'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

위치 민감형 중성자 검출 장치의 개발과 그 특성에 관한 연구

Development of Position Sensitive Neutron Detector and Study of Its Characteristics

문명국, 강희동

경북대학교
대구광역시 북구 산격동 1370

이창희, 홍광표

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중성자 산란능이 낮아 장시간 측정이 요구되는 중성자 회절 실험에 적용하여 넓은 범위의 중성자 회절상을 동시에 측정할 수 있는 1차원 위치 민감형 중성자 검출기를 제작하고, 그 특성을 조사하였다. 제작한 검출기는 각각의 음극띠에 연결된 지연소자를 이용하여 위치 정보를 획득하는 방법을 사용하였다. 제작한 검출기의 유효 검출 면적은 120mm×80mm이고, 1.8Å의 파장을 갖는 중성자를 약 60% 검출할 수 있다. 검출기의 고유 위치 분해능은 1.6mm이고, 1mm 슬릿을 이용하여 1.9mm의 위치 분해능을 얻었다. 적분형 비선형성은 0.3%, 미분형 비선형성은 3.67%로 나타났다. 제작한 검출기를 이용하여 니켈 분말 시료에 대한 중성자 회절상을 획득하고, 그 결과를 하나로의 고분해능 분말 회절 장치로 얻은 회절상과 비교하였다.

Abstract

A one dimensional position sensitive neutron detector was designed and fabricated, which can reduce measurement time drastically when the scattering power of sample is very low. The incident neutron position was encoded by delay lines which are connected to each cathode strips. The effective detection area of the detector is 120mm×80mm and the thermal neutron detection efficiency is about 60%. The intrinsic spatial resolution is 1.6mm. We could get 1.9mm of spatial resolution using a 1mm width slit. The integral non-linearity of the detecter and the differential non-linearity of the detector are about 0.3% and 3.67%, respectively. The fabricated detector was applied to the diffraction measurement to see feasibility of field application, and the acquired Ni powder diffraction patterns were compared with the data from the HRPD(High Resolution Powder Diffractometer) in the research reactor HANARO.

1. 서 론

실시간 측정에 의한 상전이 연구 및 집합조직과 잔류 응력 측정장치, 소각산란 분광장치 등 여

러 분야의 중성자 회절 실험에 응용할 수 있는 중성자 위치 검출기는 원자로 또는 가속기를 이용한 핵 파쇄장치(spallation source)가 전세계적으로 한정된 관계로 소수의 기관에서만 연구 개발이 이루어지고 있다. 국내에서 한국원자력연구소의 열출력 30MW 다목적 연구로인 하나로(HANARO)가 1995년 2월에 첫 임계에 도달한 후 현재까지 중성자를 이용한 여러 가지 연구가 수행되고 있어서 위치 민감형 중성자 검출기의 필요성이 증가하고 있다. 현재 상용으로 가능한 위치 민감형 중성자 검출기는 주로 단일선 검출기로 동축형 형태를 가지고 있으며, 크기나 형태 등고 매우 제한적이다. 이러한 단일선 검출기의 입사창 폭은 최대 약 5cm 이하로 제작이 되고 있다. 이런 형태의 검출기에서 입사창을 넓히고, 양극선과 음극관 사이의 거리를 멀게 하면 기체 증폭에 의하여 생성되는 다량의 이온들이 음극관에 도달하는 시간이 많이 걸리게 된다. 따라서 계수능의 저하를 가져오게 된다.

중성자 회절에 의한 금속재 부품의 내부 잔류 응력을 측정하는 실험에서는 검출기가 주로 브래그 각(Bragg angle, 2θ)이 90도 근방에서 위치하기 때문에 계수능을 높이기 위하여 폭이 넓은 입사창을 요구하게 된다[1]. 이러한 형태, 즉 입사창의 폭을 확대할 수 있는 중성자 위치 검출기로는 1968년 고에너지 입자의 궤적을 추적하는 장치로 G. Charpak에 의하여 최초로 고안된 다중선 비례 계수관(MWPC, MultiWire Proportional Chamber)과 같은 것이 존재한다.[2] 이 검출기는 고계수율, 우수한 위치 분해능, 검출기 제작의 간편성 및 구조 변형의 용이성 등으로 인하여 고에너지 물리학 분야뿐만 아니라 응집 물리학, 분자 생물학, 천체 물리학, 진단의학 등의 다양한 연구 분야로 응용이 확대되었다. 특히 기존의 단일선 검출기에 비하여 입사창의 크기를 용도에 맞게 확대할 수 있어서 넓은 면적의 방사선 위치 검출이 요구되는 실험에서 다양한 시도가 이루어졌다.

다중선 비례 계수관과 같은 중성자 위치 검출기에서 사용되고 있는 입사 위치를 결정하는 방법에는 상승시간 측정법(RC encoding), 전하분할법(Charge division), 지연선법(Delay line readout), 병렬판독법(Wire by wire readout) 등 여러 가지가 있다. 이 가운데 지연선에 의한 중성자 위치 결정법은 다른 방법에 비하여 우수한 위치 선형성 및 분해능 특성을 가지고 있어서 많은 검출기에 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 다중선 비례 계수관에 지연선법을 이용하여 중성자 위치 정보를 획득하는 일차원 위치 민감형 중성자 검출기를 제작하였다. 제작한 검출기는 검출 면적이 120mm×80mm이고, 열중성자 검출 효율이 60% 이상이다. 제작한 검출기의 기본 특성 즉, 위치 불확실성, 계측 효율 균일성, 위치 선형성 등에 관한 특성을 조사하였으며, 제작한 검출기를 이용하여 니켈 분말의 중성자 회절상을 측정하여 그 결과를 하나로의 고분해능 분말 회절 장치(HRPD, High Resolution Powder Diffractometer)에서 얻은 회절상과 비교하였다.

2. 위치 민감형 중성자 검출기의 제작

위치 민감형 중성자 검출기의 제작시 검출기의 성능 결정에 있어서 가장 기본적인 인자들은 양극선의 간격, 양극선 반경, 양극선 평면과 음극띠 평면간의 거리, 음극띠의 간격 등으로 이들은 동작 전압, 검출 효율, 위치 분해능, 위치 선형성 등에 영향을 준다.

2. 1. 양극선 면의 제작

다중선 비례 계수기에서 고전압이 인가된 양극선의 역할은 검출기 내에서 중성자와 검출 기체인 ^3He와 반응하여 발생한 양성자와 트리톤에 의하여 발생된 전자를 수집하여 증폭시키는 것이다. 따라서 양극선 평면상 어느 지점에서나 동일한 기체 증폭 효과를 얻어야 된다. 동일한 기체 증폭 이득을 얻으려면 단위 길이당 전하량($Q=CV$)이 일정하게 유지되어야 한다. 양극선 간격과 양극선 직경은 인가전압과 관계가 있다. 양극선의 간격을 줄이면 인가전압을 높여야하고 국지적인 방전의 확률이 증가할 수 있으므로 안정된 동작을 얻지 못할 수 있다. 양극선 직경 또한 줄일수록 낮은 전압에서 동작이 가능하지만 양극선 면을 제작하는데 어려움이 따른다. 따라서 기본적

으로 서로 상충되는 검출기의 특성들이 있으므로 절충적인 인자를 선택하는 것이 타당하다. 본 연구에서 제작한 양극선 면은 직경이 15㎛이고 길이 130mm의 금도금된 텅스텐선을 3mm 간격으로 배치하여 납땜으로 고정하였다. 양쪽 가장자리에는 전기장의 급격한 변화를 방지하기 위하여 직경이 50㎛인 선을 배치하였다. 그림 1에서는 본 연구에서 제작한 양극선 면을 보여주고 있다.

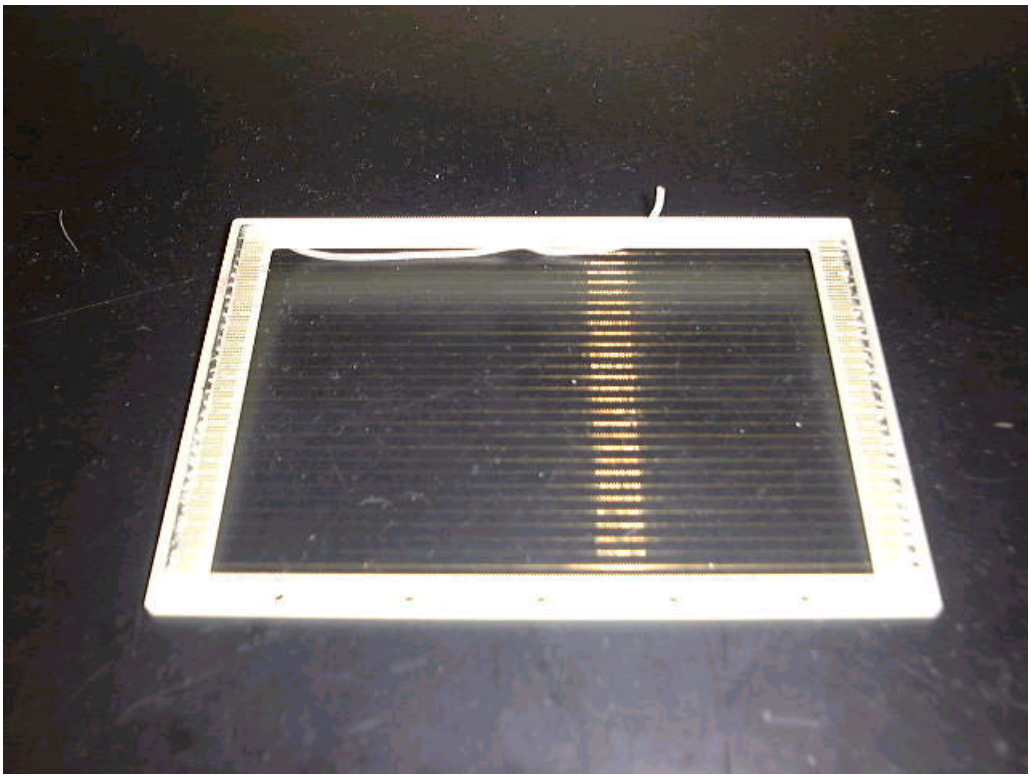

그림 1. 제작한 양극선 면

2. 2. 음극띠의 의 제작

음극띠 평면은 양극선 평면 아래에 위치하며, 양극선 주위에 생성된 양이온운에 의해 음극 평면에 유도된 영상 전하 분포의 중심을 구하는 것이다. 음극선을 사용하면 검출 깊이를 증가시킬 수 있으나 유도된 영상전하의 크기를 높이고, 제작상의 편의를 위해 띠 구조로서 양극선 설치 방향과 수직되게 제작하였다. 유도 전하 분포를 가장 가깝게 측정하기 위해서는 음극선의 간격을 줄이고 그 개수를 늘이는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 전극의 수가 늘어남으로서 일정한 총 유도전하량에 대해 신호 대 잡음의 비가 작게 되어 위치분해능의 저하를 가져오게 된다. 반면에 유도전하 분포가 연속적인 경우에 접근하게 되므로 위치의 비 선형성은 감소하게 된다. 따라서 음극선의 간격은 신호 대 잡음의 비나 제작상의 편의를 위해 가능한 넓게 결정해야 하지만, 위치 비 선형성을 지나치게 증가시키지 않아야 한다. 위치 검출기의 비 선형성에는 검출기의 기하학적 구조, 특히 음극선에 유도된 전하분포, 양극선 표면 부근에서 일어나는 전자사태의 각분포(angular spread) 및 위치, 양이온의 이동도, 신호처리 회로 등의 변수들이 복합적으로 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다.[3] 이 가운데 기하학적 인자에 의한 부분은 음극선에 유도된 전하분포를 이론적으로 계산함으로써 그 관계를 조사할 수 있다.

양극선에 생성된 전하에 의해 거리 d 떨어진 음극띠에서 유도된 전하밀도 $\rho_0(x)$는 다음과 같이 주어진다.[4]

$$\rho_0(x) = -\frac{Q}{4d}\sec h\frac{\pi x}{2d} \quad (1)$$

위의 연속적인 전하분포를 일정간격의 음극띠에 의한 신호로 중심을 결정할 경우 개개의 음극띠에 유도되는 전하량은 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 양극선과 직교하는 방향(y)으로 무한길이를 가지며, 그 폭이 w인 n번째 음극띠에 유도되는 전하량은

$$\Delta\rho_n = \frac{Q}{4d}\int_a^{a+w}\sec h\frac{\pi x}{2d}\,dx$$

$$= \frac{Q}{\pi}[\arctan(e^{\pi x/2d}]_a^{a+w} \quad , a \geq 0 \quad (2)$$

과 같이 주어진다. 여기서 a는 중성자가 입사한 위치를 기준점으로 할 때 0이 된다.

정밀한 위치결정을 위해서 유도전하가 분포되는 최적의 음극띠의 수는 실제 중성자가 입사한 위치와 위치검출 회로를 통한 계산된 위치 사이에 선형적인 관계가 유지되어야 하는 조건으로부터 결정된다. 이러한 선형적인 함수관계를 위치반응함수(position response function)라고 하며, 음극띠의 폭을 넓게 하여 유도전하가 분포되는 음극띠의 수를 줄이면 불연속성 및 변조(modulation) 현상이 나타나게 되고, 반대로 음극띠의 수를 늘이게 되면 지연선 단자의 증가와 더불어 회로적인 잡음이 커지게 될 수 있다. 이것은 전 검출길이에 대해서 동일한 중성자를 입사시켰을 때 검출기에 나타나는 위치의 일양성(uniformity)과 같은 미분형 비선형성을 통해서 알 수 있다. 이와 같이 음극띠의 수에 관계되는 비선형성은 음극띠의 폭(w)과 양극선 면과 음극띠 면 사이의 거리(d)가 같을 때 하나의 음극띠 영역에서 15μm 정도의 절대 위치오차(적분형 비선형성)와 약 1% 정도의 미분형 비선형성이 나타나는 것으로 알려져 있다.[5] 결과적으로 음극띠가 기여하는 비선형성을 줄이려면 w<d로 선택되어야 한다. 본 연구에서는 2mm 간격으로 60개의 음극띠를 제작하였다. 그림 2에서는 본 연구에서 제작한 음극띠 기판을 보여준다.

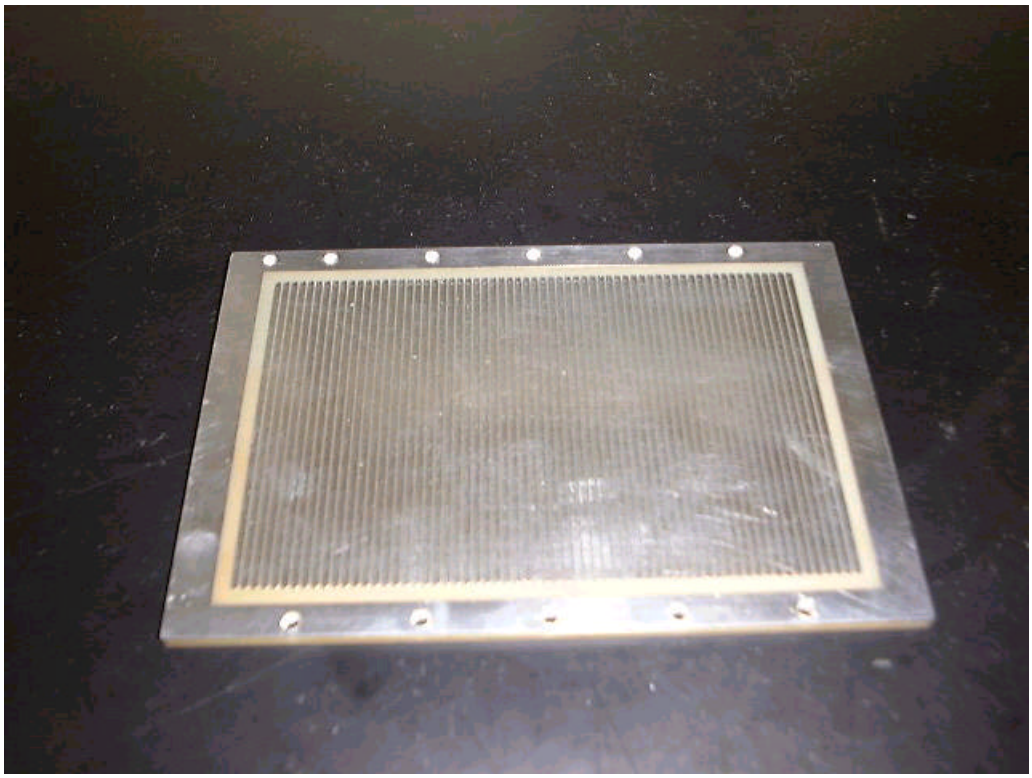

그림 2. 제작한 음극띠 기판

2. 3. 검출 깊이

검출 깊이, 즉 입사창과 음극띠 사이의 간격은 검출기내에서 중성자가 흡수되는 검출효율을 결정하게 된다. 중성자 검출기의 효율은 중성자 흡수반응에 의존할 뿐만 아니라 흡수반응에서 방출된 하전입자를 검출하는 과정을 포함하고 있다. 검출기 입사창과 같은 것에 대한 흡수를 무시하면 중성자 검출효율(ε)은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \xi(1 - e^{-N\sigma_a t}) \quad (3)$$

여기서 효율 ε는 $(1 - e^{-N\sigma_a t})$항으로 주어진다. N은 단위 부피당 중성자 변환원자의 수(^{3}He 또는 ^{10}B)이며, σ_a는 흡수 산란 단면적, t는 검출두께이다. 감쇠인자 ξ는 검출기 구조, 중성자와 반응하여 발생한 하전입자의 수집률 등에 관계된다. 기체검출기의 경우에 ξ는 1에 가깝다. ^{3}He, $^{10}BF_3$의 흡수 단면적이 열중성자인 경우에는 산란 단면적이 속도에 반비례하여 변하기 때문에 $N\sigma_a t$은 식 (2)와 같이 환산거리(X)로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X} = \text{gas pressure(bar)} \times \text{thickness(cm)} \times \text{wavelength(Å)} \quad (4)$$

그림 3에서는 중성자 검출 효율과 환산인자(X)와의 관계를 보여준다. 그림 2에서 보는 바와 같이 ^{3}He 기체를 사용하는 중성자 검출기인 경우에 X의 값이 약 12일 때 검출 효율이 60% 이상임을 알 수 있다. 본 연구에서는 입사창과 음극띠 사이의 거리를 15mm로 하였으며, ^{3}He 기체를 4기압 채웠을 경우에 계산상 중성자 검출 효율이 파장 1.8Å에 대하여 약 60% 정도가 되도록 하였다.

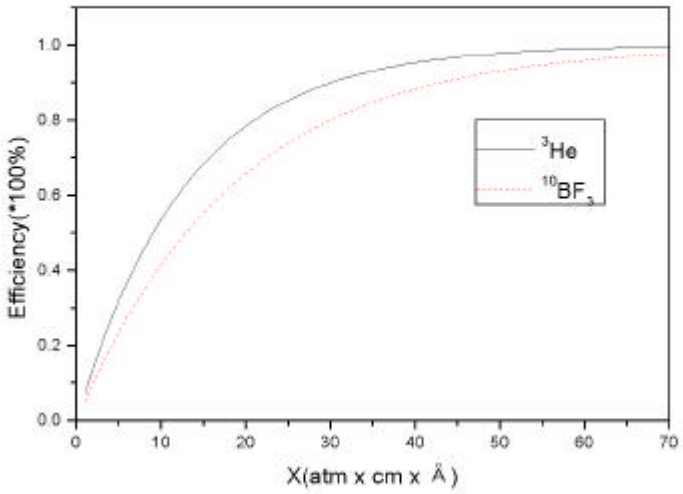

그림 3. 열중성자 검출 효율

2. 4. 지연선의 제작

지연선의 전극수는 검출기의 유효면적과 음극선 및 음극띠의 간격을 결정하는 인자가 되며, 음극띠의 수와 같고, 총 지연시간을 결정하게 된다. 유도전하에 대한 지연선 출력의 정확한 신호파형은 전자의 확산 정도, 양이온의 이동으로 생기는 유도전류, 지연선을 구성하고 있는 수동 소자간의 정격용량의 편차 또는 지연탭(tap)당 시간의 편차 등의 변수들에 의해 결정된다. 지연선의 총 지연시간은 계수율과 밀접한 관계를 가지게 되므로 되도록 줄이는 것이 좋으나 검출신호의 시간적인 형성과정이 검출기 내부의 물리적인 과정에 의해서 제한되므로 임의적으로 결정할 수 있다. 한편 지연선의 길이가 길어지는 경우, 지연선 내에서 시간정보의 오차는 시간분해능을 제한하

게 되며, 이것은 주로 신호대 잡음의 비에 의해서 결정된다. 지연선은 수동소자인 인덕터(L)와 축전기(C)를 회로적으로 결선하여 제작한다. 지연선 자체의 특성 임피던스(Z_0)는 다음과 같다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}\sqrt{1 - \frac{\omega^2 L C}{4}} \quad (\Omega) \tag{5}$$

여기서 ω는 신호의 각떨기수(angular frequency)이다.

신호의 떨기수($f = \frac{\omega}{2\pi}$)가 끊어버림 떨기수(cutoff frequency) $f_c = 1/(\pi L C)$에 비하여 아주 낮을 때, 이 지연선은 순수한 저항 성분만을 가지게 되며 특성 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega) \tag{6}$$

신호의 떨기수가 끊어버림 떨기수(cutoff frequency) 이상일 때는 임피던스가 허수가 되며 지연선은 리액턴스(reactance)를 가지게 되어 신호는 진행할 수 없다. 각각의 LC 결합에 의하여 지연된 단위시간(δ)은 신호의 전파 속도의 역수인 $\delta = \sqrt{L C}$로 주어진다. 제작된 전자지연선의 탭수 N은 지연선의 좋음을 나타내는 지수로서 상승시간 t_{rdl}와 총 지연시간 T_d의 비로 표시되는 f_m(figure of merit)과 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다.[3]

$$N = f_m^{1.36} = \left[\frac{T_d}{t_{rdl}}\right]^{1.36} \tag{7}$$

그리고 지연선 출력의 시간에 대한 편차(δ_t)는 다음과 같이 주어지게 된다.[6]

$$\overline{(\delta t)^2} = 0.55\,\overline{e_n^2}\frac{t_{fw}^3}{Z_0^2 Q_s^2} \tag{8}$$

여기서 t_{fw}는 지연선 양단에 도착되는 전류신호의 반치폭이며, Z_0는 지연선의 특성 임피던스, e_n은 전치증폭기 입력단의 RMS 잡음전압, Q_s는 음극띠 위에 유도되는 신호의 총 전하량이다.

또한 지연선의 특성을 나타내는 물리량을 다음과 같이 정의할 수 있다.[6]

$$\Theta_D \equiv \frac{T_d}{t_{fw}} \tag{9}$$

여기서 T_d는 지연선의 총 지연시간을 나타낸다. 그리고 지연선 양단의 출력신호로부터 시간편차에 의한 상대적인 위치분해능은 다음과 같이 주어진다.[6]

$$\frac{\delta l}{l} = \sqrt{2}\frac{\delta t}{T_d} \tag{10}$$

한편 상대적인 위치분해능은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\delta l}{l} = 2.46\frac{1}{\Theta_D}\frac{e_n}{Z_0 Q_s} t_{fw}^{1/2} \quad [fwhm] \tag{11}$$

위의 식으로부터 우수한 위치분해능을 얻기 위해서는 전류신호의 폭 t_{fw}를 작게 유지하면서 한편으로는 총 지연시간 대 전류신호 폭의 비(T_d/t_{fw})는 최대한 크게 유지해야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 고계수율에서의 동작은 총 지연시간(T_d)이 가능한 짧아야 하므로 상호절충을 통하여 적절한 값을 결정해야 한다. 본 연구에서는 표면실장용 소자(SMD, Surface Mount Device)의 형태의 56pF 값을 가지는 축전기와 150nH의 값을 가지는 인덕터를 사용하여 각 탭당 지연시간이 약 2.9ns인 지연선을 제작하였다. 검출기 전체 지연시간은 약 180ns이며, 지연선의 특성 임피던스는 50Ω이다. 그림 4는 제작한 지연선을 보여주고 있으며 음극띠 하부에 위치한다. 그림 5에서는 제작한 지연선에 의하여 지연되는 신호를 보여준다.

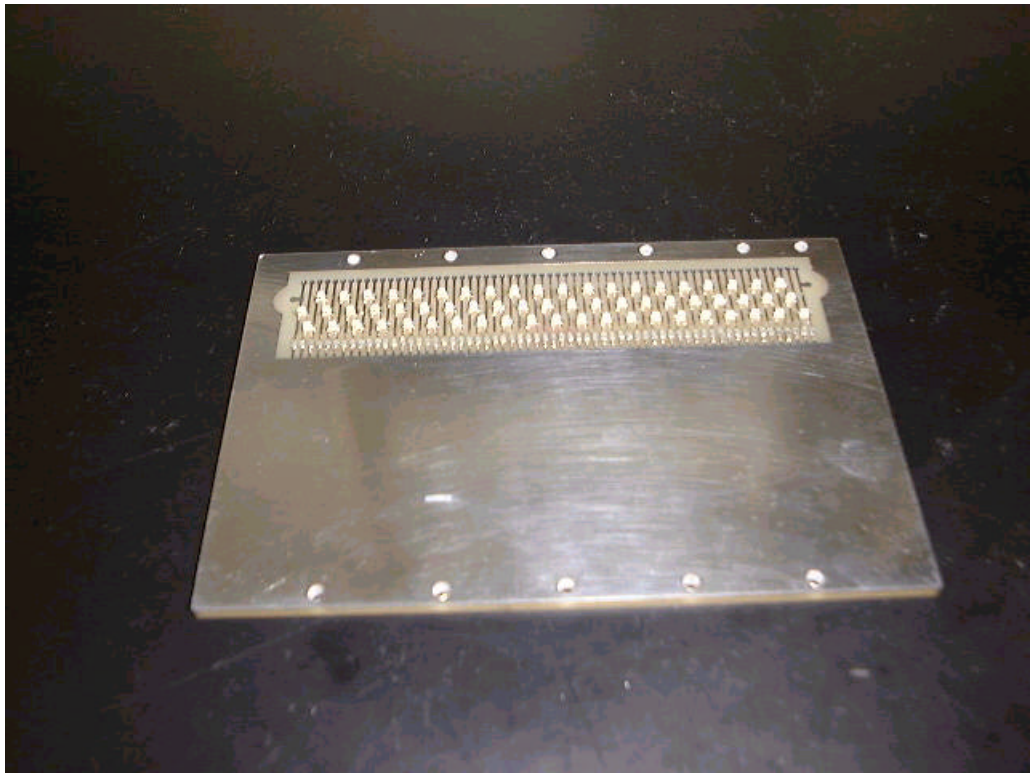

그림 4. 제작한 지연선(C=56pF, L=150nH)

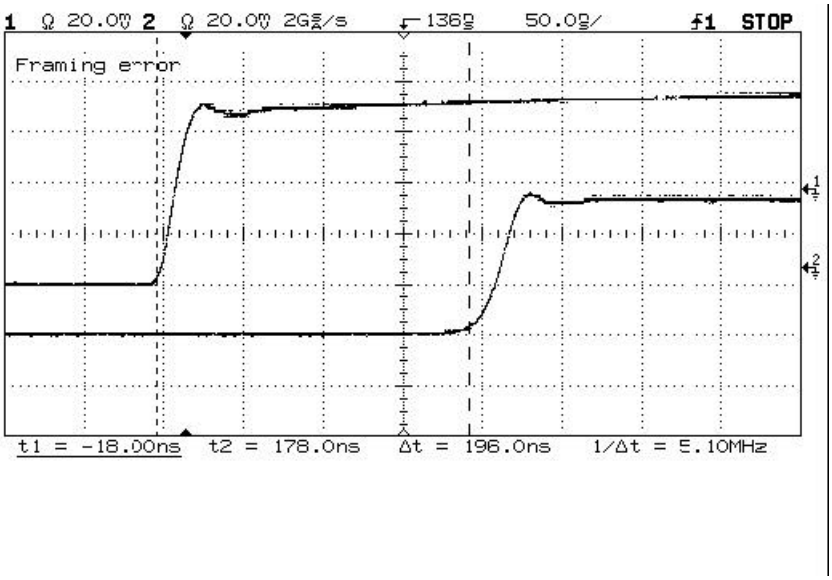

그림 5. 지연선에 의한 신호의 지연

2. 5. 검출기 상자의 제작 및 검출기의 결합

본 연구에서 제작된 1차원 위치 민감형 중성자 검출기는 위로부터 검출기 상자의 덮개이면서 입사창, 양극선 면, 음극띠 면 등으로 구성된다. 검출기 상자의 재질은 알루미늄 합금(6061)을 사

용하였으며 입사창의 두께는 5mm로써 이 때 95% 이상의 열중성자가 투과된다. 입사창과 양극선 면 사이의 거리는 9.6mm이고, 양극선 면과 음극띠 면 사이의 거리는 6.4mm이다. 검출기체의 누설을 방지하기 위하여 O-ring을 사용하였다. 고전압의 공급을 위하여 후버와 셔너사의 진공 밀봉형 SHV(22 SHV-50-0-3)를 사용하였으며, 음극띠에서 발생한 신호를 전치 증폭기로 입력시키기 위하여 진공 밀봉형 BNC(22 BNC-50-0-24)를 두 개 사용하였다. 검출기체의 충진 및 배기를 위하여 스웨지록사의 퀵 커넥터(QC4-B-2MSIS)를 두 개 사용하였다. 그림 6에서는 본 연구에서 제작된 검출기의 내부 결합도를 보여준다.

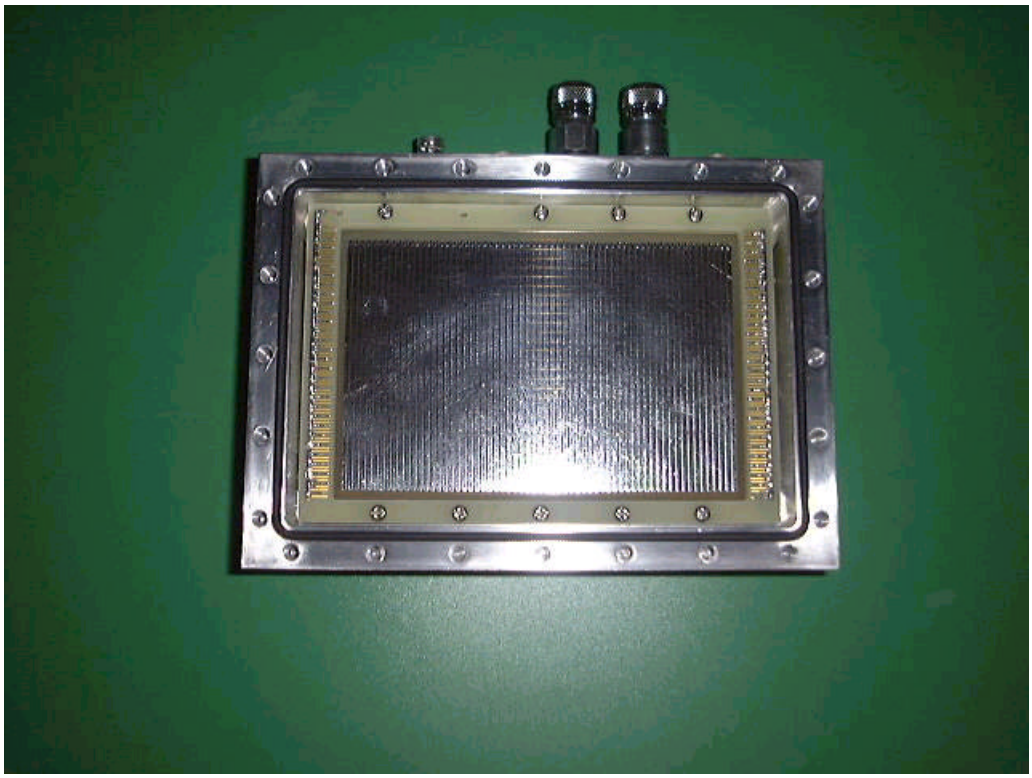

그림 6. 결합된 검출기 내부 결합도

검출기 내의 유기기체인 잔류 기체를 제거하기 위하여 고순도 헬륨을 충진시킨 후 오일 확산 펌프를 이용하여 배기하는 과정을 여러 번 반복하였다. 이 때 최소 압력은 5×10^{-7} torr 정도가 되도록 하였다. 검출기용 기체는 4기압의 ^{3}He과 2기압의 CF_4를 혼합하여 충진하였다. 그림 7은 제작한 검출기의 외형을 보여준다.

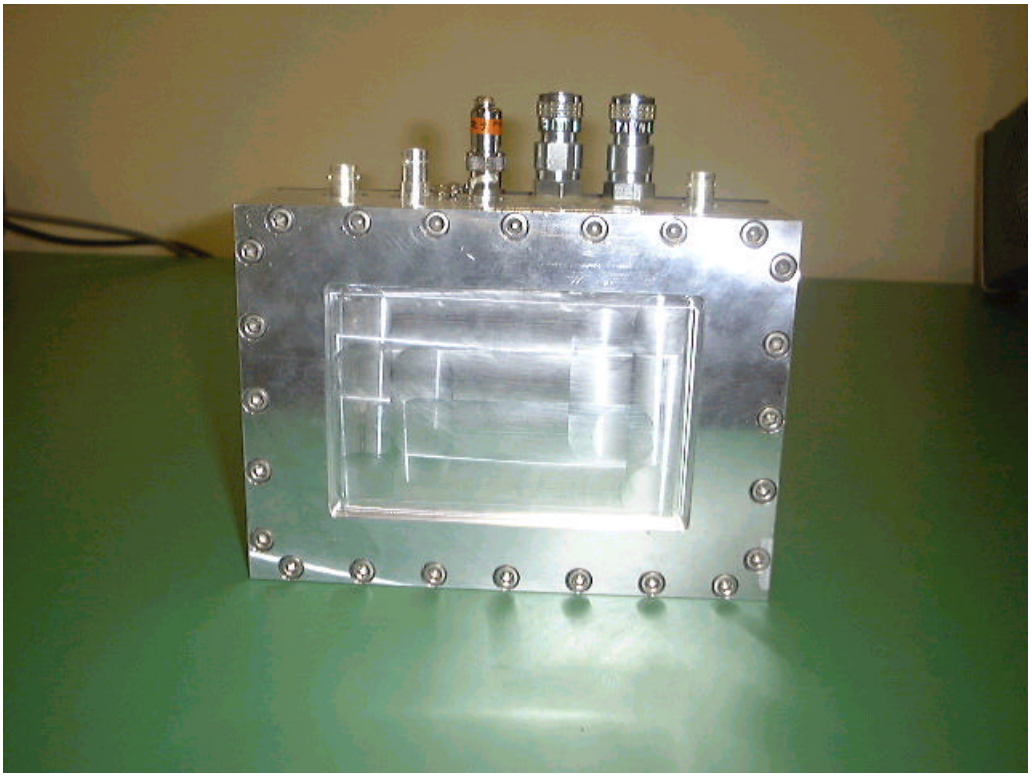

그림 7. 제작한 검출기의 모습

3. 검출기 특성 결과

3. 1. 감마선 테스트

중성자 검출용 기체로는 고가의 동위원소인 ^{3}He가 사용되므로 실제 검출기 제작시 상당히 주의가 요구된다. 따라서 검출기 조립 후 감마선을 이용하여 검출기의 동작을 사전 확인하는 것이 유용하다. 본 연구에서는 검출기 조립후 85%의 Ar과 15%의 에탄(C_2H_6)이 혼합된 기체를 충진하여 감마선에 대한 응답 특성을 조사하였다. 사용한 감마선원은 중성자와 ^{3}He과 반응 후 발생하는 에너지와 비슷한 값을 가지는 ^{137}Cs(662keV)을 사용하였다. 그림 8은 ^{137}Cs 선원을 검출기의 중심에 위치한 후 검출된 감마선의 위치를 보여준다. 그림 8에서 보는 바와 같이 제작한 검출기가 잘 동작할 수 있음을 알 수 있다.

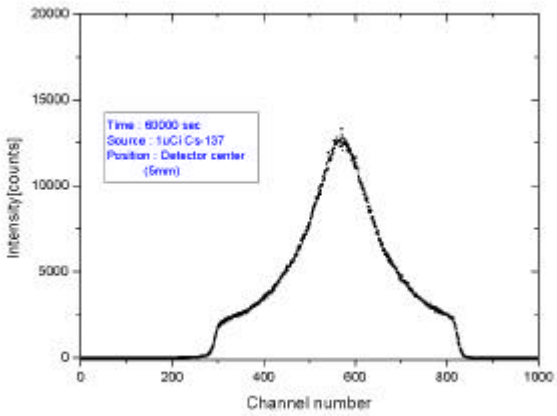

그림 8. ^{137}Cs을 이용한 검출기의 성능 조사

3. 2. 계수율 특성

제작한 검출기가 비례 영역에서 동작하므로 계수 특성을 조사하여 적절한 동작 전압을 설정하는 것이 중요하다. 일반적으로 검출기의 적정한 동작 전압은 인가 전압에 따른 계수율의 변화를 측정하여 계수율이 일정한 위치로 결정된다. 그림 9는 전방향 산란 특성이 있는 플렉시글라스(Plexiglass)에서 산란된 중성자를 이용하여 인가 전압에 따른 계수율의 변화량을 측정한 것이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 안정된 계수율을 얻기 위해서는 보다 높은 인가 전압이 요구되지만, 고전압 발생 장치의 한계(<5,000V) 및 방전에 의한 검출기의 파손 위험성을 고려하여 4,750V 이상은 인가하지 않았다.

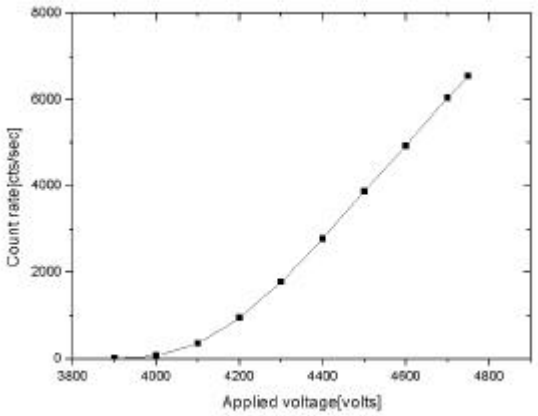

그림 9. 인가 전압에 따른 계수율의 변화

3. 3. 위치 선형성과 계수 균일성

입사 위치 선형성은 제작한 검출기의 중성자가 입사한 위치를 결정하는데 중요한 특성중의 하나이다. 이와 같은 선형성은 위치의 정확도를 나타내는 것으로 실제 중성자가 입사한 위치와 검출기를 통하여 측정된 위치의 변위에 대한 절대위치 오차를 검출기의 총길이에 대해서 규격화한 적분형 비선형성과 중성자 위치 검출기 및 신호처리회로의 일양성 정도를 나타내는 미분형 비 선형성이 있다. 그림 10는 제작한 음극띠에 테스트 신호를 주입하면서 검출된 위치를 측정한 것이다. 이 때 적분형 비선형성은 약 0.3%로 우수한 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 검출기 교정용으로 사용되는 플렉시글라스(plexiglass)에 의해 산란된 중성자 분포를 보이는 것으로 전 검출영역에서 계수값의 균일성을 보여준다. 이 때 미분형 비선형성 값은 3.67%로 나타났다.

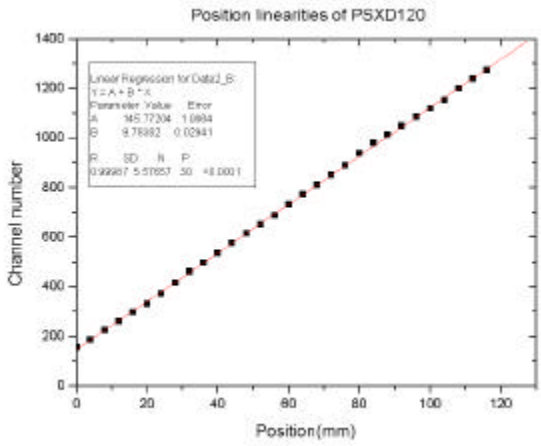

그림 10. 제작한 검출기의 위치 선형성

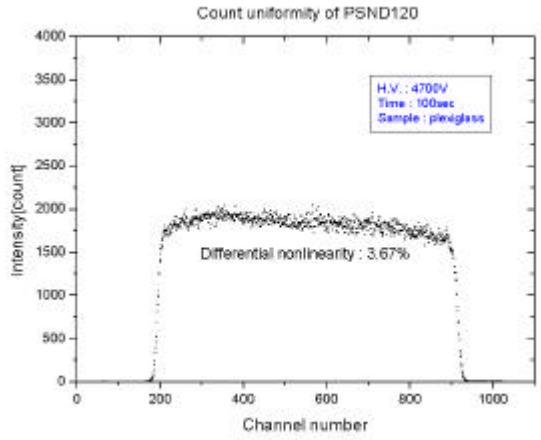

그림 11. 제작한 검출기의 계수 균일성

그림 12는 검출기 동작 전압의 변화에 따른 계수 균일성의 변화를 측정한 것이다. 동작 전압이 증가할수록 계수 균일성이 향상됨을 알 수 있다.

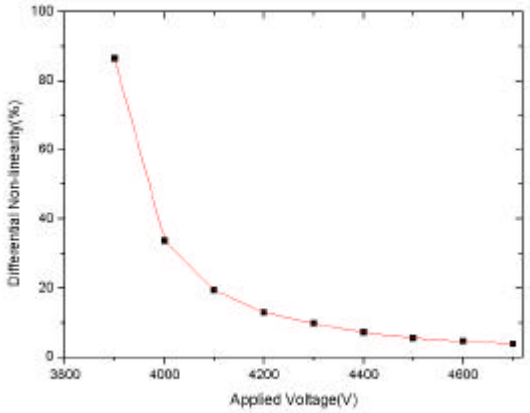

그림 12. 동작 전압에 따른 계수 균일성의 변화

3. 4. 위치 분해능

^{3}He와 중성자의 상호작용 후 생성되는 573keV 에너지를 갖는 양성자(p)와 191keV 에너지를 갖는 삼중수소(t)는 운동량 보존 법칙에 따라 서로 반대방향으로 진행하며 궤적을 따라서 기체를 이온화시킨다. 이들에 의하여 발생된 이온화 중심점은 양성자 이동거리의 약 0.35에 위치한다. 따라서 이온화 중심점은 직경이 양성자 이동거리의 0.7이 되는 구의 형태를 취함을 알 수 있다. 위치 분해능을 높이기 위해서는 양성자 저지능이 높은 기체를 사용하며 현재 C_3H_8, CF_4 등이 가장 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 중성자의 검출 효율을 60% 하기 위하여 ^{3}He 기체를 4기압 사용하였고, 양성자의 저지능을 높이기 위하여 2기압의 CF_4를 사용하였다. 이 때 573keV 양성자의 이동거리는 2mm 이하이다. 그림 13은 거리가 1cm 떨어진 폭 1mm인 슬릿을 검출기 입구에 설치한 후 측정한 위치 분해능 함수를 보여준다. 이 때 검출기의 반치폭(FWHM)은 1.9mm로 측정되었다. 검출기의 고유 위치 분해능은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{측정된 위치 분해능}^2 = \text{슬릿 폭}^2 + \text{검출기 고유 위치 분해능}^2 \quad (12)$$

따라서 검출기의 고유 위치 분해능은 약 1.6mm임을 알 수 있다.

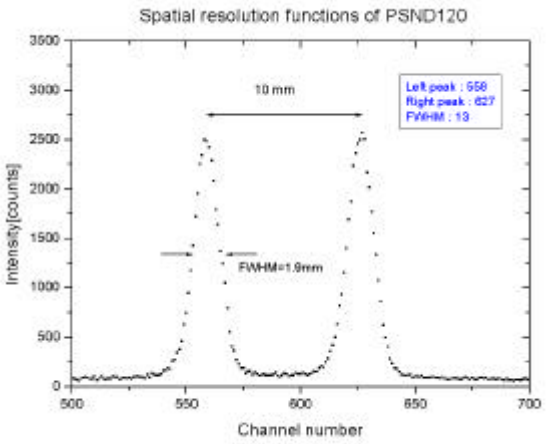

그림 13. 제작한 검출기의 위치 분해능 함수

3. 3. 중성자 회절상 획득 및 평가

제작한 위치 민감형 중성자 검출기를 이용하여 실제 적용 타당성을 조사하기 위하여 중성자 회절 실험에 시험적으로 적용하였다. 측정 시료는 회절 장치 교정용으로 많이 사용되는 니켈 분말을 사용하였다. 상용 중성자는 1.8348Å의 파장을 가지며, 시료와 검출기 사이의 거리는 40cm로 하여 약 17° 정도의 중성자 회절 분포를 측정토록 하였다. 그림 14는 HRPD로 측정한 니켈 분말의 중성자 회절상([111], [200], [220])을 보여주고 있으며, 그림 15는 본 연구에서 제작한 위치 민감형 중성자 검출기를 이용하여 여러 각도에서 측정한 회절상을 보여주고 있다. 그림 15에 보여준 각각의 데이터는 시료를 중심으로 검출기를 각각 10도씩 이동하며 측정하였다.

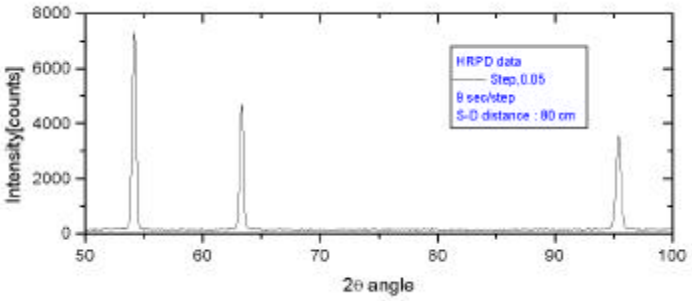

그림 14. HRPD로 얻은 니켈 분말의 중성자 회절상

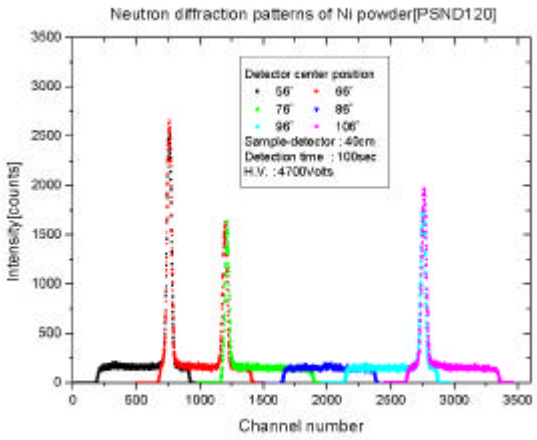

그림 15. 제작한 검출기로 얻은 니켈 분말의
중성자 회절상

표 1에서는 HRPD로 획득한 중성자 회절상과 본 연구에서 제작한 중성자 회절상의 특성을 비교하였다. HRPD의 경우에는 검출기 전반에 중성자 회절각 외에 입사하는 중성자를 차폐하기 위하여 0.16° 솔러 조준기(SOLLER collimator)가 있으나, 본 연구에서 제작한 검출기는 조준기가 없이 측정하였다. 따라서 측정된 중성자 회절 피크의 폭(peak FWHM)이 늘어나는 경향이 있었다. 특정 피크 [111]을 기준으로 [200], [220] 피크의 강도를 비교한 결과 HRPD는 각각 0.65내외이나, 본 연구에서 제작한 검출기로 측정한 값은 각각 0.60, 0.80 정도였다. 표 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제작한 검출기로 중성자 회절상 전체를 측정하는 시간은 HRPD에 비하여 비슷한 시간이 요구되나, 중성자 잔류응력 실험과 같은 특정한 피크의 위치의 변동이나 강도 변화를

조사하는 실험에서는 짧은 시간에 많은 측정을 할 수 있는 장점이 있음을 확인할 수 있다. Peak/Background 비율이 제작한 검출기가 낮은 것은 검출기를 충분히 차폐하지 않고 임시로 간략 차폐 상태로 측정하였기 때문이다.

Items	HRPD	PSND200
Collimator	Yes(SOLLER 10')	No
Detection time	0.05°step/9sec	frame/100sec
Peak total counts	peak counts portion [111] : 58361 / 1.00 [200] : 37902 / 0.65 [220] : 38062 / 0.65	peak counts portion [111] : 122766 / 1.00 [200] : 73551 / 0.60 [220] : 98153 / 0.80
Peak counts/background counts	50	11
Peak FWHM	[111] : 0.35 ° [200] : 0.35 ° [220] : 0.55 °	[111] : 42chn(0.87 °) [200] : 42chn(0.87 °) [220] : 42chn(0.87 °)

표 1. HRPD와 제작한 검출기의 니켈 분말 중성자 회절상 비교표

4. 결 론

본 연구에서는 지연선을 이용한 위치 민감형 중성자 검출기를 제작하고 그 기본 특성을 조사하였다. 제작한 검출기는 검출 면적이 120×80mm²이고 검출 깊이는 15mm이다. 검출기체는 ^{3}He(4기압)와 CF_4(2기압)를 사용하였다. 양극선 면은 직경 15μm인 금도금된 텅스텐 선을 이용하여 3mm 간격으로 배치하였다. 음극선 띠는 2mm 간격으로 60개를 설치하였고, 양극선과 직교한다. 음극띠와 연결된 지연선은 인덕터(150nH)와 축전기(56pF)를 이용하여 단위지연시간이 2.9ns인 지연선을 60개 설치하였다. 이 때 검출기 전체 지연시간은 약 180ns이며, 지연선의 특성 임피던스는 50Ω이다. 검출기 상자는 알루미늄 합금으로 제작하였으며 입사창의 두께는 5mm이다. 입사창과 음극띠 사이의 거리는 15mm로 하였으며 열중성자 검출 효율은 약 60%가 된다. 제작한 검출기의 적분형 비 선형성은 약 0.3%로 나타났고, 미분형 비 선형성은 약 3.67%이다. 폭이 1mm인 슬릿을 이용하여 검출기의 위치 분해능을 측정하였으며 이 때 반치폭은 1.9mm로 측정되어 검출기의 고유 위치 분해능은 약 1.6mm 임을 알 수 있었다. 제작한 검출기를 하나로 원자로에서 니켈 분말에 대한 중성자 회절상을 획득하였다. 그 결과 잔류 응력 측정 또는 중성자 회절에 의한 정량 분석 등과 같은 실험에 응용 가능하다고 사료된다.

참고문헌

1. V. T. Em 외, KAERI/TR-1343/99, 한국원자력연구소, 1999
2. G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier and C.Zupanic, Nucl. Instru. and Meth. 62, 235(1968)
3. R. A. Boie, J. Fisher, Y. Inagaki, F. C. Herritt, V. Radeka, L. C. Rogers and D. M. Xi, Nucl. Instru. and Meth. 201, 93(1982)
4. I. Endo, T. Kawamoto, Y. Mizuno, T. Ohsugi, T. Taniguchi and T. Takeshita, Nucl. Instru. and Meth. 188, 51(1968)
5. 남욱원, 박사학위논문, 경북대학교(1990)
6. V. Radeka, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-21, 51(1974)