

## 환경 분야에서의 촉매 나노 입자

한국에너지기술연구원  
이승재

나노 기술은 대개 1-100 nm의 나노 스케일을 가지는 재료와 구조를 이용하는 기술을 말한다. 아마도 깨닫지 못하는 사이에 이미 우리 일상 생활에서 나노 기술과 유사한 것들을 만날 수 있다. 예를 들어, 박테리아에서부터 곤충, 인간에 이르기까지 생체 기관에 있는 단백질 분자들은 “분자 동력 (molecular motors)”으로 작용하여 편모 운동에서 근육의 움직임까지 모든 것을 유도하고 있다. 나노 미터 크기의 입자들은 타이어의 기계적 특성을 개선하기 위해 사용되고 있으며, 사진 인화와 석유 화학 산업의 중요한 촉매로 사용되고 있다.

환경 학자와 공학자들은 이미 어느 정도 나노 스케일의 구조물들에 관련되어 있다. 철산화물과 규산염과 같은 미네랄의 자연 풍화와 박테리아와 조류 (algae)와 같은 미생물들은 나노 스케일의 콜로이드를 생산한다. 이러한 콜로이드는 특별한 성질의 매체에 나노 크기의 입자로 분산되어 환경적으로 위험한 물질에 대한 수송, 변형, 생물학적 이용도 등에 중요한 영향을 미친다. 졸, 에멀전, 거품으로 불리는 액체안에 존재하는 고체, 액체, 기체의 콜로이드와 연기와 안개로 불리는 기체 속에 존재하는 고체, 기체 콜로이드는 주위 환경에서 종종 볼 수 있다.

그러나 나노 기술은 단순히 크기에서만 매우 작은 것들을 말하는 것은 아니다. 더 중요한 것은 원자나 분자 수준에서 관찰하고, 조절하여 제작할 수 있는 능력이다. 이러한 크기와 구조의 변화에 의한 결과로 새롭고 기존의 물리적, 화학적 생물학적 성질들을 가지는 물질과 시스템을 얻는 것이다. 이들 새로운 성질들에는 개선된 촉매 현상과 조절할 수 있는 파장의 감지 능력, 증가한 기계적 강도 등이 있다.

나노 기술의 기본적인 구조는 나노입자나 나노결정, 나노층 그리고 나노튜브 등을 포함한다. 이러한 나노구조들은 이들 구조가 어떻게 만들어지는가와 이들 구조의 원자와 분자들이 어떻게 배열되는가에 따라 달라진다. 수십개에서 수천개의 원자들이 모여 1-100 nm의 크기를 가지는 나노입자는 나노 기술에 있어서 가장 기본적인 구조물이다. 이 같은 나노입자들은 원자 하나 하나에 의해 만들어지며, 실험 조건에 따라 크기와 모양이 조절된다. 또한 이러한 나노입자들에는 원자들이 매우 잘 정렬되어 결정면을 가짐에 따라 나노결정으로 표현되기도 한다.

### 오염물질 방지

오염물질의 방지는 “원인의 저감 (source reduction)”과 원료 물질, 에너지, 물 혹은 다른 자원들을 효율적으로 사용하여 폐기물 생산의 저감이나 제거를 말한다. 또한

이러한 전략적인 방법에는 독성이 적은 물질과 재생 가능한 물질의 사용, 보다 친환경적인 제조 등이 포함된다. 나노 기술은 이러한 오염 방지 기술에 주요한 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 나노 기술에 기반한 가정용 조명은 미국 내에 약 10%의 에너지 절감효과를 가져오는 것으로 추산되며, 이는 해마다 1000억 달러를 절약하고 연간 2억톤의 탄소 배출을 줄일 수 있다.

나노 구조의 촉매를 사용하여 원하는 반응 생성물에 대한 선택도를 높임으로써, 보다 효과적으로 화학 물질을 생산할 수 있다. 예를 들어, 제올라이트와 같은 알루미늄 규산염 분자체는 명확한 구조를 가진 다공성 결정체로서, 분리와 촉매에 폭넓게 사용되고 있다. 10-100 nm의 나노미터 크기를 가지는 제올라이트는 톨루엔을 benzaldehyde로 전환시키는 반응과 같이 탄화수소를 선택적으로 산화시키기 위해 개발되고 있다. 나노 구조를 가지는 제올라이트를 이용하면, 두 가지 이유에서 보다 친환경적인 면을 가진다. 첫번째로, 산화반응을 가시광선을 이용하여 개시시킬 수 있어 에너지 소모를 줄일 수 있다. 두번째는 가시광선의 사용으로 저에너지의 반응 경로로 반응이 일어나, 낭비적인 부차적 광반응을 제거하고 원하는 생산물의 수율을 높일 수 있다는 점이다. 기존의 제올라이트로 35 %의 benzaldehyde 선택도를 얻은 반면, 새로운 나노구조물을 이용한 경우에는 87 %의 선택도를 나타내었다.

## 처리 및 개선

초기 나노 기술에 대한 연구는 대부분 개선과 후처리 기술에 관련되었다. 환경에서 오염물질의 처리와 개선을 위한 나노입자의 다양한 사용에 대해 많은 연구가 보고되었다. 예를 들어, 다양한 산화제, 환원제, 중성제 나노입자들의 사용은 크기를 작게하고 비표면적을 넓힘으로써 반응성과 유연성을 크게하여, 오염물질의 변형을 촉진 시키고 미생물의 성장을 자극하는데 유용한 것으로 나타났다. 나노입자는 또한 큰 입자에서는 나타나지 않았던 독특한 화학적 반응성을 나타낸다. 이러한 성질은 나노입자들의 비정상적인 결정 형태와 격자 순서에 기인하는 것으로 보인다. 예를 들어, 염화된 유기 용매를 *in situ*로 개선하기 위해 사용하는 생물학적 개선과 제로가의 철을 사용하는 기존의 방법들은 원하지 않는 부산물들을 만드는 경향이 있다. Trichlorethylene의 경우 부산물로 dichloroethylene과 vinyl chloride가 생성된다. 나노스케일의 이원 금속 입자를 사용하면, 이러한 원하지 않는 부산물을 본질적으로 제거할 수 있다.

밴드 갭이 큰 반도체인 티타늄 산화물 ( $\text{TiO}_2$ )과 아연 산화물 ( $\text{ZnO}$ )과 같이 빛에 의해 활성화되는 나노입자들은 다양한 매체에서의 유기 오염물질 제거능에 대해 연구 되어 지고 있다. 이러한 입자들은 쉽게 구할 수 있으며 비싸지 않고 독성이 적다. 최근에는  $\text{ZnO}$  나노입자가 염화된 페놀의 처리에서 센서와 광촉매의 두가지 작용을 하는 것으로 나타났다. 또한 이러한 나노입자의 표면을 유기나 무기 염료를 이용하여 조절함으로써, UV에서 가시광에 이르는 폭넓은 빛에 대해 광반응이 일어

나도록하는 연구가 이루어지고 있다. UV 빛이 태양광의 5 %만을 차지하기 때문에 이러한 나노입자 개발은 환경 오염물질의 변환을 위한 광촉매의 효율을 높일 것으로 보인다.

나노입자는 *in situ*로 개선하는 데 큰 유연성을 제공한다. 예를 들어, 나노입자들은 오염된 토양, 찌꺼기, 고체 폐기물 등을 처리하기 위한 *ex situ* 슬러리 반응기에 활용될 수 있다. 또한 이들 나노입자들을 탄소, 제올라이트, 혹은 분리막 등에 부착 시킴으로써 물, 폐수, 혹은 기상 공정 흐름에 대한 처리를 향상 시킬 수 있다. 나노스케일의 철 입자를 중력에 의하거나 가압에 의해 직접 표면 아래로 주입시키면, *trichloroethylene*과 같은 염화된 유기물을 친환경적인 물질로 분해할 수 있다. 이러한 기술은 중금속과 방사성 핵종을 고정화하는 데 유망한 기술이다.

철/팔라듐, 철/은, 아연/팔라듐과 같은 나노스케일의 이원 금속 입자들은 강력한 환원제로 작용하며, 또한 PCB, 유기염소 살충제, 할로겐화된 유기 용매 등과 같은 환경 오염물질을 분해하는 촉매로 사용된다. 나노스케일의 금속 입자들은 실질적으로 모든 염화된 탄화수소를 친환경적인 탄화수소로 전환시킬 수 있다. 덧붙여, 철 기반의 나노입자들은 다른 처리하기 어려운 오염물질들을 환원시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이들 처리하기 어려운 물질로는 *perchlorate*, *nitrate*, *dichromate*와 같은 음이온 물질과, 니켈과 수은 같은 중금속, 우라늄 산화물과 같은 방사성 핵종 등을 포함한다.

## 나노기술의 함정

과학과 공학에서 혁명적인 나노 기술은 소비 상품과 제조 방법, 재료 사용에 있어서 기존의 기반시설에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 나노기술이 가지는 잠재적인 장점들이 과학계나 대중 매체에 크게 언급되는 것은 놀랄 일은 아니다. 그러나 모든 기술들이 그러하듯이 검의 양날을 지니고 있다. 나노기술에 대한 환경과 안정성에 대한 논의가 최근 이루어지고 있다.

우리는 이미 나노기술과 관련된 오염에 대한 몇몇 전구체적 물질을 목격할 수 있다. 매년 수백만 개의 컴퓨터와 휴대 전화기가 버려짐에 따라 마이크로칩에서 사용되는 독성의 *gallium arsenide*가 매립지로 유입되고 있다. 나노물질 자체의 성질이나 이들 물질로부터 생산된 제품의 특성, 제조 공정 측면에서 나노기술이 가지고 있는 잠재적인 위험 요소들이 커질 수 있다. 넓은 비표면적과, 결정 구조, 나노입자들의 반응성들은 환경에 있어서 독성 물질의 이동을 용이하게 할 수 있다. 즉, 나노구조의 크기와 화학적 조성이 세포 물질과 반응하는 식으로 생물학적 위험성을 야기할 수 있다.

U.S. National Nanotechnology Initiative는 잠재적인 환경적 및 사회적 영향들에 대해 이미 논의하기 시작하였다. 2001년 가을에는 Rice university가 National Science Foundation의 지원을 받아 Center for Biological and Environmental Nanotechnology

(CBEN)을 열었다. CBEN의 주요 분야 중 하나는 나노 물질이 환경에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 2002년에는 U.S. EPA에서 외부 연구를 위한 연구비 지원에 대한 계획을 발표하였다.

잠재적으로 해로운 영향을 미칠 수 있는 여러가지 경우에 대한 문제 인식과 이에 대한 설명을 위한 책임 의식은 연구자와 환경 전문가들의 몫이다. 새로운 나노 스케일의 구조와 기술들이 개발되고 연구됨에 따라, 연구자들은 가능한 환경적 결과물에 대해 고려하는지 의문시 된다. 예를 들어, 더욱 친환경적인 전구체 물질이나 합성 방법이 사용될 수 있는지 생각해 보아야 할 것이며, 또한 나노입자나 나노튜브를 재사용하기 위해 회수할 것인가 아니면 친환경적 물질로 분해시킬 것인가에 대한 논의가 필요할 것이다. 새로운 나노스케일 구조물질과 다른 앞서 언급한 환경적 응용 예들은 나노스케일의 과학과 공학이 과학과 기술에 있어 큰 영향을 미칠 수 있음을 보인다. 그러나, 이러한 기술로부터 파생되는 잠재적인 영향을 항상 염두에 두어야 할 것이다. 특히, 이러한 나노스케일의 물질들이 먹이사슬에 들어와 물이나 음식에 의해 흡수되거나 이동할 수 있다는 점을 기억해야 할 것이다. 새롭게 만들어진 나노스케일의 물질에 대한 생물학적 이용도와 독성은 아직 알려진 바가 없다. 나노기술은 여러 분야에 걸쳐 관계가 깊은 분야로, 환경 관련 과학자들과 공학자들에게는 새로운 분야가 될 수 있다. 아직 환경적 나노기술에 대해 훈련된 학생들은 거의 없으며, 이러한 분야에 대해 연구를 수행하거나, 나노 오염물질을 검출하고, 효과적인 처리 및 개선 기술 개발에 관련된 연구실은 몇몇 되지 않는 실정이다.

#### 참고문헌

- Tina Masciangioli and Wei-Xian Zhang, "Environmental technologies at the nanoscale", *Environmental Science & Technology*, March 1 (2003) 102-108.