

'98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

울진3,4 호기 정전사고시

이차측 강제감압 사고관리전략의 효과 분석

송용만, 박수용, 김동하, 최 영, 김시달

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

울진 원전 3,4 호기를 대상으로 MAAP4.0.2 코드를 이용하여 발전소 정전사고를 모의/분석했다. 본 분석에서는 사고진행에 따른 일차측의 상태변화를 원자로용기 파손때까지 상세 파악하였다. 사고관리 관점에서, 발전소 정전사고는 이차측의 대기방출밸브를 통한 강제감압에 의해 사고진행을 완화할 수 있으며 이러한 운전원 조치에 의한 완화효과를 검토하였다. 그 결과 감압시작 2시간후에 일차측은 약 24 °C 의 과냉각도를 보이며 안정되었고, 사고시작 1시간 후부터 3시간 동안의 강제감압이 성공한 경우, 노심노출시간 기준으로 약 2시간의 지연효과가 있었다.

1. 서론

발전소 정전사고 (즉, 교류전원 완전상실사고)는 대표적인 고압사고 경위로서 사고진행의 심각성으로 인해 많은 주목을 받아왔다. 울진발전소의 경우, 대체교류 디젤발전기로 인해 노심손상에 이르는 기인사고로서의 빈도가 상당히 감소했으나 아직 전체 빈도의 약 6%를 차지하고 있다. 본 사고에서 교류전원 회복 및 운전원 조치가 실패할 때 유일한 열제거 수단은 터빈구동펌프에 의한 보조급수와 주증기 안전밸브를 이용한 이차측으로의 열제거이다. 그러나 울진발전소의 경우 터빈구동펌프의 터빈 제어기는 사고시작 4시간 후에는 발전소 배터리의 고갈로 인해 동작을 보장할 수 없다. 따라서 사고시작 4시간 이후에는 노심용융 및 원자로용기 파손으로의 진행을 막을 방법이 없다. 한편 발전소 비상운영절차서[1]에 의하면, 본 사고시 “최소한 하나의 증기발생기에 보조급수 공급과 대기방출밸브를 이용한 증기 배출로 원자로정지냉각 (SDC) 시작 조건으로의 유도”를

피하도록 되어 있다. 이에 따라 운전원이 사고인지후 대기방출밸브를 열면 4시간후 보조급수의 공급이 끊어져 이차측으로의 열제거가 지속되지 못하더라도 사고진행시간을 상당히 늦출 수 있다. 본 논문에서는 운전원이 사고시작 1시간후 대기방출밸브 1개를 열림조치한 경우를 그렇지 않은 경우와 사고진행시간 및 발전소 주요 운전변수에 대해 비교하여 중대사고 측면에서의 사고완화 효과를 검토하였다.

본 분석은 MAAP4.0.2 PC version 을 사용하여 최적평가방법을 통해 이루어졌다.

2. 사고경위

본 논문에서 언급되는 발전소 정전사고는 소외전원상실에 기인하고 비상 및 대체 디젤발전기의 동시실패로 인한 교류전원 완전상실 사고이다. 따라서, 본사고가 발생하면 교류전원에 의존하는 모든 기기/계통은 동작을 못하고, 피동형 (예 : 가압기 안전밸브, 주증기 안전밸브, 및 안전주입탱크 (SIT)) 및 발전소 배터리에 의존하는 계통 (예 : 터빈구동에 의한 보조급수 계통) 만이 이용가능하다.

- 본 분석에 이용된 주요 가정은 다음과 같다.
 - 교류전원의 회복은 없고, 발전소 배터리의 용량은 4시간이다.
 - 일차냉각펌프의 밀봉부위 실패에 의한 냉각수 누출사고는 없다.
- 본 분석에 이용된 주요 입력은 표 1 와 같다.

주요 변수	입력 값	주요 변수	입력 값
원자로 출력	2815 MW(th)	붕괴열	ANSI/ANS5.1-1979 - 300 days x 3 year - 29252 MWD/Mt
일차계통	- 운전압력 - 15.51 MPa - 냉각수 온도 - 584.6 K - 체적 (가압기 제외) - 277 m ³	이차계통	- 운전압력 - 7.38 MPa - 냉각수 온도 - 584.6 K - 설정수위 - 44% narrow range
가압기 안전밸브	- 열림압력 - 17.2 MPa - 닫힘압력 - 14.1 MPa - 초기 유량 - 57.96 kg/s x 3 unit	주증기 안전밸브	- 열림압력 - 8.72 MPa - 닫힘압력 - 8.72 MPa - 초기 유량 - 122.6 kg/s x 2 unit
안전주입탱크	- 설계압력 - 4.31 MPa - 냉각수량 - 51.8 Ton x 4 unit	대기방출밸브	- 작동 방식 - 수동 밸브 - 초기 유량 - 94.5 kg/s

표 1 사고해석에 사용된 주요 변수 값

발전소 교류전원이 완전히 상실되면, 원자로정지 제어봉 삽입에 의해 원자로 트립이 발생하고 이차측에서는 터빈 트립, 주급수 공급 중단, 및 주증기 차단밸브의 닫힘이 발생한다. 트립이 발생하면

약 45초후 터빈구동펌프에 의해 양쪽의 증기발생기에 보조급수가 공급되며, 구동시작 4시간 후에는 발전소 배터리의 고갈로 인해 보조급수의 공급이 중단된다. 한편 운전원 조치가 전혀 없는 경우를 <경우 1>, 사고시작 1시간후 운전원이 사고를 인지하여 대기방출밸브를 1개만 연 경우를 <경우 2>로 정의하였다. 발전소 배터리가 고갈되면 대기방출밸브는 단힘실패 상태가 된다.

3. 사고진행 분석

- <경우 1>

사고발생후 원자로가 정지하고 주급수 펌프가 가동을 중단하면 터빈구동 보조급수가 양쪽 증기발생기에 공급되어 설정된 수위를 유지한다. 보조급수 유량은 증기발생기의 수위제어 프로그램에 의해 최대 550 gpm 이내에서 공급되며, 보조급수 펌프의 배출압력은 충분히 큰 것으로 가정하여 설정수위를 맞추는 데 걸리는 시간지연 효과는 무시되었다. 이후 4시간 동안, 일차측 압력은 붕괴열과 이차측으로의 열제거와의 차이로 인해 전출력시의 압력으로부터 서서히 감소하고 (그림 1 참조), 이차측 압력은 주증기 안전밸브의 개폐운전에 의해 증기발생기의 냉각수가 고갈될 때까지 설정압력으로 유지된다 (그림 2 참조). 계산결과에 의하면, 가장 낮은 설정압력을 가진 주증기 안전밸브 (증기발생기당 2개)는 초기 수 초동안의 급격한 천이기간을 제외하면 이후에 생성되는 증기를 배출시키는 데 충분하였다.

사고시작 네시간후, 발전소 배터리의 고갈로 터빈구동 보조급수 펌프가 가동을 중단하여 보조급수의 공급이 중단된다. 이후 증기발생기 이차측의 수위가 낮아져 증기발생기 세관이 노출되면 이차측으로의 열전달은 저하되고 (그림 3 참조), 사고시작 약 다섯시간후 일차측 압력은 급격히 상승하기 시작한다.

증기발생기 고갈시점 즈음에, 일차측 압력은 가압기 안전밸브의 열림압력에 도달하여 개폐운전을 하게 되며 일차측 냉각수는 유출된다. 이 과정이 반복되면 결국 노심이 노출되고, 노출된 부위가 붕괴열 및 지르칼로이 산화열로 가열되어 노심용융이 발생한다 (그림 4 참조). 노심용융이 계속되어 하부로 이동하면 하부의 노심지지판이 손상되고 이후 원자로용기의 실패에 도달하게 된다.

주요한 사건진행 시간은 표 2 와 같다.

- <경우 2>

사고발생후 한시간 동안, 일차측 압력 (그림 1 참조) 및 이차측 압력 (그림 2 참조)은 경우 1 과 동일하다. 사고시작 한시간후, 운전원에 의해 한쪽의 loop (이후 “BL” 로, 반대쪽 loop는 “UL”로 정의)에 있는 대기방출밸브 1개가 열린다. BL 이차측 압력/온도는 급격히 떨어지고, 일차측의 온도/압력은 향상된 BL 이차측으로의 열전달에 의해 역시 급격히 떨어진다. 이 과정에서 일차측 압력은 안전주입탱크의 설계압력 이하로 떨어지고 그 결과 약 20톤의 냉각수가 저온관을 통해 주입되었다. 계산결과에 의하면, 사고시작후 1~3 시간동안 일차측으로부터 BL 이차측으로의

열전달은 활발히 이루어진 반면 UL 이차측으로의 열전달은 음의 값을 나타내는 특성을 보였고 (그림 3 참조), 사고시작후 3~4 시간에는 일차측의 온도가 거의 변화가 없었다. (즉, 사고시작후 1~4 시간에는 UL 이차측에는 보조급수가 들어가지 않는다)

사고시작 네시간후, 보조급수의 공급이 중단되고 열렸던 대기방출밸브는 닫힌다. BL 이차측 압력은 주증기 안전밸브의 설정압력까지 급격히 증가하여 이후 UL 이차측과 마찬가지로 (단, UL 이차측은 사고초기부터 개폐운전을 하고 있었음) 개폐운전을 증기발생기 고갈시점까지 지속한다. 일차측의 온도 및 압력 역시 이차측의 주증기 안전밸브 개폐운전 시작시점까지 급격히 상승하여 약 12 MPa 근처에서 안정되었다가, 이차측의 수위가 낮아져 증기발생기 세관이 노출되면 다시 증가한다.

일차측 압력이 가압기 안전밸브가 열림압력에 도달한 이후의 사고진행은 노심용융 (그림 4 참조)등 주요사건의 발생시점만 다를 뿐 경우 1 과 동일하다. 주요한 사건진행 시간은 표 2 와 같다.

주요 사건	경우 1 [초]	경우 2 [초]
발전소 정전사고 발생	0	0
원자로 정지	0	0
일차측 냉각수 펌프 정지/충전펌프 중지	0	0
이차측 주급수 펌프 중지/터빈 정지/주증기 차단밸브 닫힘	0	0
터빈구동펌프에 의해 양쪽의 증기발생기에 보조급수 공급	0	0
BL 이차측 대기방출밸브 1개 수동 개방	N/C	3600
BL 이차측 대기방출밸브 닫힘실패	N/C	14400
터빈구동펌프에 의한 보조급수 공급중단	14400	14400
UL 증기발생기 고갈	19959	27202
BL 증기발생기 고갈	19959	27208
가압기 안전밸브 최초 개방	20529	27064
원자로 배수탱크 파단판 (Rupture Disk) 파손	20724	27066
노심 노출 시작	23363	30996
노심(노드) 최대온도가 2500 K 이상에 도달	27478	35254
노심 하부 지지판 (Support Plate) 파손	28107	36862
원자로 용기 파손	32854	43283

표 2 교류전원 완전상실 사고시 주요사건 진행시간

4. 결론

본 연구는 교류전원 완전상실사고 발생시, 운전원이 증기발생기 이차측을 의도적으로 강제감압 (forced depressurization)하는 사고관리 전략의 효과를 분석하였다. 강제감압의 수단은 울진 3/4 발전소의 대기방출밸브를 이용하였으며, 분석의 현실성을 높이기 위해 사고발생 1시간이 지난 뒤 운전원이 조치를 취한 것으로 가정하였다. 강제감압이 성공한 경우, 일차측으로부터 이차측으로의

열전달이 향상되어 감압시작 2시간후에 일차측의 압력은 약 3.2 MPa, 온도는 약 24 °C 의 과냉각도를 보이며 안정되었다. 그러나 교류전원이 회복되지 못하고 발전소 배터리가 고갈되면 이차측의 강제감압 수단이 실패해 사고진행 완화의 효과는 있었으나 중대사고로의 진행은 피할 수 없었다. 그 예로, 울진발전소의 배터리 용량을 4시간으로 보장하여 3시간의 강제감압을 시도한 결과, 노심노출시간 기준으로 약 2시간의 지연효과가 있었다.

5. 참고문헌

- [1] 한국전력공사, "울진 제2발전소 운영절차서 (우선/비상)"

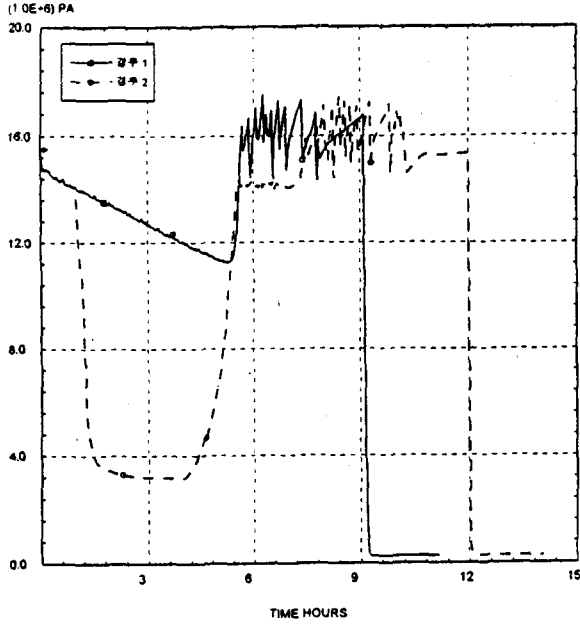


그림 1 일차계통 압력 비교

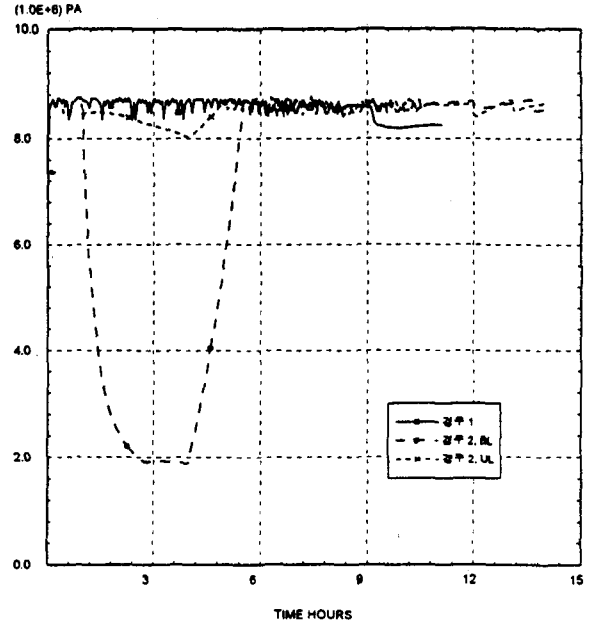


그림 2 이차계통 압력 비교

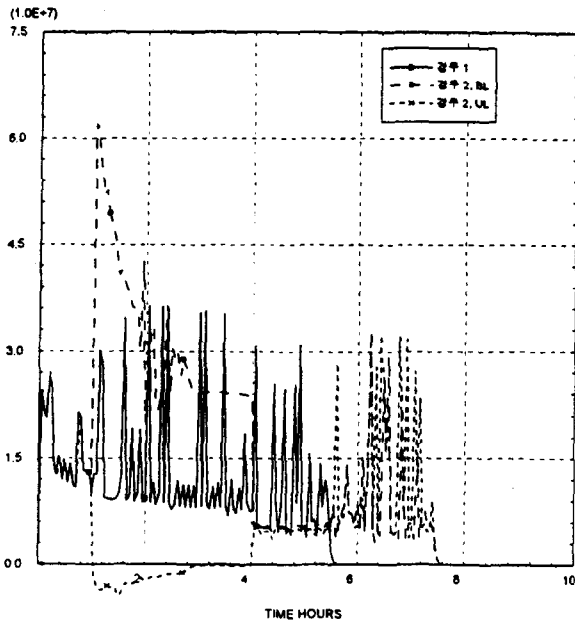


그림 3 증기발생기 이차측으로의 열전달 비교

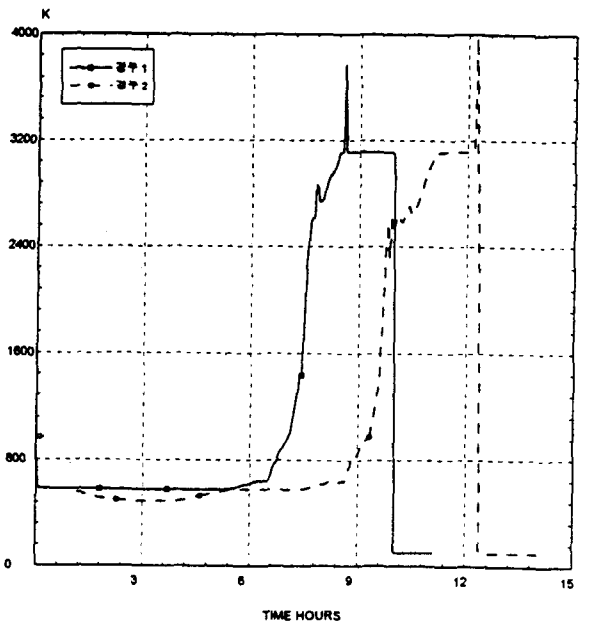


그림 4 노심 최대온도 비교