2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리 1호기 붕소희석 사고의 안전성 향상을 위한 타당성 연구

Feasibility Study to Improve Safety on the Kori Unit 1 Boron Dilution Event

성송기, 류석희, 엄길섭
한전원자력연료(주)
대전광역시 유성구 덕진동 493번지

요 약

고리 1호기에서는 현행 인허가 기준에 따라 운전모드 3, 4, 5 및 6에서 화학 및 체적제어계통 오작동 시 노심이 임계에 도달하지 않음을 보여주기 위해 운전원 조치사항을 고려한 사고분석이 수행되지 않았다. 따라서 고리 1호기 주기적 안전성 평가 일환으로 미국원자력규제위원회 표준심사지침서(SRP) 개정 1에 준하는 요건들을 적용하여 운전모드 3, 4, 5 및 6에서의 원전 안전성 향상 가능성 여부를 확인하기 위한 연구가 수행되었다. 일반적으로 화학 및 체적제어계통(CVCS)의 오작동으로 기인하여 발생하는 붕소희석 사고에 대한 분석은 원전 정지여유도 완전 상실 이전에 부적절한 붕소희석에 대한 운전원 조치 또는 자동적인 완화를 위해 가용한 시간을 확인하기 위해 수행된다. 그러므로 본 연구에서는 임계 발생을 방지하기 위해 운전원이 충분한 조치시간을 가지도록 실제 노심설계 시 일정 농도 이상으로 유지되어야 하는 사고 초기붕소농도와 임계붕소농도를 결정하고, 노심에서의 부적절한 붕소희석에 대해 운전원이 사고를 감지하고 노심이 임계 상태에 도달을 방지하기 위한 운전원 조치 시간이 표준심사지침서 허용 기준에 따라 최소한 15분(운전모드 6은 30분)이상 유지될 수 있는지를 확인하였다. 분석 결과, 붕소희석사고에 대한 표준심사지침서 요건을 만족하기 위해서는 운전절차 개정과 용적형 충전펌프 잠금이 필요한 것으로 제시되었다.

Abstract

As per existing licensing basis of Kori Unit 1, there is no analysis considering operator action in order to demonstrate that the criticality does not occur in the event of a CVCS malfunction in Modes 3, 4, 5, and 6. Thus a study, under the Kori Unit 1 PSR(Periodic Safety Review) project, has been performed to determine whether it is feasible to improve the plant safety in Modes 3, 4, 5, and 6 in compliance with the NRC SRP(Standard Review Plan) Rev. 1. Generally, the analysis of boron dilution event, which occurs due to a CVCS(Chemical and Volume Control System) malfunction, is performed to identify the amount of time available for operator action or automatic mitigation of an inadvertent boron dilution prior to complete loss of plant shutdown margin. Therefore, in this analysis, it is determined the initial boron concentration and the critical boron concentration that must be preserved for the actual core design to ensure that an operator would have enough time to prevent criticality according to the SRP acceptance criteria and is identified that the calculated operator action time would exceed at least 15 minutes(30 minutes for Mode 6) for an operator to diagnose the event and prevent criticality following an inadvertent boron dilution in the reactor core. As per the result of this analysis, it suggests that the revision of administrative control procedures and the locking of a one positive displacement charging pump be required as the necessary functions for boron dilution protection to meet SRP criteria for the event of boron dilution.

1. 서 론

가압경수로에서 붕소희석사고는 비붕산수가 화학 및 체적제어계통(Chemical & Volume Control System, CVCS)을 통해 원자로 노심으로 유입됨으로써 발생하는 정반응도에 의해 원자로 정지 여유도 상실을 초래하는 사고이다. 발전소에서의 붕소 희석은 수동모드에서 정해진 절차에 따라 수행되며, 화학 및 체적제어계통은 운전원이 원자로로 유입되는 냉각재의 붕소농도를 조절할 수 있는 기능을 제공한다. 또한 운전원의 실수나 화학 및 체적제어계통의 고장에 의한 사고 시 보충수계통의 비붕산수가 원자로 내부로 유입될 수 있으므로, 이를 대비하여 원자로냉각재 보충수와 관련한 정보는 운전원이 항상 감지할 수 있도록 하고 있다.

현행 고리 1호기 최종안전성분석보고서에는 운전 Mode 1, 2, 6에서의 붕소희석사고가 인허가 기준으로서 사고분석이 수행되어 있으나, 운전 Mode 6에 대한 분석은 임계도달 시간 계산 시 운전원 경보 시점부터가 아닌 사고 시작 시점부터 계산됨에 따라 최신 규제요건을 만족하지 못하고 있는 것으로 파악되었다. 또한, 운전 Mode 3, 4, 5에 대해서는 미분석된 관계로 최신 기술기준(SRP 15.4.6, Rev. 1)을 적용한 추가 사고분석 수행이 필요한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 붕소희석사고 시 노심 내 정반응도 증가에 따른 운전원 경보[예, 정지시 고 중성자속(High Flux at Shut Down)] 발생 후 임계도달 시간을 최신 SRP에 제시된 운전원 조치 허용시간(운전 Mode 6은 30분, 나머지 운전 Mode는 15분)과 비교 평가하여 만족할 수 있는지를 확인하고, 불만족 사항을 해결하기 위하여 개선된 방법론을 적용하여 평가를 수행한 후 최신 기술기준을 만족하기 위한 해결 방안을 도출하고자 한다. 본 연구는 한수원(주) 고리1호기 주기적 안전성평가 과제 일환으로 수행되었다.

2. 사고 분석

2.1 분석 가정

본 사고를 해석하기 위하여 현재 Westinghouse형 발전소의 정지운전 Mode에서 붕소희석사고 인허가 설계용으로 사용되고 있는 ABORT[1] 전산코드를 사용하였다. 본 사고해석 시 적용되는 ICRR(Inverse Count Rate Ratio) 곡선은 고리 1호기 19주기 기동 시 취득된 자료 중 '제어봉 인출에 의한 임계접근' 자료를 근거로 다음과 같이 별도 생산되었다.

○ 고리 1호기 19주기 기동 자료를 근거한 ICRR Curve(X: 붕소농도, y: ICRR)

- 적용범위 : 1582.8 ppm < 붕소농도 < 2041 ppm

$$y = 2.35579E-13 \times X^5 - 2.17512E-09 \times X^4 + 8.0183E-06 \times X^3 - 1.47522E-02 \times X^2 + 1.35468E+01 \times X - 4.96682E+03$$

- 적용범위 : 1136.0 ppm < 붕소농도 < 1582.8 ppm

$$y = 2.81995E-13 \times X^5 - 1.85908E-09 \times X^4 + 4.89749E-06 \times X^3 - 6.44693E-03 \times X^2 + 4.24349 \times X - 1.118027E+03$$

비교 분석을 위하여 붕소희석사고 분석 시 포괄적으로 적용되는 범용 ICRR 곡선(Generic Curve: H.B Robinson Curve)을 사용한 분석도 수행되었다.

사고 시작 후 임계도달 때까지의 시간을 계산하기 위해 Westinghouse형 발전소 붕소희석사고

분석 시 준용되는 다음의 관계식이 사용되었다.

$$T = \frac{M_{RCS}}{m_{dil}} * \ln\left[\frac{C_{b0}}{C_{bc}}\right]$$

여기서, M_{RCS} = 운전 Mode별 원자로냉각재 질량, lbm

m_{dil} = 운전 Mode별 최대 희석 유량, lbm/min

C_{b0} = 운전 Mode별 초기 붕소 농도, ppm

C_{bc} = 운전 Mode별 임계 붕소 농도, ppm

사고 시작 후 운전원 경보까지의 시간을 계산하기 위하여 ICRR 곡선이 사용되며, 이를 근거로 운전원 조치시간이 계산된다. 붕소희석사고는 운전 Mode별로 수행되었으며, 사고분석 초기 조건은 다음과 같다.

○ 붕산수공급계통의 설계요건(Design Requirement) 제한치 반영
- Boron Acid Tank(BAT)의 공급능력 : 그림 1
- Refueling Water Storage Tank(RWST)의 공급능력 : 그림 2

○ 경보 후 소요시간

ABORT 코드내의 범용 ICRR 곡선(H.B Robinson Curve)과 고리 1호기 19주기 ICRR 붕소희석 곡선을 사용하고 중성자속 증배율(Flux Multiplier Factor)은 2.8을 사용하여 계산

○ 각 운전 Mode별 희석유량

기존 분석 시 사용된 180 gpm(용적형 충전펌프 3대 작동 시 유량)의 희석유량일 경우 외에 민감도 분석을 위해 120 gpm(용적형 충전펌프 2대 작동 시 유량) 희석유량일 경우에 대하여 밀도보정을 고려하여 분석을 수행하였다. 180 gpm 및 120 gpm의 희석유량에 대하여 각 운전 모드별 밀도 영향을 보정한 체적유량(Density Corrected Volumetric Flow Rate)이 표 1에 제시되어 있다.

표 1. 운전 Mode별 희석유량

희석유량의 구분 (gpm)	밀도보정 희석유량 (gpm)				비고
	(Mode 3)	(Mode 4)	(Mode 5)	(Mode 6)	
120	159.2	134.7	124.7	122.1	= (A) × (1.2/1.8)
180	238.8(A)	202.1(A)	187.0(A)	183.1(A)	

2.2 분석 결과

본 연구에서는 다음 6가지 경우에 대해 비교 분석하였다.

- Case 1: 운전 Mode 3 (RCP in Operation)
- Case 2: 운전 Mode 4 (RCP in Operation)
- Case 3: 운전 Mode 4 (RHR in Operation)
- Case 4: 운전 Mode 5 (Filled RCS Loop)
- Case 5: 운전 Mode 5 (Drained RCS Loop)
- Case 6: 운전 Mode 6

2.2.1 현행 설계방법론을 적용한 분석

현행 고리 1호기 최종안전성분석보고서(FSAR)의 붕소희석사고 운전 Mode 6 분석 시 사용되었던 사고분석 방법론은 총 소요시간(붕소희석 사고시 정지여유도를 만족하는 초기조건으로부터 임계에 도달할 때까지 걸리는 시간)을 운전원 조치시간으로 간주하였으며 이를 적용하여 모든 Case에 대하여 분석을 수행하였다. 주요 계산 입력자료 및 결과는 표 2와 같다. 이 표에서는 계산된 총 소요시간 뿐만 아니라, 일반 ICRR 곡선(H.B Robinson Curve)를 사용하고 중성자속 증배율(Flux Multiplier Factor)을 2.8로 가정하여 계산된 운전원 조치시간(High Flux at Shutdown Alarm 시점부터 임계에 도달할 때까지 걸리는 시간)도 보여준다. 표 2에서 제시된 바와 같이 운전원 조치시간은 상당히 짧게 나타나 희석유량을 120 gpm으로 적용하여도 현행 설계방법론으로는 SRP에서 요구하는 운전원 조치시간을 만족 못할 것으로 판단된다.

○ 총 소요시간(사고 발생시점부터 임계도달 시점까지 기간)
운전 Mode 3, 4(RCP 운전), 6은 만족하나(제한치: 운전 Mode 3 ~ 5는 15분이상, 운전 Mode 6은 30분 이상) 나머지 Case는 만족 못함.

○ 운전원 경보후 소요시간
모든 운전 Mode가 제한치(Mode 3 ~ 5는 15분이상, Mode 6은 30분 이상)를 만족 못함.

표 2. 분석결과 (기존 방법론, 180 gpm)

Case	질량 희석유량 (lbm/min)	희석체적 (ft^3)	희석체적의 비체적 (ft^3/lbm, 10^{-2})	초기 붕소농도 (ppm)	임계 붕소농도 (ppm)	계산된 총 소요시간 (min)	운전원 경보후 소요시간* (min)
1 (RCP in Operation)	1502.3	4,661.61	2.12513	1305	1142	19.48	4.66
2 (RCP in Operation)	1502.3	4,661.61	1.7989	1317	1165	21.16	5.12
3 (RHRS in operation)	1502.3	2335.31	1.7989	1317	1165	10.60	3.47
4 (Filled RCS Loop)	1502.3	2335.31	1.6637	1257	1177	6.15	1.81
5 (Drained RCS Loop)	1502.3	1854.19	1.6637	1257	1177	4.88	1.22
6	1502.3	2145	1.6293	2000	1207	44.25	18.38

*) ABORT 코드내에 H.B. Robinson ICRR 곡선 및 중성자속 증배율 2.8을 사용하여 계산된 값임

2.2.2 가변정지여유도를 적용한 분석

앞 절에서 언급한 바와 같이, 고정된 정지여유도로서는 최신 기술기준을 만족하지 못하고 있다. 이에 이 절에서는 운전원 조치시간에 대한 허용기준을 만족하는 가변정지여유도 개념을 도입하여 분석을 수행하였으며, ICRR 곡선을 고리 1호기 기동자료로부터 생산한 값을 적용하였다.

그림 3에서 8까지 각 운전 Mode별 가변정지여유도 개념을 적용하여 생산된 SDM(Shutdown Margin)을 제시하였다. 그림에서 관측되듯이 가변정지여유도 곡선은 붕소공급계통인 BAT 및 RWST의 붕소공급능력에 제한을 받고 있다. 180 gpm의 희석유량을 가정하여 분석한 경우, 대부분 운전 Mode에서 최대 임계 붕소농도(표 2의 임계붕소농도 값에 100 ppm 불확실도 포함한 것, 단 운전 Mode 6의 값은 100ppm 불확실도가 이미 반영되어 있음)보다 작은 값에서 정지여유도 곡선이 멈추는 것으로 나타났으며, 120 gpm 희석유량의 경우는 운전 Mode 5(RCS Drained) 및 운전 Mode 6에서 관측되었다. 즉, 3대의 충전펌프가 모두 작동하는 경우(180 gpm) 대부분의 운전 Mode에서 요구정지여유도(Required Shutdown Margin)가 발전소 붕산수공급계통의 설계요건(Design Requirement) 제한치를 넘는 관계로 발전소 운전에 적용될 수 없을 것으로 판단된다.

따라서 미국 Comanche Peak 발전소에서 수행된 유사분석 권고사항[2] 및 본 연구결과에 따르면 향후 고리 1호기 붕소희석사고 분석에 추가적으로 고려하여야 할 기술권고 사항은 다음과 같다.

○ 중성자속 고 증배율 계측
- 발전소 정지운전 중 중성자속을 감시 및 측정할 수 있어야 함

○ 중성자속 고 증배율에 대한 계측기 설정치
- 중성자속 고 증배율 측정에 대한 불확실도 평가가 수행되어야 하며, 특히 저 중성자속(10 cps 미만)에 대한 불확실도 평가가 필요함

○ 발전소 기동시 ICRR 자료 측정조건
- 제어봉 인출이 아닌 붕소희석에 의하여 임계에 도달하여야 하며 농도의 변경은 최소한 300 ppm 이상이어야 함
- 희석과정은 임계에 도달할 때(또는 ICRR 값이 0.01)까지 연속적이어야 함. 일시적으로 희석유량을 다량을 투입하거나 RCS 내의 혼합을 위해 일시 중단하는 것은 붕소희석사고에 대한 Scenario에 맞지 않음. 계통의 문제로 희석과정이 중단될 경우 15분 이상 초과하지 말아야 함
- 초기 희석률은 시간당 50 ppm 이어야 하고, 추정된 붕소농도가 '임계 예상 붕소농도'의 100 ppm이내일 때 시간당 30 ppm으로 줄여야 함(희석률을 줄일 때에도 상기에서 언급한 대로 희석이 중단되지 말고 계속되어야 함)

○ 최대 붕소희석 유량
- 붕산수공급계통의 설계요건 제한치를 만족하기 위해서는 최대 희석유량이 120 gpm이 되도록 계통 성능분석 및 운전원 조치사항들에 대한 평가가 수행되어야 함
- 운전 Mode 5(RCS Drained 조건) 및 운전 Mode 6은 고리 3, 4호기 경우와 같이 붕소희석의 근원이 되는 밸브를 차단하므로써 최신 규제조건을 만족시키는 접근 방법이 적절한 것으로 판단됨. 단, 계통운전 성능 면에서 타당성 평가가 별도 수행되어야 함

3. 결론

본 연구에서는 현행 방법론 및 가변정지여유도 방법론을 적용하여 고리 1호기 붕소희석사고에 대해 분석을 수행하였다. 분석 결과, 고리 1호기 붕소희석사고에 대해 최신 규제요건을 만족하기 위한 대안을 도출할 수 있었으며, 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

○ 고리 1호기 붕소희석사고 안전성 분석 시 현행 분석방법론을 적용하는 경우 운전 Mode 5의 경우 약 1.2분 정도로 모든 정지운전 Mode에서 최신 기술기준인 운전원 조치 요구시간 15분을 만족 못하는 것으로 나타남

○ 3대의 충전펌프가 모두 작동할 경우(180 gpm)는 가변정지여유도 방법론을 적용을 적용하더라도 대부분 정지운전 Mode에서 요구정지여유도(Required Shutdown Margin)가 발전소 붕산수 공급계통의 설계요건 제한치를 넘는 관계로 발전소 운전에 적용될 수 없는 것으로 판단됨

○ 가변정지여유도 방법론을 적용하고 붕소희석 유량이 120 gpm인 경우는 운전 Mode 5(RCS Drained 조건) 및 6을 제외하고는 운전원 조치시간 최신 기술기준을 만족하며, 한편 운전 Mode 5(RCS Drained 조건) 및 운전 Mode 6 에서는 고리 3, 4호기와 같이 붕소희석의 원인이 되는 밸브를 차단하므로써 최신 규제조건을 만족시키는 접근 방법이 적절한 것으로 판단됨

REFERENCES

1. SAE-TA-98-070, “User's Documentation for ABORTV1 Version 1.01,” 1998. 3. 4., Westinghouse.

2. 해외출장보고서, “고리 1호기 주기적안전성평가 과제 관련 Non-LOCA 사고해석 인허가 현안 협의 및 자료수집,” 2000. 4., KEPCO Nuclear Fuel Co.

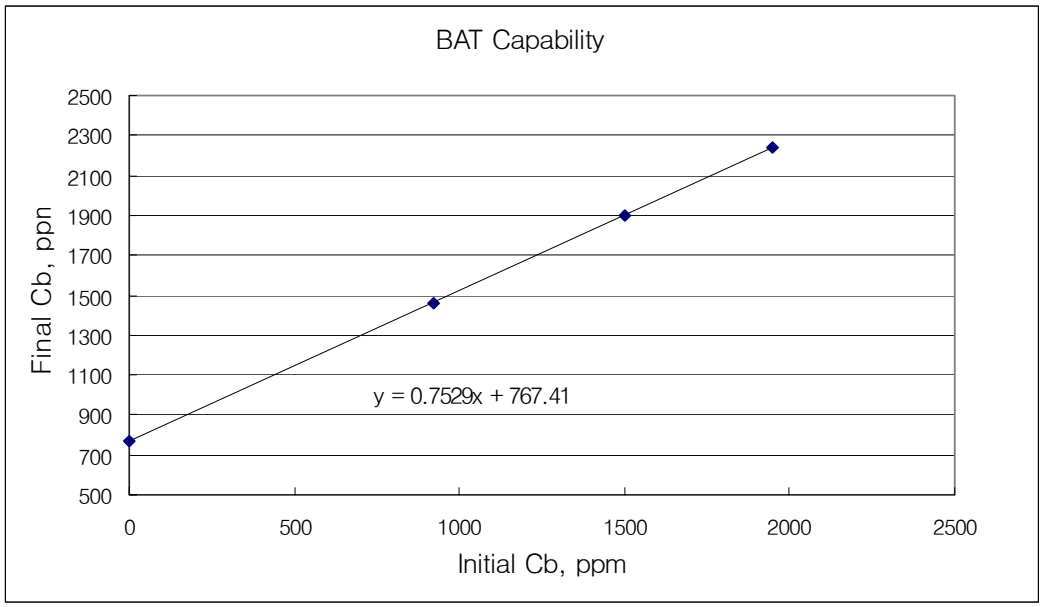

그림 1. BAT의 붕소 공급능력

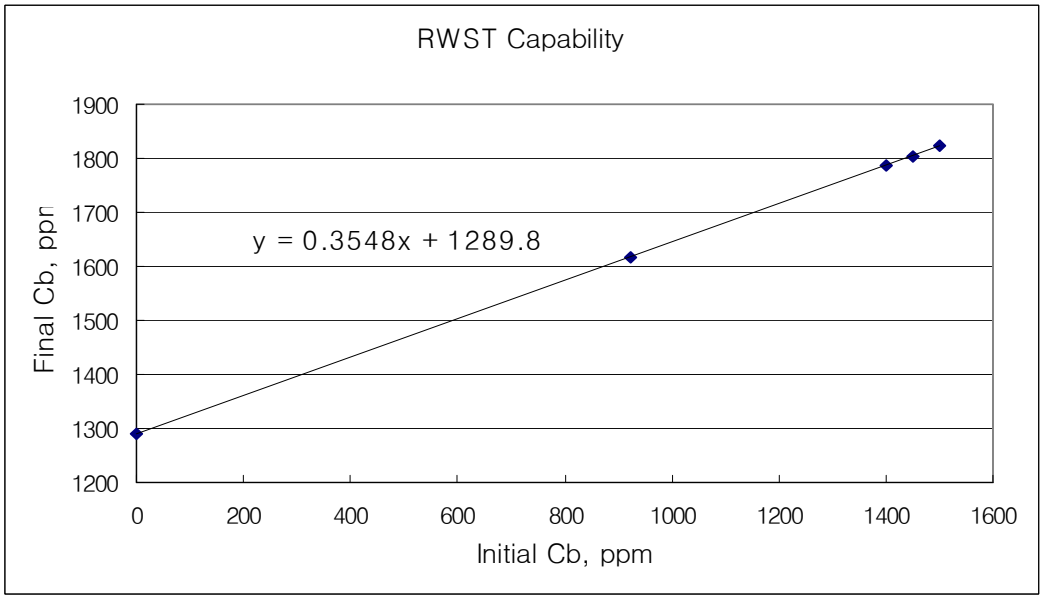

그림 2. RWST의 붕소 공급능력

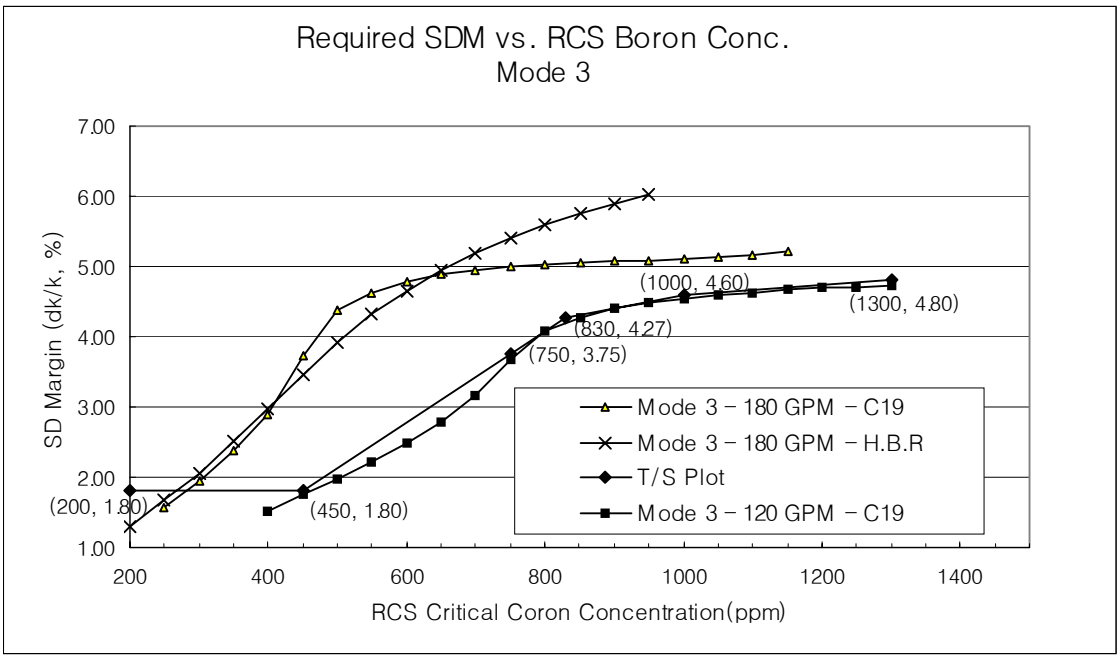

그림 3. 가변 정지여유도를 적용한 분석결과(운전 Mode 3)

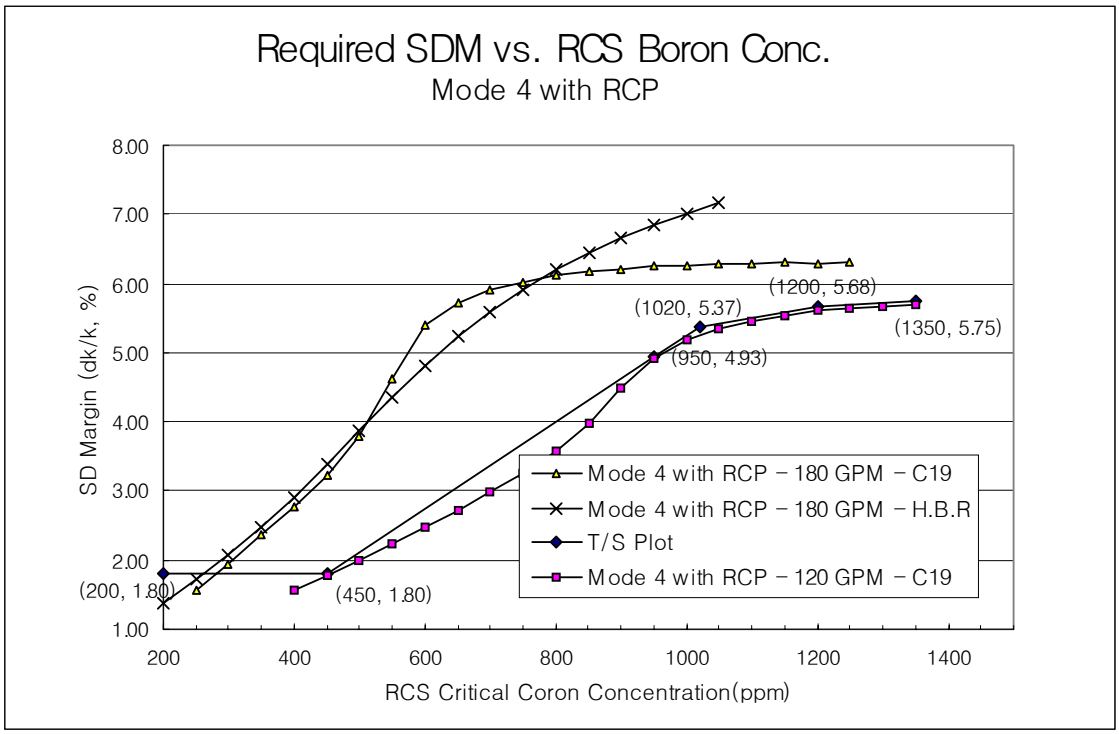

그림 4. 가변 정지여유도를 적용한 분석결과(운전 Mode 4 - RCP in Operation)

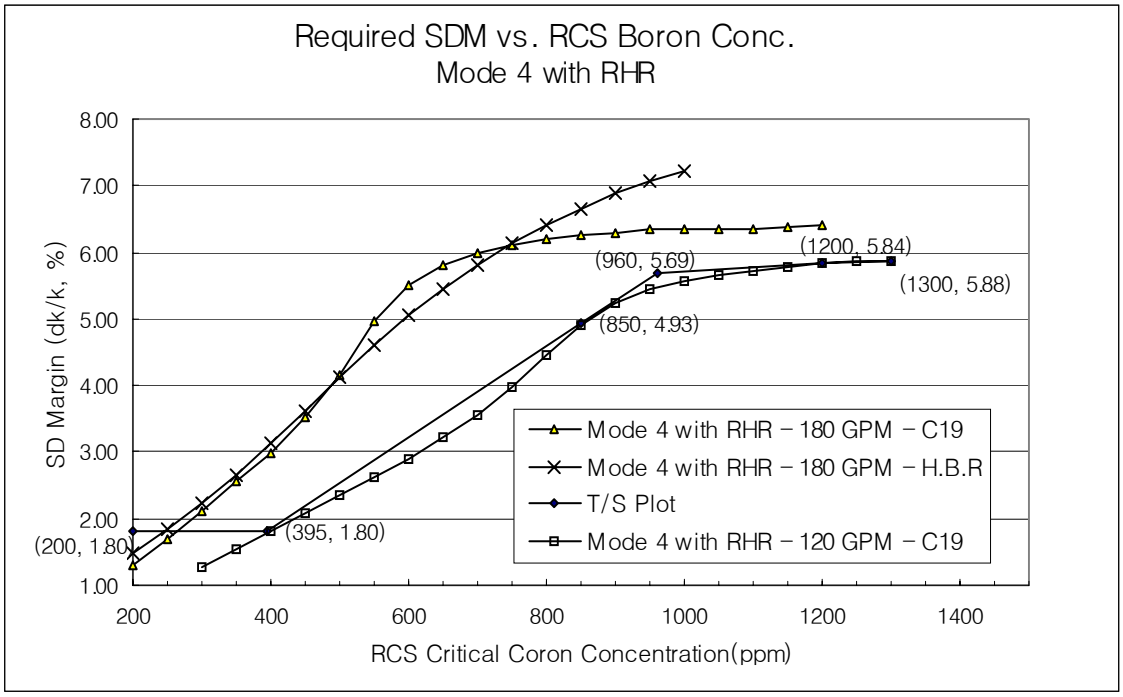

그림 5. 가변 정지여유도를 적용한 분석결과(운전 Mode 4 - RHR in Operation)

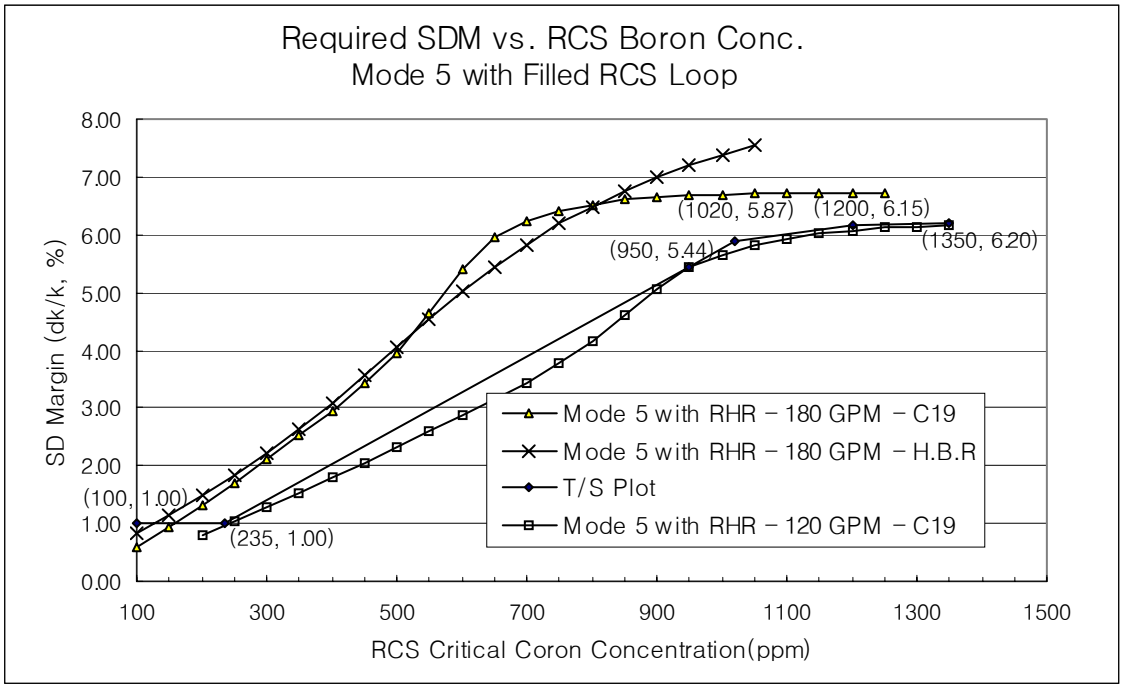

그림 6. 가변 정지여유도를 적용한 분석결과(운전 Mode 5 - Filled RCS Loop)

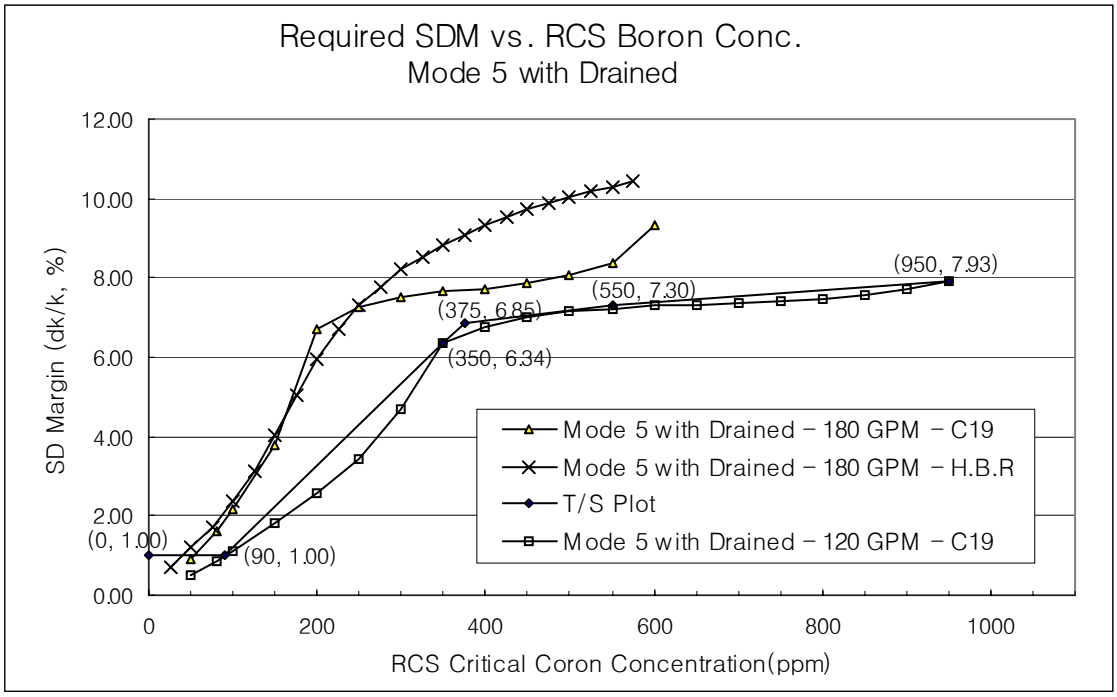

그림 7. 가변 정지여유도를 적용한 분석결과(운전 Mode 5 - Drained RCS Loop)

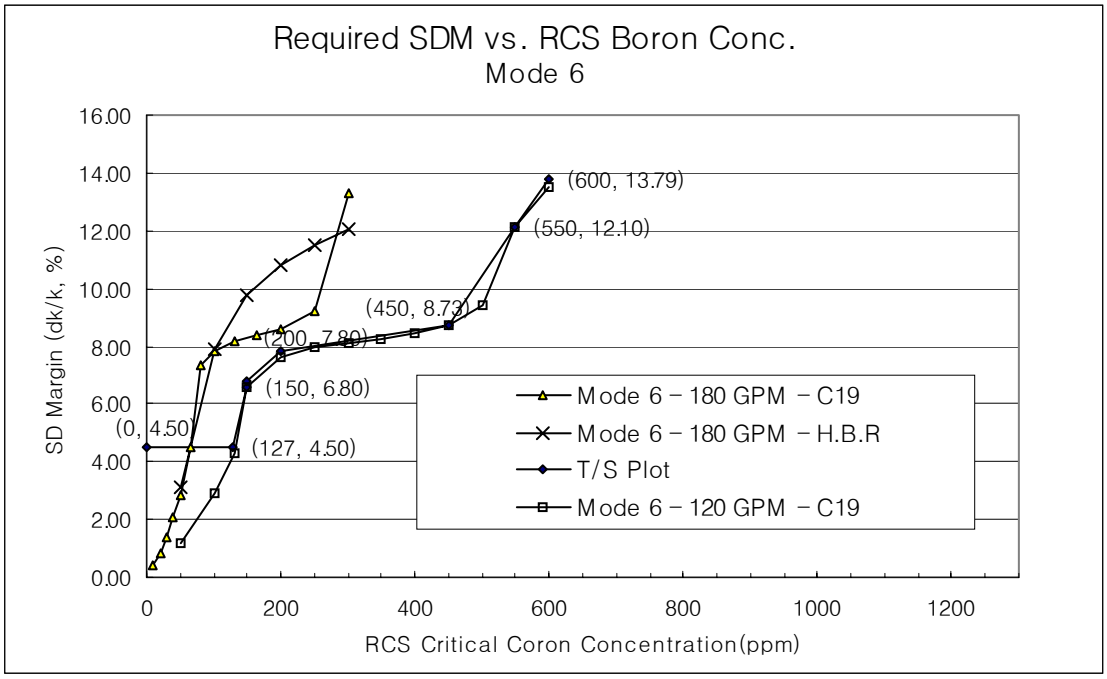

그림 8. 가변 정지여유도를 적용한 분석결과(운전 Mode 6)