

# SEM용 전자 검출기의 설계 및 제작

이상욱\*, 전종업\*\*, 박기태+, 박규열\*\*

## A Study on the Secondary Electron Detector for use in Scanning Electron Microscope

SangUk Lee\*, Jong Up Jeon\*\*, KiTae Park+, Kyu Yeol Park\*\*

### Abstract

The nature of the signals collected by an SEM(Scanning Electron Microscope) in order to form images are all dependent on the detector used to collect them, and the quality of an acquired image is strongly influenced by detector performance. Therefore, the development of detector with high performance is very important in pulling up the resolution of SEM This study presents the secondary electron detector for use in scanning electron microscope, electric circuit and I/V conversion circuit for driving that detector.

**Key Words :** Electron Detector(전자검출기), Scanning Electron Microscope(주사전자현미경), Secondary Electron(이차전자), Photomultiplier tube(광증배관), Secondary Electron Detector(이차전자검출기)

### 1. 서론

나노 기술(NT)는 21세기에 들어오면서 세계주요국들이 정보기술(IT), 바이오 기술(BT)과 함께 21세기를 주도할 핵심 기술로 선정, 범국가적 지원을 하고 있다.

나노 기술이 소개된 지 20년이 채 안되었지만, 그 발전가능성은 무궁무진하며 화학, 소재, 기계, 전자, 환경, 에너지, 국방, 우주 등 모든 기술과 결합하여, 20세기 말 등장한 반

도체 산업이 새로운 문명을 창출했듯이 21세기는 나노 기술이 이 자리를 대신할 것이라고 많은 미래학자들은 예측하고 있다.<sup>(1)</sup> 지금까지 나노 기술이 주로 순수과학에서 진행되어 왔으나 산업화로 확대되기 위해서는 다양한 공학 기술이 접목되어야 할 것이다. 이를 위해서 나노가공장비, 나노 측정장비, 나노 액츄에이터 및 나노 가공공정기술 개발은 반드시 연구·개발되어야 하는 분야이다. 본 연구는 나노 스케일 수준의 물질크기를 측정할 수 있는 나노단위

\* 발표자, 울산대학교 대학원 기계자동차공학과(sulee@mail.ulsan.ac.kr)  
주소: 680-749 울산광역시 남구 무거동 산 29  
+ 울산대 대학원 기계자동차공학과  
\*\* 울산대 기계자동차공학부

측정 장비들 중의 하나인 SEM(주사전자현미경, scanning electron microscope)에 관한 것으로, SEM을 구성하고 있는 여러 핵심 구성요소 중에서 물질의 영상을 획득하는데 필요한 이차전자 검출기에 관한 것이다.

SEM은 에너지가 매우 높은 전자빔(electron beam)을 이용하여 아주 작은 크기의 물체를 분석하는 기기로서, 물체 표면의 형상(texture) 등과 같은 국소해부학(topography)적 정보, 물체를 구성하는 입자들의 형상과 크기 등의 형태학(morphology)적 정보, 재료 내 원자들의 배열상태 등의 결정학(crystallography)적 정보 등을 얻는데 이용되고 있다. SEM에 관한 연구는 1935년 베를린에 있는 기술대학에서 Max Knoll과 Ernst Ruska<sup>(2)</sup>에 의해 처음으로 시작되었고, 1942년 V. K. Zworykin, J. Hiller, R. L. Snyder에 의해 입체형태의 시료를 관찰할 수 있는 SEM이 발표되었다.<sup>(3)</sup> 1964년에 SEM이 상업적으로 이용되기 시작한 이래 SEM의 해상도는 전자총(electron gun), 렌즈계, 검출기(detector) 등의 지속적인 발전에 힘입어 비약적인 발전을 이루었다. 최근에는 산업의 요구에 맞는 다양한 SEM이 개발되어 최근 활발하게 연구 개발되고 있는 MEMS, 나노, 바이오 기술 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 이와 같이 다양한 산업분야에서 SEM의 용도가 급격히 증가하고 있음에도 불구하고 국내의 경우, SEM에 관한 기술부족으로 인해 전량 외국제품이 수입되어 사용되고 있는 실정이다. 따라서, 전자검출기를 포함한 SEM의 국산화가 무엇보다 절실한 상황이라 할 수 있다.

우선 시료와 입사전자빔과의 상호작용에 관하여 간략하게 기술하고, 본 연구에서는 SEM의 핵심 구성요소 중의 하나인 이차전자 검출기를 설계, 제작하였으며, 이를 실제 SEM에 장착하여 성능실험을 수행하고 평가하였다.

## 2. 시료와 전자빔간의 상호작용

SEM에 있어서, 시료에 입사되는 전자빔의 에너지는 시료와의 상호작용(interaction)에 의해 여러 가지 다양한 신호들로 변환된다. 시료의 표면을 관찰하기 위한 신호로는 전자의 방출과 전자기 복사(electromagnetic radiation)형태의 두 가지 신호가 있다. 전자는 고체 중에 들어가면 원자핵이나 주변 전자와의 쿨롱(coulomb) 상호작용에 의해서 탄성 또는 비탄성 산란(elastic or inelastic scattering)하게 된다. 전자는 탄성산란에서 비교적 큰 각도로 산란되는 한편 비탄성 산란에서는 고체 내의 전자를 기저상태(ground state)에서 여기시키므로 그에 상당하는 에너지를 손실하게

된다. 두꺼운 시료 중에서는 입사전자가 탄성 및 비탄성 산란을 반복하므로 그 산란 영역은 점차 확대되어 결국 그 대부분의 에너지를 잃고 전도전자가 되어 시료에서 접지(earth) 전류로 흐른다. 여기된 전자 중에서 진공준위(vacuum level)보다 높은 에너지를 지닌 전자는 여기된 후에 고체를 통해 표면에 도달하여 표면에서 탈출한다. 이러한 전자를 이차전자(secondary electron)라고 한다. Fig. 1은 전자빔과 시료사이의 상호작용으로 인해 방출되는 여러 가지 전자 신호들을 보여주고 있으며, 본 논문에서는 시료 표면으로부터 방출되어 나오는 이차전자를 검출하여 영상으로 나타내는데 필요한 이차전자 검출기에 대해서 기술한다.

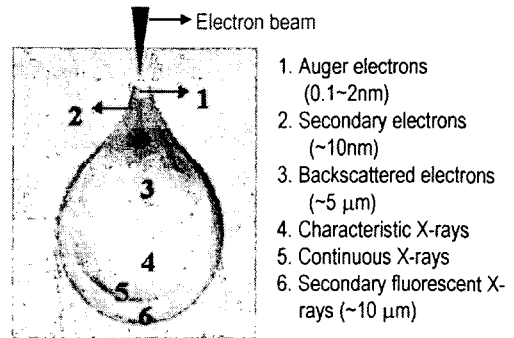


Fig. 1 Electron beam-specimen interaction

## 3. 전자 검출기의 설계 및 제작

### 3.1 전자검출기의 구조

Fig. 2는 본 연구에서 설계한 이차전자 검출기의 구조를 나타낸 것이다. 일반적으로 SEM에서 이차전자의 검출은  $10^{-6}$  torr 이하의 초 고진공하에서 이루어지는데, 이러한 환경에서 소재로부터의 아웃가싱(outgasing)은 챔버 내의 진공도를 저하시켜 양질의 이차전자 신호를 획득하는데 지장을 초래하므로 SEM의 진공챔버를 이루는 소재는 비교적 초 고진공하에서도 아웃가싱이 적은 것이어야 한다. 그래서 본 연구에서도 Table. 1에서 보는 바와 같이 역시 초 고진공하에서 사용될 수 있는 재질들을 선정하여 이차전자 검출기를 설계 및 제작하였다

Fig. 2의 몇가지 구성부품들의 기능을 살펴보면, ①은 코로나 링(corona ring)으로써 이는 +10kV의 고전압을 인가받아 ②의 신틸레이터(scintillator) 주위에 강한 전계를 형성하여, 시료에 입사되는 전자빔과의 상호작용으로 인하여 시료표면으로부터 튀어 나오는 이차전자들을 강하게 가속시켜

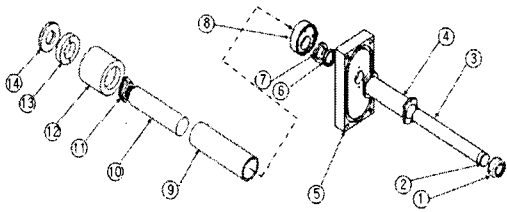


Fig. 2 Structure of electron detector

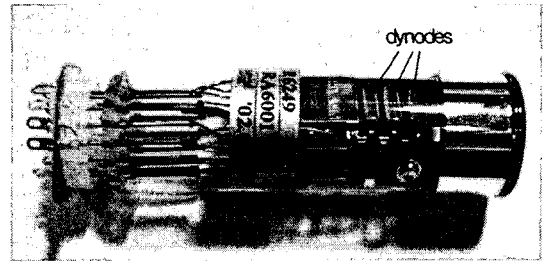


Fig. 3 PMT(photomultiplier tube) and socket

Table 1 Each part name and materials of detector

번호	부품명	재질
1	Corona ring	C3604
2	Scintillator	
3	Light guid	quartz
4	Faraday cage supporter	C3604
5	Plate	C3604
6	O-ring fix washer	C3604
7	Nut	C3604
8	PMT housing connector	MC
9	PMT housing	A6061
10	PMT	
11	PMT socket	
12	Circuit housing	A6061
13	PMT fixer	A6061
14	PMT pusher	A6061

높은 에너지를 가지고 신틸레이터 부분으로 집중시켜 충돌하게 하는 역할을 한다. 높은 에너지를 가진 이차전자들은 신틸레이터에 도포된 섬광물질과 충돌하여 모든 에너지를 소멸하며, 섬광물질은 광자를 생성하게 된다. 이렇게 생성된 광자는 ③의 도광관(light guide)를 따라 ⑩의 광증배관(PMT, photo multiplier tube)로 안내되어 광증배관의 광음극(photo cathode)를 통과하면서 다시 전자로 변환되고, 이 변환된 전자들이 광증배관 내에 있는 다수의 다이노드(dynode)를 거치면서 수십만 배 증폭되어 최종적으로 전류 신호로써 출력된다.<sup>(4)</sup> Fig. 3은 본 연구에서 사용한 HAMAMATSU사의 R6249 모델이고, 주요 사양은 Table 2에 나타내었다.

### 3.2 전자검출기 회로의 설계 및 제작

이차전자 검출기에 필요한 회로는 크게 광증배관을 구동하기 위한 고전압 인가회로와, 광증배관에서 증폭된 전류 신호를 전압으로 변환한 후 증폭하는 회로로 나누어 설계 및 제작되었다.

Table 2 Specification of PMT

Effective area	∅ 25 mm
Spectral response range	300~650nm
Reak wave length	420nm
Cathode radiant sensitivity	38mA/W
Gain	$2.1 \times 10^6$
Rise time	4ns

#### 3.2.1 광증배관 구동을 위한 회로

광증배관을 구동하기 위해서는 매우 높고 고정도의 전압이 필요한데, 본 연구에서는 고정도를 갖는 -1kV의 고전압을 사용하였다. Fig. 4는 광증배관의 다이노드에 전압을 인가하기 위한 소켓을 나타낸 것이고, Fig. 5는 광증배관을 구동하기 위한 회로로써 Fig. 4의 각 다이노드에 인가될 전압을 등분배 하며, 이와 동시에 증폭된 전류신호를 출력하는 회로이다. 광증배관에 인가되는 고전압은 매우 안정적으로 인가되어야 하기 때문에 동축 케이블을 통해서 전압을 인가하였고, 회로의 입력단에 고압용 커패시터를 연결하여 ripple을 최소화 하였다. Fig. 6은 본 연구에서 제작한 광증배관 구동을 위한 회로를 보여주고 있으며, 소켓과 회로사이의 전선의 길이가 길어짐에 따라 발생할 수 있는 노이즈를 원천적으로 차단하기 위해 소켓을 회로기판에 직접 붙여서 제작하였다.

#### 3.2.2 I/V 변환회로(I/V conversion circuit)

광증배관의 출력단자에서 나오는 전류 신호를 오실로스코프를 사용해서 확인하거나 A/D컨버터를 사용해서 데이터를 획득하기 위해서는 반드시 전압신호로의 변환이 필요한데, 이럴 경우 전류신호를 전압신호로 바꾸는 I/V변환 회로를 사용하여야 한다. Fig. 7에 광증배관에서 나온 전류신

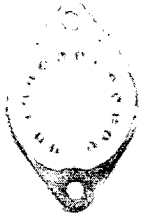


Fig. 4 PMT socket (HAMAMATSU E878-14C)

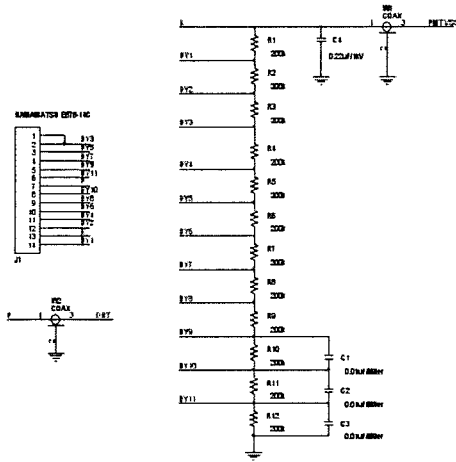
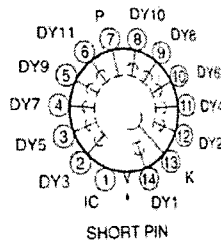


Fig. 5 Drive circuit for PMT

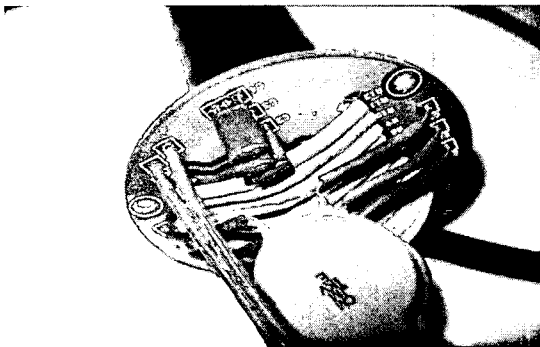


Fig.6 Manufactured circuit for PMT

호를 전압신호로 변환하기 위한 간단한 회로를 나타내었으며, 이는 식  $V_0 = -I_p \cdot R_f$ 에서 알 수 있듯이 출력전압이 광증배관의 출력단자에서 나온 전류의 양에 따라 선형적으로 증

가 또는 감소하는 것을 보여준다.

Fig. 8에 본 연구에서 설계한 I/V변환회로와 그리고 변환된 전압신호를 증폭하는 주 증폭회로( main amplifier)를 나타내었다. 본 회로는 광증배관에서 나오는 상당히 미약한 전류를 변환 및 증폭하기 위해 제작되었기 때문에 회로 외부에서 발생하는 노이즈(noise)의 제거에 만전을 기하였다. 본 회로의 I/V 변환 부분은 전류를 전압으로 변환 시 광증배관에서 나오는 수  $\mu A$  범위의 전류를 수 mV의 전압신호로 변환하며, 주 증폭회로 부분은 약 34배의 증폭율을 가지며 수 mV의 전압을 수십 mV에서 수백 mV의 전압으로 증폭한다. 또한 회로의 구동을 위해 사용되는 소형 직류전원장치가 지니고 있는 노이즈의 영향도 무시할 수 없기 때문에 커패시터 필터를 사용해서 원천적으로 noise를 차단하였다. 본 회로를 설계 시 주의해야 할 점은 연산증폭기(Op-amp)를 선정할 때 광증배관으로부터 나오는 출력전류의 값이 극히 미약하기 때문에 그것을 감지 할 수 있는 입력 임피던스(input impedance)가 작은 연산증폭기를 사용하는 것이다. Fig. 9는 본 연구에서 설계 및 제작한 이차전자 검출기를 보여주고 있는데, 아직 SEM의 진공 챔버에 실장되기 전의 사진이다.

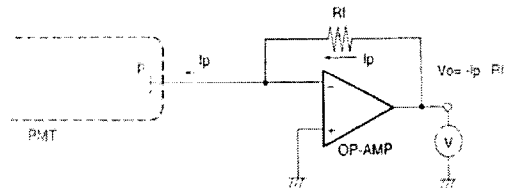


Fig. 7 Concept of I/V conversion circuit

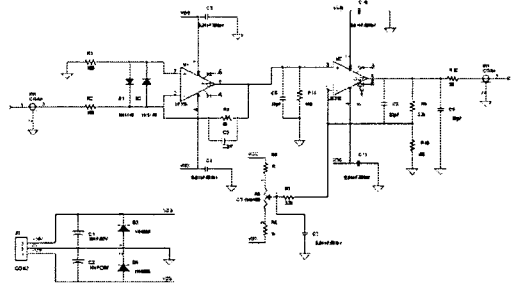


Fig.8 I/V conversion and main amplifier circuit

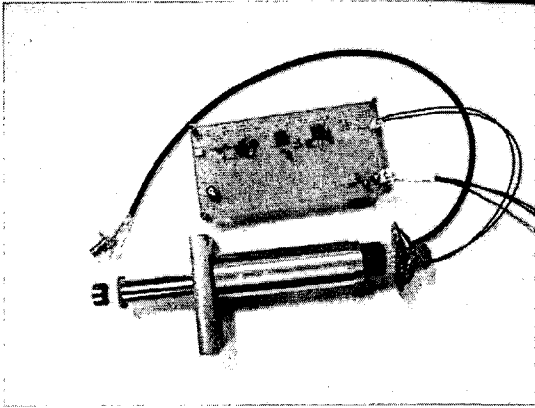
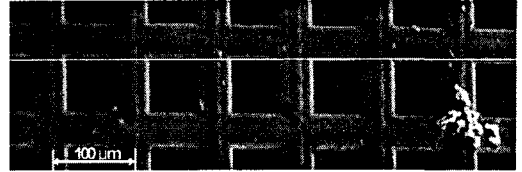


Fig. 9 Picture of secondary electron detector

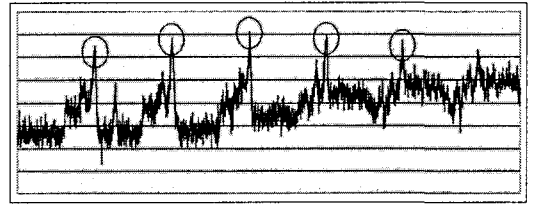
#### 4. 전자 검출기의 성능실험

상기에서 기술한 전자검출기와 광증배관 구동을 위한 회로 및 I/V 변환회로를 설계 및 제작하여 성능 실험을 수행하였다. 시편의 요철에 따라 이차전자의 발생량이 많은 차이를 보이는지 알아보기 위하여, 본 성능실험에서는 한 종류의 표준시편을 사용하였는데 메쉬형태(mesh type)를 가진 것을 사용하였다.

본 연구를 수행함에 있어서 시료에서 이차전자를 발생시키기 위해서는 높은 에너지를 가진 전자빔의 사용이 필수적인데, 이를 위해서 (주)우성오토마에서 제작한 SEM을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험을 수행할 때 SEM의 진공챔버 내부 진공도는 약  $5 \times 10^{-5}$  torr 정도였으며, 이차전자를 신틸레이터로 가속시킬 때 사용된 가속전압은 +10kV를 사용하였다. Fig. 10의 (a)는 본 연구에 사용된 표준 시편의 SEM 사진이고, Fig. 10의 (b)는 표준시편을 전자빔으로 스캔할 때 시편으로부터 발생하는 이차전자의 양을 전압 신호로 증폭하여 추출하였을 때 나타나는 전압 신호인데, Fig. 10 (a)에 표시된 스캔라인(scan line)을 따라 스캔했을 때 나타나는 신호이다. 예상했던 대로 시편의 요철에 따라 발생하는 이차전자의 양이 다르다는 것을 전압신호의 파형을 관찰함으로써 확인하였다. Fig. 10의 (b)에 ○표시한 부분의 신호들은 이차전자들의 발생이 많은 것으로 생각될 수 있는데, 검출기가 시편의 우측에 위치하여 검출을 행하였기 때문에 나타난 결과이지 이차전자들의 발생량이 많은 것이 아니다. 즉, 시편으로부터 튀어나온 이차전자들의 운동방향이 검출기를 향하고 있을 때, 그 반대의 경우와는 달



(a)



(b)

Fig.10 Detected signal of mesh typed specimen

리 상대적으로 많은 양의 전자들이 검출되는 것이다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 전자빔과 시료의 상호작용에 의해 발생하는 여러 전자 신호들 중 특히 시료표면의 영상을 얻는데 사용되어지는 이차전자들을 검출하는 이차전자 검출기와 광증배관 구동을 위한 회로 및 I/V 변환회로를 설계 및 제작하였다. 또한 이를 실제 SEM에 장착하여 측정실험을 수행하여서 시편의 요철에 따라 전자검출기에 검출되는 이차전자의 양에 있어서도 확연히 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 기초실험결과들을 토대로 하여 조금 더 보완된 시스템을 형성한다면 SEM의 핵심기술 중의 하나인 전자검출기 국산화가 가능할 것으로 생각한다.

전자 검출기에서 검지된 시료에서 나온 신호는 노이즈에 매우 민감하므로 깨끗한 화상처리를 위해서 신중한 장치제작이 필요하며, 향후 이차전자 및 후방산란전자 등을 검출하기 위한 구성장치들이 개선 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업(총괄과제명: 이온빔 이용 나노가공용 장비 개발)의 위탁과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Jang, D. Y., Park, M. J., Kim, J. H., Han, D. C., 2004, "Development of a multi-functional nano-fabrication system for fabrication and measurement", Proceedings of the Ksmte Spring Conference. pp.472~477.
- (2) Peter W. Hawkers, 1988, "Advances in Electronics and Electron Physics", Academic Press
- (3) Robert Edward Lee. 1993, "Scanning Electron Microscopy and X-ray Analysis", Prentice Hall
- (4) S. Lee, J. U. Jeon, S. H. Han, 2004, "The Electron Detector in Scanning Electron Microscope" Proceedings of the Ksmte Spring Conference. pp.513~517.