

## 하나로 즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치 개발 현황

### Current States for Developing the Prompt Gamma Neutron Activation Analysis System at HANARO

변수현, 선광민, 김인중, 최희동  
서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

김명섭, 전병진  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

하나로 즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치에 사용될 주요 부품의 제작 및 성능 시험을 완료하였다. 회절 중성자 인출장치는 pyrolytic graphite 결정과 수동식 2축 goniometer로 구성된다. Graphite 결정은 중성자를 시료 위치에서 집속시키기 위해 오목거울 형태로 기울일 수 있다. 집속 조건에 대응되는 기울임각은 평행광을 반사시켜 결정하였다. Collimator는 borated plastic, 납, 폴리에틸렌이 반복된 층으로 구성된다. Collimator 주변 차폐체로서  $B_4C$  분말이 섞인 heavy concrete를 제작하였으며, 회절 빔라인의 중성자 및 감마선 차폐체도 완성되었다. 현재 graphite 결정, collimator 및 주변 차폐체를 설치한 상태에서 회절 중성자 특성 및 중성자 집속 효과 측정이 진행되고 있다.

#### Abstract

Fabrication and performance test of major components used for the Prompt Gamma Neutron Activation Analysis system at HANARO have been completed. Thermal neutron extraction device consists of pyrolytic graphite crystals and a manual type two-axis goniometer. To focus neutron at the sample position graphite crystals can be tilted to concave mirror type. The tilting angle corresponding to the focusing condition was determined by reflecting parallel light. Collimator is composed of alternating layers of borated plastic, lead and polyethylene. As a shield surrounding collimator, heavy concrete mixed with  $B_4C$  powder was fabricated and neutron and gamma-ray shields for diffracted beam line have been completed. Presently, measurements of diffracted beam characteristics and neutron focusing effect are on the way

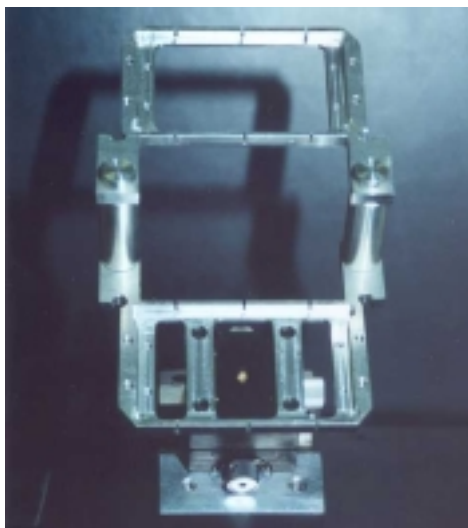
with graphite crystals, collimator and surrounding shield installed.

## 1. 서론

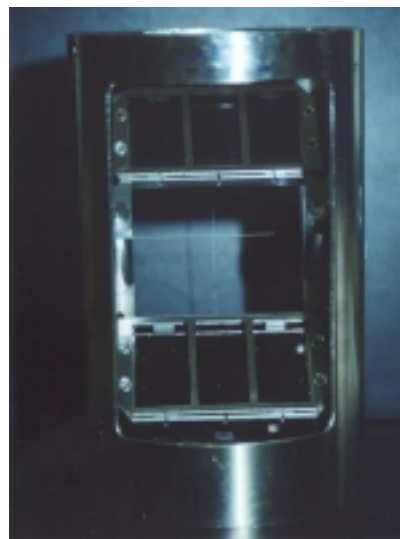
즉발 감마 중성자 방사화 분석법(Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNAA)은 시료를 중성자에 조사시킬 때 중성자 포획 후  $10^{-14}$  sec 영역의 짧은 시간에 방출되는 즉발 감마선을 계측함으로써 시료내 성분 핵종의 함량을 분석하는 방법이다. 한국원자력연구소의 하나로에는 pyrolytic graphite(PG) 결정(crystal)에 의해 회절된 다색빔을 이용한 PGNAA 장치가 ST1 수평 중성자공에 건설되고 있다. 본 장치는 이론적인 상세 계산 및 검증 실험을 통해 우수한 검출민감도와 검출한계를 달성할 수 있음을 확인하였으며[1-3], 이후 상세 설계를 거쳐[4] 주요 부품의 제작 및 동작 시험이 완료되었다. 본 논문에서는 회절 중성자 인출장치, collimator 및 차폐체를 위주로 하나로 PGNAA 장치 설계 원리와 동작 시험 결과를 요약하였다.

## 2. 회절 중성자 인출 장치

PGNAA 장치에서 회절 다색 중성자 인출 장치는 사진 1과 같으며, PG 결정 및 지지대, 2축 goniometer 등으로 구성된다. 사진 1의 (a)는 PG가 장착되지 않은 상태를 나타내며, (b)는 부품이 모두 조립된 모습이다. PG가 차지하는 빔 단면적은 ST1 중성자공 출구 단면적  $70^w \times 120^h$  mm<sup>2</sup> 중에서 중심부  $70 \times 60$  mm<sup>2</sup>을 제외한 상·하부 각  $70 \times 30$  mm<sup>2</sup>으로서, 각 영역에 크기가  $75 \times 50$  mm<sup>2</sup>인 PG 2 개가 3 등분 분할된 상태로 고정된다. PG 지지대는 중성자 산란 및 포획 감마선 생성을 최소화하기 위해 알루미늄으로 제작하였으며, 사진 1 (b)와 같이 직경 127 mm인 스테인레스 스틸 파이프에 고정된다.



(a)



(b)

사진 1. 회절 중성자 인출 장치.

3 등분 분할된 PG 중에서 가운데 조각을 제외한 나머지 두 조각은 기울임각을 인가할 수 있다. 양 끝 조각이 오목 거울 형태로 기울어지면 기울어진 조각에서 반사된 상이 가운데 조각에서 반

사된 상과 완전히 중첩되는 위치가 존재한다. 따라서 상이 겹치는 위치가 PGNAA 장치의 시료 위치와 일치하도록 기울임각을 설정하면 중성자속을 크게 증가시킬 수 있다. 장치 설계 단계에서는 PG 결정을 오목 거울 형태로 휘는 방안을 고려하였으나 실제 시험 결과 PG가 파손되지 않는 상태에서 휘 상태를 유지하기가 힘들었기 때문에 3 등분 분할된 조각을 기울여서 오목거울에 근사하는 방식으로 변경하였다. 입사 중성자의 각확산 효과와 PG의 모자이크 분포를 무시할 때 기울임각을 증가시키에 따라 세 조각으로부터 반사된 상이 시료 위치에서 이동하는 과정을 개념적으로 나타내면 그림 1과 같으며, 이 경우의 중성자속 이득은 3 배까지 가능하다. 그러나 실제로는 중성자 확산 효과로 인해 이득이 감소할 것이며, 각확산 및 모자이크 분포를 고려한 Monte Carlo 계산 결과 약 1.7 배로 예상된다.

그림 1의 집속 조건에 대응되는 기울임각은 기울임각을 미세하게 조정하면서 시료 위치에 설치한 pin-hole 중성자 검출기의 계수율 변화를 측정하여 계수율이 최대인 경우로서 결정할 수 있다. 그러나 하나로 PGNAA 장치는 기울임각 변경이 수동식이고, 기울임각을 변경할 때 중성자 인출장치 뿐만 아니라 collimator까지 꺼내야만 하기 때문에 이 방법을 적용하면 기울임각 설정에 너무나 많은 시간이 소요된다. 따라서 가급적 각도 조절 회수를 줄이는 방식이 보다 타당하며, 본 연구에서는 평행광을 이용하여 광학대 상에서 기울임각을 최대한 맞춘 상태로 중성자 인출장치를 조립하였다. 평행광원은 등방으로 방출되는 광원과 볼록렌즈를 이용하여 얻었다. PG는 반사광의 강도가 약하고 난반사로 인해 일정한 형태의 상이 형성되지 않기 때문에 기하학적으로 규격이 동일한 거울 조각을 이용하였다. 거울 조각에서 반사된 상이 시료 위치에서 완전히 중첩된 모습은 사진 2와 같다. 이 상태에서 기울임각 설정용 볼트의 진행 길이는 약 0.3 mm로서 각도로 환산하면  $0.77^\circ$ 이다.

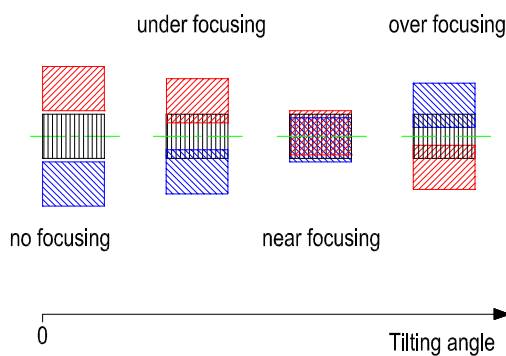


그림 1. 회절 중성자 집속 개념도.

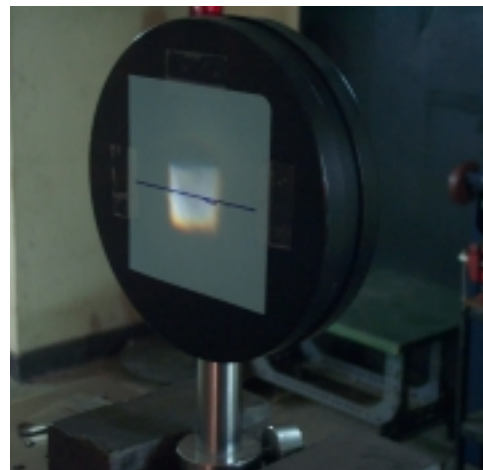


사진 2. 평행광을 이용한 집속 시험.

### 3. Collimator

시료 위치에서 회절 중성자 빔 크기를 제한하고 PG에서 산란되어 시료 방향으로 진행하는 감마선과 시료로 향하지 않는 중성자를 차폐하기 위해 PG와 시료 사이에 collimator가 설치된다. Collimator는 중심부가 관통된 차폐링과 이를 고정하는 파이프로 구성되며, 파이프의 하단은 PG

지지대를 고정하는 파이프와 서로 연결된다. 차폐체는 borated plastic, 납, 폴리에틸렌이 반복하여 쌓인 구조이며, 각각 열중성자, 감마선, 고속중성자를 차폐한다. 각 링의 중심부에 관통된 구멍의 크기는 시료 위치에서 직경 20 mm인 원이 PG 경계면 전체를 바라보는 조건으로서 결정되었다.

#### 4. 차폐체

PGNAA 장치의 차폐체는 collimator 주변 차폐체, beam shutter 및 stopper를 포함한 회전 빔 라인 차폐체, 즉발 감마선 계측용 고순도 게르마늄(Hyper Pure Ge, HPGe) 검출기 주변 차폐체 등으로 크게 구분할 수 있다.

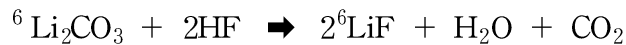
PG 지지대 및 collimator 주변은 중성자공에 인접해 있기 때문에 방사선 준위가 매우 높다. 이러한 높은 준위의 방사선은 즉발 감마선 분광계통의 background에 크게 영향을 미치기 때문에 차폐체를 설치하여 가능한 한 준위를 낮추어야만 한다. 본 연구에서 제작한 차폐체는 외형을 철판(두께 : 10 mm)으로 용접한 후 내부에 heavy concrete를 타설하는 방식으로 제작하였으며, 콘크리트에 B<sub>4</sub>C 분말이 포함되어 있다. Collimator 주변 차폐체를 ST1 중성자공 출구에 설치한 모습은 사진 3과 같다. 차폐체는 모두 7 영역으로 분할되어 있으며, 서로 빈틈없이 밀착된 구조를 유지한다. 중앙에 설치된 1710 kg 차폐체에 뚫린 구멍이 회전 중성자 인출구로서, 이 속으로 회전 중성자 인출장치와 collimator가 설치된다. 최초에는 collimator가 설치될 공간 주변이 폴리에틸렌과 납으로 채워져 있었으나 차폐체 표면 선량률이 감마선의 경우 60 mrem/hr, 고속 중성자의 경우 200 mrem/hr로서 상당히 높았다. 특히 고속중성자의 준위가 높기 때문에 이 상태에서 PGNAA 장치를 설치하면 즉발 감마선 계측 계통의 성능이 크게 저하되고 HPGe 검출기가 중성자 상해를 입을 우려가 있어 콘크리트 차폐체를 신규로 제작하여 설치하였다.



사진 3. Collimator 주변 차폐체 설치.

빔라인 차폐체 및 HPGe 검출기 주변 차폐체는 중성자 차폐체와 감마선 차폐체로 구분할 수 있으며, 중성자를 먼저 차폐한 후 감마선을 차폐한다. 열중성자 차폐는 흡수단면적이 큰 <sup>10</sup>B, <sup>6</sup>Li가 함유된 물질이 사용된다. PGNAA 장치에서 채택된 <sup>10</sup>B 함유 차폐체는 borated plastic으로서 B<sub>4</sub>C가 무게비로 66% 함유되어 있다. <sup>10</sup>B 함유 차폐체는 중성자 흡수능이 우수하지만 중성자 흡수 후

2차 감마선이 방출되기 때문에 2차 감마선이 HPGe 검출기에 영향을 미치지 않는 beam shutter, beam stopper 등과 시료 부근을 제외한 영역에 설치되었다.  ${}^6\text{Li}$ 는 중성자 흡수단면적이  ${}^{10}\text{B}$ 에 비해 작고 자연 상태에서 존재비율이 7%에 불과한 단점이 있지만 중성자 흡수 후 2차 감마선이 거의 생성되지 않는 특성이 있다. 따라서 2차 감마선 생성이 억제되어야 하는 시료 위치 부근과 HPGe 검출기 입구의 중성자 차폐용으로 사용된다. Li 화합물 중에서 중성자 차폐에 적합한 화학 조성은 LiF 또는  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 이며, 이 두 화합물은 밀도가 비슷한 반면 Li 무게비는 LiF가  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 의 1.6 배이므로 LiF가 보다 유리하다. 시료 부근 차폐체는  $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$  크기의 LiF 벽돌이 사용되며, HPGe 검출기 입구 차폐체는 두께가 절반인  ${}^6\text{LiF}$  벽돌이다.  ${}^6\text{LiF}$ 는  ${}^6\text{Li}$ 가 95% 농축된 재료이며 상용으로 구매 가능한  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  분말로부터 불산을 이용하여



반응에 의해  ${}^6\text{LiF}$  분말로 변환한 후 소결(sintering) 공정을 거쳐 벽돌로 제작된다[5].  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  분말은 질량 분석 결과 표 1과 같이  ${}^6\text{Li}$  농축도가 95.65%이며, Ba, Ca 등의 불순물이 ppm 수준으로 포함되어 있음을 확인하였다. 또한 건조 감량은(105°C, 1 hr)  $10.0 \pm 0.5 \text{ wt}\%$ 로서 수분이 상당량 포함되어 있었다.

빔라인과 검출기 주변의 감마선 차폐체는 납을 사용하며 최소 두께가 10 cm 이상을 유지한다. 빔라인 주변은 4 개의 납벽이 사방으로 애워싼 구조이며, 이 차폐벽 아래에는 beam shutter, 위에는 beam stopper가 각각 설치된다.

표 1.  ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$  분말 성분 분석 결과.

	분석 원소(또는 핵종)	함량
농축도	${}^6\text{Li}$	$95.65 \pm 0.055 \text{ [Atom\%]}$
	${}^7\text{Li}$	$4.35 \pm 0.055 \text{ [Atom\%]}$
불순물	Ba	$6.2 \pm 0.14 \text{ [}\mu\text{g/g]}$
	Ca	$34 \pm 0.6 \text{ [}\mu\text{g/g]}$
	Cu	$2.0 \pm 0.21 \text{ [}\mu\text{g/g]}$
	Mg	$3.4 \pm 0.14 \text{ [}\mu\text{g/g]}$
	Zn	$1.9 \pm 0.07 \text{ [}\mu\text{g/g]}$

## 5. 결론

회절 중성자 인출장치, collimator, 차폐체 등 하나로 PGNAA 장치의 주요 부품을 제작하여 동작 시험 및 설치 시험을 완료하였다. 회절 중성자 인출장치에서 중성자 집속을 위한 PG 기울임각은 평행광을 이용하여 광학대 상에서 결정하였으며, 최종적으로 중성자를 이용하여 확인하게 된다. 2000년 말에 PGNAA 장치 설치가 완료되어 붕소 농도 검정이 시작될 예정이다.

## 참고문헌

1. S.H. Byun and H.D. Choi, "Design Features of a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis System at HANARO", J. Radioanal. Nucl. Chem. 244 (2000) 413.
2. 변수현, 최희동, 김명섭, 전병진, "하나로에서의 즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치 설계 및 중성자빔 특성", 1999 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
3. H.D. Choi, S.H. Byun, B.J. Jun and M.S. Kim, "Extraction of Polychromatic Thermal Neutrons by Bragg Diffraction to Use for Prompt Gamma Neutron Activation Analysis", in the Proceedings of 10th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, p. 731, 2000.
4. 최희동 등, "붕소 농도 분석 장치 개발 및 BNCT장치 성능시험 기술개발", KAERI/CM-315/99.
5. M. Rossbach, "Multielement Prompt  $\gamma$  Cold Neutron Activation Analysis of Organic Matter", Anal. Chem. 63 (1991) 2156.