

# 중성자 방사화 포일 기반 보너구 반응함수 계산 방법

김정호, 박현서  
한국표준과학연구원

2011년 2월 16일 접수 / 2011년 2월 28일 1차수정 / 2011년 3월 2일 채택

원자력발전소, 의료용 가속기 등 고선량 지역 및 능동형 열중성자 검출기를 사용하기 힘든 환경에서는 방사화 포일 기반 보너구 스펙트로메터를 사용하여 중성자 에너지 스펙트럼 측정을 수행한다. 중성자 방사화 포일을 보너구의 열중성자 검출기로 사용하는 경우, 중성자 방사화 포일의 위치 변동에 따른 보너구 반응도의 변화 및 중성자 방사화 포일의 질량과 반응도 사이의 상관관계 등 특성연구가 선행되어야만 한다. 본 연구에서는 MCNPX 모사계산을 통하여 중성자 방사화 포일 면에 수직입사하는 경우 중성자 방사화 포일의 위치 의존성이 크다는 사실과 중성자 방사화 포일의 질량과 반응도 사이에 선형관계가 없음을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수 계산 방법 및 중성자 방사화 포일 위치 및 질량 차이에 따른 반응도 변화를 연구함으로써 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수 결정방법을 확립하였다. 본 연구결과를 바탕으로 보너구 반응함수를 계산하여 추후 중성자 방사화 포일 기반 보너구 스펙트로메트리에 적용할 예정이다.

중심어: 중성자 방사화 포일, 보너구 스펙트로메터, 반응함수, MCNPX

## 1. 서론

가속기 및 의료장비에서 부수적으로 발생하는 중성자에 대한 선량평가 및 방호의 중요성은 고에너지 가속기를 이용한 의료용 방사선 사용이 증가함에 따라 점점 더 강조되고 있다. 가속기에서 발생하는 중성자는 수 meV의 열중성자부터 수 십 MeV의 속중성자까지 다양한 에너지 분포를 가진다. 이러한 넓은 에너지 분포를 갖는 중성자는 중성자 에너지 스펙트럼을 측정하고 중성자 플루언스-선량당량 환산인자를 적용해야만 정확한 선량평가를 수행할 수 있다. 따라서 중성자 선량평가를 위한 다양한 중성자 에너지 스펙트럼 측정방법이 개발되어 왔으며 그 중에서 넓은 에너지 분포를 갖는 중성자 에너지 스펙트럼을 측정하는 가장 좋은 방법 중 하나는 보너구 스펙트로메터(Bonner Sphere Spectrometer)를 이용하는 것이다[1]. 보너구 스펙트로메터는 통상 10 개 내외의 보너구라고 부르는 폴리에틸렌 감속구와 열중성자 검출기로 구성되어 있다. 폴리에틸렌 감속구는 입사하는 속중성자를 감속시켜 열중성자로 변환시키고 폴리에틸렌 감속구 중심에 놓인 열중성자 검출기가 열중성자를 측정하게 된다. 열중성자 검출기로는 반응도가 큰  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기와 같은 능동형 검출기를 많이 사용한다. 중성자 에너지 스펙

트럼은 각 보너구에 계측된 계수율과 정밀한 모사계산을 통하여 구한 반응함수를 이용하여 언폴딩(unfolding) 과정을 거쳐 얻게 된다[2].

$^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기와 같은 능동형 열중성자 검출기를 사용한 보너구 스펙트로메터는 반응도가 크기 때문에 원자력발전소, 의료용 가속기 등 고선량 지역에서는 중성자 에너지 스펙트럼을 측정하는데 많은 어려움이 있다. 특히 가속기에서 발생하는 중성자 측정은  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기와 같은 능동형 중성자 검출기를 사용할 경우 검출기의 포화 및 불감시간으로 인해 검출기가 작동하지 않거나 측정 자체가 불가능할 수도 있다. 또한 전기신호 노이즈가 많은 곳과 같은 측정환경이 좋은 않은 극한환경에서는 능동형 중성자 검출기의 전자장비가 영향을 받을 수 있어 측정의 신뢰성이 떨어지는 어려움이 있다.

이러한 어려움을 극복하기 위해 열중성자 검출기를 능동형이 아닌 수동형 검출기를 사용한 보너구 스펙트로메터가 연구되어 왔다[3,4]. 다양한 수동형 열중성자 검출기를 사용하는 보너구 스펙트로메터에는 중성자 방사화 포일이 열중성자 검출기로 널리 사용된다. 중성자 방사화 포일 기반 보너구 스펙트로메터를 사용하여 중성자 에너지 스펙트럼을 측정하기 위해서는 단위 질량당 중성자 방사화 포일의 포화 방사능에 대한 반응도를 계산하여 각각의 보너구에 대한 반응함수를 구하여야 한다.

중성자 방사화 포일을 열중성자 검출기로 사용할 경우 구형 또는 원통형인  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기와 달리 새로

책임저자 : 김정호, jungho@kriss.re.kr  
대전광역시 유성구 도룡동 1번지, 한국표준과학연구원

은 어려움이 존재한다. 보너구는 중성자 입사 방향에 따른 보너구의 반응도의 변화가 없는 것이 이상적이므로 열중성자 검출기는 중성자 입사 방향 의존성을 줄이기 위해 보너구 중심에 위치시킨다. 이때 중성자 방사화 포일은 구형 또는 원통형인  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기와 달리 매우 얇으므로 보너구의 중심에 정확히 위치시키기가 어려우며, 따라서 보너구 내의 위치에 따른 반응도 변화에 대한 연구가 필요하다. 또한 중성자 방사화 포일 여러 겹을 사용하거나 두꺼운 포일을 사용함에 따라 포일의 질량이 증가할 때 반응도가 질량의 증가에 따라 선형적으로 변하는지에 대한 연구 또한 반드시 수행되어야만 한다. 본 논문에서는 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수 결정 방법을 연구하고 중성자 방사화 포일의 위치, 질량 등에 따른 반응도 차이를 분석하여 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수 결정 방법을 확립하고자 한다.

## 2. 재료와 방법

### 2.1 보너구 반응함수 계산방법

중성자 방사화 포일 기반 보너구는 폴리에틸렌으로 제작된 감속구 내부에 열중성자 검출기로 중성자 방사화 포일을 삽입하여 구성된다. 상업적으로 흔히 제작되는 방사화 포일은 보통 지름 12.7 mm, 두께 0.05 mm 인 원통형으로 되어 있다[5]. 보너구 스펙트로메트리는 다양한 크기의 보너구를 사용한 측정과 보너구 반응함수를 이용한 언폴딩 과정을 통해 중성자 에너지 스펙트럼을 얻는 과정이다. 따라서 보너구 반응함수를 알고 있어야 언폴딩을 수행할 수 있다. 보너구 반응함수는 몬테카를로 모사계산으로 구하며 보통 MCNPX 코드를 사용하여 계산한다[6]. 중성자 에너지는 열중성자 영역부터 수 십 MeV까지 계산하며 우주선 중성자 등 고에너지 중성자를 계산하기 위해서

는 수 GeV까지 반응도를 계산하여야 한다. 본 연구에서는  $1 \times 10^{-9}$  MeV ~  $1 \times 10^3$  MeV 범위의 중성자 에너지 분포에 대하여 반응도를 계산하였다.

보너구의 반응도를 계산하는 방법은 다음과 같다. 먼저 단일 에너지 중성자(mono-energetic neutron)를 보너구에 입사시킨다. 보너구에 입사한 중성자 중 감속을 통하여 열중성자로 변환되어 열중성자 검출기에서 반응한 중성자 수를 기록하여 보너구 반응도를 계산한다. 보통 보너구 스펙트로메트리를 위한 보너구 반응함수는 중성자 플루언스를 곱하면 중성자 계수율을 계산할 수 있도록  $\text{cm}^2$ 의 단위로 나타낸다. 중성자 방사화 포일의 경우는 보통  $\text{mg}^{-1}\text{cm}^2$ 의 단위로 반응도를 나타낸다.

반응도를 계산하기 위하여 단일 에너지 중성자를 발생시켜 보너구에 입사시키는 방법은 수직입사, 평행입사, 등방입사의 세 가지 방법이 많이 사용된다. 수직입사는 중성자를 열중성자 검출기 축 또는 중성자 방사화 포일 단면에 수직으로 입사시키는 경우이며 평행입사는 중성자를 열중성자 검출기 축 또는 중성자 방사화 포일 단면에 평행하게 입사시키는 경우이다. 중성자를 보너구 구면에 수직으로 입사하는 경우는 등방입사로 중성자의 입사 방향을 알 수 없는 일반적인 경우에 사용하는 반응도를 계산하기 위한 입사방법이다.

중성자 방사화 포일 기반 보너구의 구조 및 반응함수를 계산하기 위한 중성자 입사방향을 Fig. 1에 나타내었다. 중성자 선원이나 가속기 표적과 같이 중성자가 발생한 위치 및 보너구에 입사하는 방향을 알고 있는 경우는 수직입사나 평행입사를 사용하여 계산한 반응함수를 선택하며, 원자력 발전소 내부나 환경 중성자와 같이 특정 입사방향을 알 수 없는 경우는 등방입사 반응함수를 사용하게 된다. 보너구 시스템은 위의 세 가지 입사방향에 대한 반응함수를 구하여야 하며 세 가지 입사방향 반응함수가 거의 차이가 없도록 설계되어야 한다.

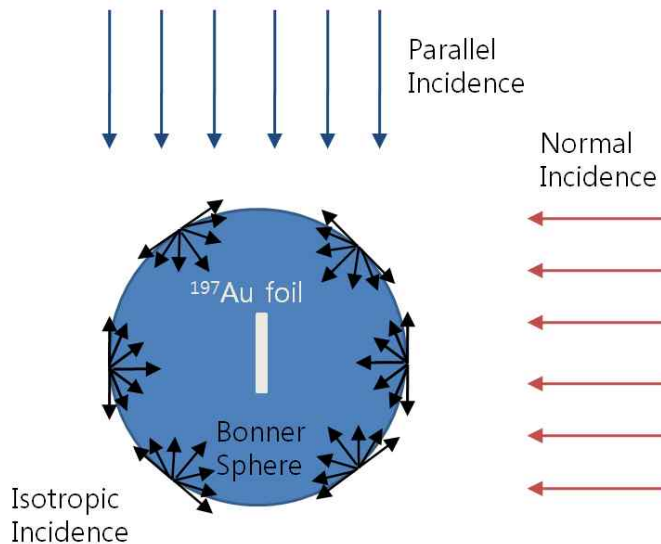


Fig. 1. Illustration of activation foil-based Bonner sphere and neutron irradiation direction.

$^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기를 열중성자 검출기로 사용하는 경우 열중성자 검출기의 형태는 대부분 구형 또는 지름과 높이가 비슷한 원통형이며 입사방향에 따른 반응도의 차이가 거의 없다. 보통 방사성 중성자 선원을 이용한 측정은 수직입사 조건에서 수행하지만 본 연구와 같이 얇은 두께의 중성자 방사화 포일을 사용하는 경우, 수직입사와 평행입사 조건이 많이 다르며 방사화 포일을 보너구 중심에 위치시킬 때 측정마다 포일 위치가 달라질 수 있다.  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기는 부피가 크기 때문에 위치 변동이 반응도에 미치는 영향이 작지만 중성자 방사화 포일은 위치에 따른 반응도 차이가 많이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 입사방향에 따른 보너구 반응도 조사를 통한 방사화 포일 기반 보너구의 제작 및 측정 방법 등의 연구가 반드시 선행되어야만 한다.

## 2.2 $^{197}\text{Au}$ 방사화 포일

$^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기를 열중성자 검출기로 사용한 보너구 시스템의 경우, 보통 하나의 열중성자 검출기를 다양한 크기의 보너구에 바꿔 삽입하여 측정을 수행한다. 따라서 보너구의 크기에 따라 반응도가 정해지면 다른 열중성자 검출기를 사용하지 않는 한 반응함수가 변하지 않는다. 다만, 우주선 중성자와 같이 동시에 여러 보너구를 사용한 측정을 수행할 경우에는 열중성자 검출기마다 내부에 포함된  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$ 의 개수가 다르므로 반응도가 달라진다. 이러한 차이는 열중성자 검출기의 효율을 측정하여 보정해준다.

중성자 방사화 포일 기반 보너구 스펙트로메터는 중성자 조사 후 방사화된 포일을 HPGe 검출기나 NaI(Tl) 검출기를 사용하여 감마선을 측정하거나 베타검출기를 이용하여 베타선 측정하여 포화 방사능을 얻는다. 따라서 중성자 방사화 포일을 어느 하나의 보너구에 삽입하여 측정 후 바로 다른 보너구에 삽입하여 재사용할 수 없다. 이러한 실시간 측정이 이루어지지 않는 수동형 검출기의 특성에 따라 모든 보너구에 각각 다른 중성자 방사화 포일을 사용한다. 중성자 방사화 포일은 보통 두께가 매우 얇기 때문에 같은 규격으로 제작하여도 질량이 조금씩 다르다. 따라서 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수는 반응함수를 계산할 때 사용한 포일의 질량으로 나눈 단위 질량당 중성자 플루언스에 대한  $(n, \gamma)$  핵반응수로 나타낸다. 단위는 일반적으로  $\text{mg}^{-1}\text{cm}^2$ 로 나타내며 실제 반응도는 측정에 사용한 방사화 포일의 질량을 반응함수에 곱하여 결정한다. 이번 연구에서는 상업적으로 판매하고 있는  $^{197}\text{Au}$  방사화 포일(직경 12.7 mm, 두께 0.05 mm, 질량 120 mg)을 모델링하여 MCNPX 모사계산을 수행하였다.

## 2.3 MCNPX 모사계산 방법

보너구 반응함수는 계산하고자 하는 중성자 에너지 구간에서 단일 에너지 중성자를 발생시켜 각 단일 에너지에 대한 보너구 반응도를 계산하여 결정한다. 보너구 반응도

는 MCNPX 모사계산을 수행하여 결정하였으며 이때 중성자 에너지  $1 \times 10^{-9} \text{ MeV} \sim 1 \times 10^3 \text{ MeV}$  범위의 중성자 에너지 분포에 대하여 수행하였다. 로그로 표시한  $1 \times 10^{-9} \text{ MeV} \sim 1 \times 10^3 \text{ MeV}$  중성자 에너지 범위를 균일하게 나누어 총 241개의 단일 에너지를 얻었다.

모든 MCNPX 계산은  $^{197}\text{Au}$  중성자 포일 내부에 입사한 중성자 tally4에 대하여  $(n, \gamma)$  핵반응을 일으킨 수를 계산하였다. 모든 에너지에 대하여 tally4의 계수에 의한 불확도가 0.5% 미만인 되도록 MCNPX 모사계산 시간을 설정하였다. 반응함수를 계산할 때 중성자의 입사방향은 수직입사, 평행입사 및 등방입사의 세 가지를 고려하였다.

## 2.4 중성자 방사화 포일 위치에 따른 반응도 변화

중성자 방사화 포일을 보너구 중심에 위치시킬 때 보너구 중심에 정확히 중성자 방사화 포일을 위치시키는 것은 어렵다. 중성자 방사화 포일의 두께는 0.05 mm이고 실제 중성자방사화 포일을 보너구 중심에 위치시킬 때 중성자 방사화 포일이 보너구 중심에서 1 mm 정도 벗어날 가능성은 충분하다고 할 수 있다. 중성자 방사화 포일의 두께가 중심이동거리에 비해 상대적으로 얇기 때문에, 이러한 위치 변화가 반응도에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

중성자 방사화 포일 위치에 따른 반응도 변화를 조사하기 위하여 직경 12.7 cm (5 inch) 보너구에 대하여 다양한 MCNPX 모사계산을 수행하였다. 계산에 사용된  $^{197}\text{Au}$  방사화 포일은 직경 12.7 mm, 두께 0.05 mm이며 보너구 중심에서 각각  $\pm 1 \text{ mm}$ ,  $\pm 2 \text{ mm}$ ,  $\pm 5 \text{ mm}$  이동한 위치에  $^{197}\text{Au}$  방사화 포일을 위치시켰을 때 수직입사, 평행입사 및 등방입사에 대한 반응함수를 각각 계산하였다. 이때 중성자 방사화 포일을 이동시킨 방향은 수직입사 방향과 동일한 방향이며 +는 중성자 입사 방향, -는 중성자 입사 반대방향을 나타낸다. 또한 동일한 계산을 직경 12.7 mm, 두께 0.1 mm의  $^{197}\text{Au}$  방사화 포일에 대하여도 수행하여 중성자 방사화 포일 위치에 따른 반응도 변화가 포일 두께와 연관성이 있는지 조사하였다.

## 2.5 방사화 포일 질량 변화에 따른 반응도 변화

동일한 직경과 밀도의 중성자 방사화 포일의 경우, 포일의 질량이 증가하면 포일의 두께가 증가하게 된다.  $^{197}\text{Au}$  방사화 포일의 두께가 두꺼워질수록  $^{197}\text{Au}$  원자핵의 수가 증가하므로 반응도가 커지게 된다. 중성자 방사화 포일의 중심과 바깥쪽에서의 열중성자 분포가 다른 경우 중성자 방사화 포일 두께 증가와 반응도가 선형관계인지 확인할 필요가 있다. 이러한 중성자 방사화 포일의 질량 증가에 따른 반응도 변화를 조사하기 위하여 중성자 방사화 포일을 직경 12.7 cm인 보너구의 중심에 위치시키고 두께를 증가시켜가며 단위 질량당 반응도를 계산하였다. MCNPX 모사계산에 사용한 중성자 방사화 포일의 두께는 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.4 mm, 0.5 mm,

1 mm 총 6개이며 질량은 각각 120 mg, 240 mg, 480 mg, 960 mg, 1200 mg, 2400 mg이다. 중성자 입사방향은 수직입사, 평행입사, 등방입사 세 가지로 각 입사방향에 대해 모든 계산을 수행하였다. 또한 보너구 직경에 따른 반응도 변화도 살펴보기 위하여 직경 7.62 cm (3 inch) 및 직경 30.48 cm (12 inch) 보너구에 대해서도 동일한 계산을 수행하였다.

함수이며, Fig. 2B는 평행입사 반응함수이다. 두 경우 모두  $\pm 1$  mm,  $\pm 2$  mm,  $\pm 5$  mm 위치 이동에 따른 반응도가 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 모든 241개 단일 에너지에 대하여 위치 이동에 따른 반응도는 보너구 중심의 반응도와 비교하여 1% 미만으로 나타났다. 반응도의 tally4 불확도가 0.5%임을 고려할 때 평행입사 및 등방입사의 경우  $\pm 5$  mm 이내 변동에서는 반응함수의 변화를 무시할 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 결과와 논의

#### 3.1 중성자 방사화 포일 위치에 따른 반응도 변화

평행입사 및 등방입사에 대한 직경 12.7 cm 보너구 반응함수를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2A는 등방입사 반응

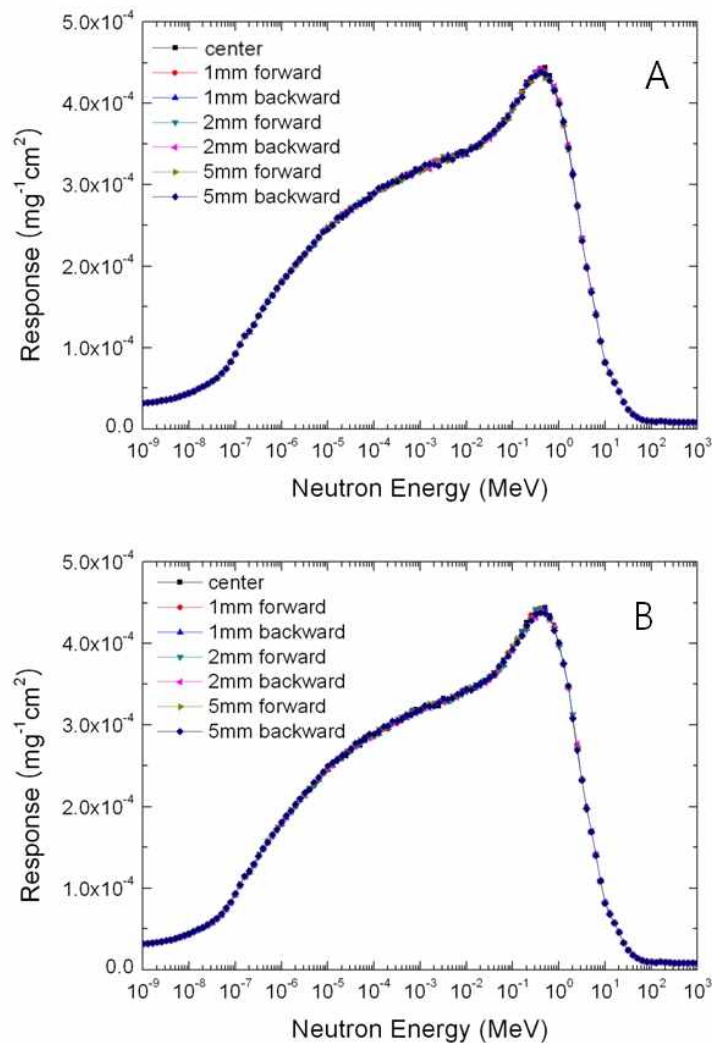


Fig. 2. Position dependence of 12.7 cm Bonner sphere response functions for isotropic (A) and parallel (B) incidence.

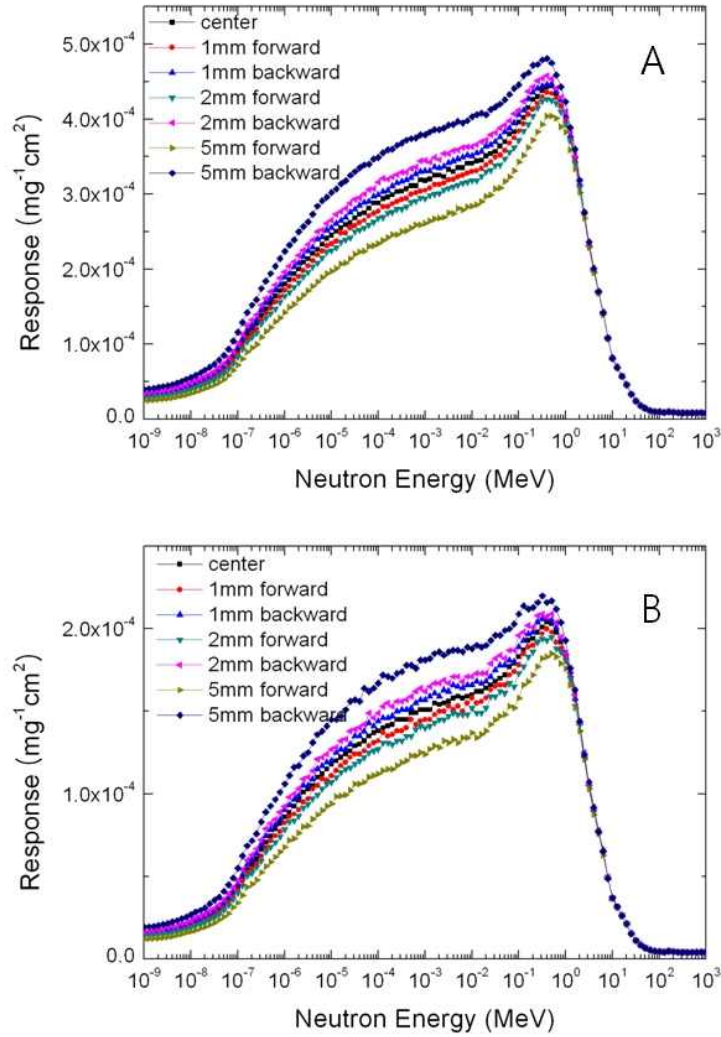


Fig. 3. Position dependence of 12.7 cm Bonner sphere response functions for normal incidence with 120 mg (A) and 2400 mg (B) <sup>241</sup>Au foil.

평행입사 및 등방입사의 경우와 달리 수직입사의 경우 직경 12.7 cm 보너구 반응함수는 중성자 방사화 포일 위치에 따른 변동이 뚜렷하게 나타났다. 수직입사에 대한 직경 12.7 cm 보너구 반응함수를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3A는 방사화 포일의 두께가 0.05 mm 일 때의 반응함수이다. 중성자 방사화 포일의 위치가 중성자 입사 방향 쪽으로 이동할 경우 반응도가 작아지고 반대방향으로 이동했을 경우 반응도가 커짐을 알 수 있다. 열중성자 영역부터 에너지가 증가함에 따라 중성자 방사화 포일 위치에 따른 반응도의 편차가 커지다가 다시 줄어들어 1 MeV 이상에서는 위치에 따른 반응도의 변화가 거의 없어진다. 중성자 에너지가 높은 경우는 열중성자로 감속이 되기 위해서 폴리에틸렌 내부의 수소나 탄소와 많은 산란을 거쳐야 하므로 ±5 mm 이내 변동에서는 열중성자로 감속되는 정도의 차이가 거의 없음을 보여준다. 하지만 열중성자나 열외중성자가 보너구에 입사하는 경우 중성자 방사화 포일까지의 감속재 두께에 따라 열중성자화되어 중성자 방사화 포일에 도달하는 확률이 변하게 된다. 따라서 중성

자 방사화 포일을 중성자 입사방향 쪽으로 이동했을 경우 (+ 방향 이동) 감속재 두께가 얇아지는 효과로 반응도가 작아지며 중성자 입사방향 반대방향 쪽으로 이동했을 경우(- 방향 이동) 감속재 두께가 두꺼워지는 효과로 반응도가 커지게 된다. 이러한 중성자 방사화 포일의 위치 변화에 따른 반응도 변화가 포일의 질량에 관련이 있는지 조사하기 위하여 1 mm 두께의 방사화 포일에 대해서도 동일한 MCNPX 모사계산을 수행하여 Fig. 3B에 나타내었다. 두께 1 mm의 경우에도 ±1 mm, ±2 mm, ±5 mm 위치 이동에 따른 반응도의 변화는 두께 0.05 mm 인 경우와 큰 차이가 없었다.

본 연구의 결과는 교정용 중성자 선원이나 가속기 표적 등 중성자가 발생하는 위치를 알 수 있는 경우 중성자 방사화 포일을 중성자가 포일 단면에 수직입사가 아닌 평행입사가 되도록 설치해야만 중성자 방사화 포일이 보너구 중심에 위치하지 않음에 따른 불확도를 줄일 수 있는 측정 방법임을 보여준다. 수직입사의 경우에는 중성자 방사화 포일 위치가 1 mm 이동할 경우에도 직경 12.7 cm

보너구의 경우 열중성자 및 열외중성자 영역에서는 최대 5% 까지 반응도의 차이가 난다. 보너구 크기가 달라지면 감속재 두께가 달라지므로 반응도 편차가 커지거나 작아질 수 있으나 이러한 위치 변동에 따른 반응도 불확도를 줄이기 위해서는 수직입사 측정을 하지 않는 것이 바람직하다.

3.2 방사화 포일 질량 변화에 따른 반응도 변화

Fig. 4는 직경 12.7 cm 보너구에 등방입사를 한 경우 중성자 방사화 포일 질량 변화에 따른 반응도 변화이다. 중성자 방사화 포일을 보너구 중심에 위치시킨 경우에는 중성자가 보너구에 수직입사, 평행입사 및 등방입사에 따른 반응도 변화가 거의 없으므로 방사화 포일 질량 변화에 따른 반응도 연구는 등방입사하는 경우만 계산하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 중성자 방사화 포일의 두께가 증가되어 질량이 증가함에 따라 단위 질량당 반응도가 작아

지는 경향을 나타낸다. 두께 1 mm의 중성자 방사화 포일의 반응도는 0.05 mm 두께의 중성자 방사화 포일의 반응도에 비해 약 50% 이상 작아지므로 질량이 20배 증가해도 반응도의 증가는 10배 미만이 됨을 알 수 있다. 이와 같은 방사화 포일 질량과 반응도 사이의 비선형성이 보너구 직경에 따라 달라지는 지 확인하기 위하여 다른 직경의 보너구에 대하여 동일한 계산을 수행하였다. 많이 사용되는 보너구 중에서 직경 12.7 cm 보다 작은 보너구와 큰 보너구로 직경이 각각 7.62 cm, 30.48 cm인 보너구의 중심에 중성자 방사화 포일을 삽입하고 중성자가 등방입사하는 경우에 대하여도 계산을 수행하였다(Fig. 5). Table 1은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 반응함수의 합을 중성자 방사화 포일의 질량에 따라 나타낸 것이다. 표에서 확인할 수 있는 바와 같이 보너구 직경에 관계없이 중성자 방사화 포일의 두께가 증가하면 단위 질량당 반응도가 줄어들며 그 비율이 거의 일정함을 알 수 있다.

Table 1. Integrated Response per Unit Mass for Various Foil Masses. BS means Bonner sphere.

Foil mass (thickness)	Integrated response per unit mass (arbitrary unit)		
	7.62 cm BS	12.7 cm BS	30.48 cm BS
120 mg (0.05 mm)	27.36	24.20	5.56
240 mg (0.1 mm)	24.78	22.18	5.09
480 mg (0.2 mm)	21.56	19.43	4.46
960 mg (0.4 mm)	17.81	16.10	3.69
1200 mg (0.5 mm)	16.51	14.94	3.43
2400 mg (1.0 mm)	12.62	11.42	2.62

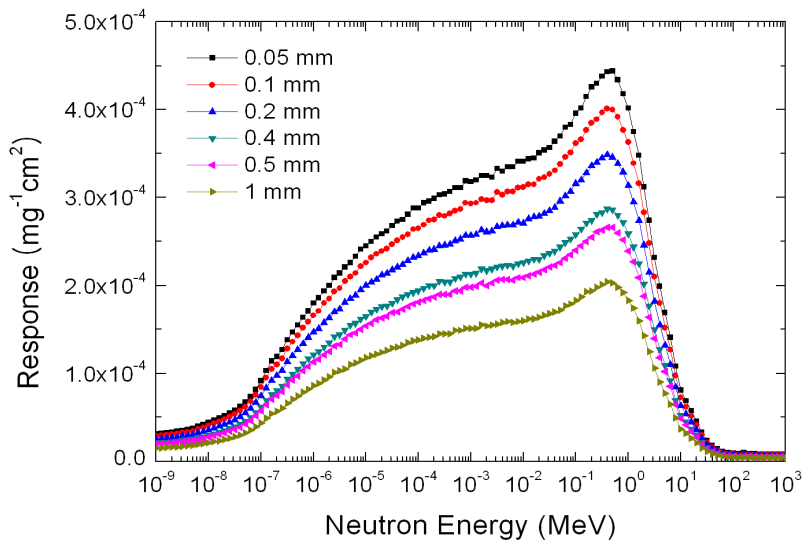


Fig. 4. Thickness dependence of 12.7 cm Bonner sphere response functions for isotropic incidence.

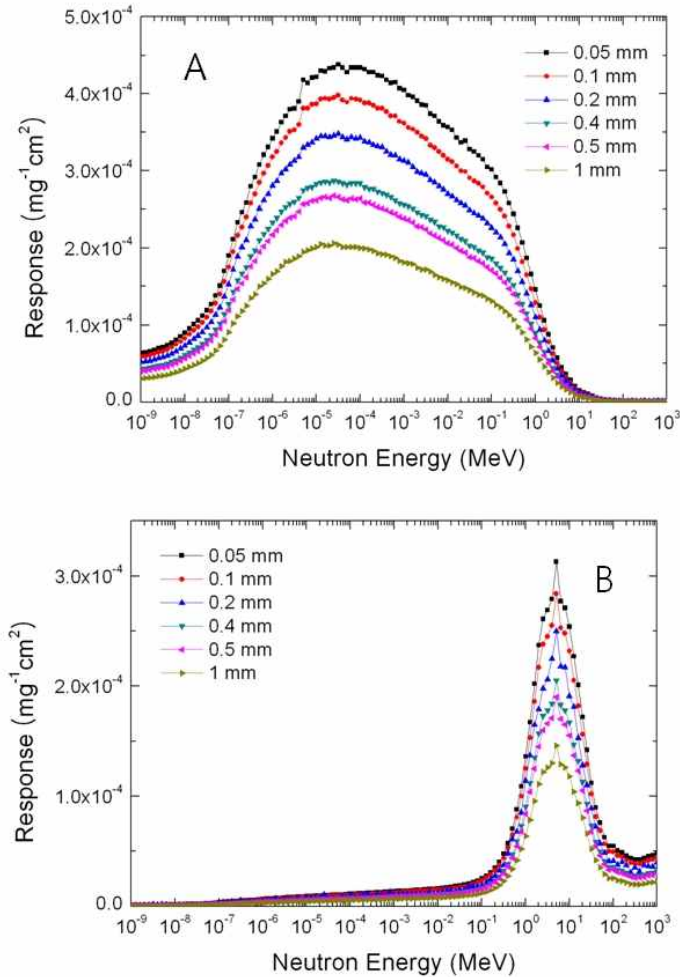


Fig. 5. Thickness dependence of response functions of 7.62 cm Bonner sphere (A) and 30.48 cm Bonner sphere (B) for isotropic incidence.

중성자 방사화 포일은  $^3\text{He}$ 나  $\text{BF}_3$  비례계수기와 달리 두꺼운 포일을 사용하거나 포일의 수를 증가시켜 포일의 질량을 증가시킬 수 있어 보너구의 반응도를 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 본 연구에서 확인한 것과 같이 중성자 방사화 포일의 질량이 증가하면 반응도는 커지지만 단위 질량당 반응도는 줄어든다. 흔히 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수는  $\text{mg}^{-1}\text{cm}^2$ 로 나타내므로 사용하는 포일의 질량을 반응함수에 곱하여 새로운 반응함수를 얻을 수 있다. 하지만 본 연구의 결과에서는 중성자 방사화 포일 기반 보너구는 중성자 방사화 포일의 질량을 달리 사용할 경우 사용하고자 하는 각각의 중성자 방사화 포일의 질량에 따라 반응함수를 새로 계산하여 결정해야 함을 알 수 있다. 즉 열중성자 검출기로 중성자 방사화 포일을 사용할 경우 단위 질량당 반응도를 사용하고자 하는 방사화 포일의 질량에 따라 계산하여야 하며 다른 질량을 사용하여 계산된 포일의 단위 질량당 반응도에 단순히 포일의 질량을 곱해서 사용하면 안 됨을 알 수 있다. 수직입사 및 평행입사의 경우도 등방입사와 동일한 결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

고선량 지역의 중성자 에너지 스펙트럼 측정에 사용하는 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수를 결정하기 위하여  $^{197}\text{Au}$  방사화 포일을 보너구 중심에 위치시키고 중성자 방사화 포일의 위치 및 두께, 중성자 입사방향에 따른 반응도 차이를 MCNPX 모사계산으로 조사하였다. 보너구 중심에서 중성자 방사화 포일을 이동할 경우 중성자를 방사화 포일 단면에 수직으로 입사시키는 경우에는 위치변화에 따른 반응도의 변화가 뚜렷이 나타났으나 방사화 포일 단면에 평행입사하는 경우와 등방입사하는 경우에는 반응도 변화가 없음을 확인하였다. 또한 중성자 방사화 포일의 질량과 반응도는 선형적으로 증가하지 않기 때문에 중성자 방사화 포일의 질량에 따라 보너구 반응함수를 새로 계산해서 사용해야 함을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수 계산 방법 및 중성자 방사화 포일 위치 및 질량 차이에 따른 반응도 변화를 연구함으로써 중성자 방사화 포일 기반 보너구의 반응함수 결정방법을 확립하였다. 본 연구결과를 바탕으로 보너구 반응함수를 계산하여 추후

중성자 방사화 포일 기반 보너구 스펙트로메트리에 적용할 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력연구사업임 (No. 2010-0017566).

#### 참고문헌

1. Alevra AV, Thomas DJ. Neutron Spectrometry in mixed fields: Multisphere spectrometer. *Rad. Prot. Dosim.* 2003;107:37-72.
2. Reginatto M, Goldhagen P, Neumann S. Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED. *Nucl. Instrum. Meth. A* 2002;476:242-246.

3. Thomas DJ, Bardell AG, Macaulay EM. Characterisation of a gold foil-based Bonner sphere set and measurements of neutron spectra at a medical accelerator. *Nucl. Instrum. Meth. A* 2002;476:31-35.
4. Bedogni R, Esposito A, Gentile A, Angelone M, Gualdrini G. Determination and validation of a response matrix for a passive Bonner sphere spectrometer based on gold foils. *Rad. Meas.* 2008;43:1104-1107.
5. <http://www.shieldwerx.com/foils.html>.
6. McKinney GW, Durkee JW, Hendricks JS, James MR, Pelowitz DB, Waters LS, Gallmeier FX. MCNPX Overview. LA-UR-06-6206, Proceedings of the 2006 HSSW, FNAL, IL, 2006.

## Evaluation of Response Functions for Activation Foil-based Bonner Spheres

Jungho Kim and Hyeonseo Park  
Korea Research Institute of Standards and Science

**Abstract** - Activation foil-based Bonner sphere spheres are used to obtain neutron energy spectra of nuclear power plants or accelerator-produced neutrons. The position and the foil mass dependence of response functions should be studied carefully before measurement of Bonner spheres. This study showed that the normal incidence to the foil surface made a large shift of responses while parallel and isotropic incidence made no position dependence. The correlation between foil mass and response was not linear. Therefore, the response functions of activation-foil based Bonner spheres should be calculated for every different foil mass and the direction of Bonner spheres for parallel incidence will be preferred for radioactive neutron source or accelerator target produced neutrons.

**Keywords** : Neutron activation foil, Bonner sphere, Response function, MCNPX