

원전 붕산수저장탱크 농도 조정에 따른 Heat Tracing 설비 온도감소 연구

송동수, 이창섭
한국전력공사 전력연구원

Heat Tracing Temperature Reduction due to Boron Concentration Design Change on BAT for Nuclear Power Plant

Song Dong-Soo, Lee Chang-Sup
Korea Electric Power Corporation (KEPRI)

1. 서론

고리 1호기의 붕산수저장탱크(BAT: Boric Acid Tank)는 20,000 ppm의 고농도 붕산수를 저장하고 있어 붕소석출로 인한 계통내 밸브의 손상, 배관/필터의 막힘 및 보온설비계통의 운전 등과 같은 붕산수 관련계통의 유지·보수에 상당한 어려움이 있어 설계개선이 절실히 요구되고 있다. 그리고 붕소 석출을 방지하기 위하여 Heat Tracing으로 탱크 및 배관을 약 70℃ 이상으로 가열하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 BAT의 붕산수 농도를 운전에 적합한 붕소농도인 14,000 ppm으로 설계변경을 계획하고 있다. 이에 따라 Heat Tracing 온도 최소 설정치를 기존 62.8℃에서 51.7℃로 감소가 가능하다.

이와 같이 설계변경을 수행하게 된 배경은 고리 1호기의 붕산수저장탱크는 정상운전 중 운전모드 변경에 따른 노심의 붕산 농도 조정 시 이를 이용하고 있으며, 사고 발생시에는 비상노심냉각계통(ECCS: Emergency Core Cooling System)의 안전주입을 위한 붕산수 탱크로도 사용되고 있다. 일반적인 국내 웨스팅하우스(WH) 형 발전소의 경우 정상운전 중일 경우에는 약 7,000 ppm의 붕산수가 저장되어 있는 BAST(Boric Acid Storage Tank)가 사용되고, 사고 시에는 약 20,000 ppm의 BIT(Boron Injection Tank)를 이용하고 있다. 반면, 고리 1호기는 BAST와 BIT 기능을 1개의 기능으로 통합된 BAT가 사용되고 있는 특별한 경우의 발전소이다.

비상시에 주입되는 붕산수도 기존 BAT 20,000ppm의 고농축 붕산수가 주입되던 것을 재장전수 저장조(RWST) 2,400ppm 농도의 붕산수가 직접 주입되도록 변경하였다. 이로 인해 안전해석에 영향을 미치게 되므로 관련 설계 기준사고에 대한 안전성 분석을 수행하였다. 본 설계변경과 관련하여 최종안전성분석보고서(FSAR) 설계 기준 사고를 기준으로 핵설계, 안전해석, 열수력설계, 붕소계통 설계, 격납용기 건전성 등을 수행하였다.

2. 붕소계통 설계변경 및 성능평가

2-1. BAT 붕소 요구량

붕소 주입 계통은 원자력발전소의 정상운전중 상온정지 및 재장전시 발전소 운영기술지침서의 정지여유도(Shutdown Margin)를 만족시키는 충분한 붕산수를 저장하고 있어야 한다. 이를 확인하기 위하여 붕소요구량 분석을 수행하였으며 고리 1호기의 붕산수원으로 사용되고 있는 재장전수 저장탱크(Refueling Water Storage Tank: RWST)와 BAT의 붕산수 체적이 발전소 운영기술지침서의 운전모드별 요구값을 만족하는지를 확인하였다. 그 결과 발전소 정상 운전을 위한 BAT의 요구 체적 및 농도 제한치는 운전 모드 1, 2, 3, 4에서는 14,000 ppm, 2,700 gal, 운전 모드 5, 6에서는 191 gal이 최소 필요한 양으로 평가되었다.

2-2. 재장전수 저장탱크(RWST) 붕소 요구량

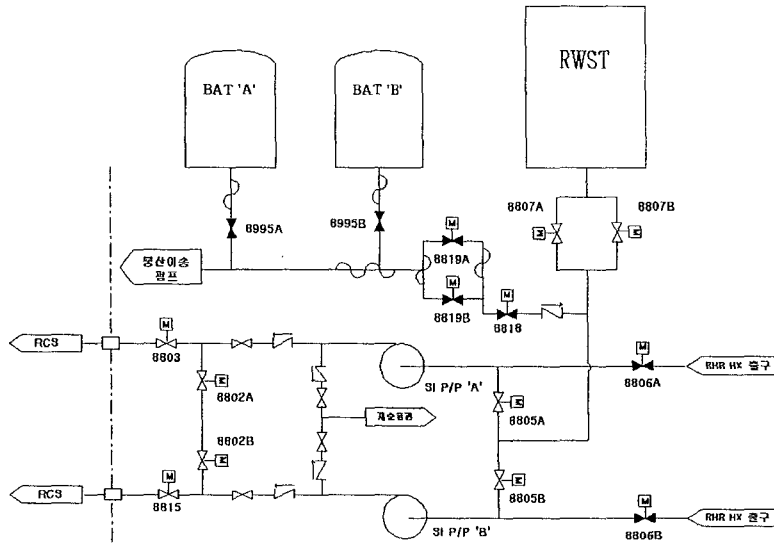
고리 1호기는 안전주입시 BAT에서 20,000ppm의 붕산수가 주입되다가 BAT의 저수위 신호가 발생하면 RWST(2,000 ppm)으로 전환되도록 되어있다. 그러나 BAT의 안전주입기능을 제거할 경우 주증기관 파단사고에 따른 안전주입시 RWST의 붕산수가 직접 주입되므로 RWST의 붕소 농도가 기존의 2,000 ppm~2,500 ppm 에서 2,400 ppm~2,600 ppm으로 상향조정되었다.

2-3. 안전주입 관련 연동 및 밸브작동 설계변경

기존의 BAT의 안전주입(SI)계통 설계개념은 안전주입 신호 발생시 BAT로부터 고농도의 붕산수를 흡입 받아서 안전주입펌프를 통해 원자로계통으로 주입되다가 BAT가 저-저수위(3%)가 되면 밸브가 차단되고, 흡입원이 RWST로 전환되면서 붕산수를 계속 주입하도록 설계되어있다. 그런데 안전주입시 BAT 대신 RWST로부터 붕산수를 흡입 받도록 배관회로를 영구적으로 변경하게 됨에 따라 SI 발생시 밸브 8819A/B가 자동으로 열리는 연동 및 BAT 저-저 수위시 연동(밸브 8995A 닫히고 8807A/B 열림)도 제거한다. 이러한 변경에 따라 다음과 같이 BAT의 SI 계통의 line-up을 변경하게 된다.

표 1 BAT 기능변경에 따른 밸브 작동 설계변경 표

밸브번호	변경전	변경후	비 고
8995 A	정상열림	정상닫힘	Lock Close
8995 B	정상닫힘	정상닫힘	Lock Close
8819 A/B	정상닫힘	정상닫힘	Lock Close
8818	정상열림	정상닫힘	Lock Close
8807 A/B	정상닫힘	정상열림	전원 제거



(주) RWST: 저장전수저장탱크
 RCS : 원자로냉각재계통
 RHR : 잔열제거계통

그림 1. BAT 관련 SI 계통 개략도(변경후)

2-4. Heat Tracing 온도설정치 변경

기존의 BAT 농도가 20,000ppm이던 것을 14,000 ppm으로 감소시킴에 따라 Heat Tracing 온도 설정치를 결정하기 위해 온도에 따른 붕산석출온도를 검토하였다.

붕소와 붕산수농도(H_3BO_3) 변환을 위해 아래와 같은 계산식을 작성하였다.

$$\text{ppm Boron} = \frac{(\text{ml NaOH})(N \text{ NaOH})(10.82 \times 10^3)}{(\text{ml of sample})} \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{Weight \% } H_3BO_3 = \frac{(\text{ml NaOH})(N \text{ NaOH})(6.18)}{\text{ml of sample}} \quad \text{----- (2)}$$

위 식 (1)과 (2)로부터 아래의 관계를 산출할 수 있다.

$$\frac{\text{ppm Boron}}{10.82 \times 10^3} = \frac{\% H_3BO_3}{6.18} \quad \text{----- (3)}$$

그러므로 식(3)으로부터 붕소와 붕산수 농도(% H_3BO_3) 변환식은 식(4)와 같다.

$$\text{Weight \% } H_3BO_3 = \frac{\text{ppm Boron}}{1750.809} \quad \text{----- (4)}$$

결국 붕소농도 1 W/o(Weight %)는 1751ppm이다. 따라서 붕산농도(%)를 ppm 농도로 나타내기 위하여 1751을 곱하여 붕소농도 (%)를 농도(ppm)로 표시하면 다음과 같다.

- 7.5% = 13133 ppm
- 8.0% = 14008 ppm
- 8.5% = 14884 ppm

BAT 농도를 보수적으로 8.5%라 가정하면 붕산농도에 대한 일반적인 온도변수는 다음과 같다.

- 석출(Crystallization)온도 : 40.5℃ [참고문헌 2]
- 운전범위 : 54.4~60℃
- 최소 허용온도 : 51.7℃

상기에서 보는바와 같이 최소 허용온도(51.7℃)는 석출온도(40.5℃)에 비해 11℃정도의 여유를 두고 설정하였다.

2-5. 기기 온도설정치 결정

현재의 BAT 농도가 20,000ppm이던 것을 14,000 ppm으로 감소시킴에 따라 Heat Tracing 온도 설정치를 결정하기 위해 온도에 따른 붕산석출온도를 검토하였다. 그리고 석출 여유를 고려하여 Heat Trace Controllers 및 BAT Heaters 등의 기기에 대한 온도 설정치를 다음과 같이 결정하였다.

(1) Heat Tracing Tape 온도 조절기

Heat Tracing Tape 온도설정치는 기존 설정치에 비해 16.6℃ 낮은 54.4℃로 설정함.

(2) BAT 내장 가열기 온도 조절기 (Immersion Heater Controllers)

BAT Heater: 57.2℃

(3) Batch Tank

Batch Tank Heater: 57.2℃

(4) Boric Acid Evaporator

BA Evaporator Heater: 57.2℃

(5) Concentrate Holding Tank

Concentrate Holding Tank Heater: 57.2℃

표 2 붕산수에 대한 일반적인 온도조건[2]

농도 Wight (%) 온도구분(℃)	2	4	6	8	10	12	15
석출온도	0	13	27	38	49	57	66
운전범위	13-18	27-32	41-46	52-57	63-68	71-77	70-85
최소허용온도	10	24	38	49	60	66	71
최대허용온도	88	88	88	88	88	88	88
비등온도	100	100.3	100.5	100.8	101	101.3	101.7

대기압상태에서 물속의 붕소(H_3BO_3) 용해도(solubility) 곡선 및 표는 그림 2와 표 3과 같다

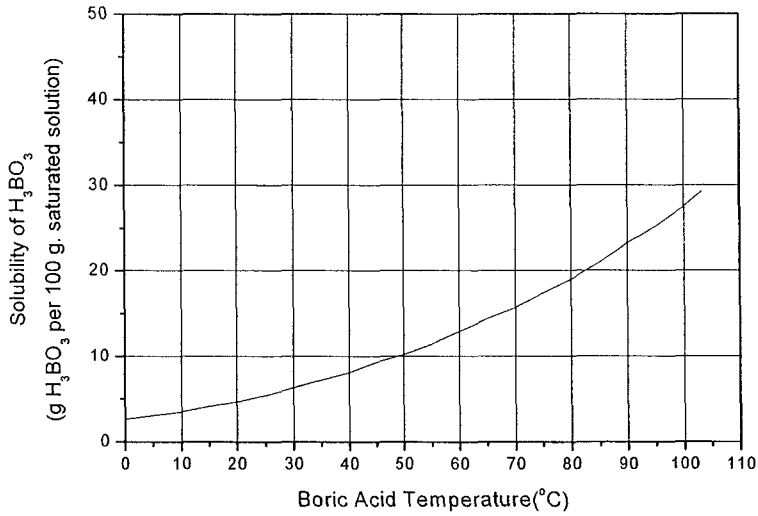


그림 2 온도에 따른 붕산수 용해도 곡선

표 3 붕산수의 온도에 따른 용해도 표

Temperature (°C)	Solubility of H_3BO_3 (Weight %)	Boron Concentration (ppm)
0.0	2.70	4725.0
5.0	3.14	5495.0
10.0	3.51	6142.5
15.0	4.17	7297.5
20.0	4.65	8137.5
25.0	5.43	9502.5
30.0	6.34	11095.0
35.0	7.19	12582.5
40.0	8.17	14297.5
45.0	9.32	16310.0
50.0	10.23	17902.5
55.0	11.54	20195.0
60.0	12.97	22697.5
65.0	14.42	25235.0
70.0	15.75	27562.5
75.0	17.41	30467.5
80.0	19.06	33355.0
85.0	21.01	36767.5
90.0	23.27	40722.5
95.0	25.22	44135.0
100.0	27.53	48177.5
103.3	29.27	51222.5

3. 경제성 분석

현재 봉산저장탱크의 농도가 21000ppm으로 운전됨으로써 붕소석출방지를 위해 70℃ 이상의 전기보온 설비 계통을 유지해야하고 관련계통의 고장 등으로 유지보수가 어렵다. 실제로 붕소회수계통 등의 관련계통에 과거 10년간 400여건의 교체 및 수리 사례가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 동 탱크의 농도를 14000ppm으로 조정할 경우 탱크 및 일차계통의 수질관리 용이 및 Heat Tracing 온도를 낮출 수 있다. 해외 기술에 의존하지 않고 자체 수행함으로써 얻는 이득과 관련계통 고장으로 인한 유지 보수 비용절감, Boric Acid 펌프, 배관, Filter, Teat Tracing 등 기기 파손예방 효과, 에너지 절감 등 향후 10년간 약 16억원 정도의 경제적 이득이 있는 것으로 나타났다.

표 4 항목별 기대 수익 금액 (단위: 백만원)

항목명	경과년	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	계
1. 해외용역비 절감	년간	270.0										
2. 유지관리비 절감	년간	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	
3. 기기파손 방지	년간					100.0					100.0	
4. 전력비용 절감	년간	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	
기대수익 금액		301.1	31.1	31.1	31.1	131.1	31.1	31.1	31.1	31.1	131.1	
'2004년 현가금액		411.8	47.2	52.4	58.2	272.2	71.7	79.6	88.3	98.0	458.6	1,638

4. 결 론

붕소농도를 21000ppm에서 14000ppm으로 변경함에 따른 계통 및 안전성 분석 결과 운전성은 향상되고 안전성에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다. 운전성 면에서는 현재 고리 1호기의 Heat Tracing 최고온도를 78℃까지 유지하던 것을 54℃~ 60℃로 감소하여 운영이 가능하다. 안전성면에서는 주증기관파단사고에 따른 안전주입(Safety Injection)시에 BAT 대신 RWST에서 봉산수가 직접 주입되더라도 주증기관 파단 사고의 노심 안전기준을 만족하였으며, 격납용기의 건전성도 유지됨이 확인되었다.

온도설정치를 감소시키기 위해 IEEE 622 의 붕소석출온도 기준에 따라 각 기기의 운전 온도를 설정하였고, 설계변경에 따른 경제성 평가 결과 향후 10년간 미화 150만 달러 정도의 이득이 있는 것으로 나타났다. 경제적인 면 외에도 고농도의 봉산수를 취급하는 운영상의 어려움을 해결할 수 있고, 관련 배관계통의 단순화를 통해 모터구동 밸브에 대한 정기점검 조항을 삭제할 수 있는 등 운영상의 이점이 크다고 판단된다.

5. 참고 문헌

- [1] Burnett, T. W., et al., LOFTRAN Code Description, WCAP-7907- P-A(Proprietary), and WCAP-7907-A, April (1984)
- [2] IEEE Std 622-1987 "IEEE Recommended Practice for the Design and Installation of Electric Heat Tracing Systems for Nuclear Power Generation Stations" Appendix A -"Typical parameters for Boric Acid"(1987)
- [3] Westinghouse Guidelines for Secondary Chemistry,"February (1985)