



나노제품의 안전성 설계 기술 동향 및 전망

김재현, 이학주, 최병익 | 한국기계연구원

[요약문]

나노기술의 발전과 함께 나노소재의 활용과 이를 이용한 나노제품의 개발 및 상용화가 가속되고 있다. 나노소재의 우수한 특성과 이를 이용한 새로운 응용 제품의 연구는 매우 활발하지만, 나노소재가 동반할 수 있는 위해성에 대한 연구와 이를 방지하기 위한 노력은 미미한 상태이다. 본 원고에서는 나노소재를 이용하는 나노제품의 안전성 설계 기술에 대한 동향과 전망을 제시하고자 하며, 구체적으로는 나노소재가 지니는 위해성에 대한 연구 동향, 나노소재의 노출에 대한 전주기적 평가 기술에 대한 연구 동향, 나노제품의 안전성 평가 및 전산해석 그리고 설계 기술의 구축에 대한 연구 동향을 제시한다. 가까운 장래에 나노제품이 일반화될 시점에서는 이러한 안전성 설계 기술의 필요성이 크게 대두될 것으로 전망되며, 연구기관이나 관련 기업에서 이에 대한 준비와 인프라 구축이 필요하다.

1. 서론

나노소재는 적어도 하나의 특성 길이가 100nm보다 작은 소재로서 정의할 수 있다.^[1] 이러한 나노소재는 금속, 폴리머, 세라믹, 반도체 등 다양한 소재로부터 제조될 수 있으며, 구조적인 특성에 따라 그림 1과 같이 3가지로 구분할 수 있다. 나노 입자(nanoparticle), 나노 튜브(nanotube), 나노층(nanolayer)이 그것이다. 나노 입자는 모든 특성 길이가 나노스케일인 나노소재를 의미한다. 나노 튜브는 길이 방향의 특성 길이를 제외한 모든 특성 길이가 나노스케일인 나노소재로서, 나노 섬유(nanofiber), 휘스커(whisker), 나노 막대(nanorod) 등을 포함한다. 나노층은 하나의 특성길이만이 나노스케일인 나노소재로서, 나노클레이(nanoclay), 나노박막(nanosheet), 나노박판(nanoplatelet) 등을 포함한다.

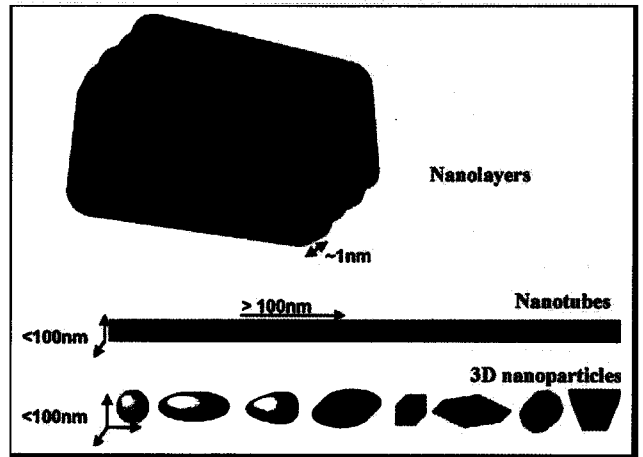


그림 1. 나노소재의 구조적인 특징에 따른 분류^[1]

나노제품은 나노소재의 우수한 특성을 이용하기 위하여, 나노소재를 포함하여 제조된 제품으로 정의한다. 나노소재를 포함한 제품의 형태는 다양할 수 있으나, 가장 널리 사용되는 형태는 나노복합재를 이용한 제품의 형태이다. 즉 나노소재를 기존의 공학 재료 내부에 분산시켜서 복합재의 형태로 만들고, 이를 제품의 외부에 코팅하거나 제품을 구성하는 기본 재료로 사용하는 방식이 널리 사용된다. 나노복합재 코팅이나 나노복합재 자체로 구성된 제품의 예로



는 은나노가 포함된 유아용 제품, 전도성 나노소재로 구성된 전자 제품, 내마모 나노복합재로 구성된 자동차 엔진블럭, 고강도 경량 나노복합재로 구성된 스포츠 용품 등이 있으며, 그림 2와 같이 상용화된 나노제품의 종류는 매우 다양하다. 상용화된 나노제품은 비정상적인 사용에 의한 급격한 파손에서부터 정상적인 사용에 의한 점진적인 파손에 까지 다양한 파손 현상을 경험하며, 이 때에 나노소재들이 외부로 노출된다.

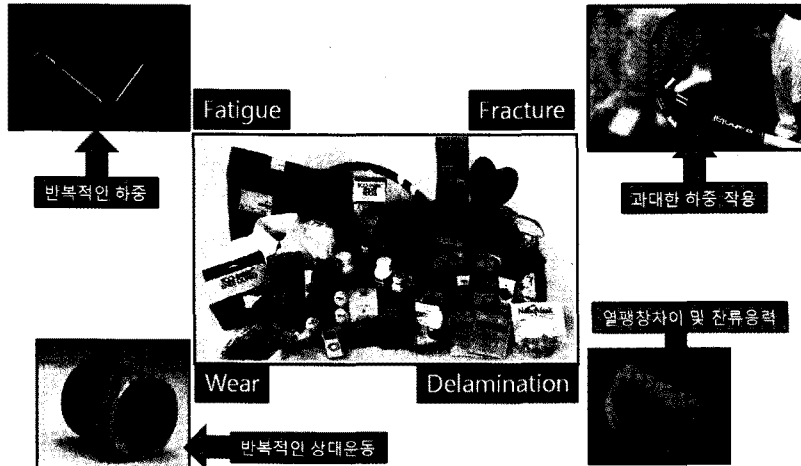


그림 2. 상용화된 나노제품과 기계적인 응력에 의한 나노제품의 파손 현상

안전성(safety)이라면 구조물의 기계적인 신뢰성(structural reliability)을 의미하는 것이 일반적이지만, 본 원고에서는 보다 넓은 의미를 부여하고자 한다. 즉 구조물의 기계적인 신뢰성과 함께 환경과 건강에 해악을 끼치지 않는다는 의미의 안전성이 포함된다. 이러한 안전성 이슈는 나노소재가 지니는 건강과 환경에 미치는 영향에 대한 우려가 증가하면서 대두되었으며, 나노소재가 지니는 독성과 함께 나노소재가 외부로 노출되는 정도와 깊은 연관성을 지닌다. 나노제품의 안전성 설계라는 것은 나노제품의 설계 단계에서부터 나노제품의 안전성을 고려하여 설계한다는 의미이다. 나노제품의 상세 설계 단계에서, 사용되는 나노소재의 종류, 그 나노소재의 위해성, 외부 노출 가능성, 노출 제한 기준 등을 고려하여 제품을 설계하는 것이며, 나노소재가 미치는 환경적인 영향과 인체 건강에 미치는 영향에 대한 기본적인 정보 및 나노제품의 파손에 의한 나노소재의 노출 정도에 대한 평가, 노출 허용 기준에 대한 설정 등을 총괄적으로 포함한다. 이러한 설계 개념을 Design for Environment, Health and Safety (EHS)라고 불리우는 개념으로 확장하고자 하는 시도도 있다.

이전까지의 나노제품 설계는 주로 성능 및 효율에 대한 설계에 초점이 맞춰져 있었다. 한 예로서 폴리머 나노복합재를 생각해 보자. 요구되는 성능이나 특성을 만족하는 폴리머 나노복합재를 설계하기 위해서는 폴리머 나노복합재에 사용되는 나노소재의 기하학적인 정보, 나노소재의 개별 특성, 폴리머 모재 내에서의 분산도, 폴리머 모재의 특성, 모재와 나노소재 간의 계면특성 등을 고려할 필요가 있다.^[2] 기존의 성능 및 특성에 대한 설계와는 별도로 나노제품의 경우에는 안전성에 대한 설계가 필요하다. 폴리머 나노복합재 내부에 포함된 나노소재가 위해성을 지니는 경우에는 제품의 사용 중에 발생하는 나노소재의 노출량이 기준량 이하가 되도록 설계해야 한다. 이렇게 안전성을 설계한다는 것은 제품 설계 단계에서 신뢰성을 고려한다는 design for reliability의 개념과 유사하다. 즉 나노제품의 설계 단계에서 제품의 성능 및 특성과 더불어 안전성을 고려한 설계가 이루어져야 한다는 것이다.

나노소재를 이용하는 나노제품의 안전성은 현재 매우 중요한 이슈가 되고 있으며, 안전성이 검증되지 않은 제품은 시장에 진입하기가 매우 어려운 실정에 있다. 실제로 미국 EPA (Environmental Protection Agency)는 은나노 입자와 탄소나노튜브에 대한 규제를 시작하여 이러한 나노소재가 포함된 제품의 시장 진입을 제한하고 있다.^{[3] [4]} 나노소

제의 위해성에 대한 연구결과가 지속적으로 발표되면서, 이들 나노소재를 사용하는 나노제품에 대한 심리적인 저항감이 증가하고 있다. 나노제품을 개발하는 단계에서 이러한 안전성을 고려하지 못한 상태에서 제품 개발이 완료된 후에 안전성 문제가 발생하는 경우에는, 매우 큰 경제적인 손실과 사회적인 문제를 야기하게 된다. 따라서 나노제품을 설계하는 단계에서 이러한 안전성을 고려하는 것이 필요하며, 이를 위한 다양한 설계 도구와 관련 데이터베이스 및 정보체계의 구축이 필요하다.

2. 나노 소재의 안전성 연구 동향

나노 소재의 위해성에 대한 연구는 매우 다양하며, 나노소재의 기하학적인 특성과 함께 나노소재의 화학적인 특성이 매우 중요하다. 이 절에서는 나노소재를 금속 나노소재, 반도체 나노소재, 탄소기반 나노소재로 분류하고^[5], 각각의 나노소재가 지니는 위해성에 대하여 여러 그룹에서 보고한 연구 결과들을 제시한다.

금속 나노소재는 나노기술이 주목 받기 이전부터 매우 오랜 기간 동안 인류가 사용해 왔다. 현재 가장 널리 사용되는 금속 나노소재는 은나노입자와 금나노입자이며, 최근 들어서 이들 금속 나노소재의 위해성에 대한 관심과 다양한 연구결과들이 급증하고 있다. 특히, 은나노 입자는 전세계적으로 가장 많이 사용되는 나노소재이며, 실내 공기정화용품, 섬유, 유아용품, 전자제품 등에서 은나노 입자가 지니는 항균 성질을 이용하고 있다.^[6] 은나노입자의 특성은 나노입자의 크기, 나노입자 표면 코팅의 종류, 나노입자 합성 시에 발생하는 부산물의 영향 등에 크게 의존하며, 여러 연구자들이 관련 연구결과를 발표하고 있다. 은나노입자를 합성할 때에 발생하는 독성 있는 부산물을 제거하거나, 표면에 탄소 코팅을 하는 경우에 독성이 발현되지 않는다는 연구결과가 있는 반면에 은나노입자가 미생물에 가지는 항균 특성이 진핵세포에서도 나타난다는 연구 결과가 있다. 사람의 피부 세포에 미치는 은나노입자에 대한 연구도 있다. 이 연구에서는 은나노 합성에 사용되는 은질산염과 은질산염에서 합성된 다양한 크기의 은나노입자, 은나노입자의 표면 코팅의 종류에 따라 피부 세포에 미치는 독성을 연구하였다. 이 연구에서는 은질산염 자체는 매우 독성이 큰 것으로 나타났으나, 이로부터 합성된 콜로이드 상태의 은나노입자의 독성은 없는 것으로 보고되었다.^[7] 그림 3에는 이러한 독성 평가 결과의 한 예가 나타나 있다. 이 그림에서는 인간의 상피세포에 은나노입자를 노출시키고, 세포의 생존율을 평가한 결과를 보여주고 있으며, 은나노입자보다는 은질산염의 독성이 매우 크다는 점을 보여주고 있다. 은나노입자에 코팅을 하기 위하여 건조하는 과정에서 은나노입자의 화학 상태 변화에 따른 독성이 나타날 수 있음을 보고한 결과도 있으며, 이를 방지하기 위해서 건조된 은나노입자의 표면을 생체적합 폴리머로 코팅함으로써 독성이 없어질 수 있음을 보고한 연구결과도 있다.

세포 단위에서의 독성에 대한 연구는 많이 보고되고 있지만, 보다 큰 조직(또는 장기), 개별 동물 단위에서의 독성 연구는 아직 많지 않은 실정이다. 세포 독성과 실제 인체 독성과의 상관관계가 완전히 규명되지 않은 상태이므로, 이와 관련된 다양한 연구가 진행되어야 한다. 2009년에는 Zebra fish의 배아를

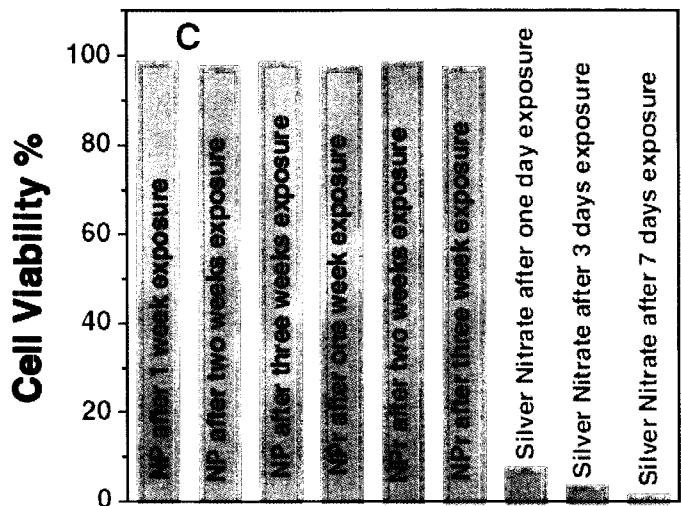


그림 3. 은나노입자의 노출에 의한 세포 생존율 변화^[8]



이용하여 은나노와 금나노입자의 독성을 평가한 연구가 보고되었으며, 흥미롭게도 3, 10, 50, 100nm의 직경을 가지는 은나노입자는 같은 크기를 지닌 금나노입자보다 매우 독성이 높은 것으로 나타났다.^[8] 은나노입자가 지니는 독성의 원인은 아직 명확하지 않으며, 은나노입자 자체의 독성인지 은나노입자가 만드는 은이온의 독성인지에 대해서도 추가적인 연구가 필요한 상태이다.

금 콜로이드는 수십년간 의학적인 용도로 사용되어 왔다. 나노스케일의 특성길이를 지니는 금 나노입자가 지니는 독성에 대해서는 다양한 연구가 진행되어왔다. 매우 작은 크기때문에 금 나노 입자는 쉽게 세포 안으로 침투하며, 침투된 금 나노 입자는 세포 내에서 서로 응집되는 경향이 있다. 금 나노입자가 지니는 독성에서는 금 나노입자의 표면 코팅이 매우 중요한 역할을 하는 것으로 생각되며, 코팅의 종류에 따라 독성이 작기도 하며, 때로는 90%이상 독성이 증가하기도 한다. 금 나노입자의 독성은 입자의 합성 시에 사용되는 화학물질에도 크게 의존한다. 자주 사용되는 CTAB의 경우 나노입자의 분산에 도움을 주지만, 나노입자가 세포 내로 침투하는 것을 돕는 역할을 하면서 독성을 일으키기도 한다. 나노입자의 합성 시에 사용되었던 화학물질 자체가 독성을 지니는 경우에는 나노입자와 함께 이러한 독성 화학물질이 작용함으로써 독성이 발현된다.^[9]

반도체 나노소재는 양자점으로 대변된다. 양자점은 직경이 2에서 100 nm범위에 있는 반도체성의 나노입자로서, 다양한 의학 기술과 광학 기술, 에너지 기술 등에 적용되고 있다. 이러한 양자점은 보통 코어/셸 구조를 지니며, 코어를 구성하는 소재는 주기율표에서 II-VI 그룹(CdSe, CdTe, CdS, PbSe 등)과 III-V 그룹(GaAs, GaN, InP, InAs)이다. 이러한 소재들 중의 일부는 적은 농도에서도 독성이 있는 것으로 알려져 있으며, Cd, Se, Pb, As 등이 그 예이다. 양자점을 싸고 있는 셸의 내구성이 매우 중요하며, 이 셸이 산화되거나 시간에 따라 손상을 입는 경우에는 독성이 있는 코어 소재의 노출에 의한 문제가 야기된다. 생체에 적합하면서도 내구성이 있는 셸 코팅에 대한 연구가 진행되고 있으며, 셸 코팅에 따른 다양한 독성 시험이 이루어지고 있다.^[5] 그림 4에는 양자점이 세포에 노출된 정도에 따라 세포의 사망률을 변화하는 정도를 보여주고 있으며, 노출 정도에 따라 비례적으로 사망률이 증가하는 것을 알 수 있다. 2010년에는 CdSe, Cd_(1-x)Zn_x/ZnS, CdSe/ZnS의 조성을 지니는 양자점에 대한 세포 독성 연구가 보고되었으며, 인체의 embryonic kidney fibroblast cells(HEK293)을 이용하여 세포 생존률이 양자점의 농도에 의존한다는 것을 보고하였다.^[6]

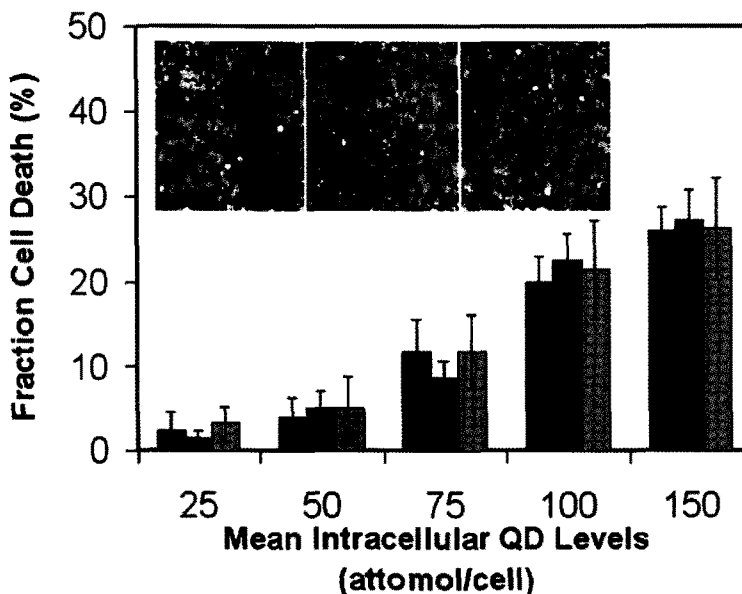


그림 4. 양자점의 노출 정도에 따른 세포 사망률의 변화^[5]

탄소기반 나노소재의 안전성 연구에는 다중벽탄소나노튜브(MWCNT), 단일벽탄소나노튜브(SWCNT) 등을 이용한 연구 결과들이 보고되었다. 몇 가지 연구결과에 따르면, MWCNT는 그 자체로서 독성이 있는 것으로 생각된다. 독성을 주는 메커니즘으로는 MWCNT가 세포막에 부착되거나 세포막을 지나 침투함으로써 세포의 대사에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 구체적으로는 MWCNT의 농도와 노출시간이 세포의 생존율에 영향을 주는 결과가 보고된 바가 있다.^[6] MWCNT의 표면에 있는 코팅층도 독성에 큰 영향이 있는 것으로 보이며, 소수성이 있는 MWCNT는 hydroxyl이나 carboxyl 그룹이 표면에 있는 MWCNT보다 독성이 적은 것으로 보고한 결과가 있다. MWCNT의 직경이나 길이에 따른 독성 영향에 대한 연구도 있지만, 아직까지 명확한 결론에는 이르지 못한 것으로 보인다.^[8] MWCNT가 일으키는 염증반응에 대한 연구도 있다. MWCNT에 의하여 유전자나 단백질에 이상현상이 발생하는 것이 관찰된 바가 있으며, 세포 괴사와 같은 현상이 발생하는 것도 보고된 바가 있다. MWCNT가 석면이나 탄소블럭이 일으키는 염증 반응과 유사한 반응을 일으킨다는 보고도 있으나, 일부에서는 몇 가지 세포에 대한 시험 결과를 토대로 MWCNT가 생체적합성이 있다는 상반된 주장을 펼치는 연구결과도 있다.^[6] 아크 방전으로 합성되고, 정제과정을 거친 SWCNT의 경우, 장기간의 노출에 의한 독성을 그다지 크지 않은 것으로 보고된 바가 있다. 쥐를 이용한 이러한 노출 시험은 폐에 약간의 염증 반응을 일으킨 것 외에는 주목할만한 독성을 보여주지 않았다.^[10]

나노입자가 지니는 독성을 이해하기 위한 여러 가지 노력들이 진행 중이며, 현재까지는 세포를 이용한 in-vitro 시험이 주를 이루고 있다. 향후에는 조직이나 장기, 인체 전체에 미치는 영향을 평가하기 위한 다양한 연구가 필요하며, 세포 이외에 조직이나 장기 단위에서 나노입자의 독성을 일으키는 메커니즘을 이해하기 위한 노력이 필요하다.^[11] 나노입자와 생체 시스템과의 상호작용 및 이를 통한 독성을 이해하기에는 현재까지 개발된 도구가 매우 부족한 실정이다. 구체적으로 나노입자의 집합(aggregation), 물리적/화학적 반응성 등은 현재로서 완전히 이해하기 어려운 상태에 있으며, 나노입자가 동적이며 살아있는 생체 시스템 내에서 어떤 개별적인 또는 집합적인 영향을 미치는 지에 대해서는 더욱더 측정하기가 어렵다. 앞으로 이러한 영역에서의 측정 기술이 필요하며, 현재까지 개발된 몇 가지 분석 기법들은 보다 세심한 주의를 기울여서 적용되어야 한다.^[12]

3. 나노 소재의 노출 연구 동향

나노소재의 노출을 평가하기 위해서는 나노소재의 합성, 정제, 분산 및 제품화와 같은 작업이 이루어지는 작업장에서의 노출 평가와 나노제품을 사용하고 있는 사용자 환경에서의 노출 평가, 나노제품의 폐기 시에 발생하는 노출 평가 등을 전주기적으로 고려할 필요가 있다. 이러한 전주기적 노출 평가를 통하여, 나노소재의 제품화 단계 및 사용, 폐기 단계에서 누락되는 것 없이 나노소재가 노출되는 정도를 고려할 수 있다. EPA에서 2007년에 발간된 나노 기술 백서에는 아래 그림 5와 같이 전주기적 risk 평가에 대한 필요성이 제시되고 있다.^[13]

나노입자나 미세입자의 노출을 검출하는 기술에 대해서는 에어로졸 분야에서 많은 연구가 이루어졌다. 1997년 Provder는 particle size distribution(PSD)을 측정하는 다양한 기술들의 장점과 한계점을 정리했다.^[14] 정리된 기술들은 미세 입자 측정을 위하여 현재까지 사용되기는 하지만 나노입자의 노출을 평가하기에는 부족한 부분이 있다. 최근에는 나노입자를 측정할 수 있는 다양한 첨단 장비들이 개발되었다. 2007년에는 aerosol particle mass(APM) 방법과 Differential Mobility Analyzer(DMA)를 이용하여 공기 중에 부양된 나노입자를 측정하는 기술이 발표된 바가 있다.^[15] 2004년에는 광학 현미경 기술을 이용하여 반경 51, 202nm인 PS와 PMMA 나노 입자를 측정하는 기술이 발표되었다.^[16] 이렇게 광학 기술을 이용하여 나노입자들을 검출하는 기술들은 현재 scattering ellipsometry로 발전하여 반도체 공정에서 나노입자들을 검출하는 기술로 활용되고 있다. 2010년에는 탄소나노섬유(carbon nanofiber)를 생산하는 시설에서 Condensation Particle Counter(CPC)와 photometer, diffusion charger등을 이용하여 에어로졸 검지 플랫폼(aerosol sampling platform)을 만든 연구가 있다.^[17] 그림 6과 같이 챔버 내에서 grinding을 하는 경우에 발생하는 나노입자의 PSD를 측정하기 위한 장비를 구축하고 실제 실험을 통하여 측정된 연구 결과

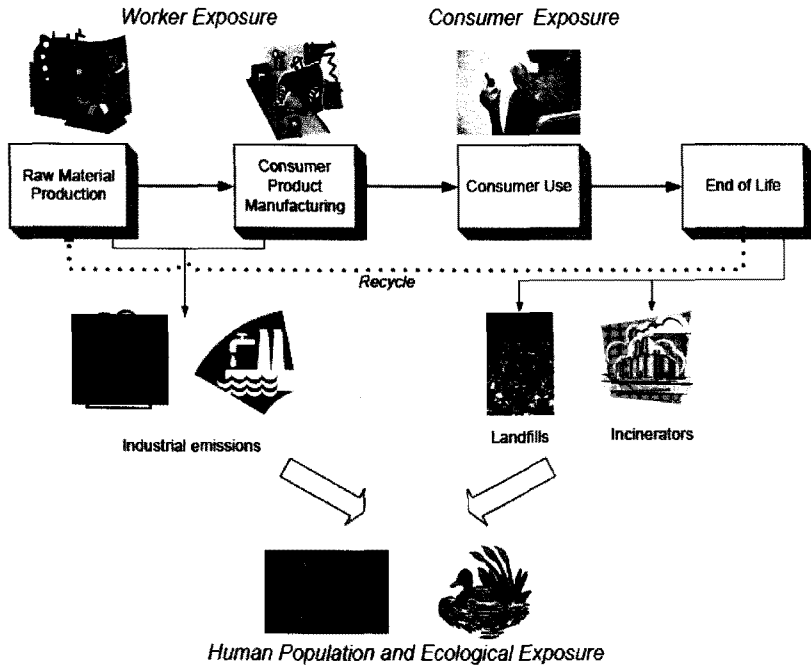


그림 5. 나노제품의 수명 주기에 따른 노출 평가의 필요성^[18]

가 보고된 바가 있으며, Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)와 Aerodynamic Particle Sizer (APS)를 주로 사용하였다.^[18] 이러한 장비 구축 사례는 향후 나노제품의 노출을 평가하는 데에도 매우 유용할 것으로 생각된다. 챔버 내에서 나노제품의 다양한 파손 및 손상 모드에 따라 나노입자를 생성하며, 생성된 나노입자를 실시간으로 검출하는 장비를 구축하는 것이 필요할 것으로 보인다.

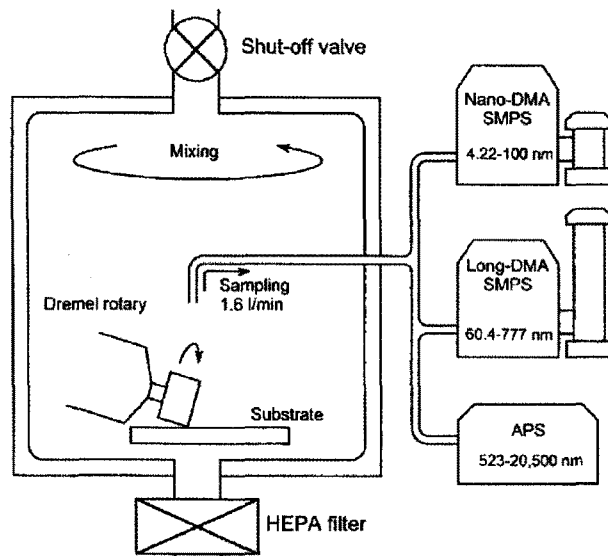


그림 6. Grinding 공정 시에 발생하는 나노입자의 측정 장비 개념도^[19]

현재 나노소재를 이용한 나노제품의 생산이 활발하게 진행되면서 앞서 기술된 노출 측정 장비들을 활용하여 생산 현장에서 나노입자들이 노출되는 정도를 측정한 다양한 연구결과들이 발표되고 있다. 2008년에는 미국에서 탄소 기반의 나노입자를 생산하는 공장에서 공기 중에 부유하는 나노입자의 노출 측정 결과를 보고하였다.^[19] 이들은 light-scattering aerosol photometer, SMPS, CPC, DMA 등의 장비를 이용하여 다양한 측정결과들을 제시하였다. 2008년에는 작업장에서 시간에 따른 나노입자의 변화를 측정한 연구결과가 보고되었으며, 이 연구에서는 백그라운드에 존재하는 에어로졸과 나노입자 사이의 관계를 연구하고 이 둘 간의 상호작용에 대한 모델을 제시하였다.^[20] 2006년에는 실제 엔진 가공 및 조립 공장에서 발생된 입자들에 대한 연구결과가 있다. 이 연구에서는 나노입자에만 초점을 맞춘 것은 아니지만, 실제 산업현장에서 입자의 발생을 평가하고 모니터링하는 연구의 중요성을 나타내고 있다.^[21]

현재 나노제품을 생산하는 기업의 수는 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 첨단 연구용 제품 뿐만 아니라 일상 가전 제품, 생활 용품 등에서 나노제품의 사용이 점차 증가하고 있다. 이러한 나노제품을 생산하는 공장에서는 노출되는 나노소재의 정도를 파악하고 이것이 인체의 건강 및 환경에 미치는 영향을 세심하게 연구할 필요가 있다. 이를 위해서는 생산 현장에서 나노소재의 노출량을 측정하는 측정 장비의 개발, 나노소재의 노출 정도를 정확하게 sampling하기 위한 절차 구축^[22], 나노제품의 사용 중에 발생하는 나노소재의 노출 평가 장비 및 평가 절차의 개발이 필요하다. 이러한 장비 및 평가 절차의 개발을 토대로 정부 차원에서 나노소재별 노출 기준을 설정하고 이것을 제도화하는 일이 필요하다. 나노소재별 노출 기준은 개별 나노소재가 지니는 독성과도 긴밀한 관계를 지니며, 생산 현장에서의 노출 기준 뿐만 아니라 나노제품의 사용자들에게 미치는 노출 기준도 함께 고민할 필요가 있다.

4. 나노 제품의 안전성 설계 기술 동향

나노 제품의 안전성을 설계한다는 것은 다소 생소한 개념이다. 설계 단계에서 제품의 신뢰성을 고려한 design for reliability 같은 개념들이 제시된 바가 있지만, 설계 단계에서부터 나노소재의 위해성을 고려하여 나노 제품의 안전성을 설계한다는 것은 그다지 익숙하지 않은 개념이다. 그러나 실제 산업 현장에서는 나노제품의 개발에서 이러한 개념의 적용이 매우 절실한 상태이다. 예를 들어, 유전 전도체가 필요한 전자 업체에서 전도성 탄소나노튜브의 사용을 고려하고 있다면, 이 업체에서는 탄소나노튜브의 위해성과 노출에 의한 위험으로 인해 제품 상용화에 큰 문제가 발생할 수 있다. 미국 EPA에서는 탄소나노튜브를 이용하는 제품의 경우에는 미국 내에 생산과 수입을 위해서 안전성에 대한 데이터를 요구하기 때문이다.^[3] 나노 제품의 안전성 설계에는 다양한 물성 데이터 및 전산해석 기술이 요구된다. 그림 7에는 나노 제품의 안전성 설계 과정에 대한 단순화된 절차가 나타나 있다. 나노제품을 구성하는 각종 소재와 나노소재의 물성 데이터, 나노소재의 위해성 데이터, 나노소재의 노출기준, 나노제품의 특성 및 나노소재의 노출 예측을 위한 전산해석 기술 등 다양한 기술들이 하나의 플랫폼 형태로 구성되어 나노 제품의 설계에 복합적으로 적용되어야 한다.

나노소재의 노출 및 위해성에 대한 연구 동향은 앞서 기술되었으므로 이 절에서는 나노 제품의 안전성 설계와 관련된 특성 평가와 전산 해석 기술을 살펴보고자 한다. 여러 가지 나노제품 중에서 가장 중요한 형태 중의 하나는 나노입자가 폴리머 및 기타 재료로 구성된 기지 내에 포함되는 나노 복합재의 형태이다. 여기서는 나노 복합재를 중심으로 나노제품의 설계 기술을 검토하고자 한다. 나노 복합재에 사용되는 나노소재로는 현재 탄소나노튜브 및 은나노입자가 가장 널리 사용되고 있다. 나노복합재의 거동을 결정짓는 패러미터에는 여러 가지가 있을 수 있지만 기지 내에 나노소재가 정렬된 형태, 나노소재의 분산도, 나노소재와 기지 사이의 계면 접촉 거동, 나노소재의 표면 개질 등이 중요한 패러미터로서 작용한다.^[23] 나노 복합재는 나노소재의 단순한 부피비보다는 나노소재와의 계면 영역이 매우 중요한 패러미터가 되며, 이러한 특성을 이용하여 나노 복합재 및 나노 제품의 특성을 설계하고, 개선하는 것이 가능하다.^[24] 나노 복합재에서 나노튜브와 나노 platelet간의 비교를 통하여 인터페이스 phase의 영향을 수치적으로



검토한 연구결과가 있다.^[26] 이 연구에서는 인터페이스 영역에서 폴리머 기지 상에 큰 변화가 야기된다는 점과 이것이 폴리머 나노복합재의 거시적인 특성에도 영향을 미치게 된다는 점을 지적하였다. 기존의 복합재와는 달리 나노복합재의 거동 예측 및 나노복합재 기반의 나노제품 설계를 위해서는 이러한 인터페이스 특성을 고려하여 나노 복합재의 거동 예측을 위한 모델을 개발하고, 이를 이용한 제품 설계를 할 필요가 있다.

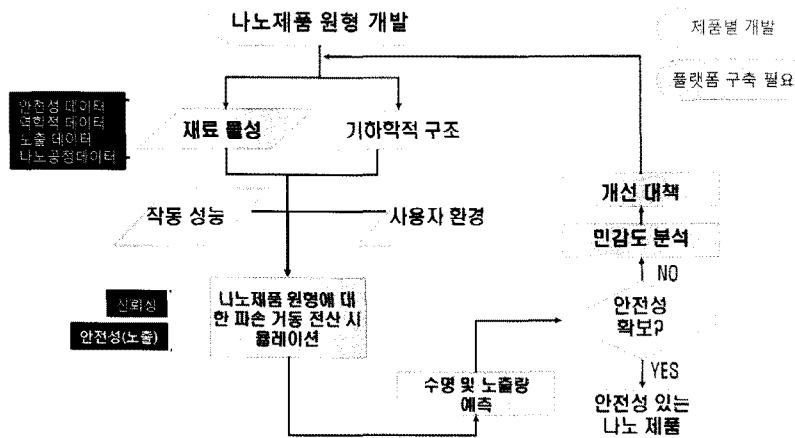


그림 7. 나노제품의 안전성 설계 과정

나노제품 및 나노복합재의 역학적 특성 평가를 위해서는 다양한 측정 기술들이 개발되어왔다. 거대 시험편 (bulk specimen)의 측정에서 사용되는 UTM(Universal Testing Machine)과 함께 나노소재 및 나노스케일 박막 구조물의 측정에 사용되는 나노압입시험기와 미소인장시험기 등을 이용한 역학적 특성 평가 연구가 이루어지고 있다. 그림 8에는 한국기계연구원의 나노역학연구실에서 보유한 나노 구조물의 역학적 물성 평가 장비가 나타나 있다. 그림 8(a)은 연구실에서 자체적으로 개발한 미소 역학 시험 장비이며, 그림 8(b)는 상용 미소 역학 시험 장비가 나타나 있다. 이러한 미소 역학 시험 장비를 이용하여 나노복합재 및 나노제품의 내구성 시험이 이루어지고 있으며, 이러한 내구성 데이터는 나노제품의 파손과 손상에 의한 나노소재 노출 예측에 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 이러한 장비를 이용한 나노제품 특성 평가의 예로는 CNT를 이용한 나노제품에서 쉽게 찾을 수 있다. CNT를 이용한 센서 및 전자부품의 연구에는 CNT의 내구성이 매우 중요하며, 기계적인 변형과 함께 CNT 필름에 발생하는 특성변화와 손상에 대한 정량적인 이해가 필요한 상태이다. CNT를 이용한 strain 센서에 대한 예가 보고된 바가 있으며^[26], 이 연구에서는 CNT의 분산도, 필름 제조 방법 등에 따라 CNT 센서의 특성이 달라짐을 보였고, CNT 스트레인 센서의 민감도와 CNT volume fraction 사이의 모델이 제시되었다.

나노제품 특히 나노 복합재의 전산 모사를 위해서는 기존의 연속체 해석 기법과 분자스케일 해석 기법 간의 긴밀한 연계가 필요하다. 분자스케일 해석 기법으로는 나노 입자의 거동을 정량적으로 모사할 수 있지만, 계산 시간과 비용이 매우 높아서 실제적인 문제에 바로 적용하기가 어렵다. 연속체 해석 기법의 경우에는 산업 현장에서 부딪히는 실용적인 문제에 적용할 수 있을 정도로 대중화되었지만, 나노 입자의 거동을 정량적으로 모사하기에는 어려움이 있다. 이에 따라 분자스케일 해석 기법과 연속체 해석 기법을 잘 융합하여 적절한 계산 비용으로도 나노제품의 거동을 정량적으로 모사할 수 있는 기술들이 연구되고 있다.^[23] 현재 일종의 다중스케일 해석 기법을 적용하여 나노소재와 폴리머 기지로 구성된 나노복합재를 해석하는 연구가 활발하게 진행 중인데, 나노소재는 원자스케일에서 해석하며, 폴리머 기지는 연속체 스케일에서 해석한다. 나노소재와 폴리머 사이의 계면을 모사하는 것이 중요한데, 간단하게는 반데르발스 힘으로 부착된 것으로 모사할 수 있다.^[27] 나노복합재의 경우, 나노소재와 기지 사이의 계면을 모사하는

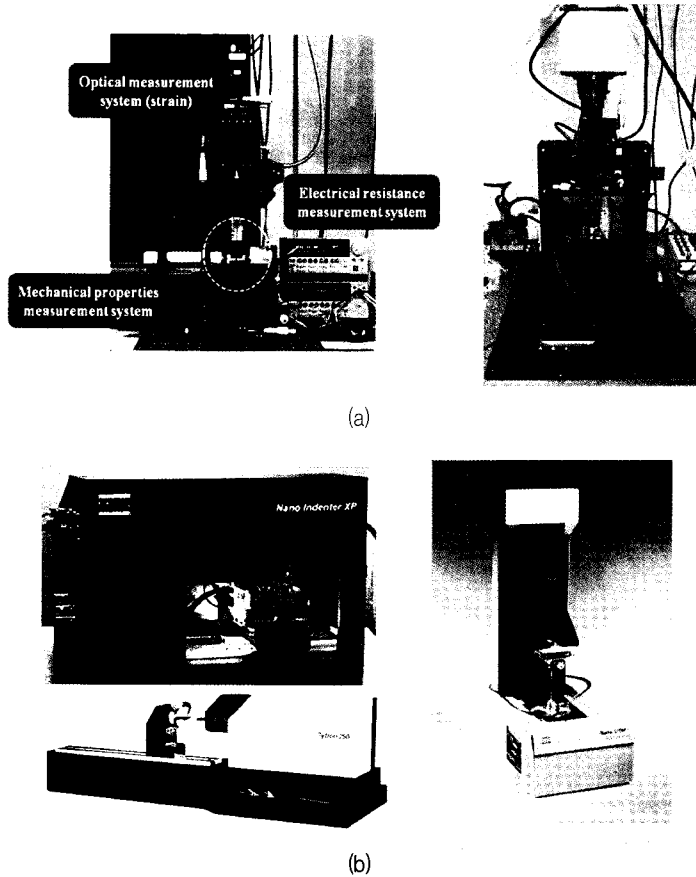


그림 8. 나노소재 및 나노복합재의 역학적 물성 시험 장비. (a) 미소인장시험기와 미소트라이볼로지 시험기, (b) 상용 미소인장시험기와 나노압입시험기

것이 매우 핵심적인 부분으로 여겨지고 있으며, 나노소재의 존재로 인해 발생하는 폴리머 기지의 변화가 나노복합재의 거시적인 거동을 크게 좌우하는 것으로 생각된다. 이에 따라 매우 소량의 나노입자를 투입하여도 나노복합재의 거동에는 매우 큰 변화가 일어나는 결과가 종종 야기되며, 전산 해석에 있어서는 이러한 계면의 거동을 어떻게 정량적으로 예측할 수 있을 지가 관건이 된다. 현재까지 제시된 나노복합재의 해석 방법을 살펴보면, 나노복합재의 전산 해석을 위해서는 그림 9와 같이 분자스케일 모델과 연속체 스케일 모델 간의 하이브리드 접근 방법 및 다중 스케일 접근 방법이 필요한 것으로 생각되며,^[2] 전산해석을 위한 도구로서 나노복합재의 3차원 모델링 및 가시화 (visualization)에 사용되는 도구의 개발이 필요한 상태이다.^[28] 나노복합재의 거동을 정량적으로 이해하고 예측하는 것은 향후 나노 복합재 및 나노제품 설계에 매우 중요하며, 가까운 장래에는 나노복합재의 역학적인 거동을 측정하는 기술과 접목되어 보다 정확한 예측 결과를 산출하는 것이 필요하다.

안전성 설계를 위해서는 나노제품의 손상과 그로 인한 나노소재의 노출에 대한 정량적인 예측이 필요하다. 나노제품(주로 나노복합재)의 손상에 대해서는 비교적 많은 연구가 진행되었고, 전산해석 및 실험 방법에 대한 관심이 증가하는 추세이다. 그러나 손상과 그에 따른 나노소재의 노출 사이의 관계는 아직 연구의 초기단계에 있으며, 보다 많은 관심과 연구개발이 필요하다. 먼저 나노제품의 파손모드와 손상에 대한 실험적 연구, 이러한 손상에 의한 나노소재 노출 평가 연구, 전산 해석을 위한 손상-노출 연계 모델의 개발 등이 시급히 진행되어야 한다.

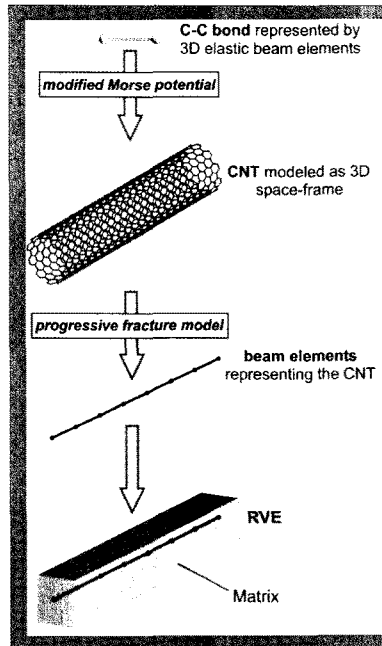


그림 9. 나노복합재의 전산 해석 모델 생성의 예^[11]

5. 요약 및 제언

현재 나노제품의 안전성에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며 나노소재 레벨에서의 독성 연구, 작업장과 사용자, 폐기 단계에서의 노출 연구, 나노제품의 전산해석, 특성 평가, 설계에 대한 연구들이 다양하게 진행되고 있다. 이 분야는 다른 나노기술 분야와 마찬가지로 다분야 간의 협력이 매우 활발하며, 이러한 협력을 통한 다양한 시너지 효과가 기대되고 있다. 현재 나노소재의 위해성 유무에 대해서는 서로 상반되는 연구결과가 다수 보고되고 있으며, 각각의 실험 조건과 나노소재 준비 단계에 따라 달라질 수 있으므로, 총체적인 결론을 내리기 어려운 실정이다. 나노소재의 독성에 대한 보다 깊은 이해를 위해서는 개별연구 그룹에서 수행하는 특정 나노소재에 대한 독성 연구와 함께 정부주도의 체계적이고, 종합적인 나노소재의 독성 연구가 필요하다. 노출연구 분야에서는 지난 수십년간 다양한 크기 분포를 지니는 입자 및 나노 입자에 대한 측정 기술이 확보된 상태에 있으며, 상용화된 측정 장비도 다수 존재하고 있다. 실제 나노제품의 생산 공장에서 작업자들에게 노출되는 나노입자의 측정결과들이 보고되고 있으며, 앞서 제시된 나노소재의 위해성 정보를 고려하여 적절한 노출기준을 설정하는 단계가 아직 남아있다. 탄소나노튜브와 같이 구형이 아닌 나노소재에 대해서는 실시간 노출평가를 위한 기술개발의 여지가 남아 있으며, 이에 대한 연구개발이 진행 중이다.

나노제품의 상용화를 위해서는 나노소재의 위해성 정보와 함께 나노제품의 거동을 측정하고, 전산 해석을 통하여 손상과 나노소재 노출을 예측하며, 이를 기반으로 나노제품을 다양한 형태로 설계하는 기술이 필요하다. 나노제품의 가장 기본적인 형태인 나노복합재에 있어서도, 이러한 기술은 아직 초보적인 수준이다. 나노제품의 안전성 설계 및 신뢰성 향상 기술은 향후 나노제품의 상용화에 가장 큰 걸림돌이 될 수 있는 부분이므로, 이에 대한 집중적인 연구개발 투자가 필요한 상태이다. 특히 기업에서는 이러한 설계 및 신뢰성 기술에 대한 투자가 어려운 실적이므로, 정부주도의 집중적인 연구개발이 필요하며, 연구개발의 결과를 데이터베이스, 설계 소프트웨어, 안전성 평가 장비 등의 형태로 기업이 쉽게 이용할 수 있도록 하는 연구가 필요하다. 설계 단계에서 나노소재의 위해성을 고려할 필요가 있

는지에 대해서는 아직 일반적인 공감대가 형성되지 못한 상태이지만, 가까운 장래에 그 필요성이 대두될 것으로 전망된다. 나노소재의 위해성은 매우 복잡한 양상을 지니며, 나노제품의 내부에 들어가서 이러한 나노소재의 위해성이 어떻게 사용자들에게 영향을 줄 지에 대한 문제는 매우 심각한 사회문제를 야기할 수 있다. 설계 단계에서 나노제품 내부에 사용된 나노소재의 위해성을 검토할 수 있다면, 나노제품의 상용화에는 큰 유익이 있을 것으로 판단된다. 다만, 이러한 위해성을 설계단계에서 검토하는 비용과 시간이 기업에게 얼마나 큰 부담으로 작용할 지에 실효성이 달려 있다고 할 수 있다. 정부 주도로 이러한 위해성을 설계단계에서 검토할 수 있는 기술을 기업에 제공한다면 향후 나노산업을 선점하고 주도하는 데에 큰 도움이 될 것은 분명해 보인다.

✻ 참고 문헌

- [1] H. Hua, L. Onyebuekea, and A. Abatanb, "Characterizing and Modeling Mechanical Properties of Nanocomposites—Review and Evaluation," *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, vol. 9, 2010, pp. 275–319.
- [2] L.S. Schadler, L.C. Brinson, and W.G. Sawyer, "Polymer nanocomposites: a small part of the story," *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 59, 2007, pp. 53–60.
- [3] O.O. Lockard and C.M. Zygmunt, "Environmental and Toxic Tort ADVISORY," Dec. 2009.
- [4] "www.epa.gov."
- [5] N. Lewinski, V. Colvin, and R. Drezek, "Cytotoxicity of Nanoparticles," *Small*, vol. 4, 2008, pp. 26–49.
- [6] M.E. Samberg, S.J. Oldenburg, and N.A. Monteiro-Riviere, "Evaluation of Silver Nanoparticle Toxicity in Skin in Vivo and Keratinocytes in Vitro," *Environmental Health Perspectives*, vol. 118, 2009, pp. 407–413.
- [7] W. Lu, D. Senapati, S. Wang, O. Tovmachenko, A.K. Singh, H. Yu, and P.C. Ray, "Effect of surface coating on the toxicity of silver nanomaterials on human skin keratinocytes," *Chemical Physics Letters*, vol. 487, 2010, pp. 92–96.
- [8] O. Bar-Ilan, R.M. Albrecht, V.E. Fako, and D.Y. Furgeson, "Toxicity Assessments of Multisized Gold and Silver Nanoparticles in Zebrafish Embryos," *Small*, vol. 5, 2009, pp. 1897–1910.
- [9] P. Dua, S. Jeong, S. Lee, S. Hong, S. Kim, and D. Lee, "Evaluation of Toxicity and Gene Expression Changes Triggered by Quantum Dots," *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 31, 2010, pp. 1555–1560.
- [10] S.T. Yang, X. Wang, G. Jia, Y. Gu, T. Wang, H. Nie, C. Ge, H. Wang, and Y. Liu, "Long-term accumulation and low toxicity of single-walled carbon nanotubes in intravenously exposed mice," *Toxicology letters*, vol. 181, 2008, pp. 182–189.
- [11] J. Lee, G.D. Lilly, R.C. Doty, P. Podsiadlo, and N.A. Kotov, "In vitro Toxicity Testing of Nanoparticles in 3D Cell Culture," *Small*, 2009, pp. NA–NA.
- [12] C.F. Jones and D.W. Grainger, "In vitro assessments of nanomaterial toxicity," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 61, 2009, pp. 438–456.
- [13] "epa-nanotechnology-whitepaper-2007.pdf."
- [14] T. Provder, "Challenges in particle size distribution measurement past, present and for the 21st century," *Progress in Organic Coatings*, vol. 32, 1997, pp. 143–153.
- [15] A.D. Maynard, B.K. Ku, M. Emery, M. Stolzenburg, and P.H. McMurry, "Measuring particle size—



dependent physicochemical structure in airborne single walled carbon nanotube agglomerates,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, 2006, pp. 85–92.

[16] C. Finder, M. Wohlgemuth, and C. Mayer, “Analysis of particle size distribution by particle tracking,” *Particle & Particle Systems Characterization*, vol. 21, 2004, pp. 372–378.

[17] D.E. Evans, B.K. Ku, M.E. Birch, and K.H. Dunn, “Aerosol Monitoring during Carbon Nanofiber Production: Mobile Direct–Reading Sampling,” *Annals of Occupational Hygiene*, 2010.

[18] A.T. Zimmer, “Investigation of the Aerosols Produced by a High–speed, Hand–held Grinder Using Various Substrates,” *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 46, 2002, pp. 663–672.

[19] B. Yeganeh, C.M. Kull, M.S. Hull, and L.C. Marr, “Characterization of airborne particles during production of carbonaceous nanomaterials,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, 2008, pp. 4600–4606.

[20] M. Seipenbusch, A. Binder, and G. Kasper, “Temporal evolution of nanoparticle aerosols in workplace exposure,” *Annals of occupational hygiene*, vol. 52, 2008, p. 707.

[21] T.M. Peters, W.A. Heitbrink, D.E. Evans, T.J. Slavin, and A.D. Maynard, “The mapping of fine and ultrafine particle concentrations in an engine machining and assembly facility,” *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 50, 2006, p. 249.

[22] D.H. Brouwer, J.H. Gijbbers, and M.W. Lurvink, “Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies,” *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 48, 2004, p. 439.

[23] K. Lau, C. Gu, and D. Hui, “A critical review on nanotube and nanotube/nanoclay related polymer composite materials,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 37, 2006, pp. 425–436.

[24] R.A. Vaia and H.D. Wagner, “Framework for nanocomposites,” *Materials Today*, vol. 7, 2004, pp. 32–37.

[25] H. Liu and L.C. Brinson, “Reinforcing efficiency of nanoparticles: A simple comparison for polymer nanocomposites,” *Composites Science and Technology*, vol. 68, 2008, pp. 1502–1512.

[26] G.T. Pham, Y.B. Park, Z. Liang, C. Zhang, and B. Wang, “Processing and modeling of conductive thermoplastic/carbon nanotube films for strain sensing,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, 2008, pp. 209–216.

[27] C. Li and T.W. Chou, “Multiscale modeling of compressive behavior of carbon nanotube/polymer composites,” *Composites science and technology*, vol. 66, 2006, pp. 2409–2414.

[28] N. Chawla, R.S. Sidhu, and V.V. Ganesh, “Three–dimensional visualization and microstructure–based modeling of deformation in particle–reinforced composites,” *Acta Materialia*, vol. 54, 2006, pp. 1541–1548.



김재현

· 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부
 나노역학연구실 선임연구원
 · 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
 · E-mail : jaehkim@kimm.re.kr



이학주

· 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부
 나노역학연구실 책임연구원
 · 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
 · E-mail : hjlee@kimm.re.kr



최병익

· 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부
 나노역학연구실 책임연구원
 · 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
 · E-mail : choibi@kimm.re.kr