

곤충·거미 생물지표를 이용한 생태계위해도 평가

김용균¹⁾·배연재²⁾·유건상³⁾·이시혁⁴⁾·조기종⁵⁾·이준호⁴⁾*

1. 서 론

환경은 생물을 둘러싸고 있는 모든 제한 조건들의 총합이라고 할 수 있으며, 생물들의 생존과 번성을 결정하는 제한된 자원을 제공하는 공간으로서 생물과 환경을 아우르는 공간이 생태계이다. 따라서 생태계 내부에서는 많은 물리화학적 요소와 인간을 포함하는 다양한 생물들이 끊임없이 상호작용을 하고 있어, 생태계 자체가 하나의 생물학적 유기체로 작용한다.

최근 생태계 전반에 걸쳐서 나타나는 환경오염은 제반 산업 활동 및 인간 활동의 결과로서 필연적으로 발생하는 유해화학물질 및 환경오염물질에 기원하며 생태계의 자정능력을 크게 훼손함으로써 인간의 쾌적한 삶을 위협하는 위중한 요소로 대두되고 있다. 즉, 현재의 생태계는 산업발전과 조절 불가능한 오염물질의 이동에 의해 생태학적 변화가 가속화되고 있는 실정이다. 따라서 인간의 생활과 밀접한 관련을 가지는 생태계나 특정 지역의 변화를 파악하고 추적하며, 이에 대한 신뢰할 만한 정보를 축적하는 일은 매우 중요하다. 근래의 환경생태학적 연구들은 자연생태계를 보전시키면서 인간의 생존 및 지속 가능한 발전을 도모한다는 측면에서 종래의 공학기술이나 화학적 방법들에 의존하던 것에서 탈피하여 생물학적 방법을 이용하여 기존의 방법들이 안고 있었던 문제점들을 보완하고자 하는 경향이 뚜렷하다.

생태계의 오염상태를 모니터링하는 것은 물리화학적·생물학적 변화를 동반하는 생태계의 변화에 대한 정량적, 정성적인 정보를 수집하는 것으로서 환경에 노출되어 있는 다양한 형태의 독성폐기물 또는 오염물질의 수준을 파악하는 기본적 도구이다. 환경변화 모니터링의 전제조건은 적절한 환경지표생물의 개발이다. 종래의

화학적 모니터링으로는 오염물질에 의한 생물학적 결과를 파악할 수 없다. 따라서 이러한 물질에 반응하여 생리학적·생태학적 민감성을 보이는 생물을 모니터링하는 것이 생태계의 기본변화를 파악하는 가장 효과적인 수단이다. 토양오염이나 하천의 오염에 대해 생물학적평가방법을 적용하는 것은 자연환경의 보전과 관리 및 그 건강성 유지라는 차원에서 매우 중요할 것이며, 이를 포함하는 모든 환경변화는 장단기적으로 한 국가의 장래를 위한 환경정책의 수립에 결정적인 단서를 제공할 것이다. 그림 1은 생태계의 건강성 확보와 환경정책 수립 및 환경지표생물의 위치 등을 표시한 개념도이다.

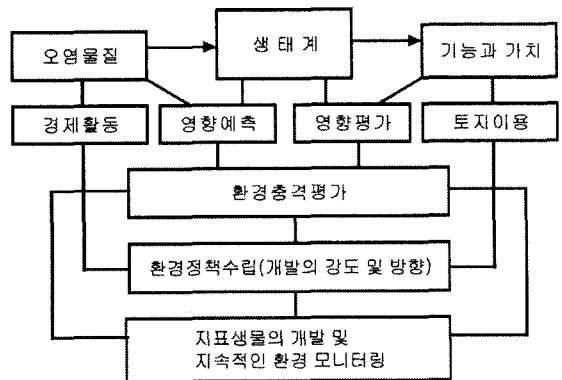


그림 1. 환경지표생물을 통한 환경영향평가와 환경정책 수립의 개념도.

2. 곤충·거미 생물지표의 중요성

생물지표(生物指標, bioindicator)는 환경상태 또는 환경을 구성하는 요소들의 상황을 측정하는데 이용될 수

1) 안동대학교 생명자원과학부
 2) 서울여자대학교 생물학과
 3) 안동대학교 화학과
 4) 서울대학교 농생명공학부
 5) 고려대학교 환경생태공학

있는 생물을 말한다. 산업발달과 함께 화학물질의 생산과 사용도 급증해 최근 각종 폐수에서 검출되는 화학물질의 종류가 무려 1,600만종에 이르고, 그것도 모자라 해마다 4만종 정도가 새로 생성되고 있다. 따라서 아무리 첨단 시약과 물리·화학적 방법을 동원해도 오염물질을 모두 가려 낼 수는 없는 실정이기 때문에 동물, 식물 그리고 곤충 등을 생물지표로 이용해서 환경오염정도를 측정하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히, 곤충은 금세기에 들어 환경 특성의 정도를 나타내는 지표로 사용되어 왔다.

곤충은 환경 스트레스에 대해서 신속히 반응하며, 세대기간이 짧고, 대개 채집과 동정이 용이하기 때문에 좋은 지표로 여겨지고 있다. 또한 곤충은 좋은 생물지표가 갖추어야 할 3가지 기준을 만족시키는데 그 기준이란 변화에 대한 초기 경고를 제공할 수 있을 만큼 충분히 민감해야 하고, 지리적으로 넓은 지역에 걸쳐 분포해야 하며, 광범위한 스트레스에 대해 지속적인 평가를 제공할 수 있는 능력이 있어야 한다는 것이다.

곤충은 수서(담수)생태계 오염수준의 감시 및 일반적인 수질의 지표로서 널리 이용되어 왔다. 수서생태계의 수질 환경, 특히 수질을 평가하는 방법으로는 우선 이화학적 방법을 들 수 있겠는데, 이는 측정 당시의 수질의 이화학적 특성만을 대변하기 때문에 보다 일시적인 방법이라 할 수 있다. 반면에 수서생태계의 환경은 그곳에 서식하는 생물과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 이들 생물, 즉 지표생물을 이용하여 수질 환경을 평가하고자 하는 생물학적 수질평가는 그 생태계에 보다 장기적으로 서식하는 생물을 조사하여 수시로 변하는 수질상태와 수질에 영향을 미치는 여러 가지 환경요인들을 종합하여 대변해 줌으로써 보다 장기적이고 종합적인 수질 평가 방법이라 할 수 있다. 지표생물을 이용한 생물학적 수질평가는 시대의 변천에 따라 수많은 방법이 제안되어 왔는데, 환경의 변화에 민감하게 반응하는 소수의 지표종(indicator species)을 이용하는 방법에서 특정 생태계를 대표하는 생물의 군집, 즉 지표군집(indicator community)을 이용하는 보다 다양한 방법으로 발전하게 되었다. 또한 생물학적 수질평가를 위하여 지표생물의 분포와 군집의 구성을 계량화하여 생물지수(biological index)가 제안되었는데, 이는 개체군 수준에서의 개체군 지수(population index)와 군집의 특성에 근거를 둔 군집지수(community index)로 구분할 수 있다. 그러나 생물지수의 사용에 있어서 어느 생태계에 서식하는 생물 군집의 모든 종을 이용하는 군집지수는 생물의 조사와 동정 및 수리적 분석에 있어서 전문성을 요하므로 그 활용에 어려움이 따르는 반면, 개체군지수는 이용 가치가

높은 소수의 지표종을 선별하여 그들의 분포, 생태, 각종 오염물질에 대한 내성 등의 깊이 있는 연구를 바탕으로 사육 시스템을 구축하여 실용화함으로써 수질평가에 이용할 수 있는 보다 현실적인 방안인데, 우리나라의 경우 이러한 제반 연구가 시급히 요구된다.

곤충지표는 육상생태계에서는 수서생태계 수준의 관심을 끌지 못하고 있었으나 근래에는 이 분야에서도 성공사례가 많이 보고되고 있다. 남아프리카에서는 서식지 변화에 대한 지표로서 나비목 곤충을, 오스트리아의 감자포장에서는 농장관리의 생물지표로서 딱정벌레가 이용되었으며, 목초지관리농법의 지표로서 딱정벌레와 바구미가 사용된 경우도 있다. 육상 생태계내 토양절지동물은 그들의 직, 간접 활동으로 생태계의 물질 순환과 에너지흐름을 원활하게 하고 다른 생물군간의 균형을 유지시켜주는 역할을 하며, 그들의 분포 특성이 이화학적 미소 환경변화에 민감하게 반응하므로 환경지표생물로서 이용가능성이 높다. 육상생태계내에 대표적인 토양 미소절지동물로는 응애류, 톱토기류, 거미류, 원생동물, 선충, 파리유충, 기타 절지동물 등이 있는데, 이들 대부분이 미생물과 더불어 분해자로서 낙엽의 분해를 가속화시키는 역할을 하여 토양의 비옥도를 증진시키는데 유익한 생물들이다. 또한 이들은 많은 다양한 종류의 토양에서 밀도가 매우 높아 쉽게 채집할 수 있고, 개선된 추출장치들을 이용하여 효과적으로 토양과 부엽에서 여러 가지 물리, 화학적 요인들에 관한 상대적인 중요성을 연구하는데 매우 적합하다.

곤충을 이용한 환경영향평가의 수월성은 특정 생태계의 환경을 지시하는 곤충 생물지표종(bioindicator 또는 bioindex species)들의 획득에 크게 의존하고 있다. 이들 생물지표 종들이 환경 영향평가 도구로서의 유용성은 생물이 특정 환경을 선호하는 생물학적 속성에 기인한다는 점에서, 국내의 환경에 적합한 생물지표종의 자료를 확보하기 위해서는 국내의 생태계에 대한 면밀한 이화학적 분석과 더불어 생태계모니터링 및 이를 통한 유의한 지표생물의 도출이라는 일련의 집중된 연구가 필요하다.

3. 국내의 곤충 및 기타 절지동물 생물지표 이용 현황

국제생물과학연합(IUBS, International Union Biological Sciences)은 환경지표생물과 관련된 심포지엄, 관련문헌의 출판 및 정보의 개인적인 교환과 연구협동 등을 주관하고 있으며 “환경상태의 생물학적 지표: 환경지

표 1. 외국의 환경오염물질에 대한 환경지표생물

	Bioindicators	Target pollutant	Reference
1.	polycyclic aromatic hydrocarbon	coal tar, petroleum, shale oil	IARC, 1983
2.	autotrophic picoplankton	metals	Munawar, 1995
3.	bryophytes and lichen	heavy metal	Brown, 1995
4.	watermelon	ozone	Gimeno, 1995
5.	aleppo pine, <i>Pinus halepensis</i>	ozone	Davison, 1995
6.	aphid	air pollution	Holopainen, 1995
7.	<i>Anodonta cygnea</i>	heavy metal	Salanki, 1995
8.	tree leaves	proline and inorganic elements	Supuka, 1995
9.	earthworm	heavy metal	Bouche, 1996
10.	crustacean, insect	heavy metal	Butovsky, 1993
11.	insect larvae	rare elements	Krivolutskii, 1994
12.	beetles	neutron and gamma radiation	Krivolutskii, 1994
13.	soil organism	pesticide	Butovsky, 1991
14.	collembola	oil industry sewage	Artemyeva, 1989
15.	diptera, collembola and carabid	cement and lime dust	Kozlov, 1990
16.	spider	heavy metal	Maelfait, 1996, Larsen, 1996
17.	<i>Steatoda bipunctata</i>	cadmium and lead	Clausen, 1989
18.	invertebrates	copper and cadmium	Hunter, 1987

표생물" 프로그램을 정착시켜 왔다. UNESCO는 "인류와 생물권" (MAB, Man and Biosphere)이라는 프로그램을 통해 대기, 수질 및 토양오염에 대한 지표로 환경지표생물을 적극 권장하고 있다.

무척추동물을 이용한 수질측정법은 미국과 독일, 프랑스 등에서 채택하고 있는데, 특히 미국 환경보호청은 하루살이류, 날도래류, 강도래류 등 세 가지만으로 속성판정을 하고, 일본은 초등학생들까지 이용할 수 있도록 환경지표생물종을 16개 군으로 나눈 간이지표를 활용하기도 한다. 현재, 국외에서 실험과 연구를 통하여 얻어진 환경변화 모니터링에 효과적인 환경지표생물은 표 2와 같다. 오스트리아는 내수면 수자원을 보호하기 위해서 200여개의 잠재적인 주요 생물지표종을 선정하였으며, 그 중에서 53개 생물종은 지표종으로 사용하기 위하여 계속적인 연구를 수행하고 있으며, 지하수 관련 생물지표종 6종, 인간의 건강에 관련된 3개의 생물종, 13개의 수질에 관련된 지표종 및 수량, 물리적인 변화, 생물학적 서지식지 질에 관련된 다수의 지표종 뿐만 아니라 효과적인 관리를 위한 4개의 지표종을 선정하여 조사를 수행하고 있다.

국내에서는 정부(환경부)에서 1977년부터 시작한 자

연생태계 조사를 통하여 1960년 후반 개별학자들에 의하여 단편적으로 수행되어 오던 연구가 통합되었다. 그 후 제 1차 자연환경 전국 기초조사가 1986~1990까지 이루어졌고, 제 2차 조사는 1997~2001년까지 수행되어 군집 생태조사가 주로 이루어졌다. 이와 같은 조사는 조사지역의 생물상 및 분포조사를 목적으로 수행된 것으로 환경오염물질에 대한 영향을 평가하기 위한 것은 아니었다. 생태계 영향평가 기법 개발은 1992년 착수하여 1994년까지 3차 년도에 걸쳐 육상식물을 중심으로 한 대기오염물질의 영향평가를 수행한 바 있다. 1995년 도에는 국가적 긴급 오염사고시 원인 물질을 조기에 규명할 수 있는 미량오염물질 배출원 추적기법 연구, 공단 하천에 유입되는 유해화학물질을 감시하기 위한 물벼룩 이용 조기경보체계 연구가 수행되었다. 또한 1980년대 중반이후 생태계를 구성하는 어류, 동물 및 식물성 플랑크톤, 수중식물, 육상식물, 저서성 생물의 지표종에 대한 개체 수준의 독성시험을 수행하여 기술은 선진국 수준에 이르렀다고 볼 수가 있다. 그러나 이러한 기술은 국내 지표종이 아닌 국제적 시험종에 대한 사망 영향 (immobilisation) 또는 성장에 대한 영향으로 제한되어 있으며, 단일 종에 대하여 실험실 규모에서 단기간에 급

표 2. 수질등급과 환경지표생물

수 질	기 준 (BOD)	환경지표생물	비 고
1급수	1ppm 이하	옆새우, 플라나리아, 열목어, 산천어	간단한 정수처리로 식수로 사용
2급수	3ppm 이하	찍지, 파라미, 은어, 장구벌레, 갈겨니	약품처리나 끓여서 식수로 사용
3급수	6ppm 이하	거머리, 붕어, 잉어	공업용수
4급수	6ppm 이상	실지렁이, 갈따구, 종벌레	농업용수, 물놀이 불가

성적인 영향을 파악하는데 국한되어 있어 실제 자연수계에서 저 농도의 장기간의 노출에 대한 영향을 모니터링 하는데 제한점을 지니고 있다고 생각된다. 그동안 생물지표를 이용하여 유해화학물질 전반에 대한 환경영향 평가에 필요한 단위기술은 다소 집적 되어 왔으나, 이를 체계화하여 현장에 적용하고, 오염물질군을 추적하는 단계까지는 도달하지 못한 상황이므로 이에 대한 연구가 필요하다.

1992년 국립환경연구원 산하 호소수질연구소에 의해 '한국생물지수'가 제안됐는데, 담수 무척추동물 173종을 29개 지표군(indicator group)으로 나눠 독성에 견디는 정도와 출현도를 부여한 뒤 가장 많이 나타난 지표군에 가중치를 주는 등의 방법으로 수질을 점수화한다. 예를 들어 플라나리아류가 2급수에서 발견되면 1점, 1급수에서 발견되면 3점 등 출현도에 따라 점수를 주는 방식으로 29개군의 점수를 각각 매긴 뒤 가중치를 부여하여 최종 점수를 낸다. 수서곤충군은 오래 전부터 오염수준을 파악하는 수질의 지표로 이용되어 왔으며, 2급수의 장구벌레, 4급수의 갈따구, 모기붙이 유충 등이 있다(표 2).

4. 곤충·거미 생물지표를 이용한 환경영향 평가모형

기존의 생태영향평가 생물지표 개발은 대상 유해화학물질의 존재 없이 피상적 오염지역과 비교적 청정 지역 간의 생물분포 종 차이를 구분하는데 역점을 두어, 실제로 어떠한 환경오염물질이 조사 대상 지역에 유입되어 생태계 위협이 되는지에 대한 명확한 판별이 어렵다. 이러한 한계성을 극복하기 위해서는 특정 환경오염물질을 대상으로 이 화학물질의 야외 노출정도가 다른 지역을 선별하여 생물지표 후보종들을 조사 연구하여 지표종을 선정하는 것이 중요하다. 곤충이나 지표성 거미를 대상으로 중금속, PCB 등의 유해 물질에 노출된 정도에 따른 반응을 군집수준, 개체군독성 수준, 생리/분자지표 수준에서 분석하여 해당 지역의 건강성을 판단하며 또한 단계별 오염원 추적을 할 수 있는 조기경보시스템을 가동할 수 있다(그림 2). 1 단계는 선발된 곤충 및 거미 생물지표들을 이용하여 해당 생태계의 건강도 판별을 하게 되며. 여기에서 이상 징후가 검출되면 다음 단계로

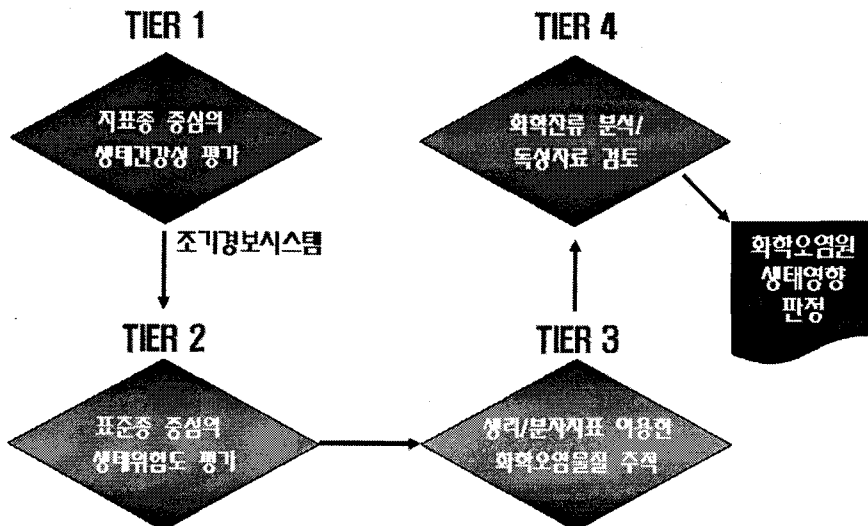


그림 2. 무척추동물을 이용한 환경영향 평가기법 모형도

환경오염물질을 추적하게 된다. 2 단계는 조사 서식지에서 추출된 환경시료를 이용한 실내 표준종들에 대한 생태독성분석을 통해 환경시료의 위험도를 평가한다. 위험도가 높다고 평가된 지역에 대해서 3단계로 넘어가 생리 및 분자 지표를 이용하여 오염물질을 추정하고 마지막 단계

는 화학잔류분석을 통해 최종적으로 화학오염원 생태영향 판정을 하게 된다. 이 환경생태영향평가모형은 앞으로 현장 적용 연구를 통해 개선 확립될 예정이다.

사 사

본 원고는 저자들이 수행한 환경부 차세대 핵심 환경기술개발사업 “환경오염에 대한 생태영향평가 적합 생물지표 개발” 최종보고서를 기초로 작성하였음

참고문헌

- 김용균, 배연재, 유건상, 염동혁, 이성규, 이시혁, 이준호, 조기종. 2005. 무척추동물 생물지표와 환경위해도 평가. 정행사.
- 김용균, 배연재, 염동혁, 이성규, 이시혁, 이준호, 조기종. 2005. 무척추동물 생물지표를 이용한 환경오염물질 노출판별기법 (현장 매뉴얼). 정행사.
- 환경부. 2005. 환경오염에 대한 생태영향 평가 적합 생물지표 개발.
- Aisemberg J, Nahabedian DE, Wider EA, Verrengia Guerrero NR. 2005. Comparative study on two freshwater invertebrates for monitoring environmental lead exposure. *Toxicol.* 210: 45-53.
- Artymyeva TI. 1989. Assemblages of soil animals and problems of recultivation of technogenous territories. Nauka, Moscow.
- Butovsky RO. 1991. The conservation of beneficial insects in conditions of chemical environmental pollution. Vniitei agroprom Publ. Moscow.
- Butovsky RO. 1993. Heavy metals in terrestrial arthropods. 2. *Insecta. Agrohimiya.* 7: 113-124.
- Clausen IHS. 1986. The use of spiders (Arneae) as biological indicators. *Bull. Br. Arachnol. Soc.* 7: 83-86.
- Fernandez-Bayon JM, Barnes JD, Ollerenshaw JH, Davison AW. 1993. Physiological effects of ozone on cultivars of watermelon (*Citrullus lanatus*) and muskmelon (*Cucumis melo*) widely grown in Spain. *Environ. Pollut.* 81: 199-206.
- Holopainen JK, Mustaniemi A, Kainulainen P, Sakta H, Oksanen J. 1993. Conifer aphids in an air-polluted environment. I. Aphid density, growth and accumulation of sulphur and nitrogen by scots pine and Norway spruce seedlings. *Environ. Pollut.* 80: 185-191.
- Hunter BA, Johnson MS, Thompson DJ. 1987a. Ecotoxicology of copper and cadmium in a contaminated grassland ecosystem. I. *Invertebrates J. Appl. Ecol.* 24, 573-586.
- Hunter BA, Johnson MS, Thompson DJ. 1987b. Ecotoxicology of copper and cadmium in a contaminated grassland ecosystem. II. *Invertebrates J. Appl. Ecol.* 24, 587-599.
- IARC [International Agency for Research on Cancer]. 1983. Benzo[b]fluoranthene. pp. 33-91, 147-153. In: Monographs on the evaluation of carcinogenic risk of chemicals to humans. Polycyclic aromatic compounds. Part 1. Chemical, environmental and experimental data. Vol. 32. Lyon, France.
- Kozlov MV. 1990. The influence anthropogenous factors on the populations of terrestrial insects. *Totals of Science and Technics.* V. 13. VINII publ. Moscow.
- Krivolutskii DA. 1994. Soil fauna in ecological control. Nauka, Moscow.
- Larsen KJ, Brewer SR, Taylor DH. 1994. Differential accumulation of heavy metals by web spiders and ground spiders in an old field. *Environ. Toxicol. Chem.* 13: 503-508.
- Lodovici M, Akpan V, Gasalini C, Zappa C, Dolara P. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbons in *Laurus nobilis* leaves as a measure of air pollution in urban and rural sites of Tuscany. *Chemosphere.* 36: 1703-1712.
- Maefait JP. 1995. Soil spiders and bioindication pp. 165-178. In: van Straalen NM, Krivolutsky DA, Eds. *Bioindicator Systems for Soil Pollution.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. Netherlands
- Munawar M. et al., 1995. Bioindicators of environmental health. SPB Academic Publishing. 265pp.
- Richardson DHS. 1988. Understanding the pollution sensitivity of lichens. *Bot. J. Linn. Soc.* 96: 31-43.
- Robles C, Greff S, Pasqualini V, Garzino S, Bousquet-Melou A, Fernandez C, Korboulewsky N, Bonin G. 1996. Phenols and flavonoids in Aleppo pine needles as bioindicators of air pollution. *J. Environ. Qual.* 32: 2265-2271.
- Salanki J, Budai D, Hipari L, Kasa P. 1993. Acetylcholine level in the brain and other organs of the bivalve *Anodonta cygnea* L. and its modification by heavy metals. *Acta Biol. Hung.* 44: 21-24.