

# 하나로의 즉발감마선 방사화분석 장치를 이용한 붕소의 정량에 대한 연구

정용삼\* · 조현재 · 문종화 · 김선하 · 김영진

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(2003. 7. 5 접수, 2003. 7. 24 승인)

## Study on Determination of Boron using the PGAA Facility at HANARO Research Reactor

Young-Sam Chung\*, Hyun-Jae Cho, Jong-Hwa Moon, Sun-Ha Kim and Young-Jin Kim

\*Korea Atomic Energy Research Institute,

150 Dukjin-dong, Yusong, Daejeon, Korea

(Received Jul. 5, 2003, Accepted Jul. 24, 2003)

**요약** : 하나로의 즉발감마선 방사화분석 장치를 이용하여 생물시료중의 붕소의 정량을 위한 기초 연구를 수행하였다. 측정조건에 대한 특성조사를 위해 시료에 대한 중성자 조사 위치에서 중성자속 및 균질도를 측정하였다. 시료위치에서 열중성자 빔의 크기가  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  되도록 집중하였으며, 측정된 선속은  $1.0 \sim 6.5 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  범위를 나타냈으며, 중심부로부터 반경 4.5 mm 이내 및 9 mm 이내에서 각각  $5.77 \pm 0.71 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $4.68 \pm 1.64 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  이었다. 따라서 양질의 균일한 조사를 위해서 시료의 크기를 10 mm 이내로 조정하였다. 검출 시스템은 컴프턴 산란에 의한 백그라운드 요인을 억제하고 분석감도를 높이기 위해 설계되었으며, 감마선 계측 시스템의 에너지 교정과 컴프턴 억제율을 조사하기 위해 NaCl 표준체를 이용하여 단일 및 컴프턴 모드로 백그라운드를 측정하였다. 또한 정확한 붕소의 측정을 위해 시료의 매질효과로서 발생하는 분광학적 Na의 472 keV 피이크에 대한 간섭효과를 결정하였으며, 세 가지 인증표준물질 (NIST SRM 1570a, 1547, 1573a)을 이용한 붕소농도 측정시험을 두 가지 모드로 실시한 후 결과를 비교하였다.

**Abstract** : Basic research for the determination of boron content in biological sample has been carried out using the PGAA facility of the 24MW research reactor(HANARO). For investigation of characteristics for the measurement condition, neutron flux and its homogeneity were measured at irradiating geometry. The size of thermal neutron beam collimated from beam guide is  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  at the sample position. The neutron flux measured was the range of  $1.0 \sim 6.5 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , and flux distribution from center within the radius of 4.5 mm and 9.0 mm was  $5.77 \pm 0.71 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $4.68 \pm 1.64 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. Accordingly, sample size is adjusted within 10 mm for

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)42-868-8412 Fax : +82+(0)42-868-8448

E-mail : yschung@kaeri.re.kr

a homogeneous irradiation of high quality. Measurement system is designed to reduce the background source by Compton scattering and to improve the analytical sensitivity. To investigate the energy calibration and Compton suppression effect of gamma-ray counting system, the background conditions on both of Compton and single-mode were measured using NaCl standard. On the other hand, degree of spectral interference for sodium 472 keV peak as a matrix effect in the sample is established for an accurate boron analysis, and then boron content in three certified reference materials (NIST SRM 1570a, 1547, 1573a) was measured by using two modes and the results were compared with each other.

**Key words** : HANARO research reactor, Prompt gamma neutron activation analysis (PGAA), Boron analysis, Biological sample

## 1. 서 론

핵분석기술 (Nuclear Analytical Techniques) 중에서 중성자 포획반응에 의한 분석 방법은 미량원소의 정량분석에 중요한 정보를 제공한다. 중성자 방사화분석 (Neutron Activation Analysis, NAA)이 분석감도의 측면에서 미량의 많은 원소를 정량하는데 흔히 사용하는 기술이지만, 중성자를 포획한 후, 안정 핵종이 생성되지 않거나 또는 생성 핵종의 반감기가 너무 길거나 짧아서 충분한 세기의 감마선이 방출되지 않는 경우에는 분석의 어려움이 발생한다. 즉발감마선 방사화분석 (Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis: PGAA)은 NAA와 같이 중성자 포획반응을 이용한 비파괴 분석 기술이지만 여기된 핵이 즉발적으로 방출하는 방사선을 이용하기 때문에 생성 핵종의 방사성 성질과는 무관하여 여러 분야에 이용할 수 있다.

PGAA는 방사성 붕괴로부터 지연감마선에 의한 감마 스펙트럼보다 더 복잡한 형태를 보이는데, 이것은 주로 핵자당 감마전이가 많고 스펙트럼간의 간섭확률이 높아서 복잡다중 전이 분포를 이루기 때문이다. 이때 대다수 고에너지 감마선들은 검출기 시스템내의 물질과의 상호작용에 의해 Compton scattering 에 따른 Compton continuum과 pair production에 따른 escape 피크가 생성되어 저에너지 영역에서 낮은 감마선 강도를 갖는 많은 감마선들을 덮어버리게 된다. 이러한 영향들로 인해 PGAA 측정에서도 백그라운드가 높게 나타나는 원인이 된다. 따라서 스펙트럼상의 백그라운드 영향을 제거하고 분석감도를 증가시키기 위해서 각각 컴프턴 억제 시스템이나 annihilation pair spectrometric 시스템을 구성하여 측정에 이용하고 있다.<sup>1</sup> PGAA 장치의 성능은 고속 중성자

및 감마선이 충분히 제거된 상태로 높은 중성자 속의 열, 열외 또는 냉중성자 빔의 이용 여부에 따라 달라진다. 초기의 장치들은 대부분 중성자공에서 유도된 빔을 그대로 사용하였으나, 오늘날에는 냉중성자 빔라인 설치가 보편화되면서 냉중성자 빔을 이용한 장치의 개발이 주류를 이루고 있다.<sup>2</sup>

최근에는 PGAA를 이용하여 붕소 중성자 포획 치료 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)를 위한  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  반응연구가 열 및 냉중성자 측정시스템을 이용하여 활발히 진행되고 있다. Volker<sup>3</sup>, Riley<sup>4</sup> 등은 BNCT 연구를 위한 생물, 임상 및 의학적 이용 목적으로 붕소의 정량을 연구하여 치료기술 개발에 활용해 오고 있다. Yonezawa<sup>5</sup> 등은 시료에서 수소의 간섭영향을 고려한 측정정확도 방법을 이용하여 인체조직에서의 붕소검출 방법 등을 연구해오고 있다. Mackey<sup>6</sup>, Marshall<sup>7</sup>, Kuno<sup>8</sup> 등은 생물 및 지질시료에서 미량원소 분석을 위해  $^{252}\text{Cf}$ 을 중성자원으로 이용한 측정 스펙트럼에서 선형중첩방법을 이용하여 정량분석을 시도하였다. 이외에도 수증의 침전물<sup>9</sup>에 함유된 미량원소 분석과 토양과 대기류<sup>10</sup> 사이의 농도 상관관계 등의 연구, 농작물<sup>11</sup>과 식품<sup>12</sup>에 Na 및 H의 영향 분석을 통한 함유 원소분석 등에 이용하고 있다.

본 연구는 하나로 PGAA 장치를 이용하여 생물시료 중의 B의 정량을 위한 기초연구로서 분석장치의 백그라운드 피크 및 간섭핵종의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 특히 에너지 교정과 컴프턴 억제율을 보기위해 NaCl 시료를 이용하여 단일모드와 컴프턴 모드로 측정하였다. 붕소분석에 필요한 시료캡슐 및 주변 백그라운드 및 분광학적 간섭의 영향 등을 고려하여 인증 표준물질을 이용하여 정확한 붕소의 농도를 측정하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. PGAA 장치

PGAA 장치는 Fig. 1 에 보인 바와 같이 하나로 원자로 ST1 중성자공 출구 상단에 설치되었다. 열중성자 인출을 위해 회절격자인 pyrolytic graphite(PG)가 이용되었고, 빔조준기 (beam collimator)는 열중성자, 감마선 및 고속중성자를 흡수하기 위해 borated plastic, 납, 폴리에틸렌 등을 이용하여 시료위치에서 빔이 집중될 수 있도록 구성되어 있다. 중성자 조준기를 통과한 회절빔이 시료에 집중되도록 시료위치에서 빔 크기가 2×2 cm<sup>2</sup>이 되도록 조정되어 있다.<sup>13</sup> PGAA 장치와 측정요건은 Table 1과 같다.

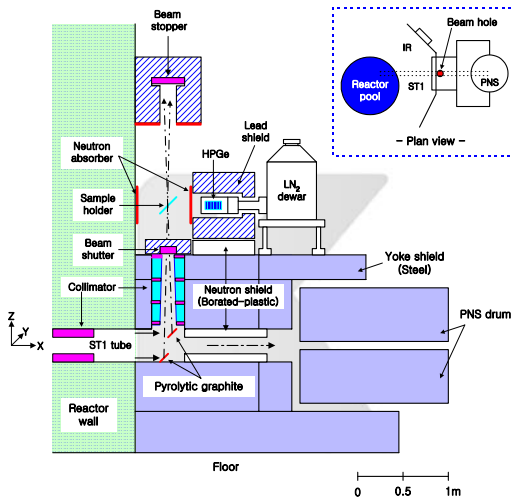


Fig. 1. Layout of PGAA facility in the HANARO research Reactor.

Table 1. Main specifications of PGAA facility.

Beam Port	ST1, 24MW HANARO
Beam Size	2 × 2 cm <sup>2</sup>
Beam type	Bragg diffraction tech. using pyrolytic graphite crystal
Neutron flux (Cd-ratio)	6.5 × 10 <sup>7</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> (> 250)
γ-ray detector	n-type HPGe, with BGO shield
Relative efficiency	43% at 1332 keV ( <sup>60</sup> Co)
Resolution	1.9 keV at 1332 keV ( <sup>60</sup> Co)
Distance	25 cm (Sample to detector)

검출시스템은 컴프턴산란에 의한 백그라운드 억제와 분석감도를 높이기 위해 Fig. 2에 보인바와 같이 HPGe 을 중심으로 주변에 8개의 BGO 검출기는 고리 (annulus) 형태로 제작 되었다.<sup>13</sup> 주검출기에서 컴프턴 산란된 감마선은 주변부 검출기와 상호작용하여 스펙트럼에 영향을 주므로 이들 신호를 제거하기 위하여 컴프턴 억제 모드로 측정을 수행하였다. 여기서 BGO는 컴프턴 억제부 (Compton suppressor)로 이용되도록 구성하였다. 이와 같은 구조는 BGO가 탈출억제 차폐체로서 신호대 잡음 비를 현저하게 향상시켜 주기 때문이다. 또한 BGO는 우수한 시간 변별력을 가지고 있어서 동시신호에 활용 가능하고 고밀도(7.3 g/cm<sup>3</sup>)이기 때문에 상대적으로 작은 용적으로도 산란된 광자를 완전히 정지시키는 것이 가능하다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 중성자빔 선속의 측정

모든 시료의 측정은 빔의 방향과 45° 각을 이루고 있는 Al sample holder에 십자형으로 테프론 실을 고정 시킨 틀의 중앙에 부착하였으며, 중성자 속 측정시에는 빔의 방향과 수직이 되게 고정하였다.

시료위치에서 열중성자 속에 대한 분포도를 알아보기 위해 gold monitor (Rx Experiment Co., USA, 99.998% purity activation wire)를 이용하여 측정하였다. 조정된 빔의 크기(2×2 cm<sup>2</sup>)에 맞추어 약 10 mg 의 Au wire를 말아서 4.5 mm 간격으로 5 × 10 개의 정사각형 배열로 모니터링 하였다. 중성자 속은 gold wire 방사화법으로 측정되었고 4시간 동안 중성자 조사 후, <sup>198</sup>Au의 412 keV 감마선을 300초간 계수하여 방사능 생성식을 이용하여 구하였다<sup>1</sup>. 추가로 바나듐 foil을 이용하여 시료 위치에서 측정시간에 따른 열 중성자의 변동을 조사하였다.

#### 2.2.2. 붕소 및 바탕스펙트럼의 측정

일차로 붕소의 감마선 스펙트럼의 형태와 특성을 파악하기 위하여 0.5 mg 정도의 붕산 (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 99.999%) 을 0.5 mL 들이 polyethylene vial (8×7 mm)에 넣고 조사위치에서 측정하였다. 또한 시료가 없는 상태의 백그라운드와 시료 및 vial로부터 발생하는 백그라운드의 영향을 고려하기 위하여 스펙트럼 측정을 수행하였으며, 실제시료 분석과정에서 붕소의 478 keV와의 주요간

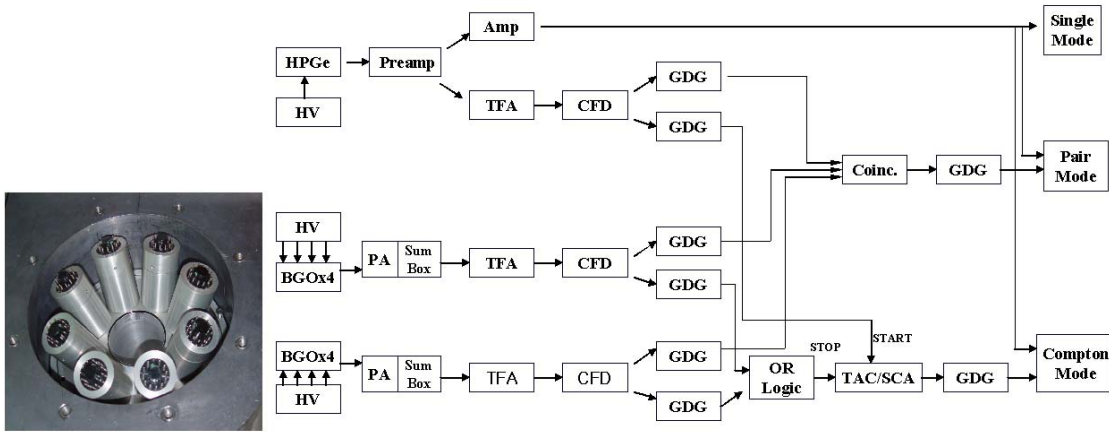


Fig. 2. BGO configuration and electric circuit. (The detector system consists of a high-purity Ge detector surrounded by a BGO scintillator as an annulus type)

섭 핵종으로 알려진 나트륨의 472 keV를 보정하기 위하여 무게 (5.08, 11.02, 22.41 and 34.63 mg)를 알고 있는 염화나트륨 (NaCl, 99.999%)을 측정하여 시료중의 나트륨 함량에 따른 초당 계측수를 산출하였다.

2.2.3. 붕소농도의 분석

PGAA에 의한 붕소의 측정에서 농도 검정에 사용되는 대표적인 붕소화합물은 붕산 (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 99.999%)이며, 붕산을 순수 (deionized water)에 단계적으로 희석시켜 붕소 표준시료를 제작한다. 본 실험에서는 붕소의 질량 (0.63, 1.46, 7.59 μg)에 따른 초당 계측수를 산출하여 바탕값을 제거한 후에 검정선을 작성하였으며 2.2.2의 실험결과를 바탕으로 시료중의 붕소를 일차적으로 정량하기 위한 방법을 확립하였다.

생물시료중의 붕소의 함량을 측정하고 비교하기 위하여 인증 표준물질을 이용하였다. 3종의 식물시료 (NIST SRM 1570a-Spinach Leaves, NIST SRM 1547-Peach Leaves, NIST SRM 1573a-Tomato Leaves)에 대한 즉발 감마선 스펙트럼을 측정하여 확립한 분석절차에 따라 시료중의 붕소함량을 결정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 시료위치의 중성자빔 선속

시료조사 위치에서 중성자 속 및 균질도 측정을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타냈으며, 열중성자 빔의 선속

은 1.0 ~ 6.8x10<sup>7</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 범위로 측정되어 위치별 차이가 컸으며, 중심부로부터 반경 4.5 mm 범위 (15개 모니터)의 평균 중성자 빔속과 편차는 5.77±0.71×10<sup>7</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 그리고 반경 9 mm 범위 (45개 모니터)까지는 4.68±1.64×10<sup>7</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>를 나타냈다. 반경 9 mm 이내에서의 평균 중성자 속과 편차는 각각 반경 4.5 mm 이내에서 보다 23%와 두 배 정도 높게 나타났으며 시료의 비 면적당 방사화율이 높아짐을 알 수 있었다.

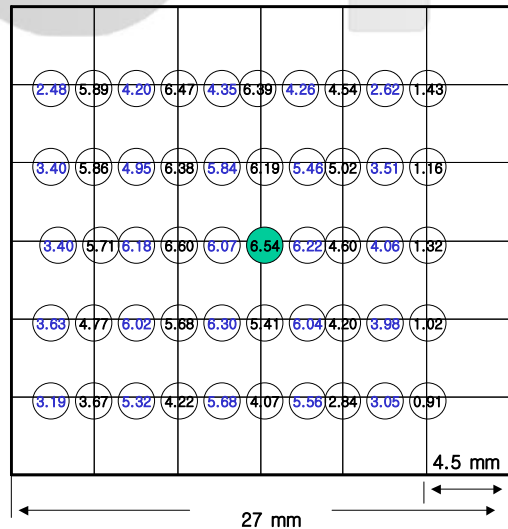


Fig. 3. Distribution of neutron flux at sample position (unit : 10<sup>7</sup> n·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>).

따라서 균일한 조사를 위해서는 시료의 크기가 10 mm 이내로 조정될 필요가 있으며, 본 측정에서는 측정 시료의 크기를 10 mm 이내로 균일하게 제작하여 측정에 이용하였다. 바나듐 foil을 시료지지대의 중앙에서 4,000 초 동안, 30 여회 반복하여 측정된  $^{51}\text{V}$ 의 645 keV의 계 측수에 대한 평균과 표준편차는  $42,370 \pm 380$  counts 로서 감마선 측정시의 통계적 오차와 큰 차이가 없어서 시간에 따른 열 중성자의 변동은 1% 이하로 나타났다.

**4.2. 컴프턴 억제장치의 비교**

본 측정에 이용한 주 검출기는 n형 HPGe로 0.5 mm 두께의 beryllium window에  $^{60}\text{Co}$ 에 대해 43% 상대효율 과 1332 keV 감마선에 2.2 keV 분해능을 가지고 있다. 8대의 BGO 검출기는 회로에 연결되어 BGO로부터 출력되는 신호는 시간 대비 문지방 신호로 분리되어 회로 내 Ge 신호를 차단하는 trigger logic 신호로 이용된다. BGO 신호는 1  $\mu\text{s}$ 로 지연시켜 BGO ADC 채널의 정지 신호가 되고, 입력 신호는 더해져서 BGO ADC에 아날 로그 신호가 되도록 하였다. 단일모드와 컴프턴 모드 측정의 자료를 비교한 결과를 Fig. 4에 보였으며, 저에너지 영역과 고에너지 영역에서의 백그라운드 영향비가 1/6에서 1/3까지 저감 됨을 확인할 수 있었다. 이로부터 저에너지 영역에서 Compton continuum에 의한 감마선의 영향이 효과적으로 배제되어 유효한 계수치를 얻을 수 있었다. 이와 같은 수치의 비는 측정에 따라 동시측 정방법 (coincidence counting method)을 이용할 경우 현 저히 줄어들 것으로 보이며 이들 방법들은 결과적으로 컴프턴 산란에 의한 백그라운드 연속에 의한 영향을 줄

여주고 피이크 대 컴프턴 비를 현저하게 향상시켜 검출 한계를 낮춰 줄 것으로 예상된다.

PGAA 장치의 성능은 크게 분석감도 (sensitivity)와 검출한계 (Detection Limit)에 의해 평가되며, 측정 원소에 대한 분석감도는 단위질량 당 계수율로 산정 (Counts per second/ $\mu\text{g}$ )하고 주어진 측정 시간에 대한 검출 한계는 검출 피이크의 백그라운드 계수율,  $[3.29 (R_B/tc)^{1/2}/\text{s}]$ 로서 산정한다.<sup>13</sup> PGAA의 분석감도 (sensitivity)는 thermal neutron cross section, counting statistics, background 그리고 interference의 영향을 받는다. 현재까지 보고된 검출 한계는 각 실험실마다 상이한 형태의 시료와 서로 다른 정의를 사용하고 있어 직접적인 비교가 불가능하며 대개 1시간의 측정으로 0.5 ~ 0.15  $\mu\text{g/g}$  범위이며, 본 시스템에서는 0.1  $\mu\text{g/g}$  으로 산정되었다.

**4.3. 붕소 및 바탕 스펙트럼**

현 측정시스템을 이용하여 시료내의 붕소를 정확하게 정량하고 검출한계를 보다 낮추기 위해서 선행되어야 하는 또 하나의 작업은 분광학적 간섭효과를 보정하는 일이다. 따라서 PGAA 검출시스템으로부터 발생하는 백그라운드와 시료 및 vial로부터 발생하는 백그라운드의 영향을 고려하기 위하여 스펙트럼 측정을 수행하였다. Fig. 5에 도플러 확장된 붕소 스펙트럼을 나타내었다. 현 장치에서 약 730~760 채널 사이에 위치하는 붕소의 478 keV 에너지에서의 반치폭은 13.1 keV로서 문헌에 알려진 범위이내에 있음을 알 수 있었다. 또한 시료가 없는 상태 및 폴리에틸렌 캡슐만을 측정 한 바탕

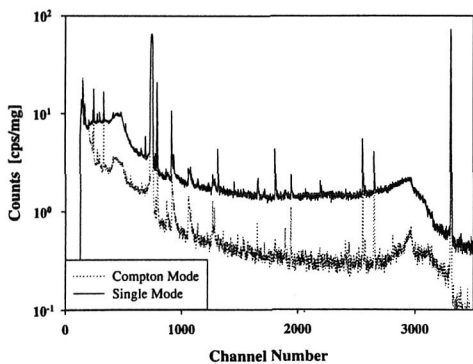


Fig. 4. Comparison of background spectrum by Compton and single mode

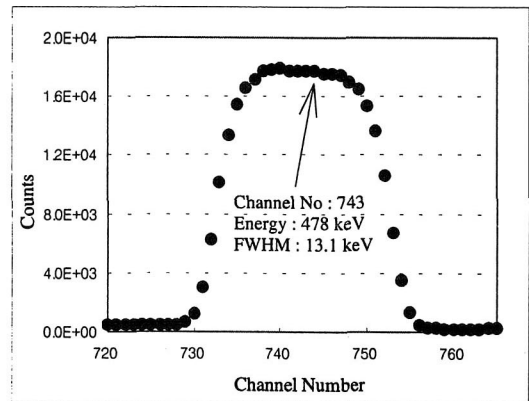


Fig. 5. Boron peak broadened by Doppler effect.

스펙트럼에서 나트륨(Na)의 472 keV와 붕소의 478 keV가 중첩된 피크가 검출되었다. 이들을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 중첩된 피크의 초당 계측수(cps)는 시료가 없는 상태에서는 0.99 cps, blank vial이 첨가된 상태에서는 1.80 cps로 측정되어 실제 시료중의 붕소 분석 시에 간섭을 유발할 수 있으며 blank vial에 의해서도 간섭정도가 가중됨을 알 수 있었다. 즉 현재 사용한 vial을 Na이 없는 Teflon과 같은 다른 고순도 재질로 대체하여 간섭을 최소화하여 검출감도를 향상시킬 필요가 있었다.

붕소의 특성 피크는 Na의 영향이 포함될 수 있으며, 이에 대한 계수율과 함유율을 보기위해 NaCl 시료를 이용하여 Na의 472 keV 영역에 대한 계수율을 측정하였다. Fig. 8은 Na 스펙트럼으로부터 순 계수를 얻기 위한 가우스 fitting과 백그라운드 결정선을 보여주고 있다.

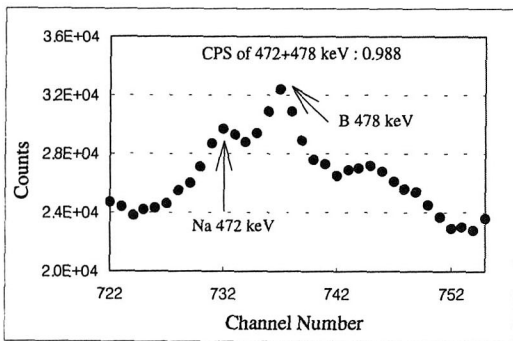


Fig. 6. Background spectrum of PGAA system without sample vial.

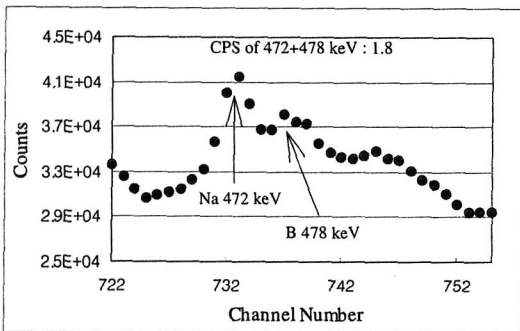


Fig. 7. Background spectrum of PGAA system with sample blank vial.

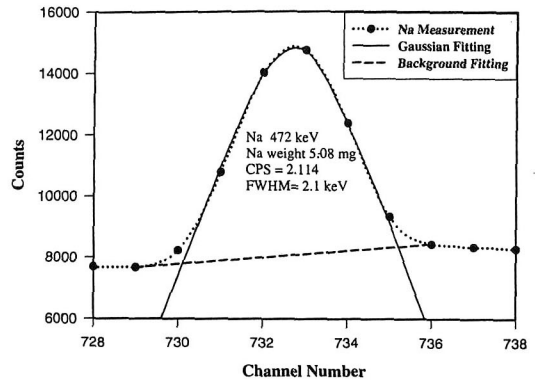


Fig. 8. Gaussian fitting from Prompt gamma-ray spectrum of Na.

이 계수율 fitting 함수는 나중에 붕소의 도플러 확장 피크에서 Na의 영향을 제거하기 위한 바탕 피크함수로 이용하였다. 붕소의 순 계수율을 얻기 위하여 Na의 472 keV의 백그라운드는 Na의 무게에 따른 계수율 곡선을 이용하여 얻은 수치를 붕소 순계수 이득에 활용하였고, vial에 의한 영향 또한 고려하여 제거하였다. Fig. 9는 Na 표준체들의 무게비 계수율에 대한 함수그래프를 보여주고 있다. 이 함수와 Gaussian fitting을 이용하여 붕소내 Na 함유량에 따른 간섭정도를 결정하였다. 이와 같은 방법을 이용하여 붕소 시료에서의 무게에 따른 계수율 값을 얻었다.

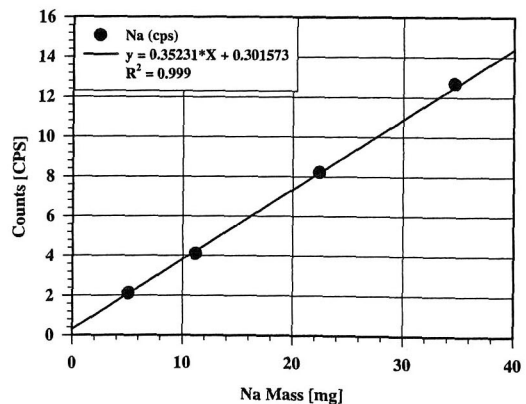


Fig. 9. Calibration curves between Na mass and count rates(cps).

#### 4.4. 붕소의 농도분석

생물시료내의 붕소의 정량을 위하여 붕산시료의 무게를 달리하여 즉발감마선 측정에 따른 각각의 계수율을 무게 대 계수율에 대한 검정곡선을 구하였다. Fig. 10에는 단일모드로 측정된 감마선 스펙트럼을 보였으며 붕소함량이 높을수록 주변 감마선에 의한 영향 정도가 줄어들음을 볼 수 있었다. Fig. 11에는 단일 및 컴프톤의 두 가지 측정 모드를 이용하여 얻은 검정곡선을 나타냈으며 적용된 붕소의 농도범위 내에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났지만 농도가 낮아질수록 차이가 늘어나는 경향을 보였다. 이것은 계측시스템의 백그라운드 영향과 관련이 있으며 컴프톤 모드의 적용에 의한 검출한계의 개선이 필요함을 예증하고 있다.

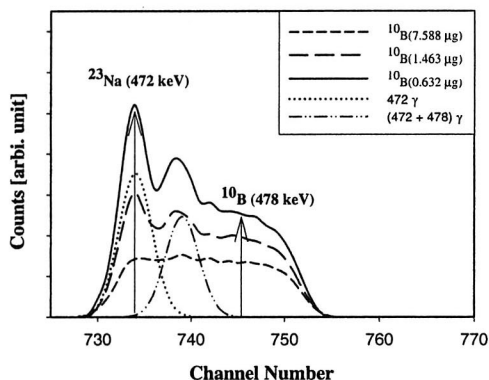


Fig. 10. Comparison of count rate(cps) obtained from B sample with weight

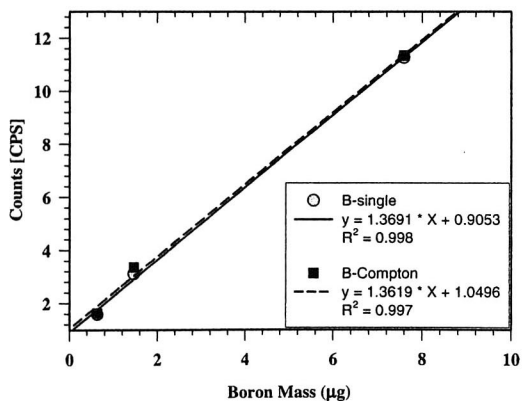


Fig. 11. Calibration curves between Boron mass and count rates(cps).

Fig. 12에는 세가지 인증표준물질 (NIST SRM 1570a-Spinach Leaves, NIST SRM 1547-Peach Leaves, NIST SRM 1573a-Tomato Leaves)에 대한 분석결과를 인증값과 비교하였으며 보고된 문헌값과도 비교하여 나타냈다. 시금치잎 (Spinach Leaves), 복숭아잎 (Peach Leaves), 토마토잎 (Tomato Leaves)의 측정값은 각각  $38.70 \pm 0.83 \mu\text{g/g}$ ,  $30.87 \pm 0.40 \mu\text{g/g}$ ,  $34.22 \pm 0.46 \mu\text{g/g}$ 이었다. 인증값과의 상대오차는 3 ~ 6%를 나타냈으며 모두 양의 편차를 보여 백그라운드 보정시에 생긴 계통오차로 추정된다. 상대표준편차는 1 ~ 2%를 나타내어 비교적 정확한 결과를 얻은 것으로 판단된다. 그러나 추가로 고려해야 할 사항은 분석시료 중의 수분 함량, 시료의 기하학적 형태 및 불균일성으로 인한 오차요인이며 각 요인별 측정 불확도를 평가할 필요가 있다.

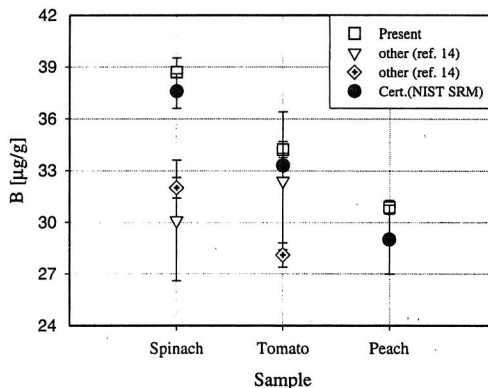


Fig. 12. Comparison of analyzed and certificated values for NIST SRM

### 5. 결 론

연구용 원자로 (하나로)의 즉발감마선 방사화분석 장치를 이용하여 생물시료중의 붕소의 정량을 위한 기초적인 선행연구로서 측정조건에 대한 열중성자 빔의 특성조사, 감마선 계측시스템의 백그라운드 및 특정 성분의 간섭효과를 단일 및 컴프톤 모드를 적용하여 조사하였으며 세 가지 인증표준물질 (NIST SRM 1570a, 1547, 1573a)을 이용한 붕소농도 측정시험을 두 가지 모드로 실시한 후 결과를 비교하였다. 이들 생물시료에 대한 분석값이 전반적으로 인증값보다 높게 나타났지만 통계적 허용 오차범위 내에서 잘 일치함을 볼 수 있었다.

이와 같은 결과로부터 본 측정에서 얻은 붕소 에너지 478 keV 영역에서의 백그라운드 제거 방법이 시료 정량분석에 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 측정에서 이용한 간섭영향 제거방법을 이용하고 아울러 주변 백그라운드를 효율적으로 제거한다면 더욱 향상된 분석값을 얻을 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. Zeev B. Alfassi and Chien Chung, "Prompt Gamma Neutron Activation Analysis", Eds., CRC Press, Inc., Boca Raton, 1995.
2. G. J. Schmid D. Beckedahl, J. J. Blair, A. Friensehner and J. E. Kammeraad, *Nuclear Instruments and Methods, in Physics Research Section A* **422**, 368-372 (1999).
3. H. Volker, S. K. Marina, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **72**, 112 (1995).
4. K. J. Riley, O. K. Harling, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **75**, 31 (1996).
5. C. Yonezawa, A. K. Hajiwood, *Anal. Chem*, **67**, 4466(1995).
6. E. A. Mackey et al., *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **203**, 413(1996).
7. J. H. Marshall et al., *J. Appl. Radiation Instrum.*, **3**, 445 (1989).
8. A. Kuno, K. Sampei, M. Matsuo, B. Takano, C. Yonezawa, H. Matsue and H. Sawahata, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **239**, 587-590(1999).
9. A. Kuno, M. Matsuo, B. Takano, C. Yonezawa, H. Matsue and H. Sawahata, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **218**, 169-176(1996).
10. K. Sueki, Y. Oura, W. Sato, H. Nakahara and T. Tomizawa, *J. Radioanal. Nucl. Chem*, **234**, 27(1998).
11. D. L. Anderson and W. C. Cunningham, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **65**, 140 (1992).
12. R. Zeisler, and V. P. Guinn, "Nuclear Analytical Methods in the Life Science's", New Jersey (United States), Humana Press, 776, 613-622 (1990)
13. Y.S. Chung, K. W. Park, J. H. Moon, S. H. Kim and S. R. Baek, "Application of Prompt Gamma-Ray Activation Analysis", KAERI Report, KAERI/TR-2123/2002.
14. Vuong Huu Tan, Nguyen Canh Hai, Tran Tuan Anh and Le Ngoc Chung, INDC(NDS)-411, 54-60 (2000).