

## 유리화 비정형 탄소의 전계방출 거동

안상혁 · 이광렬 · 은광용

한국과학기술연구원, 박막기술연구센터  
(2000년 1월 7일 접수)

### Characterization of field emission behavior from vitreous carbon

Sang-Hyuk Ahn, Kwang-Ryeol Lee and Kwang Yong Eun

Thin Film Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology,  
P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul, 130-650, Korea  
(Received January 7, 2000)

**요 약** - Mo이 코팅된 유리기관 상에 전기영동법으로 도포된 유리화 비정형 탄소분말의 전계방출 특성을 조사하였다. 탄소의  $sp^2$  결합만으로 이루어진 유리화 비정형 탄소는 전계방출을 얻기 위한 초기화 공정 없이도 규칙적인 전계방출 거동을 보이고 있었다. 전자의 방출이 시작되는 임계전장의 크기는 3에서 4 MV/m 구간의 값을 가지고 있었으며, Fowler-Nordheim plot으로부터 평가된 effective work function은 약 0.06 eV 였다. 전류-전압거동의 반복측정에 의해 관찰된 바와 같이 전계방출의 안정성 면에서 유리화 비정형 탄소는 Si tip보다 우수하였으며, 도포된 전체면적에서 전면발광의 가능성을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 탄소계 물질에서 관찰되는 전계방출이 탄소의  $sp^3$  결합과 밀접하게 관련되어 있지 않으며, 전자가 음극물질의 표면으로 이동하는데 필요한 전기전도성, 혹은 기관과 음극물질 계면에서의 전하이동 등이 전계방출의 거동을 결정하는 중요한 요인임을 보여주고 있다.

**Abstract** - Field emission behavior from vitreous carbon powders deposited on Mo coated glass by electrophoretic method was investigated. Although the vitreous carbon has only  $sp^2$  hybridized carbon bond, we could observe an excellent field emission behavior. Reproducible electron emission was observed without initiation process which is known to be needed in most carbon cathode materials. Critical electric field for electron emission was in the range from 3 to 4 MV/m. The effective work function was estimated to be about 0.06 eV, as obtained from the slope of Fowler-Nordheim plot. The stability of the emission behavior characterized by repeated I-V measurements, was much superior to the Si tips. We observed the possibility of full area light emission in vitreous carbon materials. This results showed that the field emission is not intimately related to the  $sp^3$  hybridization of carbon, but the electrical properties of cathode/electrode interface or the conductivity of the cathode materials which required for the electron transport to the cathode surface.

### 1. 서 론

다이아몬드 및 다이아몬드상 카본필름 그리고 최근 탄소 나노튜브 등 카본계 물질은 전계방출 소자의 음극 재료로 적합한 뛰어난 물성들을 가지고 있어 활발한 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 다이아몬드나 일부 다이아몬드상 카본필름은 음의 전자친화도를 가지고 있어 낮은 전기장에 의해서도 쉽게 전계방출이 일어나는 것으로 알려져 있다 [4]. 4내지 5 eV의 일함수를 가지고 있는 메탈이나 반도체 물질의 표면에서 전계방출을 얻기 위

해서는 5000 MV/m이상의 전장 인가가 필요하지만, 일부 카본계 물질에서는 3 MV/m 혹은 그 이하의 전장에서 전자의 방출이 관찰되었다 [5]. 따라서, 이러한 음극물질들은 Mo나 Si처럼 tip의 형태로 제작할 필요가 없으므로, 제작 공정을 단순화할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, 기계적 물성과 화학적 안정성이 우수하여 잔류가스의 흡착이나 back sputtering에 의한 음극의 열화를 억제할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나, 재현성 있는 전계방출을 얻기 위해서 반복적으로 전압을 인가하는 초기화 공정이 필요하거나, 전자방

출의 불균일성 등 많은 문제점을 가지고 있고, 전계방출 현상의 안정성 면에서도 아직 개선해야 할 점이 많은 것으로 알려져 있다. 이러한 문제점들은 FED 혹은 vacuum microelectronics 등에 카본계 음극물질을 응용하는데 큰 제약이 되고 있다.

금속이나 Si 등에서 일어나고 있는 전계방출의 기구에 대해서는 대체로 잘 알려져 있으나, 카본계 물질에서 일어나는 전계방출 현상의 기구는 아직 명확히 밝혀져 있지 않다. 카본계 음극물질에 관한 연구는 수소와 결합하고 있는 다이아몬드 표면이 음의 전자친화성을 가지고 있다는 결과가 발표되면서 활발히 연구되기 시작하였으며 [6], 카본계 물질에 관한 많은 연구결과들은 전계방출 현상을 필름 내의 다이아몬드성 결합 즉,  $sp^3$  hybridized carbon bond와 연관지어 고찰하고 있다. 그러나, 이러한 음의 전자친화성만이 전계방출의 거동을 결정하는 인자가 아니다. 음의 전자친화도 외에도 결정질 다이아몬드의 입계 [7], 표면결합이나 도핑에 의한 밴드갭내의 에너지 준위 [8], 그리고 다이아몬드내의  $sp^2$  결합영역 [9] 등이 우수한 전계방출의 원인인 것으로 제안되었다. 다이아몬드상 카본필름의 경우에는 질소의 첨가나 고온에서의 열처리가 전계방출을 개선한다는 보고가 있다 [10-11]. 이와 같은 연구결과들은 전계방출 현상이 필름내의  $sp^3$  결합보다는  $sp^2$  결합의 증가에 따른 전기전도성의 증가와 관련되어 있음을 의미하고 있다. 전계방출 거동을 이해하기 위해서는 emission의 limiting step을 제대로 이해하여야 하며, 이러한 관점에서 카본음극과 전극사이의 전기적 거동, 그리고 카본계 음극자체의 전기적 물성 제어 역시 카본계 음극의 구현을 위해 매우 중요하다.

본 연구에서는  $sp^2$  결합만으로 이루어진 유리화 비정질 탄소분말의 전계방출 거동에 대해 조사하였다. 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정질 탄소는 전혀  $sp^3$  결합을 가지고 있지 않음에도 불구하고, 매우 낮은 임계전장값을 가지고 있었으며, 전계방출의 안정성도 뛰어난 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 카본계 물질에서 관찰되는 전계방출 현상이 궁극적으로 필름내의  $sp^3$  결합보다는 카본계 음극물질의 전기전도성이나 전극과 음극계면의 전기적 물성과 더욱 직접적으로 연관되어 있음을 보여주는 것이다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용된 유리화 비정형 탄소로는 Alfa Aesar

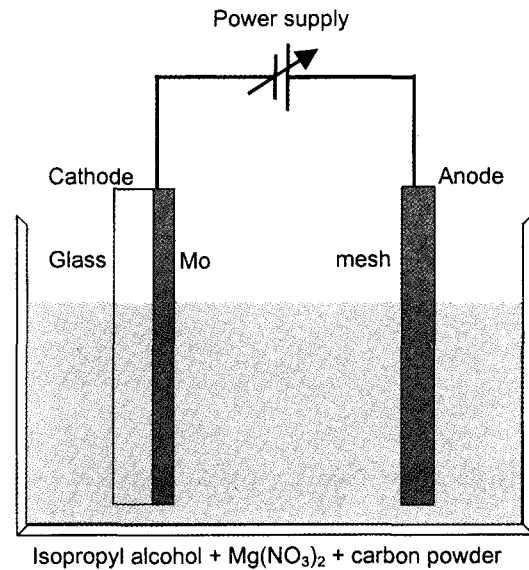


그림 1. 전기영동법을 이용한 유리화 비정형 탄소분말의 코팅 개략도.

사의 분말을 사용하였다. 분말의 크기는  $20\ \mu\text{m}$  미만이었으며, 주사 전자 현미경으로 관찰한 분말의 형상은 전형적인 파괴에 의해 만들어진 날카로운 형상을 보여주고 있었다. 이들 분말을 전기영동법으로 기판에 코팅하기 위한 용액으로서 isopropyl alcohol에  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 를  $4 \times 10^{-3}\ \text{mol/l}$ 의 분율로 섞은 것을 사용하였다. 이 용액 500 ml당 유리화 비정형 탄소분말 1 g을 혼합하였으며, 결합력을 증진시키기 위해 3%의 DI water (15 ml)를 첨가하였다 [12]. 용액의 사용 전, 용액 내의 분말들을 균일하게 분산시키기 위해 stirrer를 이용하여 6 시간 이상 용액을 저어주었다. 그림 1은 본 실험에 사용한 전기영동법의 개략도이다. 전계방출의 음극으로 사용될 기판으로는 magnetron sputtering 방법을 이용해서  $0.5\ \mu\text{m}$  두께의 Mo를 증착한 유리를 사용하였다. 전계방출 전류 측정시 leakage 전류를 막기 위해서 spacer가 위치할 부분의 Mo를 식각하여 제거하였으며, Mo 전극 중앙부의 원하는 위치에만 코팅이 가능하도록 내경 1 cm의 스테인레스 스틸링을 기판에 밀착시켰다. 전기영동을 위한 양극으로는 용액의 흐름을 원활히 하기 위해 스테인레스 스틸금속망을 사용하였으며, 기판과 양극간의 거리는 3 cm를 유지하였다. 이들 전극에 300 V의 전압을 인가하여 30초 동안 유리화 비정형 탄소를 코팅하였으며, 코팅 후 접착력의 증진을 위해  $450^\circ\text{C}$  진공분위기에서 30분간 열처리하여 MgOH를 MgO로

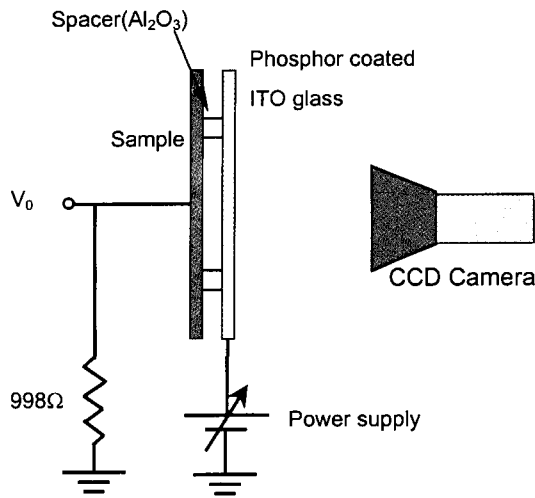


그림 2. 전계방출 전류 및 발광패턴 측정장비의 모식도.

전환시켰다 [13].

시편의 전계방출 특성은  $10^{-8}$  Torr 대의 고진공 하에서 측정하였다. 그림 2는 전계방출 거동을 측정하기 위한 장치의 모식도이다. 양극으로는 발광물질이 코팅된 indium tin oxide(ITO) glass를 사용하였으며,  $450\ \mu\text{m}$  두께의 알루미늄을 spacer로 사용하였다. 비교적 두꺼운 spacer를 사용하여 전극간의 거리를 유지하는 것은, 코팅표면의 조도에 따른 국부적인 전장의 크기 차이를 없애주어 아크발생을 억제하는데 효과적이었다. 측정 전 시편은  $10^{-8}$  Torr의 고진공 하에서 할로겐 램프를 이용하여 6시간 이상 가열하여 표면에 흡착된 수분을 제거하였다. 가열 시 시편의 온도는  $150^\circ\text{C}$  정도에서 유지되었다. 전계방출 거동의 측정을 위한 전압인가 속도는  $0.67\ \text{V/sec}$ 였으며, 최대  $2000\ \text{V}$ 까지 전압을 인가하였다. 전계방출 전류는 시편과 접지사이에 설치된  $998\ \Omega$ 의 저항 양단의 전압 차이를 읽어 측정하였으며, 방출 전류를 측정하면서 실시간으로 발광패턴을 CCD 카메라로 녹화하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 본 연구에 사용된 유리화 비정형 탄소 분말의 라만 스펙트럼이다. 라만 스펙트럼은 D-피크와 G-피크가 분리된 채로 잘 발달된, 다결정 흑연의 스펙트럼과 비슷한 모양을 보이고 있다. 그러나, 각 피크의 반가폭 (FWHM)은 각각  $221.3$ 와  $90.2\ \text{cm}^{-1}$ 로서 결정

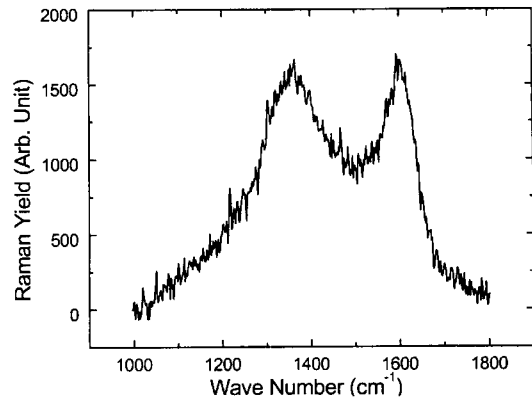


그림 3. 유리화 비정형 탄소분말의 전형적인 라만 스펙트럼.

질 흑연의 값들 보다 큰 값을 가지고 있는데 [14], 이는 필름의 구조가 비정질이어서 재료 내 탄소결합의 진동 주파수 분포가 넓기 때문에 나타나는 현상이다. 유리화 비정형 탄소는 탄소와 유리의 성격을 동시에 가지고 있으며, 전기전도성이 우수하고 화학적으로 매우 안

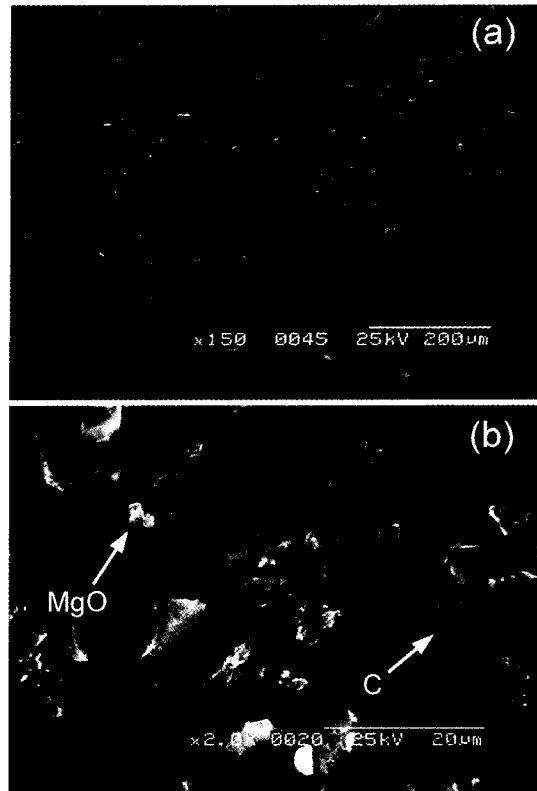


그림 4. 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소분말의 SEM 미세조직.

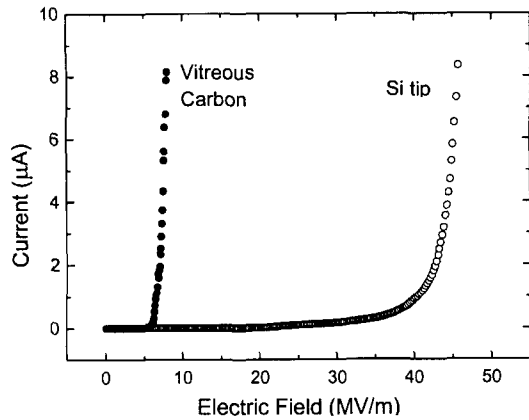


그림 5. 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소분말과 Si tip의 I-V curve.

정하여 전극이나 필터 등에 광범위하게 사용되고 있는 재료이다. 그림 4(a)는 기판 위에 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소입자들의 SEM 사진으로서, masking되어 있지 않은 전체면적에 걸쳐 균일하게 코팅되어 있음을 보여주고 있다. 그림 4(b)의 고배율 SEM 사진으로부터 탄소 입자 주변과 표면에 MgO 입자들이 함께 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 절연성 MgO가 전계방출 거동에 미치는 영향에 관해서는 뒤에서 다시 논의할 것이다.

그림 5는 코팅된 유리화 비정형 탄소에서 관찰되는 전계방출 거동을 보여주는 I-V curve이다. 그림 5에는 비교를 위해 Si tip의 전계방출 거동도 함께 도시하였다 [15]. 다이아몬드나 다이아몬드상 카본필름에서는 전계방출을 관찰하기 위해서 수회 혹은 수십 회에 걸쳐 반복적으로 전압을 인가하는 초기화 공정이 필요한 것으로 알려져 있다 [16]. 이러한 초기화 공정의 역할에 대해서는 아직 잘 밝혀져 있지 않으나, 초기화 공정 중에 표면에서 미세한 arc가 발생되면 전계방출이 현저히 증가한다는 결과가 발표되기도 하였다 [17]. 그러나, 유리화 비정형 탄소의 경우에는 이러한 초기화 공정이 없이도 안정된 전계방출을 관찰할 수 있었다. 유리화 비정형 탄소에서 전자의 방출이 시작되는 임계 전장의 크기(1 nA 이상의 전류가 측정되는 전장으로 정의)는 3에서 4 MV/m 구간의 값을 가지고 있었으며, Fowler-Nordheim plot의 직선적 관계로부터 전형적인 전계방출 현상임을 확인할 수 있었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 유리화 비정형 탄소의 전계방출 임계 전장은 Si tip의 임계 전장 값인 20 MV/m 보다 훨씬 작은 값을

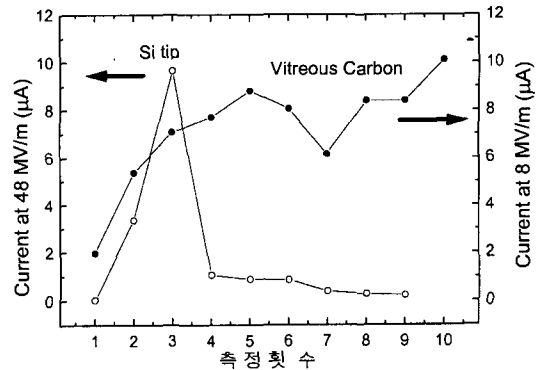


그림 6. 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소분말과 Si tip 전계방출 전류의 측정횟수 의존성.

가지고 있었으며, Fowler-Nordheim plot의 기울기로부터 평가된 유효 일함수(effective work function) 역시 0.05에서 0.08 eV로 Si tip (약 0.12eV)에 비해 매우 작은 값을 가지고 있었다.

전계방출의 안정성 면에서도 유리화 비정형 탄소는 Si tip에 비해 뛰어난 거동을 보이고 있다. 그림 6은 유리화 비정형 탄소와 Si tip의 I-V 거동의 반복 측정에 따른 전계방출 전류의 변화를 보여주는 그래프이다. 유리화 비정형 탄소의 경우에는 전장 8 MV/m에서 측정된 전류이며, Si tip의 경우에는 48 MV/m에서 측정된 전류의 변화를 보여주는 것이다 [15]. Si tip의 경우 3회 반복측정까지 방출 전류가 증가하고 있으나, 그 이후에는 급격히 감소하여 9회 이후에 전류의 방출이 거의 관찰되지 않았다. Si tip의 전계방출 불안정성에 대해서는 많은 연구결과가 발표되어 있으며, 이는 native oxide [18], 잔류가스와의 화학반응 [19], 표면에 흡착된 불순물과 이로 인한 arc의 발생 그리고 back sputtering에 의한 tip 형상의 변화 [20]에 기인하는 것으로 알려져 있다. 한편, 유리화 비정형 탄소의 경우에는 3회 반복 측정까지는 인가 전장 8 MV/m에서 방출전류가 2에서 8  $\mu$ A까지 증가한 뒤, 그 이후 10회까지의 반복측정 동안 방출 전류의 변화가 거의 관찰되지 않았다. 또한, 9회의 반복측정 후 8 MV/m의 전장 하에서 30분 동안 방출전류의 안정성을 조사한 결과, 8.4  $\mu$ A에서 변동률 15% 미만의 안정된 전자방출이 일어나고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과들은  $sp^2$  결합만으로 이루어진 유리화 비정형 탄소분말의 전계방출 거동이 그 안정성과 임계 전장의 관점에서 모두 다이아몬드나 다이아몬드상 카본

필름, 그리고 Si tip보다도 뛰어나다는 것을 보여주고 있다 [1, 15]. 더구나, 다이아몬드나 다이아몬드상 카본필름에서 전계방출을 관찰하기 위해 반복적으로 전장을 인가해야 하는 초기화 공정없이도 재현성있는 전자의 방출을 관찰할 수 있었다 [16]. 카본계 물질에서 일어나는 전계방출 현상의 기구는 아직 명확히 밝혀져 있지 않지만, 필름 내에 존재하는  $sp^3$  결합에 의해 음의 전자친화도를 갖는 표면이 형성되고, 이러한 표면특성에 의해 전자가 방출된다는 모델이 제시되어 있다 [9]. 그러나, 본 연구의 결과는  $sp^3$  결합의 양이 다이아몬드등 카본계 물질에서 관찰되는 전계방출 현상의 필요조건이 아니라는 것을 보여주고 있다. 오히려 카본계 음극 물질의 표면은 원자의 relaxation이나 물리적 혹은 화학적 흡착에 의해 벌크 내의 원자 결합구조와는 무관한 전기적 구조를 갖는 것으로 판단된다.

한편, 안정적인 전계방출이 일어나기 위해서는 음극 물질의 표면에서 진공 중으로 전자의 방출이 용이해야 할뿐만 아니라, 기판 혹은 전극으로부터 음극물질로의 전자 공급과 음극물질 내에서 표면으로의 전하이동이 원활하여야만 한다. 이러한 점에서는 음극물질과 기판의

계면, 그리고 음극물질의 전기적 특성 역시 전계방출 거동에 많은 영향을 미치게 된다. 본 연구에서 사용된 유리화 비정형 탄소는  $sp^2$  결합만으로 구성되어 있어 높은 전기전도도를 가지고 있다. 따라서, 유리화 비정형 탄소에서 관찰되는 우수한 전계방출 거동은 이 물질이 가지고 있는 높은 전기 전도도에 기인하는 것으로 생각된다.

그림 7은 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소의 발광특성을 보여주는 사진들로서, 전장 5.5 MV/m 하에서 시간에 따른 발광패턴의 변화를 보여주고 있다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 전장인가 직후에는 국부적인 부분에서 매우 밝은 발광특성을 보이고 있으나, 전장의 인가 시간이 증가함에 따라 발광부의 숫자가 증가하고 발광의 세기도 균일해 지고 있음을 알 수 있다. 그림 7(d)는 48시간동안 전장을 인가한 뒤에 코팅면적 전체에 걸쳐 고른 발광이 일어나고 있음을 잘 보여주고 있다. 이 결과는 유리화 비정형 탄소에서 전면발광이 가능하다는 것을 의미하고 있으나, 그림 4(a)에서 관찰된 코팅 부분의 입자밀도에는 크게 못 미치는 발광부 밀도와 장시간의 전압을 인가한 후에만 전면 발광이 가

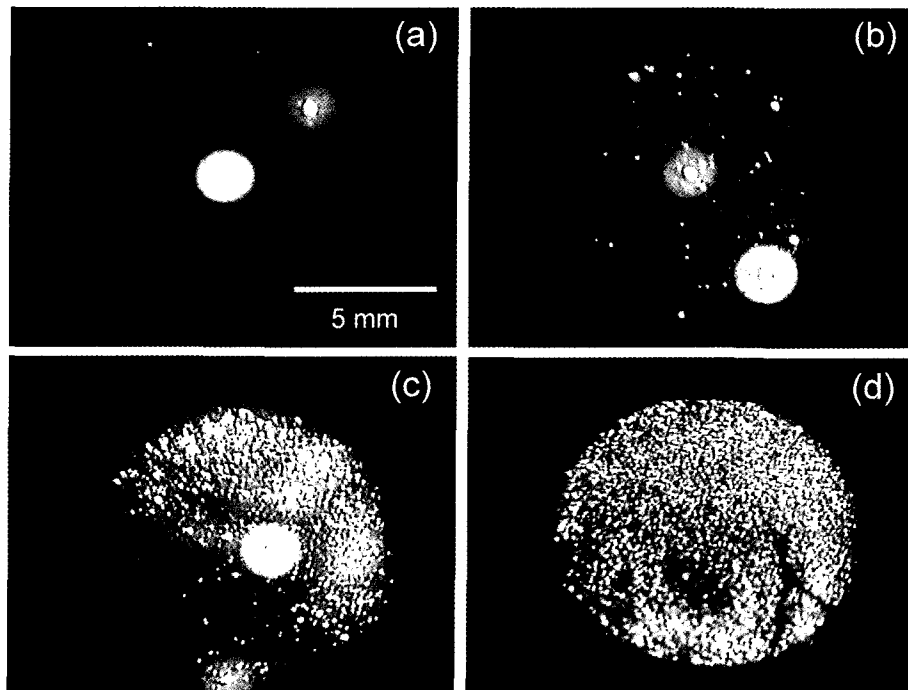


그림 7. 인가전장 5.5 MV/m에서 전장 인가 시간에 따른 발광패턴의 변화. (a) 인가직후, (b) 10시간후, (c) 26시간후, (d) 48시간후.

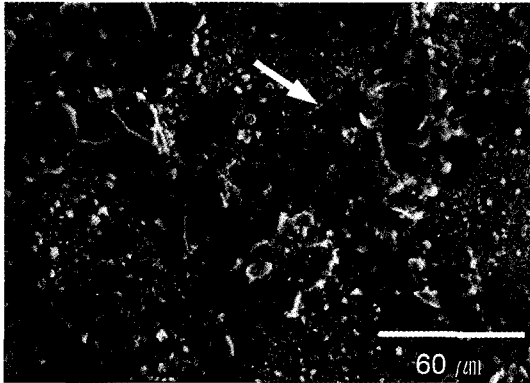


그림 8. 전계방출 특성 측정 후 시편표면의 SEM 미세구조.

능하다는 문제점도 동시에 보여주고 있다.

그림 8은 전계방출 거동의 측정 후 코팅 층의 미세 조직을 보여주는 SEM 사진이다. 그림 8과 그림 4를 비교해 보면, 전계방출 거동의 측정 후에는 전극표면에 남아있는 유리화 비정형 탄소 입자의 수가 현저히 줄어든 것을 알 수 있다. 그림 4(b)에 보는 바와 같이 전기영동법에 의해 코팅된 탄소입자의 주위에는 절연성의 MgO가 존재한다. 이러한 절연층은 전기장의 인가에 따라 정전기를 유발하게 되고, 이에 따른 breakdown등이 발생할 가능성이 높다. 이러한 breakdown이 발생하면, 접착력이 나쁜 탄소입자는 대부분 기판으로부터 떨어져 나가는 것으로 판단된다. 그림 8의 화살표는 탄소입자가 전계방출 전류의 측정 중에 떨어져 나간 부분을 잘 보여주고 있다. 따라서, 코팅부의 입자 밀도에 비해 전체 발광 밀도가 낮은 이유는 전기영동법에 의해 코팅된 탄소입자의 접착력이 충분치 못하여, 탄소입자가 전장 인가에 의해 기판으로부터 떨어져 나갔기 때문인 것으로 생각된다. 그림 7(d)의 우측 하단에 발광되지 않는 부분 역시 현미경 관찰을 통해 탄소입자가 기판으로부터 떨어져 나간 부분임을 확인할 수 있었다. 따라서, 발광밀도의 증진을 위해서는 탄소입자 코팅 시의 접착력 증진이 요구된다.

한편, 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 전기영동법으로 코팅된 탄소입자의 코팅 면적 전체에서 고른 발광을 관찰하기 위해서는 장시간의 전장인가가 필요하였다. 이러한 거동은 코팅된 시편을 수소의 rf. 글로우 방전을 이용하여 표면 처리를 하거나, 시편을 다시 공기 중에 노출시킨 뒤에도 마찬가지로 일어났다. 따라서, 이러한 현상은 탄소입자 표면의 물리적 혹은 화학적 흡착

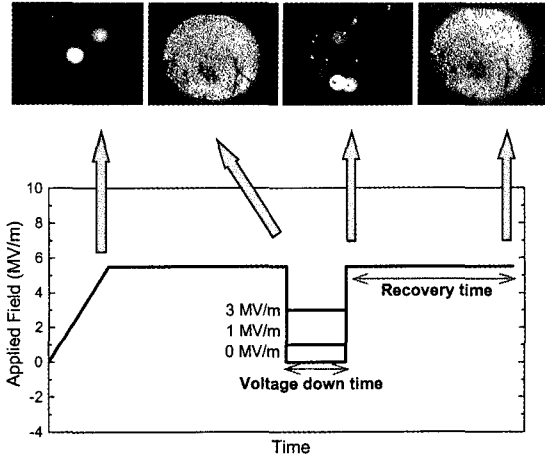


그림 9. 전장인가 histogram과 각 단계에서의 발광패턴.

때문에 발생하는 것은 아닌 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 전계방출의 지체 현상을 자세히 관찰하기 위해 전장 변화 실험을 수행하였다. 그림 9는 인가 전장의 histogram과 각 단계에서의 발광패턴을 보여주고 있다. 오랜 시간동안 5.5 MV/m의 높은 전장을 인가하여 전면 발광을 일으킨 뒤, 인가 전장을 3 MV/m, 1 MV/m 그리고 0 MV/m로 감소시켜 발광이 일어나지 않도록 하였다. 각각의 낮은 전장에서 일정 시간을 유지한 뒤, 다시 인가 전장을 5.5 MV/m로 상승시켰을 때의 발광거동을 관찰하였다. 전면 발광이 일어난 후에도, 전장을 감소시킨 뒤 다시 상승시키면, 그 초기에는 그림 9의 발광 패턴에서 보는 것처럼 전면에서 고른 발광을 하지 않고 국부적인 발광을 하고 있었다. 그러나, 높은 값의 전장을 인가한 시간이 증가함에 따라 발광 site의 수가 증가하여, 다시 전면 발광으로 회복되었다. 본 연구에서는 전장 상승 후, 다시 전면 발광으로 회복되는 데 소요되는 시간을 회복시간(recovery time)으로 정의하였다. 그림 10은 각각의 낮은 전장에서 유지한 시간에 따른 회복시간의 변화를 보여주는 그래프이다. 낮은 전장에서 유지한 시간이 증가함에 따라, 회복시간은 단조 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 전혀 전장을 인가하지 않은 경우에 비해, 1 혹은 3 MV/m의 낮은 전장을 인가한 경우의 회복시간이 매우 짧게 나타났다.

이러한 거동은 유리화 비정형 탄소입자를 코팅하면서 생성된 절연성의 MgO가 탄소입자의 표면이나 주변에 부착되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 그림 11은 전

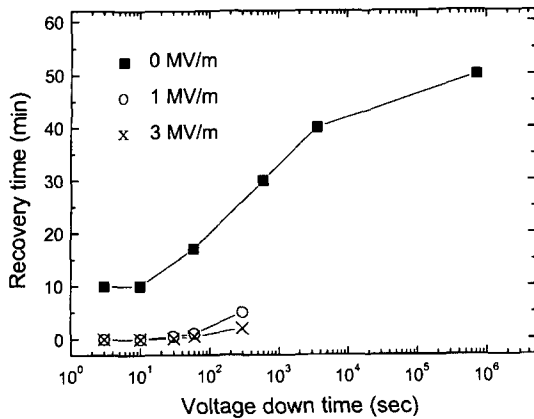


그림 10. 여러 낮은 전장에서의 유지시간에 따른 발광패턴의 회복시간 변화.

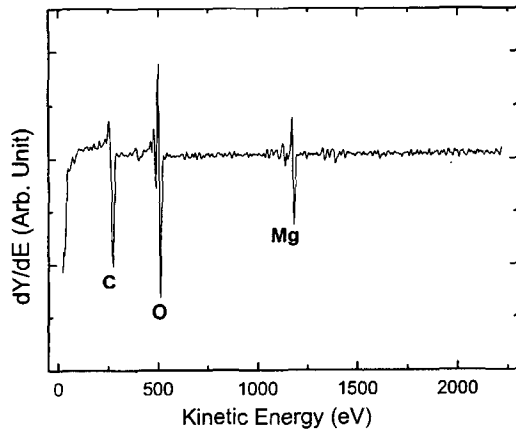


그림 11. 전계방출 거동의 측정 후 기판에 남아있는 탄소입자 표면의 오제 스펙트럼.

계방출 거동을 측정하고 난 뒤, 시편의 표면에 남아 있는 탄소입자의 Auger 분석결과이다. 그림 11의 Auger 스펙트럼은 입자의 표면을 Ar 이온으로 15분 동안 sputtering하고 난 뒤의 스펙트럼으로서, 탄소입자의 표면은 매우 두꺼운 MgO층에 의해 둘러싸여 있음을 알 수 있다. 이 두꺼운 MgO 층은 탄소입자의 접착력을 증진시키는 효과를 가지고 있지만, 전기적인 관점에서는 전계방출의 capacitor층으로 작용하게 될 것이다. 그림 10의 인가 전장의 변화 실험 결과는 MgO 층의 축전 효과를 잘 보여주고 있다. 전장 감소시의 전장이 1내지 3 MV/m의 경우 회복시간이 현저히 짧게 관찰되는 것은 MgO층 내에서 전하가 유지되어 짧은 시간 내에 바로 전면 발광을 구현할 수 있기 때문이며, 전장을 전

혀 인가하지 않은 0 MV/m의 경우에는 MgO층에서 전하의 소멸이 발생하여 다시 전면발광으로 회복되는데 긴 시간이 소요되는 것으로 생각된다.

또한, 전계방출에 따른 MgO층의 온도 변화도 전체 시스템의 전계방출 거동에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 전장인가 초기에 관찰되는 국부적인 발광은 MgO 층의 두께가 얇아서 축전효과가 적은 부분으로부터 전자의 방출이 일어남을 보여주고 있다. 전장인가 시간이 증가함에 따라 이런 국부적인 전자의 방출이 주위의 온도를 상승시키면, MgO층의 전기 저항이 감소되고 주변 탄소입자로의 전기적 접촉이 용이해지면서 넓은 면적에서의 전자 방출을 유도하는 것으로 생각된다. 인가 전장의 변화 실험에서 관찰된 낮은 전장의 인가시간이 길어짐에 따라 회복시간이 길어지는 현상도 같은 맥락에서 이해할 수 있을 것이다. 따라서, 빠른 반응속도를 갖는 전계방출 소자의 제작을 위해서는 입자의 코팅을 위해 사용하는 보조재료의 전기적 물성을 개선하여야 할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소를 이용하여 비교적 낮은 전장 하에서 전면 발광의 가능성을 확인하였다. 유리화 비정형 탄소에서 관찰된 전계방출 거동은 절연 특성을 가지는 다이아몬드나 다이아몬드상 카본필름보다 우수하였으며, 날카로운 Si tip의 경우보다도 안정성과 임계 전장 등 모든 면에서 우수한 전자 방출 거동을 보여주었다. 탄소의  $sp^3$  결합만으로 이루어진 유리화 비정형 탄소로부터 매우 안정되고 우수한 전계방출 거동을 관찰한 본 실험의 결과는 카본계 물질에서 관찰되는 전계방출이 탄소의  $sp^3$  결합과 밀접하게 관련되어 있지 않다는 것을 보여주고 있다. 카본계 물질에서 전계방출 거동에 주된 영향을 미치는 인자는 전극으로부터의 전자공급, 혹은 전자가 재료의 표면으로 이동하는데 필요한 음극 재료의 전기전도도이며, 카본계 물질의 표면 전자방출 특성은 그 구조와 관계없이 전계방출 소자로 이용하기에 충분한 것으로 판단된다.

그러나, 전기영동법으로 코팅된 유리화 비정형 탄소는 코팅방법상 피할 수 없는 절연성의 MgO 접착층을 가지게 되는데, 이 MgO층이 소자의 반응속도와 발광 밀도를 크게 저하시키고 있었다. MgO층의 축전효과로

인해 전장에 따라 발광거동이 상당한 시간지체 현상을 보이고 있었으며, 심한 경우 탄소입자를 기관으로부터 분리시켜 발광 밀도를 감소시키고 있음을 확인하였다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 탄소입자의 접촉력 향상과 접촉층의 전기적 특성제어에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] W. Zhu, G. P. Kochanski, S. Jin, L. Seibles, J. Appl. Phys. **78**, 2207 (1995).
- [2] P. W. May, S. Höhn, M. N. Ashfold, W. M. Wang, N. A. Fox, T. J. Davis, and J. W. Steed, J. Appl. Phys. **83**, 1618 (1998).
- [3] A. G. Rinzier, J. H. Hafner, P. Nikolaev, L. Lou, S. G. Kim, D. Tomanek, P. Nordlander, D. T. Colbert, and R. E. Smalley, Science **269**, 1550 (1995).
- [4] F. T. Himpel, J. A. Knapp, J. A. VanVechten, and D. E. Eastman, Phys. Rev. **B20**, 624 (1979).
- [5] O. M. Küttel, O. Gröning, C. Emmenegger, and L. Schlapbach, Appl. Phys. Lett., **73**, 2113 (1998).
- [6] B. B. Pate, Surf. Sci. **165**, 83 (1986).
- [7] D. Hong, M. Aslam, M. Feldman, and M. Olinger, J. Vac. Sci. Technol. **B12**, 764 (1994).
- [8] Z. H. Huang, P. H. Cutler, N. M. Miskovsky, and T. E. Sullivan, Appl. Phys. Lett. **65**, 2562 (1994).
- [9] W. S. Xu, Y. Tzeng, and R. V. Lattan, J. Phys. **D26**, 1776 (1993).
- [10] L. S. Pan, T. E. Felter, D. A. A. Ohlberg, W. L. Hsu, C. A. Fox, R. Cas, and G. Vergara, J. Appl. Phys. **82**, 2624 (1997).
- [11] R. D. Forrest, A. P. Burden, R. V. A. Khan, and S. R. P. Silva, Surf. Coat. Technol. **168/169**, 577 (1998).
- [12] B. E. Russ and J. B. Talbot, J. Electrochem. Soc. **145**, 1245 (1998).
- [13] B. S. Jeon, J. S. Yoo, and J. D. Lee, J. Electrochem. Soc. **143**, 3923 (1996).
- [14] H. C. Tsai and D. B. Bogy, J. Vac. Sci. Technol. **A5**, 3287 (1987).
- [15] S. H. Ahn, K. R. Lee, K. Y. Eun, and D. Jeon, Surf. Coat. Technol., in press (1999).
- [16] B. S. Satyanarayana, A. Hart, W. I. Milne, and J. Robertson, Appl. Phys. Lett. **71**, 1430 (1997).
- [17] O. Gröning, O. M. Küttel, P. Gröning, L. Schlapbach, Appl. Surf. Sci. **111**, 135 (1997).
- [18] W. J. Bintz and N. E. McGruer, J. Vac. Sci. Technol., **B12**, 697 (1994).
- [19] D. Temple, D. Palmer, J. Mancusi, L. Yadon, D. Vellenga, and G. E. McGuire, 11th Int'l Conf. on Vacuum Microelectronics, Asheville, U.S.A., p. 99 (1998).
- [20] Q. Li, J. G. Xu, H. B. Song, X. F. Lie, and W. P. Kang, J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 1889 (1996).