

영광 3,4 호기의 초기 부분충수 운전중 정지냉각 상실 사건에 대한 예비 확률론적 안전성평가

강대일, 성태용, 박진희, 김길유

한국원자력연구소

요약

본 논문에서는 영광 3,4호기의 초기 부분충수 운전중 정지냉각 상실 사건에 대하여 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA)를 수행하였다. 1 단계 PSA 결과인 노심손상빈도에 크게 영향을 끼치는 인간행위는 THERP(technique for human error rate prediction)를 사용하여 평가하였고, 사고경위는 KIRAP(KAERI integrated reliability analysis code package)을 이용하여 정량화하였다. 영광 3,4호기의 부분충수 운전중 정지냉각 상실 사건에 대한 예비적인 PSA 결과, 노심손상 빈도는 $1.43E-6$ 로 평가되었고 노심손상 빈도에 주요하게 기여하는 것은 원자로 냉각재 보충에 대한 운전원의 진단 실패로 나타났다. 노심손상빈도를 감소하는 방안의 하나는 운전원의 진단오류 확률을 낮추기 위해 노심손상까지의 운전원 여유시간을 확장하는 것이다. 그러나 보다 구체적인 결과는 분석에 필요한 여러가지 자료들을 검토하고 PSA를 다시 수행해야 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

원자력발전소가 정지된 후 이상사태가 발생하였을 때에는, 잔열이 낮고 운전원이 대처할 수 있는 시간이 길다는 등의 이유로 저출력/정지 운전에 대한 안전성은 중요하게 생각하지 않았었다. 그러나 원자력발전소의 저출력/정지 운전중에 발생했던 많은 사건들로 인해 저출력/정지 운전시에도 안전성이 중요하다는 것이 인식되었고 또한 프랑스와 미국에서 수행된 PSA 결과에서는 저출력/정지시 노심손상 빈도가 전출력 운전시 노심손상 빈도와 비교하여 무시할 수 없을 정도로 높게 나타났다[1]. 정지운전중에는 대부분의 계통을 수동으로 작동해야 하기 때문에 정지운전에 대한 PSA결과인 노심손상 빈도에 차지하는 인간행위는 전출력운전의 PSA 결과보다 크게 나타났다. 기존에 수행되었던 저출력/정지운전 PSA 연구 현황을 인간신뢰도분석 방법론 측면에서 살펴보면 Combustion Engineering사는 THERP를, 미국의 국립연구소인 B.N.L과 S.N.L은 각각 성공경향지수 방법(successive likelihood index methodology; SLIM)과 ASEP(accident sequence evaluation program) 방법을, 프랑스는 모의제어반 실험 결과를, 대만은 인간인지신뢰도(human cognitive reliability;HCR) 방법을 사용하였다[2, 3]. 국내에서도 HCR 방법과 ASEP 방법을 사용한 저출력/정지 PSA 연구가 수행되었다[4, 5].

부분충수(mid-loop) 운전이란 예방 정비기간을 단축하기 위해 원자력발전소의 핵연료장전, 증기발생기의 튜브 검사 및 보수, 원자로 냉각재 펌프의 밀봉장치 교체를 위한 보수작업시 원자로 냉각재 수위를 고온관의 중간지점까지 배수를 하고 정지냉각계통을 운전하는 것을 말한다. 핵연료 교체를 위한 계획예방 정비시 2번의 부분 충수 운전이 있으며, 그 중 핵연료 교체전의 부분 충수

운전시에는 사용후 핵연료가 아직 원자로에 장전돼있고 잔열이 많기 때문에 정지냉각 상실(loss of shutdown cooling) 사건이 발생하면 노심손상까지의 운전원 여유시간은 다른 어떤 운전모드보다 매우 짧다.

이에 본 연구에서는 영광 3,4호기의 초기부분 충수 운전중 정지냉각 상실 사건에 대해 PSA를 수행하였다. 본 연구에서 인간행위 정량화는 일반적인 인간신뢰도분석 방법인 THERP[6]를 사용하였고, 노심손상까지의 운전원 여유시간 파악과 사건수목(event tree) 작성, 그리고 사건수목의 표제(heading) 성공기준 확정은 기수행된 연구결과[5]와 영광 3,4호기의 관련 절차서[7]를 검토하여 수행하였다. 초기사건 선정과 초기사건빈도 계산은 NUREG/CR-6144[8]와 영광 3,4호기의 운전모드 분류 방안[9]을 사용하여 평가하였다.

2. 사고경위 모델

정지운전에 대한 PSA 수행 결과 보고서인 NUREG/CR-6144[8]에 의하면 정지냉각 상실을 유발하는 인자로는 과배수(overdraining) 사건과 정지냉각계통 자체의 이상 등 여러 가지 원인이 있다. 본 분석에서는 분석의 편의를 위해 크게 정지냉각 상실을 유발할 수 있는 사건을 과배수 사건과 정지냉각 계통 자체의 상실 사건으로 나누고 다른 원인으로 인한 정지냉각 상실 사건들은 이 두 사건에 포함시켰다. 정지냉각계통 자체의 상실사건은 보수적으로 정지냉각계통의 펌프 모두가 이용불능이라고 가정하였다. 그림 1에 과배수 사건으로 인한 정지냉각 상실 사건수목이 나타나있다. 정지냉각계통 자체의 상실로 인한 정지냉각 상실 사건수목은 그림 1에서 초기사건 빈도와 표제 RSCS의 성공기준만이 다르다. 정지냉각 상실에 대한 초기사건 빈도 평가 결과, 과배수 사건으로 인한 정지냉각 상실은 1.7E-2/년으로, 정지냉각계통 자체의 상실 사건은 9.0E-4/년으로 평가되었다.

정지냉각 상실 사건이 발생하면 운전원이 우선적으로 취해야할 조치는 냉각수 보충이다. 냉각수를 보충한 뒤에 대기중인 다른 정지냉각계통을 사용하여 계속적으로 원자로를 냉각시킨다. 만일 정지냉각 계통이 이용 불가능하면 격납용기살수계통을 이용하여 원자로를 냉각시킨다. 만일 정지냉각이나 격납용기 살수 펌프를 이용한 원자로의 냉각이 불가능하면 핵연료 재장전수(refueling water tank)의 물을 원자로에 계속적으로 주입한다. 핵연료 재장전수 탱크의 물이 고갈되면 격납용기 배수조(sum)에 있는 물을 이용해 계속적으로 원자로를 냉각시킨다. 현재 영광 3,4호기 비정상-45[7]에는 정지냉각계통이나 격납용기살수계통 모두 이용 불가능할때 핵연료 재장전수 물의 지속적인 주입과 재순환 운전에 대해서는 기술돼있지 않다.

사건수목의 표제에 대한 성공기준은 참고문헌 [5]와 절차서[7] 검토를 토대로 가정을 하였다. 초기사건과 사고경위 모델링시 사용한 가정사항은 다음과 같다;

- 1) 초기부분 충수 운전 시간은 30시간이고 초기부분 충수 운전 회수는 연간 1회라고 가정하였다.
- 2) 분석의 편의를 위해 정지냉각 계통 이상으로 인한 정지냉각의 상실은 정지냉각계통 모두가 이용불능이라고 하였다.
- 3) 절차서에 따라 정지냉각 운전시에는 정지냉각 펌프 뿐만이 아니라 격납용기살수계통의 펌프도 이용가능하다고 가정하였다. 정지냉각계통이상으로 인한 정지냉각 상실 경우에는 격납용기살수계통 펌프만이 이용 가능하다.
- 4) 부분충수 운전 중에 가압기의 맨웨이(manway)는 열려있기 때문에 항시 증력을 이용한 냉각재계통의 보충은 가능하다고 가정하였다. 본 분석에서 냉각재 보충을 위해 고려된 유로는 저압안전주입계통 펌프와 격납용기살수계통 펌프를 거치는 증력급수이다.

- 5) 강제급수를 통한 냉각재계통의 충전 및 유출 운전의 성공은 핵연료 재장전수 탱크의 물이 다 고갈하기 때문에 24시간동안의 원자로 냉각을 위해 격납용기 배수조에 있는 물을 사용하여 지속적인 운전을 하는 것이라고 가정하였다.
- 6) 모델링과 정량화의 편의를 위해 냉각재 보충은 중력급수만을 이용하고, 냉각재계통의 충전 및 유출운전은 고압안전주입계통만을 사용한다고 가정하였다.

3. 인간신뢰도분석

인간오류 정량화는 THERP[6]를 사용하여 수행하였다. THERP는 원자력발전소의 이상상태에 대응하는 운전원행위의 인간오류를 진단오류와 수행오류로 나누어 평가한다. 수행오류는 다시 운전원이 절차서의 항목을 빠뜨리는 누락오류(error of omission)와 기기들의 조작시 실패하는 조치오류(error of commission)로 이루어진다. 과배수 사건 발생후에 운전원이 냉각수 보충을 하고있는 동안 원자로 수위지시계의 불안정으로 인해 운전원은 냉각수 보충이 충분히 됐었다고 잘 못 판단할 수 있다. 이렇게 운전원이 판단을 잘 못하면 운전원은 대기중인 정지냉각 계통의 펌프를 기동하여 정지냉각계통의 고장을 유발할 수 있다. 판단 잘 못으로 인한 이러한 인간오류를 조치오류(commission error)에 포함시키지만 이러한 조치오류는 특수한 조치오류로서 현재 연구 중[10]에 있기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않았다.

그림 1의 사건수목에 있는 각 표제와 관련된 인간행위들의 성공기준과 시간정보 등을 간단히 기술하였다.

(1) O-MKUP Operator fails to makeup RCS - gravity feed

운전원의 성공기준은 재장전수 탱크와 냉각재 계통의 중력 수두(gravity head) 차를 이용하여 저압안전주입계통이나 격납용기살수계통을 통한 유로 형성을 위해 관련 계통의 밸브들을 정렬하는 것이다. 노심손상까지의 운전원 여유시간은 초기사건후 80분이다.

(2) O-RSCS Operator fails to re-start shutdown cooling operation

냉각재 보충이 이루어지면 절차서에 따라 잔열제거를 위해 대기중인 정지냉각계통의 펌프를 기동한다. 정지냉각계통의 성공적인 운전을 위해 노심손상 까지의 여유시간은 냉각재 보충후 5시간이다.

(3) O-F&B Operator fails to feed and bleed operation - HPSIS

냉각재 보충이 실패하거나 정지냉각 운전이 실패할 때 일차측 충전 및 유출 운전을 수행하여 잔열을 제거할 수 있다. 성공기준은 고압안전주입계통 펌프의 지속적인 운전이다. 냉각재 보충이 실패할 경우 노심손상 까지의 운전원 여유시간은 초기사건후 80분이고 성공할 경우에는 냉각재 보충후 5시간이다.

(4) O-RCIR Operator fails to perform recirculation operation - HPSIS

핵연료 재장수 재고량이 고갈되면 운전원은 격납건물 배수조에 고여있는 냉각수를 이용하여 계속적으로 재순환 운전을 하여 잔열을 제거한다. 노심손상 까지의 운전원 여유시간은 냉각재 보충후 5시간이다.

표 1에 인간오류 정량화 결과가 나타나 있다. 운전원의 진단오류는 노심손상까지의 여유시간과 운전원의 훈련정도 그리고 운전원의 꺼림(hesitancy)에 따라 평가하였다. 절차서에 기술돼 있지 않으나 일부 운전원이 알고 있는 행위의 진단오류 확률은 THERP에서 제시하는 노심손상까지의 운전원 여유시간에 따른 확률 값의 상한 치를 할당했다. 수행오류는 운전원이 받는 스트레스와 운전원 사이의 의존성을 고려해 평가하였다. 절차서에 기술돼 있지 않으나 일부 운전원이 알고 있는 행위는 THERP의 표 20-7의 항목 2를 사용해 평가하였고, 절차서에 없으나 일부 운전원이 알고 있는 행위는 THERP의 표 20-7의 항목 4를 사용해 평가하였다. 인간신뢰도분석시 사용한 가정사항은 다음과 같다;

- 1) 운전원의 훈련과 관련 절차서는 충전 및 유출(F&B) 운전을 제외하고 잘 돼 있다고 가정하였다.
- 2) 그림 1에서 일차적인 냉각재 보충(MKUP)이 실패하면 운전원은 매우 높은 스트레스(extreme high stress)를 받는다고 가정하였다.
- 3) 충전 및 유출 운전에 대해 일부 운전원들은 이 운전과정을 알고 있다고 가정하였다.
- 4) 단일행위(single action)에 대한 수행오류 확률의 최대 하한 치는 인간행위의 다변성(variability)때문에 $1.0E-4$ 이라고 가정하였다.
- 5) 영광 3,4호기의 주제어실에는 각종 기기에 대한 경보와 지시계 등이 잘 돼 있기 때문에 수행오류 평가시 조치오류는 매우 미미한 것으로 판단되어 고려하지 않았다.
- 6) 냉각재 보충과 정지냉각계통(RSCS) 운전은 서로 밀접히 연관돼 있기 때문에 진단오류는 동일한 사건으로 가정하였다. 정지냉각계통의 인간오류는 정지냉각계통 운전이 냉각재보충의 성공후에 이루어지기 때문에 수행오류만을 고려하였다. 충전 및 유출(F&B) 운전과 재순환(RCIR) 운전 행위 또한 서로 서로 밀접히 연관돼 있기 때문에 진단오류는 동일한 사건으로 가정하였다. 정지냉각계통의 운전과 마찬가지로 재순환운전의 인간오류는 수행오류만을 고려하였다.
- 7) 냉각재 보충 실패 뒤에 수행되는 충전 및 유출 운전의 진단오류와 냉각재보충의 진단오류는 두 행위의 특성상 완전 의존성이 있는 것으로 가정하였다.
- 8) 냉각재 보충을 위한 저압안전주입계통과 격납용기계통 운전에 대한 수행오류들 사이에는 낮은 정도의 의존성이 있는 것으로 가정하였다.

4. 결과와 토의

계통의 모델링을 위해 참고문헌 [11]의 고장수목을 사용하였으며 사고경위 정량화는 KIRAP을 이용하였다. 노심손상 사고경위를 나타내는 단절집합을 생성하기 위한 절단치(cut-off value)는 $1.0E-12$ 이었다. 정량화 결과 초기 부분충수 운전중 정지냉각 상실을 일으키는 과배수 사건으로 인한 노심손상 빈도는 $1.362E-6$ /년이고, 정지냉각 계통 자체의 상실 사건은 $7.179E-8$ /년으로 평가되었다. 정지냉각 상실로 인한 전체 노심손상 빈도의 값은 $1.43E-6$ /년으로 평가되었다. 이러한 노심손상빈도는 영광 3,4호기 전출력 운전의 내부사건으로 인한 노심손상 빈도의 19%정도이다. 정지냉각 상실로 인한 노심손상 빈도에 주요하게 기여하는 것은 두 사건 모두 원자로 냉각재 보충(MKUP)에 대한 운전원의 진단오류로 전체 노심손상 빈도의 60%이상을 차지했다.

현재의 영광 3,4호기 비정상 -45 절차서에 충수 및 유출 운전을 포함시키는 절차서 개정시 정지냉각 상실로 인한 전체 노심손상 빈도는 $1.03E-6$ /년으로, 위의 경우보다 약 28% 정도 감소된 노심손상 빈도 값을 나타내고 있다. 노심손상 빈도에 주요하게 기여하는 것은 원자로 냉각재 보충(MKUP)에 대한 운전원의 진단오류로 정지냉각 상실 사건으로 인한 노심손상 빈도의 90%이상을 차지했다.

위의 분석결과를 바탕으로 현재의 영광 3,4호기 초기 부분 충수 운전중 정지냉각 상실 사건에 의한 노심손상빈도를 감소하는 방안으로서는 운전원의 진단오류를 감소하는 것이다. 운전원의 진단오류는 노심손상까지의 여유시간과 운전원 훈련 등에 따라 달지는데 본 논문에서는 운전원 훈련이 잘 돼 있다고 가정했기 때문에 노심손상까지의 여유시간 확장이 우선적인 노심손상 빈도 감소 방안이라 판단된다. 그러나 보다 구체적인 분석 결과와 노심손상 빈도 감소 방안은 초기사건 빈도와 노심손상까지의 운전원 여유시간을 파악하기 위한 열수력학적 분석, 절차서의 세밀한 검토와 운전원

면담을 통한 표제의 성공기준 확정과 인간신뢰도분석을 새로이 수행해야 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 박창규 외, "원자력 안전성 향상 연구: 1단계 PSA 체제 개선", KAERI/RR-1333/93, 한국원자력 연구소, 1994
- [2] 강대일 외 " 원자력발전소의 저출력/정지 확률론적 안전성평가에서의 인간신뢰도분석에 대한 현황분석", KAERI/AR-458/97, 한국원자력 연구소, 1997
- [3] Chun-Chang Chao et al., "An Estimation of Core Damage Frequency of a Pressurized Water Reactor during Midloop Operation due to Loss of Residual Heat Removal", Nuclear Technology Vol 111, July 1995
- [4] Won Hyo Yoon and Soon Heung Chang, "Risk Model Development for PWR during Shutdown", K.N.S, Vol. 21, No.1, 1989
- [5] 성태용 외, "가압경수로의 부분충수 운전 중 소외전원 상실사고에 대한 확률론적 안전성 평가", KAERI/TR-750/96, 한국원자력 연구소, 1996
- [6] A.D.Swain and H.E.Guttman, "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications", NUREG/CR-1278, S.N.L, Aug. 1983
- [7] 김창석, "정지냉각계통 상실시 조치", 비정상-45, 영광 제2발전소, 1996
"발전소 정지중 안전기능 점검", 기행-79, 영광 제2 발전소, 1996
- [8] T.L.Chu et al., "Evaluation of Potential Severe Accidents During Low Power and Shutdown Operations at Surry, Unit 1", NUREG/CR-6144, B.N.L, June 1994
- [9] 박진희, " 영광 3,4호기 발전소 운전모드 (POS)분류 방안", 세미나자료 1997
- [10] M.T.Barriere, "Multidisciplinary Framework for Human Reliability Analysis with an Application to Errors of Commission and Dependencies", NUREG/CR-6265, B.N.L Jul. 1995
- [11] Y.G Jo et al., "Final Level 1 PRA Update for YGN Nuclear Units 3&4", KAERI, 1993

표 1 인간오류 정량화 결과

인간행위	설명	진단오류 확률	수행오류 확률*
O-MKUP	fails to perform RCS makeup - LPSI or CSS pump line	5.32E-5(lower, 50min)	5.36E-4 x 5.05E-2(low dependency) = 2.71E-5
O-F&B-PR1	fails to perform F&B operation	3.42E-2(higher, reluctance, 200min.)	1.0E-2 x 1.25 x 2 x 1 x 6.9E-2 = 1.73E-3
O-F&B-PR2	fails to perform F&B operation	7.71E-2(higher, reluctance, 50min.)	1.0E-2 x 1.25 x 5 x 1 x 1.86E-1 = 1.16E-2
O-RSCS	fails to perform SCS operation	Not Applicable	3.0E-3 x 1.25 x 1 x 5.00E-1 x 5.00E-2 <= 1.0E-4
O-RCIR	fails to perform HPSI recirculation	Not Applicable	1.0E-2 x 1.25 x 1 x 1 x 5.95E-2 = 7.44E-4

*: 기본인간오류 확률 x 중앙값을 평균값으로 바꾸는 증배계수 x 스트레스 효과 등을 고려한 보정계수 x 첫번째 운전원의 실패에 대한 다른 운전원들의 회복 못할 오류 확률

Overdrain Event/Fail to maintain RCS level (17E2: upper estimate based on INURECPS14)	Makeup from RWI to RSC, UFSI & CSS	Re-start SCS systems - SCS PP & CSS PP	Feed & Bleed using UFSI PP from RWI to RCS	Recirculation using UFSI pump from sump	PDS	EVENTS SEQUENCE
RHRI	MKUP	RSCS1	FAB	RCIR	SEQU #	
					1	OK RHRI
					2	OK RHRI RSCS1
					3	CD RHRI RSCS1 RCIR
			c-14B-p1		4	CD RHRI RSCS1 c-14B-p1
					5	OK RHRI MKUP
					6	CD RHRI MKUP RCIR
			c-14B-p2		7	CD RHRI MKUP c-14B-p2

그림 1 Loss of SDC ET - overdraining event/fail to maintain RCS level