

유류로 오염된 군사기지의 복원 우선순위 결정 모델 연구

노 경희* 양 임석** 한 옥*

군사과학대학원* · 국방부**

A Study on the Restoration Priority Decision Model of Oil Contaminated Military Sites

Kyunghee Roh*, Imsuk Yang** and Uk Han*

Advanced Institute of Military Science & Technology* and MND**

ABSTRACT

At military bases, environmental restoration activities resulting from oil contamination are growing concerns of preventing adverse effects on human health and environments. Its technologies are still under developing stage through some countries such as United States and Germany. This study is focused on developing model for a decision-maker to assist the restoration priority under the situation of limited resources such as budget and time. The Model, named the Base Restoration Priority Decision model(BRP model), is composed of the three factors: oil contaminants, receptors, and the potential migration pathways. Each risk rating of factor is combined in the 27 matrix blocks and set immediate, moderate, and delayed action category designated restoration priority. This is categorized to group sites into three degree using the simplest of assessment system. As a result, the model will be able to apply to the effective allocation of resources for the restoration by any decision-maker because the model is easy to understand. Also, the continuous study will have established risk assessment system for the restoration of contaminated military with this study as the starting point.

Key words : restoration priority decision, relative risk assessment, oil contaminated military sites,

요 약 문

최근 군사기지에서의 환경복원활동은 미국과 독일 등의 일부 선진국을 중심으로 인간의 건강과 환경을 보호하기 위한 차원에서 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 상대적 위해성평가 기법을 이용하여 군사기지 복원을 위한 우선순위 결정을 지원함으로써, 효율적인 자원배분이 가능하고 군에 적합한 타당한 모델이 개발될 수 있도록 하는 연구에 초점을 맞추었다. 평가 대상은 군사기지 내에서 유류로 오염된 지역의 전 범위를 대상으로 하였다. 본 연구모델은 유류오염물질 요소, 수용체 요소 및 이동경로 요소의 세가지 평가요소를 평가하여 총 27개의 매트릭스 칸에 각 평가요소의 위해등급을 상호 결합하여 판단함으로써, 종합적인 복원순위를 긴급·보통·유예로 나타냈다. 이는 최대한 간편한 평가체제를 유지하기 위하여 세가지의 등급으로 그룹화하여 평가한 것이다. 본 연구모델은 복원이 요구되는 지역에 대하여 자원의 배분을 위한 접근을 위해 군의 환경관리자는 누구나 쉽게 이해하고 적용 가능하다는 중요한 장점이 있다. 따라서, 향후 발전적인 연구과제에서 본 연구모델을 시발점으로 지속적으로 보완된다면, 군의 위해성평가 체계의 정착이 이루어질 것으로 기대한다.

주제어 : 복원우선순위 결정, 상대적 위해성 평가, 유류오염 군사기지,

1. 서론

군은 사회속의 어느 집단보다도 전투력 운영 및 그 유지를 위하여 자연환경을 폭넓게 이용하고 있다. 주둔지가 전국적으로 분포되어 있을 뿐만 아니라 군사활동, 또한 지상, 해상, 공중의 전 지역을 대상으로 일어나고 있다. 특히, 우리나라의 군사기지는 환경적으로 중요한 지역, 상수원 보호구역이나 생태계가 잘 보존되어 있는 지역내에 위치하고 있음이 환경보전에 대해서 결코 간과할 수 없게 한다.

따라서, 한 때는 군이 환경문제에 대한 관심이 적었으나, 현재는 국민들의 관심고조와 군의 자각, 그리고 정부에서의 토양환경보전법 제정으로 안보상의 여건이 허락하는 한 동일한 환경규정의 적용을 받고 있다.

그러나, 군은 국방예산의 약 0.11~0.36%의 낮은 수준의 환경예산으로, 그 일부를 오염토양에 대한 복원 및 관리대책을 위하여 추진하고는 있으나, 미 국방부가 이들 분야에 국방예산의 1~2%를 사용하고 있는 데 비하면 정부차원의 예산지원과 효율적인 예산사용에 대한 연구가 요구된다¹⁾.

따라서, 군은 과거 무관심속에 오염된 기지는 현재에도, 그리고 미래에도 지속적, 동시다발적 형태로 오염을 유발할 가능성을 인지하고, 인간과 환경을 보호하는 효과적인 접근방법을 바탕으로, 군사기지 오염의 복원 과정에 대하여 합리적인 조사와 평가를 강조하는 등의 노력이 절실하다.

본 연구는 군사기지의 오염 중 가장 많은 영향을 미치고 있는 유류로 오염된 지역을 대상으로 하여²⁾, 복원작업에 대한 효율적인 자원배분이 가능하도록 우선순위 결정을 지원하는 새로운 평가기법(Base Restoration Priority Decision model : BRP model)을 개발하였다.

이는 향후 경제적인 오염토양 복원을 가능하게 하고, 시급한 토양오염문제 해결에 합리적이고 체계적으로 대처하는 데 기여할 수 있다.

2. 연구 방법

BRP model은 Figure 1과 같이 먼저 평가요소별로 분석을 한 후에 요소별 평가등급을 결정하고, 이를 종합하여 판단함으로써 해당 군사기지에 대한 복원 우선순위 결정이라는 목표를 달성하도록 하였다. 평가요소는 각각 1·2·3등급으로 위해등급을 결정하고, 이에 대한 종합적인 복원 우선순위를 긴급·보통·유예라는 등급으로 평가하였다.

여기에서 긴급·보통·유예로서의 평가는 인간의 건강과 환경에 대한 직접적인 위해도를 나타내는 것이 아니라, 가장 긴급하게 복원을 위한 정밀

조사와 실행이 요구되는 기지를 나타냄으로서, 자원이 상대적 위해도가 더 높은 곳에 우선 중점 지원될 수 있도록 하였다.

평가요소는 다양한 유류 오염물질(oil contaminants)과 수용체(receptors) 및 이동경로요소(migration pathways)의 세가지 요소를 주대상으로 하였고, 평가요소별 세부 평가인자는 Figure 2와 같다. 평가요소 구성의 이론적 바탕은 국내·외의 위해성평가에 대한 문헌^{3),4),5),6)}에 대한 분석과 군사기지의 운용에 따른 환경영향, 토양환경의 특징, 유류의 일반적인 특성, 그리고 토양오염으로 인한 인간과 환경에의 영향 등을 연구하여 종합한 결과이다. 이를 현행 토양환경관련 법규⁷⁾에 접목함으로써 지속적이며 일관성 있는 접근이 가능하도록 하였고, 군의 환경관리자는 누구나 쉽게 이해하고 적용할 수 있도록 간편한 평가체계로 구성하였다.

실제 BRP model을 적용할 때의 활용 정보는 기지의 이력, 토양오염유발시설 신고서, 환경영향평가서, 지질도, 토양도, 지적도 등에 대한 문헌조사를 통하여 획득하고, 추가적으로 현장조사를 통해서 정량적 또는 정성적으로 판단할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

평가요소별 분석:

a. 유류오염물질 요소: 세부평가인자는 Table 1과 같이 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes)농도와 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)농도에 대하여 각각 세가지의 범위로 분류하여 분류번호를 부여하였다. 이는 토양환경보전법에서의 토양오염 확인, 우려 및 대책기준에 의한 것이다.

이를 Table 2와 같이 유류오염물질요소에 대한 위해등급을 결정하였다. 일반적으로 유류오염기지에서 다양한 석유화합물이 섞여있는 상태이므로, 휘발유 등 인화점이 높은 일부 유류에서만 나타날 수 있는 BTEX나 등유, 경유, 제트유 등에서 나타나는 TPH농도 중에서 한가지라도 오염대책기준(각각 200mg/kg, 5,000mg/kg)을 초과하면 위해1등급, 한가지라도 오염우려기준(80 mg/kg, 2,000mg/kg)을 초과하면 2등급, 한가지라도 오염확인기준(32mg/kg, 800mg/kg) 이상이면 3등급으로 결정하였다.

b. 수용체 요소: 세부평가인자는 유류오염 기지 주변의 직접적인 피해대상인 인간과 민감한 생태환경을 대상으로 하였다(Table3).

생태계를 수용체로 고려할 때의 평가인자는 토양오염유발시설관리지침에 정하고 있는 상수원 특

별대책지역 등의 각종 보호구역을 고려하였다. 인간을 수용체로 고려한 세부 평가인자는 부대원이나 인근 주민이 이용하는 음용수를 공급하는 환경인 하천이나 지하수 공급관정, 그리고 인간에 의해 이용되면서 직·간접 접촉의 대상이 되는 토지이용 형태- 부대막사나 인근 주민이 거주하는 주거지역, 부대 연병장이나 기타 오락공간을 나타내는 레크레이션지역, 기지 주변의 농경지역, 상·공업지역 - 를 고려하였다.

이를 유류오염이 수용체에게 미치는 영향민감도를 나타내는 각 수용체까지의 근접거리를 기준하여 분류하였다. 생태계 수용체에 대해서는 1, 3, 10km로 하였고, 인간 수용체에 대해서는 0.5, 1, 3km로 토지이용형태별로 다소 차이를 두었다. 이처럼 인간 수용체의 근접도를 생태계 수용체보다 근거리로 정한 것은 인간 생활환경이 생태환경보다는 근거리 내에서 영위된다는 점을 고려한 것으로, 두 평가인자의 평가의 형평성을 맞추기 위함이다.

이들 수용체 요소에 대하여 분류한 결과는 Table 4와 같이 위해등급을 결정하였다. 각종 보호구역이 1km이내이거나 음용수로 이용되는 관정 및 하천, 또는 주거지역이 0.5km이내에 있게 되면 위해1등급으로 결정하였다.

c. 이동경로 요소: 이동경로를 위한 세부 평가인자는 유류오염물질의 이동 촉진이나 지면에 직접적으로 관계하는 실질적인 인자를 선택하였다. 수용체에서 오염물질이 관측되는지의 여부를 우선 판단하였다. 관측이 된다면 이미 오염물질이 다양한 경로를 통해 이동되어 수용체에 영향을 미치고 있는 것이므로, 이동경로 판단의 최우선순위의 위해등급으로 결정하기 위함이다.

반면, 수용체에서 관측되지 않는 경우는 오염물질이 잠재적으로 이동경로에 영향을 주게 되는 요소를 판단하여 평가인자를 선정하였다. 먼저 물리적인 시설 설치여부는 오염물질의 잠재적인 이동과정에 영향을 미치는 결정적인 평가인자로 선정하기에 적합하다고 판단하였다. 즉, 규정에 의한 토양오염방지조치는 토양오염 유발을 원천적으로 규제하고자 하는 조치이면서, 동시에 토양오염방지 조치가 되어 있지 않았다면, 언제라도 오염물질 누출로 인하여 주변의 민감한 수용체까지 도달될 수 있다는 개연성을 증명하는 것이 된다. 따라서 오염방지 조치여부를 토양오염유발을 확인할 수 있는 대표적인 평가 대상으로 선정하였다. 또한, 유류오염물질의 지하매질에서의 투과시간은 오염기지의 지역적인 수리지질학적 특성을 대표하여 유류오염물질 이동의 촉진과 지연 여부를 직접적으로 표현하고 있는 것으로, 토양의 성상 및 기반암의 종류를 투과시간을 나타내는 평가인자로 판단하였다.

평가의 용이함을 위하여 부여한 분류번호는 유류오염물질의 이동유발 조건에 미치는 영향의 중요도에 의하여 부여하였다. 투과시간은 오염방지시설 설치의 하위개념의 평가인자로서 단독으로 평가의 대상이 될 수 없고, 오염방지조치가 불량하다는 평가인자가 선택된 후에 선택가능한 평가인자로 하였다(Table 5).

상기와 같이 부여된 분류번호를 기준하여 이동경로요소의 위해등급을 결정하였다(Table 6). 수용체에서 오염물질이 관측된 경우는 위해1등급으로 하고, 규정에 준한 시설 설치가 불량하고 토양의 성상이 사질이거나 기반암의 종류가 퇴적암류일 때는 2등급으로, 규정에 준한 시설 설치 불량하고 토양의 성상이 실트질, 점토질이고, 기반암의 종류가 화성암, 변성암류이면 3등급으로 결정하였다.

복원 순위 등급 결정:

복원 우선순위 등급을 결정하기 위한 의사결정 절차는 Figure 3과 같다.

유류오염물질 요소의 평가등급을 복원순위등급 결정에 가장 우선하여 판단하였고, 다음으로 이동경로와 수용체 요소에 대한 위해등급을 판단하여 유류오염 군사기지에 대한 종합적인 위해등급을 결정하였다. 유류오염물질 요소는 위해유발의 주체이고, 동시에 복원조사와 실행시에 가장 먼저 제거해야 하는 대상이며, 이에 대한 평가분석자료 역시 가장 정량적인 자료이므로 기준데이터와 같이 이용하였다.

결정방법은 매트릭스기법을 이용하였다. Figure 4와 같이 유류오염물질의 평가등급에 따라서 세개의 매트릭스로 구분하였고, 각각 수용체와 이동경로의 평가등급을 가로와 세로축에 배열하여 세가지의 평가등급이 균형적으로 고려되도록 하였다. 총 27개의 칸에는 세가지 평가등급을 상호 결합하여 종합적인 복원순위를 나타내는 긴급, 보통, 유예를 위치시켰다. 이는 최대한 간편한 평가체제의 유지를 위하여 세가지의 등급으로 그룹화하여 평가한 것이다. 유류오염물질 요소가 위해1등급일 때는 이동경로나 수용체 요소 모두 2등급이상이면 복원 우선순위를 긴급으로 판단하였고, 유류오염요소가 위해2등급일 때는 이동경로 요소나 수용체 요소 중 하나라도 1등급이상이면 복원우선순위를 긴급으로 판단하였다. 유류오염요소가 위해3등급일 때는 이동경로 요소나 수용체 요소 모두 1등급이상일 때만 복원우선순위를 긴급으로 판단하였다.

긴급, 보통, 유예로서의 평가는 인간건강과 환경에 대한 직접적인 위해성을 나타내는 것이 아니라, 긴급으로 평가된 지역은 보통, 유예로 평가된 지역보다는 우선하여 복원 실행이 요구되는 지역임을 나타냈다. 또한, 유예로 평가된 지역은 복원을 하지

않아도 된다는 의미가 아니라, 긴급·보통으로 평가된 지역보다는 복원 실행에 있어서 시간적인 여유가 있는 지역임을 나타냈다. 즉, 이 모델의 평가는 유류로 오염되어 복원을 위한 정밀조사와 복원의 실행을 필요로 하는 군사기지를 대상으로 하기 때문에, 평가된 모든 지역은 자원이 배분되는 시점만을 달리할 뿐 필히 복원이 요구되는 하는 지역이다.

BRP 모델의 적용사례:

개발 모델의 시험적용을 위해서, 구 2정비창 지역을 선정하였다. 이 지역은 현재 폐쇄된 기지로서 부대창설 이후부터 전 군의 기동장비와 경장갑차량 정비지원 업무를 약 40년간 수행하던 부대이고, 약 93천m²에 이르는 지역⁸⁾이다. 기지 주변에는 인구밀도가 높은 주거지역이 형성되어 있고, 지역의 지질은 충적층이 발달⁹⁾하고 있으며, 특히 점토질 토양층이 오염의 확산을 방지하여 유류오염물질이 수직적으로는 더 이상 침투하지 못하고 점토질 토양층 위에 수평적으로 분포하고 있다. 채취한 시료에서 BTEX는 전혀 나타나지 않았고, TPH는 0~29.060mg/kg의 범위로 국지적인 오염형태가 나타났다. 결과적으로 먼저 유류오염물질 요소는 오염대책기준인 TPH농도 5000 mg/kg를 초과하고 있으므로 위해1등급에 해당하고, 수용체 요소도 인근 주거지역이 500m이내에 있으므로 위해1등급에 해당한다. 이동경로요소로 수용체에서의 누출은 판측된 바 없으며, 토양은 점토층이 분포하므로 위해3등급에 해당한다. 따라서, BRP model에 적용한 복원순위 등급은 '보통'으로 결정하였다. 이러한 결정에 가장 큰 영향을 미친 요소는 이동경로 요소로서, 유류오염물질의 수직적인 확산을 차단하고 있는 점토질 토양층의 분포가 반영되었다.

BRP model을 적용해 본 결과를 통하여 판단해 볼 때, 필요하다면 다음과 같은 추가적인 사항을 고려할 수 있다. 유류오염물질 요소에 대한 평가를 위하여 최고농도와 함께 평균농도 및 오염범위 등을, 수용체 요소에 대하여 인구밀도를 비롯하여 연령 및 성별 등을, 이동경로요소에서 지하수의 이동상태를 고려한 횡적인 확산 등을 고려할 수 있다. 또한, 추가적으로 기타 정치·사회적인 요소를 고려할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 토양 복원의 궁극적 목표인 인간과 환경에 대한 위해성 제거를 위해서 어느 지역을 먼저 복원할 것인지에 대한 해결책을 상대적 위해성 평가법을 이용한 BRP model로서 제시하였다.

본 연구의 제한사항은 간편한 예비평가 체계를

추구하는 방식으로 개발되어 좀더 세부적이고 전문적인 자료의 반영이 부족하다는 점이다. 이는 본 연구에서의 시도가 군에서는 처음 이루어지는 것이고, 민간에서도 매립지에 대한 위해성평가에 대한 일부 시도를 제외하면 거의 전무한 실정으로, 평가를 위한 기본자료의 획득이 근본적으로 어려웠다는 데에 기인한다.

그러나, 본 연구는 군사기지에서 가장 광범위한 오염요인인 유류오염의 복원에 관련된 작업절차의 효율성을 증대시키고, 유류를 제외한 기타 일반적인 오염물질과 관련된 복원과정, 그리고 군사기지 뿐만 아니라 인간과 환경의 위해성에 연관되는 광범위한 영역의 개인과 집단에 도움이 될 수 있을 것으로 사료되고, 더불어 위해성평가 체계의 정착이 이루어질 것으로 기대한다.

5. 참고문헌

- 1) 양임석, 안병성, 이경형, 군 환경관리체계 효율화 방안-군 환경관리자원 운영체계 중심-, 국방논집 여름 제42호, 19-46 (1998).
- 2) Schaefer, K. W. et. al., International Experience and Expertise in Registration, Investigation, Assessment, and clean-up of Contaminated Military Sites, Dames & Moore GmbH & Co, 201-284, 503-596 (1997).
- 3) DoD, Relative Risk Site Evaluation Primer, <http://www.dtic.mil/envirodod/relrisk/toc.html> (1999).
- 4) U.S. DoD, Defense Environmental Restoration Program, Annual Report to Congress for Fiscal Year 1994, 3-63 (1995).
- 5) U.S. EPA, Revised Hazard Ranking System : Final Rule (1990).
- 6) 홍상표·김정욱, 수자원 오염취약성을 고려한 매립지 유해성 평가모형, 서울대 환경계획학과 박사학위 논문 (1997).
- 7) 환경부, 토양환경보전법 관계규정집 (1999).
- 8) 국방부, 보고서-구 2정비창 토양오염 정화계획 보고 (1999).
- 9) 장태우, 양필중, 황상구, 이동우, 한국지질도: 부산·가덕 도폭(1: 50,000), 한국 동력자원 연구소, 1-20 (1999).

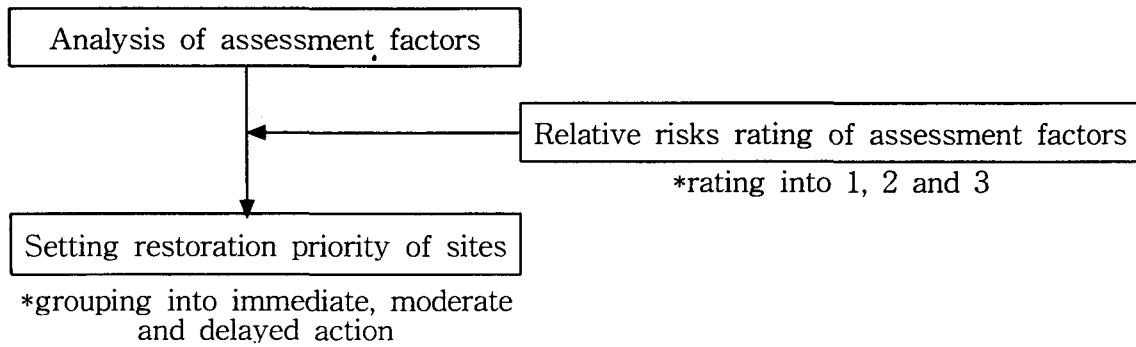


Figure 1. Assessment process of Base Restoration Priority Decision model.

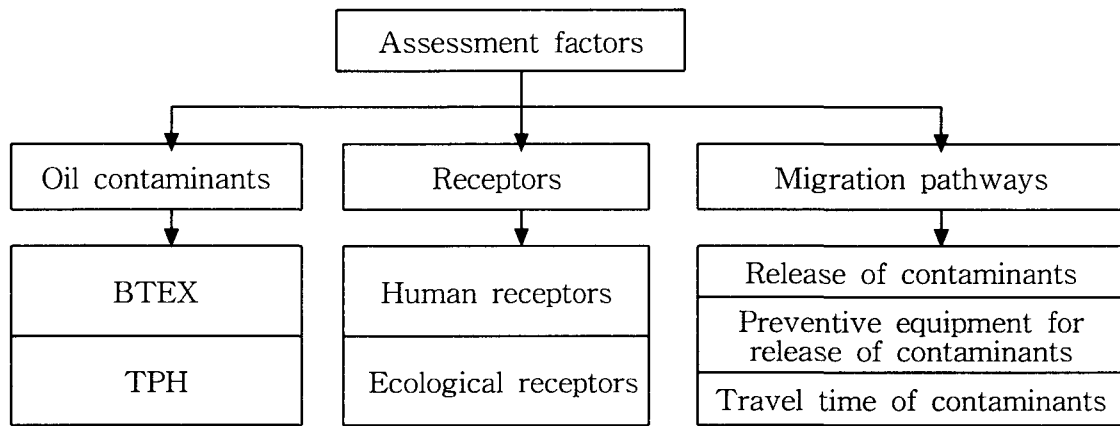


Figure 2. Subdivision elements of evaluation factors.

Table 1. Subdivision for evaluation of oil contaminants factor.

Subdivision elements	Reference of subdivision(mg/kg)	Subdivision No.
BTEX	Greater than 200	1
	80 ~ 200	2
	32 ~ 80	3
TPH	Greater than 5000	1
	2000 ~ 5000	2
	800 ~ 2000	3

Table 2. Relative risk rating oil contaminants factor.

Reference of rating	rating
Correspond to one or more kind on subdivision No. 1	1
Correspond to one or more kind on subdivision No. 2	2
Correspond to one or more kind on subdivision No. 3	3

Table 3. Subdivision for evaluation of receptors factor.

Subdivision elements		Reference of subdivision (nearing distance: km)	Subdivision No.
Ecological receptors	All kinds of Preservation areas	Under 1	1
		1 ~ 3	2
		3 ~ 10	3
Human receptors	Groundwater and surface water for drinking water	Under 0.5	1
		0.5 ~ 1	2
		1 ~ 3	3
	Residential areas	Under 0.5	1
		0.5 ~ 1	2
		1 ~ 3	3
	Agricultural and recreational areas	Under 0.5	2
		0.5 ~ 1	3
		Commercial and industrial areas	Under 0.5

Table 4. Relative risk rating of receptors factor.

Reference of rating	rating
Correspond to one or more kind on subdivision No. 1	1
Correspond to one or more kind on subdivision No. 2	2
Correspond to one or more kind on subdivision No. 3	3

Table 5. Subdivision for evaluation of migration pathways factor.

Subdivision elements	Reference of subdivision (mg/kg)	Subdivision No.	
Release of contaminants	Confirmed release from receptors	1	
Preventive equipment for release of contaminants	Bad of the legal equipment	2	
Travel time of contaminants	Soil quality	Sand	2-1
		Silt, Clay	2-2
	Kind of bedrocks	Sedimentary rocks	2-1
		Igneous, Metamorphic rocks	2-2

Table 6. Relative risk rating of migration pathways factor.

Reference of rating	rating
Correspond to subdivision No. 1	1
Correspond to both subdivision No. 2 and one or more kind on subdivision No. 2-1	2
Correspond to both subdivision No. 2 and all kinds on subdivision No. 2-2	3

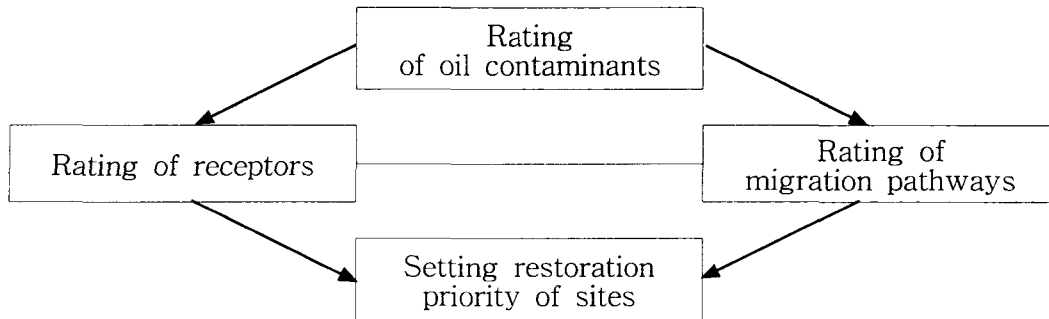


Figure 3. Procedure for setting restoration priority of contaminated sites

		Rating of oil contaminants : 1					Rating of oil contaminants : 2		
Rating of migration pathways	1	I	I	M	Rating of migration pathways	1	I	I	M
	2	I	I	M		2	I	M	D
	3	M	M	D		3	M	D	D
		1	2	3			1	2	3
		Rating of receptors					Rating of receptors		

		Rating of oil contaminants : 3		
Rating of migration pathways	1	I	M	D
	2	M	D	D
	3	D	D	D
		1	2	3
		Rating of receptors		

Figure 4. Guide for setting restoration priority of contaminated sites.
 I: immediate action, M: moderate action, D: delayed action.