

가압기의 밀립 과도상태 및 완화 전략에 관한 연구

A Study on Pressurizer In/outsurge Transients and Operational Mitigating Strategies

김현장, 권갑주

한국전력공사 원자력교육원
울산광역시 울주군 서생면 신암리 991

요 약

원자로냉각재계통의 가열 또는 냉각 운전중 기존의 설계 해석에서는 그 영향이 평가되지 않은 가압기 In/outsurge 과도상태가 발생하고 있다. 이 과도상태는 유로와 가압기 사이의 온도차가 클 경우 가압기 하부 헤드에 추가적인 피로 부하를 유발하여 가압기의 구조적 건전성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 가압기 In/outsurge 과도상태에 대해서 기술지침서 적용의 문제점, 가압기의 구조적 건전성 평가 방법, 그리고 이의 영향을 완화하기 위한 운전측면의 전략을 제시하였다. 또한 각 발전소 가열 및 냉각 운전절차서를 검토하여 In/outsurge 과도상태를 유발할 수 있는 운전상태와 이를 개선하기 위한 운전 방법 및 절차서의 개선점을 제시하였다.

Abstract

The pressurizer in/outsurge transients, which was not evaluated in the stage of the design analysis, have been occurred during the reactor coolant system(RCS) heatup and cooldown operations. When the temperature difference between the RCS and the pressurizer is large, these in/outsurges can additionally produce the significant thermal fatigue transients in the pressurizer lower head and affect the structural integrity of the pressurizer. This study provides the concerns to the application of the technical specification, the evaluation method of the pressurizer structural integrity, and the operational strategies to mitigate the effects for the pressurizer in/outsurge transients. And, this study reviewed the plant procedures and proposed the operational strategies for mitigating the pressurizer in/outsurge transients.

1. 서 론

가압경수로에서 특정 운전 조건, 특히 가열 또는 냉각 운전중에 RCS의 갑작스러운 재고량 변화 또는 온도 변화에 의한 체적 변화는 냉각재가 유로로부터 가압기로 밀려 들어오는 현상(Insurge)

또는 가압기로부터 유로로 밀려 나가는 현상(Outsurge)이 발생하게 된다.

지금까지는 Insurge가 발생할 때 가압기의 밀림관 안쪽에 설치된 노즐 스크린의 혼합작용으로 Insurge된 고온관측의 상대적으로 차거운 냉각재가 가압기의 뜨거운 냉각재와 섞여서 하부 헤드에 심각한 온도 변화를 일으키지 않는 것으로 가정하였다. 즉, 가압기의 가열률과 냉각률 제한치 또한 가압기 포화온도의 변화율만을 고려하였으며 In/outsurge에 의한 하부 헤드의 급격한 온도 변화율은 고려하지 않았다. 따라서 가압기 설계 과도현상의 근거는 불완전하며, 운전중 Insurge의 허용은 설계시 해석되지 않은 운전 조건에서 가압기를 운전하게 되는 결과를 초래하게 된다. 웨스팅하우스 사용자 그룹(WOG)은 이런 문제점에 대처하기 위해 일련의 In/outsurge 과도상태 완화 및 가압기 건전성 평가 프로그램을 수행하였다. 그 결과 WOG는 WCAP-13588에서 In/Outsurge의 영향을 최소화하기 위한 운전 전략, WCAP-14950 및 WCAP-14717 Rev. 1에서 In/Outsurge 과도상태의 완화 전략과 가압기의 구조적 건전성에 대한 평가 방안을 제시하고 있다.^[1, 2, 3]

본 연구의 목적은 상기 WOG 프로그램에서 제시된 In/outsurge 과도상태에 대한 가압기의 구조적 건전성 평가 방법을 검토하고 운전측면의 In/outsurge 완화 전략을 근거로 현재 국내 웨스팅하우스형 발전소에서 사용중인 가열 및 냉각 운전 방법과 절차에 대해 개선점을 제시하는 것이다.

2. 가열률 및 냉각률 제한치의 문제점

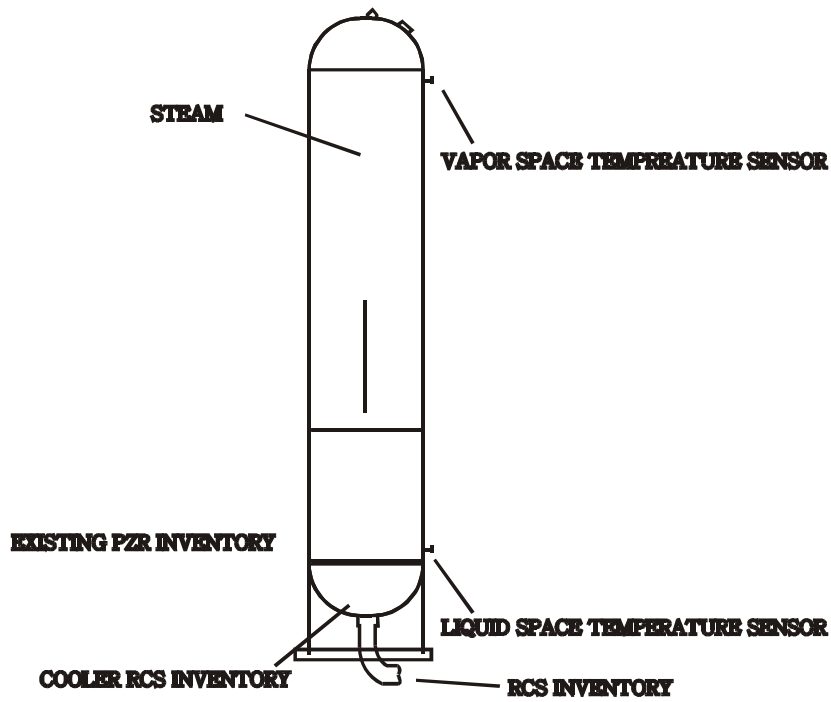
가압기에 기포가 존재할 때는 가압기내의 액체는 RCS 압력에 상응하는 포화온도 상태에 있게 되며 RCS 고온관 온도보다 높다. 가압기와 RCS 고온관의 온도차는 발전소 운전 모드에 따라 30°F에서 320°F 사이에서 변하게 되며, 큰 온도차는 가열 및 냉각 운전중에 주로 발생한다. 고온관과 가압기 사이의 온도차가 클 때 Insurge가 발생하게 되면 가압기의 하부 헤드에 심각한 온도 과도현상을 일으키게 된다. 높은 온도차와 상대적으로 낮은 Insurge 유량률은 가압기의 고온수가 Insurge된 저온수와 섞이는 것을 방지하는 부력효과(Buoyancy effects)의 원인이 되며 [그림-1]과 같이 가압기내 고온수와 Insurge된 저온수가 층을 이루어 가압기의 벽면을 따라 이동하는 결과를 가져온다.

층을 이룬 경계면이 액체영역 온도감지기에 접촉하게 되면 가압기 온도는 단계적으로 감소(Step Decrease)하게 되고 기술지침서의 냉각률 제한치(200°F/hr)를 초과하게 된다. 기술지침서 요건에 따라 냉각률을 제한치 내로 유지하기 위해 Outsurge 유량을 형성하면 이번에는 온도가 단계적으로 증가(Step Increase)하여 가열률 제한치(100°F/hr)를 초과하게 됨으로써 하부 헤드는 단시간 내에 이중의 심각한 온도 과도현상을 경험하게 된다.

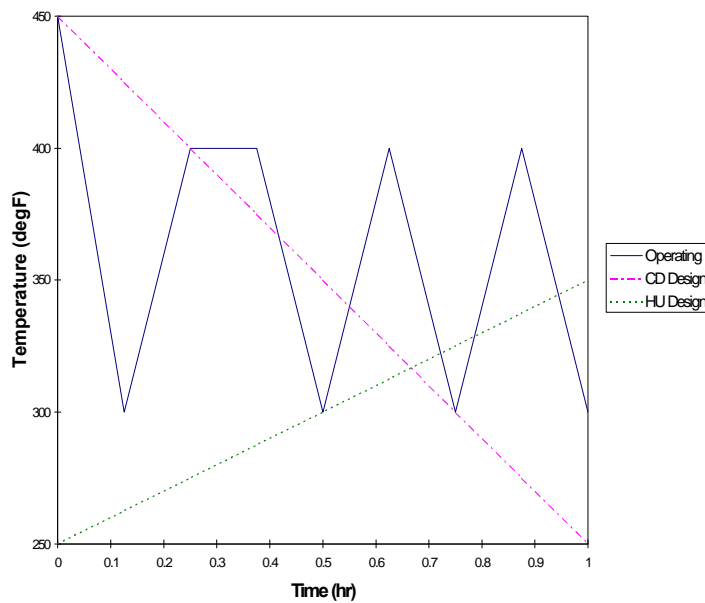
기존의 가압기 설계에서는 Insurge가 발생할 때 가압기의 밀림관 안쪽에 설치된 노즐 스크린의 혼합작용으로 Insurge된 고온관측의 상대적으로 차거운 냉각재가 가압기의 뜨거운 냉각재와 섞여 하부 헤드에 심각한 온도 변화를 일으키지 않는 것으로 가정하였기 때문에 가압기의 밀림관 노즐만 Insurge에 의한 열충격 해석에 반영되었다. 따라서 가압기 가열률 및 냉각률 제한치(100°F/hr 및 200°F/hr)는 가압기의 액체 온도 즉, 가압기 압력 변화에 의한 포화온도 변화율을 정의한 것이다. 그러나 실제 운전 경험과 In/outsurge시 가압기 열성층화 현상의 실재를 근거로 보면 가압기 가열 및 냉각률은 성층화 경계면이 온도감지기를 지날 때 단계 변화에 가까운 매우 큰 값을 나타낸다. 이것은 설계시 고려한 압력 변화에 따른 포화온도 변화의 시나리오와 맞지 않다.

In/outsurge 및 온도 제한치에 대처할 때 “어느 1시간 동안에...”라는 기술지침서 단어는 운전원

으로 하여금 온도 제한치를 유지하기 위해 역 Surge 유량을 형성하도록 조장하는 결과를 초래한다. 이는 [그림-2]에서 보는 바와 같이 어느 1시간 동안에 여러 번의 급격한 온도 변화를 초래하게 되고 수명기간 동안 200회로 가정한 설계기준 가열 및 냉각 횟수를 초과하는 원인이 된다. 이러한 해석이 가능하다면 극단적으로 변화율은 없어지고 단지 가압기와 RCS 고온관의 온도 차이인 가열시 100°F, 냉각시 200°F의 온도차(ΔT) 제한치만이 존재하게 된다. 따라서 1시간 이내에서는 무수히 많은 온도 제한치 범위내의 과도현상을 허용하는 것과 같다.



[그림-1] 가압기 In/outsurge에 의한 열성층화 현상



[그림-2] 가열/냉각률의 해석시나리오

가압기의 가열률 및 냉각률 제한치는 금속의 피로 해석과 관련되어 있다. 기존 피로 해석은 가압기 유체 온도가 제한치 이내에서 서서히 변하는 것을 가정하였으며 In/outsurge에 의해 가압기 하부 헤드에서 발생하는 단계적 온도 변화는 고려되지 않았다. 따라서 기존의 가압기 온도 제한치는 In/outsurge 과도현상에 대해 직접 적용할 수 없으며 새로운 설계기준의 가압기 과도상태를 정의하고 이들 과도상태에 대해 가압기 구조적 건전성을 평가할 수 있는 기준 및 방법이 마련되어야 한다. 가압경수형 가압기는 전형적으로 100°F/hr와 200°F/hr의 가열률 및 냉각률 제한치를 가지고 있으며, 발전소의 최종안전성 분석보고서에 기술된 기술지침서의 내용은 다음과 같다.^[4, 5, 6]

운전 제한사항

가압기 온도는 다음과 같이 제한되어야 한다.

- ① 어느 1시간 동안의 최대 가열률 100°F
- ② 어느 1시간 동안의 최대 냉각률 200°F

조치사항

상기 가압기의 온도 제한치를 초과하는 경우 30분 이내에 제한치내로 온도를 복구하고 제한치 초과가 가압기의 구조적 건전성에 미치는 영향을 공학적으로 평가해야 한다. 또한 가압기의 연속 운전을 허용할 수 있는지 평가해야 하며 그렇지 않은 경우 적어도 다음 6시간 이내에 고온대기, 다음 30시간 이내에 가압기를 500 psig 이하로 감압해야 한다.

점검요구사항

계통의 가열 및 냉각중에 적어도 30분에 1회씩 가압기 온도가 제한치 이내에 있음을 확인해야 한다.

제한사항에 대한 기술배경

가압기 가열률 및 냉각률에 적용되는 제한사항은 가압기가 ASME 코드 요건에 따라 수행된 피로 해석에서 가정한 설계기준내에서 운전되고 있음을 보장하기 위함이다.

상기의 가압기 온도 제한치에 대한 기술지침서의 해석과 적용에 있어서 일반적으로 발생하는 의문사항과 문제점은 다음과 같다.

- 온도 제한치는 전체 온도 변화와 변화율 산정기간에 관계없이 순수하게 변화율 문제인가?
즉, 가압기가 15분 동안에 51°F 냉각된다면 이 냉각률은 제한치를 초과하는가?
- 온도 제한치는 어느 1시간 동안의 모든 변화율에 관계없이 온도 변화 절대치만의 문제인가?
즉, 만일 가압기가 10분 동안에 190°F 냉각되고 그 온도에서 유지되거나 처음 온도로 재가열되는 경우 그 제한치를 만족하게 되는가?
- 제한치가 위협받거나 초과할 경우 “...제한치내로 온도를 복구해야 한다”에 대한 적절한 절차서는 어떠한 것인가? 예를 들어 어떤 경우에 운전원이 제한치내로 가압기 온도를 복구할 의도로 Outsurge 유량을 형성한다면 가압기 하부 헤드에 또 다른 열충격을 주게 되는데 이것은 적절한 운전 조치인가?

3. WOG의 가압기 건전성 평가 프로그램

WOG는 기존의 가압기 설계기준에서 벗어난 In/outsurge 과도상태에 대해 가압기 하부 헤드의 구조적 건전성을 평가하기 위해 앞서 언급한 여러 가지 프로그램을 수행하였다. 그 결과를 검토하면 다음과 같다.

가압기의 구조적 건전성은 가압기 용기의 무연성 파괴와 피로 해석에 근거하여 대처할 수 있다. 무연성 파괴에 대한 구조적 건전성의 확인은 어떤 과도상태에 대해 발전소의 계속 운전허용 여부를 결정하기 위한 것이고, 피로 해석은 어떤 과도상태에 대한 가압기 용기의 수용성 확인으로 용기의 운전 수명에 대해 장기간에 걸친 주기적 열충격을 평가하기 위한 것이다.

WCAP-14717 Rev. 1에서는 실제 운전중 제한치를 벗어나는 In/outsurge 과도현상에 의해 가압기의 구조적 건전성에 가해지는 영향을 평가하기 위해 [표-1] 및 [그림-3]의 여러 가지 기준의 과도상태를 가정하여 [그림-4]의 취약부위에 대한 임계결함 크기 및 피로 해석을 수행하였다. 그 결과 단계적 변화를 포함하여 가열시 100°F, 냉각시 200°F ΔT 내의 In/outsurge 과도상태는 무연성 파괴에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

가열시 100°F, 냉각시 200°F ΔT를 초과하는 과도상태에 대해서는 [표-1]에 나타낸 기준 과도상태를 근거로 [표-2]와 [표-3]의 예와 같은 기준에 따라 임계결함 크기(Critical Flaw Size) 및 증분 피로 사용값(Incremental Fatigue Usage)을 평가하도록 하였다. 각 발전소는 In/outsurge 발생시 이 기준 과도상태의 해석 결과를 이용하여 간단히 가압기의 구조적 건전성을 평가할 수 있다. 그 과정은 다음과 같다.

① 실제 발생한 In/outsurge가 [표-1]에서 가정한 어느 하나의 기준 과도상태에 해당되는지 아래와 같이 비교한다. 어느 것도 해당되는 않으면 별도의 해석이 이루어져야 한다.

- T1 실제값 < T1 가정값
- T2 실제값 > T2 가정값
- T3 실제값 > T3 가정값
- T4 실제값 < T4 가정값
- P_{max} 실제값 < P_{max} 가정값
- ΔP 실제값 < ΔP 가정값

온도 변화율 R12와 R34는 발생 가능한 최대변화율을 수용할 수 있도록 분석시 [그림-3]과 같이 최대한의 보수적인 값 1200°F/hr를 가정하였기 때문에 [표-1]의 과도상태 특성변수 항목에서 제외되었다.

② [표-2]로부터 각 가압기 핵심 취약부위에 대한 임계결함 크기를 결정한다.

③ [표-3]으로부터 가압기 각 취약부위의 In/outsurge 사이클당 적용 가능한 피로 사용 영향치를 결정한다.

④ 다음과 같이 가압기 취약 부위별로 보수적인 누적 피로 사용값을 결정하여 설계 허용치와 비교한다.

$$u_i = N \times u_{ic}$$

여기서, N : 제한치 초과 과도상태 사이클 수

u_{ic} : [표-3]으로 부터 구한 사이클당 증분 피로사용값

$$U_{tot} = U_{des} + u_{i1} + u_{i2} + \dots + u_{in}$$

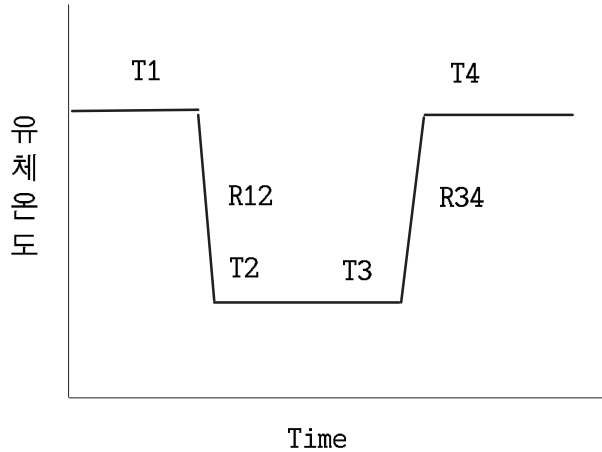
여기서, U_{tot} : 각 취약부위의 총 누적 피로 사용값

U_{des} : 이전 각 취약부위의 누적 피로 사용값

$u_{i1} \dots u_{in}$: 과도상태 1...n에 대한 각 취약부위 증분 피로 사용값

피로 사용에 대한 가압기의 구조적 건전성을 확인하기 위해 총 누적 피로 사용값을 설계허용 피로 사용값(일반적으로 1.0)과 비교한다.

$$U_{tot} < 1.0$$

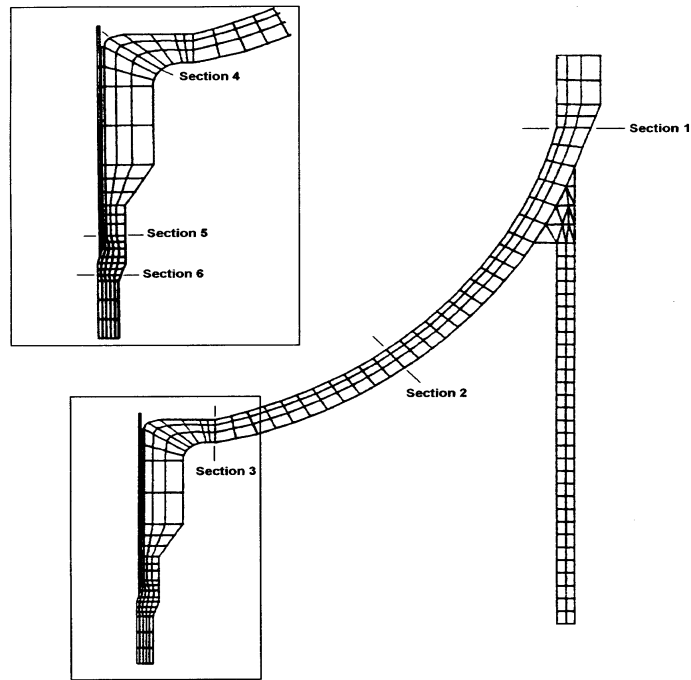


- T1 : 과도상태 시작시점의 하부 헤드의 초기온도(가압기의 액체 온도)
- T2/T3 : Insurge 유체 온도(RCS 고온관 온도)
- T4 : Outsurge에 의한 가열후 최종 온도(가압기의 액체 온도)
- R12/R34 : 온도변화율(1200°F/hr로 가정)
- P_{max} : 과도상태 기간중 최대 RCS 압력
- ΔP_{max} : 과도상태 기간중 최대 압력차

[그림-3] In/outsurge 특성 변수

[표-1] 제한치 초과 기준 과도상태

과도상태 명칭	과도상태 특성변수*1, *2					
	T1 (°F)	T2*3 (°F)	T3 (°F)	T4*3 (°F)	P_{max} (psig)	ΔP_{max} (psig)
고압운전시 과도상태						
HP1	653	550	550	653	2300	50
HP2	653	450	450	653	2300	50
HP3	653	350	350	653	2300	50
저압운전시 과도상태						
LP1	500	350	350	500	500	50
LP2	500	250	250	500	500	50
LP3	500	200	200	500	500	50
LP4	500	150	150	500	500	50
LP5	450	100	100	450	500	50
주 1. 특성 변수는 [그림-3]의 정의 참조 주 2. 밀립 유량률은 모든 과도상태에서 200gpm으로 가정 주 3. 모든 온도변화율은 분석적 단계변화로 가정. 변화후 과도상태는 임계응력의 최대화를 위해 충분히 길게 유지						



- Section 1 : Lower Head to Shell Weld
- Section 2 : Lower Head at Heater Penetration
- Section 3 : Lower Head to Nozzle Weld
- Section 4 : Surge Nozzle Corner
- Section 5 : Surge Nozzle to Safe End Weld
- Section 6 : Safe End to Pipe Weld

[그림-4] 가압기의 취약부위 단면도

[표-2] 임계결함 크기(a/t, Fabricated 14s160 모델)

단면	과도상태							
	HP1	HP2	HP3	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.55
3	1.0	1.0	0.84	1.0	1.0	1.0	1.0	0.76
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.78

[표-3] 단위 사이클당 피로 사용값(Fabricated 14s160 모델)

단면	과도상태							
	HP1	HP2	HP3	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
1	0.000003	0.000026	0.000108	0.000003	0.000049	0.000092	0.000159	0.000152
2	0.000232	0.000555	0.001717	0.000167	0.000857	0.001431	0.002222	0.002154
3	0.000006	0.000024	0.000104	0.000003	0.000041	0.000078	0.000127	0.000116
4	0.000001	0.000015	0.000080	0.000003	0.000032	0.000062	0.000101	0.000097
5	0.000002	0.000348	0.010550	0.000003	0.000922	0.003961	0.011072	0.008585
6	0.000001	0.002566	0.036958	0.000144	0.006150	0.019150	0.044458	0.037723

가압기와 RCS 고온관 사이의 최대 온도차(ΔT)를 기준으로 하여 가압기의 구조적 건전성을 평가하도록 권고하고 있으며 그 내용은 다음과 같다.

① ΔT 가 80°F 이하인 일반적 가열 또는 냉각 운전과 In/outsurge 과도현상은 금속 피로를 포함해서 가압기의 구조적 건전성에 미치는 영향이 없다.

② ΔT 가 가열시 100°F, 냉각시 200°F 이내인 일반적 가열 또는 냉각 운전과 In/outsurge 과도현상은 단기적으로 가압기 하부 헤드의 구조적 건전성에 영향을 미치지 않는다. 이는 WCAP-14717 Rev. 1의 일반적 파괴 평가에 근거한다. 이들 과도현상의 반복이 가압기의 구조적 건전성에 미치는 장기적 영향은 가압기의 피로 설계기준에 따라 다음 핵연료 주기가 시작되기 전에 재평가되어야 한다.

③ ΔT 가 가열시 100°F, 냉각시 200°F를 초과하는 일반적인 가열 또는 냉각운전과 In/outsurge 과도현상은 단기적으로 여전히 가압기 하부 헤드의 구조적 건전성에 영향을 미치지 않는다. 이것은 WCAP-14717 Rev. 1의 간략화된 비교 방법을 사용하여 쉽게 평가할 수 있다. 이들 과도현상의 반복이 가압기의 구조적 건전성에 미치는 장기적 영향은 가압기의 피로 설계기준에 따라 다음 핵연료 주기가 시작되기 전에 재평가되어야 한다.

④ 각 발전소별 가열 및 냉각운전 방법을 근거로 가압기 피로 해석 결과 가압기가 허용할 수 있는 최대 In/outsurge 과도현상 횟수에 대한 새로운 설계기준을 수립하고 이 기준에 따라 지금까지 허용된 횟수와 앞으로 제한해야 할 횟수를 결정해야 한다. 이를 위해 과거에 발생했거나 앞으로 발생하는 In/outsurge 과도상태(ΔT)의 심각도 및 횟수를 추적할 수 있는 감시 프로그램을 개발하여 운영해야 한다.

일반적으로 RCS 재고량 및 온도 변화는 가압기 In/Outsurge 과도상태를 초래하게 된다. 온도 변화에 의한 과도상태는 냉각재 체적의 수축과 팽창에 의해 초래된다. 과도상태의 거동에 영향을 주는 운전변수는 다음과 같다.

- 재고량에 영향을 미치는 운전변수
 - 충전유량(노즐 충전유량 및 RCP 밀봉 In-leakage 유량)
 - 유출유량(오리피스 유출유량 그리고/또는 저압유출유량)
 - 보조살수유량
- 냉각재온도(체적)에 영향을 미치는 운전변수
 - RCP에 의해 부가되는 열
 - RHR 펌프에 의해 부가되는 열(미소 영향)
 - 가압기 전열기에 의해 부가되는 열
 - RHR 계통에 의해 제거되는 열
- RCS 압력에 영향을 미치는 운전변수
 - 살수유량률
 - 살수온도
 - 가압기 전열기에 의해 부가되는 열

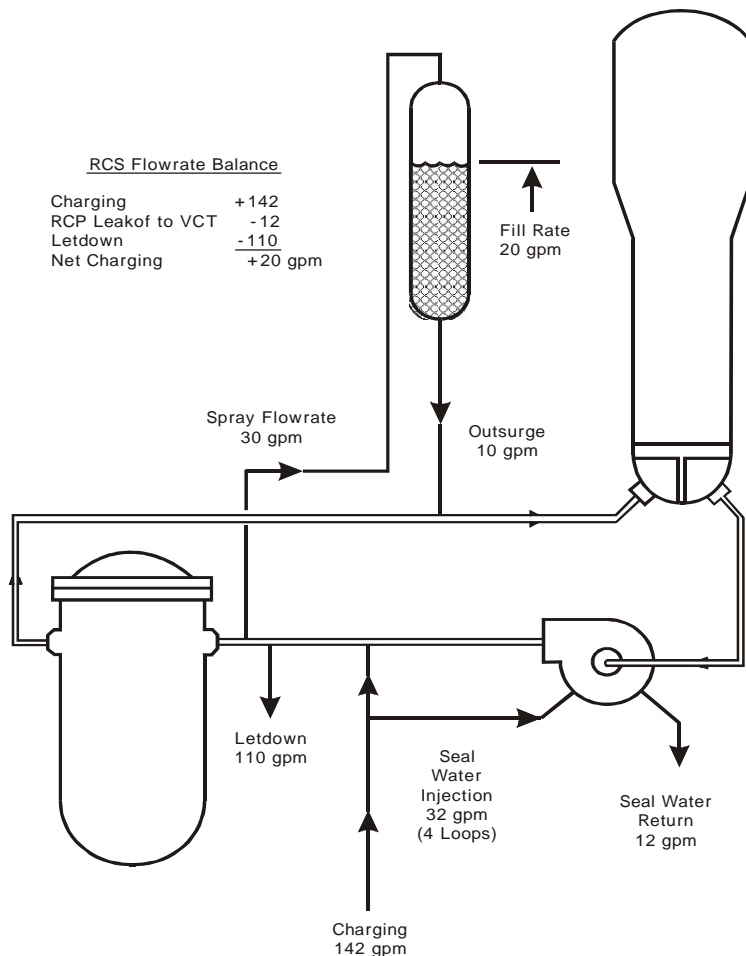
운전원은 특정 운전조건에서 Insurge가 발생할 가능성을 예측할 수 있어야 한다. 만일 Insurge가 예상될 때 이것을 방지하기 위한 조치를 취하거나 해당 운전을 ΔT 가 적은 다른 시점에 수행해야 한다. Insurge는 냉각재 재고량 또는 온도의 증가에 기인한 체적 증가에 의해 발생한다. 첫 번째 재고량 증가는 충전유량의 감소 또는 유출유량의 증가를 통해 가압기 수위를 일정하게 유지

함으로써 대처할 수 있다. 온도 증가는 RHR 열제거율을 증가시킴으로써 대처할 수 있다. 만일 Insurge가 발생하면 고온·저온수의 열성층화면이 가압기 하부 헤드의 벽면을 따라 상부로 이동하지 않고 일정한 위치에서 유지되도록 필요한 조치를 취해야 한다. 그 목적은 성층화면을 통한 온도차가 성층화면이 움직이기 전에 평형 상태에 도달하도록 하기 위함이다. 온도가 평형 상태에 도달하기 전에 성층화면이 반대로 움직이면 처음 경우와는 반대의 심각한 두 번째 과도상태를 밀립관과 하부 헤드에 부가하는 이중충격(Double-impact)을 초래하게 된다. 온도 평형 과정은 가압기 전열기를 켜므로써 촉진될 수 있다.

가압기의 운전 제한치를 초과하는 과도상태에 대처하기 위한 가장 효과적인 방법은 In/outsurge 그 자체를 방지하는 것이다. WOG 프로그램에서는 2가지의 주요 전략을 제안하였다. 하나는 연속적인 가압기 Outsurge 유량을 형성하는 것이고 다른 하나는 가압기와 고온관 사이의 최대 온도차 (ΔT)를 최소화하는 것이다.

연속 Outsurge 유량 유지

가압기의 Insurge와 이에 따른 열적 과도상태를 방지하기 위한 최선의 접근법은 가열 및 냉각 운전중에 가압기에 연속적인 Outsurge 유량이 형성되도록 운전하는 것이다. 연속 Outsurge 유량은 모든 보조전열기를 켜서 살수유량을 형성함으로써 확보할 수 있다. 살수유량이 많으면 많을수록 Insurge가 일어날 가능성은 감소한다.



[그림-5] 연속 Outsurge 형성 Flow Balance

가압기 Insurge와 가압기의 온도가 감소하는 과도상태의 공통적인 원인은 충전유량률의 증가 또는 유출유량률의 감소에 의해 가압기 수위가 증가하는 것이나 가압기 수위가 증가하는 상태에도 연속적인 Outsurge 유량의 형성이 가능하다. [그림-5]는 그 원리를 나타낸다. [그림-5]의 예에서 보면 살수유량률은 30 gpm이다. 충전 및 유출유량을 고려하여 순수 RCS 유입량은 20 gpm이다. 결과적으로 10 gpm의 Outsurge 유량이 형성되면서 가압기는 20 gpm율로 충수되게 된다. 따라서 보조전열기에 의해 압력이 유지되는 조건에서 살수유량률을 최대로 하는 만큼 수위는 증가하고 Outsurge 유량은 많아지게 된다.

가압기 밀림유량의 방향은 통상 밀림관 온도감지기를 통해서 확인이 가능하다. 만일 밀림관 온도가 가압기 액체영역 온도와 유사하다면 Ousurge 유량이 형성되고 있음을 나타내며 고온관 온도와 유사하다면 Insurge 유량이 형성되고 있음을 나타낸다. 밀림관 온도의 급격한 변화는 밀림 유량의 방향이 바뀌고 있음을 나타낸다.

계통 최대 온도차(ΔT) 최소화

In/outsurge 온도 과도상태는 ΔT 가 최소화될 때 덜 심각하게 된다. 즉, ΔT 가 적으면 적을수록 In/outsurge 발생시 가압기 하부 헤드에 미치는 열충격이 작아진다. 만수 가열운전(Water Solid Method)은 이 ΔT 를 최소화 할 수 있는 운전방법이다. 가열 및 냉각운전중에 ΔT 를 최소화 하기 위한 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 가압기 액체영역 온도를 감소하는 것이고 다른 하나는 유로의 냉각재 온도를 증가시키는 것이다.

① 가압기 온도 감소

가열 및 냉각운전 중에 가압기에 증기기포가 있을 경우 RCS 압력을 낮추게 되면 포화온도가 낮아지게 된다. 포화온도는 압력에 대해서 상대적으로 민감하지 않다. RCS 감압은 RCP 기동 및 연속 운전중에 #1 밀봉의 차압을 유지하기 위해 200 psid 이상 되어야 하는 요건에 의해 제한된다.

② RCS 유로 냉각재 온도 증가

가열 운전중에 냉각재온도는 RCP 운전이나 붕괴열에 의해 증가시킬 수 있다. 냉각운전 중에 RCS 유로 온도 감소는 제한되어야 한다. 냉각운전 중 가장 큰 ΔT 는 가압기 증기기포를 제거하는 시점에서 발생한다. 증기기포의 제거 시점에서 RCS 온도가 낮으면 낮을 수록 ΔT 는 커지므로 가능한 높은 온도에서 가압기를 만수위 상태로 만들어야 하며, 앞에서 언급한 연속 Outsurge 유량을 형성하기 위한 운전 방법을 이용해야 한다.

4. 국내 원전의 In/outsurge 완화 대책

가. 국내 원전의 In/Outsuge 발생 현황

정상적인 출력 운전중에 국내 웨스팅하우스형 원전의 가압기 액체영역 온도는 정격압력 2235 psig의 포화온도에 해당하는 650°F를 유지하고 있으며, 가압기 살수관의 열응력 방지를 위해 연속 최소유량(1 gpm)으로 가압기에서 고온관측으로 항시 Outsurge 유량이 형성되고 있다. 고온관 온도는 100% 출력 운전중에 620°F로 가압기와의 온도차는 약 30°F이다. 이는 In/outsurge에 의한 하부 헤드의 열충격 제한값 80°F 이하이므로 가압기 건전성에 미치는 영향은 없다. 출력이 감소될 수록 온도차는 커져 영(Zero)출력일 경우는 93°F에 달하게 되나 1주기 전운전기간을 통하여 전출력 운전을 하게 되고 항상 Outsurge 유량이 형성되므로 가압기 하부 헤드에 미치는 열충격은 문

제가 되지 않는다. 그러나 가열 및 냉각 운전중에는 국내 원전에서도 앞에서 언급한 바와 같은 In/outsurge 과도상태가 수시로 발생하고 있으며, 이를 방지하기 위한 운전 개념이나 대책은 언급되어 있지 않아 조속한 개선이 요구되고 있다. 다음은 발전소의 가열 및 냉각 운전절차서를 근거로 할 때 In/outsurge 과도상태인 Insurge 유량 및 큰 ΔT 를 유발할 수 있는 대표적인 운전조건이다.

- Insurge 유량 유발 운전조건
 - 가열 운전시 RCS 온도 증가에 의한 냉각재 체적 팽창시
 - 냉각 운전시 RCS 온도 감소에 의한 냉각재 수축을 보상하기 위해 충전유량 증가로 가압기 수위를 증가시킬 때
 - 체적제어탱크 상부 가스를 질소로 치환하기 위해 충전 및 유출 유량을 증감시켜 체적제어탱크 수위 증감 운전을 수행할 때
 - 가압기 증기기로 제거를 위해 충전유량 증가로 가압기 수위를 증가시킬 때
- 큰 ΔT 유발 운전조건
 - 고온대기에서 고온정지까지 냉각 운전중 과도한 과냉각도 유지. 즉, 가압기의 고온 유지
 - 낮은 RCS 온도에서 체적제어탱크 상부 가스를 질소로 치환
 - 낮은 RCS 온도에서 가압기 증기기로 제거

나. In/outsurge 과도상태 완화 대책

① 연속적인 Outsurge 유량의 형성

In/outsurge 사이클에 의한 가압기 하부 헤드의 열충격을 완화하기 위해서는 발전소 가열 및 냉각 운전중에 가압기 전열기를 모두 켜서 항상 Outsurge 유량이 형성되도록 하여야 한다. 그러나 각 발전소 가열 및 냉각 운전절차서에는 연속적인 가압기 Outsurge 유량을 형성하도록 하는 운전지침이 포함되어 있지 않다. 운전상태별 Outsurge 유량 형성의 기본 개념은 다음과 같다.

- Outsurge 유량형성 공통 개념
 - 가압기 보조전열기를 모두 켜 둬.
 - 밀림관 온도가 항상 가압기 포화온도 근처인지 확인
- 가열 운전시
 - 온도상승에 따른 냉각재 체적 팽창분을 충분히 배출하여 가압기 수위가 증가하지 않도록 순 유출유량을 조절
- 냉각 운전시
 - 온도감소에 따른 냉각재 체적 수축분을 충분히 보상하여 가압기 수위가 감소하지 않도록 순 충전유량을 조절
- 가압기 수위를 증가시킬 때
 - 가압기 압력유지가 가능한 최대 살수유량을 범위내에서 순 충전유량을 증가(순 충전유량 < 살수유량)

체적제어탱크 수위 증감에 의해 수소를 질소로 치환하는 운전은 가압기에 In/outsurge를 반복하여 유발하므로 대신 체적제어탱크에서 기체폐기물처리계통으로 연속 배기에 의해 수소를 질소로 치환하는 방법으로 운전을 개선하여야 한다. 이 경우 치환에 걸리는 시간이 다소 증가할 수 있다.

② 가압기와 고온관의 최대 ΔT 최소화

RCS 가열 및 냉각 운전중에 연속적인 가압기 Outsurge 유량을 형성하는 것이 In/outsurge 사이클에 의한 가압기 하부 헤드의 열충격을 완화하는 최선의 방법이다. 그러나 특정 운전조건을 확립하기 위해 부득이한 경우나 기기의 불시 오동작에 의해 Insurge가 발생하는 경우 하부 헤드에 대한 열충격이 최소화 되도록 모든 운전 조건에서 가압기와 고온관 사이의 ΔT를 최소로 유지하는 것이 중요하다. 각 발전소 가열 및 냉각운전 절차서에서 ΔT가 In/outsurge에 의한 하부 헤드의 열충격 제한값 80°F를 초과 또는 초과 가능한 운전 모드와 이에 대한 대책은 다음과 같다.

RCS 가열 및 냉각 운전

RCS를 가열하거나 냉각할 때에는 적절한 RCS 압력 유지를 통해 과냉각도를 확보함과 동시에 가압기와 고온관 사이의 온도차를 줄여 부득이한 Insurge 발생시 가압기 하부 헤드의 열충격을 최소화하여야 한다. 그러나 RCS 가열 및 냉각에 따라 유지하여야 할 가압기 압력이 50°F의 과냉각도 유지를 위해 하한선만 명확히 기술되고 상한선에 대해서는 명확히 언급되어 있지 않아 필요 이상으로 높게 유지함으로써 높은 ΔT를 유발할 수 있다. [표-4]는 각 발전소의 가열 및 냉각시 RCS 압력 유지기준을 비교한 것이다.^[7, 8, 9, 10]

가열 및 냉각운전시 가압기와 유로의 ΔT를 최소화 하기 위해서는 RCS 온도 대비 과냉각도 즉, 압력을 과도하게 높게 유지하지 않도록 절차서에 다음 주의사항을 추가하는 것이 필요하다. “가열 및 냉각운전중 RCS 압력은 과냉각도가 50~80°F 이내로 유지되도록 조절해야 한다.”

[표-4] 가열 및 냉각시 RCS 압력 유지 기준

	가열 및 냉각시 RCS 압력 유지 기준
고리 1, 2호기	<ul style="list-style-type: none"> ○ RCS 온도-압력곡선에 따름 ○ RCS와 SG 압력차 < 1600 psid ○ RCS 과냉각도 > 50°F 유지
고리 3, 4호기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기술지침서상의 “운전허용 온도-압력곡선”에 따름 ○ RCS와 SG 압력차 < 1600 psid ○ PZR 기포존재시 온도 > 고온관온도 + 50°F
영광 1, 2호기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기술지침서상의 “운전허용 온도-압력곡선”에 따름 ○ RCS와 S/G 압력차 < 1600 psid ○ PZR 기포존재시 온도 > 고온관온도 + 50°F
울진 1, 2호기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기술지침서상의 “운전허용 온도-압력곡선”에 따름. 단, 곡선상에 최대 (P_{sat}, T_{sat} - 90°F) 및 최소 허용치(P_{sat}, T_{sat} - 200°F)가 표시되어 있음. ○ RCS와 S/G 압력차 < 1600 psid ○ PZR 기포존재시 온도 = 고온관온도 + (90~200)°F

RCS 수소 제거를 위한 체적제어탱크 수위 증감 운전

원자로 정지후 핵연료 재장전을 위해 RCS 개방이 요구될 때는 작업자의 방사선 쏙임 및 수소의 폭발 방지를 위해 냉각재의 용존수소 농도를 정상운전시의 25-50 cc/kg(at STP)에서 5 cc/kg 이하로 낮추어야 한다. 이것은 체적제어탱크의 상부 가스를 수소에서 질소로 변경한 후 수위 감소를 통해 질소를 받아들이고 다시 수위 증가를 통해 수소를 배출하는 운전 방식을 취하게

되는데 RCS의 산화원상태 유지를 위해 통상 RCS온도가 300°F(150°C) 도달시 수행하게 된다. 이 경우 가압기 온도는 원자로냉각재펌프(RCP) 운전압력 350 psig에 해당하는 포화온도 430°F가 되며 ΔT 는 130°F에 달한다. 이 ΔT 는 In/outsurge에 의한 가압기 하부 헤드의 열충격 제한값 80°F를 초과함은 물론 체적제어탱크 수위 증감 운전을 위해 충전 및 유출유량을 조절하는 과정에서 In/outsurge를 반복적으로 유발하여 가압기 하부 헤드의 열충격을 유발하게 된다.

이에 대한 대책은 체적제어탱크 수위 증감 운전에 의해 수소를 배기하는 대신 기체폐기물처리계통으로 연속 배기하면서 수소를 질소로 치환하도록 운전하는 것이다. 이 방법은 In/outsurge 자체가 발생하지 않으므로 큰 ΔT 조건에서도 수행이 가능하다.

가압기의 기포 제거 운전

가압기내에 기포를 형성할 때에는 가압기로부터 유로측으로 Outsurge가 형성되어 Insurge에 의한 하부 헤드의 열충격 영향이 없으나 기포를 제거할 때에는 가압기의 수위를 증가시켜야 하므로 충전유량의 증가에 의해 부득이하게 Insurge 현상이 발생하게 된다. 가압기의 기포는 RCP가 운전중인 상태에서 제거해야 하므로 이 시점의 RCS 압력은 RCP 운전에 필요한 350 psig 정도이고 가압기 온도는 430°F이다. 일부 발전소는 RCS 온도가 저온정지 상태인 180°F에서 기포 제거운전을 함으로써 가압기와의 ΔT 가 250°F에 도달하게 되고 Insurge 발생시 하부 헤드에 미치는 열충격이 심각하게 된다. 발전소별 가압기 기포 제거 시점과 최대 ΔT 는 다음 [표-5]와 같다.

가압기 기포 제거 운전시 최대 ΔT 를 나타내는 고리 3, 4호기와 영광 1, 2호기의 경우 Insurge에 의한 가압기 열충격을 최소화하기 위해 고리 1, 2호기나 울진 1, 2호기에서 사용하는 방법과 같이 RCS 온도 266°F~300°F에서 가압기 기포 제거운전을 종료할 수 있도록 관련 절차서의 개정이 필요하다. 이 경우 최대 ΔT 는 130~164°F로써 Insurge시 하부 헤드의 열충격을 감소시킬 수 있다. 이와 함께 가압기 기포 제거를 위한 수위 상승시 살수유량률 이내로 순 충전유량을 유지함으로써 Outsurge가 일어나도록 하는 것이 중요하다.

[표-5] 발전소별 가압기의 기포 형성 또는 제거시의 온도와 압력

	K-1	K-2	K-3, 4	Y-1, 2	U-1, 2
기포제거 운전시점의 RCS 온도	300 °F	266~300 °F	180 °F	180 °F	266 °F이상
기포형성/제거시의 RCS 압력	350 psig	350 psig	350 psig	350 psig	350 psig
기포형성/제거시의 가압기 온도	430 °F	430 °F	430 °F	430 °F	430 °F
기포제거시 RCS/가압기 최대온도차	130 °F	130~164 °F	250 °F	250 °F	164 °F이하

③ Insurge 발생시 역 Outsurge 유량 형성방지

냉각 및 가열 운전중 Insurge가 확인되면 기술지침서에 따라 30분 이내에 제한치 내로 온도를 낮추기 위해 Outsurge 유량을 형성할 수 있다. 그러나 이 Outsurge 유량은 또 다른 단계적 온도 증가를 초래하여 하부 헤드에 이중의 열충격을 유발하게 된다. 따라서 Insurge 발생시 열성충화 경계면이 더 이상 상부로 이동하거나 Outsurge 되지 않고 그 위치에서 장시간 유지하여 열평형 상태를 회복하도록 충전 및 유출 유량을 조절해 가압기 수위를 유지하고 모든 전열기를 켜

주어야 한다. 이러한 내용이 가열 및 냉각 운전절차서의 주의사항으로 추가되어야 한다.

5. 결 론

In/outsurge에 의한 가압기 하부 헤드의 열충격은 설계시 고려되지 않은 새로운 과도현상이다. 본 연구에서는 이러한 과도현상을 방지하여 설계수명 동안 가압기의 구조적 건전성이 유지될 수 있도록 운전측면의 두 가지의 세부적인 완화전략을 제시하였다. 하나는 가열 및 냉각운전 중에 항상 Outsurge 유량이 형성되도록 가압기를 운전하는 것이고, 다른 하나는 만일의 경우 Insurge가 발생했을 때 그 영향을 최소화하기 위해 가압기와 유로의 최대 ΔT 를 최소화하는 것이다. 본 연구에서는 또한 웨스팅하우스형 발전소의 가열 및 냉각 운전절차서를 검토하여 In/outsurge 과도상태를 유발할 수 있는 운전상태와 이를 개선하기 위한 운전 방법 및 절차서의 개선점을 제시하였다.

운전측면의 완화 대책 이행과 더불어 잔여 수명기간 동안 In/outsurge 과도상태의 발생을 감시하고, 새로운 가압기 설계기준 과도상태를 정의하여 향후 파괴 및 피로측면의 가압기 구조적 건전성을 평가할 수 있는 프로그램의 개발이 요구된다. 본 연구에서 살펴본 바와 같이 일련의 WOG 가압기 프로그램에 의해 기 확립된 구조적 건전성 평가 방법론을 이용할 경우 이러한 프로그램은 보다 유용하게 개발될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 운전측면의 완화 전략은 지금까지 운전원들이 경험하지 못한 운전 방법으로써 고도의 주의와 운전 기술이 요구되는 부분이다. 따라서 시뮬레이터를 이용하여 본 전략의 반복 실습을 통해 In/outsurge 과도상태에 따른 열충격을 방지하고 구조적 건전성을 유지함으로써 가압기의 수명관리에 효과를 거둘 수 있을 것이다.

참고자료

- [1] Westinghouse Owners Group, "Operating Strategies for Mitigating Pressurizer Insurge and Outsurge Transients", WCAP-13588, March 1993.
- [2] Westinghouse Owners Group, "Mitigation and Evaluation of Pressurizer Insurge and Outsurge Transients", WCAP-14950, February 1998.
- [3] Westinghouse Owners Group, "Evaluation of the Effects of Insurge and Outsurge Out-of-Limit Transients on the Integrity of the Pressurizer Program", WCAP-14717 Revision 1, August 1998.
- [4] Korea Electric Power Corporation, "Kori Units 1, Final Safety Analysis Report"
- [5] Korea Electric Power Corporation, "Kori Units 2, Final Safety Analysis Report"
- [6] Korea Electric Power Corporation, "Korea Nuclear Units 3 & 4, Final Safety Analysis Report"
- [7] 한국전력공사 고리원자력본부, "고리원자력 1, 2호기 운전절차서"
- [8] 한국전력공사 고리원자력본부, "고리원자력 3, 4호기 운전절차서"
- [9] 한국전력공사 영광원자력본부, "영광원자력 1, 2호기 운전절차서"
- [10] 한국전력공사 울진원자력본부, "울진원자력 1, 2호기 운전절차서"