

광촉매용 나노분말 제조기술



김 선 재
세종대학교 나노공학과 부교수
(나노기술연구소 소장)

이 남 희
세종대학교
나노기술연구소 연구원



김 선재 소장



이 남희 연구원

인류문명의 발전과 더불어 각종 산업현장 또는 생활현장에서 발생하는 오염물질들에 의해 지구온난화와 같은 이상 기후 현상, 아토피성 피부염, 블루베이비 신드롬, 새집 증후군 등에 의한 새로운 질병이 발견되어 사회적으로 커다란 문제를 야기하고 있다. 또한, 사람들의 생활 습관과 방식이 변화되면서 바쁜 일상과 인스턴트식품, 유해환경 등으로부터 건강한 육체와 정신을

추구하는 웰빙(well-being)이라는 새로운 문화코드가 생성되어 보다 나은 환경에서 생활하고자 하는 사람들의 관심 또한 꾸준히 증가되고 있다. 더구나 환경에 대한 규제도 갈수록 심화되어 우리나라에서도 2004년 5월 30일을 기준으로 오염물질 함유하거나 방출 우려가 있는 건축자재의 사용을 제한하는 (다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법)을 시행할 예정이다. 이와 같이 깨끗한 환경에 관한 관심이 증가 되면서 광촉매를 생활전반에 응용하여 향균, 방오, 실내 공기 정화 등의 기능을 개발하려는 시도가 활발히 진행 중이다.

광촉매는 1972년 일본 동경대학교의 Hujishima 와 Honda에 의해 백금을 음극으로, 이산화티타늄을 양극으로하여 키세논 램프를 조사하면 물이 수소와 산소로 분해되는 결과로부터 본격적인 관련 연구가 시작되었다. 광촉매란, 일정한 파장의 에너지를 받으면, 여기 되어 활성화되는 물질로서, 자신은 반응에 직접 참여하지 않으면서, 광반응을 가속시키는 물질을 말한다. 이는 빛이 촉매로 작용하는 것이 아니라, 반응에 직접 관여하는 에너지원으로 사용됨을 의미한다. 지금 까지 합성, 개발된 광촉매는 주로 반도체 물질로서, 반응 매질에 입자상으로 분산되어 광반응을 일으킨다. 이와 같은 물질로는 이산화 지르코늄 (ZrO_2), 산화아연 (ZnO), 이산화 티타늄 (TiO_2) 등이 있으며, 가장 많이 상용화되고, 기술적 연구가 진행된 것은 이산화 티타늄계 광촉매이다.

이산화 티타늄은 반도체 물질이므로, 광화학적 활성이 고체 물질의 전자구조와 관련이 있다. 반도체의 전자구조를 살펴보면, 전자에 의해 가득 점유된 가장 높은 에너지의 띠인 공유띠 (valence band)와, 전자에 의해 점유되지 않은 가장 낮은 에너지의 띠를 전도띠 (conduction band)가 존재한다. 이와 함께 공유띠와 전도띠의 가장 높은 에너지 경계와 가장 낮은 에너지 경계에 각각 공유띠 가장

자리 (valence band edge, VB)와 전도띠 가장자리 (conduction band edge, CB)가 위치하며, VB와 CB의 차이를 띠 간격 에너지 (band gap energy, Eg) 라고 부른다. 이러한 반도체 물질 표면에 빛이 조사될 경우, 그 반도체의 띠 간격 이상의 에너지를 갖는 광자 ($h\nu \geq E_g$)가 흡수되어 공유띠에서 전도띠로 전자여기가 일어나고, 공유띠에는 정공이, 전도띠에는 전자가 생성되어 전자-정공쌍을 형성한다. 이와 같이 생성된 전자, 정공중 일부는 재결합이 일어나, 다시 빛으로 방출되거나, 격자 진동을 통한 열에너지로 사라져 버린다. 그러나 재결합을 피해 표면으로 이동한 전자, 정공의 일부는 반도체의 표면에 흡착된 적절한 전자주개 (electron donor) 분자나, 전자 받개 (electron acceptor) 분자가 존재할 경우, 전자 전이를 일으키면서, 광화학 산화, 환원 반응이 일어나게 되는 것이다. 이러한 광촉매 물질을 실제 생활에 적용하기 위해서는 첫째, 빛에 쉽게 활성화 되어지면서도 화학적으로도 안정하여야 한다. 즉, 광촉매용 반도체 물질의 입자가 매우 미세해야 하며 오염물질들과 반응하지 말아야 한다. 둘째, 가시광선이나 자외선 영역의 빛을 이용하기 위해서 적당한 band gap energy를 갖고 있어야 한다. 셋째, 전자-정공 쌍의 결합소멸 속도가 충분히 느려야 하며 넷째, 가격이 저렴해야 한다. 이에 본 고에서는 일반적인 초미립 세라믹분말 제조방법에 대한 고찰을 통해 분말상

광촉매 제품 제조기술에 대한 이해를 돕고자 한다.

가. 분쇄법

가장 전통적인 분쇄에 의한 방법으로는 충격식의 고속 회전밀로 분쇄를 할 경우 3 μ m가 한도인 것으로 알려져 있고, 회분식 조작에서 습식 불꽃에서 장시간 분쇄하면 0.2 μ m까지 분쇄가 가능하다는 보고가 있다. 금속의 수소 취성을 이용한 분쇄에서는 100nm의 입자를 얻을 수 있다는 보고가 있다.

나. 기상법

기상법을 이용한 초미립자의 제조방법은 최근 신재료로서 초미립자에 대한 기대와 같이 여러 분야에서 그 제조하는 방법에 대하여 자세히 검토되고 연구가 행하여지고 있다. 기상법에서의 초미립자의 제조방법은 증발응축법과 기상반응법으로 크게 분류 할 수 있다.

증발응축법은 원료를 가열, 용해하여 그의 표면에서 증발시켜 급랭에 의해 응축으로 초미립자를 생성시킨다. 기상반응법은 금속증기 또는 화합물의 기상에서의 화학반응에 의해 초미립자를 생성한다.

초미립자 자체에 대한 흥미와 기대는 기계, 전기, 요업, 고분자, 금속, 분말야금 등 광범위한 분야에서 미립자에 대한 특성, 생산기술 등에 지대한 관심을 가지고 있다. 기상법에서는 생성반응 조건의 조절에서 입경의 컨트롤이 용이하고, 입도 분포가 양

* 표1. 초미립자 제조방법

분 류	제 조 방 법
물리적 분쇄	기계적 분쇄, 수소취성법, 초음파법, 기타(스파크법, 폭발법)
액 상 법	분무법, 수열법,산화, 침전합성, 분해, 결정화법, 알콕사이드법
기 상 법	증발,응축법(플라즈마, 유도전기), 기상반응법(할로겐화합물의 산화, 열분해, 기상합성)

호하며, 깨끗한 표면을 갖는 등의 장점이 있는 반면, 초미립자 레벨(입경 100nm이하)에서는 입자 생성후의 입도 선별이 곤란하다는 최대 단점이 있다. 최근 이들에 대한 문제점을 해결하기 위하여 재료학자, 화학, 화공학자들은 기상법에 의한 초미립자의 형상, 형태, 구조 등의 물성연구와 이들을 이용한 응용개발에 박차를 가하고 있다.

(1) 기상반응에 의한 초미립자의 제조

성분증기의 응축과 기체성분의 화학반응에 의해 각종 형태의 고체를 석출시킬 수가 있다. 석출물의 형태에는 고체 표면상에서의 불균일 핵생성과 성장에 의해 생성하는 입자가 있다. 입자 생성법으로서의 기상반응법은 금속증기 또는 화합물의 기상에서의 화학반응에 의해 미립자를 생성하는 방법이다.

기상반응에는 단일 화학종의 열분해 [A(g)→ B(s) + C(g)]와 두 종류 이상의 화학종 간의 반응 [A(g) + B(g)→C(s) + D(g)]이 있다. 전자는 목적원소를 함유한 적당한 화합물이 존재해야

되는데 반하여 후자에서는 여러 가지의 화합물을 만들 수 있는 가능성이 있다.

염류의 열분해법과 침전법에 비교하여 기상반응법은 다음의 특징을 갖는다.

- 1) 원료금속 화합물이 휘발성으로 정제가 용이하고, 생성된 분체는 분쇄가 불필요하기 때문에 고순도로 만들 수 있다.
- 2) 생성조건의 제어에 의해 입도 분포가 좋고, 입경이 1 μm 이하의 초미립 분체를 용이하게 얻을 수 있다.
- 3) 반응 분위기의 세어가 용이하고 산화물 외에 액상법에서는 직접 합성이 곤란한 금속, 실화물, 탄화물, 붕화물 등의 비산화물에도 적용할 수 있다.

기상반응의 원료에는 제조가 용이하고, 증기압이 높고, 반응성도 비교적 높은 금속염화물이 이용되고 있지만 그밖에 금속 증기, 옥시염화물 (MO_nCl_m), 알콕사이드[M(OR)_n], 알킬화합물 [M(R)_n] 등이 이용된다. 공업적으로는 탄화수소의

* 표2. 기상반응에 의한 초미립자 생성예

기 상 반 응	온 도	생 성 물
염화물, 옥시염화물의 NO ₂ 산화	~ 400℃	MoO ₃ , WO ₃ , V ₂ O ₅
	175~ 500℃	Al ₂ O ₃
염화물의 산소산화	1000~ 1700℃	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZnO, SiO ₂
염화물,옥시염화물의 산소산화	>5000K	δ-Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃
비휘발성금속할로겐화물의 가수분해	H ₂ -O ₂ flame	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂ -Al ₂ O ₃
금속알콕사이드증기의 열분해	320~ 450℃	TiO ₂
금속알킬의 연소		Al ₂ O ₃
금속증기의 산화	~ 1000℃	ZnO, MgO

열분해에 의해 카본 블랙이 얻어지고, 아연증기의 산화에 의한 ZnO, 금속염화물 증기의 산소분해 또는 가수분해에 의해 TiO₂, SiO₂, Al₂O₃ 등을 얻는다.

(2) 증발응축법에 의한 초미립자의 제조

증발현상을 이용한 금속, 금속화합물 등의 초미립자 생성법을 표 3에 나타내었다. 증발응축법은 가열의 방법, 증발시의 분위기, 용융, 증발시의 반응 상황 등에 따라서 여러 가지 특징이 있지만, 초미립자 원료의 용융된 표면에서 원자상으로 도출되어 나오고 그 직후에 가스분자와 충격으로 초미립자가 형성되어 진다.

다. 액상법

액상 반응법으로서는 염화물이 많이 이용되고 염화물은 마그네슘과 티탄의 정련법으로 오래 전부터 확립되어진 기술이다. 현재는 파인 세라믹스의 원료로서 주목되고 있는 질화규소의 합성법으로서 연구되어지고 있다. 금속 할로젠화물은 높은 온도에서

기화하고 산소와도 용이하게 반응하기 때문에 금속 산화물의 초미립자 제조방법으로서도 적용성이 높고, 생산성도 높지만 염화물을 만들기 쉬운 물질이 한정되어 있다.

초미립 세라믹 소재의 제조법에는 주로 액상법을 사용하게 되는데 그것은 임의의 농도조절이 쉽고 조성적으로 균일한 고순도의 최종생성물을 얻기 쉬운 장점을 지니고 있기 때문이다. 그 대표적인 방법으로는 침전법, 가수분해법, 콜로이드 화학법, 용매 제거 휘발분해법, 수증방전법, 수열법 등이 있다.

(1) 침전법

성분원자를 용액상태로 혼합한 후 용액에 적당한 침전제를 가하여 전구체 입자를 만들어 반응시키는 것이 침전법의 일반적인 방법이다. 용액중의 침전은 보통 여과 조작에 의해 용액에서 분리시킨다. 침전은 여과하기 쉽게 만드는 것이 요망되고 이렇게 하기 위해서는 1차입자의 입경을 크게 할 필요가 있다. 침전의 입경은 핵생성과 핵성장의 상대적인

* 표3. 증발응축법의 종류와 원리

제 조 방 법	생 성 원 리
저압가스중 증발법	• 저압의 알곤, 헬륨등의 불활성 가스중에서 금속을 증발하고 가스중에서 응축하여 초미립자를 생성한다.
활성수소-용융금속반응법	• 수소가스 혼합분위기중의 아크가열 용탕면에서 초미립자를 방출, 활성 가스 중에서 세라믹 초미립자를 생성한다.
스퍼터링법	• 이온충격으로 비용융 상태의 Target에서 증발하여 초미립자를 생성한다. • 아크, 플라즈마 가열용융 Target 표면에서 금속초미립자를 생성한다.
유동유면상 진공증착법	• 고진공 중에서 증발한 금속을 유동유면 내에서 극초미립자를 생성하고 분산상태로 보존한다.
통전 가열증발법	• 탄소봉 전극을 금속과 접촉하고 통전가열에 의해 금속을 용해, 고온의 탄소와 반응하여 탄화물로서 증발 한다.
하이브리드 플라즈마법	• RF플라즈마에 DC 플라즈마를 조합한 하이브리드 방식으로 금속 및 세라믹스의 초미립자를 생성한다.

속도에 의존한다. 핵생성의 속도가 핵성장의 속도에 비하여 적게되면 생성되는 입자수가 적게 되기 때문에 한 개의 입경은 크게 된다. 일반적으로 침전의 용해도가 적은 경우 침전의 입경이 작고, 용액의 과포화도가 적으면 비교적 큰 입경으로 되는 것이 경험적으로 알려지고 있다. 침전 생성조건을 조절하는 것은 실제적으로 어렵고, 생성한 침전을 크게 하는 것으로 하여 입경을 조절하는 기술이 행해지고 있다. 이 침전법에는 직접침전법, 균일침전법, 공침법, 화합물 침전법 등이 있지만 침전 시료 조성의 균일성에 대해서 주의를 해야한다.

현재 상용되고 있는 침전공정에는 여러 반응물(염용액, 침전제)을 직접 혼합하여 과포화 시킴으로써 불용성 염을 만든다. 따라서, 이들 공정에 필수적으로 게재되는 과도한 농도 구배는 균일한 입자를 재현성 있게 제조할 수 없는 주원인이 된다. 따라서, 입자의 균일성과 재현성을 높이기 위해서는 고상 입자들이 출발용액 전체에 걸쳐 동시에 균일하게 형성될 수 있어야 한다. 이러한 목적을 위해 개발된 방법이 균일침전법이다. 균일침전법의 기본 원리는 용해도 한계까지 리간드(OH⁻, CO₃⁻, SO₄²⁻)를 계 내부로 천천히 도입시킴으로써 양이온과의 반응을 계 전반에 걸쳐 균일하게 한다는 것이다. 만약 전체 부피에 걸쳐 반응이 균일하게 행해진다면 계의 모든 부위에서 입자들이 동시에 균일하게 형성된다. 균일침전법은 침전제의 종류나 침전반응에 참여하는 리간드의 종류에 따라 여러 가지 방법으로 세분할 수 있다.

(2) 요소 및 포름아미드 가수분해법

암모니아와 CO₂를 동시에 형성시키기 위해서 가열을 통해 요소를 천천히 분해시키는 방법이다.

요소의 분해반응은 다음과 같이 진행되며 70 이상에서는 급속히 진행되지만, 상온에서는 정지되므로 반응온도 및 시간을 조절하므로 용액의 pH를 용이하게 조절할 수 있다.



침전제로 요소를 대신에 포름아미드를 사용하여도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 포름아미드의 분해반응은 다음과 같다.



요소는 분해시에 CO₂ 가스를 방출하지만 포름아미드는 가스의 방출이 없으므로 밀폐용기에서의 제조가 가능하므로 불순물의 오염도를 낮출 수 있으며 요소는 pH 변화속도가 시간에 따라 점차 빨라지는 반면에 포름아미드의 경우는 분해초기의 pH 변화속도가 빠르고 점차 느려지기 때문에 pH 조절이 용이하여 단분산 구형입자를 제조하는데 보다 유용하다. 요소나 포름아미드의 분해에 의한 과포화 정도는 크지 않기 때문에 초기에 형성되는 입자는 균일하게 성장하며, 새로운 입자는 거의 형성되지 않는다. 이러한 침전제를 이용한 균일침전법은 단일 핵생성을 이용한 공정으로 균일하고 단분산 입자를 얻는 중요한 방법으로 제안되어져 있다. 이 방법을 이용하여 단분산구형의 알루미늄과 이트리아 분말의 제조가 가능하다.

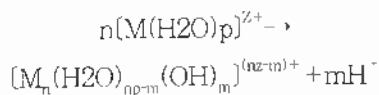
(3) 금속착체 분해법

이 방법은 침전제가 음이온을 방출하는 대다수의 균일침전법과는 달리 금속을 포함하는 킬레이트 화

합물을 강염기성 용액에 용해한 후, 열분해하여 금속양이온을 용액 내에 일정한 속도로 방출함으로써 용액내의 금속수화물의 농도가 반응한계에 도달하면 침전이 발생하는 원리를 이용한 것이다. 가수분해 속도는 착화물의 분해속도에 의해 결정되므로 금속수화물의 농도가 핵생성 한계농도 이상이 되면 핵이 형성되고 용액의 농도는 더 이상의 핵생성 없이 성장만 일어나는 조건으로 감소하여 성장반응이 지속된다. 이 방법을 이용하여 균일한 크기의 구형 알루미늄 분말의 제조가 가능하다.

(4) 가열 가수분해법

이 방법은 침전제를 첨가하는 방법이 아니라 주로 산성영역에서 금속염의 비교적 희박한 용액을 가열해서 가수분해를 촉진시킴으로써 단분산 입자를 얻는 가장 간단한 방법이다. 가열 가수분해 반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



이 방법에 의해 여러 가지 금속염으로부터 단분산 분말을 제조할 수 있지만 용액농도, 가수분해 온도, 용액의 pH, 음이온의 종류 등에 따라 입자의 크기, 형상, 결정성 등이 달라지며 특히 고온에서 장시간 숙성을 하여야 하기 때문에 경제성이 전혀 없는 방법이다. 예를 들어, 알루미늄 황화물 용액을 가열 가수분해하면 초기 농도가 10^{-2} M 정도로 낮아야만 단분산 분말이 제조되고 반응수를 또한 15~25% 정도로 매우 낮다.

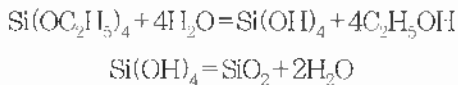
(5) 알코올 - 물 혼합용액의 가열에 의한 방법

이상에서 금속 염용액을 여러 가지 균일침전법에 의해 단분산 구형분말을 제조하는 방법들은 염 용액의 농도, pH, 음이온의 종류 및 특성, 반응온도 등의 여러 인자에 대해 매우 민감할 뿐만 아니라 특히 0.02 M 미만의 저 농도가 아니면 형상 및 크기의 제어가 불가능한 방법이기 때문에 실용화는 아직 힘들다. 지금까지 대부분의 금속염을 출발물질로 하는 침전법은 물만을 용매로 사용하고 침전제를 첨가하는 방법인데 최근에 물과 알코올을 혼합용매로 사용하고 온도에 따른 용매의 특성변화를 이용함으로써 단분산 구형입자를 제조하는 방법도 개발되었다. 이 방법에서는 알코올과 물의 혼합비를 증가시키거나 온도를 증가시킴에 따라 알코올-물 혼합용매의 유전상수를 변화시킴으로써 계 전반에 걸쳐 균일하게 침전을 유도한다. 또한, 입자사이의 상호작용력은 알코올의 첨가나 온도의 변화에 따른 매질의 유전상수를 변화시켜 정전기적 반발력을 조절하거나 hydroxypropyl cellulose와 같은 분산제를 첨가하여 입체상호 작용에 의한 반발력을 변화시키면 용이하게 조절된다.

(6) 알콕사이드의 가수분해 - 축합반응을 이용한 졸 - 겔법
출발원료에 물을 가하여 분해시켜 수산화물 또는 함수산화물을 얻고 이것을 하소시켜 세라믹스 미립자를 얻을 수 있다. 출발원료의 품질에 따라 고순도의 미립자를 제조할 수 있다. 가수분해법의 특징은 화학조성이 균일하고 반응에 의해 입경이 10~100 nm 정도의 1차 산화물 입자를 얻을 수 있다. 알콕사이드 가수분해법은 금속 알콕사이드의 가수분해에 의해 함수 비정질을 얻고 가열에 의해 미립자를 얻는 방법으로서 침전물은 콜로이드 사이즈의 1차 입자의 2 차 응집체로 된다. 온도, 이온농도, 시간,

가수분해의 프로세스에 의해 가수분해 생성물은 변화한다.

Stober, Fink, Bohn은 물과 알코올의 균질용액 하에서 NH_4OH 를 촉매로 TEOS를 가수분해 및 축합반응을 조절하여 단 분산된 구형 실리카 분말을 제조하는 SFB 공정을 개발하였다. 이 방법은 졸-겔 법으로서 분말을 제조하는 연구에서는 아직도 널리 이용되는 방법으로서, 가수분해와 축합의 전체반응은



으로 각각 나타낼 수 있다. 입경은 가수분해제로 작용하는 물의 양, 알콕사이드의 농도와 알코올의 종류를 변화시키는 것에 의해 조절되어 진다. 금속 알콕사이드의 가수분해를 제어하여 구형분말을 제어하려는 일련의 연구는 그 후에도 많은 연구자들에 의해 계속 진행되어 TiO_2 , ZnO_2 , ZnO , Al_2O_3 등에서도 좋은 결과를 얻었다. 또한, 이 방법에 의해 적절하게 금속 알콕사이드의 종류와 농도, 가수분해 조건, 입자의 속성조건을 선택함에 의해 조성이 균일하고 입경이 조절된 LiTiO_3 , $(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_2$, LiAlO_2 , $(\text{Zn}, \text{Sn})\text{TiO}_4$ 등의 복합산화물 입자를 형성할 수 있으며 최근에는 phenyl-trimethoxysilane나 methyltrimethoxysilane를 졸-겔법의 출발물질로 사용함으로써 실리카와 탄소원자가 원자단위로 혼합된 전구체 분말을 형성하고 이를 열탄화 환원시키는 방법에 의해 단분산, 구형을 갖는 SiC , Si_3N_4 과 같은 비산화물의 합성에도 성공하였다.

그러나 알콕사이드를 출발물질로 하는 졸-겔 법은 실리온 알콕사이드를 제외하고는 급속한 반응속

도로 인해 가수분해 축합 속도를 제어하기가 어렵다. 또한, 반응조건이나 반응물의 선택에 매우 민감하며, 단분산, 구형분말을 제조 가능하게 하는 한계 농도는 0.3M 정도로서 Matijevic 등의 금속염으로부터 분말을 제조하는 방법에 비해서는 월등히 높지만 상업적으로 이용하기에는 아직 낮은 수준이다. 또한, 출발물질이 매우 고가이기 때문에 실제 적용에는 아직도 많은 제약이 있다.

(7) 용매증발법

이 방법에는 분무건조법, 분무열분해법, 예멸전법 등이 큰 범위로 포함되는 것으로서 단분산, 구형 입자를 제조하는 것이 가능하다. 이 방법들은 앞에서 설명한 방법들과는 달리 구형의 미소 액적을 기상 내에 균일하게 분산시키거나 다른 액상 내에 예멸전화 시킨 후 이 액적에서 침전반응이 일어나게 함으로써 형상과 크기를 제어하는 방법이다. 건조가 급속하게 진행되기 때문에 여러 가지 복잡한 상과 조성을 갖는 경우에도 조성상 상의 분리를 방지하는 것이 가능하며 액적의 크기로 최종입자의 크기를 결정할 수 있는 장점이 있지만 액적의 크기를 경우에는 용액의 농도, 점성의 조절과 액적의 분산을 소홀히 하면 원하는 치밀한 구성입자가 합성되지 않고 입자내부가 빈 중공이 되거나 불규칙한 모양으로 깨어지는 단점이 있다.

(8) 수열법

수열법으로는 고온고압의 물, 수용액 또는 증기 등의 유체가 관여하는 처리방법으로서 그 처리방법에 의하여 산화법, 침전법, 분해법, 결정화법 등이 있다. 생산성도 높지만 순도와 입경제어 등이 가능한 방법으로 알려지고 있다. 액상법의 하나로 수용

성 염용액을 혼합, 반응시켜 난용성 염을 침전시켜 미립자를 제조하는 방법이 있다. 일반적인 수연합 성법은 고온, 고압조건에서 염수용액을 가열, 가수분해시키는 방법으로서 수율이 높고 대부분의 액상 침전법과는 달리 바로 결정질 분말이 형성되기 때문에 열처리가 필요 없는 분말을 제조할 수 있다는 것이 큰 장점이다.

또한, 균일한 입자모양과 입도 분포를 갖는 미세한 분말을 얻을 수 있고, 성형 및 소결특성 또한 우수하기 때문에 현재 부분적으로 실용화 단계에까지 발전되어 있는 방법이지만 대량생산에는 고온고압 조건의 유지가 관건이므로 앞으로 풀어야 할 과제가 많은 분야이다.

위와 같은 초미립 세라믹 나노분말의 일반적 제조방법 외에 과학의 진보와 함께 새로운 분말합성 방법이 지속적으로 개발되고 있으며, 이를 이용한 광촉매의 개발 또한 활기차게 진행되고 있다. 따라서 우수한 특성을 갖는 광촉매의 개발을 위한 학·연·산의 협력과 함께 광촉매 시장개척, ET, BT 등과의 관련기술 접목, 가시광응답형 광촉매 개발이 선행되어야 할 것이다.

