

분무건조 및 분무열분해 공정을 이용한 나노입자 합성

이혜문, 양상선, 김용진 | 재료연구소

1. 서론

수 nm에서 100nm의 크기를 지닌 나노입자는 동일 물질의 벌크상에서 나타나지 않는 우수한 물리·화학적 특성을 보여, 초전도, 촉매, 약물전달, 센서, 자성재료 등 전자·정보, 화학, 기계 및 바이오 산업과 같은 첨단산업에 활용성이 매우 높을 것으로 기대되고 있다.^[1]

나노입자는 입경분포가 매우 작고 비응집 상태의 구형으로 존재할 때 첨단산업 활용에 매우 효과적이다. 특히 나노입자의 성형 및 소결공정을 통해 특정 형상의 기계류 부품을 만들어 내는 분말야금 분야에서는 단분산 상태의 비응집 구형 입자를 활용하는 것이 양질의 분말부품을 만들어내는 핵심이라 할 수 있다. 단분산 상태의 비응집 구형입자를 제조하기 위해 개발 및 사용되고 있는 공정은 여러 가지가 있다. 그 중 에어로졸 공정은 타 공정에 비해 입자간 응집을 최소화할 수 있어 단분산도(monodispersity)를 극대화 할 수 있으며, 생성되는 입자의 형상을 제어할 수 있다는 장점을 지니고 있어 최근 형광, 자기, 광촉매 등 다양한 기능을 지닌 나노입자 제조에 효과적으로 활용되고 있다.^[2]

기능성 나노입자를 제조하는 에어로졸 공정은 크게 가스-입자 전환(gas-to-particle conversion)과 액체-입자 전환(liquid-to-particle conversion) 2가지로 구분된다. 가스-입자 전환은 높은 에너지를 이용하여 고체 및 액체 상태의 전구물질(precursor)을 증발 가스화한 후 낮은 온도에서 다시 응축시켜 입자화 하는 방법으로 생성되는 입자의 크기가 수 nm로 매우 작고, 단분산도 또한 매우 좋으며, 무엇보다도 순도가 매우 높은 입자를 만들어 낼 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나 전구물질별 증기압, 핵 생성 및 성장률, 반응율 등이 서로 달라 나노 복합체 제조가 매우 어려울 뿐만 아니라, 생성되는 입자의 양이 적고 생성된 입자간 응집이 심해 활용도가 매우 낮다는 단점을 지닌다. 반면 분무 건조(spray drying) 및 분무 열분해(spray pyrolysis) 공정으로 대표되는 액체-입자 전환은 다양한 종류의 나노복합체 합성에 유리하며, 가스-입자 전환에 비해 공정이 간단하고 입자합성에 필요한 비용 또한 매우 저렴하다는 장점을 지니고 있다.

그러므로 본 고에서는 다양한 기능의 나노 및 서브마이크론(100nm ~ 1 μ m) 입자를 연속적으로 생산할 수 있는 다양한 종류의 분무 건조 및 열분해 공정을 소개하고, 상기 공정을 이용하여 생성되는 입자의 형상을 제어하는 기술과 다양한 기능을 지닌 나노입자를 합성하는 기술을 소개하고자 한다.

2. 분무 건조 및 열분해 공정 (Spray drying and pyrolysis processes)

분무 건조(spray drying) 및 열분해(spray pyrolysis) 공정을 통해 나노 및 서브마이크론 입자를 제조하는 과정은 크게 전구물질의 제조, 전구물질의 미세 액적화, 미세 액적화된 전구물질의 건조 및 열분해를 통한 나노입자의 합성, 합성된 입자의 포집 등 4 단계로 이루어져 있다. 그림 1은 분무 건조 및 열분해 공정을 통해 나노입자를 합성하는 과정을 설명한 것으로 다양한 분무장치를 통해 아주 작은 액적(droplet)으로 만들어진 전구용액은 공급되는 캐리어 가스에 의해 건조 및 열분해로에 유입된다. 유입된 전구용액 액적은 건조 과정을 거치면서 고형화되고 계속되는 용매의 증발로 고형화된 입자는 전구용액 액적 중심으로 모여 최종적으로는 다양한 기능과 형상을 지닌 구형의 나노입자가 만들어지게 된다.

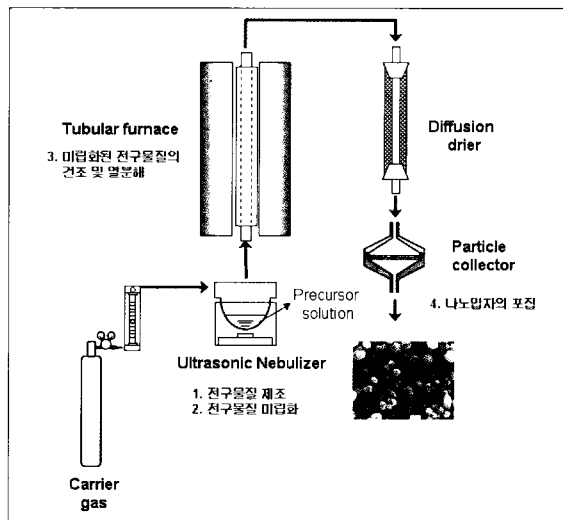


그림 1. 나노 및 서브마이크론 분말 합성을 위한 분무 건조 및 열분해 공정

2.1 전구물질의 제조

분무 건조 및 열분해 공정을 통해 최종적으로 생성되는 입자의 화학성분은 전구용액(precursor solution)을 구성하는 화학물질로 결정되며, 최종 생성 입자가 화합물일 경우 입자를 구성하는 화학물질의 원소 비 또는 전구용액에 함유되어 있는 화학물질의 몰비로 결정된다.^[2] 그러므로 분무 건조 및 열분해 공정을 통해 원하는 재료의 나노입자를 제조하기 위해서는 특정 화학물질이 적절한 몰비로 혼합되어 있는 전구물질(precursor)을 용액상태로 제조하는 과정이 매우 중요하다.

분무건조법은 화학적 합성반응 및 결정화 과정이 포함되지 않고 단지 건조 단계만을 통해 최종 생성되는 나노입자의 형상 및 크기를 제어하는 공정이라 할 수 있다. 그러므로 분무건조법을 통한 나노입자 제조에는 일반적으로 결정성을 지닌 1차 입자가 특정용매에 분산되어있는 colloidal suspension 용액이 전구용액으로 사용된다. 반면 화학적 합성 및 결정화 단계를 통해 나노입자를 합성하는 분무 열분해 공정은 최종 생성 입자를 구성하는 화학물질을 함유하는 nitrate, chloride, acetate 계열의 비교적 값싼 금속염을 물 또는 알콜과 같은 용매에 녹인 상태 또는

폴리올 법과 같은 화학공정을 통해 합성된 수 nm 크기를 지닌 비정질 상태의 1차 입자가 특정 용매에 고르게 분산되어 있는 colloidal suspension 용액을 전구용액으로 사용한다. 그림 2는 한국기계연구원 부설 재료연구소에서 sodium citrate aided 공정을 이용하여 합성한 barium ferrite colloid suspension과 그 안에 존재하는 비정질 상태의 barium ferrite 전구분말의 TEM 사진을 보여주는 것으로 약 2nm의 전구입자가 매우 균일한 크기로 잘 분산되어 있는 것을 볼 수 있다.

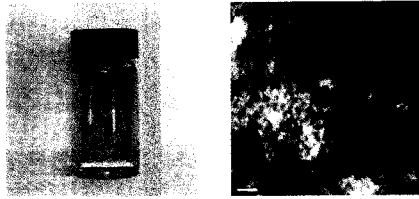


그림 2. Sodium citrate aided법으로 제조된 $BaFe_{12}O_{19}$ 전구분말이 분산되어 있는 colloidal suspension 및 전구분말 TEM 사진

2.2 전구물질의 미립화

분무 건조 및 열분해 공정에 의한 입자합성은 “One droplet One particle (ODOP)”로 전구용액에서 분무된 하나의 액적이 하나의 단결정 혹은 다결정 입자를 만든다는 개념에서 시작된다. 즉 다양한 분무공정에 의해 만들어진 전구용액의 액적 크기 또는 그 액적에 함유되어 있는 전구물질의 농도가 분무 건조 및 열분해 공정에 의해 생성되는 입자의 크기를 결정하는 중요한 변수가 된다. 그러므로 최종 목표로 하는 입자의 크기를 nm 크기로 만들기 위해서는 전구용액을 아주 작은 크기로 만들어 주는 분무공정이 필요하다. 분무공정은 인위적으로 외력을 가해 전구용액을 아주 작은 물방울로 분쇄하여 가스 중으로 분산시키는 것을 의미하는 것으로 전구 용액 분무법은 그림 3에서 보여주듯이 전구 용액 내에 가스를 공급하여 분무화 하는 pneumatic 법, 초음파 진동자를 이용한 초음파 분무법, 2류체 노즐을 이용한 노즐 분무법 외에 진동 오리피스, 회전원판, glass filter, electrospray nozzle 등을 이용한 전구 용액 분무법 등 다양한 방법이 사용되며, 전구용액의 분무방법에 따라 나노입자를 합성하는 분무 건조 및 열분해법 또한 다양하게 분류된다. 이러한 여러 가지 분무방법 중 전구용액의 점도 및 표면장력 등과 같은 특성을 고려해 알맞은 분무장치를 결정하는 것이 최종적으로 만들어지는 입자의 크기 및 형상을 최적화하는데 도움이 된다.

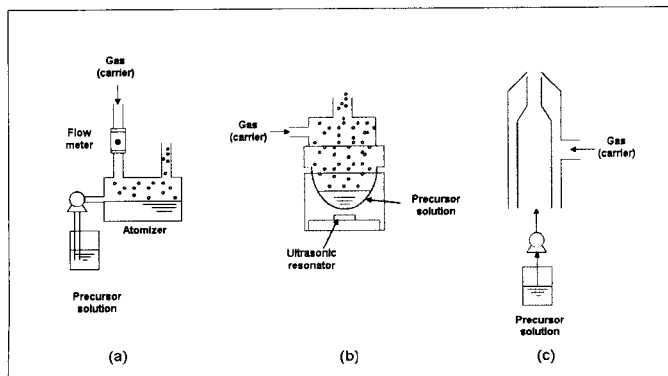


그림 3. 전구물질 미립화에 사용되는 분무법; (a) pneumatic 법, (b) 초음파 분무법, (c) 2류체 노즐 분무법

2.3 미립화된 전구물질의 건조 및 열분해

분무법에 의해 미립화된 전구용액 액적은 캐리어 가스에 의해 건조 및 열분해 로에 공급된다. 미립화된 액적의 건조 및 열분해를 위해서는 다양한 종류의 로가 사용될 수 있으나 공정의 편의상 관상로(tubular furnace)가 주로 사용된다. 관상로는 경우에 따라서 1 또는 2단 이상의 온도조절 영역으로 이루어진 로가 사용될 수 있다.

분무건조는 300℃ 이하의 저온에서 이루어지는 공정으로 하나 또는 두개의 온도영역으로 구분되는 관상로가 사용되며, 분무과정에서 공급된 전구용액 액적의 건조만으로 최종입자를 만들어 내는 공정이다. 일반적으로 분무 건조 공정에서는 열분해 과정 없이 건조과정에 의해서만 최종입자가 만들어지므로 결정을 지니는 한 종류의 1차 입자가 특정 용매에 분산되어 있는 colloid suspension 용액이 전구용액으로 사용되며, 최종입자의 형상 또한 1차 입자의 모양이 그대로 존재하는 granule particle이 만들어지게 된다. 그러므로 만들어지는 입자의 형상은 전구용액을 구성하는 1차 입자의 크기를 변화시킴으로써 최종입자의 형상을 제어할 수 있다. 또한 녹는점이 서로 다른 2 종류의 1차 입자가 함유되어 있는 전구용액과 건조 및 열분해 영역으로 구분되어 있는 2단의 관상로를 사용할 경우 하나의 입자에 다양한 크기의 기공을 지니는 다공질 입자를 만들어 낼 수도 있다. 즉 분무건조 공정은 다양한 기능을 지니는 나노입자 복합체 합성보다는 특정 기능을 지니는 나노입자의 형상제어에 주로 활용된다고 할 수 있다.

분무열분해 공정은 주로 1000℃ 이상의 고온에서 이루어지는 공정으로 금속염 또는 비정질 상태의 1차 입자가 특정용매에 분산되어 있는 전구용액을 특정 기능을 지니는 나노입자 합성에 활용한다. 분무열분해 공정은 분무건조 공정과 거의 유사하나 건조과정에 의해 만들어진 비정질 상태의 입자를 고온영역에서 화학반응 및 결정화를 유도하여 최종적으로 원하는 기능을 지닌 단결정 혹은 다결정 상태의 나노입자를 만들어내는 공정이라 할 수 있다. 분무열분해법은 고온에서 이루어지는 공정으로 분무공정으로 인하여 만들어진 전구용액 액적을 구성하는 용매의 증발속도가 빠를 경우 입자의 내부가 비어있는 hollow sphere 또는 비구형의 불균일한 형상을 지닌 입자가 만들어 지게되므로 건조 및 열분해가 서서히 일어나도록 구성된 2단 이상의 온도영역으로 나뉘어진 관상로가 주로 사용된다.

2.4 제조된 나노입자의 포집

나노입자 합성을 위해 사용된 전구용액 내에는 다량의 물이 함유되어 있으므로 관상로를 통해 배출되는 가스에는 최종적으로 만들어진 나노입자 뿐만 아니라 많은 양의 수분이 함께 존재한다. 입자와 함께 존재하는 수분은 나노입자의 심각한 응집을 유발하며 포집효율 또한 저하시키므로 분무건조 및 열분해 공정을 통해 제조된 비응집 상태의 나노입자를 효율적으로 포집하기 위해서는 배출 가스에 함유되어 있는 수분의 영향을 최소화하는 것이 필수라 할 수 있다. 배출 가스 중 존재하는 수분의 영향을 최소화하기 위해 사용되는 일반적인 방법으로는 관상로 출구부터 미세 입자 포집을 위해 사용되는 전기집진장치(electroprecipitator) 및 여과집진장치(bag filter)까지의 온도를 100℃ 이상으로 유지하여 가스 내에 존재하는 수분의 응축을 방지하고 나노입자만을 포집하는 방법과, 관상로 후단에 diffusion drier를 설치하여 배출가스 내에 함유되어 있는 수분만을 제거한 후 나노입자를 포집하는 방법이 있다. 이러한 2가지 방법 모두 분무 건조 및 열분해 방법에 의해 제조된 나노입자를 효과적으로 포집하는데 활용할 수 있으나, 후자의 경우 diffusion drier를 반복적으로 교환해야 하는 번거로움이 있으므로 첫 번째 방법인 100℃ 이상의 온도 유지를 통한 수분제어가 분무건조 및 열분해 공정을 통해 만들어진 나노입자를 포집하는데 더욱 효

과적이라 할 수 있다.

3. 분무 건조 및 열분해 공정을 이용한 나노입자의 형상제어

분무건조 공정은 위에서 언급했듯이 한 종류의 1차 결정질 입자 또는 녹는점의 차이가 큰 2가지 종류의 1차 입자(결정질 입자와 폴리머 입자)가 특정용매에 분산되어있는 colloid suspension이 전구용액으로 사용된다. 그러므로 분무 건조공정에 의해 만들어지는 입자의 형상은 1차 입자의 형상을 유지하는 granule particle이 만들어지게 된다. 그림 4(a)는 Chang et al.^[3]에 의해 이루어진 연구 결과로 SiO₂ 입자가 용매에 분산되어있는 colloidal suspension을 사용하여 granule 입자가 만들어지는 과정과 colloidal suspension에 분산되어 있는 SiO₂ 입자의 크기에 따라 변하는 최종입자의 형상을 보여준다. 이는 전구용액 액적의 용매가 증발되며 용매내에 분산되어 있는 1차 입자가 모세관 현상(capillary effect)으로 인해 액적 가운데로 서서히 몰리기 때문에 1차 입자의 형상을 유지한 granule particle이 형성되게 된다. 즉 1차 입자의 평균입경이 커지면 그림에서와 같이 최종 생성되는 입자 표면의 굴곡이 심해지며 포도송이 같은 입자가 만들어 지게 된다. 이렇게 만들어진 입자는 같은 재료, 같은 크기를 지닌 입자라 해도 표면의 형상이 달라지면 광학적 특성이 서로 다르게 나타난다는 특성에 의해 광학관련 산업에 활용될 수 있다.

그림 4(b) 또한 Chang et al.^[3]에 의해 이루어진 연구결과로 녹는점의 차가 매우 큰 SiO₂ 입자와 Polystyrene latex (PSL) 입자를 1차 입자로 특정용매에 분산시킨 colloidal suspension을 전구용액으로 사용하고 300°C 이하의 건조영역과 500°C 이상의 열분해 영역으로 분리된 관상로를 이용하여 다공질 입자가 만들어지는 과정을 보여 준다. 건조단계에서는 상기 공정과 같이 2 종류의 1차 입자가 혼합되어 있는 상태로 granule particle이 만들어지고 고온의 열분해 영역에서 녹는점이 낮은 PSL입자만이 녹아 없어져 PSL이 있었던 위치가 빈자리로 남게되며, 최종적으로 사진에서 보는 바와 같이 다공질 입자가 만들어 지게 된다. 이러한 다공질 입자는 매우 넓은 표면적으로 인하여 광학재료 뿐만 아니라 촉매산업에도 활용될 수 있을 것으로 보고되고 있다.

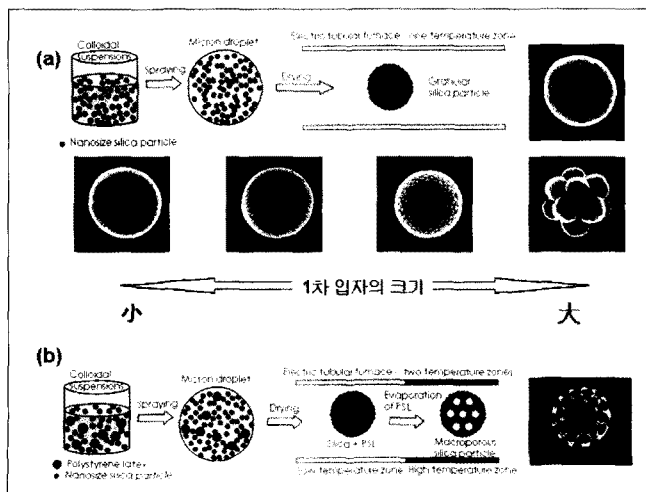


그림 4. 분무건조법에 의한 다양한 형상의 나노입자 제조; (a) granule particle, (b) macroporous particle

분무열분해 공정은 앞에서 언급한 바와 같이 분무건조공정과 다르게 금속염 또는 비정질 상태의 1차 입자로 이루어진 전구용액을 분무화 하고 관상로 내부에서 화학반응 및 결정화를 유도하여 최종적으로 원하는 기능을 지닌 나노입자를 만들어내는 공정이다. 분무 열분해 공정에서는 그림 5와 같이 분무화된 전구용액 액적을 구성하는 용매의 증발속도(τ_{sv})와 금속염 및 비정질 상태의 1차 입자 확산속도(τ_{sd})에 따라 최종적으로 만들어지는 입자의 형상이 결정된다. 즉 τ_{sv} 와 τ_{sd} 가 같으면 건조과정에서 고형화된 전구입자가 액적 가운데로 모여 최종적으로 내부에 기공이 없는 구형의 단결정 혹은 다결정 나노입자로 만들어지나, τ_{sd} 가 τ_{sv} 보다 월등히 클 경우 고형화된 전구입자가 빠른 확산속도로 인해 액적 외부로 모이거나 기공이 많은 상태로 액적 가운데 모여 hollow sphere 또는 불규칙한 형상의 나노입자가 만들어진다.

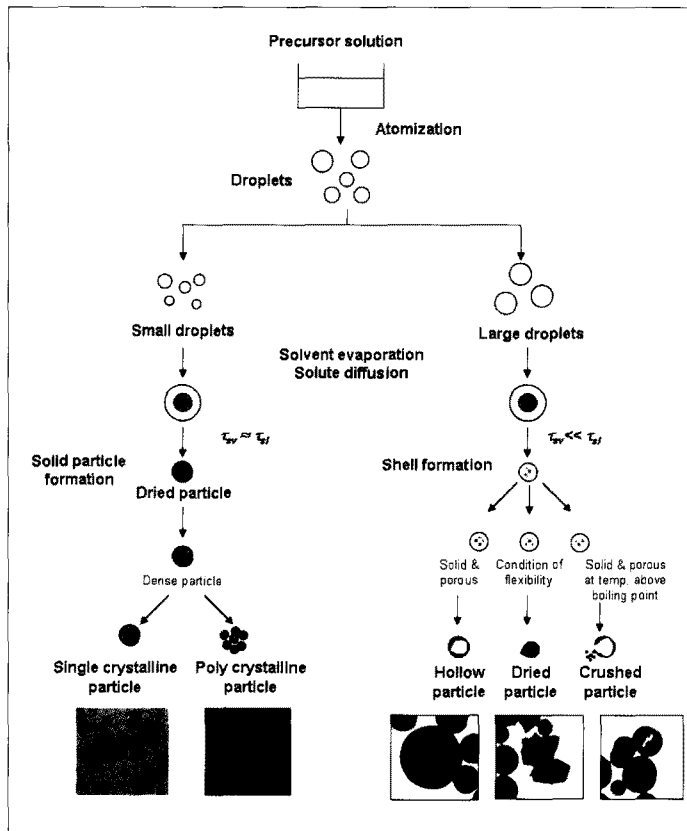


그림 5. 분무 열분해법에 의한 다양한 형상의 나노입자 제조^[4]

4. 분무 열분해 공정을 이용한 기능성 나노입자 합성

최근 분무 열분해 공정은 다양한 산업에 활용될 수 있는 기능성 나노입자 합성을 위해 매우 활발하게 연구되고 있다. 4장에서는 다양한 분무 열분해 공정을 이용하여 기능성 나노입자를 합성한 연구내용을 조사하여 정리해보았다.

4.1 알콜 첨가 분무 열분해법(Alcohol Assisted Spray Pyrolysis; AASP)을 이용한 BaFe₁₂O₁₉ 나노입자 합성

Lee et al.^[4]은 고용량 자기기록 매체에 활용되는 BaFe₁₂O₁₉ 나노입자를 분무 열분해 단일 공정을 통해 합성하기 위해 금속염인 Fe(NO₃)₃ · 9H₂O와 Ba(NO₃)₂를 12:1의 몰비로 초순수에 녹여 제조한 전구용액에 에탄올을 첨가 하였다. 에탄올 첨가로 인한 전구용액의 표면장력 감소는 최종 생성 입자크기를 결정짓는 초음파 분무 액적 크기를 감소시켰으며, 첨가된 에탄올의 연소를 통해 발생된 열에너지는 BaFe₁₂O₁₉ 결정화 향상에 활용되어 세계 최초로 분무 열분해 단일공정을 통해 평균입경 72nm, 보자력 4510 Oe의 BaFe₁₂O₁₉ 나노입자를 합성하는데 성공하였다.(그림6)

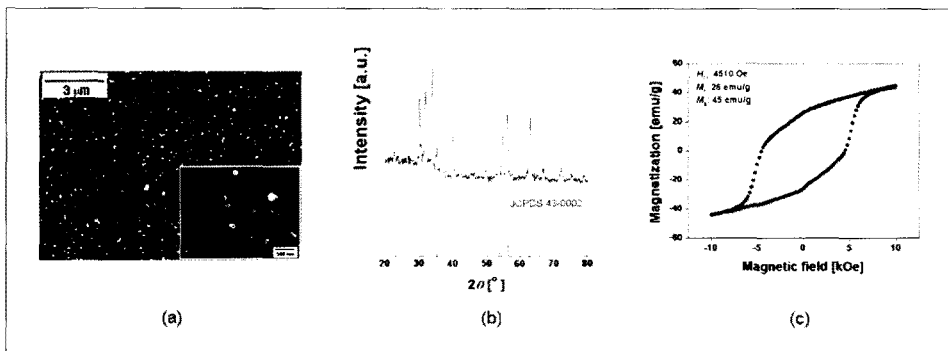


그림 6. AASP법에 의해 만들어진 BaFe₁₂O₁₉ nanoparticles; (a) SEM 사진, (b) XRD 패턴, (c) 자기 특성 (Hysteresis loop)

4.2 염 첨가 분무 열분해법(Salt Assisted Spray Pyrolysis; SASP)을 이용한 Y₂O₃-ZrO₂ 나노입자 합성

Xia et al.^[5]은 분무 열분해 공정으로 합성되는 입자의 크기를 최소화하고 단분산도 또한 극대화하기 위해 염첨가 분무 열분해법 (Salt Assisted Spray Pyrolysis; SASP)을 개발하였다. 그림 7은 SASP 공정을 보여주는 개략도와 SASP에 의해 합성된 Y₂O₃-ZrO₂ 형광체 나노입자를 보여준다. 그림 7(a)에서 보듯이 SASP는 일반 분무 열분해 공정 (conventional spray pyrolysis; CSP)과 다르게 전구용액에 인위적으로 첨가된 염이 건조과정에서 석출되어 Y₂O₃-ZrO₂ 결정핵 주위를 둘러싸 열분해 과정에서 발생하는 Y₂O₃-ZrO₂의 결정성장을 억제하게 된다. 그림 7(b)에서 보듯이 SASP에 의해 만들어진 입자는 CSP 공정에 의해 만들어진 입자와 모양이나 크기에서 커다란 차이가 없지만 수세과정을 거치면 Y₂O₃-ZrO₂ 주위를 둘러싸고 있는 염이 제거되어 그림 7(c)와 같이 약 10nm의 크기를 지니는 Y₂O₃-ZrO₂ 입자가 생성되어 있음을 확인할 수 있다. 이 공정은 아주 작은 입자를 만들어내는 데는 효과적인

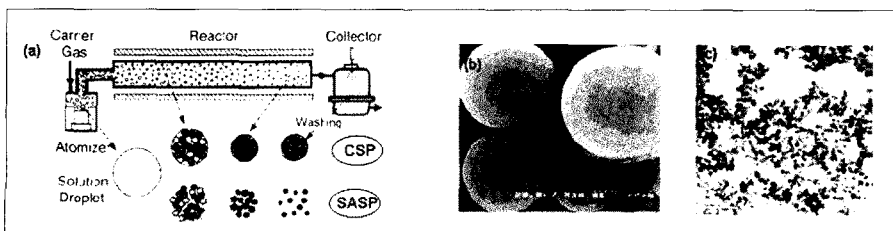


그림 7. SASP 공정 개념도 (a) 및 합성된 Y₂O₃-ZrO₂ 분말; 수세전 (b), 수세후 (c)

이나, 첨가된 염에 의해 순도가 떨어질 수 있다는 단점이 존재하여 가능한 여러 번의 수세과정 거쳐 염을 깨끗하게 제거해주는 과정이 반드시 필요하다.

4.3 정전분무 열분해법(Electrospray pyrolysis)을 이용한 기능성 나노입자 합성

일반적인 전구용액 분무공정에 의해 만들어지는 액적의 크기는 대부분 $10\mu\text{m}$ 전·후로 분무 열분해 공정에 의해 생성되는 최종입자는 수백 nm크기로 구성된다. Lee et al.^[6]은 전구 용액의 액적 크기를 최소화하는 방법으로 정전분무(electrospray)공정을 적용하여 20nm 이하의 L10 구조 FePt 나노입자를 합성하였다. 정전분무는 그림 8(a)와 같이 약 $100\mu\text{m}$ 내경을 지닌 시린지 튜브를 통해 배출되는 전구용액에 직류 고전압(D.C 3 - 10 kV)을 인가하고 특정 거리를 유지하는 링전극에 접지를 하면 그림에서와 같이 시린지를 통해 공급되는 전구용액은 노즐 끝에서 콘젯(Cone-jet) 모양의 액주가 형성되어 약 10-100nm 크기의 액적으로 분리되어 분무된다. 이렇게 분무된 미세한 전구용액 액적은 관상로에서 화학적 합성반응 및 결정화가 이루어져 그림 8(b)와 같이 20nm 이하의 미세하고 단분산도가 좋은 L10 구조의 FePt 나노입자가 합성된다.

이 외에도 수 μm 의 기공을 지닌 glass filter를 이용하여 많은 양의 극미세화된 전구용액 액적을 저압상태의 열분해로에서 수십 nm의 입경을 지닌 기능성 나노입자로 합성하는 low pressure spray pyrolysis (LPSP)^[7] 및 전구용액 액적의 열분해를 위해 사용되는 관상로 대신 수소 화염을 사용하는 flame spray pyrolysis^[8] 등 다양한 분무 건조 및 열분해 공정이 기능성 나노입자 합성에 활용되고 있다.

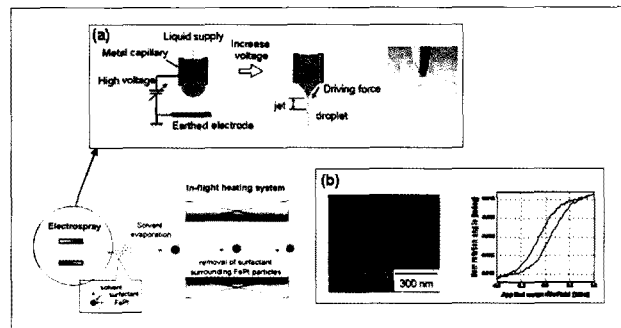


그림 8. Electrospray pyrolysis 공정을 통한 L10 FePt 나노입자의 합성; (a) electrospray 공정 개념도, (b) L10 FePt 나노입자의 SEM 사진 및 자기적 특성 (hysteresis loop)

5. 결 론

분무 건조 및 열분해 공정은 타 공정에 비해 비교적 간단한 공정으로 금속, 금속산화물, 금속황화물 등 다양한 기능 및 형상을 지니며 단분산도가 매우 뛰어난 나노입자 합성이 가능하다. 이러한 장점을 살려 최근에는 분무 건조 및 열분해 공정을 통해 전자·정보, 바이오, 환경, 에너지 산업 등에 활용하기 위한 원료 나노입자 합성에 많은 노력을 기울이고 있으며, 실제로 나노크기의 강자성 분말, 형광분말, 전극재료 분말, 광학재료 분말, 의약품 분말 등 대부분의 첨단산업에 활용될 수 있는 다양한 유·무기 나노입자 합성이 가능해졌다. 그러나 아직까지는 나노입자의 생산량이 많지 않은 단점을 지니고 있어 현재는 나노입자 합성량 향상을 위한 연구와 분무 건조 및 열분해 공

정에 의해 만들어진 기능성 나노입자의 활용단계에서 발생하는 나노입자 손실과 공정비용 및 시간을 최소화하기 위해 분무 건조 및 열분해 공정과 나노입자 활용을 위한 타 공정이 접합된 새로운 하이브리드 공정 개발을 위해서도 노력하고 있다.

★ 참고 문헌

- [1] I. Wuled Lenggoro, Hye Moon Lee, Kikuo Okuyama, 2006, Nanoparticle Assembly on Patterned “Plus/Minus” Surfaces from Electrospray of Colloidal Dispersion, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 303, pp. 124–130.
- [2] Kikuo Okuyama, I. Wuled Lenggoro, 2003, Preparation of Nanoparticles via Spray Route, *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, pp.537–547.
- [3] Hankwon Chang, Kikuo Okuyama, 2002, Optical Properties of Dense and Porous Spheroids Consisting of Primary Silica Manoparticles, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 33, pp. 1701–1720.
- [4] Hye Moon Lee, Sun-Young Bae, Ji-Hun Yu, Yong-Jin Kim, 2009, Preparation of Unsintered Spherical BaFe₁₂O₁₉ Nanoparticles via an Alcohol-Assisted Spray-Pyrolysis Route, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 91, pp. 2856–2861.
- [5] Bin Xia, I. Wuled Lenggoro, Kikuo Okuyama, 2001, Novel Route to Nanoparticle Synthesis by Salt-Assisted Aerosol Decomposition, *Advanced Materials*, Vol. 13, pp. 1579–1582.
- [6] Hye Moon Lee, Soon-Gil Kim, I. Matsui, T. Iwaki, F. Iskandar, I. W. Lenggoro, K. Okuyama, 2007, Monolayer Deposition of L10 FePt Nanoparticles via Electrospray Route, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 313, pp. 62–68.
- [7] W. N. Wang, Y. Itoh, I. W. Lenggoro, K. Okuyama, 2004, Nickel and Nickel Oxide Nanoparticles Prepared from Nickel Nitrate Hexahydrate by a Low Pressure Spray Pyrolysis, *Materials Science and Engineering B*, Vol. 111, pp. 69–76.
- [8] Takao Tani, Lutz Madler, Sotiris E. Pratsinis, 2002, Homogeneous ZnO nanoparticles by flame spray pyrolysis, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 4, pp. 337–343.



이 혜 문

· 재료연구소 나노기능분말연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 에어로졸 공정을 이용한 나노분말 합성 및 응용기술
· E-mail : hyelee@kims.re.kr



양 상 선

· 재료연구소 분말기술연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 습식공정을 이용한 나노금속분말 제조 및 응용기술
· E-mail : nanoyang@kims.re.kr



김 용 진

· 재료연구소 분말기술연구그룹 책임연구원
· 관심분야 : 습식공정을 이용한 나노금속분말 제조 및 응용기술
· E-mail : yjkim@kims.re.kr