 일차측 급속냉각 실패 가능성이 크다는 것을 알 수 있다. 운전원 오류 평가는 ASEP 인간신뢰도분석방법을 사용하였다.

일차측 급속냉각에 대한 타 PSA 수행 결과를 살펴 보면, Zion, Sequoyah, Surry PSA에서는 고려하지 않은 반면, System 80, Palo Verde, Seabrook PSA에서는 이를 고려하고 있다. 뿐만 아니라 OECD/NEA에서는 소형 냉각재상실사고 발생 후 고압안전주입이 실패한 사고에 대해 이차측

냉각을 통해 일차측 압력을 낮추고 저압안전주입을 이용한 일차측 재고량 보충 가능성에 대한 실험을 수행하여 일차측 급속냉각의 기술적 근거를 제시하고 있다. 이처럼 PSA경향을 볼 때, 적절한 기술적 근거가 있으면 일차측 급속냉각을 PSA분석에 모델하고 있다.

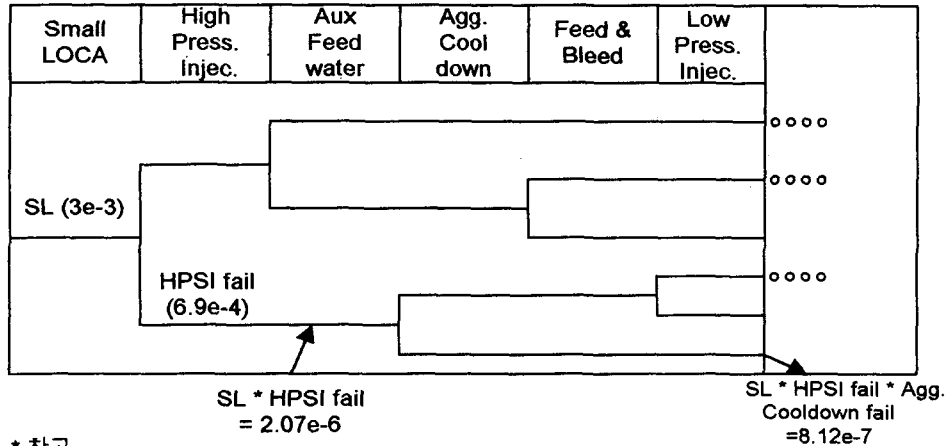


그림 1 간략화한 Small LOCA 사건수목 및 일차측 급속냉각 고려시의 사고경위 빈도

3. 일차측 급속냉각의 가정 변경에 따른 PSA 민감도 분석

2절에서 언급한 바와 같이 일차측 급속냉각의 실패는 대부분 인간오류에서 기인되며, 문제는 15분 이내에 운전원이 냉각재상실사고와 고압안전주입 실패 상황을 판단하고 일차측 급속냉각을 신속히 수행할 수 있는지에 있다. 이런 의문은 현 비상운전절차서에 고압안전주입 상실시 일차측 급속냉각에 대한 언급이 명확하지 않을 뿐 아니라, 일부분이 언급되어 있는 회복절차서까지 도달하는데 걸리는 시간이 최소 15분 이상 걸릴 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 관심의 대상은 일차측 급속냉각에 대한 오류 확률의 변화가 전체 결과에 미치는 영향과 운전원 조치 허용 시간을 늘릴 수 있는가이다. 본 논문에서 분석한 민감도 분석은 다음과 같다.

첫째, 운전원 조치 허용시간의 변화와 오류 확률 변화가 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가한다.

둘째, 성공기준을 여러 가지로 변화시켜 볼 때 노심손상빈도에 미치는 영향과 운전원 조치 허용시간을 늘릴 수 있는가이다.

3.1 운전원 조치시간에 대한 민감도 분석

CE의 사고해석 결과나 최근에 OECD/NEA에서 수행한 RCS 급속냉각에 대한 실험[5]은 RCS 급속냉각이 물리적으로 가능함을 보여 주었다. 그러나, 운전원 조치 가능성 여부는 허용시간과 절차서 기술 상황, 훈련 및 교육에 따라 달라진다. 또한 인간신뢰도분석 방법의 한계로 인하여 분석 방법이나 분석자에 따라 오류 확률 추정 값이 달라질 수 있다. 따라서 RCS 급속냉각 운전 실패 확률 값이 변함에 따라 소형 냉각재상실사고의 노심손상빈도는 어떤 영향을 받는지

분석하였다. 오류 확률 값이 1.0인 경우는 보수적 관점에서 RCS 급속냉각을 고려하지 않는 경우를 의미한다. 이에 따른 민감도 분석 결과는 표 1과 같다.

표 1 운전원 조치 허용 시간 및 오류에 대한 민감도 분석

경우	오류 확률	조치 시간	SIT 성공기준	Small LOCA 노심손상빈도	비고
1	0.1	15	2	1.438e-6/yr(25% 감소)	낙관적
2	0.35	15	2	1.928e-6/yr	현모델(기본)
3	0.5	15	2	2.22e-6/yr(15% 증가)	보수적
4	1.0	15		3.15e-6/yr(63% 증가)	급속냉각 고려않함
5	0.35	30	4	1.935e-6/yr(0.2% 증가)	기본
6	0.15	30	4	1.54e-6/yr(20% 감소)	보수적
7	0.08	30	4	1.41e-6/yr(27% 감소)	덜 보수적

관련 계통 신뢰도분석에서는 안전주입탱크를 제외한 나머지 계통은 기본 경우와 같으며, 안전주입탱크 계통은 성공기준을 2대에서 4대로 변경하여 신뢰도를 분석하였다. 오류 확률 계산에서는 ASEP 인간신뢰도분석 방법을 사용하였으며, 운전원 조치 시간이 30분인 경우에 대해 보수적인 평가와 덜 보수적인 평가로 나누어 오류 확률 값을 계산하였다. 일차측 급속냉각을 위한 운전원 조치 허용시간이 30분이고 이에 대한 정상적 오류 확률을 사용할 경우, 노심 손상빈도는 기본 경우에 비해 27% 정도 감소하였고, 보수적 오류 확률을 사용하면 20% 정도 감소하는 것으로 분석 되었다. 반면, 일차측 급속냉각을 고려하지 않으면 노심손상빈도가 63% 증가하는 것으로 분석되었다.

3.2 일차측 급속냉각 성공기준 재분석

앞에서 언급한 것처럼 허용시간이 15분인 경우, 오류 확률에 대한 여러 가지 입장이 있을 수 있다. 그러나 운전원이 적절한 조치를 취할 수 있을 만큼 허용시간이 길다는 것을 보일 수 있다면 현재 제기되는 많은 논란들이 해결될 수 있다. 따라서 이를 보이기 위해 MAAP4.0코드를 이용하여 급속냉각 성공기준에 대한 열수력 분석을 수행하였다. 총 22가지 경우에 대한 분석을 수행하였으나 본 논문에서는 민감도 분석 대상을 중심으로 표 2에 정리하였다. 열수력 분석에서의 주요 변수는 냉각 시작 시간, RCS 냉각율과 안전주입탱크 성공기준 등 이다. 냉각재상실은 소형 냉각재상실사고의 상한치인 0.02 ft² 크기의 파단이 저온관에서 발생하였다고 가정하였다.

MAAP 분석 결과에 의하면, 운전원이 원자로정지 15분 이내에 100 °F/hr 정도로 일차측 급속냉각을 수행하고 안전주입탱크가 2대만 작동할 경우, 노심노출이 발생하고 노심 온도도 약 1000 °K까지 상승하는 것으로 나타났다. 반면, 안전주입탱크 4대가 모두 작동한다면 노심노출이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 급속냉각 시점을 변경하면서 여러 성공기준에 대한 열수력

분석을 수행한 결과, 표 2의 경우 8에서 볼 수 있는 바와 같이 안전주입탱크 4대가 모두 작동하고 냉각율을 99.9 °F/hr로 유지하면서 급속냉각을 냉각재상실사고 후 30분에 시작하면 일정 기간 노심 노출이 발생하고 노심 온도는 증가하지만 노심손상은 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 만일 냉각율을 110 °F/hr 정도 유지하면 노심 노출도 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 반면, 원자로정지 후 40분에 일차측 급속냉각을 수행하면 120 °F/hr의 냉각율로도 노심 용융이 발생하는 것으로 분석되었다.

본 논문에서는 이상의 열수력 분석을 근거로 안전주입탱크 4대가 모두 작동할 경우, 일차측 급속냉각을 위한 운전원 조치 허용 시간이 30분 까지 가능하다는 결론을 얻었다.

표 2 일차측 급속냉각 성공기준에 따른 열수력 분석결과

경우	냉각율(°F/hr)	안전주입탱크 수	조치 시간 (원자로정지 후)	노심 상태
1	100	2	15분 이내	노심 노출
2	140~160	2	15분 이후	OK
3	107	4	15분 이후	OK
4	>500	2이상	20~30분	OK
5	120	4	30분 이내	OK
6	120	3	30분 이내	노심노출
7	127	4	40분 이내	노심 노출& 손상
8	99.9	4	30분 이내	노심 노출
9	110.5	4	30분 이내	OK

4. 결론 및 토의

소형 냉각재상실사고시 고압안전주입실패는 대부분의 PSA에서 중요한 사고경위로 나타나고 있으며 노심손상빈도에 큰 영향을 주고 있다. 이러한 문제 때문에 국내 원전의 PSA는 물론 System 80 PSA나 Palo Verde IPE에서도 소형 냉각재상실사고시 고압안전주입 상실이 발생하면 일차측 냉각을 통해 일차측 압력을 낮추고 저압안전주입을 이용하여 냉각재 재고량을 보충하는 일차측 급속냉각을 모델하고 있다. 그러나 현 비상운전절차서에 따르면, 일차측 급속냉각은 시간상으로 매우 촉박한 작업으로 실패할 가능성이 매우 높은 것으로 판단되며, 이로 인하여 일차측 급속냉각의 고려 여부 및 오류 확률 값에 대한 논란이 제기되었다. 따라서 일차측 급속냉각의 여러 요인에 대한 추가 분석과 민감도 분석의 필요성이 대두되었다.

민감도분석 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 고압안전주입 실패 후 일차측 급속 감압을 고려하지 않으면, 소형 냉각재상실사고에 의한 노심손상빈도는 63%가 증가하는 것으로 분석되었다. 이에 따라 일차측 급속냉각이 전체 노심손상 빈도에 미치는 영향이 클 것으로 예측된다. 본 논문에서는 MAAP 4.0 코드를 이용한 열수력 분석을 통해 일차측 급속냉각의 타당성과 성공기준을

검토하였으며, 일차측 급속냉각의 수행 가능성 여부와 노심손상빈도에 미치는 영향을 평가하고 새로운 성공기준을 제시하였다. 분석 결과 운전원이 원자로 정지후 30분 이내에 100 °F/hr의 냉각율로 RCS 급속냉각을 수행하면 노심손상을 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 이 때 안전주입탱크는 4대 모두 작동해야 한다.

또한 논란이 되고 있는 오류 확률 값의 변화에 따른 민감도 분석도 수행하였다. 조치 허용시간이 15분일 경우, 보수적으로 RCS 급속냉각을 고려하지 않는다면 고려할 때보다 소형 냉각재상실 사고의 노심손상빈도가 63% 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 MAAP 분석 결과로 얻어진, RCS 급속냉각을 위해 30분 정도의 허용시간이 있는, 새로운 성공기준을 적용할 때는 현재 보다 약 27% 낮은 노심손상빈도가 얻어졌다.

참고 문헌

1. "Depressurization and Decay Heat Removal – Response to NRC Questions", CEN-239, ABB-CE, 1983.
2. 울진 3,4호기 확률론적 안전성평가, 한국전력공사, 1998.
3. 울진 3,4호기 확률론적 안전성평가에 대한 KINS 2차 질의서, 한국원자력안전기술원, 1997.
4. 울진 3,4 호기 1단계 확률론적 안전성평가 별도보고서, 한국원자력연구소, 1998.
5. OECD/NEA/CSNI International Standard Problem No. 27 - BETHSY Experiment 9.1B2, Cold Leg Break without and with Delayed Ultimate Procedure , OECD/NEA, 1992.
6. 울진 원자력발전소 3,4호기 최종안전성분석보고서, 한국전력공사, 1996.
7. 울진3,4호기 완전급수상실사고 해석, KAERI/TR-673/96, 한국원자력연구소, 1996.