

## 하나로 1차 배관의 중성자 발생원 분석

김명섭, 홍광표, 진병진  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

하나로 1차 배관에서 중성자를 측정하고 발생 원인을 분석하였으며, 이를 통하여 중성자 계측 계통을 이용하여 핵연료 파손을 감시할 수 있는 가능성을 검토하였다. 중성자 측정에는 BF<sub>3</sub> 비례 계수관을 이용하였고, 1차 배관의 주 방사선원인 N-16에 의한 감마선 펄스의 영향은 무시할 정도로 작았다. 중성자의 발생 원인을 규명하기 위해 원자로 정지 전후에 중성자 계수율의 변화를 측정하였다. 원자로의 정상 운전시 1차 배관에서 발생하는 중성자는 물속의 중수소가 고에너지 감마선을 흡수하여 방출하는 광중성자와 핵연료의 표면 오염에 의해 발생된 지발 중성자라고 가정하여 원자로 정지 전후의 발생량 변화를 계산하였다. 계산 결과와 측정값을 비교하여 1차 배관 주변에서 측정된 중성자 가운데 지발 중성자가 약 70 %, N-16에 의한 광중성자가 약 30 %임을 확인하였다. 핵연료의 표면 오염 정도로 발생하는 지발 중성자도 민감하게 측정되므로, 이러한 지발 중성자 계측법이 핵연료의 손상 여부를 알아낼 수 있는 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.

### 1. 서 론

하나로(HANARO)와 같은 연구용 원자로에서 핵연료의 파손이나 비정상적인 방사능 유출을 감시하기 위해 주로 사용하는 방법은 1차 배관 냉각수의 방사선 준위를 감시하는 것이다. 정상적인 원자로 운전시 1차 배관 내의 방사선원은 냉각수 자체 및 냉각수에 포함된 불순물들의 중성자 방사화에 의한 것과 방사화된 노심 구조 물질이 냉각수에 녹아난 방사선원에 의한 것으로 나눌 수 있다. 이 중에서 1차 배관에서 가장 큰 몫을 차지하는 것은 N-16으로부터 방출되는 6~7 MeV 감마선이다. 하나로에서는 1차 배관내의 감마선을 감시하여 N-16으로부터 방출되는 감마선 외에 핵분열 생성물에서 발생하는 감마선의 포함 여부로 핵연료의 파손을 알아낼 수 있는 핵

연료 파손 감시기(FFDS : Failed Fuel Detection System)를 1차 배관에 설치하여 운용하고 있다. 이러한 감마선을 감시하는 FFDS 계통 외에 핵연료의 파손을 알아낼 수 있는 또 다른 방법은 1차 배관의 중성자를 계측하여 비정상적인 상태에서 방출되는 지발 중성자(Delayed neutron)를 감시하는 방법이다[1]. 어느 방법이든 비정상적인 상황을 민감하게 계측하기 위해서는 정상 상태에서의 측정값이 비정상 상태에서의 값보다 충분히 낮아야 한다. 지발 중성자 측정의 경우에는 정상적인 원자로 운전 중 1차 배관에서 발생하는 중성자의 준위와 그 발생 원인을 확인하여 비정상적인 상태에서 방출되는 지발 중성자를 즉각 검출해 낼 수 있는지를 판단해야 한다. 따라서 본 연구에서는 하나로 1차 배관의 중성자를 계측하고 계측된 중성자의 발생 원인을 분석하였으며, 이를 통하여 중성자 계측 계통을 이용하여 핵연료 파손 및 비정상적인 방사선 유출을 감시할 수 있는 가능성을 검토하였다.

## 2. 실험

본 연구에서 사용된 중성자 계측기는 CENTRONIC사에서 제작한 BF<sub>3</sub> 비례 계수관이며, 계측기의 주요 제원은 표 1과 같다. 중성자 계측 계통은 그림 1과 같고, 원자로가 20 MW로 정상 운전하고 있는 동안 측정된 중성자 스펙트럼은 그림 2와 같다. 중성자 계수율의 측정은 SCA를 이용하여 수행하였으며, 그림 2의 스펙트럼에서 알 수 있는 바와 같이 감마선 펄스 및 잡음이 섞여 있는 영역과 중성자 펄스 영역의 구분이 명확하므로 SCA의 discriminator level을 적절히 결정하여 중성자 계수율을 측정하였다.

1차 배관의 주 방사선원인 N-16으로부터 발생하는 6.13, 7.12 MeV의 감마선이 중성자 펄스 영역에 계측될 가능성이 있다. 이를 확인하기 위해 계측기를 납이나 카드뮴으로 차폐한 후 SCA 계수율의 변화를 관찰한 결과, discriminator level 이상에서 감마선에 의한 펄스의 영향은 무시할 수준임을 확인하였다. 계측된 중성자의 발생 원인을 규명하기 위해 원자로 정지 전후에 중성자 계수율의 변화를 측정하였다. 출력 변화와 중성자 계수율의 변화를 동시에 측정하기 위하여 두 개의 CIC(Compensated ion chamber)와 두 개의 BF<sub>3</sub> 계측기를 함께 이용하였다.

표 1. BF<sub>3</sub> 계측기의 주요 제원.

모델명	12EB20/25 (CENTRONIC)
감도(cps/nv)	1.5
인가 전압(V)	1200
튜브 용량(pF)	3.7
직경(mm)	25
길이(mm)	210
반응 영역(mm)	120

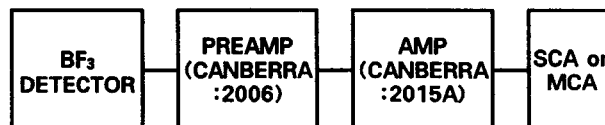


그림 1. 1차 배관 중성자 계측 계통.

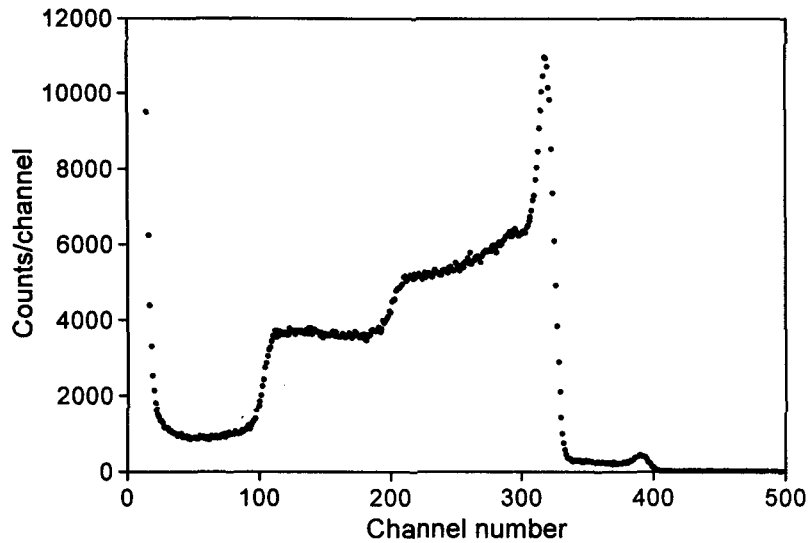


그림 2. BF<sub>3</sub> 계측기를 이용하여 측정된 하나로 1차 배관의 중성자 스펙트럼.

BF<sub>3</sub> 계측기는 1차 배관의 노심 출구관과 입구관에 각각 1개 씩 설치하였으며, 관의 외면에서 검출기까지의 거리는 5 cm로 하였다. 또한 입구관 또는 출구관에서 발생된 중성자가 다른 쪽 관에 설치된 계측기에 검출되는 수를 줄이기 위해 카드뮴 판으로 서로를 차폐하였다.

### 3. 결과 및 분석

원자로의 정상 운전시 1차 배관에서 발생되는 중성자는 냉각수 또는 주변 콘크리트에 존재하는 중수소가 고에너지 감마선을 흡수하여 방출하는 광중성자와 핵연료 표면에 오염된 우라늄의 핵분열로 생긴 지발 중성자[2,3]로 가정하여 원자로 정지 전후의 발생량 변화를 계산하였다. 정상 운전 상태에서 중양자의 결합 에너지 2.225 MeV보다 큰 에너지의 감마선을 방출하는 선원으로는 N-16과 Na-24가 있으나, Na-24가 차지하는 비율은 N-16에 비하여 무시할 수 있는 것으로 확인되었다[4]. 따라서 원자로 정지후 광중성자 수의 시간에 따른 변화는 N-16으로부터 발생되는 감마선 수의 변화와 동일할 것으로 예상되며, 아래와 같이 구할 수 있다.

노심에서 N-16이 발생하는 율을  $G$ , 노심으로 들어오는 물의 비방사능(specific activity)을  $N_i$ 라 하면, 노심 출구에서 N-16의 비방사능  $N_0$ 는,

$$N_0(t) = G(t) + N_i(t) \quad (1)$$

이 된다. 냉각수의 노심 통과 시간은 약 0.1 초로 매우 짧기 때문에 이 사이에 N-16이 붕괴하

는 것은 무시하였다. 1차 냉각수의 배관 순환 시간을  $T_l$  (21.27 초)이라 하면,  $N_i$ 는

$$N_i(t) = \frac{M}{(M+m)} N_0(t - T_l) \exp(-\lambda T_l) \quad (2)$$

이 되고, 여기서,  $\lambda$ 는 N-16의 붕괴 상수,  $M$ 은 노심 유량,  $m$ 은 우회 유량이다. 노심에서 나온 냉각수가 계측기 위치에 도달하는 시간을  $T_d$ , 이곳에서의 방사능을  $N$ 이라 하면,

$$N(t) = N_0(t - T_d) \exp(-\lambda T_d) \quad (3)$$

이 된다. 또한 핵연료 표면 오염에 의해 발생하는 지발 중성자의 경우에도 마찬가지로 서로 다른 반감기를 갖는 모핵종의 농도를 구하여 중성자 생성율을 계산하고 이를 모두 더하면 지발 중성자의 시간에 따른 발생량을 구할 수 있다.

위와 같은 방법으로 계산한 결과와 측정 결과는 그림 3과 같다. 계산 결과가 급격한 계단식 변화를 보이는 것은 모든 냉각수가 혼합되지 않고 일정한 속도로 1차 배관 내를 이동한다고 가정하였기 때문이며, 계단의 주기는 냉각수가 배관을 도는 21.4 초와 동일하다. 측정 결과 중 원자로 출력 변화를 나타내는 CIC 출력은 CIC가 하나로 중수 반사체 바로 바깥에 있으므로 원자로 출력 변화를 즉각 나타내지만,  $\text{BF}_3$  검출기 계수율은 정지 후 약 4 초 뒤에 급격히 낮아졌으며, 이 시간은 냉각수가 계측기 위치에 도달하는 시간과 일치한다.  $\text{BF}_3$  검출기의 계수율이 원자로 정지 직후에 감소하는 정도는 원자로 출력 감소에 비하여 매우 작지만, prompt jump 이후의 변화 경향은 원자로 출력 변화와 유사하다. 그림 3으로부터 원자로 정지 후 광중성자는 지발 중성자보다 급격하게 감소하고 있으며, 측정값은 두 계산 결과의 사이에 있음을 알 수 있다. 따라서 이 두 가지의 중성자 발생원이 기여하는 비율과 입, 출구관에서 발생하는 중성자의 기여 비율을 적절하게 구하여 이들의 합과 측정값을 비교하면 각 중성자 발생 원인의 기여 정도를 구할 수 있다.

그림 4는 이렇게 예측한 것을 측정 결과와 비교한 것으로, 계산으로 예측한 결과가 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 노심 출구관에 설치한 계측기의 경우, 출구관의 영향을 98 %, 입구관의 영향을 2 %로 하여 계산하였고, 광중성자가 30 %, 지발 중성자가 70 %를 기여한다고 가정했으며, 입구관에 설치한 계측기의 경우에는 입, 출구 배관의 영향을 각각 50 %로 하고, 광중성자가 20 %, 지발 중성자가 70 %를 기여한다고 가정하여 계산하였다. 노심 입구관에서 광중성자의 기여도가 작은 것은 N-16이 지발 중성자 모핵종보다 빨리 붕괴하기 때문이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 원자로 정지 후 첫 단계에서 감소되는 정도는 광중성자와 지발 중성자 사이에 큰 차이가 없다. 따라서 원자로 정지 후 첫 단계의 감소량은 입, 출구 배관의 비율에 민감하였다. 반면, 그 이후의 값은 광중성자와 지발 중성자의 비율에 따라 결정되었다. 이로써 계측에 광중성자가 미치는 영향은 지발 중성자보다 크지 않음을 확인할 수 있었다. 핵연료 손상을 예민하게 알

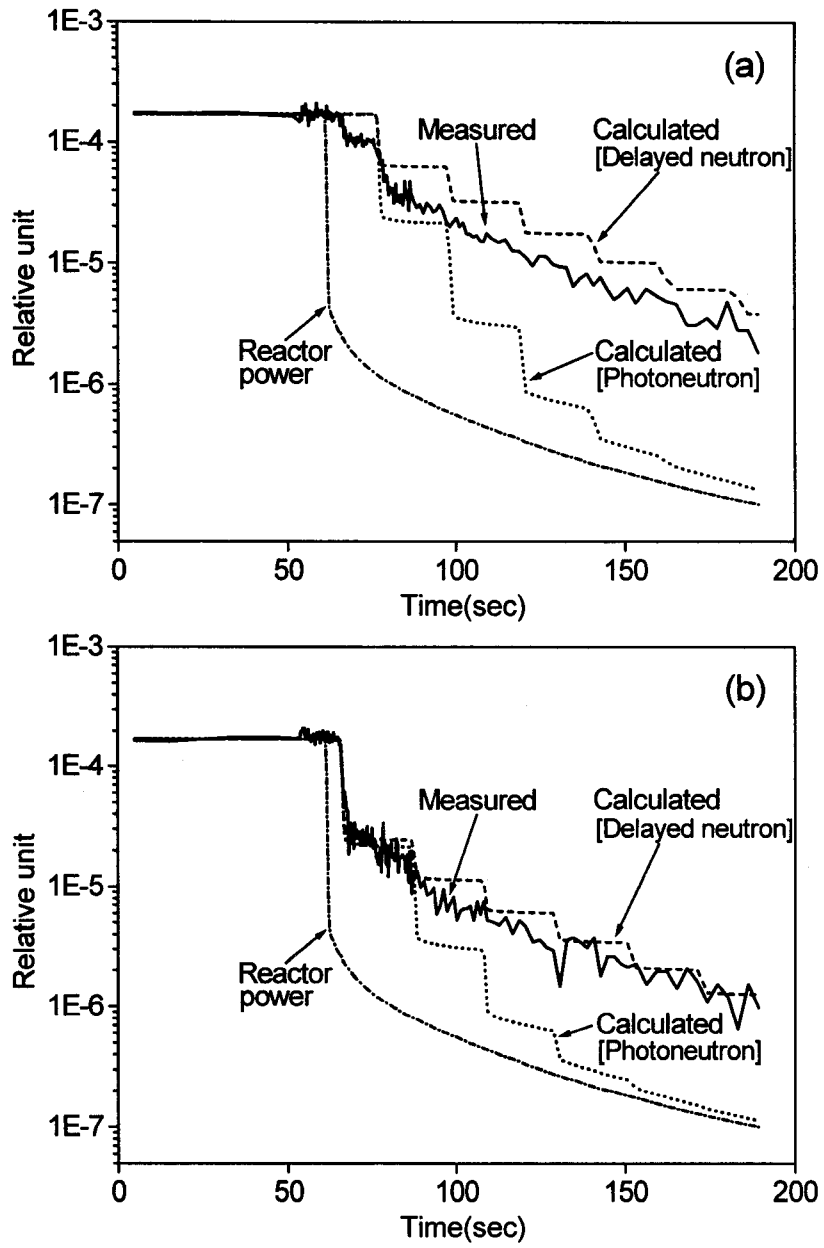


그림 3. 원자로 정지 전후의 노심 입구관(a) 및 출구관(b)에서의 중성자 측정 결과와 광중성자 및 지발 중성자 수의 변화 계산 결과.

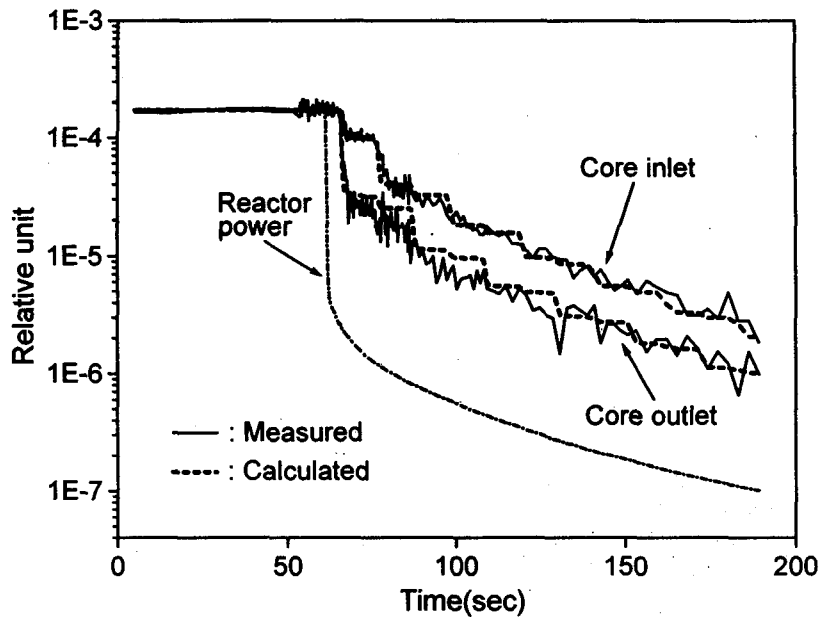


그림 4. 노심 입, 출구관에서의 중성자 측정 결과와 계산 결과.

아내는데 방해 요인이 되는 광중성자의 비율이 작고, 핵연료의 표면 오염 정도로 발생하는 지발 중성자도 민감하게 측정하므로, 이러한 지발 중성자 계측법이 핵연료의 손상을 알아낼 수 있는 유용한 방법임을 확인할 수 있다. 현재 광중성자와 지발 중성자 발생량의 절대값을 계산하는 연구를 수행중이므로 각 기여량에 대한 보다 정밀한 자료를 구할 수 있을 것이라 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 하나로 1차 배관 주변의 고에너지 및 고준위 감마장내에서 특별한 감마 차폐 없이 중성자를 측정할 수 있었으며, 중성자 발생원의 분석 결과 1차 배관 주변의 중성자 가운데 지발 중성자가 약 70%, N-16에 의한 광중성자가 약 30%임을 확인하였다. 이로써 지발 중성자 계측법이 핵연료 손상을 민감하게 알아낼 수 있는 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. S.K. Ayazuddin, T. Hayat, A.A. Qureshi and H.A. Khan, Ann. Nucl. Energy, Vol. 24, No. 15, p.1213, 1997.
2. 전병진, "연료봉 표면의 우라늄 오염 측정", HAN-RO-CR-97-020, 1997. 5.12.
3. 박상준, "KFC-020 표면 오염 검사 결과", HAN-RO-CR-97-040, 1997. 9.12.
4. 이충성, "RRS 정지후 1차 고방사능 분석", HAN-RT-CR-96-083, 1996.11.11.