

동적 제어봉 제어능 측정 결과 평가 (기저신호 보정 민감도 분석)

이 정 규
2016. 10. 26



© 2016 KEPCO NF All rights reserved

목 차

배경

동적 제어봉 제어능 결과 분석

기저신호 보정 민감도 분석

요약 및 제언

배 경



- 1 원자로 특성 시험
- 2 제어봉 제어능 측정
- 3 동적 제어봉 제어능 측정
- 4 기저신호 보정

원자로 특성 시험

수행 흐름도



- 교체노심 안전성평가 결과 신뢰의 근거
- 교체노심 설계 타당성 확인

영출력 원자로 특성시험 시험 항목 요약

시험 항목	판정 기준	비 고
1. 반응도 계산기 외부 동특성시험 ^{a)}	± 4 %	80/ 100/ 200 (sec)
2. 개별 제어봉 제어능 (DCRM) ^{a)}	± 15 % or 100 pcm	제어봉 교환 동적 제어봉 제어능 측정
총 제어봉 제어능 ^{a)}	± 8 %	Shutdown margin Overall power distribution
3. 최종점 붕소농도 측정 (ARO) ^{b)}	± 50 ppm	
노심 반응도 점검 *	± 1000 pcm	* BW (pcm/ppm) x Boron bias (ppm)
4. 등온온도계수 ^{b)}	냉각/ 가열시 ** (± 1.8 pcm/°C)	** ITC _{cooling} - ITC _{heating}
	± 3.6 pcm/°C	Temperature reactivity

a) = {(M-P)/M}x100, b) = M-P, M = 측정값, P = 설계값

원자로 특성시험 참고 문서

- ANSI/ANS** 상업용 PWR 원전 노심 특성 검증 지침
- 19.6.1** 시험 항목별 허용 가능 정도 또는 허용 범위로 타당성 입증
- 일반적 권고사항 또는 주의 사항이 포함된 기술 기준 및 방법 제공

제어봉 제어능 측정



제어봉 교환(Rod Swap)

- 약 12시간 소요
- 적분 제어능 측정
- 기존 제어봉 측정시 봉산 폐액 발생(봉산 희석법 적용)

동적 제어봉 제어능 측정(Dynamic Control rod Reactivity Measurement)

- 2005년 11월 한울2호기 제14주기 동적 제어봉 제어능 측정 최초 수행
- 10년간 국내 PWR형 원자력 발전소에서 동적 제어봉 제어능 측정(DCRM) 만족
- 약 5시간 소요
- 미분 및 적분 제어능 측정
- 봉산 폐액 생성 없음
 - ∴ 봉산 폐액의 감소와 시험 시간 단축

WH형 노심 DCRM 수행 이력

발전소	DCRM 수행 호기 주기	측정 제어봉	비고
고리1발	고리1호기 24~30주기 고리2호기 21~28주기	90	K1C31,32 제어봉 교환법 적용, K2C28 계산기 교환
고리2발	고리3호기 18~24주기 고리4호기 17~24주기	120	
한빛1발	한빛1호기 17~23주기 한빛2호기 17~22주기	104	
한울1발	한울1호기 15~18주기 한울2호기 14~21주기	72	U1C19이후 계측기 변경으로 제어봉 교환법 적용

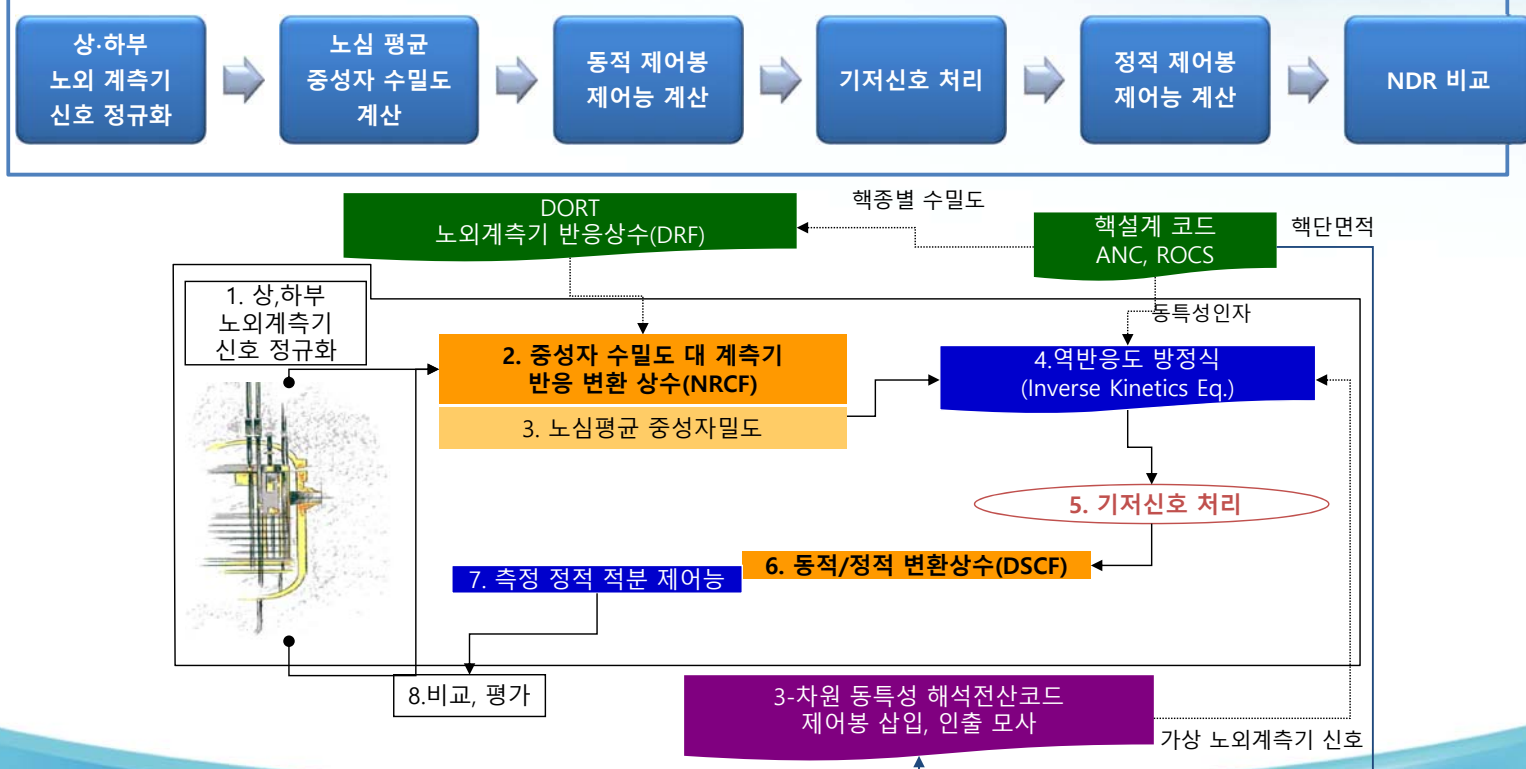
5

served

동적 제어봉 제어능 측정



동적 제어봉 제어능 평가 절차

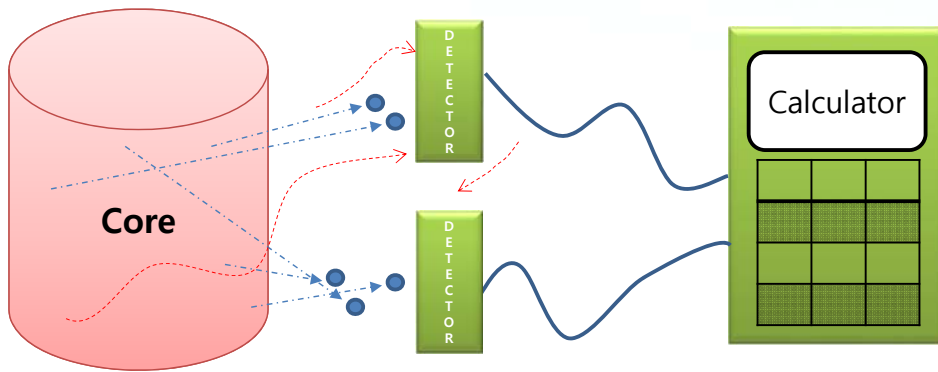


6

기저신호 보정



노외 계측기 신호 생성(WH형)



기저신호?

- 계측기내 중성자에 의한 반응 외, 외부 감마선에 의해 계측되는 신호 증가
- 계측시 중성자 준위가 작은 경우 상대적으로 기저신호가 증가됨
- 기저신호의 정량적 측정이 어려움

∴ 정확한 동적 제어봉 제어능 측정을 위해 외부 감마선에 의해 생성된 기저신호의 보정이 필요함

7

ved

기저신호의 보정

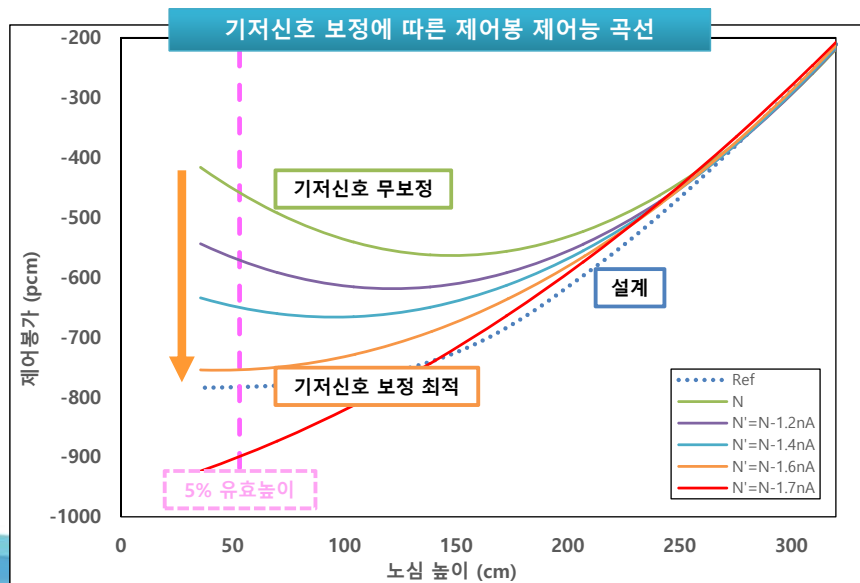


제어봉 측정 시 물리적 특성을 고려한 기저신호 보정

- 기저신호가 없는 경우, 제어봉 삽입시 반응도는 급격히 감소하고 하부쪽으로 이동할수록 미분 제어봉가 작아짐
- 제어봉 완전 삽입시 미분 제어봉가는 0 가까워지며 완만한 기울기를 보임
- 제어능 곡선의 기울기가 완만해지는 시점까지 기저신호 제거

다양한 평가항목의 조합으로 최적의 제어능 곡선 판정

- 높이 및 시간에 따른 곡선의 기울기, 반응도 변화, 기저신호 변화



8

PCO NF All rights reserved

동적 제어봉 제어능 결과 분석



1

동적 제어봉 제어능 측정 결과

2

고리1호기 DCRM 자료 분석

3

DCRM 편차 증가 원인

동적 제어봉 제어능 측정 결과

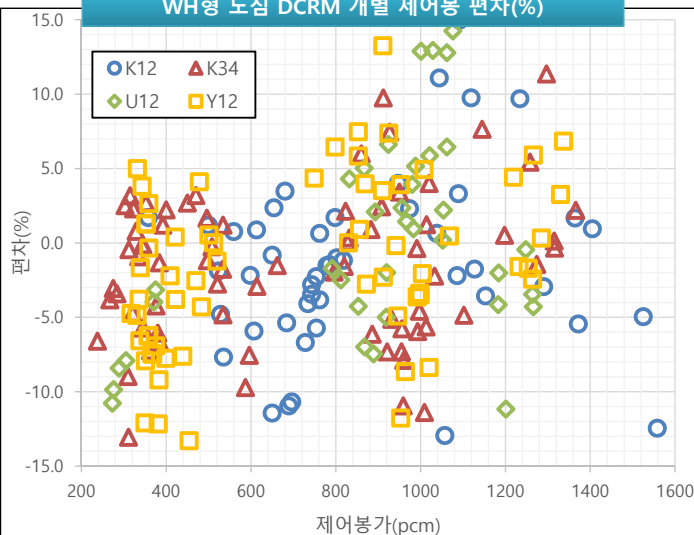
· 최근 4주기 WH형 노심 동적 제어봉 제어능 측정 자료

- 제어봉 제어능 판정 기준 만족 (개별 : $\pm 15\%$ or 100 pcm, 총 : $\pm 8\%$)

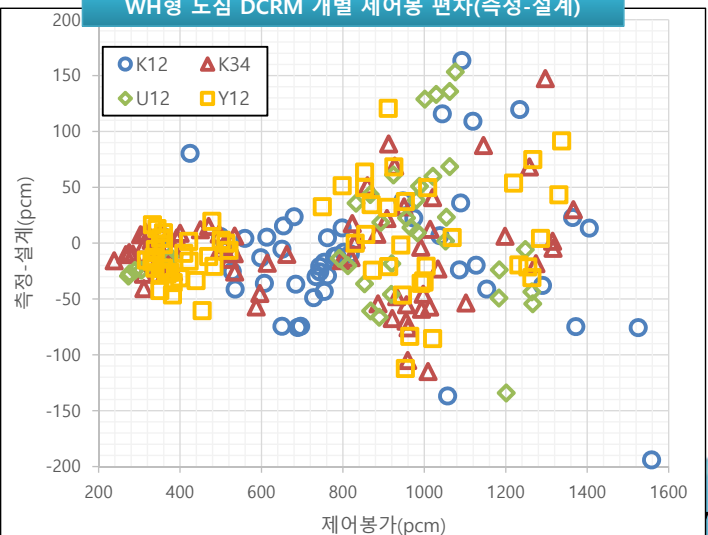
WH형 노심 DCRM 총 제어능 편차(%)

호기주기 편차(%)	K1C30	K1C29	K1C29R	K1C28	K2C28	K2C27	K2C26	K2C25	K3C24	K3C23	K3C22	K4C24	K4C23	K4C22
	0.3	-4.1	-1.4	0.8	-0.9	-0.4	-5.5	0.4	-1.5	0.2	-1.0	0.5	-3.2	-3.6
호기주기 편차(%)	U1C18	U2C21	U2C20	U2C19	U2C18	U2C17	Y1C23	Y1C22	Y1C21	Y1C20	Y2C22	Y2C21	Y2C20	Y2C19
	-0.6	4.7	-0.7	1.1	0.3	0.7	-2.2	-0.5	2.0	-2.4	0.7	-1.2	1.3	-1.6

WH형 노심 DCRM 개별 제어봉 편차(%)



WH형 노심 DCRM 개별 제어봉 편차(측정-설계)



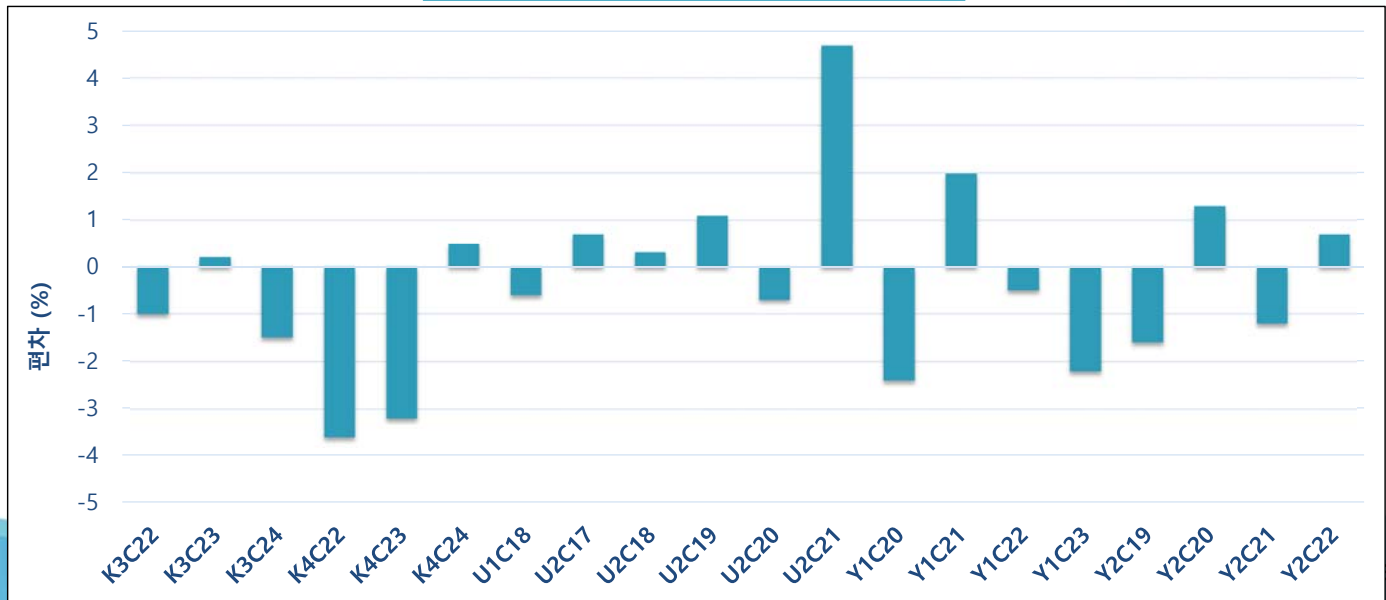
동적 제어봉 제어능 측정 결과



· WH형 3loop 노심 동적 제어봉 제어능 측정 자료

- 총 제어봉 제어능 판정 기준 만족 ($\pm 8\%$)
- 총 제어봉 제어능 만족 (Max. U2C21 : 4.7 %)
- 3loop 기준 DCRM 측정 불만족 발생 없음

WH형 3loop 노심 DCRM 총 제어능 편차(%)



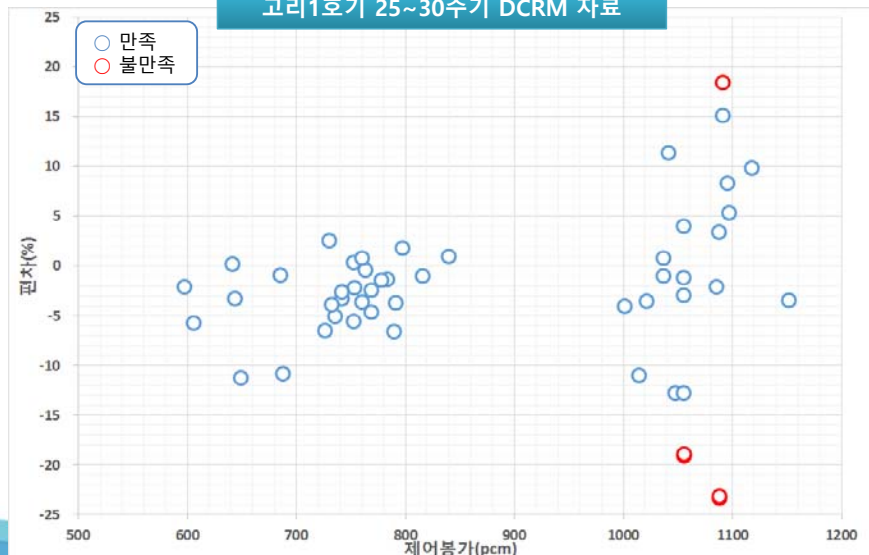
11

고리1호기 DCRM 자료 분석



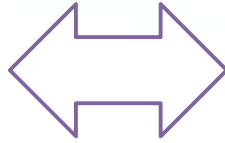
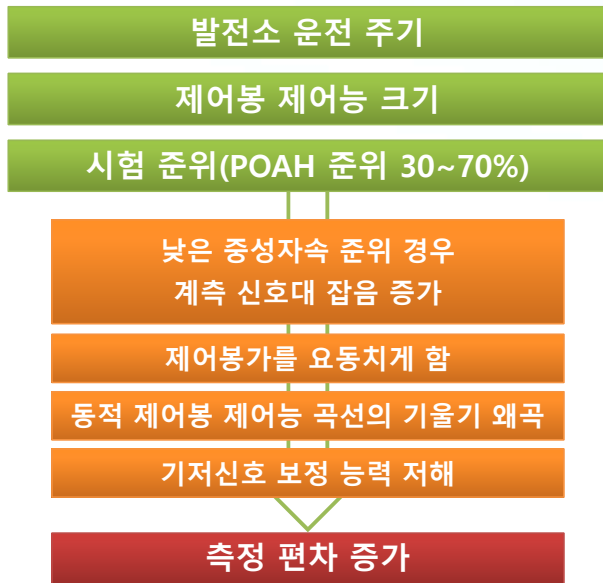
- 고리1호기 24~30주기 DCRM 판정기준 만족
- 고리1호기 29주기 영출력 원자로 특성 시험 이후 특정 제어봉에서 측정 편차 증가
 - 29주기 제어봉 CC, 29주기(ROL) 제어봉 CC, 30주기 제어봉 CA
 - 1000 pcm 이상의 제어봉가 갖는 제어봉에서 발생
 - 해당 제어봉 DCRM 반복 수행 후 판정 만족
- 31주기는 DCRM 불만족으로, 제어봉 교환 방법 수행

고리1호기 25~30주기 DCRM 자료

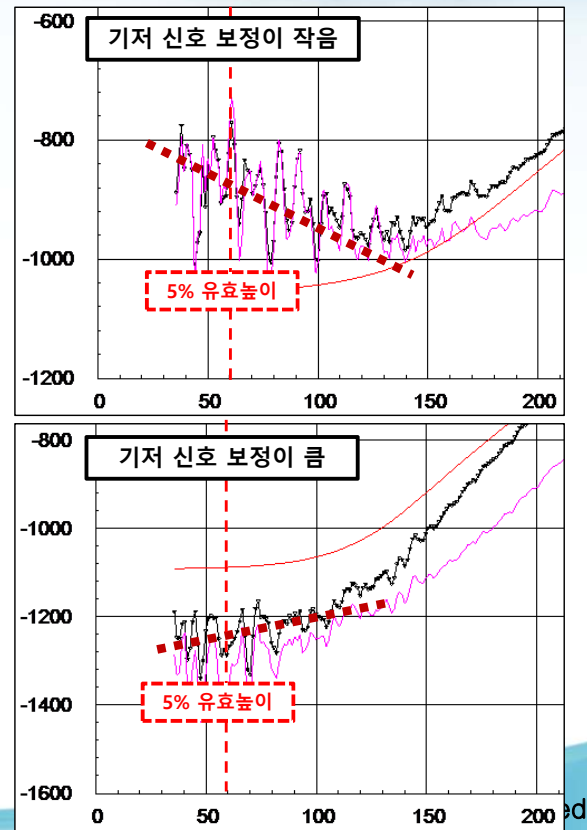


12

DCRM 편차 증가 원인



고리1호기 기저신호 보정 능력 저해



고리1호기 잡음 증가에 영향을 미치는 요인

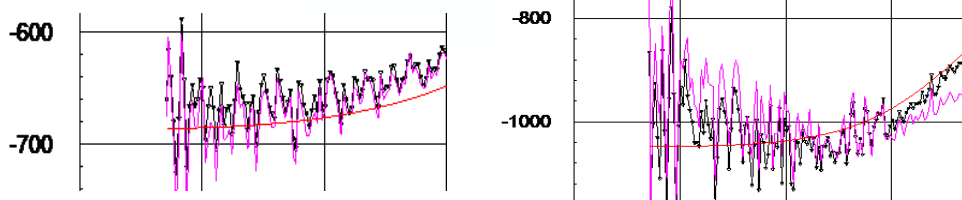
- 시험 제어봉의 제어봉가
- 제어봉 삽입 속도
- 기저신호 증가

DCRM 편차 증가 원인



1. 시험 제어봉의 제어봉가

- 1000 pcm 이상 제어봉에서 주로 발생되며 편차가 커짐
- 중성자속 준위가 낮아져 제어봉가 측정에 감마선의 영향이 상대적으로 커져 잡음도 커짐
- 특히, 제어능이 큰 제어봉은 상대적으로 빠른 시간에 기저신호 영향 준위로 도달함(중성자속은 지수함수로 감소)



2. 제어봉 삽입 속도

- 제어봉이 빠른 속도로 움직이면 간섭효과가 줄어 잡음이 적음

측정 제어봉 삽입 속도 비교

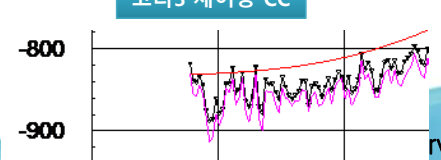
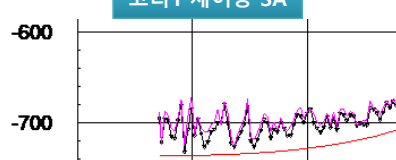
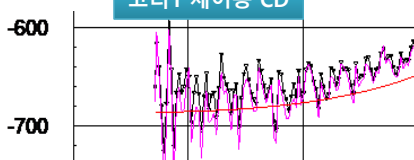
[cm/sec]

	CA	CB	CC	CD	SA	SB	SC	SD
K1C29	1.19	1.19	1.19	1.2	1.57	1.57	-	-
K3C24	1.31	1.31	1.31	1.31	1.73	1.73	1.49	1.50

고리1 제어봉 CD

고리1 제어봉 SA

고리3 제어봉 CC



DCRM 편차 증가 원인



3. 기저신호 증가

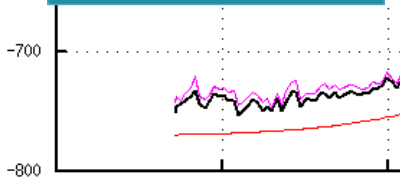
- 일정량 이상의 기저신호는 보정된 측정 신호를 작게해 잡음의 영향을 높임

발전소별 기저신호

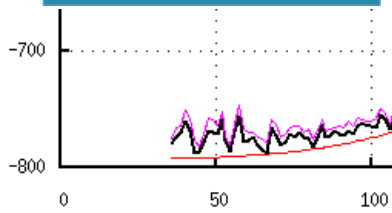
[nA]

BACKGROUND SIGNALS		K1C25	K1C26	K1C27	K1C28	K1C29	K2C18	K2C25	Y1C23	K3C24
BOT		0.9001	1.4095	1.9291	1.7548	1.4625	1.5647	1.6748	0.5066	0.5176
TOP		0.8321	1.2924	1.6339	1.5045	1.3474	1.5737	1.6377	0.7879	0.4265

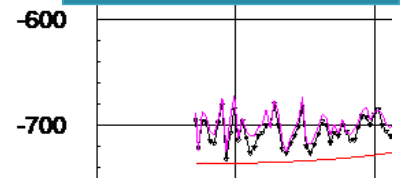
고리1호기 25주기 제어봉 SA



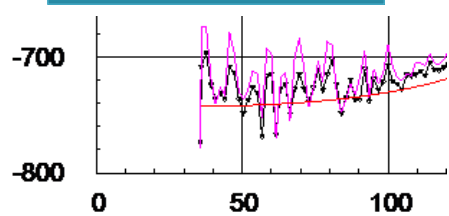
고리1호기 26주기 제어봉 SA



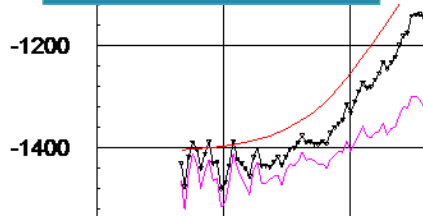
고리1호기 27주기 제어봉 SA



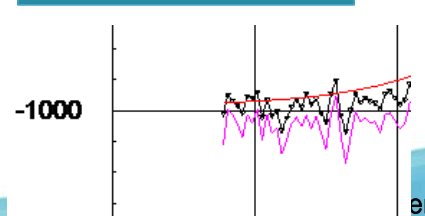
고리1호기 28주기 제어봉 SA



고리2호기 25주기 제어봉 SA



고리3호기 24주기 제어봉 SB



기저신호 보정 민감도 분석



1

기저신호 보정 민감도 분석 개요

2

기저신호 보정 민감도 분석 방법

3

기저신호 보정 민감도 분석 결과



기저신호 보정 민감도 분석 개요



기저신호 보정 민감도 분석의 필요성

- 고리1호기 제어봉 CA/CC의 경우 잡음이 크게 발생될 수 있는 여지가 있음
- 고리1호기 제어봉 CA/CC의 경우 잡음의 영향으로 최적 기저신호 보정이 어려움
- 발전소의 특성을 고려하여 기저신호 보정 민감도 분석 필요함

기저신호 보정 민감도 분석시 고려 사항

- 기존 DCRM 기저신호 보정 방법론의 범주 내에서 기저신호 보정 분석
- 기저신호 검증 요건 중 잡음의 영향을 가장 많이 받는 검증 요건을 선정
- 상·하부 계측기는 독립적으로 계측되며 각기 다른 기저신호를 보정함

분석 방법 및 대상

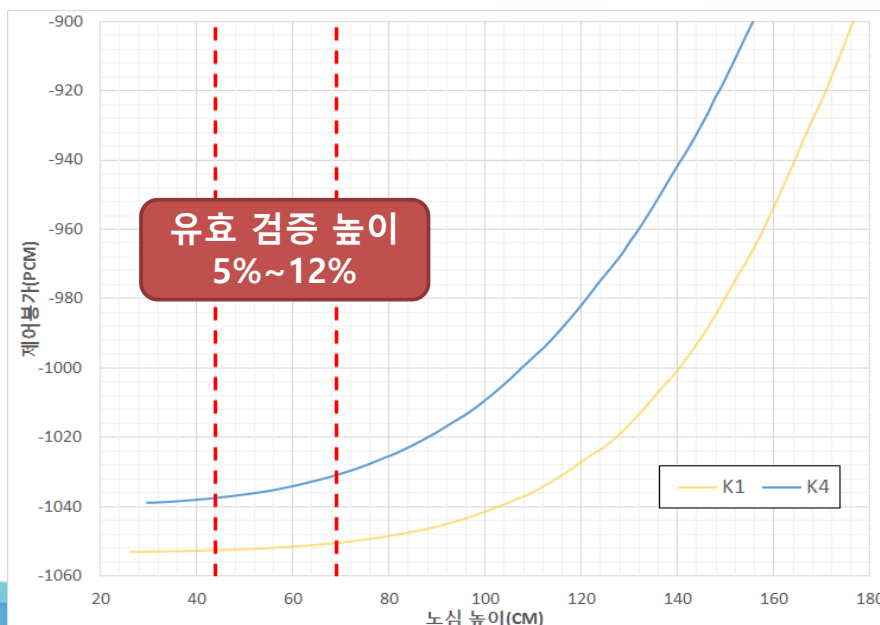
- 제어능 곡선의 기울기 검증을 위한 유효 높이(5%)를 8%, 10%, 12%로 변경
- 상·하부 계측 신호의 기저신호 보정 시 독립적인 유효 높이 기준을 적용해서 평가
- 기측정된 고리1호기 동적 제어능 제어봉 측정의 상·하부 계측 자료를 이용

기저신호 보정 민감도 분석 방법



- 5% 유효 검증 높이를 8%, 10%, 12%로 조정하여 기저신호 보정 민감도 분석
- 5% 유효 높이 검증은 검증 항목 중 잡음 영향에 가장 민감하고 검증 항목 우선순위가 높음
- 고리1호기 제어능 곡선의 특성을 고려하여 민감도 분석(타호기 대비 제어능 곡선의 기울기가 일찍 완만해짐)
- 기 측정된 고리1호기 DCRM 신호 이용

고리1호기와 고리4호기 제어능 곡선 비교

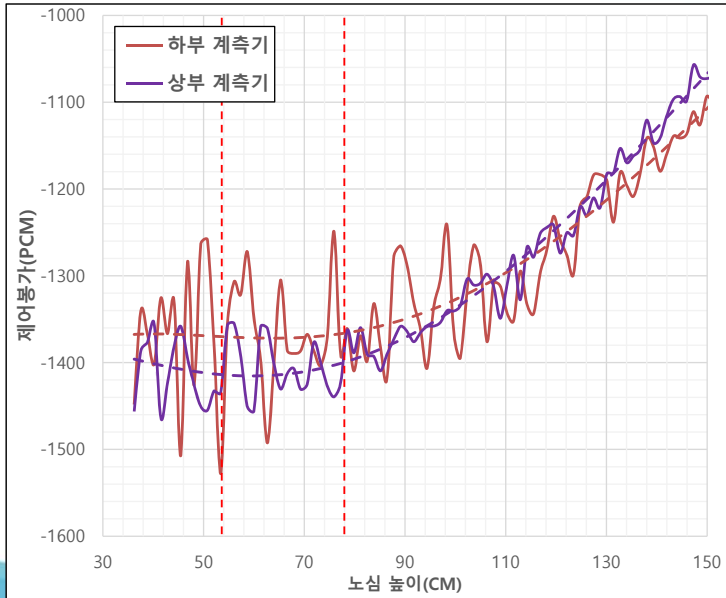


기저신호 보정 민감도 분석 방법

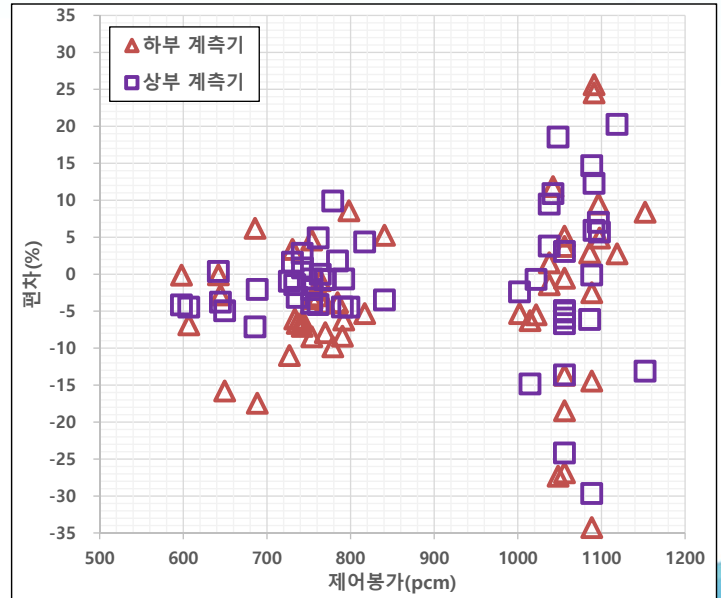


- 상·하부 계측기 신호를 나누어 기저신호 보정 민감도 분석
 - 상·하부 계측기의 제어능 곡선의 기울기가 상이함
 - 상·하부 계측기별로 측정 편차 분포가 다른 경향을 보임

고리1호기 상·하부 계측기 동적 제어능 곡선



고리1호기 상·하부 계측기 제어능 편차



기저신호 보정 민감도 분석 결과

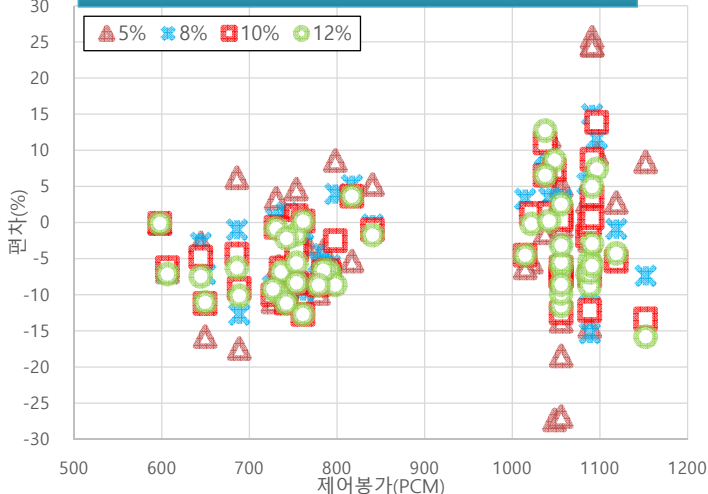


- 고리1호기 상·하부 계측기별 기저신호 보정 민감도 평가
 - 제어봉가 1000 pcm 이상의 경우, 8 %, 10 % 의 검증 결과가 5 % 보다 편차가 작은 영역 분포됨
 - 제어봉가 1000 pcm 이하의 경우, 유효 높이 별 민감도가 크지 않음
- 분석 결과를 토대로 상·하부 유효높이를 다양하게 조합하여 제어봉가 민감도 분석

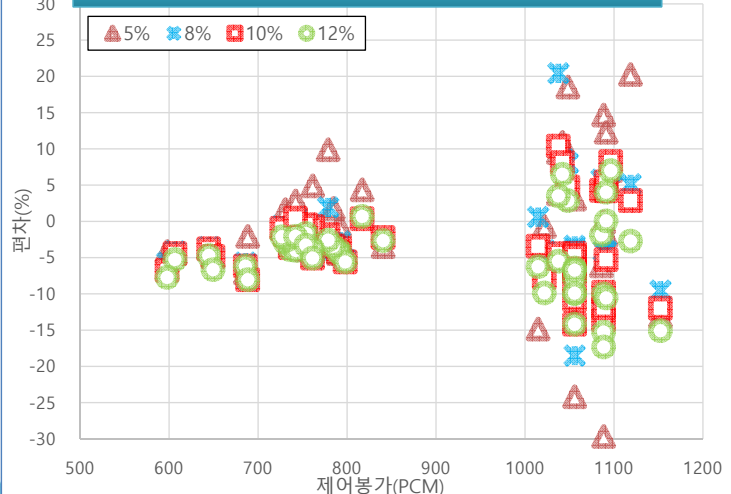
고리1호기 상·하부 계측기 기저신호 보정 민감도 평가 결과 RMS

유효 높이	5 %	8 %	10 %	12 %
하부 계측기 신호	14.5	6.8	7.2	7.4
상부 계측기 신호	9.3	6.6	6.4	7.1

고리1호기 하부 계측기 기저신호 보정 민감도 평가 결과



고리1호기 상부 계측기 기저신호 보정 민감도 평가 결과



기저신호 보정 민감도 분석 결과



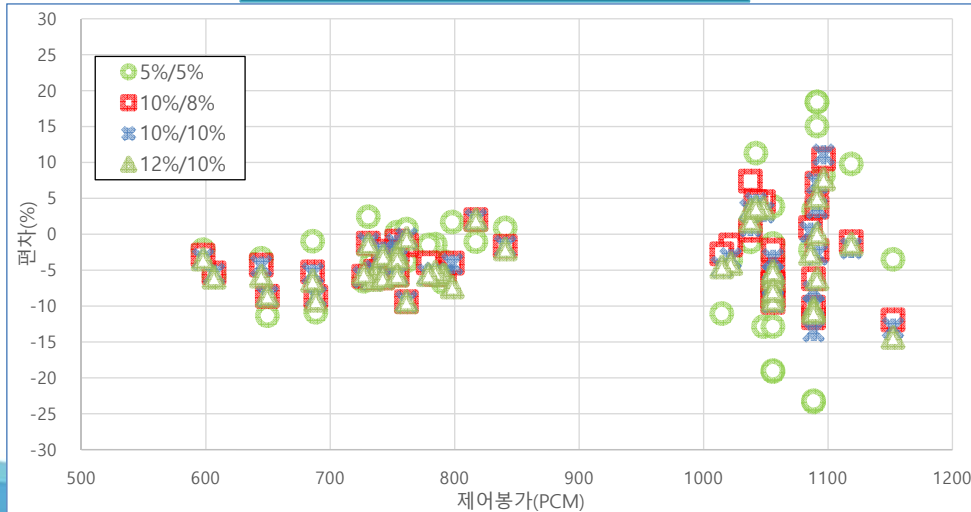
고리1호기 상/하부 계측기 합성 기저신호 보정 민감도 평가

- 제어봉가 1000 pcm 이상의 경우, 측정값의 편차가 줄어 판정 기준 15 %을 만족함
- 제어봉가 1000 pcm 이하의 경우, 유사한 경향을 보임
- RMS의 경우, 상부 계측기 10 %/하부 계측기 10 % 조합이 수치상 작으나 다른 조합과의 차이는 미미함

고리1호기 기저신호 보정 민감도 평가 결과 RMS

유효 높이 RMS	5 % / 5 %	10 % / 8 %	10 % / 10 %	12 % / 10 %
	11.0	6.0	6.2	6.4

고리1호기 기저신호 보정 민감도 평가 결과



NF All rights reserved

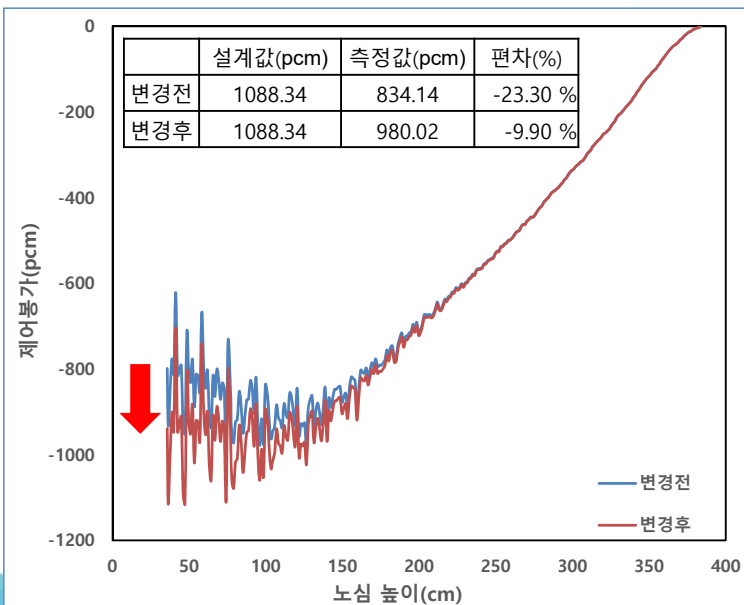
기저신호 보정 민감도 분석 결과



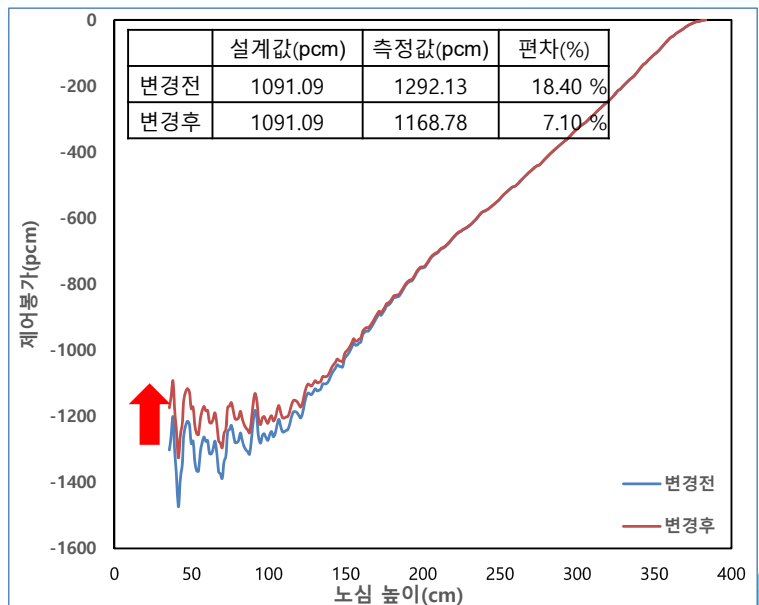
고리1호기 기저신호 보정 민감도 분석 결과 (제어봉 곡선 비교)

- 고리1호기 제29주기 제어봉 CC의 측정 제어봉 곡선이 내려감
- 고리1호기 제30주기 제어봉 CA의 측정 제어봉 곡선이 올라감

고리1호기 29주기 제어봉 CC



고리1호기 30주기 제어봉 CA



요약 및 제언



동적 제어봉 제어능 측정 편차 증가 사례 발생

- 고리1호기 31주기 동적 제어봉 제어능 시험 불만족 사례 발생
- 제어봉가 1000 pcm 이상인 제어봉 CA와 CC에서 발생

동적 제어봉 제어능 측정 편차 증가 원인 분석

- 잡음으로 인해 기저신호 보정 능력 저해
- 발전소 운전 주기, 제어봉 삽입 속도, 제어봉 제어능 크기 등의 특성에 의한 잡음 영향 증가

기저신호 보정 민감도 분석

- 유효 높이에 따른 기저신호 보정 민감도 분석 (기준 5 % → 변경 8 %, 10 %, 12 %)
- 상·하부 노외 계측기 독립적인 기저신호 보정 민감도 분석
- 기저신호 민감도 평가 결과, 기측정된 고리1호기 DCRM 시험 결과 개선

제언

- 동적 제어봉 제어능 측정 편차가 증가 추이에 있는 발전소는 기저신호 보정 민감도 검토 고려

Thank You

