

재료 분석에서 전자 에너지 손실 스펙트럼 (EELS)의 원리 및 응용 연구

윤상원 · 김규현 · 안재평* · 박종구^a

한국과학기술연구원 특성분석센터, ^a한국과학기술연구원 나노소재기술개발센터

Principle and Applications of EELS Spectroscopy in Material Characterizations

Sang-Won Yoon, Kyou-Hyun Kim, Jae-Pyoung Ahn* and Jong-Ku Park^a

Advanced Analysis Center, Korea Institute of Science and Technology,

Hawolkok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 130-650, Korea

^a*NanoScience Research Division, Korea Institute of Science and Technology,*

Hawolkok-dong, Sungbuk-ku, Seoul 130-650, Korea

Abstract An electron energy loss spectroscopy (EELS) instrument attached on transmission electron microscopy (TEM) becomes a powerful and analytical tool for extracting the noble information of materials using the enhancement of TEM images, elemental analysis, elemental or chemical mapping images, electron energy loss near edge structure (ELNES), and extended energy-loss fine structure (EXELFS). In this review, the principle and applications of EELS which is widely used in material, life, and electronic sciences were introduced.

Keywords : EELS, TEM, EFTEM, Ionization edge, ELNES, EXELFS

1. 서 론

최근 나노기술의 등장과 함께 분말의 합성과 응용에 관한 신기술의 발달이 가속화되고 있으며 금속, 세라믹, 고분자, 생체재료 등 거의 모든 분야에 걸친 융합기술이 화두가 되고 있다. 따라서 이들 재료의 물성에 대한 평가 역시 다양하고 첨단 물성 또는 특이 물성들을 끄집어 낼 수 있는 측정 및 분석 기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 투과전자현미경은 높은 해상도(고분해능 격자 이미지)의 지원 및 나노영역에서의 조성분석과 구조분석을 수행할 수 있어 위와 같은 일에 첨병의 역할을 수행해 왔다. 여기에 덧붙여 최근 활용되고 있는 EELS 기술은 재료의 다양한 특성을 분석할 수 있는 중요한 도구로서 주목 받고 있다.

EELS는 전자빔 에너지 손실 스펙트럼이라는 용어 자체의 의미에서 알 수 있듯이 재료와 전자빔의 충돌

시 전자에너지의 손실된 에너지를 스펙트럼으로 표현하기 때문에 전자빔과 반응한 시료의 영역만을 국부적으로 해석할 수 있다. 따라서 TEM의 기능을 그대로 유지하면서 추가적으로 재료 내 화학적, 물리적, 전자적 정보를 획득할 수 있다. 또한 EDS (energy dispersive spectroscopy)와 보완적으로 사용하면 주기율표상의 거의 모든 영역의 화학적 정보를 얻게 된다. 이것은 EELS의 가장 기본적인 기능에 해당되며 이 외에 영상 콘트라스트 향상, 성분맵핑, 화학맵핑, 전자구조 분석을 통한 화학결합상태 (ELNES) 및 extended energy loss fine structure(EXELFS) 등 기초적이고 다양한 재료정보를 얻을 수 있다. 본고에서는 최근 첨단 재료 분석에서 활발히 사용되고 있는 EELS의 기본 기능 및 응용 사례에 대하여 원론적인 설명을 하고자 한다.

EELS는 금속 표면으로부터 반사되는 전자 에너지에 대하여 보고한 Rydberg(1929)¹⁾에 의하여 처음으로

*Corresponding Author : [Tel : +82-2-958-5536; E-mail : jpah@kist.re.kr]

로 사용되었으며 샘플의 화학조성을 밝히는데 사용되었다. Ruthemann²⁾은 이를 발전시켜 TEM에서 알루미늄 박막의 EELS 스펙트럼을 보고하였고 1944년 Hillier와 Baker에³⁾ 의하여 전자 마이크로 프루브를 이용하여 실리콘과 철의 K-edge 스펙트럼에 대하여 처음으로 보고된 후, Parker 그룹에⁴⁾ 의하여 전자 렌즈의 second 수차 correction과 관련된 마그네틱 프리즘에 대한 중요한 기술들이 보고되었다.

EELS는 TEM 내에서 크게 두 가지 형태로 장착되어 사용되고 있다. 하나는 TEM 컬럼의 중간에 위치하고 있는 “in column (Zeiss Omega filter) 렌즈”와 TEM 필름부의 끝단에 위치한 “post column (Gatan사) 형태”로 제조회사에 따라 나뉜다. 국내에서는 90년대 중반에 도입되기 시작하여 지금은 산업계(삼성전자, 하이닉스, 삼성중공업, 동부전자 등)와 대부분의 연구소(KIST, KBSI, 나노종합팩, 기계연구원, 표준과학연구원 등)에서 활발하게 사용 중에 있다. 또한 대학의 경우 고가의 장비 가격으로 인하여 몇몇 대학(서울대, 성균관대, KAIST, 포항공대 등)에서 사용되고 있는 실정이다. 현재 이들 기관에서 사용되고 있는 EELS 응용은 아직 기초적인 단계를 벗어나지 못한 것이 현실이나 최근 학계에서 매우 활

발하게 이 기술의 활성화를 위하여 적극적인 노력을 경주하고 있어 향후 본격적인 응용이 기대되고 있다.

2. EELS 스펙트럼의 소개

TEM을 이용한 재료의 관찰에서 입사 전자가 시료의 원자와 반응할 때 산란(scattering) 현상이 발생한다. 산란에는 초기 입사 전자빔과 원자핵이 충돌한 후 에너지가 변화되지 않는 “탄성산란(elastic scattering)”과 원자핵 주변의 전자들과 반응하여 원자를 이온화시키는 “비탄성 산란(inelastic scattering)”으로 구별된다. 비탄성 산란에서는 초기 전자빔의 에너지가 외각 전자와 충돌하여 이온화에 필요한 높은 에너지만큼 손실을 겪는 경우와 “프리즈몬(plasmon)”과 같이 매우 적은 에너지 손실이 일어나는 경우로 구별된다. 프리즈몬 영역은 핵과 전자의 결합에너지와 같은 매우 적은 에너지로부터 손실된 전자빔이 여기에 해당된다. EELS는 바로 이렇게 손실된 에너지를 그림 1과 같이 스펙트럼으로 나타낸 것이다. x축의 “0 eV”에 해당되는 것이 탄성산란 영역(zero loss region)이고 나머지는 작은 에너지 손실 영역(low loss region)과 높은 에너지 손실 영역(high

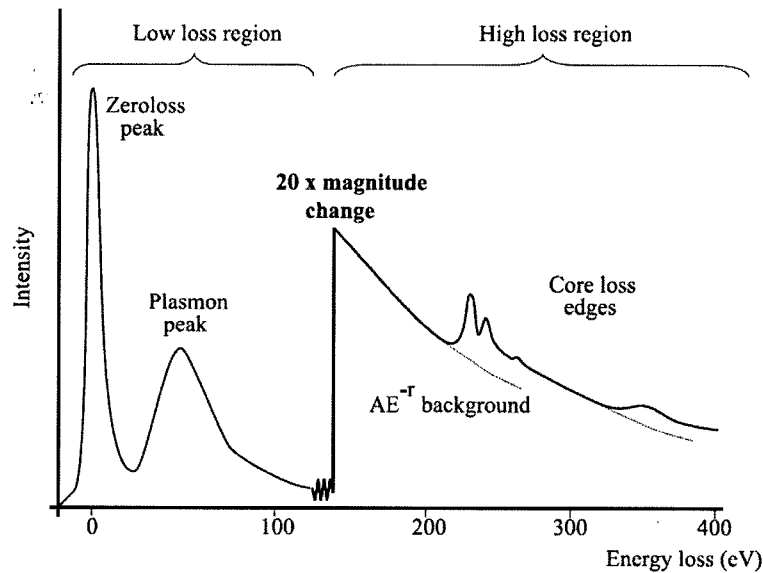


Fig. 1. An EELS spectrum can be split into two regions: the low loss region, dominated by the zero loss peak and plasmon interactions, and the high loss region, containing core loss edges. The intensity of the core loss edges is much lower than that of the low loss features, due to the low scattering probability of inner shell ionization and a gain change is needed to view these features⁵⁾.

loss region)으로 구별된다. y축은 x축에 대한 개별적인 강도이다. High loss region에서는 단일 전자 여기로 인해 발생하는 “core loss edge”를 관찰할 수 있고, low loss region에서는 선택적 전자 여기로 생성되는 plasmon의 발생을 볼 수 있다. “Core loss edge”는 이온화와 관련되어 있다. 이온화될 때 원소에 따라 매우 특정한 에너지를 필요로 하므로 특정 X-선이 발생된다. EDS는 바로 이 X-선의 에너지를 측정하여 원소를 구별하지만, EELS는 그 때 손실된 전자빔의 에너지 크기를 측정하여 원소를 구별한다. EELS와 EDS와의 비교는 다음절에서 주워질 것이다. 그림 1에서처럼 Core loss edge의 스펙트럼이 넓은 에너지에 걸쳐 분포하지만 재료의 원소를 특징짓는 것은 “edge”가 시작되는 에너지를 기준으로 한다. 또한 스펙트럼의 “background”는 “power law 법칙”으로 설명된다.

Core loss edges의 특징적인 모양은 페르미 준위 위의 다양한 전자 상태를 반영하므로 물질에 따라 매우 독특한 스펙트럼을 나타낸다. 일 예로써 edge 이후에 나타나는 스펙트럼의 모양은 전이금속의 채워지지 않은 d-states나 이웃한 원자와의 결합에 따라 다르게 생성된다. 이 edge의 모양은 이온상태의 원자에 대한 정보와 결합상태환경에 대한 정보를 제공한다. 따라서 EELS 스펙트럼으로부터 원소의 존재 여부와 화학적 결합상태 등에 대한 화학적인 정보 (chemical information)를 얻을 수 있게 된다. 복잡한 edge 모양은 실험적으로 얻어진 edge와 비교하여 물리적·화학적 의미를 찾을 수 있다.

그림 2는 TEM의 끝 단에 부착된 EELS 장치의 구조도이다. EELS 장치의 앞 부분은 일반적인 TEM과 동일하며, 카메라 챔버의 아래 부분에 EELS 장치가 부착된다. EELS 장치의 조리개로 입사된 전자는 “magnetic prism”에 의해서 입사방향에 수직으로 90° 꺾여서 렌즈를 통과한 후 최종적으로 카메라에 기록된다. 시료를 거친 전자빔은 다양한 에너지를 포함하고 있으므로 magnetic prism을 통과한 다양한 에너지의 전자빔은 파장에 따라 서로 다른 각도로 꺾이면서 스펙트럼을 형성하게 된다. 또한 스펙트럼 모드로부터 영상 모드로 변환하게 되면 특정 에너지를 갖고 있는 영상(EFTEM: energy filtered TEM image)을 얻게 된다. 여기서 렌즈의 중간에 있는 슬릿 (slit)은 특정 에너지 영역을 선택할 수 있는 역할을 한다. 슬릿을 적절히 움직여 특정 원소에 대한 에너지

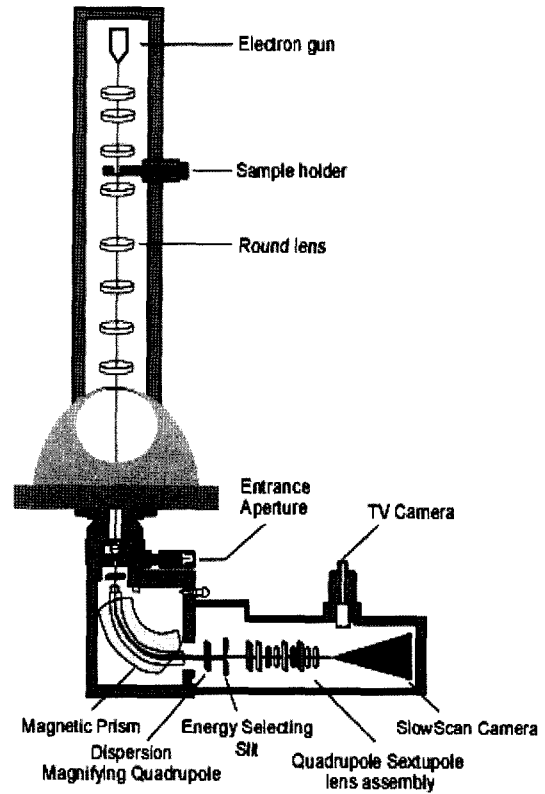


Fig. 2. Schematic of a TEM with an imaging filter (EELS) reproduced from Egerton⁶⁾.

를 선택함으로써 EFTEM 영상을 얻게 된다.

3. EELS를 이용한 원소의 정성 및 정량분석

그림 3은 전지 재료로 사용되고 있는 LiCoO₂, LiMnO₂, LiNiO₂ 등의 재료에 대한 EELS 스펙트럼 및 EELS edge로서 각 원소의 존재 여부를 확인할 수 있다. 원소가 검출되는 에너지의 위치는 원소의 이온화 에너지와 일치한다. 산소는 O K-edge 이온화 에너지와 일치하는 532 eV 값에서 검출되며 각각의 전이금속인 Mn, Co, Ni 등은 L-edge 이온화 에너지인 640, 779, 855 eV에서 각각 검출된다. 따라서 위에서 언급된 바와 같이 EELS 스펙트럼에서 성분 분석은 각 원소의 이온화 에너지의 크기와 일치함을 알 수 있다.

또한 EELS 스펙트럼의 정량분석에 대한 설명은 몇 가지 수식을 필요로 한다. 일반적으로는 스펙트럼에서 백그라운드 제거하고 신호를 적분하여 정량화

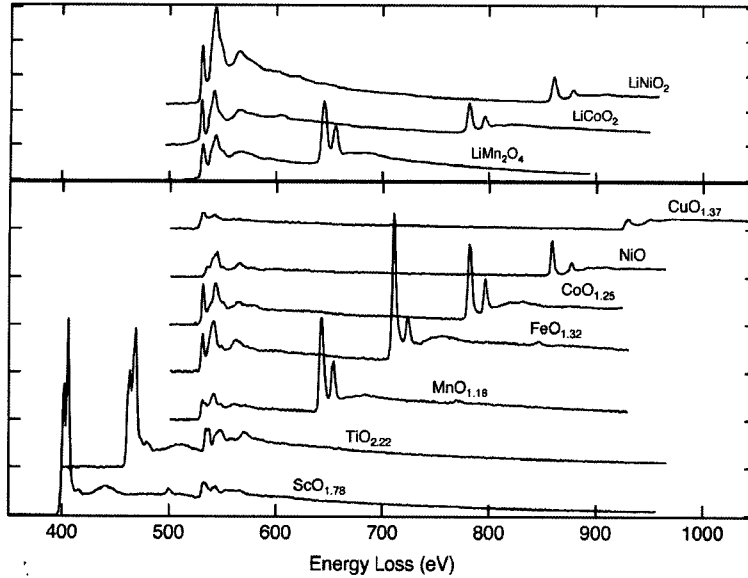


Fig. 3. Energy loss spectra of the oxygen K and transition metal L_{2,3}-edges from a series of LiTMO₂(top and a series of TM oxides (bottom)⁶). TM means a transition metal.

를 위한 기본적인 산란식을 이용한다. 좀 더 자세한 물리적인 의미는 Egerton 책⁴에서 다루고 있으므로 참고하기 바람에 기본 산란식은 아래와 같이 주워진다.

$$I_k = NI\sigma_k$$

여기에서 “N”은 이온화 edge K에서 발생되는 원자의 areal concentration (atoms/nm²), “I”은 백그라운드를 제거한 edge의 모든 카운트의 합, “I_k”은 카운트의 총합, “σ_k” 전자각 내 한 전자의 이온화를 위한 cross-section을 의미한다. 이식을 이용하여 다성분에 대한 조성의 정량비는 아래식을 이용하여 계산한다.

$$\frac{N_a}{N_b} = \frac{I_{ka}(\beta, \Delta_a)\sigma_{jb}(\beta, \Delta_b)}{I_{jb}(\beta, \Delta_b)\sigma_{ka}(\beta, \Delta_a)}$$

여기에서 아래 첨자 a, b는 다른 성분에 대한 표현이고 j, k는 전자각의 번호 (shell indices)이며 β, Δ는 산란 반각과 신호 적분값이다.

4. 성분 분석에서 EELS와 EDX의 비교

1992년 Fuggle과 Inglesfield가⁷ 무기 고체와 분자의 “density of unoccupied state”에 대해 언급한 후 성분 분석을 위한 EDS 분광법과 화학 결합상태 분석을 위한 NEXAFS (near edge X-ray absorption

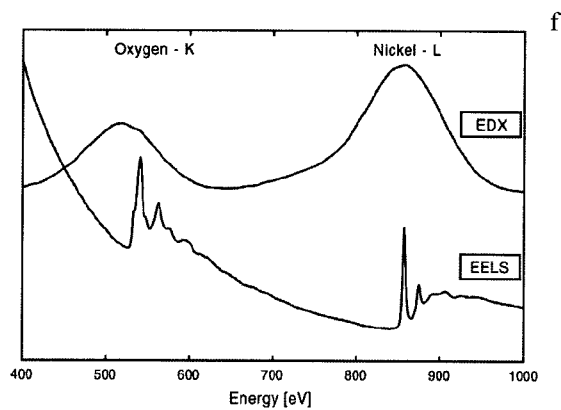


Fig. 4. Schematic comparison of EDX and EELS spectra.

fluorescence spectroscopy)와 비교하는 논쟁이 생겼다. 본고에서는 EDS와의 비교만을 다루며 NEXAFS와의 비교는 다루지 않는다.

TEM에 장착되어 있는 EELS는 물질의 성분 분석 뿐만 아니라 화학 결합상태의 분석에 대해서도 사용되고 있다. 이중 성분 분석 분야에서 EDS와 비교해 보고자 하며 두 스펙트럼의 상대적인 비교가 그림 3과 표 1에서 보여진다. 앞서 간략히 설명된 것처럼 EELS는 초기 200 keV로 가속된 전자가 시료와 충돌된 후 외각 전자를 추출하는데 필요한 이온화 에너지만큼 손실되는데 대략 그 범위가 50~2,000 eV

Table 1. The relative comparison of EELS and EDX.

	EDS	EELS
Source	X-ray	Energy loss electron*
Quantification	Good	Good
Electronic structure	Impossible	Possible
Thick specimen	Good	Bad
Elemental weight	Heavy	Light
Mapping	Slow (hrs)	Fast (TEM or STEM mode)
Artifact	Yes	Very small
Energy resolution	Frequent overlap	No overlap
Spatial resolution	Not good	Good
Sensitivity	Not bad	Good

*The reasons of the powerful tool for the light elements in the EELS analysis.

에 해당된다. EDS는 충돌로 이온화된 원자의 높은 에너지 상태를 낮추기 위하여 방출되는 특성 X-선을 검출하는 것으로 에너지 범위는 약 0~40,000 eV에 해당된다.

일반적으로 EDS는 중 (heavy) 원소 분석에, EELS는 경 (light) 원소 분석에 매우 강력한 도구이다. 따라서 두 방법을 적절히 병행하여 사용하면 주기율표 상의 거의 모든 원소를 정확하게 검출할 수 있다. EDS의 경우, 최근 경 원소를 분석하기 위해 검출기의 입구에 ultra thin window를 사용하여 B (붕소)까지 검출 가능하다. EDS에 비해 EELS가 갖는 장점들에 대해 몇 가지 설명하면 아래와 같다.

1. H부터 검출이 가능하므로 수소저장합금, Li 배터리 재료 등의 에너지 저장과 같은 분말의 특성을 검출할 수 있다.
2. 수십 초 이하에서 빠른 성분 맵핑이 가능하다.
3. 시편과의 충돌시 반응 부피 (reaction volume)의 개념이 없으므로 프루브 크기와 동일한 성분 정보를 얻을 수 있다. 따라서 sub nm 영역에서 정성 및 정량 분석이 가능하다.
4. 또 다른 장점으로는 화합물의 결합과 관련된 전자구조에 대한 힌트를 얻을 수 있다. 이것은 싱크로트론의 NEXAFS와 유사한 스펙트럼을 갖기 때문이다.
5. 특히 다른 장비와 구별하여 EELS가 보유하고 있는 가장 큰 장점으로는 매우 극부적인 영역 (atomic scale)에서 재료의 전자구조에 대한 정보를 얻을 수 있다.

그림 4는 여러 재료로부터 측정된 O K-edge를 보여주는 것으로 전자구조와 밴드갭 구조를 엔지니어

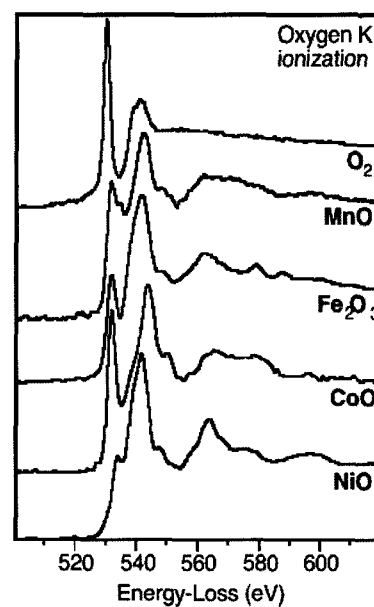


Fig. 4. Comparison of O K-edge features of several 3d transition metal oxides with different number of d-electrons. The NEXAFS spectra were recorded by measuring the partial electron yield. Oxides samples were amorphous powder materials; the titanium oxide sample was anatase TiO₂⁸⁾.

링하는 연구자들에게 매우 흥미로운 결과이다. 여러 천이원소 산화물에서 산소의 NEXAFS K-edge를 보여주는 것으로 edge가 시작되는 에너지는 동일하지만 뒤에 오는 피크의 모양이 모두 제각기 다른 형태를 갖고 있다. 이것은 산소와 결합하고 있는 천이원소의 3d와 4s 각에 있는 전자의 결합형태가 그만큼 다양함을 의미한다. 이것은 산화물의 밴드갭에 대한 힌트를 제공하며 또한 최근에는 구조분석에서도 활발하게 사용되고 있

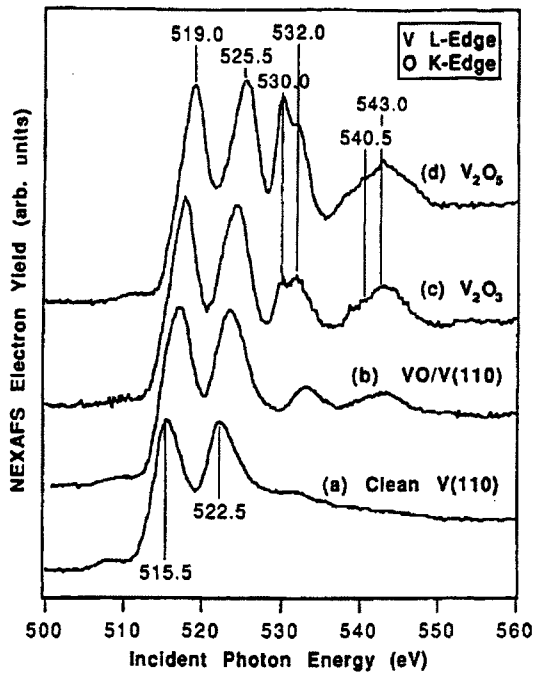


Fig. 5. Comparison of vanadium L-edge features and oxygen K-edge features for V(110), VO/V(110), and powder materials of V_2O_3 and V_2O_5 . The VO/V(110) surface was prepared by repeating cycles of exposing V(110) to oxygen at 400K followed by annealing to 600K⁹⁾.

다. 예를들어 기존에는 HRTEM 또는 회절을 이용하여 구조분석을 수행하였기 때문에 분석에 비교적 장 시간이 필요하였지만 어느 정도 물질에 대한 정보를 이미 알고 있다면 EELS의 피크로부터 형상의 비교만으로도 매우 빠르게 구조분석을 수행할 수 있다.

그림 5는 V과 O가 결합하고 있는 원자가가 서로 다른 재료에서 V과 산소의 NEXAFS L-edge와 K-edge를 보여주는 것으로 V K-edge의 시작 위치가 화학결합에 따라서 서로 다른 위치에서 얻어짐을 보여준다. 일반적으로 이것은 "chemical shift"로 명명된다. 즉 원자가에 따라서 화학결합에너지가 바뀌어 생기는 현상으로 (a)에서 (d)로 갈수록 결합에너지가 높아지고 있다.

5. EELS를 이용한 원소맵핑과 화학맵핑

5.1. 원소맵핑(Elemental mapping)

EELS를 이용한 원소맵핑은 원하는 에너지를 선택하여 영상을 얻는 기술로 향상된 명암비를 갖는

TEM 영상을 만드는데 유용할 뿐 아니라 높은 해상도의 민감한 원소 맵핑이 가능하다. 원소맵핑은 EELS의 영상모드에서 얻어지는데 다른 이름으로 EFTEM (energy filtered TEM) 영상이라 한다. EFTEM 영상은 에너지 슬릿을 사용하여 특정 에너지 범위를 선택함으로써 수행된다. 즉 슬릿을 이용하여 zero loss peak만을 선택하면 "Zero loss 영상"을 얻을 수 있다. Zero loss 영상은 비탄성 산란된 전자의 영향을 제거하고 탄성 산란된 전자만으로 영상을 얻음으로써 다소 두꺼운 TEM 시편에서도 향상된 명암비와 해상도를 갖는다. 또한 슬릿을 특정 원소의 이온화에너지 영역에 위치시키면 그 원소에 해당되는 영상을 얻게 되는데 이 영상으로부터 적절히 백그라운드 제거함으로써 원소맵핑이 가능해진다. 이것을 core loss 전자의 원소맵핑이라 한다.

백그라운드를 제거하기 위해서는 그림 6과 같이 적어도 세 장의 energy-filtered 영상이 필요하며 (jeanguillaume 1978⁹⁾, Bonnet, 1988¹⁰⁾) 이를 "three window technique"이라 한다. 이 과정을 진행하기 위한 소프트웨어가 Bonnet and Zahm¹¹⁾과 Quintana 등¹²⁾ 의해 1998년 개발되었다. 그 후 시리즈로 얻은 energy-filtered 영상에서 백그라운드를 제거하기 위해 "Egerton power model"을 적용하여 Quintana 등¹³⁾ 실제 "P" 원소 맵을 (p-maps) 얻기 위해 시도하였다. 가장 적절한 "background fitting"을 위한 pre-edge 설정은 "true map"을 얻기 위해 필수적이다. 사실, Egerton power 법칙은⁵⁾ 낮은 에너지 영역에서 백그라운드를 제거하는데 잘 맞지 않아 편차를 가진다. "under"로 외삽된 백그라운드는 원소가 없는 영역에서 전체적으로 양의 신호를 나타내고 이와 반대로 "over"로 외삽된 백그라운드는 원소가 없는 영역에서 전체적으로 음의 신호를 나타낸다. 정확히 외삽된 백그라운드는 원소가 없는 영역에서는 "0"의 신호를 나타내야 한다. 반면, 작은 에너지 슬릿을 이용한 특정 에너지에 관련된 EFTEM 이미지를 얻기 위해서는 흥미있는 영역으로부터 EELS 스펙트럼을 얻은 후 특정 에너지로부터 슬릿을 사용하여 얻어진 이미지의 수에 의존한다 (Lavergne, 1992¹⁴⁾; Kořtje, 1994¹⁵⁾; Mayer 1997¹⁶⁾).

EELS 스펙트럼의 다른 형태로 이미 사용되고 있는 parallel electron energy loss spectroscopy (PEELS)가 (Martin *et al.*, 1996¹⁷⁾; Mayer *et al.*, 1997; Pon-

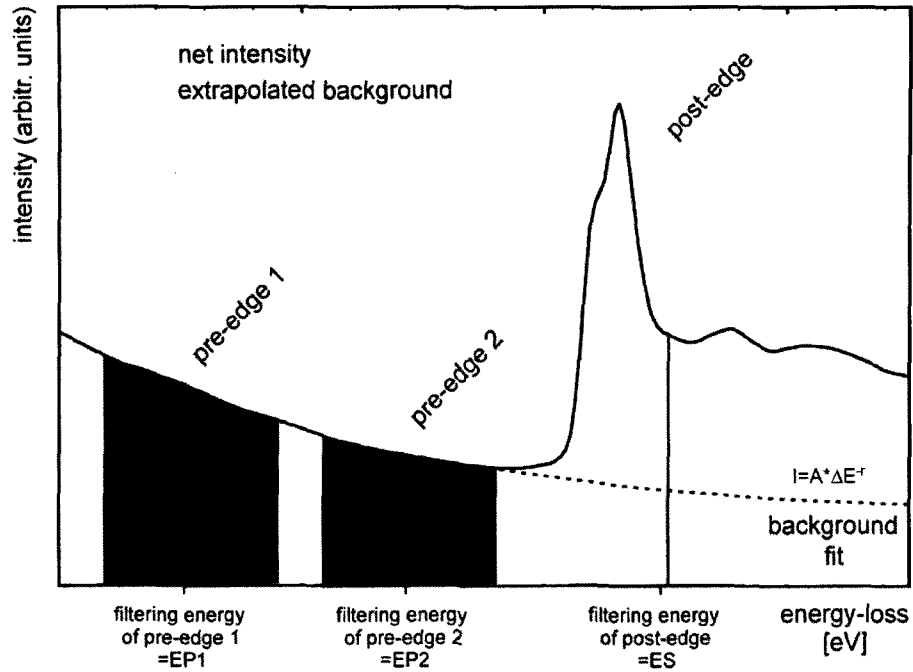


Fig. 6. Schematic diagram on the “Three window technique” in EELS spectrum. Two Pre-edge images and one post-edge image, respectively, before and after ionization edge are acquired in EFTEM mode and, from two pre-edge images, the background of the edge is subtracted. Finally we can get only signal intensity above the dot line which means the background containing the edge peak of EELS spectrum.

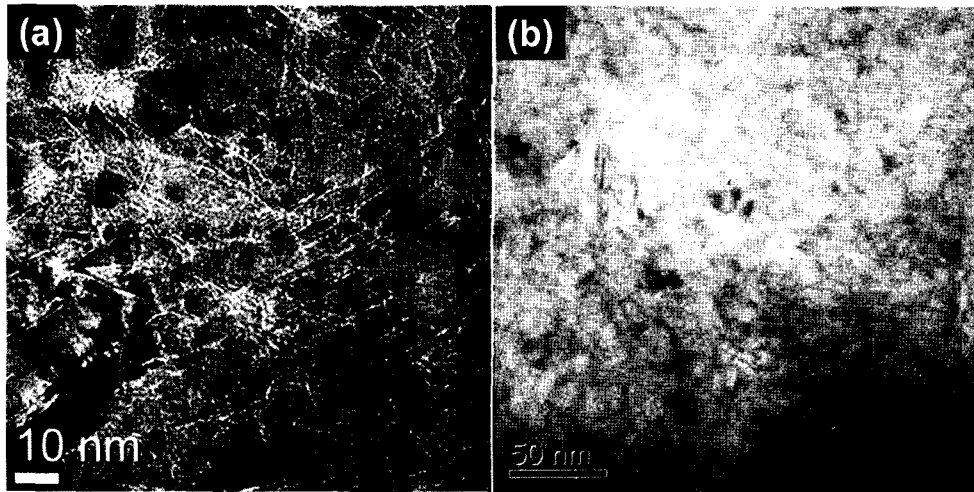


Fig. 7. (a) A diamond thin film of approximately 10 nm grains in diameter. (b) A sp^3 chemical mapping image, which shows that the grain matrix has sp^3 bonding.

sonnet *et al.*, 1998¹⁸⁾; Soler *et al.*, 1998; Plitzko and Mayer, 1999¹⁹⁾; Rojas, 2000²⁰⁾ 있다. 특히, 특정 edge에서 얻은 전·후 이미지를 이용하여 수학적 모델과의 차이를 적용하여 실험적 백그라운드 차이

를 보정하는 것이 가능하다. 이런 보정이 끝난 후, 특정 신호에서 내삽법을 이용하여 백그라운드 차이를 제거한다.

한편 “Three window technique” 외에 원소맵핑을

하는 다른 방법으로 두 개의 window를 사용하는 "jump ratio" 방법이 제안되어 있다. 이 방법은 한 개의 pre-edge와 한 개의 post-edge를 요구한다. 백그라운드를 포함하지만 원소의 강도를 적절하게 표현할 수 있어 three window technique과 함께 원소 맵핑에서 유용하게 사용되고 있다.

5.2. 화학맵핑 (Chemical mapping)

EELS 스펙트럼을 이해하면 원소맵핑뿐만 아니라 화합물의 화학적 결합상태만을 추출하여 영상화하는 화학맵핑이 가능하다. 예를 들면, 탄소는 매우 다양한 결정구조를 갖고 있는 것으로 유명하다. 그래파이트일 때 sp^3 와 sp^2 공명결합을 하고 있으며, 다이아몬드일 때는 sp^3 결합만으로 이루어져 있다. 따라서 sp^2 와 sp^3 에 대한 정보(영상)를 따로따로 얻을 수 있다면 화학맵핑이 가능하다. 그림 7(a)는 플라즈마법으로 합성된 다이아몬드 박막의 TEM 미세조직을 보여준다. 다이아몬드 박막은 약 10 nm의 결정립으로 구성되어 있다. 이들 결정립의 경계에서 결합상태를 알아보기 위해 sp^3 결합에 대한 화학맵핑을 분석한 결과가 그림 7(b)이다. 이 그림에서 결정립은 하얀색으로 표현되고 있어 sp^3 결정구조를 갖고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 나노결정 다이아몬드에 대한 물리적 특성(전기전도성)을 이해하고 공정 상의 성장조건을 최적화시키는 유용한 정보를 얻을 수 있다²¹⁾.

6. 요약

본 고에서는 최근 재료분석에 활발히 응용되고 있는 EELS 분석장비의 원리와 응용 분야 등에 대해 검토하였다. EELS를 이용하여 수행할 수 있는 주요 응용분야로는 원소의 정성 및 정량분석, 원소 및 화학 맵핑, 화합물의 결합구조를 알 수 있는 전자구조(DOS)에 대한 힌트 등이 있으며, 점차 재료의 근본적인 성질을 추출할 수 강력한 분석기가 되고 있다. 또한 원소를 분석하고 맵핑하는데 걸리는 시간이 수 초에서 수분 이하의 시간으로 매우 짧아 전자빔에 의한 재료의 손상을 최소화시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 특히 나노미터 영역의 분말의 경우 원소의 분포가 불균일하고 전자빔에 의하여 쉽게 변형되는 재

료 분석에 매우 유용하다. 향후 TEM의 발달과 함께 EELS는 국부적인 영역에서 가장 다양하고 유용한 정보를 추출할 수 있는 분석기로 자리매김할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Martinson, Indrek, L. J. Curtis: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **235** (2005) 17.
2. G. Ruthemann: Naturwissenschaften **29** (1941) 648.
3. J. Hillier, R. F. Baker: J Appl Phys **15** (1944) 663.
4. N. W. Parker, M. Utlaut, M. S. Isaacson: Optik **51** (1978) 333.
5. R. F. Egerton: Electron Energy Loss Spectroscopy in the Electron Microscope, 2nd ed. (Plenum Press New York, 1996).
6. N. W. Parker, M. Utlaut, M. S. Isaacson: Optik **51** (1978) 333.
7. J. G. Chen: Surf. Sci. Reports **30** (1997).
8. A. P. Hitchcock, A. T. Wen: E. Ruhl, Chem Phys **147** (1990) 51.
9. C. Jeanguillaume, P. Trebbia, C. Colliex: Ultramicroscopy **3** (1978) 237.
10. N. Bonnet, C. Colliex, C. Mory, M. Tence, Scan Microscopy **2** (1988) 351.
11. N. Bonnet, J. M. Zahm: Cytometry **31** (1998) 217.
12. C. Quintana, S. Marco, N. Bonnet, C. Risco, M. L. Gutierrez, A. Guerrero, J. L. Carrascosa, Micron **29** (1998) 297.
13. C. Quintana, N. Bonnet, S. Marco, 14th International Congress on Electron Microscopy, Cancun (Mexico), 1998, p. 711.
14. J. L. Lavergne, J. M. Martin, M. Belin: Microsc Microanal M **3** (1992) 517.
15. K. H. Kortje: J Microsc-Oxford **174** (1994) 149.
16. J. Mayer, U. Eigenthaler, J. M. Plitzko, F. Dettenwanger: Micron **28** (1997) 361.
17. J. M. Martin, B. Vacher, L. Ponsonnet, V. Dupuis: Ultramicroscopy **65** (1996) 229.
18. L. Ponsonnet, B. Vacher, J. M. Martin: Thin Solid Films **324** (1998) 170.
19. J. M. Plitzko: J. Mayer, Ultramicroscopy **78** (1999) 207.
20. T. C. Rojas, M. J. Sayagues, A. Caballero, Y. Koltypin, A. Gedanken: L. Ponsonnet, B. Vacher, J.M. Martin, A. Fernandez, J Mater Chem **10** (2000) 715.
21. K. Okada, K. Kimoto, S. Komatsu, S. Matsumoto: J Appl Physb (2003) 3120.