

입자집적화 기술의 연구현황 및 전망

원제 - 입자집적화 기술의 세계

원문 출처 - 일본 공업조사회

김덕호 (한국과학기술연구원)

- 목 차 -

1. 분석자 서문	(1)
2. 입자집적화 입문	(2)
2.1 입자집적화란 무엇인가?	(2)
2.2 입자집적화의 범위	(2)
2.3 마이크로세계에서 작용하는 힘	(3)
2.4 입자집적화 기술의 분류	(4)
2.5 입자집적화 방법.....	(4)
3. 입자를 들어 옮겨서 배열하기.....	(5)
3.1 입자를 들어 운반하기 위한 요소 기술.....	(5)
3.2 입자를 들어 나르기.....	(9)
3.3 입자 접합하기.....	(10)
4. 입자를 패턴모양으로 배열하기.....	(12)
4.1 가스증착을 이용.....	(12)
4.2 잉크젯 프린팅 이용.....	(13)
4.3 자기조직화막 패턴을 이용.....	(14)
4.4 대전패턴의 이용.....	(15)
4.5 전극배선패턴을 이용.....	(16)
4.6 미소 주형을 이용.....	(16)
5. 대량의 입자를 한꺼번에 배열하기.....	(16)
5.1 자기조직화 현상을 이용한 입자배열.....	(16)
5.2 2 차원 콜로이드 결정(단입자막)을 만듦.....	(16)
5.3 최대조밀형 3 차원 콜로이드 결정(인공오팔)을 만듦.....	(17)
5.4 규칙적으로 배열된 구멍을 가진 다공질재료(역오팔) 만듦.....	(17)
5.5 비최대조밀구조 3 차원 콜로이드 결정(액중콜로이드결정)을 만듦.....	(17)
5.6 큰 입자의 표면에 작은 입자를 배열.....	(18)
6. 분석자 결론.....	(18)

1. 분석자 서문

입자집적화 기술이란, 원자를 안정하게 존재시키면서 재료로서의 기능을 가지는 크기까지 입자를 집적화시키는 기술을 일컫는다. 예를 들면, 입자를 결정과 같은 3 차원적인 주기구조체로 조립한다거나 여러 가지 기능을 가진 복수 종류의 입자를 LSI 트랜지스터, 저항, 콘덴서 등과 같이 배열, 연결시켜서 LSI 와 같은 고도의 기술이나 지금까지 없었던 기능을 가진 재료나 디바이스로 만들고 개발하는 기술이다. 현재 원자를 하나씩 이동시키는 기술은 실현되었지만, 원자 하나 하나를 쌓아서 재료를 구성한다는 것은 그다지 현실적이지 않다. 그러나, 막을 만드는 것과 미세가공을 반복하는 반도체 리소그래피와 비교할 때 입자집적화 기술은 다양성이나 발전성을 가지고 있다고 생각한다.

이 책은 일본 공업조사회에서 국가적으로 입자 어셈블에 직접 참여했던 연구자들이 자신들의 연구뿐만 아니라 관련된 연구까지 조사하여, 입자 어셈블 보다 넓은 입자 집적화 기술에 관해 그 개념과 기초과학, 기술개발 현황 및 재료화/디바이스화에의 시도 등을 분담 집필한 책이다. 본 저서는 이 분야의 관련 기술을 정리한 최초의 책으로서, 국내의 마이크로/나노 생산분야에서 입자 집적화 기술의 응용에 관심있는 연구자에게 관련 분야의 기술현황 및 문제점 등을 파악하고 연구 방향에 대한 시사점을 줄 수 있는 계기가 될 것으로 기대한다.

2. 입자집적화 입문

2.1 입자집적화란 무엇인가?

입자집적화란 재료나 디바이스의 제조를 목적으로 입자를 규칙적으로 집적하는 것을 의미한다. 따라서 입자집적화기술이란 이를 위한 일련의 방법을 가리키며, 다시 말하자면 미세한 분말을 모아 물건(재료나 디바이스)을 만드는 기술을 의미한다. 입자집적화를 좀더 엄밀하게 말하자면 “입자 또는 입자군의 위치를 제어하는 것을 의미하거나, 또는 복수종류의 입자가 관여할 경우 그들의 상대적 위치를 제어해서 각각 집적하는 것”이라 할 수 있다. 근래에 이르러 입자집적화에 관한 연구의 질과 양이 모두 비약적으로 증가하고 있다.

입자집적화로 크게 다음의 세 가지 특징적인 효과를 기대할 수 있다.

첫째, 입자의 위치를 제어할 때 특정 입자를 특정 위치에 배치할 수 있다는 것이다. 예를 들어 각종 센서기능을 가진 입자를 배치해서 센서어레이(sensor array)를 만드는 것을 생각할 수 있다. 센서어레이라고 하는 것은 피부나 혀와 같이 각종 센서가 면 모양으로 분포한 것으로서 많은 센서 신호를 동시에 검지할 수 있다.

둘째, 내부구조에 규칙성이 있다. 적당한 크기의 입자가 규칙적으로 배열된 구조체에 빛을 비추면 특정한 파장을 가진 빛만을 투과시키거나 특정한 방향으로 빛을 쬐이게 하는 성질을 보여준다. 이 성질을 이용하면 광통신이나 광컴퓨터에서 사용하는 도파로(導波路)나 분파소자(分波素子) 등의 기본적인 디바이스를 만들 수 있다. 이처럼 빛 관계를 응용하는 연구는 입자집적화기술의 연구에 있어서 큰 비중을 차지하고 있다.

마지막으로 입자간의 상호작용에서 유래되는 효과를 들 수 있다. 가령, 금속이나 세라믹스 등의 재료는 결정이 다수 모여 만들어졌기 때문에 결정과 결정간의 계면에서 생기는 재료기능이 적지 않다. 향후 이러한 입자계면에서 얻어지는 기능을 발현시키고자 하는 연구가 더욱 증가되어도 좋으리라 생각된다.

입자집적화의 효과로서 이상의 세가지 특성을 언급할 수 있지만, 입자집적화의 큰 목표 중 하나는 그들 효과를 잘 사용하여 재료와 같은 디바이스, 또는 디바이스와 같은 재료를 만드는 것이다. 지금까지 재료와 디바이스는 엄격한 구별이 가능한 것이었다. 재료는 재료로써 사용되는 것이고 디바이스는 어떠한 목적을 가지고 활용을 하는 유닛이다. 그러나 기능재료라는 말이 있듯이 재료에도 각종기능을 가진 것이 있다. 예를 들어, 형상기억합금의 경우 재료가 좀 더 복잡한 기능이나 또는 두 가지 종류 이상을 가짐으로써 더 이상 재료와 디바이스의 구별을 무의미 하게 한다. 실제로 그러한 고기능, 다기능 재료는 지능형 재료라 칭하여 차세대의 재료로써 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 입자집적화는 이러한 지능형 재료를 만들기 위한 유력한 접근 방식이라고 할 수 있다.

2.2 입자집적화의 범위

이 책에서는 재료화나 디바이스화를 목적으로 한 입자집적화기술의 최신 현황을 가능한 한 넓게 소개하고 있다. 단, 입자집적화 그 자체가 매우 다양한 방면에서 연구되고 있는 것이므로 입자의 크기나 기술의 개발단계, 성격에 제약을 두어 다룰 제재를 정리했다. 기술에 관해서는 이미 실용화 단계에 있는 것, 재료화나 디바이스화에 연결되지 않으리라고 판단되는 것을 배제했다. 이 책에서 소개하는 연구의 모두가 직접적으로 재료나 디바이스와 관련되어 지는 것은 아니지만, <http://www.kosen21.org/>

능성이 있는 것은 가능한 한 망라했다. 입자의 지름에 관해서는 일부 예외도 있으나 집적화의 대상이 되는 입자의 직경이 sub μm ~ sub mm 가 되도록 조건을 두었다. 즉 0.1 μm (100 nm)에서 수 100 μm 사이이다(그림 1).

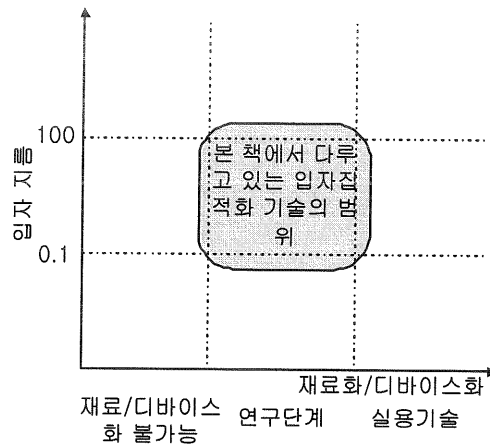


그림 1 이 책에서 다루고 있는 입자집적화 기술의 범위

sub μm ~ 수 100 μm 크기 입자의 집적화를 다루는 것은 재료적으로 안정된 다양한 종류의 입자가 공급되고 있다는 점과 역학적으로 천이영역(transition region)에 있어 일반적인 감각으로는 다룰 수 없다는 점이 흥미로운 점이다.

2.3 마이크로세계에서 작용하는 힘

미소입자를 규칙적으로 배열하기 위해서는 미소입자에 대한 고유의 기술이 필요하다. 왜냐하면 대상물이 미소하다고 하면 스케일효과라는 원리가 작용하기에 중력이외의 힘이 지배적으로 되기 때문이다. 물체를 움직일 수 있는 것은 모두 힘이다. 또한 역으로 힘이 작용하고 있음에도 불구하고 움직이지 않는 경우에는 그 힘과 반대방향의 힘이 작용하고 있기 때문이다.

이 우주에는 중력, 전자기력, 강력, 약력의 4 종류의 힘만이 존재한다. 물체에 작용하는 힘은 모두 위의 4 가지 힘으로 환원되며, 그 가운데 우리가 보고 느끼는 힘의 대부분은 중력과 전자기력으로 환원된다. 입자집적화를 위해서는 입자를 특정 위치에서 우리가 원하는 위치까지 이동시켜 그곳에 고착시킨다는 조치가 필요하다. 입자를 이동시킨다는 것은 입자에 무언가의 힘을 작용시킨다는 것이다. 입자를 규칙적으로 집적시키기 위해서는 이동시킬 뿐 아니라, 그 힘을 이용해서 입자의 위치를 제어해야만 한다. 그렇다면 먼저, “힘이 미소입자에 어떻게 작용하는가”에 대하여 고찰해 볼 필요가 있다. 같은 힘이 작용하더라도 물건의 크기에 의해 그 효과가 크게 달라지며, 미소입자를 조작할 때에는 항상 이러한 점을 염두에 둘 필요가 있다.

공을 던져 올리면 포물선을 그리며 떨어지는 데 이것은 중력이 원인이 된다. 그러나 공중으로 올라간 작은 먼지는 좀처럼 떨어지지 않는다. 이것은 크기가 큰 공에 작용하는 공기저항은 공에 작용하는 중력에 비해 무시할 정도로 작고 먼지는 그 반대이기 때문이다.

왜 크기에 따라 어떤 종류의 힘이 무시 가능하게 된다고 또는 무시할 수 없게 되는 것일까?

일반적으로 크기가 n 배가 되면 다른 물리량은 n^m 배가 된다. 예를 들면 질량은 n^3 배로 표면적은 n^2 배로 된다. 이것은 스케일효과라고 불러진다. 이러한 특징은 미립자의 집적에서 아주 중요한 영향을 미친다. 사실 가볍고 작은 물체의 운동은 중력이외에 여러 가지 종류의 외력의 작용을 받는다. 정확하게 말하면 무겁고 큰 물체의 경우는 중력만이 압도적으로 강해 다른 외력은 거의 무시 가능한 것에 비교해서 가볍고 작은 물체에서는 상대적으로 다른 외력의 영향이 무시할 수 없게 되는 것이다. 또한 여기서 말하는 외력의 대부분은 이 장의 처음에 말했던 4 가지 기본 힘으로 이야기하자면 전자기력으로 환원되는 힘이다. 즉 역학적인 천이영역(transition region)에 있

어서 중력과 전자기력이 동등하게 영향을 미치고 있는 것이다.

2.4 입자집적화 기술의 분류

입자집적화를 하는 구체적인 방법에는 많은 종류가 있다. 현재 발전중에 있는 기술이다 보니 어떠한 기술이 우위에 있다고는 말할 수 없는 상황이다. 각각에 존재하는 특징을 살려서 구체적인 응용을 제시하는 연구가 이루어지고 있는 상황이다.

이 책에서는 입자집적화의 기술을 다음의 세 개의 분류에 따라 구체적인 방법을 기술했다.

- (1) 입자를 들어 옮겨서 배열하기
- (2) 입자를 패턴모양으로 배열하기
- (3) 대량의 입자를 한꺼번에 배열하기

표 1에 각각의 방법과 특징을 간단하게 정리했다.

표 1 입자집적화기술의 분류와 특징

	입자를 들어 옮겨 배열 (제 2 장)	입자를 패턴모양으로 배열 (제 3 장)	대량의 입자를 한꺼번에 배열 (제 4 장)
방법	<ul style="list-style-type: none"> - 핀셋으로 붙잡음. - 프로브에 붙임. - 정전기력 - 자연적인 부착력 - 모세관에 붙임 - 진공 - 액체 - 레이저 매니플레이션 	<ul style="list-style-type: none"> - 액체로 운반해서 내뿜음. - 가스로 운반 - 액체로 운반 - 입자를 용융시켜 운반 - 기관에 세공(細工) - 자기조직화 - 대전패턴 - 배선패턴 - 몰드를 사용 	<ul style="list-style-type: none"> - 자기조직화를 이용 - 계면에너지최소 - 위치에너지최소 - 정전에너지최소 - 복합입자를 만듦 - 기계적혼합 - 유동층 - 정전기력
속도	×	○	◎
정확도	◎	^	○
형태의 자유도	◎	○	×
응용	시작(試作), 기초연구	미세구조체	광학디바이스

2.5 입자집적화 방법

2.5.1 입자를 들어 옮겨서 배열하기

입자를 규칙적으로 집적하는 방법으로 제일 먼저 들 수 있는 것은 하나씩 순서대로 조작하는 방법이다. 손가락으로 감싸듯이 움직이는 집계를 이용해서 입자를 잡는다. 이와 같은 기계는 핀셋, 또는 마이크로 그리퍼라고 불린다. 핀셋은 그 구조가 약간 복잡하므로 좀더 간단한 프로브라 불리는 가느다란 막대기를 집어넣어서 그 끝에 입자를 붙여 운반하는 방법이 있다. 입자를 붙이기 위해서는 정전기력의 한 종류인 그레디언트(gradient)력을 이용하는 방법과 자연의 부착력을 이용하는 방법이 있다. 그레디언트력은 보통 비균일 전기 가운데서 물체를 전계가 강한 곳으로 움직이게 작용하는 힘이다. 한편 자연의 부착력이라고 하는 것은 접촉한 물체의 계면에 작용하는 흡인력이다. 그리고 입자를 접촉하지 않고 붙잡아 운반하는 방법에는 레이저 매니플레이션이 있다.

2.5.2 입자를 패턴모양으로 배열하기

입자를 한 개씩 배열하는 방법은 착실한 방법이기도 하나 대량의 입자를 배열하는 데는 한계가 있다. 그렇기에 고속화의 한 수단으로 입자를 고속으로 또한 연속적으로 공급하는 방법이 있다. 구체적으로 설명하자면 입자를 유체(기체 또는 액체)를 사용해 연속적으로 운송, 정해놓은 위치에 가져다가 붙이는 것이다. 입자를 하나씩 운반하지 않기에 배열속도는 비약적으로 빨라진다. 그러나 개개의 입자의 위치를 제어하기는 어렵기에 주로 집적해 놓은 입자의 패턴을 만드는데 사용된다.

집적된 입자의 패턴을 만드는 방법에는 입자를 분출시켜 고정시키는 방법 이외에도 미리 기판에 세공(細工)시켜두는 방법이 있다. 구체적으로는

- (1) 기판의 표면에 단분자막을 형성한 후 자외선 조사(照射) 등에 의해 소수성과 친수성의 패턴을 만드는 방법
 - (2) 빔(beam)의 조사 등에 의해 대전 패턴을 만드는 방법
 - (3) 리소그래피 등에 의해 직접 패턴화 시킨 전극을 만드는 방법
- 과 같이 정전기력을 이용한 것이 있다.

2.5.3 대량의 입자를 한꺼번에 배열하기

입자군이 전체의 에너지가 최소로 되도록 자연스럽게 정렬 되는 것을 자기조직화라 부르고 한번에 대량의 입자를 배열하는데 사용된다. 그러나 입자에 전하가 있으면, 입자간의 상호작용이 작용해서 반드시 최대조밀구조가 가장 안정된 상태라고 말할 수 없게 된다.

침강을 자기조직화에 이용하려면, 적당한 입자와 액체와의 조합으로 침강속도를 아주 느리게(수일에서 수개월) 할 필요가 있다. 입자가 대전되어 있어 침강속도가 아주 느릴 경우에는 시스템의 에너지는 거의 정전에너지로 결정되게 된다. 따라서 정전에너지가 가장 작아지도록 자기조직화가 일어나는데, 이를 이용해서 만든 것을 액중(液中)콜로이드 결정이라 부른다. 또한 액가교력(液架橋力 : liquid bridge)을 사용해서 대량의 입자를 한꺼번에 배열하는 방법도 있다. 위의 방법은 같은 종류의 입자를 대량으로 배열해서 규칙구조를 만드는 방법이었지만, 2 종류 이상의 입자로 구성되는 복합입자를 만드는 방법도 있다.

3. 입자를 들어 옮겨서 배열하기

3.1 입자를 들어 운반하기 위한 요소 기술

3.1.1 입자를 들어 운반하여 배열하기 위한 요소 기술

하나의 입자를 들어 올려서 목표한 위치에 배치하기까지의 일반적인 과정을 그림 2 에 나타내었다. 이 책에서는 100 μm이하의 입자에 대해서 이와 같은 과정을 반복해 인공적인 구조물을 제작하는 기술에 관해 설명하겠다.

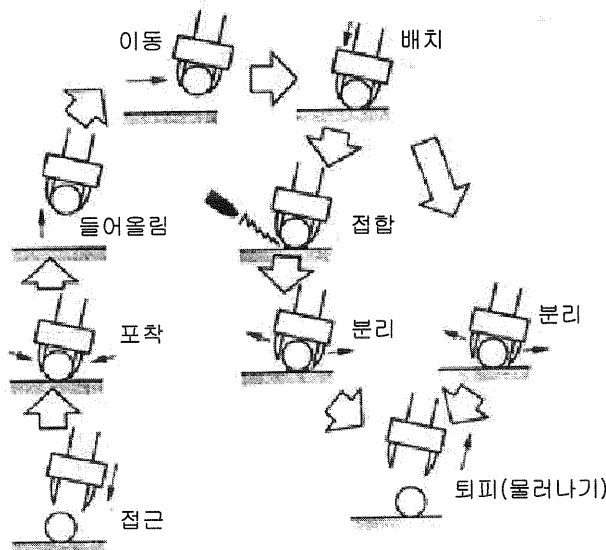


그림 2 입자를 들어올려 배치하고 분리시키기까지 과정

그림 2의 과정 자체는 큰 물건이나 작은 물건에서 공통적이지만, 미소한 입자만의 독특한 원리가 사용되는 부분이 있다. 이것은 입자를 붙잡는 공정(포착), 접합하는 공정(접합), 떼어내는 공정(분리)이다. 한편 그림 2에서 분리 공정은 중요한 요소이다. 그리고 포착, 접합, 분리 이외에 접근, 들어올림, 이동등 즉 “들어올려 운반하는 공정”에서는 필요한 정확도, 자유도를 가지는 메커니즘(매니플레이터로 부름)을 어떻게 공학적으로 실현할까 하는 것이 과제이다.

3.1.2 입자를 붙잡아 떼어내기

포착에는 미소세계 역학의 특징을 반영하는 여러 가지 힘이 이용되지만, 분리에도 여러 가지 전략이 있다. 분리 조작이 필요한 경우도 그렇지 않은 경우도 있다. 그림 3에서 여러 가지 포착, 분리 방법을 나타내었다. 많은 경우 포착을 위해 한 개의 가는 막대기, 즉 프로브(probe)를 이용한다.

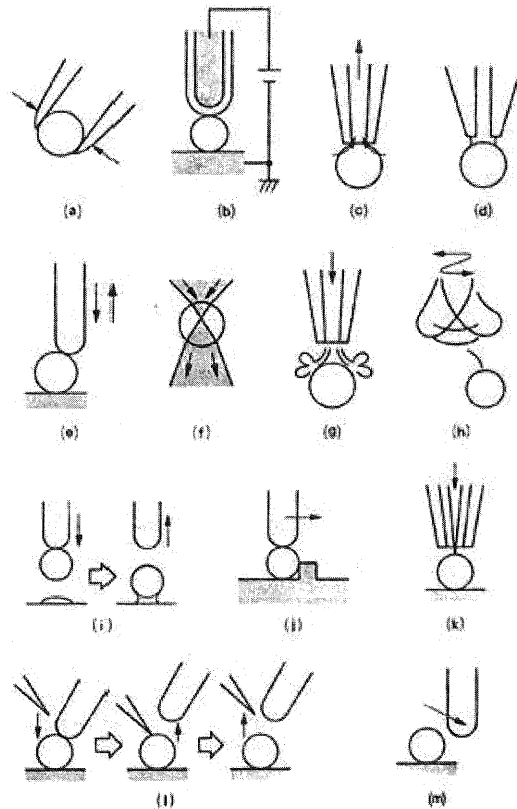


그림 3 입자를 포착, 분리 시키기 위한 여러 가지 방법

3.1.3 핀셋으로 붙잡기

정밀하게 만들어진 작은 핀셋으로 붙잡는 방법으로(그림 3), 보통 일상생활에서 작은 것들을 조작하는 방법을 그대로 연장한 방법이다. 그러나 물체가 30 μm 보다 작게 되면 붙잡지 않더라도 부착되어 들어 올릴 수 있게 된다. 그렇기 때문에 “붙잡는” 행동은 작은 물체에 대해서는 들어 올리기 위해서라고 하기보다는 물체의 자세를 구속해서 제어하기 위한 의미가 강하다. 이 방법은 막대기나 입방체와 같은 방향성을 가진 물체를 정해진 방향으로 배치해야 할 때 중요하게 사용된다. 이런 미세한 핀셋은 대표적인 마이크로 머신이며, 반도체 미세가공 프로세스를 이용해서 만들 경우가 많다. 현재는 핀셋을 제작한다는 자체가 연구 테마이며, 아주 많은 연구예가 있다. 그러나 물체가 작아 지면 핀셋을 연다 해도 한 쪽에 달라붙은 상태로 남기 때문에 원하는 대로 배치하는 것은 어렵다(그림 4).

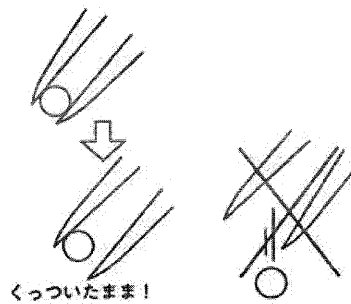


그림 4 달라붙음(sticking) 현상

3.1.4 정전기의 힘으로 끌어 당기기

정전기력은 제어가 용이하고 큰 힘을 발생시킬 수 있기 때문에 미소한 물체를 다룰 때에 자주 사용된다. 기본적으로는 프로브의 표면과 기관 표면의 어느 쪽이나, 또는 양쪽에 절연막을 설치해두고 프로브와 기관간에 전압을 인가한다(그림 3(b)). 그렇게 하면 프로브의 끝 부분에 전계가 집중되므로 그래디언트력이 작용하게 되어 물체를 프로브의 끝에 붙일 수가 있다.

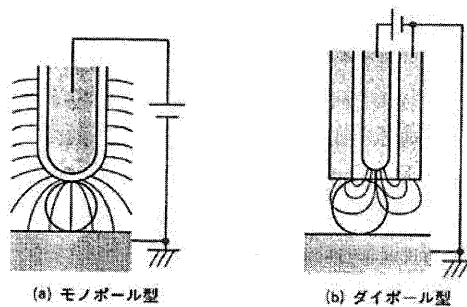


그림 5 정전기력을 사용하는 프로브: (a) 모노폴형 (b)다이폴형

그림 5 는 정전기력을 이용하는 프로브의 2 가지 형태를 보여주고 있다. 모노폴(단극자)형과 다이폴(쌍극자)형이 있다. 모노폴형 프로브(그림 5(a), 그림 5(b)과 동일)는 구조가 단순해서 널리 이용되나 프로브 전체에서 기관을 향해 발산형의 전계로 인해 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 고안된 것이 중심전극과 외부를 둘러싼 원통형 외부전극으로 구성된 다이폴형 프로브이다. 그림 5(b)에서 보여주듯 끝 부분 이외의 부분은 정전차단이 되어 있어, 외부전계는 끝 부분에만 집중하게 된다

3.1.5 진공으로 빨아 당겨 부착시키기

끝 부분에 흡입구멍을 낸 프로브(모세관)에 진공 펌프를 연결해서 입자를 빨아 당기는 방법이다(그림 3(c)). 100 μm ~ 수mm의 물체를 다룰 때 많이 사용되지만, 대기 중에서의 조작만이 가능하다. 300 μm정도까지의 개구경(開口徑-구멍의 지름)이라면 시판되고 있는 진공 편셋이 그대로 사용 가능하다. 그것보다 작은 프로브도 유리관을 가열해서 잡아늘이면 간단하게 자작(自作) 가능하다. 프로브는 끝부분의 구멍을 1 μm이하의 크기까지 간단히 만들 수 있어 지금 보다 더욱 미소한 물체에도 적용가능 할 것이다.

3.1.6 액체를 이용하여 부착시키기

끝 부분에 액체 공급 구멍을 뚫은 프로브에 미량의 액체를 송출시킬 수 있는 펌프를 연결한

뒤, 끝 부분으로 약간의 액체를 분출시켜 그 표면장력으로 입자를 흡착시키는 방법이다(그림 3(d)). 이 방법에는 다른 방법에는 없는 특징이 있다. 먼저 프로브의 끝 부분이 대상물에 기계적으로 접촉하지 않기 때문에 파괴되기 쉬운 대상물의 포착에 적합하다. 또한 프로브 끝 부분의 단면과 대상물의 형상, 분출하는 액체의 양을 적절하게 조정하면 물체가 자동적으로 프로브의 끝 부분 중앙에 위치하게 되는 효과를 얻을 수 있다.

3.1.7 여러 가지 분리방법

위에서 기술한 각종 포착법과 조합을 이루어 이용되는 각종 분리법을 여기서 정리해 둔다.

그림 3(g)는 프로브 침단의 구멍에서 압력을 주어 분리시키는 방법이다. 그러나 이 방법은 정밀한 제어가 어려워 물체가 멀리 날아가 버리는 경우가 있다.

그림 3(h)는 진동 분리법으로, 실제로는 그림과 같이 옆방향으로 진동시키면 입자가 떨어질 때 멀리 날아가 버리기 때문에 기판에 수직의 방향으로 진동시키는 것이 보통이다. 이 때 물체에 작용하는 힘은 $m\omega^2$ (m : 물체의 질량, r : 진폭, ω : 각주파수 = 2π 주파수 [Hz])로 나타난다.

그림 3(i)는 배치하고 싶은 장소에 미리 액체를 도포(塗布)해 두어 그 표면장력으로 물체를 기판에 단단히 부착시켜 분리시키는 방법이다.

그림 3(j)는 작업환경에 뾰족하게 돌기된 부분이나 각진 곳을 마련해 두어, 그곳에 문질러 붙이는 방법이다. 임의의 장소에 배치하기 위해서는 그 후 다시 슬라이드 등의 이동이 필요하다.

다음 두 방법은 어떠한 부착력의 경우에 있어서도 일반적으로 곡률반경이 작은 부분일수록 부착력이 약하다는 성질을 이용한 것이다.

그림 3(k)는 뾰족한 침으로 밀어내는 방법이다. 그러나 실제로 미소 입자에 대해 이 방법을 행할 수 있는 프로브를 제작하는 것은 곤란하다.

그림 3(l)은 그것을 현실에서 실행하기 쉽게 2개의 굵기가 다른 프로브로 실현하는 방법이다. 가는 프로브는 분리용, 굵은 프로브는 포착용이다. 가는 프로브로 물체를 누른 상태에서 굵은 프로브를 분리시킨다. 그러나 이 작업을 실행하기에는 복잡한 구조의 매니플레이터나 핀셋이 필요하다.

3.1.8 자역흡착력을 이용하기

수 μm 에서 sub μm 까지의 미소한 입자는 자연 부착력이 매우 커서 접촉된 것처럼 되어 버리므로 그것을 떼어 낸다는 것이 현실적으로 어려워지는 경우도 생긴다. 그러나 프로브를 이용해서 접촉하고 있는 면을 기계적인 작용으로 떼어 내어 포착, 분리를 제어할 수가 있다. 이 방법은 프로브에 특별한 장치를 할 필요가 없다는 점에서 간편하며, 특히 가느다란 프로브가 필요한 미소한 입자에 적합한 방법이라 생각된다.

3.1.9 빛을 이용하여 붙잡기

마지막으로 완전히 비접촉으로 물체를 포착할 수 있는 특수한 방법이 있다. 레이저 트래핑(trapping)(그림 3(f)) 현상을 이용한 방법이다. 이것은 optical tweezer 혹은 광핀셋 이라고도 불리우며 1 분자에서부터 수 μm 단위 크기의 물체를 단일 레이저로 포획하여 조작할 수 있는 기술이다. 현재 나노입자 및 살아있는 세포, 단백질 등의 조작에 중요한 도구로 쓰여지고 있다. 또한 특수한 방법을 이용하면 금속 등의 투명하지 않은 입자도 포착 가능하다. 이 방법으로는 입자집적화에 적합한 크기의 물체를 기계적으로 건드리지 않고 조작할 수 있어 미세 프로브를 제작할 필요가 없다. 게다가 일반적으로 광학현미경에 레이저와 약간의 광학시스템을 조합하는 것으로 실현 가능하다. 그러나 기계적 접촉을 해야만 하는 방법에 비교하면 발생력이 현저히 작으며 기껏해야 10pN 정도이다. 레이저 매니플레이션 방법에서는 빛을 차단하는 것이 분리에 해당한다. 아울러, 미세입자들이 포획되는 원리는 입사하는 광이 갖고 있는 운동량이 미세입자로 전이되는 현상으로 설명될 수 있다.

3.2 입자를 들어 나르기

하나하나의 입자를 들어 나르는 기술은 먼저 입자를 비접촉으로 포착한 상태에서 운반할 것인가 아니면 접촉해서 포착한 상태로 운반할 것인가, 그리고 관측수단으로 무엇을 이용할 것인가에 따라 분류된다(그림 6).

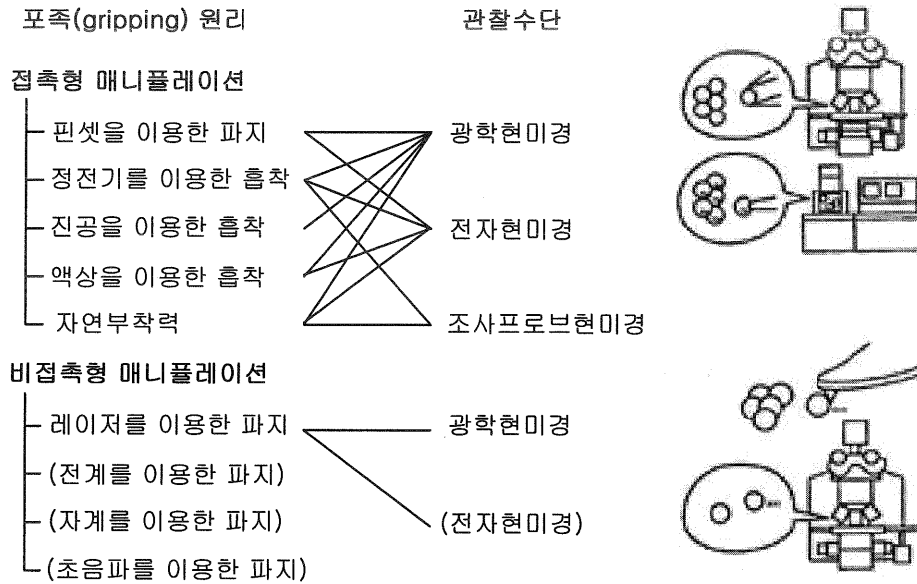


그림 6 개개의 입자를 들어 나르는 방법

3.2.1 광학현미경하에서의 접촉 매니플레이션

생물학의 분야에서는 마이크로 매니플레이션이 오래 전부터 사용되어 온 일반적인 기술로 1920 년부터 개발이 시작되어 1960 년대 1970 년대를 거치면서 기계식이나 유체압식의 현재 시판 품의 모양으로 자리잡게 되었다. 현재는 시판 현미경에 붙이기 위한 금속도구류나 각종 형태를 한 프로브를 만드는 주변기기도 잘 갖추어져 있다.

같은 매니플레이터를 광학실험용의 미동스테이지에서도 쉽게 구성할 수 있다. 수동, 전동의 시판품이 여러 가지 갖추어져 있어서 대부분의 작업은 이것들을 조합시킴으로 실현 가능하다.

광학현미경용의 매니플레이터는 한층 더 정교한 조작이 쉽게 가능하도록 주로 로봇 공학의 분야에서 연구가 한참이다. 소형이면서도 아주 복잡한 움직임이 가능한 구조, 직감적으로 조작하기 쉬운 휴먼 인터페이스 등이 개발되고 있다.

그러나, 광학 현미경에도 각각 특징이 다른 몇 개의 타입이 있다. 실체현미경은 작동거리가 길고 매니플레이션과의 조합이 간단하다. 그러나 관찰분해능에서 뒤떨어져 수 10 μm 이상의 대상의 관찰에 적합하다.

3.2.2 전자현미경하에서의 접촉 매니플레이션

여기서 말하는 전자현미경이란 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)을 의미한다. SEM 은 수mm라는 높은 분해능과 깊은 초점심도를 함께 가지고 있어 광학 현미경하에서는 다루기 어려운 수μm 이하의 미소한 물체를 3 차원적으로 조작하기에 최적이다. 그러나 아직 공급체제가 갖추어 지지 않아 연구현장에서 자작하는 실정이므로 완성된 시판품을 쉽게 구할 수 있는 광학현미경용 매니플레이터와는 사정이 매우 다르다.

한편 본래 SEM 이란 것은 정적인 사진을 찍기 위한 도구이다. 그러므로 수 mm라는 분해능의 화상을 얻기 위해서는 1 장당 1 분이나 그 이상의 시간이 걸린다. 그러나 매니플레이션은 동화상(매초 30 장의 비디오 영상)을 보면서 행해야 하므로, 이런 경우에는 사양에서 제시하는 분해능을

연을 수 없다. 따라서, 매니플레이션을 위해서는 분해능에 여유가 있는 현미경을 선택할 필요가 있다.

3.2.3 주사프로브현미경하에 의한 접촉매니플레이션

주사터널현미경(Scanning Tunneling Microscope: STM)이나 원자간력현미경 (Atomic Force Microscope: AFM)등의 주사프로브현미경은 원래는 관찰을 하기 위한 장치로서 개발되었으나 STM 을 이용해서 각 원자를 조작 가능하다는 것이 실증되었다. 그러나 이러한 조작에는 일반적으로 초고진공이나 극저온 등의 특수한 환경이 필요하다.

또한 AFM 을 이용해서 대기 중이나 액체 중에서 10~100 nm의 입자나 액체방울을 한 개씩 배열할 수 있다는 것이 증명되었다. AFM 의 경우에는 입자를 프로브에 부착시켜서 들어올리는 것이 아니라 비접촉방식(non-contact mode: 프로브를 상하로 진동시킨다)으로 기판상의 입자를 기계적으로 조금씩 밀어 슬라이드 시켜서 이동시키는 방법이 신뢰성이 높다고 평가되고 있다. AFM 을 이용하는 방법의 한가지 문제점은 프로브로 입자를 들어 올리는 것이 아니라 기판 위를 미끄러지게 해서 이동시키는 것이므로 3차원적인 배열에는 적합하지 않다는 것이다.

3.2.4 레이저매니플레이션

레이저광의 스포트(spot) 자체가 프로브의 역할을 하므로 스포트(spot)와 시료전체를 상대이동시키는 것만으로 매니플레이션이 된다. YAG레이저나 Ar 이온레이저의 빛을 광학현미경의 조명시스템에 도입해서 대물렌즈로 강하게 집광하는 것인데, 이 스포트(spot)를 미러(mirror)로 조사한다거나 광학현미경의 스테이지 쪽을 이동시켜 매니플레이션을 실현한다.

레이저 매니플레이션의 재미있는 점은 한번에 다수의 입자를 포착하는 것이 비교적 용이하다는 것이다. 이것은 입자를 효율성 있게 배열해서 조립하기 위한 중요한 특성이다. 그리고

- (1) 복수의 레이저광의 간섭 무늬를 이용하는 방법
- (2) 독립해서 움직이는 복수의 빔을 도입하는 방법
- (3) 한 개의 빔을 고속으로 스캔해서 빔의 궤적 상에 줄줄이 배열시키는 방법
- (4) 한 개의 빔의 고속이동과 일시 정지를 반복해서 복수의 입자를 하나하나 독립적으로 조작하는 방법
- (5) 동적인 홀로그램으로 임의의 위치에 복수의 스포트(spot)를 형성하는 방법 등이 개발되어 있다.

3.3 입자 접합하기

입자끼리(또는 입자와 기판)를 접합하기 위해서는

- (1) 접촉점 부근의 입자재료 자체를 용융시키는 방법
- (2) 화학반응에 의한 생성물로 입자와 입자 사이에 다리를 잇는 방법
- (3) 양 측면이 입자에 흡착되는 접착분자로 입자와 입자 사이에 다리를 잇는 방법
- (4) 입자와 입자의 접촉계면에서의 자발적인 접합을 이용하는 방법 등이 있다.

이러한 방법들을 그림 7에 정리했다.

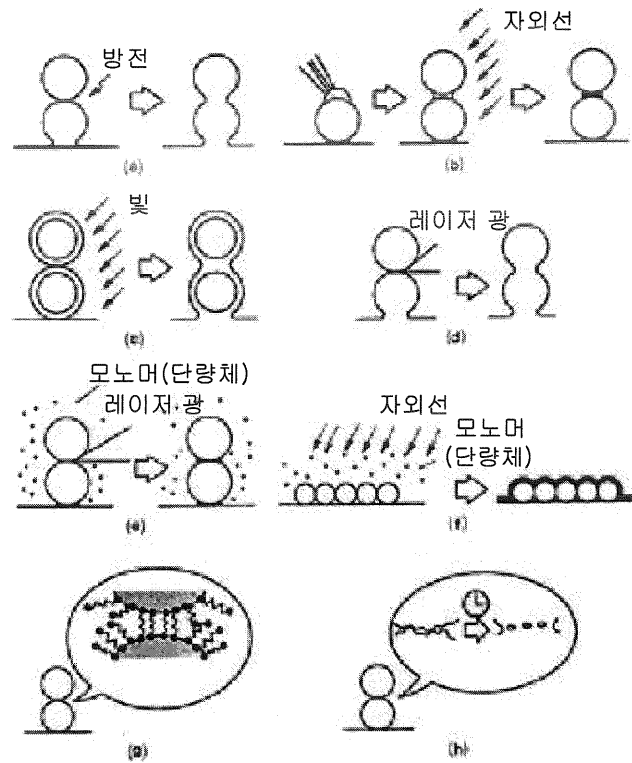


그림 7 하나하나의 입자를 접합하기 위한 여러 가지 방법

3.3.1 방전에 의한 금속입자의 용접

미소한 입자끼리를 용접하는 방법(그림 7(a))으로는 고압방전의 예가 알려져 있을 뿐이다. 이 예에서는 kV레벨의 꽤 높은 전압을 인가하므로 아크방전보다는 글로방전에 가까운 상황이라 생각된다. 현재는 아직 시행착오에 기초해서 과정을 확립시키는 단계로 발열의 메커니즘이나 적절한 제어방법은 아직 알려 지지 않았다.

3.3.2 빛에 의한 용접과 접착

고분자재료를 접합에 이용하는 방법에는 빛을 이용하는 것이 많다. 빛의 열작용과 광화학작용을 이용하는 것도 있지만 여기서는 어떻게 접합영역을 한정할까 하는 관점에서 다음과 같이 분류했다.

- (1) 접착제를 접합점에만 공급하는 방법 (그림 7(b))
- (2) 빛을 접합점에만 조사(照射)하는 방법 (그림 7(c))
- (3) 접합영역을 한정하지 않고 용매전체를 고화(固化)하는 방법 (그림 7(d))

또한 모노머(monomer, 단량체(單量體)) 분자, 광중합(光重合)개시제(開始劑), 가교제(架橋劑)를 첨가한 액체 중에서 입자를 배열해 접합점 부근에 조사(照射)한 자외 레이저 스포트로 광중합 반응을 일으켜 입자를 접합시킨 예도 있다(그림 7(e)). 그리고 같은 조성의 액체 중에서 입자를 배열하고 전면에 자외광을 조사(照射)해서 배열한 구조물 전체를 수지로 팩(pack)하는 방법도 있다(그림 7(f)).

3.3.3 접착분자에 의한 접합

이 외에 미소한 입자 특유의 접합방법으로 금속표면에 흡착하기 쉬운 성질을 양 측면에 가진 접착분자를 이용해서 입자 끼리를 접합하는 방법이 있다(그림 7(g)). 그러한 분자로서는 디티올이나 디이소니토릴이 알려져 있다. 이 경우에 재미있는 것은 접착분자의 길이를 어떻게 고르느냐

에 따라 입자의 간격을 mm오더로 정확하게 제어 가능하다는 것이다. 그러기 때문에 입자간의 터널 전도 등의 양자역학적 효과를 기대하는 경우에 이용되고 있다.

3.3.4 자발적으로 접합하는 현상 이용

수 μm 의 입자는 접촉해두면 점점 부착력이 커져서 접합된 상태처럼 될 때가 있다(그림 7(h)). SEM 하에서의 고분자 입자가 대전에 의한 정전기력으로 기관과 가볍게 부착되기 시작해서 점점 더 강하게 접합되어 가는 모습은 실제 측정에서 자세하게 조사되었다. 따라서 SEM 하에서의 고분자 입자의 매니플레이션에서는 특별한 접합을 하지 않아도 강하게 고정된 구조물을 얻을 수가 있다.

4. 입자를 패턴모양으로 배열하기

이 장에서는 입자를 기관 위에 분출시켜 붙이거나 기관 상에서 선택적으로 부착시키는 방법에 의해 입자가 패턴을 이루게 하며 배열하는 기술을 소개한다.

전반부에서는 입자군 또는 개개의 입자를 기관상의 원하는 위치에 분출시켜 붙이는 입자집적 패턴작성 기술 2 가지를 설명한다. 첫번째 기술은 에어로졸(입자가 기체상태중에 분산된 상태)을 이용한다.두번째 기술은 액체상태중에 입자가 분산된 현탁액을 이용하는 것이다.

후반부에서는 기관상에 선택적으로 입자가 부착되는 영역을 형성해서 이 영역 위에서 입자를 집적시킨다. 자기조직화막 패턴, 대전패턴, 전극 배선 패턴, 그리고 주형 패턴을 입자가 선택적으로 부착되는 영역으로서 이용한다. 액체상태 또는 기체상태중에서 분산된 입자를 적절한 방법으로 공급하면, 입자는 기관상의 이런 영역에만 선택적으로 부착되어 입자집적 패턴이 제작된다. 패턴을 이루게 해서 입자를 배열하는 6가지 기술을 순서대로 소개했다.

4.1 가스증착을 이용

4.1.1 가스증착의 원리

가스증착법은 다음의 세가지의 과정에 의해 입자를 기관상에 집적한다.

- (1) 입자를 교란(攪亂), 진동시킴으로 에어졸을 형성해서
- (2) 에어졸을 에어졸화 방(실(室))과 데포지션 방(실(室))의 압력차에 의해 생긴 가스의 흐름에 실어 운송관을 통해 기관까지 운송한 뒤
- (3) 미세한 노즐로 기관상에 분출시켜 붙인다.

입자는 노즐 밑의 기관에 퇴적되어 노즐의 지름에 대응한 입자 집적체를 형성한다. 이 때 노즐이 기관을 일정한 속도로 이동하면 2 차원의 입자집적 패턴을 형성시킬 수 있다. 또한 그대로 기관을 정지시켜 입자의 퇴적을 계속하면 3차원적으로 입자를 집적할 수도 있다.

현재 가스증착 장치가 시판되고 있어 미세한 전극단자, 배선의 형성, 배선의 보수, 마이크로 파트즈(parts-부품)의 접합이나 구멍 메우기 등에 이용되고 있다.

4.1.2 입자집적패턴의 제작에

가스증착법에서는 한 종류의 금속입자뿐만 아니라 철과 은이라는 2 종류의 입자를 혼합해서 에어로졸을 이용하는 방법으로 철과 은의 합금입자 집적패턴을 형성할 수도 있다. 입자의 혼합량을 조정함으로써 임의의 조성비를 가진 합금패턴을 제작할 수도 있다. 게다가 3종류 이상의 조성합금 패턴링(patterning)에도 적용 가능하다. 또한 금속 이외의 무기화합물 등으로도 가스증착법으로 입자 집적 패턴을 형성한 예가 보고되어 있다.

최근 가스테포지션법을 마이크로 디바이스나 마이크로 머신 등 미세가공분야에 응용하려는 시도가 있다. 예를 들면 마이크로 액츄에이터의 제작을 목적으로 해서 압전효과(전압을 인가하면

재료가 굽어지는 현상)를 나타내는 PZT 입자의 패터닝에 높은 관심이 모이고 있다.

4.1.3 입자집적패턴의 미세화

입자집적 패턴을 미세화하기 위해서는 가늘게 집중시킨 입자 빔을 내뿜을 필요가 있다. 가스 증착법에서 입자 빔의 크기는 노즐 직경에 의해 정해진다. 따라서 노즐 직경을 작게 함으로써 미세한 입자의 패터닝을 형성할 수 있다.

원래 가스증착법은 높은 진공상태에서 금속을 가열, 나노 사이즈의 입자를 제작해서 바로 퇴적시켜 입자집적패턴을 형성하는 기술로서 개발되었다.

최근의 가스테포지션법의 연구에서는 가스의 흐름을 잘 제어하면 입자빔을 노즐 지름보다도 잘게 집속(集束)할 수 있게 되었다. 또한 가스증착법과 원리적으로는 다르지만 정전기장(靜電氣場)을 이용해서 입자빔을 집속시키는 방법도 있다. 이 방법에서는 가스의 흐름을 사용하지 않고 진공 중에서 대전된 입자를 가속시킨 입자빔을 형성한다. 그리고 정전장에 의한 대전입자의 렌즈 효과를 이용해서 입자빔을 집속시킨다.

4.2 잉크젯 프린팅 이용

4.2.1 잉크젯 프린팅의 원리

잉크젯 프린팅법은 잉크젯프린터의 원리를 재료 프로세스에 이용한 것으로, 잉크대신에 입자를 액체상태에 분해한 현탁액을 이용한다. 즉 편향전극에 인가하는 전압을 제어함으로써 압전소자에 펄스형 압력을 가하여 노즐에서 방출된 액적(液滴-, 액체방울 liquid droplet)을 기관상의 원하는 위치에 내뿜어 기관상에 입자 집적 패턴을 형성할 수 있는 것이다.

잉크젯프린터로 미세한 인쇄를 하기 위해서는 사용하는 잉크의 최적화가 가장 중요한 요소의 하나이다. 입자집적을 위한 잉크젯 프린팅법에서도 현탁액의 조제가 가장 중요한 문제로 현탁액의 점도, 입자농도 또는 첨가물 등을 중심으로 한 연구가 진행되고 있다.

4.2.2 입자집적패턴의 제작에

세라믹스, 금속, 고분자 등의 다양한 물질을 대상으로 해서 잉크젯 프린팅법을 이용해 입자 집적 패턴을 제작하는 연구가 행해지고 있다. 이 잉크젯 프린팅법을 이용한 세라믹스의 마이크로 구조물 제작기술은 주형을 필요로 하지 않는 솔리드 프리 포밍(solid free forming)기술의 하나로서, 소량다품종의 세라믹스 성형체를 낮은 코스트로 단기간에 형성 가능한 새로운 프로세스 기술로 높은 관심을 모으고 있다.

다음으로 금속입자를 이용한 잉크젯 프린팅법 사용하여 전극배선 패턴을 형성한 연구로 백금 입자가 액체상태에 분산된 현탁액을 잉크로 이용해서 각종 고분자기판 상에 내뿜어 백금입자의 패턴을 형성한 예를 들 수 있다.

또한 최근 잉크젯 프린팅법을 다양한 유기고분자입자에 응용하는 연구(특히 발광소자에의 응용)가 활발하게 진행되고 있다.

지금까지 소개해온 잉크젯소 프린팅법과 같이 입자를 용매 중에 분산시키는 것이 아니라 가열해서 용매상태의 액적을 형성하는 방법도 있다.

4.2.3 입자집적패턴의 미세화

현재 잉크젯 프린팅법으로 만들 수 있는 입자집적패턴의 라인폭은 수 10 μm 에서 수 100 μm 로, 앞으로 더욱더 미세화 될 필요가 있다. 이 잉크젯 프린팅법은 잉크젯프린터와 동일한 기술기반 상에 개발되고 있는 것이라, 잉크젯프린터의 기술을 쉽게 응용할 수 있다. 따라서 현재의 잉크젯프린터의 기술을 관찰하면 잉크젯 프린팅법의 앞으로의 전개를 어느 정도 예상할 수 있다.

또한 잉크젯프린터로 개발된 많은 기술을 전용(轉用)하면 잉크젯 프린팅법으로도 좀더 미세한 입자집적패턴을 만드는 것이나 대량의 입자를 단시간에 배열하는 것이 가능하다.

4.3 자기조직화막 패턴을 이용

4.3.1 입자집적의 원리

그림 8 는 현탁액(懸濁液) 중의 대전입자가 기판상의 표면기(表面基)가 다른 영역에 정전기적 상호작용에 의해 선택적으로 부착되는 모델을 나타내고 있다. 여기서 입자는 음극으로 대전되어 있다고 가정하고, 기판은 양극으로 대전되어 있는 영역이외는 음극으로 대전되어 있다고 가정한다. 입자는 쿨롱력에 의해서 이 양극으로 대전된 영역에 우선적으로 부착된다. 즉 기판 상에 표면 특성이 다른 영역을 패터닝 해두면 디자인 한 형태에 입자 패턴을 형성할 수가 있다. 이러한 표면 특성이 다른 영역의 제작에서는 단분자층을 간편하게 제작할 수 있는 자기조직화막으로 사용한다.

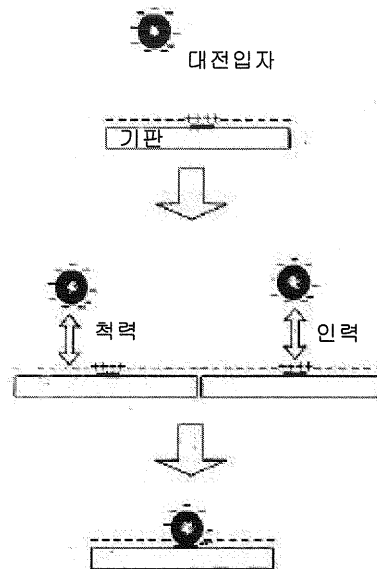


그림 8 대전입자와 기판과의 정전기상호작용으로 입자가 부착되는 모델

4.3.2 자기조직화막 패턴형성 방법

자기조직화막 패턴을 형성하기 위해서 그림 9 에서 보이는 바와 같이 자외선, 전자빔, 원자간력현미경, 컨택트프린팅(contact printing) 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 컨택트프린팅법은 기판상의 특정 영역만을 자기조직화막 패턴으로 형성하는 방법이다. 잉크가 묻은 스탬프를 기판에 눌러서 인쇄하듯이 자기조직화막 패턴을 형성한다. 여기에서 스탬프로 이용하고 있는 것이 표면이 울퉁불퉁한 패턴을 가지고 있는 실리콘 고무로 만든 시트인데, 마이크로 몰드(mold)라고 불린다. 한편 잉크에 해당되는 것은 자기조직화막을 형성하고 있는 분자이다. 또한, 입자를 하나하나 기판상에 정밀하게 배치하는 것도 가능한데 이것을 이용하여 자기조직화막 패턴을 변형하면 임의의 패턴 입자배열을 형성할 수가 있어 디바이스 등에의 응용이 기대된다.

4.3.3 나노입자의 집적

최근 나노 테크놀로지 연구가 진전됨에 따라 나노 입자가 가지는 양자효과를 디바이스 등에 응용하는 연구에 큰 관심이 쏠리고 있다. 나노 입자의 자기조직화막 패턴을 이용해서 많은 연구가 보고되고 있다. 자외광 리소그래피나 컨택트프린팅법을 이용해서 자기조직화막 패턴을 형성할 경우, 패턴의 선 폭을 100 nm 이하까지 미세화하는 것은 아주 어렵다. 나노입자를 이용한 미소한 입자집적패턴을 얻기 위해서는 먼저 자기조직화막 패턴의 선 폭을 나노사이즈 까지 미세화할 필요가 있다. 그래서 그 미세화의 수단으로써 전자빔, 이온빔, 조사프로브현미경을 이용한 리소그래피를 생각할 수 있다. 그리고 자기조직화막 패턴위에서 행하는 나노입자 배열프로세스는 전자디

바이스나 광학디바이스 등 공학분야, 바이오 분야나 의학, 의료분야 등 폭넓은 영역에서 응용이 검토되고 있다.

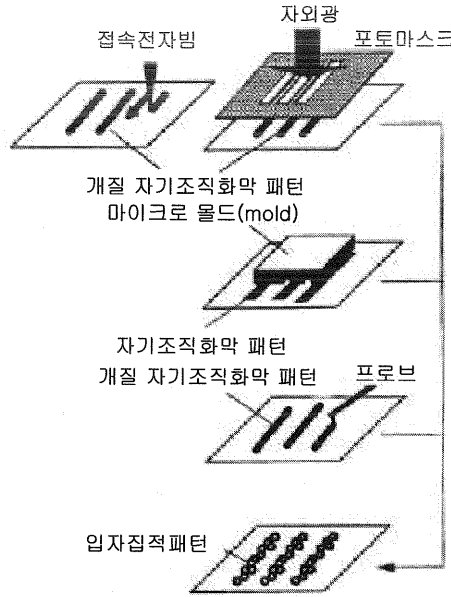


그림 9 자기조직화막의 패터닝

4.3.4 기판에의 입자고정

기판 위에 집적한 입자는 물리흡착에 의해 기판 위에 부착되어 있다. 그러나 이 부착력은 입자 크기가 크게 될수록 작아진다. 입자 크기가 수 μm 이상이 되면, 가스를 내뿜으면 입자는 비교적 간단하게 기판에서 박리되어 버린다. 따라서 좀더 견고하게 입자를 기판에 고정하기 위해서 입자와 기판간에 화학결합을 형성하려는 시도가 행해지고 있다.

4.4 대전패턴의 이용

이 장에서는 기판 상의 하전빔 묘화법이나 접촉대전법을 이용해 대전패턴을 형성해서 그 부분에 정전상호작용을 이용, 입자를 집적시키는 기술을 소개한다. 이 기술은 복사기나 프린터에서 이용되는 제로그래피 기술과 같은 원리를 이용하는 것이다.

4.4.1 이온빔 리소그래피(하전빔 묘사법)

이온빔 리소그래피란 집속된 전자빔 등을 이용해 절연체 기판의 표면에 전하를 조사(照射)해서 대전패턴을 형성한 것을 입자집적 패턴을 제작하는 프로세스에 응용한 것이다. 원리적으로 기체상태 중에서도 사용가능하므로 액체상태를 이용하지 않는 드라이 프로세스에 이용가능하다.

4.4.2 접촉대전법

접촉대전은 오래전부터 공학적으로 폭넓은 분야에서 이용된 현상으로 절연성의 필름에 전극을 접촉시킨 후 전압을 인가하면 전극에서 전자가 필름 가운데로 주입되어 엘렉트로렛이라고 불리는 안정한 대전전하를 형성한다. 이 접촉 대전에 의해 형성된 대전 패턴을 입자집적 패턴의 형성에 응용하는 방법이 다음과 같다.

- 1) 도전선의 마이크로 몰드를 눌러 찍어서 접촉대전 패턴을 형성하는 방법
- 2) 기판상에 형성해 둔 접촉대전 패턴에 기체상태에 분산된 나노입자(에어졸)를 내뿜음으로 입자의 집적 패턴을 제작하는 방법이다. 이 에어졸프로세스를 이용한 입자집적패턴은 양자효과 디바

이스 등을 대량으로 만든 프로세스로써 연구가 진행되고 있다.

4.5 전극배선패턴을 이용

전극배선 패턴에 전압을 인가해서 전장을 형성하고 입자를 정전상호작용력에 의해 집적시키는 기술이 있다. 정전상호작용은 그 메커니즘의 차이에 의해 전기영동과 유전영동의 2 종류로 분류되었다.

첫째로 전기영동은 대전한 입자가 전계 중에서 이동하는 현상이며 공학적으로도 폭넓은 분야에서 이용되고 있다. 입자집적패턴을 제작하기 위해서는 입자가 전극기관 전체에 붙어버리지 않기 위해 기관상의 특정영역 만에 전기영동으로 부착시키기 위한 기술이 필요하다. 예를 들면 도전성 기관상에 피복한 절연성의 레지스트를 리소그래피 기술로 가공해서 레지스트 패턴을 형성한 것이 전극으로서 사용되고 있다 또는 레지스트 패턴을 이용하지 않고 전계와 자외광을 이용해서 기관 상에 선택적으로 입자의 집적패턴을 형성하는 것도 가능하다.

둘째로 유전영동이란 전기장에 의해 입자에 유기되는 전기 쌍극자와 전계의 기울기의 내적에 비례하는 정전기력에 의해 입자가 이동하는 현상이다. 위의 전기영동과는 달리 입자가 대전되어 있지 않아도 입자의 영동이 발생해 입자를 기관위에 집적할 수 있다. 입자가 영동하는 방향은 입자의 유전율이 용매의 유전율보다 큰 경우 입자는 전계의 강도가 큰 쪽으로 이동한다(양의 유전영동). 반대로 용매의 유전율이 큰 경우 입자는 전계강도가 작은 영역으로 이동한다(음의 유도영동).

4.6 미소 주형을 이용

입자가 분산되어 있는 현탁액을 미소한 주형에 흘려 넣어 용매만을 제거함으로 입자를 주형의 형상으로 집적시킬 수가 있다. 이 절에서는 기관 위에 입자집적 패턴을 제작하는 2 가지의 기술에 대해서 소개한다.

첫째로 컨택트프린팅법에서 사용한 마이크로 몰드를 주형으로 이용하는 방법이 있다. 이 방법의 마이크로 몰드는 몇번이고 반복해서 사용할 수 있고 큰 면적의 마이크로 몰드를 제작하는 것도 가능해서 코스트가 낮고 대량의 입자집적패턴을 제작 가능하다는 특징이 있다.

둘째로 마이크로 템플레이트를 주형으로 이용해서 입자를 배열시키는 방법이다.

5. 대량의 입자를 한꺼번에 배열하기

재료나 디바이스를 실제로 제작하기 위해서는 대량생산이 가능한지를 따져보아야 한다. 이 장에서는 대량의 입자를 한꺼번에 배열할 수 있는 두가지 기술과 그 응용예를 설명하겠다

5.1 자기조직화 현상을 이용한 입자배열

이 장에서는 콜로이드 용액을 이용해서 제작한 대량의 입자가 자발적, 규칙적으로 늘어선(자기조직화 현상) 배열체(콜로이드 결정)의 제작법, 특징, 응용예에 대해서 설명한다. 먼저 콜로이드 결정에 대해서 설명하면, 배열의 방법(2 차원, 3 차원, 최대 조밀 등의)를 고려해서 다음의 3 종류로 분류가 가능하다. 첫째로 입자가 2 차원의 최대조밀구조로 배열된 2 차원 콜로이드 결정(단입자막)이다. 육방정(六方晶; hexagonal)구조를 하고 있다. 둘째로 입자가 3 차원의 최대조밀로 배열된 최대조밀형 3 차원 콜로이드 결정(인공 오팔)이다. 셋째로 콜로이드 용액 중에서 입자가 정전기적 척력(쿨롱 척력)에 의해 일정한 간격을 유지하며 면심입방격자(위), 또는 체심입방격자(아래: Body-Centered-Cubic; BCC)구조로 배열된 비최대조밀형 3 차원 콜로이드 결정(액중(液中)콜로이드)이다.

5.2.2 차원 콜로이드 결정(단입자막)을 만들

입자가 기체~액체의 계면 또는 고체표면에 2 차원적으로 자기조직화하는 현상을 이용해서

콜로이드 결정을 만드는 방법이 있다. 이를 통해 얻어진 배열은 2 차원 최대조밀의 육방정(六方晶; hexagonal)이다. 여러가지 배열방법이 있지만 대략적으로 아래의 세가지 방법으로 분류가능하다.

첫째로 기체~액체의 계면에 콜로이드 용액을 주입하고 단입자막을 형성시켜 그것을 고체기판의 표면 위에 옮겨서 뽑아내는 방법이다.

둘째로 고체기판표면상에 콜로이드용액을 도포(塗布)하고 용매를 천천히 증발시킴으로 단입자막을 형성하는 방법이다.

셋째로 전기영동 증착법이다.

한편 현시점에서는 위의 방법으로 얻어지는 단입자막 안에서 단결정영역의 크기는 작고 하나의 영역안의 입자수는 많아야 1만개 정도이다. 따라서 얻어진 콜로이드 결정은 작은 단결정의 집합체(다결정)이다. 이런 방법을 발전시켜 큰 단결정 영역을 가지는 단입자막을 제작하기 위한 방법도 몇가지가 있다.

5.3 최대조밀형 3 차원 콜로이드 결정(인공오팔)을 만들

이 장에서는 인공 오팔의 전형적인 두 제작방법을 소개한다.

첫째로 표면전하량이 작은 입자의 중력에 의한 침강을 이용하는 방법으로 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 단순하게 보이는 방법이지만, 침강, 브라운 운동, 핵형성과 성장, 등의 복수의 프로세스가 얽혀있기 때문에 최적조건을 정하는 것은 간단하지 않다. 이를 결정하는 파라미터로서는 입자지름, 입자와 용매의 비중, 온도와 습도조절에 의한 용매의 증발속도 등이 있다.

둘째로 물리적 제한을 이용하는 것이다. 입자직경 보다 작은 구멍이 복수개 뚫려있는 셀 측면에 유리튜브를 사용해서 콜로이드 용액을 주입한다. 그 때 용매가 흘러 나가면서 입자가 먼저 구멍이 뚫린 측면으로 모여 그곳에서부터 정열해 나가게 된다 그 결과로 (111)면이 유리기판에 평행하게 된 CCP 구조를 가진, 결정성이 높은 인공 오팔을 얻을 수 있다. 이 방법은 비교적 고속으로 집적층을 제어 할 수 있다는 이점이 있다.

마지막으로 재미있는 형태를 가진 인공오팔의 제작예를 소개한다. 기름의 표면에 콜로이드 용액의 물방울을 뜨게 하여 수분을 천천히 증발시켜서 구, 타원구, 또는 도너츠 형태의 모양을 가진 인공 오팔을 만드는 것이다.

5.4 규칙적으로 배열된 구멍을 가진 다공질재료(역오팔) 만들

위의 콜로이드 결정에서 입자간의 틈새에 있는 것은 공기이다. 이 장에서는 규칙적으로 배열된 구멍을 가진 다공질재료(inverse opal)에 대해 설명하겠다.

역오팔이라는 것은 콜로이드 결정을 주형으로 입자간의 틈새에 다른 물질로 채우고 굳게 한 뒤, 원래의 입자를 제거해서 만드는 다공질재료(포러스(porous) 재료)를 의미한다. 처음으로 만들어진 역오팔은 포러스(porous) 실리콘이다. 그 후 여러가지 물질의 역오팔이 제작되고 있다.

역오팔은 비표면적(단위체적당 표면적)이 크기 때문에 촉매, 센서용재료, 연료전지의 전극 등에 응용할 수 있다. 또한 구멍이 규칙적으로 배열되어 있기 때문에 제 6 장에서 소개하는 포토닉 결정으로 취급할 수도 있다.

5.5 비최대조밀구조 3 차원 콜로이드 결정(액중콜로이드결정)을 만들

적당한 조건하에서 표면 전하량이 큰 입자는 서로간에 큰 정전기적 척력이 작용하기 때문에 비최대조밀구조 3 차원 콜로이드 결정(액중 콜로이드 결정)이라 불리는 정전에너지가 최소가 되는 3 차원 배열체를 형성한다. 이 결정구조는 입자수농도와 정전기적 차폐의 길이[차폐장;遮蔽長]로 결정된다. 정전기적 차폐장은 두개 입자의 중심간 거리보다 짧게 되면 접촉하기까지 서로 영향을 끼치지 않게 되므로 결과로서 FCC 구조가 형성된다. 반면 정전기적 차폐장이 두개 입자의 중심거리 보다 길면 BCC 구조로 된다. 그리고 어떤 경우도 입자직경과 같은 정도의 적당한 거리를 두고 배열된다. 따라서 제작하면서 입자지름과 표면전하량의 균일성, 비중, 콜로이드 용액중의 이온 농

도, 흐름, 온도 등을 조절하면 큰 액중 콜로이드 결정을 얻을 수 있다.

5.6 큰 입자의 표면에 작은 입자를 배열

2 종류의 입자를 복합해서, 각각이 가지는 기능이나 그 계면에 새롭게 나타난 기능을 이용하는 생각으로 현재까지 다양한 형태의 복합입자가 개발되어 있다. 이 책에서 소개하는 복합입자의 제작법은 크게 나누어서 기계적 복합화법, 유동층법, 정전기력을 이용한 방법의 3종류가 있다.

첫째로 기계적 복합화법은 입자를 딱딱한 공과 함께 용기에 넣어 회전혼합하는 종래의 볼밀(ball mill)법에서 발전시켜 최근에는 입자에 좀더 적극적으로 에너지를 투입하는 방법이 개발되어 있다.

둘째로 유동층법은 샤프트모양의 용기에 2 종류의 입자를 넣어서, 밀바닥으로부터 망으로 된 접시를 통해 가스를 불어 넣어 입자를 유동상태로 만든 뒤, 충돌을 반복시켜서 복합입자를 만드는 방법이다.

기계적 복합화법이나 유동층법에 의해 만들어진 복합입자는 입자간의 결합이 강하고 대량 생산이 가능하기 때문에 의약품, 화장품, 식품, 토너 등의 분야에서 이미 널리 실용화 되어 있다.

마지막으로 정전기력을 이용하는 방법으로 습식에서는 용매 중에서의 제타전위를 pH 치로 제어해서 2 종류의 입자를 서로 역극성으로 대전시켜 복합입자를 얻을 수가 있다(헤테로응집법). 한편 건식에서는 막자사발(mortar) 등으로 단순 혼합하는 방법이 예전부터 이용되어 왔다. 이 방법은 2 종류의 입자가 접촉해 있을 때, 전자의 주고받기가 일어나서 입자가 서로 역극성으로 대전되는 현상을 이용해서 그 사이에 작용하는 정전인력을 이용해 부착시키는 것이다. 하지만 접촉대전양이 큰 조합은 자연계에서 아주 한정되어 있기 때문에 임의의 조합의 입자로부터(정전기력을 이용해서) 막자사발(mortar) 등에 의한 단순한 혼합으로 복합입자를 만드는 것은 어렵다. 그렇기 때문에 건식으로는 2 종류의 입자를 각각 반대 부호로 강제적으로 대전시켜서 그 사이에 작용하는 정전인력을 이용해서 복합화 시키는 방법이 있다. 이 방법은 원리적으로는 모든 입자의 조합에 적용가능하며 범용성도 높다.

6. 분석자 결론

광범위한 자료를 정리하면서 본문의 내용을 충분히 숙지하지 못하고 지나친 부분이 없지 않을 것이다. 본 자료에서는 나노기술의 핵심분야 중에 하나인 입자집적화 기술의 현황에 대해 잘 정리되어 있으며, 필자의 전공분야와 관련된 마이크로/나노 입자조작 방법의 관점에서 분석해 보았다. 현재의 정보화 사회를 가져온 것은 전자 기술이며, 그 핵심 기술이라고 할 수 있는 것은 IC 기술이다. IC 기술의 발전 과정을 살펴보면 차세대 재료/디바이스는 미세구조가 고도로 제어되어 부품과 같은 기능을 가진 유닛이 다수 집적화된 뒤, 더욱 여러 가지 기능을 가지는 유닛이 계층적으로 집적화 되어 장치와 같은 기능을 가지게 될 것이다. 그 핵심 기술은 집적화 기술이다. 즉 입자집적화기술은 기능을 집적화시킨 IC 또는 지능형 재료와 같은 차세대 재료/디바이스를 만들 수 있는 유력한 기술이라 할 수 있다.

그러나 입자집적화에 의해 다기능을 가졌거나 또는 부품이나 장치와 같은 기능을 가진 재료/디바이스가 가지는 단점도 있다. 현재 기술적인 한계로서 문제시되고 있는 것으로 공업제품의 구조가 너무나도 복잡하고 또한 컴퓨터 제어가 지나치게 앞서 나가고 있음으로 인해 취급하기 힘들다는 점, 그리고 내부가 블랙박스처럼 되어 버려 이상이나 고장에 대응할 수 없게 되었다는 점을 들 수 있다.

입자에서 재료/디바이스를 만들어 내는 일련의 과정은 크게 3 개의 기술분야로 나눌 수가 있다.

첫째, 입자 그 자체에 필요한 기능, 즉 부품과 같은 기능을 가지도록 하는 기술분야이다. 이 기술분야는 입자 설계라고 불려지고 있어 입자표면의 코팅, 분자에 의한 장식, 입자의 복합화 등

다채로운 연구가 계속되고 있다.

둘째, 여기서 다룬 입자집적화기술이다.

셋째, 어떤 입자를 어떻게 집적시켜 목적으로 하는 기능을 발현하도록 설계하는 기술이다. 즉 생명체에서 DNA 에 상당하는 역할을 가지는 분야이다.

입자설계기술은 충분하다고는 할 수 없지만, 기반 기술을 축적 중에 있어 재료나 디바이스로의 응용을 준비하는 단계이다. 그리고 선행된 입자설계기술과 앞으로 개척될 설계기술을 잘 연계시켜 새로운 기술 분야를 형성해 꿈의 재료를 만드는 것도 멀지 않은 않을 것이다.