

원자외선 분광기의 2차원 위치검출을 위한 고 분해능 지연선 검출회로

이진근^{1,2†}, 남욱원², 공경남², 이대희³, 신종호¹, 육인수², 진호², 유광선³, 선광일²,
강경인³, 박장현², 민경욱¹, 한원용², 이우백², Eric Korpela⁴, Jerry Edelstein⁴

¹한국과학기술원 물리학과

²한국천문연구원

³한국과학기술원 인공위성연구센터

⁴Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley

HIGH RESOLUTION DELAY LINE READOUT ELECTRONICS FOR THE FIMS 2-D POSITION SENSITIVE DETECTOR

J. G. Rhee^{1,2†}, U. W. Nam², K. N. Kong², D. H. Lee³, J. H. Shin¹,
I. S. Yuk², H. Jin², K. S. Ryu³, K. I. Seon², K. I. Kang³, J. H. Park²,
K. W. Min¹, W. Y. Han², W. B. Lee², E. Korpela⁴, J. Edelstein⁴

¹Department of Physics, KAIST

²Korea Astronomy Observatory

³Satrec, KAIST

⁴Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley

E-mail: jgrhee@kao.re.kr

(Received November 1, 2001; Accepted February 17, 2002)

요 약

MCP(microchannel plate)와 지연선 양극판(delay line anode), 그리고 지연선 검출회로로 구성되는, 원자외선 분광기에 사용될 2차원 지연선(delay line) 방식의 위치검출기(position sensitive detector)를 설계하고 그 중 지연선 검출회로를 제작하여 동작 및 분해능에 대한 시험을 수행하였다. 이 시험에서는 검출회로의 고유한 분해능을 확인하기 위하여 MCP와 양극판은 각각 특성이 잘 알려진 스티뮬레이터(stimulator)와 양극판 시뮬레이터(anode simulator)로 대체되었다. 제작된 검출회로는 안정적으로 동작하였으며 분광 및 영상 축 방향으로 각각 약 560ps와 약 100ps의 시간 분해능을 가지는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

We designed two-dimensional position sensitive MCP(microchannel plate) detector for FIMS, which is composed of MCP, delay line anode, and delay line readout electronics. And also, we fabricated and tested for the operation stability and resolution of the delay line readout electronic system. An anode simulator and a stimulator were used instead of the real MCP and anode during the test to see the electronic contribution to the resolution. The readout electronics was operated stably and showed time resolution of about 560 ps for the spectral direction and about 100 ps for the image direction respectively.

Keywords: microchannel plate, delay line, readout electronics, resolution

[†]corresponding author

1. 서 론

원자외선 분광기는 성간에 존재하는 고온($10^{4.5} \sim 10^6$ K)의 기체가 복사열에 의해 냉각되면서 발생하는 O_{IV} 방출선을 관측하는 것을 중요한 목표로 하고 있으며, 관측 대상에 대하여 분광과 각 파장 별 영상 관측을 동시에 수행할 수 있다. O_{IV} 방출선은 이중선(doublet)으로써 파장은 각각 1032\AA , 1038\AA 이며, 지구 대기광에서 방출되는 $10^{5.5}$ LU(line unit; $1 \text{ photons/s/cm}^2/\text{sr}$)의 강도(intensity)를 갖는 Lyman β (1025\AA) 배경선 때문에 그 동안 극히 제한된 일부 시선 방향으로만 관측되었다. 원자외선 분광기는 한 궤도동안의 관측으로 $800 \sim 900$ LU의 O_{IV} 방출선을 관측할 수 있도록 설계되었으며, 이것은 약 7,000 LU 정도의 검출 효율을 갖는 FUSE나 HUT 등 기존의 관측장비의 비해 월등한 값이다(선광일 등 2000). 이러한 높은 O_{IV} 방출선의 검출 효율을 구현하고 각 파장 별 영상 관측을 수행할 수 있도록 torroid 형태의 에델이발을 이용하여 1035\AA 에서 $1.4\text{\AA}(\lambda/\Delta\lambda \sim 750)$ 의 분광 분해능과 5'의 영상 분해능을 가지는 원자외선 분광기의 광학계가 설계되었으며, 이 광학계와 함께 원자외선 영역의 광자에 대해 양자 효율(quantum efficiency)이 좋은 MCP(microchannel plate)를 기반으로 한 지연선 방식의 2차원 위치검출기를 사용한다. 광학계의 선형 분산능을 고려할 때 설계된 분광 및 영상 분해능에 해당되는 초점면 상의 위치 분해능은 분광 축 방향으로 약 $120\mu\text{m}$, 영상 축 방향으로 약 $250\mu\text{m}$ 이다(유광선 2000). 2차원 위치검출기의 경우 MCP 출력 신호의 분포, 양극관과 증폭기의 비 선형성, 검출 회로의 판별기(discriminator)에서 발생하는 타이밍 오차 등 여러 가지 요인에 의해 위치 판별오차가 발생할 수 있으며 이러한 오차는 검출기 자체의 위치 분해능을 결정한다. 광학계와 검출기는 서로 독립적으로 전체 시스템의 분해능에 영향을 주므로 초점면 상에서 전체 시스템의 위치 분해능은 광학계와 검출기의 위치 분해능의 RSS(root sum square)로 주어진다. 원자외선 분광기에서는 검출기의 전체 시스템의 분해능에 대한 기여는 약 10% 이내가 되도록 하는 것을 목표로 하고 있으며, 검출기 자체의 위치 분해능은 분광 축 방향으로 약 $40\mu\text{m}$, 영상 축 방향으로 약 $80\mu\text{m}$ 를 넘지 않아야 한다.

MCP(microchannel plate)를 기반으로 한 2차원 위치검출기(position sensitive detector)는 1980년대 이후부터 많은 자외선 분광 및 영상 관측 임무들에서 사용되어 왔으며, MCP와 MCP에서 생성된 전자들을 수집하는 양극관(anode), 그리고 이 양극관의 출력신호를 처리하여 광자가 입사한 위치를 파악하고 이를 디지털 값으로 변환하여 주는 검출회로로 구성이 된다(그림 1 참조). 이 방식을 사용하는 검출시스템의 특성은 일차적으로 양극관에 의해 결정되며 그 특성에 따라 검출회로의 구성이 달라지게 된다. FAUST, EUVE 등 초기 임무에서는 charge division 방식의 쐐기형 양극관(wedge-strip anode)이 사용되었으나(Siegmund et al. 1984), 이 방식은 양극관 자체의 정전용량에 의한 전하손실과 MCP에서 생성된 전자들이 양극관의 양쪽 전극으로 나누어질 때 발생하는 통계적인 오차 때문에 광학계의 초점면 상에서 얻을 수 있는 검출기의 위치 분해능이 약 $100\mu\text{m}$ 이상으로 제한되는 단점이 있다. 이러한 이유로 90년대에 들어서 여러 그룹에서 고 분해능을 얻을 수 있는 양극관에 대한 연구를 수행하였으며, Lampton et al.(1987)이 ORFEUS 임무에서 이중 지연선(double delay line) 방식의 양극관을 사용하여 약 $15\mu\text{m}$ 의 고 분해능 분광 스펙트럼을 얻는데 성공한 이후 현재까지 SOHO, IMAGE, FUSE, GALEX 등의 임무에서 다양한 형태의 지연선 양극관이 사용되어 왔다(Lampton & Marchwordt 2000). 최근에는 2차원 모두에 대해 고 분해능을 얻을 수 있는 교차 지연선(cross delay line) 방식의 양극관이 보편적으로 사용되고 있으며, 원자외선 분광기에는 기존의 교차 지연선을 변

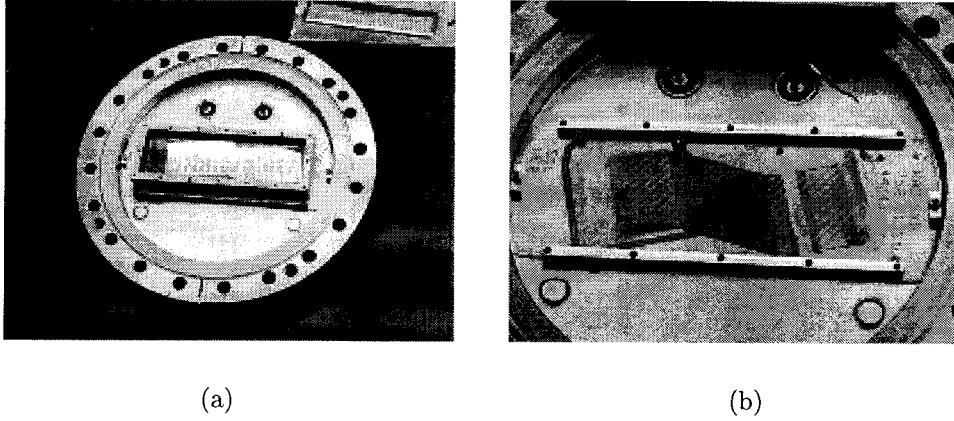


그림 1. (a) 원자외선 분광기의 prototype MCP 검출기, (b) 시험용 일차원 SXD anode.

형한 SXD(shared cross delay line) 방식의 양극판을 사용한다.

지연선 검출회로는 지연선 양극판과 함께 사용되며 증폭기, 타이밍 판별기(timing discriminator), 그리고 디지털라이저(digitizer)로 구성된다. 이 중 타이밍 판별기는 검출회로의 분해능을 결정하는 중요한 요소이며 용도에 따라 여러 가지 판별 방법이 사용되어 왔다. MCP와 같이 출력신호의 크기가 넓은 분포를 갖는 검출기를 사용하는 경우에는 CFD(constant fraction discriminator)를 사용하면 walk 효과를 최소화 할 수 있으므로 최적의 시간 분해능을 얻을 수 있다(Lampton 1998).

이 논문에서는 원자외선 분광기에 사용된 SXD(shared cross delay line) 방식의 양극판과 이에 대응되는 지연선 검출회로의 설계 내용을 소개하고, 검출 회로의 동작 및 분해능에 대한 시험 결과를 소개한다

2. 원리 및 구성

원자외선 분광기의 2차원 위치검출기는 그림 2의 구성도에서 보듯이 MCP와 양극판 그리고 검출회로로 구성이 되어 있다. 광학계의 초점면 상에 위치한 MCP로 입사한 광자는 전자 구름을 생성하고, 이 전자들은 MCP와 양극판 사이에 인가된 전기장에 의해 가속되어 양극판에서 수집된다. 원자외선 분광기에서는 그림 3에 나타나있듯이 분광 및 영상 축 방향으로 지연선을 공유하는 SXD 방식의 양극판을 고안하여 검출회로를 단순화 시킴으로써 전력 소모를 줄이고 공간을 최소화 하였다.

지연선 양극판의 특정한 지점에 전하들이 입사되면 4개의 펄스- X_{start} , X_{stop} , Y_{start} , Y_{stop} -가 생성되고 양극판 상에 구현된 지연선을 따라서 출력 쪽으로 전파된다. 이 때 양극판의 양쪽 끝에 도달하는 두 신호의 도착시간의 차는 전하들이 입사한 위치에 따라 달라지게 되는데 도착시간의 차(T_{delay})와 입사위치(X) 사이의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$T_{delay} = T_{start} - T_{stop} = (2X - L)/V_{eff} \quad (1)$$

여기서 L 은 지연선 양극판의 크기이고, V_{eff} 는 양극판에 수집된 전하들의 유효전파속도이며 c/ϵ_r 로

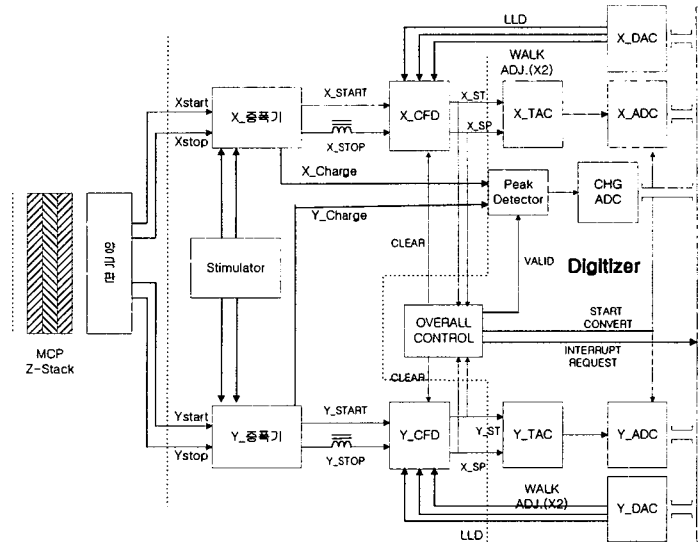


그림 2. 원자외선 분광기 검출시스템의 구성도.

주어진다. 이때 ϵ_r 은 지연선에 사용되는 유전체의 유전상수 값이다. 이 식을 미분하면

$$\delta X = V_{eff} \delta T_{delay} \tag{2}$$

의 형태가 되므로 위치분해능은 시간분해능과 비례관계에 있으며 전파속도를 느리게 만들어줄수록 위치분해능은 좋아짐을 알 수 있다. SXD 양극판의 지연선에는 유전상수가 약 10인 알루미늄(Alumina)가 유전체로 사용되며, 분광 축 방향으로는 약 27ns, 영상 축 방향으로는 약 20ns의 지연시간을 가지도록 설계되었다.

원자외선 분광기에 사용된 지연선 검출회로는 그 기능에 따라 다시 증폭기와 CFD(constant fraction discriminator) 그리고 디지털이저로 나누어진다.

2.1. 증폭기

증폭기는 양극판에서 출력된 신호를 증폭시키는 장치이다. 지연선 검출시스템에 사용되는 증폭기는 높은 통과주파수 대역을 가져야 하며 잡음이 작아야 한다(Spieler 1982). 또한 지연선을 통과하면서 발생하는 분산에 의해 시간 분해능이 나빠지는 것을 막기 위해서는 선형성이 좋아야 하며, MCP 출력의 PHD(pulse height distribution) 때문에 분해능이 영향을 받는 것을 최소화 하기 위해서는 동작범위가 넓어야 한다. SXD 양극판에서 출력되는 신호는 약 1ns의 폭을 가지는 가우스 형태의 펄스이며 증폭기는 이 신호로부터 약 5ns의 폭을 가지는 타이밍 증폭신호와 약 2 μ s의 피킹 타임(peaking time)을 가지는 전하 증폭신호를 만들어 준다. 타이밍 증폭신호는 수 GHz의 통과주파수 대역을 가지는 monolithic RF amplifier에 의해 생성되며, 전하 증폭은 전치 증폭기(op-amp)와 수동

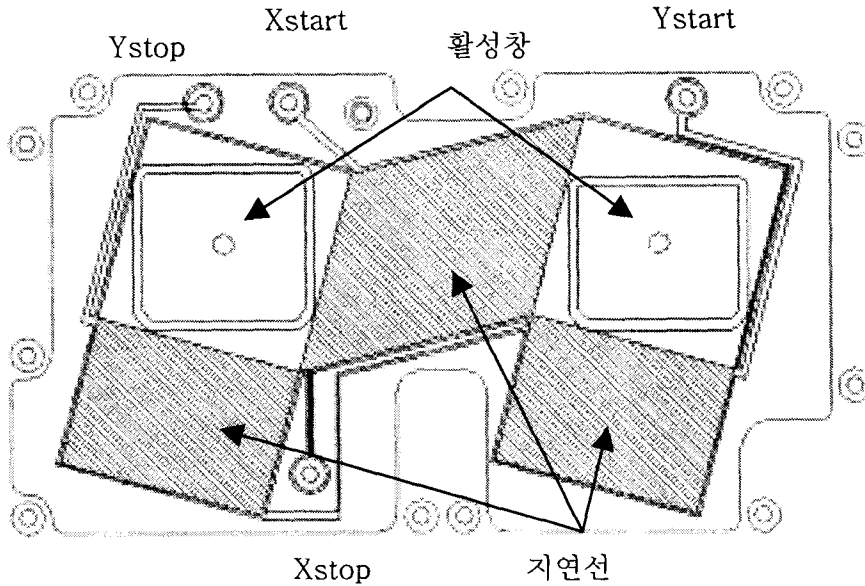


그림 3. FIMS의 SXD 양극판.

소자로 구성된 CSA(charge sensitive amplifier)를 통하여 이루어진다. 각 축 방향의 시작(Start) 출력이 항상 끝(stop) 출력에 선행하도록 만들어주기 위하여 증폭기의 끝 출력에는 양극판의 총 지연시간에 해당되는 지연선을 추가로 설치하였다.

2.2. CFD(Constant Fraction Discriminator)

CFD는 입력펄스에 대하여 항상 일정한 시간간격을 갖는 타이밍(timing)의 기준펄스를 만들어 주는 부분이다. 시간에 대한 함수인 CFD의 입력신호를 $V(t)$, 이에 대해 t_0 시간만큼 지연된 신호를 $V(t - t_0)$ 라 하면 $G(t) = FV(t) - V(t - t_0)$ 의 zero cross 점에서 타이밍의 기준펄스가 생성된다. 이때 F는 0과 1사이의 값을 갖는 fraction으로서 최적의 시간분해능을 얻기 위한 F값은 다음으로부터 구할 수 있다.

$$F = -[dV/dt]/[dV(t - t_0)/dt] \tag{3}$$

이 식으로부터 CFD에서 타이밍 기준 펄스는 입력신호 크기와 관계없이 항상 일정한 fraction에서 생성됨을 알 수 있다. 따라서 입력신호 크기의 변화는 검출 회로의 시간 분해능에 영향을 주지 않게 된다. 그러나 입력신호의 모양이 변하는 경우에는 설정된 fraction이 변하게 되므로 입력 펄스에 대해 타이밍 기준 펄스가 일정하지 않은 시간 간격으로 발생되어 검출 회로의 시간 분해능이 나빠지게 된다. 일반적으로 CFD는 ECL(emitter coupled logic)로 구성이 되지만 원자의선 분광기에서는 전력 소모를 줄이기 위하여 Lampton(1998)이 제안한 TTL(transistor-transistor logic)으로 구성된 CFD를 사용하였다.

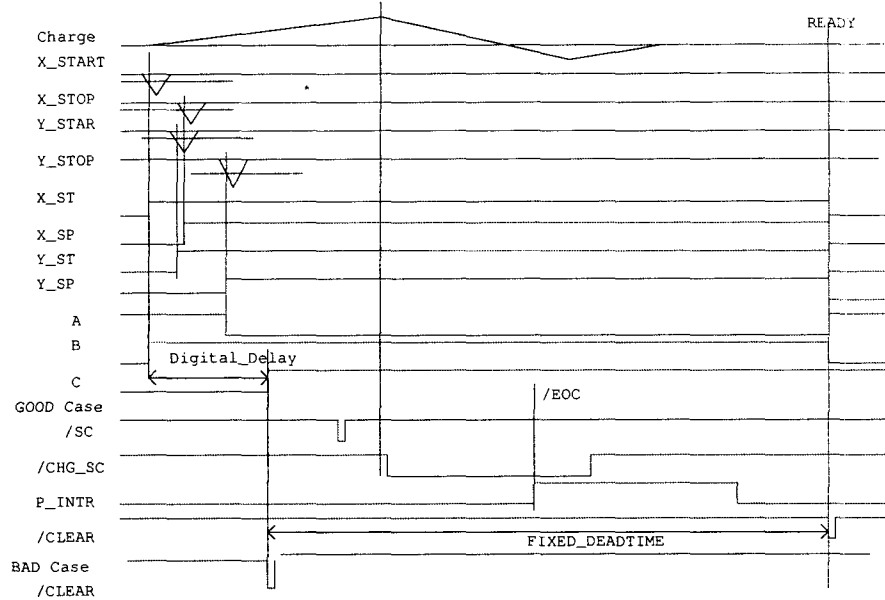


그림 4. CFD 및 digitizer의 overall timing logic.

2.3. 디지털타이저(Digitizer)

디지털타이저는 CFD에서 생성된 타이밍 기준 신호를 이용하여 시작(start)과 끝(stop) 신호의 도착 시간차에 비례하는 전압 신호를 만들고, 이를 디지털 값으로 변환하여 주는 장치이다. 또한 CFD에서 생성된 신호가 실제 광자에 의해 생성되었는지의 여부를 판정하고 적절한 이벤트(good event)에 대해서는 외부의 제어기로 인터럽트 신호를 발생시켜 변환된 디지털 값을 읽어갈 수 있도록 만들어 준다. 디지털타이저는 TAC(time to amplitude converter)와 ADC(analog to digital converter), 그리고 overall control 부분으로 구성된다. TAC는 CFD에서는 생성된 시작 및 끝에 해당되는 타이밍 기준 신호가 유지되는 동안 축전기(capacitor)가 정 전류원에 의해 충전되도록 함으로써 출력 펄스의 시간차를 전압으로 바꾸어주는 장치이며 TAC의 출력은 ADC를 통해 디지털 값으로 변환된다. 원자외선 분광기에는 EURD 임무에서 사용되었던 Analog Device사의 ADC인 AD679를 사용하였다. overall control 부분의 동작은 그림 4에 나타나있다. CFD에서 생성된 타이밍 기준신호들-X_{ST}, X_{SP}, Y_{ST}, Y_{SP}-을 이용하여 적절한 이벤트(good event)와 부적절한 이벤트(bad event)를 판정하고 적절한 이벤트인 경우에는 ADC에 변환시작 신호를 인가하고 50 μ s 후에 회로가 다음 이벤트에 반응할 수 있도록 만들어 준다. 부적절한 이벤트인 경우에는 약 400ns 후에 회로가 다음 이벤트에 반응할 수 있도록 준비가 된다. 증폭기에서 출력되는 전하 증폭신호는 별도의 피크 검출기와 ADC를 통해서 그 크기가 디지털 값으로 변환된다. 전하 증폭신호는 광자가 아닌 고 에너지 입자들에 의해 이벤트를 구별하기 위하여 측정한다.

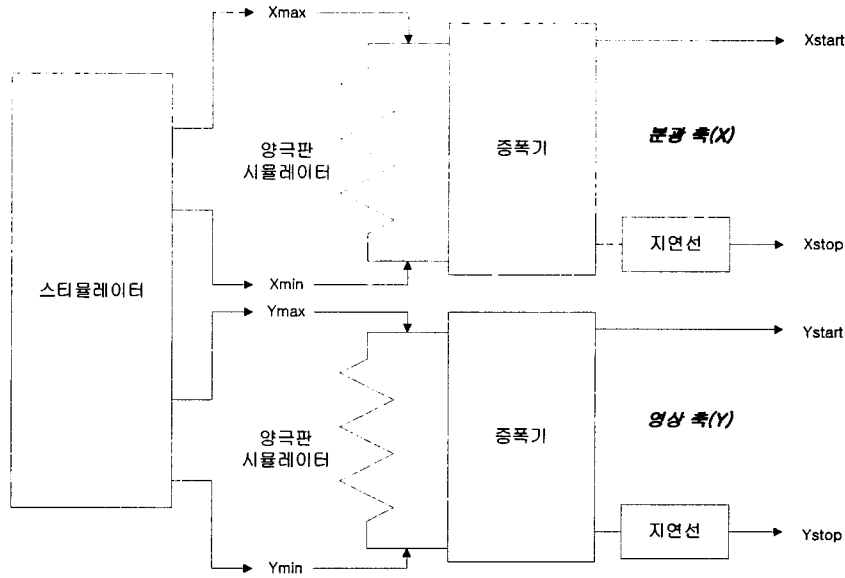


그림 5. 시험장치의 구성.

3. 시험 및 결과

검출회로의 시험은 원자외선 분광기의 인증모델(qualification model) 시험의 일환으로 진행되었으며 MCP와 양극판에 의한 영향을 배제하고 검출 회로 자체가 갖는 위치 분해능을 조사하기 위하여 자체적으로 제작한 스티물레이터와 양극판 시뮬레이터를 사용하였다. 스티물레이터는 분광 및 영상 축 방향의 최대 및 최소 시간지연에 해당되는 4쌍의 이벤트- (X_{min}, Y_{min}) , (X_{min}, Y_{max}) , (X_{max}, Y_{max}) , (X_{max}, Y_{min}) -들을 순차적으로 발생시키는 장치이다. 각각의 이벤트는 5V의 구형 펄스 형태로 출력이 되며 실제 MCP의 출력을 대체하여 그림 5와 같이 증폭기의 입력으로 인가된다. 각 쌍의 이벤트는 이미지 평면상의 네 모서리에 해당되며 약 40Hz 주기로 생성되도록 조정 하였다. 양극판 시뮬레이터는 실제의 양극판에서 발생하는 신호 지연 효과를 구현하기 위하여 동축 케이블(RG188)을 이용하여 제작하였다. SXD 양극판은 분광 축 방향으로는 약 27ns, 영상 축 방향으로는 약 20ns의 시간 지연을 발생시키도록 설계되었으며, 제작된 시뮬레이터는 양극판과 동일한 시간 지연을 오실로스코프를 이용하여 확인하였다.

스티물레이터에서 발생된 각각의 이벤트에 의해 생성된 분광 및 영상 축 방향의 위치 정보 데이터는 DSP(digital signal processor)를 통하여 수집되었고 각 이벤트가 발생한 시간정보를 함께 기록 하였다. 이 시험에서는 약 30,000개의 이벤트 데이터들을 누적하여 수집하고 이벤트들의 발생순서를 추적하여 누락된 이벤트가 있는지의 여부를 살펴보았으며, 이벤트들의 출력 분포를 조사하였다. 누락된 이벤트들은 존재하지 않았으며 그림 7(a)에서 보듯이 이미지 평면에서의 출력분포를 보아도 위치를 벗어난 이벤트들은 관측되지 않았다. 이로부터 검출회로가 안정적으로 동작하고 있음을 확

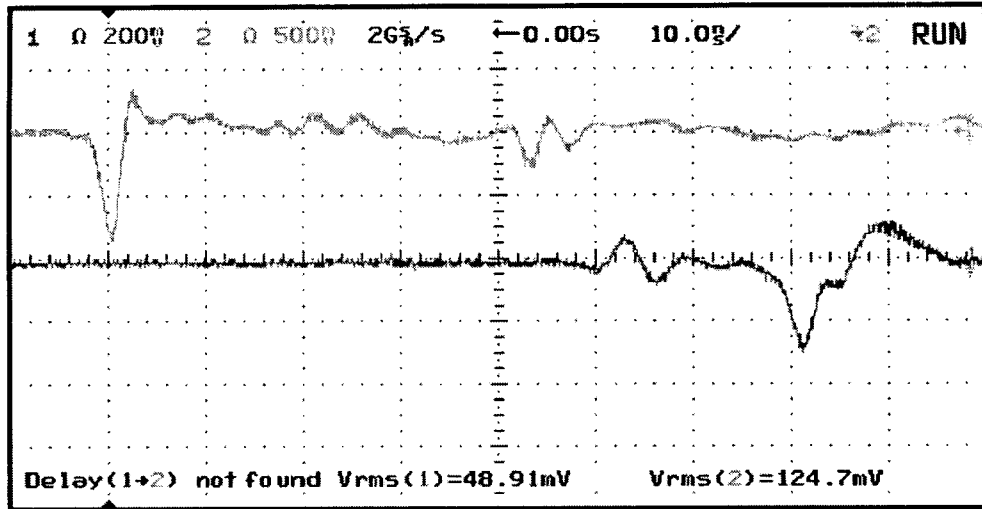


그림 6. 스티뮬레이터에서 발생된 이벤트에 대한 Xstart와 Xstop 신호의 파형.

인하였다.

검출회로의 출력범위는 실제 MCP와 양극판을 사용하여 ADC의 최대 채널범위에 해당되도록 조정되어야 하며, 이 시험에서는 검출회로의 출력범위에 대한 조정 작업을 별도로 수행하지 않았다. 따라서 ADC 채널 당 시간 간격을 알기 위하여 그림 6에서 보여지듯이 먼저 오실로스코프를 이용하여 각 축 방향으로 시작과 끝 신호 사이 시간 간격의 최대 및 최소값을 측정하고, 이벤트 데이터들의 출력 분포로부터 여기에 해당되는 ADC 채널을 확인하는 방법을 사용하였다. 측정된 시간 간격의 최대 및 최소값은 분광 축의 경우에는 55ns, 영상 축의 경우에는 45ns이며 여기에 해당되는 ADC 채널의 수는 그림 7의 스티뮬레이터 출력분포로부터 각각 약 800과 230의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이로부터 ADC 채널 당 시간 간격은 분광 축의 경우 약 70ps, 영상 축의 경우는 약 200ps임을 알 수 있다. 또한 스티뮬레이터 출력분포의 반축 폭(FWHM; full width at half maximum)은 분광 축의 경우에는 약 8 채널이고 영상 축의 경우에는 약 0.5 채널이므로, 이로부터 제작된 검출회로는 분광 축 방향으로 약 560ps, 영상 축 방향으로 최대 약 100ps의 시간 분해능을 가지고 있음을 알 수 있다. SXD 양극판은 약 1mm/ns의 지연 효과를 주므로 이 값들은 각각 약 560 μ m와 100 μ m의 위치 분해능에 해당된다.

4. 결론

원자외선 분광기에 사용될 검출회로를 제작하여 동작을 검증하고 시간분해능을 측정하였다. 현재의 검출회로는 분광축 방향으로 약 560ps, 영상축 방향으로 약 100ps의 시간 분해능을 가지고 있으며 이 값들은 SXD 양극판의 특성을 고려할 때 각각 약 560 μ m와 100 μ m의 위치 분해능에 해당된다. 이러한 시험 결과가 원자외선 분광기의 과학적 목적을 달성하기 위한 각각 약 40 μ m와 80 μ m의 위치 분해능 요구치와 차이가 많이 나는 것은 앞으로 회로의 동작범위와 CFD의 fraction ratio의 조정 등을 통해 개선될 수 있다.

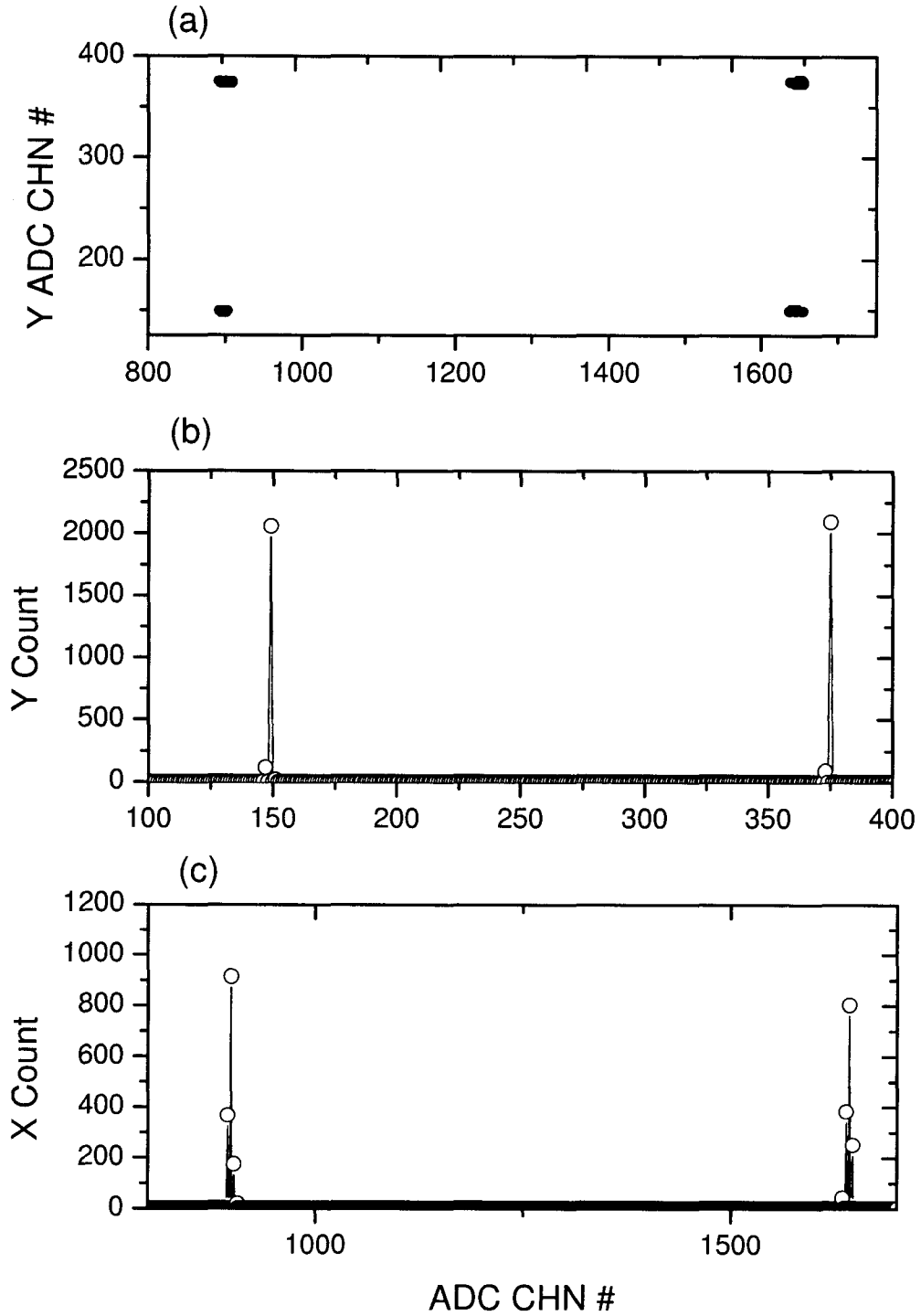


그림 7. 검출회로의 시간분해능 측정결과. (a) 이미지 평면에서의 스티물레이터 출력분포, (b) 영상축(Y) 방향의 스티물레이터 출력분포, (c) 분광축(X) 방향의 스티물레이터 출력분포.

참고문헌

- 선광일, 유광일, 육인수, 박장현, 남옥원, 한원용, 선종호, 민경욱, Edelstein, J., & Korpela, E. J
2000, 한국우주과학회지, 17, 77
- 유광선 2000, 박사학위논문, 한국과학기술원
- Lampton, M. 1998, Rev. Sci. Instrum., 69, 3062
- Lampton, M., & Marchwordt, M. 2000, Rev., Sci. Instrum., 71, 4611
- Lampton, M., Siegmund, O., & Raffanti, R. 1987, Rev. Sci. Instrum., 58, 2298
- Siegmund, O. H. W., Malina R. F., Coburn, K., & Werthimer, D. 1984, IEEE, Trans. Nucl. Sci.
NS-31, 776
- Spieler, H. 1982, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-29, 1142