

나노물질의 전과정 평가

박준수 · 광병규 · 배은주 · 이정진 · 김영훈¹ · 최경희² · 이종협[†]

서울대학교 화학생물공학부 화학공정신기술 연구소

¹광운대학교 화학공학과, ²국립환경과학원

Life Cycle Assessment of Nanomaterials

Junsu Park, Byoung Kyu Kwak, Eunjoo Bae, Jeongjin Lee, Younghun Kim¹,
Kyunghee Choi², and Jongheop Yi[†]

*School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University,
Seoul 151-742, Korea*

¹*Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea*

²*National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon 404-708, Korea*

Received January 21, 2010/Accepted March 16, 2010

As increasing use of nanoproducts including engineered nanomaterials, it is expected that the exposure of nanomaterials to the ecosystem increases. However, few methodology has been reported to evaluate impacts of nanoparticles on human health and environment. The potential impacts of nanoproducts can be assessed in terms of life cycle assessment (LCA). LCA is the systematic analysis of the resource usages and emissions over the life time from the primary resources to the moment of disposal. In this study, LCA methodology of nanomaterials and nanoproduct was proposed based on international standards (ISO14040-14044). Results of this study suggested that data on ecotoxicology and environmental fate and physicochemical characteristic of nanomaterials should be identified. In addition, database should be established on these preliminary data. Sustainable development of nanotechnology will be accomplished after the evaluation of environmental impact via LCA of nanomaterials.

Key words: Nanomaterials, Nanoproduct, Nanotechnology, Life cycle assessment, LCA

1. 서 론

나노기술, 나노물질 및 나노제품은 산업적으로 큰 잠재성을 가지고 있고 급속하게 발전할 혁신적인 분야이다. 영국왕립협회 및 공학아카데미에¹⁾ 따르면 나노물질은 전세계적으로 향후 2011~2020년 사이에 연간 생산량이 58,000톤에 달할 것으로 예상하였고 미국 국립과학재단²⁾은 2020년까지 나노기술에 의해 전세계 경제에 대한 1조 US달러 정도의 영향과 2백만명 고용효과를 예상했다. 그러나 나노제품에는 환경과 인체건강에 대한 수많은 불확실성이 존재한다. 나노물질을 유용하게 만드는 물질이라도 상황에 따라 인간과 환경에 유해한

영향을 미칠 수 있다. 몇몇 나노물질은 세포막(cell membrane)³⁾이나 혈액뇌관문(blood-brain barrier)⁴⁾을 뚫고 투과할 수 있다. 이러한 물성은 질병치료를 위한 약물전달체로서 사용될 수 있는 장점을 갖지만, 의도하지 않는 부작용을 낳을 수 있다. 시장에 출시되는 나노물질을 함유하는 제품들의 수가 점점 늘어남에 따라 인체와 환경으로 유입되는 나노물질의 양도 점점 늘어날 것이다. 나노물질의 유입에 의한 인간과 환경의 영향을 평가하고 이를 최소화하는 노력은 안전한 나노기술의 발전을 위해 필수적이다.⁵⁻⁷⁾ 그러므로 전과정 평가와 같은 포괄적인 평가도구를 이용하여 나노물질이 환경과 건강에 미치는 영향을 분석, 평가, 이해 그리고 관리하

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-(0)2-880-7438, Fax: 82-(0)2-885-6670, E-mail : jyi@snu.ac.kr

는 것이 필요하다.¹⁾ 나노제품의 전과정평가는 나노물질을 포함하고 있는 제품이 인체건강과 환경에 미치는 잠재적 부작용을 파악하고 이를 최소화하는 예방법을 개발하기 위해 실행한다. 전과정평가의 결과는 작업장에서의 보건과 안전, 소비자 보호 및 환경보호와 관련된 규정과 법률제정을 위한 자료로 활용될 수 있다. 나노제품의 환경적 위해성과 이익을 초기에 조사하는 것은 나노기술의 안전하고 지속적인 발전을 위한 정책수립에 도움이 된다. 산업계는 전과정 평가결과를 이용하여 제품디자인, 마케팅, 연구개발 및 제조과정에서 나노물질과 나노기술을 선정할 때 중요한 참고자료로 사용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국제표준화협회(ISO)에 의해 개발된 일반적인 전과정평가(ISO 14040:2006, ISO14044:2006) 형식에서 나노물질과 나노제품에 대한 전과정평가를 실행하기 위해 각 단계별로 고려해야 할 사항을 제시하였다. 또한 현재까지 보고된 나노물질 및 나노제품에 대한 전과정평가 연구결과를 조사하여 나노물질 전과정평가의 격차를 분석하고 향후 나노물질 전과정평가를 실행하기 위한 연구방향을 제시하였다.

2. 나노물질의 전과정평가

2.1. 전과정평가의 구성

전과정평가는 제품마다 공정 또는 서비스의 전과정(원료수집, 제조, 가공, 수송, 유통, 사용, 재활용 및 폐기)동안에 소모되고 배출되는 에너지와 물질의 양을 정량화하고 이들이 인체와 환경에 미치는 총체적인 영향을 평가하는 기법이다.⁸⁾ 전과정평가의 구성요소는 목적 정의 및 범위설정, 목록분석, 영향평가, 해석의 4단계로 구성된다. 전과정평가의 목적, 목적대상 및 대상제품을 설정하는 것이 목적정의이다. 범위설정은 제품 시스템 경계, 기능단위, 자료기준 등을 설정하는 것이다. 목록분석결과를 통해 제품시스템내의 각 단위공정에서 제품까지의 투입물과 산출물이 기여도에 따라 계산되고, 이를 통해 제품 전과정에서 발생하는 환경부하 정보를 정량적으로 산출한다. 영향평가 단계에서는 제품 시스템의 환경부하를 토대로 환경영향이 평가된다. 해당 영향범주에 상응인자를 적용하여 환경영향을 정량화한다. 이 과정을 특성화라고 한다. 정규화 및 가중치부여를 수행하여 환경영향에 대한 정보를 더 체계적으로 정리한다. 해석은 서로간의 완전성, 민감도 및 일관성 같은 다양한 측면에서 전과정 목록분석과 영향평가 결과를

분석한다. 또한 제품 시스템에서 환경적으로 큰 기여도를 갖고 있는 주요 인자를 규명한다.

2.2. 목적 및 범위설정

목적정의와 범위설정 단계에서는 전과정평가의 목적을 정의하고 연구의 개시자, 실행자, 관계자 및 연구결과와 사용자들을 명확하게 제시한다. 시간적, 지역적, 기술적 적용범위를 설정함으로써 전과정평가 연구의 특성을 결정하고, 기능, 대안, 기준흐름 및 기능단위를 정의한다. 목적정의와 범위설정에서 가장 중요한 것은 제품이 제공하는 서비스 및 성능의 주된 기능을 정량적으로 제시하는 기능단위(functional unit)의 선정이다.⁹⁾ 매우 새로운 기능을 갖는 나노제품의 경우 동일한 기능을 갖는 비교제품을 찾는 것은 어려운 일이다. 예를 들어 열룩방지용 나노코팅 바지의 경우, 기존 바지와 비교분석을 통해 착복과 세척 등에 대한 상세한 비교가 가능하지만, 나노물질을 이용한 의약품과 같은 경우 기능적으로 비교할 수 있는 의약품이 존재하지 않기 때문에 비교평가의 수행이 어렵다.¹⁰⁾

2.3. 목록조사

목록조사는 평가 대상이 되는 시스템과 관련된 자원과 에너지의 사용 및 환경 배출물 항목들의 양을 기능단위 생산에 따른 투입물 및 산출물의 양으로 환산하는 단계이다. 전과정평가에서의 흐름은 시스템 투입물과 산출물이 환경 간섭으로 전환될 때까지를 말한다. 환경간섭은 경제(=생산시스템)와 환경 사이의 경계를 가로지르는 흐름이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 생산 시스템과 환경 및 기본흐름과 기타흐름의 구분을 위해 경제-환경 시스템 경계는 명확하게 정의되어야 한다.⁹⁾

공정순서도를 사용하여 시스템을 기술하는 것은 시스템을 이해하는데 도움이 된다. 순서도는 모든 주단위 공정의 개요와 그들의 상호관계를 보여준다. 전과정의 각 단계의 통합과정에서 초기 순서도의 초안을 작성한다. 기준공정, 인접공정, 주요 물질의 생산공정 및 폐기 공정부터 시작한다. 초기 순서도부터 시작하여 자료수집단계에 따라 계속해서 자료를 보충하여 작성한다.

기존의 목록분석이 질량을 기준으로 하는 반면 나노물질과 나노제품의 경우에는 추가적인 정보(예: 화학적 조성, 입자크기, 모양, 결정구조, 표면적)가 필요하다. 전과정동안 배출되는 나노입자들에 대한 영향평가를 위해서는 추가적인 변수들이 중요하게 작용할 것이다.¹⁰⁾ 나노물질의 독성에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 화

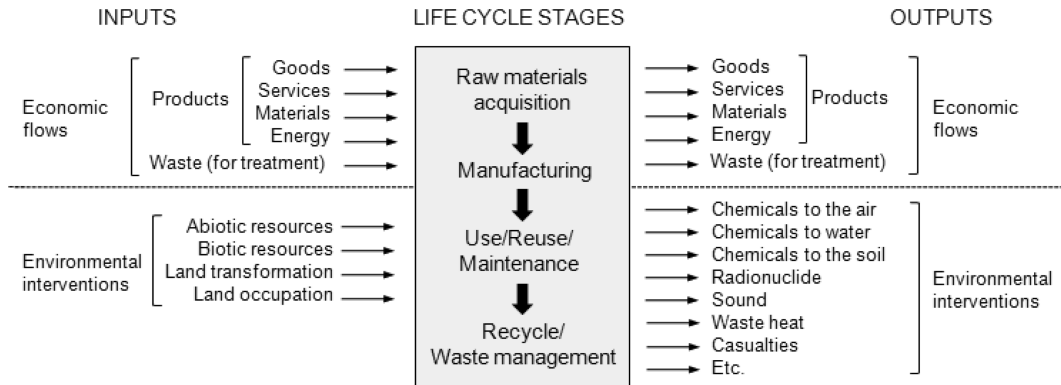


Fig. 1. Basic structure of a unit process (or product system) in terms of its inputs and outputs.⁹⁾

학성분, 입자크기, 모양, 형태비율, 결정구조, 표면적, 표면화학, 전하, 용해도 및 흡착물성 등이 있다. 나노물질이 순수한 상태인지 혼합물의 형태인지 또는 전과정동안 모양이나 형태를 바꾸는 지에 대한 정보 또한 중요하다. 목록에서 나노물질의 이러한 추가적인 특성들이 기술되어야 할 것이다. Fig. 2에서 보듯이 나노물질은 화학적 물성과 구조적 물성에 따라 구분될 수 있다.¹¹⁾ 기본적인 나노물질의 조성은 유기물(텐드리머, 고분자 등), 무기물(금속, 금속산화물 등), 탄소류(탄소나노튜브, C₆₀ 등) 혹은 이들 물질의 화합물로 구성된다. 만약 표면전하의 조절과 다른 화학반응의 유도를 목적으로 표면이 개질되었다면 더 복잡한 분류가 가능하다. 구조적 물성은 다양한 형태(구형, 막대형, 튜브형, 고리형 등)로 구분되고, 이는 제조방법에 따라 달라진다. 궁극적으로, 환경으로 나노물질들이 방출되면 위에서 언급된 다양한 물리화학적 특성들이 나노물질의 이동과 다른 물질과의 상호작용에 영향을 미치기 때문에 독성 효과에 기여하는 바가 클 것이다.

나노물질의 제조기술은 하향식(top down) 혹은 상향식(bottom up) 접근법으로 분류된다. 하향식 제조는 나노물질의 생성 개시물(starting block)로서 벌크한 물질을 사용한다. 반도체의 생산에서 사용되는 리쏘그래피, 정밀한 표면을 생성하기 위한 에칭 그리고 금속나노입자를 만들기 위한 분쇄공정이 예이다. 상향식 제조는 분자수준에서부터 나노물질을 제조하는 접근법이다. 이들은 화장품, 연료첨가제의 제조반응, 자가조립 디스플레이 화면 혹은 필터 카트리지의 제조 등에 사용되는 최신기술이다. 그 중 화학침전법이나 리쏘그래피에서 사용되는 액상공정은 용매나 액체시약을 사용한다. 분쇄(attrition), 레이저 삭마(ablation), 증기증착(vapor deposition), 열분해(pyrolysis) 그리고 플라즈마 아크 방전법(plasma arc discharge)은 건조공정에 속한다. 여러 가지 공정은 각각 전체 환경이나 독성에 대하여 영향을 미칠 수 있다. 에칭이나 화학적 침전법 같은 액상공정의 경우 처리해야 하는 추가적인 폐약품이 생성된다. 이러한 추가적인 폐약품의 처리 때문에 지구 온난화를

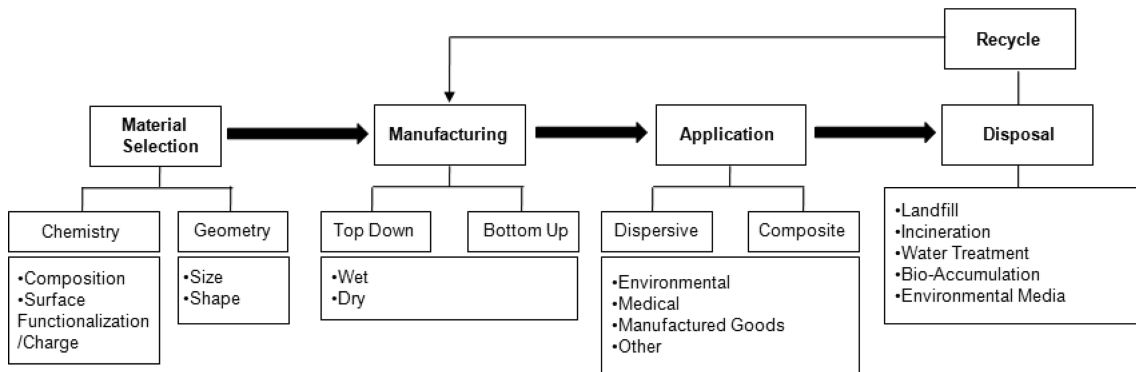


Fig. 2. Choices associated with a nanotechnology throughout its life cycle make application of life cycle assessment.¹¹⁾

유발할 수 있는 전력소비의 증가뿐만 아니라 폐처리설비로 인한 토지사용관련 비용이 증가될 것이다. 또한 에칭을 위한 화학약품들이 일반적인 화학약품과 비교하여 작업자들에게 큰 독성을 제공할 수 있다.

사용과정에서 나노물질은 환경, 의료용 소비재 및 다양한 활용범위(건축자재, 전자제품 등) 내에서 분산된 형태 혹은 혼합물 형태로 사용된다. 분산된 형태의 나노물질은 나노크기의 물성을 유지하며 방출되었을 때 이동성과 반응성이 크다. 독성저감을 위해 합성된 형태로 제조된 나노물질은 혼합체가 파괴되지 않는 이상 인간이나 환경에 영향을 미치지 않지만, 폐기 후에 문제가 발생할 것이다. 나노물질의 폐기시 매립, 소각 혹은 수처리를 거친다. 이러한 잠재적 노출이 나노물질독성과 관련된 큰 우려를 낳고 있다. 사용이 끝난 나노물질의 재활용은 원료 절감과 환경오염 방지에 도움이 된다. 그러나 이러한 재활용은 현실적으로 제약이 많다. 몇몇 물질들은 사용하는 동안 의도적이던지(예: 가솔린속 나노첨가제) 의도적이지 않던지(예: 운전 중에 배출되는 타이어 속 나노물질) 배출될 것이다. 특히 이들이 상태의존적(예: 날씨나 운전자의 운전습관에 의존할 때) 이라면, 정확한 배출량은 구하기가 어렵다.⁷⁾ 사용 후 폐기되는 나노물질의 물성 또한 아직까지 불분명하다. 예를 들면, 소각장과 쓰레기 더미 속에서 나노물질이 다른 물질과 어떻게 반응할지에 대해서 불명확하다. 그러나 이러한 자료들은 전과정평가를 위해 필요하다.

2.4. 영향평가

영향평가에서는 해석범주를 선정하고, 각 범주별로 투입물과 산출물을 분류하여 각 공정에서 발생하는 환경부하를 정량적으로 나타낸다. 분류화(Classification)는 목록분석에서 도출된 항목들을 해당 영향범주로 분류하는 과정이다. 각각의 영향범주에 분류된 항목들의 영향크기를 파악하기 위하여 특성화 과정이 필요하다. 특성화(Characterization)는 영향범주에 분류된 항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 과정이다. 정규화(Normalization)는 각 영향범주간의 상대적 중요성에 대한 명확한 정보를 얻기 위해 실행한다. 각 영향범주들이 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 영향범주 간에 상대적인 중요도를 결정하는 과정이다. Table 1에 특성화 모델링 기법 중 EDIPO3 방법에서 사용된 정규화요소와 가중치 요소를 나타내었다.¹²⁾

기존의 영향범주가 나노물질과 나노제품의 평가에 적용하는데 특별한 문제점은 없다.¹⁰⁾ 질량농도에 기반을

둔 기존의 독성자료는 표면적, 화학성분, 입자크기 및 모양 같은 다른 특성과 연관되어 있는 나노물질에 적용되지 않는다. 나노물질은 배출된 후 구조적변형이 일어날 수 있기 때문에 물리적 기작에 따른 독성을 어떻게 다룰지를 고민해야 한다. 나노입자의 물성에 기반을 둔 경로, 노출모델 및 물리기반 약물동력학 모델(PBPK)은 노출을 예상하는데 도움이 될 것이다. 현재 인체에 대한 나노물질과 나노제품의 잠재적 독성영향을 명확하게 밝히기 어렵다.

2.5. 해석

해석은 영향평가의 결과를 통해 환경적 취약점 및 이점을 파악하고 환경영향을 감소시키는 방안을 제시하는 단계이다. 가정, 방법론, 모델링 기법 및 자료가 연구목적 및 범주와 관련이 있는지 확인하는 일관성 검사(Consistency check)후 모든 자료가 이용가능하고 완전한지를 확인하는 완성도 검사(Consistency check)를 거쳐 다양한 요소가 결과에 미치는 기여도(Contribution)를 계산한다. 이러한 기여도는 대개 전체의 퍼센트로서 나타난다. 민감도 분석(Sensitivity analysis)은 결과의 정확성을 검증하기 위해 도입된다. 불확실성과 민감도분석은 불완전하고 불확실한 생산 특성을 갖는 제품의 경우에 꼭 실행해야 한다. 개선평가의 마지막 단계에서 전과정평가를 통해 얻어진 자료와 해석을 통해 얻어진 결과들을 바탕으로 결론과 권고사항을 결정한다. 나노제품의 전과정 개선평가는 기존제품의 개선평가와 크게 다르지 않다. 전과정평가의 개선평가에서 많은 분야(산업계, 학계, 정부)의 이해관계자를 활용하는 방법론이 요구된다.

3. 사례연구

Table 2은 문헌조사를 통해 확인된 나노제품의 전과정평가 연구들을 목록화한 것이다. 미국환경보호국(EPA)에서 실행한 「나노기술의 전과정평가 프로젝트」¹³⁾를 통해 Llyod 연구팀이 자동차 판넬 속 클레이-폴리프로필렌 나노합성물¹⁴⁾과 자동차 촉매 속 백금금속 나노입자¹⁵⁾의 전과정평가를 실시한 이후로 몇몇 연구그룹에서 나노물질 및 나노제품에 대한 전과정평가에 대한 연구결과를 보고하였다. 나노물질의 환경영향을 이해하는데 문제점의 하나는 물질의 특성이다. 같은 나노물질이라고 해도 제조방법에 따라 순도(계면활성제 혹은 금속촉매)와 균일성(길이, 지름 및 전도도)에 차이가 있어

Table 1. EDIP03 normalization and weighting factors: global and regional impact categories

Impact category	Normalization reference		Weighting factor	Reference year	Reference region
	Unit				
Environmental impacts					
Global					
Global warming	Kg CO ₂ -eq/pers/yr	8.70E+03	1.1	1994	World
Ozone depletion	Kg CFC-11-eq/pers/yr	0.103	63	1994	World
Regional and local					
Photochemical ozone					
Formation-vegetation	m2.ppm.hr/pers/yr	1.40E+05		1995	EU-15
Photochemical ozone					
Formation-human health	pers.ppm.hr/pers/yr	10		1995	EU-15
Acidification	m2/pers/yr	2.20e+03		1990	EU-15
Terrestrial eutrophication		2.10E+03			
Aquatic eutrophication					
	kg NO ₃ ⁻ -eq/pers/yr	58		1995	EU-15
- N-equivalents	kg N-eq/pers/yr	12		1995	EU-15
- P-equivalents	kg P-eq/pers/yr	0.41		1995	EU-15
Ecotoxicity					
- water acute	m ³ water/pers/yr	2.91E+04	1.1	1994	EU-15
- water chronic	m ³ water/pers/yr	3.52E+05	1.2	1994	EU-15
- Soil chronic	m ³ soil/pers/yr	9.64E+05	1	1994	EU-15
Human toxicity					
- via air	m ³ air/pers/yr	3.06E+09	1.1	1994	EU-15
- via water	m ³ water/pers/yr	5.22E+04	1.3	1994	EU-15
- via soil	m ³ soil/pers/yr	1.27E+02	1.2	1994	EU-15
Waste					
- Bulk waste	kg/pers/yr	1350	1.1	1991	Denmark
- Hazadous waste	kg/pers/yr	20.7	1.1	1991	Denmark
- Slag and ashes	kg/pers/yr	350	1.1	1991	Denmark
- Nuclear waste	kg/pers/yr	0.035	1.1	1989	Sweden

이러한 나노물질의 특성과 제조방법에 대한 이해가 필요하다. 이런 의미에서 나노물질의 제조방법에 따른 전과정평가는 중요하다. Stark 연구팀은 산화나노입자의 제조를 위한 액상공정과 기상공정을 비교하였고 플라즈마공정, 화염합성법 및 액상기반 침전공정이 명확한 차이가 있음을 보였다.¹⁶⁾ 비교적 간단한 공정이지만 건조공정은 다단계의 액상공정보다 훨씬 큰 에너지소비가 요구되었다. Isaacs 연구팀은 단일탄소나노튜브의 아크방전법(Arc ablation), 화학증기증착(Cheical Vapor deposition, CVD) 및 고압 CO 제조공정(HiPco)을 환경영향측면에서 비교하였다.¹⁷⁾ 공정별로 실시한 전과정 평가 연구들은 나노물질이 인체와 환경에 미치는 영향에 대한 자료의 부족으로 정확한 결론을 내지 못하고 있다. 이러한 경향은 최근 발표된 전과정 평가연구들에서 보다 구체적으로 언급되고 있다. Rose 연구팀은 폴

리프로필렌/규산염(silicate) 나노화합물이 포장용 비닐, 농업용 비닐, 차체판넬 제조에 사용될 때와 기존 물질(예: LDPE)로 제조되었을 때와의 환경영향 및 비용을 전과정에 걸쳐 비교하였다.¹⁸⁾ 폴리프로필렌 나노화합물의 사용은 원료물질량의 감소측면에서 기존의 물질에 비해 환경적인 이점이 있을 수 있다고 결론을 냈지만 나노화합물의 독성효과에 대한 평가를 제외하고 이에 대한 연구가 필요함을 언급하였다. Hassn 연구팀은 공기정화를 위해 사용되는 나노 산화티타늄(TiO₂) 도료 코팅제의 전과정평가를 실행하였다.¹⁹⁾ 산화티타늄은 전체적으로 산성화, 부영양화, 대기오염물, 스모그 생성의 주요 환경범주에서 긍정적인 역할을 한다고 예상하였다. 그러나 이 연구에서 산화티타늄(TiO₂)의 정확한 물질성이 분석되지 않았고 인체건강 및 환경독성평가에 대한 자료를 활용하지 않았다. Bakshi 연구팀은 철을 함

Table 2. Summary of conducted life cycle assessments of nanotechnology¹²⁾

Reference	Nanomaterial/ Nanoproduct	Assessed Stage	Results
Lloyd et al. 2003 ¹⁴⁾	Clay-Polypropylene Nanocomposites	Manufacturing, Use	Although the manufacturing cost is higher, potential benefits in reducing energy use and environment discharges by nanocomposite design.
Lloyd et al. 2005 ¹⁵⁾	Platinum-group metal (PGM) nanoparticles in automotive catalysts	Manufacturing, Use	Nano-scale PGM would decrease energy consumption, improve environmental quality, and contribute to sustainable resource usage.
Osterwalder et al. 2006 ¹⁶⁾	Titania(TiO ₂), Zirconia(ZrO ₂)	Manufacturing	The production of oxide nanoparticles by dry processes require bigger energy consumption than that by wet processes
Roes et al. 2007 ¹⁷⁾	Polypropylene/layered Silicate Nanocomposite	Manufacturing	The use of nanocomposite polypropylene can have environmental advantages over conventional material.
Krishnan et al. 2008 ²¹⁾	Nano-scale semiconductor	Manufacturing	Upstream energy requirements associated with chemicals and materials was evaluated using hybrid life cycle assessment
Healy et al. 2008 ¹⁷⁾	Sing walled Carbon Nanotube	Manufacturing	Under base case yield conditions, HiPco process shows the lowest environmental impact.
Hassan 2009 ¹⁹⁾	Ultrafine/nano Titanium Dioxide (TiO ₂) Coatings	Manufacturing, Use	The use of TiO ₂ coating reduced the environmental impacts due to photocatalytic process.
Khanna et al. 2009 ²⁰⁾	Carbon nanofiber(CNF) reinforced polymer nanocomposites(PNC)	Manufacturing, Use	CNF reinforced PNCs are 1.6-12 times more energy intensive than steel.

유하는 고분자 나노화합물보다 탄소나노섬유를 함유하는 고분자 나노화합물을 생산할 때 거의 1.6-12배 정도의 에너지 소모가 있다고 결론을 내렸다.²⁰⁾ 하지만 탄소나노섬유에 대한 인체 및 환경시스템에 대한 경로, 이동 및 반응기작에 대한 정보부족으로 탄소나노섬유를 함유하는 고분자 나노화합물의 노출과 종말점에서의 에너지 소비는 고려하지 않았다.

4. 전 망

최근 전과정평가 연구들에서 나타나듯이 나노물질 및 나노제품의 전과정평가를 실행할 때 가장 문제가 되는 것은 정확한 목록자료와 인체 및 환경 영향에 대한 자료의 부족이다. 기업들이 최신기술인 나노기술에 대한 정보제공에 소극적으로 대하고 있기 때문에 배출량 및 유통량과 같은 자료가 구하기 쉽지 않은 실정이다.²²⁻²⁴⁾ 또한 나노물질의 독성실험결과와 환경 중 나노물질의 경로 및 반응기작 연구결과의 부족으로 대부분의 전과정평가 연구들이 제조와 사용단계에서 이루어지고, 분배 및 종말점단계에서의 평가가 이루어지지 않

고 있다. 그러나 나노물질의 전과정평가 실행이 완벽에 가까운 자료가 이용 가능할 때까지 미루어져서는 안 된다. 나노물질 전과정평가 방법론개발, 독성학자와의 합동연구 및 향후 전과정 비교평가를 위한 자료생성이 지속적으로 이루어져야 한다. 이를 위해 정부는 나노기술 분야에 전과정평가 방법론개발과 나노제품 및 기술의 기준을 설정하고 통합하기 위한 연구프로그램을 마련해야 한다. 또한 학계에서는 나노기술을 위한 전과정평가를 위한 기초자료와 전과정평가 사례연구의 데이터베이스를 구축해야 한다. 산업계는 이러한 연구활동을 지원하고 전과정평가를 위해 기밀자료를 제공할 수 있는 메카니즘을 창출해야 한다. 이와 같이 다양한 이해관계자들의 연구활동 및 지원을 통한 나노물질 및 나노제품의 전과정평가 기법개발을 통해 안전한 나노기술의 지속가능한 성장이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

참고문헌

1. The royal society and the royal academy of engineering, *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*, **2004**, London, UK.
2. R. F. Service, *Science*, **2005**, 310, 1609.
3. A. Verma, O. Uzun, Y. Hu, Y. Hu, H.-S. Han, N. Watson, S. Chen, D.J. Irvine, and F. Stellacci, *Nat. Mater.*, **2008**, 7, 588-595.
4. U. Schroder, and B. A. Sabel, *Brain Res.*, **1996**, 710, 121-124.
5. M.-S. Kim, K. Choi, Y. Kim, and J. Yi, *Clean Technology*, **2007**, 13(3), 161-172.
6. E. Bae, J. Lee, Y. Kim, K. Choi, and J. Yi, *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2009**, 12(2), 59-73
7. E. Bae, B. K. Kwak, and J. Yi, *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2008**, 11(3), 207-216
8. S. Chah and J. Yi, *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, **1998**, 36(5), 732-742.
9. J. B. Guine, *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*, **2001** Kluwer academic publishers, Netherlands
10. Woodrow Wilson International Center for Scholars, *Nanotechnology and life cycle assessment: A systems approach to nanotechnology and the environment*, **2007**, NewYork
11. D. E. Meyer, M. A. Curran, and M. A. Gonzalez, *Environ. Sci. Technol.*, **2009**, 43, 1256-1263
12. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, *Implementation of Life cycle Impact Assessment Methods*, **2007**, Swiss
13. US EPA, *A Life Cycle Analysis Approach for Evaluating Future Nanotechnology Applications*, **2005**, <http://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/6245>
14. S. M. Lloyd, and L. B. Lave, *Environ. Sci. Technol.*, **2003**, 37, 3458-3466
15. S. M. Lloyd, L. B. Lave, and H. S. Matthews, *Environ. Sci. Technol.*, **2005**, 39, 1384-1392
16. N. Osterwalder, C. Capello, K. Hungerbuhler and W. J. Stark, *J. Nanopart. Res.*, **2006**, 8, 1-9
17. M. L. Healy, L. J. Dahlben, and J. A. Isaacs, *J. Ind. Ecol.*, **2008**, 12(3), 376-393
18. A. L. Roes, E. Marsili, E. Nieuwlaar, and M. K. Patel, *J. Polym. Environ.*, **2007**, 15, 212-226
19. M. M. Hassan, *Journal of Infrastructure Systems*, **2009** in press
20. V. Khanna, and B. R. Bakshi, *Environ. Sci. Technol.*, **2009**, 43, 2078-2084
21. N. Krishana, S. Boyd, A. Somani, S. Raoux, D. Clark, and D. Dournfeld, *Environ. Sci. Technol.*, **2008**, 42, 3069-3075
22. J. Park, B. K. Kwak, E. Bae, J. Lee, Y. Kim, K. Choi, and J. Yi, *J. Nanopart. Res.*, **2009**, 11(7), 1705-1712
23. Y. Kim, J. Park, H. Kim, J. Lee, E. Bae, S. Lee, B. K. Kwak, K. Choi, K. Park and J. Yi, *J. Environ. Toxicol.*, **2008**, 23(4) 257-265
24. J. Lee, Y. Kim, E. Bae, S. Lee, B. K. Kwak, K. Choi and J. Yi, *J. Environ. Toxicol.*, **2008**, 23(4), 247-256