

## 자연내재복원기술(Intrinsic Remediation)적용을 위한 오염지역 평가과정 개발

김병태\* · Robert M. Cowan\*\* · 오근찬\*\*\*

\* 대전대학교 환경공학과

\*\* *Dept. of Environmental Sciences, Rutgers, the State University of New Jersey*

\*\*\* *Bioremediation Reference Laboratory, UC Berkeley*

## **The Extended Site Assessment Procedure Based on Knowledge of Biodegradability to Evaluate the Applicability of Intrinsic Remediation**

Byung-Tae Kim\* · Robert M. Cowan\*\* · Keun-Chan Oh\*\*\*

\* *Dept. of Environmental Engineering, Daejin University*

\*\* *Dept. of Environmental Sciences, Rutgers, the State University of New Jersey*

\*\*\* *Bioremediation Reference Laboratory, UC Berkeley*

### **ABSTRACT**

The remediation of contaminated sites using currently available remediation technologies requires long term treatment and huge costs, and it is uncertain to achieve the remediation goal to drop contamination level to either back-ground or health-based standards by using such technologies. Intrinsic remediation technology is the remediation technology that relies on the mechanisms of natural attenuation for the containment and elimination of contaminants in subsurface environments. Initial costs for the intrinsic remediation may be higher than conventional treatment technologies because the most comprehensive site assessment for intrinsic remediation is required. Total remediation cost, however may be the lowest among the presently employed technologies. The applicability of intrinsic remediation in the contaminated sites should be thoroughly investigated to achieve the remedial goal of the technology.

This paper provides the frame of the extended site assessment procedure based on knowledge of

biodegradability to evaluate the applicability of intrinsic remediation.

This site assessment procedure is composed of 5 steps such as preliminary site screening, assessment of the current knowledge of biodegradability, selecting the appropriate approach, analyzing the contaminant fate and transport and planning the monitoring schedule. In the step 1, followings are to be decided 1) whether to go on the the detailed assessment or not based on the rules of thumb concerning the biodegradability of organic compounds, 2) which protocol document is selected to follow for detailed site assessment according to the site characteristics, contaminants and the relative distance between the contamination and potential receptors. In the step 2, the database for biodegradability are searched and evaluated. In the step 3, the appropriate biodegradability pathways for the contaminated site is selected. In the step 4, the fate and transport of the contaminants at the site are analyzed through modeling. In the step 5, the monitoring schedule is planned according to the result of the modeling.

Through this procedure, users may able to have the rational and systematic informations for the application of intrinsic remediation. Also the collected data and informations can be used as the basic to re-select the other remediation technology if it reaches a conclusion not to applicate intrinsic remediation technology at the site from the site assessment procedure.

Key word : intrinsic remediation, site assessment procedure, biodegradability

## 요 약 문

기존에 개발된 토양 및 지하수 복원기술에는 막대한 비용과 시간이 필요하며, 실시후의 효과에 대한 예측이 어렵다. 자연내재복원기술(*intrinsic remediation*)은 해당 지역환경에서 자연발생되는 물리·화학·생물학적 과정을 통하여 오염물질을 감소시키는 원리를 이용하며, 인간이나 지역생태계에 허용할 수 있는 수준으로 환경을 복원함을 목표로 한다. 따라서 오염토양 및 지하수복원에 적용가능한 여러 기술과 비교하여 자연내재복원기술은 지역평가를 위한 초기비용은 높으나 전체적으로는 가장 경제적인 방법이다. 따라서 유해효과가 심각하여 긴급한 처리가 필요한 지역을 제외하고는 현재의 오염수준, 오염분포상태, 토지와 지하수 이용현황과 장래 계획에 따라 자연내재복원기술을 도입할 필요성이 있다.

본 연구는 자연내재복원기술의 적용가능성을 판단하기 위하여 생물학적 분해도(*biodegradability*)에 기초한 오염지역 사전평가과정을 제시하였다. 본 연구의 오염지역 사전평가과정은 기존 연구에 비하여 대상오염물질종류가 많고 다양한 지역범위를 포함함으로써 자연내재복원기술을 실용화시킬 수가 있다.

오염지역 사전평가과정은 1)예비지역조사 2)생물학적 분해도 관련자료 수집 및 평가 3)오염지역내 분해경로 선정 4)오염물질 운반과 거동 분석 5)모니터링계획 수립의 5단계로 진행된다.

1단계에서는 개략적 생물학적 분해도(*rules of thumb concerning the biodegradability of organic com-*

pounds)에 기초한 상세조사의 계속진행여부와 오염지역자료를 이용하여 적절한 프로토콜을 결정한다. 2단계에서는 생물학적 분해도에 대한 광범위한 자료수집과 평가를 하며 3단계에서는 본 연구에서 제시한 경로중에서 오염지역에 맞는 경로를 선정한다. 4단계에서는 모델링을 위한 모델종류를 선정하여 예측하며 5단계는 자연내재복원기술의 적용여부를 판단하여 모니터링계획을 수립하는 단계이다.

본 연구의 오염지역 사전평가과정은 사용자에게 자연내재복원기술을 이용하기 위한 합리적이고 체계적인 판단과정을 제공하여 줄 것이다. 또한 사전평가 결과 오염지역이 자연내재복원기술적용이 불가능하다고 평가되어도 이미 수집된 자료와 정보는 다른 복원기술을 선정하기 위한 기초자료로서 사용가능하다.

**주제어** : 자연내재복원기술, 오염지역 평가과정, 생물학적 분해도

## 1. 서론

유해화학물로 오염된 지하수나 토양의 처리문제는 우리나라를 포함한 산업국가에서 심각하게 대두되고 있다. 이에 따라 각국은 각종 복원기술을 통하여 오염지를 원상태로 회복시키기 위한 각종 환경규제를 강화하고 있다. 많은 기업들이 오염토양 및 지하수의 복원을 시도하고 있으나, 현재 이용가능한 복원기술에는 막대한 경비가 소요되며, 일부 지역에서는 이러한 기술적용이 불가능한 곳도 있다. 각 오염지역은 수문지질학적 특성과 오염물질 종류등의 범위와 질적 수준이 다양하므로 적합한 복원기술을 선정하기 위하여는 오염지역에 대한 일련의 사전평가작업이 선행되어야 한다. 지금까지는 복원기술을 선정하기 위하여 오염지역에 대한 정확한 자료획득과 사전평가에 중점을 두기보다는 규제기준을 만족시킬 수 있는 처리기술을 위주로 하고 있으므로 설비부담이 필요이상으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 미국 California주의 지하유류저장탱크에서의 누출사고를 조사한 결과<sup>1)</sup>, 28,051건의 지하탱크누출사고중에서 136건만이 음용수원에 직접 영향을 미쳤고 나머지는 음용수원으로 사용

되지 않는 지하수를 오염시켰으며, 인간이나 환경에 미치는 위해도도 높지않다는 것을 발견하였다. 또한 자연내재복원기술(intrinsic remediation)적용시의 오염물질 농도감소확률은 50%이상에 달하나, 여기에 지상처리기술(pump-and-treat)을 추가하면 단지 20%정도만이 증가할 뿐이며, 환경목표치에 도달하는 기간은 두 기술이 동일하다고 발표하였다. 이에 따라 California주 당국은 위해도가 낮은 지역에 대하여 지상처리기술을 중단하고 모니터링계획을 수립할 것을 권고하고 있다.

Risk-Based Corrective Action(RBCA)을 도입하면 위해도가 낮은 지역에서 선정할 수 있는 복원기술의 종류가 다양해 질 수 있다. 실제로 미국내 20개주이상에서 RBCA에 기초한 복원기준치를 현재 사용하고 있다<sup>1)</sup>.

자연내재복원기술(intrinsic remediation)은 해당 지역환경에서 자연발생되는 물리·화학·생물학적 공정을 통하여 오염물질을 감소시키는 원리를 이용하며, 인간이나 지역생태계에 허용될 수 있는 수준으로 환경을 복원함을 목표로 한다. 따라서 오염토양 및 지하수복원에 적용가능한 여러 기술과 비교하여 자연내재복원기술은 지역

평가를 위한 초기비용은 높으나 전체적으로는 가장 경제적인 방법이다.

사용자에게는 생물학적 분해가 진행되고 있음을 실제측정자료로써 설명하고 앞으로 어떻게 진행될 것인가와 이의 효과를 충분히 확인시켜 줄 수 있어야 한다. 이를 위하여 시료채취 및 분석, 자료수집 및 정보획득, 수집된 자료의 통합 및 해석, 수학적 모델의 선정 및 평가, 모니터링 설계방법등에 대하여 상세히 기술된 프로토콜이 개발되어야 한다. 국내에서는 아직 연구가 활발하지 않으나 미국에서는 자연내재복원기술 프로토콜에 관한 문헌이 연속적으로 발간되고 있다. 그러나 이러한 프로토콜은 주로 생물학적 분해가 용이한 BTEX를 대상으로 하며 특정 지질조건에서만 적용될 수 있는 한계를 가지고 있다. BTEX 이외의 다른 오염물질까지 포함하면서도 다양한 지질조건에 적용할 수 있어야 자연내재복원기술의 실용화를 높일 수 있다. 이러한 연구의 일환으로 본 연구에서는 해당지역에 자연내재복원기술의 적용가능성을 판단코자 할 경우에 이용할 수 있는 생물학적 분해도(biodegradability)에 기초한 오염지역 평가과정을 작성코자 하였다.

## 2. 자연내재복원기술(intrinsic remediation)의 정의

지하저장탱크나 부주의에 의하여 누출 또는 침출된 유해화학물질은 토양층을 통과하여 지하수에 도달하는 과정에서 토양에 흡착되고 지하수와 혼합되어 짐으로써 토양과 지하수를 동시에 오염시킨다. 따라서 오염된 토양이나 지하수만 단독으로 처리할 수는 없으며 항상 토양과 지하수를 동시에 처리하여야만 한다. 그러나 토양입자에 흡착되어 있거나 공극사이에 있는 오염물질을 분리하기는 어려우며 지하수내의 오염물질은 잘 이동하지 않는다. 따라서 오염된 토양이나

지하수를 지상으로 옮기거나 현장의 환경조건을 개선시키기 위한 기존의 처리방법으로 넓은 지역을 처리하기에는 막대한 비용과 시간이 필요하다. 그러므로 유해효과가 심각하여 긴급한 처리가 필요한 지역을 제외하고는 현재의 오염수준, 오염분포상태, 토지와 지하수 이용현황과 장래 계획에 따라 자연정화작용을 이용한 처리방법 도입을 고려할 필요성이 있다. 즉 인체 및 생태계에 허용가능한 정도도의 복원으로도 충분한 지역이라면 비용경제적 측면에서 굴착, 관정, 장비설치, 처리 및 관리, 미생물 증식등에 소요되는 막대한 비용을 절감할 수 있는 자연내재복원기술이 우선적으로 고려되어야 할 것이다. 최근에 공학적 장치의 설치없이 자연적으로 발생하는 물리·화학·생물학적 과정을 이용함으로써 효율적 비용으로 오염된 지하수나 토양을 복원하면서도, 수용지점(receptor)에서의 건강유해성을 방지코자하는 연구가 증가하고 있다<sup>2)</sup>. 그러나 이에 사용되는 기술용어가 natural attenuation, intrinsic bioremediation, intrinsic remediation, remediation by natural attenuation등으로 혼용되어 불리어지고 있어 정확한 기술개념을 이해하는데 혼란을 주고 있다. 따라서 향후 연구에 도움을 주고 본 연구에 적합하게 사용할 수 있도록 관련 용어를 정의하면 다음과 같다.

### 2.1 자연감쇄(Natural Attenuation)

자연감쇄(natural attenuation)는 유하방향에서의 오염물질 이동률을 변화시키거나 오염물질을 감소시키는 모든 자연적 발생과정을 일컫는 포괄적 용어이다. 여기에는 지체(retardation), 휘발(volatilization), 이류(advection), 확산(dispersion), 희석(dilution), 생물학적 분해(biodegradation), 화학반응(chemical reaction)등의 모든 물리·화학·생물학적 과정이 포함된다. 이러한 각

과정은 오염물질을 저감 또는 변화시켜 수용지점에서의 유해성을 낮추어주는 원상복원요인으로 작용한다. 즉 자연감쇄(natural attenuation)는 자연에서 일어나고 있는 현상을 표현한 것으로 이 용어 자체가 원상복원기술을 의미하지는 않는다.

## 2.2 생물학적 자연내재복원기술(Intrinsic Bioremediation)

토양과 지하수에 오염물질이 유입된 경우에, 이들 물질을 기존의 또는 특수한 미생물로 분해하여 개선, 복구하는 것을 포괄적 의미로 '생물학적 복원(bioremediation)'이라 한다. 미생물의 분해능력을 이용하는 생물학적 복원방법은 물리·화학적 처리 방법에 비하여 2차오염의 우려가 없고 광역적으로 적용될 수 있는 장점이 있다. 포괄적 생물학적 복원방법중에서 대상토양에서 서식하고 있는 기존미생물의 분해능력을 이용하는 경우에 이를 '생물학적 자연내재복원기술(intrinsic bioremediation)'이라 한다. 기존의 미생물은 외부에서 증식되어 공급되는 미생물보다 환경적응능력이 강하여 경쟁에서 우위를 지킬 수 있고, 대부분의 토양에는 필요한 미생물이 혼재하고 있으므로 미생물이 현저하게 부족한 지역을 제외하고는 생물학적 자연내재복원기술에 의한 분해효과를 기대할 수 있다. 그러나 생물학적 처리가 자연내재복원기술의 가장 중요하고 핵심적인 과정이라 할지라도 이 용어에는 물리·화학적 과정이 결여되어 있다. 지하환경에서는 물리·화학·생물학적 분해가 동시에 일어나고, 물리·화학·생물적 조건의 상호관계에 따라 오염물질 저감효과가 다르게 나타난다. 따라서 생물학적 내재복원기술만의 단독적용은 한계를 가지며, 그 결과의 해석에도 오류를 범할 가능성이 높다고 하겠다.

## 2.3 자연내재복원기술(Intrinsic Remediation) 또는 자연감쇄복원기술(Remediation by natural attenuation)

'자연내재복원기술(intrinsic remediation)' 또는 '자연감쇄복원기술(remediation by natural attenuation)'이란 오염된 지하수나 토양을 자연감쇄공정으로 복원하기 위한 관리방법으로, 자연감쇄메커니즘을 충분히 이해하여 허용수준에 도달하기 위한 복원기술이다. 이러한 개념에는 1) 현장에서 자연적 생물학적 분해가 발생한다는 명확한 증거가 있어야 하며 2) 예측정확성을 규명할 수 있는 장기모니터링이 필요하며 3) 가능하다면 오염원제거도 요구된다.

그러나 자연내재복원기술이 기계설비를 장치하지 않는다고 '아무 것도 하지않는 접근방식'(do nothing approach)은 아니다. 자연내재복원기술을 적용하기 위하여는 수리학, 지질화학, 미생물분야 등에 대한 전문적 지식, 충분히 조사된 자료와 정보이용, 오염물질거동 이해, 오염물질 확산예측과 장기간의 모니터링이 필요하다. 따라서 자연내재복원기술을 실행하기 위해서는 오염지역에 대한 정확한 평가가 선행조건으로, 관련분야의 전문인력, 광범위한 자료수집, 정교한 측정기술, 새로운 분석 및 평가방법, 적절한 모델링을 통합하여야만하는 첨단복원기술이라고 할 수 있다.

이러한 자연내재복원기술은 다른 공학적 기술에 비하여 저비용이며, 작업인부예의 유해물질 노출위험성감소 및 관입의 필요성이 없으며 기계장치의 유지관리가 필요없다는 장점이 있다. 그러나 목표기준을 달성하기위하여 장기간이 소요되므로 인간이나 생태계에의 유해성이 현저하게 발견될 정도로 긴급히 원상복원이 요구되는 지역에는 적용할 수 없으며, 토지이용이나 지역수문요소 변화에 영향을 받을 수 있다는 단점이

있다.

자연내재복원기술은 모든 자연감쇄현상을 내포하고 현장적용가능성이 높은 복원기술로서, 본 연구는 이 기술을 대상으로 하고 있다.

### 3. 자연내재복원기술의 프로토콜

자연내재복원기술의 오염지 원상복원을 위한 기술적 잠재성이 크게 인식됨으로 인하여 이와 관련한 프로토콜 개발연구가 활발하다. 본 연구에서 분석코자 하는 프로토콜 관련 연구로는 1) U.S. Air Force Center for Environmental Excellence(AFCEE)에서 발간한 'Technical protocol for implementing intrinsic remediation with long-term monitoring for natural attenuation of fuel contamination dissolved in groundwater'<sup>3)</sup> 2) American Society of Testing and Materials(ASTM)에서 발간한 'Guide for remediation by natural attenuation at petroleum release sites'<sup>4)</sup> 3) American Petroleum Institute(API)에 제출된 'Natural attenuation toolbox'와 software package<sup>5)</sup> 4) 염소계 지방족탄화수소(PCE, TCE, DCE, TCA, DCA 등)로 오염된 지역에서의 지침서<sup>6,7)</sup>를 이용하였다.

이들 프로토콜 관련연구중 일부는 아직 발표되지 않았으나 마지막 연구를 제외하고는 용존성 염료계 탄화수소(dissolved phase fuel hydrocarbons, 즉 benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes, BTEX)의 거동을 주 대상으로 하고 있다. 이는 이들 화학물에 대한 생물학적 분해연구가 상당히 규명되어 지하환경에서 이들 물질의 생물학적 분해가 양호하게 이루어질 수 있음이 이미 입증되어 있기 때문이다. 그러나 BTEX 이외의 다른 오염물질에 대한 관심이 증대되고 있는 여건에서 자연내재복원기술적용은 한계를 가지게 된다. 따라서 기존의 연구 결과를 포함하여

광범위한 오염물질에 대하여 적용시킬 수 있는 오염지역 평가과정개발이 필요하다. 자연내재복원기술을 적용하기 위하여는 오염물질의 생물학적 분해성에 관한 정보는 필수적이다. 이는 모든 유기화합물이 동일한 메카니즘으로 분해되는 것은 아니기 때문이다.

예로써 비광합성미생물(non-photosynthetic microorganism)은 전자공여체(electron donor)의 산화과정에서 발생하는 에너지를 이용한다. 전자공여체는 기질이라고 불리며 에너지원으로 작용한다. 유기기질이 호기성조건하에서 종속세균(heterotrophic bacteria)에 의하여 분해될 경우, 전자공여체는 유기화합물이며 전자수용체는 산소이다. 종속세균이 혐기성조건에서 성장시에는, 다른 산화물질( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$ , Fe나 Mg의 산화금속)들이 환원되면서 전자수용체의 역할을 한다. 고도로 환원된 상태에서 BTEX는 전자수용체의 존재유무에 관계없이 항상 전자공여체로 작용한다. 즉 BTEX는 어떠한 전자수용체조건에서도 분해되어지며 이러한 반응을 수행하는 미생물은 지하환경의 어느 지점에서나 존재하고 있다(질산염환원조건에서 benzene의 생물학적 분해에 대한 명확한 증거는 없으며 현재 연구중). 이와는 대조적으로, PCE나 TCE 같은 고염소화 화합물은 염소가 탄소보다 electronegative 하므로 탄소는 항상 산화되어진다. 따라서 이러한 화합물들은 전자공여체의 역할을 하지 못하고, 전자수용체의 역할을 하게된다. 즉 전자수용체역할은  $\text{O}_2 > \text{NO}_3 > \text{Fe(III)} > \text{SO}_4 > \text{CO}_2$ 의 순이며, TCE와 PCE는  $\text{SO}_4$ 와  $\text{CO}_2$  사이의 범위에 해당되어 전자공여체보다는 전자수용체로서의 역할을 하게되므로 이러한 화합물은 쉽게 분해되지 못한다. 또한 이들 물질은 난분해성일 뿐만 아니라 독성을 띄고 있어서 co-metabolism이라는 특수한 메카니즘을 통해서 분해한다. co-metabolism은 미생물이 쉽게 분해되는 성장기질(growth

substrate)을 이용하여 자라면서 동시에 생분해가 어려운 비성장기질(nongrowth substrate)을 생분해 가능한 다른물질로 변형시키는 반응이다. 예로서 methanotroph 세균군은 기질인 메탄이 존재하고 구리이온의 농도가 25 $\mu$ M이하인 환경에서 methane monooxygenase(MMO)의 역할에 의해 TCE를 분해하게 된다<sup>8,9)</sup>. 또한 많은 종류의 혐기성세균이 다양한 종류의 염소화합물에 작용하여 탈염소시키는 능력이 알려지고 있다 (Table 1. 참조). 따라서 고염소화 화합물은 완전한 환원조건이나 특별한 호기성조건하에서 분해 가능하다.

이러한 염소계 지방족화합물의 분해제한요인으로 인하여 오염지역내 전자수용체여부, 토착미생물에 의한 필요반응의 발생여부를 확인할 수 있는 세밀한 조사가 추가되어야만 한다. 즉 자연내재복원기술의 적용범위를 기존의 BTEX에서 염소계 지방족 화합물과 다른 화합물까지로 확대하기 위하여는 전자수용체와 분해미생물분포에 기반을 둔 생물학적 분해성 패턴이 조사되어야만 한다. 이러한 패턴을 통하여 오염지역에 대한 자연내재복원기술의 적용잠재성 및 적절한

적용경로를 파악할 수 있을 것이다.

#### 4. 생물학적 분해도에 기초한 오염지역의 평가과정

물리·화학적 복원 또는 bioaugmentation이나 biostimulation과 같은 생물학적 복원처리는 적절한 기계장치선정과 공정적용에 중점을 두는 반면에, 자연내재복원기술은 오염지역과 관련된 종합정보의 확보여부가 중요하다. 또한 오염지역에 대한 사전평가과정을 통하여 오염물질이 수용지점에 도달하기전에 인간 및 환경에 허용될 수 있는 수준으로 감소될 수 있음이 확인되어야만 한다. 사전평가과정에는 토양특성, 지하수특성, 오염물질 종류 및 생물학적 분해도 자료가 필요하며 이를 이용하여 대상지역 토양 및 지하수조건에서의 분해정도, 오염물질의 수직·수평확산정도, 수용지점까지의 도달시간, 농도와 방향, 모니터링위치, 기간 등에 대한 결과가 제시될 수 있어야 한다.

Table 1. Anaerobic Degradation of Xenobiotics

Anaerobic metabolism	Xenobiotics used as electron donor
Denitrification	phenol, cresol, hydroxybenzoate, benzoate, toluene, phthalate, resorcinol, polychlorobenzoate, PCBs
Metal reduction	phenol, cresol, benzoate, hydroxybenzoate, toluene, phthalate
Sulfidogenesis	phenol, benzoate, hydroxybenzoate, indol, toluene, xylene, chlorophenols, trinitrotoluene(TNT), aminobenzoate
Methanogenesis	benzene, toluene, xylene, benzoate, polychloroethenes, chlorophenols, chlorobenzenes, dichloromethane, vanilate, phenylpropionate
Homoacetogenesis	ethylene glycol, phenylmethyl ether, dichloromethane
Fermentation	polyphenols, polyethylene glycol, hydroxybenzoate

source : 김병홍, 생물학적처리기술(bioremediation), 환경복원 및 재생기술 workshop, 한국과학기술원, p.95(1995).

#### 4.1 오염지역평가를 위한 항목분류

오염지역평가를 위하여 고려해야 할 항목으로는 해당오염지역의 1) 오염물질종류, 2) 지질구조, 3) 오염원과 수용지점과의 거리등이 있으며, 이를 본 연구목적에 맞게 정리하면 다음과 같다.

##### 4.1.1 오염물질

본 연구에서는 오염지역 평가과정에 적용가능한 오염물질을 다음과 같이 나누었다.

##### 1) Fuel hydrocarbon contamination

오염지가 benzene, toluene, ethylbenze과 xylenes(BTEX)와 같은 연료계 탄화수소로 오염되어 이들 화학물질제거가 필요한 지역에 해당된다.

##### 2) Chlorinated solvent contamination

오염지가 tetrachloroethylene(PCE), trichloroethylene(TCE), dichloroethylene(DCE), vinyl chloride(VC), carbon tetrachloride(CT), trichloroethane(TCA) 등의 염소계 용제로 오염되어 이들 물질의 제거가 필요한 지역에 해당된다.

##### 3) Organic compound contamination

오염지가 BTEX, 염소계 용제 또는 PCBs, PAHs와 기타 유기화합물로 오염된 지역에 해당된다.

##### 4.1.2 지질 구조

오염지역의 수문지질학적 특성을 지질구조에 따라 정리하면 다음과 같다.

- 1) Sandy soil aquifer which is fairly homogeneous
- 2) Unconsolidated media aquifer with minor heterogeneity

3) Unconsolidated media aquifer with moderate heterogeneity

4) Unconsolidated media aquifer with major amounts of heterogeneity

5) Highly weathered fractured media aquifers

6) Fractured bedrock

7) Karst

##### 4.1.3 오염원과 수용지점과의 거리

오염원과 수용지점과의 거리는 지하수 이동속도와 오염물질 운반속도와의 상대적비율을 고려하여 다음과 같이 나눌 수 있다.

1) Contamination is far from any potential receptor

2) Contamination is near a potential receptor

3) Contamination has impacted a receptor

#### 4.2 생물학적 분해도의 분류

생물학적 분해정도에 따라 오염물질을 분해양호(highly biodegradable), 분해용이(readily biodegradable), 난분해(inherently biodegradable)와 비분해(nonbiodegradable)로 나눌 수 있다.

##### 4.2.1 분해양호(Highly Biodegradable)

##### 1) 호기성 조건

호기성조건하에서, 오염물질이 유사토양배지(acclimated culture)에서 1-2일 이내에, 비유사토양배지(unacclimated culture)에서 5-7일 이내에 70-100%가 분해되면 분해양호하다고 할 수 있다. 또한 오염물질을 분해하는 미생물이 오염지역이나 주변토양에서 모두 쉽게 분리된다면 이들 미생물은 편재하다고 할 수 있다.

이러한 범주의 오염물질로 toluene, benzene,



phenol등이 해당된다. 또한 자체의 탄소와 에너지 지원만으로도 특별한 화합물을 분해할 수 있는 많은 수의 미생물이 분리된다면 이들 화합물은 오염지역에서 분해양호하다고 여겨진다.

## 2) Anoxic(Nitrate Reducing) conditions

질산염 환원조건하에서, 오염물질이 유사토양배지에서 3-5일 이내에, 비유사토양배지에서 1-2주 이내에 70-100%가 분해되면 분해양호하다고 할 수 있다.

## 3) 혐기성조건(iron reducing, sulfate reducing, and methanogenic)

혐기성 조건하에서, 오염물질이 유사토양배지에서 2-3주 이내에, 비유사토양배지에서 3-5개월 이내에 70-100%가 분해되면 분해양호하다고 할 수 있다.

### 4.2.2 분해용이(Readily Biodegradable)

#### 1) 호기성조건

호기성조건하에서 1달 이내에 70%정도가 분해된다면 분해용이하다고 할 수 있다. 이들을 분해하는 미생물은 다소 제한적으로 편재되어있다.

이러한 화합물로는 chlorobenzene같은 염소계 방향족탄화수소나 nitrobenzene과 nitrophenol과 같은 nitroaromatic hydrocarbons등이 해당된다.

#### 2) Anoxic(Nitrate Reducing) conditions

질산염 환원조건하에서, 오염물질이 유사토양배지에서 3-5일 이내에, 비유사토양배지에서 2-3주 이내에 70%정도가 분해되면 분해용이하다고 할 수 있다.

#### 3) 혐기성조건(iron reducing, sulfate reducing, and methanogenic)

혐기성 조건하에서, 오염물질이 유사토양배지에서 2-3주 이내에, 비유사토양배지에서 1년 이내에 50%정도가 분해되면 분해용이하다고 할 수 있다.

TCE나 PCBs는 호기성조건하에서는 난분해(inherently biodegradable)가 일어나지만, 혐기성 조건하에서는 분해용이하다.

### 4.2.3 난분해(Inherently biodegradable)

이 범주에 속하는 화합물들은 위의 두범주에 비하여 매우 분해가 느리거나 특별한 환경조건하에서만 분해가 일어난다. 예로써, DDT와 TNT는 완전한 유사토양배지에서만 분해가 일어나며 장기간이 소요된다. TCE와 PCBs는 호기성조건하에서 각각 toluene, methane, biphenyl과 같은 co-substrate가 존재하는 경우에만 분해된다.

혐기성조건하에서 난분해(inherently biodegradable)와 비분해(nonbiodegradable)를 구별하기는 어려우나, 특정의 전자수용체가 존재하는 조건하에서 분해된다면 난분해가 일어난다고 할 수 있다. 예로써, benzene은 질산염 환원조건을 제외한 모든 전자수용체조건하에서 분해된다. 그러나 다른 전자수용체보다 질산염이 풍부한 조건에서는 난분해된다고 할 수 있다.

### 4.2.4 비분해(Nonbiodegradable)

어느 조건에서도 분해되지 않는 물질로서 자연내재복원기술의 적용범위에서 제외된다.

## 4.3 오염지역 사전평가과정

현재까지 밝혀진 생물학적 분해가능성과 지역 자료를 이용하여 자연내재복원기술적용을 위한 오염지역 평가과정을 Fig. 1.과 같이 flow chart로 작성하였다.

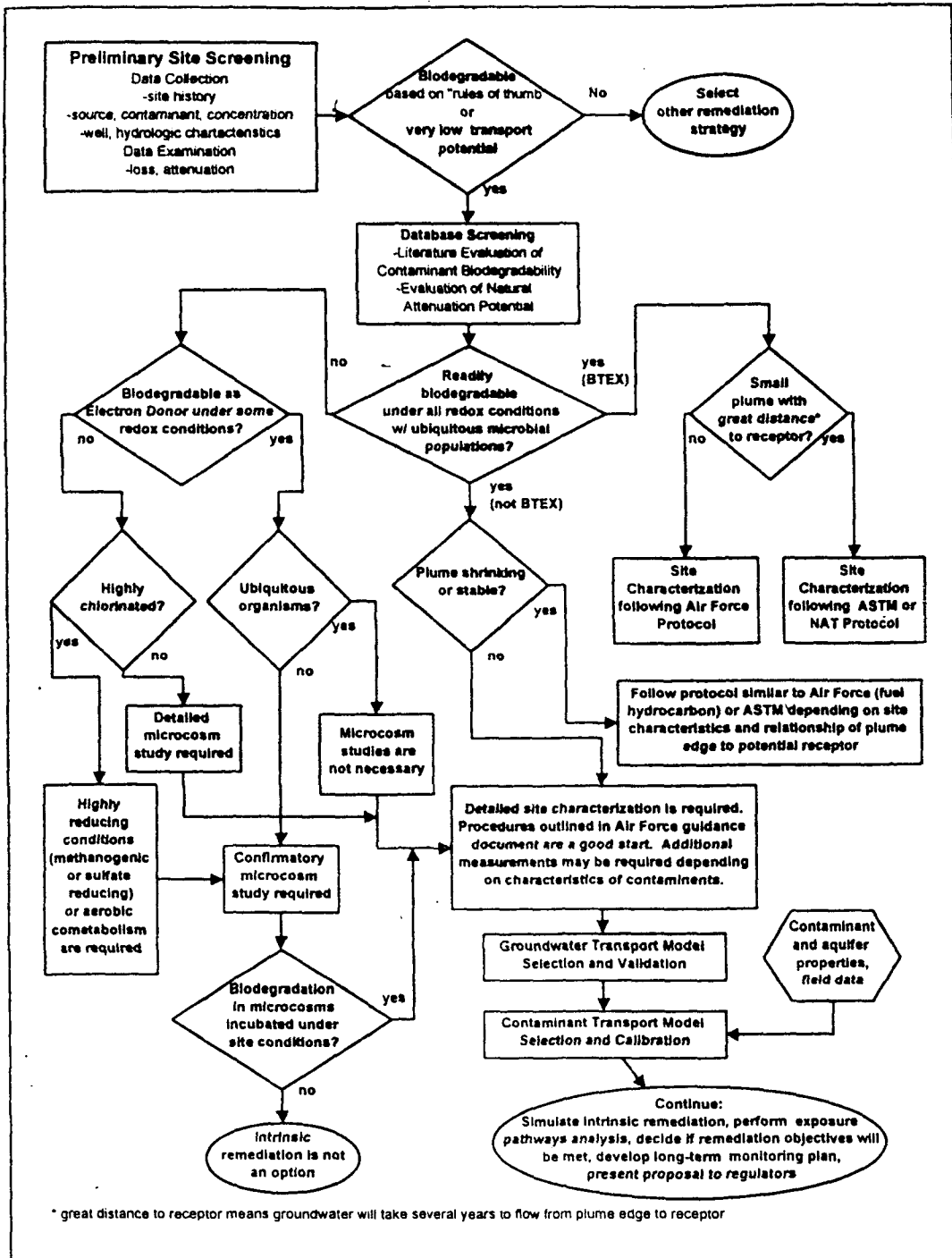


Fig. 1. Flow chart of the extended site assessment procedure based on knowledge of contaminant biodegradability for intrinsic remediation.

본 연구의 평가과정에 대한 응용성을 높이기 위하여 BTEX를 중심으로하여 개발된 프로토콜도 Fig. 1.에 포함을 시켰다. AFCEE 프로토콜은 대규모 오염물질 누출지역을 대상으로 자연감쇄와 생물학적 자연내재복원기술을 상세하게 다루고 있는 반면에, 다른 연구진의 프로토콜은 소규모 누출지역을 대상으로 다소 개략적인 접근방법을 취하고 있다. 이러한 개략적 접근방식은 비용이 적게 들며, BTEX만으로 오염되고 오염원과 수용지점과의 거리가 먼 경우에 적용가능하나 불확실성이 높아질 우려가 있다.

Fig. 1.의 오염지역 사전평가과정은 1)예비지역조사 2)생물학적 분해도 관련자료 수집 및 평가 3)오염지역내 분해경로 선정 4)오염물질 운반과 거동 분석 5)모니터링계획 수립의 5단계로 진행된다.

1단계 : 예비지역조사

오염지역에 대한 이용가능한 자료를 수집하여 검토하고, 오염지역에 적합한 개념적 모델을 산정한다. 이 단계에서는 기초적 자료를 이용하여 첫째로 자연내재복원기술적용을 위한 상세한 조사를 계속할 것인지의 여부를 결정하게 된다. 이

를 위하여 Table 2.를 이용한 개략적인 방법(rules of thumb)으로 생물학적 분해도를 판단할 수 있다.

둘째로 Table 2.에 의하여 자연내재복원기술의 적용가능성이 있다면 오염물질종류, 수문지질학적 특성, 오염원과 수용지점과의 거리를 고려하여 어떠한 프로토콜을 사용하여야 할지를 결정하게 된다(Table 3. 참조). 연료계 탄화수소로 오염된 지역범위가 넓고 지질구조가 복잡하고 수용지점과의 거리가 가깝다면 AFCEE 프로토콜이 적절하며, 연료계 탄화수소로 오염된 지역범위가 좁고 지형구조가 간단하고 수용지점과의 거리가 멀다면(지하수 도달시간이 3년이상인 경우) ASTM method를, 염소계 지방족화합물로 오염된 지역은 AFCEE CI 프로토콜을 따르는 것이 적절하다. 그러나 BTEX와 염소계 지방족탄화수소이외의 다른 유기화합물이 검출되거나 풍화된 지질에서는 본 연구의 다음 과정을 따라 진행하면 된다. 필요하다면 추가자료(특히 전자수용체에 관한 자료)를 수집하고 지하환경조건을 평가하기 위하여 이용가능한 screening tools를 사용할 수 있다.

Table 2. "Rules of Thumb" Concerning the Biodegradability of Organic Compounds

1) Aliphatic Hydrocarbons

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Aliphatic Hydrocarbons (alkanes, alkenes, alkynes)	Degradable as sole C & e source	Aerobic( $\beta$ -oxidation, or $\omega$ -oxidation, or possibly subterminal oxidation via methane monooxygenase)
	Degradable in laboratory studies	Sulfate-reducing conditions-this is an active area of research- no field evidence as yet
Rules of thumb for aliphatics : (Noncyclic) aliphatics are easier to degrade than alicyclics or than aromatics. Branching slows degradation - the more branching, the slower the degradation. Double or triple bonds between carbons are harder to degrade than single bonds, making unsaturated hydrocarbons harder to degrade than saturated. The aliphatic hydrocarbons that degrade the fastest have chains of about 10 to 20 carbons: Shorter chains tend to be toxic to most microbes, and longer ones take longer to degrade. Once the molecular weight is over 500, the compound is not used as a carbon source.		

## 2) Alicyclic Hydrocarbons

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Alicyclic Hydrocarbons (cycloalkanes, cycloalkenes cycloalkynes)	Degradable as sole C & e <sup>-</sup> source, but more frequently degraded by two cooperating strains with another substrate present (commensalism and cometabolism)	Aerobic
		Anaerobic
<p>Rules of thumb for alicyclics :</p> <p>Alicyclics are harder to degrade than (noncyclic) aliphatics: they are often unable to serve as sole carbon source for growth unless they have an aliphatic side chain that is long enough. Sometimes they can be degraded by cometabolism using one microbial species plus the cooperation of two or more microbial strains in the later degradation steps.</p> <p>Saturated rings (e.g., cyclohexane and decalin) are more resistant to degradation than the aromatic compounds analogous to them.</p>		

## 3) Aromatic Hydrocarbons

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Aromatic Hydrocarbons (unsubstituted or with substituents consisting only of combinations of O, H, and C)	Degradable	Aerobic(ortho or meta-cleavage)
	Degradable	Denitrifying
	Degradable	Anaerobic/Fe(III) reducing
	Transformable	Anaerobic/manganese reducing
	Degradable	Anaerobic/sulfate reducing
	Degradable	Anaerobic/methanogenic
<p>Rules of thumb for aromatics :</p> <p>Aromatics are biodegradable under both aerobic and anaerobic condition.</p> <p>Aromatics are harder to degrade than aliphatics under aerobic conditions, but it may be easier to degrade aromatics than aliphatics under anaerobic conditions.</p> <p>Side chain substitutions usually aid in degradation potential.</p>		

4) Polycyclic aromatic hydrocarbons or polynuclear aromatics(PAHs or PNAs)

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
PAHs or PNAs	Some are degradable, but many are degraded with difficulty or not at all - lower-weight aromatics must be present to induce enzyme production.	Aerobic (5 rings or less, via bacteria or eukaryotes. Degradation via eukaryotes, e.g., white rot fungus, is generally not complete oxidation. The contaminant is not completely mineralized but is transformed into an intermediate compound. Degradation of compounds with 3 rings or less is relatively quick. However, degradation with 4-5 rings is very slow and often does not lead to complete mineralization.
	Possibly degradable or transformable - there are few studies and no consensus among researchers yet.	Anaerobic/denitrifying (at least for naphthalene and naphthol).
	Possibly degradable - there are few studies and no consensus among researchers yet.	Anaerobic/sulfate-reducing (per studies done on naphthol) - one study found some complete mineralization of naphthalene.
	Possibly degradable - there are few studies and no consensus among researchers yet.	Anaerobic/methanogenic (per studies done on naphthol) : however, another study on naphthalene showed in persistence in methanogenic conditions.
	Transformable	Anaerobic/manganese-reducing (naphthalene)
	Persistent	Anaerobic/iron-reducing(naphthalene)
<p>Rules of thumb for PAHs :</p> <p>The more rings, the harder the compounds is to degrade.</p> <p>Solubility is very important here - unless the compound is bioavailable, microbes cannot degrade it. The more hydrophobicity of the compounds, the less transportability in the soil and groundwater.</p>		

5) Halogenated aliphatic hydrocarbons( e.g., CT, TCE, PCE, Freon 11, Freon 113)

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Halogenated aliphatic hydrocarbon	Degradable with another C source present (cometabolism)	Aerobic (via methanotrophs & other oxygenases-based pathways; e.g., toluene oxidizers, phenol, ammonia)
	Degradable as e <sup>-</sup> sink, with another C source present (cometabolism), but not all are mineralized completely - may be toxic intermediates	Anaerobic via reductive dehalogenation (in denitrifying, sulfate-reducing, or methanogenic conditions)
<p>Rules of thumb for halogenated aliphatics :</p> <p>The more halogen substituents, the more difficult the compound is to degrade aerobically.</p> <p>However, the more highly substituted halogenated hydrocarbons are more likely to undergo reductive dehalogenation under anaerobic conditions than are monosubstituted hydrocarbons.</p> <p>Saturation also encourages reductive dehalogenation (i.e., if there are no double or triple bonded carbons, the compound will more quickly undergo reductive dehalogenation)</p>		

## 6) Halogenated aromatic compounds

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Halogenated aromatic compounds	Degradable as sole C & e <sup>-</sup> source	Aerobic
	Degradability depends on type of halogen substitution, and number and position of substituents	Anaerobic via reductive aryl dehalogenation (sulfate-reducing environment for some chlorophenols, although sulfate can inhibit dechlorination; methanogenic environment also possible)
<p>Rules of thumb for halogenated aromatics :</p> <p>The more halogen substituents, the more difficult the compound is to degrade aerobically.</p> <p>Because their bond strength is lower, bromine or iodine substituents are more easily removed than chlorine, and chlorine is more easily removed than fluorine.</p>		

## 7) Heterocyclic Compounds containing N or S in ring

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Heterocyclic Compounds containing N or S in ring	Degradable	Aerobic(for some)
	Degradable	Anaerobic(via initial oxidation of ring)
<p>Rules of thumb for Heterocyclic Compounds containing N or S in ring :</p> <p>Heterocyclic compounds usually present with polycyclic aromatic hydrocarbons that they are degraded by heterocyclic compounds degrading organisms and/or polycyclic aromatic compounds degrading organisms by cometabolisms. They may be more readily biodegradable due to their greater aqueous solubilities than PAHs. Degradation of heterocyclic compounds are found in all primary, secondary, and tertiary heterocycles</p>		

## 8) Nitroaromatics(Aromatics with nitro-substituent)

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Nitroaromatics(Aromatics with nitro-substituent)	Degradable, but difficult	Aerobic (TNT can be mineralized aerobically)
	Degradable, but difficult - degradation to mineralization is unlikely	Anaerobic (TNT tends to transform to intermediate products (e.g, toluene) rather than mineralizing completely)
<p>Rules of thumb for nitroaromatics :</p> <p>Biodegradation of nitroaromatic compounds in environments are limited not because of their inherent biodegradability but because of their low aqueous solubility. More substitution with nitro group to the aromatic compounds make degradation of the compounds more difficult. As the level of substitution to the ring increase, they are more susceptible to the reductive degradation pathways. Degradability of the compounds decrease as the number of the aromatic ring increase.</p>		

9) Polychlorinated biphenyls(PCBs)

Category of Compound	Degradable or Not?	Conditions Under Which Degradable
Polychlorinated biphenyls (PCBs) (Note that PCBs consist of a mixture of congeners with a set average number of chlorine substitutions.)	Degradable if low number of chlorine substitutions in the presence of other C source (cometabolism)	Aerobic
	Reductively dechlorinated if high number of chlorine substitutions	Anaerobic
The location of chlorine substitutions is important. Orthosubstituted chlorines(immediately adjacent to each other) are easier to reductively dechlorinate but harder to degrade aerobically.		

Table 3. Selection of Intrinsic Remediation Protocol Document

1) Fuel Hydrocarbon Contaminated Groundwater

	Distance from contaminants to receptor		
	Far	Near	Receptor Impacted
Sandy and homogenous	ASTM or API-NAT	AFCEE Fuels	AFCEE Fuels w/ RBCA
Unconsolidated with slight heterogeneity	ASTM or API-NAT	AFCEE Fuels	AFCEE Fuels w/ RBCA
Unconsolidated with moderate heterogeneity	AFCEE Fuels or API-NAT	AFCEE Fuels	AFCEE Fuels w/ RBCA
Unconsolidated with major heterogeneity	AFCEE Fuels	AFCEE Fuels	AFCEE Fuels w/ RBCA
Highly weathered fractured shale	this research	this research	this research w/RBCA
Fractured bedrock	this research	this research	this research w/RBCA
Karst			

2) Chlorinated Solvent Contaminated Groundwater

	Distance from contaminants to receptor		
	Far	Near	Receptor Impacted
Sandy and homogenous	AFCEE Cl	AFCEE Cl	AFCEE Cl w/ risk
Unconsolidated with slight heterogeneity	AFCEE Cl	AFCEE Cl	AFCEE Cl w/ risk
Unconsolidated with moderate heterogeneity	AFCEE Cl	AFCEE Cl	AFCEE Cl w/ risk
Unconsolidated with major heterogeneity	AFCEE Cl	AFCEE Cl	AFCEE Cl w/ risk
Highly weathered fractured shale	this research	this research	this research w/risk
Fractured bedrock	this research	this research	this research w/risk
Karst			

## 3) Soil and/or Groundwater Contaminated with Any Organic Compound

	Distance from contaminants to receptor		
	Far	Near	Receptor Impacted
Sandy and homogenous	this research	this research	this research w/risk
Unconsolidated with slight heterogeneity	this research	this research	this research w/risk
Unconsolidated with moderate heterogeneity	this research	this research	this research w/risk
Unconsolidated with major heterogeneity	this research	this research	this research w/risk
Highly weathered fractured shale	this research	this research	this research w/risk
Fractured bedrock	this research	this research	this research w/risk
Karst			

AFCEE Fuels : Wiedemeier et al. (1995), "Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater".

AFCEE Cl : Wiedemeier et al. (1995), "Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons Dissolved in Groundwater".(draft)

API-NAT : Rafai(1996), "Natural Attenuation Toolbox", Americand Petroleum Institute.(draft)

ASTM : ASTM(1996), Guide for Remediation by "Natural Attenuation at Petroleum Release Sites".

RBCA : ASTM(1995), Standard Guide for Risk-Based Corrective Action(RBCA) applied at petroleum release sites. E-1739-95. September 10.

Risk : Use of a risk based analysis and/or a mass loading rate analysis.

2단계 : 생물학적 분해도관련 자료수집 및 평가  
이전단계에서 조사된 오염지역내 오염물질에 대해 현재까지 밝혀진 생물학적 분해가능성에 대한 연구결과를 조사하여 평가한다.

해당지역내 오염물질의 생물학적 분해도에 관한 자료는 문헌, database조사 또는 소형생태실험(microcosm study)등의 방법으로 수집할수 있다. 일반적으로 문헌조사를 통하여 정보를 획득하나, 경우에 따라 Internet database를 활용하여 많은 정보를 신속히 구할 수 있다. Internet database는 요금을 지불하는 상용 database와 무료 이용이 가능한 database로 나누어져 있다. 또한

문헌이나 Internet을 통한 자료획득이 어렵고 특수한 지역조건에 해당하는 경우에는 소형생태실험을 행하여야 한다.

3단계 : 오염지역내 분해경로 선정

2단계에서 수집, 평가된 생물학적 분해도 및 미생물에 관한 자료를 활용하여 Fig. 1.에서 제시한 경로를 따라 오염지역과 일치하는 경로를 선정한다.

일반적 조건에서 분해가 용이하지 않다면 특이한 산화환원조건에서 분해될 수 있는가를 판단한다. 특이 조건하에서 분해가 일어난다면 이 조



건에서의 분해미생물의 편재여부를 조사하여 소형생태실험의 실시여부를 결정한다. 특히 조건하에서도 분해가 일어나지 않는다면 염소화 정도를 확인한다. 고염소화되어 있다면 환원 또는 호기적 co-metabolism에서의 소형생태실험이 필요하다. 소형생태실험으로 오염지역내 미생물로 생물학적 분해가 확인되면 자연내재복원기술이 적용가능하다.

#### 4단계 : 오염물질 운반과 거동 분석

모델링은 지하수이동과 오염물질운반 및 감소를 계산하여 수용지점에의 도달시간과 농도, 환경허용치에의 도달년수등을 평가하는 기법으로 실제조건을 묘사하는 공식의 정확도, 수집자료의 신뢰도와 모델운영자의 능력에 따라 모델링 예측치가 달라질 수 있다. 지표부근에서 유출된 오염물질은 토양을 거쳐 지하수면에 도달한후 지하수를 따라 이동하게 된다. 오염물질의 이동 및 감소는 토양층의 종류, 지질구조등에 따라 달라진다. 또한 지하수에 도달한 오염물질은 비중, 용해도등에 따라 지하수위에 부유(floaters, LNAPL), 용해되어(mixers) 이동하거나, 침전(sinkers, DNAPL)하게된다. 오염물질 운반은 지하수 이동방향과 유사하나 이류(advection), 분산(dispersion), 지체(retardation)와 분해율등에 따라 이동방향과 운반률이 다르게 나타난다. 모델링을 하기위하여는 이전 단계에서 이미 수집된 자료를 이용할 수 있으며 선택된 모델종류에 따라 추가적으로 자료를 수집할 필요성이 있다. 예측모델은 차원(dimension), 시물레이션 방법, 이동대상물질 종류등에 따라 다양하게 분류된다. 모델의 종류가 다양하므로 지역조건을 적절하게 묘사할 수 있는 모델을 선정하기 위하여는 신중을 기하여야 한다. 새로운 모델을 개발하거나 기존에 개발된 각종 모델을 연구하는 주요 기관으로

IGWMC(the International GroundWater Modeling Center), RSKERL(Robert S. Kerr Environmental Research Lab), CSMoS(the Center for Subsurface Modeling Support)와 NGWIC(the National Ground Water Information Center)등이 있으며, 이곳에서는 무료 또는 저렴한 비용으로 모델을 구입할 수 있다. 이외에도 상용목적으로 개발된 다양한 모델이 있다. 또한 자연내재복원기술에 적용하기 위하여 개발된 모델로는 본 연구에서 분석한 AFCBE에서 용존성 탄화수소의 자연감쇄를 시물레이션하기 위한 BIOSCREEN모델과 API연구팀의 Rafai<sup>9)</sup>가 개발한 BioplumeII모델(현재 Bioplume III로 수정)이 있다. BIOSCREEN은 사용자가 이용하기 용이하도록 구성되었으며, 현재 BIOSCREEN을 기본으로 하여 염소계 탄화수소에 적용가능한 BIOCHLOR를 개발중에 있다<sup>10)</sup>. 모델운영자가 모델구조에 깊은 지식이 없다면 우선적으로 유체흐름을 묘사하는 흐름모델(flow model)과 오염물질이동을 묘사하는 운반모델(transport model)로 구별하여 점차 세부적 분류를 해 나가면 용이하게 모델선정을 할 수 있다. 모델선정시 원상복원목적 해석하여 줄 수 있고 모델구조가 지역조건을 유사하게 묘사할 수 있는가를 고려하여야 하나 모델에 입력하여야 할 자료의 획득가능성, 모델의 유효성등도 검증하여야만 한다. 또한 모델을 선정하여도 오염지역여건에 따라 모델을 수정하거나 새로 개발할 필요성이 있을 수 있다. 모델선정과정은 Fig. 2.와 같이 나타낼 수 있다.

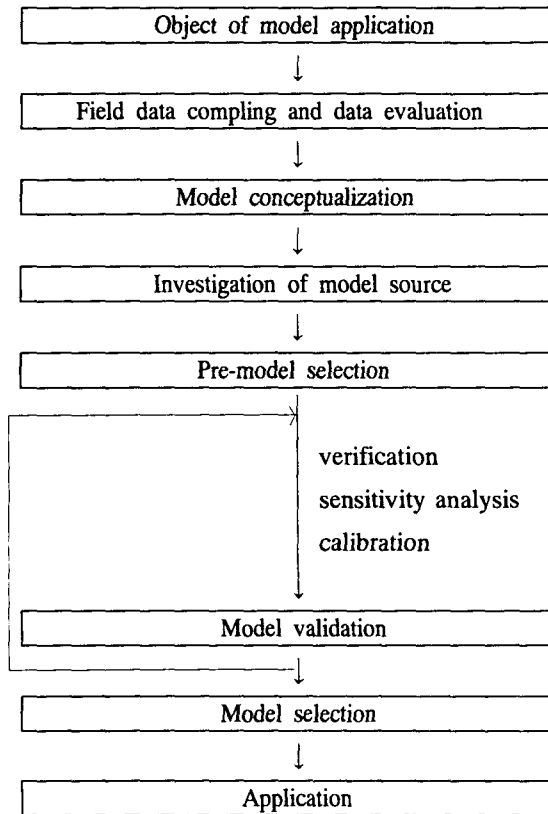


Fig. 2. Procedure for model selection.

#### 5단계 : 모니터링계획 수립

1단계에서 4단계까지의 결과로서 자연내재복원기술을 오염지역에 적용가능하다고 여겨지면 모델링 예측결과와 지형특성을 고려하여 모니터링 계획을 수립한다.

이 단계는 실제적으로 자연내재복원기술을 적용하기 위한 실행계획들을 입안하는 과정으로, 오염물질의 이동경로를 확인하고 모델링결과치를 검증하기 위하여 수립된다. 모니터링을 위한 관측정은 오염원 상부지역, 오염원 지역, 유하방향의 혐기분해지역과 호기분해지역, 오염되지 않은 유하방향 하류지역, 동일한 지하수흐름층의 오염지역과 떨어진 위치에 비교관측정이 설치되어야 한다. 각 관측정에서는 주기적으로 시료를 채취, 분석하여 모델링결과와 비교하여야 한다.

모델링결과와 일치하지 않는 경향이 나타나면 이의 원인을 찾아내기 위한 작업으로 위의 각 단계를 반복할 필요성도 있다.

## 5. 결 론

자연내재복원기술은 아직 우리나라에서 활발히 연구가 진행되고 있지않으나 기존의 토양 및 지하수복원기술에 비하여 경제성이 높고 실시후 효과에 대한 예측이 가능하여 최근에 이에 대한 프로토콜연구가 활발하다. 본 연구에서는 기존에 진행된 프로토콜 관련 연구를 분석하여 자연내재복원기술의 적용성을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하고자 하였다. 이를 위하여 생물학적 분해도에 기초한 오염지역 사전평가과정을 제시하였다. 본 연구의 오염지역 사전평가과정은 기존의 연구에 비하여 대상오염물질범위가 넓고 다양한 지역범위를 포함함으로써 자연내재복원기술을 실용화시킬 수가 있다.

오염지역 사전평가과정은 1)예비지역조사 2) 생물학적 분해도 관련자료 수집 및 평가 3)오염지역내 분해경로 선정 4)오염물질 운반과 거동 분석 5)모니터링계획 수립의 5단계로 진행된다.

1단계에서는 개략적 생물학적 분해도에 기초한 상세한 조사의 계속진행여부와 오염지역자료를 이용하여 적절한 프로토콜을 결정한다. 2단계에서는 생물학적 분해도에 대한 광범위한 자료 수집과 평가를 하며 3단계에서는 본 연구에서 제시한 경로중에서 오염지역에 맞는 경로를 선정한다. 4단계에서는 모델링을 위한 모델종류를 선정하고 예측하며 5단계는 자연내재복원기술의 적용여부를 판단하여 모니터링계획을 수립하는 단계이다.

본 연구에서는 사전평가과정에 입력되는 상세한 프로토콜 항목에 대하여는 기술하지 않았으나, 본 연구의 오염지역 사전평가과정은 사용자

에게 자연내재복원기술을 이용하기 위한 합리적인 체계적인 판단과정을 제공하여 줄 것이다. 또한 사전평가 결과 오염지역이 자연내재복원기술적용이 불가능하다고 평가되어도 이미 수집된 자료와 정보는 다른 복원기술을 선정하기 위한 기초자료로서 사용가능할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Neal, L., State Re-Evaluates Costly Underground Tank Cleanups, *Water Environmental & Technology*, 8(3), pp.20-22(1996).
2. Ritz, S.M., "State speaks out on Natural Attenuation", *Soil & Groundwater Cleanup*, pp.18-27(Jan/Feb 1996).
3. Wiedemeier, T.H., J.T. Wilson, D.H. Campbell, R.N. Miller, and J.E. Hansen, Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater : Volume 1, US Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division, Brooks Air Force Base, San Antonio, Texas(1995).
4. Barden M.J. and M. Small, ASTM Guide for Remediation by Natural Attenuation at Petroleum Release Sites, (1996).
5. Rafai, H.S. and L.P. Hopkins, Natural Attenuation Toolbox, draft submitted to American Petroleum Institute, Washington, D.C. (1996).
6. Wiedemeier, T.H., Presentation at Conference on Intrinsic Remediation of Chlorinated Solvents, Salt Lake City, Utah(2 April 1996).
7. Wiedemeier, T.H., M.A. Swanson, D.E. Moutoux, J.T. Wilson, D.H. Campbell, J.E. Hansen, and P. Hass, "Overview of the Technical Protocol for Natural Attenuation of Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons in Groundwater Under Development for the U. S. Air Force Center for Environmental Excellence", *Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, Dallas, Texas*, pp.35-59(1996).
8. 김병홍, "생물학적 처리기술(bioremediation)", 환경복원 및 재생기술 workshop, 한국과학기술원, pp.91-107(1995).
9. 이무열, 양지원, "난분해성 유기화합물로 오염된 지하수에 대한 bioremediation", 미생물과 산업, 한국미생물학회, 21(4), pp.409-417(1995).
10. Newell, C.J., R.K. McLeod, and J.R. Gonzales, "The Bioscreen Computer Tool", *Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, Dallas, Texas*, pp.60-63(1996).