

나노폐기물의 소각 처리

김영훈*

광운대학교 화학공학과
139-701 서울 노원구 월계동 447-1

(2016년 2월 16일 접수; 2016년 3월 10일 수정본 접수; 2016년 3월 14일 채택)

Nanowaste Treatment via Incineration

Younghun Kim*

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea

(Received for review February 16, 2016; Revision received March 10, 2016; Accepted March 14, 2016)

요 약

최근 나노기술의 급격한 발전은 산업 분야에 새로운 활용 가능성을 제시하고 있다. 그러나 나노물질의 연간 생산량 증가와 함께, 비의도적인 환경 노출이 야기되고 있다. 따라서 지속적인 나노기술의 발전을 위해서도 나노폐기물에 관한 효과적인 관리가 필요하다. 나노폐기물 처리의 최종 단계는 바로 소각시설을 이용하는 것으로 보고 있다. 나노물질의 소각처리에 관한 문헌자료가 부족하지만, 일부 선도적인 연구자들에 의하면 소각시 나노물질의 대기노출은 억제되지만 바닥재는 결국 매립되어 나노물질은 잔존하게 된다는 것이다. 아직까지는 소각장내 나노물질의 거동과 다양한 질문거리가 남아 있지만, 무엇보다도 소각을 통한 나노폐기물 처리가 인간 및 환경 영향을 최소화할 수 있는 안전하고 효과적인 나노물질 처리법인지가 검토되어야 할 것이다.

주제어 : 나노물질, 나노폐기물, 소각, 환경노출, 나노위해성

Abstract : Rapid growth in nanotechnology promise novel benefits through the exploitation of their unique industrial applications. However, as increasing of production amount of nanomaterials, their unintentional exposure to the environment has been caused. Therefore, there is a need for effective management of nanowaste to the sustainable nanotechnology. One possible endpoint at the environmental exposure scenario for nanowaste treatment is incineration. Although a few study on the incineration of nanomaterials was reported, pioneering researchers found that although it is possible to incinerate nanowaste without releasing nanoparticles into the atmosphere, the residues (bottom ash or slag) with nanomaterials eventually end up in landfills. Though there are still many questions to understand the fate of nanomaterials in incinerator, firstly we have to study whether nanowaste treatment via incineration is safe to human and environment.

Keywords : Nanomaterials, Nanowaste, Incineration, Environmental exposure, Nano-hazard

1. 서 론

미래학자 아마라가 제창한 아마라의 법칙(Amara's law)에 의하면, 기술의 발전은 반드시 해당 기술을 활용한 제품들을 필연적으로 양산하게 된다[1]. 다만 해당 기술이 가져다주는 단기간의 긍정적인 효과는 과하게 해석하고, 가까운 미래에 다가올 수 있는 EHS (environmental, health and safety) 관점의

부정적 영향은 최소한으로 생각하는 경향이 있다고 한다. 나노기술 또한 2000년대 들어서 급격한 발전을 거듭해 오고 있으며, 해가 거듭될수록 나노기술을 활용한 나노제품들이 기하급수적으로 증가하고 있다. 가전, 식품, 환경, 국방 등 다양한 분야에 이미 나노기술이 깊숙이 침투하여 다양한 제품이 소개되고 있다. Woodrow Wilson Center는 2005년 이후 PEN (Project on Emerging Nanotechnologies)을 통해 전세계 나노

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: korea1@kw.ac.kr; Tel: +82-2-940-5768

doi: 10.7464/ksct.2016.22.1.001 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소비재 현황을 지속적으로 관리하고 있으며[2], PEN 보고서에 의하면 건강관련 제품(health and fitness)이 가장 널리 상용화 되었고 미국, 독일에 이어 우리나라는 세계 3대 나노제품 생산국으로 자리매김하고 있다[3]. 세계 수준의 나노기술력을 가지고 있고 다양한 선도적인 나노제품이 양산되고 있는 시점에서 아마라의 법칙을 다시 한번 적용해 볼 필요가 있다. 즉, 나노기술의 발전과 함께 나노제품이 양산되고 전파되었고, 이들이 가져다줄 부정적인 영향 요인은 무엇인지 고민해야 한다.

나노물질의 전파는 인체 및 환경에 비의도적인 노출을 초래하게 되고, 해당 나노물질이 지닌 독특한 특성으로 인해 아직 명확히 규명되지 않은 위해성 문제를 야기할 수 있다. 이에 다양한 나노물질에 대하여 *in-vivo*, *in-vitro* 실험들이 진행되었지만[4], 여전히 나노물질의 잠재적인 위해성 문제를 종식시키기에는 해결해야 할 문제들이 잔존해 있다. 독성문제를 제외하고도 또 다른 문제점이 존재하는데, 그것은 나노제품을 사용함에 따라 자연적으로 발생하는 나노제품의 폐기물 처리 문제이다. 즉 나노물질을 함유한 나노제품을 사용함에 따라 나노물질을 함유한 나노폐기물(nanowaste)이 자연적으로 발생하게 된다. 나노폐기물의 발생량은 나노제품의 사용량에 비례하여 증가할 수밖에 없다. 일반소비자, 연구자, 정부 모두 나노제품에 대한 관심과 그것이 지닐 수 있는 위해성에 관한 문제는 인지하면서도, 나노폐기물에 의한 잠재적 인체 및 환경 영향은 고려되지 못하고 있는 실정이다.

영국 랑캐스터 환경연구소(Lancaster Environment Centre)의 보고에 의하면[5], 의료, 건강 보건, 가정용품 등 다양한 산업 분야에 가장 널리 사용되고 있는 은나노물질(AgNP)은 제조 과정에서 발생하는 폐기물과 제품 사용후 폐기물은 모두 폐수처리장이나 매립, 소각 등의 방법으로 처리되고 있다. 나노물질은 기존 화학물질과는 다르게 제조에서부터 폐기에 이르는 전과정에 관한 적절한 법적 규제 장치가 갖춰져 있지 않아 다양한 경로로 인체 및 환경 노출을 유발하게 된다.

현재 전세계 고형물폐기물중 연간 약 1억 톤이 소각처리되고 있으며, 특히 중국 같은 경우는 2011년 3%의 소각처리능력을 2020년까지 30%까지 늘리겠다고 선언한 바 있다. 중국의 소각처리는 곧 비산먼지를 다량 배출하게 되어 국내에도 즉각적인 대기오염을 유발하게 된다[6]. 이에 소각과정에서 함께 존재할 수 있는 페나노물질 또는 페나노제품의 소각은 나노물질 형태 변화나 물성 변화를 발생하지 모르는 상황이다. 이에 소각 과정에서 나노물질의 거동이 어떻게 변하는지에 대한 연구가 국내외적으로 필요한 시점이다. 그러나 국내에서는 현재까지 나노물질 자체에 관한 위해성에 관한 연구는 많이 진행되었지만, 나노폐기물 처리에 관한 관심이 전무하며 해당 연구나 리뷰가 진행된 바 없는 것이 사실이다. 이에 본 논문에서는 나노폐기물의 처리 방법 중 대기영향 및 인체 호흡노출에 가장 즉각적으로 영향을 줄 수 있는 소각에 관심을 가지고 기존 나노폐기물의 소각 처리시의 문제점과 국내외의 관련 연구 동향을 살펴보고자 한다. 이를 통해 국내에

서도 나노폐기물 처리에 관한 관심이 필요함을 상기시키고 관련 연구에 관한 정부의 지원을 이끌어 내고자 한다.

2. 나노폐기물의 발생경로

나노폐기물에 관한 합의된 정의는 없지만, 미국화학학회에서 사용하는 방법에 따라 정의할 수 있다. 순수 나노물질(원료물질), 나노물질로 오염된 것(개인보호장비, 휴지), 나노물질이 함유된 액체(분산액), 나노물질이 포함된 고형물(은나노양말) 등을 포함하는 폐기물을 나노폐기물로 지칭한다[7]. 이들은 유동 가능성에 따라 독립적으로 유동 가능한 상태(free-bound), 표면에 고정된 상태(surface-bound), 고체상내에 고정된 상태(bulk-bound)로 구분되며, 독립적으로 유동 가능한 분말형태의 비산 입자상이 가장 높은 인체 및 환경노출을 보인다고 할 수 있다[8]. 나노폐기물의 표면이나 고체내에 고정된 나노입자도 폐기물 처리과정(하폐수처리, 매립, 소각 등)을 거치는 동안 외부의 물리화학적 변화로 인해 탈착이 가능하며, 이는 환경 노출을 야기한다.

구체적으로 살펴보면, 자동차의 매연 저감 필터내 귀금속계 나노입자(Pd-Ru)와 타이어 내마모용 함유제인 ZnO 등은 자동차 운행 중에도 대기로 노출되고 인근 토양이나 수계로 침전하게 되어 비의도적인 노출과 함께 추후 제품의 교환으로 인해 나노폐기물을 양산 하게 된다. 자동차 내구성향상 및 인장강도 향상, 착색제 등으로 주로 사용되는 카본블랙 또한 비슷한 노출경로를 갖는다. 썬크림에 함유된 수백 나노미터 수준의 TiO₂나 ZnO는 사용 후 세안이나 수영을 하는 동안 수계에 노출된다.

또한 나노물질을 취급하는 시점에 따라서도 나노폐기물이 발생하는 지점이 상이하다. 나노물질이나 나노제품을 생산하는 작업장에서는 작업 설비를 사용하는 과정에서 배출되는 고형물이나 폐수(나노물질 포함)가 곧 나노폐기물이 된다. 나노관련 연구실에서는 나노물질과 접촉했던 휴지, 글러브, 분진마스크 등의 소모품 및 개인보호장비 등이 나노물질로 표면 고정이 되며, 물질을 제조하면서 사용했던 각종 초자료를 세척한 세척수가 나노폐기물이 된다. 나노소비를 직접 사용하는 소비자는 제품을 사용하면서 세척을 통한 폐수 발생과 나노소비의 파기를 하는 과정에서 나노폐기물을 발생시킨다. 이처럼 다양한 경로를 통해 발생된 폐기물은 소각시설이나 하폐수처리시설로 모이게 되며, 해당 시설에서 최종적으로 발생하는 최종방류수 또는 슬러지케익, 폐슬러지, 소각재, 비산 먼지 등이 나노물질을 일부 함유하게 되면 이 또한 추가적인 나노폐기물로 작용하게 된다.

결국 나노물질을 취급하는 전과정(생산, 이송, 저장, 폐기 등)에서 비의도적인 나노폐기물을 양산하게 되고, 발생한 나노폐기물은 매립, 소각, 폐수 등의 라인을 거쳐서 궁극적으로는 대기, 수계, 토양 노출을 유발하게 된다. 이는 Figure 1과 같이 결국 다시 되돌아와 인체 및 환경에 영향을 미칠 수밖에 없는 악순환구조를 보이게 된다.

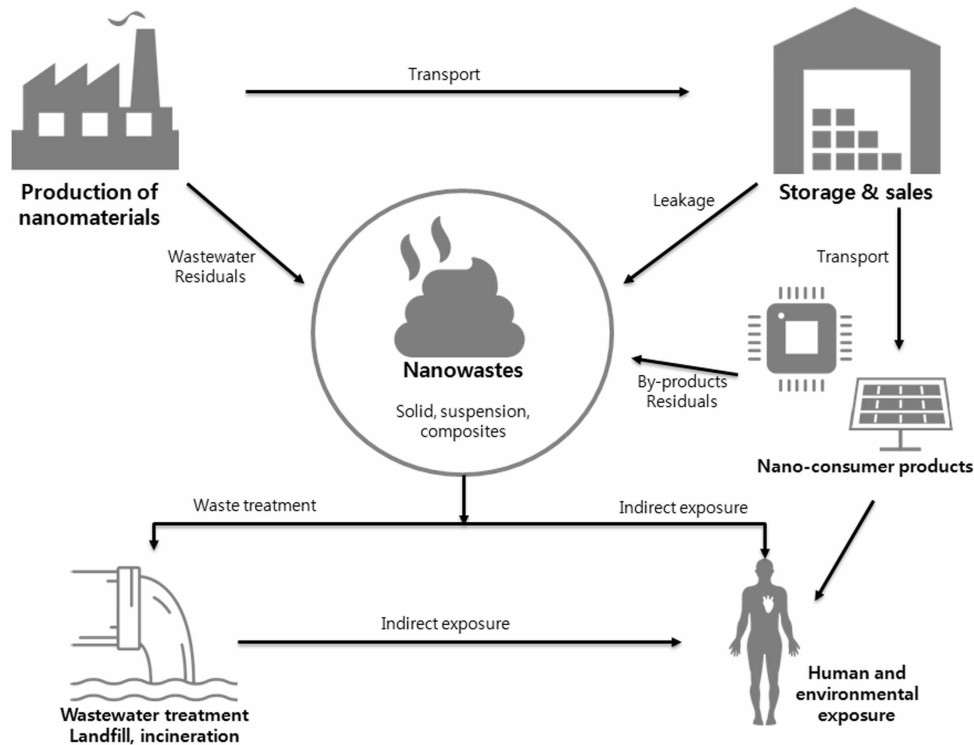


Figure 1. Sources and exposure routes of nanowaste to human and environment.

3. 소각에 의한 나노폐기물 처리방법

나노물질은 생산 과정에서 대기로 쉽게 노출되지만 궁극적으로는 수계 및 토양에 침적되게 된다. 따라서 나노폐기물의 처리 시설은 폐수처리장이나 소각 시설에 집중되게 된다. 매질 흐름 분석법(mass flow analysis)을 통해 소각, 매립, 폐수처리에 따른 환경 매질(대기, 토양, 수계)로의 노출되는 양을 모델링한 사례가 보고되었다[9]. 해당 기법을 통하여 주로 노출되는 매질을 결정할 수 있게 되며, 환경예측능도를 파악할 수 있다. 예로 TiO₂는 제품이나 원료물질로부터 직접적인 환경 노출이 발생할 수 있으며, 폐수처리장, 소각장, 매립 과정을 거치게 된다. 나노제품에 사용된 TiO₂는 다양한 경로를 거쳐 최종적으로는 소각, 매립, 폐수처리 시설로 이동하게 되는데, 70% 정도는 매립되어 토양에 노출되며, 폐수처리장의 침출수로는 12% 정도가 노출되는 것으로 보고되었다. 대기로는 1% 미만으로 나노 소비재에 의한 대기 노출은 거의 없으며, 대체로 수계와 토양에 노출되는 것으로 판단된다. 대기 노출은 없어 보이지만 소각시설에서의 비산 먼지나 바닥재, 침출수 형태로 나노물질이 함유되어 있을 수 있으므로 소각 시설에 의한 토양 및 수계 영향도 크다고 볼 수 있다. 이에 소각에 의한 나노물질 또는 나노폐기물 처리시에 발생할 수 있는 문제점을 우선적으로 살펴보고, 폐수처리에 관한 폐기물 처리의 효율성에 대해 살펴보고자 한다.

3.1. 소각 처리

국가 나노물질유통량 조사결과를 바탕으로 2014년에 환경

부에서 수행한 TiO₂의 환경매질별 노출량 파악 연구에 의하면, 107톤 TiO₂가 연간 생산되는 것으로 집계되었고 하폐수처리장으로 94.6톤, 소각장으로 29.9톤, 매립으로 30.5톤이 이동하는 것으로 집계되었다[10]. 상당부분의 나노폐기물이 하폐수처리장에서 1차적으로 처리되지만, 하폐수처리장에서 발생하는 폐슬러지, 슬러지케익 등 22.7톤이 소각장으로 이동하게 되어 궁극적으로는 소각장에서 나노물질이 농축되게 된다. 나노물질의 활성슬러지와 같은 수처리법을 통한 제거효율은 80~95% 이상이 되는 것으로 나타나고 있지만[11], 최종 방류수에서 노출되지 않을 뿐 대부분이 활성슬러지와 침전물에 농축되어 결국 소각장으로의 위치이동만이 발생한다. CeO₂ 나노입자를 일반 폐기물에 분사시켜 소각 처리했을 때, 소각 시설의 각 공정별로 나노입자가 지속적으로 발견되었고 슬래그(slag), 비산재(fly ash) 형태로 대부분 최종 처리되는 것으로 파악되어, 소각에 의한 나노폐기물의 처리효율은 높은 것으로 파악되었지만 이 또한 문제점을 단순히 Shift 시키는 것 뿐이라는 것을 지적하기도 했다[6]. 따라서 소각장에서의 나노물질의 농축에 따른 환경에 무해한 수준으로의 처리가 관건이 된다.

스위스는 도시형 고품 폐기물과 폐슬러지를 100% 소각처리하고 있으며, 소각에 의한 나노물질 처리시의 효율 평가에 있어서 선두 국가라고 할 수 있다[12]. 앞서 설명한 바와 같이 중국은 폐기물의 소각율을 2020년까지 30%까지 확대시키려 하고 있으며, 유럽연합도 매립을 금지하는 법안을 공포하여 미처리된 폐기물에 대한 매립을 억제하고 있어서 소각에 의존하는 경향을 보이고 있다[6]. 우리나라도 2012년 이후 폐기

물의 해양투기가 억제되면서 폐슬러지는 소각으로 24%를 처리하고, 자원화 75%, 매립 1%으로 처리하고 있으며, 소각에 의한 폐기물 처리 의존도가 상당히 높은 수준이다. 따라서 소각에 의한 나노폐기물의 처리가 더욱 중요시 되고 있으며 효율적인 나노폐기물 처리 및 소각시설내 나노물질 거동과 2차적인 인체 및 환경노출억제가 중요해 지고 있다.

소각시설에서는 연소와 동시에 대기 집진 필터로 1차 비산재가 걸러지고 추가적으로 산세정(acid washing)으로 비산 먼지를 모두 제거하고 있어서, 대기중으로는 1% 미만으로 노출된다. Muller의 모델링 결과에 의하면[12], 탄소나노튜브는 94%가 소각으로 처리되어 바닥재(bottom ash)로는 2% 정도만 발생되며, AgNP는 바닥재/슬래그로 58%, 비산재로 8%가 발생되고 나머지 29%가 소각 후 매립된다고 설명하고 있다. 즉 나노물질의 연소가능성에 따라서 소각후 잔류 특성 및 그에 따른 추가적인 환경 노출 양상이 달라질 수 있다는 것이다. Holder가 정리한 바에 의하면[13], 나노물질은 소각장내에서 연소가능성, 점화지연효과, 환경오염물질 증가 효과 등의 차이가 나타나는 것으로 보였다. 산화물계 나노입자인 SiO₂, TiO₂, CeO₂는 연소는 되지 않지만 점화지연효과와 연소설비내에서 연소에 방해 요인이 되며 이들이 비산되거나 응집으로 추가적인 오염물질을 배출하는 것으로 나타나고 있다. 반면 탄소계의 CNT, 플러렌은 산화과정을 통해 연소되어 점화 지연이나 연소 방해는 되지 않지만 2차 오염원을 배출하고 있다. 2차 오염원에 관한 요인은 나노물질 제조에 함께 사용되는 각종 첨가물의 영향으로 볼 수 있다. 나노입자의 분산안정제가 소각시에 유독한 화합물질로 변할 수 있음을 보고한 사례가 있다[14]. 이 보고에 의하면 TiO₂, 금속 산화물, CeO₂, AgNP, 플러렌 등 다양한 나노입자를 포함하고 있는 종이나 플라스틱 폐기물을 소각했을 때, PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon), PCDD (polychlorinated-dibenzo-*p*-dioxin) 등이 배출될 수 있음을 실험실 수준의 소성로(furnace)에서 실험을 통해 증명하였다. 따라서 현재 나노폐기물, 나노물질을 포함한 폐슬러지를 상당부분 소각에 의존하고 있기 때문에 소각재, 소각 후 발생하는 화학물질(다이옥신 등)에 대한 검증 연구가 필요하다.

최근 스위스에서는 5개의 소각시설에서 발생한 비산재에 관심을 갖고 나노물질 존재가능성을 평가했다[15]. 현존 소각장

내 비산재를 억제하는 필터는 초미세입자 제거에 사용되고 있지만 그보다 더 작은 크기인 나노물질의 대기 노출을 억제할 수 있을지를 평가한 것이다. 상당부분의 나노입자들이 초미세입자 제거 필터에서 발견되어서 대기중 노출은 상당히 억제되는 것으로 보였으며, 비산재의 밀도는 입자의 크기에 의존하는 것으로 나타났다. 즉 100~150 nm의 비산재는 0.7~0.8 g/cm³의 밀도는 보이지만, 350~500 nm의 비산재는 2 g/cm³을 보이고 있다. 이는 입자가 작을수록 더 넓은 대기 공간내에 분포하여 입자 포집을 어렵게 하고, 환경중 노출을 보다 용이하게 할 수 있다는 것이다. 따라서 기존 초미세입자 필터가 효과적으로 작동한다지만 향후 나노입자 제거 필터에 효용성에 관한 연구도 필요하다.

나노입자 포함여부에 따른 폐지와 폐플라스틱 연소시 발생하는 입자상물질(PM, particulate matter)의 증가 여부를 실험실 수준에서 분석한 사례도 있다[16]. 나노물질의 함량이 10 wt%를 넘기면 폐지, 폐플라스틱 연소시 PM의 입도분포가 더 작은 크기쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 즉 어느정도 이하의 나노물질 함량을 지닌 나노폐기물의 소각시 PM 분포도 영향은 없지만, 함량 초과시에는 초미세 입자의 대기 노출이 증가하게 된다는 것을 지적하고 있다. 또한 본 연구에서도 공통적으로 지적하는 점은 비산되는 PM에 함유되지 못한 대부분의 나노입자는 바닥재에서 발견되고 있으며, 바닥재는 매립될 것이기 때문에 해당 2차 폐기물을 나노폐기물로 봐야 한다는 것이다. 물론 나노폐기물 소각시 다이옥신 배출이 저감된다는 연구결과도 있다[17]. TiO₂를 함유시켜 제조한 PVC (polyvinyl chloride)와 기존 PVC를 연소시켰을 때, PVC-TiO₂ 나노입자에서 50% 적은 양의 다이옥신이 배출된다는 것이다. 그러나 여전히 TiO₂를 포함한 고형 나노폐기물은 잔존하게 된다.

바닥재가 2차 오염원이 될 수 있다는 것은 매립과정에서 발생할 수 있는 침출수에 의한 하천, 지하수의 오염 때문이다. TiO₂가 포함된 고형 페인트를 소각로의 연소 조건인 950 °C에서 연소시킨 뒤, 바닥재로부터 Ti가 침출 되는지를 평가한 사례가 있다[18]. 실험실 수준의 연소로에서는 대기중으로 TiO₂ 배출은 안되었지만 소성을 통해 페로프스카이트(perovskite)의 일종인 CaTiO₃로의 변환이 관찰되었고, 1 mg/kg 정도의 Ti가 침출되는 것으로 파악되었다. 따라서 다양한 나노폐기물 또는 나노물질 연소후 발생하는 바닥재에 대한 침출 영향에 관한 연구도 필요하다.

소각후 발생하는 PM의 독성을 연구한 사례가 최근 공개되었다[19]. 인간폐세포를 이용하여 나노폐기물 소각후 발생한 PM의 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)의 발생 유무를 관찰한 것으로, Ag, TiO₂, 플러렌을 함유한 PM은 독성 유발 효과가 증가하지만, CeO₂, F₂O₃, CdSe 등을 함유한 PM에서는 별다른 영향은 없었다. 이는 세포 수준의 독성평가로서 토양이나 수생 생물에 대한 노출을 통한 독성평가가 이루어져야 보다 명확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다. 이점은 저자도 동일하게 지적하고 있다.

이상을 정리하면 나노폐기물의 상당부분은 폐수처리를 통

Table 1. Expected incineration behavior of several nanomaterials [13]

Nano-materials	Com-bustible	Fire retardant	Persist through combustion zone	Increased pollutant emissions
SiO ₂	-	+	+	?
TiO ₂	-	+	+	+
CNT	+	+	+	?
CeO ₂	-	+	+	+
Ag	?	?	?	+
Fullerene	+	?	?	+

+ : positive effect, - : negative effect, ? : uncertainty

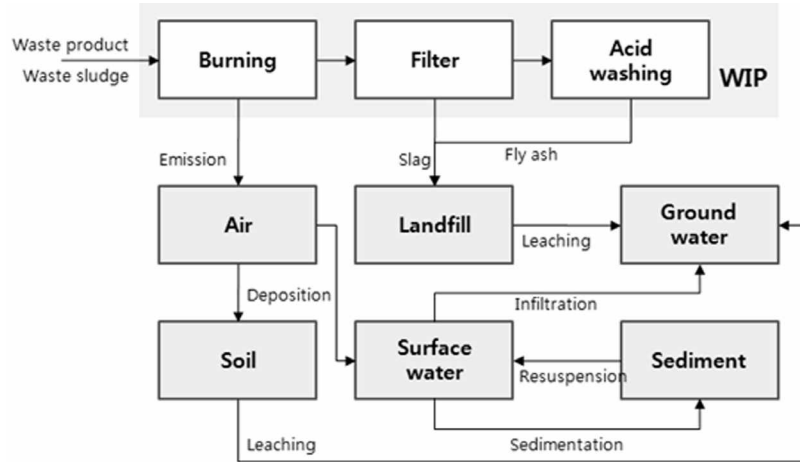


Figure 2. Indirect exposure of nanowastes from waste incineration plant (WIP).

해 제거되어 수계 노출을 억제하지만 궁극적으로는 다시 소각시설로 이동하게 된다. 이후 소각장내 연소과정을 통해 비산재, 바닥재, 슬래그 형태로 나노물질 복합체가 형성된다 (Figure 2). 즉 소각 과정에서 발생한 재는 필터를 통해 걸러지게 되며, 필터를 통과한 비산재는 산세척을 하고 필터 하단부의 소각재는 슬래그 형태로 존재한다. 소각과정에서는 1차적인 비의도적 노출이 발생하는데, 소각 과정에서 대기중으로 유해 화학물질과 함께 나노입자도 배출 될 수 있으며 이후 노출된 입자는 토양과 지표수로 침전하게 된다. 이에 대해서는 대기 노출을 억제할 수 있는 필터와 산세척을 더욱 강화하는 방법이 우선시 될 수 있다. 2차적인 비의도적 노출은 슬래그나 비산재를 주로 매립하는데, 매립한 재에 포함된 나노물질의 일부가 지하수로 용출되어 수계로의 노출이 발생할 수 있다. 이에 대해서는 아직까지는 처리 방법은 없으며, 매립한 재에 남은 나노물질에 대한 생물학적 안전성 평가가 필요하다고 할 수 있다.

3.2. 소각 외 하폐수처리

소각 시설에 직접 유입되는 나노폐기물은 주로 고형 폐기물이며, 용액내 분산된 상태로 폐기되는 폐수는 하폐수처리장에서 정화 공정을 거치게 된다. 나노폐수에 관한 처리 규정이 전무한 실정이므로, 기존에 하폐수처리장에서 가장 널리 사용되는 활성슬러지법을 이용하여 처리하고 있다. 문헌 결과에 의하면 하수처리장의 활성슬러지법으로는 AgNP는 90~95% 제거하는 것으로 나타나고 있다[20]. 비용해성인 나노물질(CeO₂, TiO₂, SiO₂)은 합성하수에서도 일정한 제타전위를 보이지만 용해성 나노물질(Fe₂O₃, ZnO 등)은 불안정하여 급격한 응집과 침전을 발생하게 된다[21]. 결국은 슬러지에 흡착되거나 응집 침전되어 폐슬러지 케익과 함께 소각시설로 최종 이동하게 된다. SiO₂의 폐수처리시 환경 거동을 살핀 결과에서는, 잔류중인 나노입자가 생물학적 처리조에 영향을 줄 수 있음을 지적한 결과도 있다. 수계에 노출된 나노입자가 폐

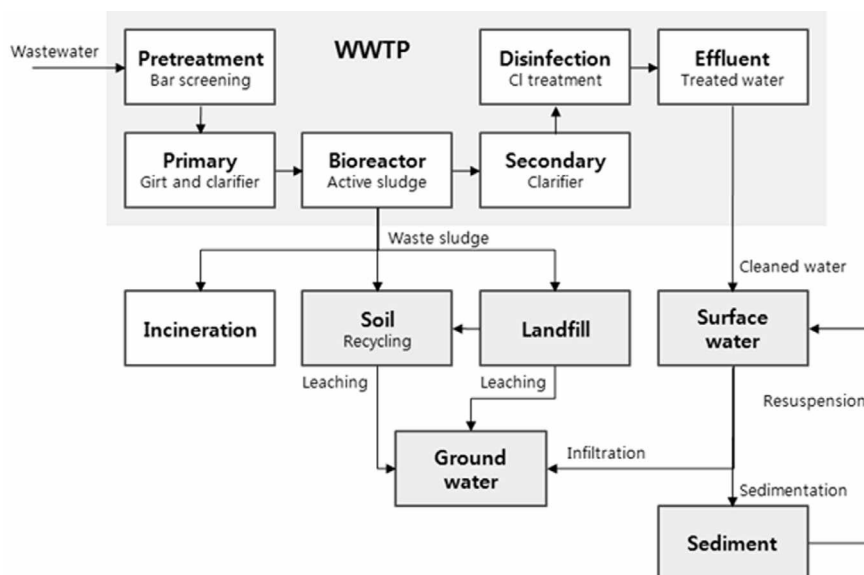


Figure 3. Indirect exposure of nanowastes from wastewater treatment plant.

수처리시설로 이동하여, 1차 침전조를 거쳐 모두 제거된다면 환경에 영향이 없겠지만, 잔류중인 나노입자는 2차 생물학적 처리조에 영향을 미치게 된다[22]. 이외에도 하폐수처리 시설에 관한 나노폐기물 연구는 소각에 의한 처리 연구보다는 훨씬 광범위하게 이루어지고 있기 때문에[10, 23-25], 여기서는 상세한 설명은 생략하고자 한다.

Figure 3과 같이 하폐수처리장을 통해 저감 처리된 나노물질은 최종방류수내에서는 거의 잔류하지 않게 되지만, 생물반응조나 다른 침전조에서 제거되고 농축되어 최종적으로는 폐슬러지 케익, 고형물 등으로 잔존하게 된다. 이중 지렁이토, 복토 등의 자원화로 75%가 사용되며 나머지는 대부분 소각된다. 소각시설을 거치면 Figure 2와 같은 비의도적 토양 및 지하수 노출을 우려되며, 폐슬러지의 매립과정에서도 동일한 수계 노출이 발생될 수 있다.

4. 나노폐기물 처리에 관한 국내외 관심

4.1. 국제 기구 활동

나노폐기물에 의해 발생될 수 있는 문제점을 사전에 억제하기 위한 목적으로 나노물질이 포함된 원료물질이나 나노소비재를 규제 또는 등록하는 규제를 마련하는 것도 중요하다. 이에 관해서는 미국을 비롯한 선진국이 앞장서서 규제화를 진행 중이며, 이는 추후 환경무역규제로 작용할 가능성이 있기 때문에 우리나라 환경부의 관심도 높은 분야이다. 현재 나노물질 안전관리에 관한 규제나 법령이 마련된 국가는 미국, EU, 호주 등으로 몇 개국이 안 되지만, 우리나라를 비롯하여 일본, 태국은 관련 규제를 마련하고자 나노물성 정보와 독성 정보를 수집하고 있다. 또한 나노물질이 함유된 제품에 대해서는 라벨링제를 도입하여 성분, 조성, 형태 등에 관한 정보를 공개하도록 유도하고 있다[26]. 이는 일반 소비자로서 하여금 정보 제공을 통해 제품에 관한 신뢰도 확보나 위해성 정보를 사전에 고지하기 위함이다. 이러한 나노소비재에 대한 라벨링제나 인증마크는 일반인으로 하여금 나노폐기물에 대

한 인식을 고취시킬 것이며, 일반폐기물과는 다른 취급법을 취해야 함을 인지하게 만들 것이다.

나노안전관리를 위한 대표적인 국제 기구인 OECD에서도 나노폐기물에 관한 관심을 가지고 자원생산성 및 폐기물 작업반(WPRPW, Working Party on Resource Productivity and Waste)을 구성하여 2014년 12월에 회의를 개최한 바 있다. 음식물쓰레기, 폐기물 자원화 등을 다루는 작업반이지만, 나노폐기물에 관한 관심도 고조되고 있다. 해당 회의에서는 나노폐기물의 4가지 처리 방법인 소각, 매립, 침출수 처리, 재활용 등을 통합한 연구가 필요하다고 결론 맺으며 연구결과에 대한 적극적인 정보공유가 필요함을 지적하였다. 해당 작업반에서는 나노폐기물에 관한 안전관리 보고서를 출간하여 온라인에 공개하고 있다[27].

4.2. 우리나라의 관심

우리나라에서도 나노물질의 안전관리에 관심을 갖고, OECD와 함께 국제 연구활동을 교류하고 있다. 교과부, 노동부, 지경부, 환경부, 식약청을 중심으로 2011년 10월에 제1차 나노안전관리종합계획(2012-2016)을 마련하여, 나노 안전관리를 위한 제도에 집중한 바 있다. 해당 기간 동안에 환경부에서는 화학물질등록및평가등에 관한 법률(화평법)을 마련하여 일부 나노물질을 취급, 생산하는 시설에 대해서도 화평법을 따르도록 규정화하고 있다. 그러나 여전히 나노폐기물에 관한 논의는 없었으나, 2015년말에 환경부를 중심으로 제2차 범부처나노안전관리종합계획(2017-2021)의 초안이 마련되면서, ‘나노물질 및 제품의 전주기 안전관리 체계 구축’이라는 중점 과제내에 ‘나노폐기물 위해성관리 체계 구축’이라는 주요 추진과제가 자리 잡게 되었다(비공개). 이는 범부처 차원에서 나노폐기물에 관한 관심을 갖게 되었다는 증거이며, 향후 해당 분야에 관한 전주기 안전관리 관점에서 많은 연구 투자가 이루어지리라 판단된다. 또한 이를 통해 나노폐기물이 지닐 수 있는 잠재적 인체 및 환경 영향을 최소한으로 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

EU'S WASTE HIERARCHY

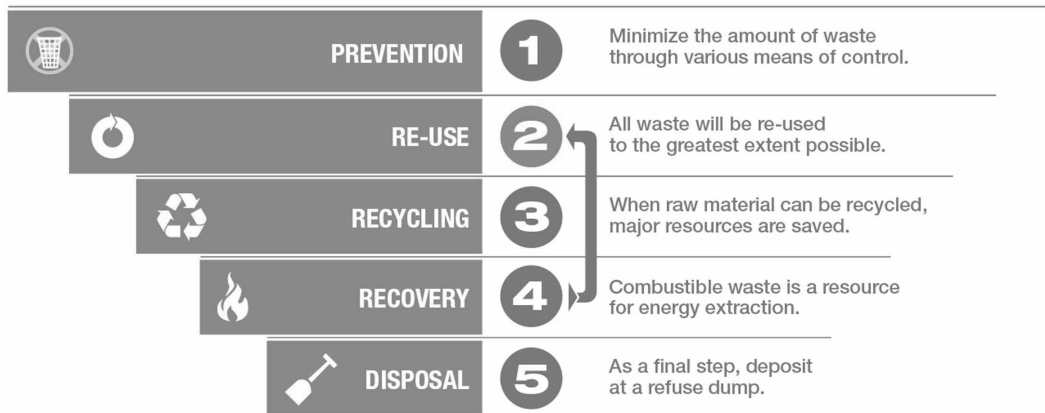


Figure 4. European waste hierarchy [28].

5. 결론

유럽연합에서는 Figure 4와 같이 폐기물에 처리에 관한 계통도(Waste Hierarchy)를 공개한 바 있다[28]. 2008년부터 사용된 폐기물 처리 기준이며, 사전절감(prevention)을 폐기물 처리의 1수준으로 잡고 있다. 재사용(reuse), 재생(recycling), 회수(recovery)를 2~4수준으로 보고 있으며, 최종적으로 폐기(disposal)를 생각하게 된다. 나노폐기물 또한 폐기물로서 최소한의 사용(1수준)과 회수, 재생, 재사용 등을 통해 공정내 선순환을 시키면 소각시설로 이동하는 5수준의 나노폐기물 처리량을 절감할 수 있을 것으로 보인다. 나노물질은 생산되는 순간 자발적으로 자연상에서 사라지지 않는다. 폐수처리장을 거치건 소각장을 거치건 새로운 곳에 농축되거나 변형되어 위치이동을 할 뿐이다. 특히 최종적으로 머무르는 소각시설 내 나노폐기물 처리와 환경중 거동에 관한 관심을 갖고, 소각을 통한 나노폐기물 처리과정에서 올 수 있는 문제점은 없는지 다시 한 번 돌아봐야 할 것이다.

References

1. Bystrzejewska-Piotrowska, G., Golimowski, J., and Urban, P. L., "Nanoparticles: Their Potential Toxicity, Waste and Environmental Management," *Waste Manag.*, **29**, 2587-2595 (2009).
2. Woodrow Wilson Center, "An Inventory of Nanotechnology-based Consumer Products Currently on the Market," The Project on Emerging Nanotechnologies(2011).
3. Vance, M. E., Kuiken, T., Vejerano, E. P., McGinnis, S. P., Hochella, M. F., Rejeski, D., and Hull, M. S., "Nanotechnology in the Real world: Redeveloping the Nanomaterial Consumer Products Inventory," *Belstein J. Nanotechnol.*, **6**, 1769-1780 (2015).
4. Liu, X., Liu, Y., Kong, X., Lobie, P. E., Chen, C., and Zhu, T., "Nanotoxicity: A Growing Need for Study in the Endocrine System," *Small*, **9**, 1654-1671 (2013).
5. Whiteley, C. M., Valle, M. D., Jones, K. C., and Sweetman, A. J., "Challenges in Assessing the Environmental Fate and Exposure of Nano Silver," *J. Phys. Confer. Series*, **304**, 012070 (2011).
6. Walser, T., Limbach, L. K., Brogioli, R., Erismann, E., Flamigni, L., Hattendorf, B., Juchli, M., Krumeich, F., Ludwig, C., Prikopsky, K., Rossier, M., Saner, D., Sigg, A., Hellweg, S., Günther, D., and Stark, W. J., "Persistence of Engineered Nanoparticles in a Municipal Solid-Waste Incineration Plant," *Nature Nanotechnol.*, **7**, 520-524 (2012).
7. Hallock, M. F., Greenley, P., BiBerardinis, L., and Kallin, D., "Potential Risks of Nanomaterials and how to Safety Handle Materials of Uncertain Toxicity," *J. Chem. Health Saf.*, **16**, 16-23 (2009).
8. Musee, N., "Nanotechnology Risk Assessment from a Waste Management Perspective: Are the Current Tools Adequate?," *Human Exp. Toxicol.*, **30**, 820-835 (2011).
9. Mueller, N. C. and Nowack, B., "Exposure Modeling of Engineered Nanoparticles in the Environment," *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 4447-4453 (2008).
10. Kim, Y., "Nanowaste Treatment in Environmental Media," *Environ. Health Toxicol.*, **29**, e2014015 (2014).
11. Oh, S. Y., Sung, H. K., Park, C., and Kim, Y., "Biosorptive Removal of Bare-, Citrate-, and PVP-Coated Silver Nanoparticles from Aqueous Solution by Activated Sludge," *J. Ind. Eng. Chem.*, **25**, 51-55 (2015).
12. Muller, N. C., Buha, J., Wang, J., Ulrich, A., and Nowack, B., "Modeling the Flows of Engineered Nanomaterials during Waste Handling," *Environ. Sci. Proc. Imp.*, **15**, 251-259 (2013).
13. Holder, A. L., Vejerano, E. P., Zhou, X., and Marr, L. C., "Nanomaterial Disposal by Incineration," *Environ. Sci. Proc. Imp.*, **15**, 1652-1664 (2013).
14. Vejerano, E. P., Holder, A. L., and Marr, L. C., "Emissions of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Polychlorinated Dibenzop-dioxins, and Dibenzofurans from Incineration of Nanomaterials," *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 4866-4874 (2013).
15. Buha, J., Mueller, N., Nowack, B., Ulrich, A., Losert, S., and Wang, J., "Physical and Chemical Characterization of Fly Ashes from Swiss Waste Incineration Plants and Determination of the Ash Fraction in the Nanometer Range," *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 4765-4773 (2014).
16. Vejerano, E. P., Leon, E. C., Holder, A. L., and Marr, L. C., "Characterization of Particle Emissions and Fate of Nanomaterials during Incineration," *Environ. Sci. Nano*, **1**, 133-143 (2014).
17. Yoo, H., and Kwak, S.-Y., "TiO₂-Encapsulating PVC Capable of Catalytic Self-suppression of Dioxin Emission in Waste Incineration as an Eco-friendly Alternative to Conventional PVC," *Appl. Catal. B: Environ.*, **104**, 193-200 (2011).
18. Massari, A., Beggio, M., Hreglich, S., Marin, R., and Zuin, S., "Behavior of TiO₂ Nanoparticles during Incineration of Solid Paint Waste: A Lab-scale Test," *Waste Manage.*, **34**, 1897-1907 (2014).
19. Vejerano, E. P., Ma, Y., Holder, A. L., Pruden, A., Elankumaran, S., and Marr, L. C., "Toxicity of Particulate matter from Incineration of Nanowaste," *Environ. Sci. Nano*, **2**, 143-154 (2015).
20. Kiser, M. A., Westerhoff, P., Benn, T., Wang, Y., Pérez-Rivera, J., and Hristovski, K., "Titanium Nanomaterial Removal and Release from Wastewater Treatment Plants," *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 6757-6763 (2009).
21. Limbach, L. K., Bereiter, R., Müller, E., Krebs, R., Gälli, R., and Stark, W. J., "Removal of Oxide Nanoparticles in a Model Wastewater Treatment Plant: Influence of Agglomeration and Surfactants on Clearing Efficiency," *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 5828-5833 (2008).
22. Jarvie, H. P., Al-Obaidi, H., King, S. M., Bowes, M. J., Lawrence,

- M. J., Drake, A. F., Green, M. A., and Dobson, P. J., "Fate of Silica Nanoparticles in Simulated Primary Wastewater Treatment," *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 8622-8628 (2009).
23. Marcoux, M.-A., Matias, M., Olivier, F., and Keck, G., "Review and Prospect of Emerging Contaminants in Waste - Key Issues and Challenges Linked to their Presence in Waste Treatment Schemes: General Aspects and Focus on Nanoparticles," *Wast Manage.*, **33**, 2147-2156 (2013).
24. Wigger, H., Hackmann, S., Zimmermann, T., Köser, J., Thöming, J., and Gleich, A., "Influences of use Activities and Waste Management on Environmental Releases of Engineered Nanomaterials," *Sci. Total Environ.*, **535**, 160-171 (2015).
25. Westerhoff, P., Lee, S., Yang, Y., Gordon, G. W., Hristovski, K., and Halden, R. U., "Characterization, Recovery Opportunities, and Valuation of Metals in Municipal Sludges from U.S. Wastewater Treatment Plants Nationwide," *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 9479-9488 (2015).
26. Umh, H. N., Lee, B.-C., and Kim, Y., "New Paradigm for Nanowaste Treatment," *Clean Technol.*, **18**, 250-258 (2012).
27. OECD Working Party on Resource Productivity and Waste, "Incineration of Waste Containing Nanomaterials," ENV/EPOC/WPRPW(2013)3/FINAL.
28. Directive 2008/98/EC on Waste, "European Waste Hierarchy," Waste Framework Directive.