

## Measurement of Detection Efficiency of Plastic Track Detector to $\alpha$ -particle

Young-Woong Park and Hyun-Soo Yang\*

Korea Atomic Energy Research Institute

\*Chungnam National University

(Received 2 October 1996 ; Accepted 28 February 1997)

### 고체비적검출기의 알파선 검출효율 측정에 관한 연구

박영웅, 양현수\*

한국원자력연구소 · \*충남대학교 공업화학과

**Abstract** - The calibration method for the detection efficiency of solid state track detector to alpha is presented, and the detection efficiency of CN-85 and LEXAN to alpha is measured by this method. The results are 97% and 57% in CN-85 and LEXAN, respectively. The reason for a better result in CN-85 is not only the high sensitivity but also the low energy dependency with comparing for LEXAN. The peak detection efficiency is 3 MeV and 1.8 MeV in CN-85 and LEXAN, respectively.

**Key words** : Solid State Track Detector,  $\alpha$ -particle, Detection Efficiency, CN-85, LEXAN

**요약** - 알파선 검출 효율 측정을 위한 고체비적검출기의 교정 방법을 제시하였으며, 제시된 교정 방법을 이용하여 CN-85와 LEXAN의 검출 효율을 측정하였다. 0~5.5 MeV 에너지 영역의 알파선에 대한 검출 효율을 측정한 결과 CN-85와 LEXAN이 각각 97%, 57%였다. CN-85가 LEXAN에 비해 검출 효율이 높게 나타난 이유는 알파선에 대한 CN-85의 sensitivity가 LEXAN에 비해 좋을 뿐만 아니라 에너지 의존성이 CN-85가 LEXAN에 비해 낮기 때문인 것으로 분석되었으며, CN-85는 알파선의 유도 에너지가 약 3 MeV, LEXAN은 약 1.8 MeV에서 검출 효율이 최대로 나타났다.

**중심단어** : 고체비적검출기, 알파선, 검출효율, CN-85, LEXAN

#### 1. 서 론

1990년 선량 한도를 낮춘 내용을 기본으로 한

ICRP-60 보고서가 발표됨에 따라 저준위의 방사선 측정 기술의 개발이 필요하게 되었으며, 따라서 자연 방사선에 의한 피폭선량의 대부분을 차

지하는 라돈 및 피폭선량에서 차지하는 비율이 상대적으로 적었던 중성자 측정 관련 기술의 정립이 요구되고 있다.

자연 환경에서 라돈 농도를 측정하고자 하는 경우 일반적으로 측정 대상의 농도가 낮기 때문에 누적 방사선을 측정해야 할 필요성이 있으며, 또한 중성자 측정에 이용되는 대부분의 측정기는 에너지 의존성이 매우 커서 고체비적검출기와 같은 보조적인 방법으로 측정값을 검증하는 절차를 필요로 하는데, 이런 목적에 가장 적합한 측정기가 고체비적검출기이다.

고체비적검출기란 방사선을 검출하기 위한 판상의 고체 물질로서, 알파선 등 하전입자가 고체비적검출기에 조사될 때 생긴 비적을 화학 부식(에칭)을 통하여 현미경 등을 통해 검출할 수 있는 정도의 크기로 확대한 후 계수하였을 때, 다른 물질에 비해 상대적으로 높은 검출 효율을 나타내는 물질이며, 운모, 유리등을 원료로 한 무기비적검출기와 플라스틱비적검출기로 구분할 수 있다.

플라스틱비적검출기의 종류는 diethylene glycol bis(allyl carbonate)의 중합체인 CR-39, bisphenol-A의 중합체인 LEXAN(1) 및 CR-39 당량체와 diethylene glycol bis(allyl sulphonate)의 공중합체인 SR-86(2) 그리고 propanediol bis(allyl carbonate) 및 diallyl succinate의 중합체로 구성된 카보네이트계와 CN-85(kodak), LR-115(kodak) 등 니트로셀룰로오스계의 플라스틱비적검출기가 대표적이라고 말할 수 있다. 카보네이트계의 플라스틱비적검출기는 방사선 조사시 CO 또는 CO<sub>2</sub>가 발생하며, 니트로셀룰로오스 계통의 플라스틱비적검출기는 NO<sub>2</sub>가 발생하여 방사선에 의해 생성된 라디칼의 재결합을 억제하는 효과가 있으므로 플라스틱비적검출기는 일반 플라스틱에 비해 방사선에 대한 검출 효율이 높다.

고체비적검출기는 1965년 우주선에 포함된 중하전입자를 측정하기 위해 운모를 사용한 것을 시점으로 하여, 우라늄 탐사(3,4), 지진의 예측(5), 극미량의 우라늄 분석(6) 및 우주선을 비롯한 기타 환경 중의 라돈 농도 측정 등 국외 뿐만 아니라 국내에서도 매우 다양한 분야에서 이용

되고 있다. 고체비적검출기가 이렇게 다양하게 이용되고는 있지만, 국내에서는 라돈 농도 측정을 위한 환산 인자를 도출하기 위한 교정(7)을 제외하고는, 검출 효율 측정에 대한 국제적인 내용이 담긴 논문은 발표된 적이 없으므로, 알파선을 측정하기 위한 고체비적검출기의 검출 효율을 필요로 하는 경우 일반적으로 100%로 가정하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 알파선에 대한 고체비적검출기의 검출 효율을 측정하는 방법을 제시한 후, 제시된 방법을 이용하여, CN-85(C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>9</sub>N<sub>2</sub>)와 LEXAN(C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>O<sub>3</sub>)의 검출 효율을 측정 후 비교·분석하여 보았다.

## 2. 알파선 검출효율 측정이론

알파선에 대한 고체비적검출기의 검출 효율은 고체비적검출기 표면에 입사된 알파선의 수에 대한 에칭 후 고체비적검출기 표면에서 관찰되는 비적수의 비에 해당한다. 알파선의 에너지에 따라 검출 효율은 다르게 되므로, 검출 효율을 측정하고자 하는 경우 측정 대상의 알파선의 에너지가 충분히 검토되어야 한다.

본 연구에서는 3개의 알파 선원을 이용하였을 뿐만 아니라, 선원과 고체비적검출기의 거리를 변화시켜 알파선의 에너지가 0~5.5 MeV 범위에서 균일하게 분포되도록 유도하였으며, 이 에너지 범위의 혼합 알파선에 대한 검출 효율을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 각각의 거리별로 같은 수의 방사선이 입사될 수 있는 시간을 계산하여, 비록 선원과 고체비적검출기 간의 거리는 다르지만 같은 수의 방사선이 고체비적검출기에 조사될 수 있도록 하여, 알파선 검출 효율 측정시 에너지 의존성을 알아낼 수 있게 하였다.

### 가. 알파선의 비정 및 유도에너지

알파선의 에너지는 고체비적검출기에서의 비정과 관계가 있으므로, 선원과 고체비적검출기 간의 거리 변화에 따른 고체비적검출기에서의 알파선의 비정을 계산하면, 계산된 비정으로부터 해당되는 알파선의 유도에너지를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 알파 선원과 고체비적검출기 간의 거리를 변화시켜 고체비적검출기에 입사되는 알파선의 에너지를 변화시키는 방식을 이용하여, 알파선의 에너지 변화에 따른 고체비적검출기의 검출 특성을 경제적이면서 간편하게 알아볼 수 있도록 하였다.

알파 선원과 고체비적검출기 간의 거리(Y) 변화에 따른 고체비적검출기 내에서의 알파선의 비정(μ)은 식 1과 식 2를(8) 조합한 식 3을 이용하였으며, 식 3을 이용하여 고체비적검출기별 방사선의 비정을 계산한 결과를 표 1에 나타내었다. 계산에 사용된 각 고체비적검출기의 유효 원자량과 밀도는 CN-85가 각각 10.08, 1520 kg/m<sup>3</sup>이며, LEXAN은 각각 7.697, 1200 kg/m<sup>3</sup>이다.

Table 1. The Range of α-particle in Plastic Track Detector with Change of Distance from the Source to the Detector

Y(mm)	Th-23(4.668 MeV)		Pu-239(5.147 MeV)		Am-241(5.478 MeV)	
	LEXAN	CN-85	LEXAN	CN-85	LEXAN	CN-85
0	0.023	0.021	0.027	0.024	0.030	0.027
10	0.016	0.014	0.019	0.018	0.022	0.020
15	0.012	0.011	0.016	0.014	0.019	0.017
20	0.008	0.007	0.012	0.011	0.015	0.013
25	0.005	0.004	0.008	0.008	0.011	0.010
30	0.001	0.001	0.005	0.004	0.007	0.007
35	-	-	0.001	0.001	0.004	0.003
40	-	-	-	-	-	-

$$R(\text{mm}) = \exp[1.61\sqrt{T(\text{MeV})}], \quad 1 < T \leq 4 \text{ MeV} \quad (1)$$

$$R(\text{mm}) = (0.05T + 2.85)T^{3/2}(\text{MeV}), \quad 4 \leq T \leq 15 \text{ MeV}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \quad \text{Bragg-Kleeman rule} \quad (2)$$

T=kinetic energy of the particle in MeV

ρ<sub>i</sub>: the density of material i

A<sub>i</sub>: the atomic weight of material i

$$R(\text{mm}) = (3.2 \times 10^{-1}) \cdot \frac{A_{\text{eff}}}{\rho(\text{kg/m}^3)} \cdot [(0.05 \cdot T + 2.85) \cdot T^{3/2} - Y(\text{mm})] \quad (3)$$

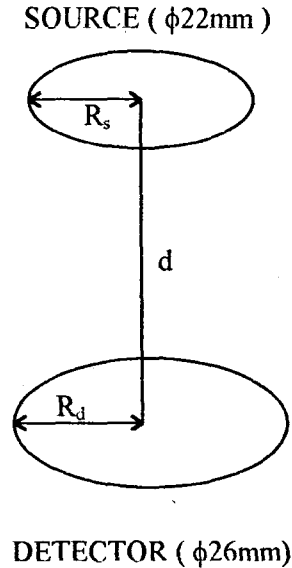


Fig. 1. View of the Source and the Plastic Track Detector to Measure the Detection Efficiency of α-particle.

그리고 알파선의 비정에 따른 유도에너지의 계산은 식 3과 시행오차법을 이용하여 주어진 비정에 따른 에너지를 찾아내는 방법을 이용하였다.

#### 나. 조사시간 결정

선원으로부터 고체비적검출기가 떨어져 있게 되면 접촉되었을 때에 비해 고체비적검출기에 입사되는 방사선의 수가 감소하게 되므로, 검출효율 측정시 에너지 의존성을 관찰하기가 어려워진다. 따라서 선원과 고체비적검출기가 떨어져 있더라도 접촉되었을 때와 같은 수의 방사선의 입사되도록 하기 위한 조사 시간을 계산할 필요성이 있으며, 본 연구에서는 식 4를 이용하여 기하학적 효율(Ω)을 계산한 다음 기하학적 효율의 역수배에 해당하는 시간에 선원에서 방출하는 분당 총방사선의 수를 곱한 값을 선원으로부터

고체비적검출기에 도달하는 알파선의 이론적 갯수로 취하였다.

$$\Omega = s \int_0^{\infty} dx \cdot e^{-xz} \frac{J_1(x)}{x} \cdot J_1(xs) \quad (4)$$

$$s = R_d/R_s$$

$$z = d/R_s$$

$J_1$  = Bessel function of the first kind

Table 2. Geometric Factor and Exposure Time to reach the Same Fluence of  $\alpha$ -particle to the Detector from the Source.

Y(mm)	0	10	15	20	25	30	35	40
Geometric Factor	0.5	0.163	0.105	0.072	0.051	0.038	0.030	0.023
Exposure Time (mm)	2	6.13	9.52	13.89	19.61	26.32	33.33	43.43

윗 식을 이용하여 선원과 고체비적검출기 간의 거리에 따른 기하학적 효율 및 알파선원의 단위면적으로부터  $4\pi$  방향으로 방출하는 알파선의 같은 수의 알파선이 고체비적검출기의 단위면적에 조사되는데 필요한 시간을 계산하여 표 2에 나타내었다.

## 2. 실험 및 결과

실험에 사용된 알파 선원의 구조는 모두 지름이 2.2 cm인 원판형이며, 선원의 방사능은 Am-241이 31427 dpm/380 mm<sup>2</sup>, Pu-239이 21700 dpm/380 mm<sup>2</sup> 그리고 Th-230이 11300 dpm/380 mm<sup>2</sup>이며, 표 2를 근거로 하여 에칭 후 현미경으로 관찰하고자 할 때 판독이 편리하고 또한 계수 오차를 줄이기에 적당한 임의의 수에 해당하는, 고체비적검출기의 단위면적 당 비적수가 42 개/mm<sup>2</sup>이 되도록 하는데 필요한 조사 시간을 각 선원별로 계산하여 표 3에 나타내었다. 그리고 42 개/mm<sup>2</sup>을 검출 효율 계산시 필요로 하는 이론표준값으로 취하였다.

이론표준값을 검증하기 위한 목적으로 3개의 선원을 알파카운터(Ebe., SAC-4)의 검출부에 밀착시켜 측정된 후 실험표준값을 계산하는데 이

용하였으며, 3개의 선원을 각각 1분 동안 10회씩 측정된 평균값은 Am-241은 13665±133 cpm, Pu-239는 9567±80 cpm, Tu-230이 4936±39 cpm였다.

Table 3. Exposure Time to reach the Same Fluence of  $\alpha$ -particle to the Detector from three Alpha Sources.

Y(mm)	Exposure Time (min : sec)		
	Th-230	Pu-239	Am-241
0	2 : 47	1 : 27	1 : 00
10	8 : 31	4 : 26	3 : 04
15	13 : 14	6 : 54	4 : 46
20	19 : 19	10 : 04	6 : 57
25	27 : 16	14 : 13	9 : 48
30	36 : 35	19 : 05	13 : 10
35	45 : 20	24 : 10	16 : 40
40	60 : 26	31 : 31	21 : 44

각 측정값에 표 3의 Y=0일 때 해당되는 시간을 곱하여, 방사능 차이에 따른 알파 선의 수를 보정한 후, 알파 선원의 단위면적으로 나누어 실험표준값을 계산하였다. 계산 결과 Am-241은 36 개/mm<sup>2</sup>, Pu-239은 37 개/mm<sup>2</sup> 그리고 Th-230은 36 개/mm<sup>2</sup>였으며, 계산 값에 오차가 거의 없이 일정한 값을 나타내었으므로 36 개/mm<sup>2</sup>을 실험표준값으로 결정하였다.

그러나 위에서 제시한 이론표준값과 실험표준값에는 각각 계산 오차와 실험 오차가 포함되어 있고, 또한 두 값을 평균한 값이 진값에 근접할 것이라는 판단에 의하여, 이론표준값과 실험표준값을 평균한 값이 39 개/mm<sup>2</sup>을 고체비적검출기의 알파선 검출 효율을 측정하기 위한 기본값으로 사용하였다.

CN-85와 LEXAN을 표 3에서 제시한 시간동안 조사 시킨 후 CN-85의 경우는 2.5N-NaOH 60 °C 수용액에서 1시간 에칭하였으며, LEXAN은 6N-NaOH 60 °C 수용액에서 13시간 에칭하였다. 에칭 속도를 계산하기 위해 에칭 전의 두께와 에칭 후의 두께를 마이크로미터로 측정된 결과 에칭 전의 두께는 CN-85와 LEXAN이 각각 0.178 mm, 0.096 mm였으며, 에칭 후의 두께는 각각 0.166

mm, 0.093 mm였다. 부식은 양면에서 진행되었으므로 주어진 조건에서 고체비적검출기 한면에서의 부식 속도를 계산하면 CN-85와 LEXAN이 각각 1.5  $\mu\text{m}/\text{h}$ , 0.46  $\mu\text{m}/\text{h}$ 였으며, 니트로셀룰로오스계의 CN-85가 카보네이트계의 LEXAN에 비해 부식 속도가 크다는 것을 알 수 있었다.

예칭 후 고체비적검출기에 나타난 비적은 모니터와 연결된 배율이 600배인 현미경으로 판독하였으며, 판독결과는 표 4와 그림 2 그리고 그림 3에 나타내었으며, 비적의 형태는 그림 4와 같다.

Table 4. The Result of the  $\alpha$ -track Detection in CN-85 and LEXAN at Various Distance from the Source to the Detector.

	Y(cm)	Distance (cm)								Ave.
		0	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	
CN-85	Am-241	6	26	51	38	38	58	32	38	36
	Am-239	19	45	38	58	38	32	38	13	35
	Am-230	32	102	51	64	45	32	19	0.0	43
	Am-241	26	13	26	13	19	45	38	19	25
LEXAN	Am-239	13	13	19	13	26	38	45	19	23
	Am-230	13	6	13	26	38	32	13	0.0	18

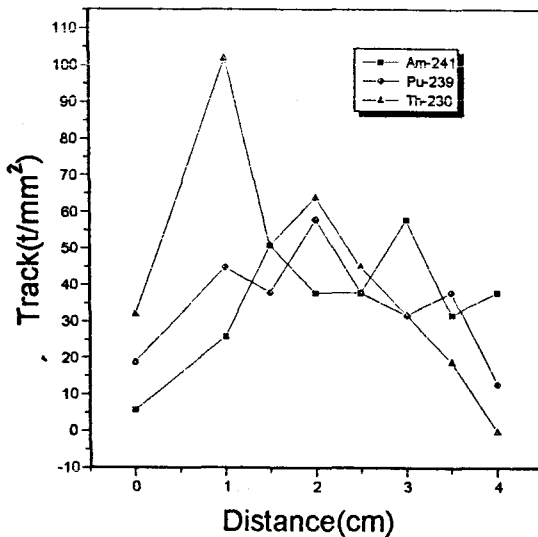


Fig. 2. The Result of the  $\alpha$ -track Detection in CN-85 at Various Distance from the Source to the Detector.

고체비적검출기별로 3개의 알파 선원 및 각각의 거리에서 조사시킨 후 예칭하여 얻은 24개의 측정값을 평균하면 CN-85는 38 개/ $\text{mm}^2$  그리고 LEXAN은 22 개/ $\text{mm}^2$ 였다. 측정값을 효율로 나타내어 보면 이론표준값을 적용하여 계산된 효율은 각각 90 %, 53 %, 실험표준값을 적용하여 계산한 효율은 각각 105 %, 61 %였다. 이론표준값과 실험표준값을 평균하여 얻은 기본값으로 검출 효율을 계산한 결과 CN-85와 LEXAN이 각각 97 %, 57 %였다.

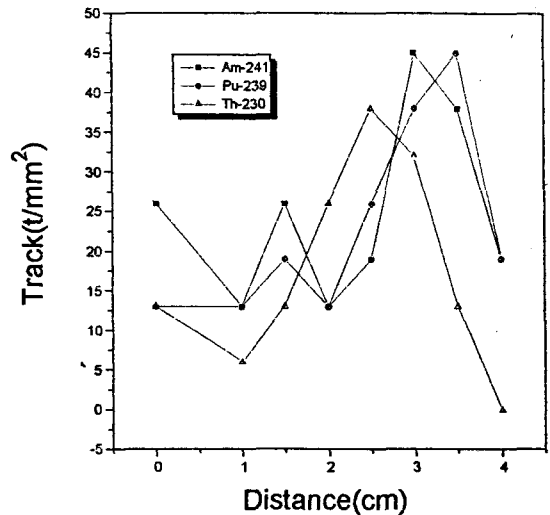


Fig. 3. The Result of the  $\alpha$ -track Detection in LEXAN at Various Distance from the Source to the Detector.

그리고 Th-230에서 방출하는 4.668 MeV 알파선의 공기 중 비정기이 약 3.1 cm이므로 CN-85와 LEXAN 모두 선원으로부터 4 cm 거리에서 조사시킨 경우에는 비적이 검출되지 않았다. 그림 2에서 최대 검출 효율을 나타내는 경우는, 선원과 고체비적검출기의 거리가 CN-85와 LEXAN에서 각각 2 cm, 3 cm였을 때이며, 이 때의 고체비적검출기에서의 비정과 유도에너지를 계산한 결과는 CN-85인 경우 10  $\mu\text{m}$ , 3 MeV, LEXAN인 경우 5  $\mu\text{m}$ , 1.8 MeV에 해당한다.

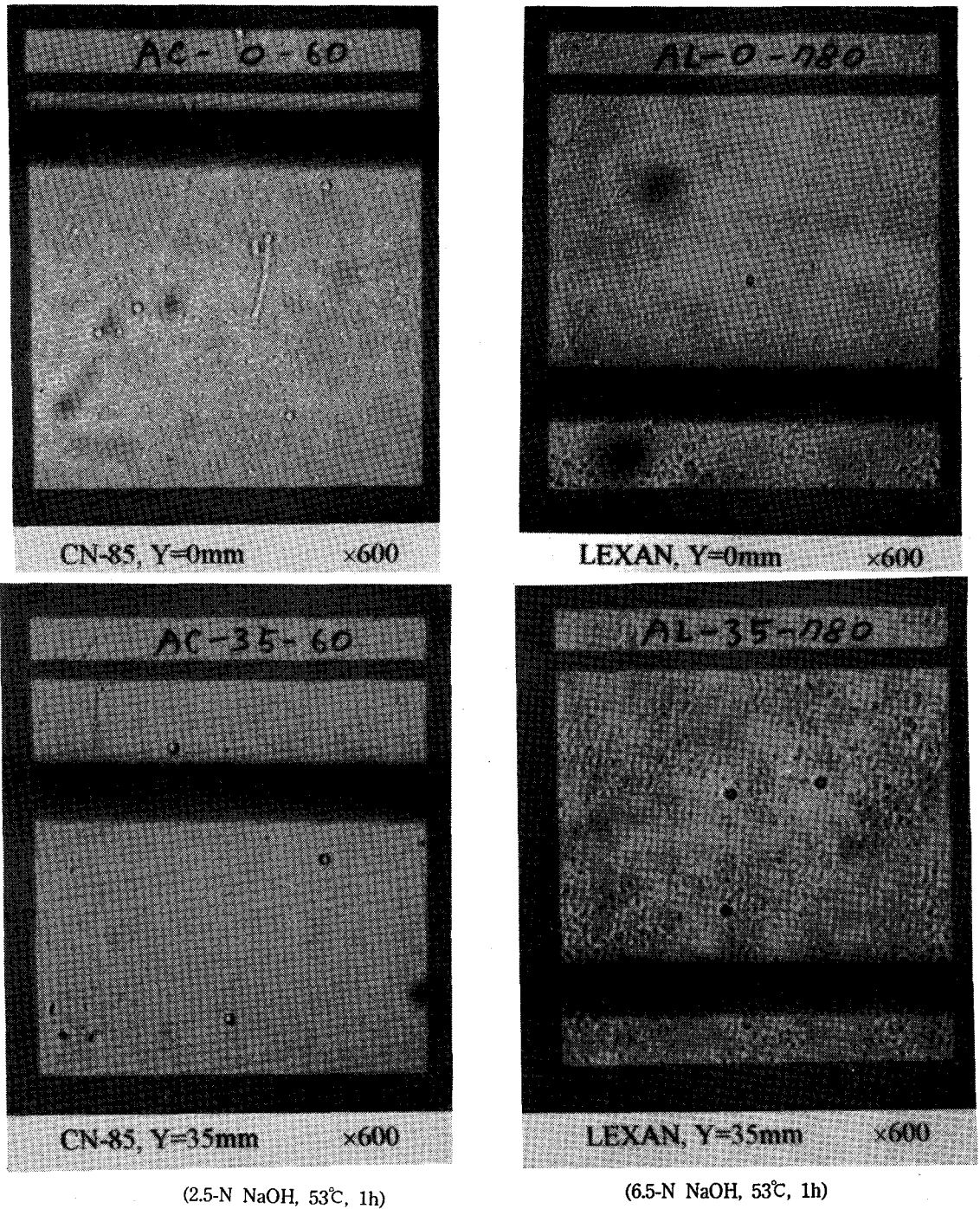


Fig. 4. A View of the  $\alpha$ -track in CN-85 and LEXAN. (Y=Distance from the Source to the Detector.)

#### 4. 결론 및 고찰

알파선을 방출하는 선원과 고체비적검출기와의 거리를 변화시켜 알파선의 유도에너지를 0~5.5 MeV 범위에 있도록 하여, 이 에너지 영역에 있는 혼합 알파선에 대한 검출 효율을 측정하기 위한 고체비적검출기 교정 방법을 제시하였으며, 제시된 방법을 이용하여 알파선 검출을 위한 고체비적검출기를 교정한 결과 CN-85와 LEXAN이 각각 97 %, 57 %였다.

CN-85가 LEXAN에 비해 검출 효율이 좋게 나타난 이유는 CN-85가 LEXAN에 비해 알파선에 대한 sensitivity가 높고, 또한 에너지 의존성이 LEXAN에 비해 낮기 때문인 것으로 분석되었으며, 알파선 검출 효율이 최대값인 CN-85의 경우 고체비적검출기에서 알파선의 비정이 약 10  $\mu\text{m}$ 일 때이며, LEXAN의 경우 약 5  $\mu\text{m}$ 일 때이다. 이때의 유도 에너지를 계산하면 CN-85는 약 3 MeV일 때, LEXAN인 경우 약 1.8 MeV일 때 검출 효율이 최대로 됨을 알 수 있다. 또한 선원이 Th-230인 경우 방출되는 알파선의 공기 중 비정이 3.1 cm이므로, 선원과 고체비적검출기 간의 거리가 4 cm인 경우는 CN-85와 LEXAN 모두 비적이 검출되지 않은 것을 확인하였으며, 유도 에너지에 따른 비적의 형태가 다양하므로 본 논문에서 제시된 알파선 검출 효율 측정 방법을 응용하면 고체비적검출기를 이용한 핵종 분석도 가능하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. T. A. Gruhn, W. K. Li, E. V. Benton, R. M. Cassou and C. S. Johnson, "etching mechanism and behavior of polycarbonates in hydroxide solution: Lexan and CR-39", in: *Solid State Nuclear Track Detector*, 10th international conference, Lyon, 2-6 July 1979, Pergamon Press, 291-302 (1980).
2. M. Fujii, R. Yokota and Y. Atarashi, "New Polymeric Track Detectors of High Sensitivity (SR-90)", in: *Nuclear Tracks and radiation Measurements*, Volume 15, Pergamon Press, 107-110 (1988).
3. A. Y. Smith, P. M. C. Barretto and S. Pournis, "Radon Method in Uranium Exploration", in: *Exploration for Uranium Ore Deposits*, IAEA, SM-208, **52**, 185-211 (1976).
4. J. E. Gingrich and J. C. Fisher, "Uranium Exploration Using the Track-Etch Method", in: *Exploration for Uranium Ore Deposits*, IAEA, SM-208, **19**, 213-227 (1976).
5. 강동구, 김현구, "CR-39를 사용한 제주도 지역 토양 중의 라돈 측정", 대한방사선방어학회지, **13**, 57-65 (1988).
6. S. K. Chakarvarti, Nand Lal and K. K. Nagpaul, "Uranium trace analysis of some materials using solid state nuclear track detectors", in: *Solid State Nuclear Track Detector*, 10th international conference, Lyon, 2-6 July 1979, Pergamon Press, 701-715 (1980).
7. 박영웅 외 3인, "공기중의 라돈농도 측정을 위한 CR-39의 교정" 대한방사선방어학회지, **14**(2), 18-21 (1989).
8. Nicholas Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, pp. 125-129, McGraw-Hill (1983).

1. T. A. Gruhn, W. K. Li, E. V. Benton, R. M. Cassou and C. S. Johnson, "etching mechanism