

토양 관련 조류독성 연구동향

Research Trends for Soil-Related Algal Toxicity

남선화 · 안윤주[†]

Sun-Hwa Nam · Youn-Joo An[†]

건국대학교 환경과학과

Department of Environmental Science, Konkuk University

(2013년 5월 27일 접수, 2013년 8월 29일 채택)

Abstract : Soil ecological risk assessment requires terrestrial toxicity data based on trophic levels including plants, earthworms, nematodes, and springtails. To expand the trophic levels, it is needed to consider primary producer algae, nearly distributed in terrestrial environment, as representative terrestrial test species. In this study, we collected research cases focused on soil-related test species and exposure media from SCI papers, and analyzed exposure media, test species, test chemicals, and other test methods, for reviewing research trends of soil-related algal toxicity. Up to now, in the soil-related algal toxicity, test species were 8 cases (*Pseudokirchneriella subcapitata*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus bijugatus*, *Chlorococcum infusionum*, *Scenedesmus subspicatus*, *Nostoc linckia*, *Synechococcus elongatus*, and *Chlorococcum* sp.) and endpoints were cell count or photosynthetic pigment content. Also, 5 of exposure media were liquid medium, soil extracts, porewater, agar medium, and soil. Most of papers used algae isolated from natural soils or soil extracts. There were only one case for assessing algal toxicity in soil medium. More researches regarding algal toxicity in soil environments need to be conducted consistently.

Key Words : Porewater, Soil, Soil Algae, Soil Extracts, Toxicity

요약 : 토양 생태위해성평가는 식물류, 지렁이류, 선충류, 곤충류 등 일부 영양 단계에 국한된 토양독성자료를 활용하고 있다. 토양독성자료의 생물종 확대를 위해 토양 환경에서의 주요 생산자인 조류가 우선적으로 고려되어야 한다. 본 연구에서는 토양 관련 조류독성 연구동향을 분석하기 위해 국제 학술 논문을 대상으로 토양 관련 시험종, 노출매체 등에 초점을 맞춰 연구 사례를 수집하였으며, 시험매체, 시험종, 시험물질, 시험방법 등의 특성 중심으로 분석하였다. 현재까지 토양 관련 조류독성 연구에 사용된 생물종은 8종(*Pseudokirchneriella subcapitata*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus bijugatus*, *Chlorococcum infusionum*, *Scenedesmus subspicatus*, *Nostoc linckia*, *Synechococcus elongatus*, and *Chlorococcum* sp.)으로 제한적이고, 독성 종말점은 세포계수나 광합성 색소 측정에 국한되어 있다. 또한 노출매체는 액체배지, 토양추출액(soil extract), 토양공극수(porewater), 한천배지, 토양 등 총 5종으로, 액체배지와 토양추출액이 대부분을 차지하며, 토양에서 분리된 조류를 이용하거나 토양 추출액을 이용하는 연구가 대부분이라 토양 매체에서의 직접적인 연구는 미비하다. 따라서 토양 오염으로 인한 생태계 건강성 저하를 방지하기 위하여 필요한 생태위해성평가는 토양 매체에서의 전반적인 종 민감도 분포 파악이 선행되어야 하므로, 토양 관련 조류 시험종 및 종말점 개발이 필요하다.

주제어 : 독성, 토양, 토양조류, 토양추출액, 토양공극수

1. 서론

조류(Algae)는 대표적인 생태독성 시험종으로 널리 알려진 생물이며, 주로 수중에 서식하나 암석, 토양, 나무, 건물 등 생육 환경에 따라 토양조류(Soil algae), 기중조류(Aerial algae), 빙설조류(Cryoalgae), 공생조류(Symbiotic algae), 담수조류(Freshwater algae), 해수조류(Marine algae)로 분류된다.^{1,2)} 조류는 수서생태계나 토양생태계 내 주요 생산자로서, 소형 수서 또는 토양 생물상 및 중형 수서 또는 토양 생물상에게 피식됨으로써 생태계 내 영양단계에서 주요한 위치를 차지하고 있다.³⁾ 신뢰성 높은 생태위해성평가는 전반적인 종 민감 분포도(Species Sensitivity Distribution)를 기반으로 수행되어야 하며, 이를 위해서는 생태계 내 영양 단계별 생태독성자료가 구축되어야 한다. 현재 수서생태계에 대한 위해성평가는 조류, 물벼룩류, 어류와 같은 3개 영양 단계를 중심

으로 확장된 수서독성자료를 바탕으로 확률생태위해성평가(Probabilistic Ecological Risk Assessment)나 결정생태위해성평가(Deterministic Ecological Risk Assessment)가 적용되고 있으나,⁴⁾ 토양생태계에 대한 위해성평가는 식물류, 지렁이류, 선충류, 곤충류 등 일부 영양 단계로 국한된 토양독성자료를 활용하고 있는 실정이다.⁵⁾ 토양독성자료의 생물종을 확대하기 위해서는 대부분의 토양에서 분포하는 주요 생산자인 토양조류가 우선적으로 고려되어야 한다.⁶⁾ 그러나 Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD),⁷⁾ European Community (EC),⁸⁾ American Society for Testing and Materials (ASTM),⁹⁾ International Organization for Standardization (ISO)¹⁰⁾ 등 국제적인 표준시험법에서 제시하고 있는 시험법은 녹조류 *Pseudokirchneriella subcapitata* (= *Selenastrum capricornutum*), *Desmodesmus subspicatus* (= *Scenedesmus subspicatus*), 규조류 *Navicula pelliculosa*, 남조

[†] Corresponding author E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr Tel: 02-2049-6090 Fax: 02-2201-6295

Table 1. Test species of algal growth inhibition test in international standard methods

Classification	Test species	References
Green algae	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> (= <i>Selenastrum capricornutum</i>)	OECD ⁷⁾ , EC ⁸⁾ , ASTM ⁹⁾ , ISO ¹⁰⁾
	<i>Desmodesmus subspicatus</i> (= <i>Scenedesmus subspicatus</i>)	OECD ⁷⁾ , EC ⁸⁾
Diatoms	<i>Navicula pelliculosa</i>	OECD ⁷⁾
Cyano-bacteria	<i>Anabaena flos-aquae</i>	OECD ⁷⁾
	<i>Synechococcus leopoliensis</i>	OECD ⁷⁾

류 *Anabaena flos-aquae*와 *Synechococcus leopoliensis* 등의 담수조류를 이용한 성장저해독성평가 시험법이 유일하다 (Table 1). 현재까지 조류에 대한 표준 토양독성시험법은 제시된 바 없으므로 토양조류를 이용한 독성평가 기법이 마련되어야 한다. 이를 위해서는 토양조류에 관한 기존 독성사례 연구가 선행되어야 하며, 조류의 토양독성평가에의 적용성을 검토하고 개선 방향을 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 토양 관련 조류독성 연구동향을 분석하기 위해 국제학술논문을 대상으로 토양 관련 시험종, 노출매체 (액체배지, 토양추출액, 토양공극수, 한천배지, 토양) 등에 초점을 맞춰 연구사례를 수집하였으며, 이 때 액체 배지에서 실험되었으나, 토양에서 채취 및 분리된 조류를 이용한 사례도 포함되었다. 수집된 연구 사례를 바탕으로 노출매체, 시험종, 시험물질, 시험방법(예: 노출기간, 노출온도, 희석수, 종말점 등) 등의 세부 사항 중심으로 비교 분석하였다.

2. 토양 관련 조류독성 연구사례

현재까지 보고된 토양 관련 조류독성 연구사례는 총 14건으로, 노출매체 종류에 따라 액체배지, 토양추출액, 토양공극수, 한천배지, 토양에서의 독성사례로 분류되며, 자세한 내용은 다음과 같다.

2.1. 액체 배지(Liquid medium)에서의 독성사례

현재까지 보고된 토양에서 분리 배양된 조류를 이용한 액체 배지에서의 생태독성연구는 Megharaj et al.^{11,12)} Caceres et al.¹³⁾의 3건이 있다. Megharaj et al.¹¹⁾은 목화밭으로 사용된 바 있는 토양에서 분리 배양된 녹조류 *Chlorella vulgaris*와 남조류 *Nostoc linckia*를 이용하여 p-Nitrophenol (PNP), m-Nitrophenol (MNP), 2,4-Dinitrophenol (DNP), Catechol 등 페놀계 화합물 4종의 액체 배지에서의 독성 영향을 평가하였다. 35일 동안 Bold basal medium으로 희석된 0~50 µg/mL 페놀계 화합물 4종에 노출시킨 *C. vulgaris*의 세포 계수 결과, 페놀계 화합물 4종 모두 10, 20, 30, 35일 째 세포 수 감소 현상이 나타났다. 또한 35일 동안 Modified Chu-10 nitrogen free medium으로 희석된 0~50 µg/mL 페놀계 화합물 4종에 노출시킨 *N. linckia*의 클로로필-a 및 카로테노이드

농도 측정 결과, 경우 5, 15, 25, 35일 째 고농도 처리군에서 클로로필-a 및 카로테노이드 농도가 감소하였으며, PNP의 경우에만 25, 35일 째 전농도 처리군에서 클로로필-a 및 카로테노이드 농도가 감소하였다. 이를 바탕으로 페놀계 화합물 4종에 대한 독성 민감도는 *C. vulgaris* > *N. linckia* 순으로 민감한 것으로 나타났다. 다음으로 Megharaj et al.¹²⁾은 벼 경작 토양에서 분리 배양된 녹조류 *Scenedesmus bijugatus*와 남조류 *Synechococcus elongatus*를 이용하여 Carbofuran, Carbaryl 등 살충제 2종의 액체 배지에서의 독성 영향을 보고한 바 있다. 32일 동안 28 ± 4°C에서 Bold basal medium으로 희석된 0~100 µg/mL 살충제 2종에 노출시킨 *S. bijugatus*의 세포 계수 결과, 6, 20, 26일 째 10 µg/mL Carbofuran 처리군부터 세포 수가 감소하였으며, 32일 째 50 µg/mL Carbofuran 처리군부터 세포 수가 감소하였다. 또한 Carbaryl의 경우 6일 째 5 µg/mL 처리군부터, 20, 26일 째 2 µg/mL 처리군부터, 32일 째 50 µg/mL 처리군에서 세포 수 감소 현상이 나타났다. 한편 32일 동안 28 ± 4°C에서 Modified Chu-10 nitrogen free medium으로 희석된 0~100 µg/mL 살충제 2종에 노출시킨 *S. elongatus*의 세포 계수 결과, 6, 20, 26, 32일 째 2 µg/mL Carbofuran 처리군부터 세포 수가 감소하였으며, 1 µg/mL Carbaryl 처리군부터 세포 수가 감소하였다. 또한 35일 동안 노출시킨 *S. elongatus*의 클로로필-a 농도를 측정한 결과, Carbofuran의 경우 10일 째 20 µg/mL 처리군부터, 15일 째 50 µg/mL 처리군부터, 20일 째 10 µg/mL 처리군부터, 25일 째 100 µg/mL 처리군에서, 35일 째 전농도 처리군에서 클로로필-a 농도가 감소하는 것으로 나타났으며, Carbaryl의 경우, 10, 20일 째 5 µg/mL 처리군부터, 15일 째 10 µg/mL 처리군부터, 25일 째 50 µg/mL 처리군에서, 35일 째 전농도 처리군에서 클로로필-a 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 살충제 2종에 대한 시험종별 독성 민감도는 *S. elongatus* > *S. bijugatus* 순으로 민감하였고, 종말점별 독성 민감도는 세포 계수 > 클로로필-a 농도 순으로 민감하였으며, 두 시험종에 대한 독성도는 Carbaryl > Carbofuran 순으로 강한 것으로 나타났다. 마지막으로 Caceres et al.¹³⁾은 10년 이상 농약에 오염되지 않고 경작 가능한 지역 토양에서 분리 배양된 녹조류 *Chlorococccum* sp.를 이용하여 Femaniphos, Fenamphos sulfoxide, Fenamiphos sulfone, Femaniphos phenol, Fenamphos sulfoxide phenol, Fenamiphos sulfone phenol 등 농약류 6종의 액체 배지에서의 독성 영향을 평가한 연구이다. 4일 동안 25°C에서 Bold basal medium으로 희석된 0~100 mg/L 농약류 6종에 노출시킨 *Chlorococccum* sp.의 세포 계수 결과, 농약류 4종에 의한 성장 저해 현상이 나타났으며, 4d-EC₅₀은 Femaniphos 38.49 mg/L, Ffemaniphos phenol 10.54 mg/L, Fenamphos sulfoxide phenol 30.33 mg/L, Fenamiphos sulfone phenol 16.25 mg/L로 산출되었다.

2.2. 토양 추출액(Soil extract)에서의 독성사례

현재까지 보고된 토양 추출액에서의 조류독성연구는 Tomas

et al.,¹⁴⁾ Hammel et al.,³⁾ Baun et al.,¹⁵⁾ Aruoja et al.,¹⁶⁾ Robidoux et al.,¹⁷⁾ Antunes et al.,¹⁸⁾ Maisto et al.,¹⁹⁾ Marques et al.²⁰⁾의 8건이 있다. Tomas et al.¹⁴⁾은 *Pseudokirchneriella subcapitata* (= *Selenastrum carpicornutum*)를 이용하여 Roundup, Arsenal (2 Ib), Garlon 4, Tordon 101 M, Velpar L, Velpar ULW 등 제초제 6종의 토양 추출액에서의 독성 영향을 보고한 바 있다. 제초제 6종으로 1시간, 5일, 10일 오염된 토양과 물을 각각 1:4 비율로 혼합하여 토양 추출액을 추출하였으며, 이를 성장 배지로 희석하여 4일 동안 24 ± 2°C에서 노출시켰다. 그 결과 제초제에 의한 오염 기간과 무관하게 세포 수 감소 현상이 두드러지게 나타났다. 단, Arsenal (2 Ib)의 경우 5일 오염 토양 추출액 50% 및 80% 처리군에서, 10일 오염 토양 추출액 80% 처리군에서, Roundup의 경우 10일 오염 토양 추출액 10%, 50%, 80% 처리군에서 대조군 대비 과성장이 나타났다. Hammel et al.³⁾은 녹조류 *Chlorococcum infusionum*, *Scenedesmus subspicatus*를 이용하여 SbO/K tartrate으로 오염된 토양 추출액에서의 독성 영향을 평가하였다. 6달 동안 압조건, 6°C에서 1,000 mg/kg SbO/K tartrate으로 오염시킨 후, 토양과 물을 1:2.5 비율로 혼합하여 토양 추출액을 추출하였다. 추출된 토양 추출액을 희석하여 DIN 38412/9에 따라 두 시험종의 성장 저해를 평가하였다. 그 결과 두 시험종 모두 성장 저해 현상이 발생하였으며, 독성값은 *C. infusionum*의 경우 EC₅₀ 43 mg/L, *S. subspicatus*의 경우 EC₅₀ 59 mg/L로 산출되었다. 이를 바탕으로 SbO/K tartrate에 대한 독성 민감도는 *C. infusionum* > *S. subspicatus* 순으로 민감한 것으로 나타났다. Baun et al.¹⁵⁾은 녹조류 *P. subcapitata*를 이용하여 7군데 다방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) 오염 토양 추출액에서의 독성 영향을 평가하였다. 34~2,960 mg/kg PAH 오염 토양과 ISO medium을 1:4 비율로 혼합하여 토양 추출액을 추출하였으며, 2일 동안 21 ± 2°C에서 노출시킨 후 조류 색소의 형광(ex 420, em 671 nm)을 측정하고 결과 *P. subcapitata*의 성장 저해가 발생하였다. 또한 Aruoja et al.¹⁶⁾은 녹조류 *P. subcapitata*를 이용하여 11군데 카드뮴, 납, 아연 오염 토양 추출액에서의 독성 영향을 보고하였다. 중금속 3종 오염 토양과 물을 1:99 비율로 혼합하여 토양 추출액을 준비하였으며, 3일 동안 23 ± 2°C에서 노출시킨 후 조류 색소의 형광(ex 440, em 670 nm)을 측정하고 결과 *P. subcapitata*의 성장 저해 현상이 나타났다. Robidoux et al.¹⁷⁾은 8군데 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), 1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazine (RDX), 1,3,5,7-Tetranitro-1,3,5,7-tetrazacyclooctane (HMX) 및 그 부산물 오염 토양 추출액에서의 독성 영향을 평가하였으며, 1군데 토양 추출액을 제외하고 4일 동안 25 ± 1°C에서 *P. subcapitata*의 세포 수 감소로 성장 저해 현상을 확인할 수 없었다. 또한 Antunes et al.¹⁸⁾은 Chlorpyrifos, Endosulfan, Glyphosate, Vinclozolin 등 농약류 오염 토양 추출액을 토양과 Woods Hole MBL medium의 1:4 비율로 추출하여 20 ± 2°C에서 *P. subcapitata*의 흡광도(440 nm) 측정을 통해 성장 저해 영향을 파악하였다. Endosulfan 및 Vinclozolin 오염 토

양 추출액 12.5% 처리군에서만 성장 저해가 확인되었으며, 나머지 토양 추출액 처리군에서는 과성장이 확인되었다. 한편 Maisto et al.¹⁹⁾은 크롬, 구리, 니켈, 납 오염 토양과 물을 1:4 비율로 추출한 토양 추출액에서의 *P. subcapitata*의 세포 수 변화로 독성 영향을 평가하였으며, 4일 동안 24°C에서 노출시킨 도심 지역 토양 추출액 및 산업 지역 토양 추출액에서 세포 수 감소가 확인되었다. 마지막으로 Marques et al.²⁰⁾은 습지대, 운하, 논 지역 토양과 Woods Hole MBL medium의 1:4 비율로 추출한 토양 추출액에서의 *P. subcapitata* 및 *Chlorella vulgaris* 세포 수 계수를 통해 성장 저해 영향이 확인되었다. *P. subcapitata*의 경우 습지대 및 운하 토양 추출액의 전농도 처리군에서 성장 저해가 발생하였으며, 논 토양 추출액 100% 처리군에서 성장 저해가 발생하였다. 반면 *C. vulgaris*의 경우 습지대 및 운하 토양 추출액보다 논 토양 추출액에서 성장 저해 영향이 더 높게 평가되었다.

2.3. 토양 공극수(Pore water)에서의 독성사례

현재까지 보고된 토양 공극수에서의 조류독성연구는 Cook et al.²¹⁾가 있다. *P. subcapitata*를 이용하여 탄화수소, 중금속, 염 오염 토양 공극수의 독성 영향을 평가하였으며, 4일 동안 흡광도(430 nm) 측정을 통해 조류 과성장을 확인하였다. 토양 공극수 추출은 column leaching을 이용하여 22°C에서 추출하였으며, 오염되지 않은 토양 공극수는 오염되지 않은 토양에서 추출한 공극수를 사용하였다. 한편 오염 토양 공극수 100%까지 노출시킨 결과 조류 성장 저해는 관찰되지 않았으며, 오히려 성장 촉진 현상이 발생하였다.

2.4. 한천 배지(Agar medium)에서의 독성사례

현재까지 보고된 토양에서 분리 배양된 조류를 이용한 한천 배지에서의 조류독성연구는 Megharaj et al.²²⁾이 유일하다. Megharaj et al.²²⁾은 목화밭 토양에서 분리 배양된 녹조류 *C. vulgaris*와 *Scenedesmus bijugatus*를 이용하여 Monocrotophos, Quinalphos, Cypermethrin, Fenvalerate, Carbofuran, Carbaryl 등 살충제 6종의 한천 배지에서의 독성 영향을 평가한 연구이다. 5일 동안 26 ± 3°C에서 Bold basal medium으로 희석된 0~60 µg/disc 농도로 살충제 6종에 노출시킨 *C. vulgaris* 및 *S. bijugatus*의 디스크 주변 성장저해 면적 측정 결과, Monocrotophos의 경우 *C. vulgaris*는 20 µg/disc 처리군부터, *S. bijugatus*는 8 µg/disc 처리군부터 성장저해 면적이 증가하였고, Quinalphos 및 Carbaryl의 경우 두 시험종 모두 2 µg/disc 처리군부터 성장저해 면적이 증가하였으며, Cypermethrin, Fenvalerate, Carbofuran의 경우 두 시험종 모두 4 µg/disc 처리군부터 성장저해 면적이 증가하였다. 이를 바탕으로 두 시험종에 대한 독성도는 Quinalphos > Carbaryl > Carbofuran > Cypermethrin > Fenvalerate > Monocrotophos 순으로 강한 것으로 나타났다.

2.5. 토양에서의 독성사례

현재까지 보고된 토양에서의 조류독성연구는 유일하게 Ha-

mml et al.³⁾ 1건이 있다. Hammel et al.³⁾은 녹조류 *Chlorococcum infusionum*을 이용하여 SbO/K tartrate, Sb₂S₃, Sb₂S₅ 등 안티몬 화합물 3종의 토양에서의 독성 영향을 보고한 바 있다. 농지 토양에서 채취한 3가지 특성의 토양(예: Vambisol,

Luvisol, Chernozem)을 안티몬 화합물 3종으로 오염시켜 6 달 동안 암조건, 6°C에서 숙성시킨 후 14일 동안 21 ± 1°C에서 *C. infusionum*에 노출시켰으며, 5군데 광업 지역 오염 토양도 동일한 방법으로 노출시켰다. 14일 후 총 클로로필 농

Table 2. Toxicity data using soil algae and soil-related exposure media

Test media	Test species	Test chemicals	Test methods	References
Liquid medium	<i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Nostoc linckia</i> isolated from soil	p-Nitrophenol (PNP), m-nitrophenol (MNP), 2,4-dinitrophenol (DNP) and catechol	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 35 days Dilution water : bold basal medium for <i>C. vulgaris</i> and modified Chu-10 nitrogen free medium for <i>N. linckia</i> Endpoint : cell count, concentration of chl-a and carotenoid 	Megharaj et al. ¹¹⁾
	<i>Scenedesmus bijugatus</i> and <i>Synechococcus elongatus</i> isolated from soil	Carbofuran and carbaryl	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 32, 35 days Exposure temp. : 28 ± 4 °C Dilution water : bold basal medium Modified Chu-10 nitrogen free medium Endpoint : cell count, concentration of chl-a 	Megharaj et al. ¹²⁾
	<i>Chlorococcum</i> sp. isolated from soil	Femaniphos, fenumphos sulfoxide, fenumphos sulfone, fenumphos phenol, fenumphos sulfoxide phenol and fenumphos sulfone phenol	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 4 days Exposure temp. : 25 °C Dilution water : bold basal medium Endpoint : cell count 	Caceres et al. ¹³⁾
Soil extracts	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Roundup, arsenal (2 lb), garlon 4, tordon 101M, velpar L and velpar ULW	<ul style="list-style-type: none"> Soil:water=1:4 Exposure duration : 4 days Exposure temp. : 24 ± 2 °C Endpoint : cell count 	Tomas et al. ¹⁴⁾
	<i>Chlorococcum infusionum</i> and <i>scenedesmus subspicatus</i>	SbO/K tartrate	<ul style="list-style-type: none"> Soil:water=1:2,5 According to DIN 38412/9 	Hammel et al. ³⁾
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Polycyclic aromatic hydrocarbons	<ul style="list-style-type: none"> Soil:water=1:4 Exposure duration : 2 days Exposure temp. : 21 ± 2 °C Endpoint : fluorescence 	Baun et al. ¹⁵⁾
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Cd, Pb, Zn	<ul style="list-style-type: none"> Soil:water=1:99 Exposure duration : 3 days Exposure temp. : 23 ± 2 °C Endpoint : fluorescence 	Aruoja et al. ¹⁶⁾
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) and 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazacyclooctane (HMX)	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 4 days Exposure temp. : 25 ± 1 °C Endpoint : cell count 	Robidoux et al. ¹⁷⁾
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Chlorpyrifos, endosulfan, glyphosate and vinclozolin	<ul style="list-style-type: none"> Soil:woods Hole MBL medium=1:4 Exposure temp. : 20 ± 2 °C Endpoint : absorbance 	Antunes et al. ¹⁸⁾
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Cr, Cu, Ni and Pb	<ul style="list-style-type: none"> Soil:water=1:4 Exposure duration : 4 days Exposure temp. : 24 °C Endpoint : cell count 	Maisto et al. ¹⁹⁾
	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> and <i>chlorella vulgaris</i>	-	<ul style="list-style-type: none"> Soil:woods Hole MBL medium=1:4 Endpoint : cell count 	Marques et al. ²⁰⁾
Pore water	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	Hydrocarbon, heavy metals and salts	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 4 days Endpoint : absorbance 	Cook et al. ²¹⁾
Agar	<i>Chlorella vulgaris</i> and <i>scenedesmus bijugatus</i> isolated from soil	Monocrotophos, quinalphos, cypermethrin, fenvalerate, carbofuran and carbaryl	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 5 days Exposure temp. : 26 ± 3 °C Endpoint : inhibition area near disc 	Megharaj et al. ²²⁾
Soil	<i>Chlorococcum infusionum</i>	SbO/K tartrate, Sb ₂ S ₃ and Sb ₂ S ₅	<ul style="list-style-type: none"> Exposure duration : 14 days Exposure temp. : 21 ± 1 °C Endpoint : concentration of chl-a 	Hammel et al. ³⁾

도를 측정된 결과, Sb₂S₃, Sb₂S₅을 오염시킨 Luvisol, Chernozem 토양에서 총 클로로필 농도가 감소하였으며, Sb₂S₃의 경우 14d-EC₅₀ 257 mg/kg dw (Luvisol), 125 mg/kg dw (Chernozem), Sb₂S₃, Sb₂S₅의 경우 14d-EC₅₀ 172 mg/kg dw (Luvisol), 314 mg/kg dw (Chernozem)으로 산출되었다. 또한 5군데 광업 지역 오염 토양 중 2군데 오염 토양에서 급격한 총 클로로필 농도 감소가 나타났다.

3. 토양 관련 조류독성 연구동향 분석

Table 2에 제시한 바와 같이 토양 관련 조류독성 연구는 총 14건으로, 토양에서 분리된 조류를 이용하여 액체배지 또는 한천배지에서 실험한 사례가 있었으며, 액체배지에서 배양된 조류를 이용하여 토양추출액, 토양공극수 또는 토양에서 실험한 사례가 보고되었다. 노출매체는 토양추출액 8건, 액체배지 3건, 토양공극수, 한천배지, 토양 각각 1건씩 사용되었으며, 주로 토양추출액을 사용한 것으로 나타났다. 또한 시험종은 *P. subcapitata* 8건, *C. vulgaris* 3건, *S. bijugatus* 2건, *C. infusionum* 2건, *S. subspicatus*, *N. linckia*, *S. elongatus*, *Chlorococccum* sp. 각각 1건씩 사용되었으며, OECD,⁷⁾ EC,⁸⁾ ASTM,⁹⁾ ISO¹⁰⁾ 등 국제적인 표준시험법에서 담수조류 성장저해독성평가 시험으로 권고하고 있는 *P. subcapitata*가 주로 사용된 것으로 나타났다. 한편 시험물질은 폐놀계 화합물, 농약류, 중금속류, 다방향탄화수소 등이 사용되었으며, 노출기간, 노출온도, 희석수, 독성종말점 등의 세부 시험 조건은 노출매체 및 시험종에 따라 상이하게 적용되었다. *P. subcapitata*의 경우 액체배지, 토양추출액, 토양공극수에서 2~4일 동안 18~26°C에서 노출되었으며, *C. vulgaris*의 경우 액체배지에서 35일, 한천배지에서 5일 동안 노출되었다. *S. bijugatus*의 경우 액체배지에서 32~35일, 한천배지에서 5일 동안 26~32°C에서 노출되었으며, *C. infusionum*의 경우 토양에서 14일 동안 20~22°C에서 노출되었다. 희석수는 Bold basal medium, Modified Chu-10 nitrogen free medium, Woods hole MBL medium이 주로 사용되었고, 독성 종말점은 세포계수, 클로로필 또는 카로테노이드 등 광합성 색소 농도, 형광도, 흡광도, 성장 저해 면적이 있으며, 주로 세포계수가 적용된 바 있다.

현재까지 토양 관련 조류독성 연구에 사용된 생물종은 8종으로 제한적이며, 독성 종말점은 세포계수나 광합성 색소 측정에 국한되어 있다. 또한 표준시험법에 제시된 일부 생물종의 독성 영향에 치중되어 있으며, 토양에서 분리된 조류를 이용하거나 토양 추출액을 이용하는 연구가 대부분이라 토양 매체에서의 직접적인 연구는 매우 미비한 실정이다. 지속적으로 토양 오염이 유발되는 시점에서 토양생태계의 전반적인 중 민감도 분포도를 통한 토양 생태위해성평가가 수행되기 위해서는 토양에서 적용 가능한 조류시험종 및 독성종말점을 개발할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 토양 관련 조류독성 연구동향을 분석하기 위해 국제 학술 논문을 대상으로 토양 관련 시험종이나 노출매체 등에 초점을 맞춰 연구 사례를 수집하였으며, 노출매체, 시험종, 시험물질, 시험방법 등의 특성 중심으로 분석하였다. 현재까지 보고된 토양 관련 조류독성 연구는 총 14편에 불과하여, 주로 토양에서 분리된 조류를 이용한 액체배지에서의 실험이나 담수조류 성장 저해 평가를 위한 표준 시험법에서 권고하는 시험종을 이용한 토양 추출액에서의 실험이 주로 확인되었으며, 토양 공극수나 토양에서 실험한 사례는 극히 드물었다. 그러나 주요 생산자인 토양조류를 제외한 식물류, 지렁이류, 선충류, 곤충류 등 일부 영양 단계로 국한된 토양독성자료를 이용한 토양 생태위해성평가는 한계가 있으므로, 전반적인 중 민감도 분포 파악이 가능하도록 토양 관련 조류 시험종 및 종말점 개발 등 체계적인 토양 관련 조류 독성평가 방법 정립이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 ‘토양지하수오염방지기술개발사업(2012-000540011)’ 연구비 지원에 의해 수행되었음

KSEE

참고문헌

1. Lim, A. S. and Lee, O.-M., “The distribution of aerial algae and the evaluation of algal inhabitation on five stone cultural properties in Gyeonggi-do,” *Algae*, **23**(4), 269~276(2008).
2. Linda, E. G. and Lee, W. W., “Algae,” pp. 1~640(2000).
3. Hammel, W., Steubing, L. and Debus, R., “Assessment of the ecotoxic potential of soil contaminants by using a soil-algae test,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **40**(1-2), 173~176(1998).
4. An, Y.-J., Nam, S.-H. and Lee, W.-M., “Comparative study of probabilistic ecological risk assessment (PERA) used in developed countries and proposed PERA approach for Korean water environment,” *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **25**(4), 494~501(2009).
5. An, Y.-J., Lee, W.-M., Nam, S.-H. and Jeong, S.-W., “Proposed approach of Korean ecological risk assessment for the derivation of soil quality criteria,” *Kor. Soc. Soil Groundwater Environ.*, **15**(3), 7~14(2010).
6. Metting, B., “The systematics and ecology of soil algae. the botanical review,” p. 196(1981).
7. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), “OECD guidelines for the testing of chemicals, section 2: effects on biotic systems. Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test,” pp. 15(2011).
8. European Community (EC), “C.3. Algal inhibition test,” p. 4(1992).

9. American Society for Testing and Materials (ASTM), "D3978-04(2012) Standard Practice for Algal Growth Potential Testing with *Pseudokirchneriella subcapitata*," p. 1(2012).
10. International Organization for Standardization (ISO), "ISO 8692:2012 Water Quality-Fresh water algal growth inhibition test with unicellular green algae," p. 1(2012).
11. Megharaj, M., Venkateswarlu, K. and Rao, A. S., "The toxicity of phenolic compounds to soil algal population and to *Chlorella vulgaris* and *Nostoc linckia*," *Plant Soil*, **96**(2), 197~203(1986).
12. Megharaj, M., Venkateswarlu, K. and Rao, A. S., "Effects of carbofuran and carbaryl on the growth of a green alga and two cyanobacteria isolated from a rice soil," *Agr. Ecosyst. Environ.*, **25**(4), 329~336(1989).
13. Caceres, T., Megharaj, M. and Naidu, R., "Toxicity and transformation of fenamiphos and its metabolites by two microalgae *Pseudokirchneriella subcapitata* and *Chlorococcum* sp.," *Sci. Total Environ.*, **398**(1-3), 53~59(2008).
14. Thomas, M. W., Judy, B. M., Lower, W. R., Krause, G. F. and Sutton, W. W., "Time-dependent toxicity assessment of herbicide contaminated soil using the green alga *Selenastrum capricornutum*," *Plants Tox Ass.*, pp. 235~254(1990).
15. Baun, A., Justesen, K. B. and Nyholm, N., "Algal test with soil suspensions and elutriates.: a comparative evaluation for PAH-contaminated soils," *Chemosphere.*, **46**(2), 251~258(2002).
16. Aruoja, V., Kurvet, I., Dubourguier, H. C. and Kahru, A., "Toxicity testing of heavy-metal-polluted soils with algae *Selenastrum* a soil suspension assay," *Environ. Toxicol.*, **19**(4), 396~402(2004).
17. Robidoux, P. Y., Gong, P., Sarrazin, M., Bardai, G., Paquet, L., Hawari, J., Dubois, C. and Sunahara, G. I., "Toxicity assessment of contaminated soils from an antitank firing range," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **58**(3), 300~313(2004).
18. Antunes, S. C., Pereira, J. L., Cachada, A., Duarte, A. C., Gonçalves, F., Sousa, J. P. and Pereira, R., "Structural effects of the bioavailable fraction of pesticides in soil Suitability of elutriate testing," *J. Hazard. Mater.*, **184**(1-3), 215~225(2010).
19. Maisto, G., Manzo, S., De Nicola, F., Carotenuto, R., Rocco, A. and Alfani, A., "Assessment of the effects of Cr, Cu, Ni and Pb soil contamination by ecotoxicological tests," *J. Environ. Monit.*, **13**(11), 3049~3056(2011).
20. Marques, C. R., Pereira, R. and Gonçalves, F., "Toxicity evaluation of natural samples from the vicinity of rice fields using two trophic levels," *Environ. Monit. Ass.*, **180**(1-4), 521~36(2011).
21. Cook, S. V., Chu, A. and Goodman, R. H., "Leachability and toxicity of hydrocarbons, metals and salt contamination from flare pit soil," *Water, Air, Soil Pollut.*, **133**(1-4), 297~314(002).
22. Megharaj, M., Venkateswarlu, K. and Rao, A. S., "The use of unicellular soil green algae for insecticide bioassay," *J. Microbiol. Methods*, **10**(2), 119~122(1989).