

핵연료봉 출력 분포를 비파괴적으로 측정하기 위한 장치의 개발 및 새핵연료 다발  
분석

Development of an Experimental Equipment to Nondestructively Measure  
the Rod Power Distribution and Analysis with a New Fuel Assembly

서철교, 박상준, 이충성, 김학노

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

핵연료 집합체를 해체하지 않고 핵연료봉의 출력 분포를 더욱 정확하게 측정 위하여 슬릿 폭이 충분히 넓은 감마 스캐닝 장치를 만들었다. 이 장치를 이용하여 하나로 36봉 새핵연료 집합체를 감마 스캐닝하였다. 새핵연료 집합체에 대해서 측정 결과를 이용해서 계산으로 얻은 출력 분포를 보면 표준 핵연료봉과 축소 핵연료봉으로 제대로 구분되어 조립되어 있음을 핵연료 집합체를 해체하지 않고 확인할 수 있었다. 슬릿 폭이 좁은 감마 스캐닝 장치는 측정값과 계산으로 얻은 모의 측정값이 잘 일치하지 않았는데 슬릿 폭이 넓은 감마 스캐닝 장치는 서로 잘 일치하였다.

출력 분포에 대한 오차는 이전에 비하여 개선되지 않았다. 이는 측정에 사용된 새 핵연료 다발의 감마선의 에너지가 낮은 것에 기인한다. 조사된 핵연료 집합체를 사용하여 측정할 경우에는 예상되는 감마선의 에너지가 높아서 문제가 없다. 슬릿 폭이 넓은 감마 스캐닝 장치를 이용하여 조사된 핵연료 집합체를 측정하여 분석하면 충분히 정확한 핵연료봉 출력 분포를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract**

*To exactly measure the rod power distribution without disassembling is developed a gamma scanner with a wide slit enough to fully cover HANARO fuel assembly horizontally. The distribution is numerically reconstructed from the gamma-scanning result of 36-rod fuel assembly in fresh clean state using new gamma scanner. From the distribution determined from the gamma-scanning result, it is confirmed that this assembly consists of standard fuel rods and reduced fuel rods. When the gamma scanner with a narrow slit is used, the measured result and the result simulated by MCNP do not agree well. But the results with a wide slit agree well.*

*Accuracy of the distribution is not improved. The errors are caused by the fact that the gamma energy is too low. There would be no problem as the gamma energy from the irradiated assembly is high. Therefore, we are looking forward to exactly measuring the distribution using new gamma scanner and the irradiated assembly.*

## 1. 개요

핵연료봉의 출력 분포는 원자로의 안전에 매우 중요하므로 운전중 모든 노심 상태에 대해 노심 관리 계산으로 항상 평가되며 이 노심 계산의 정확성은 실험으로 입증되어야 한다. 일반적으로 핵연료 집합체에서 핵연료봉별 출력 분포를 측정하는 방법은 핵연료 집합체를 해체하여 각 핵연료봉을 감마 스캐닝하는 것이다. 이때 사용하는 핵연료는 연소가 거의 되지 않은 것으로 해체 후 재조립할 수 없는 경우는 경제적인 손실이 크다. 핵연료 집합체를 해체하지 않고 핵연료봉별 출력 분포를 알아낼 수 있다면 경제적인 이점이 있고 핵연료 집합체를 해체하고 측정하는 어려운 문제점이 없어진다. 핵연료를 해체하여 측정하는 기존의 방법은 정확성이 검증되어 표준 방법으로 이용되지만 핵연료 집합체를 해체하지 않고 핵연료봉별 출력 분포를 측정하는 방법은 아직 정확성이 검증되지 않았다.

핵연료봉별 출력 분포를 측정하기 위해서 하나로의 원자로 시운전 기간에 IMEF (Irradiation Material Experimental Facility) 핫셀의 감마 스캐닝 장치를 이용하여 핵연료 집합체를 10도 간격으로 회전하면서 감마 스캐닝하였다[1]. 이 측정을 바탕으로 분석한 결과에 의하면 핵연료 집합체를 해체하지 않고 핵연료봉별 출력 분포를 측정할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 5개의 핵연료 집합체에 대해 분석하였는데 RMSE (Root Mean Square Error)가 5.1~6.7% 였으며 최대 오차가 10.2~14.3% 였다[2].

이 방법으로 핵연료봉별 출력 분포를 얻기 위해서는 오차를 더욱 줄여야 한다. 오차를 줄이기 위한 두 가지 방안이 제시되었다[2]. 첫 번째는 핵연료봉의 실제 위치를 고려하여 각 핵연료봉에서의 감쇄 인자(Attenuation Factor)를 구하여 분석하는 것이고, 두 번째는 IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치는 슬릿(Slit)의 폭이 충분하지 않아서 오차가 발생하므로 슬릿의 폭을 충분히 넓혀 계측기가 모든 핵연료봉을 한꺼번에 쳐다 볼 수 있도록 감마 스캐닝 장치를 만드는 것이다.

IMEF 핫셀에 설치된 감마 스캐닝 장치는 감마 스캐닝을 위한 핫셀의 슬릿이 핫셀 벽에 고정되어 있기 때문에 슬릿 폭을 넓힐 수가 없었다. 따라서 슬릿 폭이 넓은 감마 스캐닝 장치를 만들어 하나로 원자로실에 설치하고 새핵연료 집합체를 사용하여 측정을 위한 계측 계통의 안정성 확인, 측정 절차의 확립, 측정 방법 개발 및 분석 방법을 연구하였다. 새핵연료는 조사되지 않았지만 우라늄의 자연 붕괴에 의해 감마선을 방출하고 있기 때문에 감마 스캐닝할 수 있다. 하나로의 36봉 핵연료 집합체는 두 가지 핵연료봉으로 구성되어 있는데 두 가지 핵연료봉의 우라늄 양이 다르기 때문에 새핵연료 집합체일지라도 감마 스캐닝 측면에서 핵연료봉 출력 분포를 가진다. 핵연료 집합체 내부의 핵연료봉은 핵연료 양이 많고 외부의 핵연료봉은 핵연료 양이 상대적으로 적기 때문에 감마 선원의 세기(출력 분포에 해당)가 다르기 때문에 검증할 수 있는 좋은 자료가 된다. 따라서 조사된 핵연료 집합체로 측정하기 이전에 새핵연료 집합체를 슬릿 폭이 넓은 감마 스캐닝 장치에서 감마 스캐닝하여 핵연료봉 출력 분포를 분석하였으며 조사된 핵연료 집합체를 이용할 경우에는 어떤 차이가 있을 것인지도 분석하였다.

## 2. 측정 이론

### 2.1 측정값과 출력 분포의 상관 관계

조사 때의 출력 분포에 비례하여 각 핵연료봉에 축적된 핵분열 물질이 감마선을 발생시키기 때문에 토모그래피 방법으로 여러 방향에서 측정하면 각 핵연료봉에서의 상대적인 감마선의 세기를 수치해석방법으로 얻을 수 있다. 일반적으로 전체 감마선의 세기를 측정하는 것보다 특정 에너지의 감마선을 측정하는 것이 보다 정확한 결과를 기대할 수

있기 때문에 에너지 분해능이 있는 NaI(Tl)나 HPGe를 이용하여 MCA (Multi-Channel Analyzer)로 분석하여 특정 에너지의 감마선 계수값을 얻도록 한다.

감마선을 측정할 값과 핵연료봉의 출력 분포의 관계는 다음과 같다. 어떤 측정 위치  $j$ 에서 감마선 계측기로 측정한 계수값( $b_j$ )은 각 핵연료봉( $i$ )의 출력 분포( $x_i$ )에 비례하여 방출되는 감마선이 감쇄되지 않고 계측되는 것들의 합이며 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$b_j = C \varepsilon \sum_i x_i \int_{r_{i,j}} \int_{4\pi} \exp\{-\sum_k \mu_k t_k(r_{i,j}, \Omega)\} d\Omega dr \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 계측기의 효율이고,

$\mu_k$ 는 방출된 감마선이 계측기로 가는 도중에 통과하게 되게 되는 매질  $k$ 의 감쇄 계수이고,

$t_k(r_{i,j}, \Omega)$ 는 측정 위치  $j$ 에서 핵연료봉  $i$ 의 어떤 지점으로부터 방출된 감마선이 계측기로 가는 도중에 매질  $k$ 를 통과하는 경로의 길이로 감마선은 등방선원 (Isotropic Source)이므로 방출 위치와 계측기내의 반응 위치와의 방향성( $\Omega$ )을 고려한 인자이고,

$C$ 는 출력 분포  $x_i$ 가 상대적인 값이므로 등식이 성립하기 위한 임의의 상수값이다.

식 (1)의 오른쪽에서 출력 분포  $x_i$ 를 제외하고 다음과 같이 하나의 항( $a_{i,j}$ )으로 표시할 수 있다.

$$a_{i,j} = C \varepsilon \int_{r_{i,j}} \int_{4\pi} \exp\{-\sum_k \mu_k t_k(r_{i,j}, \Omega)\} d\Omega dr \quad (2)$$

식 (2)는 감마선이 감쇄되는 정도에 의해 결정되므로 핵연료봉  $i$ 의 측정 위치  $j$ 에서의 감쇄 인자라 정의하자. 측정 대상은 하나로 36봉 핵연료 집합체이므로 식 (1)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$b_j = \sum_{i=1}^{36} a_{i,j} x_i \quad (3)$$

측정값  $b_j$ 와 감쇄 인자  $a_{i,j}$ 를 알고 있다고 가정하면 출력 분포  $x_i$ 를 구하기 위해서는 측정 위치가 각각 다른 36회의 측정이 있어야 한다. 즉 연립방정식을 'Determinant' 하게 구성하여 유일한 해(출력 분포  $x_i$ )를 얻으려면 연립방정식의 갯수가 미지수의 갯수와 같아야 한다. 측정 위치가 다르게 36번 측정하기 위해서는 10도 간격으로 회전하면서 측정하면 된다.

식 (3)을 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$Ax = b \quad (4)$$

여기서,  $b_j$  : 측정 위치  $j$ 에서의 측정값( $j=1 \sim 36$ ),

$a_{i,j}$  : 측정 위치  $j$ 에서 핵연료봉  $i$ 의 감쇄 인자,

$x_i$  : 핵연료봉  $i$ 의 출력 분포( $i=1 \sim 36$ ).

식 (4)에서 측정값  $b_j$ 로부터 출력 분포  $x_i$ 를 구하기 위해서는  $a_{i,j}$ 를 알아야 한다. 감쇄 인자  $a_{i,j}$ 는 계산으로 구할 수 있다. 복잡한 기하학적인 모양을 다룰 수 있고 여러 가지 감마선 계산에서 정확성이 입증된 몬테 카를로(Monte Carlo) 방법을 사용하는 MCNP를 사용하였다.[3,4].

## 2.2 오차의 상관 관계

측정값  $b_j$ 와 계산으로 구한  $a_{ij}$ 로 식 (4)의 선형 대수식을 풀어 출력 분포  $x_i$ 를 구할 수 있다. 식 (4)는 간단한 선형 대수 문제같지만 측정값  $b_j$ 나 계산값  $a_{ij}$ 은 각각 오차를 가지고 있고 역행렬  $\mathbf{A}^{-1}$ 을 구해야 하므로 풀기가 간단하지 않다. 이 문제는 역 방사선 수송 문제(Inverse Radiative Transfer Problem)의 일종으로 풀기가 어려운 것으로 알려져 있다[5]. 측정값  $b_j$ 은 어떤  $x_i$ 의 변화에 거의 변화하지 않고 행렬  $\mathbf{A}$ 에서의 작은 변화는  $x_i$ 의 큰 변화로 확대되기 때문이다. 핵연료봉 출력 분포의 정확성은 측정값과 감쇄 인자의 정확성과의 관계는 다음과 같다[5].

$$\|\delta\mathbf{x}\|/\|\mathbf{x}\| \leq C_k(\|\delta\mathbf{b}\|/\|\mathbf{b}\| + \|\delta\mathbf{A}\|/\|\mathbf{A}\|), \quad (5)$$

여기서,  $C_k$ 는  $\|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\|$ .

측정값  $b_j$ 와 계산값으로 구한  $a_{ij}$ 가 정확하다면 정확한 출력 분포를 구할 수 있다. 식 (5)에서 부등호의 의미는 사용하는 수치해석방법에 따라 얻을 수 있는 출력분포의 정확도가 결정된다는 것을 의미한다. 적절한 수치해석방법에 대한 연구는 참고 2에서 이루어졌으므로 두 가지 방법이 선택되었다. 본 논문에서는 이전 결과와 비교하기 쉽도록 간단한 방법인 반복최소자승법(Iterative Least Squares Method)을 이용하였다.

## 3. 감마 스캐닝 장치

### 3.1 배경

IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치는 한 개의 핵연료봉을 감마 스캐닝하기 위한 장치로 설계 및 제작된 것으로 하나로 핵연료 집합체를 감마 스캐닝하여 핵연료봉의 출력 분포를 알아내기 위한 장치가 아니다. 하나로 핵연료 집합체를 IMEF 시설에서 감마 스캐닝을 하였을 때 핵연료 집합체, 슬릿 및 계측기의 배치도는 그림 1과 같다.

이 그림은 핵연료 집합체, 슬릿(Slit 또는 Collimator)의 폭 및 계측기의 크기를 같은 축소비로 그린 것인데 슬릿의 폭이 핵연료 집합체보다 작음을 알 수 있다. 각 핵연료봉에서 나오는 감마선은 핵연료봉에 의해서 차폐가 되지만 슬릿의 연장선에 있는 핵연료봉에서 나오는 감마선은 슬릿에 의해 주로 차폐가 된다. 핵연료 집합체 내에서의 각 핵연료봉의 위치와 슬릿 폭이 각각 설계대로 정확하다면 아무런 문제가 없지만 현실적으로 제작 공차를 가질 수 밖에 없다. 제작 공차에 의한 핵연료봉 위치의 불규칙성은 현재 하나로 핵연료 집합체의 제작자에 의해 평가되었으며 실제 핵연료봉의 위치가 설계 위치에서 최대 벗어날 수 있는 거리는 0.15cm이다. IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치 각 부품 정밀도를 보면 어떤 것은 0.01mm의 제작 공차를 가질 정도로 매우 정밀하지만 모든 부품이 같은 정밀도를 가지지는 않는다. 1차 슬릿 폭의 제작 공차는 0.02mm이지만 2차 슬릿의 길이는 120cm로 매우 길기 때문에 슬릿 폭의 최대 제작 공차는 1mm이다. 2차 슬릿은 축방향으로는 0.01mm로 정확하여 핵연료봉을 감마 스캐닝하기에 적합하지만 2차 슬릿 폭의 제작 공차는 1mm이므로 이와 같은 목적으로 핵연료 집합체를 감마 스캐닝하는 것은 적합하지 않다. 2차 슬릿은 핫셀의 벽에 고정되므로 실제 오차는 보다 커질 수도 있다. 핵연료 집합체 내에서의 각 핵연료봉 위치의 불규칙성에 의한 영향을 살펴보면 두 가지 제작 공차에 의한 영향을 알아볼 수 있다. 각 핵연료봉 위치의 불규칙성을 계산으로 모의하여 설계 위치에 있을 때의 감쇄 인자를 서로 비교하면 얼마나 차이가 있는 지를 알 수 있다.

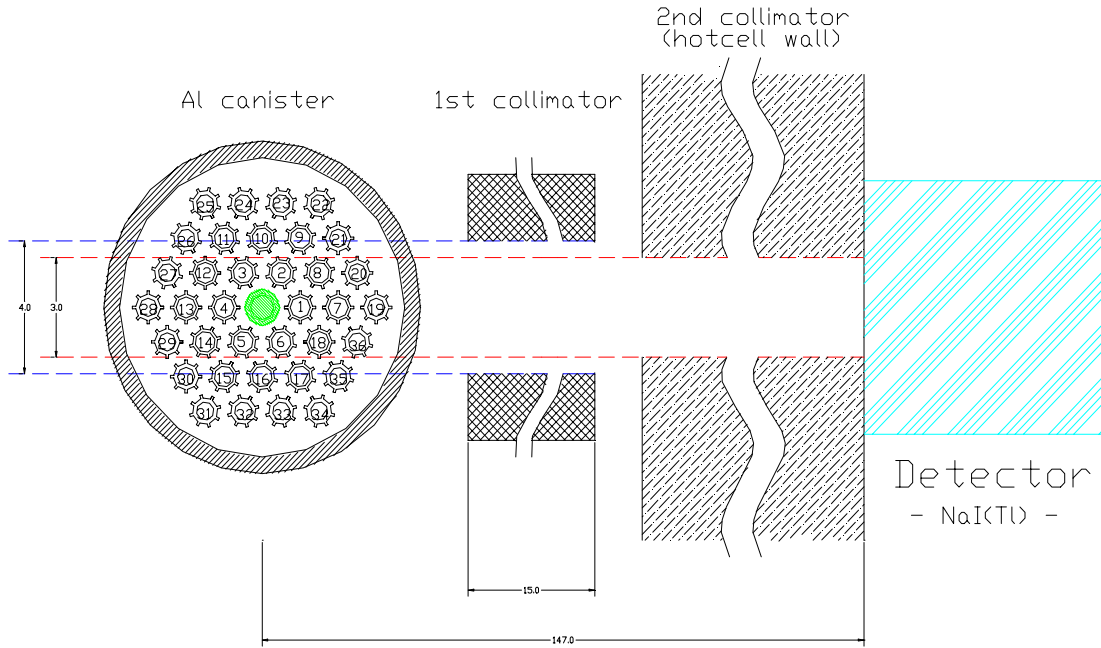


그림 1. IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치를 이용하여 감마 스캐닝할 때의 핵연료 집합체, 슬릿 및 계측기의 배치도

또한 두 가지 핵연료봉의 위치에 의한 감쇄 인자로 모의 측정값을 계산하여 실제 측정값과 비교하여 어느 것이 정확한지를 살펴볼 수도 있다. 실제 핵연료봉 위치가 설계 위치에서 최대로 벗어나는 정도(0.15cm)는 알 수 있지만 벗어나는 거리의 분포는 알 수 없으므로 가우스 분포(Gaussian Distribution)를 가진다고 가정할 수 있다. 계산 모델에서 벗어나는 정도가 가우스 분포에서  $3\sigma=0.15\text{cm}$ 로 설정하였고 0.15cm를 초과하는 경우에는 0.15cm만 벗어나는 것(일종의 Chopped Gaussian Distribution)으로 가정하였다. 실제 핵연료봉의 위치는 설계 위치에서 대부분 1mm이내의 매우 작은 위치 변동이 있었다.

그림 2는 핵연료봉이 설계 위치에 있을 때와 불규칙하게 위치할 때에 대하여 각 핵연료봉에서의 감쇄 인자를 상대 비교한 것이다[2]. 차이는 설계 위치에 대하여 나타내었으며 백분율 $\{=(\text{불규칙 위치}/\text{설계 위치} - 1) \times 100\}$ 로 표시하였다. 그림 3에서는 참고 1에서 얻은 측정값, 핵연료봉이 설계 위치에 있을 때의 감쇄 인자로 계산한 모의 측정값과 불규칙하게 위치할 때의 모의 측정값을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 2는 참고 1의 측정에서 회전 측정 기준점에 대하여  $30^\circ$  회전한 것이며 다른 회전 각도보다 감마선이 핵연료봉에 의해 많이 차폐되는 회전 위치이므로 측정값이 낮게 나오는 지점이다. 핵연료봉이 계측기에 대하여 일렬로 배열되기 때문에 핵연료봉에 의한 감쇄 효과가 가장 크게 나타나는 회전 위치이다. 불규칙적인 핵연료봉 위치에 의하여 일렬로 배열된 효과가 상대적으로 적어지기 때문에 감쇄 인자가 커진다. 핵연료봉이 설계 위치에 있을 때보다 모의 측정값(계산에 의한 계측기에서의 감마선 반응율)이 커지기 때문에 실제 측정값에 보다 가까워짐을 그림 3에서 볼 수 있다. 이것은 핵연료봉이 제작 공차에 의해서 불규칙하게 배열하기 때문에 발생한다. 핵연료봉의 위치가 제작 공차에 의해서 불규칙하게 위치하는 것은 실제 위치를 알 수 없으므로 정확하게는 고려할 수 없지만 계산 모델에서 불규칙하게 배열하는 많은 경우에 대하여 평균적인 감쇄인자를 얻을 수 있다.

그림 3에서 슬릿의 연장선에 있는 핵연료봉에서의 감쇄 인자의 차이는 다른 위치의 핵연료봉에서의 것보다 크다. 즉 슬릿 폭이 제한됨으로 인하여 핵연료봉의 불규칙적인 위치에 의한 효과는 더욱 커짐을 알 수 있다. 그림 2의 결과는 핵연료봉의 위치가 대부분 1mm

미만의 작은 변화에도 감쇄인자가 크게 변화는 것으로 보아 IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치에서 2차 슬릿 폭의 최대 제작 공차인 1mm는 작은 것이 아니며 분석 결과에 큰 차이를 줄 것임에 틀림이 없다. 그림 3에서 실제 측정값과 모의 측정값이 차이가 나는 것은 핵연료봉의 불규칙한 위치에 의한 영향보다는 슬릿 폭이 제한되어 있는 영향이 더 클 것이다. IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치는 이미 설치되어 고정되어 있으므로 슬릿 폭이 넓힐 수 없다. 슬릿 폭이 충분히 넓은 새로운 장치를 만들어 실험하면 슬릿 폭이 좁아서 실제 측정값과 계산에 의한 모의 측정값이 차이가 나는 지를 알 수 있을 것이다.

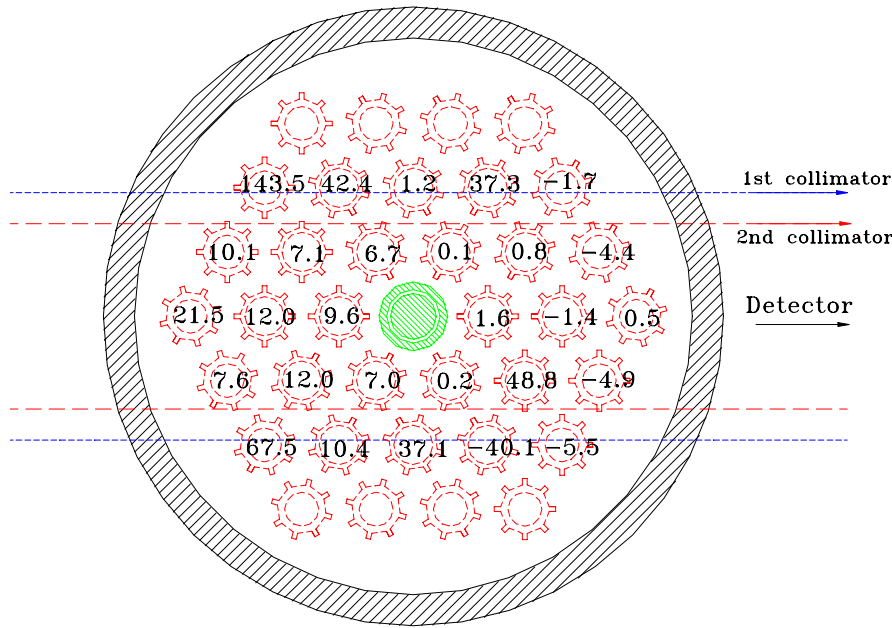


그림 2. 핵연료봉 위치가 설계 위치에 있을 때와 제작 공차에 의해서 불규칙하게 위치할 때의 각 감쇄 인자의 상대 차이(%)

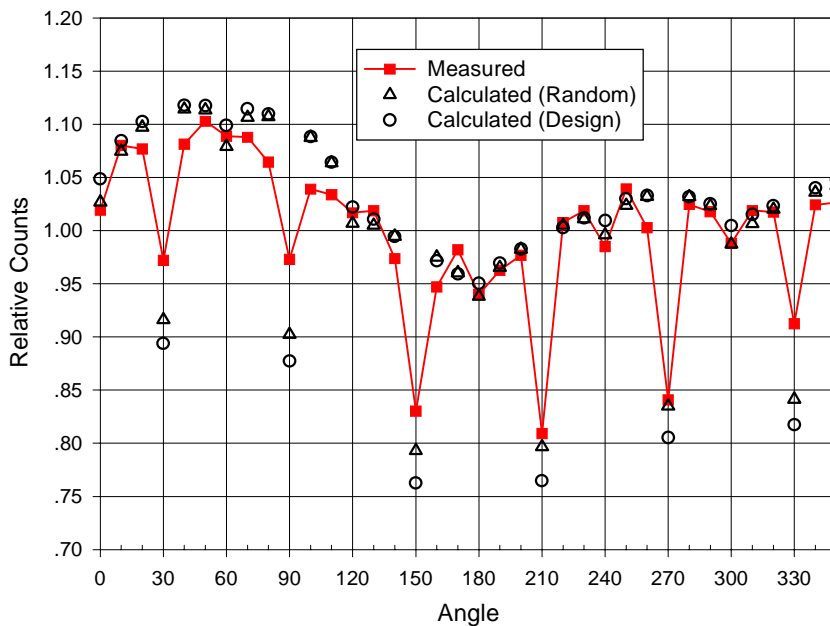


그림 3. IMEF의 감마 스캐닝 장치를 이용한 측정값과 계산에 의한 모의 측정값의 비교

### 3.2 새로운 감마 스캐닝 장치

새로운 장치는 핵연료 집합체 폭을 바라볼 수 있게 슬릿 폭을 충분히 넓게하였다. 또한 핵연료 집합체를 회전시키면서 감마 스캐닝할 때 정확한 각도로 회전시키는 것이 중요하며 축방향 이동도 가능해야 한다. 핵연료봉에서 나오는 감마선의 감쇄는 다른 핵연료봉에 의한 것이 대부분이므로 회전 각도가 정확히 유지되지 않으면 측정값은 의미가 없어진다. 그림 4는 IMEF 핫셀에서 2° 간격과 10° 간격으로 측정한 자료이다[1].

IMEF의 감마 스캐닝 장치는 PLC (Programmable Logic Controller)에 의해 제어되고 스텝핑 모터(Stepping Moter)에 의해 구동되기 때문에 매우 정확하게 측정 대상을 회전시킬 수 있다. 이 감마 스캐닝 장치의 회전 각도 단위는 0.01°이므로 그림 4의 측정 간격은 오차없이 정확하다고 할 수 있다[1].

그림 4에서 10° 간격으로 회전하면서 측정할 때는 각도의 변화에 대한 측정값의 민감도를 알 수 없지만 2° 간격으로 측정했을 때는 측정값이 회전 각도에 매우 민감하게 변하는 것을 볼 수 있다. 60° 마다 측정값이 반복적으로 낮게 나타나는 곳 근처에서는 2°의 회전에 측정값이 크게 변화하는데 그림 4로부터 추정하여 볼 때 가장 많이 변화하는 곳은 1도 회전에 5% 이하이다. 모든 회전 각도에서 회전 각도에 의한 측정 오차가 0.5% 이하로 정확하게 측정하려면 원하는 각도와 실제 각도의 차이는 0.1° 이하가 되어야 한다. 회전 각도 사이는 정확하므로 측정 기준점이 0.1° 이하로 정확하면 모든 회전 각도에서 측정 오차가 0.5% 이하가 되도록 할 수 있다.

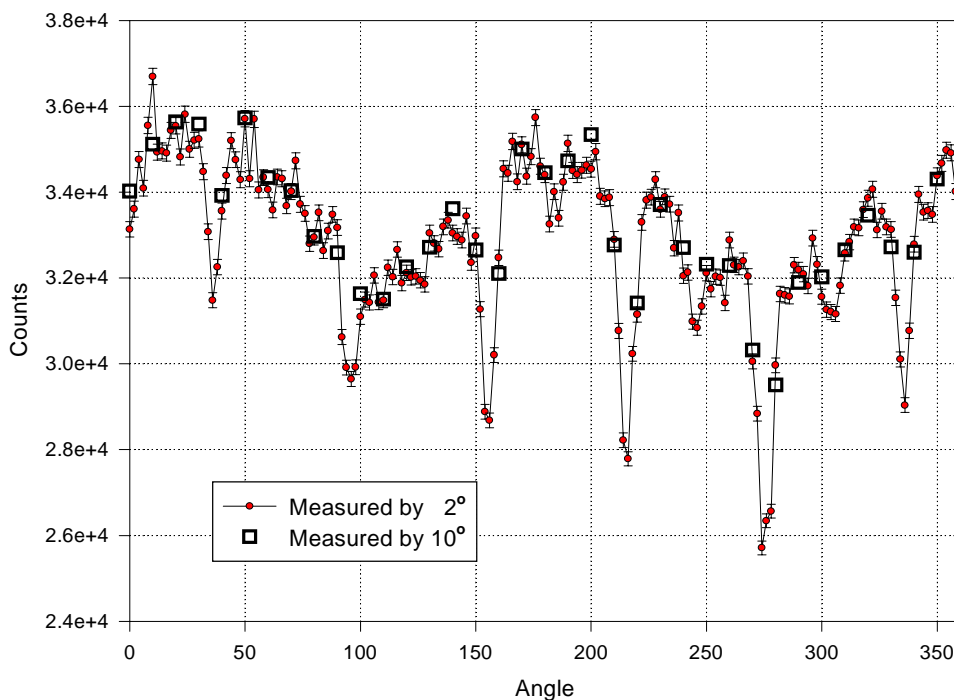


그림 4. 회전 각도에 대한 측정값의 민감도  
(IMEF 핫셀에서의 측정 결과)

새로운 감마 스캐닝 장치는 0.1° 이하로 정확하게 기준점을 잡을 수 있도록 하였다. PLC와 스텝핑 모터를 이용하면 IMEF의 감마 스캐닝 장치와 같이 정확하게 회전시킬 수 있지만 이러한 구동 장치는 비싸고 시스템 구성을 위한 노력이 많이 필요하므로 PLC와 스텝핑 모터를 사용하지 않고 실험자가 직접 구동시키는 방식을 선택하였다. 단순한 회전 장치로 실험자가 0.1° 이하로 정확하게 회전시킬 수 없으므로 기어 박스(gear box)를 이

용한 감속기로 회전 장치를 만들었다. 감속비가 36:1이므로 실험자가 손잡이로 360° 회전할 때 실제 핵연료 집합체는 10° 회전한다. 손잡이에 각도기를 부착하여 실험자가 2~3도 이내로 정확하게 손잡이를 회전시킬 수 있으므로 핵연료 집합체를 0.056~0.083° 이내로 정확하게 회전시킬 수 있다. 따라서 새로운 감마 스캐닝 장치로 핵연료 집합체를 0.1° 이하로 정확하게 회전시키면서 측정할 수 있다.

IMEF 시설의 감마 스캐닝 장치는 축방향 이동도 스테핑 모터와 PLC를 이용하여 0.01mm의 정밀도로 측정할 핵연료봉을 이동시킬 수 있어 매우 정확한 축방향 측정이 가능하다[1]. 그러나 새로운 감마 스캐닝 장치는 이러한 구동 장치가 없기 때문에 측정 결과에 영향을 주지 않도록 해야 한다. 축방향 이동의 정확성은 핵연료 집합체의 축방향 출력 분포와 직접적인 연관이 있다. 축방향 침투 출력 인자가 클 경우에는 작은 위치 이동에 대하여 측정값의 변위는 크기 때문에 높은 정밀도가 요구된다. 핵연료 다발당 출력 분포 측정 시험에서 본 실험에 이용될 핵연료 집합체의 축방향 침투 출력 인자가 약 1.5(축방향 측정 영역: 66cm)이었으므로 위치의 변위에 대하여 측정값의 변화를 예측해 볼 수 있다. 침투 출력의 위치가 가운데 있다고 가정하였을 경우에 1cm의 위치 이동에 대하여 측정값은 3%의 변화가 생긴다. 축방향 위치 변화에 대한 측정값의 변화가 0.5%이하로 되기 위해서는  $\pm 2\text{mm}$  이내로 원하는 위치를 정확하게 설정해야 한다. 이러한 정밀도로 핵연료 집합체를 축방향으로 움직이게 하기 위하여 축방향 이동장치에 1mm 단위로 눈금이 표시된 자를 부착하였다. 실험자는 어렵지 않게 1~2mm 이내로 정확하게 핵연료 집합체를 움직일 수 있다.

#### 4. 측정 및 논의

##### 4.1 측정

이번 측정에서는 새 핵연료 집합체를 사용해야 하는데 하나로 새 핵연료 집합체에 대한 감마선 스펙트럼에 대한 자료가 없으므로 어떤 감마선이 얼마나 나오는지 모른다. 감마 스캐닝에 사용하려는 NaI(Tl) 계측기는 효율이 좋아 측정 시간을 줄일 수 있지만 분해능이 낮아 감마선 에너지를 분별할 정도의 감마선 스펙트럼을 얻을 수 없어 따로 고분해능의 HPGe 계측기로 감마선 스펙트럼을 얻어 에너지를 분별하도록 하였다. 그림 5는 새 핵연료 집합체를 HPGe로 주변 방사능의 영향이 적은 곳에서 측정한 것이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 주된 피크(Peak)는 185.72와 98.84keV이다. 두 개의 피크는 U-235의 붕괴에 의해 발생하므로 HPGe로 측정하는 경우에는 이용할 수 있다. 실제 사용하려는 계측기는 NaI(Tl)이므로 그림 5와 같은 분해능이 높은 스펙트럼을 얻을 수 없고 여러 피크들이 중첩되어 나타난다. 측정 환경도 주변 방사선에 영향을 받을 수 있는 원자로실에 있으므로 주변 방사선이 선택하려고 하는 에너지의 피크에 포함되어 측정 결과에 영향을 줄 수도 있다. NaI(Tl)로 원자로실에서 새 핵연료 집합체를 감마 스캐닝 장치에 놓고 측정한 결과는 그림 6과 같다.

NaI(Tl)로 측정하였을 때는 그림 5에서 나타난 주된 피크인 185.72와 98.84keV의 근처의 피크들이 각각 하나의 피크로 나타난다. 그림 6에서 다른 에너지의 피크들은 많은 측정 시간이 필요하기 때문에 현실적으로 사용이 불가능하다. 낮은 에너지의 피크는 차폐체로서 납을 사용하기 때문에 납에서 발생하는 74.96keV의 특성 x-ray가 많이 포함되어 있으므로 185.72keV의 피크를 이용하도록 한다. 일반적으로 측정값은 'Gross Count'에서 'Background'를 제외한 'Net Count'가 되어야 하지만 측정 상황에 따라 'Gross Count' 값을 측정값으로 사용할 수 있다. 그림 6에서 보면 측정하려고 하는 185.72keV 피크에



인접하여 98.84keV 피크가 있고 피크 자체가 온도, 습도, 전압 등의 영향에 의해 조금씩 이동하므로 어떤 채널에서 어떤 채널까지를 'Net Count' 계산을 위해 설정하느냐에 따라 'Net Count' 값이 무시할 수 없는 정도로 차이가 났다.

측정값으로 'Net Count' 값 대신에 'Gross Count' 값을 사용하려면 'Background' 값이 일정해야 한다. 핵연료 집합체에서 나오는 감마선 중에서 측정하려는 감마선보다 높은 에너지의 감마선이 콤프턴 산란(Compton Scattering)에 의해 측정하려는 감마선 에너지 영역에서 'Background'의 역할을 한다. 핵연료 집합체의 회전 위치에 따라 감마선이 감쇄되는 정도가 변화하는 것을 측정하는데 측정하려는 감마선의 에너지와 'Background'에 영향을 주는 감마선의 에너지가 다르기 때문에 감쇄되는 정도에서 차이가 있다. 이와 같은 영향에 의해 회전 위치에 따라 'Background' 값이 변화면 제대로 된 측정이라고 볼 수 없다. 다행히 그림 7에서 보는 바와 같이 높은 에너지의 감마선이 매우 적기 때문에 영향은 무시할 수 있다. 'Background'의 크기에 변화를 주는 또 다른 것은 원자로 운전이다. 측정 위치는 원자로실에서 운전이 영향을 작게 받는 곳으로 선택하고 계측기의 차폐를 두껍게 했지만 원자로 운전이 의한 영향이 조금 남아 있었다. 따라서 원자로가 정지되어 있을 때에만 측정하였다. 핵연료 집합체를 회전하면서 측정하려고 할 때는 측정 기준점이 정확해야 한다. IMEF 시설에서 측정할 때는 측정 기준점을 설정하는 방법이 측정 기준점에 오차를 불러 일으키기 쉬운 방법이었다[2]. 측정 기준점을 정확하게 설정하는 방안을 참고 2에서 새로이 제시하였다. 새로운 측정 기준점을 설정하는 방법은 핵연료 집합체의 각 핵연료봉은 계측기에 대하여 회전 각도에 따라 배열이 달라 측정값에 변동이 있는 것을 이용하는 것이다. 그림 1과 같이 계측기에 대하여 핵연료봉이 일렬로 배열될 때는 그림 4의 30, 90, 150, 210, 270, 330°의 회전 지점인데 계측값은 현저히 낮다. 그림 4와 같이 계측값은 회전 각도에 따라 매우 민감하게 변화하므로 계측값이 작을 때의 회전 위치가 그림 1과 같은 핵연료봉의 배열이 되는 측정 기준점이 된다.

새로운 감마 스캐닝 장치를 이용하여 측정 기준점을 설정하기 위하여 핵연료 집합체를 0.56°씩 회전시키면서 측정하였다. 1차 측정에서 설정되는 측정 기준점이 정확한지를 확인하기 위해서 1차 측정 시작점에서 60° 회전한 지점부터 3차 측정을 하여 각각의 결과를 그림 7에 같이 나타내었다. 그림 7의 결과를 보면 1차와 2차 측정이 일관성있는 모습을 보여 주고 있으므로 측정 기준점이 제대로 설정되었다고 할 수 있다. 실제의 측정은 측정 기준점에서 시작하여 핵연료 집합체를 10°씩 회전시키면서 한 바퀴 측정한다. 측정 장치가 제대로 만들어진 것인가를 확인하는 의미에서 두 바퀴 측정하도록 하였다. 측정 시간은 순수한 계측값에 의한 측정 오차가 0.5%이하가 되도록 설정하였으며 각 회전 위치에서 1시간이 소요되었다. 측정이 완료된 후 측정값에 대한 오차를 산출하기 위해 'Background'를 1일 간격으로 3회 측정하여 평균값을 구하여 모든 측정값에서 'Background'를 뺀 값을 측정값으로 인정하고 측정 오차를 구하였다. 측정은 2000년 3월 19에서 3월 28일까지 원자로가 정지되어 있을 때 이루어졌다. 오랜 시간에 걸쳐 측정했기 때문에 온도, 습도, 전압의 변화가 있었을 것이다. 또한 회전 위치가 정확하지 않아서 생기는 오차도 있을 것이다. 이러한 것은 정량화하기 힘들므로 계수값만 가지고 측정 오차를 산출하였으며, 최대 오차는 0.54%이고 RMSE는 0.48%이다.

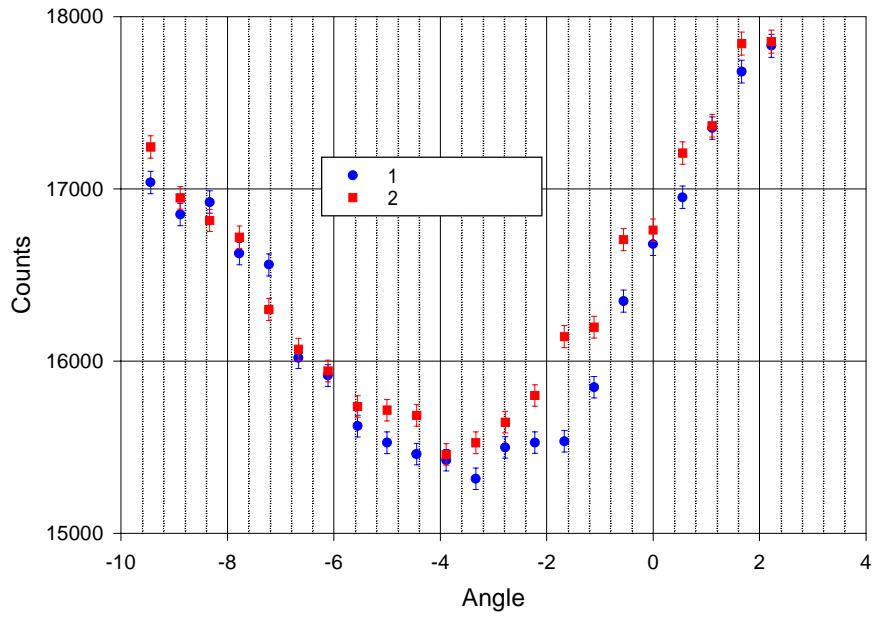


그림 5. 측정 기준점 설정

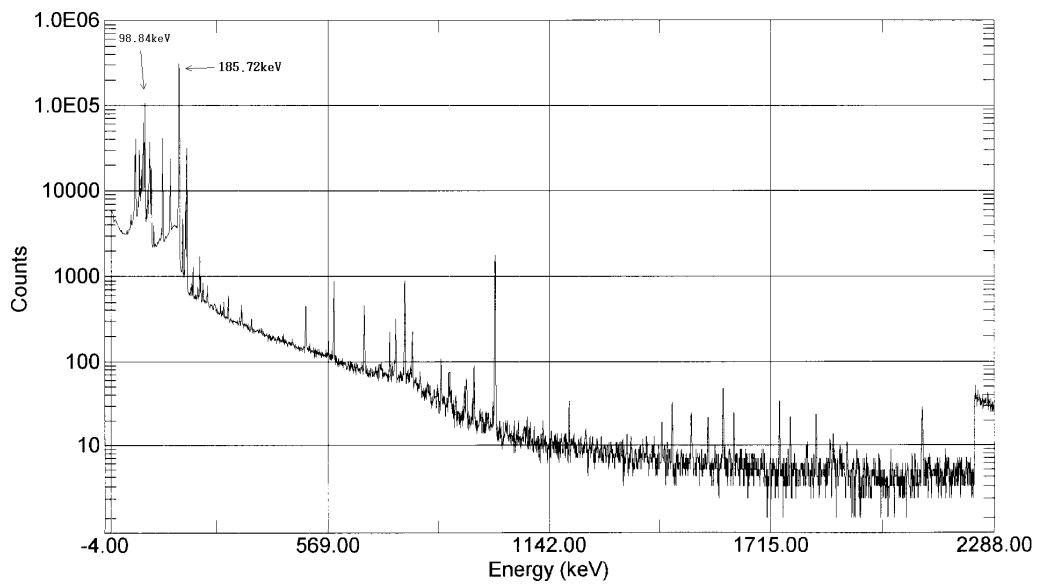


그림 6. HPGe로 측정한 하나로 새 핵연료 집합체의 감마 스펙트럼

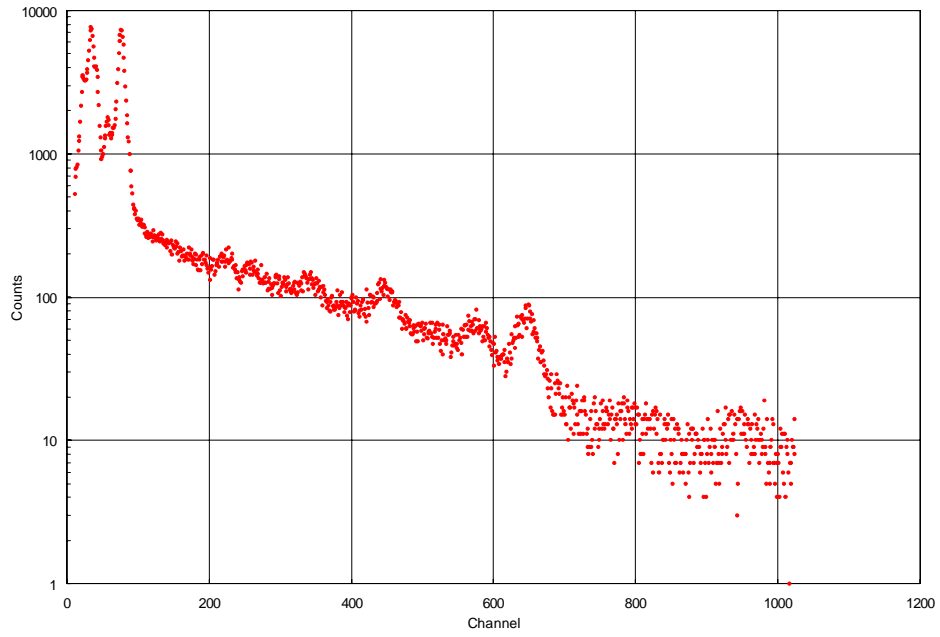


그림 7. NaI(Tl)로 측정 한 하나로 새 핵연료 집합체의 감마 스펙트럼

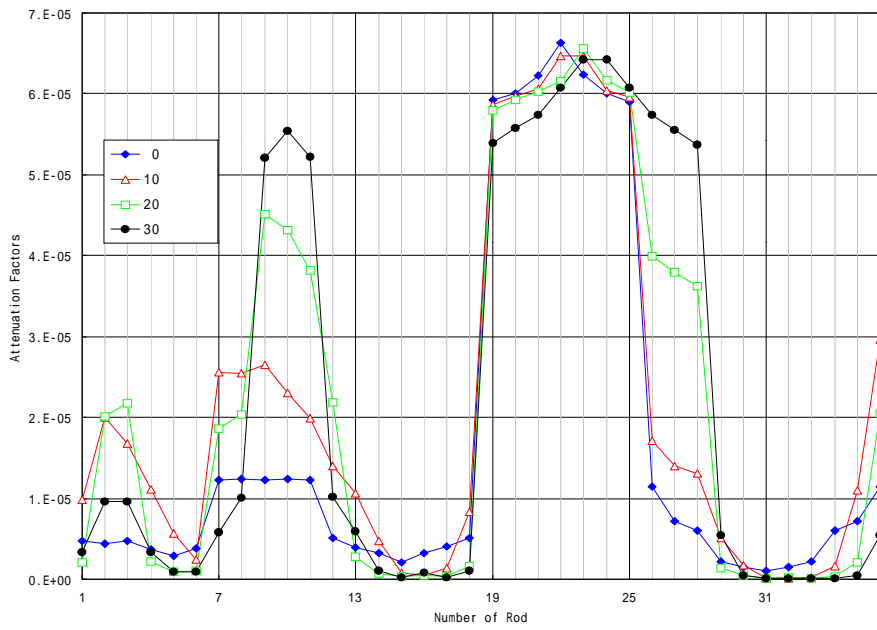


그림 8. MCNP로 계산한 185.72keV의 감마 선원에 대한 감쇄 인자

## 4.2 결과 및 논의

실험으로 얻은 결과를 가지고 핵연료봉의 출력 분포를 얻기 위해서는 감쇄 인자를 구하여 수치해석방법으로 식 (4)를 풀어야 한다. 회전 위치 0, 10, 20, 30°에서의 감쇄 인자는 모든 회전 위치를 대표하고 있으므로 계산한 감쇄 인자의 갯수는 144 ( $=4 \times 36$ )개이다. 계산할 가지 수가 많고 측정된 감마선의 에너지(185.72keV)가 낮으므로 계산 시간이 많이 걸렸다. 감쇄 인자의 오차는 0.5% 이하가 되도록 하는 것을 목표로 하여 대부분의 경우에는 목표치 이하의 오차를 가지지만 오차가 너무 커서 줄이는데 어려운 경우도 많이 있다. 전체에 대한 감쇄 인자의 RMSE는 1.62%이었다. 그림 11은 계산으로 구한 대표적인 4개 회전 방향에 대한 감쇄 인자를 나타낸다. 측정된 감마선의 에너지가 낮아 감쇄되는 정도가 심하므로 서로 차이가 많음을 볼 수 있다. 측정 결과와 계산으로 구한 감쇄 인자로 식 (4)를 풀어 핵연료봉 출력 분포를 구하였다. 측정은 새핵연료 집합체를 사용하였으므로 노심에 장전되어 있을 때와 같은 핵연료봉의 출력 분포는 아니다. 측정에 사용된 핵연료 집합체는 36개의 핵연료봉으로 구성되어 있는데 두 가지 종류의 핵연료봉으로 되어있다. 핵연료 집합체의 안쪽과 중간(그림 1에서 번호 1~18의 핵연료봉)에는 반경 0.3175cm의 표준 핵연료봉이 위치하고 바깥쪽(번호 19~36의 핵연료봉)에는 0.2745cm의 축소 핵연료봉이 위치하고 있다. 핵연료봉의 직경이 다르므로 감마 선원인 우라늄의 양도 달라진다. 표준 핵연료봉은 상대적으로 출력이 높고 축소 핵연료봉은 출력이 낮다. 표준 핵연료봉의 상대 출력값은 1.1445이고 축소 핵연료봉에서는 0.8555이다. 제작 공차에 의해 생기는 핵연료봉에서 우라늄 양의 불균질한 분포는 없다고 가정하고 계산 결과와 그림 9에 비교하였다. 계산으로 구한 출력 분포로 측정된 핵연료 집합체에서 안쪽과 중간은 표준 핵연료봉으로 되어 있고 바깥쪽은 축소 핵연료봉으로 이루어져 있음을 구분할 수 있다. 최대 오차는 안쪽에 있는 4번 핵연료봉에서 나타났으며 17.2%이고, 전체에 대한 RMSE는 8.2%이다.

그림에서 보는 바와 같이 핵연료봉의 위치에 따라 오차의 정도는 차이가 있다. 1~6번 핵연료봉의 오차는 크고 19~36번 핵연료봉의 오차는 상대적으로 작다. 안쪽에 위치한 1~6번 핵연료봉의 RMSE는 12.5%, 가운데에 위치한 7~12번 핵연료봉의 경우는 9.8%이고 바깥쪽 19~36번 핵연료봉의 경우는 4.3%이다. 이러한 원인은 핵연료봉의 감쇄 인자가 위치별로 다른데 수치해석방법에서 가중치(Weighting Factor)를 고려하지 않고 문제를 풀었기 때문에 발생하는 것으로 추정된다. 전체에 대한 평균적인 감쇄 인자를 1.00으로 할 때, 안쪽은 0.37, 가운데는 0.66이고 바깥쪽의 감쇄 인자는 1.44이다.

IMEF의 감마 스캐닝 장치를 이용한 측정에서 측정값과 계산에 의한 모의 측정값은 그림 3에서 보는 바와 같이 적지 않은 차이가 있었다. 이러한 차이의 주된 원인은 슬릿 폭이 충분하지 않아서 발생하는 것으로 추정하였다. 슬릿 폭이 충분한 새로운 장치를 만들어 실험했으므로 측정값과 계산에 의한 모의 측정값을 그림 10에 비교하였다. 측정값과 계산에 의한 모의 측정값의 최대 오차는 2.0%이고 RMSE는 0.8%이다. 측정값 자체의 RMSE가 0.48%인데 이것이 최소로 평가할 때의 것임을 고려하면 계산에 의한 모의 측정값은 매우 정확함을 알 수 있다. 예상대로 측정값과 계산에 의한 모의 측정값은 잘 일치하므로 슬릿 폭이 충분히 넓은 새로운 감마 스캐닝 장치는 이러한 측정에 적합함을 알 수 있다.

측정값과 계산에 의한 모의 측정값이 잘 일치하는데도 핵연료봉의 출력 분포가 IMEF 측정을 분석한 결과에 비하여 개선되지 않는 이유는 감마 선원의 차이에서 원인을 찾을 수 있다. IMEF에서 실험할 때 사용한 주된 감마 선원은 Zr-95에서 발생하는 765.8keV의

감마선이고 새로운 장치를 이용한 실험에서는 U-235에서 발생하는 185.72keV의 감마선이였다. 감마선 에너지가 작아져서 감쇄 인자의 계산에 많은 시간이 소요되어 정확한 감쇄 인자를 얻지 못했다. 새핵연료 집합체를 사용했기 때문에 나오는 감마 선원이 약하여 측정 시간이 많이 걸려 보다 정확한 측정값을 얻는데 어려움이 있었다. 보다 정확한 출력 분포를 얻기 위해서는 측정값과 감쇄 인자가 더욱 정확해져야 한다.

실제로 측정할 예정의 핵연료 집합체에서 나오는 감마선의 에너지는 Cs-137의 661.61keV으로 예상되기 때문에 에너지가 높아 보다 쉽게 감쇄 인자를 구할 수 있고 방출되는 감마선도 훨씬 많을 것으로 예측되기 때문에 정확한 측정 결과를 쉽게 얻을 수 있을 것이다.

새로운 감마 스캐닝 장치로 실험하는 경우에 대해 661.61keV의 감마 선원으로 계산한 감쇄 인자는 그림 11과 같다. 감쇄가 작게 일어나므로 계산 오차가 훨씬 적으며 최대 계산 오차는 0.3%에 불과하다. 감마선의 에너지가 높아짐에 따라 감쇄되는 정도가 작아지므로 감쇄 인자는 그림 11에 비하여 서로의 차이가 적다. 안쪽, 가운데와 바깥쪽의 감쇄 인자의 차이는 전체에 대한 평균적인 감쇄 인자를 1.00으로 할 때, 안쪽은 0.92, 가운데는 0.96이고 바깥쪽의 감쇄 인자는 1.02로 차이가 작다. 핵연료봉의 위치에 따른 감쇄 인자의 차이는 작기 때문에 그림 9처럼 오차가 특정 부위에 집중되는 현상은 거의 없을 것이다.

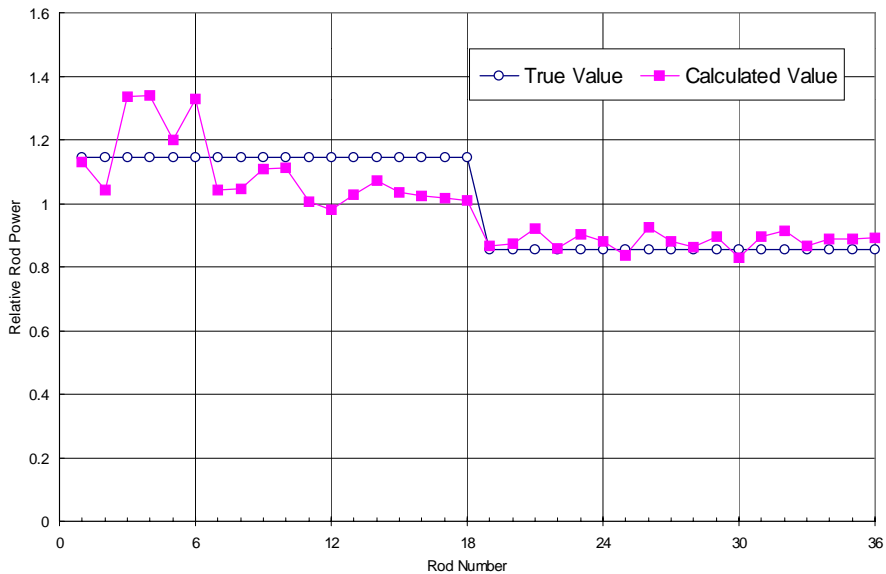


그림 9. 핵연료봉 출력 분포에 대한 계산값과 참값의 비교

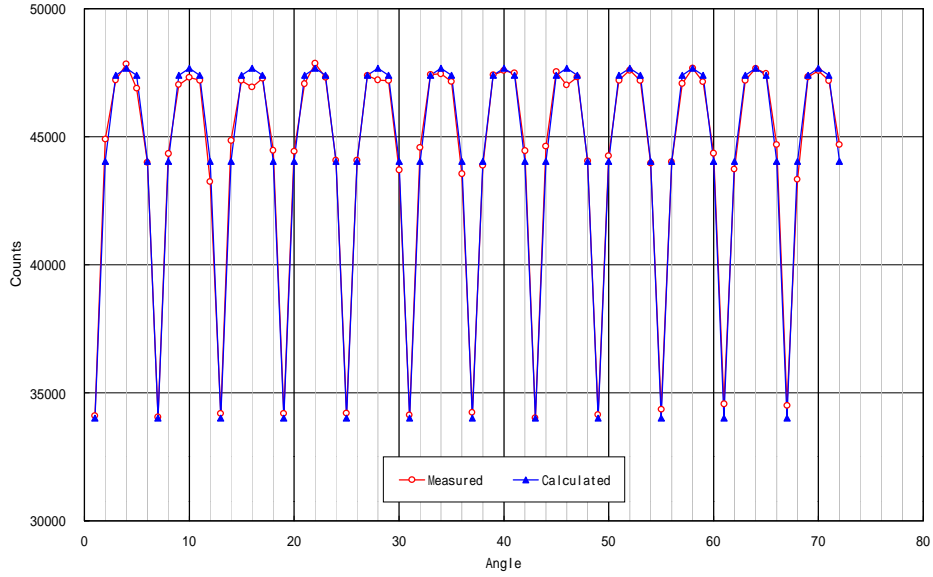


그림 10. 새로운 감마 스캐닝 장치를 이용한 측정값과 계산에 의한 모의 측정값의 비교

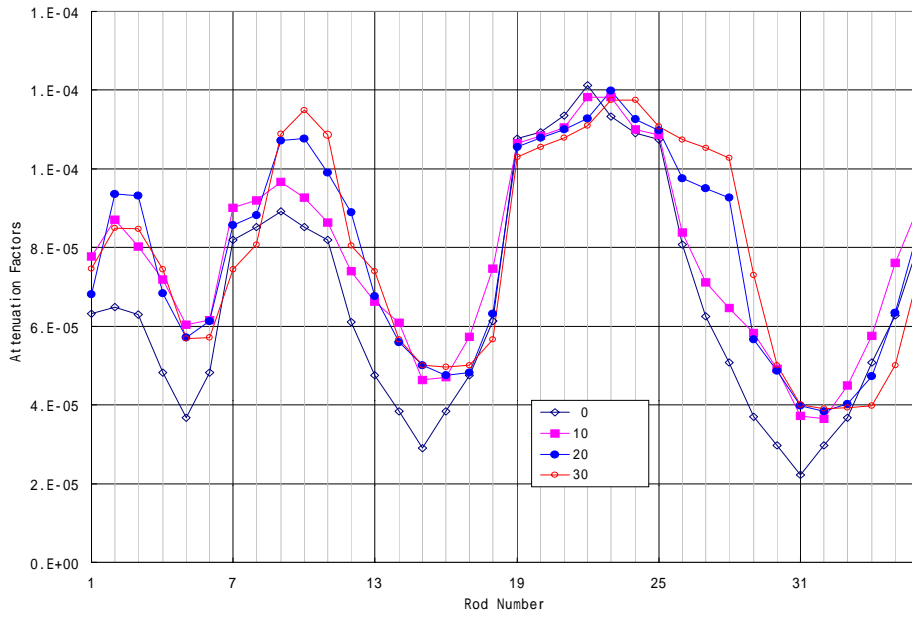


그림 11. MCNP로 계산한 661.61keV의 감마 선원에 대한 감쇄 인자

## 5. 결론

슬릿 폭이 충분히 넓지 않는 감마 스캐닝 장치는 정확한 핵연료봉 출력분포를 얻는데 한계가 있으므로 슬릿 폭이 충분히 넓은 새로운 감마 스캐닝 장치를 만들었다. 측정 장치의 특성을 파악하고 측정 절차, 조건 등을 확립하였고 측정 장치는 충분한 정확도로 측정할 수 있음을 확인하였다.

새로운 장치를 이용하여 하나로 36봉 새핵연료 집합체를 감마 스캐닝하였다. 감쇄 인자를 계산하여 수치해석방법으로 얻은 출력 분포에 대한 결과로 측정에 사용된 새핵연료 집합체가 표준 핵연료봉과 축소 핵연료봉으로 제대로 구분되어 조립되어 있음을 확인할 수 있었다. 이전의 감마 스캐닝 장치는 측정값과 계산으로 얻은 모의 측정값이 잘 일치하지 않았는데 새로운 감마 스캐닝 장치는 서로 잘 일치하였다.

출력 분포에 대한 오차는 이전에 비하여 개선되지 않았다. 이러한 원인은 측정에 사용된 감마선의 에너지가 낮아서 발생한다. 감마선 에너지가 낮아서 감쇄 인자의 계산에 많은 시간이 소요되어 정확한 감쇄 인자를 얻지 못했고, 새핵연료 집합체를 사용했기 때문에 나오는 감마 선원이 약하여 측정 시간이 많이 걸려 보다 정확한 측정값을 얻는데 어려움이 있었다. 또한 감쇄 인자는 핵연료봉 위치에 따라 차이가 많아 오차는 감쇄 인자가 작은 곳에 집중되는 현상이 발생한다.

조사된 핵연료 집합체를 사용하여 측정할 경우에 예상되는 감마선에 대한 감쇄 인자를 구하여 알아보니 이러한 문제가 없었다. 따라서 정확한 측정을 할 수 있는 새로운 감마 스캐닝 장치를 이용하여 조사된 핵연료 집합체를 측정하여 분석하면 충분히 정확한 출력 분포를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

## 참고 문헌

1. Chul Gyo Seo, "Assemblywise Power Distribution Measurement," *HANARO Commissioning Test Report, TP-RPT-C-08*, Korea Atomic Energy Research Institute (1998).
2. Chul Gyo Seo, "Reconstruction of the Pin Power Distribution from the HANARO Fuel Assembly Gamma Scanning," MS Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Feb. (1999).
3. J. F. Briesmeister (Editor), "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Los Alamos National Lab. (1993).
4. D. J. Whalen, et al., "MCNP: Photon Benchmark Problems," LA-12196 (1991).
5. N. J. McCormick, "Inverse Radiative Transfer Problems: A Review," *Nucl. Sci. Eng.*, **112**, 185 (1992).