

나노입자의 수생태계 영양단계전이 연구동향

이 우 미 · 안 윤 주*

(건국대학교 환경과학과)

Research Trend of Trophic Transfer of Nanoparticles in Aquatic Ecosystems. Lee, Woo-Mi and Youn-Joo An* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

With its recent advances, nanotechnology is now being applied to various areas. Despite the benefits of nanoparticles, their risk in the environment has caused controversy, which is now becoming an international issue. Nanoparticles can easily infiltrate into cells, accumulate in biota, and may cause adverse effects in the levels of molecules, cells and organisms, and in the community. If nanoparticles are released into the environment, they can be transferred to organisms in the ecosystem, and eventually to the human body through the food chain. In this study, the research trend of the trophic transfer of nanoparticles in the food chain was investigated. Although a few investigations have been conducted regarding this topic, the trophic transfer of nanoparticles is becoming a significant issue in the area of nanotoxicology due to the potential risk to humans via the biomagnification process. While previous studies have demonstrated evidence of the trophic transfer of nanoparticles intensive future studies are needed to provide further information on the properties of nanomaterials, the exposure media, and the *in vivo* mechanisms such as uptake, accumulation, and depuration.

Key words : accumulation, biomagnification, food chain transfer, nanomaterial

서 론

나노기술은 반도체, 전자제품뿐만 아니라 화장품, 의류, 식품 등 다양하게 사용되고 있다. 2006년 이후로 현재까지 나노기술을 적용한 물품은 500% 이상 증가하는 등 (www.nanotechproject.org) 나노기술이 우리생활에 미치는 영향은 점차 커지고 있다. 나노물질 (Nanomaterials) 은 탄소계 나노물질, 금속계 나노물질, 덴드리머 (Dendrimers), 복합체 (Composites) 등 크게 4가지그룹으로 분류된다 (US EPA, 2007). 탄소계 나노물질의 경우 Fullerene (C60), Carbon Nanotubes, Carbon Black 등이 있으며 금속계 나노물질의 경우 Zn, Cu, Ag와 같은 중금속 및

ZnO, CuO, TiO₂와 같은 산화금속, 그리고 Quantum Dot 등이 포함된다 (Tuominen and Schultz, 2010). Fullerene과 Carbon Nanotube는 전자제품, 운동기구, 컴퓨터 등에 사용되고 있으며 광촉매특성을 띠는 TiO₂와 ZnO는 자외선 차단제와 같은 화장품 및 페인트 등에 활용되고 있다. 그 외 Ag는 살균제, Au와 Si는 화장품과 의료용, Quantum Dot은 반도체 생산에 사용되고 있다 (EEB, 2009; Tuominen and Schultz, 2010). 이렇듯 나노물질은 우리 생활주변에서 쉽게 접할 수 있다.

나노물질은 생산, 유통, 사용 등 전 과정을 통해 환경으로 배출될 것이며 이는 인체 및 환경의 안전성과 직·간접적으로 연관된다. 이에 나노물질의 유해성문제가 국제적으로 야기되면서 나노물질에 대한 인체 및 생태독성연

* Corresponding author: Tel: 02) 2049-6090, Fax: 02) 2201-6295, E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr

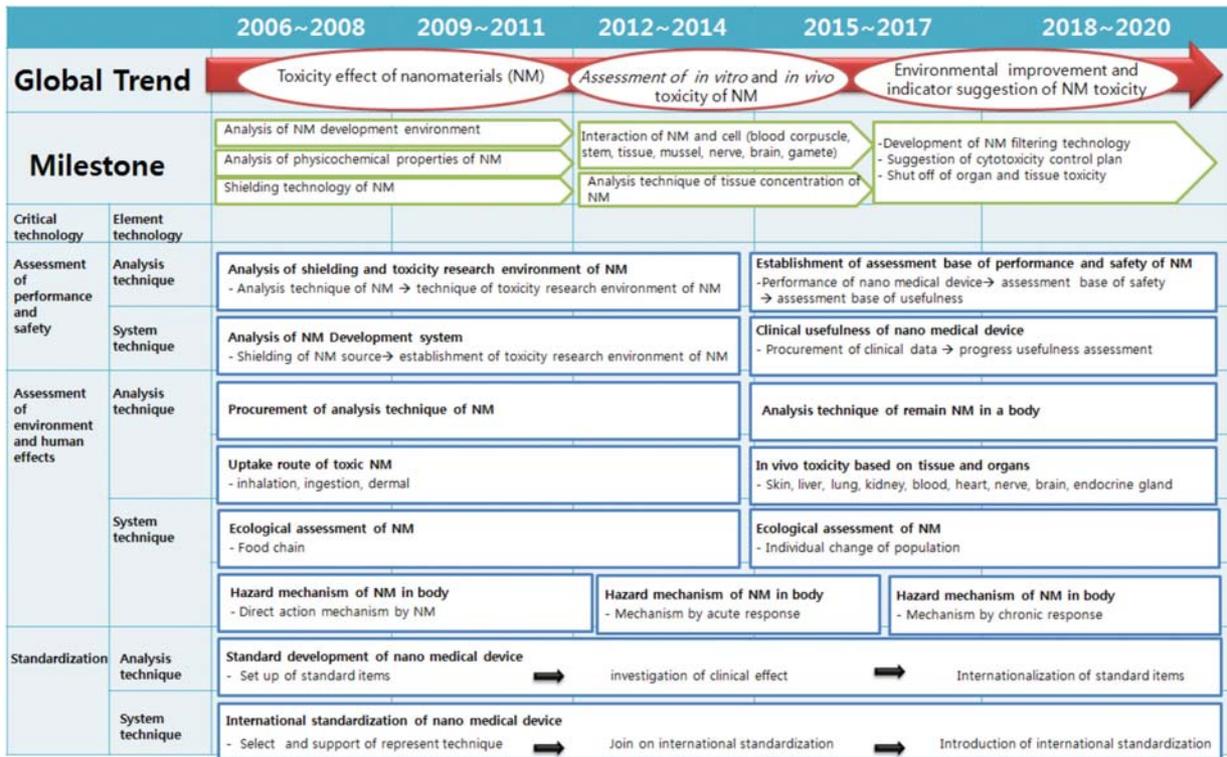


Fig. 1. National Technology Roadmap: Nanobio safety, Effect assessment, and Standardization technology (MEST, 2008).

구가 급격히 증가하고 있는 추세이다. 나노물질은 크기가 미세하고 그 성상이 매우 특이하여 같은 성분의 물질이라도 입자의 크기, 표면전하, 표면코팅여부, 입자의 형태에 따라 상이한 특성을 띤다. 또한 미세한 크기로 화학반응성이 뛰어나고 환경으로 노출시 단기간에 광범위한 범위로 확산될 개연성이 있다. 나노물질은 입자크기가 작아짐에 따라 기존 벌크물질과 상이하게 다른 물리화학적 특성을 띠는 즉, 새로운 성질을 나타내는 물질을 의미한다 (Nel *et al.*, 2006; Lin and King, 2007). 따라서 크기가 작아짐에 따라 넓은 표면적으로 반응성이 극대화되어 독성영향도 벌크물질과 다를 수 있으며 미세한 크기로 인체나 생물체에 쉽게 유입되어 세포 및 분자수준에서 생물체에 악영향을 미칠 수 있다 (Nel *et al.*, 2006). 더 나아가 생체내에 축적되면 먹이사슬전이에도 영향을 미치게 된다 (UBA, 2006). 나노물질에 대한 생태독성 연구는 2000년대 이후부터 꾸준히 증가하고 있는 추세이다 (Lee and An, 2010; Lee *et al.*, 2010). 반면 나노물질의 먹이사슬전이에 관한 연구는 매우 한정적이다. 나노물질이 먹이사슬을 통해 하위레벨에서 상위레벨로 전이될 때 생물학대에 의해 상위레벨로 갈수록 축적 (Zhu *et al.*, 2010; Werlin *et al.*, 2011) 및 위해성이 증가할 개연성이 있다

(Bouldin *et al.*, 2008). 또한 궁극적으로 나노물질이 먹이망을 통해 인체로 유입되어 악영향을 미칠 수 있으므로 먹이사슬전이 연구에 대한 필요성이 대두되고 있다. 국내에서도 나노물질의 영양단계전이의 중요성을 인식하고 '국가나노기술지도'에서 '나노바이오 안전성, 영향평가 및 표준화 기술분야'에서 나노물질의 생태영향을 평가하기 위해 '먹이사슬 영향평가 기술개발 (2006~2014)'를 계획하였다 (Fig. 1) (MEST, 2008). 본 연구에서는 수생태계를 대상으로 나노물질의 생태계노출 및 축적을 고찰하고 나노물질의 영양단계별 전이 (Trophic Transfer) 연구동향을 파악하고자, 최근까지 발표된 SCI (E)급 논문을 체계적으로 분석하고, 이와 더불어 국제적 연구지원 동향을 심층적으로 분석하였다.

나노물질의 생태계 노출/축적 및 영양단계전이 연구

1. 나노물질의 생태계 노출

다양한 종류의 제조나노물질 (Engineered nanomaterials)은 여러 가지 노출경로를 통해 수생태계로 유출되고

있다. 나노물질의 노출은 외부노출 (External Exposure) 과 내부노출 (Internal Exposure)로 구분할 수 있다 (Sft, 2007; Zijverden and Sips, 2009). 외부노출은 환경 중 존재하는 나노물질에 노출되는 것이고 내부노출은 생체내 유입된 나노물질이 세포간 또는 다른 생물체로의 전이를 의미한다. 나노물질의 물리화학적 특성 (입자크기, 형태, 표면전하, 표면화학특성 등)은 노출매체의 다양한 특성인자들 (유기/무기 분자, pH, 이온, 자연유기물질, 온도, 광조건, 입자상 물질)과 결합하여 나노물질의 응집, 용해 등과 같은 변화를 야기하게 된다 (US EPA, 2007; Vonk *et al.*, 2009; Nel *et al.*, 2009). 이러한 매체-나노입자 상호작용의 결과물은 나노물질의 환경중 거동, 독성영향 및 생체내 흡수기작에 영향을 준다. 그러나 다양한 요인으로 인해 나노물질의 환경 중 농도는 현재까지 이를 실측하기 위한 방법이 마련되어 있지 않아 모델링을 통한 PEC (Predicted Exposure Concentration)으로 예측하는 수준이다 (Gottschalk *et al.*, 2009).

2. 나노물질의 생태계 축적

Zhu *et al.* (2010)은 *Daphnia magna*를 TiO₂NP에 24 h 노출과 72 h 배출기작을 관찰한 결과 노출시간이 증가함에 따라 체내 축적된 TiO₂NP도 증가함을 확인하였다. 반면 72 h 동안 체내 축적된 TiO₂NP는 모두 배출되지 않고 내장 내에 일부 잔존함이 관찰되었다. Fullerene에 노출시킨 *D. magna* 또한 24 h 동안 축적된 fullerene이 48 h 배출시험 후 74%정도 배출되어 역시 일부 나노입자가 잔존함을 확인하였다 (Tervonen *et al.*, 2010). Petersen *et al.* (2011)은 MWNT의 표면전하에 따른 축적 및 배출영향을 관찰하였는데 표면전하는 나노물질 축적과 배출영향과는 상관관계가 없음을 확인하였다. 또한 체내 축적된 MWNT의 배출시험시 먹이를 공급한 경우 체내 축적된 MWNT가 상당수 배출되었으나 먹이를 공급하지 않은 경우 적은 양이 배출되어 먹이공급이 체내 축적된 NP의 체외배출 기작에 영향을 주는 것을 확인하였다. 한편 토양매체에서도 나노물질의 축적연구가 일부 발표되었다. 입자크기에 따른 나노물질의 축적영향 또한 상이하다는 연구가 있는데, Urine *et al.* (2010)은 2가지 입자크기의 금나노물질에 노출시킨 *Eisenia fetida*를 이용하여 입자크기에 따른 체내축적량이 상이함을 보고하였다. 55 nm 금나노물질은 노출농도에 의존하여 *E. fetida*내 축적량이 증가한 반면 20 nm 금나노물질은 일정농도 이상에서는 축적량이 증가하지 않았다. 이러한 차이는 토양내에서의 입자크기와 연관성이 있는데 20 nm의 경우 토양공극수

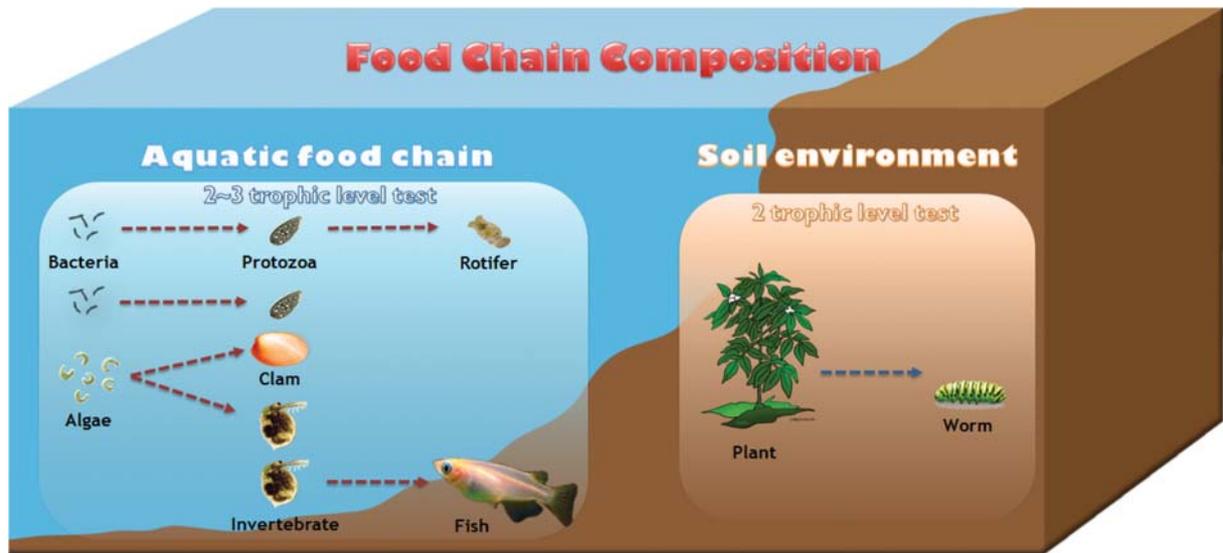
에서 55 nm의 입자보다 응집현상이 심화되었기 때문으로 보고하고 있다. 이와 달리 Coleman *et al.* (2010)은 산화알루미늄 (Al₂O₃) 나노입자의 크기가 작을수록 *E. fetida* 내 생물축적량이 증가하는 것을 관찰하였다. 또한 토양의 경우 매체 특성에 따라 나노물질의 흡수기작에 영향을 주어 독성 및 생물이용성에 영향을 줄 수 있다. Lee *et al.* (in press)은 은나노입자가 노출된 한천매지에서는 식물체내 은축적량이 노출농도에 의존하여 증가하였으나 이에 반해 토양에서는 노출농도 대비 축적량이 매우 낮은 것을 확인하였다. 이는 토양내 clay표면에 은나노입자가 흡착되어 생물이용성을 감소시킬 수 있기 때문으로 설명하고 있다. Oughton *et al.* (2008)은 중성자를 활성화시킨 코발트나노입자를 노출하였을 때 코발트가 *E. fetida*의 정자발생세포, 알, 혈액에서 검출됨을 확인하였다. 또한 7 d의 노출기간에 비해 나노입자가 장기간 (8주) 잔존하는 것을 관찰하였다.

3. 나노물질의 수생태 영양단계 전이

생물체내 축적된 나노물질은 먹이사슬에 의해 다른 생물체로 전이될 개연성이 있다. Table 1과 Fig. 2는 나노물질 먹이사슬전이 연구에서 사용한 나노물질과 영양단계 그룹을 나타낸 것이다. 수서생태계에서의 나노물질의 영양단계전이 연구는 2008년 미국 NIST (National Institute of Standard and Technology)의 Holbrook 연구팀이 처음으로 carboxylated QD와 biotinylated QD를 이용하여 3 trophic level에서의 먹이사슬전이 영향을 평가하였다. 먹이사슬전이 단계는 박테리아 (*Escherichia coli*), 섬모충 (*Tetrahymena pyriformis*) 그리고 윤충 (*Brachionus calyciflorus*)이다. QD를 노출시킨 *E. coli*로부터 *T. pyriformis*로의 나노물질 전이는 관찰되지 않았다. 이는 QD가 *E. coli* cell에 축적되지 않았기 때문인데 QD의 물리화학적 특성과 hydrodynamic size 때문인 것으로 판단하고 있다. QD는 개별 *E. coli* cell 표면에서는 관찰되지 않고 *E. coli* cell들이 응집된 부위에서 관찰되었는데, QD와 *E. coli* cell이 응집된 상태는 *T. pyriformis*가 섭취하기에 그 크기가 커서 먹이사슬전이가 나타나지 않고 선택적으로 QD가 붙어있지 않은 개별 *E. coli* cell을 제한적으로 섭취하였을 것으로 언급하고 있다. QD에 노출시킨 *T. pyriformis*에서 제한적으로 생물축적 (Bioconcentration)이 관찰되었고 *B. calyciflorus*로의 생물농축확대 (Biomagnification)는 관찰되지 않았으나 먹이사슬전이에 따른 상위레벨로의 나노물질의 잠재적인 노출에 대한 고려가 필요하다 언급하고 있다 (Holbrook *et al.*, 2008). Bouldin

Table 1. Studies on food transfer of nanomaterials.

Test NPs	Test species	Country	Reference
Carboxylated and biotinylated quantum dot	<i>E. coli</i> , <i>T. pyriformis</i> , <i>B. calyciflorus</i>	USA	Holbrook <i>et al.</i> 2008
Carboxyl QD	<i>P. subcapitata</i> , <i>C. dubia</i>	USA	Bouldin <i>et al.</i> , 2008
Amine-coated AuNP	<i>S. subspicatus</i> , <i>C. fluminea</i>	France	Renault <i>et al.</i> , 2008
Au nanorod	Estuarine mesocosms	USA	Ferry <i>et al.</i> , 2009
TiO ₂ NP	<i>D. magna</i> , <i>D. rerio</i>	USA & China	Zhu <i>et al.</i> , 2010
CdSe QD	<i>P. aeruginosa</i> , <i>T. thermophila</i>	USA	Werlin <i>et al.</i> , 2011
Tannic acid-coated AuNP	<i>Nicotiana tabacum</i> , <i>Manduca sexta</i>	USA	Judy <i>et al.</i> , 2011

**Fig. 2.** Food chain composition in the previous studies regarding the trophic transfer of nanoparticles.

et al. (2008)은 carboxyl QD에 노출시킨 조류(*Pseudokirchneriella subcapitata*)로부터 물벼룩(*Ceriodaphnia dubia*)으로의 나노물질 전이를 관찰하였다. 먹이사슬전이 평가는 QD의 형광특성을 이용하여 Fluorescence Pixel Intensity로 측정하였다. 55.0 ppb QD에 노출시킨 *P. subcapitata*를 섭취한 *C. dubia*의 Fluorescence Pixel Intensity는 대조구 대비 유의하게 증가하여 나노물질 먹이사슬 전이를 확인하였다. QD를 이용한 또 다른 연구에서는 박테리아(*Pseudomonas aeruginosa*)와 이를 섭취하는 원생동물(*Tetrahymena thermophila*)에서 5배의 생물농축 확대를 확인하였다(Werlin *et al.*, 2011). CdSe QD에 노출시킨 박테리아를 섭취한 원생동물은 대조구에 비해 성장기간이 짧고 성장률도 유의하게 감소한 것이 관찰되었다. 또한 원생동물 체내에서 QD에서 배양한 박테리아가 소화되지 않은 채 축적이 되어 있는 것이 확인되었다. 이는 QD로 인한 세포손상으로 식물의 소화 및 배출기능이 멈추었기 때문으로 언급하고 있다. Zhu *et al.* (2010)은 담

수생태계에서 물벼룩(*Daphnia magna*)이 섭취한 TiO₂NP가 어류(*Danio rerio*)로의 전이됨을 확인하였다. 생물농축 확대계수가 1 이하로 TiO₂NP의 생물농축 확대는 관찰되지 않았으나 직접노출보다 먹이사슬전이에 따른 노출이 생체내 축적량이 더 높게 측정되었다고 언급하고 있다. Renault *et al.* (2008)은 amine-coated AuNP에 노출시킨 조류(*Scenedesmus subspicatus*)를 섭취한 조개(*Corbicula fluminea*)로의 먹이사슬 전이를 관찰하였다. AuNP에 노출시킨 *S. subspicatus*를 섭취한 *C. fluminea*내에서 Au의 축적량이 대조구에 비해 유의하게 증가하였으며 아가미와 내장에 축적된 Au의 생물농축계수는 4000과 26000으로 계산되었다. Transmission Electron Microscopy (TEM)을 이용하여 Au에 노출시킨 *S. subspicatus*와 이를 섭취한 *C. fluminea*를 관찰하였을 때 AuNP가 *S. subspicatus*의 세포벽에 흡착되어있는 것이 확인되었으며 *C. fluminea*에서는 소화관 상피조직과 아가미에서 AuNP가 관찰되었다. 한편 해수, 퇴적물, 해초, 미생물, 달팽이,

조개, 새우, 물고기를 포함한 실험실 수준의 Estuarine mesocosm 시험을 통해 Au nanorod가 Water column을 통과하여 해양생태계의 먹이망까지 영향을 미칠 수 있음이 보고되었다(Ferry *et al.*, 2009). 한편 토양생태계의 경우 1차 생산자인 담배와 1차 소비자인 Tabacco hornworm (*Manduca sexta*)를 대상으로 AuNP의 먹이사슬전이와 생물농축확대를 발표함으로써, 인체노출까지 이어질 수 있는 개연성을 확인한 바 있다(Judy *et al.*, 2010).

나노물질 영양단계전이 연구지원 동향

1. 국외 연구현황

미국 및 유럽 국가를 포함한 선진외국에서는 나노입자가 생태계 생물에 미치는 영향을 파악하고자 정부차원의 연구지원을 수행하고 있다(Table 2). 유럽연합의 경우 FP7 (Seventh Framework Programme)에서 2007~2013년까지 나노물질의 인체, 안전, 환경영향에 대한 연구지원을 하고 있다. OECD에서는 나노물질에 대한 인체 및 환경 안전을 위하여 관련 시험법 및 협력방안에 대한 과제를 다루고 있다. 국가별로는 미국 US EPA에서는 'Science To Achieve Results (STAR) Research Grants'을 통하여

나노물질의 인체 및 환경, 환경거동에 대한 영향연구를 지원하고 있다. 영국은 IOM (Institute of Occupational Medicine)과 DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs)에서 나노물질의 인체 및 생태독성, 독성기전, 나노독성 표준시험법에 대한 연구를 지원하고 있다. 오스트리아는 "Nanotechnology: Assessing the Environmental Risks for Australia"를 발간하고 환경위해성에 근거한 나노물질 사용을 규제해야 한다는 움직임이 있으며 (Tolstoshev, 2006), 독일 UBA (Umwelt Bundes Amt)에서는 "Nanotechnology: Opportunities and Risks for Human and the Environment"라는 보고서에서 나노산업의 긍정적인 면 이면의 인간과 환경에 대한 위해성에 대하여 언급하였다(UBA, 2006). 일본의 NEDO (National Energy and Industrial Technology Development Organization)는 2006년부터 2010년까지 나노입자의 위해성평가관리방안을 위해 2006년에만 3억 7천만 엔을 투자하여 나노입자가 인체나 생태계에 미치는 잠재적 영향과악 연구를 시작하였으며, 일본 문부과학성은 자국내 여러 연구기관 및 대학들에 나노물질의 안전성연구를 지원하고 있다. 국외 나노독성·위해성관련 연구는 앞에서 거론한 STAR Grants나 EU Funding에 의해 지원되고 있는데, 나노물질 생태독성연구는 약 26여건 정도 조사되었다.

Table 2. International research projects of nanoparticles in the environment.

Institute (Country)	Title (Project period)	Funding source	Research category
Georgia University Kentucky University (USA)	The Bioavailability, Toxicity, and Trophic Transfer of Manufactured ZnO Nanoparticles: A View from the Bottom (2005~2008)	US EPA	Trophic transfer
Celmon University (USA)	Influence of Water Quality on the Bioavailability and Food Chain Transport of Carbon Nanoparticles (2007~2010)	US EPA	Trophic transfer
Georgia University (USA)	The Fate and Effects of Nanosized Metal Particles along a Simulated Terrestrial Food Chain Investigated Using Genomic and Microspectroscopic Techniques (2007~2010)	US EPA	Trophic transfer
CEMAGREF (France)	Trophic Transfer of Nanomaterials and Biological Effect on Freshwater Organisms (2010~2013)	ANSES	Trophic transfer
Rice Univ. (USA)	Microbial Impacts of Engineered Nanoparticles (2005~2008)	US EPA	Ecology
Florida Univ. (USA)	Assessing the Environmental Impacts of Nanotechnology on Organisms and Ecosystems (2005~2008)	US EPA	Ecology
Maine. McGill Univ. (USA)	Nanoparticle Toxicity in Zebrafish (2006~2009)	US EPA	Ecology
Missouri Univ. (USA)	Aquatic Toxicity of Carbon-Based Nanomaterials at Sediment-Water Interfaces (2007~2010)	US EPA	Ecology
Tennessee Univ. (USA)	Ecotoxicology of Underivatized Fullerenes (C60) in Fish (2007~2010)	US EPA	Ecology
Rice Univ. (USA)	Effects of Quantum Dot on Microbial Communities (2008~2011)	US EPA	Ecology

Table 2. Continued.

Institute (Country)	Title (Project period)	Funding source	Research category
Technical Univ. (Denmark)	Framework Development for Adaptive Environmental Risk Assessment and Uncertainty Analysis for Nanomaterials (2007 ~ 2010)	Technical Univ.	Ecology
Technical Univ. (Denmark)	Environmental Effects of Engineered Nanoparticles (2007 ~ 2010)	Technical Univ.	Ecology
Laboratory of Environmental Toxicology and Aquatic Ecology (Belgium)	In vitro and in vivo Evaluation of the Ecotoxicity of Nanoparticles (2006 ~ 2010)	IWT Flanders	Ecology
Fraunhofer Institute for Molecular Biology	Investigation of Two Wildly used Nanomaterials (Titanium dioxide and Silver) in Standardized Ecotoxicological Tests (2009 ~ 2011)	Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety	Ecology
Fraunhofer Institute Molecular Biology and Applied Ecology	Investigation of Ecotoxicological Long-term Effects of Selected Nanomaterials-Adaptation of Standardized Ecotoxicity Tests (2009 ~ 2012)	Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety	Ecology
McGill University (Canada)	Tools to Measure and Model the Transport, Transformations and Toxicity of Engineered Nanoparticles in Terrestrial Ecosystems (2007 ~ 2010)	NSERC	Ecology
NERC (UK)	Research to establish the mechanisms of toxicity, toxicokinetics and <i>in vivo</i> effects of nanoparticles to key ecological groups (including invertebrates, vertebrates (e.g. fish) and plants)		Environment
NERC (UK)	Define endpoints to be measured in ecotoxicological studies and assess how fit for purpose current standard tests for persistence, bioaccumulation and toxicity are when considering nanoparticles		Ecology
Tel Aviv Univ. (Israel)	Nano Health-Environment Commented Database (NHECD) (2008 ~ 2012)	EU FP-7	Environment
Consiglio Nazionale Delle Ricerche (Italy)	Development of an integrated platform for nanoparticle analysis to verify their possible toxicity and the eco-toxicity (2007 ~ 2010)	EU FP-6	Environment
Consiglio Nazionale Delle Ricerche (Italy)	Setting up Research Intensive Clusters across the EU on Characterization of Polymer Nanostructures (2008 ~ 2011)	EU FP-7	Environment
Dublin Univ. (Ireland)	A Pan-European Infrastructure for Quality in Nanomaterials Safety Testing (2011 ~ 2015)	EU FP-7	Environment
NERC (UK)	Nanoparticle Fate Assessment and Toxicity in the Environment (2010 ~ 2014)	EU FP-7	Fate
NAPIER Univ. (UK)	Engineered Nanoparticles: Review of Health and Environmental Safety (ENRHES) (2008 ~ 2009)	EU FP-7	Environment
Ekotek Ingenieri Y Consultoria Medioambiental (Spain)	Nanomaterials-related Environmental Pollution and Health Hazards throughout their Life-cycle (2009 ~ 2012)	EU FP-7	Environment
Agencia Estatal Consejo Superior De Investigaciones Cientificas (Spain)	Novel Sunlight-active Nanoarchitectures for Environmental and Human Health Protection Studied with a New Multi-Technique Methodology at Operando Conditions (2010 ~ 2012)	EU FP-7	Environment

Table 1은 국외에서 완료 또는 현재 진행중인 나노생태 독성 및 나노물질 영양단계 전이 관련과제이다. 이 외에도 상당수의 관련연구들이 연구소 및 대학에서 진행되고 있다. 반면 나노물질의 먹이사슬전이 영향연구는 4건 정도로 매우 부족한 실정이다 (Table 2).

Savannah River Ecology Lab. 외 3개의 기관 (Kentucky Univ., Dartmouth College, Georgia Univ.)에서 수행하고 있는 'The Bioavailability, Toxicity, and Trophic Transfer of Manufactured ZnO Nanoparticles: A view from the bottom'은 토양박테리아인 *Burkholderia cepacia*와 선충 *Caenorhabditis elegans*의 ZnONP의 생물이용성 및 독성을 평가하고 이 두 생물체간의 나노물질의 전이를 평가하는 것이 목적이다. 'Influence of Water Quality on the Bioavailability and Food Chain Transport of Carbon Nanoparticle'은 Celmon University에서 수행되고 있다. 탄소계 나노물질이 수체의 물리화학적 특성 (Natural Organic Matter, pH, Ionic Strength)에 따른 안정성 및 이에 따른 수서생물 (Algal-Daphnia-Fathead Minnow)에 미치는 영향 (생물이용성, 먹이사슬전이영향)을 평가하는 것을 내용으로 하고 있다. 위 두 개의 연구과제는 수서생태계의 먹이사슬전이를 다루고 있으며 'The Bioavailability, Toxicity, and Trophic Transfer of Manufactured ZnO Nanoparticles: A view from the bottom'의 경우 현재 25건의 관련연구과제 성과 (책, 논문 및 학회발표)를 제시하였다. Georgia University에서 수행하고 있는 'The Fate and Effects of Nanosized Metal Particles Examined Along

a Simulated Terrestrial Food Chain using Genomic and Microspectroscopic Techniques'는 육상생태계 먹이사슬 전이를 대상으로 하고 있다. 육상 영양단계인 지렁이 (*Eisenia fetida*)와 황소개구리 (*Rana catesbeiana*)를 대상으로 하여 CuNP, AgNP, AuNP의 생물이용성, 독성 등을 평가하고 유전체 (genomic) 및 현미경기술을 이용하여 나노물질이 세포내 분포양상 및 세포영향 평가를 다루고 있다. 이 연구 또한 23건의 관련 연구성과를 보고하였다. 유럽국가에서 수행중인 먹이사슬전이 연구는 ANSES (National Social Security Administration)에서 지원하고 CEMAGREF (Public Scientific and Technological Institute in France)에 의해 수행되고 있는 'Trophic Transfer of Nanomaterials and Biological Effect on Freshwater Organisms (TRONANO)'이 있다. 이 연구과제에서는 다양한 생물을 대상으로 나노물질 (CeO₂NP, TiO₂NP, AuNP)에 의한 분자, 생화학, 생리학적 반응을 평가하고 수생태계 먹이사슬전이를 평가하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 국내 연구현황

선진 외국에서는 나노물질의 개발뿐만 아니라 그에 따른 독성영향을 함께 연구하고 있는 추세이나 국내의 경우 주로 나노소재의 원천기술 및 제품화 기술개발에 중심을 두고 있다. 국내에서는 환경부의 나노환경기술개발 사업과 과학기술부의 메디컬 나노소재개발사업 등에서 나노입자에 대한 인체독성연구가 수행되고 있다. 우리나라 (환경부/국립환경과학원 주관)는 OECD Sponsorship

Table 3. Examples of Korean research projects of nanoparticles in an ecosystem.

Institute	Title (Project period)	Funding source	Research category
Konkuk Univ.	Trophic Transfer of Gold Nanoparticles in Ecosystem (2005 ~ 2008)	National Research Foundation (NRF), Korea	Trophic transfer
Chonnam National Univ.	Development of Isotope Labeling Nanoparticles and their Fate and Effect in Water Environment (2009 ~ 2015)	NRF	Trophic transfer
Seoul National Univ.	Phototoxicity of Fullerene to Freshwater Macroinvertebrates (2006 ~ 2007)	-	Ecology
National Institute Environmental Research (NIER)	Development of Test Methods and a Database for Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials (2007 ~ 2008)	NIER	Ecology
Korea Univ.	Use of Toxicogenomics for Toxicity Evaluation of Nanoparticles with <i>S. cerevisiae</i> and Japanese Medaka (2007 ~ 2009)	Ministry of Environment	Ecology
Konkuk Univ.	Ecotoxicity Change of Photoreactive Nanoparticles Exposed to Sunlight (2009 ~ 2012)	NRF, Korea	Ecology
NIER	Production of Toxicity Data for Silver Nanoparticles (2009)	NIER	-
Konkuk Univ.	Studies on the Terrestrial Toxicity of Nanomaterials (2010)	NIER	Ecology

Program 2단계 (2009. 7~)의 일환으로 5개 제조나노물질에 대한 안전성실험에 참여하고 있다. 2006년 OECD는 화학물질위원회 (Chemicals committee) 산하에 제조나노물질 작업반 (WPMN, Working Party on Manufactured Nanomaterials)을 설립하고, 나노물질이 인체 및 환경에 미치는 영향에 대하여 회원국 간의 정보교류 및 대응방안을 논의하였는데, 우리나라는 미국과 공동으로 은나노에 대한 주무국 (Lead sponsor)로서 지원 사업을 총괄하고 있고, 공동스폰서 (AuNP, MWCNTs, TiO₂, SiO₂), 기여자 (Dendrimer, Gold nanoparticle)로 참여하고 있다. 이와 관련하여 국립환경과학원에서는 2009년 “은나노물질의 유해성자료 생산” 연구과제가 수행되었고, 2010년 “은나노물질의 유해성 영향 인자 연구”와 “나노물질의 육상생태독성 연구”가 진행되어 최근 완료된 바 있다. 그 이외에 한국연구재단의 지원으로 나노독성에 관한 연구들이 증가추세에 있다. 나노물질의 먹이사슬 전이에 대한 연구는 최근 한국연구재단의 지원으로 “동위원소로 표지된 나노입자의 개발과 수서환경에서 거동과 영향연구”와 “금나노입자의 생태계 영양단계별 전이 연구”가 진행되고 있다 (Table 3).

연구동향 분석

나노물질에 대한 생태 독성연구는 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 국제적으로 나노물질 먹이사슬전이에 관련한 연구과제는 미국과 프랑스에서 각각 3건, 1건의 총 4건의 과제가 수행되었거나 현재 수행 중에 있다. 반면 국내의 경우 지원중인 나노물질에 대한 생태독성연구가 국제추세 (수백 개의 관련과제)에 비추어 현저히 적은 수 (6건의 관련과제)가 완료 또는 진행되고 있으며 먹이사슬 전이에 관련하여 최근 2건의 연구지원이 시작되었다. 나노물질의 먹이사슬전이에 관한 연구논문은 2008년부터 발표되기 시작하였으며 주로 2 Trophic Level에 대한 연구가 보고되고 있다. 현재까지 보고된 나노물질 먹이사슬 전이 연구논문은 총 7편이고 이 중 6편은 미국에서 수행된 연구였으며 1편은 프랑스에서 보고되었다. 이들 연구 중 2편을 제외한 나머지는 국가적 차원의 연구지원을 통해 수행되었다. 나노물질 먹이사슬전이 연구논문 중 3편은 QD를 대상물질로 하였는데 QD의 특성상 형광을 띄기 때문에 형광이미지를 통해 생물체내 축적된 QD를 확인하고 있었다. 그 외 AuNP를 대상으로 한 연구가 3편, 그리고 TiO₂NP를 이용한 연구 1편이 보고되었다. 먹이사슬전이 영양단계는 주로 담수생태계의 미생물, 조류,

물벼룩, 어류를 대상으로 하고 있으며 실험실 수준의 Mesocosm Test도 수행되었다. 토양생태계의 경우 식물과 이를 섭취하는 애벌레를 대상으로 수행되었다. 나노물질의 생체내 축적은 주로 ICP를 통해 축적된 NP의 구성물질 (QD의 경우 카드뮴)의 이온농도를 측정하여 생물농축을 평가하고 있으며 특이하게도 형광을 띄는 NP의 특성을 이용하여 Fluorescence Pixel Intensity를 통해 생물농축을 평가한 연구도 있었다. 또한 TEM, micro XRF 그리고 CLSM과 같은 영상분석장치를 이용하여 생물체내 소기관에 축적된 나노물질을 확인하고 축적양상 및 분포를 관찰하였다. 위 연구들에서는 먹이사슬전이에 따른 생물농축확대에 따른 잠재적인 위해성을 언급하고 있었다. 표면을 코팅한 금속계 나노입자의 경우 이를 직접 섭취한 생물체에게 독성영향이 나타나지 않을 수 있으나 상위레벨로 전이됨에 따라 표면코팅이 제거되고 금속 나노입자로부터 금속이온이 발생하여 독성을 야기할 수 있으며 (Bouldin *et al.*, 2008) 소수성의 나노입자의 경우 세포에 잔존하여 먹이사슬전이에 의해 생물확대가 발생할 개연성도 있기 때문이다 (Zhu *et al.*, 2010).

결 론

본 연구에서는 나노물질의 영양단계전이와 관련하여 국내·외에서 수행되고 있는 연구과제 및 관련논문을 수집하여 연구동향을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 연구가 필요함을 확인하였다. 나노물질의 독성을 평가하고 영양단계전이에 따른 영향을 이해하기 위해서는 나노물질 특성과 노출매체 특성간의 상호작용, 나노물질의 생물체로의 유입, 축적, 배출영향에 대한 연구가 함께 수행되어야 하나 이에 대한 연구가 매우 부족함을 확인하였다. 나노물질의 생태계 축적 및 배출은 나노물질의 특성과 환경적 요인 (매체의 특성)에 의해 영향 받음을 확인하였다. 나노물질과 노출매체간의 상호작용은 다양한 인자에 의해 영향을 받으나 아직까지 세부연구가 미비하므로 향후 관련 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 현재까지 보고된 나노물질 영양단계전이 논문의 상당수는 미국 내 국가연구지원에 의해 수행된 반면 우리나라에 경우 이에 대한 지원이 최근 시작되었고 그 지원 또한 외국에 비해 적어 국제적 연구추세에 비추어 정부차원의 지원이 증가해야 할 필요성이 있다. 더욱이 나노물질연구는 일부 나노물질 자체가 고가이고 생체내 유입, 축적 등 다양한 영향을 관찰하기 위해서는 많은 분석비용이 소모되어 국가차원의 연구지원이 수반되어야 한다. 또한 나노물질이

개별생물체에 미치는 영향뿐만 아니라 먹이망을 통해 인체 및 환경전반에 미칠 수 있는 잠재적인 위해성을 확인한 만큼 이를 고려하기 위하여 관련연구가 활발히 수행되어야 할 것이다. 나노기술은 국가 경제 및 기술의 원동력으로 중요한 역할을 하고 있다. 나노물질에 사용에 앞서 이에 대한 안전성을 확보할 필요가 있으므로 국가차원의 연구지원과 관심이 필요하다.

사 사

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-001-5985, NRF-2011-355-D00028).

인 용 문 헌

- Bouldin, J.L., T.M. Ingle, A. Sengupta, R. Alexander, R.E. Hannigan and R.A. Buchanan. 2008. Aqueous toxicity and food chain transfer of Quantum DOTs in freshwater algae and *Ceriodaphnia dubia*. *Environmental Toxicology and Chemistry* **27**: 1958-1963.
- Coleman, J.G., D.R. Johnson, J.K. Stanley, A.J. Bednar, C.A.W. Jr., R.E. Boyd and J.A. Steevens. 2010. Assessing the fate and effects of nano aluminum oxide in the terrestrial earthworm, *Eisenia fetida*. *Environ Toxicol Chem* **29**: 1575-1580.
- EC. CORDIS. 2011. http://cordis.europa.eu/home_en.html.
- EEB (European Environmental Bureau). 2009. Nanomaterials-Health and environmental concerns.
- Ferry, J.L., P. Craig, C. Hexel, P. Sisco, R. Frey, P.L. Pennington, M.H. Fulton, I.G. Scott, A.W. Decho, S. Kashiwada, M.J. Catherine and S.J. Timothy. 2009. Transfer of gold nanoparticles from the water column to the estuarine food web. *Nature Nanotechnology* **4**: 441-444.
- Gottschalk, F., T. Sonderer, R.W. Scholz and B. Nowack. 2009. Modeled Environmental Concentrations of Engineered Nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, Fullerenes) for Different Regions. *Environ Sci Technol* **43**: 9216-9222.
- Holbrook, R.D., K.E. Murphy, J.B. Morrow and K.D. Cole. 2008. Trophic transfer of nanoparticles in a simplified invertebrate food web. *Nature Nanotechnology* **3**: 352-355.
- Judy, J.D., J.M. Unrine and P.M. Bertsch. 2010. Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain. *Environmental Science and Technology* **45**: 776-781.
- Lee, W.M. and Y.J. An. 2010. Research trends of ecotoxicity of nanoparticles in water environment. *Journal of Korean Society on Water Quality* **26**: 566-573.
- Lee, W.M., S.W. Kim, J.I. Kwak, S.H. Nam, Y.J. Shin and Y.J. An. 2010. Research Trends of Ecotoxicity of Nanoparticles in Soil Environment. *Toxicology Research* **26**: 253-259.
- Lee, W.-M., J.I. Kwak and Y.-J. An. Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: Media effect on phytotoxicity. *Chemosphere*, in press.
- Lin, D. and B. Xing. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution* **150**: 243-250.
- MEST (Ministry of Education, Science, and Technology). 2008. National Technology Roadmap.
- National Science and Technology Information Service. 2011. <http://www.ntis.go.kr/Thmain.do>.
- Nel, A., T. Xia, L. Madler and N. Li. 2006. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science* **311**: 622-627.
- Nel, A.E., L. Madler, D. Velegol, T. Xia, E.M.V. Hoek, P. Somasundaran, F. Klaessig, V. Castranova and M. Thompson. 2009. Understanding biophysicochemical interactions at the nano-bio interface. *Nat Mater* **8**: 543-557.
- OECD. Database on Research into the Safety of Manufactured Nanomaterials. 2011. <http://webnet.oecd.org/NanoMaterials/Pagelet/Front/Default.aspx>.
- Oughton D.H., T. Hertel-Aas, E. Pellicer, E. Mendoza and E.J. Joner. 2008. Neutron activation of engineered nanoparticles as a tool for tracing their environmental fate and uptake in organisms. *Environ Toxicol Chem* **27**: 1883-1887.
- Petersen E.J., R.A. Pinto, D.J. Mai, P.F. Landrum and W.J. Weber. 2011. Influence of Polyethyleneimine Graftings of Multi-Walled Carbon Nanotubes on their Accumulation and Elimination by and Toxicity to *Daphnia magna*. *Environ Sci Technol* **45**: 1133-1138.
- Renault, S., M. Baudrimont, N. Mesmer-Dudons, P. Gonzalez, S. Mornet and A. Brisson. 2008. Impacts of gold nanoparticle exposure on two freshwater species: a phytoplanktonic alga (*Scenedesmus subspicatus*) and a benthic bivalve (*Corbicula fluminea*). *Gold Bulletin* **41**: 116-126.
- Sft (Staens forurensningstilsyn; Norwegian Pollution Control Authority). 2007. Environmental fate and ecotoxicity of engineered nanoparticles.

- The project on emerging nanotechnologies. 2011. www.nanotechproject.org.
- Tervonen, K., G. Waissi, E.J. Petersen, J. Akkanen and J.V.K. Kukkonen. 2010. Analysis of fullerene-C60 and kinetic measurements for its accumulation and depuration in *Daphnia magna*. *Environ Toxicol Chem* **29**: 1072-1078.
- Tolstoshev, A. 2006. Nanotechnology; Assessing the environmental risk for Australia. Earth policy center. Victoria.
- Tuominen, M. and E. Schultz. 2010. Environmental aspects related to nanomaterials. Finnish Environment. Finnish Environment Institute. Helsinki.
- UBA (Umwelt Bundes Amt). 2006. Nanotechnology: Opportunities and risks for humans and the environment.
- US EPA. 2007. Nanotechnology white paper. EPA 100/B-07/001, Science policy council, Washington, DC 20460.
- US EPA. Nanotechnology research project. 2011. http://epa.gov/ncer/nano/research/nano_tox.html.
- Unrine, J.M., S.E. Hunyadi, O.V. Tsyusko, W. Rao, W.A. Shoults-Wilson and P.M. Bertsch. 2010. Evidence for Bioavailability of Au Nanoparticles from Soil and Biodistribution within Earthworms (*Eisenia fetida*). *Environ Sci Technol* **44**: 8308-8313.
- Vonk, J.A., J. Struijs, D. van de Meent, W.J.G.M. Peijnenburg. 2009. Nanotechnology in perspective. RIVM; National Institute for Public Health and the Environment.
- Werlin, R., J.H. Priester, R.E. Mielke, S. Kramer, S. Jackson, P.K. Stoimenov, G.D. Stucky, G.N. Cherr, E. Orias and P.A. Holden. 2011. Biomagnification of cadmium selenide quantum dots in a simple experimental microbial food chain. *Nature Nanotechnology* **6**: 65-71.
- Zhu, X., J. Wang, X. Zhang, Y. Chang and Y. Chen. 2010. Trophic transfer of TiO₂ nanoparticles from daphnia to zebrafish in a simplified fresh water food chain. *Chemosphere* **79**: 928-933.
- Zijverden, M. van and A.J.A.M. Sips. 2009. Nanotechnology in perspective. RIVM; National Institute for Public Health and the Environment.

(Manuscript received 15 November 2011,
Revised 12 December 2011
Revision accepted 21 December 2011)