

디지털 반응도 전산기 개발
Development of DDRCS(Direct Digital Reactivity Computer System)
for Low Power Physics Test

류석진

USERS

대전광역시 유성구 문지동 103-16 전력벤처센터 A06

요 약

DDRCS(Direct Digital Reactivity Computer System) 장비는 기존의 아날로그 방식의 반응도 전산기와 디지털 방식의 반응도 전산기에 비해 회로의 결선을 간단히 하였고, 원자로 특성시험 전에 예비 작동시험의 복잡성을 개선하여, Power-On과 동시에 원자로 특성시험을 시작할 수 있어서 작업시간 절약 측면에서 대단히 유리하다. 또한 DDRCS는 원자로 동특성 방정식을 간단한 퍼스널 컴퓨터로 소프트웨어적으로 처리함과 동시에 데이터 통신방식을 디지털화 하였기 때문에 아날로그 방식 설비에서 발생하는 오차 및 보정을 해소시킬 수 있을 뿐만 아니라 Real Time On-Line Monitoring 함으로서 작업자에게 신뢰감을 줄 수 있고, Man-Machine Interface가 향상되어 운영 측면에서 큰 장점이 있다.

Abstract

DDRCS(Direct Digital Reactivity Computer System) made an improvement of broken line of circuit in comparison of the current Analog and Digital Reactivity Computer Systems. Moreover, because LPPT(Low Power Physics Test) can be performed with Power-On simultaneously, it gives great advantage in saving of working time. DDRCS makes that reactor point kinetics equation is processed by software system of personal computer and data communication type was digitalized concurrently. Therefore it is a big merit in a operational point of view solving error and calibration caused by the analog type equipment, making a reliability to operator, the real time on-line monitoring, and raising the Man-Machine Interface

I. 서론

현재 사용중인 반응도 전산기는 노외계측기 설비(NIS)의 출력영역으로부터 측정된 중성자속 전류신호(1nAmp. ~ 100nAmp.)를 사용하여 역반응도 관계식으로부터 반응도를 계산하는 장비로 영 출력 원자로특성 시험을 수행하는데 반드시 필요한 기구이다. 국내 가압경수형 발전소는 그 노형에 상관없이 모두 반응도 전산기를 사용하여 영출력 원자로특성 시험을 수행하며, 지난 십 수년간 몇차례 성능이 향상되었지만 개별 발전소에 공급되는 까닭에 성능이 낙후된 장비를 사용하는 곳도 있는 형편이다. 그리고 현재 현장에서 사용중인 반응도 전산기는 붕소회석과 제어봉 교환법에 적합하도록 구성되어 있어 앞으로 영출력 특성시험에 사용된 동적 제어봉 제어능 측정방법론 적용은 불가능하다. 여기서 개발된 디지털 반응도 전산기(DDRCS, Direct Digital Reactivity

Computer System)는 기존의 반응도 전산기가 수행하지 못했던 동적 제어봉 제어능 측정방법 적용을 가능하게 하였고 장비를 간소화하게 제작하여 사용자가 취급함에 있어 매우 용이하다.

II. 본론

DDRCS는 원자로 외곽에 위치한 노외계측기로부터 전류신호를 받아서 원자로 동특성방정식을 풀어 반응도를 계산한다. 기존의 반응도 전산기는 노외계측기 전류신호를 아날로그방식으로 처리하여 반응도를 계산하였으나, DDRCS는 노외계측기 전류신호를 디지털값으로 변환하여 반응도 계산에 사용함으로써 부수적으로 장착되어야 했던 부품의 수를 줄일 수 있다. 아래 그림 1은 DDRCS의 전체적인 Data 흐름도이다.

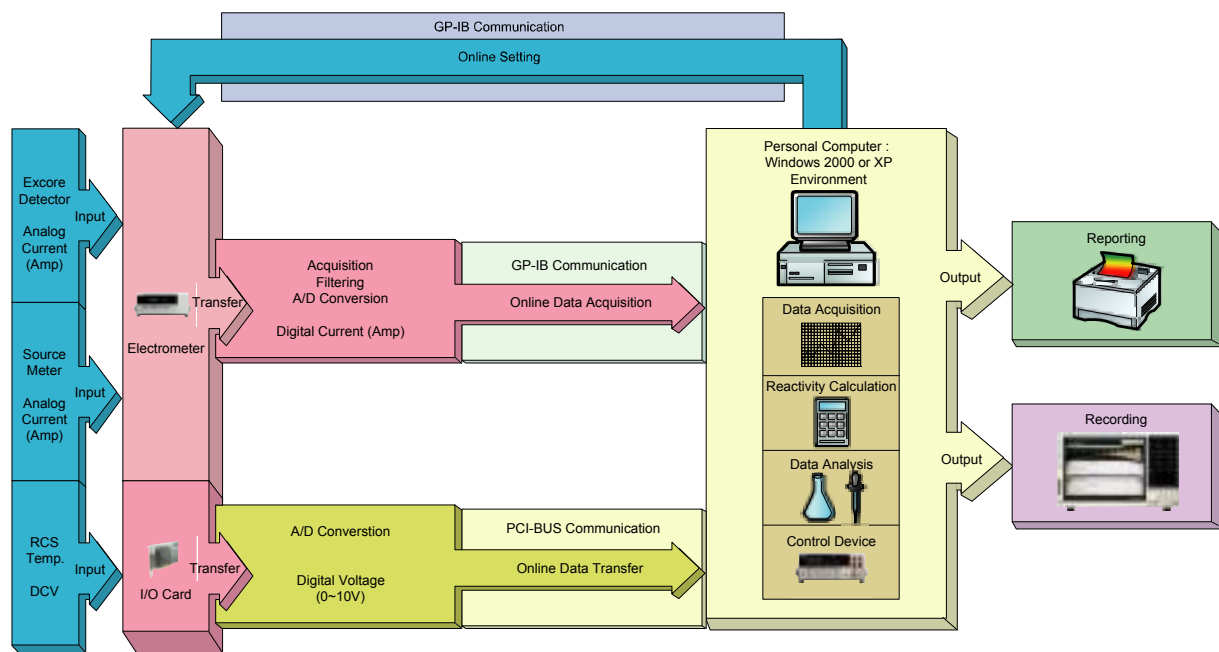


그림 1. BLOCK DIAGRAM of DDRCS

1. DDRCS 운용 프로그램

Windows 시작메뉴에서 원자로 특성시험 메뉴를 선택하면, 잠시동안 DDRCS 장치 구동화면이 나타난다. 주화면에는 원자로 특성시험 항목들이 열거되어 있는데, Setup, Exponential Test, LPPT(Low Power Physics Test) Measurement, LPPT Analysis, Procedure등 5개의 서브메뉴로 구성되어 있다. 각 서브 메뉴는 다시 여러 가지 항목들로 구성된다. 그림 2는 전체 메뉴시스템에 대한 Sitemap을 나타낸 것이다.

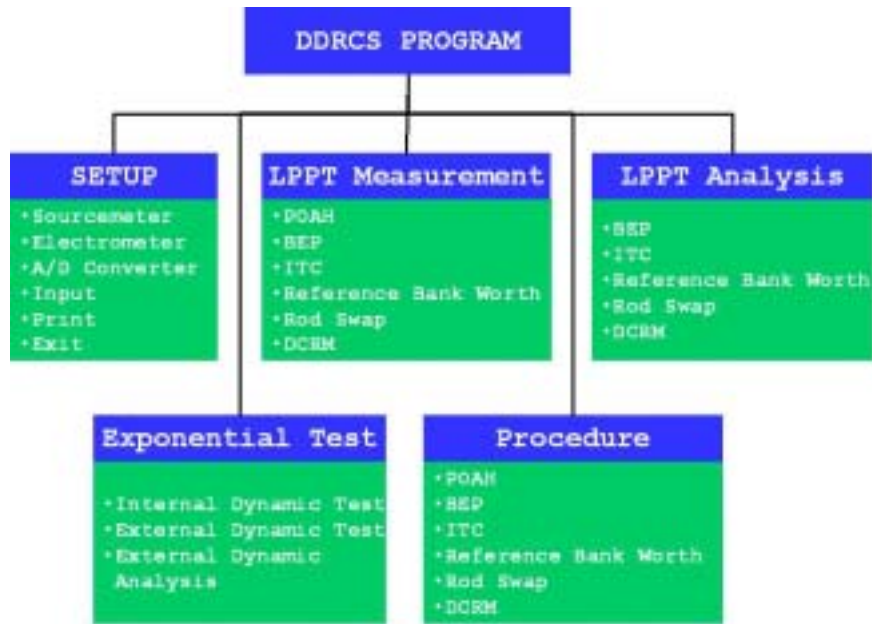


그림 2 DDRCS 메뉴시스템의 Sitemap

1.1 Setup

이 메뉴는 DDRCS 장비를 구동하는데 필요한 각종 파라메타를 설정하고 신호발생기를 초기화한다. 서브 메뉴로 Source Meter, Electrometer, A/D Converter, Input, Print, Exit 메뉴가 있다.

Source Meter 메뉴는 DDRCS 장치중 극미소전류 및 전압을 발생시킬 수 있는 장치로써 영출력 원자로 특성시험 시물레이션에 사용되는 장비이다. 신호발생기는 영출력 노심 시물레이터에서 모사하는 노외계측기 신호를 받아서 전류신호로 발생시킨다. 또한 원자로 동특성 시험설비 자체에서도 본 신호발생기를 제어할 수 있도록 프로그래밍되어 있어 각 시험항목별 측정된 자료가 있으면 언제든지 재생·가능하며 원자로 동특성 시험 설비만으로도 이전 시험 자료를 참고로 영출력 노물리 특성시험을 시물레이션 할 수 있다.

Electrometer 메뉴는 DDRCS에 장착된 Electrometer를 제어하는 프로그램으로 원자로 노외계측기 전류신호를 Electrometer를 통해 디지털 값으로 취득하기 위해 GPIB 방식을 사용하였고 이는 Electrometer Remote Mode를 사용하여야 한다. Remote Mode가 “On” 되었을 경우에는 Electrometer 전면 패널을 수동으로 조작할 수 없고 오직 GPIB 통신을 통한 주전산기 조종으로 제어할 수 있다. 이 프로그램은 Electrometer 신호 취득전 장비 초기화를 위주로 구성되었다.

A/D Converter 메뉴는 모듈 1 내부에 장착된 A/D & D/A Board를 제어하기 위한 프로그램으로 A/D & D/A Board에서 취급되는 아날로그 입력신호는 RCS Temp. 신호원, Prz. Lever 신호원이 있고 이 신호를 디지털신호로 변환하여 주전산기로 USB 통신을 통해 전송한다. 주전산기는 디지털 반응도 값, 디지털 Flux, 디지털 RCS Temp., Prz. Level 값을 다시 USB 통신을 통해 A/D & D/A Board로 보내어 아날로그 신호로 변환한 다음 이 신호를 다시 Recorder로 보내어 Strip Chart에 기록한다.

Input 메뉴는 시스템 환경설정의 일환으로 사용되고 NDR Data 입력, Rod Position 설정의 서브메뉴로 구성되어 있다. NDR Data 입력은 해당 주기 NDR를 참고하여 각 변수별로 입력하며 Rod Position 설정은 각 조절군별로 ARO Position(cm)로 입력한다.

1.2 지수시험 수행

본 항목은 내부지수시험과 외부지수시험으로 이루어져 있다. 내부지수시험은 원자로 특성시험을 시작하기 전에 핵설계값들이 적절하게 입력되었는가를 확인하는데 있으며, 외부지수시험은 실제로 노외계측기 신호를 이용하여 지수시험을 수행한다.

1.3 영출력 특성시험 수행

영출력 특성시험 수행 항목은 실제 영출력 특성시험에 수행되는 모든 시험항목을 소프트웨어적으로 결과를 취득하기위한 부분이며 임계 결정, 특성시험 범위 결정, 최종점 붕소농도 측정, 등온 온도계수 측정, 기준 बैं크 제어능 측정, 제어봉 교환 제어능 측정, 동적 제어봉 제어능 측정 항목으로 이루어져 있다.

1.4 영출력 특성시험 분석

1.4.1 최종점 붕소농도 분석

최종점 붕소농도는 ARO시 혹은 기준 제어봉이 완전 삽입 시에 측정된 붕소농도 값이 설계 붕소농도 값과 허용오차 내에서 일치하는가를 확인하는 시험이다. ARO시의 예를 들어 설명하면 Control Bank D를 인출하면서 붕산수를 주입(Boration)하여 원자로를 임계 상태로 유지시킨다. (이때 다른 모든 Bank는 완전 인출된 상태이다.) Bank D가 거의 인출상태 (약 200 ~ 210 step 근방), RCS 붕소농도 유지, 원자로 임계 상태에서 Bank D를 완전 인출한다. 이때 원자로 내에는 정반응도가 Step Function으로 주어지는데 이때 주어진 반응도를 미분 붕소 제어능값(pcm/ppm)으로 계산하여 거의 인출된 상태에서 측정된 붕소농도 측정값에 더하여 최종 붕소농도 값을 산출한다. 이때 측정시의 온도조건과 설계온도 조건과의 차이가 최종결과에 보상되어야 한다. 최종점 붕소농도 측정 분석 프로그램은 다음단계로 구성되어 있다.

- 1) 분석 전에 노심(Bank) 상태, 설계 최종점 붕소농도, 미분 붕소제어능, ITC, 설계 온도조건 값을 입력시킨다.
- 2) 측정시 부가된 반응도를 계산한다.
- 3) 사전 입력된 변수들에 의해 부가된 반응도를 미분 붕소 제어능 값과 설계 및 측정온도차에 의해 최종점 붕소농도를 계산한다. 이때 측정치가 판정 기준을 만족하는가 나타내주고 측정결과를 파일로 저장한다.
 - 냉각재 평균온도 : 설정구간에서의 측정 온도값에 대한 평균값을 나타낸다.
 - 측정 반응도 : 설정구간에서의 측정 반응도 값에 대한 평균값을 나타낸다.
 - 평균 반응도 : 분석 재시도 마다의 측정 반응도 값에 대한 평균값을 나타낸다.
 - 냉각재 평균온도 : 분석 재시도 마다의 냉각재 평균온도 값에 대한 평균값을 나타낸다.
 - 최종점 붕소농도 : 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{\text{등온온도계수} \times (\text{평균냉각재온도} - \text{입력냉각재온도}) - \text{평균반응도}}{\text{미분붕소능}} + \text{측정붕소농도}$$

- 편차(D-M) : 설계붕소농도 - 최종점 붕소농도

1.4.2 등온 온도계수 분석

- 온도 편차 : (중점의 온도값 - 시점의 온도값)으로 계산된다.

- 온도 변화율 : 시점에서 종점까지 시간당 온도 변화량을 나타낸다.
- 등은 온도계수 : (종점의 반응도값 - 시점의 반응도값)을 온도 편차로 나눈값이다.
- 평균 등은온도계수 : 분석 재시도 마다의 등은 온도계수 값에 대한 평균값을 나타낸다.
- 감속재 온도계수 : (평균 등은온도계수 - 연료온도계수 입력값)으로 계산된다.

1.4.3 기준 बैं크 제어능 분석

Rod Worth의 분석 방법은 기준 बैं크 제어능 측정에서 얻어진 데이터 파일을 이용하여 전체 Reference Bank의 적분 제어능 및 미분 제어능 값을 구한다.

- 파일열기를 수행한 후, 분석구간을 설정하고, 자동 분석이나 수동 분석 버튼을 클릭하면, 상기의 화면이 출력된다. 여기서는 하나의 프레임으로 인식한 구간마다 세로선이 나타난다. 만약, 프레임으로 인식되어야 할 구간에 세로선이 나타나지 않으면, 메시지창의 값보다 작은 값을 입력한 후, 하단 하단의 <이전 화면으로> 버튼을 클릭한 후, 위의 과정을 반복 수행한다. 반면, 프레임으로 인식하지 않아야 할 구간에 세로선이 표시되면, 메시지 창의 값을 증가시킨 후, 위의 과정을 반복 수행한다.

* 노심 반응도 = (전 프레임에 대한 직선자의 종점값 - 후 프레임에 대한 직선자의 시점값)으로 계산된다.

* 적분 제어능 : 프레임 마다의 노심 반응도 합을 나타낸다.

- 수동 분석일 경우는 사용자가 직접 프레임 상에 직선자를 그으면, 우측 하단(수동 분석란)에는 상기의 노심 반응도와 적분 제어능 계산식에 의해 계산된 값이 출력된다.

1.4.4 동적 제어봉 제어능 분석

동적 제어봉 제어능 분석 방법은 각 बैं크 제어능 측정에서 얻어진 데이터 파일을 이용하여 각 बैं크별 적분 제어능 값을 구한다. 먼저 측정 데이터가 저장된 파일을 찾아서 각 बैं크별 삽입 시작 시간과 삽입 종료 시간, 인출 시작 시간과 인출 종료 시간을 입력한다. 입력이 완료된 후 Input 버튼을 클릭하면 동적 제어봉 제어능 계산을 위한 Input이 완성된다. 그 후 계산 버튼을 클릭하면 동적 제어봉 제어능 계산 코드(Inverse)가 수행되고 계산결과는 결과보기 버튼을 클릭하면 핵설계 제어봉가와 동적 제어봉 제어능가 그리고 그 차이가 표시된다. 계산결과는 DCRM.RES와 बैं크이름_Final.out으로 작성되며 파일 포맷은 다음과 같다.

DCRM(TM): Dynamic Control Rod worth Measurement Desinged by KEPRI

Input File : k1c21-excore.fscf

Detector Signal File: cb.det

Selected Conrol Bank: CB

TIME CEA POSITION/DYANMIC(TOTAL, SUM, BOT, TOP)/STATIC REACTIVITY

3121.00	383.66	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	-0.22	0.00	0.22	0.00
3122.00	382.59	-0.03	-0.05	-0.03	-0.05	-0.02	-1.06	-1.03	0.18
3123.00	381.52	-0.59	-0.65	-0.67	-0.52	-0.81	-2.21	-1.54	0.60
3124.00	380.46	-1.02	-1.14	-1.19	-0.84	-1.54	-3.45	-2.25	0.49
3125.00	379.39	-1.07	-1.19	-1.29	-0.69	-1.90	-4.77	-3.48	0.09
3126.00	378.32	-1.15	-1.26	-1.41	-0.58	-2.23	-6.19	-4.78	0.11
3127.00	377.25	-1.71	-1.89	-2.11	-0.94	-3.27	-7.69	-5.58	0.66

=== 요약 ===

3440.00	42.93	-613.79	-610.08	-611.17	-618.59	-608.18	-649.51	-38.34	8.50
3441.00	41.86	-620.95	-615.99	-618.27	-622.01	-618.61	-649.68	-31.41	6.65
3442.00	40.79	-618.05	-613.74	-615.36	-621.14	-613.83	-649.85	-34.49	2.73
3443.00	39.72	-613.83	-610.43	-611.13	-619.72	-607.05	-650.00	-38.87	3.96
3444.00	38.66	-612.14	-608.61	-609.42	-617.57	-605.72	-650.15	-40.73	1.60
3445.00	37.59	-608.41	-605.42	-605.69	-615.45	-600.51	-650.29	-44.60	3.50
3446.00	36.52	-604.90	-602.10	-602.17	-612.46	-596.49	-650.42	-48.25	3.30
3447.00	35.45	-606.71	-603.51	-603.95	-613.01	-599.36	-650.54	-46.59	1.67

FINAL MEASURED CEA WORTH MANUPULATED BY DSCF

STEADY STATE ROD WORTH AT 35.45cm : 650.54 pcm
FINAL ROD WORTH(TOTAL CASE) /ABS.ERR/REL.ERR/ : 606.01 pcm -44.27 pcm -6.8 %
FINAL ROD WORTH(SUM CASE) /ABS.ERR/REL.ERR/ : 608.09 pcm -42.19 pcm -6.5 %
BOTTOM DETECTOR's FINAL ROD WORTH/ABS.ERR/REL.ERR/ : 601.82 pcm -48.46 pcm -7.5 %
TOP DETECTOR's FINAL ROD WORTH/ABS.ERR/REL.ERR/ : 615.64 pcm -34.64 pcm -5.3 %
OPTIMIZED BACKGROUND DETECTOR SIGNALS /BOT/TOP : 1.122531 nA 0.668297 nA
MINIMUM DETECTOR SIGNALS /BOT/TOP : 1.411988 nA 1.178654 nA
MAXIMUM DIFF.(pcm) within Effective Core Height : 48.25 pcm

1.5 시험절차서 검색

영출력 원자로 특성시험시 각 항목별 시험절차서를 검색할 수 있으며 세부 항목으로는 DDRCS 장비 설치 및 점검 절차서, 영출력 원자로특성 시험 절차서등으로 구성되어 있으며 영출력 원자로특성 시험 절차서는 다시 초기 임계 결정, 영출력 시험범위 결정, 최종점 붕소 농도 측정, 등은 온도계수 측정, 제어봉 제어능 측정, 동적 제어봉 제어능 측정에 관한 시험 절차서로 구성되어 있다. 시험 절차서는 PDF 파일 형태로 되어 있어 검색 및 인쇄가 가능하다.

2. DDRCS 하드웨어

DDRCS는 단일 랙 구조에 3가지 모듈로 구성되어 있다. 모듈 1은 I/O Interface와 Source Meter, 모듈 2는 Electrometer 2개, 모듈 3은 Strip Chart가 장착되어 있다.

2.1 모듈 1

RACK의 상단에 장착된 모듈 1에는 I/O Interface와 Source Meter가 장착되어있다. 모듈 1의 I/O Interface에는 RCS Temp.와 Prz. Level 신호원이 아날로그 신호형태로 입력되어 USB DAQ를 거쳐 디지털 신호값으로 변환되어 USB 통신을 통해 주전산기로 전송된다. 또한 주전산기로부터 USB 통신을 통해 디지털 신호형태의 Flux 값과 Reactivity 값, RCS Temp.값, Prz. Level 값이 USB DAQ를 거쳐 아날로그 신호형태로 변환된 다음 Recorder로 전송되고 이 값을 Recorder가 기록한다. 모듈 1안에 장착된 Source Meter는 장치 후면의 IEEE488 Port와 모듈 1 후면의 IEEE488 Port가 내부적으로 GPIB Cable를 통해 연결되어 있고 Source Meter로부터 발생하는 모의신호 역시 모듈 1 후면의 모의전류신호 단자와 내부적으로 연결되어 있다. 모듈 1 후면의 IEEE488 Port는 주전산

기 GPIB Board와 GPIB 통신을 통해 연결되어진다. 주전산기가 Source Meter를 제어하기 위해서는 모듈1 후면의 IEEE488 Port와 주전산기 GPIB Board간에 GPIB Cable로 연결시켜야 한다. 그림 3은 DDRCS의 전체 외형을 나타낸다.



그림 3. DDRCS 외형

2.2 모듈 2

RACK의 중간에 장착된 모듈 2에는 Flux Selection과 Electrometer가 장착되어있다. 모듈 2 후면은 원자로 중성자속 신호를 연결하는 단자가 4개가 있다. 원자로 채널 A의 Top, Bottom 신호를 Flux A Top, Bottom 단자에, 원자로 채널 B의 Top, Bottom 신호를 Flux B Top, Bottom 단자에 연결한다. 모듈 2 후면의 IEEE488 Port는 모듈 2 내부에 있는 Electrometer에 각각 GPIB Cable로 연결되어 있다. 모듈 2 후면의 IEEE488 Port는 주전산기 GPIB Board와 GPIB Cable로 연결되었다. 원자로 채널 A, B로부터 입력되는 아날로그 전류신호를 Electrometer에 입력으로 연결하면 Electrometer 내부에서 자체적으로 18Bit A/D Converter를 거쳐 디지털 전류신호값으로 변환시킨다. 이 변환된 디지털 전류신호값은 Electrometer 후면의 IEEE488 Port를 통해 모듈 2 후면의 IEEE488 Port로 전송되고 이는 다시 GPIB 통신을 통해 주전산기로 입력되어 반응도 계산에 사용된다. 이때 입력되는 전류신호를 검토하여 Flux A, Flux B, Flux A + Flux B, (Flux A + Flux

B)/2를 반응도 계산에 사용할 것인지 DDRCS 소프트웨어에서 선택한다.

2.3 모듈 3

RACK의 하단에 장착된 모듈 3 Strip Chart가 장착되어 있다. 이 Strip Chart는 중성자속 신호, 온도 신호, 반응도 값을 기록하는 기능을 수행한다. 후면 패널의 HI, LO로 표기된 입력채널은 다음과 같이 연결되어 있다.

- CH 1. : I/O Interface Panel의 Output중 Flux단자(중성자속)와 연결된다.
- CH 2. : I/O Interface Panel의 Output중 Reactivity단자(반응도)와 연결된다.
- CH 3. : I/O Interface Panel의 Output중 RCS Temp. 단자(온도)와 연결된다.
- CH 4. : I/O Interface Panel의 Output중 Prz. Level단자(온도)와 연결된다.

III. 결론

새롭게 개발된 DDRCS 장비는 예전의 부피가 큰 아날로그 방식의 반응도 계산기를 간단한 퍼스컬 컴퓨터에 의해 소프트웨어적으로 처리하고 또한, 기존의 디지털 방식의 반응도 계산기보다 회로적으로 결선을 간단히 하여 보다 쉽고 용이하게 설비를 제작할 수 있으며 데이터 통신방식을 디지털화 하여 설비가 가지는 오차를 줄였으며, Real Time On-Line Monitoring화함으로서 작업자에게 신뢰감을 줄 수 있다.

또한 원자로 동특성 방정식을 소프트웨어적으로 처리해 줌으로서 아날로그방식 설비에서 발생되는 오차 및 보정을 해소시킬 수 있을 뿐만 아니라, Man-Machine Interface가 향상되어 운영하는데 신뢰감을 줄 수 있다. 또한 반응도(Reactivity), 중성자 속(Flux) 및 각종 노심 운전 변수를 본 설비내 컴퓨터 하드디스크에 저장함과 동시에 모니터에 표시되므로 기존의 X-Y 레코더로 그려서 각 계수를 도식적으로 계산하는 번거로움을 해소한 것이 큰 장점이다.

DDRCS 장비를 사용할 경우 예전의 아날로그방식의 반응도 계산기와 기존의 디지털 방식의 반응도 계산기는 원자로 특성시험 전에 예비 작동시험이 복잡하고, 회로적 결선이 복잡하여 불편한 반면 본 장비는 Power-On과 동시에 원자로 특성 시험을 시작할 수 있어서 작업시간 절약이란 측면에서 대단히 유리하다.

IV. 참고문헌

1. 류석진 외, "영출력 노물리 특성시험 시뮬레이터 개발", 한국원자력학회 2003 추계학술발표회 논문집, 제4분과(B),(2003)
2. 우일탁 외, "동적 제어봉 제어능 측정장치 개발", 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집, 제1분과(C),(2002)
3. "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 1 Cycle 14," KNF-Y1C14-02002, KEPCO Nuclear Fuel Co., Ltd. (2002).
4. 이은기 외, "비선형NEM/ANM 방법에 의한 과도상태 모사," 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 제1분과(A),217, (2002).
5. 이은기 외, "NEM 기반의 비선형 유한차분법에 적용한 노심-반사체 경계조건의 과도상태 모사능력 평가," 한국원자력학회 1999 추계학술발표회 논문집, 제 1분과(A) (1999).

6. Y. S. Liu, et al., "ANC-A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," WCAP-11596-P-A (1986).
7. "Benchmark Problem Book," ANL-7416, Suppl. II, Argonne National Lab. (1977).