

Pyrolytic graphite의 모자이크 폭 측정 및
중성자빔 집속 효과

Measurement of the Mosaic Spread of Pyrolytic Graphite Crystals
and Focusing Effect of Neutron Beam

변수현, 최희동

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산56-1

김명섭, 전병진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치에서 열중성자 인출에 사용될 pyrolytic graphite 결정의 모자이크 폭을 측정하고, 결정을 수평 방향으로 휨으로써 얻어지는 중성자빔 집속 효과를 평가하였다. 모자이크 폭 측정에는 2축 분광계를 이용한 투과법이 사용되었다. Pyrolytic graphite의 휨 반경은 sample 위치에서의 최대 중성자속 조건과 균일한 중성자속 조건을 절충하여 결정하였다. 집속 효과는 sample 위치에서 계산된 중성자속 분포를 비교하여 평가되었으며, 2배의 이득이 기대된다.

Abstract

The mosaic spreads of pyrolytic graphite crystals used for extracting thermal neutrons in a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis system were measured and the focusing effect by bending crystals in the horizontal direction was evaluated. Transmission method using two axis spectrometer was used for the measurement of mosaic spreads. The bending radius of pyrolytic graphite was determined by the compromise between the condition of the maximum neutron flux and flat neutron flux at the sample position. The focusing effect was evaluated by comparing the profile of the neutron flux calculated at the sample position and a gain factor of 2 is expected.

1. 서론

중성자를 이용한 암치료법인 BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)에서 필수적으로 요구되는 ^{10}B 농도 측정을 위한 장치로서 한국원자력연구소의 하나로에 즉발 감마 중성자 방사화 분석(Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNAA) 장치를 건설중에 있다. 이 장치는

pyrolytic graphite(PG) 결정에 의해 수직으로 회절된 중성자빔을 이용하며, 다색빔을 이용하는 특징을 지니고 있다[1,2].

Sample 위치에서의 중성자속에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 PG의 모자이크 폭(mosaic spread)이며, 모자이크 폭이 커지면 적분반사율이 증가하여 중성자속이 커지는 효과와 각확산 증가에 의한 중성자속 감소 효과가 서로 상충한다. 따라서 하나로에서의 중성자속과 sample 위치 등 실제 조건에 대해 최적화된 모자이크 폭을 결정하였으며, 그 값으로서 0.8° 를 얻었다[2]. 구입된 PG 결정의 상용 규격은 $0.8^\circ \pm 0.2^\circ$ 로 주어지나 정확한 값은 측정에 의해 확인되어야 한다. 본 연구에서는 Si 단결정(모자이크 폭 : $10''$)을 monochromator로서 사용한 2축 분광계에 의해 PG의 모자이크 폭을 측정하였다. 또한 sample 위치에서의 중성자속 분포를 Monte Carlo법으로 계산하여 PG를 수평 방향으로 휨으로써 얻을 수 있는 중성자속 집속 효과를 계산하였다.

2. Mosaic spread 측정

Pyrolytic graphite의 모자이크 폭을 측정하기 위한 2축 분광계의 배치도는 Fig. 1과 같다. 중성자속에서 인출되는 백색 중성자 중에서 monochromator의 Bragg 조건에 해당되는 파장을 가진 중성자만이 회절되며, 이 단색빔을 PG에 입사시킨 상태에서 PG를 rocking하여 얻은 곡선으로부터 모자이크 폭을 결정할 수 있다. Rocking curve의 반폭치 Δw 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\Delta w^2 = \frac{[a^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 + (2-a)^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + a^2 \alpha_3^2 \alpha_1^2] \beta_1^2 + [(1-2a)^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2] \beta_2^2 + 4[a^2 \alpha_1^2 + (1-a)^2 \alpha_2^2 + \alpha_3^2] \beta_1^2 + 4[(1-a)^2 \alpha_2^2 + a^2 \alpha_1^2 + \alpha_3^2] \beta_1^2 \beta_2^2 + (1-a)^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + (1-2a)^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2}{4[a^2 \alpha_1^2 + (1-a)^2 \alpha_2^2 + \alpha_3^2] \beta_1^2 + 4[(1-a)^2 \alpha_2^2 + a^2 \alpha_1^2 + \alpha_3^2] \beta_1^2 \beta_2^2 + (1-a)^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + (1-2a)^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2} \quad (1)$$

여기서 β_1, β_2 는 각각 monochromator와 PG의 모자이크 폭을, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 각각 입사빔, PG 전단, 검출기 전단에서의 collimator 각도 폭을, a 는 $\tan \theta_2 / \tan \theta_1$ 을 나타낸다. Fig. 1과 같이 본 연구에서 설정한 collimator 각도 폭은 각각 $\alpha_1 = 0.17^\circ, \alpha_2$ 는 open 상태, $\alpha_3 = 2.8^\circ$ 이며, β_1, β_2 는 각각 $10'', 0.8^\circ \pm 0.2^\circ$ 이므로 $\beta_1 \ll \beta_2$ 의 관계에 있다. Monochromator로 사용된 Si와 PG의 Bragg 각도는 stepping motor에 의해 파장이 4.11 \AA 인 중성자에 대한 Bragg 조건으로서 표 1과 같이 각각 설정되었으며, 이로부터 a 값은 약 0.9가 된다. 따라서

$$\Delta w^2 = \beta_2^2 \quad (2)$$

으로 귀결되어 측정된 rocking curve의 반폭치만 결정하면 된다.

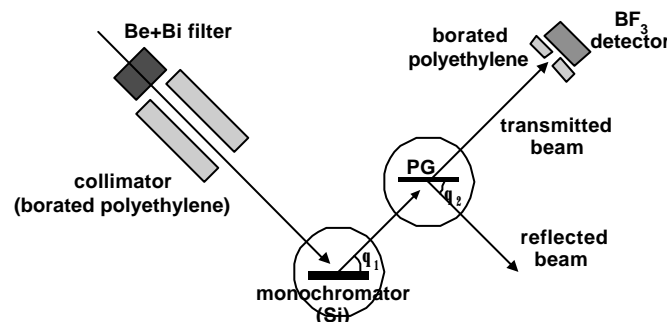


Fig. 1. Experimental arrangement for measurement of the mosaic spread of PG crystals.

Table 1. Specification and Bragg angle of the crystals.

	Si	Pyrolytic graphite
plane	(111)	(002)
interplanar distance	3,1355 Å	3,354 Å
Bragg angle	41°	37,8°

PG rocking curve를 측정한 예는 Fig. 2와 같다. 이를 정규분포로 fitting한 결과 $0.91^\circ \pm 0.01^\circ$ 의 모자이크 폭을 얻었다. PGNAA 장치에 설치하는 PG 갯수는 ST1 수평 중성자중 출구의 중심부 $70^* \times 60^h \text{ mm}^2$ 영역을 제외한 상하 각 $70^* \times 30^h \text{ mm}^2$ 영역에 $75 \times 50 \times 2 \text{ mm}^2$ 크기를 2개씩 설치하게 되며, 5개의 동일 규격 PG에 대해 모자이크 폭이 모두 $0.9^\circ \pm 0.4^\circ$ 범위내로 결정되었다.

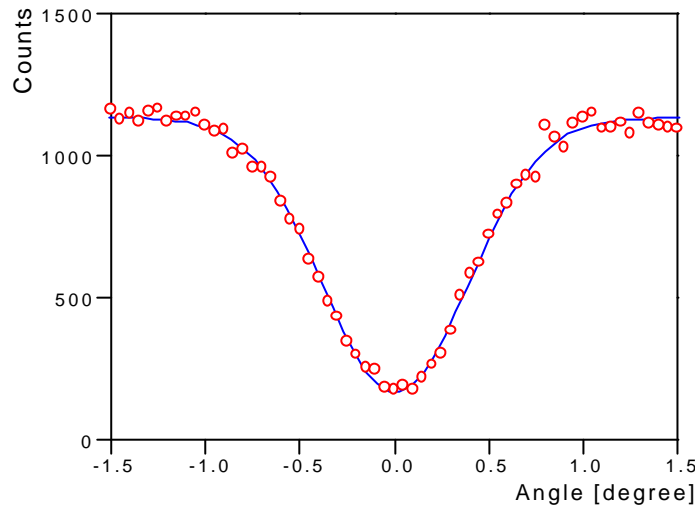


Fig. 2. The rocking curve in transmission geometry for a PG crystal.

3. PG bending에 의한 집속 효과

PG를 수평 방향으로 휘 경우 회절빔 진행 경로는 Fig. 3과 같다. 그림에서 X축과 Z축은 각각 입사 중성자의 진행 방향과 회절후 중성자 진행 방향을 나타낸다. F와 G는 각각 초점과 sample 위치이며, H는 α 의 발산각으로 입사한 빔이 회절후 중심축과 만나는 위치를 나타낸다. L_h 는 반사 조건으로부터 초점거리 L_f 에 의해

$$L_h = L_f \frac{w}{w - 2\alpha L_f} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. Sample 위치에서 중성자속 분포를 가능한 한 균일하게 하기 위해서는 평행하게 입사한 빔과 발산각을 가진 입사빔의 sample 위치에서의 빔 폭이 동일해야 하며, 이 조건에 의해 sample 위치와 초점의 관계가

$$L_s = L_f \frac{w}{w - \alpha L_f} \quad (4)$$

와 같이 결정된다. 따라서 초점거리는 PG-sample간 거리 150 cm와 입사빔의 각확산도 0.5°로부터 (4)식에 의해 123 cm가 된다. 산란 평면에 수직인 평면상에서의 초점거리와 곡률반경 R은

$$L_f = \frac{R}{2\sin\theta} \quad (5)$$

의 관계에 있으므로 [4,5] PG의 곡률반경은 174 cm이다.

곡률반경이 R이 되도록 PG를 균일하게 휜 경우 PG가 받는 표면응력 σ 는

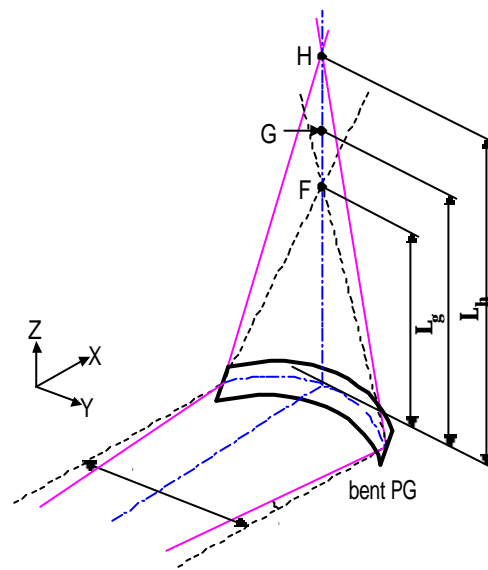
$$\sigma = 6 \frac{\delta t_0}{w^2} E \quad (6)$$

와 같다[6]. 여기서 w 는 PG 수평방향 폭, t_0 는 두께, E 는 Young's modulus를 각각 나타내며, δ 는 변형된 길이로서 R과 w 에 의해

$$\delta = R(1 - \cos \frac{w}{2R}) \quad (7)$$

로서 0.4 mm이다. PG 제작사인 Advanced Ceramics사로부터 제시된 값을 이용하여 PG가 받는 표면응력을 계산하면 17 MPa이며, PG의 tensile stress 80 MPa의 21% 수준이다.

실질적으로 PG의 휨 조건을 확인하기 위한 방법으로서는 볼록렌즈를 이용하여 얻은 평행광을 PG에 입사시켜 반사된 상을 관측하였다. 즉, 초점이 형성되는 상태를 확인하기 위해 PG를 점점 휘어 가면서 PG 표면에 평행광을 입사시켜 반사된 상을 관측하고, 이로부터 123 cm 위치에 초점이 형성되는 휨 조건을 결정하였다. 평행광은 손전등용 전구에서 방출된 빛을 직경 90 mm인 볼록렌즈에 통과시켜 얻었으며, PG를 휨에 따라 PG로부터 123 cm 위치에서의 반사광 직경이 75 mm에서 20 mm까지 감소함을 확인하였다.



G : sample position, F : focus,
 α : incident beam divergence(= 0.5°)

Fig. 3. Schematic diagram of the focusing geometry.

PG를 수평 방향으로 휨으로써 얻어지는 중성자 집속 효과를 계산하기 위해 sample 위치에서의 중성자속 분포를 Monte Carlo법으로 계산하였다. X-Z 평면과 Y-Z 평면에서 sample 위치에서의 중성자 분포를 계산한 결과는 Fig. 4와 같다. X-Z 평면에서의 분포는 Fig. 4 (a)와 같이 ST1 중성자중 윗부분과 아래부분에 설치된 PG로부터의 각 분포가 합해져 전체적으로 균일한 형태를 이

른다. Fig. 4 (b)에서 PG를 휘지 않은 경우와 휘 경우의 중성자속 분포를 비교하면 2배의 중성자속 이득이 기대된다.

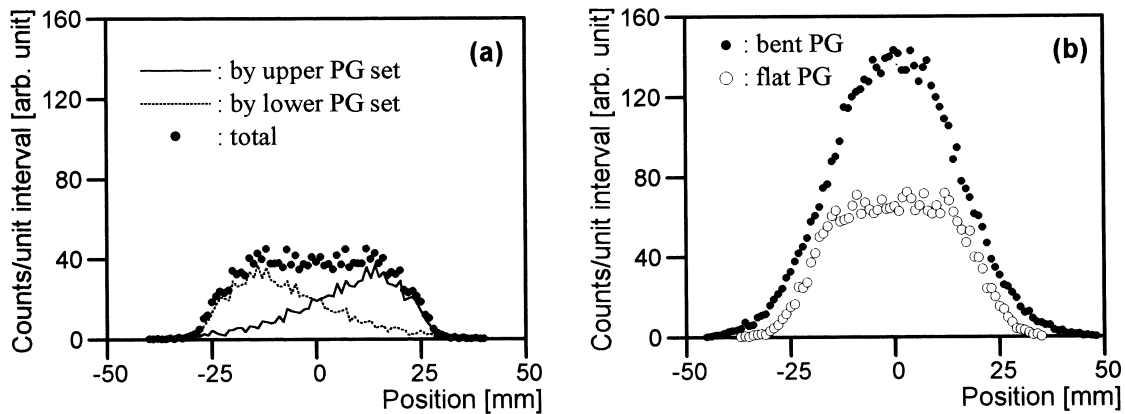


Fig. 4. Diffracted neutron profile at the sample position for the scattering plane(a) and the plane perpendicular to the scattering plane(b) obtained by the Monte Carlo calculation.

4. 결론

2축 분광계를 이용하여 PGNAA 장치에 사용될 pyrolytic graphite 결정의 모자이크 폭을 측정하였다. 또한 sample 위치에서의 중성자속을 높이고 균일한 분포를 얻을 수 있는 PG 휨 조건을 결정하였으며, Monte Carlo법에 의해 중성자속 분포와 집속 효과를 계산하였다. 평행광을 PG에 입사시켜 반사된 상을 관측함으로써 PG 휨 조건을 실질적으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구에서의 pyrolytic graphite 결정의 모자이크 폭 측정을 위해 하나로 CN 수평중에 2축 분광계를 설치하고 측정시 많은 도움을 주신 한국원자력연구소 중성자 물리실의 신은주씨께 감사드립니다.

참고문헌

1. B.J. Jun, B.S. Seong, M.S. Kim, S.H. Byun and H.D. Choi, in Proc. 6th Asian Symp. on Research Reactors (JAERI, Mito, 1999).
2. S.H. Byun and H.D. Choi, in Proc. 10th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis (USA, Bethesda, 1999)
3. C. Caglioti and F.P. Ricci, Nucl. Instr. and Meth., 15 (1962) 155.
4. T. Riste, Nucl. Instr. and Meth., 86 (1970) 1.
5. V. Wagner, P. Mikula and P. Lukas, Nucl. Instr. and Meth., A338 (1993) 53.
6. M.F. Ashby and D.R.H. Jones, "Engineering Materials", 112, Pergamon Press, 1980.