

가압경수로 증기발생기 2차측 열제거원 상실시 비상운전지침에 관한 연구

A Study on Emergency Response Guideline During the Loss of Steam Generator Secondary Heat Sink in Pressurizer Water Reactor

윤덕주\*, 이재용, 송동수

한전 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

여러 가지 독립적인 초기사건 결과로 2차측 열제거원이 상실될 수 있으며 그러한 가능성으로는 출력운전중 주급수 상실사고, 소외전원 상실사고, 또는 증기발생기가 1차측 열의 주 제거원인 상황에서 주급수계통 격리 및 상실 시나리오 등이 있다. 2차측으로의 열전달 능력이 저하됨에 따라 2차측 열제거원이 상실되고, 이 시점에서 가압기 PORV 또는 안전밸브가 개방 및 폐쇄되며 여기서 만약 운전원 조치가 취해지지 않으면 가압기 PORV 또는 안전밸브는 압력설정치 근처에서 개방 및 폐쇄를 반복하여 제한된 양의 붕괴열제거로 최종적으로는 원자로냉각재가 충분히 방출되어 노심이 노출된다. 증기발생기 고갈 상태에서 노심을 심각하게 노출시키지 않고, 고압발전소의 경우 방출-주입운전을 성공적으로 시행하기 위해서는 출력 대비 PORV 유량 비율이 140(lbm/hr)/Mwt이상이어야 한다. 만약 140(lbm/hr)/Mwt이하인 발전소라면 증기발생기 고갈된 후 방출-주입운전을 개시하면 노심 노출이 발생하므로 이를 방지하기 위해서는 RCS 압력 및 온도 증가 혹은 2,335psig 이상의 압력으로 증가하기 이전에 미리 방출-주입운전을 시작해야한다. 그러나 고리 1,2,3,4호기 등 국내원전은 이러한 기준치 이상이므로 방출-주입운전의 개시점은 2차측 열제거원 상실시로 비상운전절차서(EOP)에 적용 가능하다.

Abstract

A loss of secondary heat sink can occur as a result of several different initiating events, which are a loss of main feedwater during power operation, a loss of off-site power, or any other scenario for which main feedwater is isolated or lost. At this point the opening and closing of the PORV or safety valves will result in a loss of RCS inventory similar in nature to a small break loss of coolant accident. If operator action is not taken, the pressurizer PORV or safety valves will continue to cycle open and closed at the valve setpoint pressure removing RCS inventory and a limited amount of core decay heat until eventually enough inventory will be lost to result in core uncover. We conclude that a requirement to successfully initiate bleed and feed on steam generator dryout, without any significant core uncover expected to occur, is that the PORV flow to power ratio must exceed 140 (lbm/hr)/Mwt. For all plants whose PORV capacity is less than 140 (lbm/hr)/Mwt, since symptoms of SG dryout cannot be used to initiate bleed and feed, increasing RCS pressure and temperature or pressure greater than 2335 psig cannot be used. The only alternative symptom available is SG narrow range level. Since Kori 1,2,3&4' PORV capacity is more than the criteria, the bleed and feed operation can be initiated at steam generator dryout.

## 1. 서론

열제거원 상실시 나타나는 여러 가지 발전소 상태는 초기사건에 따라 결정된다. 만약 초기사건이 보조급수가 가용하지 않은 상황에서 출력운전중 주급수 상실사고에 해당되거나, 또는 보조급수가 가용하지 않은 상황에서 원자로정지 및 주급수계통이 격리되는 예상과도상태에 해당될 경우에는, 안전주입이 자동적으로 작동되지 않을 수 있다. 만약 초기사건이 보조급수가 가용하지 않은 상황에서 1차측 압력 저하(즉, 소형 냉각재상실사고, 2차측 배관 파단 사고, 혹은 증기발생기 세관 파열 사고)를 통해 원자로가 정지된다면, 안전주입이 자동적으로 이루어진다. 만약 RCS 방출-주입 운전으로 붕괴열을 제거(안전주입 작동 및 모든 PORV 수동 개방)할 필요가 있으면, 그때 안전주입이 작동되면 된다. RCP가 작동중일 경우에는 본 지침서 시행 초기에 RCP를 정지시켜야 하며, RCP 초기 정지 이유를 분석하였다. 2차측 열제거원을 상실시키는 초기사건중의 하나로는 보조급수가 가용하지 않은 상황에서 출력운전중 주급수계통 상실사고가 해당된다. 이것은 증기발생기 고갈(Dryout)에 따른 RCS의 거동을 평가하기 위해 수행되어야 하는 고유분석(Plant Specific Analysis)의 기본이 되고 있다. 또한 이 초기사건은 RCS 방출-주입 운전의 열제거 효율성 평가시에도 이용된다. RCS 방출-주입 운전에 의한 열제거 유형을 설명하기 위하여, 방출-주입 운전에 대한 운전원 조치가 배제된 완전 급수상실사고에 대한 과정을 평가하였다. 완전 급수상실사고 초기 사건과 관련된 사고와 징후는, 증기발생기가 1차측 붕괴열 제거의 주요 경로에 해당되는 여러 가지 다른 초기사건들과 유사하다. 그러나 초기 과도상태가 다르면 주요 사건의 발생 시점이 다를 수 있다. 따라서 방출-주입 운전시 RCS 거동이 진행되는 정도가 다를 수 있으나, 1차측 열제거는 지속적으로 가능하게 된다. 본 논문은 과도상태의 추이에 따른 시간 이력보다는 과도상태시의 징후와 일반적인 추세에 중점을 두고 연구하였다. RCS 방출-주입 운전 및 거동 분석을 위해 PORV 방출 유량을 여러 가지로 가정하고 PORV 개방시간에 대한 다양한 분석을 수행하였다.

## 2. 본론

### 가. 운전원 조치가 배제된 상태의 열제거원 상실사고

열제거원 상실시의 복구조치를 보다 효과적으로 설명하기 위하여, 운전원 조치가 배제된 상황을 먼저 기술하고자 한다. 운전원 조치가 배제된 완전 급수상실사고의 이해를 돕기 위하여 웨스팅하우스사가 개선했던 LOCA 해석코드인 WFLASH 코드 분석을 통해 얻어진 RCS 압력변화 추이를 6개의 기간(Period)으로 구분하여 기술된다. 각 기간별로 계통의 거동을 제어하는 주요 현상들이 열제거원의 복구나 열 제거 경로의 설정에 따라 기술된다.

1 단계(Period 1)로서 출력운전중 완전 급수상실사고는 모든 주급수계통의 상실에서 비롯된다. 증기가 터빈으로 계속적으로 공급되는 상황에서 급수가 이루어지지 않으므로 증기발생기 수위가 급격하게 감소하게 되며, 증기발생기 2차측 과냉각 급수의 냉각효과가 감소함에 따라 2차측 압력 및 온도가 증가하게 된다. 1,2차측 온도차가 감소하고 2차측에서 증기발생기 세관이 부분적으로 노출되는 상황이 발생함에 따라 1차측에서 2차측으로의 열전달률이 감소하게 되며, 결국 RCS의 압력과 온도가 상승하게 된다. 증기발생기의 열전달 능력이 감소되면 2차측의 열제거 능력이 저하되어 RCS 냉각재가 노심에서 발생하는 열을 상당부분 흡수하게 된다. 이로 인한 RCS 온도 증가량이 RCS 냉각재를 부풀리게(Swell) 되며, 증가된 부피가 가압기 밀림관을 통해 가압기로 이동하여 가압기 수위를 증가시킨다. 이 단계에는 1차측의 증가된 압력을 방출하기 위하여 가압기 PORV가 개방될 가능성이 있으며, 가압기 살수계통이 가용하지 않을 경우에는 그 가능성이 더욱 증가된다. 그러나 가압기 PORV의 개방은 원자로정지 시간과 과도상태 시작시 증기발생기 2차측에 존재하는 과냉각 급수의 재고량에 따라 좌우된다. 따라서, 이 단계에 PORV 개방 여부는 발전소 조건에 따라 다르기 때문에 일반적으로 예측될 수는 없다.

웨스팅하우스형 발전소의 분석결과에 따르면 과도상태 초기의 RCS 가압 및 가열 현상은 원자로 및 터빈이 정지됨으로써 종료되는데, 원자로 및 터빈의 정지는 급수 유량과 증기 유량의 불일치 및 증기발생기 저 수위 동시 신호, 혹은 발전소 설계특성에 따른 증기발생기 저-저 수위 신호와 함께 이루어진다. 과도상태 초기의 짧은 기간에 이렇게 RCS가 가압 및 가열되는 현상은 주급수 상실 후 약 16초 동안 노심이 전출력 운전을 하고 있기 때문이다. 원자로 정지 시간은 원자로 정지 신호원에 따라 달라지며, 따라서 증기발생기 저-저 수위를 원자로 정지 설정치로 채택하고 있는 발전소는 원자로 정지까지 약 45초가 소요된다.

2 단계(Period 2)시, 원자로 정지 후, RCS의 압력과 고온관 온도는 노심 출력이 감소하기 때문에 즉각적으로 떨어지게 된다. RCS 냉각재의 온도가 감소함에 따라 가압기 밀림관의 유량이 거꾸로 흐르게 되어 냉각재가 가압기로부터 빠져나가서 가압기 수위가 감소된다. 증기발생기 수위는 원자로 정지 이전만큼 빠르게 감소되지는 않더라도, 증기가 계속 발생되어 복수기 증기덤프 계통, 증기발생기 PORV, 혹은 증기발생기 안전밸브를 통해 방출되므로 계속 감소하게 된다. 이때 보조급수 계통을 통한 보충은 가용하지 않은 것으로 가정한다.

3 단계(Period 3)시, 원자로 정지 후 초기 RCS 감압은, 증기발생기를 통한 노심 붕괴열 제거라는 준 정상상태(Quasi-Steady State)를 형성시킨다. 복수기 증기덤프 계통, 증기발생기 PORV, 혹은 증기발생기 안전밸브를 통해 2차측 냉각수가 줄어들게 됨에 따라 증기발생기가 서서히 고갈(Dryout)되기 시작한다. 이 단계에 RCS의 압력과 온도는, 증기발생기 수위가 지속적으로 감소하고 세관의 열전달 면적이 더욱 노출됨에도 불구하고, 상대적으로 일정하게 유지된다. 비록 증기발생기 세관이 부분적으로 노출되더라도, RCS의 압력, 온도, 가압기 수위 등을 상대적으로 안정하게 유지할 수 있을 만큼 2차측 열제거 능력은 여전히 충분하다.

4 단계(Period 4)시, 대부분의 증기발생기 세관 다발이 노출되면 1차측에서 2차측으로 열전달률이 감소하기 때문에 RCS가 가열되기 시작하며, 증기발생기가 고갈(Dryout)에 접근함에 따라 가열 정도는 점점 심해지고, 가열된 열로 인해 냉각재가 팽창함으로써 가압기 수위와 RCS 압력이 증가한다. 이 시점에서 RCS 압력은 가압기 PORV 개방 압력 설정치까지 증가한다. 네번째 단계에서의 압력 증가가 1845초(31분)에 PORV가 개방되면서 종료되는 것을 보여주고 있다(1845초 개방시간은 가압기에 대해 비평형 모델을 사용하여 WH사가 개발한 과도해석용 전산코드인 LOFTRAN 코드로 계산되었음, WFLASH 코드는 가압기에 대해 평형모델을 사용하므로 가압기가 Water solid로 될 때까지 PORV가 개방되지 않음). PORV 개방은 증기발생기가 고갈 상태에 도달하기 5분전에 일어난다.

PORV의 실제 개방시간은 가압기의 조건에 따라 폭 넓게 변경될 수 있다. PORV 개방시간은 첫번째 단계에서의 PORV 개방 여부에 따라 달라진다. 또한, 첫번째 단계에서 PORV가 개방되는 경우, 첫번째 단계에서의 PORV 개방 지속시간이 네번째 단계(Period 4)에서의 PORV 개방 지속시간에 영향을 미친다. 가압기에서의 비응축성 기체의 농도가 또한 네번째 단계에서의 PORV 개방 시간에도 영향을 미친다. 그러나, 가압기 PORV는 네번째 단계에서 증기발생기가 고갈 상태에 도달하기 얼마 전에 개방된다.

5 단계(Period 5)시, 증기발생기가 고갈되면, 2차측은 RCS 열제거원으로서의 기능을 상실하게 되고 노심의 잔열은 RCS 냉각재 온도를 상승시키게 된다. 가압기 PORV는 압력설정치 근처에서 개폐를 반복하여 충분한 양의 냉각재를 방출시킴으로서 RCS 압력을 안정한 상태로 유지시킨다. 다섯번째 단계에서 가압기 PORV를 통해 방출되는 냉각재는 과냉각수이며 가압기 PORV의 최소 용량(Capacity)으로도 RCS 압력을 PORV 설정 압력으로 충분히 유지시킬 수 있다. 따라서, 다섯번째 단계에서 RCS 압력은 PORV 설정치 압력으로 일정하게 유지된다. 운전원의 조치가 취해지지 않으면, 노심 잔열로 인해 노심 냉각재가 PORV 설정 압력에 해당하는 포화온도(예: 2335 psig에 해당하는  $T_{SAT}$ 는 659°F)에 도달할 때까지 동 단계가 지속된다. 따라서, 운전원 조치가 없는 경우, 다섯번째 단계는 노심 잔열이 RCS 냉각재에 흡수되어 원자로 냉각재 재고량의 과냉각도가 감

소되는 단계에 해당한다. 특히, PORV 설정 압력으로 RCS 압력을 유지시키기 위하여 다량의 RCS 재고량이 PORV를 통해 상실된다.

6 단계(Period 6)시, RCS 냉각재 온도가 포화온도에 도달하게 되면, 비등 현상이 일어나게 되며, 증기가 발생되어 RCS 재고량의 체적이 크게 증가하게 된다. 이렇게 되면 가압기 PORV를 통한 체적 제거량이 RCS 체적 증가량을 상쇄하는 것이 불가능해질 수도 있다. 결과적으로 PORV가 체적증가를 제어할 수 있는 상태까지, 또는 가압기 안전밸브가 개방되어 RCS내 과도한 체적증가를 완화시킬 수 있는 상태까지 계통 압력은 증가한다. 일례로써 PORV는 2405 psig 근처에서 증기 생성을 상쇄시킬 수 있으며 따라서 안전밸브는 개방되지 않는다. 그러나, PORV는 노심내 증기생성물로 인하여 지속적으로 개방상태를 유지하며, 동 조건은 노심상부의 냉각수 재고량이 증발하고 부분적으로 노심 노출이 발생할 때까지 지속된다. 운전원 조치로 방출-주입 운전이 시작되거나 급수계통이 복구되지 않는 한, 심각한 노심 노출 및 노심 손상 가능성이 뒤따른다.

첫번째 단계부터 여섯번째 단계까지, 자동 안전주입 신호는 발생되지 않는다. 만약 안전주입이 수동으로 작동되면, RCS 압력이 가압기 PORV 압력설정치 또는 그 이상인 경우 제한된 안전주입 용량 때문에 노심 노출을 방지하는 데 비효과적이다. 가압기 PORV를 통한 질량 방출률은 50~100 lbm/sec이지만, 참조발전소의 충전/안전주입 펌프(Charging/SI Pump)계통은 두 계통 모두 작동할 경우 2,300psig RCS 압력에서 약 40 lbm/sec(290GPM)을 주입할 수 있다. 충전/안전주입 펌프로부터의 냉각재 보충량이 가압기 PORV를 통한 냉각재 방출량에 미치지 못하므로 RCS는 결국 고갈되어 노심 노출이 일어나게 된다. 요약하면, 운전원 조치가 없을 경우 출력운전중 완전 급수상실사고는 2차측의 열제거원 상실을 유발하게 되고 이것은 가압기 PORV를 통한 RCS 재고량의 상실로 이어진다. 노심 노출은 가압기 PORV 압력설정치 이상의 RCS 압력에서 발생되며, 충전/안전주입 계통이 늦게 수동으로 작동되는 경우 노심 노출을 방지할 수 있을 만큼 충분한 유량을 공급할 수 없다.

## 나. 운전조치에 의한 RCS 열제거

모든 2차측 열제거원이 상실되는 경우, 운전원 조치에 의해 RCS 방출-주입 운전을 개시함으로써 노심 노출을 방지 또는 최소화할 수 있다. 방출-주입 운전을 통하여 RCS 열을 제거하기 위해, 운전원은 고압 안전주입 계통을 수동 작동하여 RCS로 과냉각수가 주입되도록 한 후, 모든 가압기 PORV를 수동 개방하여 RCS로부터 고온의 원자로냉각재가 방출되도록 하여야 한다. 방출-주입 운전에 의한 RCS 열제거가 효과적이라고 확신하기 위해서는, 최소한 두개의 PORV를 개방하여야 한다. 방출-주입 운전을 통한 열제거 효율성은 4가지 기본적인 고려사항을 근거로 한다. 1) 모든 2차측 열제거원 상실 직후 표시 이후, 방출-주입 운전을 시작하는 운전원 조치단계의 적절성, 2) RCS 방출-주입 운전 시작 시점에서의 노심 잔열, 3) 가압기 PORV의 용량(즉, 밸브의 수 및 크기), 4) 고압 안전주입 계통의 용량(즉, 고압 안전주입 펌프의 수, 크기 및 차단수두(Shutoff head)). 이러한 고려사항은 RCS 방출-주입 운전에 의한 열제거가 구현된 이후에, RCS의 감압, 재가압 및 압력 안정화를 결정한다. 네번째 고려사항은 주어진 RCS 압력 하에서 RCS로 이송되는 안전주입 유량의 크기를 결정한다. RCS 방출-주입 운전의 효율성은 상기 고려 사항들의 조합으로 극대화되는데, 이러한 효율적인 운용을 통해 초기 RCS 감압을 최대화시키며, 연속되는 RCS 재가압을 최소화하고 안정되는 압력을 최대로 낮추며, 주어진 RCS 압력 하에서 RCS로 이송되는 안전주입 유량을 최대화시킨다. 방출-주입 운전에 의한 RCS 복구 기술을 지원하는 관점에서 이러한 고려 사항들을 평가하기 위해 일반적인 분석(Generic Analyses)이 수행되었다. 일반적인 분석에 대한 기술 및 발전소 과도상태에 대한 요약은 다음과 같다.

### 1) 방출-주입 운전 과도 해석

노심 출력과 가압기 PORV 용량의 관계를 분류하는 적절한 방법은 인허가 노심출력 대비 가압

기 PORV 정격 용량의 비율이다. 심각한 노심 노출을 방지하기 위해 방출-주입 운전을 시작하고 장기 냉각을 구현하기 위해 가용한 시간은 노심 출력 대비 가압기 PORV 정격 용량의 비율에 달려있다. 그 비율이 클수록 심각한 노심 노출 없이 RCS 방출-주입 운전을 시작할 수 있는 시간이 길어지며 증기가 방출되는 방출 면적이 크다는 것으로 해석할 수 있다. 그러므로, 비율이 클수록 압력 안정화 지점은 낮아지며 펌프 용량은 증가하게 된다. 따라서, 노심 출력 대비 가압기 PORV 정격 용량의 비율이 클수록 심각한 노심 노출을 방지하기 위하여 RCS 방출-주입 운전을 개시하는데 가용한 시간이 길어진다. 기존 웨스팅하우스형 발전소의 가압기 PORV 용량 및 노심 출력 범위에 대하여 RCS 방출-주입 운전 분석이 수행되었다[4]. 인허가 노심출력 대비 가압기 PORV 정격 용량의 비율의 범위에 대하여, 출력운전중 완전 급수상실사고시, 심각한 노심 노출을 방지하는 방출-주입 운전 개시 요구 시점을 예측하기 위하여 개선된 모델을 사용하고 있다. 이 해석은 성공적으로 방출-주입 운전을 시작하는 데 필요한 조건을 평가하는 기초로 사용되고 있다.

모든 고압 안전주입 펌프(즉, 두개의 충전/안전주입 펌프와 두개의 고압(High-Head) 안전주입 펌프)의 작동을 통해 증가된 안전주입 용량은 모든 RCS 압력에서 안전주입 용량을 증가시킴으로써 RCS 방출-주입 운전의 효율성을 증대시킨다. 안전주입계통의 용량은 두 가지 기본적인 이유 때문에 중요하다. 첫째, 저온의 안전주입 냉각수는 기존의 평균 RCS 온도에 도달하면서 어느 정도 열을 흡수하는데 이용 가능한 열용량을 가지고 있다. 이러한 초기 과냉각 상태는 재가압율과 압력이 안정되는 지점을 감소시키는데 도움이 된다. 둘째로, 안전주입 냉각수는 가압기 PORV 개방으로 상실된 냉각재를 복구시키며, 심각한 노심 노출을 방지하거나 감소시킨다. 제시된 해석에서는, 가압기 저압 안전주입 설정치(Low PRZR Pressure SI Setpoint)에 도달할 때까지 안전주입이 시작되지 않는다. 이것은 지침서에 제시된 대로 PORV 개방 이전이 아니라 개방 이후에 발생된다.

## 2) 방출-주입운전에 의한 RCS 열제거 과도상태 서술

이 시점에서 가압기 PORV를 통한 모든 증기 방출량의 변화가, 체적 제거율을 증가시키거나 또는 노심이 부분적으로 노출되어 노심 열전달 및 증기 생성율을 감소시킬 때까지 RCS 압력은 평형을 이루며 상대적으로 안정된 상태를 유지한다. RCS 재가압 및 압력 안정화 시점은 가압기 PORV 용량 및 안전주입 이송률과 함께 방출-주입 운전이 시작되는 시점에서 RCS 냉각재 온도 및 노심 잔열 크기에 달려 있다. 따라서, RCS 재가압 및 RCS 압력 안정화 지점을 최소화하여 RCS 내부로의 안전주입 용량을 극대화할 수 있도록 모든 가압기 PORV는 개방상태를 유지해야 한다. 압력 안정화 기간 동안, 모든 가용한 가압기 PORV는 개방상태를 유지해야 하며, 모든 가용한 고압 안전주입 펌프는 RCS로의 주입 용량을 극대화하기 위해 지속적으로 작동되어야 한다. 안전주입 최대유량을 가정하더라도 RCS의 냉각재 재고량이 지속적으로 감소하여 결과적으로 원자로압력용기 상부에 공동화현상을 초래하며 냉각재 수위는 고온관 위치까지 감소한다. 동 시점에서 원자로내 증기가 고온관을 통해 가압기로 방출되기 시작하여 가압기 수위가 감소될 수 있다. 가압기 PORV를 통해 다량의 증기가 방출되면 RCS의 압력은 점차 감소되며 이러한 압력 감소는 안전주입 용량을 증가시켜 노심 노출을 방지 혹은 최소화시킨다. 노심붕괴열이 감소하고 안전주입 용량이 증가함에 따라 가압기 PORV의 체적 제거능력은 노심 붕괴열로부터 발생하는 증기와 안전주입수에 의한 체적증가량을 초과하기 시작한다. 이것은 안전주입에 의한 냉각수 증가량이 PORV를 통한 방출량을 초과하여 전체 RCS내 냉각수 재고량을 증가시키는 현상을 동반한다.

방출-주입 운전을 조기에 개시하면 RCS의 최대 감압과 보다 큰 안전주입유량이 가능해지며, 효과적인 열제거가 보장된다. 방출-주입 운전이 시작되기 전에 과도상태가 다섯번째 단계(과냉각도가 감소되는 단계)로 더 진입하면 초기 감압은 더 작아진다. 결과적으로 이것은 안전주입유량을 감소시키고 재가압 효과를 더 크게 하여 더 많은 냉각재 재고량 상실을 초래한다.

방출-주입 운전이 다섯번째 단계 이전에 시작되면, 증기발생기 2차측 냉각수량은 1차측 에너지 제거에 이용 가능하며 이러한 2차측 냉각수량은 재가압의 정도를 감소시키는 데 이용 될 수 있다. 출력 대비 PORV 유량 비율이 작은 발전소에 대해서, 증기발생기에 남아있는 냉각수량은 노심 노출 방지 관점에서 방출-주입운전의 성공여부에 중대한 영향을 미친다.

여섯번째 단계가 시작될 때까지 운전원 조치가 이루어지지 않으면 방출-주입 운전으로 노심노출을 방지할 수 없는데, 이것은 노심 비등에 의해 RCS에서 증기가 발생되기 때문이다. 증기발생과 이에 따른 RCS의 가압이 PORV를 완전히 개방시키며, 이러한 밸브개방 상태를 지속시킨다. RCS는 노심이 증기발생률을 감소시킬 정도로 충분히 노출될 때까지 고압 상태를 유지한다.

여섯번째 단계에서 PORV를 통한 방출유량은 50-100 lbm/sec에 해당하며, 이것은 참조발전소의 안전주입 유량 약 40 lbm/sec(290GPM)을 초과한다. 과도상태가 여섯번째 단계로 진입되면 노심 노출을 방지할 수 있는 유일한 수단은 증기발생기 2차측의 급수를 복구하는 것이다.

### 3) 방출-주입 운전의 성공적 개시에 필요한 조건

다양한 출력 대비 PORV 유량 비율에 대해서 성공적으로 방출-주입 운전을 시작하기 위해 필요한 조건을 결정하기 위하여 고압발전소(High Pressure Plant)에 대한 분석결과[3]가 이용되었다. 고압발전소는 가압기 PORV 압력설정치 이상의 압력에서 주입운전이 가능한 충전/안전주입 펌프를 보유하고 있는 발전소를 의미한다. 고압발전소는 출력 대비 PORV 유량 비율이 140 (lbm/hr)/Mwt 이상(저압발전소의 경우 177(lbm/hr)/Mwt)일 경우 증기발생기 고갈 이전 혹은 고갈 직후 방출-주입 열제거 운전을 성공적으로 시작할 수 있다[3]. 2000초에서 증기발생기 고갈 기준선을 따라 위로 이동하면, 출력 대비 PORV 유량 비율이 140 (lbm/hr)/Mwt인 지점에서 고압발전소 성공 기준선과 교차한다. 따라서, 증기발생기 고갈 상태에서 노심을 심각하게 노출시키지 않고, 방출-주입운전을 성공적으로 시행하기 위해서는 출력 대비 PORV 유량 비율이 140(lbm/hr)/Mwt이상이어야 한다.

증기발생기 고갈은 2차측 냉각수 재고량의 상실로 정의되며 이것은 노심의 열부하가 1차측 원자로냉각재 재고량에 전달되는 것을 의미한다. 열제거원 상실을 감지하는 데 가장 적합한 징후(Symptom)는 2차측 냉각수 재고량의 상실을 직접 지시하는 것이다. 증기발생기 광역수위지시계가 2차측 냉각수 재고량을 직접 지시하는 것으로, 고압발전소에 있어서, 방출-주입운전의 시작을 알려주는 최적의 지표에 해당한다.

증기발생기 고갈이 발생함에 따라, RCS의 압력과 온도가 증가하며, 결과적으로 가압기 PORV가 개방된다. 따라서, 출력 대비 PORV 유량 비율이 140 (lbm/hr)/Mwt 이상인 고압발전소에 대해서, 방출-주입 운전의 성공적인 개시에 필요한 또 다른 징후로는 RCS의 압력 및 온도 증가 또는 가압기 PORV 압력설정치인 2335 psig를 초과하는 압력이 해당된다. 출력 운전중 완전 급수상실 사고에 대해, 참조발전소의 LOFTRAN 분석으로부터 도출된 RCS 압력과 온도의 과도상태를 분석하였으며 이러한 분석은 보다 최적의 가정과 보다 실제적인 비평형 가압기의 효과를 고려하기 위하여 사용되었다.

RCS의 압력이 약 1,900초(32분) 시점에서 급격히 상승하기 시작하여 가압기 PORV 개방 시점인 2,148초(36분)에서 종료되는 것을 알 수 있다. 상기 구간에서의 RCS 온도 상승은 고온관에 대하여 약 7°F 정도로 상당히 미미한 편이다. 결국, 가압기 PORV가 RCS 압력증가를 완화하기 위하여 2,335 psig에서 자동으로 개방되기 전까지 운전원들이 RCS 압력 및 온도 증가에 대한 조치를 취할 수 있는 시간적 여유는 약 4분 정도이다. 그러므로, 이 경우 운전원 조치는 앞에서 언급된 여러 징후들 중 어느 하나의 징후에 의하여 취해질 수 있다. 다른 사고(예 : 소형 LOCA, SGTR) 또는 정상적인 정지 냉각시 급수가 상실되는 경우에, RCS 압력이 2335 psig를 초과하여 PORV가 개방되기 이전에 먼저 RCS의 압력 및 온도 증가가 일어날 가능성이 있다. 따라서, 2차측 열제거

원 상실사고 이외의 RCS 교란(Perturbation)이 RCS의 압력 및 온도 증가 요건을 충족시켜서 방출-주입 운전을 개시할 수 있는 가능성을 최소화하여야 한다.

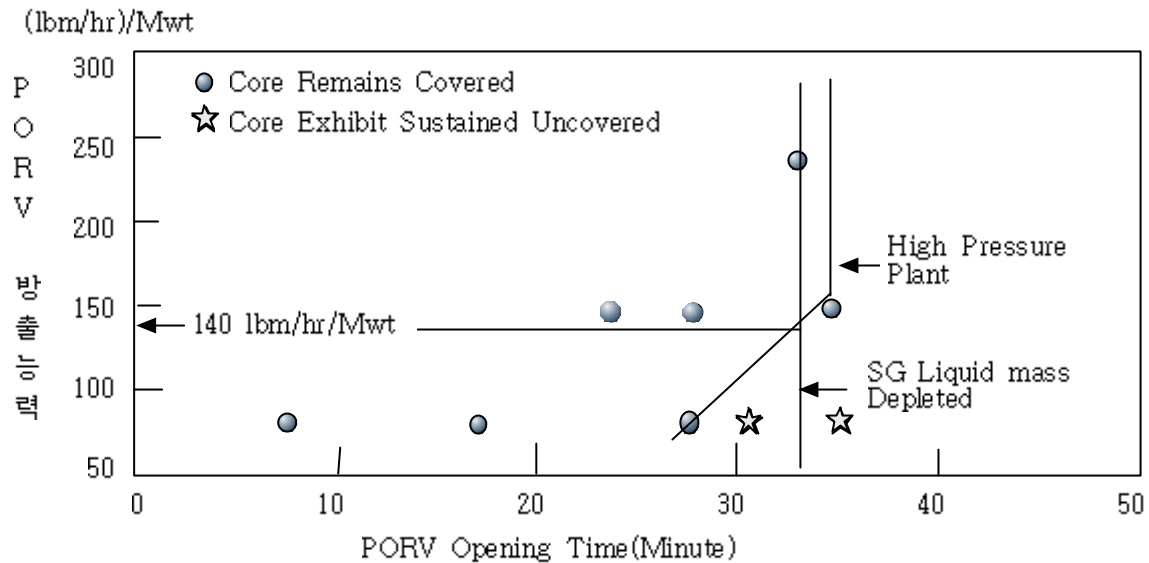


그림 1. 다양한 PORV 용량과 PORV 개방시간에 대한 발전소 민감도

출력 대비 PORV 유량 비율이 140(lbm/hr)/Mwt 이하인 발전소에 대해서, 방출-주입 운전을 위해 증기발생기가 고갈될 때까지 기다리는 것은, 현 분석을 토대로, 중대한 노심노출을 방지하는데 적절하지 않다. 최적의 징후로는 여전히 증기발생기 2차측 광역 수위가 해당된다. 방출-주입 운전의 성공적 개시를 위해서는 증기발생기 각각에 5,000 lbm의 냉각수가 필요하다. 방출-주입 운전을 시작할 때 이용 가능한 5,000 lbm의 냉각수량은, RCS의 재가압을 최소화하는 가압기 PORV와 더불어 추가적인 열제거 능력을 보장한다. 동 냉각수량은 그림 1로부터 84 (lbm/hr)/Mwt의 PORV 용량을 가지고서 방출-주입 운전을 성공적으로 시작할 수 있는 시점을 확인하여 결정되었다. PORV 용량이 84(lbm/hr)/Mwt인 경우에 대해서는, 1700초(28분)에서 고압발전소 성공 기준선과 교차하며, 동 시점에서의 2차측 냉각수량이 각각의 증기발생기에 대해 약 5,000 lbm이다. 증기발생기 2차측의 광역수위는 이러한 냉각수량으로부터 결정된다.

많은 고압 발전소들은 약 105(lbm/hr)/Mwt의 PORV 용량을 가지고 있다. 따라서, 84(lbm/hr)/Mwt의 PORV 용량을 토대로 설정된 증기발생기 2차측 냉각수량 5,000lbm은 이들 발전소에 대해 보수적인 값에 해당한다.

그러나, 그림1은 PORV의 용량이 84(lbm/hr)/Mwt에서 105(lbm/hr)/Mwt로 증가할 경우 방출-주입 운전이 단지 약 2분 정도 지연되는 것을 보여주고 있으므로, 상기 가정이 지나치게 보수적인 것은 아니다. 따라서, 84 (lbm/hr)/Mwt의 PORV 용량에 근거한 증기발생기 광역수위 징후가 140 (lbm/hr)/Mwt 이하(저압발전소의 경우 177(lbm/hr)/Mwt)의 PORV 용량을 갖는 모든 고압발전소에 대하여 주입-방출 운전의 개시를 결정하는 일반적인 징후(Generic Symptom)로 권고된다. 이들 발전소에 대하여 증기발생기 고갈 징후가 방출-주입 운전 개시 조건으로 이용될 수 없으므로, RCS 압력 및 온도 증가 혹은 2,335psig 이상의 압력 징후가 방출-주입 운전 개시 조건으로 사용될 수 없다. 가능한 유일한 대안은 증기발생기 협역수위 뿐이다.

#### 4. 열제거원 상실의 고유 징후

열제거원 상실시 발전소 별 고유징후(Symptom)들은 발전소별 고유 절차서 이행 시에 권고되는

사항이다. 상기 선정기준이 발전소별 고유 절차서에 열제거원 상실 징후로 적용된다. 발전소의 출력 대비 PORV 유량 비율이 방출-주입 운전 개시에 적합한 징후를 결정하기 위해 사용된다. 출력 대비 PORV 유량 비율이 140(lbm/hr)/Mwt 이상인 경우에 대하여, 성공적으로 방출-주입운전을 시작하는 적절한 지표는 증기발생기 고갈 징후이다. 따라서, 이들 발전소에 대해서, 적절한 오차허용치를 고려하여 설정된 증기발생기 광역수위가 이러한 요건을 충족시킨다. 출력 대비 PORV 유량 비율이 140(lbm/hr)/Mwt 이하인 경우에 대해서는 보다 큰 증기발생기 광역수위(각 증기발생기의 5,000 lbm 냉각수량에 해당)가 성공적인 방출-주입운전의 개시 조건으로 요구된다. 사고시에는 모든 증기발생기의 냉각수 재고량이 균일한 분포를 이루지 않으므로, 1개 증기발생기의 등가 냉각수 재고량을 고려하도록 징후가 수정된다. 그래서 4 Loop 발전소에 대한 등가 냉각수 재고량은 1개 증기발생기로 20,000 lbm에 해당한다. 이것은 21% 광역수위에 불확실성 및 모델 F SG에 대한 참조배관 가열효과를 고려한 값에 해당한다. 기타 SG 모델에 대한 평가가 수행되었으며 상기 광역수위 21%는 기존의 모든 모델에 적용 가능한 값이다. 모든 증기발생기가 이 광역수위 보다 작은 값을 나타내면, 모든 RCP를 정지하고 비상운전지침을 이행함으로써 방출-주입 운전을 즉시 시작하여야 한다. 모든 증기발생기의 냉각수량이 21분 시점에서 20,000lbm 이하이며, 31분 시점에서 5,000 lbm이하로 줄어들므로 이 경우에 대해, 운전원은 21분에 방출-주입 운전 개시 징후를 인지하게 된다. 만일 비대칭적인 증기발생기 질량 과도현상이 발생한다면 징후는 21분 이후의 어느 시점까지 지연될 것이다. 그러나, 31분에는 더 큰 냉각수량과 냉각능력이 필요하다.

## 5. 국내원전 적용방안

고리1호기의 경우 저압 발전소로서 PORV 방출 용량(유량 대 출력)이  $179,000 \times 2 / 1,728.5 = 207$  (lbm/hr)/Mwt(2개)로 177(lbm/hr)/Mwt 이상이다. 격납용기 정상 상태시 설정치는 증기발생기 광역 수위지시계의 just in the WR은 2%로 보고, 이 값에 격납용기 정상 상태시의 오차(Lunc(n)=3%)를 합산하면 5%가 된다. 즉 2차측 열제거원 상실로 인해 S/G 광역수위가 5%이하일 때 또는 가압기 압력이 161 bar 이상일 때 증기발생기 2차측 고갈 상태로 간주하여 방출-주입운전을 개시하여야 한다. 격납용기 비정상 상태시 설정치는 증기발생기 광역수위 채널이 검증되지 않았기 때문에 사용될 수 없다. 그래서 가압기 압력이 161bar이상이거나 원자로냉각재 압력과 고온관 온도가 증가 중으로 설정치를 적용한다.

표 1 국내 웨스팅하우스형 원전 PORV 현황 및 ERG 적용

|                      | 발전소 유형                             | PORV<br>기준용량   | PORV<br>실제적용치 | ERG<br>적용결과    |
|----------------------|------------------------------------|----------------|---------------|----------------|
|                      |                                    | ((lbm/hr)/Mwt) |               |                |
| 고리1 호기               | 저압발전소<br>SI Shut-off Head<PORV 설정치 | 177            | 207           | SG광역수위<br>5%이상 |
| 고리2 호기               |                                    |                | 223           | SG광역수위<br>7%이상 |
| 고리3,4 호기<br>영광1,2 호기 | 고압발전소<br>SI Shut-off Head>PORV 설정치 | 140            | 227           | SG광역수위<br>5%이상 |

고리2호기의 경우 저압발전소로 PORV 방출 용량(유량 대 출력)이  $210,000 \times 2 / 1,882 = 223$  lbm/hr/Mwt(2개)로 177 lbm/hr/Mwt 이상이다. CV 정상상태시 설정치는 증기발생기 광역 수위지시계의 just in the WR은 2%로 보고, 이 값에 CV 정상상태시의 오차(Lunc(n) = 4.8%)를 6.8%

가 고려하면 즉, 2차측 열제거원 상실로 인해 S/G 광역수위가 7%이하일 때 또는 가압기 압력이 164 kg/cm<sup>2</sup> 이상일 때로 설정치를 적용한다. CV 비정상 상태시는 가압기 압력이 164 kg/cm<sup>2</sup> 이상이거나 원자로 냉각재 압력과 고온관 온도가 증가 중으로 설정치를 적용한다.

고리3,4호기의 경우 고압발전소로서 PORV 방출 용량(유량 대 출력)이 227 lb/hr/MWt(3개)로 140 lb/hr/MWt 이상이므로 격납용기 정상상태시 설정치는 증기발생기 광역 수위지시계의 Just in the WR은 2%로 보고 이 값에 CV 정상상태시의 오차(Lunc(n)=3.6%)를 고려하여 보수적으로 6%가 된다. 즉 2차측 열제거원 상실로 인해 3대의 S/G중 어떠한 S/G의 광역수위가 6%이하일 때 또는 가압기 압력이 165 kg/cm<sup>2</sup>과 같거나 그 이상일 때를 설정치로 적용한다. 비정상 상태시는 원자로 냉각재 압력과 고온관 온도가 증가 중으로 설정치를 적용한다.

## 6. 방출-주입 및 주입 방출 운전 적용

방출-주입 운전은 붕괴열 제거 및 노심 냉각용 냉각재를 충분히 공급하기 위해, 수동으로 고압 안전주입을 시작하고 수동으로 가압기 PORV를 개방하여 RCS를 감압시키는 과정이다. 주입-방출 운전은 수동으로 고압 안전주입을 시작하고, 자동으로 PORV 개폐를 PORV 압력 설정치에서 반복함으로써 RCS내의 냉각재를 배출하여 붕괴열을 제거하고 노심 냉각을 제공하는 과정이다. 이러한 과정은 RCS 압력이 PORV 압력 설정치인 약 2235 psig 이상일 때 발생한다. 방출-주입 운전은 모든 고압 안전주입 펌프를 먼저 작동하고 안전주입에 의한 냉각재 공급이 정상적으로 이루어지는 것을 확인한 후 모든 PORV를 수동으로 개방함으로써 이루어진다.

주입-방출 운전은 모든 고압 안전주입계통을 작동시키므로써 이루어진다. 고압 안전주입 및 붕괴열에 의한 RCS 가열이 이루어지면 가압기 PORV가 개방되어 RCS 냉각재가 간헐적으로 방출된다. 따라서 주입-방출 운전시에는 고압 안전주입과 RCS 가열의 결과로써 가압기 PORV가 개폐를 반복하여 RCS 냉각재를 방출시킨다.

웨스팅하우스 PWR의 경우 PORV 압력설정치에서 안전주입 유량이 주입-방출 운전에 의한 노심냉각을 보장하기에 충분치 않고 해석결과를 종합하면 고압 안전주입 용량을 갖추고 있는 국내 원전의 웨스팅하우스 발전소에 대한 주입-방출 운전의 적용 타당성을 뒷받침해 주지 못하기 때문에 방출-주입 운전에 의한 열제거 방법이 적용해야한다. 또한 PORV 압력설정치에서 안전주입이 불가능한 고리1,2호기(저압 발전소)에 대해서는 주입-방출 운전이 열제거를 위해 이용되기에 부적절하다. 특히, PORV가 장시간동안 개폐를 반복할 것이나 주입-방출 운전시의 이런 상황에 대해 PORV 신뢰성이 아직 입증되지 못했다.

최종적으로 2차측 열제거원 상실의 징후가 관측되었을 때 주입-방출 운전이 시작되었다면 차후에 방출-주입으로 전환할 기회를 상실하게 되는데 주입-방출 운전시 안전주입 유량이 매우 낮아 바로 계통이 비등을 시작하기 때문이다. 일단, 비등이 시작되면 노심 노출 없이 PORV를 이용한 RCS의 감압은 매우 어렵게 된다. 그러므로 주입-방출 운전으로부터 방출-주입 운전으로 전환하기 위해서는 노심 노출 및 노심 손상이 불가피하게 된다. 따라서, 주입-방출 운전은 2차측 열제거원 상실시 1차측 열을 제거하기 위한 방법으로 부적절하므로 적용되지 않는다.

## 7. 결론

2차측 열제거원 상실시 비상운전전략을 국내원전에 적용하기 위한 검토를 수행하였다. 고리1,2호기는 저압 발전소로 PORV 용량이 177(lbm/hr)/MWt이상이므로 2차측의 고갈 후 방출-주입운전을 수행하여도 노심 노출이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 고리3,4호기 및 영광1,2호기의 경우 고압발전소로서 PORV 용량이 140(lbm/hr)/MWt이상이므로 또한 2차측의 고갈 후 방출-주입운전을 수행하여도 노심 노출이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그래서 비상운전지침에 적용할 수 있는

방출-주입운전의 시작점은 증기발생기 최저수위 혹은 압력이 PORV 설정치에 도달했을 때로 적용한다.

## Reference

- 1) W. Tauche, Loss of Feedwater Induced Loss of Coolant Accident Analysis Report, Westinghouse Electric Corp., WCAP-9744, May 1980.
- 2) L. A. Campbell, LOFTRAN Code Description, Westinghouse Electric Corp., WCAP-7878, REV. 3, January 1977.
- 3) S.I. Dederer, PORV Sensitivity Study for LOFW-LOCA Analysis, Westinghouse Electric Corp., WCAP-9914, July 1981.
- 4) Westinghouse Electric Corp., Report on Small Break Accidents for Westinghouse SSS Systems, WCAP-9600, June 1979.
- 5) Reg. Guide 1.75 Physical Independence of Electric Systems, 09/1978, US NRC
- 6) Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, HP Version 1996
- 7) Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, LP Version 1996
- 8) 고리3,4호기 비상운전절차서 설정치 고유기술배경서
- 9) 고리3,4호기 비상운전절차서, 한국전력공사
- 10) 영광1,2호기 비상운전절차서 설정치 고유기술배경서
- 11) 영광1,2호기 비상운전절차서, 한국전력공사
- 12) 고리 1호기 비상운전절차서 설정치 고유기술배경서
- 13) 고리 1호기 비상운전절차서, 한국전력공사
- 14) 고리 2호기 비상운전절차서 설정치 고유기술배경서
- 15) 고리 2호기 비상운전절차서, 한국전력공사