

PSA 기법을 이용한 가압경수로 부분충수운전 안전성 향상방안

박진희, 이윤환

한국원자력연구소

요 약

원자력 발전소 부분 충수운전 중에 발생할 수 있는 정지냉각기능 상실사고인 과배수 사건에 대한 확률론적 안전성 평가를 수행하였다. 본 분석의 주된 목적은 과배수로 인한 정지냉각기능 상실사건에 대하여 노심손상 빈도를 계산하고 안전성 향상방안을 도출하는데 있다. 과배수 사건은 초기 부분 충수운전중 발생하는 것으로 가정하였으며 이 때의 발전소 배열(Plant Configuration)은 영광 3, 4호기의 운전절차서 및 발전소 운전경험을 근거로 결정하여, 현재 운전상태에 대한 확률론적 안전성평가를 수행하였다. 분석결과 인간오류가 노심손상빈도에 가장크게 기여하는 인자로 나타났으며 인간오류를 줄일 수 있는 대체냉각 절차를 선정하여 재분석을 수행하였다. 고려된 대체냉각 수단은 피동적인 잔열제거 방법인 역류응축냉각(Reflux Cooling)과 정지냉각펌프의 대체계통으로 격납용기 살수펌프를 사용하는 경우의 두가지이다. 본 분석에서는 두가지 대체냉각수단을 모두 채택하는 것으로 가정하여 대체냉각 사용에 따른 효과를 비교하였는데 노심손상 빈도가 1/1000로 감소 하였다. 따라서 절차서 개정에 의한 대체 냉각수단확보는 부분 충수운전중 발전소 안전성 향상에 매우 효과가 큰것으로 나타났다.

1. 서론

확률론적 안전성평가는 원자력 발전소의 안전성을 종합적으로 평가하는 중요한 수단으로 이용되고 있으며, 인허가 요건 만족, 최적설계안 도출, 기술지침서 완화, 신뢰도 중심정비 및 운전원 교육 등의 다양한 분야에서 활용되고 있다. 최근까지 확률론적 안전성분석은 전출력운전에 대해서만 수행되었지만, 최근에 수행된 연구들은 정지/저출력 운전중의 위험도가 전출력운전중의 위험도에 비해 무시할 수 없는 수준이라는 것을 보여 주었으며 이에 따라 미국, 프랑스를 중심으로 세계 여러나라에서 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다 [1,2].

본 분석에서는 계획예방정비기간 중이나 원자로 냉각재 펌프 또는 증기발생기의 보수, 시험을 위해서 냉각재의 수위를 고운관 중간부분까지 배수하고 정지냉각계통을 이용하여 잔열을 제거하는 부분 충수운전을 수행하기 위하여 냉각재를 배수하는 도중에 발생할 수 있는 정지냉각 상실사고 유형 중 하나인 과배수 사건을 초기사건으로 선정하여 분석을 수행하고 부분 충수운전시 안전성을 향상 시킬

수 있는 방안을 도출하였다. 과배수 사건은 원자로 정지후 48시간이 경과된 시점에서 부분 중수운전을 위하여 냉각재 배수 중에 수위저지기의 부정확한 수위 오지시 등의 원인으로 원자로냉각재를 운전원이 과배수시켜 운전중인 정지냉각펌프에 공기가 유입되어 정지냉각기능 상실사고가 발생하는 것으로 가정하여 분석을 수행하였다.

## 2. 확률론적 안전성평가 모델

### 2.1 발전소배열

기본 발전소 배열은 영광 3,4호기 부분 중수운전 절차서[3] 및 발전소 운전경험 자료 수집을 통하여 가정되었으며 주요운전변수는 표.1과 같다.

### 2.2 사건수목 분석

그림.1 은 기본배열에 대한 과배수 사건수목을 나타내며 사용된 표제들에 대한 간략한 설명은 아래와 같다.

#### 1) OV : Overdraining of RCS

초기사건 표제 OV는 부분중수 운전을 위한 냉각재 배수도중에 정지냉각펌프 운전을 유지할 수 있는 수위 이하로 원자로냉각재를 배수하여 운전중인 정지냉각펌프에 공기가 유입되어 기능을 상실하게 되는 과배수사건이다. 발생빈도는 미국내 경험자료에서 도출된  $1.602 \cdot 2 / \text{demand}$ [4]를 사용하였다.

#### 2) OP : Operator Diagnose I.E

표제 OP는 운전원이 초기 사건발생 원인에 대하여 정확한 진단을 하지 못하는 경우를 나타낸다. 운전원이 사건발생원인 진단에 실패한 경우에는 대기중인 잔열제거계통(Train A)을 기동하여 기동된 펌프에 공기가유입되어 고장을 유발시킨다고 가정하였다.

#### 3) GFD : Gavity Feed

표제 GFD는 운전원이 초기사건진단에 성공하고 원자로냉각재를 재장전수 탱크로부터 중력급수물을 이용하여 보충하는 표제이다. 본 분석에서는 영광 3,4호기 운영절차서에서 고려된 중력 보충유로중 정지냉각계통 흡입모판을 통한 중력보충유로와 저압안전주입펌프를 통한 중력보충유로를 이용하는 것으로 가정하였다.

#### 4) MU : Coolant Make-Up

표제 MU는 운전원이 중력급수에 실패한후에 고압안전주입계통, 화학 및 체적제어계통 및 격납용기 살수계통을 이용한 냉각수 보충을 나타내는 표제이다. 이 단계의 성공기준은 소량의 냉각재로도 정지 냉각 계통의 운전 에 필요한 수위보충에 성공할 수 있으므로 고려된 냉각재 보충 수단 의 기동 성공만을 고려하였다.

#### 5) REC : Recover 2nd SCS

표제 REC는 운전원이 냉각재보충에 성공하고 냉각운전을 유지하기 위하여 대기중인 정지냉각계통의 운전을 위한 표제이다.

#### 6) F&B : Feed & Bleed

표제 F&B은 원자로 냉각수계통에 냉각수를 주입하고 유출수단을 확보하여 지속적으로 냉각을 유지하는 충전 및 유출운전이다. 이 단계의 성공기준은 고압안전주입계통, 화학 및 체적제어계통과 격납용기살수계통을 이용하여 제장전수탱크로부터 냉각재를 보충하고 이미 개방된 가압기 작업자 출입구를 통하여 유출운전을 시도하는 운전이다.

### 2.3 고장수목 분석

본 분석에 이용된 사건수목의 표제를 위한 고장수목은 영광 3, 4호기 확률론적 안전성평가에 사용된 고장수목을 사용목적에 따라 수정하였으며 영광 3, 4호기 운전 경험자료에 근거하여 안전주입탱크와 충전계통 1 Train을 제외한 모든계통을 고려하였다. 모든계통의 기동은 운전원이 수동으로 수행하는 것으로 가정하였으며 관련된 운전원 오류는 ASEP(Accident Sequence Evaluation Program) 인간오류 평가절차에 따라 분석하였다[5].

### 2.4 정량화결과

발전소 기본배열 사건수목에서 4개의 노심손상 사고경위에대하여 KIRAP Code[6]를 이용하여 정량화를 수행하였다. 정량화 결과는 표.2에 정리되었고 사고경위 #3, #7과 #9이 노심손상을 유발하는 주요 사고경위로 나타났으며 운전원 오류가 과배수사건에 대한 노심손상빈도의 주요 기여요인으로 판명되었다.

## 3. 개선안 분석

### 3.1 개선안 도출

기본배열에서 계산된 노심손상빈도를 줄이기 위한 방안으로 최근 저온정지 운전중 정지냉각기능 상실사건 발생시에 효과적인 노심 냉각수단으로 알려진 역류응축과 격납용기 살수계통을 정지냉각 기능대체수단으로 고려한 새로운 발전소배열을 가정하였으며 주요 운전 변수는 표.1에 정리되었다. 역류응축은 정지냉각 상실사고후에 냉각재의 비등으로 고온관에서 발생한 증기가 증기발생기 세관(U-Tube)으로 유입되어 증기발생기 2차측과 열전달을 하는 과정에서 응축되어 고온관으로 다시 유입되는 현상으로 국내외의 여러 연구[7,8,9]들에서 부분 충수운전중 정지냉각상실시에 효과적인 열제거원으로 알려져있다. 개선된 발전소 배열에서는 역류응축 효과를 고려하기 위하여 원자로 냉각재계통의 배기유로를 임시수위저지기와 가압기 및 원자로용기 상부의 배기유로만을 고려하였으며 기본배열에서 고려된 가압기 작업자 출입구는 개방되지 않는 것으로 가정하였다.

### 3.2 사건수목 분석

그림.2 는 가정된발전소 배열에 대한 과배수 사건수목이며 추가된 표제들에 대한 간략한 설명은 아래와 같다.

1)OP1 : Operator Re-diagnose I.E

표제 OP1은 운전원이 과배수 사건에 대한 정확한 진단에 실패하고 대기중인 정지냉각을 기동시켜 보는 정지냉각계통에 공기가 유입되어 이용불능을 초래한 후에 사고원인에대한 재진단을 시도하는 표제이다. 운전원이 재진단에 실패하는 경우에는 대기중인 격납용기 살수계통을 운전하여 계통에 공기가유입되어 계통이 정지된다고 가정하였다.

#### 2) REFX : Reflux Cooling

표제 REFX는 운전원이 역류응축을 이용하여 잔열제거운전을 시도하기 위하여 원자로계통의 배기 경로를 격리하고 증기발생기 2차측에 보조급수를 공급하는 운전과 대기배기밸브를 열어 1차측과 열전달을 통하여 2차측 냉각수가 비등할 경우에 증기를 배기시키는 운전을 시도하는 표제이다.

#### 3) RE-CSS : Recover SCS using CSS

표제 RE-CSS는 운전원이 정지냉각계통을 운전하기에 충분한 용량의 냉각재를 보충하고 대기중인 정지냉각계통의 운전이 실패한 후에 격납용기 살수계통을 이용하여 냉각운전을 시도하는 표제이다.

#### 4) F&B : Feed & Bleed

표제 F&B는 충전수단은 기본 발전소 배열의 충전수단과 동일하고 운전원이 냉각재 유출유로로 안전 감압계통(SDS) 밸브를 개방하는 것으로 가정하였다.

### 3.3 정량화 결과

개선된 발전소배열에 대한 사건수목에서 5개의 노심손상 사고경위가 도출되었으며 정량화 결과는 표.3에 정리되었고 사고경위 #5와 #7이 노심손상을 유발하는 주요한 사고경위로 나타났으며 운전원 오류와 전력계통의 이용불능도가 노심손상빈도의 주요 기여요인으로 판명 되었다.

### 4. 결론 및 논의

두 사건수목을 정량화하여 노심손상 빈도를 비교한 결과, 기본 발전소배열에서 특별한 계통의 추가나 발전소의 설계변경없이 정지냉각상실시에 복구조치로 역류응축을 수행할 수 있는 운전절차서를 준비하고 격납용기살수계통을 정지냉각계통의 대체계통으로 사용할 수 있도록 복구절차에 추가하는 발전소 부분 충수운전절차의 개선을 통하여 과배수사건으로 인한 노심손상 빈도를 약 1000배 이하로 낮출수 있는 것으로 분석되었다. 이러한 개선안을 발전소에 적용하기 위해서는 정지냉각 상실시의 발전소 거동에 대한 상세한 열수력학적 계산을 통하여 본 분석에서 고려된역류응축 냉각효과에 대한 해석이 수행되어야 하며 운전원이 고려된 복구절차를 정확하고 용이하게 수행하기위한 적절한 발전소 운영 및 비상운전절차를 개정하면 초기부분 충수운전시 정지냉각상실로 인한 노심손상 빈도를 줄이는데 상당한 기여를할 수 있다.

#### 참고문헌

1. CEA/IPSN, "Probabilistic Safety Study on French 900 MWe Plant". EPS 900, CEA/IPSN, 1990
2. EdF, "Probabilistic Safety Study on French 1300 MWe Plant", EPS 1300, EdF, 1991.
3. 한국전력공사, "영광 제2발전소 운영절차서"
4. T. L. Chu, et al., "Evaluation of Potential Severe Accidents During Low Power and Shutdown Operations

- at Surry Unit 1", NUREG/CR-6144, 1994
5. A.D. Swain, "Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure", NUREG/CR-4772, 1987
  6. S.H. Han et al., "KIRAP (KAERI Integrated Reliability Analysis Code Package) Release 2.0 User's Manual", KAERI/TR-361/93, 1993.
  7. Y.A. Hassan and Banerjee, "RELAP5/MODE3 Simulation of the Loss of the Residual Heat Removal During a Midloop Operation Experiment Conducted at the ROSA-IV Large Scale Facility", Nuclear Technology, Vol.108, Nov.1994
  8. 과학기술처, "원자력 안전성 향상 연구 1단계 PSA 전산체제 개선", KAERI/RR-1487/94
  9. 김 원 석외, "영광3/4호기 Midloop 운전중 RHR 기능 상실사고시 CATHARE2 코드를 이용한 열수력 현상해석 및 증기발생기 열제거 능력평가", 95 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집

표.1 발전소 초기조건

운전 변수	기본 발전소 배열	개선된 발전소 배열
원자로 정지후 경과시간	48 시간	48 시간
원자로 냉각재계통 배기경로	가압기 맨웨이 개방 원자로용기 배기구 가압기 배기구 임시수위저지기	원자로용기 배기구 가압기 배기구 임시수위저지기
원자로 냉각재온도	고온관 : 60 °C, 저온관 : 60 °C	고온관 : 60 °C, 저온관 : 60 °C
원자로 냉각재수위	고온관 중간	고온관 중간
증기발생기 2차측	만수위	만수위

표.2 기본 발전소배열 정량화 결과

사고경위 #	노심손상빈도( /year)	주요 기여요인
# 3	2.239 E-5	F&B 수행 오류
# 6	9.268 E-10	F&B 수행 오류
# 7	1.010 E-6	GFD & MU 수행오류
# 9	4.561 E-6	OP 진단오류
Total	2.8 E-5	

표.3 개선안 발전소배열 정량화 결과

사고경위 #	노심손상빈도( /year)	주요 기여요인
#5	3.032 E-9	REFX 및 F&B 수행 오류
# 7	2.569 E-8	전력상실
# 11	1.037 E-10	OP 진단 및 REFX 수행오류
#13	4.177 E-10	OP 진단 및 전력상실
# 16	N/A	N/A
Total	2.8 E-5	

Overdraining of RCS	Operator Dignose I.E	Gravity Feed	Coolant Make-Up	Recover 2nd SCS	Feed & Bleed	SEQ #	PDS
OV	OP	GFD	MU	REC	F&B-1		
						1	OK
						2	OK
						3	CD
						4	OK
						5	OK
						6	CD
						7	CD
						8	OK
						9	CD

그림.1 기본발전소배열 과배수사건 사건수목

Overdraining of RCS	Operator Dignose I.E	Operator Re-dignose I.E	Reflux Cooling	Coolant Make-Up	Recover 2nd SCS	Recover SCS Using CSS	Feed & Bleed	SEQ #	PDS	
OV	OP	OP1	REFX	MU	REC	RE-CSS	F&B			
									1	OK
									2	OK
									3	OK
									4	OK
									5	CD
									6	OK
									7	CD
									8	OK
									9	OK
									10	OK
									11	CD
									12	OK
									13	CD
									14	OK
									15	OK
									16	CD

그림.2 개선안 발전소 배열 과배수사건 사건수목