

Improvement of the Exponential Experiment System for the Automatical and Accurate Measurement of the Exponential Decay Constant

지수감쇠계수의 자동 및 정밀 측정을 위한 지수실험장치 개선

Heesung Shin, Ji-hoon Jang, Yun-Hee Lee, Yong-hwa Hwang, Ho-Dong Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yuseung-Ku, Daejeon

신희성, 장지훈, 이윤희, 황용화, 김호동
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

Abstract

The previous exponential experiment system has been improved for the automatical and accurate axial movement of the neutron source and detector with attaching the automatical control system which consists of a Programmable Logical Controller(PLC) and a stepping motor set. The automatic control program which controls MCA and PLC consistently has been also developed on the basis of GENIE 2000 Library. The exponential experiments have been carried out for Kori 1 unit spent fuel assemblies, C14, J14 and G23, and Kori 2 unit spent fuel assembly, J44, using the improved systematical measurement system. As the results, the average exponential decay constants for 4 assemblies are determined to be 0.1302, 0.1267, 0.1247, and 0.1210, respectively, with the application of Poisson regression.

Key words : Exponential Experiment, Exponential Decay Constant, Poisson Regression, Spent Fuel Assembly.

요약

기존의 지수실험장치에 PLC와 스텝핑 모터로 구성된 자동화 제어장치를 부착하여 중성자 선원과 검출기를 자동으로 정확하게 이동할 수 있도록 개선하였다. 또한 GENIE 2000 라이브러리를 기반으로 MCA와 PLC를 동시에 구동할 수 있는 통합자동화 프로그램을 개발하였다. 이와 같이 체계적인 장치로 개선된 실험장치를 사용하여 고리 1 호기의 사용후핵연료 집합체, C14, J14 및 G23과 고리 2 호기의 사용후핵연료 집합체, J44의 대한 지수실험을 수행하였다. 그 결과 4 개 집합체에 대한 평균 지수감쇠계수는 각각 0.1302, 0.1267, 0.1247 및 0.1210으로 결정되었다.

중심단어 : 지수실험, 지수감쇠계수, 뽀아송회귀분석, 사용후핵연료 집합체

1. 서 론

중성자 선속밀도의 지수감쇠인자와 버클링 반응도 전환인자(Buckling Reactivity Conversion Factor)의 결정을 통하여 유효증배계수를 실험적으로 결정한다. 그리고 사용후핵연료에 포함된 핵종량을 추정하여 이를 근거로 유효증배계수를 계산한다. 궁극적으로 유효증배계수의 실험값과 계산값을 비교함으로써 전산코드 검증의 목적을 달성한다. 1991년 이래 JAERI에서는 임계실험장치인 FCA에서 물감속 2.5 wt% 농축 UO_2 격자구조에 대한 지수실험을 수행하여 유효증배계수를 결정하였다[1]. Suzaki[2]는 TCA에서 물감속 저농축 UO_2 격자구조의 노심(다양한 크기)을 대상으로 한 지수실험을 통하여 중성자 증배계수를 측정하고 몬테카를로 전산코드를 써서 계산한 결과와 비교하였다. 또한 지수실험법을 써서 비 등사각형 구조의 복잡한 노심에 대하여 중성자 증배계수를 측정하고 그 결과를 MCNP 4A로 계산한 것과 비교·검토하였다[3]. 그리고 4 개의 미입계시스템에서 지수실험을 수행하여 노심의 축방향 중성자분포를 측정하고 MCNP4A에 의한 계산치와 비교하였다[4]. 최근에는 연소도 이득[5-13]을 적용하여 사용후핵연료를 핵입계관점에서 안전하게 수송, 저장 및 취급하기 위한 안전지침자료를 제공할 목적으로 지수실험을 실시하였다. Suzaki 등[12]은 PWR 사용후핵연료 집합체를 대상으로 하여 수중에서 축방향 지수감쇠인자를 측정하고 유효증배계수치를 결정한 후 MCNP 전산코드를 쓴 계산결과와 비교하였다. 이때 MCNP 계산입력자료를 ORIGEN2로 산출하였는데 일부 중원소 핵종에 대한 입력 자료의 신뢰성을 확인할 목적으로 몇 개 핵연료 봉을 취하여 화학분석을 하였다.

기존의 지수실험장치는 중성자 선원과 검출기를 5 톤 크레인에 매달고, 수동으로 축 방향으로 이동시켜서 실험을 수행해 왔다. 이 방법을 사용할 경우에는 축방향 이동거리가 정확하지 않아 측정오차가 유발되고 크레인을 사용해야 하기 때문에 PIEF의 풀의 다른 작업에 지장을 주게 된다. 일본 JAERI에선 크레인을 사용하지만 이동거리에 대한 정밀도를 높이기 위해서 눈금자와 바늘을 사용하여 0.3 mm의 정확도로 중성자 선원이나 검출기를 이용시킨다고 한다. 그러나 이 방법은 측정위치 이동에 많은 시간이 소요되어 전체 측정시간을 늘어나게 하여 비효율적이라고 생각된다.

본 연구에서는 기존의 지수실험장치에 자동화 장치를 부착하여 중성자 선원과 검출기 이동을 자동화하여 정밀도를 높이고, MCA 신호와 연계해서 작동 가능하도록 프로그램화하였다. 이와 같이 개선된 장치를 사용하여 사용후핵연료 집합체를 대상으로 중성자 계수치를 얻고, 이를 Poisson 회귀방법으로 처리하여 지수감쇠계수를 구하였다.

2. 지수실험 장치 구성 및 실험방법

가. 장치구성 및 특성

지수실험장치는 Fig. 1과 같이 구성했다. 지수실험장치는 중성자 선원, 중성자 검출기, MCA 및 계수치 분석 프로그램 GENIE 2000을 내장한 PC로 구성된다. 중성자 선원으로 ^{252}Cf 를 사용한다. 이것은 자발핵분열로 방출하는 중성자 수율이 2.34×10^{12} n/s.g으로 비교적 커서 소형으로 쓸 수 있는 이점을 갖고 있기 때문이다[14]. 이 선원의 단점으로는 고가이고 방사능 감쇠반감기가 2.645 년으로 비교적 짧다는 것이다. Suzaki[12]는 $4 \text{ mm } \phi \times 20 \text{ mm}$ 크기의 444 MBq(12 mCi) ^{252}Cf 를 사용하였는데 본 연구에서는 390 MBq(10 mCi) 선원을 사용했다.

외부 중성자선원과 마찬가지로 9.5 mm O.D. × 0.5 mm(t는 두께를 뜻한다) 스테인리스강관에 속에 삽입할 수 있는 소형 핵분열전리함(6 mm ϕ × 25.4 mm eff)을 사용한다. 이때 중성자 검출효율을 증가시키기 위하여 핵분열전리함에는 고농축 235U(93 wt% 이상)을 쓴다. 외부 중성자선원 및 핵분열전리함을 삽입할 수 있는 9.5 mm O.D. 스테인리스강관은 제어봉 안내관이거나 핵연료봉을 꺼낸 빈 공간에 9.5 mm O.D.관을 꼽은 것일 수도 있다. 중성자 감지부인 핵분열전리함으로부터 나온 전자적 신호가 매우 작아 긴 신호전송케이블에서의 감쇠가 있을 것이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

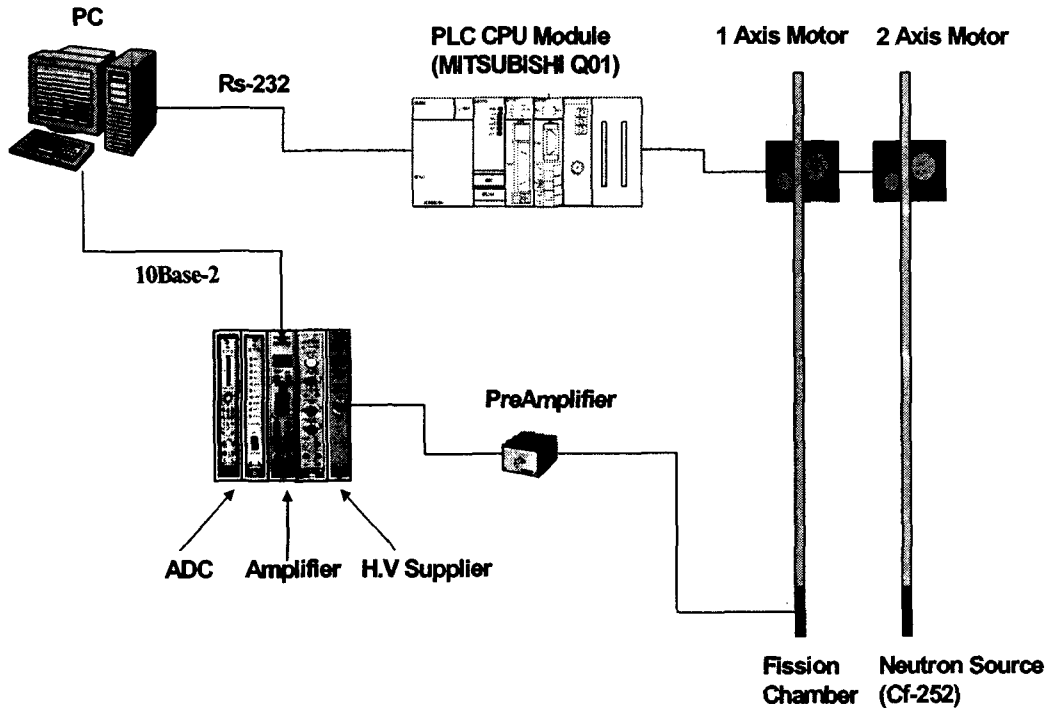


Fig. 1. Schematic description of the exponential experiment system.

나. 실험 방법

지수실험은 집합체의 가이드튜브나 제어봉 안내관에 중성자 선원과 검출기를 설치하고, 둘 사이의 거리를 변화시키면서 중성자 선속밀도의 감쇠량을 측정하여 이의 기울기인 지수감쇠계수를 구하는 실험이다. 조사후시험시설 저장폴의 저장랙에 거치된 고리 1 호기의 사용후핵연료 집합체들은 상부노즐이 제거된 상태로 콘테이너에 삽입되어 조사후시험시설 저장폴(9402)의 저장랙에 거치된다. 물의 깊이는 10 m 이다. 상부노즐을 제거한 후 핵연료집합체내 핵연료봉을 일부 제거하였을 지라도 지수실험에는 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다. 다만 외부 중성자선원의 삽입위치와 대칭위치에 중성자 측정용 핵분열전리함을 삽입할 수 있도록 하는 것이 바람직하다고 한다.

먼저 사용후핵연료 집합체 속에 핵분열전리함을 삽입하여 이로부터 나오는 파고분포를 측정(외부 중성자선원 252Cf 유무에 관계없다)한다. 일반적으로 낮은 파고에서 높은 계수치를 보여주는 데 이는 주로 감마선에 기인한다. 이 파고분포자료로부터 감마선 기여를 제거하여 일정크기 이상의 파고를 갖는 펄스만을 측정할 수 있도록 파고선별기(discriminator)에서 바이어스(bias voltage)를

조정한다. 다음은 외부 중성자선원(여기서는 252Cf)을 삽입하지 않은 상태에서 사용후핵연료 축방향의 중성자 백그라운드를 핵분열전리함으로 측정한다. 이때 중성자 백그라운드는 주로 244Cm의 자발핵분열에서 기인한다. 파고선별기의 바이어스전압을 설정하고 중성자 백그라운드를 측정 후, 외부 중성자선원 252Cf을 핵연료집합체에 삽입하여 축방향의 중성자 선속밀도 분포(상대적)를 핵분열전리함을 써서 측정한다. 이때 두 가지 방법으로 중성자 선속밀도의 분포를 측정하는데 외부 중성자선원을 일정지점(예:핵연료집합체의 아래부분)에 고정시키고 핵분열전리함을 축방향으로 구동하면서 중성자 선속밀도(상대적)의 변화를 측정하거나 반대로 핵분열전리함을 고정시키고 외부 중성자선원을 축방향으로 이동하면서 중성자 선속 밀도를 측정한다. Suzaki[12]에 의하면 후자의 방법이 전자보다 중성자 측정오차를 감소시킨다고 한다. 핵분열전리함을 써서 사용후핵연료의 축방향 중성자 선속밀도를 측정하여 백그라운드 값을 제외한 순수한 선속밀도(측정치 BG)의 기울기를 지수감쇠인자(γ)라 정의한다. 지수감쇠인자와 유효증배계수와의 관계식은 $1-1/keff = -KV^2$ 로 표현할 수 있다.

3. 지수실험장치 개선

가. 자동화 구동장치 개발

Fig. 2과 같이 스테핑 모터와 Programmable Logical Controller(PLC)로 구성된 지수수실험 자동화 구동장치를 설계하여 제작하여 하였다. 이 장치는 기존의 수동으로 작동하는 지수실험장치를 개조하여 선원과 검출기를 축 방향으로 자동으로 구동하도록 하는 것에 목적을 두고 있으며, 아울러 대형 크레인을 이용하여 선원과 검출기를 집합체의 제어봉 안내관에 주입하던 번거로움을 피하기 위해서 X-Y table을 사용하여 보다 용이하게 주입하고자 하는데 그 목적이 있다.

선원(혹은 검출기)을 setting된 거리간격 단위로 지정된 회수만큼 반복하여, 축방향의 상향(혹은 하향)으로 이동시키는 기능을 갖도록 설계하였고, setting된 거리간격이 일정하지 않은 경우에도 작동이 가능하도록 설계하였다. MCA(기존 지수실험장치의 일부)에서 보내는 신호를 감지하여 이동을 시작하도록 설계하였고, 상하 이동 폭을 3,000 m/m(Max.)로 설정하였다. 선원(Neutron source)과 검출기(detector)의 축방향 이동거리의 정확도는 ± 0.1 mm 이하가 되도록 하였고, 참고로 일본원자력연구소에서는 push button으로 크레인을 작동하여 0.3 mm 정확도로 이동시킨다고 한다. 이 장치는 조사후시험시설의 저장실에 설치할 것이므로, 방사선 오염과 고습도에 내구성이 뛰어난 재질을 사용하였고, 이런 열악한 조건에서 정상적으로 작동될 수 있도록 제작하였다.

장치장치의 각 부분별 제작내용.

Rack Gear 구동부: 2 Set. 재질 : 장치의 재질은 기본으로 Stainless Steel(STS 304)로 설정하였고, Rack Gear는 Stroke 3,000mm 이상이고, Pinion Gear는 $\phi 80 \times t 15$ mm로 설정하였다. 이와 함께, X-Y Table 3 Set, SUS304 pipe 50 X 50 X 3.2T 등으로 구성된다. PLC의 부품을 결합한 control 박스에는 PLC, 스테핑모터 드라이브, 전원공급기로 구성된다.

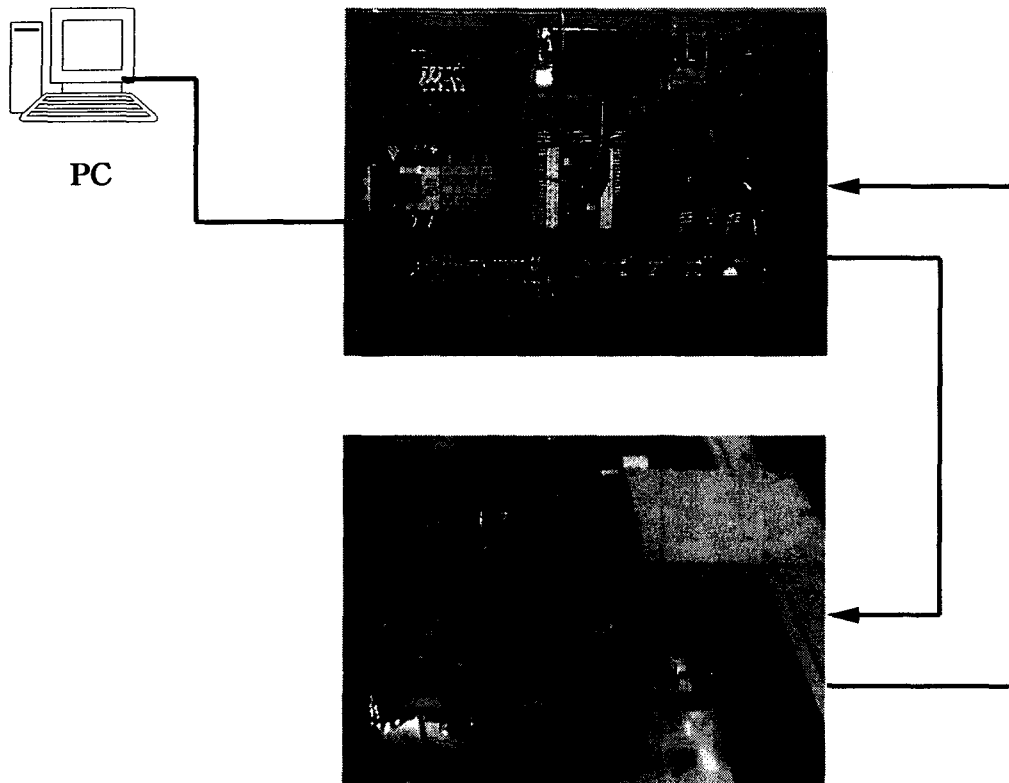


Fig. 2. Automatical movement system with PLC and stepping motor set.

나. 자동화 구동 프로그램 개발

지수실험장치의 크게 두 부분으로 나누면 PLC와 스텝핑 모터로 구성된 중성자 선원과 검출기를 구동하는 부분과 MCA를 포함하는 측정시스템으로 나눌 수 있다. 지수실험을 정밀하게 수행하려면 이 두 장치를 통합 제어하는 프로그램이 필요하다. 이를 위해 개발된 프로그램의 알고리즘이 Fig. 3에 제시되었다. 본 프로그램은 사용후핵연료 집합체의 축 방향 거리별 중성자 선속밀도를 무인 및 연속측정을 실시함으로써 다량의 실험데이터 생산 및 다변의 측정조건을 실현하기 위해 제작되었다. 또한 지수감쇠계수의 측정에 있어서 측정오류 및 불확도 저감에 기여하도록 하기 위함이다.

지수실험 자동화 프로그램은 모터구동부분과 MCA 부분으로 구성되어 있다. 모터 구동 부분은 PLC가 1축 및 2축 모터 드라이버를 제어함으로써 상하 축 방향으로 이동이 가능하게 한다. 또한 MCA 부분은 Canberra사가 제공하는 Programming Library Manual을 이용하여 작성되었으며 스펙트럼 데이터의 저장 및 Display가 가능하도록 되어 있다. 통신방식에 있어서 모터구동부분의 경우 PLC Module 박스에 내장된 Rs-232C 통신포트를 이용한 전용 Protocol에 의한 통신이다. 이는 Computer측에서 미리 설정된 전문 Format의 전용명령어를 송신하여 PLC CPU Data의 Read/Write 등을 행하는 기능이다. MCA의 경우는 전용 LAN 카드를 이용한 10Base-2 BNC 케이블 통신이다.

모터구동의 경우 PLC를 이용한 전용 Protocol에 의한 통신이다. 이 Protocol의 전용규격은 다음과 같으며, 그 세부사항은 아래의 Table 1과 같다. 또한 PLC CPU내에 입력된 디바이스 번지는 다음 Table 2와 같다. 크게 Bit 쓰기, 읽기, Word 쓰기로 구분하며, Bit 쓰기는 PLC CPU 비트 디바이스에 대해 컴퓨터 키보드에서 ON(1)/OFF(0) 정보를 입력하여 PLC에 Write 한다.

ENQ 00 FF BW 0 M504 01 00

Table 1. Protocol Specifications for PLC CPU

ENQ	00	FF	BW	0	M504	01	00
	국번호	PLC 번호	명령어	대기시간	디바이스번지	개수	데이터

Table 2. Device Memory Address in PLC CPU

기능		구분	1축 디바이스 번지	2축 디바이스 번지	비 고
Bit 쓰기	PC-mode		M504	M504	ON(1)/OFF(0)
	축 설정		M506	M507	"
	Up		M501	M503	"
	Down		M500	M502	"
Bit 읽기	PC-mode		M604	M604	
	축 설정		M606	M607	
	이동 중		M602	M603	
	이동완료		M600	M601	
Word 쓰기	거리설정		D500	D502	16진수 값

Fig. 3에서 보는 바와 같이 지수실험장치 프로그램의 전체 알고리즘은 Motor구동과 MCA의 부분으로 결합되어있다. 실제 프로그램은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 윈도우 내의 각 Frame 구성은 크게 3부분으로 나누어지는 데 운영모드 및 Motor, 방향 설정에 관한 초기 설정부분과 측정조건 입력에 관한 두 가지 모드에 대한 Frame으로 구성 되어있다. 프로그램 실행과 동시에 PLC와 PC 간의 Rs-232C 통신 Setting이 완료된다. Comport로서 Com1이 설정되어있고, 전송속도(19200 bps), Parity(None), Data Bit(8 bit), Stop bit(1 bit) 순으로서 Setting이 완료된다. 또한 각 기능별 초기화가 내부적으로 이루어진다.

본 지수실험장치 1 축에는 Cf-252 선원이 장착되어있고, 2 축에는 Fission Chamber Detector가 장착이 되어있다. 따라서 핵연료다발을 상, 하 축 방향으로 옮겨가며 측정할 경우 2가지 측정모드가 존재한다. 첫째 2축을 고정하고 1축을 이동시키는 모드(Source Scanning Mode), 둘째 1축을 고정시키고 2축을 이동시키는 모드(Detector Scanning Mode)가 그것이다.

이와 같이 결정된 측정방식에 따라 측정조건을 결정하는데도 2가지 모드가 있는데, 측정조건(간격, 시간, 반복회수)이 각 지점마다 모두 동일한 경우(등 간격 모드)와 사용자 측정조건 입력 모드 경우이다. 각각은 측정구간, 측정간격, 측정시간, 반복횟수, 시작채널, 종료채널, 파일이름의 항목으로 구성되어 있다.

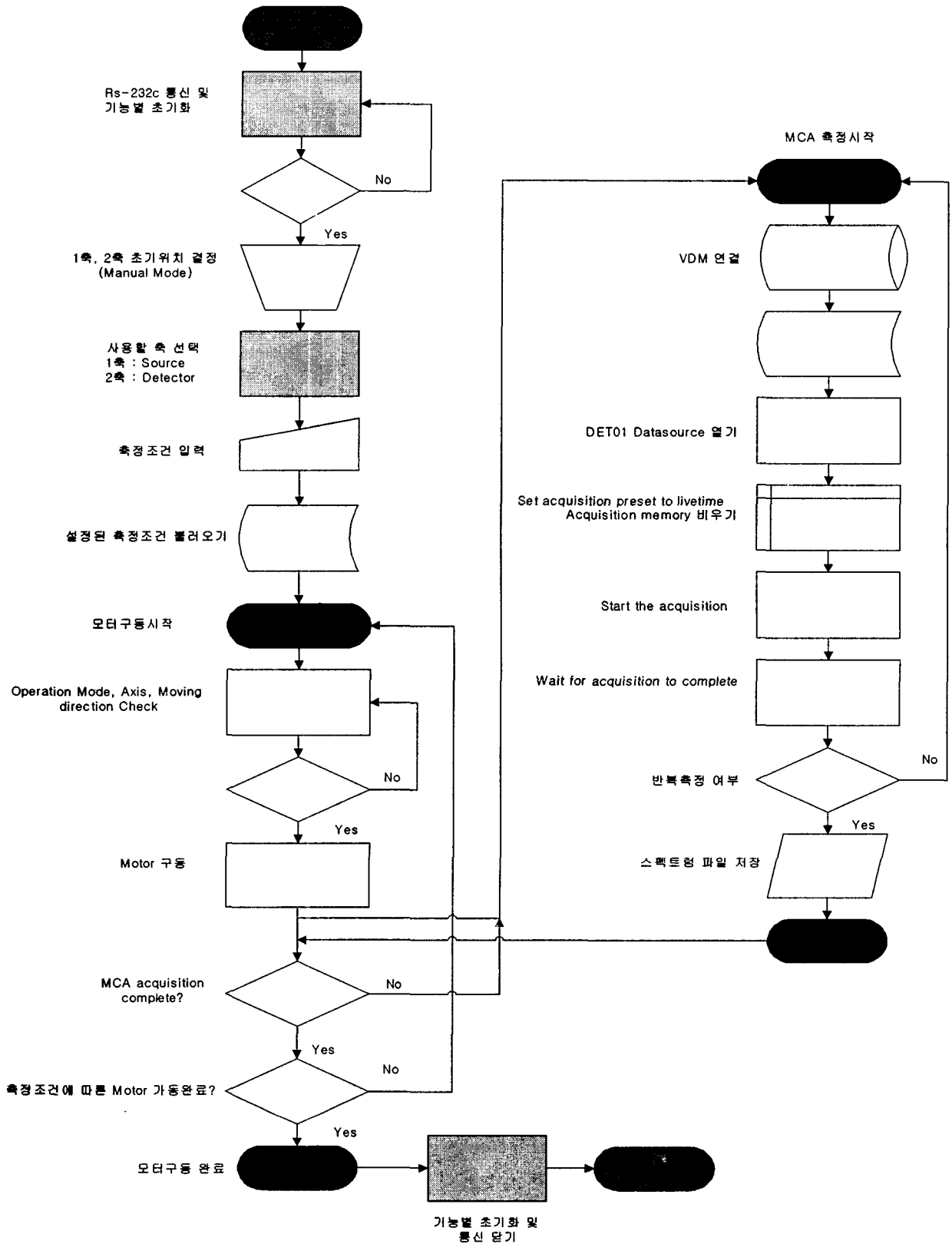


Fig. 3. Flow Chart for the automatic control system.

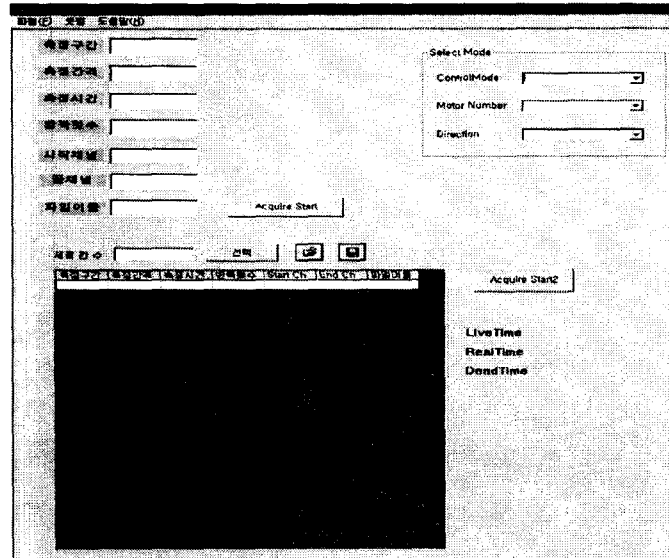


Fig. 4. Window for input data.

측정구간은 측정할 총 거리를 나타내며, 입력 단위는 0.1 mm이다. 측정구간은 측정할 거리 및 Limit Switch 간섭을 고려하여 설정하도록 되어있다. 등 간격 모드인 경우 총 측정구간을 측정간격으로 나누어서 측정지점의 개수를 설정하고 사용자 입력모드의 경우는 측정 조건표의 각 Row 별 간격조건에 따라 실행된다. 등간격의 모드의 경우 각 측정별 시간은 동일하고 사용자 입력모드의 경우 각 Row별 측정시간에 따라 실행된다. 측정시간은 MCA의 Live time이고 모터이동시간 및 대기시간 등은 포함되지 않는다. 반복횟수는 각 측정구간별 측정 반복회수 결정한다. 이는 Spectrum 측정의 반복을 의미하며, 등간격의 경우 모든 측정지점별로 모두 동일한 값을 가지고, 사용자 입력모드의 경우 Row별 반복횟수를 달리 할 수도 있다. 시작 및 종료채널은 MCA에서 Spectrum Data의 Channel Threshold Value를 의미하며, Background 혹은 Noise의 영향에 따라 사용자가 임의로 설정할 수 있다. MCA에 기록된 스펙트럼(채널별 계수치)은 일정한 파일(.txt or .dat)로 저장이 되도록 되어있다.

측정을 모두 종료한 이후에는 모든 기능들을 역순으로 초기화시키고, 측정에 사용했던 모든 측을 Off 시키고 Control mode를 Manual mode로 전환시킬 수 있다.

4. 지수실험 및 지수감쇠계수 결정

4 개의 집합체 C15, J14, G23 및 J44에 대한 축방향 중성자 선속밀도 측정 결과를 이용하여 각 집합체에서의 검출기와 선원의 위치에 따른 지수감쇠계수를 결정하였다. 이 지수감쇠계수를 결정할 때 뽀아송(Poisson) 회귀방법을 적용하여 일반 회귀분석을 적용할 때보다 개선된 결과를 도출하였다. 지수실험으로부터 얻은 중성자 계수치는 기본적으로 뽀아송분포를 따른다고 가정한다. 이 점을 고려해서 중성자 계수치의 뽀아송분포에 대한 적합성 검정과 뽀아송회귀분석을 다음과 같이 수행하였다.

가. 뽀아송분포에 대한 적합성 검정

1) 이론적 배경

임의의 확률표본 $x_i, i=1, \dots, n$ 가 뽀아송분포를 따른다는 가설을 검정하기 위하여 다음과 같은 Cramer-von Mises 유형 검정통계량(test statistic)들을 정의할 수 있다.

$$W^2 = n^{-1} \sum_{j=M_l}^{M_u} Z_j^2 \hat{p}_j \quad (1)$$

$$A^2 = n^{-1} \sum_{j=M_l}^{M_u} \frac{Z_j^2 \hat{p}_j}{H_j(1-H_j)} \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서 \hat{p}_j 는 관찰치 j 의 확률인 p_j 의 추정치이고, $H_j = \sum_{i=0}^j \hat{p}_i$ 이다. 또한 o_j 는 x_i 들 중에서 j 인 관찰치의 수이고, e_j 는 관찰치 j 의 기댓값 np_j 일 때, $Z_j = \sum_{i=0}^j (o_i - e_i)$ 이다. M_l 과 M_u 는 Spinelli 외[14]와 같이 결정한다. 식(1)과 (2)는 모두 $T = \sum_{i=1}^K \lambda_i z_i^2$ 과 같은 형태로 변환될 수 있으며, 이 때 $K = M_u - M_l + 1$ 이고, λ_i 는 $M^{1/2}(\Sigma - \mu p p')M^{1/2}$ 의 고유치(eigenvalue)이고, z_i 는 표준정규 분포(standard normal distribution)를 따르는 확률변수이다[14]. 여기서 M 은 식(1)과 (2)에 따라 달라진다.

주어진 가설이 참이라면 검정통계량 W^2 과 A^2 의 분포는 T 의 점근분포(asymptotic distribution)와 같다. 그러므로 주어진 표본을 대상으로 식(1)과 (2)를 이용하여 계산한 값은 각각의 T 의 점근분포에 근거하여 유의확률 p 값을 결정하고 이 값을 주어진 유의수준과 비교하여 가설의 기각여부를 결정한다.

2) 적합성 검정결과

Table 3은 지수실험장치의 선원과 검출기를 고정시킨 상태에서 5 초 동안 발생하는 중성자 수를 50회 반복측정한 결과이다. 식(1)과 (2)에 의해 계산된 표본의 W^2 과 A^2 은 각각 .0503과 .4102 이고 각각의 p 값은 .3828과 .4576으로 나타났다. 따라서 보편적인 유의수준 5 %에서 중성자 계수치 표본은 뽀아송 분포를 만족하는 것으로 볼 수 있다.

Table 3. A sample of neutron counts obtained from the exponential experiment

9	7	4	7	5	6	8	3	6	8
12	11	7	8	11	10	12	6	8	5
6	12	8	8	2	8	5	8	6	6
9	9	12	6	2	8	5	7	3	8
6	10	9	7	11	10	7	6	9	7

나. 뽀아송 회귀분석

검출기를 고정시킨 상태에서 선원을 이동시킴에 따라 발생하는 중성자 계수치를 측정하여 뽀아송회귀분석을 수행하였다. 중성자 계수치를 $y_i, i=1, \dots, n$ 라고 하면 중성자 계수치는 기댓값과 분산이 동시에 μ_i 인 뽀아송분포를 따른다. 검출기와 선원의 거리를 독립변수 x_i 라 하면 x_i 와 중성자 계수치 y_i 는 다음과 같은 관계를 만족해야 한다.

$$E(y_i) = \mu_i = e^{\beta_0 + \beta_1 x_i} \quad (3)$$

식(3)의 β_0 와 β_1 은 뽀아송분포 가정하에 로그우도함수(log likelihood function)를 최대화하는 방법으로 추정할 수 있고 각각의 추정된 값을 최우추정치 b_0 와 b_1 이라 한다.

지수감쇠계수 β_1 에 대한 Wald의 근사적인 $100(1 - \alpha)\%$ 신뢰구간은 다음 식으로 결정된다.

$$b_1 - z_{\alpha/2} se(b_1) \leq \beta_1 \leq b_1 + z_{\alpha/2} se(b_1) \quad (4)$$

식(4)에서 $z_{\alpha/2}$ 는 표준정규분포의 $\alpha/2$ 분위수이고 $se(b_1)$ 은 다음과 같다.

$$se(b_1) = \frac{\sum_{i=1}^n \exp(b_0 + b_1 x_i)}{\left[\sum_{i=1}^n \exp(b_0 + b_1 x_i) \right] \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \exp(b_0 + b_1 x_i) \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \exp(b_0 + b_1 x_i) \right)^2}$$

다. 지수감쇠계수 결정

집합체 C15, J14, G23 및 J44에 대한 증성자 계수치에 대해 지수감쇠계수를 구하였다. 위에서 제시한 뽀아송 회귀분석을 적용하기 위해서 먼저 통계프로그램 SAS (Statistical Analysis System)을 사용하여 Chi-square test를 수행하여 데이터의 적합성을 확인하였다. 이어 뽀아송 회귀분석식을 사용하여 각 집합체에 대한 지수감쇠계수를 구하여, 그 결과를 Table 4에 제시하였다. 또한 95 % 신뢰도의 범위를 결정하기 위해서 식(4)을 사용하였고, 각 지수감쇠계수에 대한 95 % 신뢰도를 갖는 하한값과 상한값을 구하여 Table 4에 제시하였다. Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이 95 % 오차범위인 하한값과 상한값의 상대오차는 매우 적게 나타났으며 이는 5 분 동안 측정된 증성자 계수치를 초당 계수치로 환산함으로써, 그 오차가 감소했기 때문이다. 그러나 동일한 집합체에 대해서 측정된 지수감쇠계수는 서로 큰 차이를 보이는 경우가 발생하였다. 이에 대한 원인은 앞으로 규명되어야 하며, 동일한 집합체에 대해 측정된 여러 가지 지수감쇠계수치를 이용하여 해당 집합체의 대표 지수감쇠계수를 결정하는 방법을 찾아야 할 것이다.

Table 4. Exponential decay constant and its 95 % confidence limit for four assemblies

Assembly ID	Detector Position	Exponential Decay Constant (γ)	95% Confidence Limits		
			Lower	Upper	Relative Error(%)
C15	E05	0.1350	0.1334	0.1366	1.15
	E10	0.1350	0.1334	0.1366	1.15
	J05	0.1200	0.1184	0.1216	1.35
	J10	0.1310	0.1296	0.1324	1.10
J14	E05	0.1320	0.1307	0.1333	0.96
	E10	0.1190	0.1178	0.1202	1.02
	J05	0.1230	0.1218	0.1242	0.99
	J10	0.1250	0.1237	0.1263	1.02
G23	C12	0.1250	0.1240	0.1260	0.83
	E05	0.1250	0.1238	0.1262	0.92
	J10	0.1280	0.1266	0.1294	1.08
	L03	0.1290	0.1277	0.1303	0.98
J44	F06	0.1190	0.1179	0.1201	0.92
	F11	0.1200	0.1188	0.1212	0.96
	K06	0.1220	0.1209	0.1231	0.90
	K11	0.1230	0.1220	0.1240	0.80

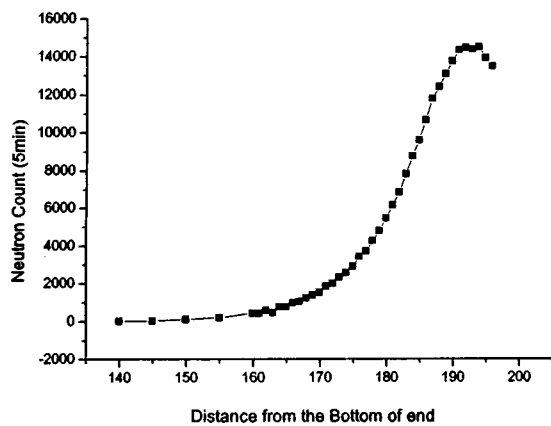


Fig. 5. Neutron net counts measured for the C15 assembly.

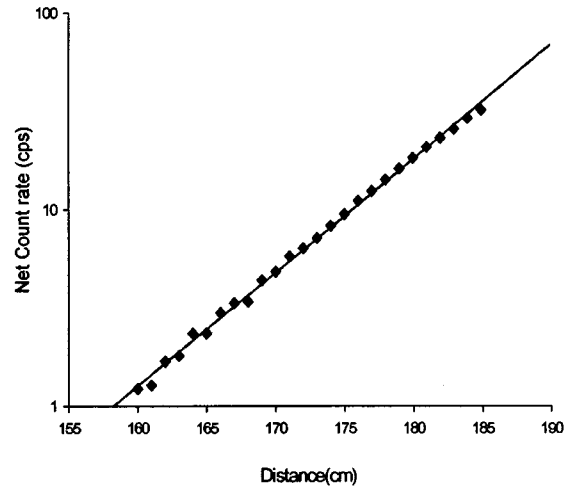


Fig. 6. Determination of the exponential decay constant for the C15 assembly.

5. 결 론 및 향후계획

기존의 지수실험장치에 자동화 구동장치의 부착과 PLC 및 MCA 통합제어시스템을 구축하고, 4 개 집합체에 대한 지수감쇠계수를 측정된 후, 다음과 같은 결론을 얻었다. 측정위치에서의 95 % 신뢰도를 갖는 자체 측정오차는 매우 적은 1.5 %이하로 나타난 점에 비추 볼 때, 본 연구의 측정시스템 및 측정방법이 적합했다고 볼 수 있다. 그러나 동일한 집합체에 대해 측정위치별 지수 감쇠계수 측정값들은 서로 큰 차이를 보였기 때문에 집합체에 대한 대표 값을 결정하는데 문제가 있다. 앞으로 동일한 집합체에 대해 다양한 위치에서 지수감쇠계수를 측정하여 측정위치에 따른 경향 분석을 통하여 이에 대한 원인을 규명하고 궁극적으로 집합체별 지수감쇠계수 대표 값을 결정하는 방법을 확립할 계획이다. 또한 지수실험의 최종 목적인 중성자유효증배계수를 정확히 예측하기 위해 버클링-반응도 전환인자를 결정하는 방법을 연구할 계획이다.

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 SF특성계량화 기술개발과제에서 수행한 것임.

참 고 문 헌

- [1] T. Suzuki, Y. Komuro, H. Tsuruta, and I. Kobayashi, "Application of exponential experiment to high subcriticality determination," Trans. Am. Nucl. Soc. 35, 280 281(1980).
- [2] T. Suzuki, "Subcriticality determination of low enriched UO₂ lattices in water by exponential experiment," J. Nucl. Sci. Technol. 28(2), 1067 1077(1991).
- [3] K. Sakurai, T. Arakawa, T. Suzuki, and Y. Naito, "Examination of applicability of exponential experiment method to complex array cores," Japan Atomic Energy Research Institute Rept. JAERI Research 95 082(1995).
- [4] K. Sakurai, T. Arakawa, T. Yamamoto, and Y. Naito, "Estimation of subcriticality with the computed values(III)," Japan Atomic Energy Research Institute Rept. JAERI Research 96 045(1996).
- [5] Jens Christian Neuber, "Burnup credit applications to PWR and BWR fuel assembly wet

- storage systems,” Proc. Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science & Techology, Vol.1, pp.631 638, 5 8 Oct. 1998, Long Island, New York(1998).
- [6] R. T. H. Mayson and K. J. Gunston, “Challenges in the application of burn up credit to the criticality safety of the THORP reprocessing plant,” Proc. 2nd NUCEF Int. Symp. NUCEF’98, Part I. pp.61 67, 16 17 November 1998, Hitachinaka, Japan(1998), JAERI Conf 99 004(1999).
- [7] Hee Sung Shin, Seung Gy Ro, Kang Mok Bae, Ik Soo Kim, and Young Joon Shin, “Application of burnup credit for PWR spent fuel storage pool,” *ibid*, pp.68 76.
- [8] Chi H. Kang and Dale B. Lancaster, “Actinide only burnup credit for pressurized water reactor spent nuclear fuel III: bounding treatment of spatial burnup distributions,” Nucl. Technol. 125, 292 304(1999).
- [9] Hee Sung Shin, Seung Gy Ro, Kang Mok Bae, Young Joon Shin, and Ik Soo Kim, “Application of SCALE 4.4 system for burnup credit criticality analysis of PWR spent fuel,” Proc. Int. Symp. on Radiation Safety Management ’99, pp.487 502, 4 6 November 1999, Taejon, Korea(1999).
- [10] Dale B. Lancaster, Emilio Fuentes, Chi H. Kang, and Meraj Rahimi, “Actinide only burnup credit for pressurized water reactor spent nuclear fuel I : methodology overview,” Nucl. Technol. 125, 255 270(1999).
- [11] Emilio Fuentes, Dale B. Lancaster, and Meraj Rahimi, “Actinide only burnup credit for pressurized water reactor spent nuclear fuel II: validation,” Nucl. Technol. 125, 271 291(1999).
- [12] T. Suzaki et al., “Exponential experiments of PWR spent fuel assemblies for acquiring subcriticality benchmarks usable in burnup credit evaluations,” 5th Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety, Vol.1, pp.1B.11 1B.18, 17 21 Sept. 1995, Albuquerque, New Mexico. U.S.A.
- [13] 노성기, “사용후핵연료 핵임계 안전관리에 관한 일본과견 연구보고서,” 한국원자력연구소 해외출장보고서 KAERI/OT 387/98, p.51(1998).
- [14] Spinelli, John J. and Stephens, Michael A., “Cramer-von Mises tests of fit for the Poisson distribution, The Canadian Journal of Statistics, 25, 257-268(1997).