

PWR 사용후핵연료 집합체에 대한 지수감쇠계수 측정 Measurement of Exponential Decay Constant for PWR Spent Fuel

장지운, 신희성, 황용화, 김호동
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

PWR 사용후핵연료를 대상으로 한 지수실험 수행에 앞서, 전치증폭과 주증폭기에 의한 측정신호를 분석하여 지수실험장치에 대한 중성자 측정신호의 특성분석과 기기의 적정화 작업을 수행하였다. 이 장치를 사용하여 고리 1 호기 사용후핵연료 집합체를 대상으로 지수실험을 수행하여 중성자 계수치를 측정하였으며, 이를 기준으로 Poisson 회귀분석 방법을 사용하여 집합체별 및 측정위치별 지수감쇠계수를 결정하였다.

ABSTRACT

Prior to exponential experiments to be performed with a PWR spent fuel in the storage pool of post irradiation examination facility, Korea Atomic Energy Research Institute, the neutron measurement sign characteristics are analyzed with oscilloscope in order to find the optimum condition for measurement instruments. And also the neutron counts for the spent fuel assembly discharged from KorI 1 unit were detected with the exponential experiment facility. The exponential decay constants at the measurement points of 4 assemblies are determined using the application of the Poisson regression method.

1. 서론

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. 1991 년 이래 JAERI에서는 임계실험장치인 FCA에서 물감속 2.5 wt% 농축 UO₂ 격자구조에 대한 지수실험을 수행하여 유효증배계수를 결정하였다[1]. Suzuki[2]는 TCA에서 물감속 저농축 UO₂ 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 미임계시스템

에서 지수실험을 수행하여 노심의 축방향 중성자분포를 측정하고 MCNP4A에 의한 계산치와 비교하였다[4].

최근에는 연소도 이득[5-13]을 적용하여 사용후핵연료를 핵임계관점에서 안전하게 수송, 저장 및 취급하기 위한 안전지침자료를 제공할 목적으로 지수실험을 실시하였다. Suzuki 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 입력자료의 신뢰성을 확인할 목적으로 몇 개 핵연료봉을 취하여 화학분석을 하였다.

본 연구에서 지수실험장치 기기의 각 부문별로 측정신호의 특성을 파악하여 측정과정에 발생할 수 있는 노이즈에 의한 영향을 분석하고, 적절한 측정시스템의 조건을 결정하였다. 적정화가 이루어진 이 장치를 사용하여 사용후핵연료 집합체를 대상으로 중성자계수치를 얻고, 이를 Poisson 회귀방법으로 처리하여 지수감쇠계수를 구하였다.

2. 지수실험장치구성 및 실험방법

가. 장치구성 및 특성

지수실험장치는 중성자 선원, 중성자 검출기, MCA 및 계수치 분석 프로그램 GENIE 2000을 내장한 PC로 구성된다. 중성자 선원으로 ^{252}Cf 을 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. Suzuki[12]는 4 mm ϕ \times 20 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. \times 0.5 mmt(t는 두께를 뜻한다) 스테인리스강관 속에 삽입할 수 있는 소형 핵분열전리함(6 mm ϕ \times 25.4 mm eff)을 사용한다. 이때 중성자 검출효율을 증가시키기 위하여 핵분열전리함에는 고농축 ^{235}U (93 wt% 이상)을 쓴다. 외부 중성자선원 및 핵분열전리함을 삽입할 수 있는 9.5 mm O.D. 스테인리스강관은 제어봉 안내관이거나 핵연료봉을 꺼낸 빈공간에 9.5 mm O.D.관을 꼽은 것일 수도 있다. 중성자 감지부인 핵분열전리함으로부터 나온 전자적 신호가 매우 작아 긴 신호전송 케이블에서의 감쇠가 있을 것이므로 이에 대한 고려가 필요하다.

나. 실험방법

1) 개요

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

2) 핵분열전리함에 의한 중성자선속밀도분포측정

먼저 사용후핵연료 집합체속에 핵분열전리함을 삽입하여 이로부터 나오는 파고분포를 측정(외부 중성자선원 ^{252}Cf 유무에 관계없다)한다. 일반적으로 낮은 파고에서 높은 계수치를 보여주는데 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 ^{252}Cf)을 삽입하지 않은 상태에서 사용후핵연료 축방향의 중성자 백그라운드를 핵분열전리함으로 측정한다. 이때 중성자 백그라운드는 주로 ^{244}Cm 의 자발핵분열에서 기인한다. 파고선별기의 바이어스전압을 설정하고 중성자 백그라운드를 측정한 후, 외부 중성자선원 ^{252}Cf 을 핵연료집합체에 삽입하여 축방향의 중성자 선속밀도 분포(상대적)를 핵분열전리함을 써서 측정한다. 이때 두가지 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. Suzuki[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 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$1 - \frac{1}{k_{eff}} = -K\gamma^2$$

3. 중성자 발생량 분석

가. 계산모델 및 방법

C15 집합체는 조사후시험시설 저장폴(9402)의 저장랙에 거치되어 있다. C15 사용후핵연료 집합체에 대한 제원 및 연소도 이력을 기준으로 계산을 수행하였다. SAS2H는 1군 핵자료를 생산하는 모듈과 ORIGEN S로 구성되어 있다. 1군 생산모듈은 NITAWL - BONAMI - XSDRNPM의 코드로 연결되어 있는 시스템으로 계산대상에 적합한 1군 유효단면적을 생산한다. 이 단면적은 ORIGEN S 계산에 사용된다. ENDF/B V, VI에서 생산된 238군 미시단면적에서 축약된 44군을 모핵자료로 사용하여 앞에서 언급한 축약코드들을 이용하여 1군 핵단면적으로 축약한다.

나. 중성자 발생량

C15 사용후핵연료에서 발생하는 중성자의 발생량을 분석하였다. 악티나이드 핵종에서 발생하는 중성자는 알파 중성자 반응과 자발핵분열에서 발생하는 중성자가 주류를 이룬다. 주요한 중성자 선원들의 중성자 방출량을 냉각기간별로 계산하였다. 원자로에서 방출직후에는 알파 중성자 반응에서의 중성자 발생량의 93%는 Cm-242에서 발생한다. 현재(냉각기간 18.5년)의 C15와 같은 경우에는 Am-241, Pu-238 및 Cm-244에 의한 기여가 전체의 90%를 차지한다.

자발성핵분열의 경우에 원자로 방출초기에는 Cm-242가 가장 큰 기여를 하지만, 3년 후부터는 대부분을 Cm-244가 기여한다. 3년 후부터는 자발성핵분열 중성자 발생량이 알파 중성자반응에서 발생하는 중성자의 24배 정도 된다. 두 중성자선원을 합해서 비교해

보면 냉각기간 18.5 년을 기준으로 Cm-244에서 발생하는 중성자가 전체의 93 %를 차지한다. 알파 중성자 선원은 0.6 MeV에서 피크가 발생하고, 자발핵분열 중성자선원은 2 MeV 근방에서 피크가 발생한다. 이는 각각 Cm-242와 Cm-244에서 발생하는 중성자의 에너지와 관련되어 있는 것으로 추정된다.

4. 중성자 측정 신호 피크 분석

지수 실험장치를 통하여 얻은 중성자 계수치의 신뢰도를 점검하기 위해서 장치의 각 단계에서 중성자 측정 신호를 분석하여 중성자 계수치에 노이즈가 포함되었는지를 확인하기 위해서, 측정 신호를 측정 시스템의 단계별로 분석하였다. 일반적으로 방사선 검출기로부터의 출력 신호는 미약한 전하 펄스이며, 검출기의 임피던스(impedance)도 극히 높다. 따라서 검출기의 임피던스가 낮은 회로나 긴 Cable 등을 직접 연결하면 펄스를 효율적으로 분석할 수 없을 뿐 아니라, 펄스 파형 자체도 붕괴되어 좋지 못한 형태가 되는 경우가 있다. 그렇기 때문에 입력 임피던스가 높은 전치 증폭기를 검출기의 바로 뒤에 접속시켜 미소한 전하 펄스를 적분하여 이것을 전압 펄스로 변환, 증폭시킨 후, 저출력 임피던스 회로로 신호를 송출한다. 주 증폭기는 전치 증폭기로 부터의 전기 신호를 더욱 증폭함과 동시에 펄스 파형을 정형하며, 해석 장치나 기록 장치에 적합한 펄스로 조정하는 것으로서 몇 개의 증폭 루프, 파형 정형 회로(filter), 가변 감쇠 및 보조 회로 등으로 구성되어 있다.

가. 전치 증폭기의 출력 펄스 형상

전하의 적분에는 입력의 부유 용량을 그대로 사용한 간단한 방식의 것도 있지만 feed back 소자에 Capacitor를 사용한 연산 증폭기 방식의 적분기를 이용한 것이 많다. 즉, 주어진 전하량 Q에 대해서 출력 전압은 feed back 용량에 의해 결정되고 검출기나 Cable 용량에 의존하지 않는다. 펄스의 감쇠 시간은 feed back 시정수에 의해 결정된다. 이러한 형식의 전치 증폭기를 전하 감응형(charge sensitive type)이라 한다.

본 실험에서는 중성자 검출기에서 얻어진 중성자 측정 신호가 전치 증폭기(Caberra, Model 2006)를 통하여 1차적으로 증폭된다. 오실로스코프(Tektronix, TDS3012B)를 이용하여 전치 증폭기를 통한 후의 측정 신호를 확인하였다. Fig. 1에는 중성자가 존재하지 않는 상태에서 노이즈에 의해서 발생된 신호의 펄스 형상을 제시하였다. 오실로스코프를 이용하여 노이즈 측정 시에는 10 분 동안 발생 노이즈 중에서 진폭이 큰 것들을 선택하여 측정하였고, 이들 중에서 주기가 가장 긴 것을 측정하였다. Fig. 2에는 중성자 계수 시에 얻는 펄스 형상을 제시하였다. Fig. 1-2에서 볼 수 있듯이 두 경우의 큰 차이는 펄스의 주기이다. 노이즈인 경우에는 펄스의 주기가 대략 $4 \mu s$ 정도이고, 중성자 계수 시의 펄스 주기는 $6 \mu s$ 가 넘는 것으로 나타났다. 따라서 $6 \mu s$ 를 기준으로 노이즈와 실제 중성자 측정 신호를 구분할 수 있다는 것을 알 수 있다.

나. 중성자 측정 신호의 주파수 측정

발생 중성자 측정 신호 분석의 일환으로 오실로스코프를 이용하여 중성자 측정 신호의 주파수를 측정하였다. 중성자 계수 시 펄스 주기의 증가와 더불어 200 MHz 이상의 주파수가 관측되었고 이는 전하량의 증가를 의미하고 연산 증폭기 방식의 적분기를 이용하여 적분이 되는 경우 노이즈와는 다른 상대적으로 큰 전압 펄스를 형성한다. Fig. 3에 중성자 계수 시 오실로스코프 상에 주파수가 증가되는 파형을 제시하였다.

다. 주증폭기의 Shape Time 변화에 따른 펄스형상 및 계수 변화

주증폭기 출력펄스 파고는 0~10 V의 것이 보통이지만, 이 범위에 있어서 입력신호의 펄스파고와 출력신호의 펄스파고가 비례하도록 하는 것이 중요하다. 주증폭기의 펄스파형 정형방식은 여러 가지가 있지만 본 실험에 사용된 주증폭기는 RC Shaping 방식으로서 Capacitor와 저항으로 된 간단한 미분회로로 펄스의 감쇠시간을 짧게 하는 효과가 있다.

조사 후 저장시설 Pool에 설치되어 있는 지수실험장치에 대한 측정신호 분석을 수행하였다. 검출기에 걸린 고전압은 500 V이다. 계수시간은 20초이고, MCA 사용 채널은 1~4096 채널이다. 오실로스코프 상의 trigger level을 350 mV로 설정하였는데 노이즈와의 선별준위로 설정했던 200 채널 이상의 계수는 위에서 설정한 trigger level 이상에서 파형이 포착되었다. Shape time 변화에 따른 각 채널범위에 발생하는 중성자 계수치는 Table 1에 제시하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 예상한 대로, Shape time이 증가할수록 중성자 계수치가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 측정신호가 주증폭기를 통과할 때, Shape time값을 변화시켜 좁으므로 펄스폭을 변화시킨다. 따라서 중성자 계수보다 상대적으로 낮은 파고와 짧은 폭을 갖는 노이즈는 Shape time를 높여좁으므로 상쇄되는 효과가 있다. 그러나 Shape time이 과도하게 높게 설정될 경우 실제 중성자 계수치에도 영향을 주기 때문에 적절한 선택이 필요하다.

Shape time이 2, 3 및 6 μ s일 때 20 초간의 중성자 측정신호를 오실로스코프를 이용하여 캐치하여 Fig. 4-6에 각각 제시하였다. 실시간으로 발생하는 측정신호를 특정 위치에 누적시키는 방법을 사용하여 20 초간의 전체신호를 한눈에 볼 수 있도록 했다. 그림에서 보는 바와 같이 Shape time이 증가함에 따라 펄스파형 폭이 넓게 변화함을 알 수가 있으며, 노이즈 준위라고 판단되는 부분의 파형들도 동일하게 변화함을 알 수가 있다.

라. 주증폭기 출력펄스 분석

각 Shape time에 대한 파형을 측정하여 Fig. 7-9에 제시하였다. Fig. 7-9에서 볼 수 있듯이 Shape time이 증가하면 파형의 폭이 늘어나는 것을 알 수 있다.

파형정형회로를 거쳐서 성형된 파형을 각 Shape time에 대해서 파형의 형성시간을 상승시간과 하강시간으로 나누어 측정하여 결과를 Table 2에 제시하였다. 예상했던 것과 같이 각 경우에 모두 하강시간이 상승시간보다 크게 나타났으며, 상승시간의 평균값은 각각 2.654, 4.248 및 8.752 초로 나타났고, 하강시간의 평균값은 각각 3.868, 5.439 및 10.71로 나타났다.

5. 지수감쇠계수 결정

4 개의 집합체 C15, J14, G23 및 J44에 대한 측방향 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.

가. 뽀아송 회귀분석의 이론적 배경

중성자 계수치는 기본적으로 뽀아송 분포를 따른다. 이 점을 고려해서 일반 회귀분

식을 사용하여 분석하던 기존 방법을 개선하여 뽀아송 회귀방법을 도입하였다. 중성자 계수치를 y_i 라고 하면 중성자 계수치는 다음과 같이 뽀아송 분포를 한다.

$$f(y_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^{y_i}}{y_i!} \quad (1)$$

식(1)의 뽀아송 분포에 대한 기댓값과 분산은 각각 $E(y_i) = \lambda_i$ 와 $Var(y_i) = \lambda_i$ 이다. 독립변수 x_i 와 종속변수 y_i 는 다음과 같은 관계를 만족해야 한다.

$$E(y_i) = \lambda_i = e^{\beta_0 + \beta_1 x_i} \quad (2)$$

식(2)을 이용하고 독립이라는 가정으로부터 y_1, \dots, y_n 의 log likelihood는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \ln L &= \ln \prod_{i=1}^n \left[\frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^{y_i}}{y_i!} \right] \\ &= \sum_{i=1}^n [-e^{\beta_0 + \beta_1 x_i} + y_i(\beta_0 + \beta_1 x_i) - \ln y_i!] \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 b_0 와 b_1 의 MLE(maximum likelihood estimator)는 다음 두 식을 만족하는 해가 된다.

$$\left(\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} \right)_{b_0, b_1} = \sum_{i=1}^n (y_i - e^{b_0 + b_1 x_i}) = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} \right)_{b_0, b_1} = \sum_{i=1}^n (y_i - e^{b_0 + b_1 x_i}) x_i = 0 \quad (5)$$

식(4)과 (5)에 반복적인 가중 최소자승법을 적용하면 β_0 와 β_1 의 MLE인 b_0 와 b_1 을 결정할 수 있다. 한편 Wald의 근사적인 $100(1-\alpha)\%$ 신뢰구간은 다음 식으로 결정된다.

$$b_j - z_{\alpha/2} se(b_j) \leq \beta_j \leq b_j + z_{\alpha/2} se(b_j) \quad (6)$$

식(6)에서 $se(b_j)$ 는 $\sqrt{(X' \widehat{V} X)^{-1}}$ 의 j번째 대각원소(diagonal element)이고 V와 X는 다음과 같이 표현된다.

$$X' = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & \cdots & x_n \end{pmatrix}, \quad \widehat{V} = \text{diag} \{ e^{b_0 + b_1 x_i} \} \quad (7)$$

나. 지수감쇠계수결정

집합체 C15, J14, G23 및 J44에 대한 중성자 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 식(1)-(5)의 뽀아송 회귀분석식을 사용하여 각 집합체에 대한 지수감쇠계수를 구하여, 그 결과를 Table 3에 제시하였다. 또한 95 % 신뢰도의 범위를 결정하기 위해서 식(6)과 (7)을 사용하였고, 각 지수감쇠계수에 대한 95 % 신뢰도를 갖는 하한값과 상한값을 구하여 Table 3에 제시하였다. Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 95 % 오차범위인 하한값과 상한값의 상대오차는 매우 적게 나타났으며 이는 5 분 동안 측

정한 중성자 계수치를 초당 계수치로 환산함으로써, 그 오차가 감소했기 때문이다. 그러나 동일한 집합체에 대해서 측정한 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.

6. 결론 및 향후 계획

PWR 사용후핵연료를 대상으로 하여 실험적으로 유효증배계수를 구하기 위한 지수실험장치의 특성을 사전에 분석하고, 지수감쇠계수를 측정한 후에 다음과 같은 결론을 얻었다. 중성자 측정신호에 섞여 나오는 노이즈는 $6\mu\text{s}$ 이하이며, 적정 Shape time은 $6\mu\text{s}$ 로 설정하는 것이 타당하다. 또한 이와 같이 성능평가 및 적정화가 이루어진 상태에서 결정된 사용후핵연료 집합체에 대한 지수감쇠계수는 95 % 신뢰도 범위에서 최대 1.35 % 이하의 오차를 보인다. 앞으로 ^{252}Cf 를 삽입하여 중성자 선속밀도의 분포를 구한 후 베클링 반응도 전환인자를 결정하는 연구를 수행할 계획이다. 또한 연소도와 핵종량을 보다 정밀하게 결정하게 할 수 있는 방법을 모색하고 높은 신뢰도를 갖도록 계산값의 불확도를 결정할 계획이다.

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 SF특성계량화 기술개발과제에서 수행한 것임.

참고 문헌

- [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 & Technology, 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).

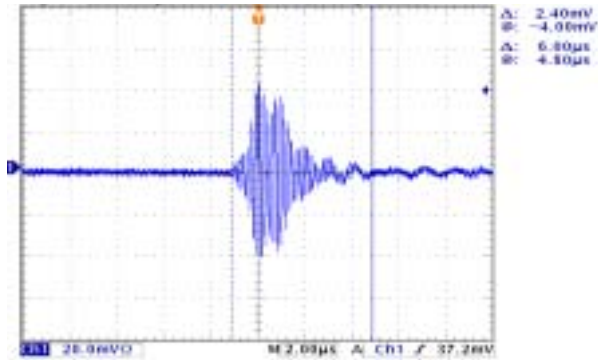


Fig.1. Output Pulse of PreAmp
(Before Occurrence of event).

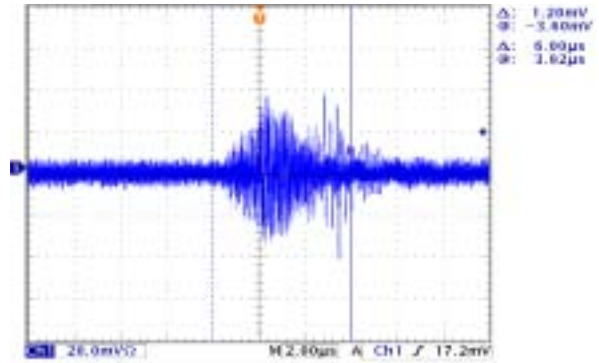


Fig.2. Output Pulse of PreAmp
(After Occurrence of Event).

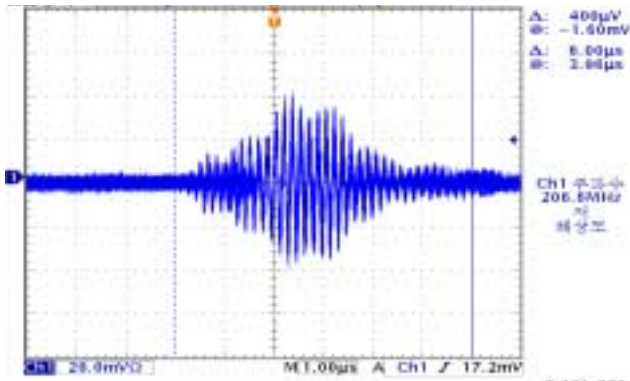


Fig.3. Measurement of Frequency
(when PreAmp Event has occurred).

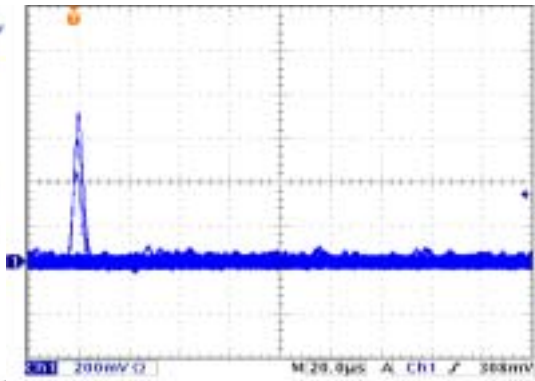


Fig.4. Output Pulse of MainAmp in case
of Shape Time 2 μ s.

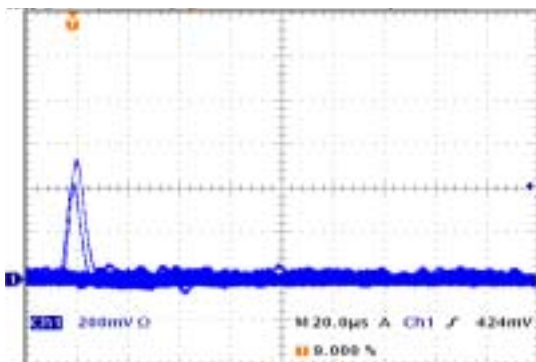


Fig.5. Output Pulse of MainAmp in case
of Shape Time 3 μ s.

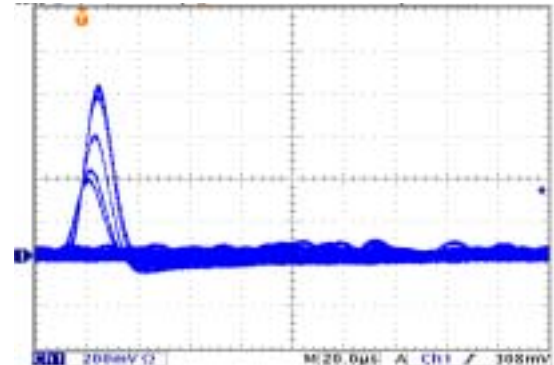


Fig.6. Output Pulse of MainAmp in case
of Shape Time 6 μ s.

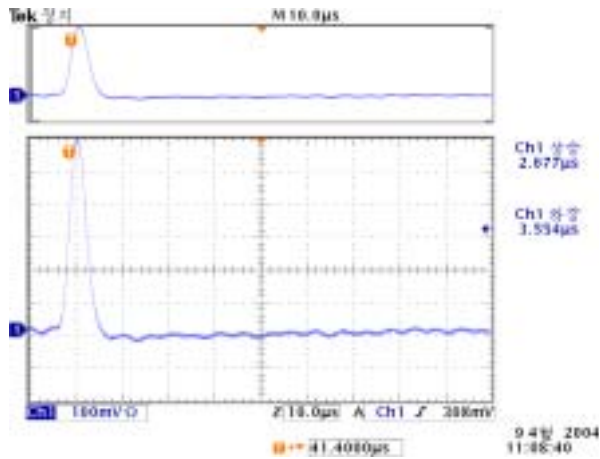


Fig. 7. Output Pulse of MainAmp(2 μsec).

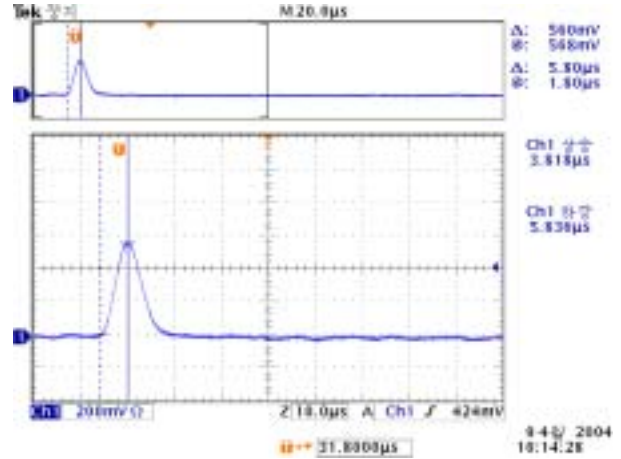


Fig. 8. Output Pulse of MainAmp(3 μsec).

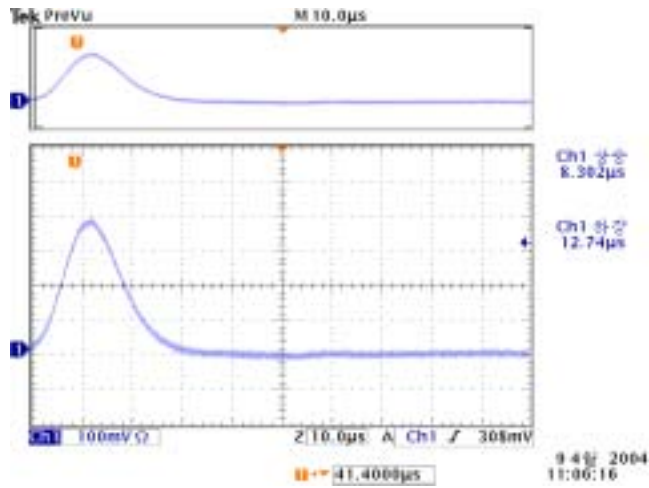


Fig. 9. Output Pulse of MainAmp(6 μsec).

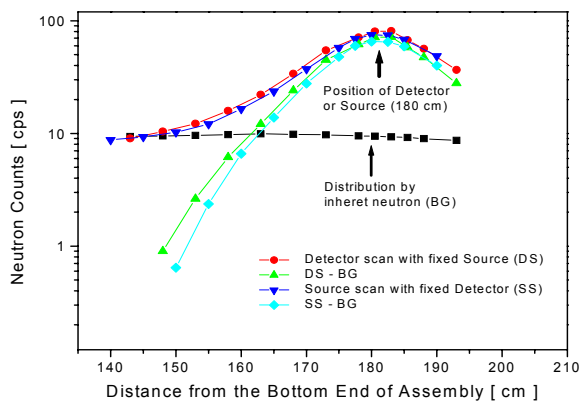


Fig.10. Neutron Counts Derived from Cf-252 Neutron Source for Detector and Source Scanning.

Table 1. Measurement of Count by Variation of Shape Time

Shape Time (μs)	Channel Range	Total Count
2	1 ~ 4096	41
	201 ~ 4096	8
3	1 ~ 4096	22
	201 ~ 4096	3
6	1 ~ 4096	15
	201 ~ 4096	4

Table 2. Analysis of Rising Time and Descending Time of Pulse

Shape Time Test No.	2 μs		3 μs		6 μs	
	Rising Time	Descending Time	Rising Time	Descending Time	Rising Time	Descending Time
1	2.775	4.626	3.818	5.836	8.979	9.876
2	2.666	3.581	3.877	5.611	7.968	10.89
3	2.753	3.759	4.305	5.194	9.478	10.60
4	2.741	4.746	4.217	5.096	8.951	11.42
5	2.553	3.620	4.093	5.108	9.174	10.55
6	2.774	3.639	4.160	5.645	8.384	11.88
7	2.532	3.626	4.359	5.356	8.974	9.782
8	2.666	3.607	4.190	5.431	8.254	9.796
9	2.614	3.919	4.806	5.437	9.465	10.04
10	2.467	3.554	4.651	5.676	7.896	12.23
Average	2.654	3.868	4.248	5.439	8.752	10.71

Table 3. 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