ANALYTICAL SCIENCE & TECHNOLOGY
(*Journal of the Korean Society of Analytical Sciences*)
Vol. 6, No. 2, 1993
Printed in the Republic of Korea

= 해 설 =

주사전자현미경의 기초 이론과 응용

김 도 향
포항공과대학 재료금속공학과

1. 서 론

과학기술이 발달함에 따라 물질의 분석에 있어서도 마이크로미터(μm) 혹은 마이크로미터 이하의 단위로 물질을 관찰, 분석하고 또한 성질을 규명해야 할 필요성이 점차 증대되고 있다. Scanning electron microscope(주사전자현미경, 이하 SEM으로 칭함)와 Electron probe microanalyzer(전자 탐침 미세 분석기, 이하 EPMA로 칭함)는 미세하게 형성된 전자 빔을 물질의 표면에 조사함으로써 물질 표면의 미소 부피에 대한 형태, 구조 및 성분 등에 대한 분석을 행할 수 있는 장비이다. 전자 빔이 물질의 표면에 조사되어 발생되는 신호(signal)는 전도 전자의 여기에 따른 2차 전자(secondary electron), 반사 전자(back scattered electron), 내각 전자의 추출에 의한 특성 X-선(charcteristic X-ray), 오제 전자(Auger electrons), 연속 X-선 스펙트럼(continuous X-ray spectrum), 광자(photon) 등을 들 수 있으며, 이와 같은 신호를 이용하여 물질 표면의 특성, 즉 표면 형상(surface topography), 결정학(crystallography), 조성 등에 관한 정보를 얻을 수 있게 된다. SEM의 경우 분석에 주로 이용되는 신호는 물질 표면의 형상(topography)에 따라 다르게 검출되는 2차 전자와 반사 전자이며, EPMA의 경우에는 전자와 분석 물질의 충돌에 의해 발생되는 특성 X-선을 이용하여 물질의 조성에 대해 정성 및 정량분석을 행한다. 특히 SEM과 EPMA는 Transmission electron microscope(투과전자현미경, TEM)에 비해서 시료의 준비가 훨씬 용이하며, 초점심도(depth of focus)가 매우 커서 파단면과 같은 표면 굴곡이 심한 구조나 복잡한 결정의 외형과 같은 입체적인 형체를 일정한 시야상에서 수십 배 혹은 수만 배의 높은 배율로 관찰이 가능하다. 또한 대물렌즈와 시료 사이에 비교적 넓은 공간이 있어 여러 종류의 검출기(Detector)의 설치가 가능하며, 검출된 신호를 브라운관에 재현하므로 화면의 콘트라스트 조절이 가능하고 여러 종류의 신호에 따라 다양한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 해설에서는 SEM 및 EPMA의 구조와 기본 원리 등 기초 이론에 중점을 두어 설명하였으며, 후반부에서 SEM 및 EPMA의 응용에 관해서 간략히 알아보기로 한다.

2. 구조와 기본 원리

SEM 및 EPMA는 실제적으로 상당히 유사한 분석장비이며 최근에는 대부분의 경우에 SEM과 EPMA를 한 설비에서 동시에 가능하도록 되어 있다. *Fig.* 1에 이와 같은 설비의 개략도를 나타내었다. 필라멘트(음극), 웨넬트 원통(Wehnelt cylinder), 양극 등으로 구성된 전자총(electron gun)에 의해서 발생, 가속된 전자는 경통(column)을 통과하면서 어퍼쳐(aperture), 집속렌즈(condensor lens) 및 대물렌즈(objective lens) 등에 의하여 차례로 축소되어 점차 가느다란 전자 빔을 형성하며, 최종적으로 시료에는 전자 탐침(electron probe)을 형성하며 조사되게 된다. 대물렌즈 부근에 설치된 주사 코일에 의해서 전자 빔의 행로를 굽힘으로써 전자 탐침이 시료 위를 주사하면서 지나가게 되고 이때 주사된 시료상의 각 점에서 발생되는 신호를 검출하여 미세 구조 및 조성에 관한 정보를 얻게 된다. *Fig.* 1에서 보듯이 2차 전자 검출기(secondary electron detector)와 특성 X-선 검출기(X-ray detector)는 모두 대물렌즈의 아래에 위치하고 있다. 특성 X-선 검출기에 의해 신호를 검출함으로써 물질 성분

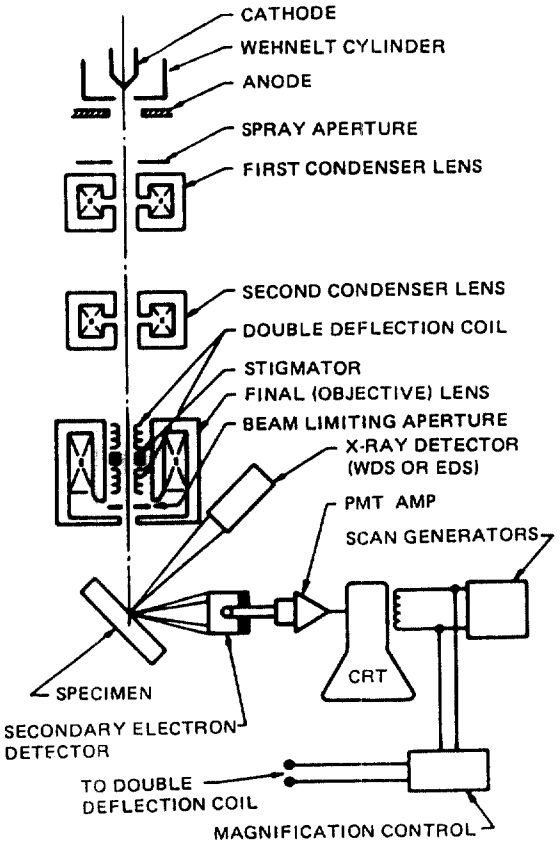

Fig. 1. SEM/EPMA에서 전자 빔 및 X-선 흐름의 개략도

의 정성 및 정량분석을 행할 수 있다

2. 1. 전자총(Electron gun)

Fig. 1에 보였듯이 SEM 및 EPMA의 기본 구조는 전자총, 전자기렌즈 및 어퍼쳐이며, 전자총에서는 열적 이온 방출 과정(thermionic emission process)에 의해서 시료에 조사되는 전자 빔이 발생되어진다. 즉 충분한 고온이 되면 음극 필라멘트의 전자는 방출을 위한 에너지 장벽(energy barrier, work function E_W)을 넘을 수 있게 되며, 이때 음극으로부터 전자의 방출이 이루어지게 된다. 전자총의 필라멘트로부터 방출되는 전류 밀도(emission current density)는 리차드슨 법칙(Richardson's law)에 의해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_c = A_c \cdot T^2 \cdot \exp(-E_w/Kt)\ A/cm^2 \qquad (1)$$

윗 식에서 A_c(A/cm^2K^2)는 재료의 특성에 따라 결정되는 상수이며, T(K)는 전자 방출 온도이다. 통상의 필라멘트는 끝 부분이 V형태를 하고 있으며 반지름은 대개 5~100μm 정도이다. 필라멘트 재료로 많이 사용되는 W나 LaB_6는 A값이 크고 E_W값이 낮기 때문에 방출 전류 밀도를 최적화할 수 있다. 일반적으로, 음극 필라멘트는 고전압(50kV)에 의해서 가열이 되게 되며 필라멘트로부터 방출된 전자는 음극과 양극 사이의 1000~50,000V의 전압에 의해서 가속되게 된다. 대표적인 전자총의 개략도를 *Fig.* 2에 나타내었다.

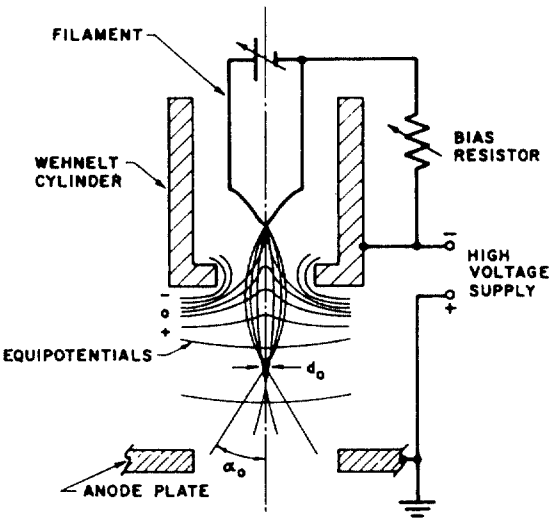

Fig. 2. SEM 전자총의 개략도

필라멘트 주위의 웨넬트 원통(Wehnelt cylinder)에는 음극 필라멘트에 대해 0~2,500V의 음전압이 걸리게 되며, 이로 인해 필라멘트로부터 방출된 전자는 지름 d_o의 교차점(crossover)에 모이게 된다. 교차점에서 전자 빔의 전류 밀도는 자기 렌즈에 수차가 존재하지 않는 경우 시료의 표면에 집중되어질 수 있는 전류를 의미하며, 이 전류 밀도 J_b는

$$J_b = \frac{i_b}{\pi(d_o/2)^2} \qquad (2)$$

로 나타내질 수 있으며, 여기서 i_b는 필라멘트로 측정된 전체 방출 전자 빔 전류이다. 이 빔 전류는 대개 15~

25μA 정도의 범위를 갖는다. 그러나 실제적으로는 전자빔의 최대 가능한 분산각(divergence angle)은 최종 렌즈의 수차에 의해서 결정되기 때문에 단위 면적당 전류밀도 J_b보다 중요한 인자는 단위 분산각에 대한 전류 밀도이며, 이를 전자 빔 밝기(electron beam brightness) β로 칭하며, 다음과 같이 정의한다.

$$\beta=\frac{\text{current}}{(\text{area})(\text{angle})}=\frac{4\cdot i}{\pi^2\cdot d^2\cdot\alpha}\ A/cm^2\cdot sr \qquad (3)$$

전자총의 경우 $i=i_b$, $\alpha=\alpha_b$, $d=d_0$이며, Langmuir에 의해서 최대 β값은

$$\beta=\frac{J_c\cdot e\cdot E_0}{\pi\cdot k\cdot T}\ A/cm^2\cdot sr \qquad (4)$$

로 주어지며 여기서 J_c는 음극 필라멘트 표면에서의 전류 밀도이며, E_0는 가속 전압, e는 전자의 전하, k는 볼쯔만 상수이다. 즉 $\beta=11{,}600J_cE_0/\pi T$($J_c$, V, E_0의 단위는 A/cm^2)으로 주어질 수 있으며, 여기서 전류 밀도는

$$J_b=\pi\beta\alpha_0^2 \qquad (5)$$

로 주어진다. 따라서, 최대 전류 밀도는

$$J_b=J_c\frac{e\cdot E_0\cdot\alpha_0^2}{k\cdot T} \qquad (6)$$

로 주어진다.

웨넬트 원통에 걸리는 바이어스 전압(bias voltage)을 조절함으로써 위 식(6)에 의해 주어지는 최대 전류 밀도에 근접한 값을 얻을 수 있다. 바이어스 전압이 너무 낮으면, 방출 전류는 커지게 되나 교차점의 지름이 커지게 되어 밝기가 떨어지게 되며, 너무 크게 되면 교차점을 통과하는 전자가 없게 되어 밝기가 없게 된다. 이와 같은 바이어스 전압의 효과를 *Fig.* 3에 나타냈으며,최적의 조건에서 웨넬트 원통에 걸리는 바이어스 전압이 조절되도록 해야 한다.

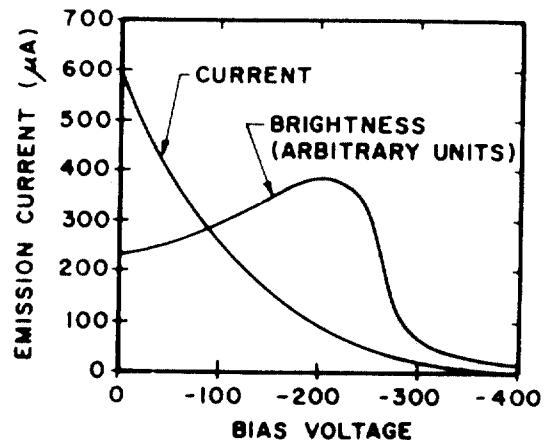

Fig. 3. 바이어스 전압과 방출 전류 변화에 따른 밝기의 변화

2. 2. 자기 렌즈

집적 렌즈(condensor lens)와 대물렌즈(objective lens or probe forming lens)는 교차점에 형성된 전자빔의 크기(d_0=10−50μm)를 점차 축소시켜서 최종적으로 5~200nm의 크기를 갖는 전자 빔이 시료 표면에 주사되도록 한다. 집적 렌즈는 하나 혹은 그 이상 갯수의 렌즈로 구성되어 있으며, 시료 표면에 조사되는 빔의 전류 크기를 조절하게 된다. 대물렌즈는 최종적으로 시료에 주사되는 전자 빔의 크기(spot size)를 조절하게 된다. 전자총 내 교차점에서의 직경 d_0의 전자 빔이 최종적으로 시료 표면 위의 직경 d의 주사 전자 탐침으로 축소 변화되어 가는 과정을 *Fig.* 4에 나타내었다. 렌즈의 수차가 없을 경우의 최대 전류 밀도는 위의 (6)에 의해 주어질 수 있으며 이에 의해 최종 탐침 크기(min. spot size) d를 구할 수 있다. 즉 일정한 가속전압 E_0하에서는 최종 탐침의 밝기도 β에 의해 주어질 수 있으며 이로부터 최종 탐침의 전류 밀도 J_A는

$$J_A=\pi\cdot\beta\cdot\alpha^2=J_c\frac{e\cdot E^0}{k\cdot T}\alpha^2 \qquad (7)$$

로 주어질 수 있다. 그러나 실제에는 최종 교차점에서 전자의 가우시안 분포(Gaussian distribution)는 무한 범위의 분포를 가정하고 있으므로 최종 탐침의 크기 d를 결정짓기 위해서는 최고 전류 밀도 J_A의 1/5 되는 전류 밀도까지의 범위를 갖는 탐침의 크기 d_k를

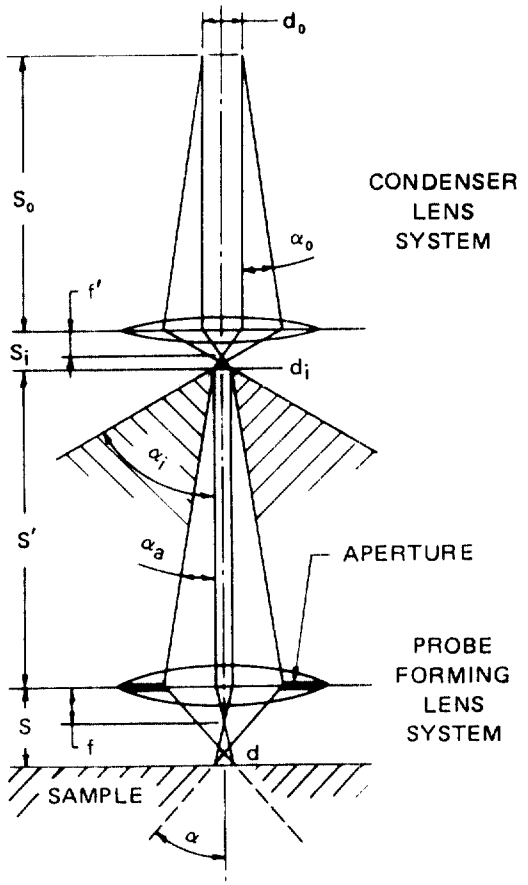

Fig. 4. SEM 경통(column)에서 전자 빔 흐름의 개략도

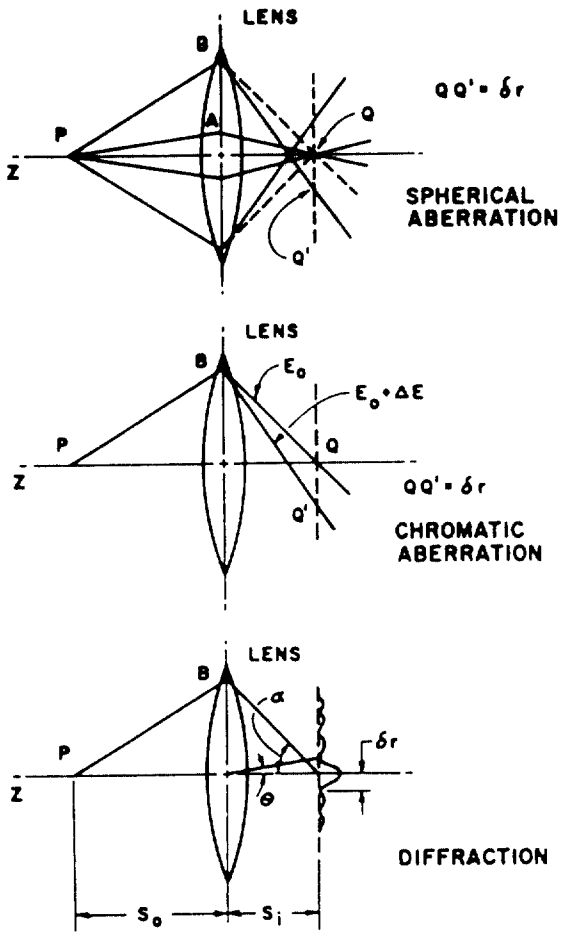

Fig. 5. 구면수차, 색수차, 회절수차를 설명해 주는 개략도

이용한다. 즉 d_k는

$$d_k=(i/B\cdot\alpha^2)^{1/2} \tag{8}$$

여기서 B는

$$B=0.62\frac{\pi e\cdot E_0}{4k\cdot T}J_c \tag{9}$$

로 주어진다. 즉 렌즈의 수차가 없다면, 일정한 탐침의 크기하에서 전류를 증가시키기 위해서는 분산각 α를 크게 하면 된다. 그러나 렌즈에는 여러 종류의 수차가 존재하므로, α는 될 수 있는 한 최소화하여야 하며, 따라서 주어진 탐침의 크기하에서는 가능한 전류가 제한되게 된다. 렌즈의 수차에는 구면수차(spherical aberration), 색수차(chromatic aberration), 회절수차(diffraction aberration) 등이 있으며, 이들의 개략적인 설명을 *Fig.* 5에 나타내었다. 구면수차 d_s, 색수차 d_c, 회절수차 d_d는 각기 다음 식에 의해 나타내어질 수 있다.

$$d_s=1/2\cdot c_s\cdot\alpha^3 \tag{10}$$

$$d_c=(\triangle E/E)\cdot C_c\cdot\alpha \tag{11}$$

$$d_d=1.22\lambda/\alpha \tag{12}$$

여기서 C_s는 구면수차계수, α는 분산각, C_c는 색수차,

△E는 가속 전자의 에너지 E가 단색광이 아니기 때문에 야기되는 에너지의 변동폭, λ는 가속 전자의 파장이다.

최종 탐침의 크기는 SEM의 분해능과 직접적인 관계를 가지며 위에서 예로 들은 여러 수차에 의해서 제한되게 된다. 위의 수차를 고려한 최종 탐침의 직경 d_p는 각 개별적인 수차에 의해 생기는 퍼진 초점의 직경의 제곱을 전부 합한 것의 제곱근과 같다고 본다. 즉

$$d_p=(d_k^2+d_s^2+d_c^2+d_d^2)^{1/2} \tag{13}$$

로 나타낼 수 있으며, 위의 (8), (10), (11), (12)식의 값을 대입하면

$$d_p^2=\{i/B+(1.22\lambda)^2\}\cdot(1/\alpha^2)+(1/2\cdot C_s)^2\alpha^6 +(\triangle E/E\cdot C_c)^2\cdot\alpha^2 \tag{14}$$

로 표시된다. 윗 식에서 얻어진 d_p에 관한 관계식을 α에 대해서 미분하면 최적의 α값을 구할 수 있을 것이며, 이때의 탐침의 크기는 최소가 될 것이며, 전류 밀도는 최대가 될 것이다. 식 (14)에서 처음 두 항을 고려하여 d_{min}, i_{max}, α_{opt}를 구하면 다음과 같다.

$$d_{min.}=1.29\cdot C_s^{1/4}\cdot\lambda^{3/4}\cdot[7.92(iT/J_c)\times10^9+1]^{3/8} \tag{15}$$

$$i_{max.}=1.26(J_c/T)[\frac{0.51\cdot d^{8/3}}{C_s^{2/3}\cdot\lambda^2}-1]10^{-19} \tag{16}$$

$$\alpha_{opt.}=(d/C_s)^{1/3} \tag{17}$$

Fig. 6은 식 (15)와 (16)에 의해 주어지는 전자 탐침 전류와 탐침의 크기를 EPMA 영역과 SEM 영역에서 비교하고 있다. W 필라멘트를 사용하였을 경우 빔 직경이 1μm일 때 얻어질 수 있는 최대 전류는 10 kV에서 10^{-6}A, 30kV에서 2×10^{-6}A이며, 이 값은 정성 X-선 분석을 행하기 위해 최소한으로 필요한 $1\sim5\times10^{-6}$A 보다는 큰 값이므로 만족하게 분석을 행할 수 있다. *Fig.* 6에 의하면 W 필라멘트를 사용하는 경우 최소 0.2μm의 전자 빔 크기하에서도 X-선 분석을 행할 수 있으며, 이와 같은 경우 다른 조건의 변화 없이 SEM에 의한 분석을 행할 수 있다.

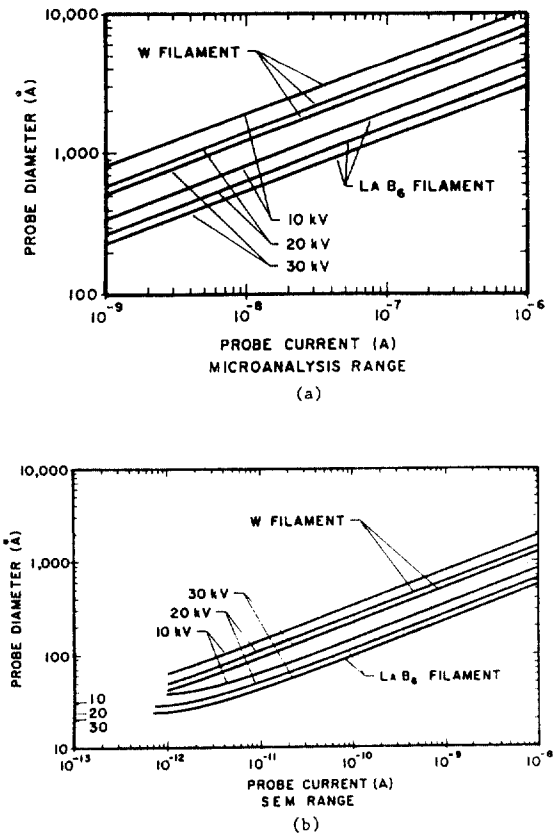

Fig. 6. 탐침 전류 i_{max}와 전자 빔 크기 d_{min}의 관계(각기 15kV, 30kV에서 작동되는 텅스텐 필라멘트 및 LaB_6 필라멘트의 경우를 고려하였음)

3. 신호의 종류와 검출

3. 1. 주사전자현미경(SEM)

위에서는 전자총에 의해 발생되는 전자가 분석 시료 표면에 전자 탐침이 되어 도달할 때까지의 과정을 살펴보았다. 본 절에서는 이와 같은 전자 탐침이 시료와 충돌하여 어떤 신호(signal)를 방출하고 그것이 어떻게 분석에 응용되는지 간략히 알아보기로 한다. 전자가 물질에 충돌하면 여러 종류의 신호가 발생하게 되며, 이로 인해 SEM에 의해 여러 종류의 분석이 가능하게 된다. 전자가 물질에 부딪히게 되면 탄성 산란(elastic scattering)과 비탄성 산란(inelsatic scattering)이 일

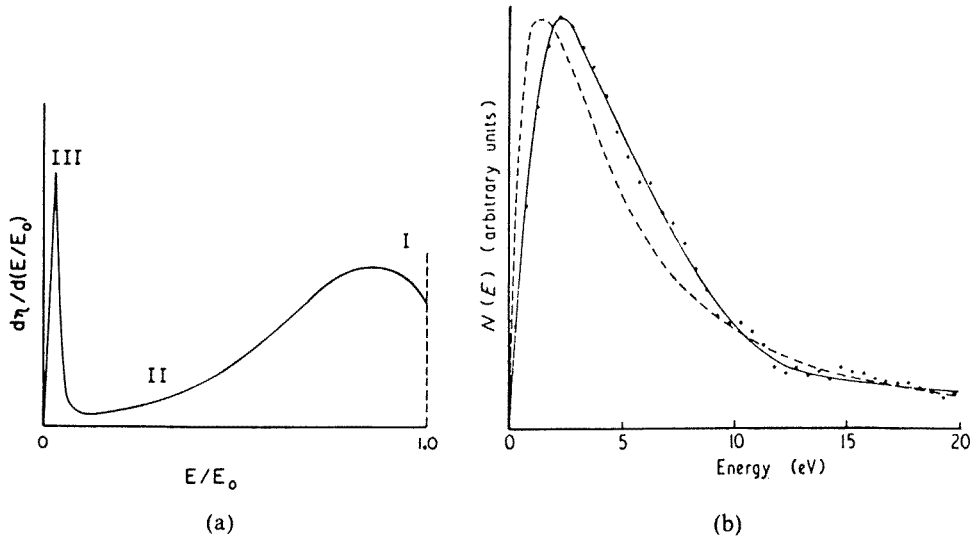

Fig. 7. (a) 전자 빔과 시료와의 충돌에 의해 발생되는 전자의 에너지 분포:반사전자의 에너지 분포는 Ⅰ, Ⅱ 영역이며, 2차전자의 에너지 분포는 Ⅲ영역이다;(b) 2차 전자의 에너지 분포: 측정치－실선, 계산치－점선

어나게 되며, 비탄성 산란에 의해서 2차 전자, 반사 전자, 특성 및 연속 X-선, 격자 진동에 의한 phonon 등이 발생되게 된다. 분석 물질과 충돌한 뒤, 발생되는 전자들의 에너지 분포를 0에서 E_0까지의 범위로 나타내면 *Fig.* 7과 같이 표현될 수 있다. *Fig.* 7에서 영역 Ⅰ은 비탄성 산란에 의해서 약 40% 이하의 에너지를 소실한 전자들로서 완만한 곡선으로 비교적 넓은 영역을 차지하고 있다. 대부분의 반사전자(back scattered electrons)는 이 영역에서 발견되어진다. 영역 Ⅰ보다는 적은 수의 전자지만 전자가 시료를 떠나기 전 40% 이상 대부분의 에너지를 소실하는 전자의 경우를 영역 Ⅱ에 나타냈으며, 그림의 곡선을 연장하면 에너지가 0인 반사 전자의 수는 0이 되게 된다. 그러나 실제로는 아주 낮은 에너지 영역, 약 50eV 이하의 에너지를 갖는 전자의 수는 *Fig.* 7에서 나타낸 것과 같이 급격하게 증가하게 되며, 영역 Ⅲ으로 표시되었다. 영역 Ⅲ의 전자는 2차 전자 방출에 의해 발생된 전자이며 이와 같이 50eV 이하의 에너지를 갖는 전자를 2차 전자로, 50eV 이상의 전자는 반사 전자로 정의된다. 2차 전자는 전자빔과 약하게 결합된 전도성 전자(conduction electrons)와의 충돌의 결과에 의해 방출되어지며, 충돌시 수 eV만이 전도성 전자에 전달됨으로써 *Fig.* 7

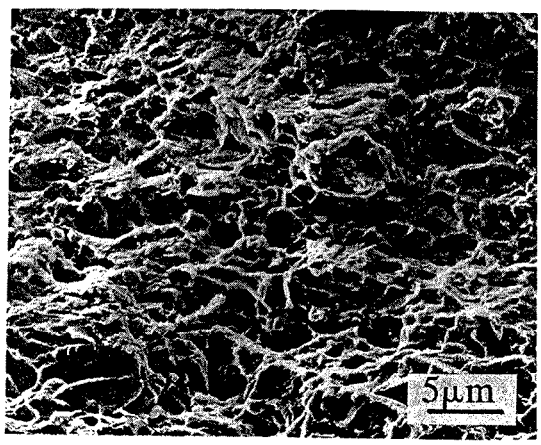

Fig. 8. Mg 합금 파면의 2차 전자상

(b)에서 보는 것처럼 3~5eV의 에너지 영역에서 최고의 분포를 나타내고 에너지가 증가함에 따라 분포가 급격히 줄어들게 된다. 또한 반사 전자의 방출량은 시료의 원자 번호가 증가함에 따라 증가하게 되나 2차 전자 계수는 시료의 종류에 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 반사 전자상의 밝기를 분석함으로써 원자 조성에 관한 정보를 얻을 수 있다. 위의 2절에서 d, i, α의 변수

에 의해 정의된 전자 빔은 시료와 충돌하여 탄성 및 비탄성 산란을 일으키게 되며, 검출이 가능한 2차 전자 및 반사 전자의 신호를 방출하게 된다. 이와 같은 신호는 검출기에 의해 검출되어 differential amplification, nonlinear amplification, Y-modulation, intensity contouring 등의 신호 처리 기술로 처리되어 특정한 상을 관찰할 수 있게 된다. 2차 전자상의 한 예로 *Fig.* 8은 Mg 합금 파면의 SEM상을 보여 주고 있다.

3. 2. 전자 탐침 미세 분석(EPMA)

전자가 시료의 원자와 충돌하여 비탄성 산란을 일으키게 되면 다음과 같은 두 가지 과정에 의해 X-선이 방출되게 된다. 즉, 원자핵 내의 정전기장으로 인해 입사 전자의 에너지가 감속되게 되며, 이로 인해 산란 후 입사 전자의 에너지값은 완전히 소실된 경우로부터 입사시 에너지값 사이에 분포하게 될 것이며, 이로 인해 연속적인 X-선 에너지의 스펙트럼이 형성되게 된다. 이와 같이 형성되는 X-선을 연속 X-선 혹은 bremsstrahlung(braking radiation)이라 칭한다. 또 다른 경우에는 입사 전자가 원자의 내각 전자를 충돌에 의해서 방출시키게 되면 외곽 궤도의 전자가 베이컨시(vacancy)를 채우게 되며, 이때 각 전자 궤도의 에너지에 따라 고유한 파장을 갖는 특정 에너지의 X-선이 방출되게 된다. 이와 같은 X-선은 물질에 따라 고유한 파장을 갖게 되며, 특성 X-선이라 칭한다. 위와 같은 시편에서 방출된 특성 X-선을 분석하여 물질 성분에 관한 정보를 얻는 분석방법이 EPMA이며, 이에는 분석 방법에 따라 두 종류가 있다. 즉, X-선의 파장을 분석하여 물질의 종류 및 조성을 분석하는 방법이 Wavelength Dispersive Spectroscopy(이하 WDS로 칭함)이며, 방출된 X-선의 에너지를 분석함으로써 물질을 분석하는 방법이 Energy Dispersive Spectroscopy(이하 EDS로 칭함)이다. 1960년대 후반 solid state detector가 처음 미세 성분 분석에 사용되기 전까지는 WDS 방법이 X-선의 분석을 위해 널리 사용되어졌다. X-선의 파장 분석에 의한 물질 조성의 분석 과정을 개략적으로 *Fig.* 9에 나타내었다. WDS 방법에서는 LiF, RaP 등의 분석 회절 결정(diffracting crystal)을 사용하며, 시료에서 발생된 X-선이 분석 결정에 입사되게 되면 $n\lambda=2d\sin\theta$(λ:입사 X-선의 파장, d:분석 결정의 면간 거리, θ:입사각)의 Bragg의 법칙을 만족하는 X-선은 회절되어 Proportional counter에 의해 검출되어 증폭된 뒤 single-channel analyzer(SCA)에 의해 펄스 신호로 되어 rate meter (RM) 혹은 recorder에 기록되게 된다. WDS에 의한 분석 예로 *Fig.* 10에 LiF 결정을 이용하여 분석된 Ni기 초합금의 WDS 분석 결과를 나타내었다.

EDS 방법은 Fitzgerald, Keil, Heinrich 등이 1968년 처음 전자 빔 분석에 solid state X-ray detector를 이용함으로써 실용화되기 시작하였으며, 현재에 이르

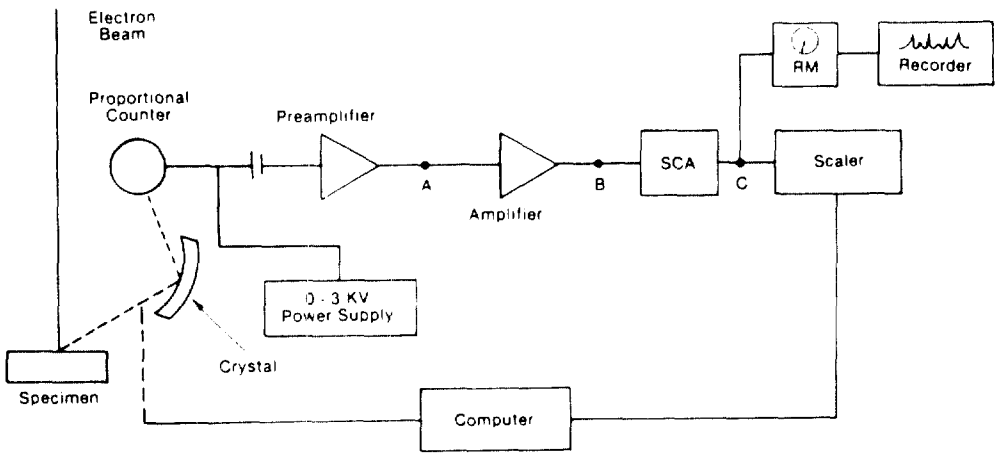

Fig. 9. WDS의 신호 검출장치 개략도

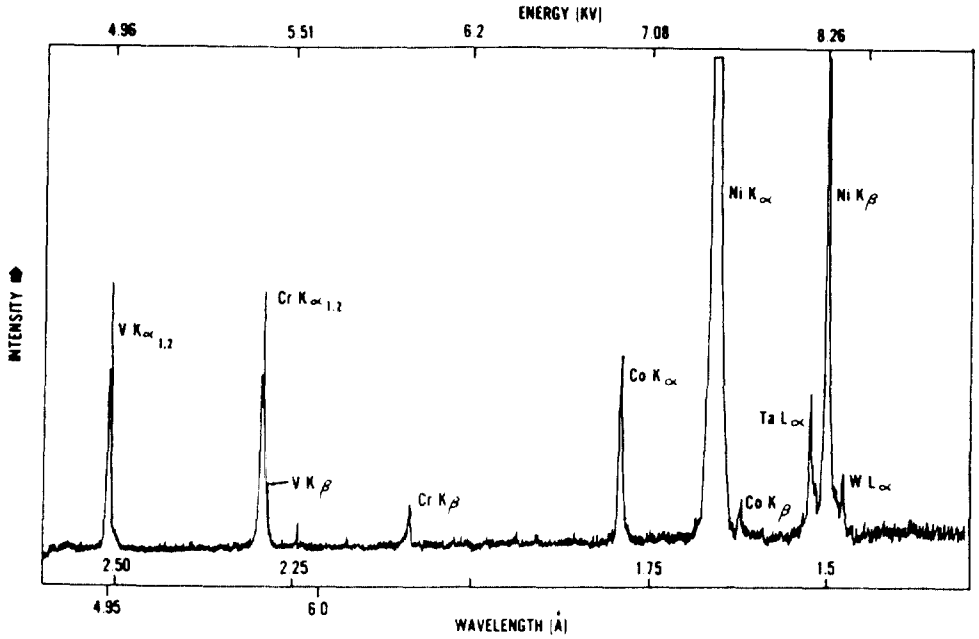

Fig. 10. LiF crystal을 이용하여 얻어진 Ni기 초합금의 WDS 스펙트럼

러서는 가장 보편적인 방법이 되었다. *Fig.* 11에 EDS의 기본원리를 나타었다. 시료로부터 발생된 X-선은 BE window 검출기를 통과하게 되며 냉각된 reverse-biased p-i-n 접합의 Si 검출기에 도달하며 전자-베이컨시 쌍을 형성하게 되는데, 이는 바이어스 전압에 의해 전하 펄스로 바뀌고 이는 다시 charge sensitive preamplifier에 의해 전압 펄스로 바뀐 다음 증폭되어 multichannel analyzer(MCA)로 보내지며 MCA

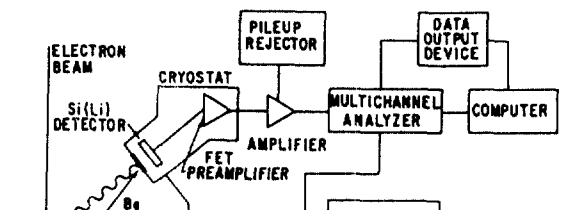

Fig. 11. EDS의 신호 검출 장치 개략도

에서 이 전압 펄스는 분류되어 분류된 전압의 분포를 X-Y recorder상에 나타내게 되어 있다. Si 검출기에서 형성되는 전자-베이컨시 쌍의 수는 흡수된 X-선의 에너지에 비례하게 된다. 즉, 예를 들어 Al Kα X-선의 경우 1.49KeV의 에너지를 가지며 이에 비례한 전자-공공 쌍이 형성되게 된다. *Fig.* 12(a)는 Al-Fe 합금에서 관찰되는 2차 전자 상 및 선 주사(line scan)에 의해 얻어진 알루미늄의 Kα X-선의 분석 결과를 함께 보여 주고 있다. *Fig.* 12(b)는 시료로부터 얻어진 EDX 스펙트럼을 보여 주고 있다. 그림에서 Al Kα, Fe Kα X-선 피크가 높은 강도를 가지고 검출되어 있음을 관찰할 수 있다. *Fig.* 12(c)와 (d)는 Al Kα, Fe Kα X-선의 mapping 상을 보여 주고 있다. 즉 각 X-선을 mapping 함으로써 이미지상에서 성분의 분포를 알아볼 수 있다. WDS 및 EDS에서는 detector 및 proportional counter의 오염을 방지하기 위해서 Be window를 사용한다. 그러나 Be window는 가벼운 원소로부터 발생된 0.75KeV 이하의 X-선은 흡수해 버리므로 원자번호 10 이하의 원소는 분석이 불가능하다. 그러나 EDS의 경우 최근에는 window를 아주 얇게 하거나 제거함으로

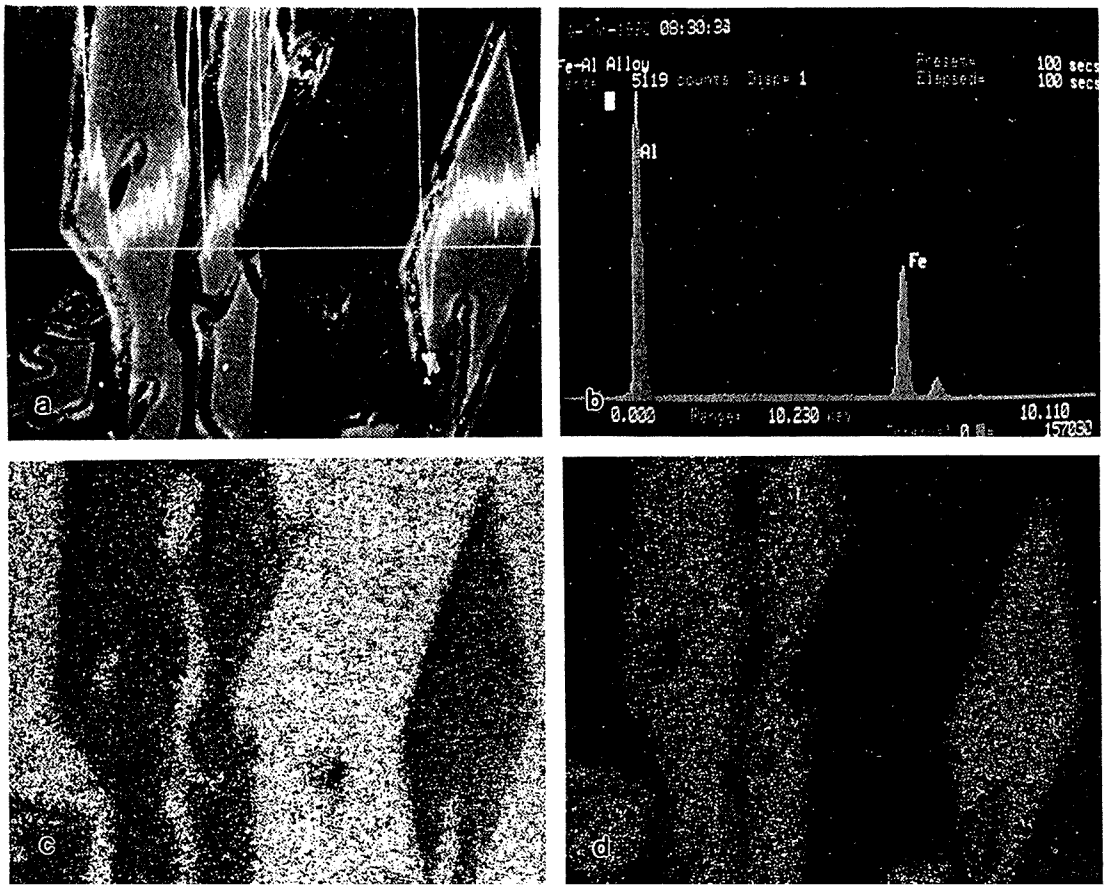

Fig. 12. (a) Al-Fe 합금의 2차 전자상 및 주사(line scan)에 의한 Al Kα X-선 피크 변화; (b) Al Kα 및 Fe Kα X-선 피크를 보여 주고 있는 EDS 분석결과; (c) Al Kα X-선의 mapping 상; (d) Fe Kα X-선의 mapping 상

써 분석 범위가 원자 번호 3 이상까지 확대되었다.

4. 결 론

서론에서도 언급되었듯이 과학 기술이 발달함에 따라 물질의 분석에 있어서도 마이크로미터(μm) 혹은 미이크로미터 이하의 단위로 물질을 관찰, 분석하고 또한 성질을 규명해야 할 필요성이 점차 증대되고 있으며, 이에 SEM 및 EPMA도 중요성이 점차 증대되고 있다. 이에 본 해설에서는 SEM 및 EPMA의 기본 원리 및 기초적인 응용 분야를 살펴 보았으며, 위의 기초 이론을 바탕으로 좀더 전문적인 분야로 분석 기술이 적용되어질 수 있을 것이다.

참고문헌

1. J. I. Glodstein, D. E. Newbury, P. Echlin, D. C. Joy, C. Fiori and E. Lifshin, "Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis", Plenum Press (1981).
2. Metal Handbook Vol. 10, American Society for Metals, (1989).
3. 日立走査電子顯微鏡(S-2400形) 小冊子