'95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리3,4/영광1,2호기의 충전 및 방출운전 시작의 최적화

이덕헌 , 한등헌
한국전력공사
김석철
한국원자력안전기술원

요 약

1979. 3.28 미국 TMI-2 의 사고를 계기로 개발된 증상기준 비상운전절차서는 고리 3,4/영광 1,2호기의 경우 '92. 2에 개정된 ERG-1B 를 근거로 하여 각 발전소 운전담당자들에 의하여 확인 및 검증 (Verification & Validation) 작업을 통하여 금년부터 본격적으로 적용되기에 이르렀다. 그러나 비상운전절차서의 특성상 각 발전소별 특정 설정치의 계산에서 어려움을 겪었으며 아직도 재 확인 작업을 통한 최적화 여지가 상당부분 잔존하고 있다. 여기에서는 고압발전소인 고리-3,4/영광-1,2호기 비상운전절차서에 있어서 증기발생기에 공급되는 정상 및 비상급수의 전체 상실사고시 노심 노출방지 및 노심 열 제거를 위해 적용되는 기능회복절차서의 "2차 열제거원 상실시 조치" 중 방출 및 충전 운전의 성공적 시작점을 계산, 개정된 비상운전절차서와 비교하여 특정 발전소의 방출 및 충전 운전 설정치를 제시하였고, 이러한 결과로부터 현재 보수적으로 설정된 값의 완화를 유도하여 방출 및 충전 운전 시작전, 운전원으로 하여금 급수확보를 시도할 수 있는 시간여유의 연장을 도출할 수 있었다.

1. 서 론

현재 사용되고 있는 증상기준 비상운전절차서 (Symptom-Based Emergency Operation Procedure:이하 EOP)는 특성상 크게 나누어 사고 자체를 다루는 Event-Related EOP (ORP) 부분과 방사성물질 방출방벽의 건전성을 유지키 위한 Function-Related EOP (FRP) 부분으로 나뉘며 원전의 관리목표상 특정 경우를 제외하고는 일반적으로 FRP가 ORP 보다 우선적으로 수행되도록 구성되어 있다.[1] 여기서 다루고자 하는 증기발생기 공급 급수 완전상실 (Loss Of total Feed Water;이하 LOFW)사고는 노심의 열 제거를 위협할 수 있는 사고유형의 일종으로 Single Failure 를 가정하는 최종안전성분석보고서[2]에서는 언급되지 않고 EOP의 FRP 중 그 우선 순위가 노심 미임계, 노심 열 제거 위협에 이어 3번째로 선정된 기능상실 사고로써 사고 발생시 노심 손상 확률은 고리-3,4/영광1,2호기의 경우 약 6.5×10^{-6}/Ry 로써 전체 노심손상확률의 4%[3]를 점유하고 있다. LOFW 사고 발생시 운전원의 적절한 조치가 수행되지 않는다면 사고진행에 따라 노심 노출과 아울러 노심 손상으로 귀결되어 질 수 있는데 사고발생시 운전원이 취할

수 있는 조치는 크게 나누어 급수확보시도에 이어 방출 및 충전 운전 (Bleed and Feed Operation : 이하 B&F 운전)의 수행이다. 여기에서는 B&F 운전의 개념, 과도상태에 따른 발전소의 각 변수별 추이 및 각 발전소의 설계 특성에 따른 B&F 운전의 최적 시작 운전점 설정과 그 효과를 살펴보고자 한다.

2. B&F 운전 개념

2.1 LOFW 시 발전소 과도상태

LOFW 가 발생할 수 있는 조건으로는 발전소가 전출력으로 운전중 주급수가 상실되고 이어서 보조급수가 상실되는 일련의 상태를 들 수 있으며 증기발생기 (이하 SG)의 급수고갈에 의한 열제거 기능상실로써 노심잔열에 의해 원자로냉각재계통 (이하 RCS)의 온도 및 압력이 증가되어 운전원의 적절한 조치가 수행되지 않는다면, 가압기의 PORV 혹은 PSV 가 설정치 부근에서 Cycling Open 을 하여 RCS 재고량 감소를 유도하고 이에 따라 노심노출과 노심 손상이 야기될 것이다.

상기 조건이라면 안전주입 (이하 SI) 은 발생되지 않을 것이며 이 상황에서의 RCS 압력 추이는 Fig-1[4] 과 같은 형태를 띨 것이다.

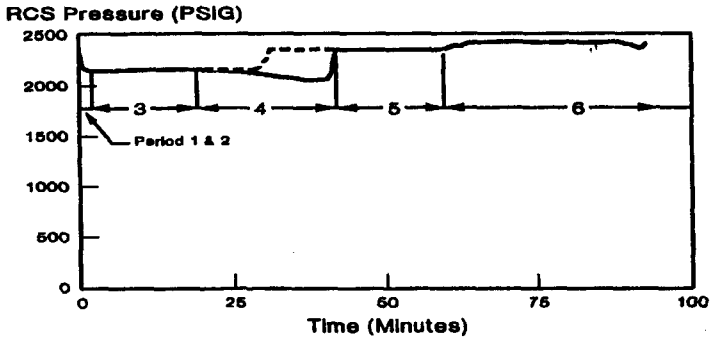

Figure 1. RCS PRESSURE FOR LOSS OF HEAT SINK DUE TO LOSS OF ALL FEEDWATER

여기에서 RCS 압력별 특성 구간을 1 - 6 구간까지 나눌 수 있는데

i) 구간-1,2 : 발전소 Trip 및 Trip 직후

ii) 구간-3 : SG Tube가 노출되지 않은 상태에서 SG 2차측 열제거원 Mass 서서히 감소

iii) 구간-4 : SG Tube가 노출되면서 RCS는 가열, 압력증가 SG Dryout 직전에 가압기 PORV 열림

iv) 구간-5 : SG Dryout 후 RCS 는 과냉각도를 상실하면서 팽창

v) 구간-6 : RCS 포화도달 후 System Boil-off 시작 및 지속, 노심노출과 같은 순서로 진행될 것이다.

전 기간동안 SI 자동작동은 이루어지지 않으며, 구간 5 이후에서는 SI 를 수동

동작시키더라도 노심 노출이 불가피하므로 (가압기 PORV 를 통한 질량 유출률 / SI 주입률 = 50~100 / 40 lbm/sec 정도 임.) 운전원은 구간 5 이전에 반드시 조치를 취해야 한다.

2.2 B & F 운전

Fig-1 에서 알 수 있듯이 운전원에게 주어지는 조치시간 여유는 구간-1 에서 부터 구간-5 시작 직전까지인데 운전원이 선택할 수 있는 방법을 우선 순위별로 본다면 다음과 같다.

1. 급수공급 시도 : 보조급수 / 주급수 / 기동용급수 / 복수공급
2. B&F 실시 및 급수 회복 계속 시도

B&F 운전은 모든 고압 SI PP를 기동하고 가능한 한 많은 가압기 PORV 를 열림 상태로 운전하는 방법으로써, 이를 조기에 실시한다면 RCS의 감압률이 커서 SI 주입량이 증대되므로 노심냉각에는 도움이 될 것이나, B&F 운전은 소형냉각재 상실사고를 유발하여 격납용기내 대기조건을 악화시킴으로 인해 계기오차를 크게 하여 EOP 진행상 어려움을 겪게 하며, 사고후 조치 비용을 증가시켜 발전소의 불필요한 경제손실을 야기하므로 운전원은 급수확보를 우선적으로 시도후, 안되면 B&F 운전을 실시해야 한다.

2.2.1 B&F 운전 유효성 고려사항

B&F 운전의 목적인 노심냉각을 달성키 위해서는 첫째로, B&F 초기 RCS 감압 극대화, 둘째로 그후 RCS 재가압 극소화 및 유지, 셋째로 SI 주입유량 극대화를 들 수 있고 이에 따른 발전소 적용성에는 다음의 4가지 고려사항이 있게 된다.

① LOFW 징후지시시 B&F 운전 시작시간의 적절성
② B&F 개시시 노심잔열제거 수준
③ PZR PORV 용량 (개수 및 크기)
④ HHSI 계통 주입 용량

여기에서 운전원 조치에 직접적 영향을 미칠 수 있는 항목은 ①,③,④ 항목이나 전 항목이 서로 연관되어 B&F 운전 개시시점에 영향을 주므로 그 연관성에 대해서는 3.0에서 기술키로 한다.

2.2.2 B & F 운전에 의한 노심열제거 해석

B&F 운전에 의해 가압기 PORV가 계속 열려있으면 RCS 내 고온부위 포화온도에 도달할 때까지 압력이 감소되기 때문에 RCS 압력은 고온부 온도에 의존한다. 포화압 도달 후 RCS 압력은 다음과 같으며 대체적인 추세는 Fig-2[5]와 같다.

$$P_{RCS} = f\ (H_{core} + V_{RCS} + SI_{flow} - F_{PORV} - H_{SG}) \quad \cdots\cdots (1)$$

H_{core} : 노심잔열량
V_{RCS} : RCS 체적팽창

SI_{flow} : SI 주입유량
F_{PORV} : 가압기 PORV 배출량
H_{SG} : SG 내 급수 잔존량에 의한 열제거

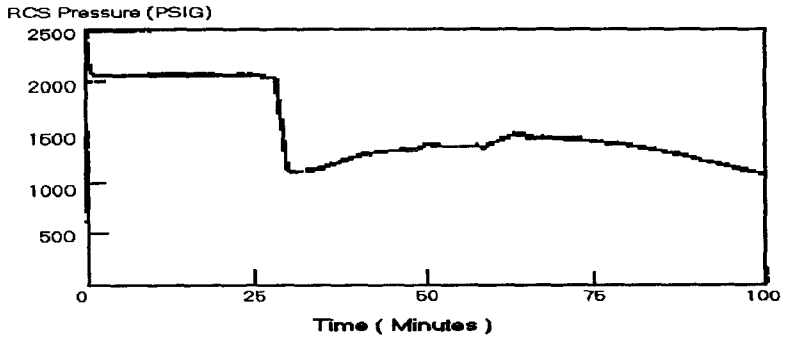

Figure-2. Bleed and Feed at 1700 sec for PORV Ratio of 157 (lbm/hr)/MWt

여기서 1차 감압후 RCS 재 가압은 SI 주입유량의 최대화를 위해 극소화해야 하며 이를 위해 가압기 PORV 를 모두 열어야 한다.

B&F 운전초기에 RCS 재고량은 노심내 수위가 원자로 고온관 상부부분에 도달하여 원자로 상부부분의 증기가 가압기 PORV 를 통해 배출될 때까지 감소하다가 증가케 된다.

B&F 의 시작시점은 Fig-1 의 구간-5 진입전, 즉 SG Dryout 전에 실시되어야 하며 그 시간은 (1)式의 SG 내 잔존 급수량에 의존케 된다. 구간-6, 즉 RCS 포화 도달 후 까지 운전조치가 지연된다면 B&F 가 시작된다 하더라도 노심 노출은 피할 수 없으며, 이를 막기 위한 유일한 방법으로는 SG 급수공급의 복구밖에 없다.

3. B & F 운전시작 시간결정

3.1 B&F 운전시작 시간결정 요소

2.2에서 언급한대로 B&F 운전은 적기에 시작되어야 하며 노심 노출 방지를 위한 결정변수에는 다음의 2가지가 있다.

① PZR PORV Opening Time

② PZR PORV 용량

여기서 B&F 시기결정에 영향을 주는 것은 PZR PORV 용량 및 노심열 발생량이므로

$$K = \frac{\text{Rated PZR PORV 용량}}{\text{Licensed Core Power}} \text{ (lbm/hr/MWt)} \quad \cdots\cdots (2)$$

이라 정의될수 있는데 여기에서 Rated PZR PORV 용량은 Rated Saturated Steam Flow이다.[6] 이에 따른 민감도분석[7] 결과는 Fig-3과 같다.이 분석결과 노심노출

방지에 영향을 미치는 것으로써는 SG Dryout 시간과 K 값으로써 HP 발전소의

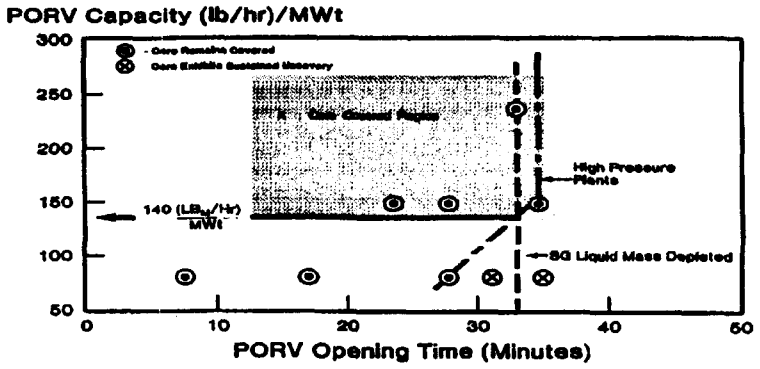

Figure-3. Sensitivity of Plants with various PORV Capacities to PORV Opening Time

경우 K > 140 에서는 SG Dryout 직전,후에 B&F가 반드시 개시되어야 하며, K < 140 의 경우는 SG Dryout 전에 B&F 가 시작되어야 함을 알 수 있다.

LOFW의 징후가 SG 광역 수위지시계에 직접적으로 나타나고 SG Dryout 시 RCS 압력의 증가가 나타나기 때문에 SG 광역 수위지시계 지시 및 RCS 압력변화 추이가 운전원이 사용할 수 있는 두 가지 변수가 될 수 있는데 여기에서 SG 광역 수위지시계의 신뢰도 여부 (개수/SG, Qualified) 또한 고려되어야 한다.

3.2 고리 3,4 / 영광 1,2호기 B&F 시작점 결정 요소

고리 3,4/영광 1,2호기의 경우 K 값을 구해보면 가압기 1개 PORV의 정격유출용량이 210,000 lbm/hr[8]이고 노심 출력이 2775 MWt 이며 EOP 상 B&F 운전의 성공경로가 "가압기 PORV 2개 이상 열림"[9] 이므로

$$K = \frac{210,000 \times 2}{2775} = 151 \text{ (lbm/hr)/MWt}$$

즉 K > 140이 된다. 이는 민감도 분석곡선 Fig.-3 에서 빗금친 A 영역에 속하게 되어 고리 3,4/영광 1,2호기의 경우 SG Dryout 전에만 B&F 를 시작한다면 노심노출을 피할 수 있다.

고리 3,4/영광 12호기의 경우 각 SG 당 1개씩, Non-Qualified 광역 수위지시계가 설치되어 있으므로 정상운전시에는 (N-1) Logic 이 적용되며 격납용기 비정상시에는 이를 사용할 수 없고 RCS 의 압력증가 및 고온관 온도증가 현상 측정으로 대체되어야 한다.

3.3 고리 3,4 / 영광 1,2호기 EOP 상 B & F 문제점

ERG-1B 에 의해 최근 개정된 고리 3,4/영광 1,2호기 EOP에는 B&F 운전 시작점을

다음과 같이 기술하고 있다.[9]

> 2차측 열제거원 상실로 인해 SG 광역수위가 60% 이하일 때 (격납용기 비정상상태시:RCS 온도와 압력이 증가됨) 또는 RCS 압력이 165 kg/㎠ 와 같거나 그 이상일 때 RCP 는 정지되어야 하고 단계 10.0 에서 16.0 에 따라 방출과 충전을 즉시 수행해야 한다.
>
> ***FR-H.1 Step 2.0 주의사항***

그러나 이 내용은 다음과 같은 문제점을 지니고 있다.

1. 설정치 관련 - SG 광역 수위 60% 이하

◆ SG 광역수위 지시계는 Cold Calibration 지시계로써 발전소 전출력 운전시 60~62% 를 지시하며, 발전소 Trip 시 Shrink 에 의해 42~46% 까지 격감케 된다. 따라서 이 설정치대로 수행된다면 운전원은 LOFW 사고 발생시 비상절차서 진입직후 급수회복 시도할수 있는 기회를 갖지 못하고 B&F 를 시작케 되어 소형냉각재 상실사고를 유발, 운전원으로 하여금 다양한 방법을 택하지 못하고 오직 B&F 운전만을 수행케 된다. 이는 발전소 사고후 복구에 상당한 영향을 줄 수 있다.

2. 설비 관련 - SG 광역 수위지시계

◆ 고리 3,4/영광 1,2호기의 SG 광역 수위지시계는 SG 당 1개씩, Non-Qualified 로 설치되어 있다. 따라서 현행 기준상 각 SG 의 광역 수위지시계간 편차가 클 때에는 운전원으로 하여금 B&F의 시작 시점 판단에 혼란을 겪을 수 있다. 또한 이 지시계가 Non-Qualified 상태이기 때문에 지시계의 고장상태를 예상한 (N-1) Logic 또한 고려 되어 있지 않아 어려움을 겪을 수 있다.

이상과 관련된 내용으로써 해당 발전소의 PGP 생산 시에 언급된 보고서[10] 를 들 수 있겠으나 동 내용들은 사정상 언급되지 못하였다.

3.4 고리 3,4 / 영광 1,2호기 B&F 시작 설정치 계산

Fig.-3 에서의 A 지역 우측하한이 SG Dryout 시점이므로 K 값이 140 이상인 고리 3,4/영광 1,2호기의 경우 SG 광역수위는 다음의 값을 가져야 한다.

$$W.R\ 수위)_{MIN} = [(WR\ 이내\ 최소\ 계측가능수위) + (Normal\ Channel\ Accuracy) + (Cold\ Calibration\ Errors)] \quad \cdots\cdots (3)$$

(3) 式에서 우측 항을 계산하면

① WR 이내 최소 계측가능수위 : 2% (작성시 일반적 판단)[10]

② Normal Channel Accuracy : 2.25% [11,12]

③ Cold Calibration Errors

여기서 ③의 Cold calibration Error값은 계산 결과 2.79%가 된다. 그러므로 B&F 시작을 위한 SG 광역 수위지시계 설정치는 SG Dryout 시간을 기준으로 (3)式에서 7.04% 가되며 이를 보수적으로 하면 8%가 될 것이다. 또한 SG 광역 수위지시계가 1개씩 설치되어 있으므로, 어느 한 SG 의 수위가 위에서 결정한 수위 이하에 도달하면 B&F 를 시작하여야 되며, 격납용기 비정상 조건에서는 이를 사용할 수 없다. 따라서 고리 3,4/영광 1,2호기의 EOP 중 B&F 운전시작점은 다음과 같이 개정되어야 할 것이다.

> ***개정 내용***
>
> 2차측 열제거원 상실로 인해 **어느 한 SG 광역수위가 8% 이하** (격납용기 비정상상태시 : RCS 압력 및 고온관 온도가 상승) 또는 RCS **압력이** 165 kg/㎠ **이상시** 모든 RCP 를 정지하고 단계 10.0에서 16.0에 따라 방출과 충전을 즉시 수행해야 한다.

여기에서 (N-1) Logic 을 적용하지 않았는데, 이는 3 SG 중 한 SG의 광역 수위지시계 고장을 나타낸 것이므로 운전원은 B&F 운전시작시 고장난 SG 광역 수위지시계를 읽지 않으면 이를 피할 수 있으며 (N-1) Logic 적용시 이를 나타내기 위한 문구작성에서 운전원의 혼돈을 유발할 수 있을 것으로 판단되어 수용치 않았다.

4. 결 론

이상과 같은 검토 및 계산 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. HP 발전소이며 K 값이 151 인 고리 3,4/영광 1,2호기의 경우, LOFW 발생 후 급수공급 복구시도를 하면서 SG Dryout 직전에 B & F 운전이 시작되어야 노심노출을 피할 수 있으며, SG Dryout 의 징후는 어느 한 SG 광역수위 8% 미만 혹은 RCS 압력이 가압기 PORV 설정치 이상임을 알 수 있었고 이에따라 B&F 운전 시작시점의 정량화를 유도, 고리-3,4/영광-1,2호기 EOP의 개정내용을 제시할수 있었다.

이러한 결과가 해당 발전소의 EOP 에 적용될 경우, 운전원은 LOFW 발생후 약 30분의 보조급수, 주급수, 복수공급등을 시도할 수 있는 시간적 여유의 확보 및 SG로의 급수공급 성공시 불필요한 SI동작과 이에 따른 SI부속기기의 동작을 피할 수 있고 LOFW발생후 야기될 수 있는 격납용기 오염과 이의 파생 결과를 줄일 수 있으며 B&F 운전을 적기에 실시할 수 있을 것이다.

참고자료

1. "Emergency Response Guidelines Executive Volume" Rev.1 BOG 1983. 9
2. "KNU-5&6 FSAR Chap.15" 한국전력공사 1983. 8
3. 홍승열외 "고리 3,4/영광 1,2호기 확률론적 안전성평가 (1단계)" 한국전력공사 기술연구원 1992. 8
4. "PWR Accident Analysis and Mitigating core Damage" Westinghouse. 1991
5. "Emergency Response Guidelines HP Version Background, Response to Loss of Secondary Heat Sink" Rev.1A WOG 1987. 7
6. "ERG Maintenance DW-92-046" WOG, 1993
7. S.I Derer "PORV Sensitivity Study for LOFW-LOCA Analysis" WH. WCAP-9914, 1981. 7
8. "KNU-5&6 FSAR. Chap.5" 한국전력공사 1983. 8
9. "고리 3,4호기 비상운전절차서, FR-H.1" 한국전력공사 1994.12
10. 채성기외 "원전 정지기준 개선 및 운전 신뢰성제고 최종보고서, EOP 기술 배경" KAERI & 한국전력공사, 1990. 2
11. "KNU-5,6 FSAR Chap.7" 한국전력공사 1983. 8
12. "계측제어 설비에 대한 정밀도 규정 및 지침" 한국전력공사 1991. 7