2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 노심 출력 감시 시스템 구현을 위한 출력 계산 알고리즘 검증

Validation of Power Calculation Algorithm Used in CANDU Core Power Monitirong System

염충섭, 김형진
고등기술연구원
경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

이성덕, 서형범
(주)한국수력원자력
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

가압중수로형 원자로의 출력을 2-4분 단위로 연속 계산하는 출력 감시 시스템의 설계를 위해 설계 전반에 걸친 타당성 검증의 일부분으로써, 정상상태에서의 알고리즘의 검증 및 핵연료 교체의 연속성을 최대로 고려하는 가정에 대한 검증을 통해 가장 적절한 핵연료교체 구조에 대한 가정을 확정하였으며 출력감발시 사용된 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘을 구축하여 타당성을 검토하였다. 출력 감시 시스템의 설계를 위해 사용된 알고리즘은 현재 가압중수로 노심에서 핵연료교체를 위한 코드인 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program)와 같이 연계하여 계산, 중성자속 계측값과 비교한 결과 개발된 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

Abstract

As a part of the design of CANDU core power monitoring system, validation of power calculation algorithm that was carried out by integrating the algorithm with RFSP code was performed for the following cases : power manoeuverings in steady state, the assumption of refueling scheme needed in continuous flux calculation, and power derating in setback at Wolsong #1 CANDU reactor. The algorithm was verified by comparing the mapped values and calculated 2-g fluxes using diffusion equation with detector readings obtained in the field of Wolsong #1.

1. 서 론

원자력발전소 운전 중 사용하는 노심 감시 계통은 노심의 안정성과 관련된 운전기술지침서상 제반 제한사항의 확인 및 핵연료교체 등의 노심 운전 지원을 위한 도구로서, 원전의 안전성 확보와 이용률 향상을 추구하는 노심 관리 업무에 매우 중요한 역할을 수행한다. 이러한 목적을 위해서는 신뢰성 있는 노심 해석 프로그램을 사용하고, 노내 계측기의 계측치를 직접 온라인 상태로 노심 해석 프로그램에 연계시켜 프로그램[1]을 계속해서 작동시킴으로서 노심 상태 변화에 따른 노심 출력을 상세히 모사하여 출력 제한치에 대한 현재의 정확한 안전 여유도를 항시 감시할 수 있는 온라인 계산체계를 구축해야 한다.

본 연구에서는 가압중수로형 원자로의 출력을 2-4분 단위로 연속 계산하는 출력감시 시스템의 설계를 위해 설계 전반에 걸친 타당성 검증[2]의 일부분으로서 그림 1에서 보는 바와 같이 핵연료 교체의 연속성을 최대로 고려하는 가정[3]에 대한 검증과 출력감발시 사용된 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘에 대해 검증하기 위해 수행되었으며, 이러한 알고리즘은 현재 가압중수로 노심에서 핵연료교체를 위한 코드인 RFSP[4],[5](Reactor Fueling Simulation Program)의 입력값을 생산하기 위해 사용되었다.

가압중수로형 원자력발전소인 월성 원자력발전소에서는 매일 2 ~ 3 채널에서 채널당 8개의 핵연료 다발을 교체하고 있다. 한 개의 채널에서 8개의 핵연료다발을 교체하는 시간은 30 ~ 40 분 정도 소요되며 본 출력 감시시스템에서의 출력계산은 2분 간격으로 수행되므로 핵연료교체를 반영한 노심 출력계산을 위해서는 핵연료교체 구조에 대한 타당한 가정을 확립하여야 한다.

본 검증에서는 현장에서의 Log Data를 이용하여 1) 2분당 1개 채널 교체, 2) 4분당 2개 채널 교체, 3) 6분당 2개 채널 교체 구조에 대해 각각 노심 해석을 수행, 타당성을 검증하여 가정 적절한 가정을 선정하였다.

또한 가압중수로형 원자로에서 제어봉들의 움직임[6]은 노내의 반응도 및 중성자 분포 및 중성자속을 변화시키게 된다. 그러므로 정확한 중성자속 분포를 계산하기 위해서는 가압중수로형 원자로에서의 제어봉의 거동에 대한 정확한 위치를 제시해야 한다. 가압중수로형에서의 제어봉의 이동은 원자로의 외부 상단에 위치한 고패(Sheave)에서 제어봉에 부착되어 있는 케이블을 감거나 풀어주므로서 제어봉을 인출 또는 삽입을 하게 된다. 이 때 제어봉의 위치는 고패에 위치해 있는 위치지시계에 의해 판독되긴 하지만 고패의 회전에 의해 위치값이 주어지기 때문에 정확한 값이 아니므로 이를 보정해 주는 알고리즘이 구축되어야 한다. 이를 위해 실제의 제어봉 위치로서 중성자속의 분포를 계산하여 그 알고리즘을 검증하였다. 그리고 출력변화에 따른 냉각재 온도등의 변수를 산출하여 POWDERPUFS 모듈[7]에서의 격자계산에 필요한 값들을 제시하는 알고리즘이 제공되어 검증되었다.

2. 본 론

2.1 시스템 설계를 핵연료 교체 구조 가정 및 검증 조건

2.1.1 핵연료 교체 구조 가정

실제의 핵연료 교체시간을 파악하기 위해 LZC의 준위 변화를 검토하였으며, 통계적으로 핵연

료가 한 채널에서 8개의 번들이 장전되는 시간은 24 분 정도가 소요된다. 그러나 실질적으로는 16분 정도에 8개의 번들이 삽입되었다가 채널의 끝까지 밀려나간 상태(위치 : #5 - #12)에서 다시 제 위치(#1 - #8)로 돌아오는데 걸리는 시간은 8분 정도 소요된다. 그러므로 2분 간격으로 출력계산이 이루어 질 경우 핵연료 교체시의 번들 교체에 따른 가정은 다음의 각 경우에 따른 평가를 수행한 후에 가장 적절한 가정이 선택되어야 한다.

가정 1) 핵연료 교체시간을 24분으로 추정 할 경우
- 6분 간격으로 2개의 번들씩 장전되는 것으로 가정 (2b6m)

가정 2) 핵연료 교체 시간을 16분으로 추정 할 경우
- 2분 간격으로 1개의 번들이 장전되는 것으로 가정(1b2m)
- 4분 간격으로 2개의 번들이 장전되는 것으로 가정(2b4m)

위의 가정중 노심내의 번들 및 채널에 대한 중성자속 분포를 계산하여 바나듐 중성자속계측기와의 오차를 평가, 가장 적절한 가정을 확립하였다. 검증은 실제 월성 원자력발전소 1호기에서 수행된 핵연료 교체에 따른 현장 자료를 이용하여 검증하였다.

2.1.2 핵연료 교체 초기화를 위한 조건 검토

핵연료 교체에 따른 출력감시 시스템의 설계를 위해서는 핵연료 교체의 초기화에 따른 조건을 부여하여야 한다. 일반적으로 핵연료교체기기와 채널이 맞물리는 시점에서부터 실제 핵연료 교체가 이루어지는 시점까지는 20 분 정도가 소요되며, 핵연료 교체가 실질적으로 이루어져서 완료되기 까지는 24분 정도 소요되는 것으로 판명되었다.

핵연료 교체의 시작에 대해 동기를 부여하기 위해서는 초기 조건을 구성해야 한다. 이러한 초기조건으로는 수위영역제어기(LZC)의 수위 변화와 채널의 온도변화등으로 구성해야 한다.

그림 2는 월성 1호기에서 5528FPD(2001.2.19)에서의 J05 채널에 대한 핵연료 교체시 노심영역 #1의 수위영역제어기(LZC)의 변화를 나타내고 있다. 약 14:16 분경 시작된 핵연료 교체 작업은 14:46 경 완료된 것으로 나타나고 있다. 14:16 - 14:32 경 까지는 핵연료가 장전되고 있음을 나타내며 14:32 - 14:46 경 까지는 핵연료가 완전히 밀려나간 상태에서 채널내 공간이 생겼다가 다시 회복하는 시점을 나타내고 있다. 그림 3은 5528FPD(2001.2.19)에서의 출구헤드의 온도로서 채널이 핵연료 매거진에 접속되는 시점에서부터 채널플러그를 빼는 등의 일련 과정을 포함하는 작업등을 거쳐 핵연료 교체가 완료되는 것을 보여주고 있다. 헤드의 온도는 100% FP에서 310^{o}C 정도를 유지하고 있다가 매거진에 접속하는 시점부터 295^{o}C로 떨어진 후, 핵연료가 밀려나간 상태에서 다시 275^{o}C 정도로 떨어졌다가 핵연료가 제자리로 자리를 잡는 시점에 다시 295^{o}C로 회복한 후 핵연료 교체를 완료한 후 매거진으로부터 분리되는 시점에 정상적으로 310^{o}C를 유지하는 것으로 나타나고 있다.

핵연료 교체에 대한 동기 부여를 위한 초기 조건은 상기 두 개의 변수를 조합시켜 구성해야 하며 교체되는 해당 채널에 대한 정보는 DCC-Y로부터 취해야 할 것이다. 만약 DCC-Y로부터 핵연료 교체시기에 대한 정확한 정보까지 얻을 수 있다면 초기화에 대한 가정을 세울 필요가 없다. 그러나 정확한 교체 시점에 대한 정확한 정보를 현재 상황에서는 얻을 수 없으므로 초기화에 대

한 가정은 필요하다.

초기 조건을 구성하기 위해서는 우선 수위영역제어기의 이력과 헤드온도에 대한 이력을 30분 이전의 값까지 항상 저장해놓은 상태에서 30분 이전의 값과 현재의 수위(교체 채널이 해당되는 영역)와 비교하여 15% 이상 증가할 때와 헤드 온도가 30분 이전과 비교해서 8% 이상 감소한 경우를 동시에 만족할 때 핵연료 교체에 대한 초기화를 이루게 해야 한다.

2.2 출력감발시 출력계산 알고리즘

2.2.1 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 풀어주므로서 제어봉을 인출 또는 삽입을 하게 된다. 이때 제어봉의 위치는 고패에 위치해 있는 위치 지시계에 의해 판독되긴 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 4이다. 또한 조절봉의 이동에 따른 편차와 지시계에 따른 실제 위치 함수는 그림 5에 나타나 있다.

2.2.2 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.

① $T_c\,(Coolant\,Temp.) = 260.08818 + 30.69604 \cdot FP - 0.94354 \cdot (FP)^2$

② $D_c\,(Coolant Density.) = 0.86355 - 0.0569 \cdot FP - 0.00208 \cdot (FP)^2$

③ $T_F\,(Fuel\,Temp.) = 261.40384 + 351.88889 \cdot FP + 75.90219 \cdot (FP)^2$

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

2.2.3 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

2.2.4 시뮬레이션 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 시뮬레이션을 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 Abosrber) 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 6과 같이 출력의 변화를 알수 가 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.

3. 결과

3.1 핵연료교체 구조 가정에 대한 검증

3.1.1 확산방정식에 의한 3차원 중성자속 분포 계산 결과

그림 7에서는 월성 1호기 노심에서 J05 채널을 교체하는 동안(5528FPD, 2001.2.19, 11:50 - 13:40)의 노심내 중성자속 분포에 대한 평균백분율 오차로서, 수위영역제어기 수위등의 노심상태

를 기준으로 3차원 중성자 확산방정식을 푼 결과를 바나듐 계측기 위치에서의 내삽하여 그 위치에서의 계측값과 각 가정에 따라 모사, 비교한 것이다.

4분당 2개의 번들을 교체(2b4m)한 결과와 2분당 1개의 번들을 교체(1b2m)한 결과, 6분당 2개 채널을 교체한 결과를 보면 평균백분율 오차는 비슷하게 나타나고 있다. 이를 보다 정확하게 판단하기 위해서는 각각에 대한 표준편차를 평가할 필요가 있다.

그림 8은 1b2m과 2b4m, 2b6m 각각에 대해 3차원 중성자 확산방정식을 푼 경우의 평균백분율 오차에 대한 표준편차를 나타내고 있다. 평균백분율 오차의 범위는 0.04 ~ 0.14 의 범위내에 있지만 그에 대한 표준편차는 1.6 ~ 3.0의 범위내에 있는 것을 알 수 있다. 이는 각각의 가정에 대한 타당성을 평가하기 위해서는 표준편차의 정도를 비교하는 것이 적절함을 나타내는 것이다. 각각의 가정에 대한 표준편차를 분석해 보면 1) 1b2m의 경우 RFSP의 입력으로서 핵연료교체가 주어졌을 경우 표준편차가 많이 줄어들긴 하나 그 진동이 심하게 나타남을 알수 있다. 2) 2b4m의 경우 핵연료 교체기간 동안의 표준편차가 상대적으로 차이가 별로 없이 나타남을 알 수 있다. 3) 2b6m의 경우 2b4m에 비해 상대적으로 표준편차가 나타남을 알 수 있다.

3.1.2 배합된 3차원 중성자속 분포 계산 결과

그림 9에서는 월성 1호기 노심에서 J05 채널을 교체하는 동안(5528FPD, 2001.2.19, 11:50 - 13:40) 측정중성자속과 계산된 2-g 중성자속간의 오차 최소화를 통한 배합을 통해 구한 중성자속과 바나듐 계측기의 중성자속 계측값을 비교한 평균백분율 오차로서, 수위영역제어기 수위등의 노심상태를 기준으로 모사, 비교한 것이다. 4분당 2개의 번들을 교체(2b4m)한 결과와 2분당 1개의 번들을 교체(1b2m)한 결과, 6분당 2개 채널을 교체한 결과로서, 자세하게 분석해보면 2b4m의 경우가 최소의 평균백분율 오차를 유지해 나가고 있는 것을 알 수가 있다. 시뮬레이션 기간 동안의 평균백분율 오차의 범위는 단순히 3차원 확산방정식을 이용해 구한 3차원 중성자속의 분포에 대한 평균백분율 오차는 0.04 ~ 0.14 의 범위내에 있지만 배합 중성자속(Mapped Fluxes) 분포에 대한 평균백분율 오차는 0.0275 ~ 0.05의 범위내에 있다 .

그림 10은 1b2m과 2b4m, 2b6m 각각에 대해 합성 중성자속과 바나듐 계측기의 중성자속 계측값을 비교한 평균백분율 오차에 대한 표준편차를 나타내고 있다. 표준편차의 범위는 단순히 3차원 확산방정식을 이용해 구한 3차원 중성자속의 분포의 평균백분율 오차에 대한 표준편차는 1.6 ~ 3.0의 범위내에 있지만 본 시스템에서 사용될 배합 중성자속 분포의 평균백분율 오차에 대한 표준편차는1.49 ~ 1.66의 범위내에 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 표준편차를 고려한 백분율 오차는 단순히 3차원 확산방정식을 이용해 2군 중성자속의 분포의 경우 1.64 ~ 3.14의 범위내에 있지만 배합 중성자속 분포의 경우에는 모든 가정에 대해 1.5175 ~ 1.71의 범위내에 있다. 이는 본 시스템에서 사용하기 위한 배합된 중성자속의 타당성에 대한 연구의 결과가 핵연료 교체시에도 타당함을 나타내는 것이다. 각각의 가정에 대해 평가를 해 보면 본 시뮬레이션 기간 동안 1b2m의 경우 평균백분율 오차에 대한 표준편차가 최대 1.64이며 2b4m의 경우 1.62, 2b6m의 경우 1.66을 나타내고 있다.

그러므로 핵연료교체에 대한 가정은 배합 중성자속을 사용하는 2b4m의 교체구조가 가정 적절함을 알 수 있다.

3.2 출력감발시 출력계산 알고리즘에 대한 검증 결과

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

그림 11은 시뮬레이션 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 출력감소에 따라 2군 중성자속이 계측값 보다 높게 나타나 음의 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, 노심감시시스템을 위한 중성자속 분포는 후자를 적용하는 것이 보다 나은 정확성을 가진다는 것이다. 그림 12는 앞의 결과들을 종합할 수 있는 결과로서, 시뮬레이션 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 보면 중성자속 계측값과 2군 중성자속 간의 평균 백분율 오차에 대한 표준편차가 점차 증가하고 있으며, 중성자속 계측값과 계산된 중성자속을 이용하여 계산된 배합 중성자속간의 평균백분율 오차에 대한 표준편차도 미세하게 증가하기 시작하여 60% 총출력에서는 2.5에 이르고 있음을 보여 준다. 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 이용함으로서 출력감시시스템에 설계에 있어 타당성을 가진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

CANDU형 원자로의 출력을 2분 단위로 연속 계산하는 출력감시 시스템의 설계를 위해 설계 전반에 걸친 타당성 검증의 일부분으로서 핵연료 교체의 연속성을 최대로 고려하는 가정을 설정, 검증하기 위해 수행되었다.

설정된 가정은 1) 2분당 1개 채널 교체(1b2m), 2) 4분당 2개 채널 교체(2b4m), 3) 6분당 2개 채널 교체(2b6m) 구조로서, 각각의 경우에 대해 3차원 확산방정식을 이용해 구한 중성자속 분포 및 배합 중성자속의 분포를 각각 바나듐 중성자속 계측기의 계측값간의 비교를 통해 그 타당성을 평가하였다. 표준편차를 고려한 백분율 오차는 단순히 3차원 확산방정식을 이용해 구한 3차원 중성자속의 분포의 경우 1.64 ~ 3.14의 범위내에 있지만 본 시스템에서 사용될 배합 중성자속 분포의 경우에는 모든 가정에 대해 1.5175 ~ 1.71의 범위내에 있어다. 각각의 가정에 대해 평가를 해보면 본 시뮬레이션 기간 동안 1b2m의 경우 평균백분율 오차에 대한 표준편차가 최대 1.64이며 2b4m의 경우 1.62, 2b6m의 경우 1.66을 나타내고 있다. 그러므로 핵연료교체에 대한 가정은 2b4m의 교체구조가 가정 적절함을 알 수 있다.

출력감발시 제어봉의 위치 산정 등의 전환 알고리즘을 사용한 출력계산 알고리즘은 배합 중성자속을 이용함으로서 출력감시 시스템에 설계에 있어 타당성을 가진다는 것을 알 수 있다.

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”, 2065-MR-01.02, 고등기술연구원, 2001
3. 염충섭, “CANDU 노심 출력 감시스템 설계를 위한 핵연료 교체구조 가정 타당성 검증 및 선정”, 2065-MR-01.03, 고등기술연구원, 2001
4. D.A. Jenkins, "RFSP Program Description", COG-94-580, AECL, Canada, 1995
5. D.A. Jenkins, "RFSP User's Manual", COG-93-104, AECL, Canada, 1996
6. CANDU 600 Generating Station Physics Design Manual, DM-59-01100, AECL, Canada
7. 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.

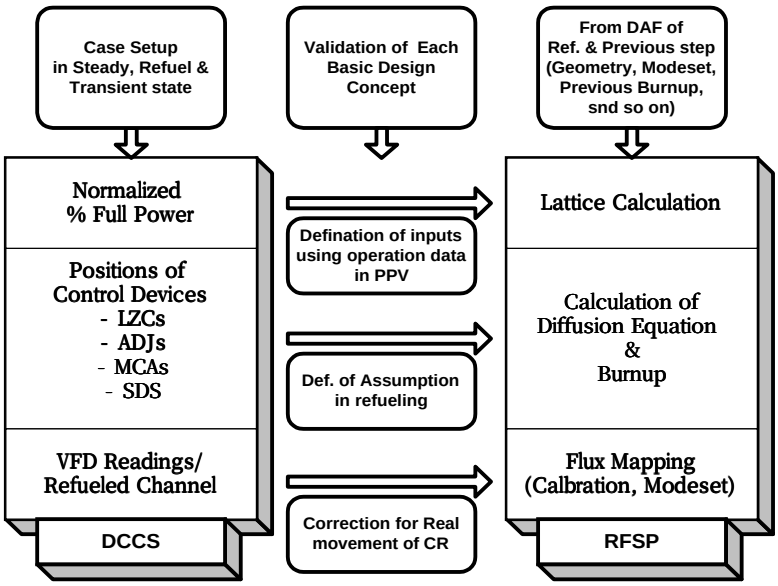

그림 1. 출력계산 다이아그램

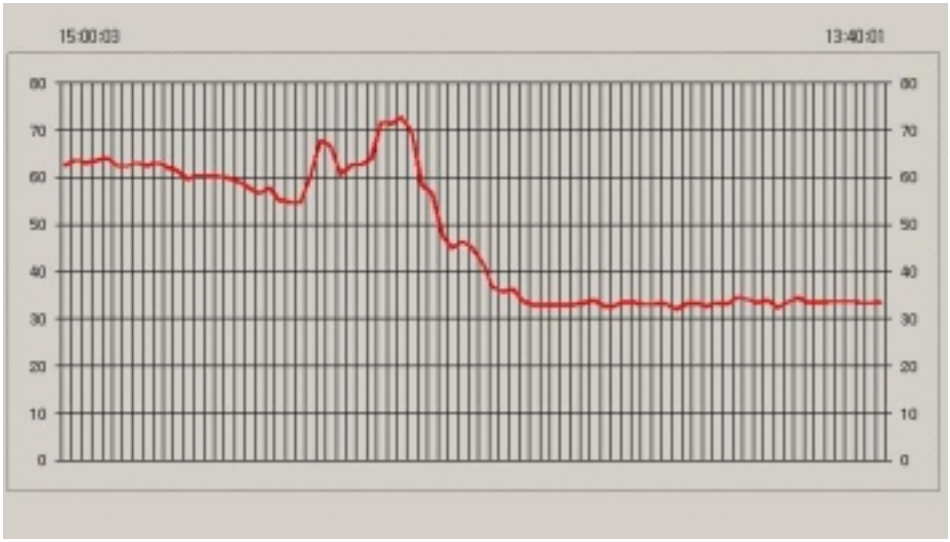

그림 2. J05 채널의 핵연료 교체에 따른 수위 영역변화(5528FPD)

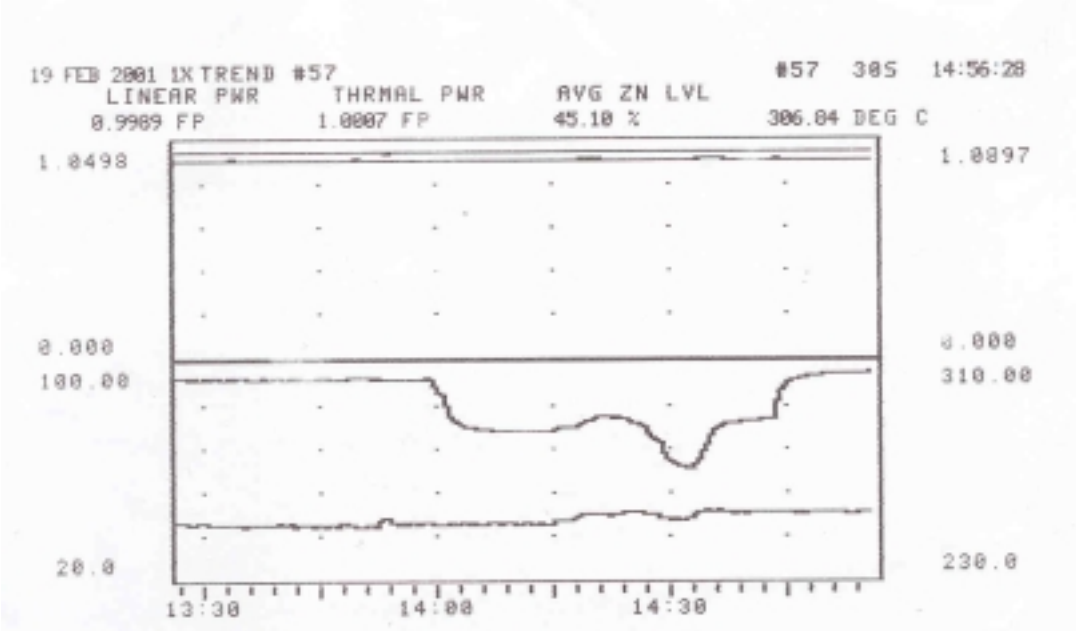

그림 3. J05 채널의 핵연료 교체동안의 노심출구 헤드 온도 변화(5528FPD)

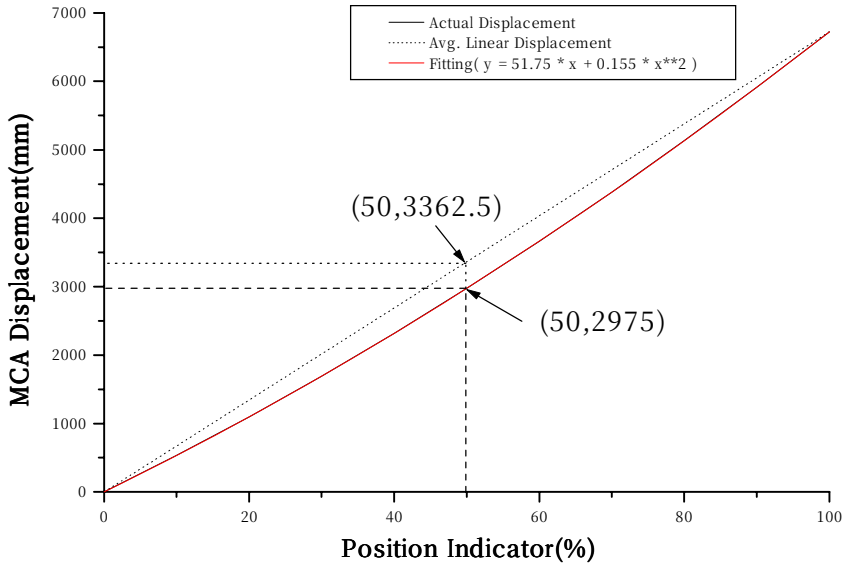

그림 4. MCA 실 이동거리 및 오차

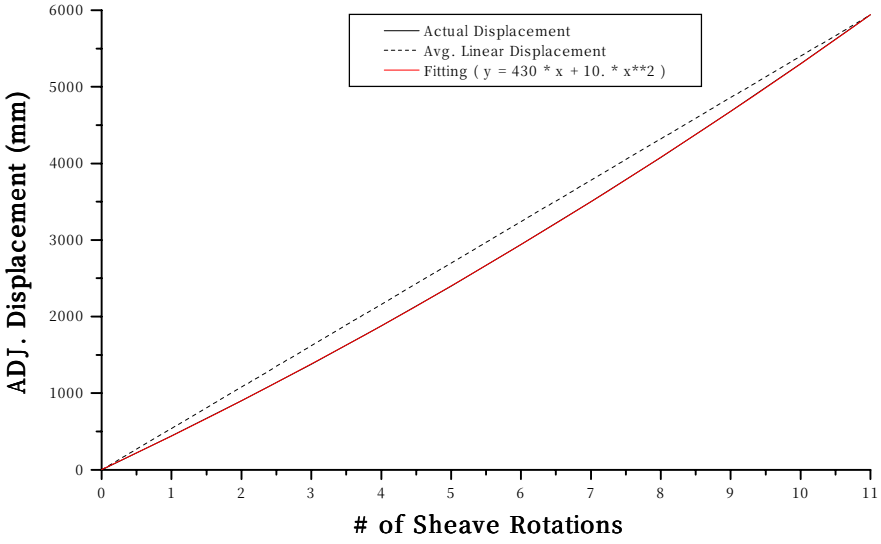

그림 5. ADJUSTER의 실 이동거리 및 오차

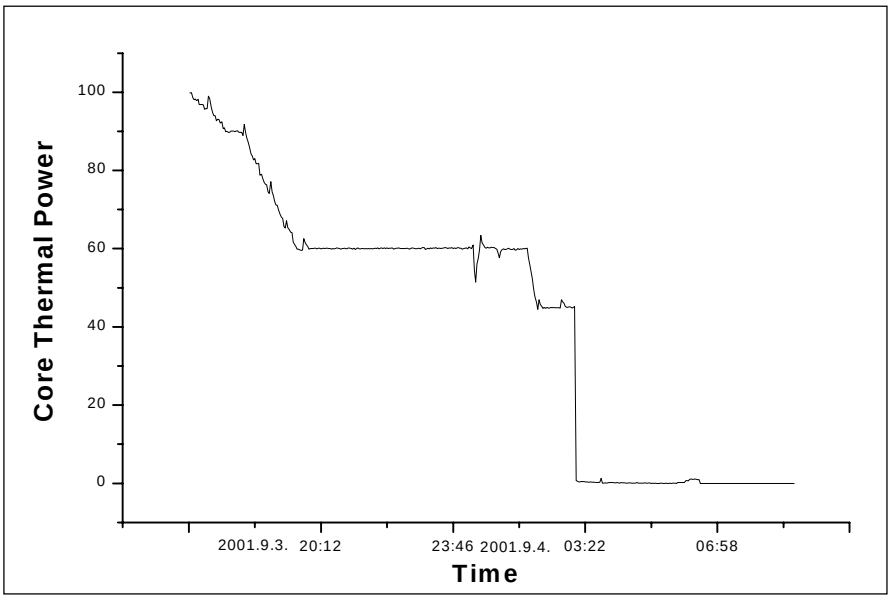

그림 6. 시뮬레이션 기간동안의 Core Thermal Power 의 변화

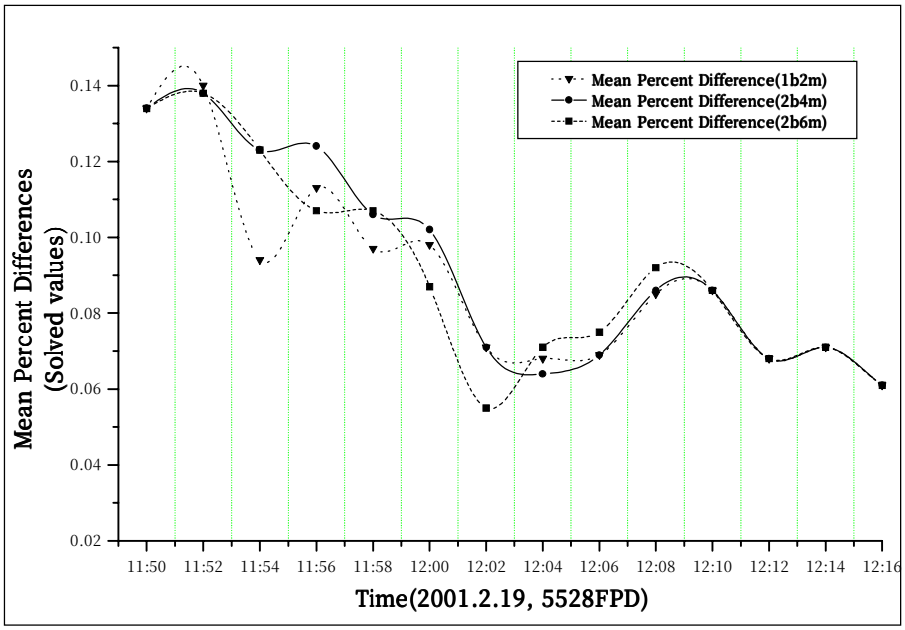

그림 7. 각 가정에 대한 2군 중성자속의 평균백분율오차

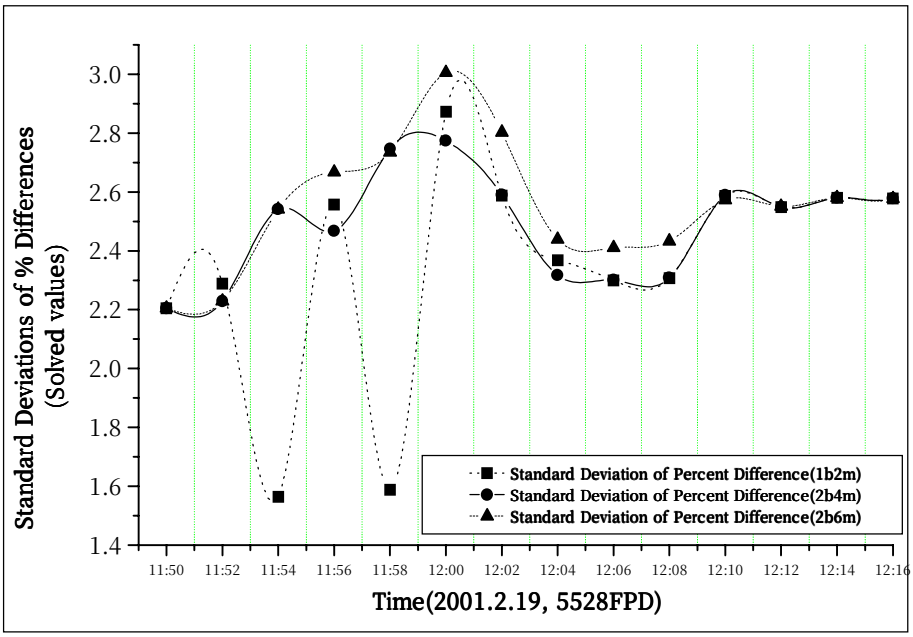

그림 8. 각 가정에 대한 2군 중성자속의 평균백분율오차에 대한 편차

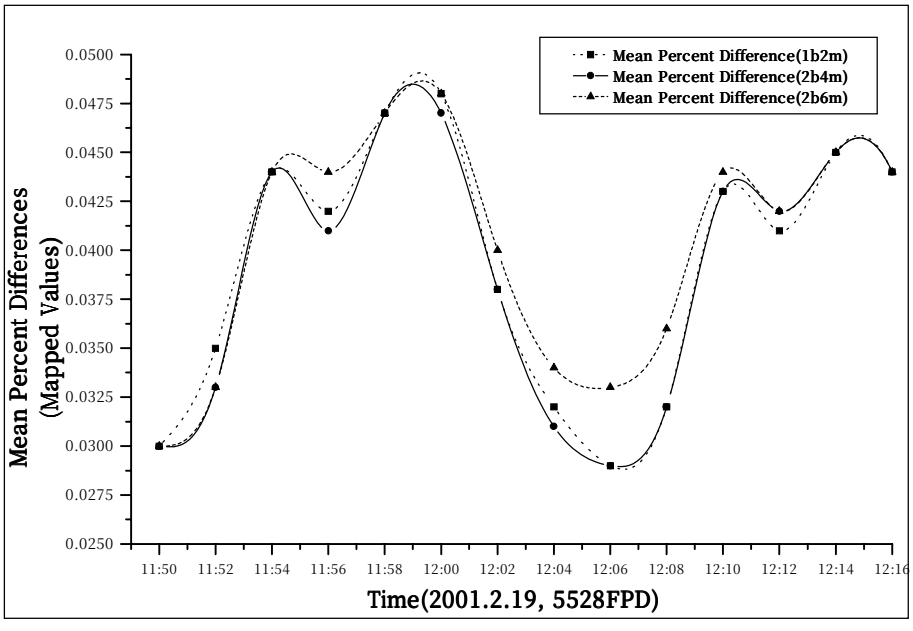

그림 9. 각 가정에 대한 배합 중성자속의 평균백분율오차

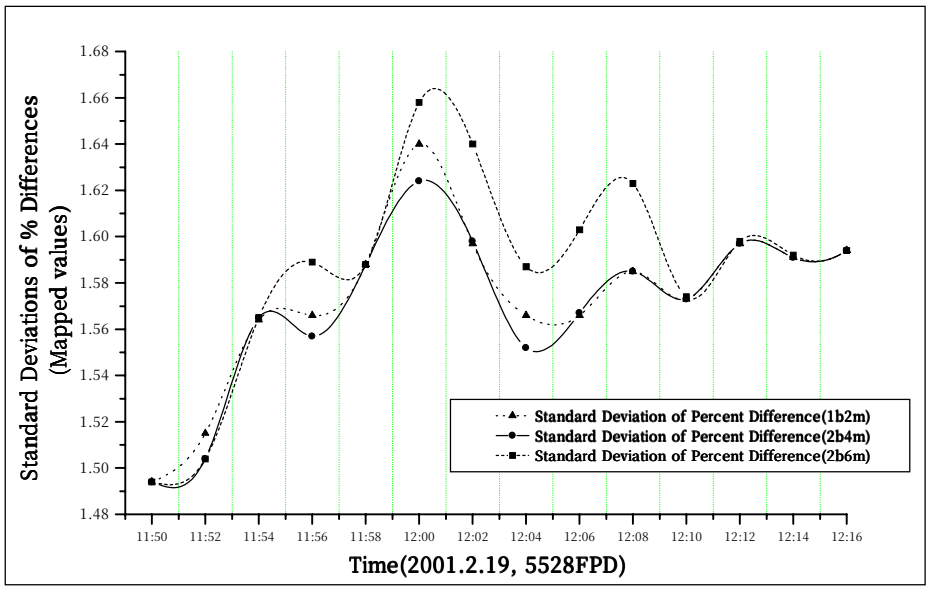

그림 10. 각 가정에 대한 배합 중성자속의 평균백분율오차에 대한 표준편차

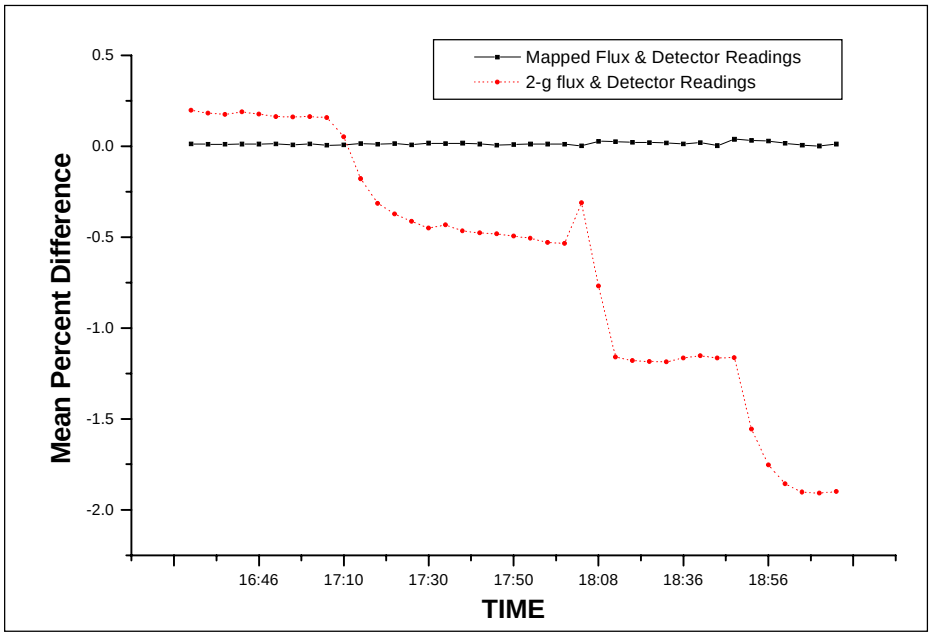

그림 11. 중성자속 계산 방법에 따른 평균 백분율 오차

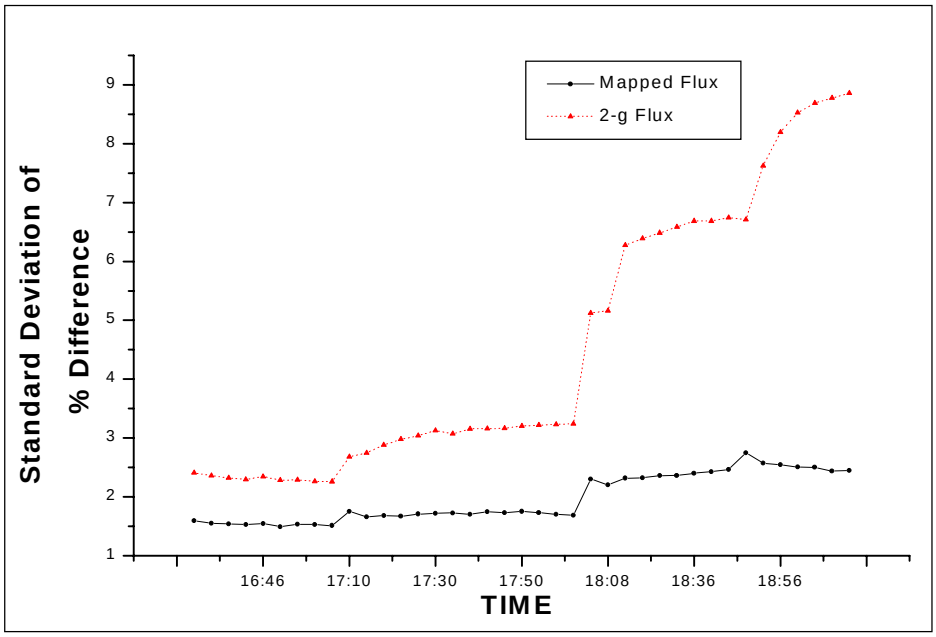

그림 12. 중성자속 계산방법에 따른 평균 백분율 오차에 대한 표준편차