

2003 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## CANDU 노심 감시 시스템 개발

### Development of CANDU Core Monitoring System

윤문영, 엄충섭, 권오환, 김경화  
고등기술연구원  
경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

#### 요 약

본 연구는 월성 1호기의 효율적인 노심관리를 목적으로 원자로의 출력 분포와 연소도 분포 및 주요 노심 변수를 상시 감시하고 노심의 주요 이력을 관리하기 위한 노심감시시스템을 개발하기 위해 수행되었다. 본 시스템에서는 주요 노심 계산을 위한 기본 입력 자료 생산을 위해 DCC(Digital Control Computer)를 통해 나온 정보를 이용하였으며, 연속적인 노심 계산을 위해 각 계산 알고리즘과 가정들에 대한 검증 후 현장에서 사용하는 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program) 코드를 사용하도록 하였다. CANDU 노심감시시스템은 RFSP 코드를 자동으로 연속 실행하고 결과를 추출하여 저장, 관리하는 서버 프로그램과 저장된 결과를 조회하여 GUI(Graphic-User Interface) 환경에서 사용자가 노심상태를 감시하는 클라이언트 프로그램으로 모듈화하여 개발되었다. 개발된 CANDU 노심감시시스템의 검증을 위해 현장 조건으로서 약 43시간에 걸쳐 감시한 결과와 현장 업무에서 사용된 자료를 비교 검토하여 시스템의 유효성을 확인하였다.

#### Abstract

The research was performed to develop a CANDU Core Monitoring System(CCMS) that enables operators to have efficient core management by monitoring core power distribution, burnup distribution, and the other important core variables and managing the past core history for Wolsong Nuclear Power Plant(NPP) #1. CCMS uses RFSP(Reactor Fueling Simulation Program) for continuous core calculation by integrating the algorithm and assumptions validated and uses the information taken from DCC(Digital Control computer) for the purpose of producing basic input data. CCMS could be largely divided into two modules; CCMS server program and CCMS client program. CCMS server program plays the role in automatic and continuous RFSP run and management of the past output data resulting from the run using DataBase Management System(DBMS). CCMS client program enables users to monitor current and past core status with GUI(Graphic-User Interface) environment predefined. The effectiveness of CCMS was verified by comparing the data resulted from field-test of the system for about 43 hours with the data used in the field of Wolsong NPP #1.

#### 1. 서론

원자력 발전소에서 노심감시시스템은 노심 운전 지원을 위한 도구로서, 노심의 출력을 비롯한 각종 노내 운전 상태를 감시함으로써 노심의 안정성과 관련된 운전기술지침서 상의 제반 제한 사항의 충족 여부를 확인하고 이상 상황 발생시 보다 신속하게 대처할 수 있도록 도움으로서 원전의 안전성 확보 및 노심 관리 업무의 효율성 제고에 기여한다. 중수형 원전의 경우는 천연우라늄을 핵연료로 사용하며 연소도를 고려하여 운전 중 매일 핵연료를 교체하는 운전 특성을 갖고 있는데, 핵연료가 노심 내에 장전되어 연소되면 연료의 농도 변화가 발생하고 핵연료 구성 핵종이 바뀌게 된다. 또한 노심 내 출력 분포 및 출력을 제어하기 위해 수위영역제어기의 수위가 계속 변하며, 이 외에도 조절봉 등의 다양한 제어장치들이 출력제어를 위해 거동하게 된다. 이와 같이 특히 중수형 원전의 경우는 노심 내에서 다양한 섭동 요인이 잠재해 있으므로 노심의 출력 변화시 최대 다발/채널 출력이 노심의 안정성과 관련된 운전기술지침서 상의 운전 제한치, 즉 핵연료 다발/채널 최대출력 제한치 내에 있는지 상시 감시할 필요가 있다.

본 연구는 현재 국내에서 가동 중인 가압중수로형 원전인 월성1호기(CANDU, Canadian Deuterium Uranium)에 노심감시시스템을 구성하기 위하여 수행되었으며, 현재 월성 원자력 발전소에서 사용 중인 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program) 코드를 이용하여 원자로 출력을 비롯한 각종 노내 운전 상태를 실시간으로 감시할 수 있는 온라인 노심감시시스템을 구축하였다.

이같은 연구 결과를 바탕으로 본 논문의 2장에서는 노심감시시스템의 국내외 현황 및 중수형 원전의 온라인 노심감시시스템 구축을 위한 이론적 배경을 제시하고, 3장에서는 구축된 CANDU 온라인 노심감시시스템에 관하여 설명한다. 본 논문의 4장에서는 월성 원자력 발전소에서의 실제 노심 운전 이력 자료를 CANDU 온라인 노심감시시스템에 적용하여 현장 조건 시험 결과를 같은 시점에 월성 원자력발전소 현장에서 노심 관리 업무를 위해 수행된 RFSP 코드 실행 결과와 비교, 분석하여 시스템의 신뢰성을 검증하였다..

## 2. 관련 연구 현황

노심감시시스템에 관한 해외 현황으로는 미국의 Oak Ridge National Lab.의 "HFIR(High Flux Isotope Reactor) Monitoring System" 및 웨스팅하우스의 "BEACON(Best Estimate Analysis of Core Operations - Nuclear)" 체제 구축, 헝가리의 "VERONA" 시스템 및 스웨덴의 "CROSS(CoRe On-line Supervision System)" 등을 들 수 있다. 노심감시시스템에 관한 국내 관련 활동으로는 ABB-CE형 원전에 설치된 "CLOSS(Core Operating Limit Supervisory System)" 및 고리 3호기의 "BEACON" 도입 예가 있다. 그러나 이들은 모두 외국에서부터 체제 자체를 도입하여 가압 경수형 원전에 적용한 경우로, 가압 중수로형 원전의 노심감시시스템에 관한 연구로는 본 연구가 거의 유일하다 할 수 있다.

본 연구에 앞서 가압 중수로형 원자로의 출력을 연속 계산하는 노심감시시스템의 설계를 위해 정상상태에서의 노심 출력계산 알고리즘을 검증하였고[2], 핵연료 교체의 연속성을 최대 고려하는 가정에 대한 검증을 통해 가장 적절한 핵연료교체 구조에 대한 가정을 확정하였으며[3], 출력 감발시 사용된 제어봉의 오차 보정 알고리즘과 격자계산을 위한 변수생산 알고리즘을 구축하여 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program)와 같이 연계, 중성자속 계측값과 비교하여 감시시스템에서 사용될 알고리즘의 타당성이 검토되었다[1]. 또한 중수형 원전의 출력 감시 시스템에서 다루어지는 방대한 양의 데이터를 체계적으로 관리하기 위한 데이터 모델링 과정에 관한 연구가 수행된 바 있다[4].

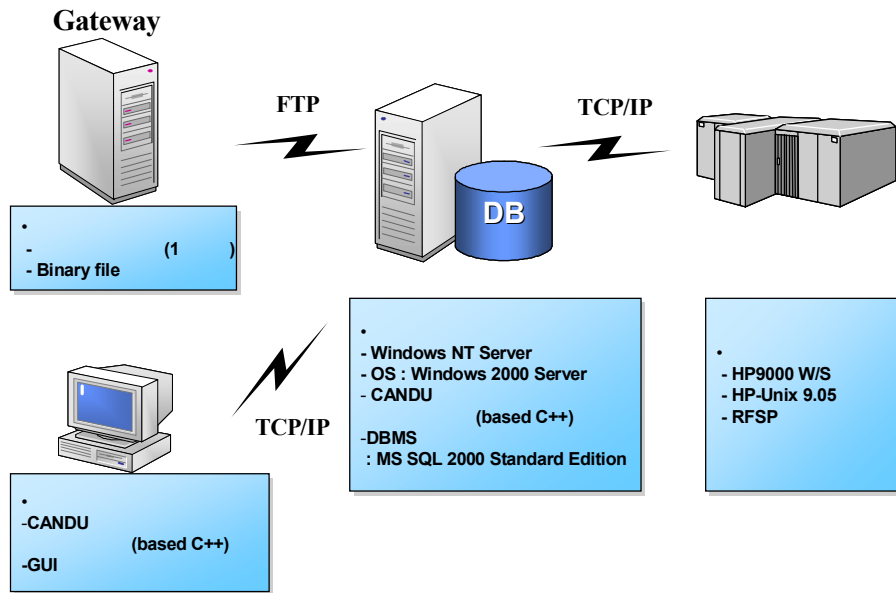
### 3. CANDU 온라인 노심감시시스템

#### 3.1. CANDU 온라인 노심감시시스템 아키텍처

본 시스템의 주요 기능은 CANDU형 원전의 노심의 상태를 계산, 핵연료 다발 및 채널의 출력 분포를 실시간으로 파악함으로써 채널/번들의 최대 출력을 상시 감시하고, 그 결과를 데이터베이스화하여 주요 데이터의 이력을 체계적으로 관리하는 데 있다. 이같은 기능을 효과적으로 구현하기 위해 CANDU 온라인 노심감시시스템은 서버 프로그램과 클라이언트 프로그램으로 모듈화하여 개발되었다. 서버 프로그램은 실시간으로 노심의 상태를 계산하여 그 결과를 계산시각과 함께 데이터베이스에 저장하는 역할을 수행하며, 클라이언트 프로그램은 데이터베이스에 접속하여 가장 최근에 계산된 노심 상태를 가져와 사용자로 하여금 GUI 환경에서 모니터링할 수 있도록 하는 기능을 담당한다.

RFSP(Reactor Fueling Simulation Program) 코드는 CANDU형 원전을 설계한 AECL에서 개발한 노심해석 코드로서, HP-UX 서버에 탑재되어 위와 같은 출력계산 알고리즘을 사용하여 채널 및 번들의 출력을 계산한다. 현재 월성 원자력발전소에서는 노심 관리업무 및 교체 핵연료 선정시 참고 자료로서 RFSP 코드를 실행, 그 결과를 분석하며 이에 따라 본 시스템의 서버 프로그램에서도 원자로 출력 분포를 계산하기 위해 RFSP 코드를 사용하기로 하였다. 바나듐 중성자속 계측값을 비롯한 각종 현장 계측값 및 LZC 준위, 제어봉의 노내 위치 등 RFSP 코드 실행에 필요한 각종 현장 값들은 소내전산기와 게이트웨이를 통해 제공되는 이진파일에서 추출된다. 이들 이진파일은 1분에 한번씩 갱신되며, 정보를 제공하는 시각의 시분을 파일 이름으로 사용한다. 예를 들어, 이름이 gw0d14.023인 파일은 14시 23분의 노내 정보를 담고 있는 게이트웨이 이진파일이다. 이들은 게이트웨이의 특정 디렉토리에서 FTP를 통해 제공된다.

따라서 CANDU 노심감시시스템을 구축하기 위해서는 노내 데이터를 실시간으로 제공하는 게이트웨이, RFSP 코드가 실행되는 UNIX 기반의 워크스테이션, 이들을 제어하는 서버 프로그램 및 DBMS가 탑재될 windows NT 기반의 서버 및 GUI 환경을 통해 노심을 감시하게 될 클라이언트 등 물리적으로 여러 대의 장비가 구축되어야 한다. 물리적으로 구분된 이들 장비 간의 통신은 월성 원자력 발전소 내에 구축된 LAN을 이용하며, 프로토콜로는 TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 및 FTP(File Transfer Protocol)를 사용한다. 이같은 기술적 요구사항을 고려하여 설계된 본 시스템의 아키텍처는 [그림 1]과 같다.

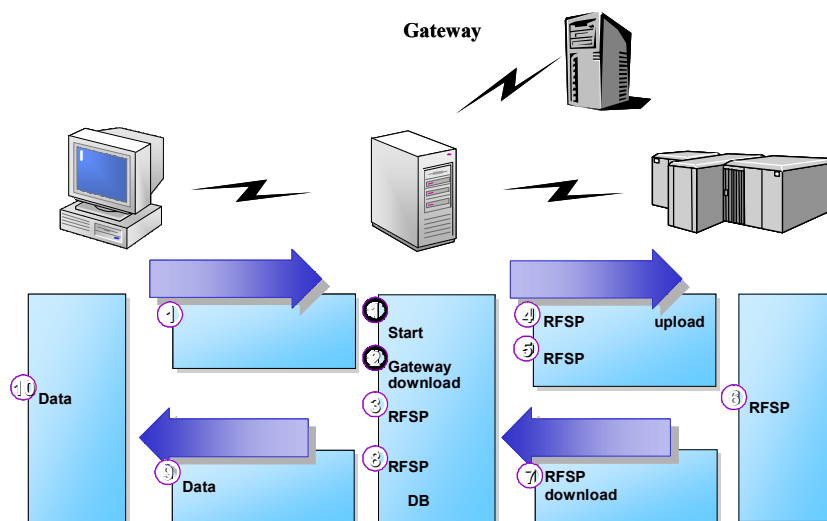


[그림 1] CANDU 노심감시시스템 아키텍처

### 3.2. 서버 프로그램의 기능

본 시스템의 서버 프로그램은 [그림 2]에서 보는 바와 같이 다음과 같은 기능을 순차적으로 반복해서 수행해야 한다.

- 게이트웨이 FTP 서버에 접속, 가장 최근에 갱신된 이진 파일 수신
- 수신한 이진파일로부터 RFSP 입력 파일 생성
- RFSP 코드 실행
- RFSP 출력 파일 분석, 데이터베이스화



[그림 2] CANDU 노심감시시스템 주요기능 실행 순서

게이트웨이로부터 수신한 이진 파일로부터 RFSP 입력 파일을 생성할 때에는 특히 핵연료 교체 여부를 진단하여 그 결과를 RFSP 입력 파일에 기록해주어야 한다. 여러 번의 현장 데이터를 활용하여 시뮬레이션한 결과, 20분 이전의 온도를 기준으로 하여 7.5% 이상 온도가 상승하는 채널은 해당 시각에 교체 중인 것으로 판단하였다.

또한, RFSP 코드는 UNIX 기반의 워크스테이션에서 실행되므로 RFSP 코드를 실행하기 위해서 서버 프로그램에서 작성된 RFSP 입력 파일을 워크스테이션으로 업로드하는 기능이 필요하며, 결과를 데이터베이스화하기 위해서는 RFSP 코드 실행 결과로 생성된 RFSP 출력 파일을 서버 프로그램이 작동되는 Windows NT 서버로 다운로드하는 기능이 필요하다.

RFSP 코드의 실행 중 에러가 발생하는 경우나 혹은 네트워크 오류로 인하여 프로그램이 제대로 작동하지 않는 경우는 로그 파일에 해당 시각 및 에러 양상을 기록, 관리자가 프로그램을 관리할 수 있도록 하였으며, 정기적으로 데이터베이스를 백업하고(1회/주), 1개월 이전의 데이터는 삭제하도록 데이터베이스 유지관리 기능을 추가하였다. 그 외에도 RFSP 출력 파일 및 DAF(Data Access File)를 특정 디렉토리에 저장하여(1 file/day) 데이터베이스에서 조회되지 않는 1개월 이전의 데이터에 관해서도 기록을 검토할 수 있도록 하였다.

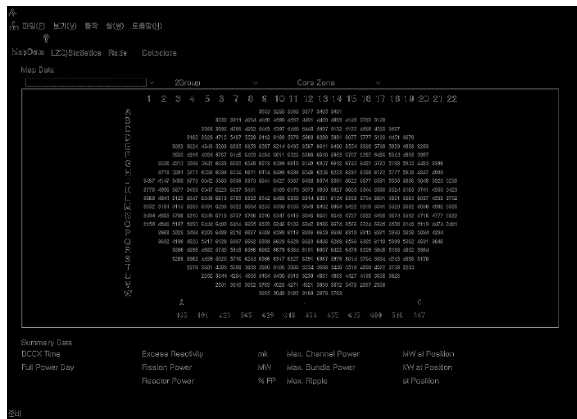
### 3.3. 클라이언트 프로그램의 기능

CANDU 온라인 노심감시시스템의 클라이언트 프로그램은 데이터베이스에 저장된 각종 노심 관련 자료를 GUI(Graphic User Interface) 환경으로 재구성하여 사용자가 노심의 상태를 정확히 파악할 수 있도록 구성되었다. 클라이언트 프로그램은 본 시스템에서 사용자가 가장 많이 활용하게 될 부분이므로, 특히 월성 원자력발전소의 실무자들의 요구사항을 구체적으로 수렴하여 적극 반영하였다. 클라이언트 프로그램의 주요 기능은 아래 표와 같다.

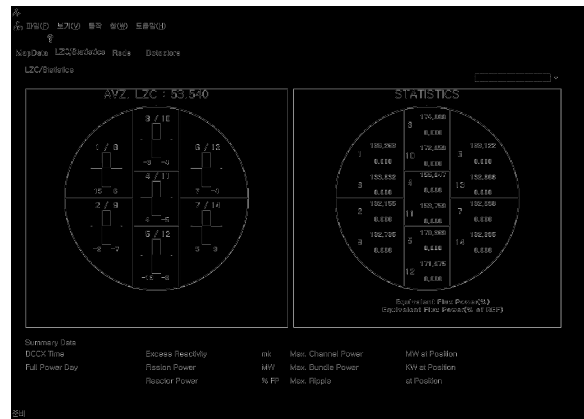
[표 1] 클라이언트 프로그램의 주요 기능

클라이언트 프로그램 기능	관련 데이터
원자로 출력 및 각종 노심 상태 감시	- channel & bundle power(2-g 및 mapped) - channel & bundle overpower(2-g 및 mapped) - k increase on refueling - day of last refueling - average exit burnup - burnup over time averaged burnup - zone statistics
제어봉 위치 조회	- adjustor position - MCA position
각종 detector 계측값 조회	- vddet reading value - zonePt reading value - sds1det reading value - sds2det reading value
과거 이력 조회 및 trend 분석	- channel & bundle power(2-g 및 mapped) - channel & bundle overpower(2-g 및 mapped) - k increase on refueling - average exit burnup - burnup over time averaged burnup - zone statistics
사용자 report 출력	- summary 정보

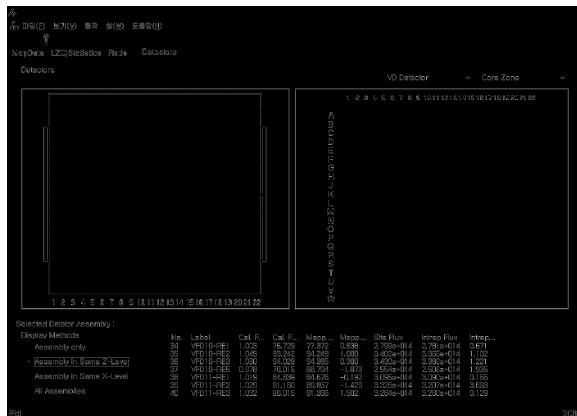
클라이언트 프로그램의 노심 감시 기능에서는 사용자에게 제공하는 정보에 따라 CANDU 원자로를 모형화한 그림과 함께 데이터를 제시한다. 380개의 채널 관련 정보들은 모두 CoreMap(x-y 평면) 상태로 제시되며, 번들 관련 정보는 해당 채널을 클릭한 경우 CoreMap 하단에 나타난다[그림 3]. Zone Statistics 정보는 x-y 평면의 원자로를 7개 영역으로 구분하여 각 zone의 해당 위치에 수치를 나타내며, z 방향의 뒤쪽에 있는 zone(zone#8 ~ zone#14) 정보는 x-y 평면상에서 동일한 위치에 해당되는 zone(zone#1 ~ zone#7)과 함께 슬래쉬('/')로 구분하여 수치를 나타낸다[그림 4]. 각종 계측값 정보에 대해서는, 해당 계측기가 부착되어 있는 VFD(Vertical Flux Detector) 및 HFD(Horizontal Flux Detector)의 위치 정보를 x-z 평면(HFD의 경우 y-z 평면) 및 x-y 평면에서 모두 제시함으로써 사용자의 가독성을 높였다[그림 5]. 제어봉 위치 정보 역시 x-z 평면 및 x-y 평면 두 가지 view로 제시된다[그림 6]. 이같은 GUI 형태는 대부분 월성 원자력발전소 현장의 노심관리업무를 분석, 현장에서 사용되는 문서 및 프로그램 등과의 일관성을 유지하는 방향으로 설계되었다.



[그림 3] 클라이언트 프로그램 GUI - CoreMap



[그림 4] 클라이언트 프로그램 GUI - Zone



[그림 5] 클라이언트 프로그램 GUI - Detector



[그림 6] 클라이언트 프로그램 GUI - 제어봉

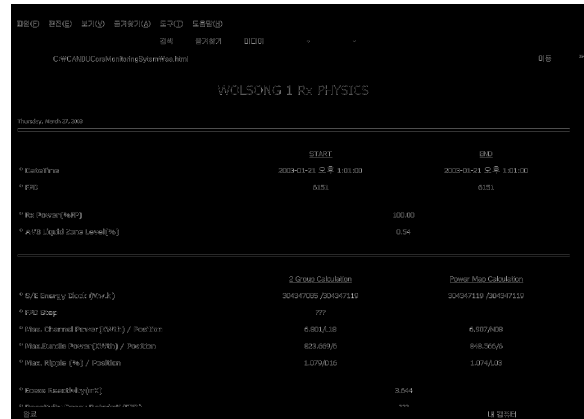
클라이언트 프로그램은 서버 프로그램과의 TCP/IP 통신을 통해 실시간 정보가 갱신될 때마다 자동으로 화면을 refresh하여 사용자의 추가 요청이 없어도 항상 실시간 노심 상태를 반영한다.

필요한 경우, 화면 왼쪽의 tree view에서 데이터베이스에 저장되어 있는 과거 특정 시점의 데이터를 클릭하여 조회할 수도 있다.

그 외에도 사용자의 요청에 따라 특정 정보의 시간별 추이를 그래프를 통해 알아볼 수 있으며 [그림 7], 노심관리업무 지원용으로 요약 정보 보고서를 작성[그림8], 프린트하거나 EXCEL 형태로 export할 수 있다.



[그림 7] 클라이언트 프로그램 GUI - 시간별추이



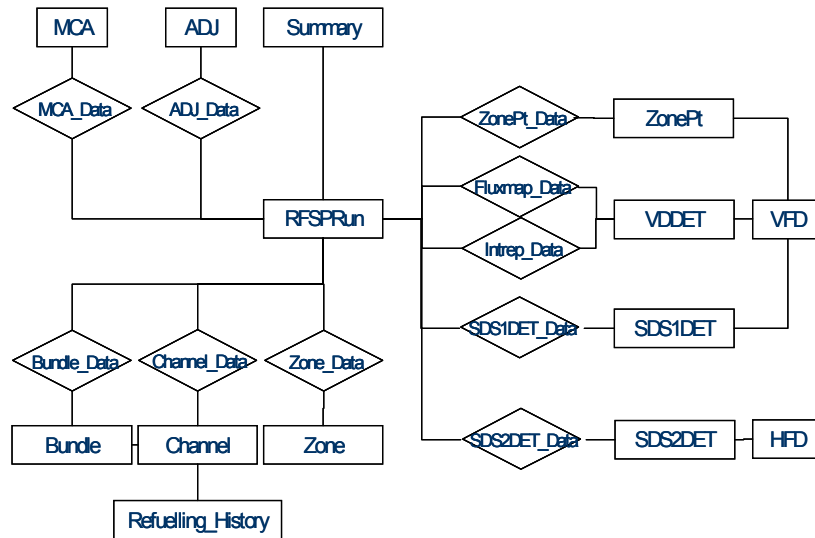
[그림 8] 클라이언트 프로그램 GUI - 리포트

### 3.4. 데이터모델링

데이터베이스는 조직의 기능을 수행하는데 반드시 필요한 운영데이터들을 통합하여, 중복을 배제하고 구조화하는 과정을 거쳐 컴퓨터화하여 저장해 놓은 데이터의 집합이다. 또한 구조화되지 않은 데이터들을 구조화하여 데이터베이스화하는 과정을 데이터모델링이라 한다. 데이터모델링의 주요 산출물로는 1976년 Peter Chen에 의해 제안된 ERD(Entity Relation Diagram)를 들 수 있다. ER Modeling에서 entity는 시스템화 하고자 하는 사물을, attribute는 entity의 성질을 나타내는 기본 단위를, relation은 entity간의 관계를 각각 나타내며, ERD는 이들의 관계를 그림으로 간략하게 표현한 것이다.

CANDU 노심감시시스템을 구축하기 위해 데이터베이스에 저장되어야 하는 정보들은 크게 세 가지로 구분된다. 첫 번째 유형의 데이터들은 채널 및 번들, zone 등 노심 관련 정보 및 노내 계측기 위치 정보, 제어봉들의 x-z 평면에서의 위치 정보 등 시간에 따라 변화하지 않는 정적인 정보들로, 이들은 entity로 모델링하였다. 첫 번째 유형에 해당하는 entity로는 channel, bundle, zone, vddet, sds1det, sds2det, zonept, adj, mca, vfd, hfd 등이 있다. 두 번째 유형의 데이터는 실제 원자로에는 존재하지 않으나 본 시스템의 구성상 필수적인 RFSP 코드 실행 과정을 entity로 형상화한 것이다. 두 번째 유형에 해당하는 entity는 RFSPRun 하나뿐이다. 세 번째 유형의 데이터는, 앞의 두 가지 유형의 데이터의 relation으로 모델링되는 것으로 해당 RFSP 코드 실행의 결과에 따른 관련 정보들을 나타낸다. 예를 들어 channel entity는 380개의 각 채널의 고유정보(원자로에서의 위치, refuel scheme 등)를 갖는 첫 번째 유형의 entity이며, 특정 시점의 RFSP 수행 결과 중 channel 관련 정보들은 channel entity와 RFSPRun entity의 relation으로서 나타나게 된다. 각

entity와 RFSPRun은 n:m의 카디널리티를 가지므로 해당 relation 역시 테이블로 구조화되는데, 이때 테이블 이름은 첫 번째 유형의 entity이름에 \_data를 접미어로 붙였다. [그림 9]는 이같은 데이터모델링 결과를 ERD로 나타낸 것이다. Entity는 사각형으로, relation은 마름모꼴로 나타나있다.



[그림 9] CANDU 노심감시시스템 ERD

#### 4. 결과 분석을 통한 유효성 검증

##### 4.1. 현장 조건 시험 및 결과

본 연구에서 구축된 CANDU 노심감시시스템의 신뢰성을 검증하기 위하여 2003년 1월 21일 13시 경부터 2003년 1월 23일 08시까지 약 43시간 동안 현장의 게이트웨이 서버를 통한 DCC 정보를 이용하여 현장 조건으로 실행한 결과와 월성 현장에서 노심관리를 위해 수행한 RFSP 실행 결과와 비교, 분석하였다. 시스템 시험 실행 기간은 아래 [표 2]와 같다.

[표 2] 시뮬레이션 시간

시뮬레이션 시작 시점	시뮬레이션 끝 시점
2003년 1월 21일 13:12	2003년 1월 23일 08:00
6151 FPD	6153 FPD
Energy clock : 304347085	Energy clock : 304435207

월성 원자력발전소 현장의 정확한 상태를 모사하기 위하여 가상 게이트웨이 서버를 구성하여 게이트웨이 이진 파일을 1분마다 순차적으로 서버에 upload하였으며, CANDU 노심감시시스템의 서버 프로그램은 가상 게이트웨이 서버에 접속, 최근 갱신된 이진파일을 수신하여 RFSP 입력 파일



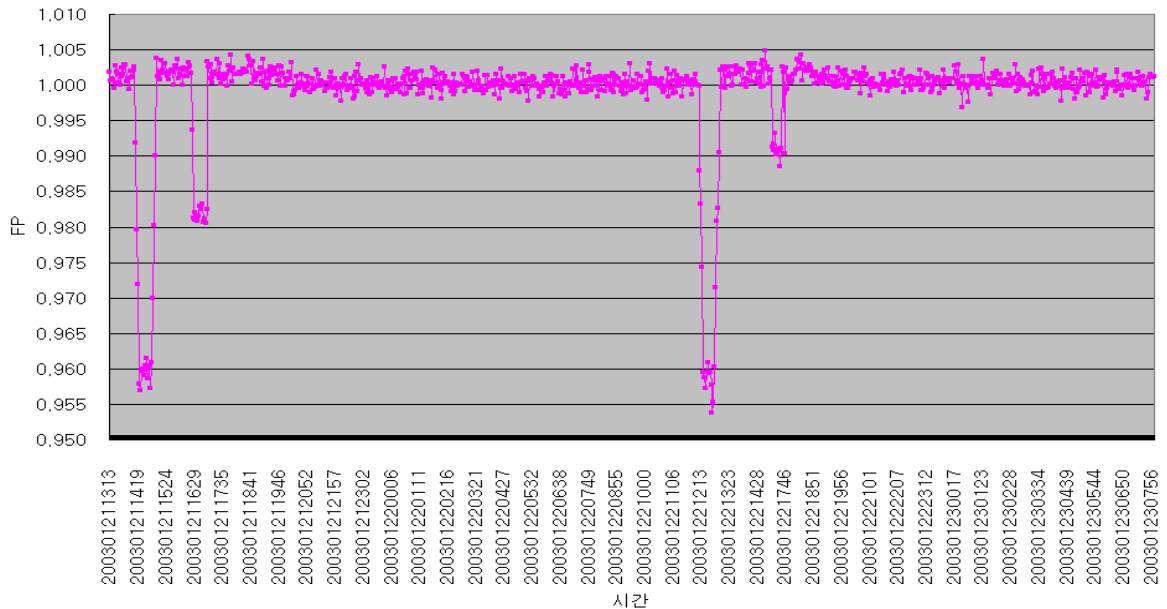
을 작성하도록 구성되었다.

현장 조건 시험 기간 동안 현장에서의 핵연료 교체 내역은 다음과 같다.

[표 3] 시뮬레이션 기간 중 핵연료 교체 내역

교체 핵연료	교체 시간
J11	2003년 1월 21일 13:52-15:19
R13	2003년 1월 21일 16:05-17:15
Q04	2003년 1월 22일 10:00-11:09
P11	2003년 1월 22일 11:52-13:12
F17	2003년 1월 22일 14:30-15:42
C08	2003년 1월 22일 16:34-18:02

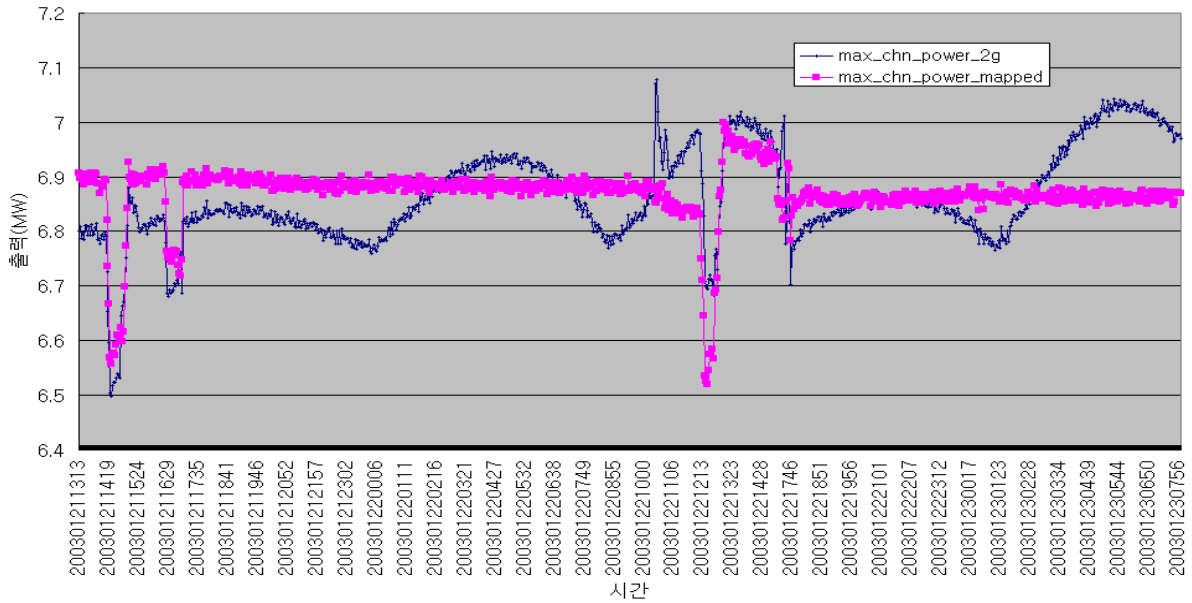
[그림 10]은 현장 조건 시험 기간 동안의 FP를 나타낸 것이다. FP는 대략 0.997 ~ 1.004 정도의 값을 가지며, FP가 현저히 떨어지는 경우는 채널 교체 시점과 일치함을 알 수 있다.



[그림 10] 시뮬레이션 기간 동안의 FP

[그림 11]은 현장 조건 시험 기간 동안의 2그룹 계산 결과에 의한 채널 최대 출력(2-g) 및 중성자속 계측값과 계산된 중성자속을 이용하여 계산된 지도화된 중성자속에 의한 채널 최대 출력(mapped)을 나타낸 것이다. 2그룹 계산 결과에 의한 채널 최대 출력은 대략 8시간을 주기로 커브를 그리고 있다. 이는 핵연료 교체를 위해 이루어진 출력 감발에 의한 독물질, 특히 제논의 동특성에 의한 것으로 판단된다. 이전 연구[2]에 의해 2그룹 계산 결과보다 더욱 신뢰성 있는 것으로 판단된 지도화된 중성자속에 의한 채널 최대 출력은 6,800kW에서 6,900kW 사이로 비교적 안정된 값을 나타내고 있다. 채널 최대 출력 분포에서 출력이 갑자기 떨어지거나 높아지는 경우는 모두 핵연료 교체 시기에 해당하는 것으로, 이는 핵연료 교체에 따른 출력 감발에 의한 결과로 나타나

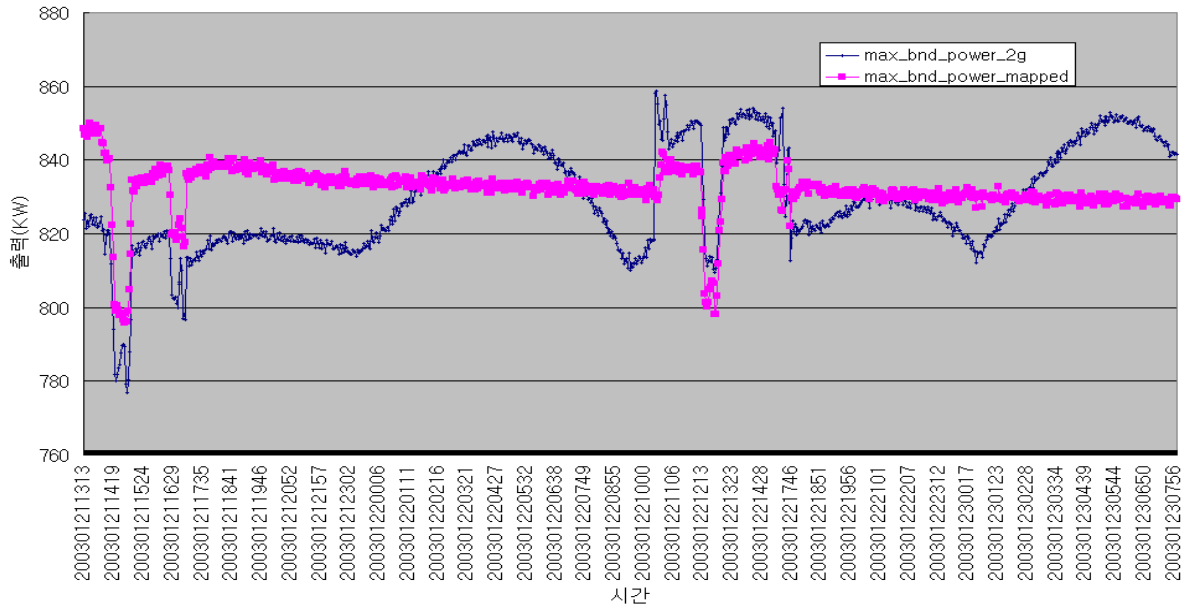
는 현상이다.



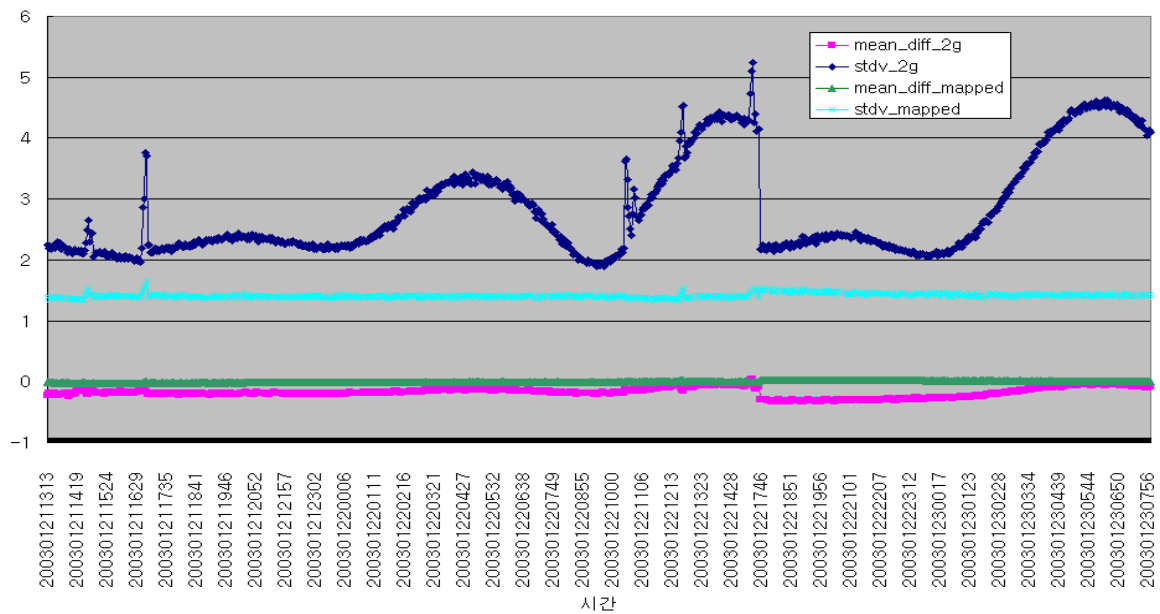
[그림 11] 시뮬레이션 기간 동안의 채널 최대 출력

[그림 12]는 현장 조건 시험 기간 동안의 2그룹 계산 결과에 의한 번들 최대 출력(2-g) 및 지도화된 중성자속에 의한 번들 최대 출력(mapped)를 나타낸 것이다. 채널 최대 출력의 경우와 마찬가지로, 2그룹 계산 결과에 의한 번들 최대 출력은 주기적으로 커브를 그리고 있으며, 지도화된 중성자속에 의한 번들 최대 출력은 안정된 값을 갖는 경향을 보인다. 두 경우 모두 번들 최대 출력 제한치인 900kW에는 도달하지 않는다.

[그림 13]은 현장 조건 시험 기간 동안의 2그룹 계산 결과를 102개의 바나듐 중성자속 계측기 위치에서 확산방정식을 이용해 계산된 2-g 중성자속 분포를 내삽한 결과 그리고 2-g 중성자속과 계측값을 이용하여 생산된 지도화된 중성자속 각각과 바나듐 중성자속 계측값 간의 오차를 비교 평가한 결과를 나타낸 것이다. 바나듐 중성자속 계측기 위치에서 두 값의 평균 백분율오차는 -0.333%에서 0.048%로 분포하며 대부분은 -0.2 ~ -0.1 범위 내에 있다. 또한 그에 따른 표준편차는 5% 내에 있으며 대략 8시간을 주기로 하여 진동하는 현상을 보여주고 있으며 독물질의 동특성 때문인 것으로 판단된다. 지도화된 중성자속의 경우 표준편차를 포함한 평균백분율 오차가 1.5%내에서 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 본 시스템에서 출력 감시의 대상이 지도화된 중성자속을 고려한 출력입을 감안할 때 정확성 측면에서 유효함을 나타낸다.



[그림 12] 시뮬레이션 기간 동안의 번들 최대 출력



[그림 13] 2-g 중성자속 및 지도화된 중성자속과 예측값과의 오차 평가

#### 4.2. 현장 조건 시험 최종 시점에서의 결과 비교

본 시스템의 신뢰성을 평가하기 위하여 현장 조건 시험 최종 시점에서의 RFSP 실행 결과를 같은 시각에 월성 원자력 발전소 현장에서 노심관리 업무를 위해 수행된 RFSP 실행 결과와 비교, 분석하였다. 비교된 시점은 2003년 1월 23일 08:00이다. [표 4]에 이들 RFSP 실행 결과가 나타나 있다.

[표 4] 현장 실행 결과 및 현장조건 시험 결과 비교

		현장 실행 결과	현장조건 시험 결과
SDATE		2003-01-20 08:00	2003-01-23 07:58
EDATE		2003-01-23 08:00	2003-01-23 08:00
Energy Clock		304434973	304435207
Excess Reactivity		4.114	4.207
max chanel power(2-g)		6757.3 at N08	6970.3 at G15
max bundle power(2-g)		815.0 at O18, #6	841.4 at F15, #7
max chanel power(mapped)		6857.6 at N08	6868.8 at N08
max bundle power(mapped)		827.4 at O18, #6	829.2 at O18, #6
site 및 Intrep 비교	mean of detector flux from intrep	0.26767E+15	0.26759E+15
	mean of detector flux from site	0.26735E+15	0.26726E+15
	mean percent difference	-0.204	-0.089
	largest positive percent difference	5.598(#51)	8.821(#51)
	largest negative percent difference	-5.046(#96)	-8.951(#99)
	standard deviation of percent diff	2.132	4.101
reading 및 mapped 비교	mean of readings	78.018	73.202
	mean of mapped values	78.018	73.201
	mena percent difference	0.008	0.008
	largest positive difference	6.521(#65)	6.434(#65)
	largest nevative difference	-3.324(#92)	-3.190(#92)
	standard deviation of percent diff	1.429	1.426

위의 결과에서 energy clock의 차이는 시작 시점과 끝 시점사이의 기간에 대해 미세한 출력변화의 고려 여부에 따라 발생한다. 즉, 감시시스템의 실행 시에는 출력변화를 고려하나, 월성 현장의 노심관리를 위한 시뮬레이션에서는 100% 총출력으로 가정을 한 상태에서 출력변화를 고려하지 않기 때문에 나타나는 현상이다.

확산방정식 계산 결과에 의한 채널 및 번들 최대 출력은 두 경우의 차이가 크게 나타난다. 최대 출력이 나타나는 채널 및 번들이 서로 다르고, 그 값에 있어서도 채널의 경우 200kW 이상, 번들의 경우 25kW 이상 차이가 나타난다. 이는 전술한 바와 같이 독물질의 동특성 계산에 의한 것이다.

지도화된 중성자속에 의한 계산 결과로 나타나는 채널 및 번들 최대 출력은 두 경우 모두 비슷하게 나타난다. 최대 출력이 나타나는 채널 및 번들이 같으며, 그 값 역시 크게 차이가 나지 않는다.

RFSP코드의 \*COMPARE 모듈은 2-g 결과로 나타난 flux를 102개의 바나듐 중성자속 계측기 위치로 내삽한 결과(intrep flux)와 바나듐 중성자속 계측기의 계측값(site flux)을 비교하여 그 결과를 제공한다. \*COMPARE 모듈의 결과를 비교하여 보면, intrep flux 및 site flux의 값은 현장 실행

행 결과값(0.26767E+15 및 0.26735E+15)이 현장조건 시험 결과값(0.26759E+15 및 0.26726E+15)보다 더 크게 나타난다. 또한 현장조건 시험한 결과의 mean percent difference(-0.089)가 현장 실행 결과(-0.204)보다 더 작으므로 보다 정확한 계산을 수행했다고 할 수 있으나, largest positive/negative percent difference 항목 및 percent differences의 표준편차가 크게 나타나 현장 조건 시험 결과에서는 각 계측기 위치마다 편차가 큼을 알 수 있다.

RFSP 코드의 \*FLUXMAP 모듈은 지도화된 중성자속을 계산하여 이 값을 102개의 바나듐 중성자속 계측기의 계측값과 비교하여 그 결과를 제공한다. \*FLUXMAP 모듈의 결과를 비교하여 보면, 지도화된 중성자속 및 바나듐 중성자속 계측기의 계측값은 현장 실행 결과(78.018 및 78.018)가 현장조건 시험 결과값(73.201 및 73.202)보다 더 크게 나타난다. Mean percent difference 값은 두 경우 모두 0.008로서 노심의 실제 상황을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났으며, largest positive/negative percent difference 항목 및 percent differences의 표준편차는 현장조건 시험한 결과에서 더 작게 나타나, 현장조건 시험 결과가 좀 더 안정적으로 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결론

구축된 CANDU 노심감시시스템은 채널 출력을 비롯한 노심의 현재 상태를 RFSP 코드를 이용하여 계산하고, 이를 실시간으로 GUI 환경을 통하여 사용자에게 제공하며, 그 결과를 데이터베이스화하여 과거 노심의 상태를 조회할 수 있도록 구성되었다.

본 시스템의 신뢰성을 검증에 위해 수행된 시스템의 현장 조건 시험 결과 시스템 가동중 노심의 거동에 대한 감시는 정상적으로 이루어졌다. 또한 노심의 주요 변수 또한 정량적인 측면에서 월성 현장 업무에 이용된 결과와의 비교를 통해 시스템의 기능적 유효성이 범위 내에 있음이 확인되었으며, 시스템 고유의 건전성 또한 검증되었다.

## 6. 참고문헌

- [1] 염충섭, "CANDU 노심 출력 감시 시스템 구현을 위한 출력 계산 알고리즘 검증", 한국원자력학회 춘계학술대회, 2002
- [2] 염충섭, "CANDU 노심감시시스템 설계를 위한 정상상태 출력계산 알고리즘 분석", 대한 에너지공학회, 2001
- [3] 염충섭, "CANDU 노심 출력 감시 시스템 설계를 위한 핵연료 교체구조 가정 타당성 검증 및 선정", 2065-MR-01.03, 고등기술연구원, 2001
- [4] 윤문영, "CANDU 온라인 출력 감시 시스템 구현을 위한 데이터 모델링", 대한에너지공학회 추계학술대회, 2002
- [5] Chen, P., 1976, "The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data", ACM Transaction on Database System, Vol. 1, No. 1, March 1976, pp. 9-36.

### 감사의 글

본 연구는 과락기술부 원자력중장기 연구개발 사업의 일환으로 한국전력연구원의 위탁연구로서 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.