2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

회절 다색 중성자빔에 대한 1/v 흡수체의 유효 단면적 측정

Measurement of the Effective Cross Section of a 1/v Absorber for Diffracted Polychromatic Neutron Beam

변수현, 선광민, 박창수, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

두꺼운 ^{10}B 시료와 얇은 ^{10}B 시료의 즉발 감마선 스펙트럼을 측정하여 SNU-KAERI PGAA 장치의 중성자빔에 대한 유효 속도와 온도를 결정하였다. 두꺼운 시료에서의 높은 중성자 흡수율로 인하여 중성자속과 감마선 검출 효율을 각각 최소 조건으로 설정하였다. ^{10}B 의 유효 흡수 단면적은 ^{10}B 피크의 계수율 비로부터 얻었다. 유효 단면적으로부터 결정된 중성자빔의 유효 속도 및 온도는 각각 2117 ± 21 m/s, 269 ± 5 K 이다. 이 결과는 중성자 스펙트럼을 이용한 계산치와 4% 범위내로 일치한다.

Abstract

The effective velocity and temperature for the neutron beam of the SNU-KAERI PGAA facility are determined by measuring the prompt γ-ray spectra for thin and thick ^{10}B samples. Both the neutron flux and the γ-ray detection efficiency were set at minimum due to high neutron capture rate for the thick sample. The effective absorption cross section of ^{10}B is obtained from the ratio of ^{10}B peak count rates in both the spectra. The effective velocity and temperature of the neutron beam determined from the effective cross section are 2117 ± 21 m/s and 269 ± 5 K, respectively. These results are consistent with the values calculated from the neutron spectrum in 4%.

1. 서 론

한국원자력연구소의 하나로에 설치된 즉발 감마 방사화 분석(Prompt Gamma Activation Analysis, PGAA) 장치는 2001 년 5 월부터 시험 가동중이다. PGAA 분석법은 특히 중성자 흡수 단면적이 큰 H, B, Sm, Cd 등의 원소에 대한 함량 분석에 유용하다. 본 장치의 개발은 붕소 중성자 포획 치료(Boron Neutron Capture Therapy) 장치에서의 붕소 농도 측정을 위해 원자력연구소의 지원하에 서울

대학교 연구팀의 주된 작업으로 진행되었으며, 본 논문에서는 “SNU-KAERI PGAA”로 지칭하기로 한다. 본 장치에서 사용되는 중성자빔은 pyrolytic graphite crystal 에 의해 회절된 다색빔이며[1-3], 장치 설계 및 제작[4], graphite crystal 의 배치 조건에 따른 회절 중성자빔 특성 측정[5] 등을 거쳐 현재 즉발 감마선 측정이 진행중이다. PGAA 분석에서 검출 민감도 예측, 분석의 표준화 등을 수행하기 위해서는 해당 핵종의 중성자 흡수 반응율에 대한 정보가 중요하다. 흡수 반응율은 중성자속과 중성자빔 스펙트럼을 이용하여 구한 유효 흡수 단면적으로 기술할 수 있다. 최근에는 Lindstrom 등에 의해 중성자 스펙트럼을 사용하지 않고서도 유효 단면적을 결정할 수 있는 간단한 방법이 제안되었다[6]. 이 방법은 1/v 흡수체의 얇은 시료와 “black absorber”인 두꺼운 시료에 대해 측정한 즉발 감마선 피크 계수율의 비를 이용하여 유효 단면적을 결정한다. 본 연구에서는 ^{10}B 에 대해 이 방법을 적용하여 SNU-KAERI PGAA 장치의 중성자빔에 대한 유효 흡수 단면적을 측정하였다. 또한 이 결과로부터 중성자빔의 유효 속도 및 온도를 결정하였다.

2. 측정 원리

임의 핵종의 유효 흡수 단면적은 중성자 스펙트럼에 평균화된 흡수 단면적으로서

$$\langle \sigma_a \rangle = \frac{\int_0^\infty \sigma_a(E)\phi(E)dE}{\int_0^\infty \phi(E)dE} \tag{1}$$

와 같이 정의된다. 여기서 ϕ(E)는 중성자속 분포, σ_a(E)는 중성자 에너지가 E일 때 해당 핵종의 흡수 단면적을 각각 나타낸다. SNU-KAERI 장치의 경우 회절 다색 중성자를 사용하기 때문에 중성자의 에너지 분포가 연속적이지 않고 이산적이며, 반응율은 회절 차수 6차까지 고려하면 충분하므로 유효 흡수 단면적이

$$\langle \sigma_a \rangle \cong \sum_{n=1}^{6} w_n \sigma_a(E_n) \tag{2}$$

과 같이 간단히 된다. 여기서 w_n은 전체 회절 중성자속 중에서 회절차수 n인 중성자의 상대 비율이다. Lindstrom 등은 중성자 스펙트럼을 모르는 상태에서 즉발 감마선 측정 결과를 이용하여 유효 단면적을 결정하는 간단한 방법을 제안하였다[6]. 본 방법에서는 흡수 핵종의 면적 밀도를 이미 알고 있는 얇은 시료와 해당 핵종이 중성자를 모두 흡수하는 충분히 두꺼운 시료에 의한 즉발 감마선 피크의 계수율 비를 이용하여 유효 단면적을 구하게 된다.

시료내에서의 중성자속 감쇠를 무시할 수 있는 얇은 ^{10}B 시료에 의한 즉발 감마선 피크 계수율 C_{thin}은

$$C_{thin} = \varepsilon\Gamma\int_0^\infty \sigma_a(E)\phi(E)NVdE = \varepsilon\Gamma AD\phi_D\langle \sigma_a \rangle \tag{3}$$

가 된다. 여기서 ε은 ^{10}B의 중성자 흡수 후 방출되는 478 keV 즉발 감마선의 검출 효율, Γ는 중성자 흡수당 478 keV 감마선 방출 수, NV는 시료내 ^{10}B 개수, A는 시료의 면적, D는 ^{10}B의 면적 밀도, ϕ_D는 시료 위치에서의 중성자속을 각각 나타낸다. 두꺼운 시료는 “black absorber”로서 중성자가 거의 모두 흡수되며, 에너지가 높은 영역의 중성자만이 극히 일부분 투과한다. 따라서

피크 계수율은

$$C_{thick} = \varepsilon \Gamma A' \phi_D \tag{4}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 A'은 시료의 면적을 중성자 빔 단면에 정사영한 면적으로서 시료가 중성자 진행 방향에 대해 45° 기울어져 있기 때문에 Acos45°가 된다. 즉 $A'\phi_D$는 두꺼운 시료에서의 ^{10}B의 중성자 흡수율을 나타낸다. 따라서 두 계수율의 비로부터 유효 단면적은

$$\langle \sigma \rangle_{meas} = \frac{A'}{A} \frac{1}{D} \frac{C_{thin}}{C_{thick}} \tag{5}$$

와 같이 구할 수 있다. 얇은 ^{10}B 시료와 두꺼운 ^{10}B 시료의 형태 및 크기가 동일하기 때문에 A'/A 항은 상수이므로 얇은 시료의 ^{10}B 면적 밀도만 주어져 있으면 유효 단면적이 두 시료의 즉발 감마선 피크 계수율 비에 의해 간단하게 결정된다.

유효 단면적이 결정되면 중성자빔의 유효 속도 및 유효 파장은 각각

$$\langle v \rangle = v_0 \frac{\sigma_{a0}}{\langle \sigma_a \rangle}, \tag{6}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{h}{m \langle v \rangle}, \tag{7}$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 v_0는 2200 m/s, σ_{a0}는 v_0에서의 흡수 단면적, h는 Planck 상수, m은 중성자 질량을 각각 나타낸다.

3. 장치 구성 및 실험

SNU-KAERI PGAA 장치의 개념도는 그림 1 과 같다. 장치는 한국원자력연구소의 하나로 ST1 수평공에 설치되어 있으며, 편광 중성자 분광계(polarized neutron spectrometer)와 중성자공을 공유하고 있다. 원자로 벽 안쪽의 ST1 공 출구 부근에는 회전 셔터가 설치되어 20′, 30′ 및 full open 조건으로 빔 인출 조건을 설정할 수 있다. 따라서 흡수 반응율을 높이기 위해 대부분의 경우 full open 상태로 중성자를 인출하며 흡수 반응율이 지나치게 높은 특별한 경우에만 중성자속이 낮은 20′ 또는 30′ 조건을 사용하게 된다. ST1 중성자공으로 방출된 중성자 중에서 pyrolytic graphite crystal 의 Bragg 조건을 만족하는 중성자가 90° 회절되어 collimator, 빔셔터 및 최종 중성자 슬릿을 거쳐 시료에 도달한다. 시료에서의 중성자 흡수로 방출되는 즉발 감마선은 회절 중성자 진행 방향과 90° 각도로 배치된 HPGe 검출기에 의해 계측되며 시료를 통과한 중성자는 stopper 에 도달하여 흡수된다. 정상 상태에서의 HPGe 검출기의 위치는 시료로부터 25.5 cm 위치로 설정된다. 즉발 감마선 계측계통은 HPGe 검출기, 전치 증폭기, 분광용 증폭기 및 MCB(Multi Channel Buffer)로 구성되며 상용 Gamma-Vision 프로그램에 의해 스펙트럼 저장 및 on-line 분석을 수행한다.

유효 단면적 측정에 사용된 표준 시료는 NIST(National Institute of Standards and Technology, USA)로부터 제공되었다. 각 시료의 크기는 양 변이 2.5 cm 인 정사각형이다. 두께가 얇은 ^{10}B 시료는 Si 에 증착된 borophosphosilicate glass 이며, ^{10}B 면적 밀도는 neutron depth profiling 에 의해 측정된 5×10^{16}/cm^2 이 제시되어 있다. 한편 두꺼운 ^{10}B 시료로서는 두께가 1.3 mm 이고 ^{10}B 이 4.5wt% 포함

된 ^{10}B–Al alloy sheet 가 사용되었다.

먼저 두꺼운 시료를 정상적인 PGAA 설정 조건으로 조사시켰을 때 정량 분석이 곤란할 정도로 감마선 계수율이 지나치게 높게 나타났다. 따라서 감마선 분석의 신뢰도를 유지하기 위해 불감시간이 10% 미만이 되도록 ST1공 collimator 설정 및 HPGe 검출기 위치를 조정하였다. 즉, ST1공 collimator는 중성자속이 가장 낮은 20′을, HPGe 검출기는 설정 가능한 최대 원거리인 35.5 cm로 각각 설정하였다. 또한 검출기 위치를 조정함으로써 발생된 빈 공간에는 5 mm 폭의 감마선 납 collimator를 추가하였다. 얇은 시료의 경우에도 동일한 계측 조건에서 즉발 감마선 스펙트럼을 측정하였다. 두 시료는 모두 Teflon sheet로 밀봉하여 중성자빔 진행 방향과 45° 각도로 고정하였다. 시료를 조사하는 동안의 중성자속 변동은 직경 6 mm인 Ti 박막을 ^{10}B 시료의 중심에 위치시킨 상태에서 함께 조사하여 Ti의 즉발 감마선 피크에 의해 확인하였다. Ti 1381.5 keV 피크를 분석한 결과 두 시료의 조사중 평균 중성자속 변동은 1% 미만이었다.

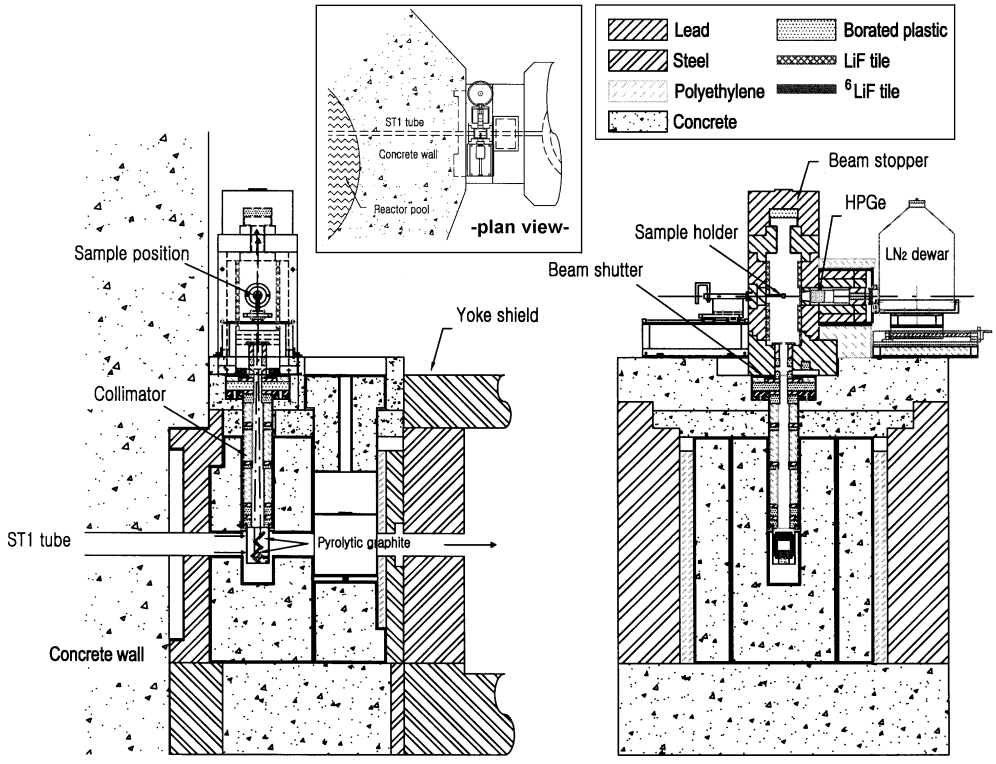

Fig. 1. Schematic diagram of the SNU-KAERI PGAA facility.

4. 결과 및 평가

두가지 ^{10}B 시료에 대해 측정된 스펙트럼을 478 keV 감마선 피크 부근에서 비교하면 그림 2와 같다. ^{10}B의 478 keV 피크가 Doppler-broadening 효과로 인해 다른 피크 보다 폭이 현저하게 넓게 나타남을 확인할 수 있으며 두 시료의 피크 계수율은 1000 배 이상의 차이를 보이고 있다. 얇은 ^{10}B 시료의 경우 475 keV 위치에 ^{10}B 피크와 중첩되는 background 피크가 존재하며, 이 피크의

면적은 empty bag 상태에서의 background 스펙트럼을 측정하여 보정하였다. 표 1은 ^{10}B 피크 분석 결과를 요약하였으며 이로부터 (6)식에 의해 유효 단면적 및 유효 속도 등을 계산한 결과는 표 2와 같다. “Black absorber”로 사용된 ^{10}B-Alloy 시료는 실제로는 모든 중성자를 완전히 흡수하지는 못하고 에너지가 높은 고차 회절 차수 중성자에 대하여 수 %의 투과율이 존재하므로, 표 2의 측정치는 이 투과 효과에 의한 보정치 2%를 반영한 결과이다. 표 2의 계산치는 PGAA 장치 중성자 스펙트럼을 이용하여 (1) 식으로 계산한 결과이다. 계산에 사용된 중성자 흡수단면적은 ENDF 자료를 이용하였다[7]. 측정된 ^{10}B의 유효 흡수 단면적은 3987.2 ± 39.9 barn으로서 2200 m/s에서의 단면적 3837 barn과 거의 일치하는 수준이다. 이는 graphite cyrstal에 의한 회절 다색빔이 입사 Maxwell 스펙트럼 에너지 영역에 고루 분포되어 있기 때문이다. 두 가지 결과를 비교하면 4 % 범위내로 일치한다. 따라서 즉발 감마선을 이용한 유효 단면적 측정 방법이 신뢰성 있게 적용될 수 있음을 알 수 있다. 측정치와 계산치의 차이는 ^{10}B 면적 밀도의 오차, 중성자 스펙트럼의 오차 등에 의해 유발된 것으로 추정된다.

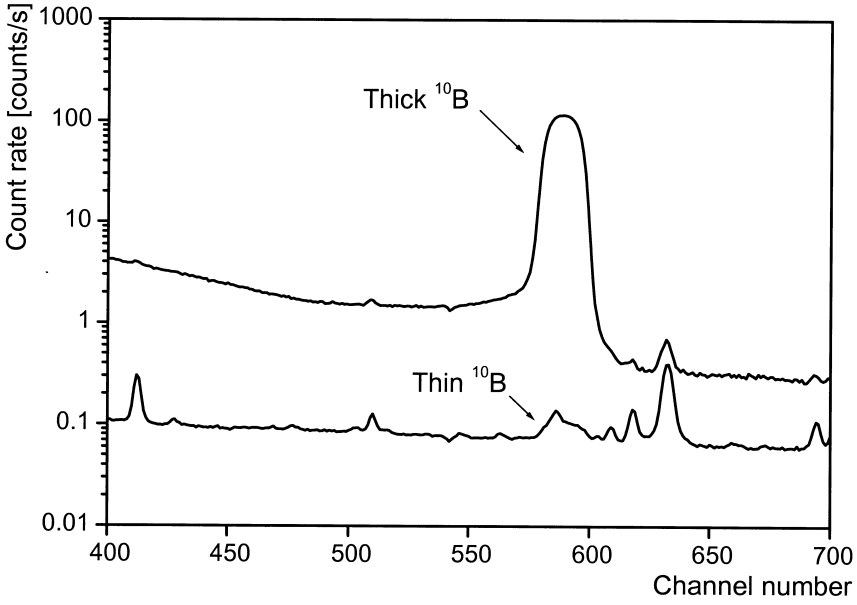

Fig. 2. Measured spectra for thick and thin boron samples.

Table 1. Countings of ^{10}B peaks for thin(Borophosphosilicate glass on Si) and thick(^{10}B-Al alloy) samples.

Sample	Live time [sec]	Peak area [counts]	Count rate [cps]
Borophosphosilicate Glass on Si	75000	38322 ± 238	0.5110 ± 0.003
^{10}B-Al alloy	3600	6.394×10^{6} ± 2578	1776.1 ± 0.7

Table 2. Comparison of the measured effective velocity from the results in Table 1 and the calculated one by using the measured neutron spectrum and the energy-dependent cross sections of ^{10}B.

	<σ> [barn]	<v> [m/s]	<λ> [Å]	<T> [K]
Measured	3987.2 ± 39.9	2117.2 ± 21.2	1.87 ± 0.02	268.6 ± 5.4
Calculated	3850.6	2192.2	1.80	288

참고 문헌

1. S.H. Byun, H.D. Choi, B.J. Jun and M.S. Kim, “Extraction of Polychromatic Thermal Neutrons by Bragg Diffraction to Use for Prompt Gamma Neutron Activation Analysis”, Proceedings of 10th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, 731 USA (2000).
2. S.H. Byun and H.D. Choi, “Design Features for a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis System at Hanaro”, J. Radioanal. Nucl. Chem., **244**, 413 (2000).
3. H.D. Choi, G.M. Sun, S.H. Byun, C.S. Kang and N.B. Kim, “Progress and Plan of the PGNAA facility at Hanaro”, Appendix 3, Summary Report of the Second Research Co-ordination Meeting, INDC(NDS)-424, June 2001, IAEA Nuclear Data Section, Vienna, Austria.
4. 변수현, 선광민, 김인중, 최희동, 김명섭, 전병진, “하나로 즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치 개발 현황”, 2000 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
5. 변수현, 선광민, 김인중, 최희동, 김명섭, 전병진, “하나로 즉발 감마 중성자 방사화 분석 장치 중성자빔 특성”, 2001 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
6. R.M. Lindstrom, “Neutron Beam Characterization”, Appendix 3, Summary Report of the Second Research Co-ordination Meeting, INDC(NDS)-424, June 2001, IAEA Nuclear Data Section, Vienna, Austria.
7. Evaluated Nuclear Data Files, 1998, http://www.nndc.bnl.gov/nndc/endf/.