

# NTD를 위한 SPND 신호 이용 중성자속 실시간 재현 The Real Time Reconstruction of Neutron Flux From the SPND Current for NTD

정환성, 전병진, 이상익, 김명섭, 김형규, 우종섭  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요 약

하나로 원자로에서 중성자 반도체 도핑 서비스를 하기 위하여 정확한 중성자속을 실시간으로 측정하는 방법을 개발하였다. 중성자 반도체 도핑에서 목표 비저항의 균일도와 정확도는 가장 중요한 품질 요건이다. 하나로에서는 2개의 로듐형 SPND로 중성자 조사량을 감시하는데 SPND 신호의 시간 지연 특성으로 인하여 조사량 결정에 약간의 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 SPND 검출기 신호를 동적으로 보상하여 실시간으로 중성자속을 측정하는 알고리즘과 프로그램을 개발하였으며 실험으로 성능이 우수함을 확인하였다.

## Abstract

The neutron flux reconstruction method in real time from the SPND signal was developed for the service of NTD in the HANARO research reactor. The homogeneity and accuracy of the resistivity are the most important for the NTD quality. At HANARO, the irradiation is monitored by two rhodium SPNDs, but their delayed signal would cause some error in the determination of dose. In this study, an algorithm for the reconstruction of neutron flux in real time from the SPND signal is developed system and its excellent performance is verified by experiment.

### 1. 서 론

하나로 NTD 장치에서 중성자 조사량을 정확히 제어하기 위하여 조사공에 자기 출력형 중성자 계측기(SPND: self-powered neutron detector)를 설치하여 사용한다. 이것은 Rhodium103을 에미터로 하는 것으로서 반감기가 길어 중성자속이 변할 경우에 계측기 신호는 상당히 느리게 반응을 나타낸다.<sup>1)</sup>

조사를 위하여 시료 조사통이 조사공에 들어가거나 나올때는 조사통의 물리적 위치와 특성에 따라 SPND 즉 조사통 주위의 중성자 속이 변화하는데, SPND의 신호는 실제 중성자속 변화를 나타내지 못하고 그림 1과 같이 시간 지연 특성을 나타낸다. 이러한 현상은 원자로 출력이 변할 경우에도 나타난다.

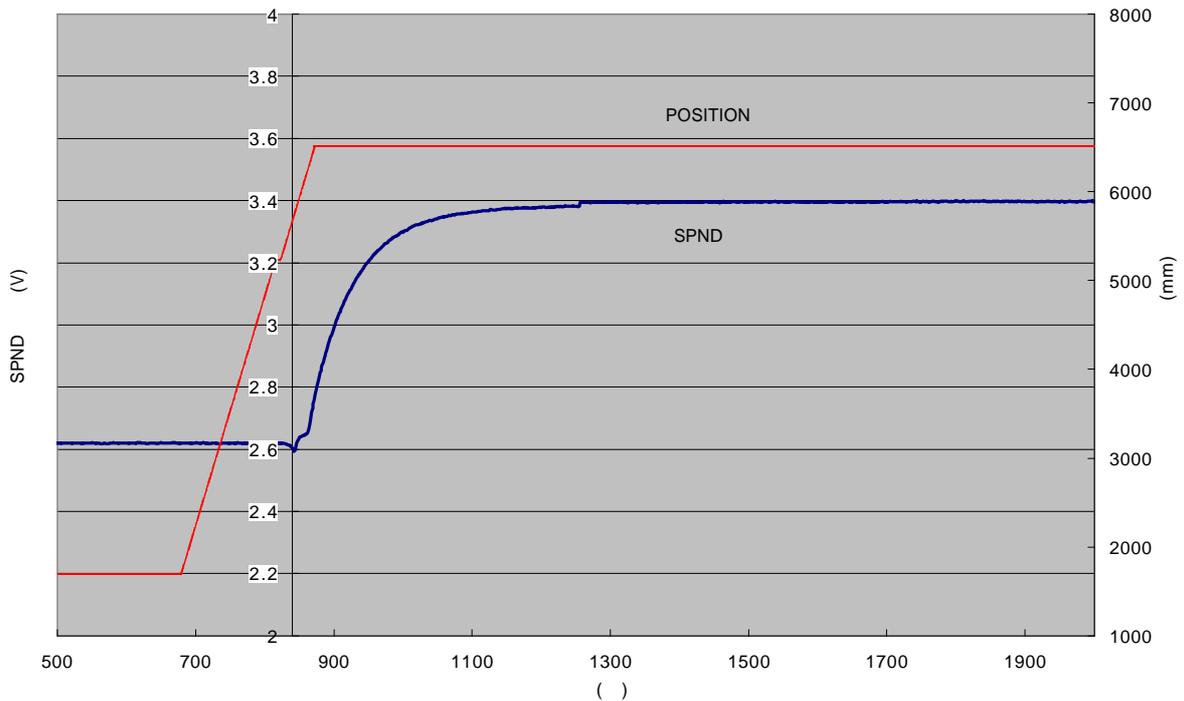


그림 1 NTD 조사통 삽입시의 SPND 신호 변화

따라서 정확한 조사량을 알기 위하여는 SPND 신호로부터 중성자 신호를 정확하게 재현하고, 이 값과 실제 시료가 받은 누적 중성자 조사량과의 관계를 고려하여야 한다. 실제 조사량과 SPND를 이용한 측정값과의 상관 관계는 시료에 부착한 방사화 시료의 방사능을 측정된 값과 시료의 비저항 값을 측정함으로써 파악된다. 그러나 방사화 방법과 비저항 측정은 결과 검증용으로서 실시간 제어에는 사용할 수가 없다. 로듐형의 SPND 신호로부터 중성자속을 재현하는 기술은 오래전부터 개발되어 왔고, 발전로의 노내 계측기로부터 중성자속 분포를 알아내는데도 이용되고 있다.<sup>2)3)</sup>

하나로 NTD에서의 SPND 신호의 시간 지연을 보상하기 위하여 알고리즘을 개발하였다.4) 이것은 참고문헌 2) 의 Direct Inversion 방법과 Kalman Filter 법을 장점을 도입 하되 실시간 처리가 쉬운 직관적인 개념의 알고리즘이다.

## 2. 본론

## 2.1 알고리즘

시간 지연이 있는 SPND 신호로부터 중성자속을 실시간으로 재현하기 위하여 개발된 알고리즘은 다음 그림 2와 같은 Rh-103의 붕괴현상을 고려하여 전개 되었다.

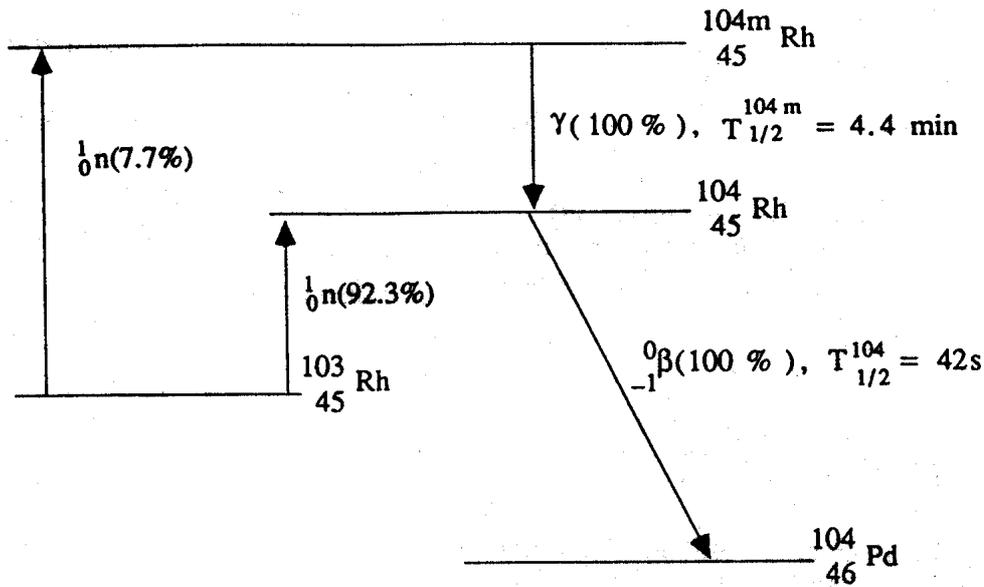


그림 2 RH-103 붕괴

$\tau dt$ 에 Rh-103(n, $\nu$ )Rh-104로 생겨나는 Rh-104는  $k \mathcal{A}(\tau) dt$ 이며, 이것이 붕괴하여  $t$ 에 남아 있는 양은  $k \phi(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau$ 이다. 따라서 이 반응으로 생겨서  $t$ 에 남아 있는 모든 Rh-104의 방사능은  $k \lambda \int_{-\infty}^t \phi(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau$ 이다. 이것은 다음과 같이 이 반응만 고려한 평형 식에서도 쉽게 구할 수 있다.

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = k \phi(t) - \lambda N_2(t) \quad (1)$$

여기서  $N_2$ 는 Rh-103(n, $\nu$ )Rh-104 반응으로만 생기는 Rh-104이다.

마찬가지로  $\tau dt$ 에 발생한 Rh-103(n, $\nu$ )Rh-104m 반응으로 인하여 남아 있는 Rh-104를 구할 수 있으면 [이것을  $k_m \mathcal{A}(\tau) n(\tau \rightarrow t)$ 라 하자], 이의 방사능은  $\lambda k_m \int_{-\infty}^t \phi(\tau) n(\tau \rightarrow t) d\tau$ 이다.  $n(\tau \rightarrow t)$ 를 구하기 위하여  $t = 0$ 에 한 개의 Rh-104m이 생겼을 때 이로 인한 Rh-104를 구

해본다. Rh-104m은 단순히 붕괴만 하므로  $e^{-\lambda_m t}$ 로 변한다. 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{dn}{dt} = n_m \lambda_m - n \lambda \quad (2)$$

여기서  $n_m(t) = e^{-\lambda_m t}$ 이므로 이를 위 식에 대입하여 풀면,

$$n(t) = \frac{\lambda_m}{\lambda - \lambda_m} (e^{-\lambda_m t} - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

따라서 Rh-104m으로 인한 기여분은  $\frac{\lambda k_m \lambda_m}{\lambda - \lambda_m} \int_{-\infty}^t \phi(\tau) (e^{-\lambda_m t} - e^{-\lambda \tau}) d\tau$ 이다. 감마에 의한 즉발 기여분은  $k_p \psi(t)$ 이다.

SPND의 신호는 이상의 3가지 기여분을 모두 더한 것이다.

$$I(t) = k_p \phi(t) + k \lambda \int_{-\infty}^t \phi(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau + \frac{k_m \lambda \lambda_m}{\lambda - \lambda_m} \int_{-\infty}^t \phi(\tau) (e^{-\lambda_m(t-\tau)} - e^{-\lambda(t-\tau)}) d\tau \quad (4)$$

평형 상태(steady state)에서는 다음과 같은 조건이 만족된다.

$$I_0 = (k_p + k + k_m) \phi_0 = \phi_0 \quad (5)$$

식 (7)은 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$I(t) = k_p \phi(t) + KA(t) + K_m B(t) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } K = k - \frac{k_m \lambda_m}{\lambda - \lambda_m}, \quad (7)$$

$$A(t) = \lambda \int_{-\infty}^t \phi(\tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau, \quad (8)$$

$$K_m = \frac{k_m \lambda}{\lambda - \lambda_m}, \quad (9)$$

$$B(t) = \lambda_m \int_{-\infty}^t \phi(\tau) e^{-\lambda_m(t-\tau)} d\tau \quad (10)$$

다음 계산 시점인  $t+\Delta$ 에는 다음과 같다.

$$I(t+\Delta) = k_p \phi(t+\Delta) + KA(t+\Delta) + K_m B(t+\Delta) \quad (11)$$

$t$ 와  $t+\Delta$ 사이에 중성자속이 직선적으로 변한다고 가정한다.

$$\psi(t+x) = \psi(t) (1 + \alpha x), \quad 0 \leq x \leq \Delta \quad (12)$$

지수 함수적으로 변한다고 가정할 수도 있으나, 나중에  $\alpha$ 에 대한 식이 비선형이어서  $\alpha$  계산이 어렵다.

$$\begin{aligned} A(t+\Delta) &= A(t) e^{-\lambda \Delta} + \lambda \int_t^{t+\Delta} \phi(\tau) e^{-\lambda(t+\Delta-\tau)} d\tau \\ &= A(t) e^{-\lambda \Delta} + \phi(t) (1 - e^{-\lambda \Delta}) (1 + \frac{\alpha}{1 - \lambda}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
B(t+\Delta) &= B(t)e^{-\lambda_m \Delta} + \lambda_m \int_t^{t+\Delta} \phi(\tau) e^{-\lambda_m(t+\Delta-\tau)} d\tau \\
&= B(t)e^{-\lambda_m \Delta} + \phi(t)(1-e^{-\lambda_m \Delta}) \left(1 + \frac{\alpha}{1-\lambda_m}\right)
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\alpha = \frac{C}{D}$$

$$\begin{aligned}
C &= I(t+\Delta) - k_p \phi(t) - KA(t)e^{-\lambda \Delta} - K_m B(t)e^{-\lambda_m \Delta} \\
&\quad - \phi(t)[K(1-e^{-\lambda \Delta}) + K_m(1-e^{-\lambda_m \Delta})]
\end{aligned} \tag{15}$$

$$D = \phi(t) \left[ k_p \Delta + \frac{K(1-e^{-\lambda \Delta})}{1-\lambda} + \frac{K_m(1-e^{-\lambda_m \Delta})}{1-\lambda_m} \right] \tag{16}$$

이상의 식을 써서 중성자속 변화에 따른 SPND의 신호를 구할 수도 있고, SPND의 신호로서 중성자속을 구할 수도 있다. 초기 조건은 다음과 같다.

$$I_0 = A_0 = B_0 = \phi_0 \tag{17}$$

중성자속으로  $I$ 를 구할 때는 식 (12)를 써서  $\alpha$ 를 구하고, 식 (13)과 (14)에 대입하여  $A$ 와  $B$ 를 구한 뒤, 식 (11)를 써서 쉽게 구할 수 있다.

$I$ 로부터 중성자속을 구할 때는 식 (15)와 (16)를 써서  $\alpha$ 를 구하여 식 (12)에 대입하면 된다. 그리고  $C$ 와  $D$ 를 계속 계산할 수 있도록 식 (13)과 (14)을 써서  $A$ 와  $B$ 를 구해두면 된다. 이상의 경과를 평형식으로부터 해석적으로도 입증되었다. <sup>5)</sup>

## 2.2 하나로에 적용

알고리즘의 정확성을 검증하기 위하여 하나로 원자로의 출력 감발시에 적용하였다. 원자로 정지시에 원자로 제어계에 사용되는 중성자 출력 감시기의 출력과 Rh-SPND 신호를 취득하여 보상한 신호를 비교하였다. 그림 3에 나타난 결과는 원자로 출력 변화를 실시간으로 나타내고 있음을 알 수 있다.

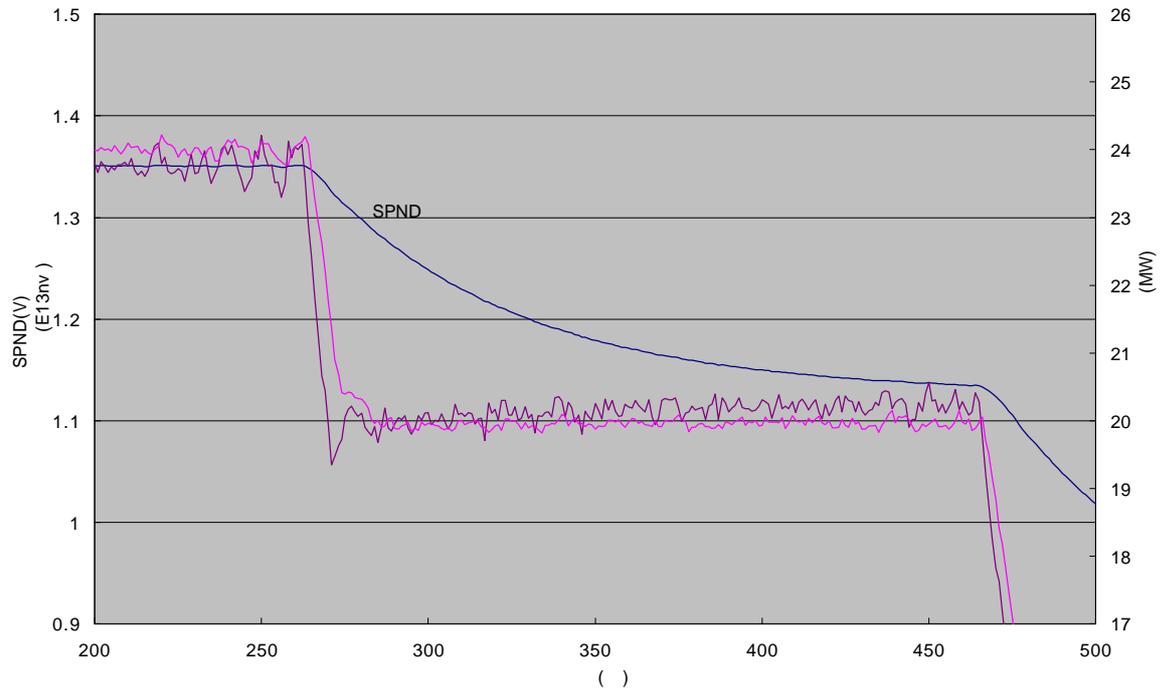


그림 3 원자로 정지시의 실험 결과

그리고 하나로의 NTD#2 조사공에 시료를 장전하면서 실험한 결과도 그림 4와 같이 양호한 결과를 나타내었다. 또한 SPND를 측정할 값과 방사화 시료를 부착하여 실험한 값과도 일관성 있는 관계를 나타내어 실제 NTD 조사에 활용이 가능함을 확인하였다.

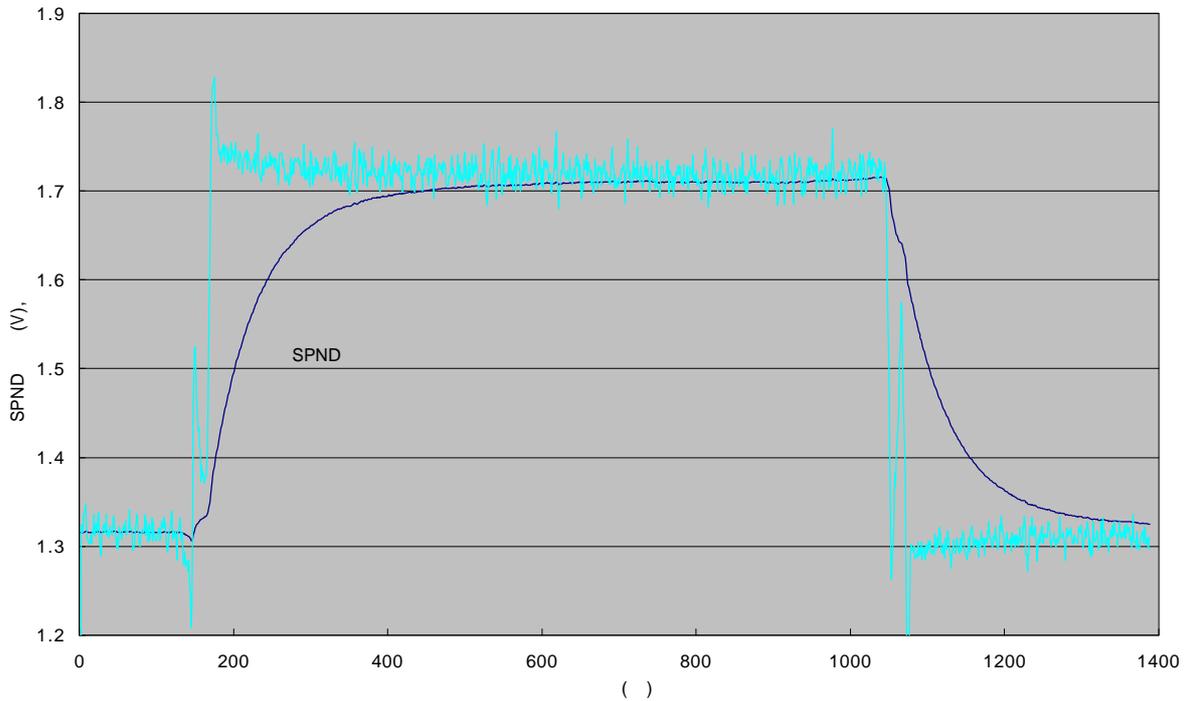


그림 4 NTD 조사시의 실험 결과

### 3. 결론

하나로에서의 NTD 서비스를 위하여, 실리콘의 중성자 조사량을 실시간으로 측정하는 알고리즘과 프로그램을 개발하였다. 여러 가지 개발된 알고리즘보다 쉽게 적용이 가능하며 실험 결과 성능이 양호함이 확인되었다. 이 결과를 바탕으로 실제 장치에 적용함으로써 양질의 NTD 조사 서비스를 하고 있다.

### 4. 참고 문헌

- 1) 정환성, 하나로 NTD 구동장치 개발, KAERI/TR-2272/2002, KAERI, 2002.9.
- 2) Geun-Sun Auh, Dynamic compensation methods for self-powered neutron detectors, Nucl. Sci. Eng., 118, 186-193 (1994)
- 3) L. Vermeeren, Absolute on-line in-pile measurement of neutron and gamma fluxes using self-powered detectors: Monte Carlo sensitivity calculations, EHPG Meeting, Lillehammer, March 11-16, 2001.
- 4) 전병진, SPND 신호 분석, HAN-RO-CR-441-02-052, 하나로 내부 통신문, 2002.12.16.
- 5) 전병진, SPND 신호 분석 논리 확인, HAN-RO-CR-441-02-053, 하나로 내부 통신문, 2002.12.21.