

지역단위 생태위해성평가 선진국사례 분석

신 유 진, 이 우 미, 안 윤 주*

건국대학교 환경과학과

Comparative Study of Regional-scale Ecological Risk Assessment used in Developed Countries

Yu-Jin Shin, Woo-Mi Lee and Youn-Joo An*

Department of Environmental Science, Konkuk University,

ABSTRACT

Ecological risk assessment (ERA) has been used to establish environmental quality standards or evaluate ecological risk in site-specific areas. The scope of ERA was expanded based on regions, and the concept of regional-scale ecological risk assessment was recently introduced in developed countries. In the present study, regional ERA approaches of relative risk model (RRM), contaminants in aquatic and terrestrial ecosystems (CATS) model, and procedure for ecological tired assessment of risks (PETAR) in advanced countries were extensively investigated. Regional ERA was compared with traditional ERA process. Stressors, receptor and response in traditional ERA were replaced with sources of stressors, habitats, and ecological impacts, respectively in regional ERA. This study introduces the concept and assessment process of regional ERA, and provides a wide perspective how the relative ERA could be applied in Korean ecosystem.

Key words : Ecological Risk Assessment (ERA), Regional-scale Ecological Risk Assessment, Relative Risk Model (RRM), CATS, PETAR

서 론

국내에서 생태위해성평가(Ecological Risk Assessment, ERA)의 적용기반을 마련한 연구는 특정 물질이나 특정매체를 대상으로 생태수용체(Ecological Receptor)가 받는 악영향을 평가하였던 위해우려물

질사업과 국내 서식하거나 분포하는 생물종을 대상으로 수생태계 보호를 위한 생태 준거치를 도출한 '물환경종합평가방법 개발 조사 연구(III)'(환경부, 2006)가 대표적이라 할 수 있다. 국내에서 수행된 위해우려물질 관련 연구사업으로는 '위해우려물질 선정 및 평가연구'(환경부, 2003)를 출발점으로 하여, 1단계 위해우려물질사업(국립환경과학원, 2005a, b, c), 위해우려물질(납, 수은, 카드뮴, 비소, 크롬, 니켈, 벤젠)에 대한 상세위해성평가(국립환경과학원, 2006a, b, c, d, e, f), 그리고 2단계 위해우려물질사업으로 3종(납, 수은, 카드뮴) 및 4종(비소, 크

접수일: 2010년 2월 10일, 채택일: 2010년 6월 22일

* To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-2049-6090, Fax: +82-2-2201-6295

E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr

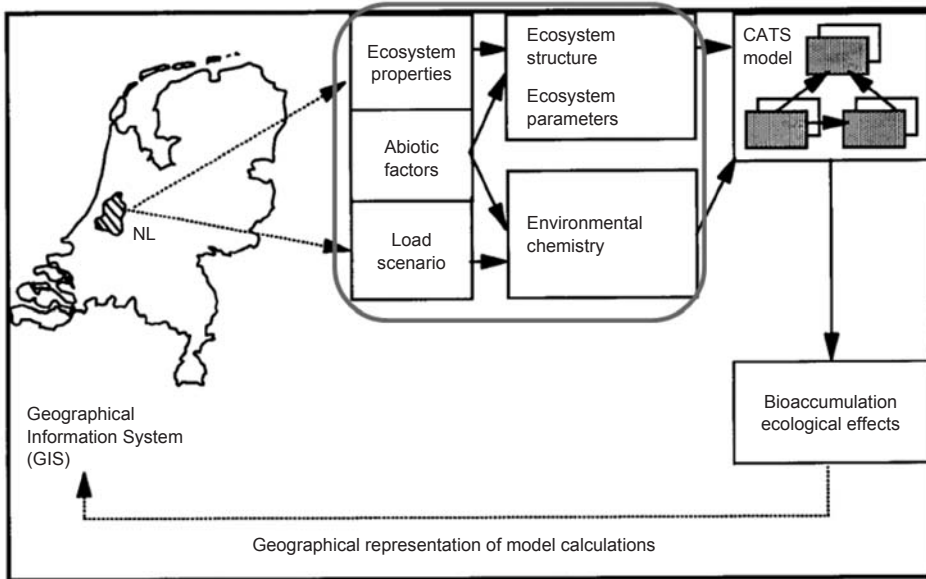


Fig. 1. Elements of regional risk assessment of RIVM CATS models (RIVM, 1996).

롬, 니켈, 벤젠)에 대한 위해성평가를 들 수 있다 (환경부, 2007a, b). 그 외 차세대 핵심연구로 생태계 생물을 대상으로 현장적용기법에 관한 연구가 수행된바 있다(환경부, 2009a, b, c).

2009년 개정된 환경보건법 내 “제3장 환경관련 건강피해의 예방·관리”에서는 환경유해인자로 인한 건강상 피해가 우려되거나 또는 의심되는 지역에 대해 관리할 것을 명시하고 있다. 따라서 이를 위한 관련 방법론 정립이 우선시 되어야 할 것이다. 그러나 기존의 위해성평가방법은 물질기반의 평가 방식으로 지역적 특성을 반영하기엔 어려운 점이 있다. 선진국에서는 일찍이 다양한 환경에서의 수많은 스트레스 요인으로부터 야기된 악영향을 평가하기엔 기존의 평가방식적용이 어렵다는 판단을 하게 되었고 지역의 물리적, 화학적, 생물학적인 구조, 크기 및 활동 등으로 인해 발생 가능한 생태위해성을 예측할 수 있는 지역단위 생태위해성평가 (Regional-scale Ecological Risk Assessment, RERA) 방법을 개발하였다.

본 연구에서는 지역단위 생태위해성평가방법 도입에 앞서 필요한 관련 방법론을 고찰하였다. 지역단위 생태위해성평가관련 연구는 네덜란드의 CATS (Contaminants in Aquatic and Terrestrial eco-

System) (RIVM, 1996), 스웨덴 연구진에 의해 제안된 PETAR (Procedure for Ecological Tired Assessment of Risks) (Moraes and Monlander, 2004), 그리고 미국 환경청에서 Superfund 프로그램에 적용하기 위한 지침인 ‘Guidelines for Ecological Risk Assessment (USEPA, 1997)’와 Landis와 Weigers (Wigers *et al.*, 1997; Wigers *et al.*, 1998; Landis, 2005)에 의해 개발된 상대위해모델 (Relative Risk Model, RRM) 등이 있으므로, 이들을 대상으로 하였다.

선진국의 지역단위 생태위해성평가기법

1. 네덜란드 (RIVM): CATS (Contaminants in Aquatic and Terrestrial ecoSystem) 모델

CATS (Contaminants in Aquatic and Terrestrial ecoSystems)는 먹이망 내 생물축적으로 인한 위해성을 지역단위로 예측할 수 있는 모델이다 (RIVM, 1996). 수서 및 육상생태계의 오염물질의 생물축적과 영향을 연구하기 위하여 다중매체모델인 CATS가 개발되었으며, 이 모델은 독성물질의 생물축적 및 먹이망을 통한 2차 영향(secondary poisoning)

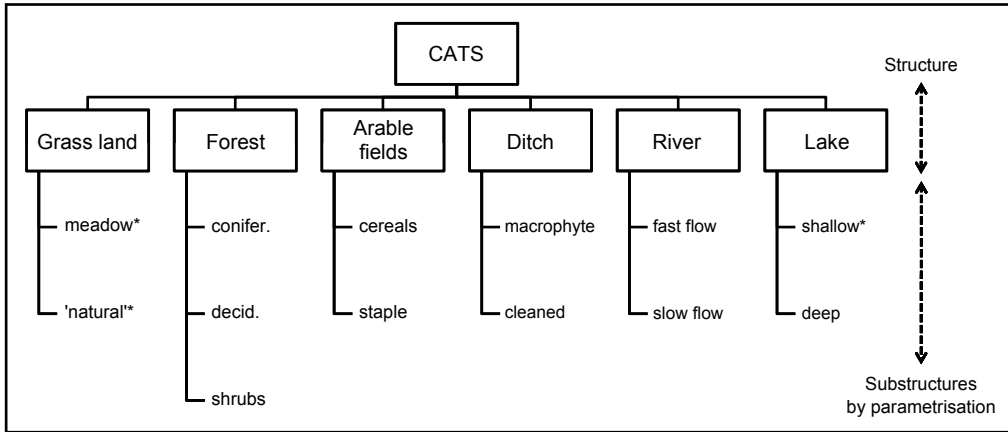


Fig. 2. Model structures and parametrisation of RIVM CATS (RIVM, 1996).

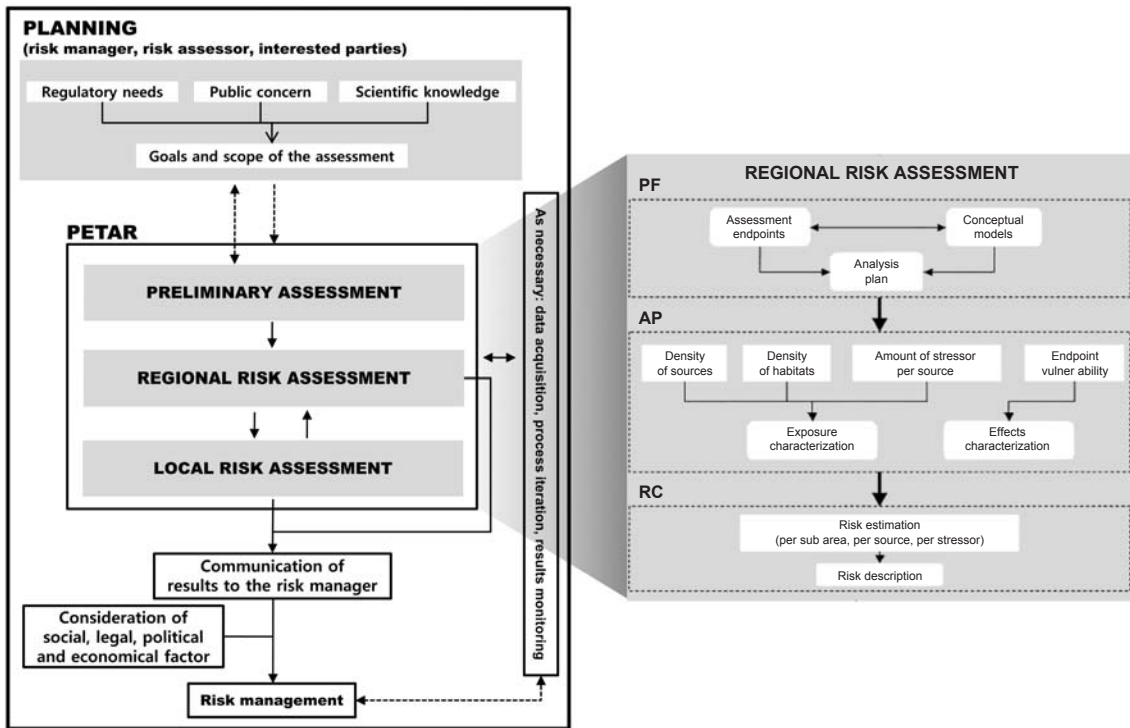


Fig. 3. Regional Risk assessment of the Procedure for Ecological Tiered Assessment of Risk (PETAR) (Maraes and Molander, 2004).

을 강조한다. 지역에 따라 오염물질의 배출이력이
다르고 토양 및 퇴적물의 흡착특성이 지역적 차이
를 나타내기 때문에 지역 간 오염도도 매우 상이하

다. 따라서 생태계에 대한 독성물질의 지역 위해성
평가는 무생물(Abiotic)/생물적(Biotic) 요소에 대한
특성을 모두 고려해야 한다. 따라서 CATS모델에서

는 무생물적 요소인 독성물질의 거동(Fate)과 생태계 생물적인 요소인 흡수(Uptake)와 연결하여, 환경중 독성물질의 유입(Load), 분배(Partitioning)와 생물체의 흡수간의 상관관계를 고려하고 있다. CATS모델에 평가대상 생태계의 오염물질 유입이력, 토양·물·퇴적물의 수리지질학적 특성 등과 같은 지역정보를 입력하면, 여러 생태계 및 토양특성별 오염물질(카드뮴, 구리, 납, TBT)에 대한 생물축적이 산정되고, 지역/위치별로 위해성이 계산되어 비교되어진다. 이 모델은 상이한 생태계들 또는 생태계 단위들을 대상으로 독성물질 유입에 대한 생물축적과 위해성을 계산하기 위해 개발되었으며, 3가지 주요 요소는 생태계 분류, 환경화학, 생태계 구조와 기능이며 (Fig. 1), 모델의 구조와 파라미터는 Fig. 2와 같다.

2. 스웨덴: Procedure for Ecological Tired Assessment of Risks (PETAR)

PETAR는 미국환경청의 생태위해성평가지침인 ‘Guidelines for Ecological Risk Assessment (USEPA, 1998)’를 토대로 스웨덴 연구진에 의해 제안된 평가과정으로써 다음과 같은 3단계로 구성되어 있다 (Fig. 3).

1단계인 Preliminary Assessment (초기평가)는 인위적 환경유해인자(Stressor)에 대한 기존정보, 오염원, 예상되는 생태효과에 대한 정성적인 평가이다. 2단계인 Regional Risk Assessment (지역위해성 평가)는 넓은 지역에 대한 생태위해성의 반(半)정량적 평가를 하는 것으로, 잠재적 생태영향을 가지는 오염원과 스트레스요인의 순위, 가장 영향을 많

이 받을 것 같은 소구역의 순위를 결정한다. 지역위해성평가의 결과물은 넓은 지리학적 지역에 대해 반정량적으로 평가된 생태위해성으로, 그 목적은 잠재적인 생태영향이 큰 스트레스 요인, 위해우려가 있는 서식지, 및 지역 내 영향을 많이 받는 소구역을 파악하는 것이다. 이러한 지역위해성평가를 위한 몇 가지 모델들이 제안된 바 있지만 자료부족으로 인해 활용성은 낮은 형편이다. 비교적 적은 자료를 필요로 하는 대안적 접근방법으로는 1997년 Landis와 Weigers에 의해 개발된 상대위해성모델(Relative Risk Model, RRM)을 들 수 있다. RRM은 다음 장에서 자세히 설명하였다.

3단계인 ‘Local Risk Assessment (지역 특이적 위해성평가)’는 좀 더 지역 특이적이고 정량적인 위해성평가로, 상대적으로 작은 규모의 지역을 대상으로 한다(Moraes and Monlander, 2004).

3. 미국: 상대위해성모델 (Relative Risk Model, RRM)

상대위해성모델(Relative Risk Model, RRM)은 1997년에 Wiegiers와 Landis에 의해 제안된 지역위해성평가 모델이다(Wiegiers *et al.*, 1997; Wiegiers *et al.*, 1998; Landis, 2005). 기존의 생태위해성평가 방식은 하나의 오염된 지역에서 단일 스트레스 요인을 대상으로 환경으로의 배출, 수용체가 살고 있는 환경 그리고 반응하는 수용체들간의 상호작용의 정도를 정량적으로 예측하는 방식으로 평가종말점 측정이 비교적 간단하였다. 그러나 이러한 방법은 확인된 특정 스트레스 요인과 특정 수용체가 아니면 노출과 영향을 예측할 수 없다는 한계성이 있

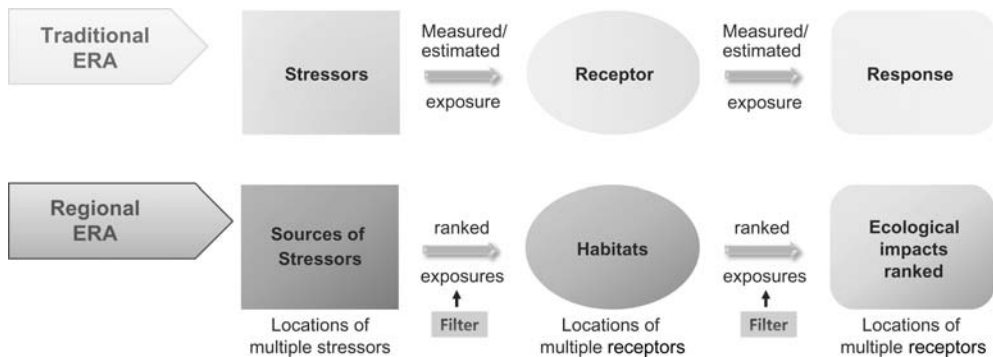


Fig. 4. Comparison of regional relative ERA with traditional ERA (Landis, 2005).

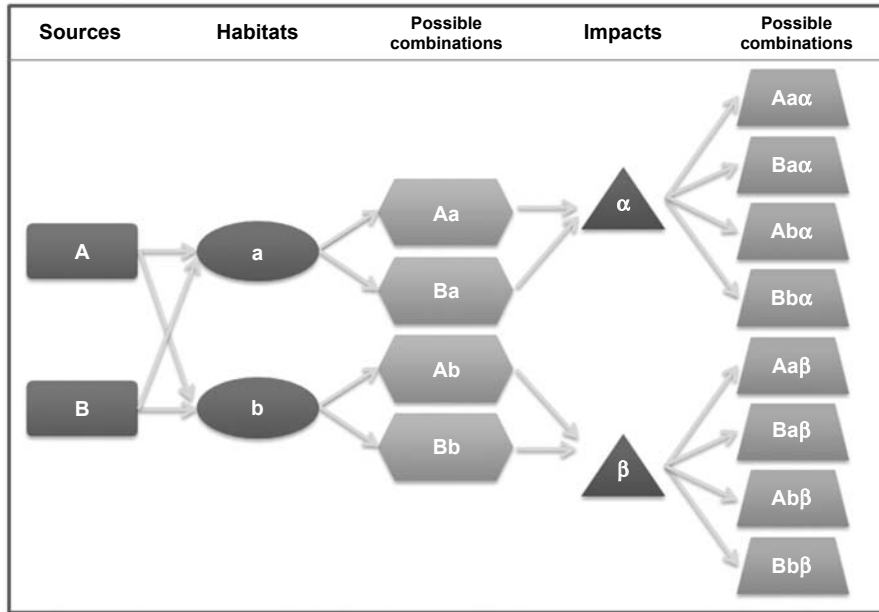


Fig. 5. Possible combinations based on the sources, habitats and impacts in relative risk model.

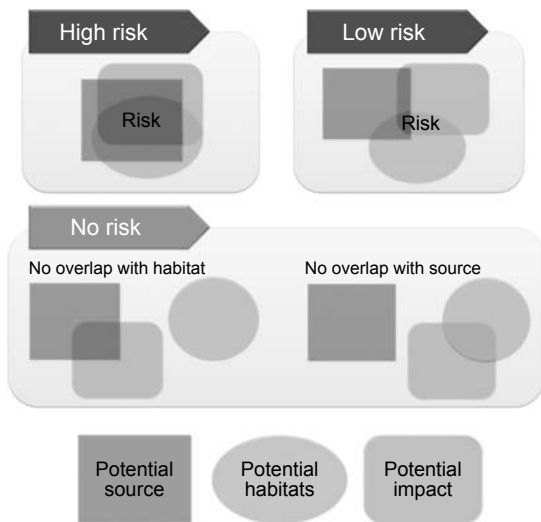


Fig. 6. Interactions of potential source, habitats and impacts in Relative Risk Model.

다. 반면, 지역적 다중 스트레스요인 평가(Regional Multiple Stressor Assessment)는 여러 오염원으로부터 발생하는 스트레스 요인, 다양한 서식지와 관련된 수용체, 하나의 영향으로부터 추가적으로 발생하는 영향들 간에 발생 가능한 많은 경우의 수를

고려하는 평가방식이다(Fig. 4). 이 평가방식은 지역 내에 위치하고 있는 각 서식지와 오염원을 중요도에 따라 등급화한 후 위해성 순위를 예측하는데, 각 지역별 구성요소의 종류의 수에 따라 결합 가능한 잠재적 위해성의 수가 결정된다(Fig. 5). Fig. 6은 RRM에서의 오염원, 서식지, 환경내 평가 종말점간의 상호작용으로 인해 야기된 생태 위해도를 나타내는 것으로 위해도는 각 인자가 겹쳐지는 정도에 비례한다고 가정한다(Wiegers *et al.*, 1997).

RRM의 평가단계는 문제형성단계(Problem Formulation)에서부터 위해성 Risk Communication까지 모두 10단계로 구성되어 있으며 각 단계별 평가과정은 Table 1과 같다. 1단계에서는 대상지역의 주요관리 목표를 목록화하는 단계로 어디서 무엇을 고려할 것인지 결정한다. 2단계에서는 관리목표와 연관된 잠재적 오염원과 서식지를 포함한 지도를 작성하는 단계로 평가대상지역 내 잠재적 오염원의 위치와 특징 등을 지도상에 배치하고 관리목표와 다양한 종말점, 서식지 정보 등을 고려하여 구역을 설정한다. 3단계는 관리목표, 오염원, 소재지의 결합에 기반을 둔 하위지역으로 지도를 분할하는 것이다. 서식지가 위치한 지역의 노출경로를 고려하여 위해지역의 위해도를 산출할 경계를 설정하

Table 1. 10 steps of the Relative Risk Model for regional risk assessment (Landis, 2005)

Steps	Assessment process
1	List the important management goals for the region. What do you care about and where?
2	Make a map. Include potential sources and habitats relevant to the management goal.
3	Break the map into regions based upon a combination of management goals, source, and habitats.
4	make a conceptual model that links sources of stressors to the receptors and to the assessment endpoints.
5	decide on a ranking scheme to allow the calculation of relative risk to the assessment endpoints.
6	Calculate the relative risks.
7	Evaluate uncertainty and sensitivity analysis of the relative rankings.
8	Generate testable hypotheses for future field and laboratory investigation to reduce uncertainties and to confirm the risk rankings.
9	Test the hypotheses listed in Step 8.
10	Communicate the results in a fashion that portrays the relative risks and uncertainty in a response to the management goals.

기 위한 초안을 작성한다. 4단계에서는 오염원, 스트레스 요인, 서식지, 그리고 종말점간에 잠재적 연결을 통해 개념모델을 만든다. 5단계는 상대위해성을 평가하기 위해 각 오염원, 스트레스 요인, 서식처를 등급화 하는 단계로 비수치적(nondimensional) 등급화를 통해 다양한 스트레스요인을 다양한 종말점으로 변환하여 비교할 수 있다. 분할된 하위 지역 내에서 각 오염원과 서식처를 상, 중, 하로 등급화 하는데 평가기준은 오염원의 크기와 빈도, 이용 가능한 서식지 수에 기반을 둔다. 등급은 각 오염원과 서식지 유형에 따라 구분하는데 0~6까지 2점 단위로 배점한다. 0점은 서식지 또는 오염원이 없을 경우이며 6점은 서식지 또는 오염원이 많음을 나타낸다. 한편 몇몇 경우에는 가용한 오염원의 농도와 적용 가능한 생태영향농도가 있다면 이를 이용하여 배점할 수 있다. 예를 들어, 하나의 비잔류성 오염물질을 함유하고 있는 배출수 농도가 EC10 이하일 경우 0점, EC10~EC30일 경우 하, EC30~EC50일 경우 중, EC50 이상일 경우 상으로 구분할 수 있다. 그러나 이러한 배점은 오염원으로부터 발생하는 대부분의 스트레스 요인에는 적용불가능하다. 6단계는 상대위해성을 산출하는 단계로 위해요소(오염원, 서식지, 평가 종말점의 영향)간의 상관관계를 결정해주는 필터(Filter)를 이용하여 산출한다. 필터는 가중치 인자로 영향을 미치는 가능성 정도에 따라 가능성이 낮을 경우 0, 가능성이 높을 경우 1로 결정된다. 필터는 2가지로 구성되는데 노출필터(Exposure Filter)는 오염원과 서식지의 결합 가능성여부에 가중치를 두는 것이고, 영향필터

Table 2. Equations for risk score estimation (Landis, 2005)

$RS = S_{ij} \times H_{ik} \times W_{jk}$	
$RS_{source} = \sum (S_{ij} \times H_{ik} \times W_{jk})$ for $j=1 \sim n : (1)$	
$RS_{habitat} = \sum (S_{ij} \times H_{ik} \times W_{jk})$ for $k=1 \sim n : (2)$	
RS	Risk Score (Risk score)
RS_{source}	The potential risk resulting from a specific source
$RS_{habitat}$	The potential risk occurring within a specific habitat
i	The subarea series (ex: region 1, 2, 3... etc.)
j	The sources series (ex: discharges, shoreline activity... etc.)
k	The habitat series (ex: mudflats, stream mouths... etc.)
S_{ij}	Rank chosen for the sources between subareas
H_{ik}	Rank chosen for the habitats between subareas
W_{jk}	Weighting factor established by the exposure or effect filter.

(Effect Filter)는 오염원과 서식지의 결합이 특정 평가 종말점에 영향을 미칠 가능성여부에 가중치를 두는 것이다. 각 요소별 등급과 필터를 결정하였다면 이를 곱하여 각 하위지역의 위해도를 산출한다. 최종 위해점수(Risk Scores, RS)는 각 하위지역별 등급(오염원과 서식지)과 가중치 곱에 의해 결정되며 하위지역별 오염원(1)과 서식지(2)의 위해점수의 합으로 잠재적 위해성을 예측할 수 있다 (Table 2). 7단계는 상대 위해순위의 불확실성과 민감도 분석을 하는 단계이다. 불확실성을 평가하기 위한 방법은 Monte Carlo process와 같은 정량적으로 평가 가능한 방법을 이용한다. 8단계는 차후 Field/LAB연구에서의 불확실성 감소와 위해순위

Table 3. The concept of Regional/Local Risk assessment

Risk assessment	Concept
Regional Regional-scale	Risk assessment for broad area including multi-source of stressors, multi-group of receptors and multiple responses semi-quantitatively.
Local Site-specific	Risk assessment for specific area including specific source of stressor that effect to ecosystem.

검증을 위한 가설을 설계하는 단계이다. 9단계는 8 단계의 가설을 검증하는 단계로 불확실성이나 스트레스요인-서식지-영향의 통합하는 과정에서 발생한 오류를 줄이기 위해 위해성평가를 다시 해야 할 경우 필요하며 평가과정을 피드백하면서 미래에 예측되는 위해성을 개선할 수 있다. 10단계는 관리목표에 상응하는 상대위해성과 불확실성을 결과를 보고하는 단계이다.

4. 미국: The superfund ecological risk assessment process

이 지침은 미국 Superfund 지역에 적용하기 위한 생태위해성평가 지침으로 US EPA에 의해 개발되었다. 이 지침은 US EPA의 위해성평가 포럼에서 개발된 ‘Proposed Guidelines for Ecological Risk Assessment (US EPA, 1996)’와 ‘Framework for Ecological Risk Assessment (US EPA, 1992)’를 바탕으로 한 과학적 접근방식의 평가지침으로, 유해 폐기물 사이트에서 유출된 오염물질이 실질적 또는 잠재적으로 식물과 동물에 미치는 영향을 정성/정량적으로 평가할 수 있다. 지침은 ‘과학적 관리를 위한 토의 (Scientific/Management Decision Points, SMDPs)’를 포함하여 8개의 평가단계로 구성된다. 이 지침의 목표는 오염물질이 환경이 미칠 수 있는 현재/미래의 잠재적 영향을 확인하고 자원을 보호할 정화 수준을 결정하는 것이다. Superfund에서의 생태위해성평가지침은 다음의 8단계로 구성되어있다 (US EPA, 1997).

1단계와 2단계는 스크리닝 단계로 문제형성 및 생태영향평가와 노출예측 및 위해성을 계산하는 단계이다. 1단계는 대상지역의 각 매체별로 확인 또는 예상되는 오염물질 및 오염물질의 최대 노출농도를 조사하고, 수용체가 영향 받을 수 있는 오염물질의 거동 및 수송메커니즘, 오염물질이 수용체

에 미치는 생태독성 메커니즘, 가정에 기반을 둔 생태독성값 등에 대한 정보를 수집한다. 2단계에서는 1단계에서 도출된 생태독성값과 최대 노출농도를 비교하여 위해성을 계산한다. 이 결과를 바탕으로 위해관리자와 위해성평가 팀은 오염물질이 생태에 미치는 영향이 무시할 수 있는 수준인지 세부평가과정(3~7단계)이 진행되어야 할지를 결정한다. 3단계는 생태위해성평가의 초기 단계인 문제형성 단계이다. 3단계에서는 앞서 진행된 스크리닝 단계(1~2단계)의 결과를 여러 의견을 수렴하여 재정리하고 세부지역과 관계된 생태학적 문제점까지 고려한다. 스크리닝 단계에서는 결여된 지역 특이적 정보를 포함하여 생태위해성평가의 목적을 설정한다. 4단계는 3단계에서 시작한 개념모델을 완성하고 데이터 분석 방법 및 데이터 질(Quality), 그리고 지역 조사에 대한 세부내역이 포함된 작업 계획(Work Plan, WP)과 샘플링 및 분석(Sampling and Analysis Plan, SAP)을 계획한다. 5단계는 SAP이 그 지역에 적절함을 검증하기 위한 단계로 앞에서 설계한 가설검증, 노출경로 모델, 측정 종말점의 적합성을 평가한다. 6단계는 노출과 생태학적 영향을 평가하기 위한 지역정보를 수집하는 단계이다. 노출과 영향에 대한 지역정보 조사 및 분석은 4단계에서 계획한 WP와 SAP에 의거하여 진행되어야 한다. 7단계는 위해도를 결정하는 단계로 위해성을 예측하고 묘사한다. 위해성 예측과 위해성 묘사를 통해 정화결정과 역치값을 설정한다. 8단계는 위해관리 단계로 위해관리자는 위해성평가 결과를 이용하여 정화 필요성을 판단한다.

5. 선진국 평가기법 비교

앞에서 고찰한 미국, 스웨덴, 네덜란드의 평가방식에서 지역의 개념은 Regional-scale Risk Assessment, Regional Risk Assessment, Local Risk Assess-

ment, Site-specific Risk Assessment로 분류할 수 있다. 생태 위해성평가를 위한 평가요소 및 방식은 각 나라마다 차이가 있는데 네덜란드의 CATS의 경우 'Regional Risk Assessment'는 독성물질의 먹이망 내 생물축적으로 인한 위해성을 지역단위로 예측한다는 의미로 사용되고 있으며 지역/위치별로 위해성이 계산되어 각각을 비교할 수 있다. 스웨덴 연구진에 의해 제안된 PETAR는 'Regional Risk Assessment'와 'Local Risk Assessment'가 구분되어 있다. PETAR의 'Regional Risk Assessment'는 넓은 지리학적 지역에 대해 반(半)정량적 생태위해성평가를 수행하는 것으로서, 그 목적은 잠재적인 생태영향이 큰 스트레스 요인, 위해우려가 있는 서식지 및 지역 내 영향을 많이 받는 소구역을 찾아내는 것이다. 그러나 실질적으로 평가를 위해 제안된 몇 가지 모델들은 자료부족으로 활용성이 낮았고 비교적 적은 자료를 요구하는 대안적 접근 방법이 1997년 Landis와 Weigers에 의해 개발된 상대위해성모델(Relative Risk Model, RRM)이다. 한편 PETAR의 'Local Risk Assessment'는 상대적으로 작은 규모의 지역을 대상으로 한 지역 특이적인 정량적 위해성평가이다. Regional Risk Assessment를 위한 기술적인 방법론인 상대위해성모델(Relative Risk Model, RRM)은 미국에서 개발되어 미국 뿐만 아니라 호주, 브라질 등 국외지역에서 성공적으로 적용된 사례가 있다. RRM은 여러 오염원으로부터 발생하는 스트레스 요인, 다양한 서식지와 관련된 수용체, 하나의 영향으로부터 추가적으로 발생하는 영향들 간에 발생 가능한 많은 경우의 수를 고려하는 평가방식이다. 이 평가방식은 지역 내에 위치하고 있는 각 서식지와 오염원을 중요도에 따라 등급화한 후 상대적 위해성 순위를 예측하는데, 각 지역별 구성요소의 종류의 수에 따라 결합 가능한 잠재적 위해성의 수가 결정된다. 미국 환경청에서 개발한 Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund(ERAGS)에서 Local Risk Assessment의 단계를 구체적인 8단계로 구분하여 상세히 언급하고 있는데 유해폐기물 사이트에서 유출된 오염물질이 실질적 또는 잠재적으로 식물과 동물에 미치는 영향을 정성/정략적으로 평가하는 방식이다. 각 나라별로 '지역'이라는 개념을 명확히 서술하거나 그 규모를 정확히 수치화시키지는 않았으나 평가목적 및 개념은 유사한 패턴을 지니고 있다.

즉, 각 지역별, 위치별로 가지고 있는 특성, 환경유해인자 그리고 이에 영향 받는 생태구조 및 여러 가지 요소들이 상이하기 때문에 이를 고려하여 평가한다는 점이다.

결 론

선진국에서는 각 지역별 특성이 다르고 다양한 환경을 고려하기엔 기존의 단일물질에 대한 위해성평가 방식이 어렵다는 것을 인식하고 지역단위 생태위해성평가방법을 개발하였다. 국내의 경우 단일물질에 대한 생태위해성평가는 2000년대 초반부터 수행해 왔으나 지역단위의 개념의 평가는 이루어진바가 없다. 따라서 환경보건법상에서 명시하고 있는 환경유해인자로 인해 문제시되는 지역에 대한 평가를 하기 위해선 지역단위 생태위해성평가방법론 구축이 시급하다. 본 연구에서 고찰한 지역단위 생태위해성평가 방법 중 Wigers와 Landis에 의해 제안된 상대위해모델(RRM)은 각 지역에서 문제시되고 있는 환경유해인자와 오염원, 대상 지역의 생태계 서식지와 수용체의 특성을 가장 잘 반영한 평가방법이었다. 우리나라에서 지역단위 생태위해성평가 방법론 구축시 이러한 특성을 반영하여 국내에 적용한다면 평가대상 지역별 지리학적, 환경적 특성이 다양하고 생태계 구조가 상이하다는 점에서 활용성이 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부/국립환경과학원 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원, 납, 카드뮴 및 수은 오염에 대한 위해성 평가 기법 연구, 2005a.
- 국립환경과학원, 위해우려물질 평가 기법 연구(II), 2005b.
- 국립환경과학원, 위해우려물질 평가기법연구(III), 2005c.
- 국립환경과학원, 화학물질 위해성 평가 보고서(납 및 그 화합물), 2006a.
- 국립환경과학원, 화학물질 위해성 평가 보고서(니켈 및

- 그 화합물), 2006b.
- 국립환경과학원, 화학물질 위해성 평가 보고서(비소 및 그 화합물), 2006c.
- 국립환경과학원, 화학물질 위해성 평가 보고서(수은 및 그 화합물), 2006d.
- 국립환경과학원, 화학물질 위해성 평가 보고서(카드뮴 및 그 화합물), 2006e.
- 국립환경과학원, 화학물질 위해성 평가 보고서(크롬 및 그 화합물), 2006f.
- 환경부, 국립환경과학원 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III)-인체 및 수생태계 위해성평가 체계 구축, 2006.
- 환경부, 무척추동물 생물지표를 이용한 환경오염물질의 생태영향 현장적용기법개발, 2009c.
- 환경부, 수서생물 현장이식 노출평가 및 환경오염물질의 생태영향평가 현장적용기법 개발, 2009b.
- 환경부, 위해성 평가 실시(납, 수은, 카드뮴) 및 위해관리대책 수립방안 마련 연구, 2007a.
- 환경부, 위해성 평가 실시(비소, 크롬, 니켈, 벤젠) 및 위해관리대책 수립방안 마련 연구, 2007b.
- 환경부, 위해우려물질 선정 및 평가연구, 2003.
- 환경부, 지표생물을 이용한 환경오염물질의 생태영향 평가 현장적용기법 개발에 관한 연구, 2009a.
- Landis WG. Regional Scale Ecological Risk Assessment Using the Relative Risk Model, CRC Press LLC 2005; 1-35.
- Landis WG. Population-scale assessment endpoints in ecological risk assessment part 1: Reflections of stakeholder values, *Integr Environ Assess Manag* 2005; 2(1): 86-91.
- Moraes F and Molander S. A procedure for ecological tiered assessment of risk (PETAR), *Human and Ecol Risk Assess* 2004; 10: 349-371.
- RIVM. Application of CATS models for regional risk-assessment of toxicants, 1996; Report nr. 719102039: 1-61.
- US Environmental Protection Agency, Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments (Interim Final), EPA 540-R-97-006 OSWER 9285 1997; 7-25 PB91-963211.
- Wiegiers JK, Feder HM, Mortensen LS, Shaw DG, Wilson VJ and Landis WG. A regional multiple-stressor rank-based ecological risk assessment for the fjord of Port Valdez, Alaska, *Human Ecological Risk Assessment* 1998; 4: 1125-1173.
- Wiegiers JK, Feder HM, Mortensen LS, Shaw DG, Wilson VJ and Landis WG. Relative risk assessment methods extracted from a multiple-stressor ecological risk assessment for Port Valdez, Alaska, *Institute of Environmental Toxicology and Chemistry* 1997; 9701.