

「수서생태계내 중금속의 환경위해성평가 연구」

박 정 규

서울특별시 동작구 사당동 1049-1, 한국환경정책·평가연구원

Tel) 3488-7655 Fax) 3488-7688

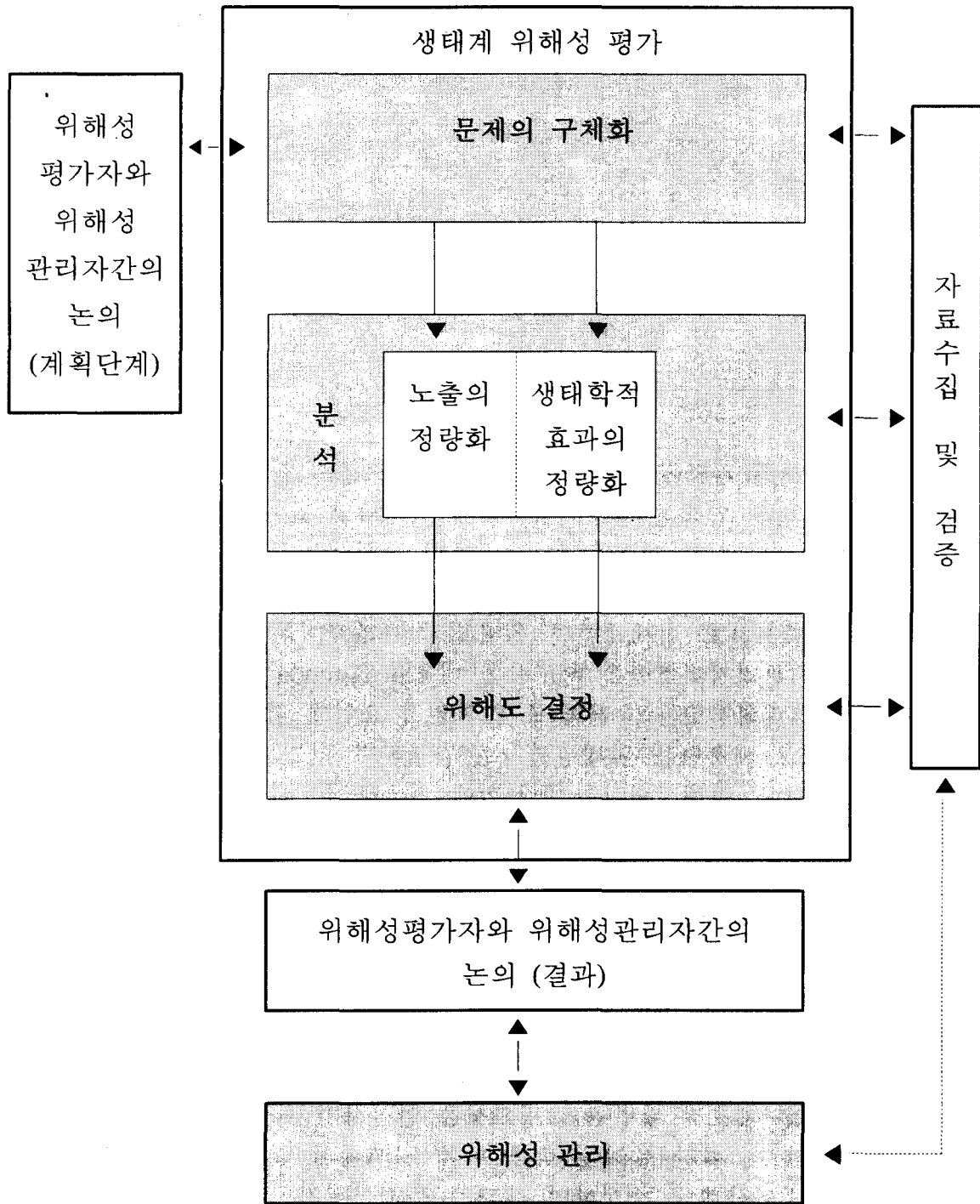
I. 머리말

근래에 이르러 세계 각국에서는 유해물질의 환경으로의 방출로 야기되는 인간 및 생태계에 대한 위해성문제가 심각하게 제기되고 있다. 이와 같은 유해물질의 인체건강 및 생태계파괴는 한 국가에만 국한되는 것이 아니라 전 인류에 영향을 미치므로 UNCED는 1992년 브라질 리우회담에서 유해물질의 국가간 이동을 감시하고 범세계적인 유해물질 관리체계를 구축하기 위하여 각국의 유해물질 관리강화방안을 촉구하는 내용을 Agenda 21에 채택하였다.

유해물질의 환경위해정도는 자연적 혹은 인위적 요인에 의해 위해가 발생할 확률을 과학적으로 예측하는 위해성평가로 결정되며 이는 현재 다양한 분야에서 활용되고 있다. 위해성평가는 독성학에 기초를 둔 인체 건강 위해성평가와 인간의 다양한 활동으로 인해 야기되는 유해한 생태학적 효과를 평가하는 생태계 위해성평가가 있다.

그런데 우리나라는 1990년대 초반부터 건강 위해성 평가기법을 환경영향평가에 적용시키기 위한 방법론에 관한 연구와 이를 수질 및 대기질 오염물질에 적용시킨 사례연구가 있었으나 아직 행정적 절차로서 제도화되어 있지는 않다. 뿐만 아니라 생태계 위해성평가는 그 개념조차 도입되지 않은 실정이나 최근에 이르러서 학계를 비롯한 많은 분야에서 생태계 위해성평가의 도입 및 이를 위한 제도적 뒷받침의 필요성을 인식하기 시작하였다.

따라서 이 글에서는 여러 유해물질 중 미국 EPA에서 실시된 대표적인 중금속의 위해성 평가사례를 소개하여 생태계 위해성평가의 국내도입시 구체적인 정책시사점을 도출하고자 한다.



(그림1-1) 생태계 위해성 평가과정

II. Quartz Hill 몰리브덴광산의 생태계 위해성평가

1. 위해성평가의 실시배경

Quartz Hill 몰리브덴광산에 대한 비교위해성평가는 광산에서 부산물로 발생하는 각종 폐석의 처리장소를 물색하기 위하여 실시되었다(표 2-1). 초기에는 세 장소가 후보지였으나 이 중 내륙에 위치한 곳을 제외한 두곳으로 좁혀졌다. 후보지인 Boca de Quadra만과 Smeaton만 모두 내수면에 접하고 있어 해양오염의 우려는 없었다.

2. 문제의 구체화

위 치 : Quartz Hill 몰리브덴광산은 알래스카 남동부의 Misty Fjords National Monument내에 위치하고 있다(표 2-2). 몰리브덴 광산폐석은 파이프를 통해 Smeaton만이나 Boca de Quadra로 유입될 계획이다(그림 2-3a, 2-3b).

유해인자 : 처음 4 - 6년 간에는 평균 36,290 미터톤/일(mt/d)의 광산폐석이 배출되었으나, 광산개발이 활발하게 진행될 향후 49 - 51년 동안에는 72,570 미터톤/일(mt/d)정도가 방출될 것으로 예상하고 있다. 이는 개발될 광석의 약 99%에 해당되는 막대한 양이며, 폐석은 약 98,000톤의 해수(1 : 1 wt)와 섞여 희석된 후 배출된다. 몰리브덴을 얻기 위하여는 원석을 분쇄하여 일차적으로 부양과정(flotation process) 및 농축과정을 거친 후 공장으로 보내어지는데 이 때 배출되는 폐기물에는 폐석(평균 입자수 63u), 담수, 해수 및 화학약품 등이 포함된다.

중금속 : 폐석에 함유된 안티몬, 비소, 카드뮴, 코발트, 구리, 철, 납, 망간, 수은, 몰리브덴, 니켈, 셀레늄, 은, 바나듐, 아연 등으로 그 특성이 표 2-1에 요약되어 있다. 이 중 은, 구리, 수은 등이 가장 독성이 강한 물질이며, 은, 구리, 납 등이 가장 많이 함유되어 있다. 표 2-1에 표시된 독성치와 폐석에 함유된 농도 등을 고려하여 수서생물에 가장 독성이 강한 중금속으로 구리를 선정하였다. 구리는 Quartz Hill 광산 이외의 다른 광산에서도 수질에 가장 높은 농도로 존재하는 물질로 밝혀졌다.

시 약 : 몰리브덴을 얻기 위하여는 많은 시약이 사용되는데 이들의 사용예측량과 급성독성치는 표 2-2에 요약되어 있다. 이 중 디젤연료가 가장 많이 사용되는 시약으로 PAHs와 다른 여러 유기물질을 함유하고 있어 수서생물

그림 2-1 광산 폐석처리장의 위해성평가 분석표

문제의 구체화

유해인자 : 매립에 따른 물리적 영향, 수서생태계에 대한 중금속의 영향

생태적 요인 : 수서 무척추동물, 어류

종말점 : 평가종말점은 서식처 파괴 및 이에 따른 수서무척추동물과 어류에 미치는 영향이며, 측정종말점인 해저면과 수질축적되는 폐석의 양을 추정

분석

노출의 정량화

- 매립가능양 및 수질에 함유되는 구리의 양을 추정하기 위해 모델 이용

생태적 효과의 정량화

- 수질분석
- 독성시험
- 생물체 조직분석

위해도 결정

- 두 폐석처리장 후보지에 대한 위해성평가를 실시·비교하였다
- 평가는 예상되는 수질의 구리농도 비교, 현탁물질양 추정 및 기준치 초과빈도 예측, 수저생물의 서식처 변동여부 등을 비교하였다

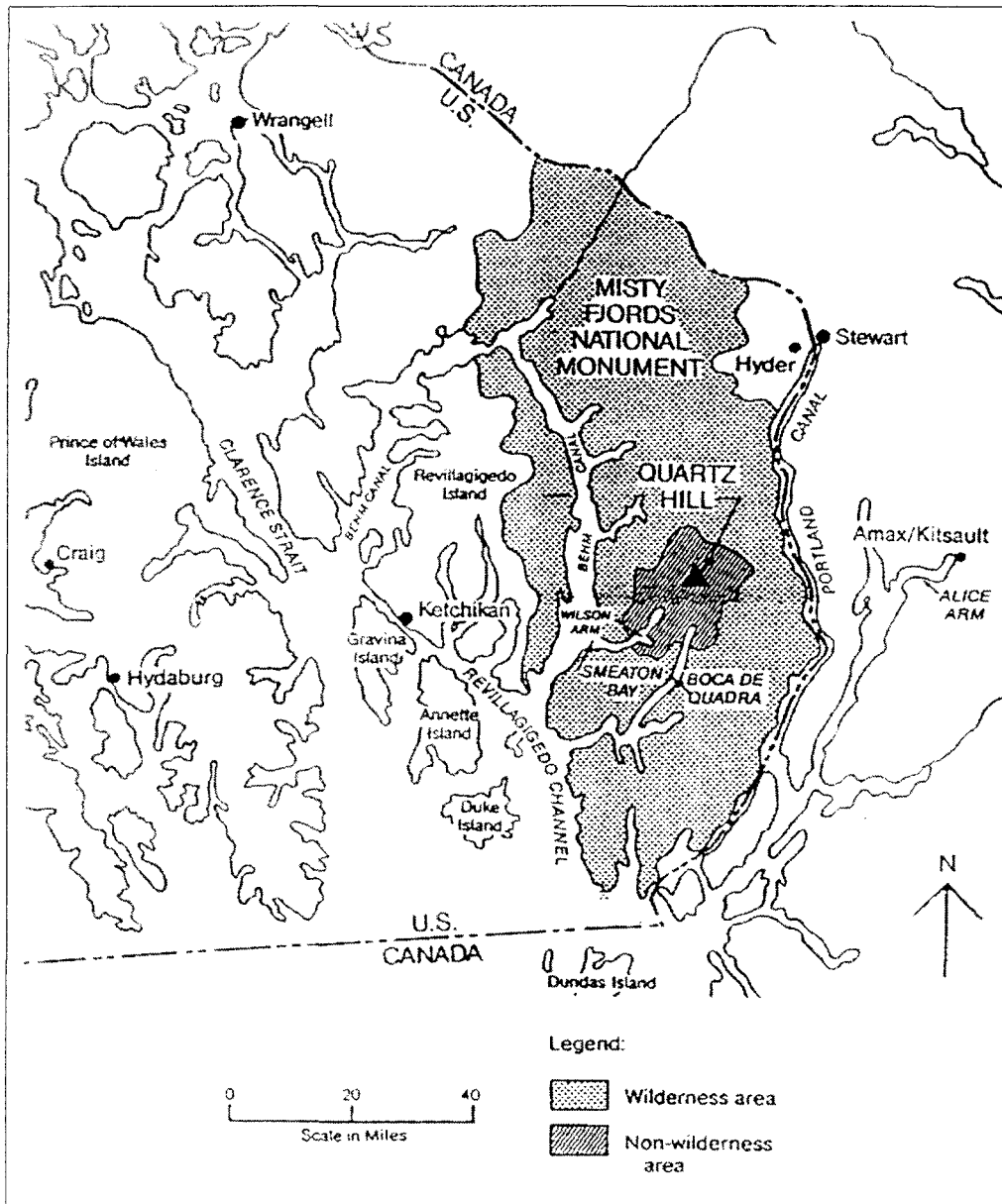


그림 2-2. Quartz Hill 광산의 위치

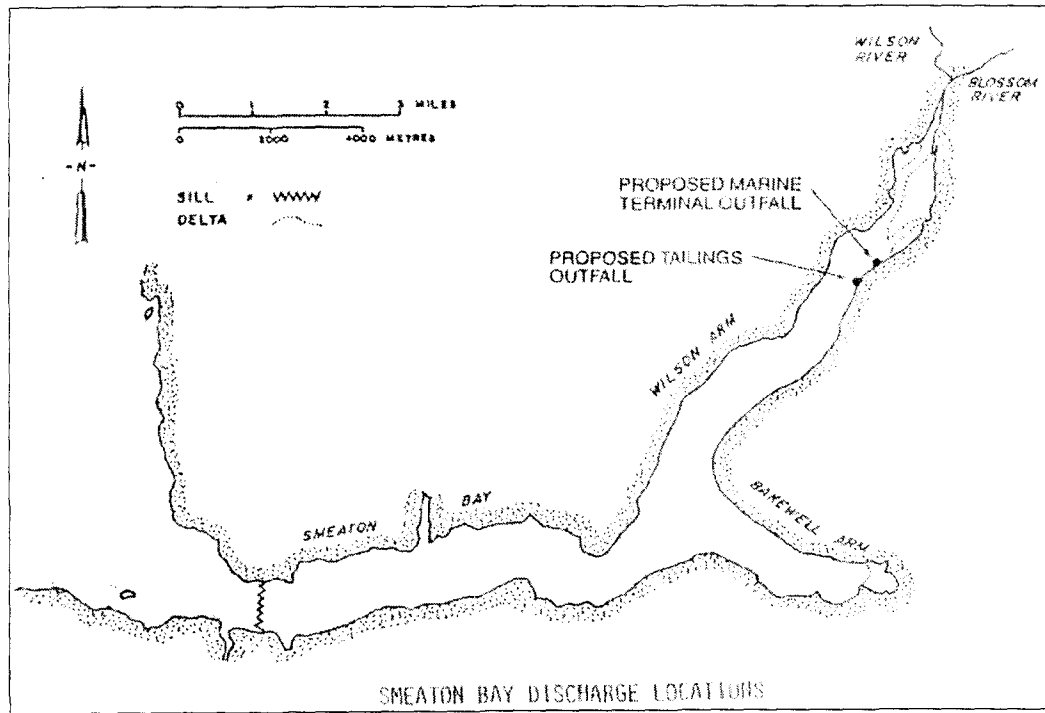


그림 2-3a. 알래스카 Quartz Hill 광산의 폐석처리 후보지인 Smeaton만

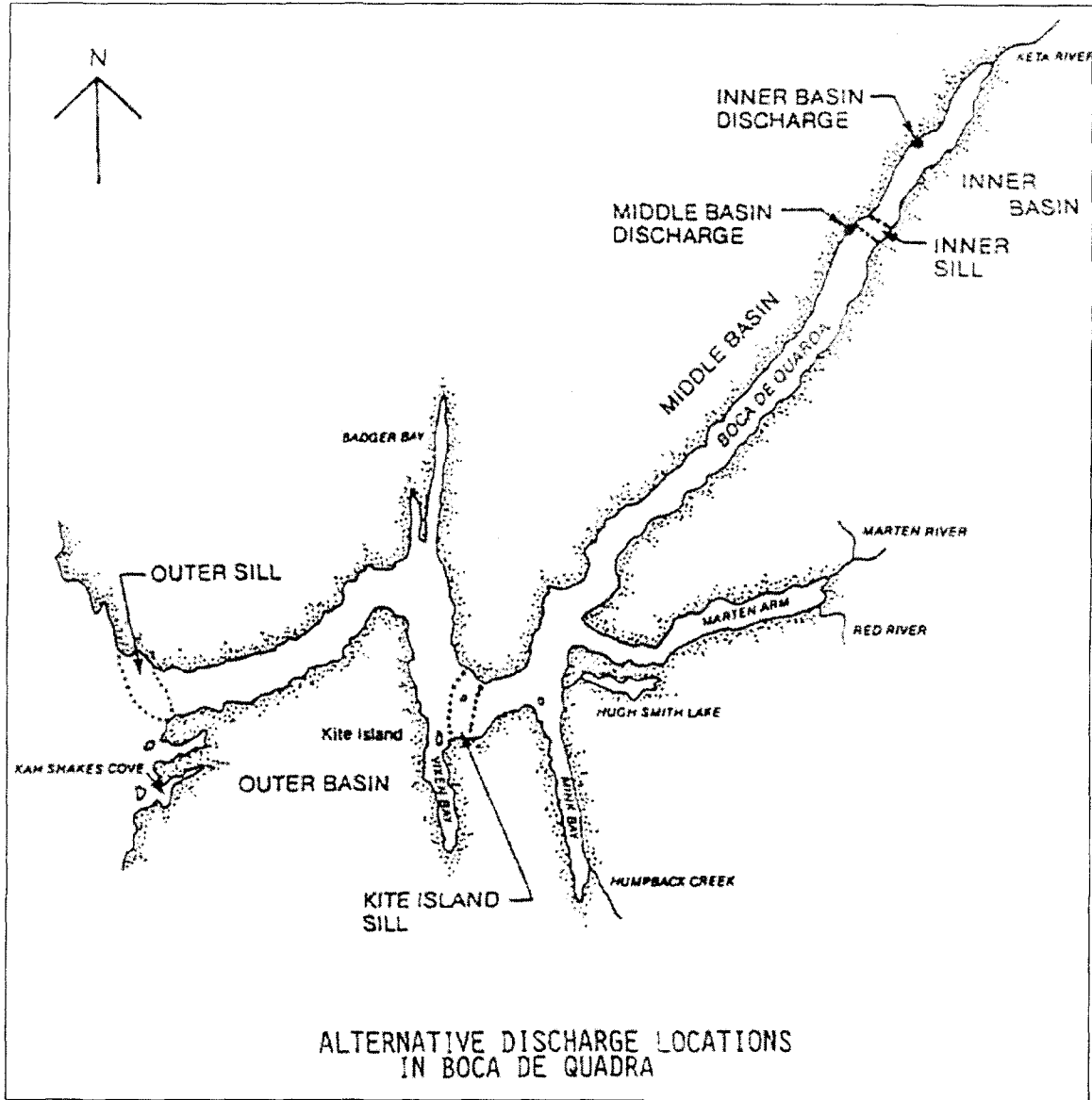


그림 2-3b. 알래스카 Quartz Hill 광산의 폐석처리 후보지인 Boca de Quadra 지역

표 2-1. 광석 및 폐석에 함유된 무기물질과 독성자료 (U. S. EPA, 1988b)

	원석 (mg/kg)	폐석 (mg/kg)	폐수2 ($\mu\text{g/L}$)	급성독성치 ($\mu\text{g/L}$)
안티몬		0.002		
비소		10.9	6.8	36.0
카드뮴		2.4	15.0	9.3
크롬		10.0	34.0	50.0
코발트		3.3		
구리	90	69.0	35.0	2.9
철		16,900	1,790	
납	60	47.0	120.0	5.6
망간		462.0		
수은		0.05	1.2	0.025
몰리브덴	2,170	120	1,080	
니켈		17.7	290	2.9
셀레늄		0.1	6.6	54
은		0.13	7.0	2.3
바나듐		17.6		
아연	40	46.0	77	86.0

표 2-2. Quartz Hill 광산 프로젝트에 사용된 시약 (U. S. EPA, 1988a)

시약	80,000 톤/일 (lb/일) 당 사용량	원석 1톤당 사용량 (lb)	LC50 (mg/L)
Diesel # 2 fuel oil	50,720	0.634	0.1-5.0 ^a
M-502	15,920	0.199	1.0 ^b
MIBC	12,800	0.160	1.0 ^b
Lime	10,720	0.134	1.0 ^b
Sodium silicate	5,040	0.063	5.0 ^b
Nokes reagent	4,320	0.054	0.002 ^c
CMC-7	3,600	0.045	5.0 ^b
ALFOL-6	3,600	0.045	5.0 ^b

^aLC₅₀ from literature values

^bNo information on aquatic toxicity in literature; LD₅₀ is assumed based on conservative assumptions.

^cAssumes Nokes reagent disassociates to H₂S.

에 급성 및 만성독성을 나타내고 있다. M-502는 4가 암모니아염 복합체로 원석 분리과정에 주로 쓰이며 토양입자에 대한 친화성이 크다. MIBC 역시 원석 분리과정에 사용되는 시약으로 높은 기화성으로 인해 주로 케톤형태로 대기중으로 방출된다. 석회는 pH 조절제로 사용되며 수질에 직접 유해한 영향을 주기보단 pH를 변화시킴으로서 수서생물체의 서식처를 파괴시킨다.

부유물질 : 폐석의 부유물질 함유량은 약 10%로, 이때의 부유물질은 수계에 직접 유입되는 입자 중 가장 작은 크기인 평균 $5\mu\text{m}$ 로 가정하였다. 부유물질은 수서생물의 대사활동(호흡이나 광합성작용 등)을 저해할 뿐 아니라 때론 직접 독성을 나타내기도 한다. 연구에 의하면, 연어에 대한 부유물질의 96-hr LC_{50} 치는 1,500 - 54,000mg/L로 분석되었다.

생태적 요인 : 환경영향을 고려해야 하는 주요 생물종은 연어, 청어, 水底 무척추동물, 플랑크톤 등이다. 水底 무척추동물은 게나 새우 등 상업적 가치가 있는 종이 포함되며 또한 연어나 청어같은 포식자의 중요한 먹이가 된다. 플랑크톤은 무척추동물의 주요 먹이일 뿐 아니라 청어의 幼生같이 어류의 초기생활상이기도 하다.

식물성 플랑크톤은 광합성에 적당한 빛이 투과하는 수심이 낮은 곳(표면에서 0 - 25m)에 주로 서식하며 3월부터 8월까지 개체군수가 늘어난다.

동물성 플랑크톤은 수심 0 - 150m에 서식하며 그 중 Copepods가 대표종이다. 하지만 평가지역마다 대표종 및 그 분포정도에 조금씩 차이가 있다.

어류는 약 75종이 서식하는 것으로 밝혀졌으며 연어, 청어, 넙치 등이 대표종이다. 이 중 40여종은 150m이하의 수심이 깊은 곳에서 서식한다.

水底 무척추동물은 Boca de Quadra와 Smeaton지역 모두에서 수심 0 - 300m의 넓은 분포도를 나타내고 있다(표 2-3).

종말점 : 평가종말점은 독성물질의 배출로 인한 수서생태계에 미치는 영향과 수서 무척추동물 및 어류의 서식처 파괴 등이며, 측정종말점은 폐석으로 인한 수서생물의 서식처파괴를 모델링을 통한 예측, 구리의 수질기준 초과여부 예측, 부유물질의 기준초과 여부 등이다.

표 2-3. Boca de Quadra 및 Smeaton Bay 지역의 수서생태계 특징

서 식 처	지 역	위 치	대 표 종
Rocky intertidal	High intertidal and gradual slopes	Throughout fjords	Rockweed
	Low intertidal and all slopes	Throughout fjords	Barnacles, mussels
Soft-bottom intertidal	High intertidal	Keta and Wilson River mud flats	Sedge, insects
	Middle intertidal	Keta and Wilson River mud flats	Rockweed, insects
	Low intertidal	Keta and Wilson River mud flats	Polychaetes, bivalves, harpacticoids, eelgrass
Rocky subtidal	Vertical walls 0-3 m	Throughout fjords	Red alge, barnacles, sea urchins, sea stars
	3-7 m		Kelps, red and brown crustose, algae, gastropods
	7-10 m		Brachiopods, tunicates
	Gradual slopes 0-2m	Throughout fjords	Eelgrass
	2-10 m		Sea stars, bivalves
Soft-bottom subtidal	20-100 m	BQ inner basin and Smeaton Bay	Polychaetes, bivalves, Dungeness crabs, Tanner crabs, pandalid shrimps, pinch bug crabs
	100-200 m	BQ inner basin and Smeaton Bay	Polychaetes, bivalves, Tanner crabs, Pandalid shrimps
	200-330 m	BQ middle and outer basins	Polychaetes, bivalves, sidestripe shrimp, Tanner crabs, heart urchins, mud stars

3. 분석 : 생태적 효과의 정량화

생물학적 정량 : 폐석의 급성독성, 만성독성 및 아치사효과 등을 여러 생물종을 대상으로 실시하였다. 연어 幼生, 조개 幼生, amphipods, euphausiids 등에 대한 급성독성을 측정하기 위해 약 10일간 노출시킨 결과 급성독성은 그리 높지 않았다. LC₅₀ 또는 EC₅₀ 농도는 euphausiids에 109,000mg/L, 연어에 208,000mg/L로 각각 밝혀졌다. 또한 계종류에 170,000mg/L, 조개 幼生에 142,500mg/L, amphipods에 86,000mg/L로 LC₅₀는 그리 높지 않은 것으로 나타났다.

만성독성 및 아치사효과를 위해 조개의 행동학적 변화와 식물성 플랑크톤의 성장장애 등을 조사하였으나 폐석노출로 인한 아무런 영향도 관찰되지 않았다.

생물농축 : 폐석에 함유되어 있는 카드뮴, 구리, 망간, 몰리브덴, 납, 철 등 중금속의 생물농축을 조사하기 위하여 실험실에서 게, 조개, 가자미에 4개월간 노출시켰다. 어떤 생물종에서도 중금속 농도의 변화가 관찰되지 않았으며, 행동학적 또는 형태적 변화도 없었다.

4. 분석 : 노출의 정량화

자연상태에서 부유물질 분포는 수직적 혼합과 용승(湧昇)작용, 물교환비율, 파도의 정도, 혼탁도 등에 의해 영향을 받는다. 이와 같은 요소의 상대적 관계는 통계적 불확실성 분석(몬테 카를로 방법)를 통해 추정되었으며, 이 결과는 농도와 같은 확실한 수치가 아닌 확률로 표시되었다. 또한 시뮬레이션을 통한 부유물질의 예측치는 표 2-4에서와 같이 예측치는 3년 - 5년, 20년, 55년으로 이는 이 프로젝트의 초기, 중기, 말기 등을 각각 대표한다. 수심 100m 이상의 상층부의 부유물질 농도는 Boca de Quadra지역보다 Smeaton 만에서 높게 나타났다.

대부분의 환경독성치는 용해성 금속농도에 기초로 측정되므로, 구리독성치를 측정하기 위하여 총 구리농도 뿐 아니라 용해된 구리농도도 측정되었다(표 2-5). 이때 폐석 중 추출가능한 부분은 다음 식에 의해 수질에서의 농도로 변환시켰다.

폐석의 추출가능한 금속부분 X 물에서의 부유물질농도 = 수질의 금속농도
(mg/mg) (mg/L) (mg/L)

표 2-4. Smeaton Bay/Wilson Arm 및 Boca de Quadra 지역 수질의
최대 부유물질농도

부유물질농도 (mg/L)		
년 도	Smeaton Bay	Boca de Quadra
5	74	56
20	160	65
55	170	65

표 2-5. 추출가능한 구리농도 예측치

	Smeaton Bay/Wilson Arm		Boca de Quadra	
	Extractable Portion (10 ³ mg/mg)	Extractable Concentration (μg/L)	Extractable Portion (10 ³ mg/mg)	Extractable Concentration (μg/L)
Total ore	0.09	13.5	0.09	5.2
Total tailings	0.069	10.4	0.069	4.0
44% of ore	0.04	6.0	0.04	2.3
44% of tailings	0.03	4.5	0.03	1.7
Tailings extraction	0.022	3.3	0.022	1.3

^a From a maximum suspended solid concentration (150 mg/L) in the upper 100 meters of Smeaton Bay/Wilson Arm at year 55 and maximum suspended solid concentration (58 mg/L) in the upper 100 meters of middle-basin Boca de Quadra at year 55.

원석 구리농도의 100%(90ug/g)와 44%(40ug/g)는 광산을 활발히 개발하는 동안의 최대구리농도를 대표치로 선정하였다. 이 농도범위는 정확한 수치గా 아닐 가능성은 있으나 원석의 최대구리농도 측정치와 원석에서 모든 금속의 용출가능한 부분을 나타낸다. 또한 이와 같은 구리농도 예측은 단지 두 지역 간의 수질을 비교하기 위해 필요할 뿐이므로 폐석의 화학분석을 통한 직접적인 구리분석은 필요치 않다. 수심 100m 이상의 상층부에서의 총 예측구리농도는 Boca de Quadra지역보다 Smeaton만 지역에서 높게 나타났다.

5. 위해도 결정

이 연구의 목적은 Boca de Quadra지역 및 Smeaton만 지역의 수질에서 총 구리농도가 기준치인 2.9u/L을 초과하는지 예측하는 것으로 예상 초과확률은 연구지역의 총 초과수를 시행된 총 시뮬레이션수로 나눈 것이다. 두 지역 모두의 수심 100m이하에서 전 광산 개발시기 동안 구리농도는 수질 기준을 초과할 것으로 예측되었다. 초과정도는 추출가능한 구리의 농도가 높아질수록 높게 나타났으며, 개발기간이 55년이 초과하면 Smeaton 지역의 수심 상층부에 기준초과확률이 커졌다 (그림 2-4a, 2-4b, 2-4c). 그러나 Boca de Quadra에서는 수심상층부의 부유물질 농도가 낮았기 때문에 이와 같은 결과는 예측되지 않았다. 또한 Boca de Quadra지역에서의 부유물질 및 구리농도는 Smeaton지역에서 보다 높게 나타났으나 반대로 생물체에 대한 영향은 적은 것으로 밝혀졌다. 이는 Smeaton지역에서는 부유물질 및 구리가 생물학적 활동이 활발한 수심 상층부에 주로 분포하고 있기 때문이다.

고형물질(settled solids)에 노출됨으로 발생하는 위해정도는 폐석으로 뒤덮인 면적당 유해한 영향을 받는 水底생물수로 표현되는데, 이때 유해한 영향은 폐석으로 인한 매몰이나 질식에 따른 치사, 적정 서식처 파괴로 인한 생물종 감소 등이다. 이와 같은 위해도는 Boca de Quadra지역보다 Smeaton지역에서 약 4배이상 큰 것으로 나타났다(표 2-6).

광산으로 인해 영향을 받게되는 Smeaton지역에서의 청어서식지는 약 320ha로 Boca de Quadra지역의 약 20ha에 비해 훨씬 많은 면적이 영향을 받을 것으로 예측되었다. 만약 서식지 이동이 늦어지면 이와 같은 예측은 사실로 나타날 것이다.

두 지역의 지리학적 특성 역시 시간에 따라 변화하여 Smeaton지역의 경우 심층부 특히 폐석이 방출될 지역의 지리학적 특성이 현저히 변화될 것으로 예상되나 Boca de Quadra 지역에는 거의 변화가 없을 것으로 결론지었다.

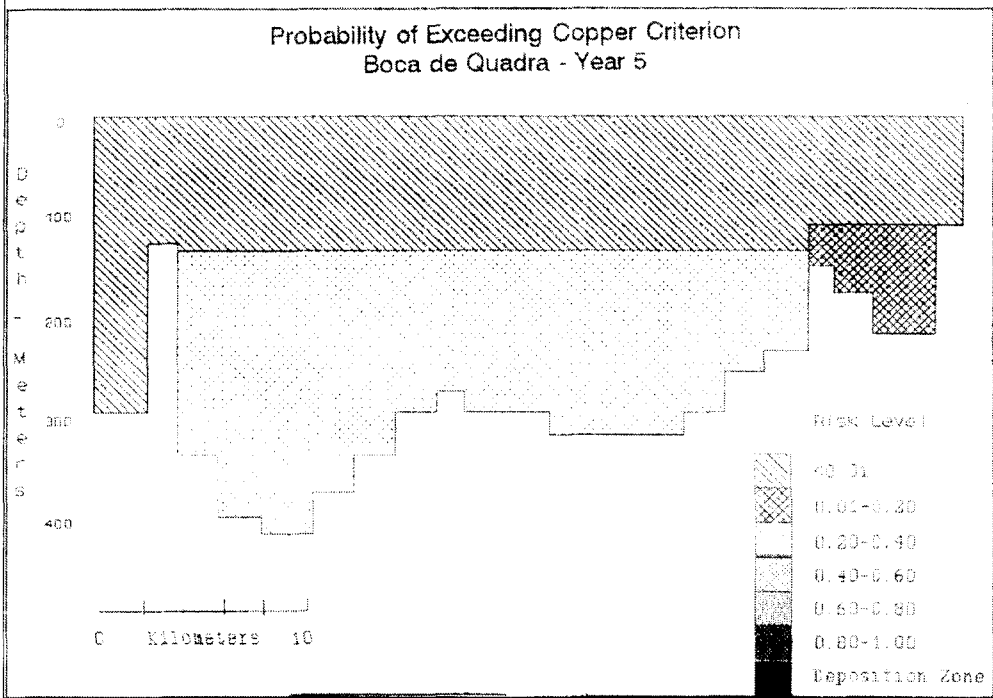
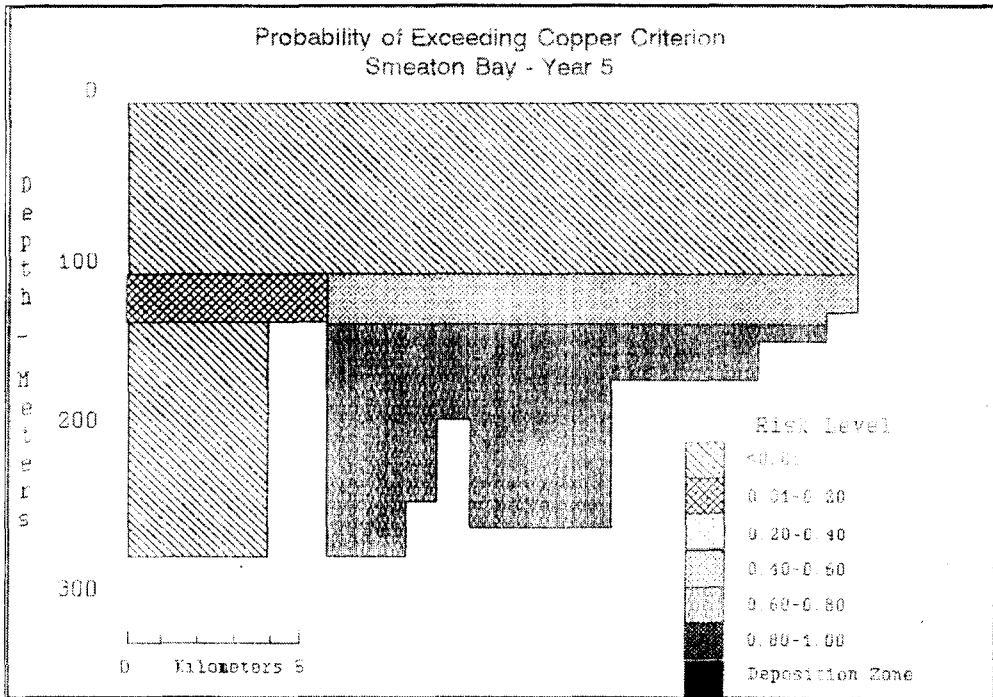


그림 2-4a. 수질기준 초과확률 - 5년

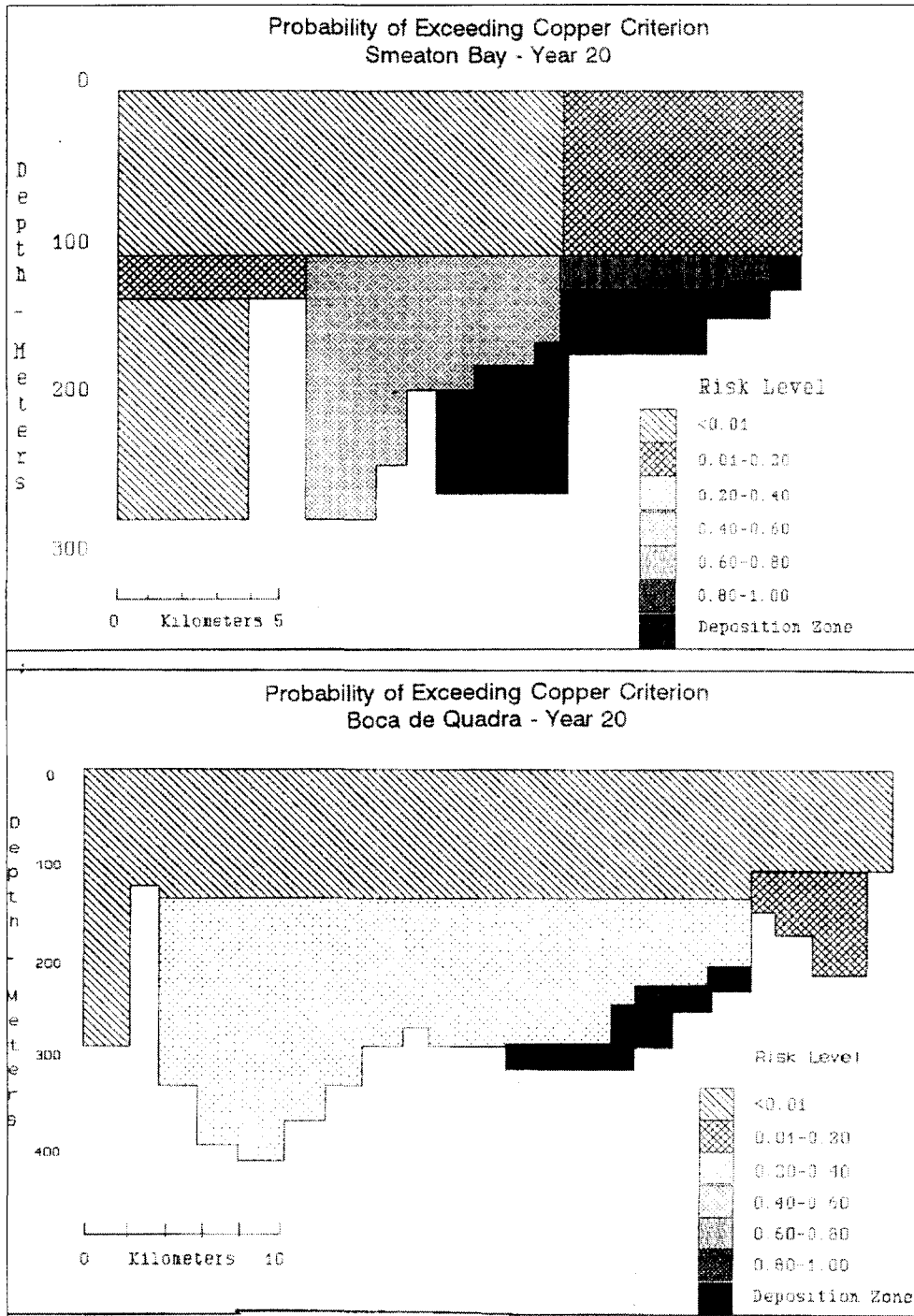


그림 2-4b. 수질기준 초과확률 - 20년

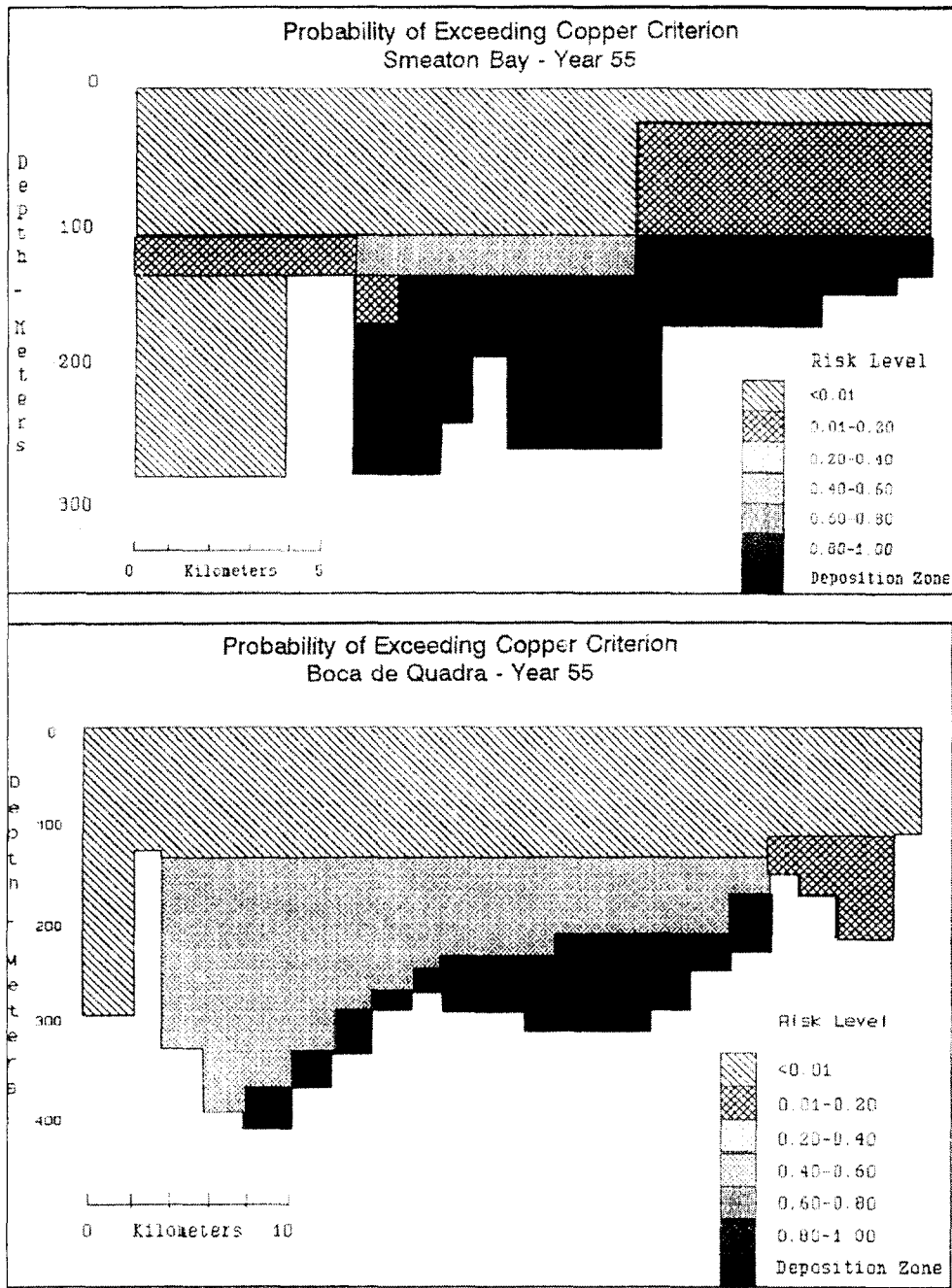


그림 2-4c. 수질기준 초과확률 - 55년

표 2-6. Quartz Hill 광산계획에 의해 영향을 받을 것으로 예측되는
생물종 및 생물총량(kg)

	Dungeness Crab	Tanner] Crab	Pot Shrimp	Traq Shrimp	Walleye Pollock	Rockfish	Flafish
<u>Option</u>							
Boca de Quadra	22,500	13,750	40,150	45,100	45,100	30,800	17,050
Smeaton Bay	52,800	129,800	26,400	313,500	33,000	11,002	17,250
<u>유실될 것으로 예측되는 총 생물총량</u>							
Boca de Quadra	175,400						
Smeaton Bay	773,850						

불확실성 : 통계적 불확실성 분석이 두 지역에서의 자연적 변이를 정량화하는데 이용되었으며 다른 광산과 비교해 본 결과 오염분산에 대한 모델 예측은 실제량과 비슷한 것으로 나타났다(표 2-7).

표 2-7. 북미지역 타 광산과의 비교표

광산명	위치	기간 (년)	최대폐석방출량 (톤/일)
Island Copper	Rupert Inlet, B.C.	16	60,000
Kitsault Molybdenum	Alice Arm, B.C.	1.5	15,000
Quartz Hill	Alaska	55	80,000

IV. 맺음말

국내에 있어 생태계 위해성평가는 새로운 분야이므로 평가 시행을 위한 제반여건이 충분히 갖추어 있지 않은 실정이다. 또한 인체건강 위해성평가의 경우 선진국의 축적된 자료 및 평가기법 등을 어느정도 국내에 적용시킬 수 있으나 생태계 위해성평가의 외국자료는 국내에 직접 적용시킬 수 없다. 이는 각 생태계의 독특한 환경적 특성때문이다. 특히 수서생태계의 경우 수계로 방출되는 물질의 종류 및 양, 생태계에 서식하는 생물종, 서식 생물종의 유해물질에 대한 민감도, 생태계의 물리·화학적 특성 등이 환경에 따라 상당한 차이가 있으므로 외국자료의 국내적용은 현실적으로 어렵다. 따라서 국내 환경에 알맞는 실험종 선정, 위해성평가기법, 노출평가 기법, 불확실성 분석, 위해도 정량화 등 생태계 평가기법의 개발이 시급하다.

이를 위하여는 생태계 위해성 평가기술, 이를 수행할 전문인력 및 자원 등 모든 분야에 대한 정부의 적극적인 관심과 지원이 필수적이며 이에 대한 법적 근거가 시급히 마련되어야 한다. 특히 법적 및 제도적 근거가 마련되지 않으면 실제적인 위해성평가의 실시는 물론 향후 실시를 위한 기반조성도 어렵게 된다. 이 외에도 생태계 위해성평가에 대한 연구의 활성화를 위하여는 학계 및 환경관련 연구소와 기업에서의 적극적인 관심이 절대적이다.

참 고 문 헌

- Covello, V. T., M. W. Merkhofer, Risk assessment methods, Plenum Press, 1993.
- EPA, A review of ecological assessment case studies from a risk assessment perspectives, U. S. EPA, 1993.
- EPA, Hazardous substances in our environment, U. S. EPA, 1990.
- EPA, Peer review workshop report on ecological risk assessment issue papers, U. S. EPA, 1994.
- Kulluru, R., S. Bartell, R. Pitblado, and S. Stricoff, Risk assessment and management handbook, McGraw-Hill Press, 1996.
- Richardson, M., Environmental toxicology assessment, Taylor & Francis, 1995.
- Suter, G. W., Ecological risk assessment, Lewis publishers, 1993.