

영광 3,4호기 증기발생기의 취출 유량과 조치준위 수질과의 상관관계  
The Relative Analysis between Blowdown Rate and Action Level Chemistry  
Specification in The Steam Generator of YGN 3,4

성기방, 양준석, 유기완, 정우태, 김범년  
은희현\*, 이봉주\*, 이해복\*\*

한국전력공사  
전력연구원, 영광원자력본부\*, 원자력교육원\*\*  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소의 증기발생기 취출계통은 화학약품 주입설비와 연계되어 증기발생기의 수질을 조절하고, 불순물을 제거하는데 사용된다. 그 외에도 설계기준 핵연료 손상과 동시에 증기발생기 1차측에서 2차측으로의 실계기준 전열관 파단누설이 발생했을 때, 2차측 방사능 준위를 90% 수준으로 낮출 수 있는 등의 설계 조건을 만족시킬 수 있도록 설계되었다. 이에 따라, 운전상황에 맞추어 정상, 비정상 및 고취출 유량 모드로 운전하고 있으며, 이중 정상운전모드는 취출률이 0.2%, 비정상운전은 1.0%로 설정되어 있는데, 수질관리와 열손실의 최소화하는 최적 운전이 필요하다. 즉, 급수중의 불순물 농도와 증기발생기 수질이 연동된 취출 유량을 평가함으로써 정상운전시의 최적 수질관리와 정확도를 할 수 있는 취출량을 평가하고자 하였다. 평가결과, 정상운전유량인 0.2% 취출 운전으로는 증기발생기 수질만족이 안되었고, 정상운전시의 최적 취출 유량률은 약 0.7% 정도로 수질 비정상시 취출 유량인 1.0%보다 낮았다. 또한, 증기발생기 유체의 물질수지식으로부터 각 SG 영역의 농도관계식을 수립하였으며, 이들 관계식으로부터 재순환비(R)의 화학성분 측정값은 SG 열수력해석 코드인 CRIBE로 얻은 값, 즉 설계값 2.8보다 적은 1.0 정도였다.

Abstract

The steam generator blowdown system(SGBDS) is used in conjunction with the chemical feed portion of the feedwater system and the condensate polishing demineralizer system to control the chemical composition and solids in the feedwater, and is capable of maintaining the chemical purity of the SGBDS discharge within secondary-side water limits. To maintain SG secondary-side water chemistry criteria, a continuous blowdown from both steam generators is in effect under normal operating conditions and an abnormal operating conditions like the event of condenser water leakage. In case of primary to secondary leakage, the blowdown rate from the non-leaking SG can remain in the normal operating range, while the blowdown rate from the leaking SG may be increased to maintain the secondary radioactivity level below the technical specification limit. To satisfy the conditions, there are three operating modes: normal, abnormal and high capacity blowdown rate. The normal continuous blowdown rate is 0.2% and the abnormal blowdown rate is 1.0%. But the normal blowdown rate can not satisfy the chemistry condition. Therefore, the optimal blowdown rate should be analyzed and determined to reduce the heat loss and to increase the water quality. The calculated normal blowdown rate is 0.7% but actual rate is about 1.0%, and the measured recirculation ratio(R) is about 1.0 than 2.8 which was obtained by the CRIBE.

## 1. 서 론

영광 원자력 3,4호기의 증기발생기 취출계통은 주급수 계통의 화학약품 주입설비 및 복수탈염기 계통과 연계되어 <표 1 > 급수의 화학적 성분을 조절하고 불순물을 제거하는데 사용된다 <표 2 >, 설계기준에는 정상취출운전시 각 증기발생기에서 급수의 1.0%에 해당하는 63,600 lbm/hr의 유량을 취출하여 처리할 수 있으며, 2대의 증기발생기에서는 총 127,200 lbm/hr의 유량을 처리할 수 있는 유량을 가진다. 계통용량은 1대의 증기발생기에서 연속취출운전 (63,600 lbm/hr) 및 다른 1대의 증기발생기에서 고유량 취출운전을 동시에 할 수 있도록 설계되었다. 이외에도, 설계기준 핵연료 손상과 동시에 증기발생기의 1차측에서 2차측으로 설계기준 전열관 파단누설이 발생했을 때, 증기발생기 2차측 용수의 방사능 준위를 90% 수준까지 낮출 수 있도록 설계되었고, 1차측으로부터 2차측으로의 전열관 파단사고시 손상이 안된 증기발생기는 정상운전범주로 취출량을 유지하며, 반면에 손상된 증기발생기는 2차측 방사능 준위를 운영기술지침서 제한치 이내로 유지하기 위해 취출량을 증가시키도록 설계되었다. 또한 주기적인 고유량 취출운전으로 증기발생기 관판상부에 축적된 찌꺼기를 제거함으로써 2차측 수질을 좀더 높이도록 한다. 그러나, 정상취출 운전유량인 0.2% 취출유량으로는 증기발생기의 수질을 제한치 이내로 유지하기가 현실적으로 어려우며, 실제로는 정상 운전 유량보다 높은 범위에서 운전하여야 한다. 이러한 이유를 증기발생기내의 유체흐름을 고려하여 취출유량을 재해석하고자 하였다.

## 2. 영광 3,4호기 증기발생기 취출계통의 기능

발전소 정상운전동안 연속 취출유량은 정상운전모드에서 각각의 증기발생기에 대해 급수의 0.2%유량인 12,700 lbm/hr, 총 25,400 lbm/hr 이 유지된다. 그러나, 증기발생기 수질이 지침요건을 초과할 때는 비정상운전모드인 연속취출수 유량을 급수의 1.0%에 해당하는 각 증기발생기로부터 63,600lbm/hr, 총 127,200lbm/hr으로 증가시킬 수 있다. 고유량 취출운전은 증기발생기 관판에 축적된 찌꺼기를 제거하기 위하여 각 증기발생기로부터 최대 1,060,000lbm/hr, 혹은 저온판이나 고온판을 통해서 528,120lbm/hr의 유량을 추출하며, 일주일에 한번 또는 필요시에 운전된다. 비정상 취출은 고유량 취출을 수반하며, 증기발생기의 수질이 <표 2>의 수화학지침에 도달할 때까지 계속된다. 증기발생기 2차측 관판하부에 침적되는 슬러지를 제거하기 위해 2분동안 유지되는 고유량 취출수는 고유량 취출수 탱크에 수집되며 탱크의 압력은 탱크배기관에 설치된 압력조절밸브에 의해 185 psig로 일정하게 유지된다.

핵연료 손상과 동시에 증기발생기의 1차측에서 2차측으로 설계기준 전열관 파단누설이 발생했을 때, 증기발생기 2차측 용수의 방사능 준위를 90% 수준까지 낮출 수 있도록 설계되어 있다. 주복수기 세판누설과 동시에 여과기나 탈염기의 하단부에서 고염소 농도가 감지되는 사고시 취출수를 폐수처리계통으로 방출할 수 있다.

## 3. 영광 4호기의 증기발생기 취출유량에 따른 수질 변화

영광 3,4호기의 CE형 증기발생기는 Hot Leg과 Cold Leg사이의 분리판에 의해 양쪽 구역이 서로 분리되었고 급수는 Cold Leg 하부영역으로 10% 정도가 공급되므로 불순물 농도는 증기발생기 상부의 Downcomer에서 높게 나타난다. 그러나, 복수탈염 설비의 수질에 따라 증기발생기의 수질을 만족시키기 위해서는 연속 취출해야 하는 설계유량이 0.2 %로 적다. 따라서, 증기발생기 취출물별 불순물 거동 및 농도 변화추이를 분석, 평가하여 증기발생기 전열관 부식환경을 만족시키면서, 즉 수질기준을 만족하면서 발전소 열효율 향상과 안정적 출력운전에 적합한 취출방법 및 유량 결정(Blowdown Rate) 시험을 영광 4호기를 대상으로 수행하였다.

< 표 1 > 영광 3,4호기 복수탈염계통 수화학 설계기준

수질 항목	Na	Cl	SiO <sub>2</sub>	Cation Cond.	Fe	S.S	pH	SO <sub>4</sub>
단위	ppb	ppb	ppb	μs/cm	ppb	ppb	-	ppb
제한치	≤ 1.0	≤ 0.15	≤ 1.0	≤ 0.1	≤ 1.0	≤ 1.0	6.8-7.2	≤ 0.2

< 표 2 > 증기발생기 2차 계통수에 대한 운전중 화학조건 제한치

수질 항목	Na	Cl	SiO <sub>2</sub>	Cation Cond.	pH	SO <sub>4</sub>	
단위	ppb	ppb	ppb	μs/cm	-	ppb	
정상 제한치	≤ 20	≤ 20	<300	≤ 0.8	≥ 9.0	≤ 20	
조치 준위	1	> 20	> 20	--	> 0.8	< 9.0	> 20
	2	>100	>100	--	> 2	--	>100
	3	--	--	--	> 7	--	

< 표 3 > 영광 4호기 취출물 시험일정 및 분석항목

B/D Rate(%)	시 험 시 간	시료채취점	분석 항목	분석주기
1.0 (28.5 t/SG/hr)	7/25 10:00 ~ 7/26 10:00	4호기S/G H/L, C/L 및 D/C	양이온전도도 Sodium(Na) Chloride(Cl) Sulphate(SO <sub>4</sub> )	1회/Shift
0.8 (22.5 t/SG/hr)	7/26 10:00 ~ 7/27 10:00			
0.6 (17.0 t/SG/hr)	7/27 10:00 ~ 7/28 10:00			
0.4 (11.5 t/SG/hr)	7/28 10:00 ~ 7/30 10:00			
0.7 (20.0 t/SG/hr)	8/21 10:00 ~ 8/30 11:00			

< 표 4 > 영광 3,4호기 및 Palo Verde 원전의 취출설비 설계사양 비교

구 분	영광 3,4호기	Palo Verde II	비 고
Normal B/D	0.2%(5.7 t/hr)	0.2% (7.6 t/hr)	- Palo Verde II는 Normal B/D (0.2%) 및 TBN GOV 시험시 HCBBD를 1회/주 실시 - 영광2발의 경우 0.2 ~ 1% 가변 운전이 가능하지만, Palo Verde II는 0.2% 또는 1%만 선택할 수 있음
Abnormal B/D	1%(29 t/hr)	1% (39 t/hr)	
HCBBD(High Capacity Blow Down)	4%(120 t/hr):고온관 8%(240 t/hr):저온관	7.6% (296 t/h) -	

< 표 5 > 영광 3,4호기 증기발생기 취출 운전이력

구 분	시운전 기간	상업운전 이후	비 고
취 출 율 (%)	1 %	1 %	High Capacity Blow Down ( HCBBD )시 발전소 출력운전이 불안정하여 시행하지 않고 있음
복수탈염기 운전	100 % (4대)	50 % (2대)	
운전 선택사유	배관 방청제에서 용출되는 인산이온 및 미지 불순물 제거	Blowdown Rate시험 결과, 인산염 용출이 거의 없어 CPP운전을 감소시킴 (주1)	

(주1) 증기발생기 Blowdown Rate Test 결과 ('95. 2. 7 ~ 2. 17)

- 0.2% 에서는 14시간만에 Action Level I 도달 (양이온전도도: 0.8  $\mu\text{s/cm}$ )
- 0.5~0.6% : 양이온전도도가 서서히 증가하고, 0.8%시 변동 없고 1%에서 감소추세로 나타남

#### 국내 원전의 취출유량 비교 현황

증기발생기 취출률은 제작사에 따라 정상 : 0.1 ~ 1.0%, 최대 : 0.3 ~ 3.3%로 설계되었지만, 설계유량이 적은 원전에서는 최대 취출유량으로 운전( ~1%)함으로써 정상운전시 취출률은 <표 6>에서와 같이 0.8 ~2.2%를 유지하고 있는 실정이다.

#### 4. 증기발생기 취출률 시험결과

상업운전후 처음 실시한 증기발생기 Blowdown Rate Test('95. 2. 7~2. 17)는 증기발생기 Hot Leg측을 대상으로 실시하였지만, 이번 시험에서는 보다 정밀한 시험을 위하여 증기발생기 부위별 (H/L,C/L,D/C) 불순물농도 및 부식환경을 평가하였다. 또한 0.7% (20톤/hr)에서 운전여부 타당성 검토를 위하여 운전조건 변화에 따른 수질변화 시험운전을 10일간 실시하였으며, 주요 내용은 다음과 같다

< 표 6 > 국내 원전의 취출유량 비교 현황

호 기	급수량(T/hr)	Blowdown 량 (T/hr)			Blowdown Rate (%)		
		설계량		실제량	설계량		실제량
		최대치	정상치		최대치	정상치	
고리 1호기	3600	30	4.4	30	0.83	0.12	0.83
2호기	3600	60	24.6	60	1.67	0.68	1.67
3호기	5700	189	57	45	3.32	1.00	0.79
4호기	5700	189	57	45	3.32	1.00	0.79
영광 1호기	5700	189	57	108	3.32	1.00	1.89
2호기	5700	189	57	126	3.32	1.00	2.21
3호기	6400	58	11.8	58	0.91	0.18	0.91
4호기	6400	58	11.8	58	0.91	0.18	0.91
울진 1호기	5400	50	20	50	0.93	0.37	0.93
2호기	5400	50	20	50	0.93	0.37	0.93
월성 1호기	3600	11	3.7	7	0.31	0.10	0.19

\* 영광3,4호기는 B/D 설계량이 적은 대신에 HCBD를 1회/주 수행하도록 설계됨

#### 가. 증기발생기 취출률 0.2%에서 Action Level I 도달 가능성 시험.

Hot Leg에서 취한 수질기준으로는 Downcomer에서 취한 시료중의 농도보다 Action Level I 발생 가능성이 적으며, 시운전단계인 '95년에 방청제로 사용된 인산염계 약품으로 인해 Hot Leg 양이온전도도가 Action Level 1 에 14시간동안 도달한 경험이 있다. 그러나 0.2% 취출유량 시 Downcomer에서 Na이 Action Level 1(20ppb)에 도달될 것으로 나타났다. 그리고, 0.4% 취출유량에서의 Na농도는 4.7/17.1 ppb(HL/DC)이었고, 0.2% 취출시험은 Action Level 방지를 위하여 실시하지 않았다.

#### 나. 불순물별 변화추이 평가

증기발생기 취출유량 감소시 Hot Leg보다 Downcomer 불순물 농도가 20~30% 빨리 증가하고, 동일 취출률에서는 Downcomer 농도가 2.1~3.6배 높았으며 불순물 변화추이는 다음과 같

았다.

(1) 양이온전도도

인산염에 의한 양이온전도도 상승 현상은 거의 없었으며, 취출률 0.4%에서는 H/L와 D/C가 0.13/0.32  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이었다<그림 1>, H/L보다 D/C가 2.1 ~ 2.4배 높았으며, 당시에 약품순도 불량, 파쇄수지 또는 공기유입은 없는 것으로 평가되었다.

(2) Na 이온

취출률 0.4%에서 Downcomer Na농도가 매우 높았고 <그림 2> , 0.2% 운전시 Action Level I (20ppb) 도달할 것으로 예상되었다. 또한, H/L 대비 Down Comer가 2.8 ~ 3.6배 높고, 증가 속도가 빨랐다. 선행호기보다 Na가 높은 것은 SG의 구조적인 문제점이며, 복수탈염설비의 미량 Na Leak로 단기간에 개선될 수 없을 것으로 보인다.

(가) 증기발생기 설계 특성 및 수질 검토

Economizer Divider Plate로서 Hot Leg과 Cold Leg이 분리되고 급수는 Cold Leg으로만 공급 되므로써, 불순물이 Cold Leg에서는 농축되지 않아 다른 SG모델에 비해 Hot Leg 및 Down Comer의 불순물이 약 2배 높은 것으로 보인다. 또한 불순물 유입시 정화속도는 타 모델의 1/2 ~ 1/3 수준(경험으로 추정)에 불과하여 증기발생기 전열관 부식환경이 열악함

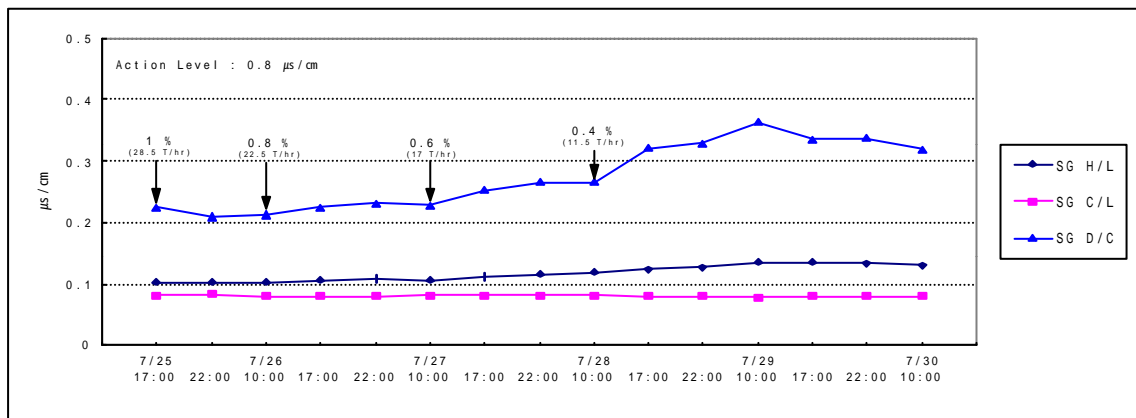
(나) 이온교환수지의 Na Leak 문제

이온교환수지의 Na선택도는 다소 낮아서 복수탈염설비 및 순수생산설비의 이온교환수지에서 미량의 Na가 Leak (~0.05ppb)되어 증기발생기에서 1.0% 취출시 100배, 0.2% 취출시 500배 농축되는 것은 모든 원전의 증기발생기 수질관리 문제로서 기술적 한계이다. 다만, 이온교환수지에서의 저농도 Na 흡착 이론을 이해하고, 많은 현장운전 경험을 반전시키고 시행착오를 줄여서 Na Leak를 다소 완화할 수 있을 것으로 보인다.

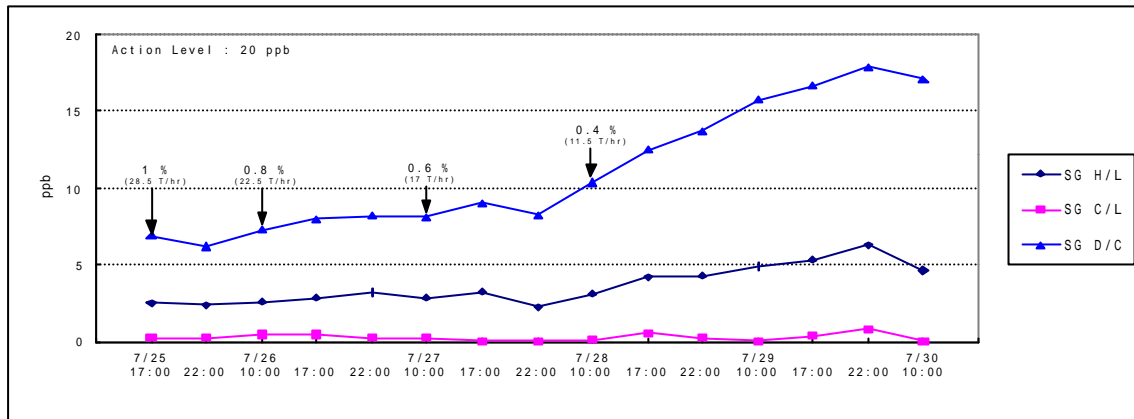
(다) 복수탈염설비 운전

복수탈염설비 이온교환수지의 Na Leak에 의하여 운전대수 증가시 증기발생기의 Na농도도 증가하는데, 영광 4호기 복수기 누설로 복수탈염기 전량 (4대) 운전후 2대로 감량운전하면서, 동일 Vessel 혼상탈염기 (#7, #8) 운전기간중 ('97. 6. 2 ~ 8. 2) 증기발생기 Na농도는 다음과 같이 운전대수에 반비례하였다. 즉, 취출유량에 의해 정화되는 비율보다 Na leak 량이 더 많았다.

- 4대 운전 ('97. 6. 2 ~ 6. 5) : 4.9 ~ 6.1 ppb
- 3대 운전 ('97. 6. 6 ~ 6.18) : 2.9 ~ 3.3 ppb
- 2대 운전 ('97. 6.19 ~ 8. 2) : 1.9 ~ 2.5 ppb



<그림 1> 증기발생기 양이온전도도 변화추이



<그림 2> 증기발생기 나트륨 이온(Na) 변화추이

### (3) Cl 이온

취출률 0.4%에서 H/L 및 D/C의 Cl농도는 3.21 / 9.18 ppb이었고 <그림3>, 취출률 감소시 Na과는 반대로 Hot Leg과 Down Comer의 농도 편차가 3.5배에서 2.8배로 감소하였다. Cl 이온은 수처리 약품 중에 존재하는 극미량이 증기발생기로 유입, 농축(50 ~ 100배)된 것으로 추정되므로, 저감은 어려울 것으로 보인다.

### (4) SO<sub>4</sub> 이온

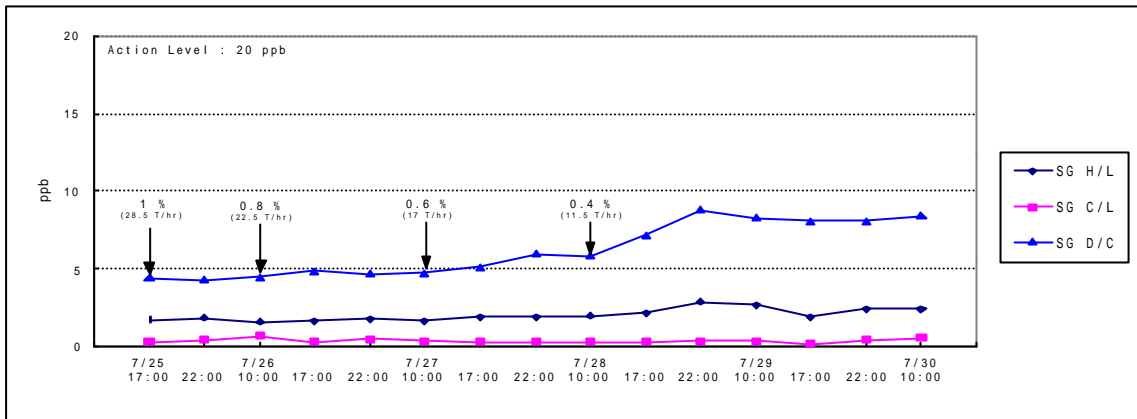
취출률 0.4%에서 H/L 및 D/C의 SO<sub>4</sub>는 2.37 / 8.41 ppb <그림4>이었다. 취출률 감소시 1% 대비 1.5배/1.9배 (HL/DC) 증가되었고, Na이나 Cl보다는 적게 농축되었다. 이는 SO<sub>4</sub>의 높은(60 ~ 90%) 잠복 (Hideout) 현상 때문으로 추정된다. SO<sub>4</sub>는 수처리 약품중에 존재하는 극미량이 유입되는 수준인 것으로 판단됨. 이는 일부 원전과 같은 보충수 저장탱크 가황고무막(공기 차단용 Membrane)에서의 SO<sub>4</sub>용출 현상이 없고, 복수탈염설비의 불완전 재생, 파쇄수지 유입에 의한 SO<sub>4</sub>증가 현상이 없어서 낮은 농도를 유지하는 것으로 판단된다.

### (5) PO<sub>4</sub> 이온

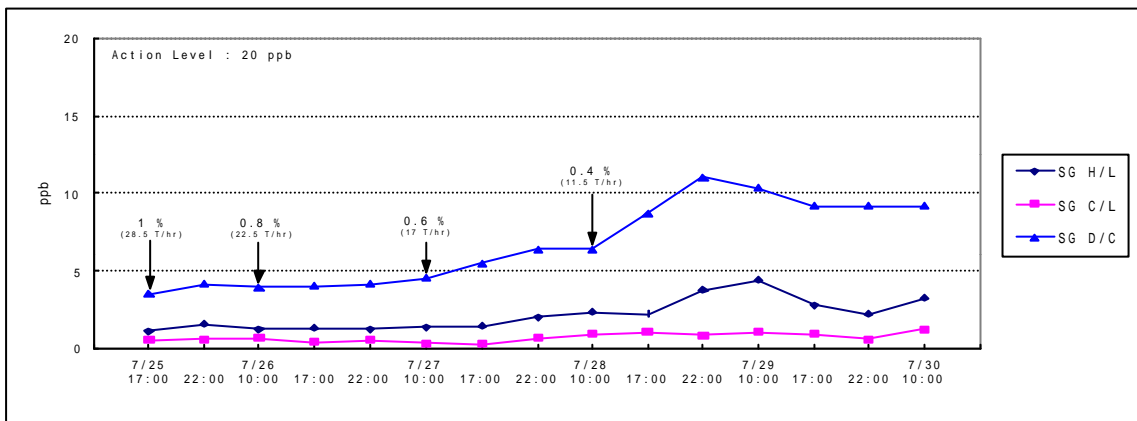
출력중 운전변수 변화시에만 PO<sub>4</sub>가 검출되고 통상은 H/L에서 검출 한계치(<1ppb) 이하였으나, 시험기간중 PO<sub>4</sub>가 검출된 후 약간 감소하는 경향이 있었다< 그림5 >. 인산이온(PO<sub>4</sub>)이 검출된 것은 시험중 노물리 시험(MTC시험)으로 TBN Governor Valve가 시험전, 후에 2~3회 미세 작동하여 대구경 배관에 도포된 방청제 일부가 증기발생기로 유입된 것으로 추정된다. 2차시험('97. 8.21 ~ 8.30) 기간중에는 Hot Leg에서 전혀 검출되지 않았고, Downcomer에서 간헐적으로 ~2 ppb 검출되었다.

### (6) 몰비 ( Molar Ratio )

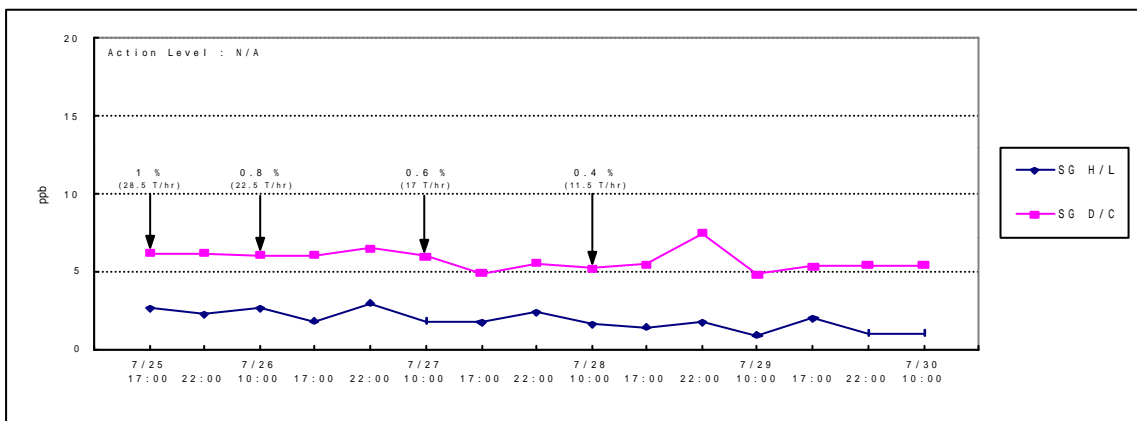
증기발생기 틈새 부식환경이 강산성 또는 알칼리성으로 되지 않도록 양이온/음이온 몰 비를 관리하는 것이 필요하다. 시험에서는 불순물 농도가 낮은 출력중에 측정하여 다소 부정확하지만, Na/Cl, Na/Cl+SO<sub>4</sub>는 알칼리성, Na/Cl+SO<sub>4</sub>+PO<sub>4</sub>의 몰 비는 중성(~1)으로 나타났다. <그림6, 7>. 취출률이 감소할수록 몰 비가 약간 개선된 것은 분석오차 또는 Cl보다는 Na의 잠복률이 높기 (EPRI 시험결과 Na : 20 ~ 30%, Cl : 10 ~ 20% 잠복) 때문으로 추정된다.



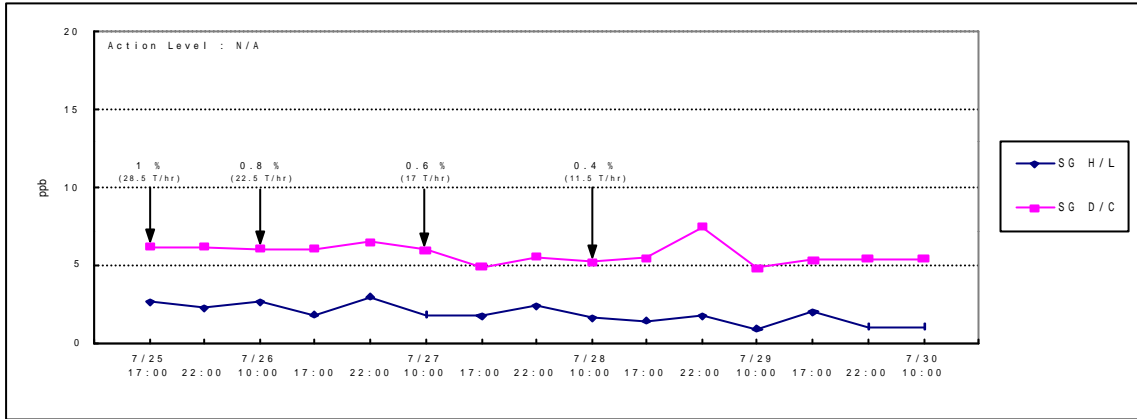
<그림 3> 증기발생기 염소이온 (Cl) 변화추이



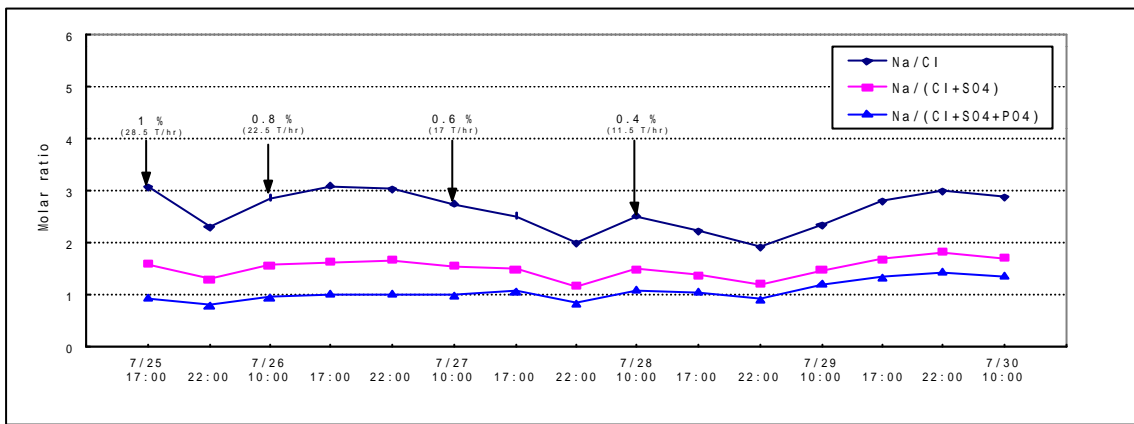
<그림 4> 증기발생기 황산이온 (SO<sub>4</sub>) 변화추이



<그림 5> 증기발생기 인산이온 (PO<sub>4</sub>) 변화추이



<그림 6> 증기발생기 Hot Leg Molar ratio(몰비) 변화추이



<그림 7> 증기발생기 Downcomer 몰비 변화추이

#### 다. 취출률 20톤/hr에서의 시험운전 결과

##### (1) 불순물 농도 비교

취출률 0.7% (20톤/hr)에서의 발전소 운전변화에 따른 수질변화 추이 분석은 10일간 실시되었다. 취출률 감소시험 (1%→ 0.4%) 종료시점에서 증기발생기 비재생열교환기 누설, 복수탈염설비 교체운전, 봉산회수계통(BAC) 및 액체폐기물 계통의 잦은 운전으로 수질이 불안정하여 1% 취출률로 약 20일 운전한 후에 0.7%로 취출시험을 실시하였다.

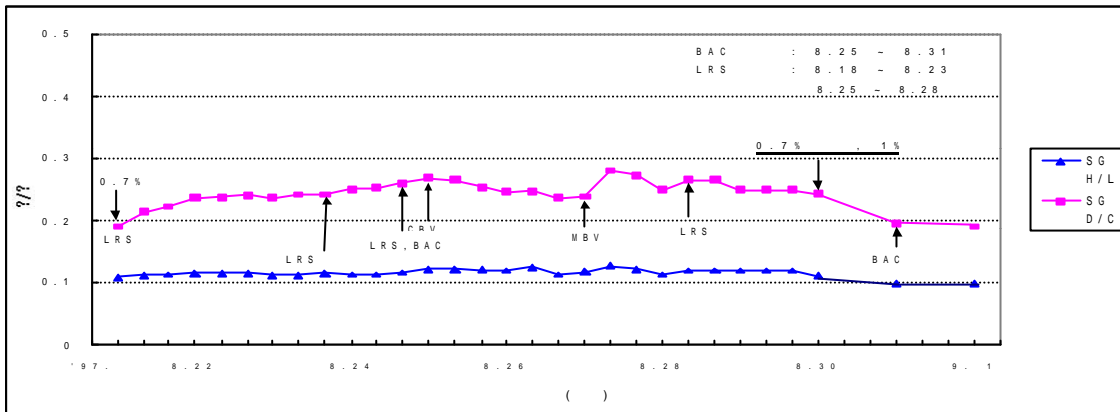
< 표 7 > 계통운전 변화가 적은 시험종료시점의 증기발생기 수질 분석값

구 분	SG취출률	양이온전도도 ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Na (ppb)	Cl (ppb)	SO <sub>4</sub> (ppb)
Hot Leg	1.0% (28T/hr)	0,097	2,6	1,2	2,1
	0.7% (20T/hr)	0,112	3,3	1,4	2,1
Downcomer	1.0% (28T/hr)	0,192	5,8	4,2	6,3
	0.7% (20T/hr)	0,240	8,8	4,9	7,0

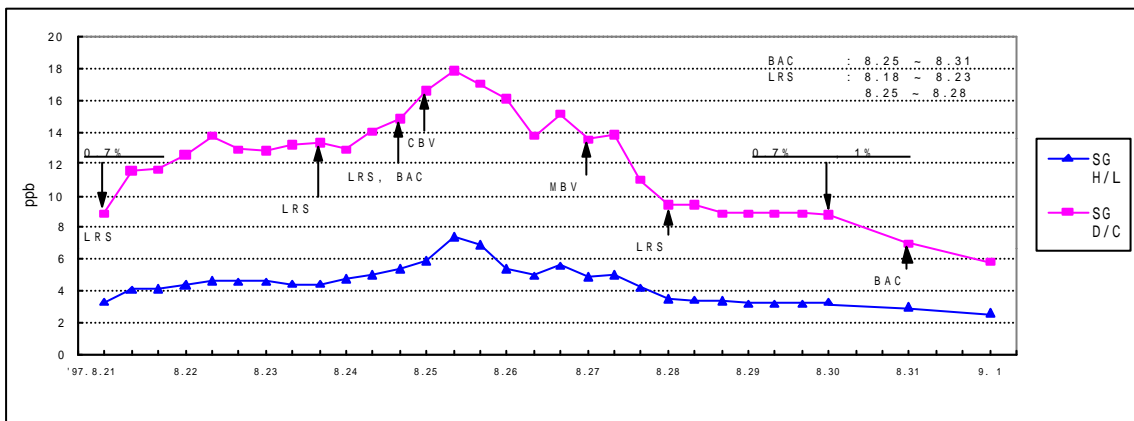


(2) 불순물 변화추이

취출률이 0.7% 감소시 양이온전도도, Cl, SO<sub>4</sub>는 약간 증가하였지만, Na는 발전소 운전조건에 따라 매우 민감하게 증가하였다. <그림 8>은 양이온전도도 변화추이로서 1% 대비 0.015 / 0.05  $\mu\text{s}/\text{cm}$  (HL/DC) 증가하였다. LRS 와 BAC의 운전시에는 전도도가 약간 증가하였고, 복수탈염 설비의 CVB교체시에는 변동 없었으나 MBV 교체시 0.05  $\mu\text{s}/\text{cm}$ (DC) 증가하여 취출률 0.7%와 1%운전의 큰 차이는 없었다. <그림 9>는 Na변화추이로서 정상조건시 1% 대비 0.7/3 ppb(HL/DC)증가하였지만, LRS 와 BAC 동시운전시 Downcomer에서 Action Level 1 수준인 20ppb에 근접하는 18 ppb까지 증가하였다. 시험종료후에 취출률 1%에서 LRS 및 BAC 운전이 정지되고 수질이 안정화된 9. 6일에는 1.8 / 4.2 ppb (HL/DC) 수준까지 감소되었다.



<그림 8> 증기발생기 양이온전도도 변화추이



<그림 9> 증기발생기 나트륨이온 (Na) 변화추이

5. 증기발생기내 유체 흐름 분석

영광 3,4호기형의 증기발생기내에서 왜 Downcomer 구역과 Hot leg 구역에서 취한 시료의 화학분석값이 크게 차이 나는가를 관계식을 수립하여 살펴보았다.

가. SG내 물의 물질수지(mass balance)식

평형조건인 정상운전에서 증기발생기에서 빠져나간 모든 증기는 터빈과 다단계의 열교환기를 거

친 후 다시 증기발생기로 유입된다. 따라서 증기와 취출수로 나간 물량과 급수로 되돌아오는 유량이 같으므로 다음 등식이 성립하고,

$$W_{water} + W_{BD} = W_{FW} \dots \dots \dots (1)$$

증기발생기 내부 재순환구역(Downcomer)에서는 습분분리기에서 재순환된 유량과 Downcomer 구역으로 유입되는 L 분률의 급수량이 합치므로 다음식을 얻는다.

$$W_{DC} = RW_{FW} + LW_{FW} = (R+L)W_{FW} \dots \dots \dots (2)$$

(영광 3,4호기의 경우, 100% 출력에서 L 값은 0.9 임)

그리고 증기발생기 관판(Tube Sheet)에서의 유량은 Downcomer에서 내려오는  $W_{DC}$  유량과 Cold Leg 구역으로 유입된 급수 유량  $(1-L)W_{FW}$  의 합에다 취출수 유량  $W_{BD}$  을 뺀 값이다. 즉,

$$W_{TS} = RW_{FW} + LW_{FW} + (1-L)W_{FW} - W_{BD} = (R+1)W_{FW} - W_{BD} \dots \dots \dots (3)$$

**나. SG내 비휘발성 물질의 물질 수지식**

또한 복수탈염기에서 제거되지 않은 다양한 불순물들은 급수와 함께 증기발생기로 유입된다. 불순물은 물에만 균질 상태로 녹아 있기 때문에 수지식을 다음과 같이 수립할 수 있다.

$$C_{BD}W_{BD} = C_{FW}W_{FW} \dots \dots \dots (4)$$

양변을 취출유량인  $W_{BD}$ 로 나누면 다음 등식을 얻으며, 급수중의 불순물 농도는 취출 유량에 반비례한다.

$$C_{BD} = C_{FW} \frac{W_{FW}}{W_{BD}} \dots \dots \dots (5)$$

즉, 급수유량과 취출유량은 잘 알려져 있으므로, 취출수의 화학 성분 분석값으로부터 급수에 있는 매우 낮은 농도의 화학 성분 농도를 계산할 수 있고, 낮은 농도여서 분석신뢰도가 떨어지는 급수의 화학분석값의 정밀도와 정확도를 평가할 수 있다.

영광 3,4호기 증기발생기의 시료채취는 고온관 취출수와 함께 Downcomer 구역에서도 시료채취할 수 있으며, 증기발생기 수질제한치 적용기준은 두 시료 분석값중 높은 값을 선택하도록 되어 있다. 그리고 Downcomer 구역에서 취한 시료중의 화학 성분은 증기발생기의 전열관에서 열을 받아 비등한 후 습분분리구역에서 증기는 분리되어 터빈을 구동하기 위해 빠져나갈 때 농축된다. 그 농축 비율은 다음과 같은 물질 수지에 의해 계산될 수 있다.

**다. Downcomer 구역에서 수지식**

증기발생기의 습분분리 구역인 Downcomer에서 취한 시료중에는 화학성분이 다른 영역에서 취한 시료보다 화학성분의 농도가 크다. 이는 증기발생기 관판 영역에서는 비등하지 않다가 전열관에서 가열되면서 습분분리기 영역까지 상승하게 되고, 물과 증기의 혼합된 유체를 습분분리기는 증기 건도가 99.75% 이상으로 습분을 분리시키기 때문에 증기에는 화학성분이 거의 존재하지 않는다. 따라서 간단히 습분분리되어 하강되는 재순환 유량중의 화학성분은 증기로 빠져나간 유량비만큼 농축되게 된다. 이러한 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.  $W_{DC}C_{DC} = RW_{FW}C_{DC}$  이고,

$$C_{DC} = \frac{W_{TS}C_{BD}}{RW_{FW}} = \frac{(R+1)W_{FW}C_{BD} - W_{BD}C_{BD}}{RW_{FW}} = \frac{(R+1-B)W_{FW}C_{BD}}{RW_{FW}} \dots \dots \dots (6)$$

이다.

증기발생기 Downcomer에서 채취한 화학 농도와 Blowdown에서 채취한 화학농도와의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{C_{DC}}{C_{BD}} = \frac{(R+1-B)W_{FW}}{RW_{FW}} = \frac{(R+1-B)}{R} \dots \dots \dots (7)$$

즉, 취출유량이 대개 급수 유량에 비해 0.2% ~ 1.0 % 로 매우 적어서 무시될 정도이므로 두 지역의 화학농도비는 대략 다음과 같다.

$$\frac{C_{DC}}{C_{BD}} = \frac{R+1}{R} \dots \dots \dots (8)$$

따라서, 재순환 증기발생기의 R 값은 1보다 크므로 Downcomer 구역의 화학성분 농도가 취출수에서 취한 것보다 높게 나타난다. 그리고 발전소 출력별로 재순환률 R 값은 변하며 일반적으로 100% 출력에서 R 값은 최소값을 갖는다. 즉, 발전소가 정상출력일 때가 두 지점에서의 농도비가 가장 적다. 위 값으로부터 모든 재순환형 증기발생기의 재순환비율을 측정할 수 있다.

참고 자료로, 영광 3,4호기의 재 순환률은 열수력해석코드인 CRIBE을 이용하여 0% 출력부터 102% 까지 계산했을 때 다음 < 표 8 >과 같다.

< 표 8 > 영광 3,4호기의 재순환비

출력 (%)	0	10	20	40	60	80	100	102
재순환률	0	26.9	16.6	8.9	5.7	3.9	2.8	2.7

- Normal water Level : 38.88 Ft, 100% power = 4824.0 x 10<sup>6</sup> Btu/hr

100% 정상운전시의 재순환률 계산값인 2.7을 위 식에 대입하였을 때 두 곳의 농도비는 3.8/2.8에서 1.358 정도 된다. 그러나 실제 측정값은 약 2~3 배 정도가 되는 것은 재순환비율이 계산값보다 적으며, 약 1 정도 된다는 것을 의미한다. 따라서 한국형 원전 증기발생기의 화학 분석값에 근거한 재순환비 측정값과 증기발생기 열수력해석에 의해 구한 재순환비 계산값과의 차이가 벌어지는 이유는 좀 더 연구할 분야라고 생각된다. 그리고, 취출수와 급수중의 화학성분의 상관관계식으로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$C_{BD} = C_{FW} \frac{W_{FW}}{W_{BD}} = \frac{C_{FW}}{B} \dots \dots \dots (9)$$

위 식을 대입하면,

$$\frac{BC_{DC}}{C_{FW}} = \frac{(R+1-B)}{R} \dots \dots \dots (10)$$

$$C_{DC} = \frac{(R+1-B)}{BR} C_{FW} \dots \dots \dots (11)$$

위 식에 따라 Downcomer에서 채취한 수질을 기준으로 할 때 증기발생기의 수질을 일정 수준으로 유지하고자 하는 급수중의 화학성분 준위를 결정할 수 있다.

위 식을 다르게 표현하면

$$C_{FW} = \frac{BR}{R+1-B} C_{DC} \dots \dots \dots (12)$$

이며, 일반적인 증기발생기의 화학조건 제한값은 20ppb 미만이고, 표에서 100% 출력에서 증기발생기의 재순환률은 약 2.7이다. 이를 식으로 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$C_{FW} = 20 \times \frac{2.8B}{3.8-B} \dots \dots \dots (13)$$

즉, 조치준위 1 이 되지 않기 위해서는 급수중의 화학 성분 농도는 취출수 유량비율에 따라 다음과 같이 주어진다.

< 표 9 > 조치준위 1을 피하기 위한 급수중의 화학물질, Na, Cl 및 SO<sub>4</sub>의 최저농도

취출 유량 (%)	0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	2.0	4.0	8.0
급수농도(ppb)	0	0.029	0.044	0.058	0.073	0.102	0.117	0.146	0.293	0.59	1.193

위의 <표 9> 따르면, 설계대로 정상운전시 조치준위를 피하기 위한 급수중의 Na 농도는 최소 0.029ppb이고, 취출유량이 0.7정도에서 수질기준을 만족하므로 급수중의 Na 농도는 약 0.1ppb 정도이다. 만약 영광 3,4호기의 복수탈염설비가 수질 설계기준값<표 1> 정도로 수질항목을 정화한다면, 수질항목별로 최소로 요구되는 유량은 가장 제한치가 높은 Na의 1.0 ppb 를 기준으로 하였을 때 약 7% 정도의 취출수를 정화시켜야 한다. 따라서 실제로 복수탈염기를 운전할때의 수질은 설계기준보다 낮추어서 운전하여야 할 것이다.

## 6. 결 론

한국형 원전의 시효인 영광 3,4호기의 증기발생기 취출유량 변화에 따른 증기발생기 내부의 수질변화를 실제 측정하여 살펴보고, 이들의 관계를 수식으로 정립하였다.

- 정상운전중의 증기발생기 수질에 미치는 불순물은 Na 이온이었으며, 유입원은 복수탈염설비의 양이온수지에서 Leak 되는 것으로 파악되었고, 수질이 안 좋은 주 원인이었다.
- 영광 3,4호기형의 증기발생기에서 조치준위 1 이 되지 않기 위한 최소의 급수중 화학 성분 농도를 관계식을 수립하여 유도하였다.
- 100% 정상운전시의 재순환률 계산값은 2.7을 위 식에 대입하였을 때 두 곳의 농도비는 3.8/2.8에서 1.357 정도 된다. 그러나 실제 측정값은 약 2~3 배 정도가 되는 것은 재순환비율이 계산값보다 적으며, 약 1 정도 된다는 것을 의미한다. 이는 한국형 원전 증기발생기의 화학 분석값에 근거한 재순환비 측정값과 증기발생기 열수력해석에 의해 구한 재순환비 계산값과의 차이가 나는 이유를 해결하여 좀더 증기발생기 수질을 향상시켜야 한다.
- 취출수와 급수중의 화학성분의 상관관계식으로부터 증기발생기 영역별 농도관계식을 도출하였다.

## 참고 자료

1. 영광 3,4호기 최종안전성 분석보고서 Vol. 15, 10.3.8
2. 은희현, 영광원자력본부 '제11회 원전화학분야 경험사례발표집' 1998. 한국전력공사
3. S/G Design Report CENC -1940, Rev. 1, ST-602