

중성자 핵반응에 의한 보론의 알파트랙 검출

손세철* · 표형열 · 박용준 · 지광용 · 김원호

한국원자력연구소, 원자력화학연구부
(2003. 10. 15 접수, 2003. 12. 5 승인)

Detection of Alpha Tracks of Boron by Nuclear Reaction with Neutron

Se Chul Sohn*, Hyung Yeal Pyo, Yong Jun Park, Kwang Yong Jee and Won Ho Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

(Received Oct. 15, 2003, Accepted Dec. 5, 2003)

요 약 : 수용액 시료에 포함된 미량의 보론 함량을 분석하는데 적합한 고체트랙 검출기를 선정하기 위하여 알파복합선원 등을 이용하여 검출능력을 비교 검토하였다. 보론의 알파트랙 검출에는 polycarbonate 재질(Lexan 및 CR-39)과 cellulose nitrate 재질(CN-85 및 LR-115)의 고체트랙 검출기를 사용하였다. 알파입자 방출물질로는 복합알파선원, 금속 우라늄 입자 및 보론 표준용액을 사용하였다. 본 연구에서는 에칭조건 및 중성자 조사조건 등에 따른 검출기의 특성을 비교하였으며, 실험 결과 보론 정량에는 CN-85 검출기가 가장 적합한 것을 알 수 있었다. 또한, 선정된 검출기를 이용하여 수용액 매질에 포함된 미량의 보론을 알파트랙 기입방법으로 측정 한 실험결과에 대해 검토하였다.

Abstract : The detection efficiencies of the several solid track detectors were investigated for the determination of boron content in aqueous solution by using the alpha multi-Radioisotope(RI) source. Polycarbonate (Lexan and CR-39) and cellulose nitrate (CN-85 and LR-115) were selected as materials for alpha track detection of boron. Alpha multi-RI source, uranium metal particles and boron standard solution were used for alpha emission. In this study, four solid track detectors(CN-85, LR-115, Lexan and CR-39) were characterized under various etching conditions as well as neutron irradiation conditions. As a result, the CN-85 was turned out to be best to provide good efficiency among the four detectors. The selected solid track detector was utilized for the determination of trace amount of boron in aqueous sample and its results were discussed in the text.

Key words : Boron, alpha track, solid state track detector

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)42-868-8156 Fax : +82+(0)42-868-8148

E-mail : nscsohn@kreri.re.kr

1. 서 론

열중성자와 반응하거나 또는 방사 decay에 의해 운동 에너지를 갖고 방출되는 알파 또는 핵분열 입자들은 고체트랙 검출기 내부에 침투하여 cone 형태의 알파트랙 또는 핵분열트랙을 생성시킨다.¹ 이와 같은 알파 또는 핵분열트랙을 연기 위해서는 일반적으로 운모, 유리, polycarbonate 또는 cellulose nitrate 재질의 고체트랙 검출기가 사용된다.^{2,4} 고체트랙 검출기의 트랙기입 효율은 검출기의 재질 특성에 따라 약간씩 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 그 이유는, 이들 고체트랙 검출기들의 화학적 및 물리적 특성이 서로 다르고 방사선에 대한 내성도 각각 다르며 에칭조건 등에서도 또한 차이가 있기 때문이다.²

보론의 안정한 동위원소는 ^{10}B 과 ^{11}B 으로 자연에서 이들의 존재 비는 각각 19.9%와 80.1%이다. 이들 중에서 ^{10}B 의 경우는 열중성자와 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 반응을 한다. 보론의 이와 같은 중성자 핵반응 특성과 알파트랙 기입 방법을 동시에 적용하여 미량의 보론을 분석하는데 이용할 수 있다. 즉, 보론이 함유된 시료를 고체트랙 검출기에 부착하고 열중성자를 조사하면, $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 반응에 의해 발생된 알파입자가 트랙검출기를 손상시키게 된다. 알파입자에 의해 손상된 검출기는 광학현미경을 이용하여 트랙 관찰이 가능하도록 적절한 농도의 알칼리용액 내에서 에칭과정을 통해 처리한 다음, 알파트랙의 수를 측정하여 보론 농도를 분석하거나 보론 분포도를 측정한다.⁵ 이와 같은 분석방법은 생체시료 또는 금속합금을 비롯한 고체 시료에 포함된 보론 분포도 또는 보론 함량 측정에 적용한 예가 주로 보고되어 있으며,^{6,9} 수용액 시료에 포함된 미량의 보론 분석에 적용한 연구 결과로는 Gabel 등¹⁰이 cellulose nitrate 재질의 LR-115 검출기와 봉산으로 제조한 표준용액을 사용하여 sub-ppm(0.15~15 mg/L)의 보론을 정량한 연구결과를 예로 들 수 있는 외에 보고된 바가 극히 적다.

본 연구에서는, 여러 가지 트랙검출기 중에서 수용액 시료에 포함된 미량의 보론 함량을 분석하는데 적합한 고체트랙 검출기를 선정하기 위한 실험결과에 대해 보고하였다. 보론의 알파트랙 검출에는 polycarbonate 재질과 cellulose nitrate 재질의 고체트랙 검출기를 사용하였으며, 트랙검출기의 에칭조건, 중성자 조사조건 및 중성자 선속조절 등에 따른 알파트랙 검출에 대한 트랙검출기의 특성을 비교하고 보론 정량에 적합한 고체트랙 검

출기를 선정하였다. 또한, 선정된 트랙검출기를 수용액 매질에 포함된 미량의 보론 정량에 적용하여 알파트랙 기입방법으로 보론을 정량한 결과에 대해 보고하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

본 연구에서 고체트랙 검출기로는 polycarbonate 재질의 Lexan(GE-Plastics, Korea), 및 CR-39(TASTRACK, UK)와 cellulose nitrate 재질의 CN-85(DOSIRAD, France) 및 LR-115 (DOSIRAD, France)를 사용하였다. 알파트랙에 대한 고체트랙 검출기의 검출 특성을 측정하기 위해 자발적 알파입자 방출 선원으로 금속우라늄 입자(지름 = $30 \pm 20 \mu\text{m}$, $\sim 2.8 \times 10^2$ alpha particles per day)와 복합알파 선원(^{239}Pu - ^{241}Am - ^{244}Cm Mixed alpha standard B 860, 1.67×10^5 alpha particles per minute, Amersham)을 사용하였다. 또한, 보론의 중성자 핵반응에 의해 생성된 알파입자에 대한 고체트랙 검출기의 알파트랙 검출에는 지름이 7 mm인 원형의 여과지(Whatman No. 42)에 보론 표준용액을 점적하여 사용하였다. 보론 표준용액은 ICP-AES용 표준용액(SPEX, 1,000 mg/L, ^{10}B content = 19.8%)을 필요에 따라 1~100 mg/L 농도로 희석하여 사용하였으며, 알파트랙의 에칭에 사용한 에칭용액은 NaOH(Aldrich, 97%)로 제조하였다.

2.2. 기기

고체트랙 검출기 표면에 나타난 알파트랙의 형태와 크기를 측정하기 위해 Optical microscope (LEICA DMLP, MZ6) 및 디지털 영상분석 장치를 이용하였으며, 트랙검출기의 에칭에는 항온수조 장치(Dae Heung Scientific, Korea)를 이용하였다. 일부 시편에 대한 중성자 조사에는 한국원자력연구소의 HANARO 연구용 원자로 중성자방사화분석을 위한 조사공을 이용하였다.

2.3. 실험 방법

복합알파선원에 의한 알파트랙 검출은 고체트랙 검출기인 CN-85, LR-115, CR-39 및 Lexan을 각각 복합알파선원에 10분 동안 접촉시킨 다음 60 °C의 2.5 M 또는 6.25 M NaOH 용액에서 에칭하고 각각의 트랙검출기 표면에 나타난 알파트랙을 광학현미경으로 확인하였다. 금속우라늄 입자에 의한 알파트랙 검출은 Lexan 검출기를 알파입자 방출체인 금속우라늄 입자에 5일간 접

측시킨 다음 60 °C의 6.25 M NaOH 용액에서 10분간 에칭하고 검출기 표면에 나타난 알파트랙을 광학현미경으로 확인하였다.

중성자 조사조건에 따른 보론의 알파트랙 검출특성은 보론의 농도가 0~100 mg/L인 표준용액 10 μ l를 지름이 7 mm인 일정한 크기의 여과지에 점적하고 CN-85, CR-39 및 Lexan 검출기에 부착한 후 중성자 선속이 $\sim 1 \times 10^{13}$ n/cm²·s인 하나로 원자로에서 10분간 조사하였다. 중성자 선속 조절에 따른 알파트랙 측정에서는 콜로디온과 에탄올 1:1 혼합용액 2 mL에 보론 표준용액 원액 0.1 mL 씩 가하여 잘 섞은 다음 보론 농도가 0~25 mg/L인 표준용액을 만들고 이를 각각 10 μ l 씩 취해 직접 Lexan 검출기 위에 점적한 후 건조시켰다. 이 시편들을 카드뮴 판의 두께와 하나로 원자로의 열중성자 선속 감쇄를 계산한 자료를 참조하여 두께가 0.1~1 mm 인 카드뮴 판으로 포장한 다음 30초 동안 중성자조사 시킨 후 CN-85 검출기 경우에는 40 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 30분 동안 에칭하고 Lexan 검출기 경우에는 60 °C의 6.25 M NaOH 용액에서 30분 동안 에칭하였다.

보론의 농도변화에 따른 알파트랙 측정에서는 콜로디온과 에탄올 1:1 혼합용액 2 mL에 보론 표준용액 원액을 0.1 mL 씩 첨가하여 잘 섞은 후 보론 농도가 0~25 mg/L인 표준용액을 제조하였다. 이 표준용액을 각각 10 μ l 씩 취해 직접 Lexan 검출기 위에 점적한 다음 그 위에 CN-85 검출기를 부착하고 두께가 0.25 mm인 카드뮴 판으로 제작한 카드뮴 상자에 보론을 점적한 트랙검출기를 넣은 후 중성자 선속이 약 1×10^{13} n/cm²·s인 하나로 원자로에서 30초 동안 중성자 조사하였다. 조사된 시편은 일주일 동안의 냉각시간 동안 방치시켰다. 카드뮴 상자에서 트랙검출기를 회수한 후 증류수로 세척하여 표면의 오염물질을 제거한 다음 40 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 30분 동안 에칭하고 증류수로 다시 트랙검출기 표면을 세척한 후 자연 건조시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 복합알파선원에 의한 알파트랙 검출

복합알파선원에 접촉시킨 CN-85와 LR-115 검출기를 60 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 에칭하고 검출기 표면에 생성된 트랙의 형태 및 크기를 광학현미경으로 확인하였으며, 그 결과를 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다.

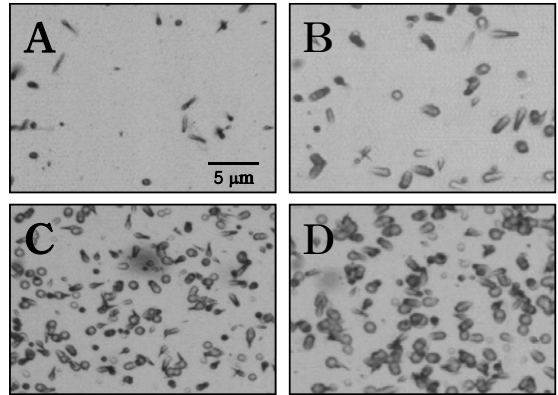


Fig. 1. Alpha tracks on CN-85 detector with various etching times. Etching condition; 2.5 M NaOH, 60 °C. Etching time(min); 10(A), 20(B), 30(C), 40(D). Magnification; $\times 200$.

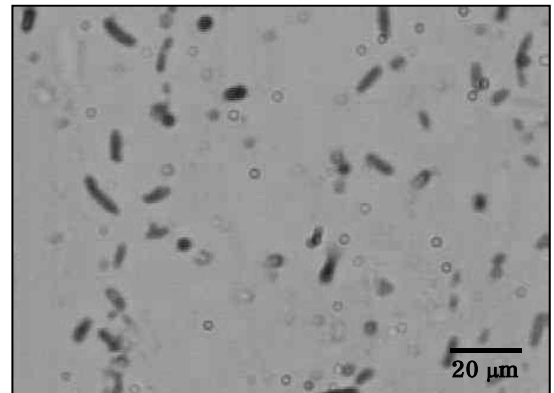


Fig. 2. Alpha tracks on LR-115 solid state nuclear track detector Etching condition; 2.5 M NaOH, 60 °C. Etching time; 90 min. Magnification; $\times 200$.

Fig. 1과 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 알파트랙이 여러 가지 형태와 크기를 나타내며 트랙검출기 표면에 기입된 것을 알 수 있었다. 트랙이 여러 가지 형태를 나타내는 것은, 복합알파선원으로부터 방출된 알파입자가 여러 가지 입사각도에서 입사되어 트랙검출기 표면에 기입되었기 때문으로 생각된다. 알파트랙의 형태에서 원형을 나타내는 트랙은 알파입자가 90°에 가까운 각도로 트랙검출기 표면에 입사되어 생성된 트랙으로 판단되며, 타원형의 꼬리를 갖는 형태를 나타내는 트랙은 트랙검출기 표면에 사각으로 입사된 알파입자에 의해 생성된 알파트랙으로 판단된다. 한편, CN-85 검출기 표

면에 기입된 알파트랙은 에칭시간을 길게 할수록 트랙의 크기가 약간씩 커지는 경향을 나타냈으며, 트랙의 형태도 점차 선명해지는 것을 알 수 있었다. 알파트랙의 크기는 에칭시간에 따라 약간의 차이가 있었으나 전체적으로 2~3 μm 크기를 나타냈으며 1 μm 이하의 크기를 나타내는 트랙은 알파입자에 의해 생성된 트랙이 기보다는 트랙검출기 자체에서 생성된 바탕트랙인 것으로 생각된다. 복합알파선원에 조사된 CN-85 검출기를 60 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 에칭하고 알파입자의 검출특성을 검토한 결과, 에칭시간을 30분으로 하는 경우가 알파트랙의 크기와 형태를 측정하기에 가장 적합하다는 것을 알 수 있었다. LR-115 검출기 표면에 기입된 알파트랙도 역시 에칭시간을 길게 할수록 알파트랙의 크기가 점점 커지는 경향을 나타냈으며, 에칭시간에 따른 알파트랙의 형태 및 크기변화를 측정된 결과, 에칭시간을 90분으로 하였을 경우가 알파트랙의 확인에 가장 적합하였다. CR-39와 Lexan 검출기의 경우에도 같은 방법으로 60 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 에칭한 다음 광학현미경을 이용하여 검출기 표면에 나타난 알파트랙을 확인한 결과, 이 경우에는 에칭시간을 3시간 이상 길게 하여도 트랙검출기 표면에서 알파트랙을 확인할 수 없었다.

한편, 에칭용액의 NaOH 농도를 진하게 하여 60 °C의 6.25 M NaOH 용액에서 에칭하고 트랙검출기 표면에 나타난 알파트랙의 형태를 측정된 결과, CN-85와 LR-115의 경우에는 각각 10분과 40분 동안 에칭하는 경우에 광학현미경으로 측정이 가능한 2 μm 크기 이상의 선명한 알파트랙을 확인할 수 있었다. CR-39 검출기의 경우에는 120분을 에칭한 결과 Fig. 3에 보여주는 바와 같은 알파트랙을 확인할 수 있었다. 이 경우, 트랙검출기 표면에 나타난 알파트랙의 모양은 CN-85 검출기에 나타난 알파트랙의 모양과 유사하였으나 동일한 표면적 위에 기입된 알파트랙의 수는 CR-39 검출기의 경우가 CN-85 검출기보다 상당히 적은 것으로 나타났다. CR-39 검출기의 경우에도 알파트랙의 크기는 다양하였으며, 이 역시 알파입자의 입사각이 서로 다르기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 반면에, Lexan 검출기의 경우에는 동일한 에칭용액에서 180분 이상 에칭하는 경우에도 알파트랙을 확인할 수 없었다. 알파트랙이 확인되지 않은 이유는 Lexan 검출기 자체의 재질이 견고하여 비교적 낮은 에너지(5.1~5.8 MeV)를 갖는 알파입자가 트랙검출기 표면에 침투하지 못했기 때문으로 생각된다. 복합알

파선원을 이용하여 트랙검출기의 검출 특성을 비교한 결과, 보론의 알파트랙 검출에는 cellulose nitrate 재질의 검출기가 적합하며, cellulose nitrate 재질 중에서는 LR-115 검출기보다 CN-85 검출가 알파트랙을 검출하는데 보다 더 적합한 것으로 나타났다.

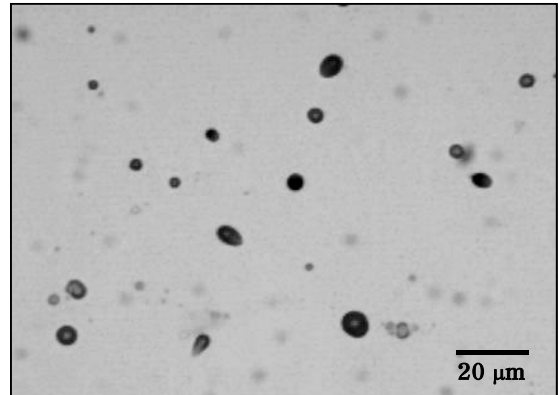


Fig. 3. Alpha tracks on CR-39 solid state nuclear track detector Etching condition; 6.25 M NaOH, 60 °C. Etching time; 120 min. Magnification; $\times 200$.

3.2. 금속우라늄 입자에 의한 알파트랙 검출

Lexan 검출기를 알파입자 방출체인 금속우라늄 입자에 접촉시킨 다음 에칭하고 트랙검출기 표면에 나타난 알파트랙을 광학현미경으로 확인하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Lexan 검출기 표면에 나타난 알파트랙의 형태는 알파방출 입자를 중심으로 하여 사방으로 알파트랙이 기입되었음을 보여주고 있으며 트랙의 중심부에서 멀어질수록 트랙의 꼬리 부분이 길어지는 형태를 나타냈다. 또한, 알파트랙의 크기는 트랙의 중심부보다는 외각부분으로 갈수록 점점 작아지는 형태를 나타냈다. Fig. 4에 나타난 결과로부터, 복합알파선원을 이용하여 알파트랙을 감지하지 못한 Lexan 검출기의 경우도 금속우라늄 입자에 접촉하는 경우에는 우라늄 입자에서 방출되는 알파입자에 트랙이 기입되는 현상을 확인할 수 있었다. 이 결과는, Lexan 검출기의 경우도 장시간 알파입자 방출선원과 접촉하는 실험조건에서는 알파트랙 검출기로 사용할 수 있음을 의미한다.

3.3. 에칭시간 변화에 따른 트랙검출기 특성

에칭시간 변화에 따른 트랙검출기의 특성은 CN-85와 Lexan 검출기를 이용하여 60 °C의 2.5 M 및 6.25

M NaOH 용액에서 에칭시간을 5~150분 범위에서 변화시키며 에칭한 다음 에칭시간에 따른 트랙검출기의 무게 변화를 측정하여 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, CN-85 검출기의 경우는 2.5 M NaOH 용액에서보다 6.25 M NaOH 용액에서 두배 정도 빠른 속도로 에칭되는 것으로 나타났다. 이 결과는 CN-85 검출기를 사용하여 보론의 알파트랙을 측정하는 경우에, 알파입자의 방출량이 적은 실험조건에서 조사한 경우이거나 또는 보론의 농도가 낮은 시료를 조사한 경우에는 높은 농도의 알카리 용액에서 에칭하는 것이 알파트랙 측정에 적합하며, 알파입

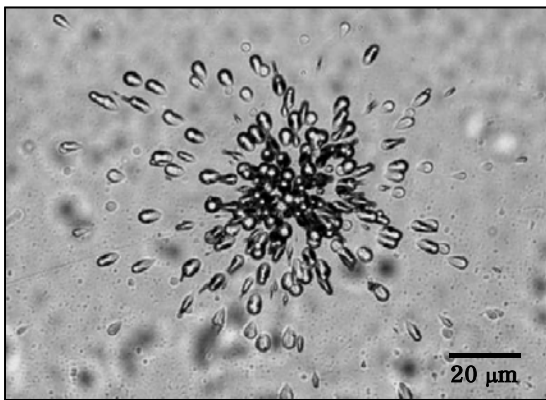


Fig. 4. Alpha tracks produced by a uranium metal particle on Lexan detector. Etching condition; 6.25 M NaOH, 60 °C, 10 min. Magnification; $\times 200$.

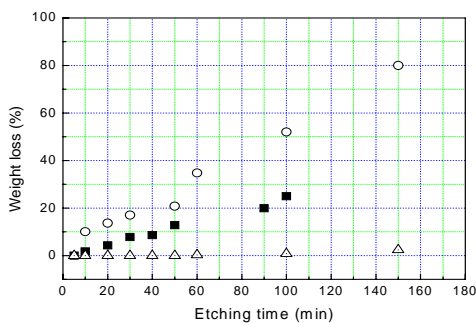


Fig. 5. Plot of weight loss of the track detector against various etching times. Etching conditions; (○), (△) = 6.25 M NaOH, 60 °C, (■) = 2.5 M NaOH. Detector; (○), (■) = CN-85, (△) = Lexan.

자 방출량이 많은 조사조건이거나 보론의 농도가 높은 시료에 대해서는 낮은 농도의 알카리 용액에서 에칭하는 것이 알파트랙 측정에 적합하다는 것을 말해준다. Lexan 검출기의 경우에는 CN-85 검출기의 경우와는 다르게 6.25 M NaOH 용액에서도 검출기의 에칭속도가 상당히 느려 150분 이상을 에칭하는 경우에서만 검출기의 무게 감소가 일부 진행되는 것으로 나타났다.

3.4. 중성자 조사시간에 따른 알파트랙 검출특성

중성자 조사시간에 따른 보론의 알파트랙 검출특성은 중성자 조사시간을 10분, 1분 및 30초로 변화시킨 조건에서 얻은 트랙검출기의 특성을 비교하여 검토하였다. 보론의 농도가 0~100 mg/L인 표준용액을 실험방법에서 설명한 과정으로 점적하고 CN-85, CR-39 및 Lexan 검출기를 부착한 후 중성자 선속이 $\sim 1 \times 10^{13}$ n/cm²·s 인 하나로 원자로에서 10분 동안 조사하였다. CN-85 검출기의 경우에 60 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 40분 동안 에칭한 결과, 검출기가 용해되는 현상이 나타났으며, CR-39 검출기의 경우에도 동일한 에칭에서 10분 동안 에칭한 결과, 트랙검출기 표면이 손상되는 결과를 나타냈다. Lexan 검출기의 경우에는 동일한 에칭용액에서 에칭한 결과, 검출기의 재질변화가 일어나지 않았으며 검출기 표면에 알파트랙도 생성되지 않은 것으로 나타났다. 한편, 동일한 시편을 1분 동안 중성자 조사하고 에칭온도를 10 °C 낮춘 50 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 5분 동안 에칭한 결과, CN-85 검출기의 경우에는 트랙검출기 표면이 우유 빛으로 변하는 현상이 나타났으며, CR-39의 경우에도 동일한 에칭조건에서 60분 동안 에칭한 결과 트랙검출기 표면이 우유 빛으로 변하는 현상이 나타났다. 한편, Lexan 검출기의 경우에는 동일한 에칭조건에서 180분 동안 에칭하였으나 트랙검출기 표면의 변화는 나타나지 않았으며 알파트랙 도 역시 검출되지 않은 것으로 나타났다. 트랙 검출기 표면이 우유 빛으로 변한 것은 검출기 표면에 과도한 알파트랙이 생긴 결과로 판단되며 광학현미경으로 알파트랙을 관찰하기에 적합한 수의 알파트랙을 생성시키기 위해서는 중성자조사 조건을 조절할 필요가 있는 것으로 판단된다. 보론의 농도가 1 mg/L인 용액 10 μl를 Lexan 검출기 표면에 점적하고 건조시킨 다음 지름이 6 mm인 원형의 시편을 제조하고, 이를 열중성자 선속이 $\sim 1 \times 10^{13}$ n/cm²·s인 하나로 원자로에서 30초 동안 중성자 조사하였다. 조사 시편을 에칭한 다음 광학

현미경을 이용하여 확대배율 1,000배에서 디지털 영상 분석 장치로 알파트랙의 수를 측정하였다. 이 경우, 트랙 측정 공간 $60 \times 40 \mu\text{m}^2$ 에서의 트랙 수는 약 2,000개 정도가 되어 디지털 영상분석 장치로 트랙의 수를 측정할 수 있는 영역범위를 넘는 결과가 나타났다. 이와 같은 실험결과와 부수적인 반응들에 의해 생성되는 불필요한 트랙의 발생을 방지하기 위해서는 열중성자 선속을 감쇄시킨 조건에서의 실험이 필요한 것으로 판단되었다.

3.5. 중성자 선속 조절에 따른 트랙측정

중성자 선속 조절에 따른 알파트랙 측정에서는 하나로 원자로의 열중성자 선속을 감쇄시키기 위해서 열중성자 흡수 단면적이 큰 카드뮴 판을 사용하였다. 카드뮴 판의 두께에 따른 하나로 원자로의 열중성자 선속 감쇄는 다음의 식으로부터 이론적으로 계산하였다.¹¹

$$I = I_0 e^{-n\sigma x} \quad (1)$$

여기서, I_0 는 중성자 선속($1.7 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$), n 은 카드뮴의 원자핵 수($4.63 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^3$), σ 는 열중성자 단면적($2.45 \times 10^{21} \text{ cm}^2$) x 는 카드뮴 판의 두께(cm)이다. 이 식을 이용하여 카드뮴 판의 두께가 0.1, 0.25, 0.5 및 1 mm인 경우에 열중성자 선속은 이론적으로 각각 3.2×10^{12} , 6×10^{11} , 3.4×10^{10} 및 $1.2 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 로 감쇄되는 것으로 계산된다. 실험방법에서 제시한 과정으로 제조한 중성자 조사시편을 두께가 1 mm와 0.5 mm인 카드뮴 판을 이용하여 만든 카드뮴 상자에 각각 넣고 30초 동안 중성자조사 시킨 후 CN-85 검출기는 40 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 30분 동안 에칭하고 Lexan 검출기는 60 °C의 6.25 M NaOH 용액에서 30분 동안 에칭하였다. 실험결과, 1 mm의 카드뮴 판을 사용하는 경우에는 중성자 조사 후 카드뮴 판이 중성자를 흡수하여 발생하는 열에 의해 카드뮴 상자 내부의 트랙검출기가 용해되어 변형되는 결과를 나타냈다. 또한, 두께가 0.5 mm의 카드뮴 판을 사용한 경우에는, 보론 용액이 점적된 부위에서는 상당히 많은 알파트랙이 관찰되었으나 그 외의 부분에서는 바탕 트랙(50개 이하/ $60 \times 40 \mu\text{m}^2$)이 많이 감소되는 현상을 나타냈으며, 이 경우에 보론 농도에 따른 생성된 알파트랙의 수 사이에 상관관계는 얻을 수 없었다. 한편, 두께가 0.25 mm인 카드뮴 판을 사용하고 CN-85 검출기를 사용한 경우에는 보론 농도가 0~25 mg/L인 경우에 트랙의 수가 각각 65~360 개

인 것으로 나타나 이들 사이에는 서로 직선적인 상관관계를 나타냈다. 두께가 0.1 mm인 카드뮴 판을 사용하고 검출기로 CN-85를 사용한 경우에는 알파트랙이 상당히 많이 생성되어 트랙 수 측정이 불가능한 결과를 나타냈다. Lexan 검출기를 사용한 경우에는 상기조건에서는 보론 농도에 따른 트랙 수의 증가 현상은 나타나지 않았으며 트랙의 수도 또한 상당히 적은 것으로 나타났다.

3.6. 보론 농도변화에 따른 알파트랙 측정

보론의 농도 변화에 따른 알파트랙의 변화는 CN-85 검출기를 사용하여 보론의 농도가 0~25 mg/L인 범위에서 측정하였다. 실험과정에서 설명한 방법에 의해 중성자 시편을 조사하고 회수하였으며, 보론의 (n , α) 반응에 의해 생성된 알파트랙을 광학현미경으로 관찰하고 디지털 영상분석 장치(Leica Q-Win)를 이용하여 알파트랙의 수를 측정하였다. Fig. 6에는 CN-85 검출기 표면에 나타난 알파트랙의 예를 보론의 농도별로 구분하여 나타냈다. 보론 농도 변화에 따른 알파트랙의 수는 트랙검출기 표면의 임의의 위치에서 $60 \times 40 \mu\text{m}^2$ 면적위에 나타난 알파트랙의 수를 측정하였다. Fig. 6에서도 알 수 있듯이 보론의 농도가 증가함에 따라 알파트랙의 수도 많아지는 경향을 보여주고 있다. Fig. 7에는 보론 농도 변화에 따른 알파트랙의 수를 도시하여 나타냈다. 보론의 농도가 0, 0.5, 1, 5, 10, 15 및 25 mg/L인 경우에 대하여 알파트랙의 수를 5회 측정하여 구한 결과, 각각 68 ± 6 , 103 ± 13 , 121 ± 9 , 169 ± 15 , 215 ± 7 , 298 ± 11 , 374 ± 20 이었다. 보론 농도에 따른 알파트랙의 수 사이에는 $y = 11.7x + 97.8$ ($r = 0.986$)의 직선적 상관관계를 나타냈다.

4. 결 론

알파입자 방출선원을 이용하여 실험하고 트랙검출기의 특성을 비교한 결과, 알파트랙의 감지에는 Lexan 또는 CR-39와 같은 polycarbonate 재질보다는 CN-85 또는 LR-115와 같은 cellulose nitrate 재질의 트랙검출기가 적합하다는 것을 알 수 있었다. 보론의 (n , α) 반응에서 생성된 알파트랙의 수를 측정하여 보론 농도를 측정하기 위해서는, CN-85를 트랙검출기로 사용하고 보론의 농도가 0~25 mg/L인 범위의 시료용액을 사용하여 중성자 조사하는 것이 적합하다는 결론을 얻었다. 또한, CN-85 검출기를 사용하여 보론의 알파트랙을 검출하기

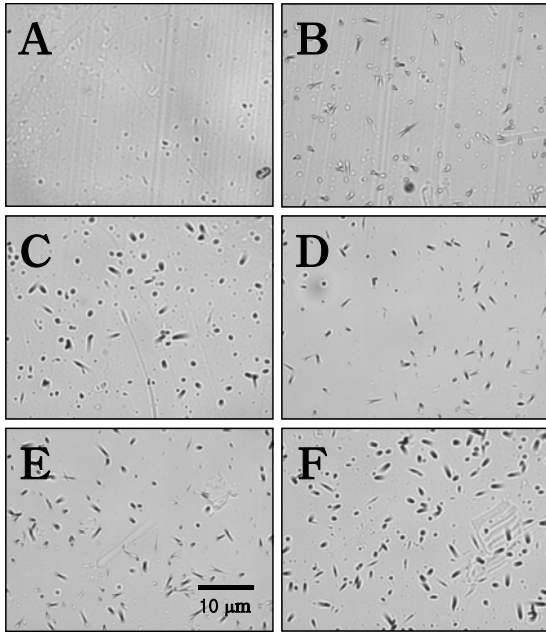


Fig. 6. Alpha tracks on CN-85 detector with various boron concentrations. Etching condition; 2.5 M NaOH, 40 °C. Etching time; 30 min. [B](mg/L); 0(A), 1(B), 5(C), 10(D), 15(E), 25(F). Magnification; ×200.

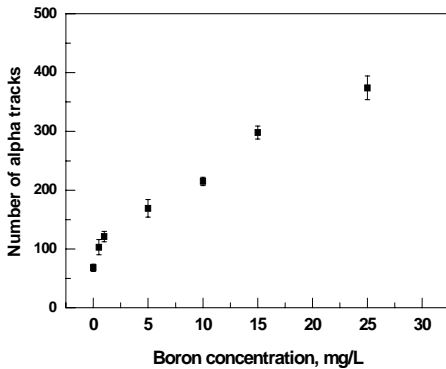


Fig. 7. Plot of number of alpha tracks on the CN-85 detector against various boron concentrations.

위해, 열중성자 선속이 약 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 인 하나로 원자료를 이용하는 경우에는 두께가 0.25 mm인 카드뮴상자를 사용하여 열중성자 선속을 $10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 정도로 감쇄시킨 상태에서 30초간 중성자 조사하고 에칭조건은

40 °C의 2.5 M NaOH 용액에서 30분간 수행하는 것이 최적조건임을 알 수 있었다. 이와 같은 최적조건에서 보론의 농도가 0~25 mg/L인 범위의 표준용액을 사용하여 보론 농도변화에 따른 알파트랙 수 변화를 측정된 결과, 이들 변수 사이에는 서로 직선적인 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 본 연구는 향후 수용액 시료에 포함된 보론 정량과 관련하여 보론 동위원소 측정, 검출한계의 측정 및 측정 재현성 실험 등과 같은 보완적인 실험을 계속해서 해나갈 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 중성자조사에 도움을 주신 한국원자력연구소 중성자방사화학분석실 여러분에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. R. L. Fleischer, P. B. Price and R. M. Walker, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **15**, 1(1965).
2. R. L. Fleischer, P. R. Price and R. M. Walker, "Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications", Univ. California Press, 1975.
3. T. Tsuruta and M. Yazaki, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **14**, 816(1977).
4. W. Enge, *Nucl. Tracks*, **4(4)**, 283(1980).
5. R. Pugliesi, M. A. Stanojev Pereira, M. A. P. V. de Moraes and M. O. de Menezes, *Appl. Radiat. Isotopes*, **50(2)**, 375(1999).
6. Z. En, J. S. Brenizer, B. Hosticka and O. A. Becker, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **244(2)**, 435(2000).
7. A. A. Qureshi, M. Akram, M. Ayub Khan, N. U. Khattak, I. E. Qureshi and H. A. Khan, *Radiat. Measur.*, **34(1-6)**, 345(2001).
8. S. Kronenberg, G. J. Brucker, B. Cummings, E. Bechtel, F. Gentner and S. Horne, *Nucl. Instr. Meth. A*, **454(2-3)**, 520(2000).
9. K. Ogura, H. Yanagie, M. Eriguchi, T. Matsumoto and H. Kobayashi, *Radiat. Measur.*, **31(1-6)**, 389(1999).

10. D. Gabel, I. Hocke and W. Elsen, *Phys. Med. Biol.*, **28(12)**, 1453(1983).
11. M. F. L'Annunziata, "Handbook of Radioactivity Analysis", Academic Press, 1988.