

기체전자증폭기를 이용한 X-선 영상획득실험에 관한 연구

강상묵^{1,3} · 한상호⁵ · 조효성^{2,4} · 남상희⁶

¹연세대학교 보건과학대학 의공학과, ²방사선학과, ³의공학연구소, ⁴보건과학연구소, ⁵한국원자력연구소, ⁶인제대학교
의료영상연구소

(2003년 1월 10일 접수, 2003년 3월 25일 채택)

A Study for The X-ray Image Acquisition Experiment Using by Gas Electron Multipliers

Sang-Mook Kang^{1,3}, Sang-Hyo Han⁵, Hyo-Sung Cho^{2,4}, Sang-Hee Nam⁶

¹Department of Medical Engineering, ²Department of Radiation Science, ³Research Institute of Medical Engineering,

⁴Institute of Health Science, College of Health Science, Yonsei University

⁵Korea Atomic Energy Research Institute

⁶Medical Imaging Research Center, Inje University

(Received January 10, 2003. Accepted March 25, 2002)

요약 : 기체전자증폭기는 기존의 기체검출기의 표류공간에 위치하여 표류전기장을 매우 짧은 거리에 걸쳐 전자사태가 가능한 세기($> 10^4$ V/cm) 이상으로 압축함으로써 기체이득을 향상시키는 개념적으로 간단한 기구이다. 이 기구는 양면이 금속(구리)으로 얇게 코팅된 수십 μm 두께의 절연성 foil에 화학적 에칭이나 고출력 레이저법 천공방법을 이용하여 직경 100 μm 이하의 미소 hole들을 100-200 μm 간격으로 균일하게 뚫어 놓은 구조로 되어 있다. 본 연구에서는 다양한 실험조건에서 기체전자증폭기의 동작특성을 조사하였으며 또한 기체전자증폭기의 섬광특성을 이용하여 표준 CCD 카메라와 결합하여 X-선 영상을 획득함으로써 디지털 X-선 영상센서로서의 가능성을 제시하였다.

Abstract : The gas electron multiplier, placed in the drift volume of conventional gas detectors, is a conceptually simple device for producing a large gas gain by concentrating the drift electric field over a very short distance to the point that electron avalanching occurs ($> 10^4$ V/cm), greatly increasing the number of drifting electrons. This device consists of a thin insulating foil of several tens of μm in thickness, covered on each side with a thin metal layer(Cu), with tiny holes, usually 100 μm or less in diameter, and with a spacing of 100-200 μm through the entire foil, perforated by using chemical etching or high-powered laser beam technique. In this study, we have investigated its operating properties with various experimental conditions, and demonstrated the possibility of using this device as a digital X-ray imaging sensor, by acquiring X-ray images based on the scintillation properties of the gas electron multiplier with standard CCD camera.

서 론

기체검출기는 반도체검출기에 비해서 구조가 간단하여 대면적 검출기 제작이 용이하고 방사선에 의한 손상이 거의 없어

하전입자 검출 및 비적 추적에 광범위하게 이용되고 있다. 특히 최근에 반도체 공정기술의 발전에 힘입어 고속 및 고위치 분해능을 지닌 다양한 형태의 기체 검출기가 개발되고 있다. 기체를 이용하여 입사 방사선의 위치를 전기적 신호로 검출하려는 최초의 위치민감형 검출기는 1968년에 G. Charpark에 의해 고안된 다중선 비례계수관(multi-wire proportional counter: MWPC)으로 오늘날까지 고에너지 물리학 및 진단의학 분야의 방사선 검출기로서 널리 활용되고 있다[1]. 최근에 다중선 비례계수관의 성능을 획기적으로 향상시키기 위해서 유럽과 미국을 중심으로 반도체 공정기술을 이용한 초정밀 방사선

본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (과제고유번호:01-PJ1-PG3-31400-0028)

통신저자 : 조효성, 220-710 강원 원주시 흥업면 매지리 234
연세대학교(원주캠퍼스)

Tel. 033) 760-2428, 011-9055-5481

E-mail. hscho@dragon.yonsei.ac.kr

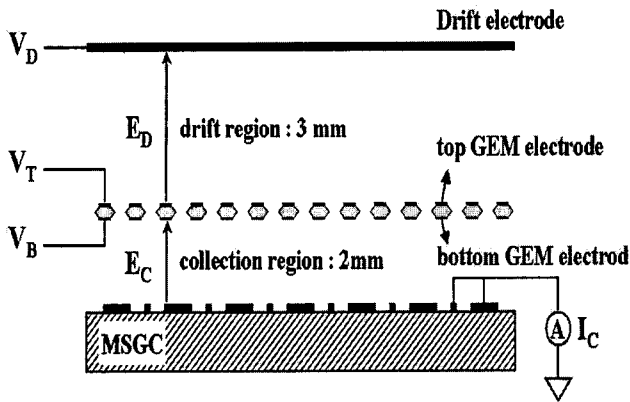


그림 1. 기체전자증폭기의 단면구조
Fig. 1. Cross-sectional structure of the gas electron multiplier

위치센서인 MSGC(micro-strip gas chamber)가 개발된 이후 다양한 형태의 마이크로 센서들이 활발히 연구개발 되고 있는데[2-4], 이러한 첨단 마이크로 센서들은 고위치 분해능, 고계수율 등의 우수한 특성을 지니고 있어 차세대 방사선 영상시스템의 영상센서로서 주목받고 있다. 특히 기체전자증폭기(gas electron multiplier: GEM)는 1997년 유럽의 입자가속기 연구소인 CERN에서 소립자의 궤적을 추적하기 위한 위치센서로서 최초로 고안되었는데[5,6], 기존의 다른 기체검출기에 비해 스파크 손상에 강하고, 공간해상도(spatial resolution), 시간해상도(time resolution) 및 기체이득(gas gain) 등 여러 면에서 뛰어난 동작특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있으며, 반도체나 섬광체 검출기에 비하여 제작단가가 저렴하여 기존의 디지털 방사선 영상시스템의 영상센서로서 적용할 경우 현재까지는 고가인 디지털 방사선 영상시스템의 일반화가 가능해지고, 또한 기존의 필름/스크린 시스템에 비해 조사선량도 낮출 수 있어 방사선 방호에도 상당한 이점을 지니고 있다. GEM 영상센서는 기존의 영상증배관(image intensifier)과 유사한 구조를 지니고 있으나 영상증배관에서는 입력섬광관에서 생성된 가시광이 광음극(photocathode)에 부딪힐 때 생성되는 전자를 면적이 상대적으로 작은 출력섬광관으로 가속 및 집속함으로써 영상의 출력이득을 향상시키는 반면 GEM 영상센서에서는 입사엑스선이 검출기체를 이온화함으로써 생성된 1차전자를 전자사태(electron avalanche)라는 현상을 통하여 영상의 출력이득을 향상시키는 점에서 원리적으로 다르다고 할 수 있다. 또한 기존의 디지털 X-선 영상센서들은 주로 형광체와 결합된 비정형 실리콘(amorphous silicon) 광다이오드나 비정형 셀리늄(amorphous selenium) 광전도체로 구성되는데 X-선 센서부와 readout 부분인 TFT 회로를 하나의 기판 위에 동시에 제작해야하는 제작상의 복잡성과 비싼 제작단가로 인해 실시간 디지털 영상(real-time digital imaging) 및 넓은 검출면적 등 많은 장점들을 지니고 있음에도 불구하고 아직까지 일반화되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 기존의 디지털 방사선 영상센서의 한계점을 극복하기 위해서 제작단가가 저렴

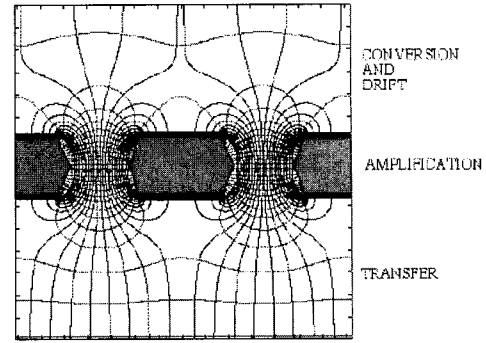


그림 2. 인가전압에 의해 생성되는 쌍극전기장과 표류전기장
Fig. 2. Dipole and drift electric fields produced by applied voltages

하고 독립된 readout 회로와 결합될 수 있는 구조를 지닌 기체전자증폭기를 제작하여 그 동작특성을 분석하였으며 또한 디지털 진단의학 분야에 적용하기 위해서 표준 CCD 카메라를 결합하여 X-선 영상을 획득함으로써 디지털 방사선 영상센서로서의 가능성을 제시하였다.

기체전자증폭기의 구조와 동작원리

기체전자증폭기는 양면이 금속(Cu)으로 얇게 코팅된 수십 μm 두께의 절연성 foil (Kapton[®]: Du Pont 사의 polyimide 상호명)에 화학적 에칭이나 고출력 레이저빔 천공방법을 이용하여 보통 직경 100 μm 이하의 미소 hole들을 100-200 μm 간격으로 균일하게 뚫어 놓은 평판구조로 일반적으로 기존의 기체검출기의 표류공간에 위치하여 기체영역을 표류영역(drift region)과 수집영역(collection region)으로 나눈다(그림 1). 그림 1에서 V_D 는 표류전극에 인가되는 전압이고 V_T, V_B 는 각각 기체전자증폭기의 상·하부 전극에 인가되는 전압을 의미하며, E_D, E_C 는 표류영역과 수집영역에서 형성되는 전기장의 세기를 나타낸다. 기체전자증폭기의 동작원리는 그림 2에서와 같이[7] 기체검출기의 표류전극(drift electrode)과 수집전극(collection electrode) 사이에 인가된 전위차에 의해 표류전기장(drift electric field)이 형성되고, 또한 기체전자증폭기의 상·하부 전극에 인가된 전위차에 의해 미소 hole 내부에 쌍극전기장(dipole electric field)이 형성되어 결과적으로 표류전기장은 미소 hole 내부에서 압축되어 전자사태(electron avalanche)가 가능한 세기($> 10^4$ V/cm) 이상으로 증가된다[8]. 이때 피사체를 투과한 X-선이 기체검출기 안으로 입사되면 검출기체와 상호 작용하여 1차 전자-이온쌍이 생성된다. 생성된 1차 전자들은 표류전기장을 따라 미소 hole 내부로 유도되어 통과하게 되는데, 이때 1차 전자는 미소 hole 내부에서 다른 중성기체를 이온화시킬 수 있을 정도로 충분히 가속되어 전자사태를 유발시킨다(그림 3)[7]. 증폭된 전자들은 미소 hole을 빠져 나와 최종적으로 수집전극에 도달한다. 1차 전자 한 개당 전자사태에 의해 증폭되어 최종적으로 수집전극에 도달하는 전자수를 유효 기체이득(effective gas gain)이라 한다. 기체전자증폭기에서

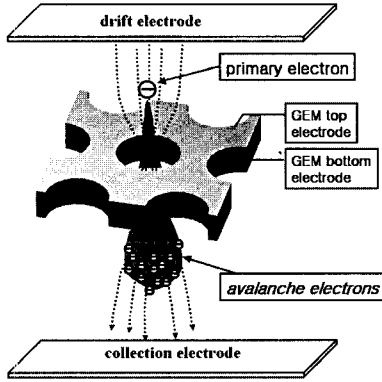


그림 3. 기체전자증폭기의 hole 내부에서 전자사태에 의한 신호증폭
Fig. 3. Signal amplification due to the electron avalanche in the GEM hole

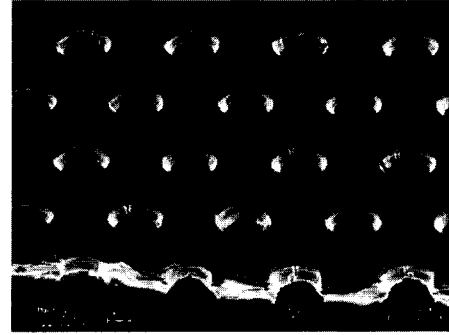


그림 4. 주사전자현미경으로 촬영한 기체전자증폭기의 모습
Fig. 4. Photograph of the gas electron multiplier taken with a scanning electron microscope (SEM)

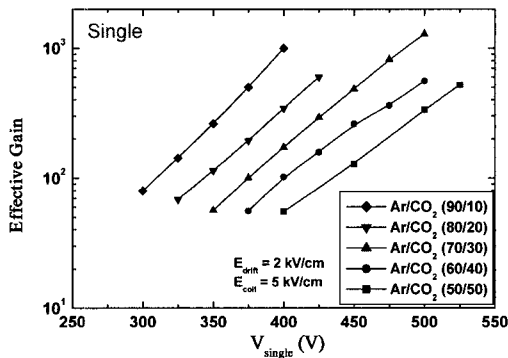


그림 5. 인가전압에 따른 단일 기체전자증폭기의 유효기체이득
Fig. 5. Effective gas gain measured as a function of applied voltage for the single gas electron multiplier

유효기체이득이 크다는 것은 수집전극에서 인출되는 전기적 신호가 크다는 것을 의미하며 결과적으로 획득영상의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)가 향상된다. 또한 기체전자증폭기에 의한 부가적인 기체이득 향상으로 인해 기존 기체 검출기의 동작전압을 낮출 수 있으며, 따라서 높은 동작전압으로 인한 불안정한 동작특성 및 절연과피에 의한 스파크 손상 등의 어려움을 극복할 수 있다. 그림 4는 본 연구에서 사용된 기체전자증폭기의 구조를 주사전자현미경(scanning electron microscope: SEM)으로 찍은 사진이며, 제작된 기체전자증폭기의 기초 hole의 지름과 간격은 각각 60 μm 및 100 μm 이고, 절연체 두께는 50 μm , 유효검출면적은 10 $\text{cm} \times 10 \text{cm}$ 이다.

실험 및 고찰

1. 유효기체이득

그림 5는 다양한 비율의 혼합기체(Ar/CO₂)를 사용하여 기체전자증폭기의 인가전압 $V_{\text{GEM}} (= V_{\text{T}} - V_{\text{B}})$ 의 함수로 측정된 유효기체이득을 나타낸다. 이때 사용된 표류전극장과 수집전극장의

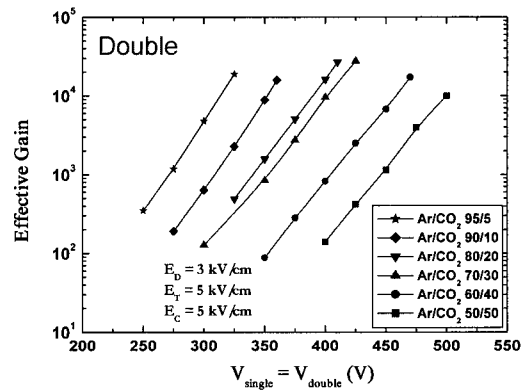


그림 6. 인가전압에 따른 이중 기체전자증폭기의 유효기체이득
Fig. 6. Effective gas gain measured as a function of applied voltage for the double gas electron multiplier

세기는 각각 2 kV/cm, 5 kV/cm이다. 인가전압이 증가할수록 유효기체이득은 지수함수적으로 증가하여 비례계수형 기체검출기의 특성을 잘 나타내었으며, Ar/CO₂(90%/10%) 혼합기체에서 최대 기체이득은 인가전압 400 V에서 약 10³으로 측정되었다. 혼합기체 중 Ar은 X-선과 반응하여 전자사태를 일으키는 주 기체이며, CO₂는 X-선과 기체의 반응에서 발생하는 자외선을 흡수하기 위해 사용된 소멸기체(quenching gas)이다. 소멸기체의 함유량이 10%인 경우 기체전자증폭기의 동작전압은 300-400 V 정도인 반면에, 30% 함유량인 경우 350-500 V로 소멸기체의 함유량에 따라 기체전자증폭기의 동작전압 범위는 넓어지고 상향 이동 하였으나 최대 기체이득에는 큰 차이가 없었다. 기체전자증폭기의 유효기체이득을 증가시키는 방법으로는 인가전압을 증가시키는 것 이외에 기체전자증폭기의 미소 hole 직경을 줄이는 것, 절연성 호일의 두께를 늘이는 것, 최적화된 혼합기체를 선택하는 것 등 여러 가지가 있을 수 있으나 현실적으로 최대의 증폭효과를 얻을 수 있는 방법은 다수의 기체전자증폭기를 적층해서 동시에 사용하는 것이다. 그림 6은 2장의 기체전자증폭기를 적층하여 사용하였을 때 측정

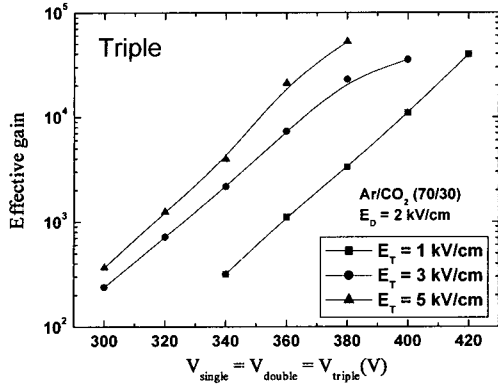


그림 7. 인가전압에 따른 삼중 기체전자증폭기의 유효기체이득
 Fig. 7. Effective gas gain measured as a function of applied voltage for the triple gas electron multiplier

한 유효기체이득이다. 단일 기체전자증폭기의 경우 기체공간이 표류 및 수집영역으로 구분되지만, 이중 기체전자증폭기의 경우에는 전자증폭기 사이에 전송영역(transfer region)이 첨가된다. 그림 6에서 2장의 기체전자증폭기에 인가된 전압은 동일하게 유지하였으며, 표류, 전송, 수집영역에서의 전기장 세기는 각각 3, 5, 5 kV/cm이다. 이중 기체전자증폭기에서 측정된 유효기체이득의 증가형태는 단일 기체전자증폭기에서와 유사하였으며 최대 기체이득은 10^4 이상으로 측정되었다. 그림 7은 3장의 기체전자증폭기를 동시에 사용하였을 때 측정된 유효기체이득이며 최대 기체이득은 약 5×10^4 이다. 기체전자증폭기를 대면적으로 구성할 때 위치에 따른 유효기체이득의 균일성은 획득영상의 화질을 평가하는 중요한 기준이 된다. 그림 8은 1 mm 직경의 X-선원을 2 mm 간격으로 이동하면서 측정된 상대적인 유효기체이득을 나타내며 약 2% 범위 내에서 균일한 기체이득을 획득하였다.

2. 섬광특성

기체검출기에서 전자사태가 일어나면 인가 전위차에 의해 가속된 전자들은 검출기체와 비탄성 충돌하여 여기 및 전리작용을 일으키며, 이때 여기된 기체는 수 nsec 이내에 원래의 기저상태로 되돌아간다. 주 검출기체인 Ar은 대부분 여기상태에서 기저상태로 돌아갈 때 UV광(Ar의 광스펙트럼 봉우리 :

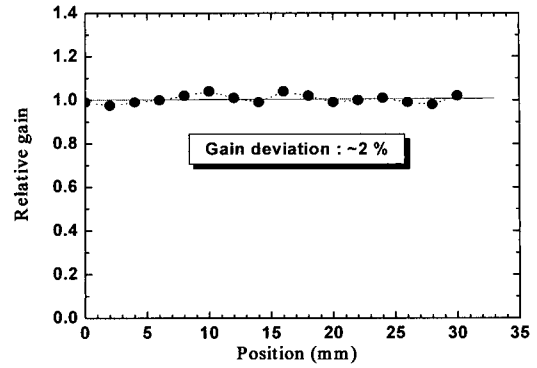


그림 8. 기체전자증폭기의 기체이득의 균일성
 Fig. 8. Gas gain uniformity of the gas electron multiplier

1250 Å)을 방출한다[9]. 최근에 포르투갈 Coimbra 대학의 F. Fraga 등은 가시광 영역의 섬광특성이 우수한 검출기체를 선택하여 기체전자증폭기를 가시광을 방출하는 위치검출 섬광체로 이용하려는 연구를 시도하였다[10]. 그들의 연구결과에 따르면 Ar에 소량의 CF₄ 기체를 첨가하였을 때 가시광 영역에서부터 800 nm 정도의 적외선에 이르는 광범위한 파장영역에 걸쳐 많은 양의 광출력을 나타내었으며, 표준 CCD 카메라로도 방사선 영상획득이 가능함을 입증하였다. CF₄ 기체에서의 광자 방출은 대부분 여기된 (CF₃)^{*}와 (CF₄)^{*}가 바닥상태로 되돌아갈 때 방출하는데, 기체전자증폭기의 미소 hole 내부에서 가속된 전자들은 전자사태 동안 CF₄ 기체를 여기 또는 전리시켜 광방출을 유발한다. 본 연구에서는 기체전자증폭기의 입사창을 통과한 X-선의 위치를 검출하고 그 강도에 따른 X-선 영상을 획득하기 위해 그림 9와 같이 X-선 영상획득시스템을 구성하였으며, 기체전자증폭기에서 증폭된 전자를 직접 검출하는 방법 대신에 증폭과정에서 발생하는 섬광을 표준 CCD 카메라로 직접 검출하여 X-선 영상을 획득하였다.

3. 영상획득 시스템 구성

본 실험에서는 X-선원으로 ⁵⁶Fe 방사성 동위원소(5.9 keV, 20 mCi)를 사용하였으며, 베릴륨(Be) 입사창으로부터 10 cm 떨어진 거리에서 직경 5 mm의 조준기로부터 X-선이 조사되도

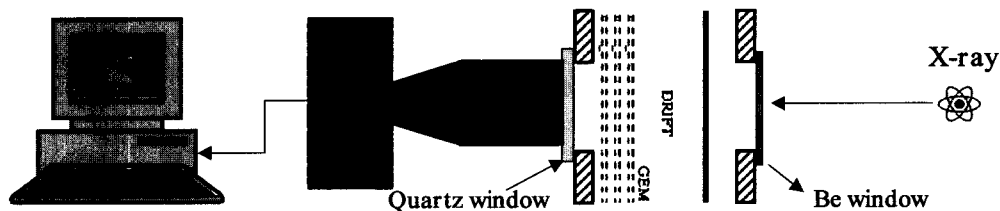


그림 9. 기체전자증폭기와 표준 CCD 카메라를 결합한 X-선 영상획득 시스템
 Fig. 9. X-ray imaging acquisition system based on the gas electron multiplier coupled with a standard CCD camera

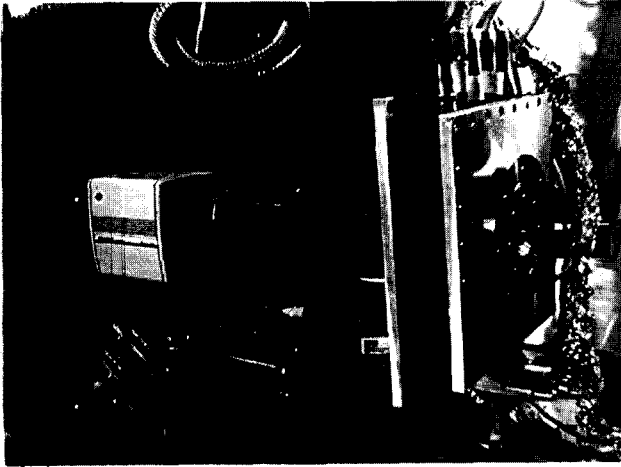


그림 10. X-선 영상획득 실험장치의 사진
Fig. 10. Photograph of the X-ray imaging acquisition system

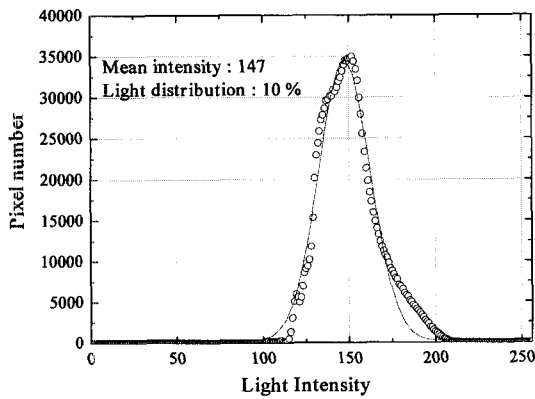


그림 12. X-선을 균일하게 조사한 후 기체전자증폭기의 전체면적에서 발생된 섬광을 CCD 카메라로 측정된 후 각 픽셀에서 수집된 섬광 세기의 분포

Fig. 12. Distribution of the scintillation light collected on the pixels of CCD camera when the gas electron multiplier was uniformly irradiated with X-rays

록 하였다. 고강도의 섬광을 검출하기 위해서 주 검출기체인 Ar에 소량의 CF_4 기체를 적절하게 혼합하였으며, 3장의 기체 전자증폭기를 2mm 간격으로 적층하여 사용하였다. 전자사태 시에 기체전자증폭기의 미세 hole 내부에서 방출되는 섬광은 테스트 챔버의 quartz 창과 망원렌즈를 통해 CCD 카메라로 전해지는데, 그림 10에서와 같이 외부의 광 노이즈를 차단하고 초점거리를 확보하기 위해 테스트 챔버와 CCD 카메라의 망원 렌즈 사이에 20cm 길이의 흑색 후드를 결합하였다. 후드와 결합된 quartz 창은 테스트 챔버 내부의 기체전자증폭기의 미세 hole에서 방출되는 섬광을 통과시키는 역할을 한다. 가시 빛 적외선 영역의 섬광을 효율적으로 검출하기 위한 수광장치로서 고분해능의 KAF1400 CCD 광센서가 내장된 MegaPlus

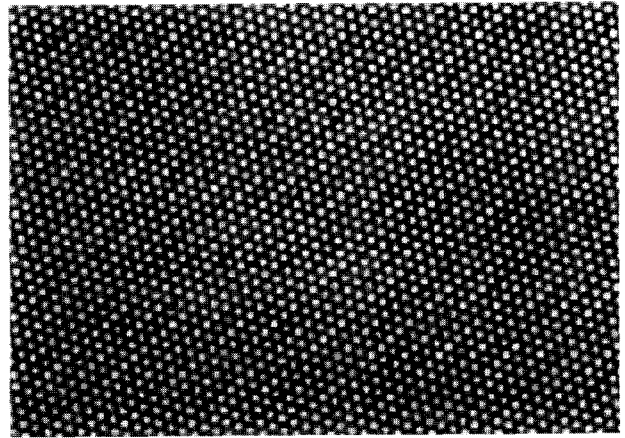


그림 11. 기체전자증폭기의 섬광작용에 의한 영상
Fig. 11. Image of scintillation light produced by the gas electron multiplier

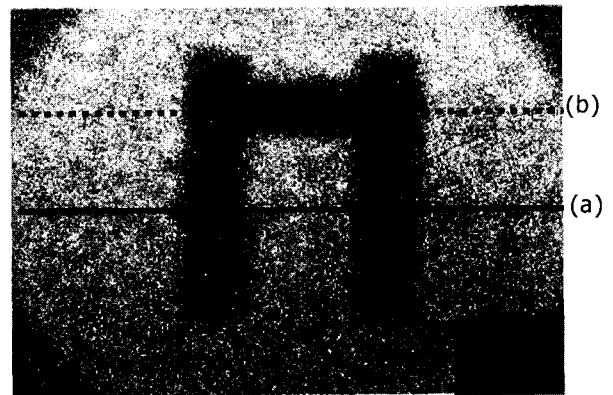


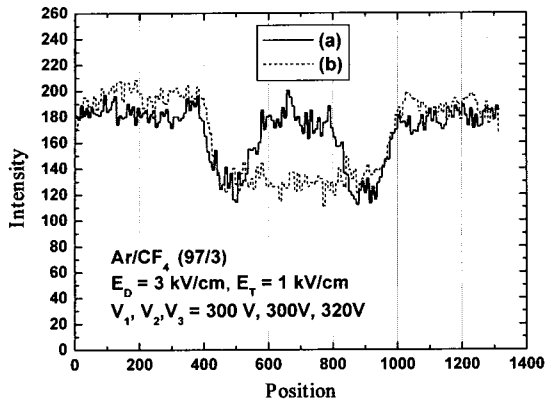
그림 13. 기체전자증폭기와 결합한 CCD 카메라로 촬영한 II-형상 플라스틱 피사체의 엑스선 영상

Fig. 13. Radiography of a II-shaped plastic phantom taken by the gas electron multiplier coupled with CCD camera

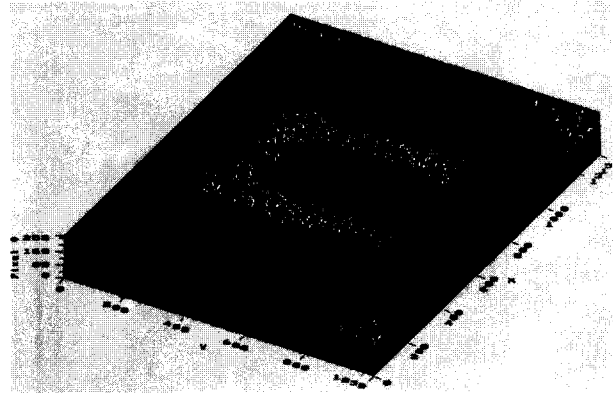
1.4i 카메라를 사용하였다. CCD 카메라에 기록된 X-선 영상정보는 PIXCI 이미지보드를 통해 컴퓨터로 입력되며 이미지분석 소프트웨어인 XCAPT(MEPIX Inc.)을 사용하여 획득된 엑스선영상의 특성을 분석하였다.

4. 엑스선영상 획득실험

그림 11은 기체전자증폭기의 전체영역에 X-선을 조사한 후 미세 hole 내에서 방출된 섬광을 표준 CCD 카메라로 촬영한 X-선 영상의 일부이다. X-선 영상획득을 위해 사용된 혼합기체는 $Ar/CF_4(95\%/5\%)$ 이며, 기체전자증폭기의 인가전압은 300 V이다. 기체전자증폭기의 인가전압이 증가함에 따라 방출 섬광의 밝기는 증가하였으며 확대된 CCD 카메라 영상을 통해 기체전자증폭기의 미세 hole 모습을 선명하게 확인하였다. 기체전자증폭기의 전체영역에 균일한 X-선을 조사하였을 때 CCD 카메라에서 수집된 섬광의 균일성은 영상의 대조도를 결정하는 중요한 요소가 된다. 그림 12는 기체전자증폭기의 표류



(a)



(b)

그림 14. (a) 그림 13에서의 선분 (a)와 (b) 상에서 평가된 섬광세기, (b) XCAPTМ 분석 소프트웨어를 사용하여 재구성한 Π -형상 플라스틱 피사체의 3차원 영상

Fig. 14. (a) The light intensity measured along the path lines of (a) and (b) in Fig. 13, and (b) 3D image of the Π -shaped plastic phantom reconstructed using XCAPTМ analysis software

영역에 X-선을 균일하게 조사한 후 기체전자증폭기의 전체면적에서 발생된 섬광을 CCD 카메라로 측정된 후 CCD 카메라의 각 픽셀에서 수집된 섬광세기의 분포를 나타내며 약 10% 정도의 편차를 나타내었다. 방출섬광의 균일성을 저하시키는 요인으로는 X-선속의 불균일성 이외에 기체전자증폭기의 미소 hole 내부 혹은 외부에 존재하는 국부적인 전기장 세기의 요동을 들 수 있다. 그림 13은 Π 형상의 플라스틱을 촬영한 영상이다. 그림 14 (a)는 그림 13에서의 선분 (a)와 (b) 상에서 평가된 섬광세기의 차이, 즉 대조도를 나타내며, 그림 14 (b)는 XCAPTМ 분석 소프트웨어를 사용하여 3차원으로 재구성한 것으로써 피사체영상의 위치에 따른 명확한 대조도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 차세대 디지털 방사선 영상시스템의 영상센서로서 제작이 용이하고 위치분해능이 우수한 기체전자증폭기를 제작하여 다양한 실험조건에서 그 동작특성을 조사하였다. 1차 전자 한 개당 전자사태에 의해 증폭되어 최종적으로 수집전극에 도달하는 전자수로 정의되는 유효기체이득(effective gas gain)은 인가전압을 증가하거나 또는 다수의 기체전자증폭기를 적층하여 사용함으로써 효율적으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 기체전자증폭기에서 유효기체이득이 크다는 것은 수집전극에서 인출되는 전기적 신호가 크다는 것을 의미하며 결과적으로 획득영상의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)가 향상된다. 또한 기체전자증폭기의 섬광특성을 이용하여 Π 형상의 플라스틱 피사체를 표준 CCD 카메라로 X-선 영상을 획득함으로써 피사체영상의 위치에 따른 명확한 대조도를

얻었다. 향후 보다 선명한 X-선 영상을 획득하기 위해서는 기체전자증폭기의 섬광특성을 이용하는 대신에 전자사태에서 증폭된 전자를 직접 검출하여 영상처리하는 방법을 개발할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier and C. Zupancic, "The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles", Nucl. Instr. Meth., 62 (1968) 262
2. A. Oed, "Position-Sensitive Detector with Microstrip Anode for Electron Multiplication with Gases", Nucl. Instr. Meth., A 263 (1988) 351
3. F. Angelini, R. Bellazzini, A. Brez, M.M. Massai, R. Raffo, G. Spandre and M.A. Spezziga, "The Micro-Gap Chamber", Nucl. Instr. Meth., A 335 (1993) 69.
4. S.F. Biagi and T.J. Jones, "The Microdot Gas Avalanche Chamber: An Investigation of New Geometries", Nucl. Instr. Meth., A 361 (1995) 72
5. F. Sauli, "GEM: A New Concepts for Electron Amplification in Gas Detector", Nucl. Instr. Meth., A 386 (1997) 531
6. R. Bouclier, W. Dominik, M. Hoch and G. Million, "New Observations with the Gas Electron Multiplier (GEM)", Nucl. Instr. Meth., A 396 (1997) 50
7. S. Bachmann, A Bressan, L. Ropelewski, F. Sauli and A. Sharma, "Charge Amplification Processes in

- the Gas Electron Multiplier*", Nucl. Instr. Meth., A 438 (1999) 376
8. G.F. Knoll, "*Radiation Detection and Measurement*", 2nd Edition (1989), John Wiley & Sons, Inc., New York
9. M. Salet and S.C.P. Leite, Portugal Phys., 11 (1980) 53
10. F.A.F. Fraga, S.T.G. Fetal, R. Ferreira Marques and A.J.P.L. Policarpo, "*Quality Control of GEM Detectors Using Scintillation Techniques*", Nucl. Instr. Meth., A 442 (2000) 417