

**하나로 반응도 컴퓨터 개선**  
**Improvement of the Reactivity Computer using Windows**  
**for HANARO Research Reactor**

박상준, 김민진, 서철교, 김학노

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요약**

하나로에서는 다채널 광대역 디지털 반응도 컴퓨터를 자체 개발하여 사용하여 왔다. 이 반응도 컴퓨터는 ADC(analog to digital converter)를 장착한 개인용 컴퓨터(PC)에 기반을 둔 것으로 DOS를 운영 체제로 하여 개발된 것이다. 그러나 Windows 운영 체제의 사용 확대에 따라 DOS 운영 시스템의 지속적인 사용이 불투명할 뿐 아니라 급속하게 발전하는 PC 기능을 완벽히 지원하지 못하는 제한성 등으로 필요한 기능을 추가하는데 어려움이 있다. 또한 PC 자체 시스템 기능에 대한 의존성이 크기 때문에 부품을 교체할 필요가 있을 때에는 이미 단종이 되어 부품을 구하기 어려운 부담이 있다. 이러한 점들을 개선하기 위한 목적으로 기존 중성자 신호 수집 계통의 일부를 개량하고 모든 제어 프로그램을 Windows 환경으로 완전히 전환하였으며 반응도 측정 실험에 필요한 여러 가지 보조 수단도 추가하였다. 그리고 하나의 중성자 계측기 신호를 gain이 서로 다른 다중 채널로 입력하여 선택적으로 사용하는 새로운 중성자 신호 처리 방식을 채택함으로써 광역(wide range) 신호 처리 능력을 개선하였다.

**Abstract**

A multi-channel wide range digital reactivity computer, which was developed by KAERI, has been used for HANARO research reactor since its fuel loading. It was based on the PC (personal computer) system equipped with an ADC(analog to digital converter), and the application program was developed in the MS-DOS environment. There exist some difficulties in upgrading the system through adding the necessary functions because not only DOS does not sure to persist in parallel with Windows, but also it has a drawback in supporting the advanced abilities of the innovatively developing PC. And it is very hard to change or replace some components, if needed, due to the strong dependence of the system on the PC hardware, which is fast obsolete. To solve these problems stemming from the MS-DOS environment, we replaced some parts of the existing system for neutron signal acquisition and completely upgraded on the Windows environment the application program

including various helpful tools that are necessary for the reactivity measuring experiments. And to improve the processing features for the wide range neutron signal, we elaborated and implemented the new concept that a single channel of the neutron signal is renovated to multi ADC channels with different gains for the purpose of selectively utilizing a proper neutron signal.

## 1. 서론

역동특성 방정식(inverse kinetic equation)을 이용하여 실시간으로 원자로 반응도를 측정하는 반응도 컴퓨터(reactivity computer) 또는 반응도 미터(reactivity meter)는 1960년대 중반에 analog 컴퓨터를 이용하여 처음 실현된 이후 1970년대에 들어서 개인용 컴퓨터(PC)의 등장으로 점차 이용이 확산되었다. 국내에서는 1988년에 TRIGA 연구용 원자로에서 처음으로 핵분열 전리함(fission chamber)으로부터의 중성자 펄스 계수 방식에 의한 실시간 반응도 측정 방법을 개발하였고[1], 이러한 경험을 바탕으로 하나로 운전이 시작된 이후에는 펄스 계수가 갖는 측정 영역의 한계를 극복하기 위하여 보상형 전리함(compensated ion chamber)의 전류 신호를 이용한 다채널 광대역 반응도 컴퓨터를 개발하여 지금까지 이용하여왔다[2].

하나로의 반응도 컴퓨터 계통은 PC에 내장된 I/O board의 ADC(analog digital converter) 입력 신호를 얻기 위하여 중성자 계측기로부터의 전류 신호를 전류계를 통하여 analog voltage로 전환하여 사용한다. 이 신호는 전류계 자체 gain에 의해 계측기 출력 전류의 3-decade마다 일정 범위의 신호를 반복적으로 출력하기 때문에 광대역 신호 범위에 대한 반응도 계산 과정에서도 여기에 맞추어 그 때마다 I/O board 환경을 재 설정하여 gain을 변화시켜주어야 한다. 이 때문에 출력 범위가 3-decades를 벗어나는 과도 상태에서는 변화 전후의 전체적인 연속성을 유지하지 못하여 프로그램을 재 수행해야 하는 불편함이 있다.

한편 일정한 시간 간격으로 계측기 신호를 수집하기 위해서는 일반적으로 I/O board의 자체 rate generator를 사용하는 것이 간편하고 안전하지만 gain 조정 시에는 일정한 AD 전환 시간 간격을 보장할 수 없기 때문에 PC의 system timer를 사용하여 신호 수집 시간을 제어하도록 하였다. 이 경우 고장이나 다른 문제로 PC를 교체해야 할 때는 동일한 성능의 counter/timer chip을 가진 PC로 대체하거나 또는 새로운 사양에 따라 매번 프로그램을 수정해야 한다. 그러나 PC의 발전 속도가 매우 빨라 이 반응도 컴퓨터가 개발되던 당시의 clock cycle을 갖는 PC는 더 이상 찾아보기 힘들어 PC의 고장 시 이를 대체하기가 어렵다.

PC의 발전 속도만큼 기본 운영 체제의 변화는 크지 않지만 현재 DOS 시장이 거의 사라지고 있는 상태에서 기존 프로그램의 수정이나 보완에도 어려움이 있으며, DOS의 제한된 메모리 이용 문제로 매우 짧은 시간 동안에 측정되는 방대한 자료의 실시간 처리 또는 저장에도 한계가 있다. 앞으로 반응도 컴퓨터에 시스템 온도나 제어봉 위치 등 추가해야 할 원자로 상태 정보량이 늘어나고, 제어봉을 낙하시키면서 한번에 직접 전체 반응도를 측정하는 기술의 개발 등을 위하여 보다 안정되고 빠른 자료 수집이 요구된다.

본 연구는 현재의 반응도 컴퓨터를 보완하여 신호 수집 hardware의 교체와 이에 따른 신호 처리 방법을 개선함으로써 광대역 중성자 신호 처리에 대한 안정성을 확보하며, 프로그램 운용에서의 hardware 호환성 및 측정해야 할 대상의 변화 등 측정 환경 변화에 대한 수용성을 높

이고 이용자의 편리성을 향상시키기 위하여 Windows를 기본으로 한 새로운 GUI(graphic user interface) 환경에서의 프로그램 개발을 목표로 하였다.

## 2. 반응도 측정 계통

그림 1은 반응도 컴퓨터의 계통 구성을 나타낸 것이다. 계통은 크게 중성자 계측기, 계측기의 출력 전류를 I/O board가 수용할 수 있는 신호로 변화시킨 후 할당된 채널에 분배하는 신호 처리 부분, 그리고 최종적으로 AD 변환 및 반응도 계산을 수행하는 I/O board 내장 PC 부분으로 구성되어 있다. 이 중 신호 변환기까지는 기존의 계통을 그대로 사용하였으며, 신호 분배기 및 I/O board와 PC 계통을 Windows 운영 체제 개발 환경에 적합한 것으로 교체하였다. Keithley-617 전류계는 보상형 전리함(CIC)의 출력 전류를  $-0.2\text{ V}$ 에서  $-20\text{ V}$  사이의 부호가 반전된 analog voltage로 전환시키고 신호 변환기를 통해서 I/O board가 수용할 수 있는  $0\text{ V}$ 에서  $10\text{ V}$  사이의 신호로 전환한다. 이 전류계는 전리함의 출력 전류가 1000 배 증가할 때마다 다시  $-0.2\text{ V}$ 로 반전되기 때문에 3-decade를 벗어나는 출력 변화에 대해서는 그 때마다 이를 감지하여 gain을 조정해야 할 필요가 있다. Gain의 조정은 I/O board의 환경 설정을 새롭게 지정하여 가능하므로 프로그램 실행 중에는 조정 전후의 전체적인 연속성을 유지할 수가 없으므로 프로그램을 재실행해야 한다. 또한 이런 경우에는 board 자체의 AD 변환 시간 간격이 일정하게 유지하는 것이 사실상 불가능하다. 이러한 문제는 가로채기(interrupt) 기술을 사용하여 해결할 수 있으나 프로그램이 복잡해질 뿐 아니라 향후 수정 및 개선에도 도움이 되지 않는다. 그 대신에 PC의 counter/timer를 이용하여 실제 AD 전환이 발생하는 시간을 측정하도록 하였다. 이러한 방법은 counter/timer의 주파수가 항상 일정해야 하는 조건이 따른다. 즉 PC 특성에 대한 의존성이 크다. 특히 PC의 발전 속도가 매우 빠른 상황에서 사용하는 예전 성능의 counter/timer는 더 이상 사용되지 않는다. 이러한 점들을 개선하기 위하여 신호 변화 시에도 gain을 변경하지 않고 넓은 범위의 신호를 측정하는 방법으로 한 개의 계측기 신호를 서로 다른 gain으로 설정된 다중 채널로 입력받는 방법을 실험하였다.

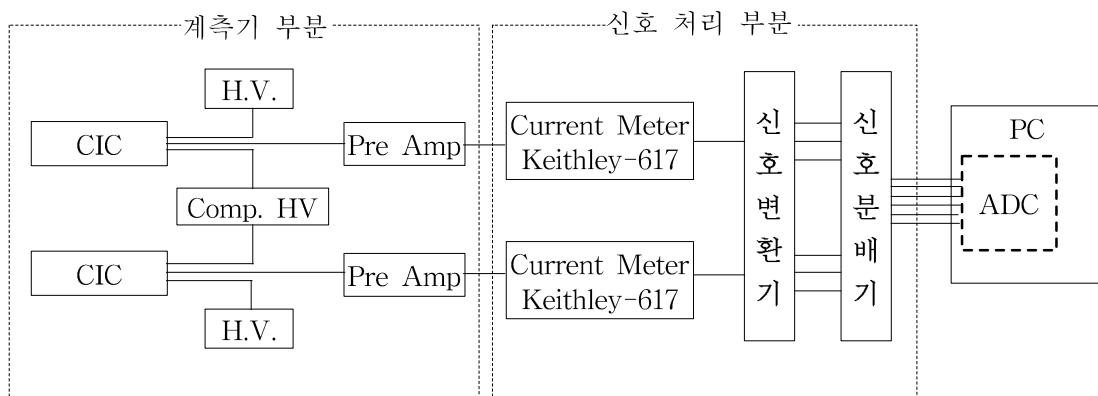


그림 1. 반응도 컴퓨터의 계통 구성

3 개의 채널을 각각 gain 1, 10 및 100으로 설정하고 하나의 계측기 신호를 동시에 받아 신호 크기에 따라  $0.1\text{ V}$  이하의 신호는 gain 100,  $1\text{ V}$  이하의 신호는 gain 10, 그리고  $10\text{ V}$  이하의 신호는 gain 1의 채널을 선택하여 사용하는 방법이다. 측정되는 신호의 크기를 판단하여

반응도 계산에 사용할 채널을 선택하고 전류계의 출력 범위가 변경되었을 경우 즉 신호가 1000 배 증가하거나 감소할 경우 이를 판단하는 과정만 추가하면 된다. 한 개의 중성자 계측기에 3 개의 채널을 할당해야 하는 단점이 있으나 gain 변경으로 인한 시간 손실을 막을 수 있어 반응도 고속 신호 수집에 적합하며, 별도로 PC 자체의 counter/timer를 조작해야 하는 복잡함도 피할 수 있다. 그림 2는 이러한 방식의 자료 수집 방식을 개념적으로 나타낸 것이다. 실제 계측기 신호 및 모의 신호를 이용하여 신호 변동에 따르는 채널 선정이 절절히 이루어지고 있음을 확인하였다[3].

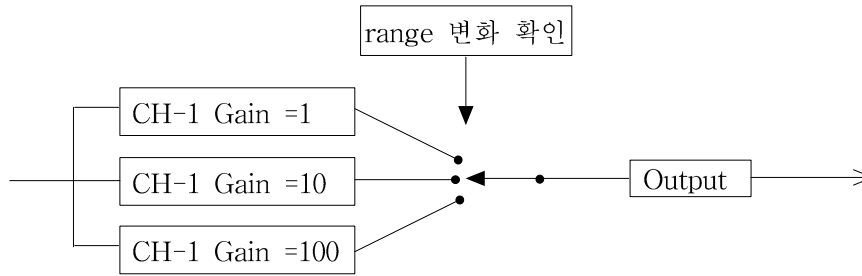


그림-2. 채널 선정 개념도

다가능 I/O board는 National Instrument PCI-6052E 모델로서 16 bit 해상도로 10 V 측정 시 0.152 mV의 해상도를 나타내며 differential 사용 시 총 8 개(single ended 사용 시 : 16 개)의 AI 채널을 제공하고 있다. 한 개의 중성자 계측기가 3 개의 채널을 차지하므로 I/O board 하나에 수용할 수 있는 계측기는 최대 2 개로 제한된다. 이 board의 최대 AD 전환 속도는 333 kHz로서 한번의 AD 전환에 걸리는 시간은 최소 약 3  $\mu$ sec 정도이다. 2 개의 계측기를 모두 사용하고 한번의 반응도 계산을 위해 수집하는 신호의 수를 1000 개라고 하면, 6 개 채널을 모두 AD 전환에 걸리는 시간은 약 20 msec 정도로 일반적인 반응도 변화에서 계산 시간 간격을 0.5 sec로 하였을 때 거의 대부분의 시간을 계산 및 화면 표시 작업에 사용할 수 있다. 신호 수집에 0.1 sec를 할애하면 각 채널당 5000 개의 자료를 얻을 수 있다. 또한 제어봉 낙하와 같이 계산 시간 간격이 0.05 sec 정도로 빨라져야 하는 경우에도 30 msec 정도의 시간 활용이 가능하다.

### 3. 반응도 계산

실시간 반응도 계산은 식(1) 및 (2)의 역동특성 방정식을 일정 시간 간격으로 반복해서 풀어 내므로 이를 위하여 적절한 차분 방정식을 결정해야 한다.

$$\rho(t) = \beta + \frac{\Lambda}{n(t)} \left[ \frac{dn(t)}{dt} - \sum \lambda_i C_i(t) - s \right] \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

차분 방정식의 형태와 함께 이 역동특성 방정식 결과의 정확성에 영향을 미치는 중요한 요인이 계산 시간 간격이다. 중성자 변화에 대하여 반응도 변화를 정확히 나타내기 위해서는 가능한 계산 시간 간격을 짧게 해야 하지만, 이 시간이 너무 짧으면 계산 및 다른 부가적인 작업 시간에 대한 부담으로 실시간 계산이 어려워진다. 물론 현재 PC의 실행 속도가 매우 빨라졌지만 특히 Windows는 그래픽을 기본으로 하고 있기 때문에 Windows 응용 프로그램 개발에 있어서는 화면 표시와 관련한 그래픽 작업에 상대적으로 긴 시간이 요구되므로 여기에 충분한 시간을 할애할 수 있어야 한다. 계산 시간 간격을 길게 하면서도 정확한 해를 얻기 위한 역동특성 방정식의 차분 방정식 형태에 대하여는 그동안 충분히 검토되어 왔다. 식(1)을 풀기 위해서는 우선  $C_i(t)$ 를 구해야 하는데 식(2)의 형태에 따라 여러 가지 차분 방정식을 유도할 수 있으나 그 대로 적분하는 것이 정확성이나 실행 시간에서 유리한 것으로 나타났다[2,4,5]. 즉, 식(2)를  $t$ 에서  $t+\Delta$  까지 적분한 식(3)을 이용한다. 여기서,  $C_i(t)$ 는 시간에 대한 변화가 빠르지 않으므로  $\Delta$  시간 동안에 선형적으로 변한다고 가정하여 사다리꼴 적분하고  $n(t)$ 는 적분 형태를 그대로 남겨둔 형태이다.

$$C_i(t+\Delta) - C_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} \int_{t+\Delta}^t n(t)dt - \lambda_i [C_i(t+\Delta) + C_i(t)] \frac{\Delta}{2}$$

$$\Rightarrow C_i(t+\Delta) \left[ 1 + \lambda_i \frac{\Delta}{2} \right] = C_i(t) \left[ 1 - \lambda_i \frac{\Delta}{2} \right] + \frac{\beta_i}{\Lambda} \int_{t+\Delta}^t n(t)dt \quad (3)$$

하나로는 중수를 반사체로 사용하고 있기 때문에 노심 및 주변의 강한 감마선과 반응하여 발생하는 광중성자(photo neutron)로 인하여 중성자원(background)이 매우 강하다. 이를 무시할 수 있는 정도까지 출력이 상승하면 노심 온도 상승으로 인한 케환 효과를 고려해야 하는 문제가 발생한다. 따라서 미입계 또는 0 출력 임계 조건에서 수행해야 하는 반응도 측정에서는 이들 중성자원에 의한 효과를 고려해 주어야 한다. 한편 중성자 계측기에는 감마 성분도 함께 측정되므로 계측기 출력 신호가 실제 중성자만에 의한 출력보다 클 수가 있다. 현재 하나로서 반응도 측정 목적으로 사용하고 있는 보상형 전리함이 원리적으로는 함께 들어오는 감마 성분을 제외하고는 있으나 보상 효과가 완벽하지 않으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 일정한 성분의 감마가 함께 측정되어 나타나는 계측기 출력을  $n_1 (=n + \gamma)$ 으로 하고, 이로 인한 반응도를  $\rho_1$ 으로 하면 식(1) 및 (2)는 다음과 같이 나타난다.

$$\rho_1(t) = \beta + \frac{\Lambda}{n_1(t)} \left[ \frac{dn_1(t)}{dt} - \sum \lambda_i C_{1i}(t) \right] \quad (4)$$

$$\frac{dC_{1i}(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n_1(t) - \lambda_i C_{1i}(t) \quad (5)$$

식(4)와 (5)를 적분하여 식(1)과 (2)에 각각 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$n_1(t)\rho_1(t) = n_1(t)\rho(t) + \Lambda s - \gamma\rho(t) \quad (6)$$

식(6)에서  $\rho$ 가 일정하게 유지되는 동안에 실제로 측정되는  $n_1\rho_1$  값들이  $n_1$ 에 대해서 1차 함수 형태가 되므로 이를  $n_1$ 에 대하여 1차 회기 시키면 이 때의 기울기가 실제 반응도  $\rho$ 가 된다. 따라서 서로 다른 미임계 조건에서 이러한 측정을 반복하면 식(6)의 절편인  $\Delta s - \gamma\rho$  는 다시  $\rho$ 에 대하여 1차 fitting시켜  $\gamma$ 와  $\Delta s$ 를 구할 수 있다. 이러한 사실은 실제 측정과 모의 계산을 통하여 확인한 바 있다[6,7].

임의의 시간 구간에서의 중성자 값  $n_1$ 은 그 시간 구간 동안에 최대한의 횟수로 신호를 수집하여 이를 대표하는 값으로 할 수 있다. 이 값은 한 구간 동안의 출력 변화가 선형으로 변한다고 가정하고 측정된 자료를 1차 fitting시켜 중간 값을 취해 사용한다. 이렇게 함으로써 별도의 filtering을 하지 않고도 자연스럽게 filtering 효과를 얻을 수 있으며, 이 결과의 적분 및 미분 값이 직접 반응도 계산에 이용된다.

#### 4. 반응도 측정 프로그램

프로그램 개발에는 PASCAL을 기본으로 하는 RAD(rapid application development) tool인 Delphi (ver. 5.0)을 사용하였고[7], National Instrument 사의 ComponentWorks를 보조 tool로 사용하였다. Delphi는 C++에 비하여 기능 면에서 다소 떨어지지만 Windows 응용 프로그램 개발을 위한 고급 기능을 충분히 구현할 수 있을 뿐만 아니라 PC를 이용한 연구용 원자로 실험 도구 개발 초기 단계에서부터 PASCAL을 계속 이용해 왔기 때문에 기존 프로그램을 최대한 이용할 수 있다. ComponentWorks는 새로 도입한 I/O board의 환경 설정 및 응용에 있어 Windows application 지원하는 그래픽 컴포넌트와 함수 도구이다.

반응도 측정 프로그램은 크게 실제 중성자 신호에 대한 반응도 측정 부분 이외에도 제어봉 위치 변화에 따른 출력 변화를 모의할 수 있는 부분을 추가시켰다. 실제 측정 부분에서는 기존의 반응도 컴퓨터 기능을 기본으로 Windows 통합 환경의 특징을 살려 자료 저장 및 재현, text 형 자료 및 그래픽 자료의 인쇄, I/O board의 환경 및 측정 채널 설정 기능 등을 pop-up 메뉴로 제공하도록 하였다. 또한 전류형 계측기 출력 전류의 초기 기준 신호 설정 및 초기 입력 자료의 내용도 프로그램 실행 중에 변화시킬 수 있도록 하였다. 시스템의 수행 속도가 한층 빨라져 반응도 측정 시간 간격을 0.1 초 이내로 줄일 수 있는 여지가 있으므로 선택적으로 사용할 수 있도록 하였으나, 제어봉 낙하 시에는 0.01 초로 고정하였다. 이전에 측정되거나 또는 계산에 의한 제어봉값 자료를 이용하여 제어봉 위치 변화에 따른 출력 변화를 모사해 볼 수 있는 환경을 새로 마련하였다. 여기에서는 실제 하나로 운전 시의 제어봉 이동 속도에 따라 선택할 수 있도록 하였다.

그림 3은 실제 반응도 측정 시의 프로그램 실행 모습을 나타낸 것이고, 그림 4는 모의 실행 중인 모습을 나타낸 것으로 모든 Windows 버전에서 실행가능 하며, PC 시스템 사양에는 거의 구애받지 않고 사용할 수 있다. 현재에는 중성자 계측기로부터의 원자로 출력 신호만을 수집하고 있으나 그밖에 반응도 측정과 관련 있는 제어봉 위치 및 시스템 온도 등의 신호 수집 및 처리를 위한 부분을 추가하였고 모의 신호에 의한 테스트를 마쳤다.

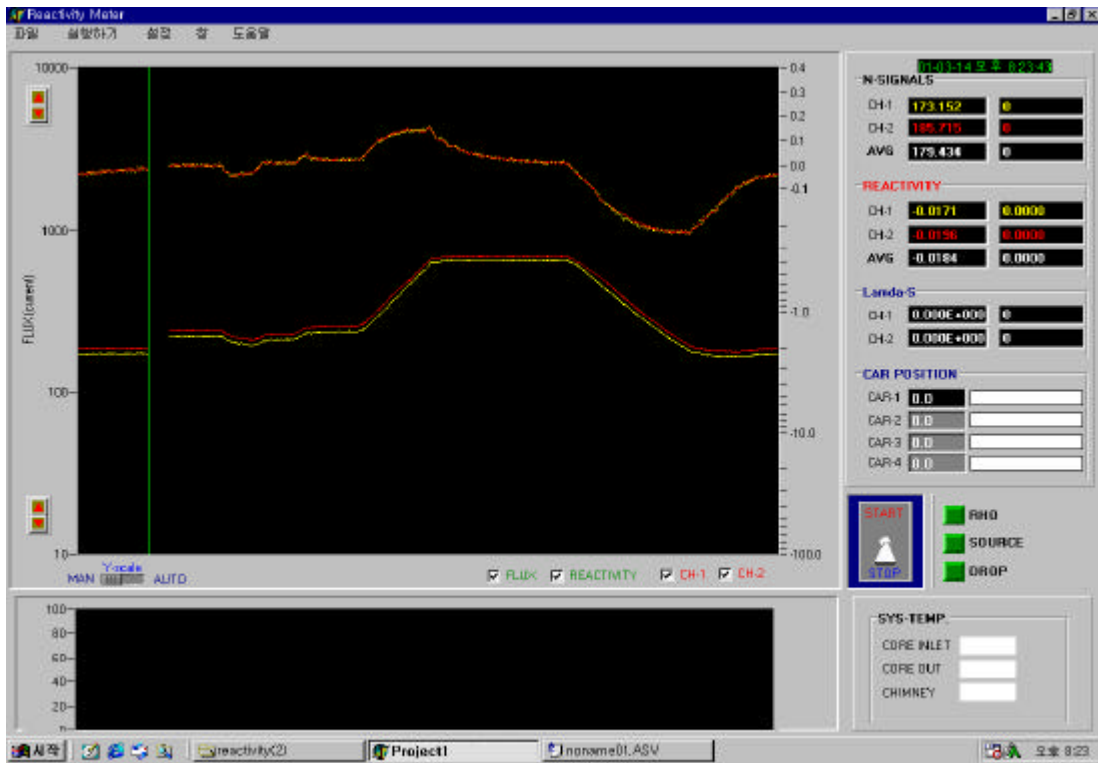


그림 3. 반응도 컴퓨터 실행 모습의 예(실제 측정)

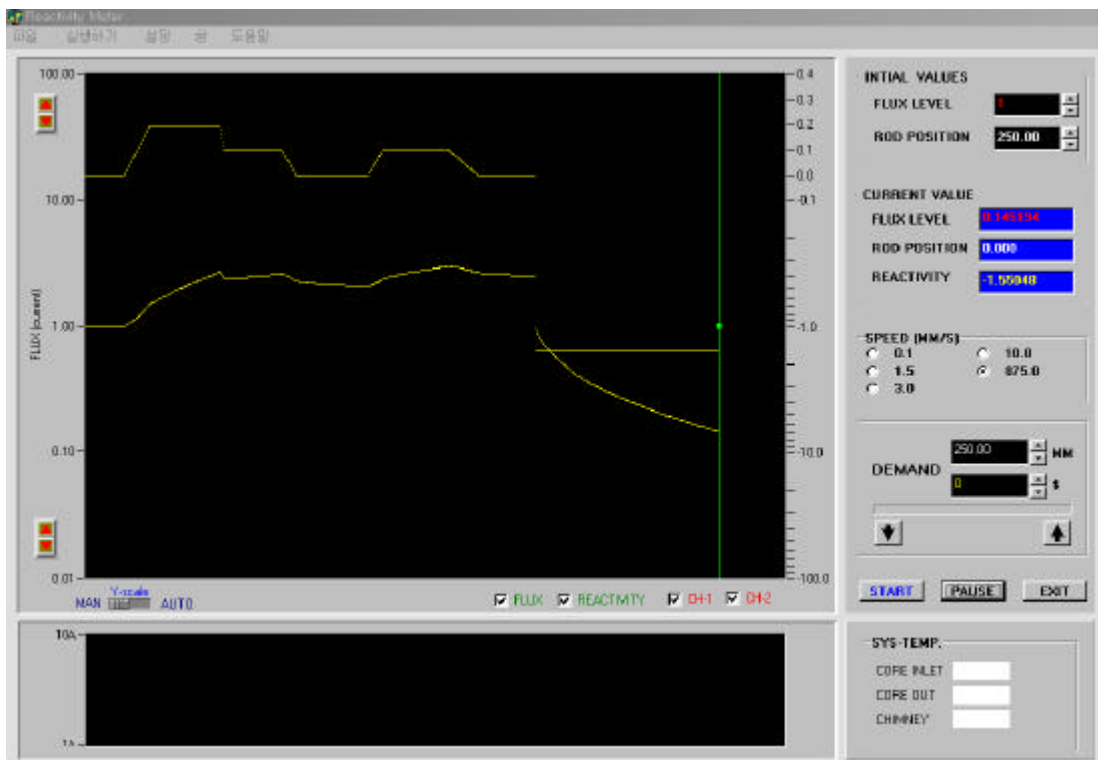


그림 4. 반응도 컴퓨터 실행 모습의 예(모의 측정)

## 5. 결 론

원자로 특성 실험 및 이용 분야에서 상용 PC를 이용하려는 노력이 오래 전부터 꾸준히 이어져왔고 원자로 제어에도 이를 도입하려는 시도가 이루어지고 있다. 이는 PC를 이용함으로써 경제성과 호환성, 그리고 유지 보수 용이성을 얻을 수 있기 때문이다. PC의 발전 속도가 매우 빠르는데 반하여 운영 체제는 그다지 크게 변화하지 않고 있어 한동안 DOS와 Window가 공용되었으나 고성능의 PC를 운영하는데 있어 DOS는 더 이상의 사용이 요구되지 않고 있다. 이에 맞추어 기존의 반응도 컴퓨터의 핵심을 이루는 I/O board의 제어 및 프로그램을 Windows 환경에 맞추어 새로이 개발하였다. 또한 한 개의 중성자 계측기 신호를 서로 다른 gain의 다중 채널로 측정하는 방안을 도입하여 보다 원활한 광대역 중성자 신호 처리가 가능하게 되었다.

반응도 컴퓨터 이외에 하나로 운전 특성 측정을 위해 개발하여 사용하고 있는 다기능 신호 계측기와 중성자 계측기 신호의 fast fourier transformation을 위한 프로그램 등도 이미 Windows 환경으로의 전환을 완료하였거나 진행중이며, 하나로 운전 보조 및 원자로 실험을 위한 통합 환경으로 이용할 예정이다.

## 참고 문헌

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원에 의해 수행된 것입니다.

1. B. J. Jun, S. J. Park, "Real Time Reactivity Measurement Using Neutron Counters," *Proc. Korea Nucl. Soc.*, Spring Meeting, Soo Won, Korea, 1989.
2. B. J. Jun *et al.*, "Development of a Multichannel Wide Range Digital Reactivity Meter," *Proc. Korea Nucl. Soc.*, Spring Meeting, Ulsan, Korea, 1995.
3. 정환성 외, "반응도 컴퓨터를 위한 Keithley 전위계 이용 광대역 전류 신호 수집 시스템 개발", 한국원자력학회, 춘계학술발표(예정), 2001.
4. 전병진 외, "점 동특성 방정식의 수치 해석적 해," Memo, 노관리-18, 한국원자력연구소, 1991.
5. 서철교, "점 동특성 방정식의 수치 해석적 방법에 대한 검토," 하나로 내부통신문, SM-NC-03, 1993.
6. B. J. Jun, C. G. Suh and J. B. Lee, "Determination of Neutron Source and Gamma Effects for a Reactivity Meter," *Proc. 5th Asian Symposium on Research Reactors*, Taejon, Korea, 1996
7. 전병진, 박상준, 이지복, "제어봉 낙하 반응도 측정에서 중성자원, 감마, 중성자 분포 함수의 복합적 영향 분석," 한국원자력학회 추계학술발표, 1997