

# Scanning Electron Microscopy

(전자현미경의 원리 및 응용)



# **Microscopy World**



# 1 현미경 개론 (Microscopy)

---

## 현미경 이란?

사람이 사물을 보는 메커니즘에는 눈의 수정체가 광학적으로 상을 맺는 역할을 한다. 그러나 우리들이 자연적으로 지니고 있는 수정체로는 보통 약 0.1mm 이하의 미세한 구조는 분석할 수 없다.

그래서 보다 작은 크기의 사물을 확대하여 관찰할 수 있는 확대경(돋보기)으로 부터 정도가 높은 광학렌즈를 조립한 광학현미경과 20세기 들어서는 전자 빔을 이용한 전자현미경 등이 사용되고 있으며, 그 사용분야는 재료공학 및 분자 생물학 그리고 반도체 등 산업전분야에서 없어서는 안되는 분석 장비이다.

## 2 | 현미경 종류

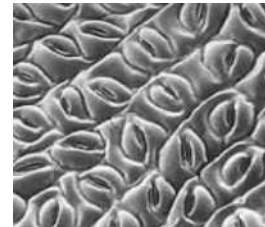
현미경(Microscope)의 종류는 아래와 같이 다양하나, 분석목적과 결과는 장비에 따라 다르며, 작은 물체를 확대하여 분석하는 기법은 동일하다.

### Light Microscopy



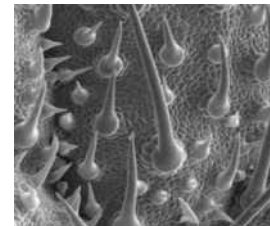
### Tabletop Mini-SEM

(Mini Scanning Electron Microscope)



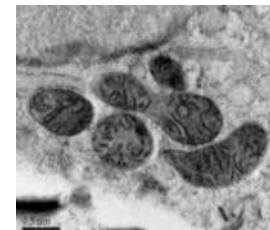
### SEM

(Scanning Electron Microscope)



### TEM

(Transmission Electron Microscope)



Sample : Leaf

### ✓ Light Microscope

- > 생물현미경
- > 측정현미경
- > 금속현미경
- > 실체현미경
- > 디지털현미경
- > 레이저현미경

### ✓ Desktop Mini-SEM

- > Low vacuum SEM
- > High vacuum SEM

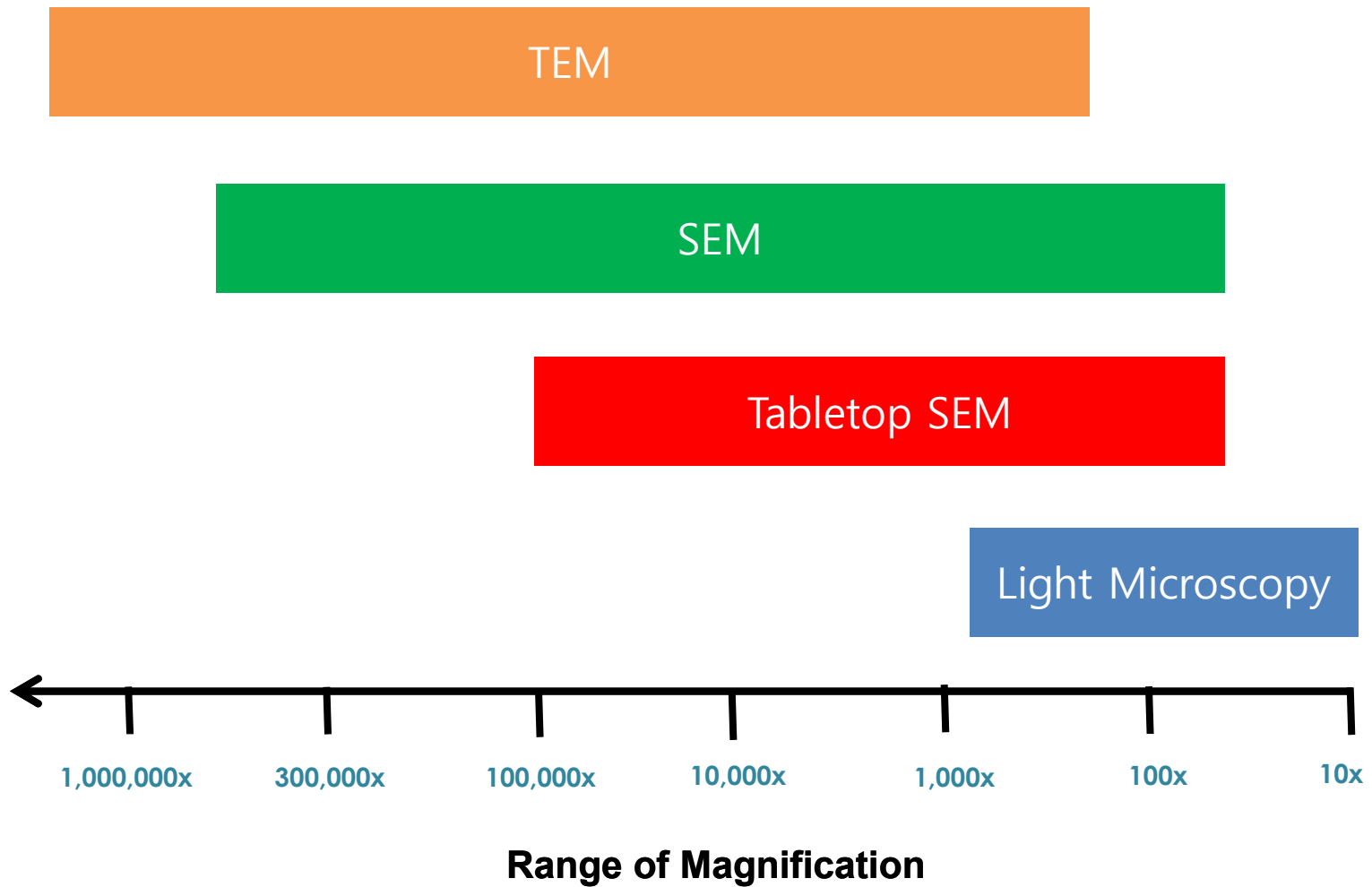
### ✓ SEM

- > Normal-SEM
- > (FE-SEM Cold, Schottky)
- > FIB(Focus Ion beam)

### ✓ TEM

### 3 Product Segment

---



## 4 광학현미경

### Why Microscopy?

유리렌즈를 사용하며, 광원(빛)은 가시광선을 이용한다. 따라서 칼라로 관찰이 가능하다.

광원으로부터 나오는 빛을 집속렌즈가 빛을 모아서 시료에 조사하면 대물렌즈에서 일차확대상을 만든 후 대안렌즈에서 최종 배율(확대된상)을 결정하여 눈으로 관찰할 수 있게된다.

대안렌즈는 대개 10배의 배율을 갖고, 대물렌즈는 보통 4, 10, 25, 40, 100배 렌즈 중에서 선택을 할 수 있으므로 만일 10배의 대물렌즈로 시료를 관찰한다면 최종 관찰배율은  $10 \times 10 = 100$  즉 100배의 배율이 된다.

분석목적 및 기법에 따라 생물현미경, 실체현미경, 공구·측정현미경, 금속현미경, 디지털현미경, 레이저현미경 등이 있다.

| 구분            | 내용                                                                                                                                                                                                  | 비고             |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Source        | Light(빛)                                                                                                                                                                                            | 가시광선           |
| Resolution    | 1 $\mu$ m ~                                                                                                                                                                                         | 파장 : 200~750nm |
| Magnification | 10x ~ 1,000x                                                                                                                                                                                        | 렌즈교체 방식        |
| Strength (강점) | <ol style="list-style-type: none"><li>1. 실시간 관찰이 가능 (샘플준비 시간 단축)</li><li>2. 샘플의 전처리가 필요 없음.</li><li>3. 샘플 크기에 제약이 적음.</li><li>4. 소모품이 없음 (렌즈외)</li><li>5. S/W 를 통한 다양한(3D 이미지) 분석(옵션)</li></ol>     |                |
| Weakness (단점) | <ol style="list-style-type: none"><li>1. EM에 비하여 분해능 및 배율에 한계</li><li>2. 표면 확대관찰 기법만 가능 (성분분석외)</li><li>3. 지속적인 검교정 필요.</li><li>4. 분석 샘플 종류에 따른 현미경 구현</li><li>5. 초점심도가 깊지 않아 단차 샘플 분석 제한</li></ol> |                |
| Price         | 저가 : 수십만~1,000만                                                                                                                                                                                     | 고가 : 3천~1.5억   |



# 5 전자현미경 ( I - Mini-SEM)

## Why Tabletop Mini-SEM?

일반 전자현미경과 동일한 전자기 렌즈를 사용하며, 전자 빔을 이용하여 진공상태의 Chamber 에 장착된 샘플을 주사하여 반사된 전자를 이미지로 변환하여 관찰하는 전자현미경 이다.

소형으로 제작되어 Compact 한 디자인과 손쉬운 기능 구성으로 다양한 사용자들이 공동으로 쓸 수 있도록 개발된 보급형 SEM 이다.

최대 10 만배 까지 관찰 가능하여 광학현미경과 일반 전자현미경의 Middle 급 Line-up 구성으로 사용할 수 있는 Application 이 다양하며 합리적인 가격구성으로 구매비용 부담해소와 빠른 시료분석이 요구되는 시장에 적합하다.

또한 부가적으로 EDS (Energy Dispersive x-ray Spectrometer) 장착이 가능하여 시료 표면의 성분분석(정성 · 정량)가능하다

| 구분            | 내용                                                                                                                                   | 비고             |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Source        | Tungsten Filament                                                                                                                    | 전자선            |
| Resolution    | 5~15nm                                                                                                                               | 파장 : 200~750nm |
| Magnification | 20x ~ 100,000x                                                                                                                       | 렌즈(고정형)        |
| Strength (강점) | 1. 일반전자현미경에 비해 저렴한 가격 구성<br>2. 가장 많이 사용하는 배울 영역대 구성<br>3. 전문 O/P 없이 다양한 사용자 공동사용<br>4. 신속한(실시간) 시료분석 가능<br>5. EDS 를 장착으로 샘플의 원소분석 가능 |                |
| Weakness (단점) | 1. 광학현미경에 비해 높은 가격대로 비용부담.<br>2. 시료 전처리 필요 (코팅, 폴리싱외)<br>3. 샘플 파괴 분석(Cutting, Milling ..)<br>4. 지속적인 소모품 교체 (필라멘트외)                  |                |
| Price         | SEM : 5000~7,000만                                                                                                                    | EDS : 4천~6천    |



## 6 전자현미경 (II- Normal/FE-SEM)

### Why SEM?

일반 전자현미경은 두 종류로 구분된다.

Tungsten Filament를 사용하는 Normal-SEM(열전자 방출형 SEM) 과 Field Emission (전계 방사형) FE-SEM 으로 구분된다.

SEM 종류의 가장 큰 차이는 Beam source 이다.

가장 많이 사용하는 Filament로 텅스텐 선을 V자로 구부린 3극 Hair pin type을 사용한다.  
W filament의 Cathode에 - Bias를 가해 2700K정도 가열되면 열 전자를 발생시킨다.  
생산단가가 낮고 많은 열 전자를 발생시킨다. Beam안정에 유리하다.



Field Emission Gun은 금속 표면에 강력한 전기장이 형성되었을 때 방사되어 나오는 전자 빔을 이용한다.

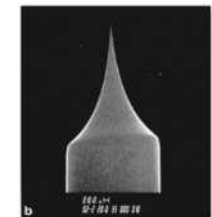
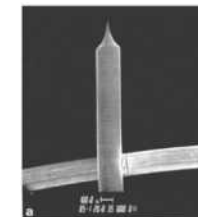
금속 표면에 강력한 전기장이 걸리면 전자가 진공 쪽으로 터널링 되어 나가는 양이 생긴다.

아주 강한 전기장을 형성시키기 위하여 날카로운 Tip에 고전압을 걸어 전자를 방출시킨다.

Field Emission Gun은 열전자 전자총에 비해 휘도가 100~1000배 높으며

Crossover diameter도 50~100A정도로 작아서 SEM resolution을 크게 향상시킨다.

수명이 길지만 초고진공( $10^{-8}$ pa)을 필요로 한다.



| 구분                 | W filament                    | Field emission Cold type | Field emission Schottky type |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Electron source 크기 | 30~100 um                     | 5~10nm                   | 5~10nm                       |
| Current stability  | 0.5% or less<br>1% or less/hr | 5%<br>5% or more/15min   | 2%<br>5% or more/15min       |
| 수명                 | 50~100 hr                     | 2~3year or more          | 1year or more                |
| 가열온도               | 2800k                         | 1400k                    | 1800k                        |
| 진공도                | <10e-3Pa (10e-5 torr)         | <10e-7Pa (10e-9 torr)    |                              |
| 가격                 | 20만원 내외                       | 1500만원                   | 1200만원                       |



# 7 전자현미경 (Ⅱ- Normal/FE-SEM)

## Why SEM?

| 구분            | SEM                                                                                | FE-SEM                                                                              |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Product       |  |  |
| Resolution    | 3.0 ~ 3.5nm                                                                        | 0.5nm~1.5nm                                                                         |
| Beam source   | Tungsten Filament                                                                  | Field Emission Filament (Schottky)                                                  |
| Magnification | 10x ~ 300,000x                                                                     | 10x ~ 1,000,000x                                                                    |
| Accelerating  | 0.5~30kV                                                                           | 0.1 ~ 30kV                                                                          |
| Probe Current | 수십nA~100uA                                                                         | 1pA ~ 200nA                                                                         |
| Vacuum        | High Vacuum<br>초기진공 : 10~20분                                                       | High vacuum<br>초기진공 : 1시간~3시간                                                       |
| Room Size     | 2~3평<br>* 설치장소 및 환경 중요.                                                            | 3~4평<br>* 설치장소 및 환경 중요.                                                             |

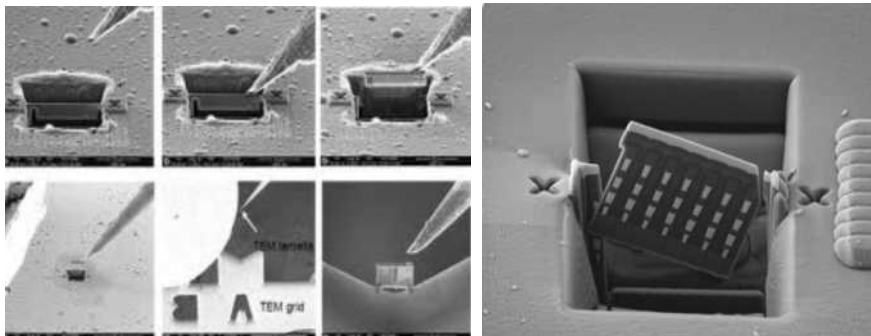
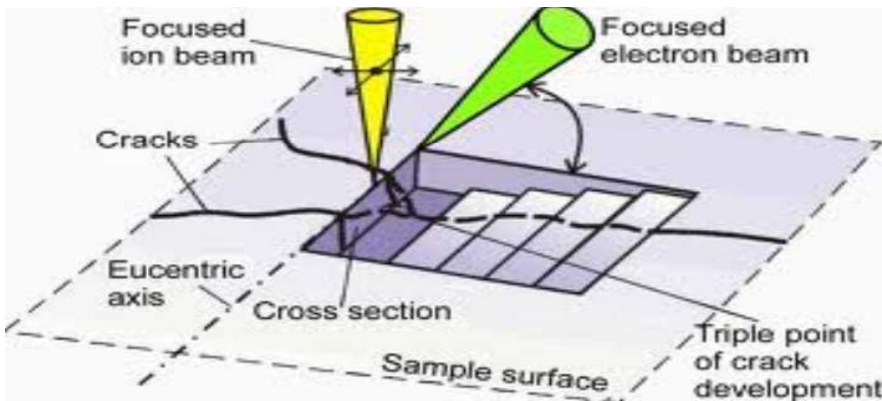
## 8 전자현미경 (Ⅲ- FIB)

### Why FIB?

FIB(Focus Ion Beam) 집속 이온 빔 장비로 샘플의 특정 부분을 Ga(갈륨) Ion Gun을 통해 집속하여 샘플 가공, 절단 등을 하는 장비이다.

FE-SEM 구조에 Ga Gun 과 Manipulator 시스템이 통합된 장비로써 일반적으로 TEM 시편 제작에 큰 목적을 두고 있다.

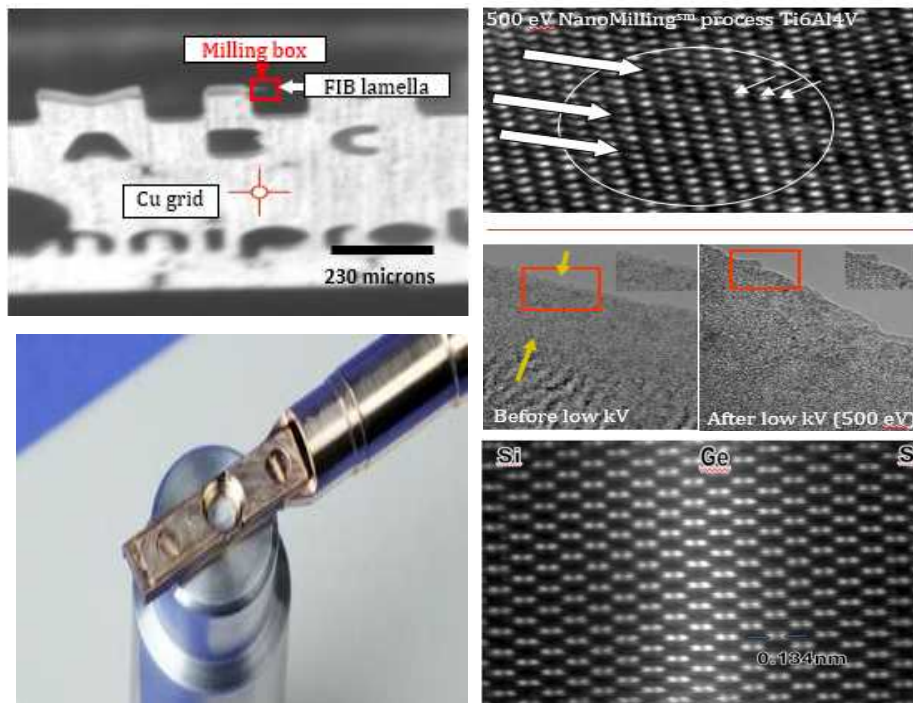
수십 nm에서 1~300백 나노 사이즈로 얇게 시편을 Cutting 하여 TEM Cu Grid 에 접합(Pt) 을 한다. (반도체 및 TEM 시편제작 센터 보유)



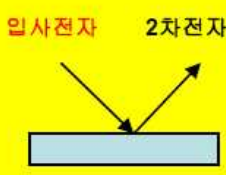
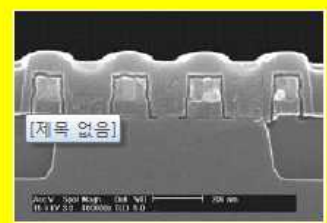
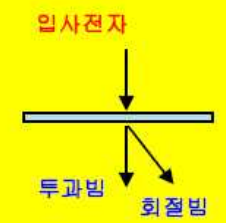
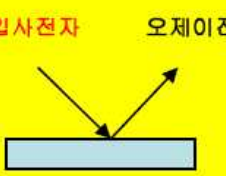
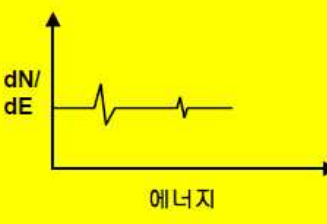
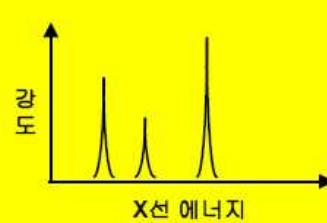
# 9 전자현미경 (IV- TEM)

## Why TEM?

TEM (Transmission Electron Microscope) 은 투과전자현미경으로써 전자 빔을 집속하여 시료에 주사하여 시료를 통과한 전자선을 전자렌즈에 의해 확대하여 상을 얻는 장비이다. 시료를 전자가 투과하기 때문에 시료를 얇게 하여야 하며, 전자선의 회절상을 관찰할 수 있으며, 시료의 결정구조를 분석할 수 있다. TEM 샘플을 제작하기 위한 전처리 절차는 매우 복잡하다. 최종 시료를 20nm~100nm 급까지 Milling 하는 것이 관건이며 FIB가 개발되기 전까지는 Disk cutter, Punchm Electro polisher, Grinder(specimen, dimping) 등의 번거로운 시료 제작과정이 필요했다. 전자현미경에 비해 시료를 투과하여 원자의 구조를 관찰하는 목적으로 높은 가속전압(50~300kV)로 구성되어 있으며 최근에는 300Kv 의 투과전자현미경이 각광을 받고 있다.



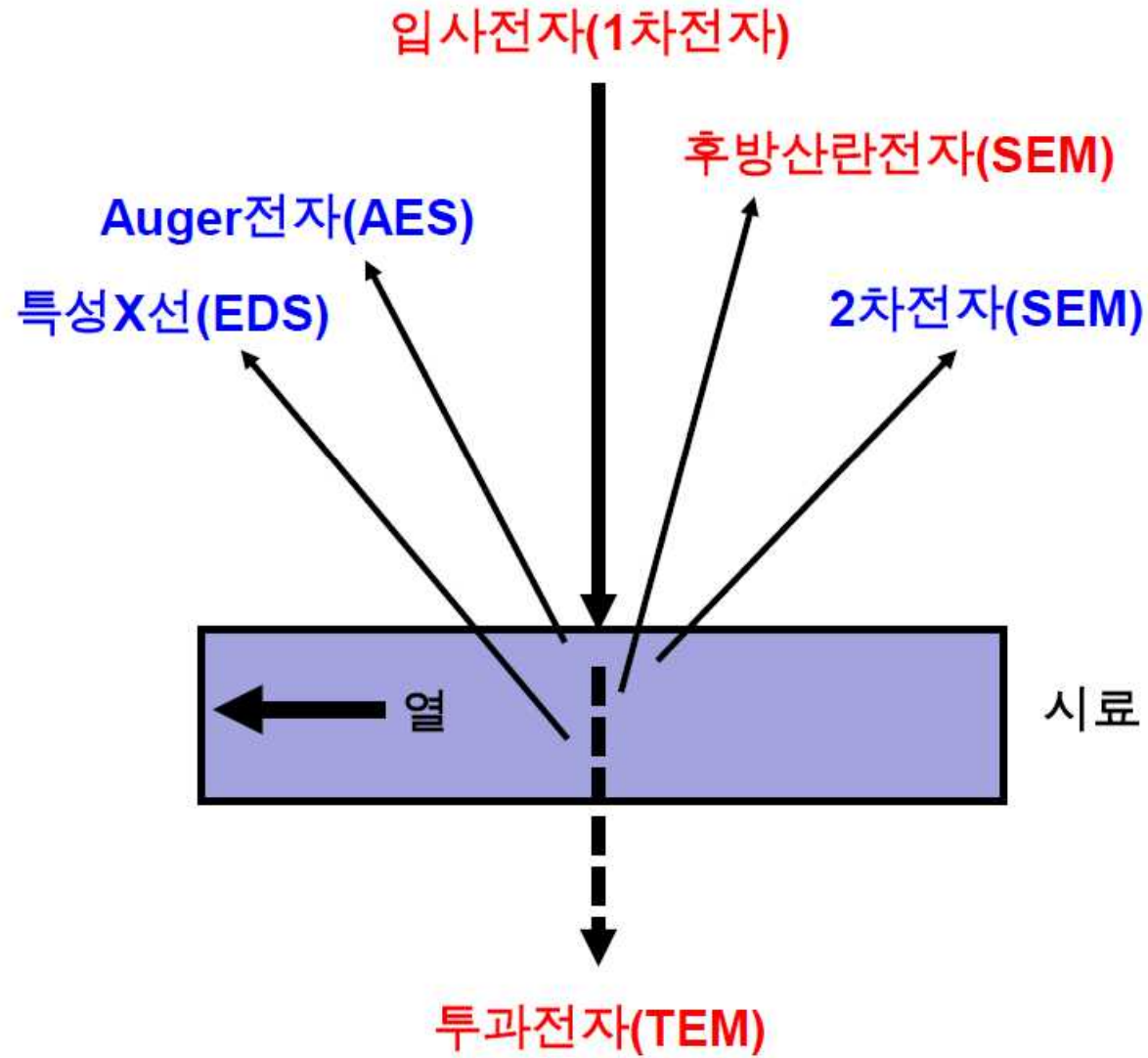
# 10 결론. 전자 빔 분석기술의 원리와 특징

| 분석기법                                                  | 원리                                                                                  | 측정 방법                                                                                                        | 측정 Data                                                                               | 측정 항목                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 주사전자현미경<br>(Scanning Electron Microscopy)             |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>•시료 표면에 1~30 kV의 전자를 입사시켜 이로부터 나오는 2차전자를 검출</li> </ul>                |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>•미세한 표면, 단면의 형상, CD 측정</li> <li>•분해능 : ~1 nm (FEG)</li> </ul>                                            |
| 투과전자현미경<br>(Transmission Electron Microscopy)         |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>•100-1000 kV의 전자를 시료에 투과시켜 원자 상호간의 작용에 의한 흡수와 회절되는 전자를 검출함</li> </ul> |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>•미세한 결정결함, 결정구조, 결정입자의 크기, 원자 Lattice의 관찰</li> <li>•분해능 : 2 Å</li> </ul>                                 |
| 오제이전자분광법<br>(Auger Electron Spectroscopy)             |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•시료에 전자선을 입사시켜 여기 방출되는 원소 특유의 오제이전자의 에너지의 양을 측정</li> </ul>            |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•재료의 조성과 불순물의 분석</li> <li>•Sputtering을 통해 깊이 방향 분포 분석, 표면분석에 주로 사용</li> <li>•Small probe size</li> </ul> |
| 에너지분산 X선분광법<br>(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>•시료에 수 십, 수 백 keV의 전자빔을 입사시켜 방출되는 원소 고유의 특성X선을 검출</li> </ul>          |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>•조성과 불순물 분석</li> <li>•공간분해능 : 수 십 nm @ SEM, ~1 nm @ TEM</li> <li>•Better for several atomic %</li> </ul> |

# **Scanning Electron Microscopy**



# 11 전자와 고체의 상호작용





## 12 주사전자현미경(SEM)의 개요

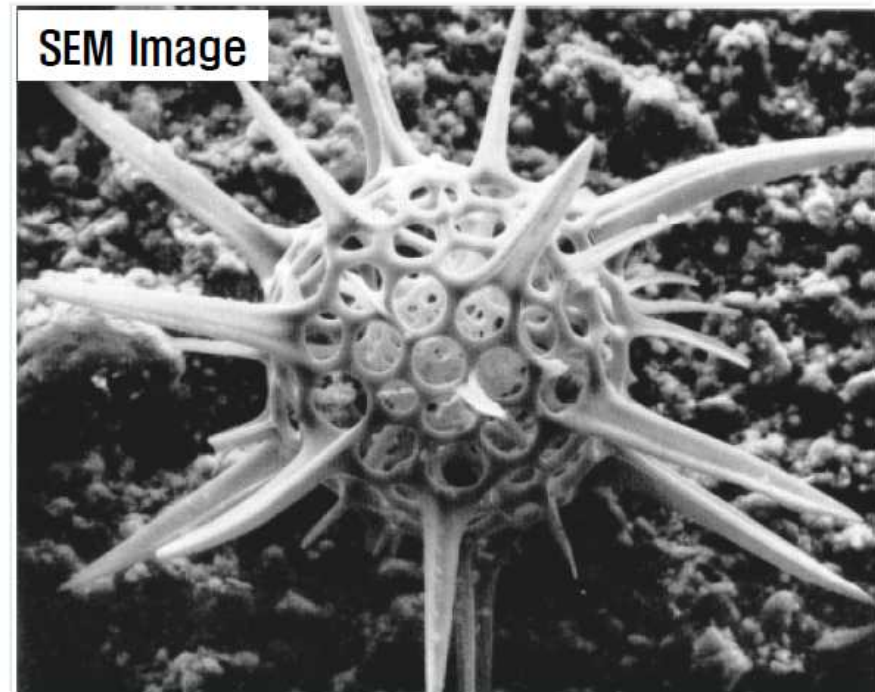
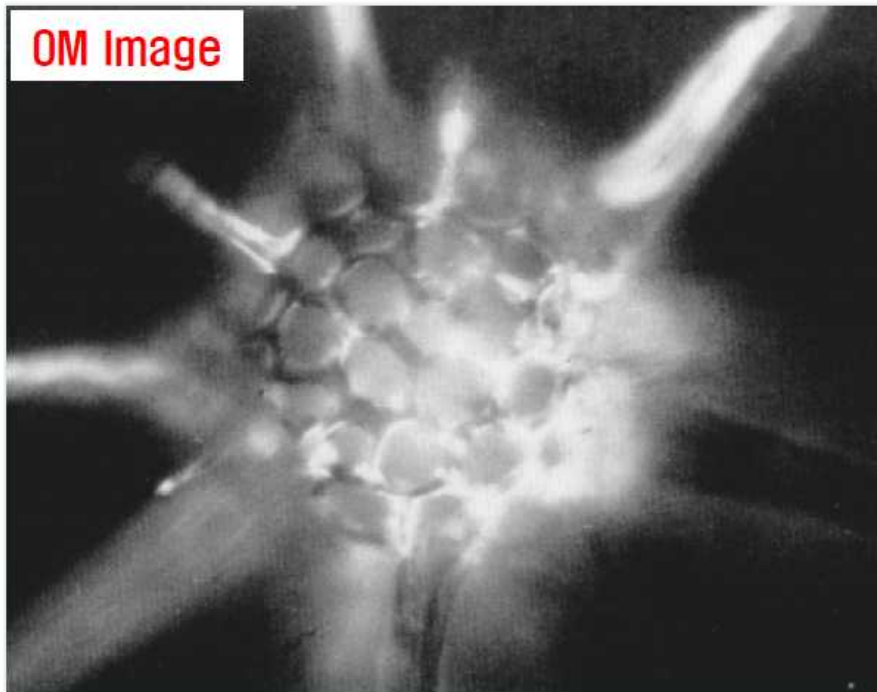
---

- 광학현미경(Optical Microscope)

- 분해능이 좋지 않음
- 초점심도가 좋지 않음

- 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)

- 분해능이 우수
- 초점심도가 좋음



# 13 주사전자현미경(SEM) 분석의 개요 : 장치



- SE (Secondary Electron, 2차 전자)

: 입사 전자 빔이 시편과 충돌하여 전자 빔과 시편의 비 탄성 충돌에 의해 시편에서 발생하는 50eV 이하의 에너지를 갖는 전자

- BSE (Backscattered Electron, 후방산란 전자)

: 입사 전자 빔이 시편과 충돌하여 입사전자가 후방으로 방출되는 전자



# 14 주사전자현미경(SEM)의 개요

## 분석 특징 및 분석 기법

- 표면 형상 및 구조의 관찰
- SE와 BSE 영상
- EDS 원소분석  
(Point, Line, Mapping)

## 분석능

- SEM의 공간분해능: ~1 nm
- EDS 원소 분석의 검출 범위  
: C-U

## 배율

- SEM의 배율

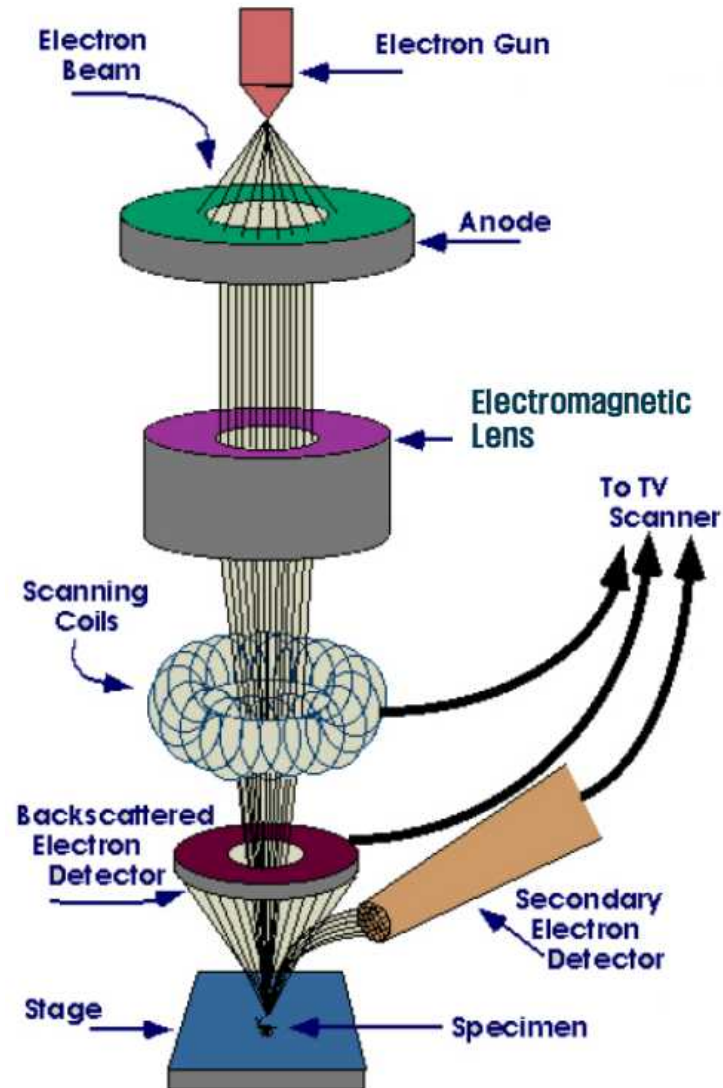
$$M = L_{\text{CRT}} / L_{\text{Specimen}}$$

재료 및 나노소자의 **형상 및 형태 관찰**

미세 Particle 및 오염물질의 **위치 추적 및 형상 분석**

EDS를 이용한 **물질 및 박막의 조성 분석**

# 15 주사전자현미경(SEM) 분석의 개요 : 장치



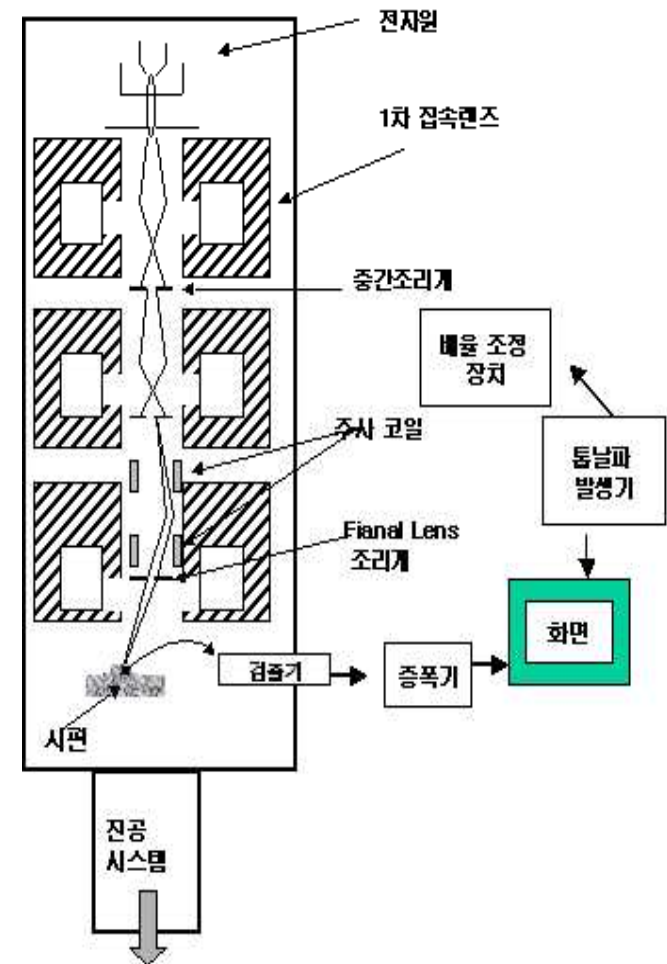
# 16 전자렌즈계

1) 주사전자 현미경에서의 고 분해능은 시편에 조사하는 전자 빔의 사이즈를 얼마나 작게 줄일 수 있는지가 관건

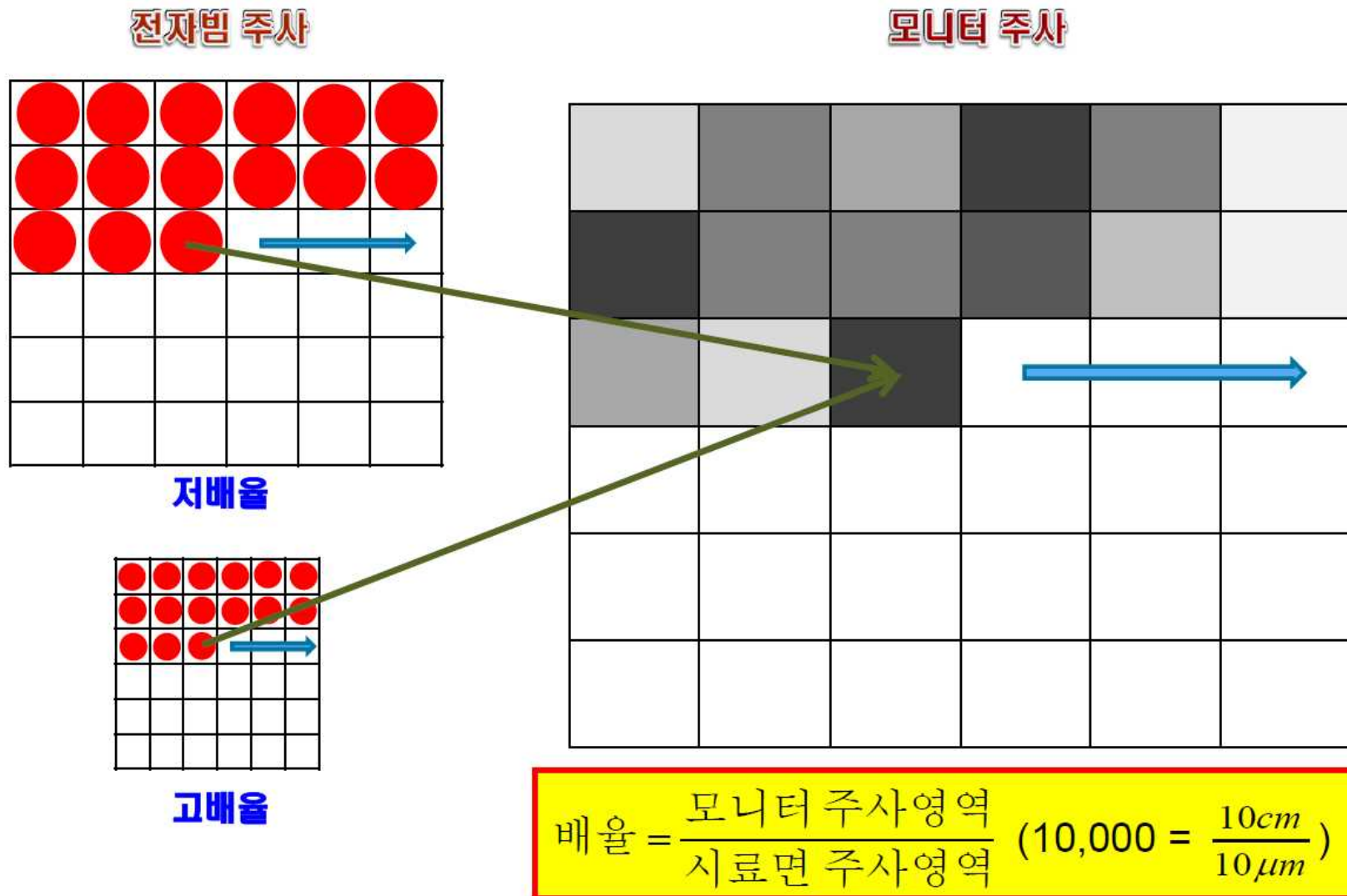
## 2) ELECTRON LENS

- Condenser Lens
  - Electron gun에서 형성된 crossover를 줄이는 역할
  - Spot size의 조절을 담당
- Objective Lens
  - Probe crossover의 위치를 광축에 따라 변화
  - Image를 focusing 하는 역할

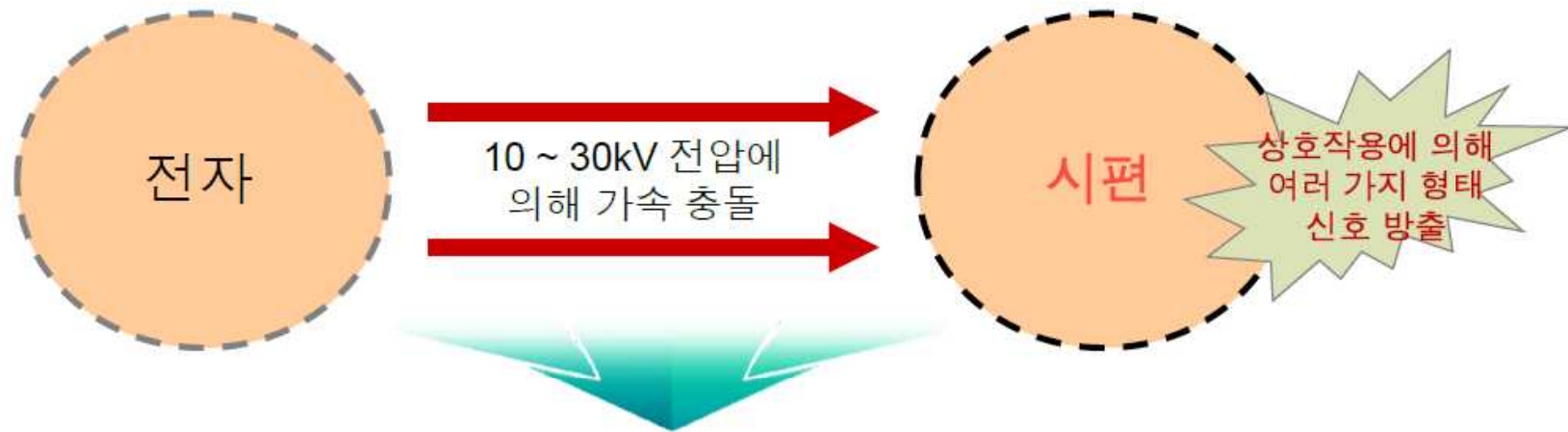
- 전자선을 발생시키는 전자원
- 전자선을 제어하는 렌즈시스템
- 시편 위에 조사 영역을 결정하여 배율을 결정하는 Scan Coil
- 비점수차를 제거하는 Stigmator
- 시편으로부터 얻어지는 Signal을 수집하는 Detector
- Detector로 얻은 정보를 보여주는 CRT



# 17 주사전자현미경(SEM)의 배율확대 원리

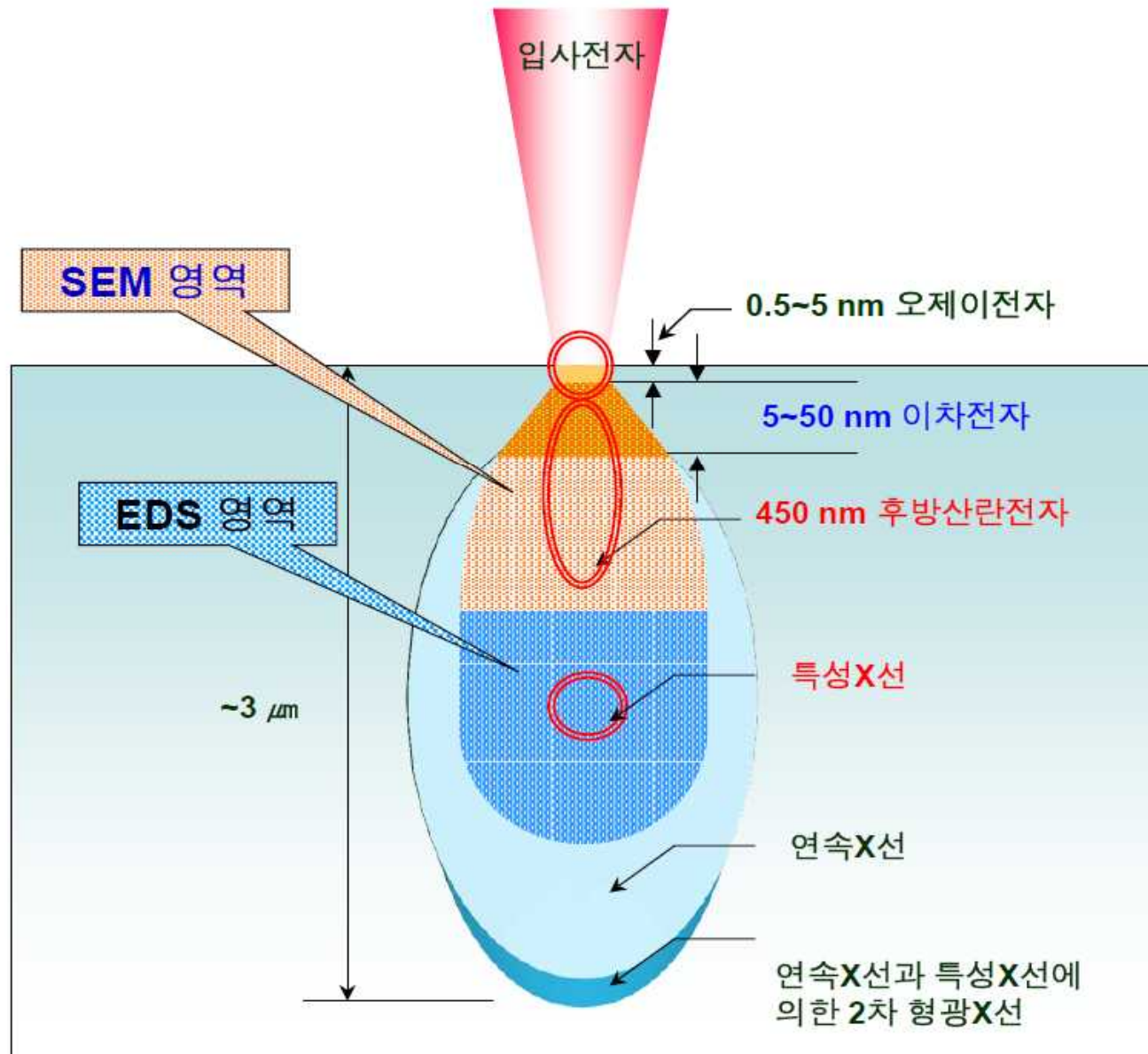


## 18 상호작용 부피와 신호



- 1 전자 속도·시편 밀도에 따라 시편내 수  $\mu\text{m}$ 까지 침투
- 2 시편 표면에 입사되는 전자빔의 직경이 매우 작아도 전자들은 시편에 입사된 후 시편내의 원자들과 상호작용
- 3 전자의 에너지를 잃을 때까지 임의의 방향으로 산란되어 분산

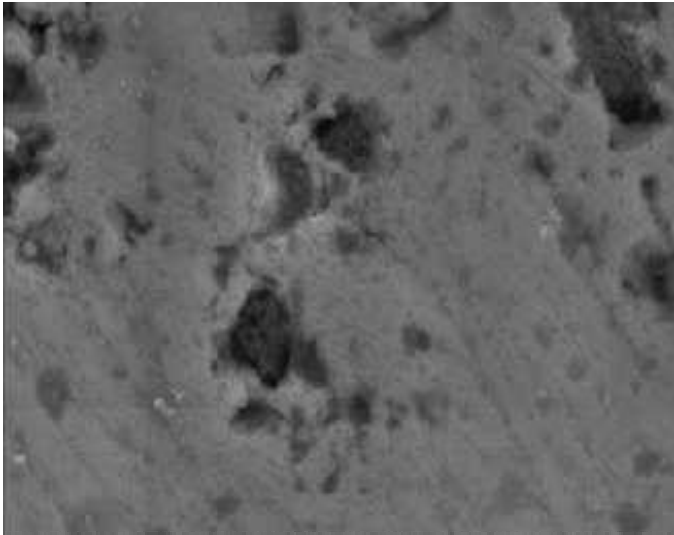
# 19 상호작용 부피와 신호





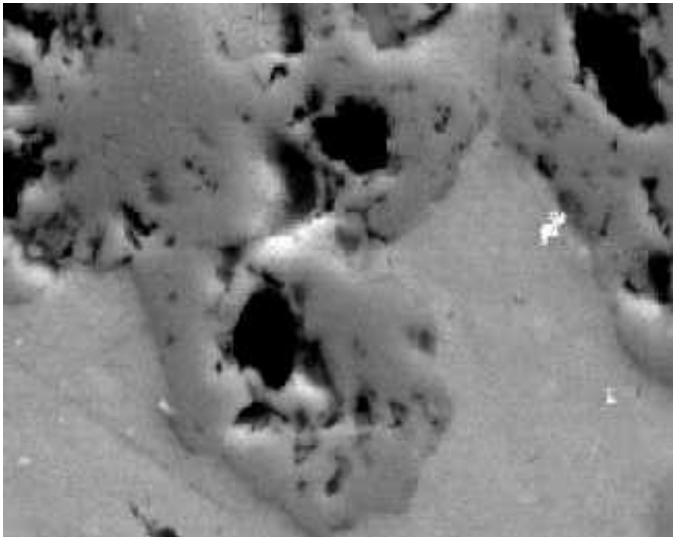
## 20 SE / BSE Detector

---



### SE(2차 전자)

요철에 의한 정보로 이미지 형성 / 주로 표면형상 관찰로  
전체적인 이미지 구성에 가장 많이 사용

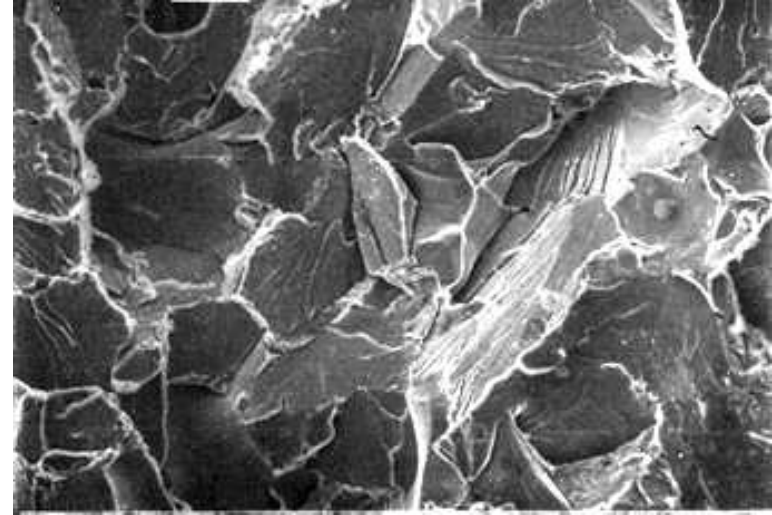
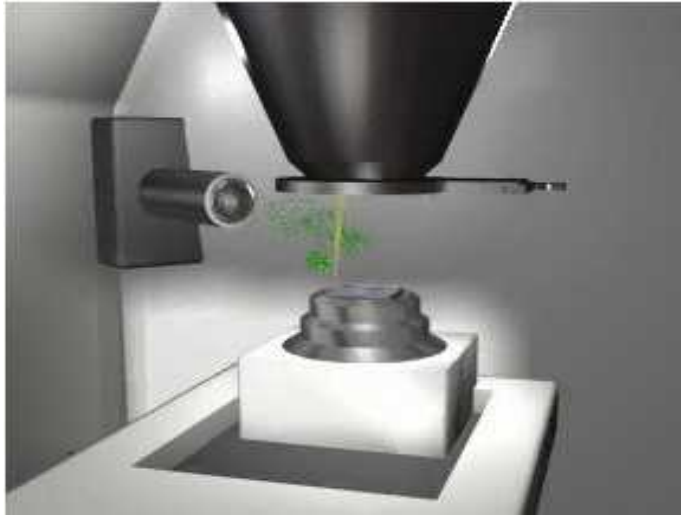


### BSE(후방산란 전자)

시편을 이루고 있는 성분(원자번호)에 의해 이미지가 형성되며  
원자번호 증가에 따라서 발생계수가 증하는 경향이 있음



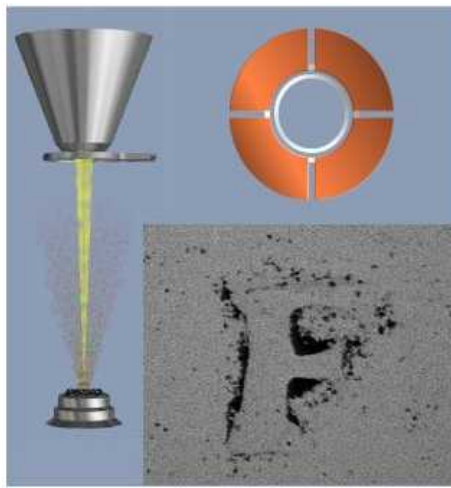
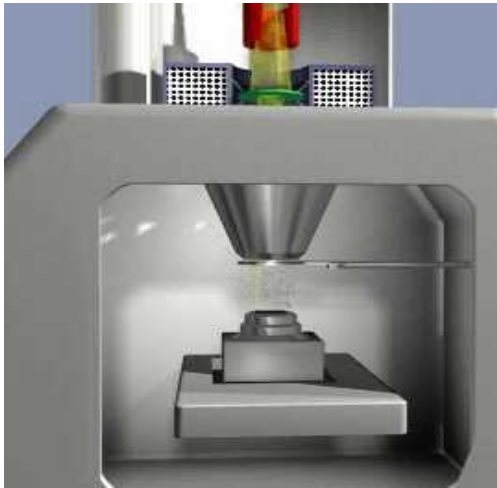
## 21 SE (Secondary Electron) Detector



- 2차 전자 ▷ 빔 전자와 비 탄성 충돌로 얻어진 에너지에 의해 시료 표면에서 발생하는 전자.
- 활성화된 빔 전자와 약하게 진동하는 금속 중의 상호작용으로 발생
- 빔 전자에 포함된 에너지 양은 시료의 전자에 비해 매우 작으므로 소량의 운동에너지 만이 2차 전자로 전이된다.
- 대부분의 SEM은 Everhart-Thomley (E-T) 검출기가 장착된다.

Scintillator 소재에 활성화된 전자가 충돌하여 광 양자를 발생시키고, 광 도파로 내부의 전반사를 통해 광전 증폭 관으로 이동한다. 광 양자는 빛의 형태를 취하므로 진공 환경과 석영 창을 통과할 수 있다. 광 양자는 양극에서 전류를 끌어들이고, 그들을 모아 검출 가능한 지점에서 전류로 되돌아 간다.

## 22 BSE (Backscattered Electron) Detector



입사전자의 일부는 Sample 원자핵의 전기장에 의해 후방으로 탄성산란을 일으킨다. 이것을 후방산란전자(BSE)라고 한다.

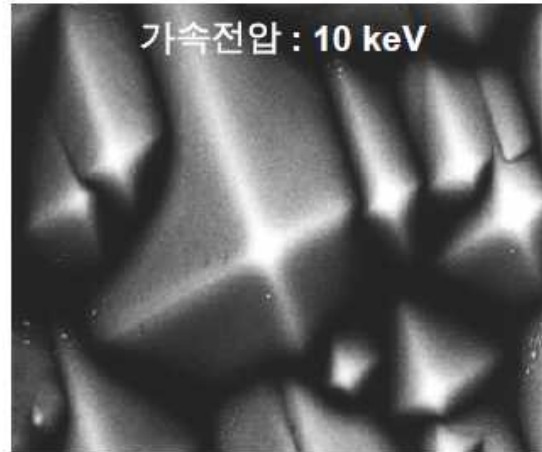


샘플로 보내졌다가 튀어나오는 전자들은 여러 가지 다양한 경로로 산란한다.

이를 전자의 탄성, 비 탄성 산란으로 구분한다.

- ❑ 1차 전자의 탄성 산란; 산란되는 전자가 운동량(momentum)은 변하지만 **에너지는 불변** 하거나 1eV 이내로 거의 없다. 운동량  $p = mv$  이고,  $m$ 은 변하지 않으므로 속도 벡터의 방향만 변한다. 산란 각도는 0-180°이며 5°정도의 전형적인 값을 갖는다.
- ❑ 탄성 산란은 음 전자와 양의 원자핵 사이에서 발생한다.
- ❑ 전자들 중 일부는 샘플 밖으로 튀어나올 정도로 산란 각이 큰 경우가 있으며 이것들이 후방산란 전자들이다.
- ❑ BSE detector로 검출한 이미지로 밝은 곳이 대부분 동이고, 어두운 곳이 알루미늄이다.
- ❑ 비 탄성 산란 운동 중 에너지는 원자 주변의 전자들로 전이되며, 활성화된 전자들에 포함 되어있던 **운동에너지는 줄어** 들게 된다.

## 23 | 가속전압(Accelerating Voltage)에 따른 영상의 변화



내부정보



표면정보

표면구조 관찰에서는  
낮은 가속전압이 유리

Accelerating Voltage

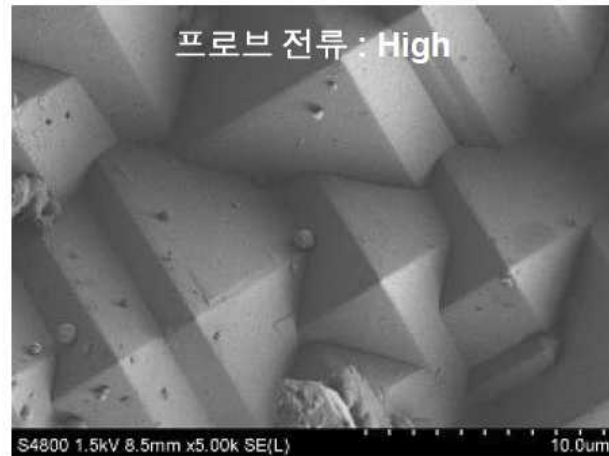
High

- 영상의 분해능 향상
- 표면구조의 선명도 저하
- 엣지효과 커짐
- 대전효과 커짐
- 빔손상이 커짐

Low

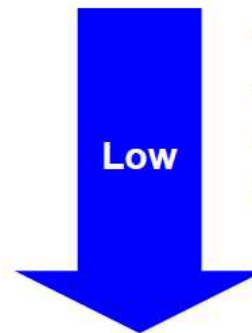
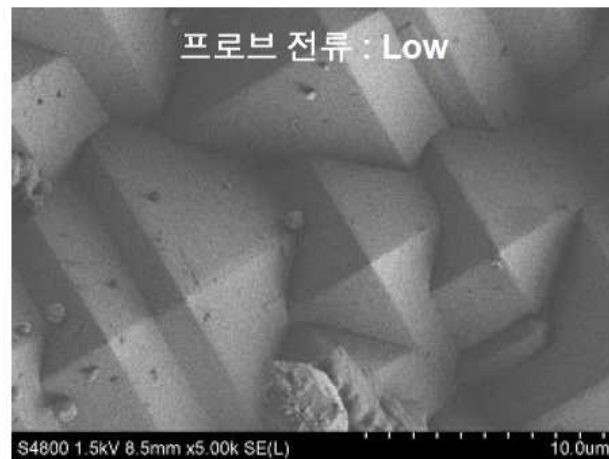
- 영상의 분해능 저하
- 표면구조의 선명도 향상
- 엣지효과 작아짐
- 대전효과 작아져서 부도체 관찰에 유리
- 빔손상이 줄어듦

## 24 | 프로브 전류(Probe Current)에 따른 영상의 변화



- 영상의 분해능 저하
- 이차전자 신호 증가
- S/N 비 증가하여 화질이 향상되고 부드러운 영상 관찰
- 빔손상이 커져서 시편이 손상되기 쉬움

Probe Current

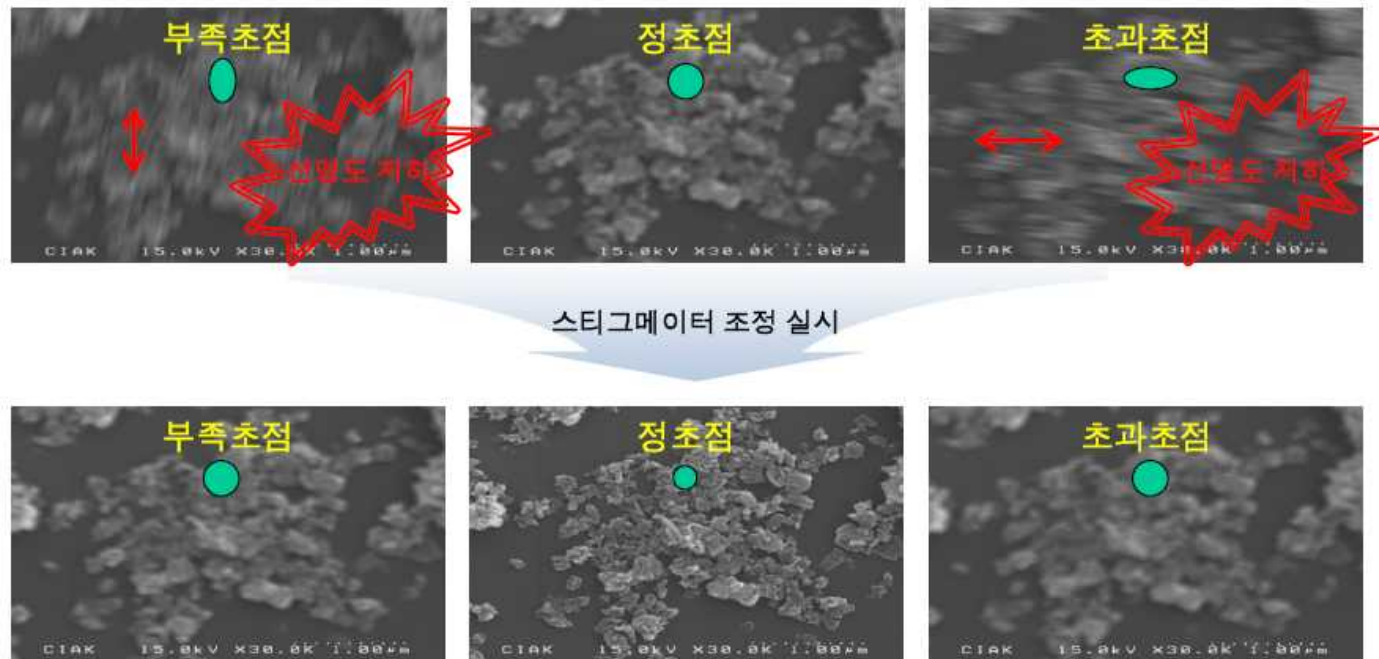
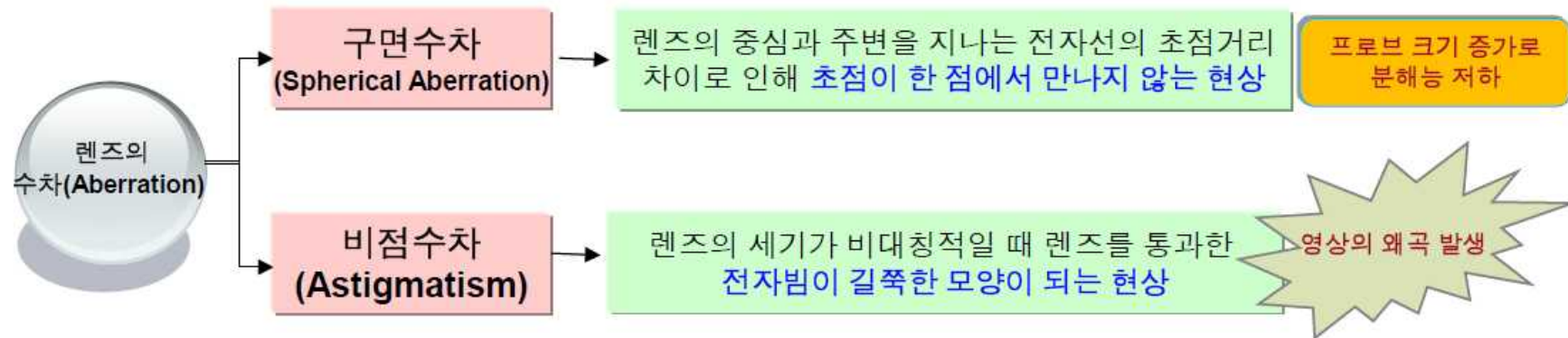


- 영상의 분해능 향상
- 이차전자 신호 감소
- S/N 비 감소하여 화질이 저하되고 거친 영상 관찰
- 빔손상 줄어들어 시편의 손상 감소

• 프로브 전류는 집속렌즈의 전류값 및 가속전압에 따라 변화

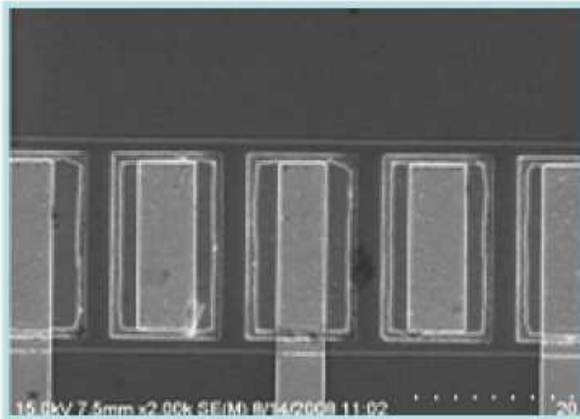


## 25 비점수차(Astigmatism)에 따른 영상의 왜곡

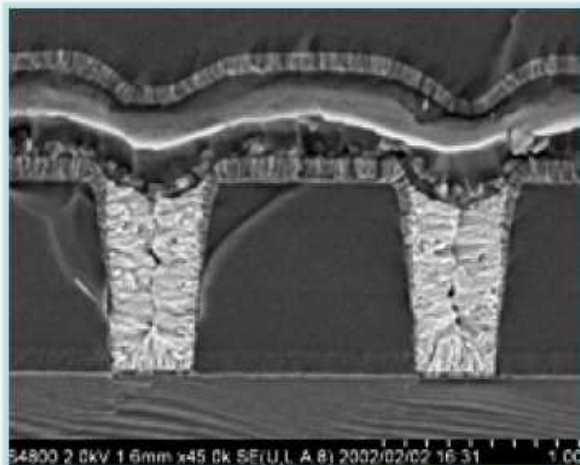
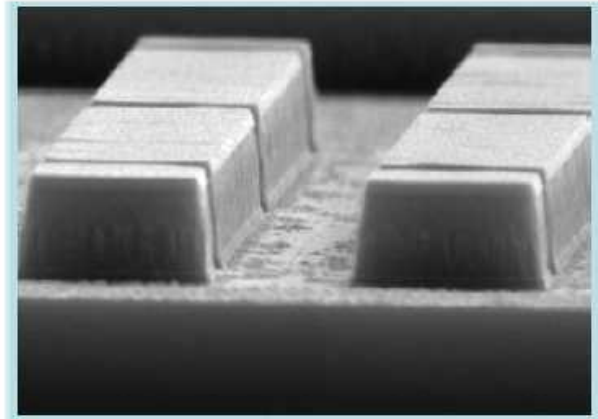
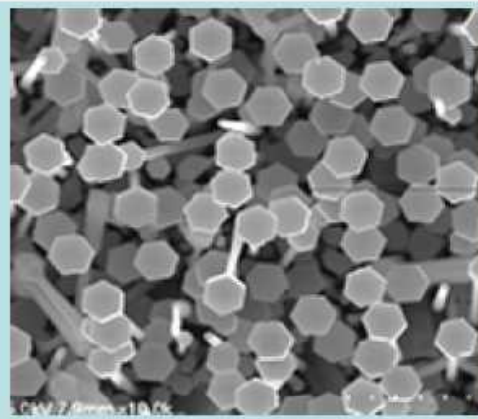


## 26 주사전자현미경(SEM)을 이용한 관찰

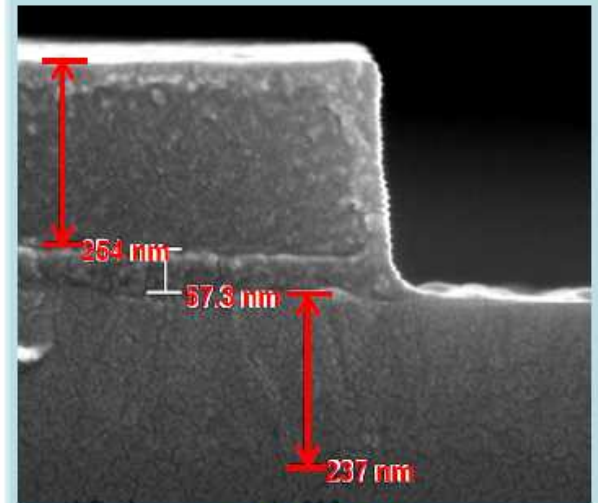
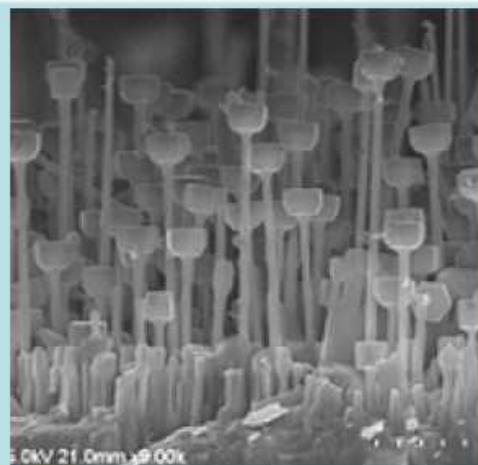
- 형상 관찰 및 크기 측정



표면 형상의 관찰



단면 구조의 관찰



두께의 측정

### Reference

1. 전자현미경의 원리 및 응용 (나노종합기술원 양준모 박사)
2. 주사전자현미경 분석과 X선 미세분석 (경남대학교 윤존도 교수)
3. SEM Product Images  
- Hitachi, JEOL, EMCRAFTS, FEI 社





**G**o together !  
**S**upreme position  
**E**ffective performance  
**M**eet needs

**지에스이엠**

| 팀장 유지택

경기도 수원시 영통구 신원로 306,  
 이노플렉스 1동 913호 (원천동)

**감사합니다**

TEL  
 FAX  
 Mobile  
 E-mail

031-8002-2225  
 031-8002-2226  
 010-4729-3391  
 gsem@gsem.biz