

2003 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 노심 중성자속계측기 Time-delay 평가

An Estimation for the Time-delay of Vanadium Flux Detectors Used in a Existing CANDU Core

염충섭, 윤문영, 권오환, 김경화
고등기술연구원
경기도 용인시 백암면 고안리 633-2
김운호, 김용배
한국전력연구원
대전 유성구 문지동 103-16

요 약

CANDU형 원자로에서는 중성자속 분포를 측정하기 위해 바나듐 중성자속 계측기가 설치되어 있다. 중성자속계측기에서 계측된 값들은 확산방정식을 이용한 중성자속 분포와 최소자승법을 이용해 중성자속 분포를 합성하는데 사용된다. 본 연구에서는 천이상태시 중성자속 분포의 정확한 계산을 위해 중성자속계측기의 Time-delay를 평가하였다. 보다 정확한 계산을 위해 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘을 구축하여 타당성 검토가 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program)와 같이 연계하여 우선 수행되었으며, 검증된 알고리즘으로서 Time-delay 평가를 수행한 결과 2001년 현재 월성 1호기의 경우 Time-delay가 12-14분 정도로 평가되었다.

Abstract

In CANDU-type reactor, Vanadium Flux Detectors(VFDs) are installed to measure flux distribution. The measured values by VFD are used to map flux distribution with solved values using 2-g diffusion equation by least square method.

The objective of this study was to estimate the time-delay of VFDs used in Wolsong NPP unit 1 for more accurate results. For the purpose, the flux calculation algorithm incorporating position error compensation algorithm for the position of control devices and variable production algorithm was validated by RFSP, and then the estimation resulted from comparing the mapped values and calculated fluxes using diffusion equation to detector readings at site by power-maneuvering simulations with

validated algorithms was performed. In the results, we concluded that the time-delay of VFDs was 12-14 minutes in 2001.

1. 서론

CANDU형 원자로에서는 중성자속 분포를 측정하기 위해 102개의 바나듐 중성자속 계측기가 수직방향으로 설치되어 있다. 중성자속계측기에서 계측된 값들은 확산방정식을 이용한 중성자속 분포와 최소자승법을 이용해 중성자속 분포를 합성하는데 사용된다¹⁾.

핵연료 교체등의 원자로 운전을 위해서 RFSP를 사용하여 노심을 해석한 결과를 살펴보면^{2),3)} 천이상태, 특히 노내에서 제어봉의 거동이 발생하였을 때 중성자속 계측기의 계측값과 확산방정식을 이용한 중성자속분포를 최소자승법으로 합성한 결과를 살펴보면 그 오차가 증가함을 알 수 있다. 이는 크게 두 가지의 원인에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 첫째, RFSP 코드 자체가 정상상태 확산방정식을 기반으로 하는 정상상태 해석 코드로서^{4), 5), 6)} 동적 해석에서는 오차를 많이 내포할 수밖에 없다는 것이다. 이 문제는 RFSP 코드 자체를 동적 모델로 교체함으로써 해결할 수가 있다. 둘째는 본 연구에서 수행된 내용으로서 중성자속계측기의 Time-delay에 기인한 것이다.

그러므로 보다 정확한 노심내의 중성자속분포를 계산하기 위하여 중성자속계측기의 Time-delay를 평가가 필요하였다. 본 연구에서는 천이상태시 중성자속 분포의 정확한 계산을 위해 중성자속계측기의 Time-delay를 평가하였다. 보다 정확한 계산을 위해 그림 1과 같이 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘을 구축하여 타당성 검토가 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program)와 같이 연계하여 우선 수행되었다.

본 논문의 2장에서는 연구배경과 보다 정확한 계산을 위해 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘 및 방법론을 설명하였으며 3장에서는 알고리즘의 타당성 검토 및 Time-delay 평가 결과에 대해 논하였다. 마지막으로 4장에서는 본 연구에 대한 결론이 기술되었다.

2. 본론

2.1 천이상태 출력계산 알고리즘

2.1.1 제어봉 이동 오차에 대한 보정

CANDU형 원자로인 월성 원자력발전소 1호기의 노심에서 제어봉들의 움직임은 노내의 반응도 및 중성자 분포 및 중성자속을 변화시키게 된다.

본 시스템에서의 노내 중성자속 분포 계산시 2-4분 주기의 계산시간을 고려할 때 계산 하는 순간의 노내 제어봉(흡수봉, 조절봉)의 위치는 정확한 중성자속 분포 계산을 위해 필히 고려되어야 한다.

본 연구에서는 낙하시간이 아주 짧은 정지봉은 제외하며 흡수봉 (MCA: Mechanical Control

Absorber)와 조절봉(Adjuster)의 위치를 파악한다.

CANDU 형 원자로에서의 제어봉의 거동은 원자로의 외부 상단에 위치한 고패(Sheave)에서 제어봉에 부착되어 있는 케이블을 감거나 풀어주므로써 제어봉을 인출 또는 삽입을 하게 된다. 이때 제어봉의 위치는 고패에 위치해 있는 위치 지시계에 의해 관독되긴 하지만 정확한 값이 아니다. 가장 심한 경우 실제의 제어봉 위치와 약 40 cm의 오차를 발생시킨다. 그 이유는 이 값은 제어봉의 길이를 고패의 총 회전수로서 나눈 값으로서, 고패에 케이블이 감기거나 풀리 때에 케이블의 두께에 의한 고패 원주의 변화를 고려하지 않은 까닭이다. 이를 정확하게 보정하기 위해서는 고패의 회전에 따른 케이블의 직경을 고려함으로써 실제 고패의 직경 변화를 산출하여 고려하여 함수를 생산하여 그래프로 나타낸 것이 그림 2이다.

2.1.2 격자상수 계산을 위한 변수 생성 함수 및 알고리즘 구축

격자계산을 위한 코드인 POWDERPUFS-V를 운용하기 위해서는 원자로 출력에 따른 노심내 주요 변수인 냉각재 온도, 냉각재 밀도, 연료 온도, 감속재 온도등의 변화를 파악하여야 함. 이를 산출하기 위해 총출력 변화에 따라서 시운전 자료에서 관련 변수 변화값을 산출, 전환 알고리즘을 구축하였다. 아래 식은 출력에 따른 각 변수의 변화를 함수로 구한 것이다.

$$\textcircled{1} T_c (\text{Coolant Temp.}) = 260.08818 + 30.69604 \cdot FP - 0.94354 \cdot (FP)^2$$

$$\textcircled{2} D_c (\text{Coolant Density.}) = 0.86355 - 0.0569 \cdot FP - 0.00208 \cdot (FP)^2$$

$$\textcircled{3} T_F (\text{Fuel Temp.}) = 261.40384 + 351.88889 \cdot FP + 75.90219 \cdot (FP)^2$$

$$\textcircled{4} \text{Fuel Heat Rating} = 0.01401 + 16.09457 \cdot FP - 0.04583 \cdot (FP)^2$$

2.1.3 노심 상태에 따른 사용 모드의 결정

중수로 노심 출력 계산시 노심 상태 특히, 제어봉의 움직임에 따라 중성자속 배합(Mapping)을 위한 중성자속의 모드수를 정의하게 된다. 중성자속의 총 모드 수는 1 ~ 28까지 총 28개의 모드를 가지고 있으며 제어봉의 거동에 따라 아래와 같이 사용 모드는 결정된다.

CASE 1 (Mode 1 - 15) : 노심 정상상태시 일반적으로 사용

CASE 2 (Mode 1 - 19) : MCA 거동시 사용

CASE 3 (Mode 1 - 15, 20 - 26) : ADJUSTER 거동시 사용

CASE 4 (Mode 1 - 15, 28 - 28) : 심운전시 사용

2.1.4 평가 기간의 노심 상태

실제의 천이상태의 출력계산 알고리즘의 타당성을 평가하기 위해 2001년도 O/H(OverHaul) 기간중 원자로를 정지시키는 동안(2001.9.3 16:30 - 9.4 04:00)의 현장 자료를 이용하여 시물레이션을 수행하였다. 현장의 게이트웨이에서 추출된 값이 충분하지 않아 출력의 60% 감소시에만 수행되었으며 현장에서 추출된 값은 아래와 같다.

- LZC(Liquid Zone Controller) Level

- Adjuster Positions
- MCA(Mechanical Control Absorber) Positions
- SOR(ShutOff Rod) Positions
- Full Power
- Core Thermal Power
- Vanadium Detector Readings

원자로를 정지시키는 동안(2001.9.3 16:30 - 9.4 04:00)의 노심상태를 살펴 보면 그림 3과 같이 출력의 변화를 알 수 있다. 2001.9.3 16:30경부터 출력이 감발되기 시작하여 20:00경 60% 출력까지 내려갔으며 2001.9.4 02:00까지 유지가 되고 있다. 02:00경부터 출력이 45%로 내려가 03:00까지 유지되고 있다. 그 이후 정지봉이 삽입되어 출력이 정지된다. LZC의 수위는 LZC #4와 #11은 60% 출력 감발시까지 증가하는 추세를 보였으며 그 외의 LZC들은 진동하는 모습을 보여주었다. Adjuster Bank #1이 2001.9.4. 18:02부터 인출되었고 나머지 Bank들도 순서대로 인출되었다가 2001.9.5 03:00 이후 전부 삽입되었다.

2.2 Time-delay 평가 방법

시물레이션을 통한 Time-delay 평가를 위해 노심의 상태가 급격한 변화가 이루어지는 기간을 선택하였다. 계획예방정비 기간 중 원자로 정지를 위하여 60% 출력감발시 조절봉 #1과 #2가 거동한 시기 중 임의의 한 시점에서 측정된 계측값을 시간을 역으로 올라가면서 2-g 중성자확산방정식의 결과 및 합성된 중성자속분포 결과를 계측값과 비교하여 그 오차가 최소화 되는 시간을 측정하여 Time-delay를 평가하였다.

3. 결과

3.1 천이상태시 출력계산 알고리즘에 대한 검증 결과

본 시물레이션에서는 바나듐 중성자속 계측기의 계측값과 계산되어 내삽된 2군 중성자속과 계측값을 이용한 배합 중성자속을 각각 비교할 수가 있다.

그림 4는 시물레이션 기간동안 중성자속 계측값과 2군 중성자속 간의 평균 백분율 오차와 중성자속 계측값과 계산된 2군 중성자속을 이용하여 계산된 배합 중성자속간의 평균백분율 오차를 각각 나타낸 것이다. 그 결과는 중성자속 계측값과 2군 중성자속 간의 평균 백분율 오차는 출력 감소에 따라 2군 중성자속이 계측값 보다 높게 나타나 옴의 오차를 나타내고 있다. 또한 Adjuster bank #1이 인출된후 더욱 심화됨을 알 수 있다. 중성자속 계측값과 2군 중성자속과 계측중성자속을 이용하여 계산된 배합 중성자속간의 평균백분율 오차는 0.03 에서 진동하고 있음을 보여 준다. 이는 배합 중성자속이 2군 중성자속에 비해 보다 작은 오차를 가지고 있음을 보여준다. 즉, 노심 감시시스템을 위한 중성자속 분포는 후자를 적용하는 것이 보다 나은 정확성을 가진다는 것이다. 그림 5는 앞의 결과들을 종합할 수 있는 결과로서, 시물레이션 기간동안 중성자속 계측값과 2군 중성자속 간의 평균 백분율 오차에 대한 표준편차와 중성자속 계측값과 2군 중성자속을 이용하여 계산된 배합 중성자속간의 평균백분율 오차에 대한 표준편차를 각각 나타낸 것이다. 그 결과를 보

면 중성자속 예측값과 2군 중성자속 간의 평균 백분율 오차에 대한 표준편차가 점차 증가하고 있으며, 중성자속 예측값과 계산된 중성자속을 이용하여 계산된 배합 중성자속간의 평균백분율 오차에 대한 표준편차도 미세하게 증가하기 시작하여 60% 총출력에서는 2.5에 이르고 있음을 보여준다. 이는 배합된 중성자속이 2군 중성자속에 비해 보다 작은 오차를 가지고 있음을 보여준다.

앞의 결과들을 종합하여 비교해 볼 때 천이상태시 전환알고리즘을 사용한 출력계산 알고리즘은 배합 중성자속을 이용함으로써 출력감시시스템에 설계에 있어 타당성을 가진다는 것을 알 수 있다.

3.2 중성자속계측기 Time-delay 평가 결과

그림 6과 7에서 보는 바와 같이 노심내에서 Adjuster Bank #1이 인출된 시점에서 Mapping 된 중성자속의 평균백분율 오차와 표준편차는 계산시점 기준으로 12 ~ 14분이 경과한 시점에서 수집된 중성자속의 예측값을 이용하였을 때 오차가 최소화됨을 알 수 있다. 그림 8)과 9는 Adjuster Bank #2가 인출된 시점에서 Mapping 된 중성자속의 평균백분율 오차와 표준편차를 나타낸 것이다. 이 또한 계산시점 기준으로 12 ~ 14분이 경과한 시점에서 수집된 중성자속의 예측값을 이용하였을 때 오차가 최소화됨을 알 수 있다.

4. 결론

천이상태시 중성자속 분포의 정확한 계산을 위해 중성자속계측기의 Time-delay를 평가하였다. 보다 정확한 계산을 위해 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘을 구축하여 타당성 검토가 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program)와 같이 연계하여 우선 수행되었다. 평가는 천이상태의 출력계산 알고리즘의 타당성을 검토한 후 제어봉의 거동 시점을 기준으로 이후에 수집되는 중성자속 예측값을 이용하여 Fkux Mapping한 결과에서의 오차를 분석하여 그 오차가 최소화 되는 시점을 파악함으로써 중성자속계측기의 Time-delay를 평가하는 수순으로 이루어졌다.

결론적으로 2001년 9월 기준으로 월성 1호기의 노내 중성자속계측기는 12 ~ 14분의 Time-delay를 갖는 것으로 평가되었다. 이러한 Time-delay에 대한 평가는 향후 Time-delay 개선방법을 개발하여 원자로내의 중성자속분포의 보다 정확하게 산출하기 위하여 활용될 것이다.

5. 참고문헌

1. "PC-Based CANDU DCC Emulator System-DCC Program Development User Manual", AECL, 1995, Canada
2. 염충섭, "CANDU 노심에서의 정상상태 출력계산 알고리즘 분석 및 검증 보고서", 2002 춘계원자력공학회, 조선대학교, 2002
3. 염충섭, "CANDU 노심 출력 감시시스템 설계를 위한 핵연료 교체구조 가정 타당성 검증 및 선정", 2065-MR-01.03, 고등기술연구원, 2001

4. D.A. Jenkins, "RFSP User's Manual", COG-93-104, AECL, Canada, 1996
5. CANDU 600 Generating Station Physics Design Manual, DM-59-01100, AECL, Canada
6. B.Rouben, "Description of the Lattice Code POWDERPUFS-V", AECL-11357, Canada, 1995

감사의 글

본 연구는 과학기술부 CANDU 원전운전 안전성 향상연구의 일환으로 한국전력연구원 수행되었습니다.
지원에 감사드립니다.

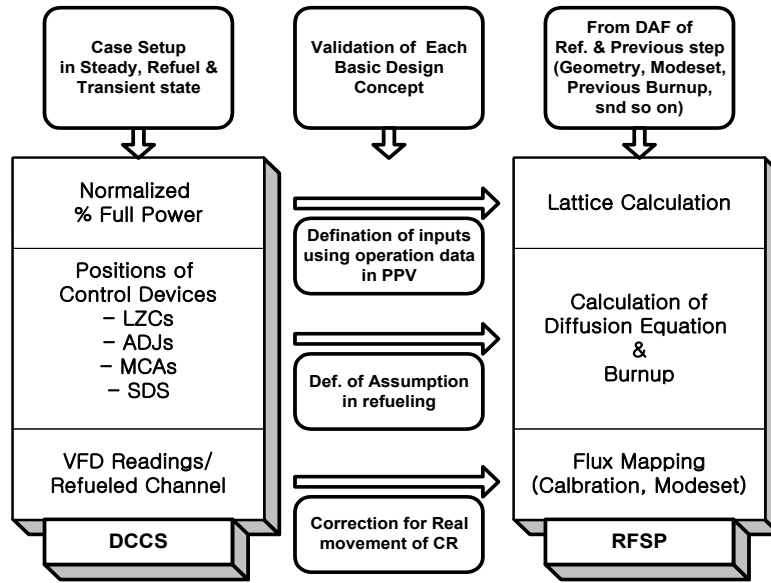


그림 1. 출력계산 알고리즘

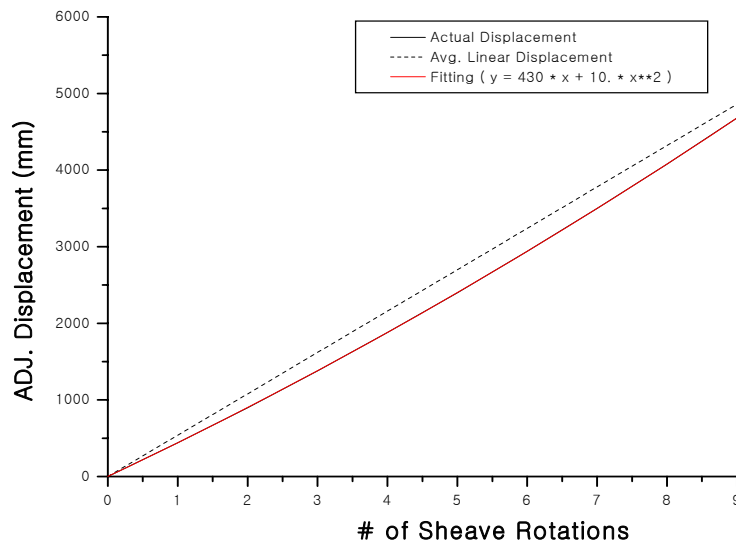


그림 2. ADJUSTER의 실 이동거리 및 오차

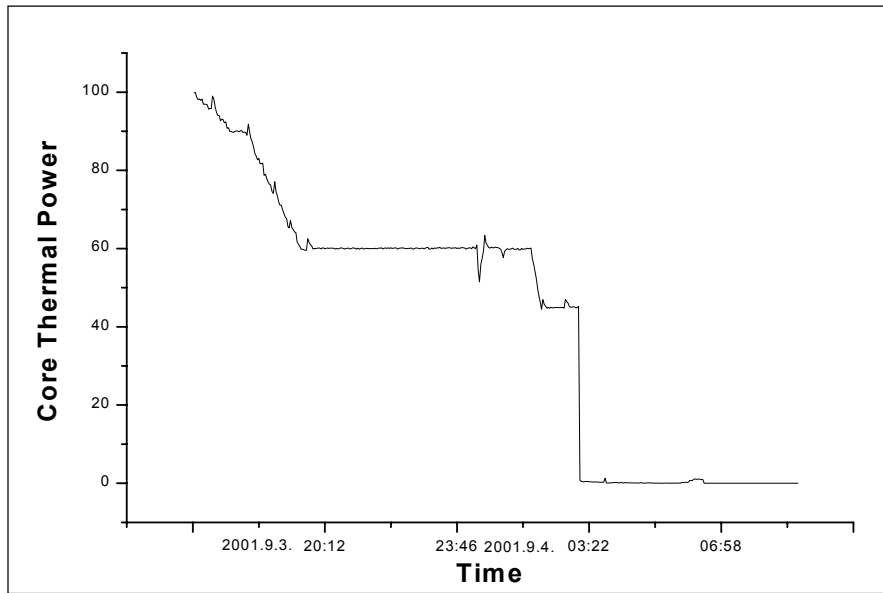


그림 3. 시뮬레이션 기간동안의 Core Thermal Power 의 변화

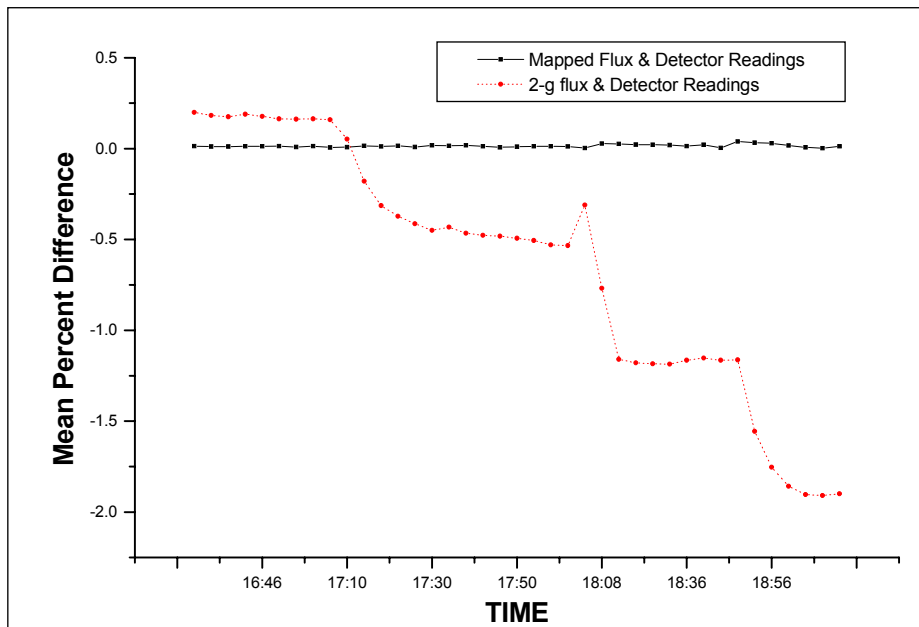


그림 4. 중성자속 계산 방법에 따른 평균 백분율 오차

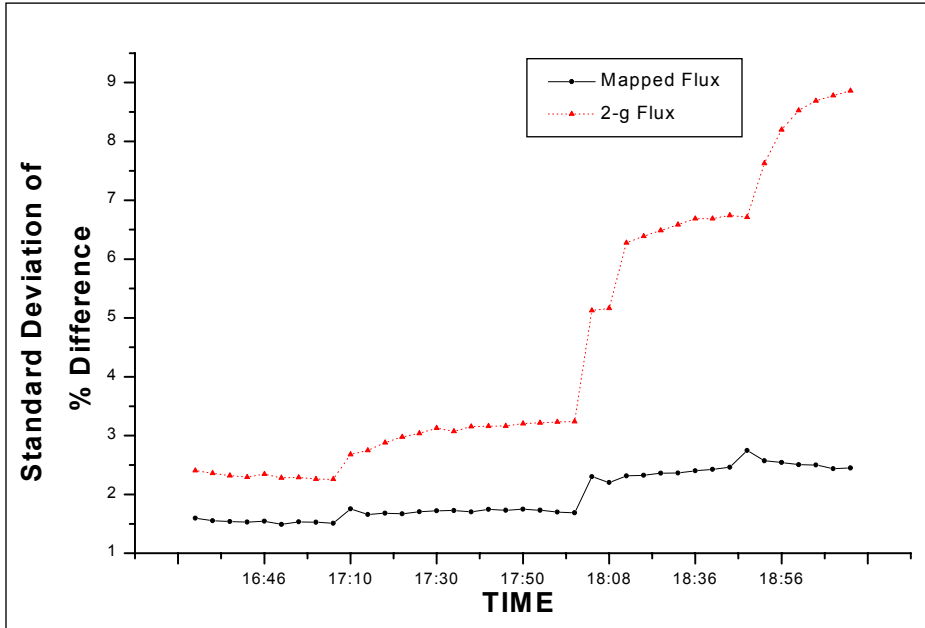


그림 5. 중성자속 계산방법에 따른 평균 백분율 오차에 대한 표준편차

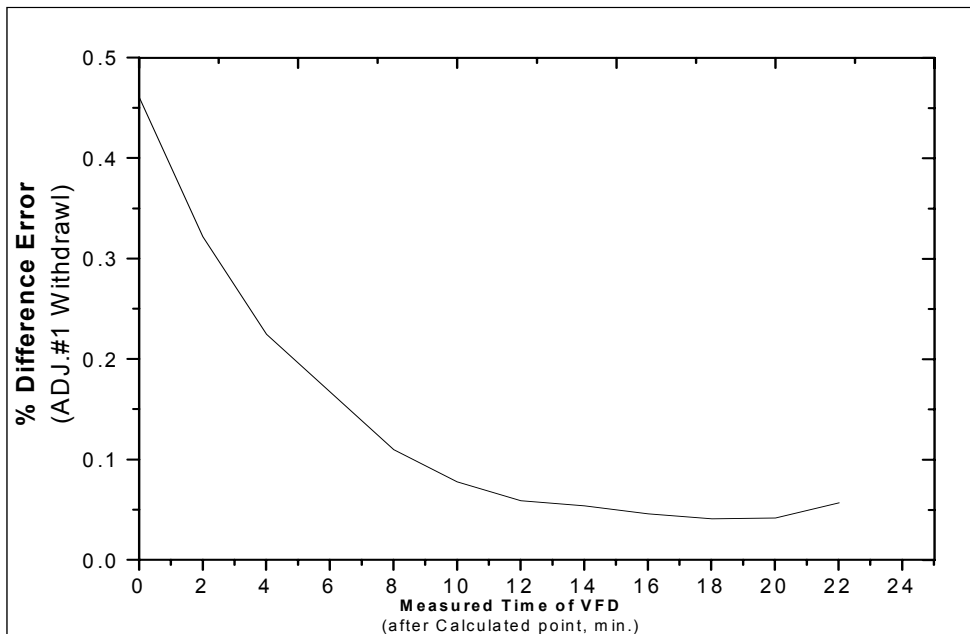


그림 6. Bank # 1 인출시점 평균백분율 오차

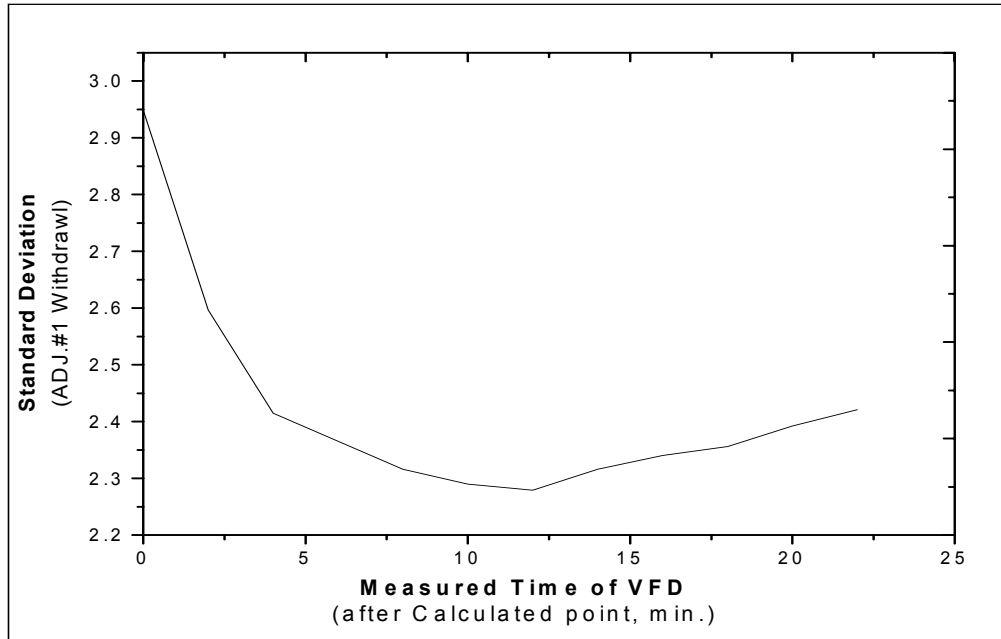


그림 7. Bank #1 인출시점에서의 표준편차

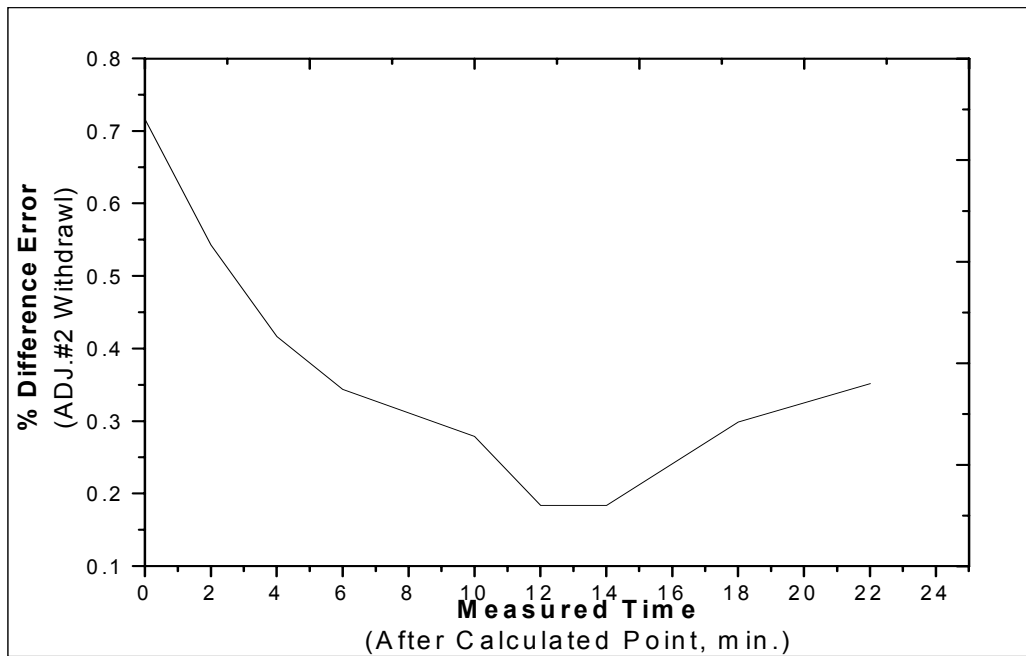


그림8. Bank #2 인출시점에서의 평균백분율오차

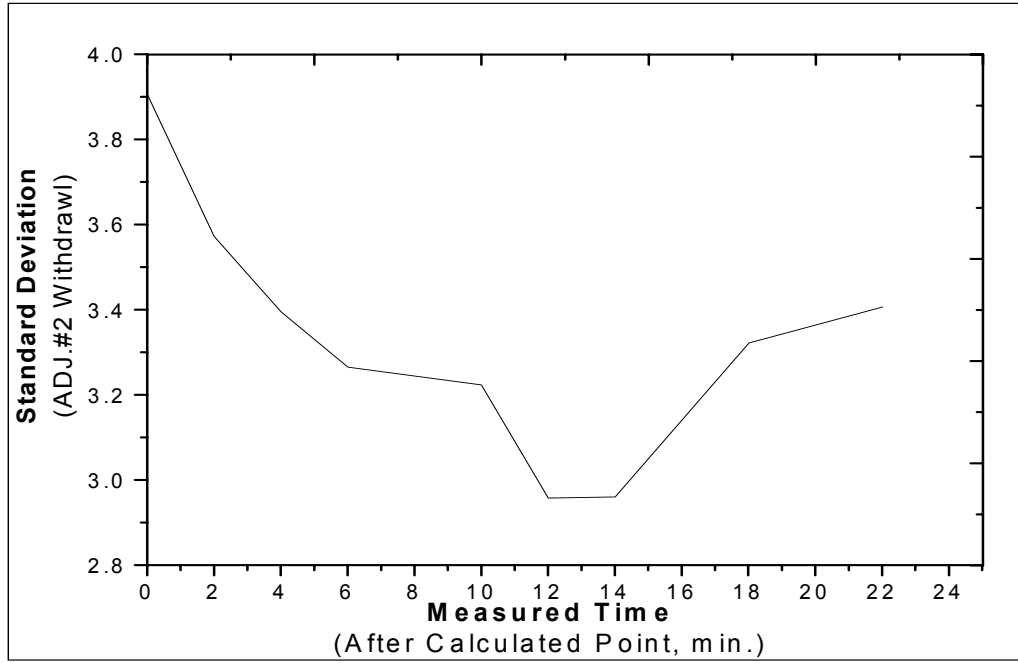


그림 9. Bank #2 인출 시점에서의 표준편차