2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성 2호기 연료교체 전, 후 영역 수위변화 분석

Zone Response Analysis Before and After Refueling in Wolsong #2

김 주택, 태 성은, 김 성민, 이 승노, 박 중우

한국전력공사, 월성원자력 제1발전소
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

매일 연료교체가 이루어지고 있는 중수로에서 관심사는 국부과출력보호검출기(ROP)의 운전 여유를 최대한 확보하여 연료 교체 중 원자로 트립 요인을 사전에 차단하는 것이고 채널, 다발 출력에 대한 운전제한치 준수, 중성자 속 평탄화, 결함연료 발생 억제, 그리고 경제성등이라고 판단된다. 출력 관련 변수들은 RFSP 코드의 사전 평가(Pre-Simulation) 기능을 이용하여 최적으로 유지하고 있으며 대단히 만족할 만큼의 정확성을 가지고 있으나 액체영역제어기의 개별 영역 수위예측에 대한 정확성은 바라는 만큼 RFSP가 가지고 있지 못하는 것으로 평가 되어 [1] 국내에서 처음으로 월성2호기의 연료교체 전, 후 자료를 수집하여 액체영역제어기 개별 고유의 특성을 파악하였다. 상부 영역의 급락 현상과 주기적 진동에 대해서도 조사하였다. 기존에 알고 있던 대로 상부 영역의 수위 변화가 큼을 재확인하였고, 설계영역의 경계와 실제 연료 교체에 의한 영역도 다름이 확인되었다.

Abstracts

The main interest in PHWR, which has daily refueling, is to prevent reactor trip during refueling by maximizing operation margin of Regional Overpower Protection(ROP) detector. And the observance of operation limits on channel & bundle powers, the flattening of flux shape, the suppression of fuel defects, and economical efficiency are also important. The power related parameters are being optimized with the tools of RFSP's Pre-Simulation, which has a great accuracy enough to give us a satisfaction. But, with reared to the ability of individual zone level prediction, it has been assessed not to have such a precise accuracy as we want. So, for the first time in Korea, we have grasped the individual liquid zone controller's characteristics unique to Wolsong unit #2 by collecting before and after refueling data. The upper zone's sudden drain events and cycling were investigated. It was reconfirmed that the variations of upper zones are bigger than those of others, as is known. But the fact that the actual boundary of each region affected by refueling is not same as that of design region, is also identified.

1. 서 론

CANDU-6형 원자로는 반응도와 출력 제어를 위하여 14개의 영역(Zone)으로 분리하여 설계되었으며, 각 영역마다 중성자 흡수 체로 경수를 사용하는 액체영역제어기(Liquid 영역 Controller)와 영역의

출력 측정용 2개 백금피복인코넬 검출기, Flux Mapping용 7 8개의 바나디움 검출기가 포함되어 있다. 연료 교체를 하다 보면 이웃 하는 영역과 멀리 떨어져 있는데도 불구하고 이웃 하는 영역에 많은 영향을 주는 채널이 있어, 교체 연료 선정에 있어서 전체 영역의 반응을 파악치 않고 있다면 Flux 평탄화를 제대로 이루지 못하게 된다. 영역과 영역 사이의 경계에 위치한 채널을 교체하면 해당 영역 보다 인접 영역에 더 많은 영향을 주기도 하고, 경계에 위치한 채널이 아닌데도 인접 영역에 많은 영향을 주는 채널이 있고, RFSP의 반응도 주입량 계산 결과보다 2 3배정도 반응도가 주입되는 듯한 변화를 보이는 특정 채널들도 있음을 알고 있었다. 이 보고서는 알고 있었던 사실을 자료 수집과 정리를 통하여 연료교체 전,후 수위변화 특성을 기술하였는데 월성 4개 호기 중 최초로 월성 고유 노심 특성을 파악한 결과로 앞으로 2호기 연료교체에 활용하여 영역 수위 제어 및 Flux Control에 적절하게 사용하고자 하며, 중수로 노심 연구에 도움을 주고자 작성되었다. 월성 1호기에는 G-2에서 연료 선정 자동화 프로그램을 구입하면서 G-2의 영역별 반응을 Data Base로 작성한 프로그램도 같이 도입하였는데 월성2호기에서 분석한 결과와 G-2 결과와 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이 분석의 의미는 월성2호기 고유의 채널별 각 설계 연소도에 대한 수위변화를 평가한 것에 있으며, 앞으로 2호기 연료교체에 활용하는데 있다.

2. 수위 제어

연료 교체 시 영역의 수위변화에 영향을 주는 인자는 여러 가지가 있지만, 정상운전 상태에서는 각 영역별 백금피복인코넬 검출기(2개/영역)의 출력이 가장 큰 영향을 미친다. 영역의 교정되지 않은 백금피복인코넬(Pt 검출기) 검출기 출력이 출력변동하면 연료출력은 93% 만큼 변하는데 반해 약 89%의 출력밖에 Reading을 하지 못해 1.04라는 상수를 곱하여 연료 출력과 일치시키는 방법을 사용한다. 이러한 것은 과도기간에 적절하나 100% 안정화 상태에서는 104%를 유지하므로 이를 보상하기 위해 열 출력과 불일치 인자 ADAF를 만들어 그 크기만큼 항상 보상 한다. 또한 Flux Mapping 프로그램에서 계산한 보다 정확한 영역 출력 값(Normalized Zone Power) 과의 불일치도 A*DIF 라는 인자를 이용해 계속적으로 PMCR(Power Measurement Calibration Routine) [2] 을 통해 자동 보상된다. 이렇게 보상하는 이유는 Pt 검출기가 반응이 빠른 반면 정확성이 떨어지기 때문이다. 이러한 특성으로 Pt 검출기는 Control과 Safety 용도로 중수로에서 사용되고 있다. 교정된 교정영역출력(Pic)을 기준으로 하여 Flux Tilt (ETi)는 원자로 출력(그림 1) 과 수위(그림 2)를 기초로 공간제어(Spatial Control)를 해나간다 [3] . 일반적으로 어떤 연료관의 연료를 교체할 때 해당 채널의 영역수위변화는 Pt 검출기 인접 거리와 연소도에 따라 크게 변하며, 교체하는 채널과 인접된 영역도 Pt검출기의 거리에 따라 수위 변화량이 좌우된다.

PiC = 1.04 × PiU + A*DiF + ADAF ---------- ①

PiU : 개별 영역의 2개 Pt출력의 평균 값(Uncalibrated 영역 Power), i는 1에서 14
KD : 1.04(상수)
A*DiF : Flux Mapping에서 계산한 영역출력과 불일치에 대한 교정인자, i는 1에서 14
ADAF : 열 출력과의 불일치에 대한 교정인자
PiC : Calibrated 영역 Power, i는 1에서 14

ETi = PiC - PAV ---------- ②

ETi : Flux Tilt, i는 1에서 14
PAV : 14개 가중평균 출력(Weighted Avg. Zone Power)

ELi = LEVAV – LEVi ---------- ③

LEVi : 14개 개별 영역 수위, i는 1에서 14
LEVAV : 14개 수위 평균값

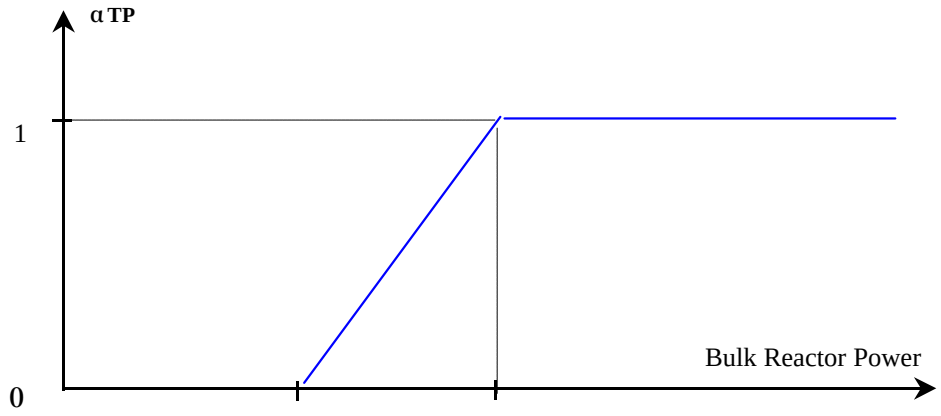


그림 1. αTP : Power-Related Flux Tilt Control Phasing-out Factor

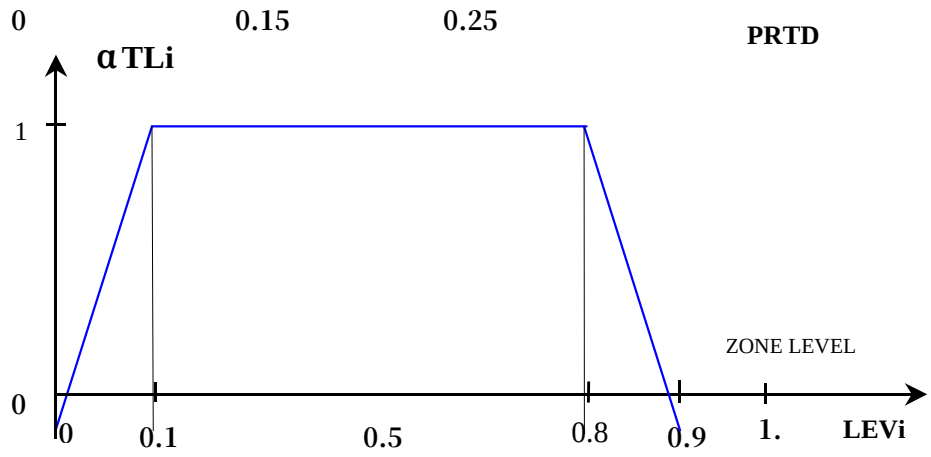
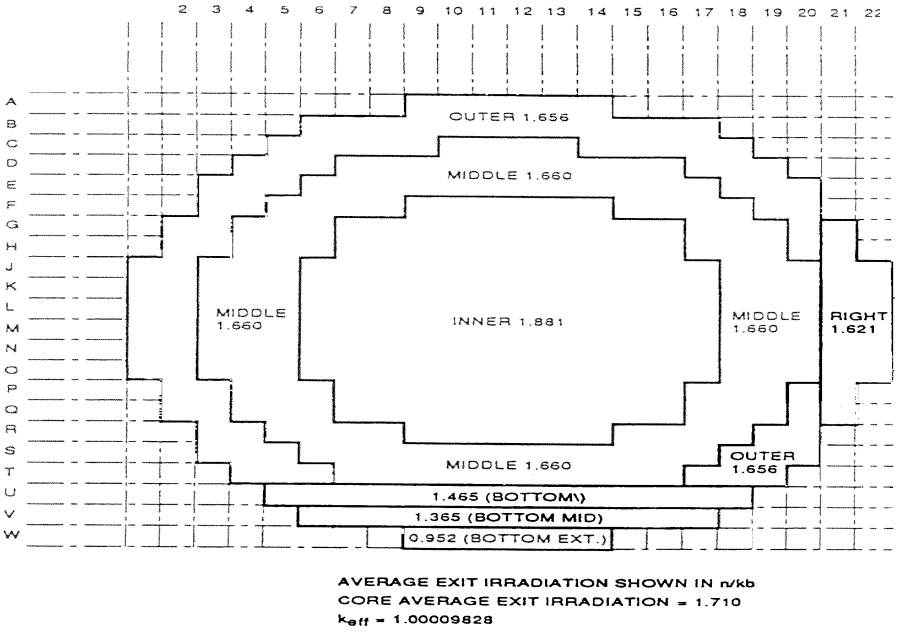


그림 2. αTLi : Level-Related Flux Tilt Control Phasing-out Factor

3. 연료 교체 전, 후 수위 변화 특성 점검 결과

중수로는 경수로와 다르게 한번 신연료로 모두 장전한 뒤 약 110 FPD(Full Power Day) 경과 후 반응도 부족분을 보상하기 위하여 하루에 16다발씩 새 연료로 교체하여 준다. 110 FPD에서 덜 탄 연료를 교체해야 하는데, 연소도 손실을 최소화하기 위하여 월성2호기에서는 1주기에 Swing-8이라는 연료 교체 방식, 즉 전체 노심(380개중 2개만 제외)에 대해 각 채널에 장전된 12다발 중 가장 많이 연소된 가운데 8다발을 교체하고 2주기부터는 Normal-8 이라는 방식으로 연료 채널 끝 부분에 위치한 8다발을 방출하는 방식으로 연료교체를 수행한다. 이렇게 해도 1주기에 방출된 연소도는 설계치

(171.7Mwh/kgu)의 1/2 밖에 되지 않으므로 영역 수위가 제대로 변하지 않아 1주기 자료는 모두 제외하고 2000년 1월까지 채널 당 3 5 횟수의 자료를 가지고 연료교체 전, 후 영역 수위 변화 결과를 각 채널별 연소도 설계 값(그림 3) [4] 으로 Normalize 하여 분석하였다.



한국전력공사 월성원자력 2,3,4호기 최종 안전성 분석 보고서
핵연료 조사영역 (평균방출 핵연료 조사를 n/kb로 표시) 그림 1

그림 3. 평균 방출 핵연료 조사영역을 n/kb으로 표시

3.1 영역의 경계 확인

설계상 영역 구분과 실제적인 영역구분을 그림 4에 제시하였으며, 그림 5는 1호기에서 연료교체시 사용하고 있는 영역의 경계와 비교(G-2에서 도입한 Data Base)한 것이다. 1호기의 Old 검출기(백금) Coiled Type 일 때도 인접 영역에 영향을 주는 채널들이 있었지만 현재(SIR : Strait Individual Replacement Type)와 같이 많은 영향을 주지는 않았다. 특히 양 Side의 검출기가 안쪽으로 이동하면서 다른 영역에 많은 변화를 주고 있다. AECL은 안쪽으로 검출기를 이동하면서 검출기 길이, 재질 등을 변경하였는데 변경으로 인하여 Flux 측정의 정확 도를 증가시키고 특정 채널 연료 교체 시 Flux Tilt

에 의한 출력감발 요인을 없앨 수가 있었다. 주요 설계변경사항을 살펴보면 다음과 같다.

- 영역 Pt(백금피복인코넬 검출기) 검출기가 3m 길이, 1.5mm 직경에서 86cm, 3mm로 변경
- 양 Side 검출기 위치가 안쪽으로 2 Lattice Pitch(약 57cm) 이동
- 영역 Pt 검출기의 재질을 백금에서 백금피복인코넬로 변경
  (즉발 감응도가 85%에서 89%로 증가, 수명에 따른 감응도 감소 방지)

그림 4. 월성2호기의 설계와 실제 영역의 경계 비교

그림 5. 월성2호기와 G-2 발전소의 영역 경계 비교

3.2 연료 교체에 의한 영역 수위 상승 특징 파악

그림 6는 채널별 교체 전, 후 수위 변동폭을 나타낸 그림이다. 채널의 교체는 대부분 그림 3의 Target 연소도에 도달하였을 때 수행하였으며, 연소도를 기준으로 Normalize 한 결과이므로 앞으로의 교체 결과도 대동 소이하게 변화할 것이다. 교체 전, 후 수위 상승에 대한 특징을 보면 상부 영역(1,8, 3,10, 6,13)의 수위가. 하부 영역 보다 많이 상승하는 것을 알 수 있다. 이 것은 상부 영역 수위의 실제 반응도 값이 하부 영역 수위의 반응도 값보다 낮아서 많이 변한다. 많이 오른 만큼 빨리 떨어진다. 그림 7은 한 채널 교체하면 3개 영역에 걸쳐 영향을 주는 채널들을 보여주고 있다

그림 6. 연료 교체 전, 후 해당영역의 수위 변화

그림 7. 연료교체시 3개 영역까지 수위에 영향을 주는 채널

3.3 RFSP Code를 이용한 사전평가(Pre-Simulation)와의 비교

사전평가결과(예측)를 운전이력관리(실제)와 비교해보면 중심부의 CPPF Region에서 최고 값에 대한 채널출력, 다발출력, CPPF(채널출력첨두계수) 결과 모두가 완벽하게 일치됨($\leq \pm 1\%$)을 볼 수 있으며 최고 값 위치도 거의 같은 위치에서 발생됨을 이미 확인하였다. 각 14개 영역의 수위와 평균 수위는 실제보다 약간(1 4%) 과다하게 예측(Over Estimated) 된다. 특정한 채널에서는 예측과 실측 사이에 때때로 개별 Zone에서 수위차이가 20% 이상 차이 날 때도 있으나 14개 영역의 수위차이에도 불구하고 채널, 다발 출력 그리고 CPPF는 정확하게 일치되고 있다 [1] .

3.4 월성2호기 상부 Zone 수위 급락과 Cycling

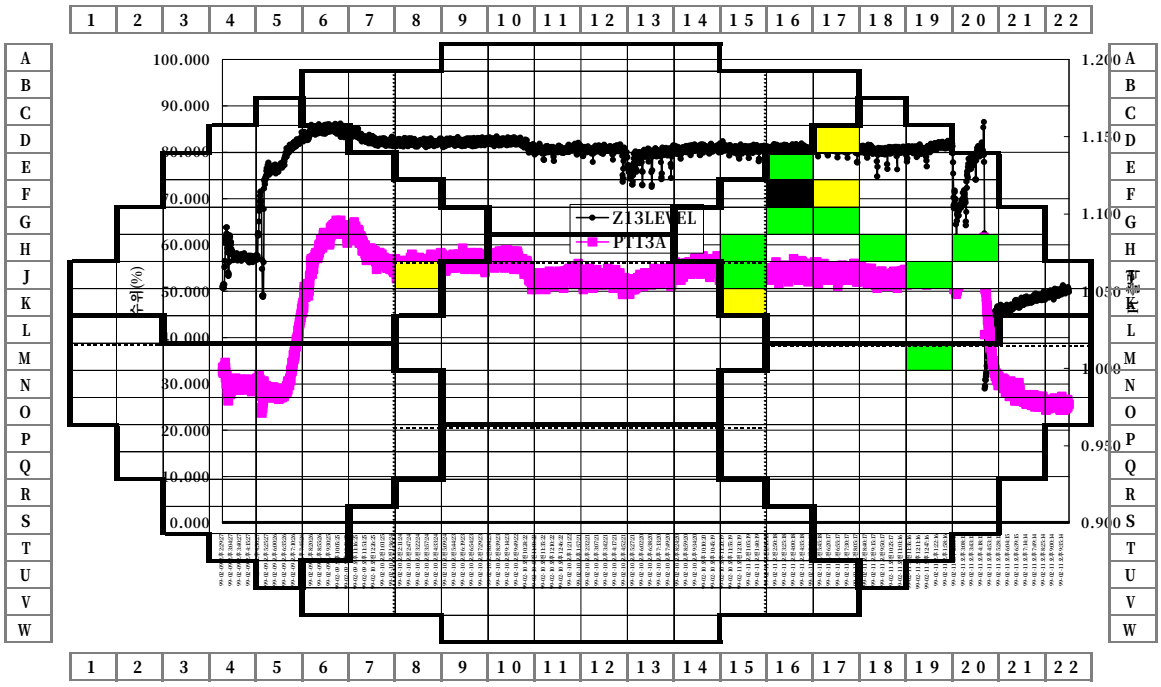
월성2호기가 액체영역제어계통의 압축기를 연속, 단속을 운전을 유지한 상태에서 상부 영역의 연

료를 교체하였을 때 급락과 진동이 발생되는 특이한 현상을 겪었는데 타 CANDU에서도 조금씩 다른 문제이지만 비슷한 경험을 갖고 있음을 확인하였다. Darlington 4호기는 월성2호기와 같은 급락 현상을 그리고 국내 1,3호기도 가압기가 단속 운전일 때 압축기 운전과 정지 시간에 맞춰 발생하는 진동이라는 동일한 현상을 경험하게 되었다. 현장에서는 AECL과 공동으로 문제해결을 추진 중인데 AECL은 이러한 현상을 Generic Problem으로 받아들이고 있으며 현상을 요약하면 다음과 같다.

● '99 계획예방정비 전

액체영역제어계통의 가압기가 연속운전 상태인 상태에서 연료 교체로 인하여 수위가 80% 까지 증가되고 약 2일 정도 80%로 유지하다가 어떤 시점에서 급락 현상이 발생 되어 정상 복귀되었는데, 자료 수집 및 시험을 위해 반복적으로 수행한 결과 영역 #13에서 10회 이상 급락하는 현상이 발생되었다(그림 8, 9). 캐나다의 Darlington #4호기에서도 같은 영역에서 수 차례 발생됨을 확인하였다.

그림 8. D-18, K-03 교체후 발생한 월성2호기 영역 #13의 급락



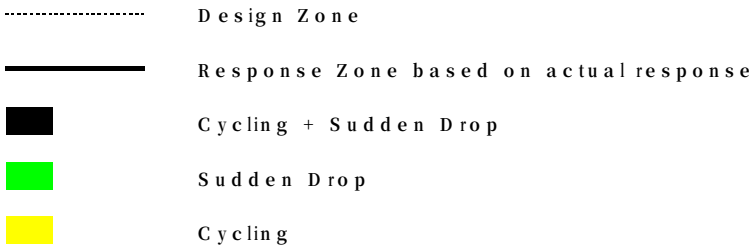


그림 9. 상부 영역에서 수위 급락 및 주기적 변동이 일어난 채널

● '99 계획예방정비 후

액체영역제어계통의 가압기가 단속운전 상태인 상태에서 연료 교체로 인하여 수위가 80% 까지 증

가되고 80%에서 감소되면서 감소되는 폭 만큼 수위가 압축기 운전 주기에 맞춰 진동 되다가 약 50% 정도 수위로 감소되면 외부 충격(연료교체 등)에 의해 진동이 없어지게 되는 현상으로 월성 1호기부터 3호기까지 발생되었는데 상부 영역 중 #1, 8, 6, 13에서 공통적으로 발생되었고 하부 영역에서는 발생되지 않는다(그림 9, 10).

4. 결 론

연료 교체 후 수위 예측은 RFSP의 사전 평가 기능을 활용하는 것보다는 연료교체 전, 후 자료를 수집하여 분석한 결과를 사용하는 것이 훨씬 정확하므로 수위 및 Flux Control에는 수집한 자료를 활용하고 채널, 다발 출력의 사전평가 및 국부과출력보호검출기 운전여유(Operation Margin)는 RFSP 코드 결과를 사용하는 것이 타당하다.

D-11, D-12 채널을 교체하면 해당 영역의 수위는 최대 40% 이상 증가하며, 영역 #3에 해당하는 채널 교체하면 대부분이 30% 이상 증가하는데 특히 상부 영역에서 많은 증가를 보이는 이유가 경수가 가지고 있는 절대 반응도 값이 작기 때문이다. 각 영역의 출력에 따라 액체영역제어기에 경수가 차(Filling) 출력 균형을 유지 하는데, 어느 수위 이상 차면 독 물질 역할을 못하기 때문에 Flux Tilt를 증가시키고 증가된 Flux Tilt에 의해 수위가 증가되기 때문이다. 교체하면 해당 영역의 수위를 급증시키는 채널이 있는 반면 3개 영역에 영향을 주는 채널, 그리고 설계 영역보다는 인접한 영역에 영향을 많이 주는 채널들이 있었다. 이러한 Data Base는 월성 중수로의 최초 고유모델로 많은 노심 분석가들의 연구 결과에도 도움이 되리라 생각되며, 앞으로 설계수명기간동안 연료 교체에 계속적으로 쓰일 수 있을 것이다.

상부 영역의 수위 급락과 주기적 변동은 액체영역제어계통의 구조적 문제와 압축기와 연관이 있을 가능성이 많으나 아직까지 원인을 발견하지 못하였다. 대신 AECL은 Pt.Lep 발전소가 사용하는 방식대로 상부 영역의 연료교체를 가능한 낮은 수위에서 수행할 것을 권고하고 있다. 처음에는 2호기에서 그리고 1호기, 3호기에서도 같은 현상이 일어나고 Darlington에서도 같은 현상이 일어나자 AECL은 액체영역제어계통의 문제를 Generic Problem으로 인식하고 월성과 같이 공동으로 문제해결을 추진해 나갈 예정이다.

5. 참 고 문

〔1〕 김 성민, 박 중우 "중수로 노심관리 코드(RFSP)를 이용한 노심안전성 사전평가" April. 1995
〔2〕 Power Measurement Calibration Routine(86-63729-PS-101)
〔3〕 Light Water Zone Control Absorbers(86-63729-PS-103)
〔4〕 월성2,3&4호기 최종안전성분석보고서

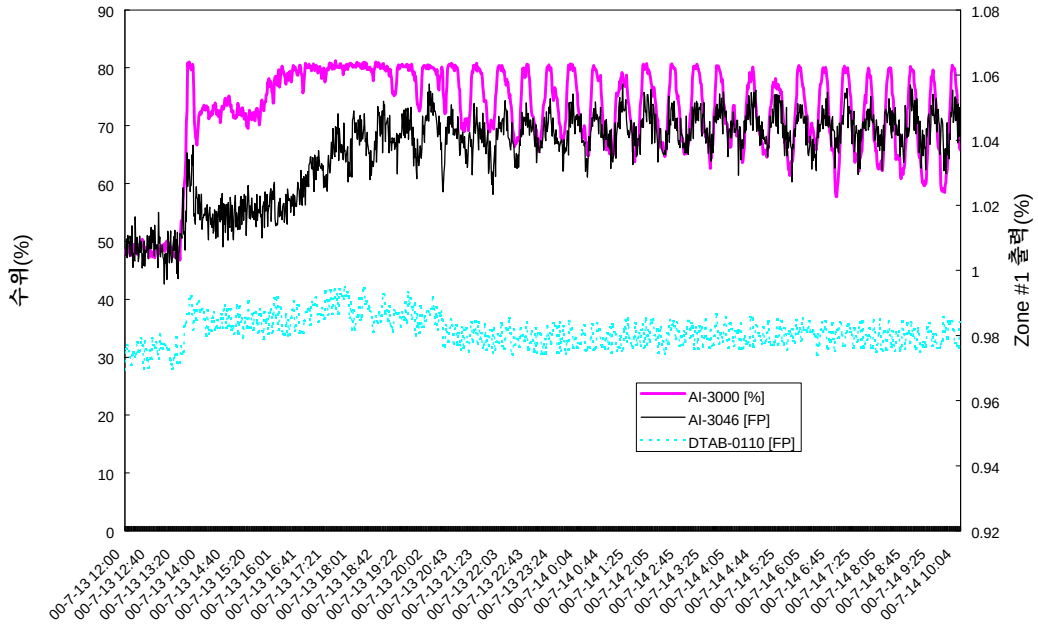


그림 10. 월성3호기의 상부 영역(#1) 연료 교체후 수위의 주기적 변동