2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력 학회

동적 제어봉 제어능 측정에서 기저신호 보상방법

A Simple Approach to Eliminate Background Signals in Dynamic Control Rod Reactivity Measurements for LWRs

이은기, 우일탁, 신호철, 류석진, 배성만

한국전력 전력연구원
대전 광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

제어봉 제어능 측정을 보다 신속히 수행하고 액체폐기물 생성을 방지하여 원전경제성을 향상시킬 목적으로 미국에서는 수년전부터 동적 제어봉 제어능 측정방법을 개발하여 시행하고 있으나 국내에서는 최근 들어서야 동적제어봉 제어능 측정방법론을 개발되었다. 본 논문은 국내 가압경수형 원전이 갖고 있는 구조적 문제, 즉 제어봉 삽입 속도가 40 ~ 48 step/min으로 국외 발전소보다 낮아 제어봉이 2/3이상 노심에 삽입되었을 때 이미 상당량의 기저신호(background signal)가 포함될 수 밖에 없다는 점에서 기존 동적제어능 측정방법에서 다루지 않았던 기저(Background) 신호 보정방법에 대하여 논하기로 한다.

ABSTRACT

Dynamic rod worth measurement (DRWM™) methodology commercialized by Westinghouse was successfully applied to many nuclear power plants in USA to measure the control rod worth at Low Power Physics Tests. But in KOREA, to increase the capacity of nuclear power plant, KEPRI has developed Dynamic Control rod Reactivity Measurement (DCRM) system using more rapid and sophisticated reactivity measurement methodology without the change of boron concentration. The object of this paper is to consider the practical method to eliminate background signals from measured ex-core detector signals. Because of relatively low rod insertion speed (40 ~ 48 steps/min), the background signals affect the final results severely. Therefore a simple and practical method based on the behavior of integral rod worth curve was developed and applied. A total of 26 experimental results show that the proposed approach works to figure out the background signals.

I. 서 론

국내 원자력 법은 원자력발전소가 원전연료 장전 후 상업운전에 들어가기 전 영출력 상태에서 각종 시험을 시행하고, 규정된 조건을 만족하는지 확인토록 하여 규정하고 있다. 이는 안전성 분석에 사용된 각종 인자들의 타당성을 확인하기 위함이다. 일련의 절차에 따라 수행되는 각 시험들을 수행함에는 일정 시간이 필요한데, 규정조건을 만족하면서 시험시간을 줄일 수 있다면 원자로 정상출력 도달시간을 그 만큼 줄여 원전 경제성 향상을 기할 수 있기 때문에 시험시간을 줄이기 위한 시도들은 지속적으로 이루어져 왔다. 제어봉 제어능(제어봉가) 측정 시험도 그 중의 하나이다. 이것은 전체 영출력 노물리시험 시간의 대부분을 차지할 만큼 소요시간이 길기 때문에 발전소에서도 측정 순서 변경 혹은 측정

절차의 간소화 등으로 가능한 최적화된 방법들을 개발하여 소요시간을 줄이기 위해 노력하고 있다. 그럼에도 불구하고 현재 WH형 노심이나 한국표준형 원전 노심의 제어봉가 측정에 공히 이용되는 붕소희석법에 이은 제어봉 교차방법은 그 측정소요시간이 10 ~ 12시간에 이른다. 향후 현재 측정하지 않는 정지제어봉까지 측정하는 경우는 그 시간이 더욱 늘어날 것으로 전망된다. 이에 따라 제어봉가 측정을 보다 빠른 시간에 수행할 수 있는 방법을 모색하게 이르렀다.

최근 전력연구원 등은 기존의 제어봉 측정방식에서 탈피하고자 "동적 제어봉 제어능 측정 방법론"을 개발하여 WH형 및 한국표준형 원전에 적용한 바 있다. 이 방법은 미국 Westinghouse(WH)사가 개발하고 이미 미국내 여러 원전에 적용하고 있는 DRWM™[1]과 유사하나 국내에서 독자적으로 개발되고 한국표준형에도 처음으로 적용된 것이다. 평형상태 노심에 제어봉을 삽입, 인출하고 완전 삽입 전후의 노외계측기 신호를 분석하여 제어봉가를 계산하는 이 방법은 약 2시간 만에 8~9개 제어봉의 제어봉가를 모두 측정할 수 있고, 각 제어봉의 절대적 제어능을 알 수 있으며, 미분제어봉가도 측정이 가능하고 액체폐기물이 발생하지 않는 등의 장점을 가지고 있다. 이를 위해 동 방법론에 필요한 자료와 노외계측기 신호를 적절히 다룰 수 있는 기술이 개발되었으나 현 국내 가압경수형 원전이 갖고 있는 구조적 문제, 즉 제어봉 삽입 속도가 40 ~ 48 step/min으로 국외 발전소보다 낮아 제어봉이 2/3이상 노심에 삽입되었을 때 벌써 상당량의 background signal이 포함될 수 밖에 없다는 점이 새로이 부상되었다. 기저(Background) 신호를 어떻게 추정하느냐는 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 문제이다.

본 논문은 background 신호를 어떻게 처리할 수 있는가에 대한 실제적인 방법에 대하여 논한다.

II. 본 론

가. 기저신호에 대하여

노외계측기는 비보상전리함을 사용한다. 중심전극에 B^{10}이 도포되어 있기 때문에 중성자가 노외계측기에 입사하게 되면 보론과 반응하게 되고 이때 하전입자 혹은 감마선이 방출된다. 방출된 하전입자나 감마선은 원통내 물질을 전리시키게 되고 원통과 중심전극상이에 일정한 전위가 걸려있어 결국 전류가 흐르게 된다.

$$
\begin{aligned}
{}^{10}_{5}B + n_{th} &\rightarrow {}^{7}_{3}Li(0.84\,MeV) + {}^{4}_{2}He(1.47\,MeV) + \gamma(0.48\,MeV) \quad ;93.7\% \\
{}^{10}_{5}B + n_{th} &\rightarrow {}^{7}_{3}Li(1.01\,MeV) + {}^{4}_{2}He(1.78\,MeV) \quad ;\ 6.3\%
\end{aligned} \tag{1}
$$

중성자를 직접 측정할 수 없어 간접적으로 측정하는 방법을 사용하지만, 반응 자체는 노외계측기에 입사하는 중성자수에 비례하기 때문에 중성자량과 전류세기는 비례관계를 갖게 되고 따라서 상대적인 중성자속 세기를 알 수 있게 된다. 문제는 노외계측기 외부에서 직접 들어오는 감마선이 fission과 동일한 효과를 보인다는 것에 있다. 중성자 수가 많은 경우는 그 효과가 미미하지만 중성자수가 적은 경우라면 감마선은 중성자 밀도를 파악하기 힘들게 하는 요인이 된다. 알려진 가장 중요한 감마선원은 단연 노심이다. 노심내 핵분열성 물질로부터 방사되는 감마선량은 저누설모형 여부와 예방정지기간의 장단에 의존한다. 유효한 신호 세기를 얻기 위해선 노외계측기에 도달하는 중성자수와 감마선사이의 비율이 크면 클수록 좋지만 저누설 장전모형의 경우 그 비율이 감소하기 때문에 감마선의 영향력이 증대된다. 또 예방정지기간이 짧으면 감마선 방출 핵종이 충분히 감쇠되지 않아 감마선 준위가 전반적으로 높아지고 따라서 측정신호에서 감마선에 의한 영향이 증대된다. 그러나 실제적으로 측정된 전류신호에서 감마선에 의한 것이 어느 정도나 되는지는 알기 어렵다. 감마선 신호세기를 알 수 없기 때문이다. 여기에 노이즈도 가세하게 되면 더욱 그러하다. 또 계산을 통해 추정하는 것도 매우 어렵다. 굳이 추정하려면 우선 3차원 중성자속 분포를 계산하고, 그에 따른 감마선원항을 계산한 뒤 감마선에 대한 지배방정식을 풀어내야 한다. 그러나

이 또한 정상상태의 경우에만 가능하고 본 방법론과 같이 제어봉군이 일정속도로 이동하고 인출되는 경우는 중성자속과 감마선에 대한 관계식을 동시에 풀어야 하기 때문에 현실적으로는 계산을 통해 제어봉이 완전 삽입된 경우 노외계측기에서 검출되는 신호중 감마선의 분율이 얼마나 되는지를 알아낼 수는 없다.

중성자원과 기저신호를 계산할 수 있는 통계적 방법들이 개발되어 일본에서 사용[2]되고 있으나 노심에 제어봉이 완전 삽입된 경우에, 정적상태가 아닌 동적 상황이 지속되고 있는 상황에서

나. 가정

상기한 바와 같이 계산모델을 통하여 기저신호를 알아낼 수 없기 때문에, 기저신호를 평가하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

첫째, 제어봉 삽입 및 인출은 중성자속 분포를 심하게 왜곡시키는 효과가 있는데 이 때문에 미세하나마 제어봉 완전삽입 시는 완전 인출상태의 감마선원항과는 다른 감마선 분포가 예상된다. 따라서 ARO 상태에서 감마선에 의한 영향을 보상전리함(Compensated Ion Chamber) 등을 이용하여 얻었다 하더라도 제어봉 하나가 완전 삽입된 경우의 기저신호로 사용할 수는 없다고 가정한다.

둘째, 제어봉 삽입간에 통상 15 가량의 시간차이가 있고 매 제어봉 측정시 최초 노외계측기 신호 세기와 제어능에 차이가 있기 때문에 각 제어봉의 완전삽입시 감마선 준위는 동일하지 않다고 가정한다. 따라서 각 제어봉의 감마선 준위는 따로 평가한다.

셋째, 상하부 노외계측기 감마선 영향이 서로 다르다고 가정한다. 이는 상하부 노외계측기의 중성자 검출 정도가 다른 것처럼 감마선 준위 역시 상하부 노외계측기에 따라 다른 값을 갖게 될 것으로 예상하기 때문이다.

상기한 가정에 따라 감마선에 의한 기저(background) 신호는 제어봉군에 따라, 상하부 노외계측기 각각 따로 추정하였다. 문제는 기저신호가 얼마인지를 어떻게, 어디에 근거를 두고 추정하느냐 이다. 이미 절대적인 값이나 중성자만에 의한 신호세기와의 상대적 분율을 알지 못한다고 했으므로 신호자체의 특성만으로 이를 추적할 수는 없다.

다. 기저신호 세기 영향 분석

우선 계측기 측정 신호 속에 핵분열에 따른 신호와 감마선에 의한 신호가 일정한 분율을 갖고 있다고 가정하고 모의계산 결과에 일정한 감마선 신호를 부가하였을 때 동적 반응도 계산 곡선이 어떤 형태를 갖게 되는지를 살펴보기로 한다. 즉, 기저 신호가 노외계측기 측정 신호속에 포함되어 있다면 측정신호는 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$I_{CEA,B,T}^{measured}(t) = I_{CEA,B,T}^{neutron}(t) + I_{CEA,B,T}^{\gamma} \qquad (2)$$

이때 중성자속에 의한 전류($I^{neutron}$(t))는 RAST-K 전산코드[3] 를 사용하여 상하부 노외계측기 각각에 대하여 얻었고, 기저신호인 $I^{g}(t)$ 역시 상하부 노외계측기에 대하여 각기 따로 가정하였지만 시간에 따라 변하지 않는다고 하였다. 측정전류는 모사계산으로 얻은 전류에 일정량의 기저신호를 더하여(식 (2) 참조) 만들고 이를 이용하여 동적 제어능을 계산하여 보았다.

그림 [1]은 울진 2호기 12주기 조절제어군 B를 대상으로 한 상기한 실험결과를 나타낸 것이다. 감마선신호 세기가 중성자속 신호의 1.5배에 달하는 경우, 즉 중성자로 인한 전류는 1nA, 감마선에 의한 전류는 1.5nA인 경우, 동적 제어능 곡선은 그림 [1]의 ‘5’와 같이 나타나게 된다. 그림을 보면 감마선의 기여, 즉 기저신호가 클수록 동적 제어능 곡선은 마치 정

반응도가 삽입되는 것과 같은 진행상황을 나타낸다. 즉, 제어봉 삽입위치가 왼쪽으로 내려갈 수록 반응도는 오히려 증가하는 것이다.

상기한 현상이 발생하는 이유는 다음과 같다. 우선 반응도는 중성자 수밀도를 측정할 수 있다면 그에 따른 지발중성자군의 수밀도 변화를 고려하여 결정할 수 있는데 식 (1)과 같이 기저신호가 끼어들게 되면, 중성자 수밀도는 기저신호만큼 과대 평가 된다. 특히 중성자 수밀도가 낮은 경우 그러한 경향은 심화된다. 또, 과대평가된다는 것은 실제 보다 더 많은 중성자 수가 존재하는 것과 같은데 여기에 지발중성자군이 개입하게 되면 그 수밀도의 영향이 증폭된다. 따라서 반응도 관점에서는 엄연히 중성자 수밀도가 감소하여야 하지만 기저신호 때문에 실제보다 중성자 수밀도가 '덜' 감소하는 것으로 '곡해'하게 되고 이를 수학적으로 만족하기 위해선 소량의 정반응도가 삽입된 것처럼 반응도 곡선이 계산되어야만 한다. 이것이 중성자수 밀도가 낮아질 수록, 감마선에 의한 기저신호가 커질수록 동적 반응도 곡선이 심하게 왜곡되는 이유이다.

라. 기저신호 보상방법

그림 [1]과 같은 현상들은 실제 국내 실험 과정을 통해서도 여지없이 볼 수 있었다. (그림 [2]참조) 따라서 절대값이나 중성자속으로 인한 전류세기와의 상대적 분율을 알지 못하는 상황에서 background를 어떻게 보정할 수 있겠는가가 문제의 핵심인데, 본 방법론에선 그림 [1]에서 나타난 바와 같이 만일 감마선 영향이 없다면 반응도 곡선이 어떤 형태를 보이겠는가에 착안점을 두었다. 감마선 영향이 없다면 반응도 곡선은 제어봉의 삽입이 진행될 수록 제어능이 감소, 그 영향력이 미미해지기 때문에 완전삽입에 가까울수록 제어능 곡선은 더 이상 변하지 않고 일정한 값으로 접근해 나간다. 완전삽입이후 즉시 제어봉을 인출하게 되면 정반응도가 부과되므로 제어능 곡선 기울기는 완전삽입시점에서 최소값을 보이고 다시 반등하여 제어봉이 완전 인출되면 초기 제어봉 삽입시점의 반응도로 돌아가게 된다. 따라서 제어봉 완전 삽입 시점에서, 감마선영향이 없다면, 동적 제어능 곡선의 기울기는 '0'이 되어야 한다. 또 그때의 동적 제어능값은 최대값이 되어야 한다.

따라서 기저 신호를 가정하여 그 크기를 조금씩 증가시키면서 동적 반응도 분포를 계산한다면 종국에는 감마선의 영향이 배제된 동적 반응도 분포 곡선(γ =0)을 얻을 수 있게 될 것이다.즉, 감마선에 의한 전류세기를 임의로 가정하고 이를 조금씩 증가시키되

①그 크기는 가장 낮은 측정 신호보다는 작고,
②삽입 완료시 반응도 곡선 분포의 기울기가 최소화 되면

계산을 종료하는 것이다. 이는 필요시 수백번의 반복계산이 필요함을 의미한다.

이 방법을 적용하여 앞서 울진 2호기 12주기 제어능 분포 곡선을 모사한 결과 그림 [3]를 얻을 수 있었다. 그림 [3]를 보면 5개 그래프가 모두 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 기저신호 증감분을 약간씩 달리하였기 때문이다. 그럼에도 불구하고 1~5까지 오차는 25pcm 이내로 나타났다. 그림 [1]과 [3]은 반응도 곡선의 특성을 이용하여 기저신호를 어느 정도 추정할 수 있다는 것을 보여준다. 물론 이 방법 역시 절대적인 기저신호를 제공할 수는 없지만 기저신호의 절대값 혹은 중성자속에 의한 전류세기와의 상대값을 알 수 없는 형편에서 가장 합리적인 추정이라 할 수 있겠다.

마. 기저신호세기가 제어능에 미치는 영향

그렇다면 문제는 '기저선호가 최종 결과값에 얼마나 큰 영향을 미치는가'이다. 즉, 절대값으로 0.001nA의 기저신호 차이가 결과값에 얼마나 영향을 미치느냐이다. 이 부분은 경우에 따라서 다른데, 6개 주기 실험에 적용한 결과 대략 0.001nA는 1~2pcm정도의 오차에 해당함을 알 수 있었다. 예를 들어, 고리 1호기 21주기 조절제어군 A의 상하부 노외계측기에 대하여 기저신호를 변경시키면서 반복 계산한 결과 설계치와의 오차가 다음과 같이 변경되고 있었다.

표 <1> 기저신호 세기가 결과에 미치는 영향

하부계측기			상부계측기		
기저신호 (nA)	측정치-설계치 (pcm)	변동 (pcm)	기저신호 (nA)	측정치-설계치 (pcm)	변동 (pcm)
1.188	116.679	기준값	0.800	86.229	기준값
1.190	120.594	4.0	0.801	87.876	1.6
1.191	124.536	4.0	0.802	89.528	1.7
1.192	128.505	4.0	0.803	91.185	1.6
1.194	132.500	4.0	0.804	92.846	1.7
1.195	136.522	4.0	0.805	94.513	1.7
1.196	140.571	4.0	0.806	96.184	1.6
1.198	144.648	4.0	0.808	97.860	1.7
1.199	148.753	4.0	0.809	99.541	1.7

상기한 표 <1>을 보면 상부계측기의 경우 기저신호가 0.809nA일때 반복계산 조건을 만족하였는데 그렇다고 0.800nA가 크게 틀린 값을 주지는 않고 있음을 볼 부 있다. 0.809nA을 사용하였을 경우와 비교하여 완전 삽입시 반응도 곡선이 좀더 빨리 정반응도가 삽입된 것처럼 왜곡될 뿐이다. 하지만 0.809nA를 쓰느냐 혹은 0.800nA을 쓰느냐에 따라 최종 결과값은 약 13 pcm가량 차이를 내게 된다. 하부 계측기는 그 경향이 더 심하여 1.199nA를 쓰는 경우와 1.188nA를 쓰는 경우 32pcm이나 차이를 보인다. 이와 같은 사실은 기저신호 보정 방식이 동적 제어능 측정에서 매우 중요하며 최종결과에 민감한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 기저신호 보정 방식은 객관적 타당성에 근거를 두어야 만 하며, 제안된 방법은 이러한 조건에 부합하는 것으로 판단된다.

III. 결 론

기저신호 보상방법은 지금까지 명확하게 수학적으로나 수치해석적 모델로 제시된 바가 없다. 특히 동적 제어능 제어봉 측정방법과 같이 노심내부에 단 한 종류의 제어봉 만이 삽입되는 경우는 그 기저신호의 크기가 ARO의 것과 동일하다고 볼 수 있는 근거가 없다. 따라서 국내 원전을 대상한 동적 제어능 측정방법에서 가장 중요한 문제인 노외계측기 기저신호 보상을 위한 다양한 방법들이 개발되어야 할 필요성이 있다 하겠다. 본 논문은 그러한 논의에 대한 시발점으로, 그리고 한가지 실제적인 접근방법으로 적분제어능 곡선이 갖는 특성을 이용하여 노외계측기 기저신호를 보상하는 방법에 대하여 살펴보았다. 동 방법을 적용하여 실제 6개주기 26개 제어봉의 동적 제어능 측정에 적용하고, 각각의 그래프를 살펴본 결과 실제 적용에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Y. A. Chao, et al., "Dynamic Rod Worth Measurement," *Nucl. Tech.*, **132**, 403, 2000.
2. Yoichiro SHIMAZU, "Estimation of Neutron Source and Gamma Source Strengths for Reactivity Measurements," **일본원자력학회**, Vol. 38, No. 5, p64 ~ 68, (1996)
3. **이은기 외**, "**비선형** NEM/ANM **방법에 의한 과도상태 모사**," **한 한국원자력학회** 2002 **춘계학술발표회 논문집**, **제**1**분과**(A),217, 2002.

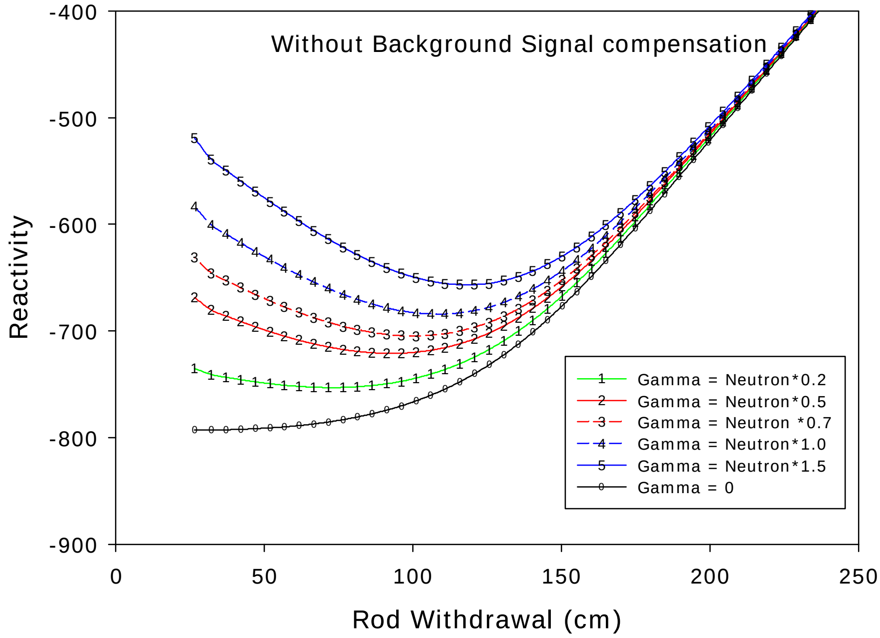


그림 [1] **기저신호 크기에 따른 동적 제어능 평가 결과**

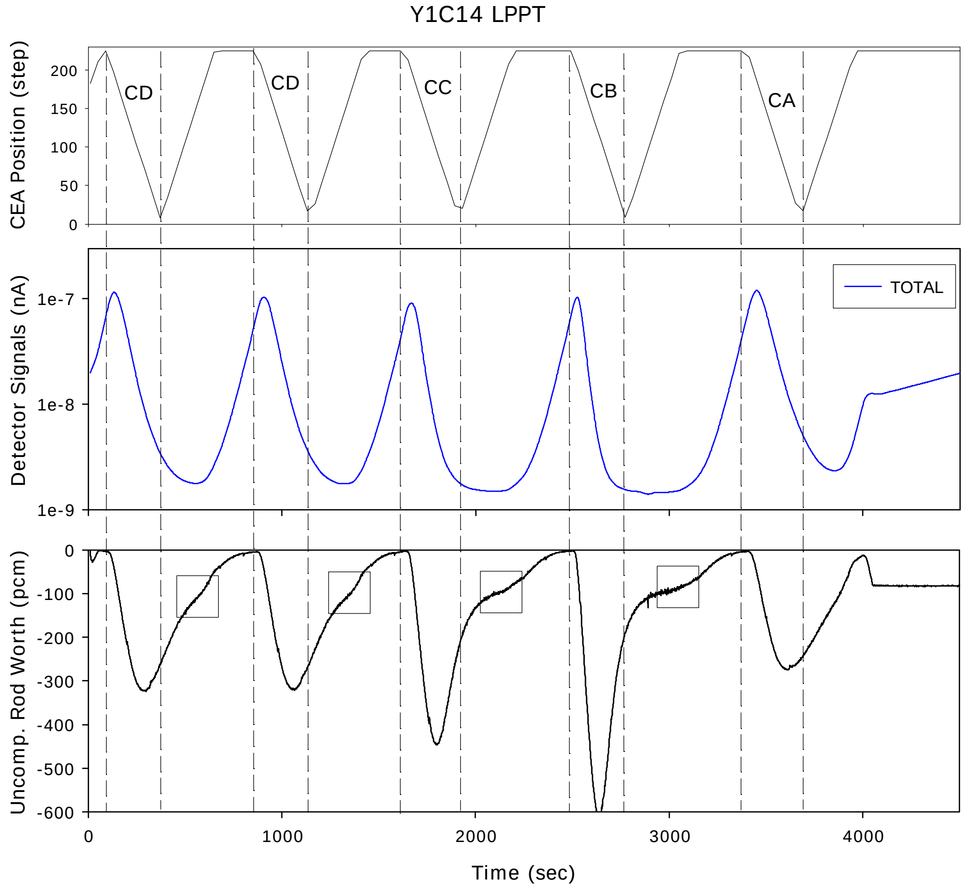


그림 [2] 영광 1호기 14주기: 기저신호 제거 이전의 동적 제어능 곡선(위에서 세번째)

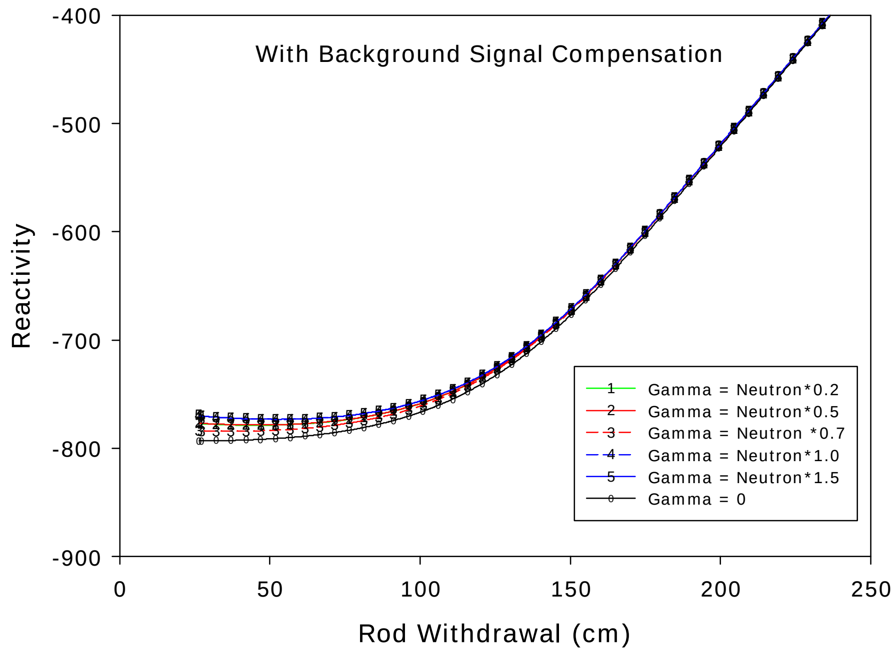
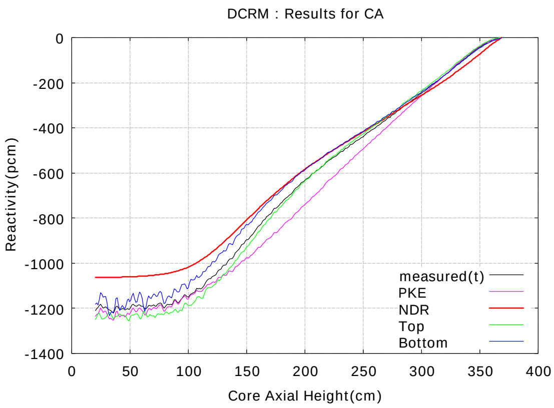
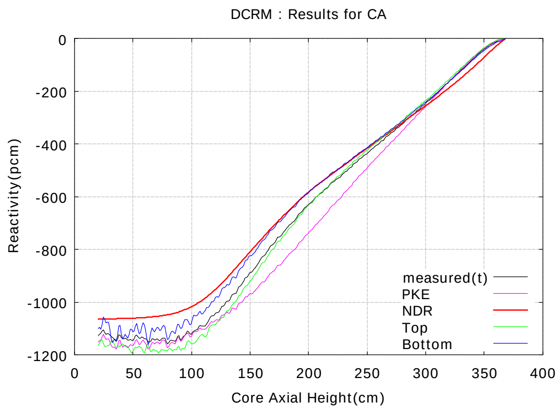


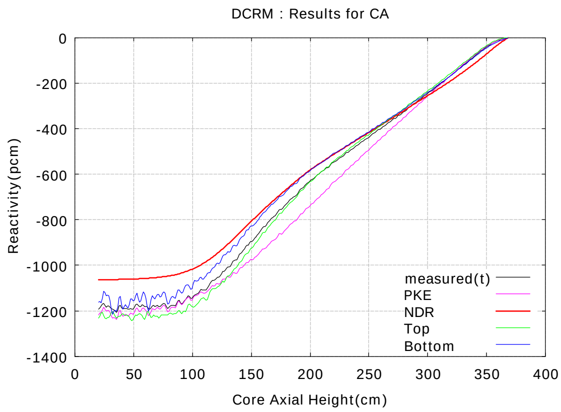
그림 [3] 기저신호가 보상된 동적 제어봉가



(1.1760, 0.8096) – 조건 만족



(1.144,0.755) – 조건을 만족 못함



(1.169,0.800) – 조건을 만족 못함

그림 [4] 고리 1호기 제어뱅크 A 실험치에 적용한 기저신호 보상 결과 비교

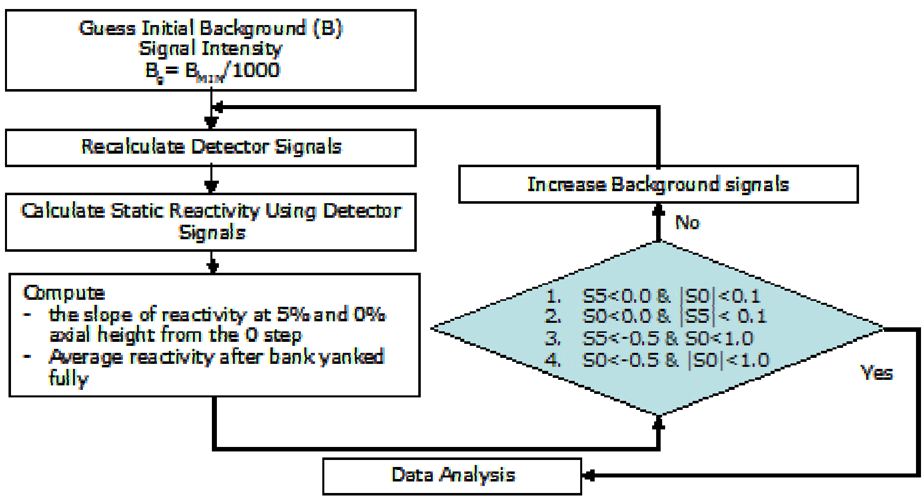


그림 [5] 기저신호 보정 알고리듬