

FIMS의 마이크로채널 플레이트 검출기 시스템의 특성

남옥원^{1†}, 이진근¹, 공경남¹, 박영식¹, 진경찬¹, 진호¹, 박장현¹, 육인수¹,
선광일¹, 한원웅¹, 이대희³, 유광선³, 민경욱², J. Edelstein⁴, E. Korpela⁴

¹한국천문연구원

²한국과학기술원 물리학과

³한국과학기술원 인공위성연구센터

⁴Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley

PERFORMANCE OF FIMS MICROCHANNEL PLATE DETECTOR SYSTEM

U. W. Nam^{1†}, J. G. Rhee¹, K. N. Kong¹, Y. S. Park¹, K. C. Jin¹,
H. Jin¹, J. -H. Park¹, I. S. Yuk¹, K. I. Seon¹, W. Han¹,
D. H. Lee³, K. S. Ryu³, K. W. Min², J. Edelstein⁴, E. Korpela⁴

¹Korea Astronomy Observatory

²Department of Physics, KAIST

³SaTRreC, KAIST

⁴Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley

E-mail: uwnam@kao.re.kr

(Received October 30, 2002; Accepted November 28, 2002)

요 약

과학위성 1호의 주탑재체인 원자외선 분광기의 검출기 전자부에 대한 특성을 분석하였다. FIMS (Far-ultraviolet Imaging Spectrograph)는 교차 지연선 양극을 가진 MCP(micro-channel plate)를 사용하여 입사된 원자외선 광자의 위치를 검출한다. MCP에 입사하는 광자는 MCP을 통해 전자형태로 변환되고 증폭된다. 증폭된 전하운의 중심은 양분되어 연결된 지연선을 통해 양단으로 나가게 되고, 지연선의 양단에서 전하운의 도착시간 차이를 구하여 입사된 광자의 위치를 판독한다. FIMS의 경우 2개의 MCP 검출기를 갖고 있으며, 각각 25mm×25mm의 유효 크기를 갖고 있다. 또 신호처리계는 1채널의 신호처리 회로계를 통해 2개의 검출기에 대한 영상검출이 가능하도록 함으로써 신호처리계의 복잡성을 피하고 아울러 전력과 무게 비용을 줄였다. 이 시스템을 통해 높은 시간 및 공간 분해능(<35×75ps FWHM)을 얻었으며, 6W 이하의 저전력 시스템을 구현하였다.

ABSTRACT

We describe some performance of the detector electronics system for the FIMS (Far-ultraviolet Imaging Spectrograph) mission. The FIMS mission to map the far ultraviolet sky uses MCP (micro-channel plate) detectors with a crossed delay line anode to record photon arrival events. FIMS has two MCP detectors, each with a ~25mm×25mm active area. The unconventional anode design allows for the use of a single set of position encoding electronics for both detector fields. The centroid position of the charge cloud, generated by the photon-stimulated MCP, is determined by measuring the arrival times at both ends of the anode following amplification and

[†]corresponding author

external delay. The temporal response of the detector electronics system determines the readout's positional resolution for the charge centroid. High temporal resolution ($< 35\text{ps} \times 75\text{ps}$ FWHM) and low power consumption ($< 6\text{W}$) were achieved for the FIMS detector electronics system.

Keywords: astronomical and space-research instrumentation, space-based ultraviolet telescopes, spectrograph

1. 서 론

FIMS(Far-ultraviolet Imaging Spectrograph)는 원자외선 영역의 방출 스펙트럼을 전천 서베이와 지향 관측을 수행한다. 관측 장비는 과학위성 1호(KAISTSAT-4)의 주탑재체이며, 2003년 중반 COSMOS를 이용하여 발사되어, 800km 고도에서 태양 동기식으로 선회할 예정이다.

FIMS는 두 파장대의 채널을 가진 영상 분광기를 채용하고 있다. 한 채널은 OVI 영역($900\text{-}1175\text{\AA}$), 다른 채널은 CIV 영역($1335\text{-}1750\text{\AA}$)에 최적화되어 있다. FIMS에서는 이들을 각각 단파장 채널, 장파장 채널로 부르고 있다. 각 채널로부터 나오는 원자외선 광자는 이의 초점면에 위치한 MCP(micro-channel plate) 검출기에 집광된다. 극자외선 및 원자외선 영역 검출용으로 사용된 MCP 검출기들은 EUVE(Extra Ultraviolet Explorer)(Siegmond et al. 1984), IMAGE(Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration)(Stock et al. 1998), SOHO(Solar and Heliospheric Observatory)(Siegmond et al. 1995), FUSE(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer)(Siegmond et al. 1997) 등의 임무에 성공적으로 사용되어 왔다(Lampton & Marckwordt 2000). FIMS의 경우 입사하는 광자의 위치를 관측하기 위해 XDL(Crossed delay line)을 채용하였다. 이러한 형태의 검출기는 일반적으로 MCP 층(stack), 양극선, 판독회로 등으로 구성된다. MCP 적층은 광자 증폭기로써, 1개의 광자 당 $10^5 - 10^7$ 개의 전자를 발생시킨다. XDL 양극은 MCP를 통해 증폭된 전하를 수집하는 전극이 서로 직교하는 모양으로 구성되어 있다. 그리고 각 전극에선 외부 지연선이 연결되어 있다. 각 검출기는 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 크기의 유효면적을 갖고 있으며, X축(분광축)과 Y축(영상축)의 분해능을 고려하면 4096×1024 채널에 해당된다. 일반적인 지연선을 이용한 방법에서 위치관측을 위해 단파장과 장파장 축의 각각의 전극에 지연선을 연결하고 각각의 신호처리회로가 필요하지만, FIMS에서는 분광축의 지연선을 파파장과 장파장 축의 전극에 공유하도록 설계하였다. 이렇게 특이하게 설계함으로써 1개의 영상신호처리계를 이용하여 단파장 및 장파장 채널의 영상을 얻을 수 있도록 하였다.

한편 시스템의 FOV(field of view)는 $8\text{도} \times 5\text{분}$ 각이며, OVI 영역($900\text{-}1175\text{\AA}$)과 CIV 영역($1335\text{-}1750\text{\AA}$)에 대한 감도 $\Delta\lambda = 1.7\text{\AA}$ (HEW; Half Energy Width)(단파장 채널의 경우), 2.5\AA HEW(장파장 채널의 경우)로 설정되어 있다. 따라서 이를 구현하도록 하기 위해 신호처리부에 요구되는 공간 분해능은 X축에서는 $84\mu\text{m}$, Y축에서는 $\sim 120\mu\text{m}$ 로 설정되어 있으며, 한계 규격(marginal requirement)은 X축에서는 $114\mu\text{m}$, Y축에서는 $\sim 160\mu\text{m}$ 으로 설정되어 있다(유광선 등 2000). 현재 FIMS용 원자외선 분광기시스템은 최종비행모델 개발이 완료된 상태이며 버클리에서 검교정을 수행하고 있다. 이에 따라 신호처리부도 비행모델에 대한 열 진공 시험을 성공적으로 마친 상태이며, 이 논문에서는 검출기 및 신호처리부에 대해 최적화 실험을 결과에 대해 기술하였다.

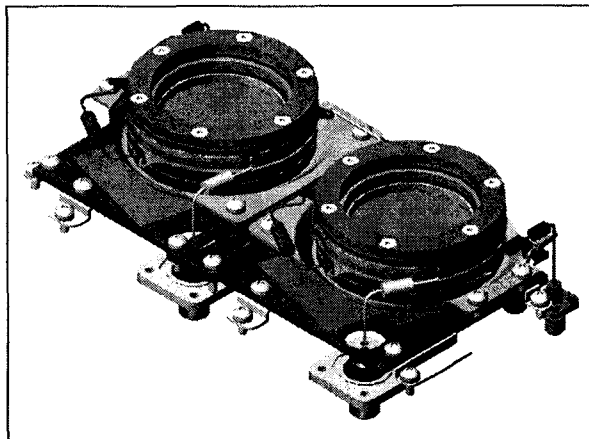


그림 1. FIMS 검출기의 3차원 구성도.

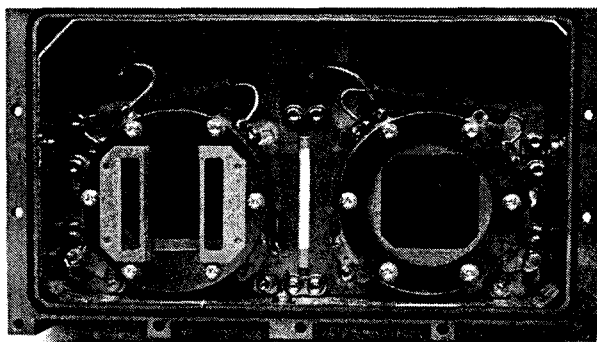


그림 2. 실제 FIMS 검출기의 모습. 왼쪽이 단과장, 오른쪽이 장과장 영역의 검출기임.

2. 시스템 설계

2.1 개요

XDL 양극을 가진 MCP는 일반적으로 MCP 층(stack), 양극, 신호처리회로 등으로 구성된다. 설계된 FIMS의 검출기부는 그림 1, 2와 같다. 단과장 및 장과장대의 광학적 채널에 대한 검출기로서 2개의 MCP를 사용하고 있다. 글자 'Z' 모양으로 적층된 MCP는 세라믹 몸체(brazed ceramic body)에 설치되어 있으며, 원주(circumferencial) 스프링으로 결합된다. 이들은 양극판과 함께 씬틀로 결합된다. MCP의 아래측 plate와 양극사이의 간격은 7mm이다. MCP는 12 μ m 직경의 pore들과 이 pore들이 15 μ m 간격으로 배치되어 있으며, MCP 채널들은 13° bias 각을 갖고 있으며, MCP의 외형적 크기는 36mm 직경을 가진 원판 모양이다. 각 plate 저항은 ~200M Ω 이며, 종횡비(aspect ratio, MCP 채널 길이와 직경의 비)는 80:1이다. XDL 양극은 2개의 직교하는 띠모양의 전하 수집 전극과 이 전극에 연결되어 있는 외부 전자 지연선으로 구성되어 있다. 외부 전자 지연선은 알루미늄 기판(substrate)($\epsilon \sim 9.6$) 위에 전선이 돌돌 말린 모양(serpentine)을 갖는다. 분광축(X축) 방향에 따라,

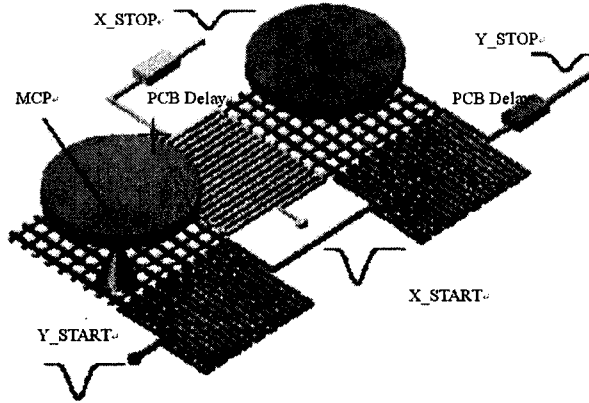


그림 3. 교차지연선 검출기의 동작원리.

단과장 파장밴드 및 장과장 파장밴드의 외부지연선은 서로 공유한다. 그러나 영상(Y) 방향의 외부지연선은 물리적으로 분리되어 있지만 전기적으로는 하나의 지연성을 구성하도록 연결되어 있다. 이 독특한 양극선 설계를 통해 단과장 파장밴드, 장과장 파장밴드 2개의 광학적 채널에 대해, 1개의 신호처리회로를 이용하여 2개의 MCP 검출기시스템에 대한 영상정보를 획득할 수 있으므로, 결과적으로 시스템의 전력, 무게 그리고 부피를 줄일수 있다.

MCP의 초점면에 맺히는 FUV 광자는 전자 구름을 발생시키고, 이들 전자운은 양극의 전극에 모인다. 이 전하는 거의 같은 양으로 나뉘어져서 X축 전극과 Y축 전극으로 흘러가고, 이에 연결되어 있는 외부 전자 지연선으로 전파된다(그림 3). 이 신호는 고속 증폭기, 기준펄스발생기(stimulator), TDC(Time to Digital Converter)로 구성되는 신호처리회로에 의해 처리된다. 광자가 검출기의 어느 지점에 입사한 위치는 두 지연선의 양단에서 측정되는 펄스 시간 차이로 부터 판단된다. X 및 Y축에 대한 전기적인 분해능은 14비트 분해능을 가진 TDC를 통해 분석된다. 한편 MCP에 의해 만들어진 각 광자에 대응되는 전하 구름의 양을 측정할 수 있도록 설계되어 있으며, 이는 8비트의 분해능을 갖고 분석된다. 이로부터 MCP의 성능이 나빠지는 정도를 판단할 수 있는 근거로 사용된다. 이들 위치 및 에너지 자료들은 32비트 자료 형식으로 패키징되어서 텔레메트리 방식을 통해 지상으로 전달된다.

2.2 양극

신호처리부에 요구되는 분해능을 얻기 위해서, MCP 검출기 아래에 2개의 직교하는 전극띠(finger)들로 구성되어 있다. 이 전극에는 외부 전자지연선이 부착되어 있다(그림 3, 4 참고). 양극은 길이 방향으로 120mm, 폭방향으로 70mm, 그리고 0.015인치 두께를 갖고 있으며, 기판의 재료는 유전율 9.6을 갖는 알루미늄이다. 양극은 일반적인 실크스크린 방법을 이용하여 제작되었다. 즉 X축 전극을 기판의 밑바닥에 설치한 다음, Y축 전극은 X축 전극과 전기적으로 도통하지 않도록 1층의 절연층 위에 설치되어있다. X축 및 Y축 전극은 MCP를 통해 형성된 전하운을 각각 50%를 끌어가서 각 전극단에 연결된 전자 지연선을 통해 신호가 전달된다. X축의 전자 지연선은 단과장 파장축 및 장과장 파장축 전극들에 의해 서로 공유되도록 되어 있고, Y축의 전자지연선은 각 파장대에 대해 서로 물리적으로 분리되어 있다. 각각의 총 지연시간은 X축에 대해 32ns, Y축에 대해 27ns 이다. 양극의 전극선들은 광축에 대해 15도 회전시켰는데, 이는 이러한 모양을 갖춘 양극에서 신호처리부를 통해서 얻

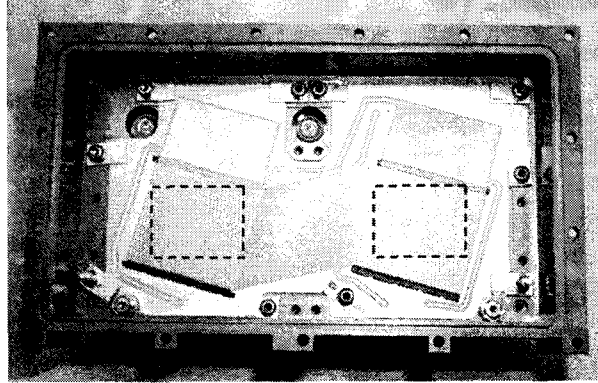


그림 4. FIMS의 교차지연선 형태 양극판. 점선으로 표시된 부분은 광학계의 축 방향이고, 검출기의 축 방향은 광학계의 축에 대하여 시계방향으로 15도 회전시킴.

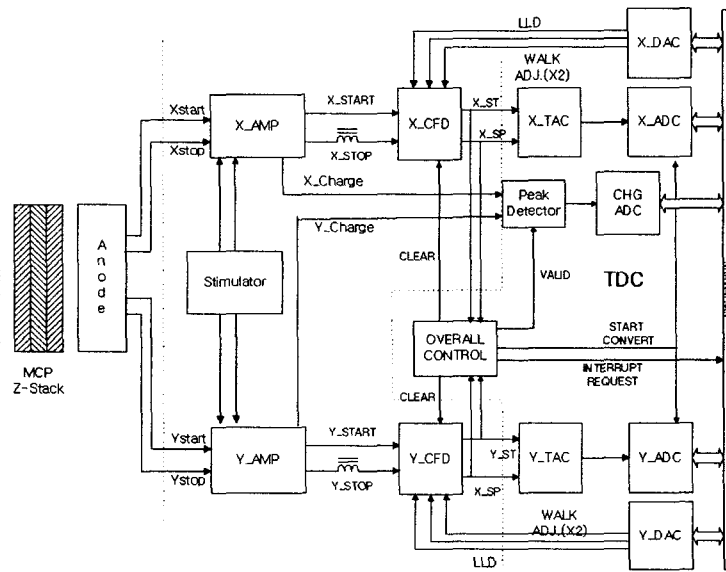


그림 5. FIMS 검출회로의 구성도.

은 선형성에서 비선형성이 최소화 되도록 하기 위함이다. 측정된 양극의 시간에 대한 길이 인자는 X 축과 Y축에 대해 각각 $0.44\mu\text{m/ps}$, $1.3\mu\text{m/ps}$ 이다.

2.3 신호처리회로

지연선 관독회로의 신호처리회로는 XDL 양극으로부터 나오는 start와 stop 신호사이의 시간 차이를 측정하여, 이를 디지털화 하고 위치정보로 변환하는 역할을 한다. 신호처리회로의 구성은 그림 5와 같다. 신호처리회로는 X축 및 Y축에 대해 각각 고속증폭기, 기준펄스발생기, TDC 등으로 구성되어 있으며 보다 자세한 내용은 이진근 등(2002)에 기술하였다. 양극의 출력은 고속증폭기에 동축

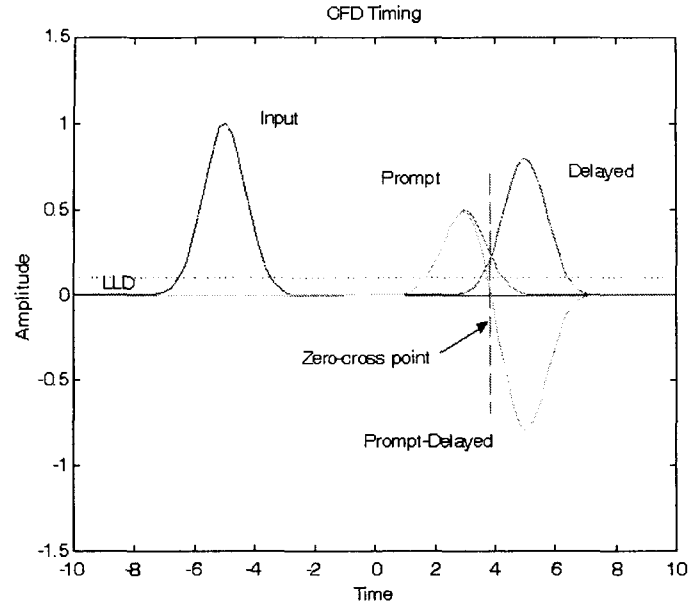


그림 6. CFD timing.

케이블을 이용하여 연결하였다. 각 위치신호처리 채널에 대해 고속증폭회로는 각 start, stop 신호로써, 고속 timing 신호($\sim 5\text{ns}$ FWHM)를 만들어 낸다. 또한 양극 신호를 $1\mu\text{s}$ 정도의 폭을 갖는 bipolar 형태로 정형시켜서, MCP로부터 나오는 신호의 크기 분포를 측정할 수 있도록 하였다. start 신호는 항상 stop 신호보다 앞서야 하며, 이를 위해서 PCB 형태로 제작된 50ns 정도의 전자 지연선을 만들어서 stop 신호 앞단에 두었다. 이는 $\sim 7.5\text{m}$ 의 긴 stripline을 FR-4($\epsilon \sim 4.2$) 기판에 설치하여 50ns 정도의 신호의 지연이 일어나도록 하였다. 이렇게 함으로써 같은 동축케이블을 이용하여 전기적 지연을 주는 일반적인 방식에 비해 소형으로 구현할 수 있지만, 신호의 감쇄와 분산이 더 일어나므로 신호 특성과 간이성(compactness)사이의 적절한 타협이 이루어져야 한다. 제작된 PCB 전자 지연선의 특성 임피던스는 $\sim 45\Omega$, DC 저항은 $\sim 4\Omega$ 이었다. 신호 감쇄는 $\sim 3\text{dB}$ 정도 측정되었으며, 입력 및 출력신호에 대한 우려할 만한 신호의 변형은 거의 없었다.

기준펄스발생기는 인위적인 event 신호를 만들어서, 약 40Hz 의 고정된 주기로 고속증폭기에 입력시킴으로써, 실제 위성에 탑재되어 운용될 때 위치 판독시스템의 열적인 변위(drift)를 보정할 수 있도록 하였다. TDC는 CFD(constant fraction discriminator), TAC(time to amplitude converter), ADC(analog to digital converter) 및 인터페이스와 관련된 주변회로 등으로 구성되어 있다. CFD는 TDC회로에서 가장 예민한 부분이며, TAC를 동작시키는 start, stop의 logic 신호를 만들어 준다. CFD는 Lampton(1998)에 의해 제시된 회로를 기초로 제작되었다. 기본적인 원리는 그림 6에 나타내었다. 이 설계에서 원래 신호(prompt signal)와 지연된 신호(delayed signal) 사이의 교차점은 펄스의 진폭에 상관없이 항상 일정한 timing을 만들어 준다. 이때 두 펄스에 대해 지연 시간은 여러 선택 단자를 만들어 두어서 일정한 비율을 가진 지연펄스가 일어나도록 조절할 수 있도록 하였다. 또, FIMS의 경우 ECL 게이트를 사용하는 대신 고속 CMOS 비교기(MAX9686)과 AC MOS 게

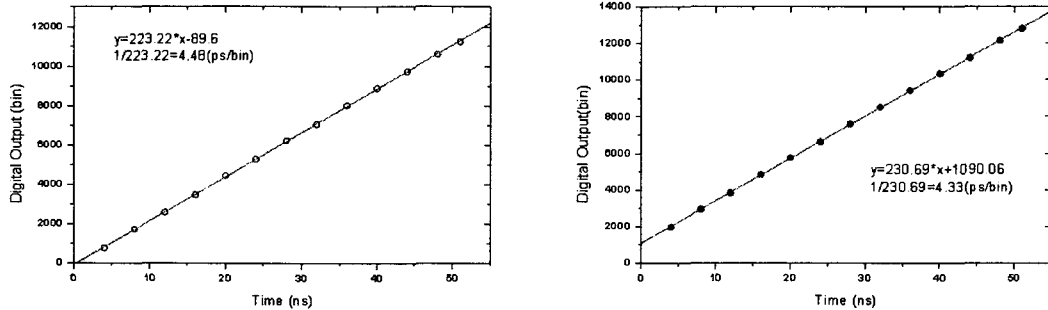


그림 7. TAC의 선형성 측정 결과. (a) Y 방향, (b) X 방향.

트(54ACT74)를 사용하여 전력 소비를 최대한 줄였다. TAC는 이의 진폭의 크기가 CFD로부터 만들어진 두 로직 펄스(START와 STOP)의 시간 크기와 비례하도록 만들어 주는 회로이다. 이의 출력은 14비트 ADC(AD679)를 통해 디지털화 시킨 다음, X축에 대해서는 12비트, Y축에 대해서는 10비트로 ADC 분해능을 소프트웨어적으로 줄여서 사용하였다.

3. 시스템 특성

3.1 신호처리회로

지연선 신호처리회로의 시스템의 분해능은 입력 단 펄스의 모양, 진폭 잡음, CFD에서의 walk 및 timing jitter, TAC 노이즈, ADC bin error 등에 영향을 받는다. 이 중에서 CFD의 walk효과를 제외한 다른 요인들은 제작된 전자회로가 갖는 고유한 특성으로써 펄서발생기(Stanford Research, DG535)와 Nanosecond Delay(ORTEC Model, 425A)를 이용하여 조사하였다. 입력신호의 크기에 따른 walk 효과는 CFD의 구성방식에 따라서 달라질 수 있으며 별도의 조정회로를 두어 최적화시킬 수 있다. FIMS의 고유한 기준펄스발생기와 신호감쇄기(attenuator)를 이용하여 시스템에 요구되는 선형동작영역(linear dynamic range)의 범위 내에서 입력 신호의 크기를 변화시키면서 walk 효과를 조사하였다. 이 두 가지 요인들에 의한 영향은 상호 독립적이며, 시스템의 최종 분해능은 각각의 RSS(root sum square)로 주어진다.

이러한 시험을 수행하기 전에 먼저 비행모델 검출기와 기준펄스발생기, 그리고 Nanosecond Delay를 사용하여 TAC의 동작 범위를 조정하고 선형성 및 pixel 크기 등을 조사하였다. 기준펄스에 의한 ADC bin상의 디지털 위치는 시뮬레이터 위치 변동에 대한 10%의 여유(margin)를 고려하여 0 ~ 17,383 bin 전체 범위 중에서 대략 ~ 1000 bin과 ~ 14,500 bin에 위치하도록 조정하였으며, X와 Y TDC에 대해서 측정된 pixel의 크기는 각각 ~ 4.3ps와 ~ 4.5ps 이었다. 그림 7의 (a)는 Y축, (b)는 X축 TAC에 대한 선형성 측정결과이며, 최소자승법을 이용하여 fitting을 수행하였을 때 상관계수는 각각 0.99994와 0.99995로 주어진다.

그림 8(a)와 (b)는 펄스발생기를 이용하여 구한 X와 Y축 TDC 각각의 고유 분해능이며, 결과는 ~ 40ps의 분해능 값을 보여주었는데 이 값은 FIMS 양극판의 변환 계수(conversion factor)를 고려하면 ~ 20 μ m(X축)와 ~ 50 μ m(Y축)의 공간분해능에 해당된다. FIMS에서는 저 전력 시스템을 구성하기 위하여 ACMOS(advanced complementary metal oxide semiconductor) 형태의 logic을 사용하여

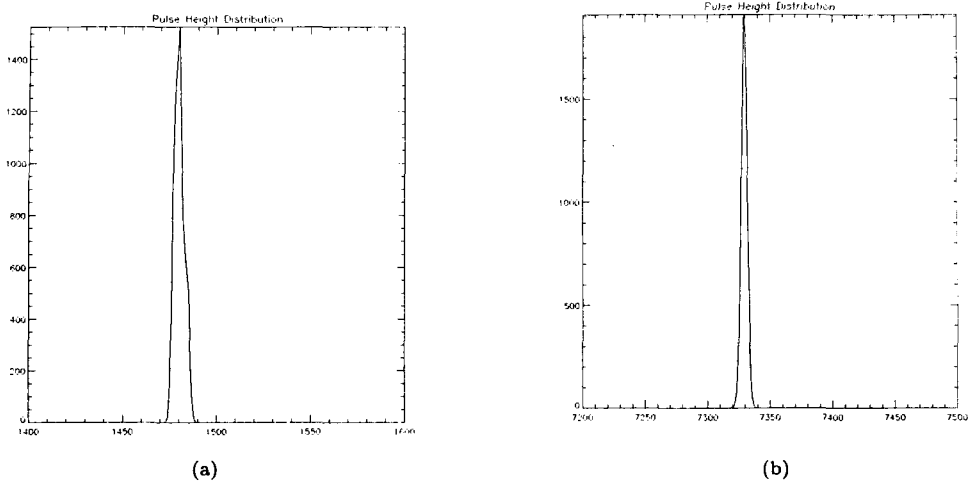


그림 8. 기준펄스발생기의 분해능. (a) DG535, (b) FIMS 자체의 기준펄스 발생기.

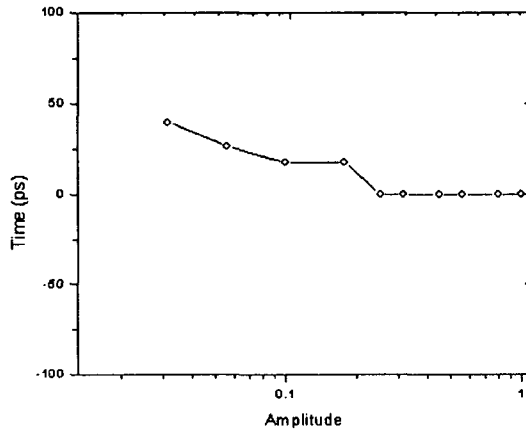
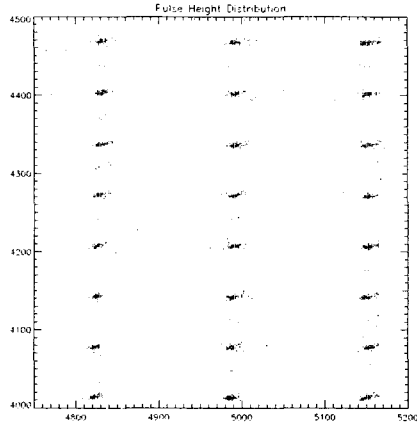


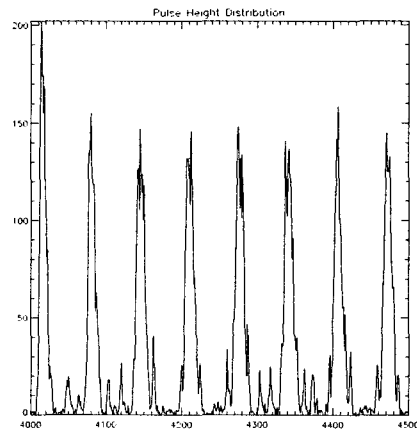
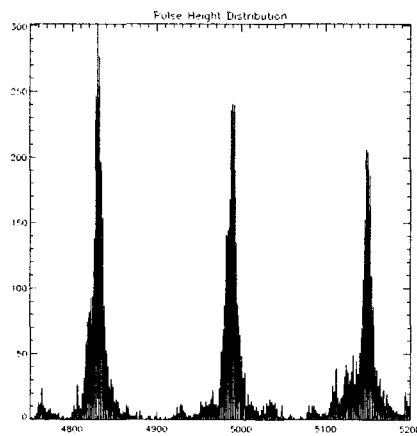
그림 9. FIMS의 기준펄스발생기와 신호 감쇄기를 이용한 walk 측정결과.

CFD를 구성하였으며 일반적으로 AC MOS logic의 출력 timing jitter가 $\sim 50\text{ps}$ 임을 고려할 때 이 값은 이러한 형태의 CFD로부터 얻을 수 있는 최대 분해능임을 알 수 있다.

그림 9는 기준펄스발생기의 출력 진폭의 변화에 따른 walk 효과 특성을 보여준다. 입력 진폭이 1에서 그 값의 1/30까지 감쇄 변화하는 동안에 생기는 피크 위치의 변화는 $\sim 50\text{ps}$ 이었다. 시스템에 요구되는 선형동작영역은 20dB 이며 이 결과로부터 walk 효과에 의한 분해능은 $\sim 50\text{ps}$ 임을 알 수 있다. 따라서 비행모델로 제작된 신호처리회로는 $\sim 65\text{ps}$ 의 시간 분해능을 구현할 수 있으며 이 값은 양극판의 변환계수를 고려할 때 $\sim 30\mu\text{m}$ (X축)와 $\sim 80\mu\text{m}$ (Y축)의 공간 분해능에 해당된다. FIMS의 설계 요구조건으로부터 주어진 신호처리회로의 분해능 목표값은 $\sim 60\mu\text{m}$ (X축), $\sim 100\mu\text{m}$ (Y축)이며, 이 결과로부터 비행모델 신호처리회로는 설계 요구조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급된 인자들 외에 분해능에 영향을 줄 수 있는 요소들로는 전자 부품들의 온도 안정성, 계수율 안정성, 전력 rejection 특성 등이 있으며 이러한 요소들에 의한 영향은 검출기 시스템의 미세조정(tuning) 및



(a)



(c)

(b) 그림 10. (a) 영상의 중심 부분에서의 pinhole image (b) X histogram (c) Y histogram.

검교정 단계에서 별도로 측정될 예정이며, 특히 온도에 의한 영향은 내장된 기준펄스발생기로부터 생성된 자료를 이용하여 보정이 된다.

3.2 영상 특성

미세조정된 신호처리부를 비행모델 검출기에 연결한 다음, 이 시스템의 특성을 구하기 위해 실제 UV 광원을 이용하였다. 시스템의 분해능을 살펴보기 위해, $10\mu\text{m}$ 구멍이 1mm 간격으로 배치되어 있는 pinhole mask를 이용하였다. 검출기 중심 부근의 pinhole 영상과 X 및 Y 방향의 단면을 보여주는 histogram을 그림 10에 나타내었다. 현재 최적화 과정을 통해 얻은 검출기 시스템의 평균적인 공간 분해능은 X축 방향의 단과장대에서 평균적으로 $90\mu\text{m}$ 이었으며, 검출기 중심에서 얻은 최대값은 $66\mu\text{m}$ 이고, 장과장대에서는 평균값 $100\mu\text{m}$, 최대값 $80\mu\text{m}$ 이었다. 한편, Y축 방향의 공간분해능은 단과장대에서 평균값 $140\mu\text{m}$, 최대값 $110\mu\text{m}$ 이었으며, 장과장대에서는 평균값 $140\mu\text{m}$, 최대값 $130\mu\text{m}$ 이었다.

4. 결론

FIMS의 목적에 맞도록 비행 모델용 검출기 및 이의 판독 시스템이 제작 완료되었으며 이 시스템의 열 및 진공 시험을 성공적으로 완료하였다. 시스템의 기본적인 특성을 펄스발생기와 기준 펄서발생기를 통해 구한 다음, 비행 모델의 검출기에 연결하여 시스템을 최적화하였다. 그 결과 신호처리회로 자체의 고유한 위치분해능은 X축에 대해서는 $\sim 20\mu\text{m}$ (FWHM), Y축에 대해서는 $\sim 50\mu\text{m}$ (FWHM)였으며, walk 효과를 고려했을 때의 위치 분해능은 $\sim 30\mu\text{m}$ (FWHM), Y축에 대해서는 $\sim 80\mu\text{m}$ (FWHM)임을 확인할 수 있었다. 또 비행모델 검출기와 신호처리회로를 연결하여 최적화한 결과 분광축인 X축에 대해서는 $\sim 80\mu\text{m}$, 영상축인 Y축에 대해서는 $\sim 110\mu\text{m}$ 를 얻을 수 있었다. 광학계의 초점면 상에서 단파장 및 장파장 영역에서의 분산능은 각각 $13\text{\AA}/\text{mm}$ 와 $19.5\text{\AA}/\text{mm}$ 이므로 $\sim 80\mu\text{m}$ 의 공간 분해능은 각각 1.04\AA 와 2.15\AA 의 파장 분해능에 해당된다. 영상 축 방향으로 5각분에 해당되는 공간 분해능이 $\sim 230\mu\text{m}$ 이므로 $\sim 110\mu\text{m}$ 의 공간 분해능은 ~ 2.5 각분에 해당된다. 서론에서 언급한 바와 같이 이 값들은 시스템이 요구하는 규격치에 충분히 부합하는 값이며, 과학위성의 과학목적과 버스의 안정도를 고려하여 얻어진 요구조건을 만족한다(김병진 등 1999, 선종호 등 2000).

감사의 글: MCP 검출기와 신호처리회로실험을 수행하는데 많은 도움을 주신 John Vallerger, Rick Raffantii, Mike Lampton, David Stone 등에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김병진, 선광일, 탁민제 1999, 항공우주학회지, 27, 1
- 선종호, 선광일, 김성현, 민경욱, 김병진, Yong, R. C. K., Leong, L. E., 전홍준, 장현석, 김형신, 배정석, 최영란, 이서림, 신영훈, 유광선, 이재진, 이대회, 박동조 2000, 한국우주과학회지, 17, 233
- 유광선, 선광일, 육인수, 선종호, 남육원, 이대회, 민경욱, 한원용, Edelstein, J., & Korpela, E. 2000, 한국우주과학회지, 17, 67.
- 이진근, 남육원, 공경남, 이대회, 선종호, 육인수, 진호, 유광선, 선광일, 강경인, 박장현, 민경욱, 한원용, 이우백, Korpela, E., & Edelstein, J. 2002, 한국우주과학회지, 19, 57
- Lampton, M. 1998, Rev. Sci. Instrum., 69, 3062
- Lampton, M., & Marckwordt, M., 2000, Rev. Sci. Instrum., 71, 4611
- Siegmund, O. H. W., Gummin, M. A., Sasseen, T., Jelinsky, P. N., Gaines, G. A., Hull, J., Stock, J. M., Edgar, M. L., Welsh, B. Y., Jelinsky, S. R., & Vallerger, J. V. 1995, Proc. SPIE, 2518, 344
- Siegmund, O. H. W., Gummin, M. A., Stock, J., Naletto, G., Gaines, G., Raffanti, R., Hull, J., Abiad, R., Rodriguez-Bell, T., Magoncelli, T., Jellinsky, P., Donakowski, W., & Kromer, K. 1997, Proc. SPIE, 3114
- Siegmund, O. H. W., Malina, R. F., Coburn, K., & Werthimer, D. 1984, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-31, 776
- Stock, J. M., Siegmund, O. H. W., Hull, J. S., Kromer, K. E., Jelinsky, S. R., Heetderts, H. D., Lampton, M., & Mende, S. B. 1998, Proc. SPIE, 3445, 407