

'98 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

몬테카를로 방법을 이용한 하나로 1차 배관에서의 중성자 발생량 계산

Calculation of the Neutron Generation at Primary Cooling Circuit of HANARO Using Monte Carlo Method

김명섭, 전병진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 1차 배관에서 발생하는 중성자의 발생 원인을 분석하였으며, 몬테카를로 방법을 사용하여 중성자 발생량을 계산하였다. 원자로의 정상 운전시 1차 배관에서 발생하는 중성자는 고에너지 감마선에 의해 자연 존재비의 중수소에서 방출하는 광중성자와 핵연료 표면 오염에 의해 발생하는 지발 중성자로 가정하였다. N-16에서 나오는 고에너지 감마선과 이 감마선에 의해 생성된 광중성자 그리고 지발 중성자의 발생과 수송을 모사하였으며, 검출 영역에서의 광중성자와 지발 중성자 계수율을 계산하였다. 광중성자 계산값은 전체 중성자 측정값의 13.91 %로 예상되었다. 또한 지발 중성자의 수송 계산을 통해 냉각수에 노출되어 있는 우라늄의 양을 예측할 수 있었다.

Abstract

The neutron source at primary cooling circuit of HANARO is analysed and the neutron generation rate is calculated by Monte Carlo method. In normal operation of the reactor, the neutrons at the primary cooling circuit are assumed as the photoneutrons from natural abundance deuterons by high energy gamma rays and delayed neutrons by fuel surface contamination. The processes of generations and transportations of high energy gamma rays from N-16, its photoneutrons and delayed neutrons, are simulated, and each neutron count rate at the detector position is calculated. The calculated count rate of the detected photoneutron is 13.91 % of the whole measured count rate. The amount of uranium exposed to the coolant in the core is also estimated by the delayed neutron transport calculation.

1. 서 론

하나로(HANARO)에서는 1차 배관의 지발 중성자를 계측하여 핵연료의 파손을 감시하는 방법을 검토해 왔다. 이러한 지발 중성자 계측법이 유용하기 위해서는 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. 이전 연구에서는 원자로 정지 전후에 1차 배관 중성자를 시간에 따라 계측하여 중성자의 발생 원인을 분석한 바 있다[1]. 본 연구에서는 이러한 분석의 신뢰성을 확보하고, 핵연료 파손 검출 감도를 추정하기 위해 몬테카를로 방법으로 중성자 계수율을 예상하였다. 중성자와 감마선 수송 계산에 MCNP를 비롯한 많은 몬테카를로 코드들이 사용되고 있는데, 이러한 코드로 (γ, n) 반응에 의한 광중성자의 수송을 계산하기 위해서는 수정이 필요하다. EGS4 코드에서는 (γ, n) 중성자 생성을까지 계산하는 수정 작업이 있었고[2], MCNP 코드에 대해서는 광자-중성자 연계 수송 계산을 위한 수정 작업이 진행되고 있다[3]. 본 연구에서는 1차 배관 주변 구조를 단순화하여 이 구조에만 적용할 수 있는 몬테카를로 프로그램을 작성하여 광자-중성자 연계 수송 계산을 하였으며, 앞으로 MCNP 등의 계산 결과와의 비교를 통해 본 분석의 신뢰성을 지속적으로 검토할 계획이다.

2. 계산 Geometry

본 몬테카를로 계산에서는 1차 배관이 10 cm의 납, 7 cm의 폴리에틸렌, 다시 10 cm의 납, 배관 중심으로부터 100 cm 떨어진 지점에 무한 두께의 콘크리트가 둘러싸고 있다고 가정하고 수송 계산을 수행하였다. 첫 번째 납 층과 반사체인 폴리에틸렌 사이에는 검출 영역을 두어 이 검출 영역에서의 중성자속을 구하였으며, 계측기의 효율을 고려하여 중성자 측정 계수율을 추정하였다. 검출기가 바라보는 1차 배관의 길이는 700 cm로, 반경은 16.51 cm로 하였으며, 배관의 두께는 무시하였다. 검출기는 원자로 정지 전후의 1차 배관 중성자 계측 실험에 사용하였던 직경 25 mm, 반응 영역의 길이 12 cm, 효율이 1.5 cps/nv인 BF₃ 검출기로 하였다.

3. 광중성자 수송 계산 과정

하나로 1차 배관에서 발생하는 감마선의 주원인은 $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ 반응이며, 이 반응의 Fission spectrum에 대한 평균 단면적은 1.9×10^{-5} barn이다[4]. 반응의 결과 생성된 N-16의 붕괴 반감기는 7.1초이며, 발생된 감마선의 에너지는 6.13(69%), 7.12(5%) MeV이다. 노심내의 중성자속이 Φ_{av} , 평균 macroscopic 방사화 단면적이 Σ_{act} 이고, 냉각수가 노심을 통과하는 시간이 t_i , 1차 배관 loop를 통과하는 시간이 t_o 일 때 노심 출구에서 N-16의 포화 activity는

$$A = \frac{\Sigma_{act} \Phi_{av} (1 - e^{-\lambda t_i})}{1 - e^{-\lambda(t_i + t_o)}} \quad (1)$$

가 된다. 여기서 λ 는 N-16의 붕괴 상수이다. 노심 중성자속은 20 MW 운전시 1.61×10^{14} 개/cm²sec로 계산되었다[4]. 노심내에서 냉각수가 지나가는 통로인 유동관과 갭의 유량비를 고려하여 노심 출구에서 N-16의 포화 activity를 계산하면 2.57×10^7 disintegrations/cm³sec가 된다.

감마선의 생성 위치와 에너지, 발생 방향 등은 난수를 이용하여 결정하였으며, 본 계산에서 사용한 난수는 회귀(Recurrence) 방정식으로부터 구하였고[5], 주기는 $2^{31} - 2 = 2.1 \times 10^9$ 이다.

1차 배관 내의 임의의 지점에서 발생된 감마선이 배관 표면까지 진행하면서 반응 지점까지 이동한 거리 t 는 감마선의 Total macroscopic cross-section이 Σ_t 이고, R이 난수이면

$$t = -\frac{1}{\Sigma_t} \ln R \quad (2)$$

이 된다. 만일 t 가 감마선 발생 지점과 배관 표면까지의 거리 보다 크면 이 감마선은 배관 바깥으로 빠져나간 것이 되며, 작으면 배관내에서 감마선 반응이 일어남을 의미한다. 감마선 반응 가운데 광전효과는 무시하였다. 배관내에서 반응이 일어난 경우, Compton 산란과 쌍생성 단면적의 비율을 이용하여 반응의 종류를 결정하였고, 반응이 쌍생성이면 감마선 수송은 중지되었으며, 반응 지점까지 발생된 중성자의 수송 계산만 수행된다. 반응이 Compton 산란이면 산란후의 감마선 에너지, 방향 벡터 등을 결정하였고, 산란후의 감마선 에너지가 2.225 MeV 이하이면 감마선 수송은 중지된다. Compton 산란 후의 감마선 각도 분포는 Klein-Nishina 식을 사용하였다. 이후의 계산은 반응 지점에서 배관 표면까지의 거리를 계산하는 단계부터 다시 시작하게 된다. 배관 밖으로 나온 감마선은 배관 중심으로부터 100 cm 떨어진 콘크리트에 입사하여 배관내서와 마찬가지로 수송되며, 에너지가 2.225 MeV 이하가 되면 loop가 정지한다. 광자 반응의 단면적은 NIST의 Photon Cross Section Database의 자료를 이용하였다[6].

광중성자는 중수가 존재하는 매질내에서 감마선이 진행하는 경로 상의 임의의 지점에서 발생할 수 있으며, 단위 부피당 광중성자 발생 수 N은

$$N = S \times d \times N_{D2O} \times \sigma \quad (3)$$

이 된다. 여기서 d 는 감마선의 매질내의 진행 거리이며, S 는 단위 부피당 감마선 발생 수, N_{D2O} 는 중수의 수밀도이고, σ 는 광중성자 생성 단면적이다[7,8]. 발생된 중성자의 에너지는 에너지와 운동량 보존 법칙으로부터 구할 수 있고, 발생된 중성자의 각도 분포는 등방적이라고 가정하였다.

이렇게 발생된 중성자의 배관 내부에서의 수송은 감마선 수송 때와 마찬가지로 방법으로 수행하며, 중성자가 흡수된 경우에는 loop가 정지되고, 탄성 산란한 경우에는 에너지가 감소하고, 방향 벡터가 달라진 채로 계속 수송된다. 계산에서 표적 핵의 운동과 비탄성 산란은 무시하였고, 탄성 산란은 질량 중심계에서 등방적으로 일어난다고 가정하였다[9]. 본 계산에 사용된 중성자의 반응

단면적은 ENDF/B-6.1 Data[10]를 사용하였다. 등방적 탄성 산란의 경우 E_0 의 에너지를 가진 중성자가 핵자수 A 인 표적 핵과 충돌하여 에너지 E 위치의 미소 에너지 간격 dE 내로 산란될 확률은

$$P(E)dE = \frac{1}{E_0(1-\alpha)} dE \quad (4)$$

이 된다. 여기서

$$\alpha = [(A-1)/(A+1)]^2 \quad (5)$$

이다. 실험실 계에서의 산란각 θ 는

$$\cos \theta = \left(\frac{A+1}{2}\right)\sqrt{\frac{E}{E_0}} - \left(\frac{A-1}{2}\right)\sqrt{\frac{E_0}{E}} \quad (6)$$

로부터 구할 수 있다. 탄성 산란 후의 중성자의 에너지 E 는 산란전의 중성자 에너지 E_0 와 산란 후 중성자가 가질 수 있는 최소 에너지 αE_0 사이의 에너지를 동일한 확률로 가질 수 있으므로 산란후 에너지 E 는

$$E = E_0[\alpha + (1-\alpha)R] \quad (7)$$

이 된다. 산란후의 Azimuthal angle, $\phi = 2 \times \pi \times R$ 이 된다. 본 계산에서는 중성자의 에너지가 10^{-5} eV 이하가 되면 loop를 정지시켰다.

배관 밖으로 나오는 중성자는 배관 표면 위의 한 점을 지나며, 이 점에서 첫 번째 납층 바깥쪽 표면까지의 거리와 납 매질에서의 첫 번째 산란 지점까지의 거리를 구한 후 두 거리를 비교하여 첫 번째 산란 지점까지의 거리가 납층 바깥쪽 표면까지의 거리보다 크면, 이 중성자는 납층을 지나 검출기 영역으로 들어오게 되고, 그렇지 않은 경우에는 납층 내부에서 산란된다. 산란된 중성자는 새로운 수송 과정을 겪게 된다. 납층을 빠져 나온 중성자는 검출 영역에서 검출되며, 중성자 검출기 효율의 에너지 의존성은 $1/v$ 법칙을 이용하여 구하였다.

폴리에틸렌 층과 두 번째 납층에서의 중성자 수송도 마찬가지로 방법으로 수행된다.

4. 지발 중성자 수송 계산

지발 중성자의 수송 과정은 광중성자의 경우와 동일하며, 생성 과정만이 다르다. 따라서 본 계

산에서는 노심내의 cc당 100000 개의 U-235 원자핵이 분열했을 때 발생하는 각 군별 지발 중성자의 수를 초기 중성자 수로 하여 수송 과정을 진행하였다. 위 지발 중성자 군 가운데 5,6군은 반감기가 매우 작으므로 무시하였다[11].

5. 결 과

반사체가 없는 경우 고에너지 감마선에 의해 발생된 광중성자의 예상 계수율은 35.13 cps로 계산되었으며, 정상 운전시 측정된 중성자 계수율, 280 cps의 12.55 %였다. 이 값은 반사체가 없는 경우 원자로 정지 전후의 중성자 계측 실험에서 예상된 비율인 30 %의 0.42배이다. 반사체가 있는 경우에는 광중성자의 예상 계수율이 125.15 cps로서 정상 운전시 측정된 중성자 계수율, 900 cps의 13.91 %이며, 반사체가 없는 경우와 유사하였다. 이러한 실험 예상값과의 차이는 실제 계측이 이루어진 기하학적 구조와 계산 배관 구조와의 차이, 검출기의 계측 효율의 불확실성, 실험 결과 평가의 불확실성 및 노심에서의 N-16 발생량 계산에서의 오차 등 여러 요인에 의한 것이라고 생각되며, MCNP 등 기하학적 구조를 쉽게 다룰 수 있는 코드를 사용하여 검증해야 할 것이다. 배관 주변의 콘크리트에서 발생된 광중성자의 비율은 작았지만 콘크리트에서도 고에너지 감마선에 의해 광중성자가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다.

노심내에 cc당 100,000 개의 U-235 원자핵이 분열했을 때 발생하는 각 군별 지발 중성자의 수를 초기 중성자 수로 하여 중성자 수송 과정을 진행한 후 지발 중성자 예상 계수율 계산하면, 반사체가 없는 경우에는 192.73 cps, 반사체가 있는 경우에는 621.89 cps로 계산되었다. 반사체를 설치하는 경우 계수율이 증가하는 비율은 광중성자와 지발 중성자가 거의 비슷하고, 실험 결과에서 전체 계수율이 증가한 비율과도 거의 같다. 지발 중성자의 예상 계수율은 실험에서 계측된 중성자 계수율 900 cps에서 위에서 구한 광중성자 계수율을 뺀 값이 된다. 따라서 지발 중성자 예상 계수율은 774.85 cps가 된다. 이 값을 이용하여 실제 원자로 운전중에 냉각수에 노출되어 있는 U-235의 핵분열 수를 계산하면 $100000 \times 774.85 / 621.89 = 124596$ 개/cc가 된다. 열중성자속 ϕ 가 1×10^{14} 개/cm²sec일 때 핵분열이 발생한 U-235의 질량은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$N_U \times \sigma_f \times \phi = N_U \times 582.2 \times 10^{-24} \times 10^{14} = 124596$$

$$N_U = 2.14 \times 10^{12} \text{ 개/cm}^3$$

$$M_U = 8.46 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$$

따라서 노심 전체에서 핵분열이 발생한 U-235의 질량은 5.33×10^{-5} g이 된다. 반사체가 있는 경우 지발 중성자 계측수에 따른 U-235의 질량수는 6.87×10^{-8} g-U²³⁵/cps가 된다.

6. 결 론

N-16으로부터 발생하는 고에너지 감마선과 이 감마선에 의해 생성된 광중성자 그리고 지발 중

성자의 발생과 수송을 모사하였으며, 검출기 위치에서의 광중성자와 지발 중성자 계수율을 계산하였다. 광중성자 계수율은 전체 중성자 측정값의 13.91 %로 예상되었다. 또한 지발 중성자의 수송 과정을 통해 냉각수 속에 녹아있는 U-235의 양을 예측할 수 있었으며, 노심 전체에 U-235 50 μ g 정도의 매우 작은 양이 녹아 있는 정도로도 약 770 cps 정도의 중성자 계수율을 얻을 수 있었다. 따라서 지발 중성자 측정법은 핵연료의 파손을 알아낼 수 있는 매우 유용한 방법이 될 수 있음을 확인하였다. 앞으로 MCNP 등의 계산 결과와의 비교를 통해 본 분석의 신뢰성을 지속적으로 검토에 나갈 계획이다.

참 고 문 헌

1. 김명섭, 홍광표, 전병진, “하나로 1차 배관의 중성자 발생원 분석”, '98춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 1998. 5.
2. 신창호, 서보균, 김종경, 김귀년, 장중화, “EGS4 코드를 이용한 물질 내에서 Photo-neutron 생성률과 에너지분포 계산”, '98춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 1998. 5.
3. 장중화, 오수열, private communication.
4. J.R. Lamarsh, “Introduction to Nuclear Engineering”, Addison-Wesley, 1983.
5. W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery, “Numerical Recipes”, Cambridge Univ. Press, 1994.
6. M.J. Berger and J.H. Hubbell, Downloading Data from INTERNET, <http://physlab.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.
7. J.M. Blatt and V.F. Weisskopf, “Theoretical Nuclear Physics”, Springer-Verlag, 1979.
8. 장중화, “중수소의 광핵분해 단면적”, NDL-18/98, 1998. 5. 8.
9. J. Wood, “Computational Methods in Reactor Shielding”, Pergamon Press, 1982.
10. Downloading Data from INTERNET, <http://hpngp01.kaeri.re.kr/CoN/endlplot.shtml>.
11. G.R. Keepin, “Physics of Nuclear Kinetics”, Addison-Wesley, 1965. - [J.R. Lamarsh, “Introduction to Nuclear Engineering”, Addison-Wesley, 1983.]에서 재인용.