

나노물질 안전관리를 위한 연구 현황에 관한 중요도-실행도 분석

김영훈*

광운대학교 화학공학과
139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2013년 10월 24일 접수; 2013년 11월 14일 수정본 접수; 2013년 11월 15일 채택)

Importance-Performance Analysis for Nano-Safety Researches

Younghun Kim*

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

(Received for review October 24, 2013; Revision received November 14, 2013; Accepted November 15, 2013)

요 약

최근 나노기술의 급격한 발전은 산업 및 바이오의약 등 다양한 분야에 새로운 활용 가능성을 제시하고 있다. 아울러 나노물질과 나노소비재의 연간 생산량이 증가하고 있어서, 의도하지 않은 환경 노출이 야기되고 있다. 또한 이미 많은 연구결과에서 이러한 나노물질이 인체 및 환경 유해성을 유발하는 원인과 결과에 대하여 보고하고 있다. 이에 정부에서는 나노물질 안전관리에 관한 다양한 연구주제들을 발굴하여 연구를 진행하고 있다. 본 논고에서는 다양한 나노물질 안전관리 연구주제들의 중요도와 실행도를 분석하여 향후 연구 진행 방향을 제시하고자 하였다.

주제어 : 나노물질, 나노소비재, 나노안전, 중요도-만족도 분석

Abstract : Recent rapidly growth in nanotechnologies is promised novel benefits through the exploitation of their unique industrial and biomedical applications. In addition, these nanomaterials and nano-consumer products have increased in quantity per year, and thus their uncontrolled release into the environment is anticipated to grow dramatically in future. Many papers for cytotoxicity of nanomaterials have been already reported, and thus government supports has funded to various research topics for nanosafety. Herein, we analyzed the importance and performance of nanosafety researches and tried to show the research direction where we have to go.

Keywords : Nanomaterials, Nanoproducts, Nanosafety, Importance-performance analysis

1. 서 론

2000년 이후 나노기술의 급격한 발전으로 인해 나노기술이 적용된 제품과 나노소비재(nano-consumer product)가 시장에 속속 등장하고 있다. 나노물질에 대한 잠재 위해성 논란이 지속적으로 야기되고 있으며, 최근에는 나노물질이 환경에 노출될 경우 생태계의 생물체에게도 악영향을 줄 수 있다는 다양한 연구 결과가 보고되고 있다[1-4]. 나노 안전관리가 국제사회의 주요 이슈로 부상하고 있고 규제화 움직임도 가시화되고 있다.

이에 정부에서는 나노물질의 잠재적 위해성으로부터 국민 건강과 생태계를 보호하고, 나노기술 및 관련 산업 발전을 지

원하기 위한 정부차원의 체계적인 종합관리 필요하다는 인식 하에 관련 5개부처(당시 교과부, 지경부, 환경부, 고용부, 식약청)가 공동으로 5개년(2012~2016)간의 종합계획을 수립하였다[4]. ‘나노안전관리 종합계획’은 4개의 대분류, 12개의 중분류, 32개의 소분류 항목으로 구분되어 있다. 그중에서 대분류만 살펴보면, 1) 나노 측정·분석 및 부처 공동 DB 구축, 2) 나노 안전성 평가 기반 구축, 3) 나노 안전관리 제도화 도입기반 마련, 4) 전문인력 양성 및 파트너십 구축 등이 있다. 중분류중 국제협력 강화, 이해관계자간 협력 및 고통체제 구축 분야는 5개 부처가 모두 참여하고 있다.

나노물질 안전관리를 위해 국제적으로는 경제협력개발기구(organization of economic cooperation and development, OECD), 국제표준화기구(international organization for standardization, ISO) 등을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 우리나라는 환경부를 주축으로 하여 나노위해성 연구자료를 생산하

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: korea1@kw.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2013.19.4.459

여 OECD에 제공하고 있다[6]. 환경부에서는 2007년부터 2012년까지 29개의 나노물질 안전관리에 관한 연구 주제들을 발굴하여 연구를 진행하고 있다. 사업분야를 정책/조사, 특성분석, 생체 외(in vitro), 생체 내(in vivo), 생태독성, 환경거동, DB 및 예측 등 7가지로 구분하였을 때, 환경부에서는 주로 특성분석(20%), in vitro (18%), in vivo (17%), 생태독성(17%)의 순으로 연구 투자가 이루어지고 있다. 주요 3개 부처(환경부, 식약처, 미래부)는 공통적으로 in vitro 및 in vivo 연구에 가장 많은 투자를 지원하고 있고, 특성분석, 생태독성 순으로 연구 투자를 하고 있다.

연구에 사용되고 있는 주요 나노물질은 TiO₂, ZnO, SiO₂, Ag, Au, C60, 탄소나노튜브 등이 있으며, 환경부에서 수행한 사업들에서는 Ag (50%), TiO₂ (17%), ZnO (11%), MWCNT (11%)의 순으로 많이 연구가 이루어지고 있다. 3개 부처에서 가장 많은 연구가 되는 물질은 역시 은나노물질이며, 식약처는 금나노입자에 관한 투자가 높게 나타나고 있다.

연간 수십억 규모의 연구비가 나노물질 안전관리를 위해 사용되고 있지만, 유사한 과제가 산발적으로 진행되고 있는 현상도 나타나고 있다. 이에 본 연구에서는 현재까지 진행되고 있는 나노물질 안전관리에 관한 연구주제의 중요도와 그에 따른 실행도(만족도, 진척도)를 평가하여, 향후 나노물질 안전관리의 연구 지원 방향을 결정하고자 중요도-만족도 분석(importance-performance analysis, IPA)을 실시하였다. IPA는 설문하고자 하는 주제에 관한 중요도-성과 분석을 통해 그 차이가 어떤 의미를 갖는지를 평가하는 도구로 Martilla와 James에 의해 소개된 분석 방법이다[7]. 일반적으로 IPA는 상품이나 서비스에 대한 이용자의 만족을 측정하기 위하여 개발된 기법이지만, 해당 설문 주제에 관한 기대와 만족 평가를 동시에 수행함으로써 문제점을 명확히 제시할 수 있고 결과 해석이 용이하여 실무적인 활용도가 높은 통계처리 기법이라고 할 수 있다.

중요도(x축)와 실행도(y축)를 하나의 그래프에 나타낸 다음 중심값을 기준으로 4개의 분면으로 나누면, 각 사분면이 정책을 결정하고 우선순위를 판단하는데 실제적인 기준을 제공하게 해준다. 1사분면(opportunities)은 유지영역(keep up good work)으로 중요도와 만족도가 높은 상태이고, 2사분면(strengths)은 중요도는 낮지만 만족도가 높은 과잉영역(possible overkill)에 해당한다. 3사분면(weakness)은 중요도와 만족도가 모두 낮은 저순위영역(low priority)이며, 4사분면(threats)은 중요도는 높지만 만족도가 낮은 집중영역(concentrate here)이 된다. 중요도-실행도(만족도)를 표준편차와 함께 나타낼 수 있는데, 표준편차가 크다는 것은 해당 지표의 중요도와 실행도에 관한 견해 차이가 큰 것으로 평균화가 필요한 부분이 된다.

2. IPA 설문 방법

나노물질 안전관리에 관한 연구주제들에 관한 전문가 집단 의견과 판단을 추출하고 종합하기 위하여 전문가 집단에

게 설문조사를 실시하였다. ‘나노안전관리 종합계획’에 제시되어 있는 연구주제를 바탕으로 설문할 연구주제를 도출하였고, 4가지 작업군(working package, WP)과 32가지 세부 연구주제를 구분하여 중요도와 실행도(지금까지의 연구결과 만족도)를 1~5점으로 평가할 수 있는 설문 문항 개발하였다(Table 1). 개별 연구주제는 1) WP1 (나노물질 제조, 공급 및 물리화학적 특성 분석), 2) WP2 (나노물질의 전주기 노출 평가), 3) WP3 (나노물질의 생태 독성 평가), 4) WP4 (지속적인 안전관리)로 구성하였다. 해당 설문지를 나노물질 안전관리 연구자에게 배포하여 결과값을 취합한 다음, IPA 그래프를 구성하고 이를 통해 집중영역, 유지영역, 과잉영역, 저순위영역 등을 구분하고 향후 연구 및 정책 추진방향을 제시하고자 하였다.

Table 1. IPA survey list for nanosafety researches

WP1	Preparation and characterization
1	Definition of nanomaterials
2	Preparation and support of standard nanomaterials
3	Characterization of physicochemical properties (PChem) of nanomaterials
4	Standard operation protocols (SOP) for characterization of PChem
5	Test guideline (TG) for cytotoxicity of nanoparticles (NP)
6	Dispersion of nanoparticles in bio-media
7	Measurement of PChem change of NP in environmental media
8	Development of novel characterization method for PChem of NP
WP2	Life cycle assessment
9	Inventory for nano-consumer products
10	Inventory for nanomaterials production
11	Exposure of NP in environmental media
12	Scenario for environmental exposure
13	Predicted environmental concentration in environmental media
14	Life cycle assessment of nanomaterials
15	Nanowastes treatment
16	Removal of nanomaterials using wastement treatment plant
WP3	Cytotoxicity test
17	In vitro test
18	Toxicity test using algae
19	Toxicity test using microorganism (bacteria)
20	In vivo test using aquatic species (fish, daphnia)
21	In vivo test using earth worm
22	Mammalian toxicity
23	Phytotoxicity
24	Inhalation test
25	Genotoxicity using intracellular biomarker
26	Development of pharmacokinetic model
27	Define toxicity mechanism
WP4	Sustainable safety
28	Nano regulation
29	Comprehensive review of toxicity test
30	Open to the public about results of nanosafety studies
31	Design of safe nanoproducts
32	Certification of nanosafety

3. 나노물질 안전관리에 관한 IPA 결과

IPA 설문 응답 대상은 나노물질 안전관리 연구경험이 있는 전문가 40명에게 설문을 요청(2013년 10월)하여 응답한 의견만을 취합하여 분석 실시하였다(Table 2). 응답자는 총 26명으로 65%의 응답율을 보였으며, 산학연관이 각각 15.4%, 65.4%, 7.7%, 11.5%의 응답비율을 보였다. IPA 설문 분석 결과, 중요도는 평균 3.96 (표준편차 1.01)으로 대부분의 연구주제들이 매우 중요수준(5)은 아니지만 중요수준(4)에는 도달하였다. 실행도는 평균 2.42 (표준편차 0.99)로 중요도와는 1.53의 편

Table 2. Raw data of IPA survey for nanosafety researches

Topic	Importance	Imp. deviation	Performance	Perf. deviation	Gap value
1	4.00	1.21	3.23	1.12	0.77
2	4.04	1.06	2.64	0.97	1.40
3	4.46	0.84	3.36	0.89	1.10
4	4.08	0.92	2.60	1.02	1.48
5	4.23	0.97	2.36	0.97	1.87
6	4.00	1.18	2.44	1.02	1.56
7	4.00	0.92	2.16	1.05	1.84
8	4.04	1.06	2.24	0.91	1.80
9	3.88	1.09	2.64	1.13	1.24
10	3.96	0.98	2.88	0.91	1.08
11	4.19	1.04	1.96	0.92	2.23
12	3.85	0.99	2.28	1.08	1.57
13	3.46	1.05	2.08	1.06	1.38
14	4.08	0.92	2.00	0.89	2.08
15	3.96	1.02	1.72	0.83	2.24
16	3.58	1.12	1.80	0.85	1.78
17	3.76	1.21	3.04	0.95	0.72
18	3.16	1.12	2.35	1.13	0.81
19	3.48	1.10	2.48	1.17	1.00
20	4.04	0.92	2.96	0.75	1.08
21	3.76	0.95	2.61	1.05	1.15
22	4.08	0.80	3.09	0.72	0.99
23	3.20	1.20	2.04	0.91	1.16
24	4.36	0.97	2.52	0.97	1.84
25	3.72	0.96	2.48	1.14	1.24
26	4.00	0.76	2.27	1.14	1.73
27	4.50	0.71	2.36	1.23	2.14
28	4.44	0.70	2.92	1.08	1.52
29	3.96	1.00	2.38	0.86	1.59
30	4.04	1.15	2.04	1.06	2.00
31	4.12	1.14	1.92	1.08	2.20
32	4.16	1.16	1.67	0.94	2.49
Mean	3.96	1.01	2.42	0.99	1.53

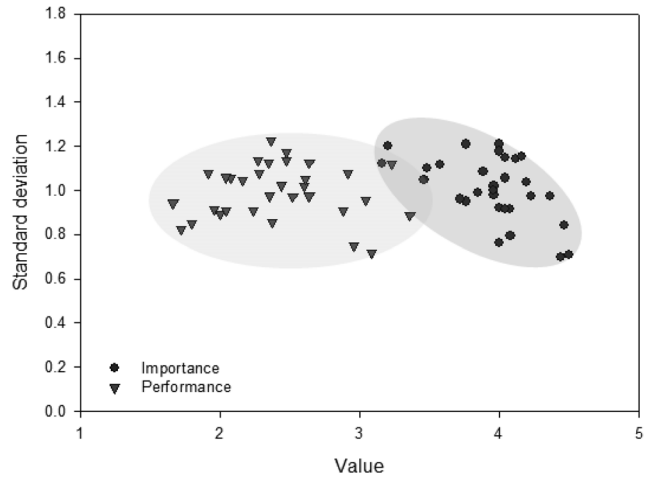


Figure 1. Standard deviation of importance and performance.

차(gap value, 중요도와 실행도의 편차)를 보이고 있어서 중요한 정도에 비해 연구주제의 실행정도와 만족도가 떨어지고 있으며, 평균값이 보통(3)과 저조(2) 수준의 절반에 해당하였다. Gap value는 1.53로 연구주제의 중요도에 비해 실행도가 떨어지고 있어서 향후 중요 연구주제들의 지속적인 지원과 연구가 필요함을 알 수 있었다.

Figure 1과 같이 중요도와 실행도를 표준편차와 함께 나타낼 수 있다. 중요도가 높은 연구 주제일수록 표준편차가 감소하고 있어서, 중요도가 높은 주제들의 공감대는 어느 정도 형성되어 있는 것으로 보이며, 중요도는 3.16~4.46 사이의 값으로 1.30정도의 범위를 보이고 있다. 반면, 실행도는 중요도에 비해 전반적으로 낮은 영역에 분포되어 있고 1.67~3.36 사이의 값으로 1.69 정도의 범위를 보이며, 실행도가 높다고 연구주제에 따른 표준편차가 감소하지는 않는 것으로 나타났다.

Figure 2는 설문 자료의 영역별 분포를 나타낸다. WP1 (나노물질 제조, 공급 및 물리화학적 특성 분석)은 1사분면인 유지 영역에 주로 위치하고 있고 가장 높은 중요도-실행도를 보이는 연구주제를 포함하고 있으며, 대체로 높은 중요도와

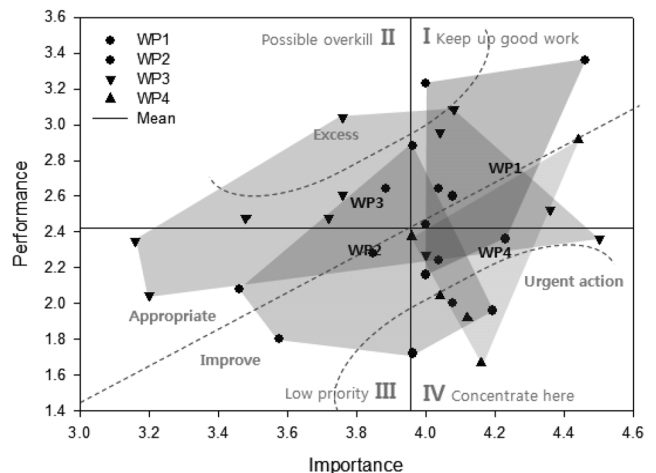


Figure 2. IPA distribution of nanosafety researches.

높은 실행도를 보였다. WP2 (나노물질의 전주기 노출 평가)는 3사분면에 치우치지만 중심영역에 분포하고 있으며, 중요도는 평균 근처이지만 실행도는 평균아래에 위치하였다. WP3 (나노물질의 생태 독성 평가)는 가장 넓은 영역에 분포하고 있으며, 2사분면(과잉 영역)에 중심을 하고 있고 실행도는 평균근처지만 중요도는 주제별로 넓은 범주를 나타냈다. WP4 (지속적인 안전관리)는 1사분면(유지 영역)과 4사분면(집중 영역)에 분포하고 있으며 높은 중요도임에도 불구하고 실행도는 평균근처를 보이고 있다.

1사분면(유지)은 10개의 연구주제 도출되었고, 2사분면(과잉)과 3사분면(저순위)은 각 5개, 4사분면(집중)은 12개의 연구주제가 도출되었다. 전통적인 IPA가 4개의 직교 영역으로 구분했다면, 최근에는 대각선 4개 영역으로 구분하여 해석하는 기법도 소개되고 있다. Figure 2에서 과잉(excess) 영역에는 WP3 일부(17번)와 WP1 일부(1번) 연구주제들이 과잉 연구 주제 영역에 포함되고 있고, 긴급(urgent action) 영역에는 WP2 (11, 14, 15번), WP4 (30, 31, 32번)의 일부 연구주제들이 긴급하게 연구 지원이 이루어져야 하는 것으로 나타나고 있다. 적절(appropriate) 영역은 WP1 상단, WP2 상단, WP3 중심 영역의 연구주제들이 현재 수준에서 적당히 연구들이 진행되고 있음을 나타내고, 개선(improve) 영역은 WP1 하단, WP2 하단, WP3 하단, WP4 상단 영역의 연구주제들로 현재 보다는 많은 연구지원이 필요한 주제들임 나타낸다.

IPA 설문 결과를 통해 연구주제별 우선순위를 도출할 수 있다(Table 3). 과잉영역에서 집중영역을 연결하는 대각선 쪽으로 갈수록 연구 우선순위가 높다고 할 수 있다(Figure 3).

Table 3. Research priority for each section in IPA chart

Section	Research priority
1	3 > 28 > 1 > 24 > 22 > 20 > 10 > 4 > 2 > 6
2	9 > 21 > 25 > 17 > 19
3	12 > 16 > 13 > 23 > 18
4	27 > 32 > 15 > 11 > 31 > 5 > 14 > 30 > 7 > 8 > 26 > 29

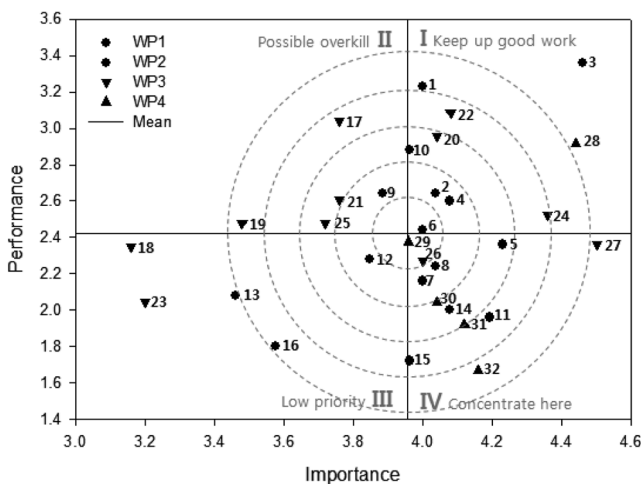


Figure 3. IPA distribution of particular research topics.

연구가 지원되어야 하는 영역별 순서는 ‘집중영역 ≫ 유지 영역 > 과잉 영역 ≈ 저순위 영역’의 차례를 지니며, 각 영역별 우선순위는 중요도와 실행도를 고려하여 설정된다.

나노물질별 독성 발현 기작 연구(27번)가 가장 높은 우선순위를 보이고 있어서 나노위해성이 나타나는 근본적인 원인을 찾고자 하는 욕구가 높다는 것을 알 수 있다. 나노제품의 안전성평가 및 인증시스템 개발(32번)은 현재 가장 낮은 실행도를 보이고 있어서 해당 연구주제에 대한 향후 범정부차원의 가이드라인이 마련되어야 할 것이다. 나노폐기물 처리에 관한 안전관리(15번), 환경매질별 나노물질 노출 평가법 마련(11번) 등은 중요도가 높은 반면 실행도가 낮은 것으로 나타나고 있다.

이외에도 우선 연구가 지원되어야 할 분야는 안전성 향상을 위한 나노제품 설계기술(31번), 독성평가를 위한 시험시료 준비 및 물질분석 절차(5번), 나노물질의 전과정 평가(14번), 나노물질 위해성 평가 결과에 관한 공개(30번), 나노물질의 환경매질내 물성 변화 평가(7번), 나노물질의 분리 및 새로운 측정기법 개발(8번), 나노전문의 생리화학적 약동학 모델 개발(26번), 독성 연구사례들의 종합 관리(29번)로 나타났다.

현재 연구지원상태를 유지되어야 하는 분야중의 최우선은 나노물질의 물리화학적 특성 분석(3번)으로 가장 높은 중요도와 가장 높은 실행도를 보이고 있으며, 국제 나노물질 안전관리 규제 추적 및 대응(28번), 나노물질의 정의(1번), 나노물질의 흡입 노출 평가(24번)도 현재 연구수준을 유지할 필요가 있는 것으로 나타났다. 낮은 중요도에도 불구하고 실행도가 높게 나타난 부분은 미생물을 이용한 독성 평가(19번), 세포를 이용한 독성 평가(17번) 등으로 나타났으며 이들에 관한 연구 지원을 억제하라는 것은 아니지만, 향후 나노소비재 현황 파악(9번), 기타 생물종을 이용한 독성 평가(21번) 등의 연구 주제에 관한 어느 정도의 지원은 필요하다고 판단된다.

저순위 영역은 중요도도 낮고 현재 지원되고 있는 연구비와 연구수준의 만족도도 낮은 부분에 해당되며, 식물을 이용한 독성 평가(23번), 조류를 이용한 독성 평가(18번)가 가장 낮게 나타났다. 저순위 영역에서 연구가 투자되어야 할 분야는 그나마 중요도가 높게 나타나고 있는 환경 노출 시나리오 설정(12번), 환경매질별 환경에측능도 평가(13번), 하폐수처리장을 이용한 나노물질 처리(16번)로 파악되었다.

연구 주제들에 관한 IPA 분석 결과와 같이 12개의 집중 연구 주제들이 우선 지원되어야 할 것이라고 판단되며 해당 연구주제들을 우선적으로 추진되어야 할 것이다. 그중에서 정책연구가 우선시 되는 분야는 나노제품의 안전성평가 및 인증시스템 개발(32번), 나노물질 위해성 평가 결과에 관한 공개(30번), 독성 연구사례들의 종합(29번) 등이다. 시험연구가 우선시 되는 분야는 나노물질별 독성 발현 기작 연구(27번), 나노폐기물 처리에 관한 안전관리(15번), 환경매질별 나노물질 노출 평가법 마련(11번), 안전성 향상을 위한 나노제품 설계기술(31번), 독성평가를 위한 시험시료 준비 및 물질분석 절차(5번), 나노물질의 전과정 평가(14번), 나노물질의 환경매질내 물성 변화 평가(7번), 나노물질의 분리 및 새로운 측정

기법 개발(8번), 나노전문의 생리학적인 약동학 모델 개발(26번) 등이다.

현재 연구 지원 수준을 유지해야 하는 분야는 10가지로 정책 연구 3가지와 시험연구 7가지를 포함하고 있다. 현재 환경부에서 진행되고 있는 정책연구와도 일맥상통하며, 국제 나노물질 안전관리 규제 추적 및 대응(28번), 나노물질의 정의(1번), 나노물질 유통량 현황 파악(10번) 등이 정책연구로 꾸준히 지원되어야 할 분야이다. 시험연구가 지속적으로 이루어져야 하는 분야는 나노물질의 물리화학적 특성 분석(3번), 나노물질의 흡입 노출 평가(24번), 설치류, 토끼 등을 이용한 조직병리학적 노출 평가(22번), 수생 생물종의 독성 평가(20번), 물성 분석에 관한 표준운영절차 마련(4번), 표준나노물질의 제조 및 공급(2번), 생체 매질내 나노물질의 분산(6번) 등에 관한 연구주제들이다.

기타 IPA 설문에서 사용한 연구주제외에 나노안전관리 전문가들이 필요하다고 생각하는 분야는 전문 연구 영역별로 다양하지만 다음과 같이 정리할 수 있다. 나노 물질 독성 결과의 바이오인포메틱스 매트릭스 연구, 나노 물질의 고속 독성 평가법 개발, 표준 나노 물질을 이용한 독성 평가 비교, 나노 물질 독성 평가를 위한 독성 방법론 개발, 나노물질 노출 감지 조기경보 시스템 등에 관한 연구이며 이는 향후 정부 지원으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

4. 결론 및 제언

현행 국내의 나노물질 안전관리 연구는 ‘물질’ 중심의 연구를 진행해온 것이 사실이며, 이 기간 동안 수행된 연구는 기존 화학물질 평가 방법론 적용한 위해성에 해당되며, 이러한 방식의 연구는 점차 지양할 필요가 있다. 즉 일례로 기존에 구축된 자료들은 은나노물질에 대한 독성 등 안전성평가 자료로 국한되어 있으므로, 다양한 나노물질 및 제품에 대한 인체 및 환경 노출평가, 위해성평가도 이루어져야 할 것이다. 위해성평가 단계에서 기 수행된 나노물질의 독성학적 평가는 응집과 분산에 얽매어 있어, 독성학적 결과 제시의 정체성을 재정립할 필요가 있다. 향후 연구에서는 나노물질 함유 ‘제품’ 중심의 평가를 기반으로, 제품 유래 나노물질의 전과정평가가 상당히 중요할 것으로 판단되며, 나노물질의 특성 상 생

산 초기단계 및 폐기단계 중심의 연구가 필요하다. 이를 위해 국내 나노물질 함유 제품의 현황조사, 노출량 평가 및 전이량 연구 등 세부 연구 전략이 수립되어야 할 것이다. 이를 통해 물질 중심의 연구는 현재 환경부에서 개발중인 ‘나노 안전성 정보시스템’과 연계하여 지속적인 평가(물리화학적 특성, 기초 독성평가 등) 계획 수립을 통해 정보의 생산-평가-공개 단계를 거쳐 대국민에게 안전정보 제공이 되어야 할 것이다.

감사

본 연구는 2013년 국립환경과학원의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. IPA 설문에 적극적으로 참여해 주신 나노물질 안전관리 전문가들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, E., Roh, J., Kim, Y., and Choi, K., "A Single Instillation of Amorphous Silica Nanoparticles Induced Inflammatory Responses and Tissue Damage Until Day 28 After Exposure," *J. Health Sci.*, **57**, 60-71 (2011).
2. Park, E., Kim, H., Kim, Y., and Choi, K., "Repeated-dose Toxicity Attributed to Aluminum Nanoparticles Following 28-Day Oral Administration, Particularly on Gene Expression in Mouse Brain," *Toxicol. Environ. Chem.*, **93**, 110-119 (2011).
3. Park, E., Roh, J., Kim, Y., and Park, K., "Induction of Inflammatory Responses by Carbon Fullerene (C₆₀) in Cultured RAW264.7 Cells and in Intraperitoneally Injected Mice," *Toxicol. Res.*, **26**, 267-273 (2010).
4. Umh, H. N., Lee, B.-C., and Kim, Y., "New Paradigm for Nanowastes Treatment," *Clean Technol.*, **18**, 250-258 (2012).
5. National Science & Technology Council, "The 1st National Plan for Nano Safety: 2012~2016," Nov. 2011.
6. Kim, M.-S., Choi, K., Kim, Y., and Yi, J., "Risk Assessment for Health and Environmental Hazards of Nanomaterials," *Clean Technol.*, **13**, 159-170 (2007).
7. Lo, C., Wang, C., Chien, P., and Hung, C.-W., "An Empirical Study of Commercialization Performance on Nanoproducts," *Technovation*, **32**, 168-178 (2012).