

# Sputtering과 Metallization

김민선\*, 윤능구 · \*한국생산기술연구원 섬유융합연구부, (주)소로나

## 1. 서론

섬유고분자 소재의 표면을 변화시킴으로써 재료가 갖는 성능을 향상시키거나 또는 새로운 기능을 부여하는 표면처리기술은 매우 중요한 연구 분야를 이루고 있다. 이러한 표면처리에 의해서 재료의 접착성, 염색성, 투과성, 용해안정성, 내후성, 전기전도성 및 생체적합성과 같은 physicochemical 특성이 개선 될 수 있다. 일반적으로 섬유고분자 소재는 매우 우수한 벌크 성질을 지니고 있지만, 표면이 비활성이거나 표면 에너지가 낮은 경우 다양한 적용분야에서 요구 조건에 부합되는 표면처리가 필요하다. 표면처리기술의 장점은 섬유고분자 소재의 벌크 성질에는 영향을 주지 않고, 표면의 물리적 성질 및 화학적 성질의 개질이 가능하다는 점이다. 또한, 표면개질에 의해 저가의 소재를 고가의 소재로 가공이 가능하므로 향후 산업에 있어서 표면처리기술의 중요성이 더욱 증가할 것으로 기대된다. 특히, 플라즈마 처리와 같은 건식표면처리기술은 최근 습식표면처리 공정에서 문제시되고 있는 폐수공해문제 등을 진공 공정으로 해결할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 기능성 피막을 창출함으로써 새로운 첨단 기술 분야로 각광받고 있다.

플라즈마 가공기술은 플라즈마를 이용한 소재의 식각, 증착, 표면처리 등을 포함하며, 이를 위한 다양한 플라즈마 장비들은 상호보완적인 공통 원천기술을 공유하고 있으므로 이를 플라즈마 요소기술별로 묶어 개발할 필요성이 증대되고 있다. 본 고에서는 스퍼터링(sputtering)으로 대별되는 플라즈마에 의한 물리적 증착공정의 원리 및 스퍼터링 장비와 섬유고분자 소재에 대표적으로 적용되고 있는 정전기 차폐 및 도전성 섬유 분야의 응용 현황에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 스퍼터링의 원리 및 종류

스퍼터링은 높은 에너지를 갖는 미립자들의 충돌에 의해 타겟(target) 물질의 표면으로부터 원자들이 떨어져 나오는 현

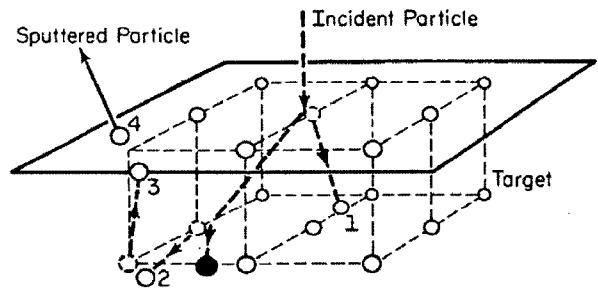


Figure 1. Computer simulation of a portion of collision sequence initiated by n-bombardment event in a solid lattice.

상을 이용하는 박막 공정중의 하나이다. 일반적으로 스퍼터링은 글로우 방전을 이동하여 먼저 이온을 형성하고 이를 전장으로 가속시켜 타겟 고체표면에 충돌시킨다. 이러한 작용을 받은 고체내부의 원자와 분자들은 운동량 교환을 통해 타겟 고체표면으로부터 떨어져 나와 기판 쪽으로 이동하게 된다. 이렇게 이동한 원자들은 기판 위에서 응축되고 결국에는 얇은 박막을 형성하게 된다. 본 장에서는 스퍼터링 기술의 기본 원리 및 스퍼터링 방법에 대하여 소개하고 향후 스퍼터링 기술의 개발 방향에 대하여 전망하고자 한다.

### 2.1. 스퍼터링의 기본 원리

#### 2.1.1. 스퍼터링 현상

스퍼터링은 Figure 1과 같이 글로우 방전을 이용하여 이온을 형성하고 이를 전장으로 가속하여 고체 표면에 충돌시켜 고체 내부의 원자와 분자들의 운동량 교환을 통해 표면 밖으로 튀어나오게 되는 현상을 말한다.

#### 2.1.2. 글로우 방전

기체의 압력이  $10 \sim 10^3$  torr 정도 인 진공내에서 두 개의 전극간에 고전압을 걸어주었을 때, 양전극에 생기는 방전현상이다. 글로우 방전 중의 기체입자의 이온은  $10^5 \sim 10^3$  정도의 분율로 존재한다. 또한, 전자와 기체분자와의 비탄성 충돌에 의해 여기상태에 있는 중성 원자도 존재한다. 전자의 질량은

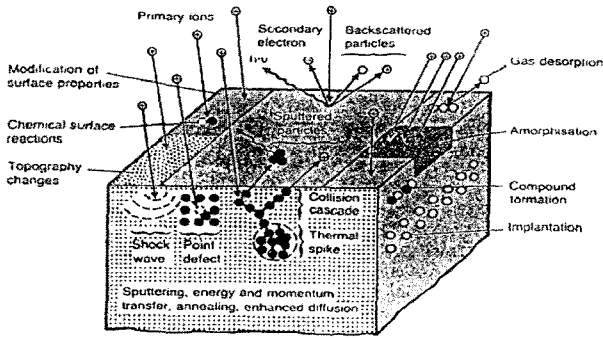


Figure 2. Synopsis of the interaction events occurring at and near the target surface during the sputtering process.

이온의 질량보다 훨씬 작기 때문에 플라즈마 중에서의 전자의 이동도는 이온의 이동도보다 크다. 따라서, 플라즈마 밖에서 자장이 가해지면 전자만이 가속되고 이온은 그 만큼 가속되지 않는다.

### 2.1.3. 타겟 표면에서의 반응

가속된 양이온이 고체 타겟의 표면에 충돌하면 Figure 2와 같이 중성원자 배출, 후방산란, X선 방출, 광자 발생, 이차 전자 방출, 그리고 타겟 표면에서 기체원자의 탈착 등이 발생하며, 타겟에서는 비정질화, 이온침투, 화합물 형성, cascade 발생, 국부적 가열, 점결합 등이 생성된다.

플라즈마를 유지하는 데 가장 중요한 역할을 하는 것은 이차 전자이다. 플라즈마 내에서 이차 전자는 추가적인 이온화를 일으키고 플라즈마의 광학적 발산의 색은 타겟 재료, 가스의 종류, 압력, 여기된 정도 등의 특징으로서, 방전 내의 구성요소들의 존재는 특성 스펙트럼 파장의 조사로 알 수 있다.

### 2.1.4. 스퍼터링율(sputtering yield) (S)

스퍼터링율은 “하나의 양이온이 음극에 충돌할 때 표면에서 방출되는 원자의 수”로 정의되며, 이는 타겟 재료의 특성 및 입사 이온의 에너지와 질량과 관계가 있다. 양이온의 가속 전압이 증가하면 스퍼터링율도 증가하고 가속전압이 매우 크면 가속된 이온이 타겟의 내부에 깊이 주입되어 오히려 스퍼터링율이 감소하게 된다.

### 2.1.5. 타겟의 선정

가속된 이온이 가지고 있는 에너지와 운동량의 전이, 충돌로 인한 가열, 가열에 의한 어닐링, 이온이나 원자의 확산에 의해 스퍼터링 반응은 지배를 받는다. 따라서, 이러한 지배요소가 타겟의 실제적인 사용을 제한하기도 한다. 이온이 타겟

에 충돌하여 가열이 일어나면 흡착되어 있던 가스가 탈착하려는 경향을 보인다. 이것은 분말 야금법으로 만들어진 타겟과 같이 밀도가 높지 않은 재료의 경우 water vapor가 표면에서 화학반응을 일으킬 수 있으므로 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 또한, 질소, 산소, 탄화수소 같은 반응성 기체가 표면에 남게 되면 부가적인 화학반응이 발생하게 되고 타겟에 화합물을 형성하여 스퍼터링 속도를 감소시킨다. 타겟의 열전도도가 낮으면 냉각속도를 감소시켜 타겟의 높은 온도로 인해 sputtering 속도 증가한다. 그러나 높은 온도는 화학반응을 쉽게하여 나쁜 영향을 끼치기도 한다. 따라서, 위와 같은 사항들을 고려하여 타겟을 선정하여야 한다.

### 2.1.6. 스퍼터링 공정 인자

스퍼터링 공정에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 다음과 같다.

- ① 방전계내에서의 산란
    - 대부분의 원자는 산란 때문에 낮은 에너지로 기판에 도달
    - 기판-타겟 거리가 멀수록 산란 효과가 커서 증착속도 감소
  - ② 처리 가스 압력
    - 기체 압력이 너무 낮으면 플라즈마의 이온화율이 감소하여 스퍼터링 속도 감소
    - 기체 압력이 너무 높으면 mean free path의 감소로 인하여 에너지가 줄어들어 증착속도 감소
  - ③ 증착 도중의 부가적인 기판 가열과 negative bias 전압
    - 성장하는 막의 미세조직에 영향
  - ④ 기판 온도와 negative bias에 따른 조직
    - Figure 3에서 보이는 바와 같이, 기판 온도는 negative bias는 형성되는 박막 조직에 영향을 미친다.
- 1) Zone I: 저온에서는 open dendritic arrangement, 낮은 밀도를 갖는다

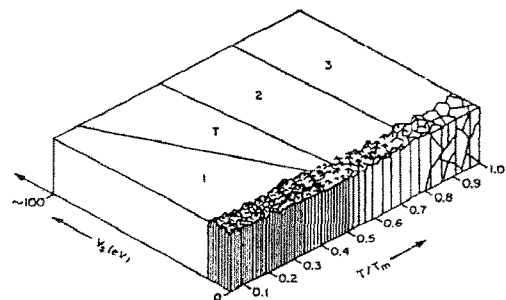


Figure 3. Revised structure zone model illustrating the combined influences of substrate bias voltage and substrate temperature (relative to the melting temperature) for thick films.

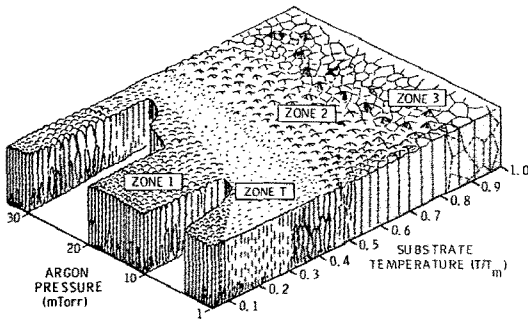


Figure 4. Structure-zone diagram showing schematic microstructures of films deposited by cylindrical magnetron sputtering as a function of growth temperature and Ar pressure.

- 2) T-zone : dense columnar formation, T-zone 정도의 온도에서는 어느 정도 높은 밀도를 가지므로 압력을 조절하여 특성을 조절한다
- 3) zone II: second dense columnar microstructure, 온도가 높아지면서 조금 더 밀도가 높아진다.
- 4) zone III : dense equiaxed grain structure로 재결정 영역이다.

⑤ 기판 온도와 압력에 따른 조직

여기서도 역시 온도가 높을수록 더욱 높은 밀도를 가지는 조직을 형성한다. 압력에 대한 영향은 온도와 반대이다. Figure 4에서와 같이 높은 압력의 경우 산란에 의해 에너지가 낮아지고 막은 porous하게 된다. 그래서 압력이 낮을수록 T-zone이 형성되는 온도는 더욱 낮아진다.

2.2. 스퍼터링의 종류

지금까지 다양한 방법의 스퍼터링이 이용되어 왔는데, 그 중에서도 이극 직류 스퍼터링, 마그네트론 스퍼터링, RF 스퍼터링 및 최근에 많이 이용되는 이온빔 스퍼터링 등이 주를 이루고 있다. 먼저, 반응성 및 비반응성 스퍼터링의 특징을 살펴본 후 스퍼터링의 주요한 방법들에 대해 소개하도록 한다.

2.2.1. 이극 직류 스퍼터링

이극 직류 스퍼터링은 타겟에 단순히 고전압을 인가하여 글로우 방전에 의한 스퍼터링을 이용하는 것으로 장치 및 공정이 간단하다는 장점을 갖는 반면 증발율이 낮고  $10^{-2}$  Torr 이상의 높은 압력에서 공정이 이루어지므로 방전가스 혼입 가능성이 크다는 단점이 있다. 그러나 증착 두께가 균일하여 균일한 두께 분포가 요구되는 박막 제조에 많이 이용되고 있다. 별도의 전자 공급원을 이용한 소위 3극 방식을 이용하는 경우가 많다.

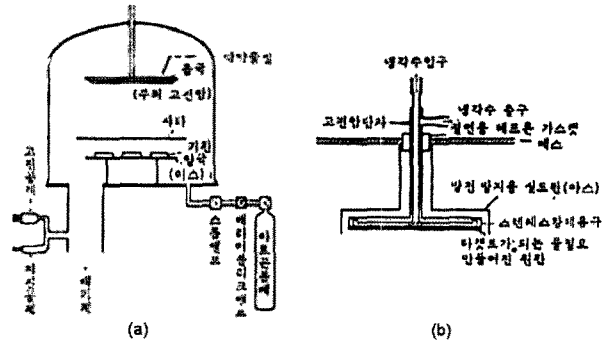


Figure 5. (a) 전형적인 이극 직류 스퍼터링 장치, (b) 스퍼터링 장치에서의 음극(타겟)의 구조.

2.2.2. RF 스퍼터링

스퍼터링 플라즈마를 발생 시에 oscillating power source를 사용하므로 직류방법보다 많은 장점이 있다. 즉, 부도체 재료를 스퍼터링할 수 있고, 낮은 압력하에서 사용 가능하다. 주파수가 50 kHz 이상이면, negative 글로우 영역에 있는 전자들은 기체 원자들을 직접 이온화 할 수 있는 충분한 에너지를 갖게 되어 실질적으로 방전을 유지하는 데 필요한 전자들의 수가 감소한다. 효과적인 스퍼터링을 위해서는 coupled electrode의 크기가 direct electrode의 크기보다 작아야 한다. RF 발생기를 직접 ground에 연결하거나 chamber의 벽 또는 기판 고정 장치에 ground를 시켜서 작은 크기의 coupled 전극을 만들 수 있다. 하지만 이러한 공명 circuit을 이루는 데 필요한 inductance를 만들기 위해서는 RF 발생기와 load 사이에 impedance-matching network를 필요로 한다. RF system에서는 inductive, capacitive 손실 감소를 위해 적당한 접지, 도선 길이의 최소화, 불필요한 연결부분을 제거하는 것이 중요하다. RF 스퍼터링의 단점으로는 insulating 타겟은 열전도성이 좋지 않아 부도체의 증착속도가 제한되는 점을 들 수 있다. metal source로부터 화학반응을 이용하여 절연막을 증착시키는 방법도 사용된다. 거의 모든 물질이 RF 방전에서 스퍼터링 되지만 생성된 막이 타겟의 조성파 반드시 일치하지는 않으며, 금속, 합금, 산화물, 질화물, 탄화물 등의 증착 등에 다양하게 사용된다.

2.2.3. 삼극 스퍼터링

Figure 6과 같이 금속 필라멘트를 가진 제 3의 전극(simple biased conductor of thermionic electron source)을 달아 열전자를 방출시켜 이온화율을 높이는 방식이다.

장점으로는 낮은 압력( $10^{-5}$  torr)에서 스퍼터링이 가능할 뿐만 아니라 낮은 전압(40 V 이하)에서도 스퍼터링이 가능하므

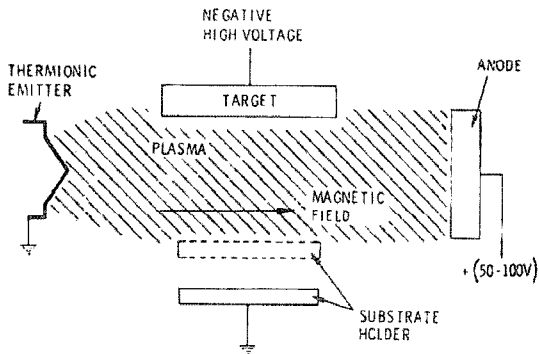


Figure 6. Schematic drawing of hot-cathode assisted discharge device(triode).

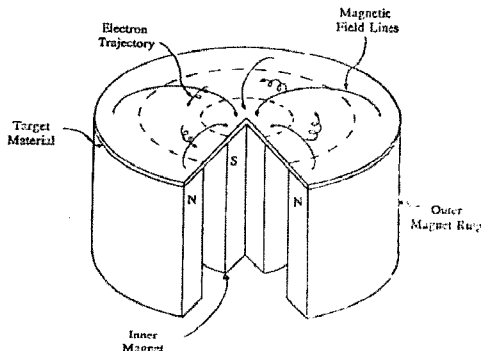


Figure 7. Circular, planar magnetron cathode schematic, illustrating the magnetic confinement and the resulting electron trajectories.

로 2차 전자로 방전을 유지할 필요가 없다는 점이다. 또한, 전자 소스의 여기에 변화를 줌으로써 전압과 무관하게 전류를 변화시켜 이온 밀도를 높일 수 있으며, 증착 속도를 증가시킬 수 있고 플라즈마의 밀도 또한 독립적으로 조절하는 것이 가능하다. 단점으로는 사용방법이 복잡하며 열전자 방출로 인한 오염이 증가할 수 있으며 반응적인 과정에서는 적용이 어려우며 규모를 크게 하기에는 용이하지 않다는 점을 들 수 있다.

2.2.4. 마그네트론 스퍼터링

마그네트론 스퍼터링이 다른 스퍼터링 방법과 차별화된 점으로는 강한 자기장을 이용하여 플라즈마의 대부분을 타겟 표면 근처에 묶는다는 점이다. 즉, 방출된 2차 전자의 궤도를 타겟 표면을 가로지르는 소용돌이 꼴의 나선 형태로 구부림으로써 플라즈마가 타겟 표면의 매우 가까운 곳에 유지되어 근처 지역에서 플라즈마 밀도가 높아지게 되므로 이온화율이 증가한다. 위와 같이 플라즈마를 가두었을 때의 장점은 증착 속도의 증가 되는 것이며, 또한, 챔버 벽과 기판으로부터의 스퍼터링이 감소되며, 증착 도중 기판의 가열이 감소될 뿐만 아니라 작용기체의 필요 압력도 감소시킬 수 있다는 점이다.

마그네트론 타겟은 Figure 7과 같이 전형적으로 'racetrack' 형태로서 고체 원판형 타겟에서 많은 양의 낭비가 있고, 타겟을 가로질러 스퍼터된 원자의 밀도가 고리 모양의 분포가 된다. 따라서, 증착의 균일성과 타겟 이용면에서 다른 형태의 많은 타겟이 개발되고 있다.

2.2.5. 비대칭 마그네트론 스퍼터링

비대칭 마그네트론 스퍼터링은 처음에 개발된 소스를 바탕으로 매우 다양한 형태가 개발되어 있으며 주로 자기장을 기판쪽으로 향하도록 유도하여 기판으로 향하는 코팅 물질의 이온화율을 향상시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특징으로는 내부 자석과 외부 자석의 자장의 세기가 다르므로 자장이 내부와 외부 사이를 벗어나 기판의 표면 쪽으로 향하는 유속이 생기고, 이러한 자장은 전기장 방향과 가까이 자기장의 방향과 전기장의 방향이 비슷해져 전자가 자장을 따라 스프링 모양을 그리면서 나선운동을 하여 기판쪽으로 향하게 된다. 따라서, 플라즈마가 음극 부근에 국한되지 않고 전체적으로 유지되는 것이 가능하다. 또한, 증착 도중 이온의 충돌은 막에 있어서 입자거동, 막의 구조, 조성 및 기계적 특성 등을 변화시킨다. 비대칭 마그네트론 스퍼터링의 세가지 기본 형태는 Figure 8과 같다. I 형태에서는 강한 내부 pole과 약한 외부 pole이 형성되므로 기판에 이온 충돌이 매우 낮다. 중간 형태의 경우는 대체적으로 균형을 이루므로 일반적인 마그네트론이 형성되며, II 형태에서는 약한 내부 pole과 강한 외부 pole이 형성됨에 따라 낮은 기판 bias potential에서 강화된 이온 충돌(2:1)이 이루어진다.

비대칭 마그네트론의 장점으로는 이온 에너지와 플럭스를 독립적으로 조절하는 것이 가능하며, 생성된 막의 미세구조와 관련된 공정 변수 사이의 관계를 보다 명확하게 알 수 있다는 점을 들 수 있다.

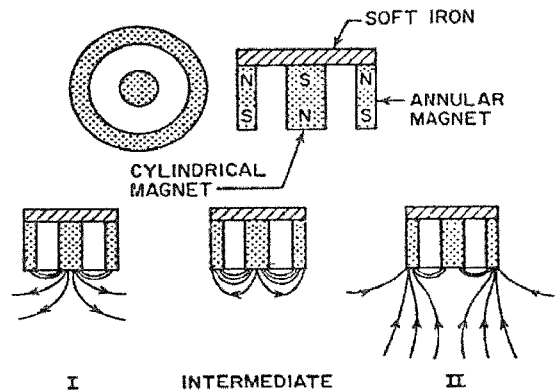


Figure 8. Unbalanced magnetron designs.

2.3. 스퍼터링 기술 향후 전망

표면개질 및 기능성 박막 형성 분야에서 스퍼터링 기술 적용성은 좀 더 다양해질 것으로 전망된다. 특히, 멀티 타겟에 의한 다중 층막의 증착을 위한 기술 개발이 진행되고 있으며, 장식용으로 다양한 색감의 코팅 분야로의 적용도 시도되고 있다. 스퍼터링 방법 특히, 비대칭 마그네트론의 경우 우수한 박막 밀착성이 가능함에 따라 미래 박막 형성 분야에서 더욱 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 섬유고분자 분야의 스퍼터링 응용 현황

metallization은 표면광택, 단열 및 도전성 등의 특징을 부여하기 위해 섬유산업 분야에서 오랫동안 적용되어 왔다. 일반적으로 메탈릭 섬유는 메탈 파우더 프린트(metallic powder printing) 또는 메탈 호일 라미네이션(metallic foil lamination) 공정에 의해 제조되지만 이러한 전통적인 공정들은 섬유의 촉감을 뻣뻣하게 하거나 통기성을 저하시키고 원단의 무게를 증가시킬 수 있는 단점이 있다. 이에 비해 스퍼터링에 의한 코팅 공정은 진공내의 음전극 소재에 전자계를 이용해서 고밀도의 플라즈마를 발생시킨 다음, 이온화 된 가스 이온이 전계에 충돌하고, 그 에너지에 의한 타겟 소재가 분자 또는 원자 상태로 튀어나와 처리 원단에 부착되는 원리를 이용한다. 스퍼터링 코팅 공정은 친환경적인 solvent-free 공정일 뿐만 아니라 박막형태의 기능성 코팅막을 형성시킬 수 있고, 또한 표면의 기공 구조를 유지할 수 있으므로 우수한 통기성을 얻을 수 있다. 따라서, 섬유 고분자 분야에서 스퍼터링 코팅 공정은 섬유고분자 소재 표면 특성을 개질시킬 수 있는 새로운 가능성을 열고 있다.

Q. Wei. 등은 구리 타겟을 이용한 스퍼터링 코팅에 의해 도전성을 부여하기 위한 연구를 진행하였다. polypropylene 니들펀칭, polypropylene 멜트브라운 및 polyamide 전기방사 웹에 Ar 가스 분위기하에서 각각 Cu-스퍼터링 처리하여 표면 특성의 변화 및 전기적 저항을 측정하였다. AFM으로 표면 구조를 관찰한 결과, 처리된 섬유 표면에는 13.6 nm에서 35.3 nm 범위에서 Cu-nanolayer가 형성되었으며 스퍼터링 시간이 증가할수록 nanolayer의 두께가 증가하였음이 보고되었다. 이때 전기저항은 스퍼터링 코팅을 처리하기 전의 시료의 경우,  $10^6 \Omega/cm$  이상으로 전기저항 측정기의 측정 범위를 벗어났으나, Cu-스퍼터링 후 전기저항값은 크게 감소하였으며 특히, polyamide 전기방사 웹의 경우에는  $1.6 \times 10^{-2} \Omega/cm$  값을 나타내었다.

전자·통신기기의 사용이 급격히 늘어남에 따라 전자파의 폐해에 대한 우려와 관심이 높아지고 전자파가 인체에 부정적인 영향을 미치는 연구결과가 속속 발표되면서 전자파 차폐기술의 개발이 활발히 진행되고 있다. 전자파 차폐의 기본 원리는 전압이 걸리는 부품에서 발생하는 유도전파인 저임피던스 차폐파를 전자파 차폐소재를 통해 반사 또는 흡수시키는 것으로 섬유에 전자파 차폐기능을 부여하는 방법으로 도전성 물질을 코팅, 도전성 물질을 혼합, 금속막을 형성하는 방법 등이 있다. 섬유고분자 소재에 전자파 차폐 기능을 부여하는 기술로서 스퍼터링에 의한 메탈 피막 형성기술은 약 17% 이상을 차지하고 있는 것으로 보고되고 있어, 산업현장에서의 적용이 이미 활발한 것으로 판단된다.

위와 같은 도전성이나 전자파 차폐 부여를 목적으로 하는 metallization 외에도 섬유의 향미생물 가공에 적용하기 위한 연구 결과도 보고되고 있다. J. Scholz 등의 연구에 의하면, SiO<sub>2</sub> 직물에 Al, Cu, Au, Pt, 및 Pt/Rh 타겟을 이용한 스퍼터링을 진행하여 각각의 시료의 향미생물성을 평가하였다. 적용된 메탈 타겟 모두 향미생물성을 부여할 수 있음을 확인하였으나 적용된 메탈 타겟에 따라 향미생물성의 등급은 각각 다르게 나타났다. 따라서, 섬유의 향미생물 가공 분야에서의 새로운 가능성도 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

스퍼터링의 타겟으로 주로 이용되는 메탈 타겟 이외에도 유기고분자 타겟을 이용한 연구개발도 진행되고 있다. 매우 뛰어난 소수성을 지닌 PTFE 필름을 스퍼터링에 의해 박막 형태로 형성한 연구를 H. J. Qi 등이 발표한 바 있다. H. J. Qi는 PTFE 타겟을 이용하여 PET 필름 위에 스퍼터링하여 PTFE 다공성 박막 필름을 제조하였다. 이때 PTFE 박막 필름은 수백 나노에서 수 마이크로 크기의 불규칙적인 grain으로 이루어져 있으며, 스퍼터링 공정 조건에 따라 grain 크기 및 분포가 조절 가능한 것으로 보고되었다.

이상과 같이 스퍼터링 공정은 신기능성 고기능 표면처리기술의 핵심기술로서 다양한 가능성을 지니고 있을 뿐만 아니라 친환경적인 건식공정으로서 섬유고분자 분야의 기능성 표면처리에 광범위하게 적용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. M. Yip, S. Jiang, and C. Wong, "Characterization of metallic textiles deposited by magnetron sputtering and traditional metallic treatments", *Surf. Coat. Technol.*, in press, (2009).
2. J. Scholz, G. Nocke, F. Hollstein, and A. Weissbach, "Investigations on fabrics coated with precious metals using the magnetron sputter technique with regard to their anti-microbial properties", *Surf. Coat. Technol.*, **192**,

252, (2005).

3. Q. Wei, Q. Xu, Y. Cai and Y. Wang, "Evaluation of the interfacial bonding between fibrous substrate and sputter coated copper", *Surf. Coat. Technol.*, **202**, 4673, (2008).
4. H. J. Qi, Y. B. Fu, D. Wang, X. Yang, K. Sui and Z. Ma, "SEM study of fluorocarbon films by R. F. sputtering PTFE 타겟s on PET substrates", *Surf. Coat. Technol.*, **131**, 177, (2000).
5. M. Hashem, N. A. Ibrahim, A El-Shafei, R. Refaie, and P. Hauser, "An eco-friendly-novel approach for attaining wrinkle-free/soft-hand cotton fabric", *Surf. Coat. Technol.*, in press, (2009).
6. V. S. Smentkowski, "Trends in sputtering", *Progress in Surface Science*, **64**, 1, (2000).
7. M. Musil and J. Vlcek, "A perspective of magnetron sputtering in surface engineering", *Surf. Coat. Technol.*, **112**, 162, (1999).
8. J. I. Jeong, W. C. Jung, T. G. Im and J. H. Jun, "Manufacturing Characterization of High Rate Magnetron Sputtering Source", *RIST 연구논문*, **17**(1), 20, (2002).

## • 김민선 -----

1993. 서울대학교 섬유공학과 졸업  
 1995. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)  
 2000. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)  
 2001-2003. Univ. of Connecticut, Institute of Materials Science (Post-Doc.)  
 2003-현재. 한국생산기술연구원 섬유융합연구부 수석연구원  
 e-mail : kimms620@kitech.re.kr

## • 윤능구 -----

1988. 인하대학교 금속공학과 졸업  
 1993. 아주대학교 재료공학과(석사)  
 1993-2000. Varian Korea 연구소  
 2004-현재. (주)소로나 대표이사  
 e-mail : ngyoon@sorona.co.kr