

〈論 文〉

汚染된 地下水 處理와 追跡을 위한 엑스퍼트 시스템의 開發

A Design of an Expert System for the Treatment and the Routing of Contaminated Groundwater

成 基 元\* 鮮于 仲 皓\*\*  
Sung, Kee Won Sonu, Jung Ho

Abstract

The domain of contaminated groundwater flow is a broad and multidisciplinary field requiring expertise in engineering, geology, chemistry and toxicology, and is an ideal area for the application of Expert System. The Expert System which is developed in this research can assist user to find possible remedial actions in case that the groundwater was contaminated with toxic pollutants. Documentation including the degree of toxicity, the possibility of chemical reaction and concentration of pollutant can be supported also. Prolog, an artificial intelligence programming language, is used to implement the prototype expert system. This expert system can explicitly advise users about contaminants' toxicity, possibility reaction with other chemicals and their concentrations.

요 약

地下水 汚染處理에 관한 問題는 水工學 이외에도 地質學, 化學, 毒극물학 등의 專門知識이 要求된다는 점에서 Expert System(이하 ES)가 設計되기에 理想的인 環境을 지니고 있는 分野이다. 본 研究의 目的은 汚染物質로 汚染된 地下水의 處理에 대한 助言과 그것에 대한 追跡을 위한 소프트웨어의 開發에 있다. Prolog 言語를 사용하여 開發된 이 프로그램은 現場 實務者에게 毒극성의 程度와 化學反應의 蓋沿性, 特定地點의 濃度計算을 通하여 現 狀況에 대한 深刻性的 程度와 對應策을 助言하게 된다.

1. 서 론

地下水 汚染으로 인한 問題는 여러 部分에 걸쳐 장기적으로 나타나는 樣相을 보이며 일단 汚染된 地下水는 處理도 어렵고 原狀回復은 거의 不可能하다. 따라서 汚染物質의 移動이 넓은 지역으로 擴大되기 이전에 필요한 措置를 取하여야 한다. 그러나 地下水 汚染問題는 어느 한 분야의

知識으로는 處理가 未治할 可能性이 크며 水文學, 地質化學, 環境工學 등의 知識이 綜合的으로 要求된다. 대부분의 災難에서 볼 수 있듯 地下水 汚染問題도 汚染物質에 대한 評價와 措置가 신속히 이루어지지 않을 경우 예상치 못한 피해를 입을 수 있다. 이처럼 措置가 늦어지는 理由는 現場에서의 對策 未熟과 經濟的 問題 그리고 여러 分野의 專門家가 모여 共同으로 對策을 樹立하여야 하므로 이를 迅速히 進行하기란 여러가지 制

\* 서울大學校 大學院  
\*\* 서울大學校 土木工學科 教授

約條件으로 인하여 어렵기 때문이다. 따라서 예기치 못했던狀況에 直面하여도 非專門家들이 컴퓨터를 통하여 對策 마련에 필요한 措置와 助言을 얻을 수 있다면 豫想되는 被害의 範圍는 最少化 될 수 있다. 이처럼 專門家와 같이 特定한 分野에 대하여 적절한 措置를 助言하는 소프트웨어를 Expert System 이라 한다. 이 論文에서는 最近에 人工知能 分野의 한 部分으로 實用的인 側面에서 크게 注目을 받고 있는 Expert System 을 地下水 汚染問題에 適用하여 보았다. 이 研究를 通하여 開發된 Expert system 은 여러분야의 知識을 바탕으로 汚染物質의 分析으로부터 處理를 非專門家에게 助言한다. 汚染物質의 分析으로 알 수 있는 地質化學的인 因子들과 다른 物質과의 化學反應의 可能性, 자체의 毒극성 등의 有害要素를 검토하고 帶水層 내에서의 2次元 흐름을 追跡하고 가능한 處理방안을 提示하는 것이 본 Expert System 의 役割이다.

## 2. ES의 特徵과 知識의 具現

### 1) ES의 特徵

ES의 特徵을 알고리즘에 의한 프로그램의 制御處理부가 없다는 점이다. 이로 인하여 시스템은 推論엔진부에서 知識베이스를 探索하여 問題解決을 誘導한다는 점, 주어진 조건을 스스로 고려하여 問題 解決方法을 달리한다는 점, 시스템의 段階的 擴張이 容易하다는 점, 選擇的 인간의 經驗的 知識을 利用한다는 점이 可能해진다. 그림 1은 問題 解決의 方法이 知識工學적인 측면에서 고려될 때 종래의 방법과의 比較를 나타낸 것이다. 즉 從來의 프로그램에서는 프로그램 내부에서 原則에 관한 루틴, 例外處理 루틴 등으로 나누어 모듈별로 設計되었던 것이 ES에서는 規則, 프레임, 意味네트웍(Semantic Network) 등으로 知識을 표시하고 前方推論, 後方推論 등으로 知識을 操作한다는 점이 다르다. 그리고 그림

2는 ES의 設計過程을 圖式化한 것이다.

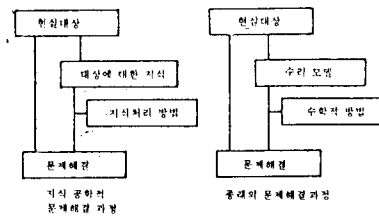


그림 1. 問題 決定의 方法 比較

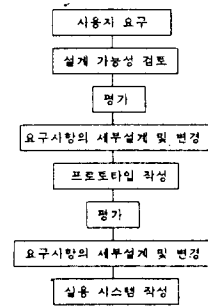


그림 2. ES의 設計課程

또한 그림 2에서도 볼 수 있듯 완성도가 큰 ES를 개발하기 위해서는 原形 設計法을 따르는데 이 設計法은 실제 문제의 分析過程과 비슷한 方法으로, 단순화된 문제하의 소규모시스템에 대한 入出力 關係의 考慮와, 解決 方法의 考慮, 시스템 확장시 실제 문제 해결가능성과 타당성에 관한 評價와 考慮가 요구되는 방법이다. 이 점이 既存의 소프트웨어가 志向하는 數值 중심의 프로그램에 사용되는 下向式 方法(Top Down Method)과 다른 점이라 볼 수 있다.

### 2) 生産規則(Production Rule)을 통한 知識의 具現

IF-THEN의 文章形態로 Production Rule을 決定하였다. 이런 形式의 知識表現은 "事實" 사이의 關係를 지식화하여 프로그램화 할 수 있다. 이때 이러한 生産規則은 두 部分으로 구성된다. 앞 部分은 조건을 표시하고 뒷 部分은 結論을 나타낸다. 그리고 一般的으로 앞 部分을 나타내는

先行詞( Antecedent )는 事實을 利用하기도 하며 境遇에 따라서는 다른 規則을 參考하기도 한다. 본 ES 에서 이용된 生産規則은 다음의 예를 따르고 있다.

IF : 고려대상이 PCB 임이 확인이 되었다면.

AND : 사용자가 그 물질의 Mobility 를 모를 경우.

THEN : ES 는 지식베이스에 의해 낮은 Mobility 를 갖는다고 가정한다.

### 3. 地下水 問題에 대한 既存의 ES 開發 研究 動向

地下水 問題를 主 目的으로 다루는 ES 의 開發에 대하여 現在 알려진 것은 거의 없는 狀況이다. 다만 地域 評價에 대한 補助的인 役割을 하는 ES 가 部分的으로 地下水 問題를 言及하고 있을 뿐이다. RPI Site Assessment System(Law et al. 1986), GEOTOX(Mikroudis, 1986) 등이 이런 種類의 ES 이다. 그러나 지금까지 開發된 ES 는 흐름의 解析이나 그 외의 地質化學的인 考慮가 充分치 못했다. 따라서 이 研究를 통하여 開發된 ES 는 이것에 대한 補完 이외에도 物質 自體의 反應性和 그것의 가능성을 同時에 評價할 수 있는 기능을 갖도록 設計하였다.

RPI Site Assessment System 는 Law et al. 에 의하여 設計되었으며 이 ES 는 環境問題에 대한 潛在的인 安定性 評價를 地域에 順位를 附與하는 形式으로 目的設計되었다. 이 ES 는 MITRE model(MITRE 1984) 의 節次를 따르면서 地域評價를 할 경우 그 節次와 方法에 있어서 專門家의 助言을 실제로 받는듯 한 役割을 한다. 또한 이 ES 는 地域的 特性을 決定짓는 두 가지 중요한 要素를 考慮하는 기능을 갖고 있다. 土質 透水能의 크기 ( soil permeability level )와 地下水의 흐름 方向이 그것이다. 土質 透水能 考慮 段階에서는 서로다른 흙으로 구성된 帶水層에서 汚染物質의 移動이 어느 層에서 주로 이루어지는

가를 選擇한다. 그러나, 이 方法은 보다 精巧한 知識베이스가 構築되지 않는 한 여러가지 問題점이 있다. 첫째는 汚染物質의 輸送만을 念頭에 두고 있기 때문에 對流分散 모델에 適合한 形態를 띄고 있지 않다는 점이다. 다시말해서 上部層의 滲透力로 透水능이 下部層의 그것보다 작을 경우 汚染物質의 이동이 下部層까지는 垂直으로 이루어지고 이와 反對의 지층의 경우에 限하여 비로소 水平移動이 發生한다는 假定을 세웠다는 점이다. 물론 汚染物質의 擴散範圍나 그 濃度에 대한 관심보다 흐름의 方向에 대한 預測이 設計目的이라면 妥當性이 存在하지만, 오염원의 움직임이 지층의 구성에 의존한다는 모순을 갖고 있어 이를 극복하기 위하여는 더욱 정교한 수학적 모형의 수립이 있어야만 垂直흐름의 假定을 正當化할 수 있다.

또다른 地下水에 관련된 ES 로 GEOTOX 를 들 수 있다. GEOTOX는 均一한 모래질 帶水層( uniform sandy aquifer ) 등에 대하여 實驗公式와 地下水 흐름의 단순한 一次元 方程式을 使用하여 흐름을 預測한다. 그러나 실제 汚染物質의 移動이 아니고 地下水 흐름을 追跡하는 것이기 때문에 汚染地域의 濃度和 形狀을 구체화하기는 不可能한 短點을 갖고 있다.

### 4. 地下水 汚染問題에 대한 ES 의 開發

이 研究를 통해 開發된 ES 는 汚染의 始作으로부터 마지막 處理에 이르는 모든 段階를 考慮하는 것을 目標로 하고 있다. 따라서 ES 는 部分的으로 세분화된 ES 의 總體로 構成되어 있다. 그림 3에서 그 過程과 모듈을 표시하였다. 그림에서 物質分類 段階에서부터 危險度 分析段階에 이르는 過程은 知識 데이터로부터 주어진 狀況에서 危險度로 表示되는데 그 過程은 知識베이스의 結合과 推論엔진의 演繹的 推論으로 이루어지게 된다. 또한 物質分類 段階에서 일부 얻어지게 되는 係數들을 使用하여 數值的 計算을 하

는 追跡의 段階를 밟을 수도 있다. 이러한 段階를 거친 知識이 使用者에게 傳達되며 使用者는 이들로부터 얻은 知識을 根據로 判斷하여 處理하게 된다. 지금까지의 說明으로 알 수 있듯 본 研究로 設計된 ES는 文字形 데이터처리만을 目的으로 하고 있지 않으며 數值的 시뮬레이션을 使用하여 危險度 分析에 또다른 重要한 判斷의 根據를 提供하는 것이다.

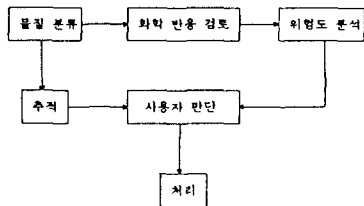


그림 3. 地下水 汚染에 대한 ES의 處理段階

그림 3에서 나타내어진 각각의 모듈은 獨立된 프로그램으로 構成되어진다. 각 모듈에서 수행되는 役割과 모듈의 이름은 (표 1)과 같다.

표 1 地下水오염 ES 모형의 細部的 構成 形態

Program 이름	기능
EXSEPA	물질분류와 지질화학적 고려
EXREAC	다른 물질과의 반응성 고려
EXDANG	물질 자체의 위험도 분석
EXFLOW	흐름의 경로와 농도 계산
EXREME	평가와 처리방안 조언

### 5. 推論의 흐름, 推理木 (Inference Tree)

본 모델에서 考慮하고자 하는 절차와 방향은 다음과 같은 推理木 形態를 갖는다. 각 절점에서 知識베이스 (Knowledge Base 이하 KB)는 使用者의 質問에 대한 應答을 준비하게 된다. KB에 의하여 推論된 사실은 다음 質問의 根據로 이용한다. 따라서 마지막 段階에서 出力되는 結果에는 使用者 판단에 助言을 하게되는 정보와 근거 資料가 포함되어 있다. 그림 4는 推論의 흐름을 나타내는 推理木으로 다음과 같은 段階를 거

친다. 첫 段階의 질문은 考慮해야 할 汚染物質의 種類에 관한 것이다. 본 研究는 4種類的 物質을 다루고 있으나 이 部分은 無限히 擴張 可能하다. 이때 이 4物質에 대한 情報는 KB에 이미 構築되어 있다. 두번째 段階의 질문은 遲延要素에 관련된 것이다. 遲延要素는 物質자체의 固有한 性質이라기 보다는 地質化學的인 것임이 이미 알려져 있다. 그러나 使用者가 그 性質에 대한 精確한 情報를 갖고있지 않을 경우 KB에 준비된 값을 사용한다. 그리고 이 값은 支配方程式의 係數로 사용되게 된다. 세번째 段階의 질문은 주위의 다른 物質들과의 化學反應의 可能性에 대한 檢討에 관련된 것이다. 이러한 段階를 거치면서 使用者에게 傳達될 情報를 준비하게 된다.

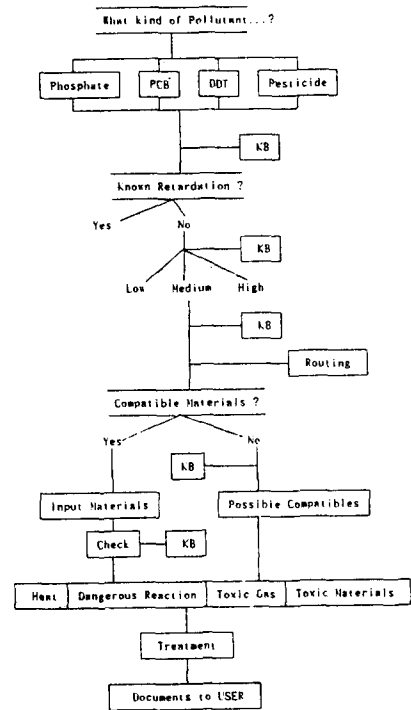


그림 4. 推理木

### 6. 地下水 ES 모형의 細部的 構成

6-1. EXSEPA : 物質 분류와 지질 化學적인 考慮

地下水와 土質의 汚染을 招來하는 物質은 無수히 많이 있으나 産業의 發達과 더불어 需要가 급속히 늘어나고 移動 輸送이 빈번한 4가지의 物質을 選擇하였다. 그 物質은 磷, PCB, DDT, 殺蟲劑 등이다.

이런 種類들의 非保存的 溶질( Non Conservative Solute )은 帶水層 내에서 흙의 構造와 작용을 하여 地下水의 汚染에 影響을 주게 된다. 이러한 地質化學的인 反應으로는 여러가지가 있으나 그 중에서도 가장 두드러진 反應을 묶어서 吸着( Sorption )이라 한다. 이 吸着으로 인하여 對流分散에 의한 物質 移動은 복잡한 樣相을 띄게 된다. EXSEPA 에서는 실제 汚染物質의 移動을 追跡하기 위한 係數를 推定하게 되며 이를 根據으로한 移動性을 분석한다. 汚染源의 連動 方程式은 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - (\rho/nKd) \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

- 여기서 C : 오염물질의 농도
- $\rho$  : 공극물질의 용적 밀도( bulk density )
- n : 공극률
- V : 평균 유속
- Kd : 흙의 투수계수

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D' \frac{\partial^2}{\partial x^2} - V' \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

여기서 D' : 유효 분산 계수 V' : 유효 속도

이 段階에서 推定되는 係數인 分配要素( Distribution factor )와 遲延要素( Retardation factor )는 일반적인 對流分散方程式에서 식(1), 식(2)에서와 같이 方程式에서의 Sink 와 실제 速度를 나타내는데 이용된다. 즉, 식(1)에서의 우

변 3번째항은 分配要素가 포함된 항으로 吸着을 표시하게 되고 이 吸着된 양은 消滅된 양으로 본다. 식(2)에서는 실제 流速은 Darcy 速度를 遲延要素로 나누어진 값을 취하게 된다. 따라서, 汚染物質의 이동식은 식(2)의 형태를 띄게 된다 遲延要素와 分配要素는 化學條件들이 平衡狀態에 이르렀을 때 妥當性을 갖게 되는데 이를 위해서 황대규(1986)에 의하여 誘導되어 提示된 表를 이용하였다. 이를 근거로 구성된 지식베이스 移動性에 관련된 것으로 이루어진다. 따라서 다음의 세가지 規則을 만들어 낼 수 있는데 이런 형태의 知識化는 앞에서 言及한 바가 있다.

- Rule 1 : 만일, 이동성이 클 경우 상황이 대단히 위험하다.
- Rule 2 : 만일, 이동성이 보통일 경우 상황이 위험하다.
- Rule 3 : 만일, 이동성이 낮을 경우 상황은 여유있다.

그리고 知識베이스를 다음과 같이 Prolog 言語를 이용하여 構築한다.

- Mobility(Phosphate, medium)
- Mobility(PCB, low)
- Mobility(DDT, low)
- Mobility(Pesticides, medium)

6-2 EXREAC : 상호反應 검토

汚染物質의 擴散은 그 자체만으로도 높은 危險度를 갖을 수 있으나, 주위에 있을지도 모르는 다른 物質과의 化學 反應 가능성으로 인하여 그 潛在的인 危險度는 증가될 수 있다. 이 過程에서는 汚染處理 對策을 樹立하는 過程에서 處理의 迅速性을 補助하고 放漫한 處理過程에서 발생하는 2차적인 副作用을 防止하는데 그 目的이 있다. 그 方法은 既知의 知識베이스 이외에 여러 種類의 化學反應과 이에 해당하는 物質을 새로운

知識베이스로 구성시켜 汚染物質이 어떠한 反應을 일으킬지를 판단한다. 그리고 이 때 反應의 種類를 다음의 4가지로 分類하였다.

- (1) 열의 발생
- (2) 격렬한 반응
- (3) 유독 가스의 발생
- (4) 독극 물질의 생성

이 過程에서 필요한 知識베이스를 만들기 위해서 California Department of Health 에서 제공한 “Law Regulation and Guidelines for Handling of Hazardous Waste”를 이용하였다. 이 資料는 많이 유통되고 있는 化學物質들을組合하여 일어날 수 있는 化學反應의 種類와 그 程度를 細分化하여 표시한 表이다.

6-3 EXDANG : 物質의 위험도 分析

汚染物質 자체의 독극성 程度는 地下水 汚染對策 마련에 중요한 指針이 될 수 있다. 이때 汚染物質의 種類에 따라 그 程度를 無次元化 하여 指標로 표시하면 상대적인 危險度 分析이 쉬워진다. 考慮되고 있는 汚染物質의 評價를 위하여 독극성, 持續性, 發火性, 反應性, 溶解性, 揮發性 등을 3과 0을 각각 最高와 最低로 表示하여 分類하였다. 이 過程을 위하여 JRB (1980)의 物質分類를 基準으로 사용하였다. 본 ES 에서 이용한 基準을 바탕으로 知識베이스를 다음과 같이 구성하여본다

Characteristic(PCB, 3, 3, 0, 0, 0, 0)이 되는데

이 Prolog 言語는

PCB는

독극성 : 최고(3), 지속성 : 최고(3), 발화성 : 없음(0)

반응성 : 없음(0), 용해성 : 없음(0), 휘발성 : 없음(0)

이라는 성질을 갖는다는 사실을 의미한다.

위와같은 기준에 의하여 隣, PCB, DDT,

殺蟲齊에 대하여 危險度 分析을 실시하였으며 이를 Prolog 言語로 具現하였다.

6-4 EXFLOW : 汚染物質의 흐름 해석

帶水層에서의 汚染物質의 輸送을 2次元 解析的 方法을 사용하여 프로그래밍화 하였다. 解析的 方法은 數值的 解法과는 달리 數值的 不安定 혹은 數值擴散에 대한 考慮가 不必要하다는 점이 단순한 ES 구성에 유리하다. 또한 계산량이 적어지므로 신속한 輸출을 얻을 수 있다는 長點이 있다. 본 ES에서는 物質 輸送의 支配方程式을 進行方向과 鉛直方向을 별도로 구성하는 特徵을 갖는다. 이 모델의 妥當性에 대한 검토는 Dillon (1989)에 의해 확인 되었다.

본 모델은 다음의 구성형태를 갖는다.

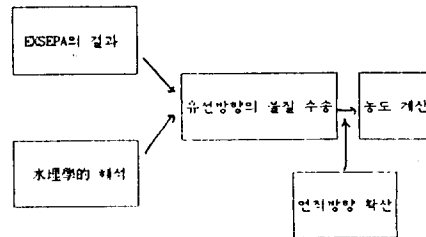


그림 5 解析的 追跡 모델 段階 구성

EXSEPA 의 결과 水理學的 해석 유선방향의 물질 수송 농도 계산 연직방향 확산

(1) 水理學的 解析

帶水層 내에서 地下水의 移動經路를 알기위하여 重疊의 原理를 이용하여 Laplace 方程式을 풀었다. 이 과정에서 사용한 假定은 帶水層의 두께는 일정하다는 점과 帶水層의 上部 境界面에서의 流入率은 일정하다는 것 그리고 左側 境界는 不透水層이라는 것들이다.

다음을 정의한다.

$\phi = \phi(x, z)$  : 수두  
 $K_x, K_z$  : x, z 방향의 투수계수  
 $D$  : 대수층의 두께  
 $W$  : 유입률

支配方程式은 다음과 같다.

$$K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} + K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Carshaw(1959, p167)의 方法에 의한 方程式의 解는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi = & \phi_0 + \frac{(w-q_0)}{2K_x D} (\alpha^2 z^2 - x^2) + \frac{q_0 \alpha^2 z}{K_x} \\ & + \frac{2 \alpha^2 D}{K_x \Pi^2} \\ & \times \sum \frac{(q_0 (-1)^n w)}{n} \frac{\cosh(n \Pi x / \alpha D)}{\cosh(n \Pi l / \alpha D)} \\ & \times \cosh(n \Pi z / D) \end{aligned} \quad (2)$$

이때  $\alpha = (K_x / K_z)^{1/2}$

$\phi_0$  :  $x = 0$  일때의 수두

이 解에 Gelhar & Wilson (1974) 近似法을 적용하면 粒子의 x, z 방향으로의 流速近似가 다음과 같이 可能해진다.

$$V_z = \frac{dz}{dt} = - \frac{K_z \partial \phi}{n_s z} = - \frac{(w-q_0)z}{n_s D} - \frac{q_0}{n_s} \quad (3)$$

$$V_x = \frac{dx}{dt} = - \frac{K_x \partial \phi}{n_s \partial z} = - \frac{(w-q_0)x}{n_s D} \quad (4)$$

따라서 흐르는 물의 軌跡은 다음과 같고

$$z = (D + \frac{q_0 D}{w-q_0}) (\frac{x_0}{x}) - \frac{q_0 D}{w-q_0} \quad (5)$$

다음의 두 關係式을 얻는다.

$$\frac{x_0}{x} = \exp(\frac{(w-q_0)t}{n_s D}) \quad (6)$$

$$t = \frac{n_s D}{w-q_0} \ln(\frac{x}{x_0}) \quad (7)$$

(2) 縱方向 物質輸送 모델

2次元 物質輸送을 流線方向의 1次元 輸送問題로 單純化한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad (8)$$

이때  $x$  : 오염물질공급원으로부터의 수평거리

$v$  : 유선을 따라 흐르는 물질의 속도  
 $D_L$  : 횡방향확산 계수  
 $\lambda$  : 감쇄율( exponential decay rate )

Paker & VanGenuchten(1984)의 Flux-averaged concentration 을 식(9)에 적용하여 解를 구하면

$$C(x,t) = C_0 B(x,t) \quad (0 < t < t_0) \quad (9)$$

$$C(x,t) = C_0 B(x,t) - C_0 B(x,t-t_0) \quad (t > t_0) \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} B(x,t) = & 1/2 \operatorname{erfc}(\frac{x-vt}{2(Dt)^{1/2}}) \\ & + 1/2 \exp(vx/D) \operatorname{erfc}(\frac{x-vt}{2(Dt)^{1/2}}) \end{aligned} \quad (11)$$

(3) 鉛直方向 分散모델

흐름이 水平방향으로 이루어 진다고 假定할 경우 z 方向은 흐름의 연직방향이라 볼 수 있다. 따라서 다음과 같은 支配方程式을 얻는다.

Dillon 은 進行時間이 길어지거나 큰 값의 橫방향확산 係數를 갖게 되기 때문에 帶水層 깊이 내에서의 특정 部分에서는 일정한 濃度를 갖는다고 제시하였다. 따라서 이 方程式의 解는 다음과 같은 간단한 형태로 變形된다.

$$C(z,t) = C1 \frac{(b-a)}{D} \quad (12)$$

여기서  $C1$  : 특정 時 내부의 濃도  
 이 세가지 方程式을 結合하여 地下水 흐름방향의 각 점에서 輸送과 分散을 따로 考慮한다.

6-5 EXREME : 評價와 處理方向 提示

地下水 汚染의 移動과 그것에 隨伴하는 여러

反應을 바탕으로한 狀況을 다음과 같이 구분하였다. 이 구분은 Le Grand (1980)의 評價構成을 따르는 방법을 택하였다. 각 모듈에서 評價되는 項目의 相互 聯關性이나 信賴性에 관한 評價가 수반되지 않았기 때문에 이 課程은 미흡한 면이 있다.

- ▶ level 1 : 대단히 위험 상황...가장 신속한 대응이 필요.  
( most dangerous situation )
- ▶ level 2 : 위험한 상황...신속한 대응이 필요.  
( dangerous situation )
- ▶ level 3 : 조치가 필요한 상황 단 시간적 여유가 있음. ( considerable situation )
- ▶ level 4 : 여러가지 부대조건을 신중히 검토할 여유가 있는 상황. ( modest situation )

위의 각 level 은 단계별로 각기 구성된 知識베이스가 각각의 狀況에 따라 결합 되어질 때 使用者에게 현재의 狀況을 level 표시형식으로 알려주게 되고 附隨的으로는 數值計算의 結果도 출력하게 된다. 實例로 다음의 規則은 각 MODE 에서 推論된 사실이 서로 AND 와 OR 로 결합하여 새로운 Production Rule 을 만들어내서 level 1을 만족하는 경우이다.

- ▶ Rule 1 : IF 이동성이 매우 큰 상황  
AND 열의 발생이 예측  
OR 유독가스의 발생이 예측  
AND 주위의 다른 물질과의 반응이 불확실  
AND 위험도의 정도가 최고치를 갖는 경우가 세가지 이상의 경우  
THEN 결과는 Level 1의 상황

그밖의 각 level 들의 조건은 다음의 표에 구성

하였다.

표 2 level 의 構成 要件

	level 1	level 2	level 3	level 4
Mobility	high	high	modest	low
Reaction	heat and gas	heat and gas	no reaction	no reaction
Mix	incompatible	incompatible	compatible	compatible
No.of CH	over 3	2	1	0

No. of CH : 반응상 검토시 최고치를 갖는 항목의 수

結論的으로 ES 는 現 狀況을 level 로 認識하게 된다. 이에 의하여 ES 는 處理方案을 제시한다. 이 處理方案 중에는 物理的 除去方法 외에도 비교적 낮은 費用으로도 효과를 볼 수 있는 방안도 포함되어 있다. ES 는 각 level 에 대응되는 수치가 1과 2인 狀況, 즉 汚染問題가 深刻한 경우는 物理的 掘鑿을 勸告한다. 이 이외의 狀況에서는 地表水의 流入을 最少化시키는 方法을 추천하고 있으며 특히 毒性가스의 除去가 필요한 狀況에서는 Air/Soil Void Space 處理方法을 아울러 推薦한다.

## 7. 結論

地下水 汚染의 發生으로부터 擴散의 過程을 통하여 나타나는 問題점을 해결하기 위한 ES 를 開發하는 過程에서 얻은 結論은 다음과 같다.

본 模型은 汚染 擴散 과정에서 발생할 수 있는 蓋沿性있는 狀況을 거의 대부분 구현하고자 하였다. 따라서 본 模型은 다른 模型에서 찾을 수 없는 獨創的인 構造를 갖는다. 그러나 ES 의 開發은 일반적으로 여러분야의 知識이 여러 專門家로부터 知識엔지니어(Knowledge Engineer)에게로 傳達되어 만들어져야 하며 知識베이스는 知識과 더불어 經驗과 直觀으로도 이루어져야 한다는 중요한 원칙이 地下水 汚染에 대한 國內의 研究가 微微한 관계로 본 ES 에서는 거의 수용되지 못하였다. 이 결과 貧弱한 지식베이스와 構成의 비균형이 必然적이었다. 이 이외의 문제에 대해서도 完成도가 높은 ES 를 設計하기 위해서는



시스템의 설계와 지식베이스의 구축을 위한 기술적인 공동연구가 필요하다고 생각한다. 특히 Knowledge Engineer와 해당분야의 專門家 간의 情報 交換이 절실히 요청된다.

또한 본 모형에서 汚染物質 追跡에 사용된 解析의 方法은 많은 假定과 近似法을 사용하고 있으므로 적지않은 誤差가 豫想된다. 境界條件에 대한 細密한 檢討와 解法이 필요하고, 多樣한 境界條件을 만족하는 모델이 이용되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 황대규(1986), *Groundwater Contamination Modeling*, 環境영향 評價를 위한 計算모델의 이론과 실제, 한국과학기술원, 485-595, 1986.
2. Abrams, E.F.(1975) Identification of Organic Compounds in Effluents from Industrial Sources, EPA-560/3-75-002, April.
3. Anders Rasmuson(1981), *Diffusion and Sorption in Particles and Two Dimensional Dispersion in a Porous Medium*, Water Resour. Res., 17(2), 321-328.
4. Anderson, M.P(1983). Movement of Contaminants in Groundwater: Groundwater Transport-Advection and Dispersion. In *Groundwater Contamination in the U.S.*
5. Bear, J.(1979). *Hydraulics of Groundwater*. 567pp. McGraw-Hill. NewYork.
6. Borland, Inc.(1988). Turbo Prolog Users Guide California Department of Health *Law Regulation and Guidelines for Handling of Hazardous Waste*, in ref IRB Asso Inc.
8. Carslaw, H.S., and J.C. Jaeger(1959). *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London.
9. Celal N Kostem et al(ed)(1986). *Expert Systems in Civil Engineering*, ASCE.
10. Cherry J.A., Gilham R.W. and Barker J.F.(1983). Contaminants in Groundwater: Chemical Process. In

- Groundwater Contamination in the U.S., 1983
11. Dillon, P.J.(1989). *An Analytical Model of Contaminant Transport From Diffuse Source in Saturated Porous Media*, Water Resour. Res., 25(6), 1208-1218
12. Fayegh, D., and Russell, S.O(1986). *An Expert System for Flood Estimation*, in *Expert Systems in Civil Engineering*, ASCE, New York, pp.174-181.
13. Gelhar, L.W., and J.L.Wilson(1974). *Groundwater Quality Modeling*, Ground Water 12(6), 399-407.
14. Hojjat Adelited J(1986). *Microcomputer Knowledge-Based Expert Systems in Civil Engineering*, ASCE.
15. IRB Associates, Inc(1980). *Methodology for Rating the Risk Potential of Hazardous Waste Disposal Site*(Tech rep.). U.S.EPA, May.
16. Karel Verschueren(1983), *Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals*, Van Nostrand Reinhold.
17. Law, K.H., Zimmie, T.F. and Chapman, D.R(1986). *An Expert System for Inactive Hazardous Waste Site Characterization*, in *Expert Systems in Civil Engineering*, C.N.Kostem and M.L.Maher(eds.), ASCE, New York, pp.159-170.
18. Le Grand H.E.(1980). *A Standard System for Evaluating Waste Disposal Site*, National Water Well Association
19. Mary Lou Maher(ed)(1986), *Expert Systems for Civil Engineers: Technology and Application*, ASCE.
20. Matheron, G., and G.De Marsily(1980). *Is Transport in Porous Media Always Diffusive?*, Water Resour. Res., 16(5), 901-917.
21. Mikroudīs, G.K., Fang, H.Y., and Wilson, J.L(1986). *Development of GEOTON Expert System for Assessment of Hazardous Waste Sites*, in 1st International Symposium on Environmental Geotechnology, Lehigh University, April, 1986.
22. MITRE Corporation(1984). *Uncontrolled Hazardous Waste Site Ranking System:A User's Manual*, U.S.

Environmental Protection Agency.

23. Parker, I.C., and M.Th.Van Genuchten(1984). *Flux-Averaged and Volume-Averaged Concentrations in continuum Approaches to Solute Transport*. Water Resour. Res., 20(7), 866-872.
24. Raymond W. Regan(1985). Preliminary Assessment of Treatment Technologies for groundwater and Remedial Actions for a Municipal Solid Waste Landfill contaminated with Hazardous Toxic Wastes(Tech rep.). Pennsylvania State University, October.