지하수토양환경 Vol. 16(1), p. 1~11, 2011

≪技術≫

위해성평가 기반 마련을 위한 한국형 위해성평가 소프트웨어 개발

남택우[1] · 류혜림[1] · 김영진[1] · 고석오[2] · 백기태[3] · 남경필[1]*

[1]서울대학교 공과대학 건설환경공학부, [2]경희대학교 공과대학 토목공학과, [3]금오공과대학교 토목환경공학부

Development of Korean Risk-Based Corrective Action (K-RBCA) Software

Taekwoo Nam[1] · Hyerim Ryu[1] · Young-Jin Kim[1] · Seok-Oh Ko[2] · Kitae Baek[3] · Kyoungphile Nam[1]*

[1]Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

[2]Department of Civil Engineering, Kyunghee University

[3]Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

1. 서 론

위해성에 근거한 복원 전략(Risk-Based Remediation Strategy, RBRS)은 위해성평가(Risk Assessment)를 통하여 오염지역의 위해성 또는 오염원을 효율적으로 관리하기 위한 의사결정과정이다. 이는 토양에 잔류하는 오염물질의 농도에 의존하여 오염지역 복구 및 수준을 결정하던 기존의 방법과는 다르게, 오염물질의 수용체에 대한 노출 가능성과 위해성에 근거하여 오염지역의 복구 여부 결정 및 정화 수준을 결정하는 방법으로, 미국, 네덜란드, 영국 등 선진국에서 이미 널리 시행되고 있다. 선진국에서는 위해성평가를 보다 수월하게 수행할 수 있도록 전문적인 소프트웨어를 개발하여 사용하고 있다. 미국의 RBCA Tool Kit for Chemical Releases(ASTM, 2007), API's DSS (American Petroleum Institute, 1999)와 CalTOX (California EPA, 2002), 영국의 CLEA(DEFRA and EA, 2002), 네덜란드의 CSOIL(RIVM - Netherlands, 2001)등과 같은 소프트웨어가 대표적이며, 이러한 소프트웨어들은 위해성평가를 하기 위해 필요한 기본적인 데이터베이스와 노출 시나리오, 위해도 및 목표정화수준 산정 기능 등을 제공하여 평가자가 쉽게 이해하고 수행할 수 있도록 한다. 위해성평가 소프트웨어의 기본이 되는 위해성평가 매뉴얼은 대부분 미국의 Soil Screening Guidance (US EPA, 1996)와 Risk-Based Corrective Action(ASTM, 1995)을 따르고 있으며, 영국(DEFRA and EA, 2002)과 네덜란드(RIVM, 2001)는 이를 바탕으로 자국의 현황에 맞게 수정하여 사용하고 있다.

우리나라도 2005년 '토양환경보전법'을 개정하여 위해성평가에 대한 근거 조항을 도입함으로써 제도적 기반을 마련하였으나 그 이후 본격적으로 시행되지 못하고 있다. 여러 가지 사회적, 제도적 이유가 있으나 위해성평가의 수행 주체가 불분명하고 본격적인 평가를 위한 기술적 기반이 충분히 조성되지 못한 데 기인하는 측면이 크다. 위해성평가를 위한 기술적 지원을 위하여 본 연구진에서는 한국형 위해성평가 소프트웨어를 개발하였고, 이를 Korean Risk-Based Corrective Action(K-RBCA)라고 명명하였다. 본 기술자료에서는 미국에서 개발되어 사용 중인 RBCA Tool Kit for Chemical Releases, API's DSS, CaLTOX를 중심으로 위해성평가 소프트웨어를 분석하여 위해성평가 소프트웨어의 주요 기능과 기본적인 설정이 어떠한지 살펴보고, 기존 상용 소프트웨어를 기반으로 한국의 위해성평가 시행 수준에 적합한 기능과 설정을 가진 소프트웨어 개발에 대한 연구 결과를 기술하였다.

2. 국외 주요 소프트웨어 분석 및 한국형 소프트웨어 개발 방향 확립

2.1. CaLTOX

CalTOX는 미국 California Department of Toxic Substances Control, Human and Ecological Risk

*Corresponding author : kpnam@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 7. 29 심사일 : 2010. 7. 29 게재승인일 : 2010. 10. 14

질의 및 토의 : 2011. 4. 30 까지

Division에서 개발하였으며, 오염물질이 오염된 토양공기 지하수지표수퇴적물 및 식물(음식섭취)로부터 노출되어 인간에 미치는 위해성과 목표위해성수준에 근거한 토양오염 복원 농도를 산출하는 소프트웨어이다. CalTOX에 사용된 모델은 다중 매체(표토, 뿌리대(근권) 토양, 통기대 토양, 공기, 지하수, 지표수, 퇴적물, 식물)에서의 오염물질 이동과, 노출시나리오 모델, 그리고 불확실성 평가 등의 구성요소로 이루어져 있다. 매체에서 시간이 지남에 따라 변화하는 오염물질의 농도를 예측하고 오염물질이 매체를 이동하면서 최종적으로 인간 건강에 영향을 미치는 위해성을 평가할 수 있다.

CalTOX는 Microsoft EXCEL을 기반으로 만들어진 소프트웨어로 평가의 전 과정이 EXCEL 프로그램 상에서 이루어지며, 평가하는 순서는 다음과 같다. 입력 정보의 순서는 우선 오염의 대상이 되는 오염물질을 선택하고, 오염 장소와 수용체인 인간에 대한 정보(노출인자)를 선택한다. 다음은 노출경로를 선택하는 것인데, 기본적으로 23가지 노출경로를 제공하여 이 중 가능한 노출경로를 선택할 수 있게 한다. 평가 결과는 주어진 정보에서 단순히 계산되어 얻어낼 수도 있고, 민감도 분석이나 Crystal Ball, @Risk와 같은 Monte Carlo Program을 더하여 불확실성 분석을 할 수도 있다.

2.2 API's DSS

API(American Petroleum Institute)에서 개발한 '노출과 위해성평가를 위한 의사결정지원시스템(Decision Support System, DSS)' 모델은 유류와 그 부산물이 지하나 지표로 유출된 경우, 인간의 노출과 발암 및 비발암 영향을 평가하는 소프트웨어이다. DSS는 6가지 노출 경로를 통한 수용자의 발암 위해도와 비발암 위해도를 평가할 수 있으며, 수많은 석유계 탄화수소, 석유 부산물, 염소화 탄화수소 및 중금속물질들에 대한 평가를 수행할 수 있도록 데이터베이스가 구축되어 있다.

DSS는 노출 물질 및 경로를 통한 위해 개요 평가(development of risk scenario module), 수용자의 국부적 농도 평가(receptor point concentration module), 화학물질의 섭취량과 위해도 계산(chemical intake and risk calculation), 위해성평가 결과 제시(risk presentation module) 의 네 가지 단계로 구성되어 있으며, 입력자료는 Microsoft Windows의 KnowledgePro를 통해서 받고, 출력자료는 Microsoft EXCEL 파일로 작성된다. 네 가지 단계 중에서 수용자의 국부적 농도 평가 단계에서는 접촉매체에 따라 모델을 선택하여 사용할 수 있는데, DSS에 포함된 여러 가지 이동 및 거동 모델(fate and transport models)을 Table 1에 제시하였다. DSS는 사용이 간편하고, 장기간 동안의 위해도를 평가할 수 있는 장점이 있지만, 농도 평가 단계에서 이동 및 거동 모델(fate and transport model)에 따라서 오차가 나타날 수 있는 단점이 있다.

2.3. RBCA Tool Kit for Chemical Releases

RBCA Tool Kit for Chemical Releases(이하 RBCA Tool Kit)는 American Society for Testing and Materials (ASTM)에서 개발한 소프트웨어로 Microsoft EXCEL을 기반으로 개발되어 사용 환경이 간편하며 시각적으로도 편리한 이용환경을 제공하고 있다. 또한 ASTM에서 제시하는 Tier 1 및 Tier 2 평가에 대해 요구되는 모든 계산과정과 기능이 포함되어 있다. Tier1 평가는 위해성에 근거한 허용오염수준을 산출하는 방법으로, 허용오염수준은 토양, 지하수에 존재하는 오염물질이 수용체에 심각한 위해성을 미치지 않는 수준이자, 일반적이고 보수적인 1차적 목표정화수준이다. 실제 토양에 존재하는 오염물질의 농도나 오염지역의 특수성과 관계없이 오염물질의 독성자료와 합리적인 최대한의 노출을 가정하여 산출할 수 있다. 만약 토양에서 발견되는 오염물질의 농도가 Tier 1평가에 의한 목표정화수준 이하이면, 오염원 제거나 노출방지 조치는 필요하지 않다고 판단하며, 그 이상인 경우 현장 특이적인 자료를 수집하여 Tier 2 평가를 실시한다. Tier 2 평가는 오염현장의 특수성을 반영하는 노출경로나 물리, 화학적 변수들을 이용하여 현장특이적 목표수준을 산출하는 것이 목표이며, 전체적인 평가 과정은 Tier 1과 유사하다. Tier 1 평가에서 수용체가 오염현장에 있다고 가정하여 1차 지역에서만 평가하는 반면, Tier 2 평가는 오염현장 뿐 아니라 필요한 경우 오염현장에 떨어진 지역(2차, 3차 지역)까지 평가하기 때문에 이를 위한 토양, 지하수, 대기에서의 오염물질 농도 변화를 예측할 수 있는 오염물질 이동 및 거동 모델링도 포함되어 있다.

RBCA Tool Kit을 이용한 평가 과정은 평가의 목적에 맞게 Tier 1, Tier 2를 선택하고 노출경로 선택 및 노출인자 입력, 오염물질 선택 및 농도 입력, 현장 특성 자료 입력(토양, 지하수, 대기 등 매체별), 결과 확인(위해도 산정 또는 목표정화수준 산정) 순서로 이루어진다. 노출경로 선택은 소프트웨어에서 제공하는 노출경로 중 현장에 맞는 경로만 선택하는 것으로 Fig. 1과 같다. RBCA Tool Kit에서 기본적으로 제공하는 노출 인자는 US EPA에서 제공하는 값들을 주로 사용하고 있다(US EPA,

Table 1. Transport and fate models used in API's DSS

Model type	Model name	Processes Simulated	Receptor Point Concentrations Calculated
Vadose zone	VADSAT	Leaching to groundwater Groundwater transport Volatile emission	Groundwater
Vadose zone	SESOIL	Leaching to groundwater Mixing in groundwater Volatile emission	Groundwater (directly beneath source)
Vadose zone	Jury	Leaching to groundwater Volatile emission	None
Volatile Emissions only	Farmers	Volatile emission	None
Volatile Emissions only	Thibodeaux-Hwang	Volatile emission	None
Particulate(Dust) Emissions	Cowherd	Particulate emission	None
Saturated zone	VADSAT	Groundwater transport	Groundwater
Saturated zone	AT123D	Groundwater transport	Groundwater
Air	Box	Mixing in a 'box'	Air
Air	Gaussian	Transport downwind	Air

1991; 1992; 1997). 또한, 115개의 오염물질에 대한 독성학적, 물리화학적 특성 데이터베이스가 구축되어 있으며, 사용자가 직접 수정, 추가할 수 있도록 되어 있다. 현장특성 자료 역시 기본값이 제공되어 있으나 현장조사가 이루어진 경우 이를 수정할 수 있도록 하였다.

2.4. 결과 및 토의

세 가지 주요 위해성평가 소프트웨어는 미국의 Soil Screening Guidance(US EPA, 1996)와 Risk-Based Corrective Action(ASTM, 1995)을 따르고 있어 모두 유사한 위해성 계산식과 평가과정을 거치며, 제공하는 기능도 비슷하다. 위해성평가는 일반적으로 1) 유해성 확인, 2) 용량-반응 평가, 3) 노출 평가, 4) 위해성 확인 등 네 단계로 이루어지는데, 유해성 확인 단계는 현장조사 단계이며, 용량-반응 평가 단계는 현장조사 결과 발견된 오염물질에 대한 독성학적 특징을 평가하는 단계로 대부분의 경우 기존 데이터베이스를 활용한다. 노출 평가 단계에서 오염물질의 이동경로와 매체의 특성 및 수용체의 위치를 파악하여 노출 경로 모델(conceptual site model, CSM)을 작성하고, 노출 경로 모델과 오염물질의 종류, 농도, 오염지역의 특성을 반영하여 위해성 확인이 이루어진다. 위 세 가지 위해성평가 소프트웨어는 이 네 단계 중 노출 평가 및 위해성 확인 단계를 보다 수월하게 수행할 수 있도록 개발되었으며, 더불어 각종 오염물질에 대한 데이터베이스가 구축되어 있어 용량-반응 평가 단계도 지원할 수 있다.

분석한 소프트웨어 중 RBCA Tool Kit이 최근 들어

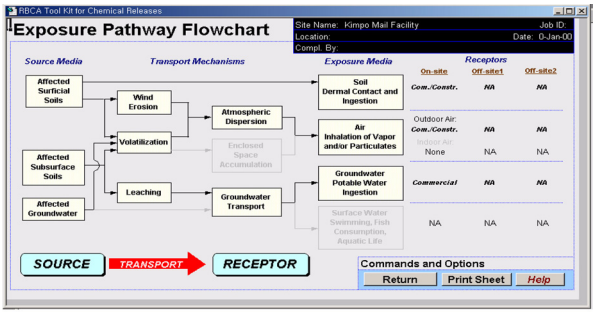

Fig. 1. Exposure pathway screen of RBCA Tool Kit.

널리 사용되고 있으며 사용자 인터페이스와 시각적인 효과도 우수하다고 판단하여, 이를 바탕으로 한국형 소프트웨어를 개발하였다. RBCA Tool Kit에서 사용된 기본적인 값들과 계산식을 이용하였으며 소프트웨어 사용환경도 이와 유사하게 개발하는 한편, 위해성평가 시행 초기 단계에 있는 한국의 현황을 고려하여 비전문가인 사용자도 활용하기에 적합하도록 위해성평가에서 가장 보수적인 가정인 '수용체가 오염지역에서만 노출된다'는 가정을 전제로 하여 Tier 1 단계의 평가를 할 수 있도록 기본적인 설정과 기능을 구성하였다.

Tier 2 단계의 2차, 3차 지역의 수용체가 노출되는 경우를 평가하기 위해서는 오염물질 이동 및 거동 모델링이 필요한데 우리나라 여건 상 어려움이 있다고 판단하였다. 이동 및 거동 모델링을 하기 위해서는 현장조사와 수학적 모델 등을 이용하여 확보예측이 가능한 토양, 지하수 등에 관련된 수리, 지질학적 인자가 필요하지만, 우리나라는

위해성평가 시행 초기 단계에 있어 적합한 현장 자료를 확보하기 어려운 상태이다. 또한 모델링을 하는 경우, 그 과정과 결과에 대한 검증이 필요한데 현재의 우리나라는 위해성평가자의 숙련정도가 부족하여 이에 필요한 시스템이 부족한 상태이다. 이런 이유로, 가장 보수적인 Tier 1 단계의 평가를 수행할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 그러나 필요한 경우 2차, 3차 지역에서 오염물질의 농도를 직접 측정하여 위해성평가를 수행한다면, 이동 및 거동 모델링 기능이 포함되지 않은 것이 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단한다.

3. 한국형 위해성평가 소프트웨어 특징 소개

3.1. 오염물질 데이터베이스

대표적인 오염물질인 총석유계탄화수소(TPH)와 중금속의 수용해도, 증기압, 헨리상수, 토양분배계수 등을 포함하는 물리화학적 특성과, 발암독성 등급, 발암독성자수, 비발암급성독성 등을 포함하는 인체독성자료에 대한 데이터베이스가 구축되어 있다. TPH는 지방족 탄화수소와 방향족 탄화수소로 구분하고, 이 중 방향족 탄화수소는 BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes)와 13종의 PAHs(acenaphthene, anthracene, benzo(*a*) pyrene, benzo(*a*) fluoranthene, benzo(*k*) fluoranthene, benz(*a*) anthracene, benzo(*g,h,i*) perylene, chrysene, fluorene, fluoranthene, naphthalene, phenanthrene, pyrene)에 대한 특성자료가 제공되어 있다. 지방족 탄화수소는 TPHCWG(1999)에서 제안한 바와 같이 탄소의 개수(equivalent carbon number)에 따라 분류한 6개 그룹(EC 6-8, EC 8-10, EC 10-12, EC 12-16, EC 16-21, EC 21-34)과 기타 지방족 화합물(ethylene dibromide, 1,2-dichloroethane, methyl *tert*-butyl ether, trichloroethylene, tetrachloroethylene)을 대상으로 하며, 중금속은 현행 '토양환경보전법'에서 규제하고 있는 8종(카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가 크롬, 아연, 니켈)을 대상으로 데이터베이스를 구축하였다(Table 2).

탄소 수에 따른 그룹으로 지방족 탄화수소를 구분하는 제공하는 이유는, 주유소 등 소규모 유류오염지역의 경우 BTEX가 주요 제거대상 오염물질인 경우가 많지만(즉, BTEX에 의한 위해성이 지방족화합물에 의한 독성보다 훨씬 큰 경우), 여러 가지 유류에 의하여 복합적으로 오염되어 있는 경우 지방족 탄화수소에 의한 위해성을 간과할 수 없는 측면이 있기 때문이다. 그러므로 지방족 탄화수소를 그룹별로 구분하여 평가하는 것이 오염현장의 실질적인 위해성을 반영하는 과학적인 접근이 될 수 있다고 판단하여 데이터베이스에 수록하였다.

3.2. 평가단위 구분 기능

평가단위(operable unit, OU) 구분 기능은 한국형 소프트웨어의 특징적인 기능으로서 부지별 특성을 보다 세부적으로 반영할 수 있도록 추가한 기능이다. 실제 오염현장은 하나의 현장 내에서도 오염분포나 환경조건이 불균질하고 지점에 따라 크게 차이가 나는 경우가 많다. 따라서 오염농도, 토양유기물 등 평가에 사용되는 특성인자를 정하는 데 있어 단 하나의 오염도 값으로 오염부지 전체를 대표하는 것은 때에 따라 불합리한 결론을 이끌어낼 수 있다. 특히 건물이 세워져 있는 등 토양의 피복/포장 상태가 다르면 오염물질의 노출경로 역시 달라질 수 있다. 이처럼 평가대상지역이 넓고 대상 지역 내 토지이용용도가 달라 노출경로가 달라지거나, 오염 농도의 분포가 균일하지 않은 경우 평가자가 대상 부지를 여러 개의 평가단위로 나누어 평가를 수행하면 부지 내부의 다양한 조건을 잘 반영하여 합리적으로 평가할 수 있게 된다(Fig. 2). 또한 평가뿐만 아니라 정화/관리계획 수립 시에도 평가단위별로 기술의 적용성 등을 검토할 수 있다. Fig. 2의 (a)와 같은 경우, OU1과 OU3에 오염물질이 존재하므로

Table 2. Chemicals of concern (COCs)

Classification	Chemicals of concern
Heavy metals	Cd, Cu, Ar, Hg, Pb, Cr (VI), Zn, Ni
Total Petroleum Hydrocarbon	
BTEX	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)	Acenaphthene, Anthracene, Benzo(*a*) pyrene, Benzo(*a*) fluoranthene, Benzo(*k*) fluoranthene, Benz(*a*) anthracene, Benzo(*g,h,i*) perylene, Chrysene, Fluorene, Fluoranthene, Naphthalene, Phenanthrene, Pyrene
Aliphatic hydrocarbon groups (classified according to carbon number)	EC 6-8, EC 8-10, EC 10-12, EC 12-16, EC 16-21, EC 21-34
Other aliphatic hydrocarbons	Ethylene dibromide (EDB), 1,2 - Dichloroethane (EDC), Methyl *tert*-Butyl Ether (MTBE), Trichloroethylene (TCE), Tetrachloroethylene (PCE)

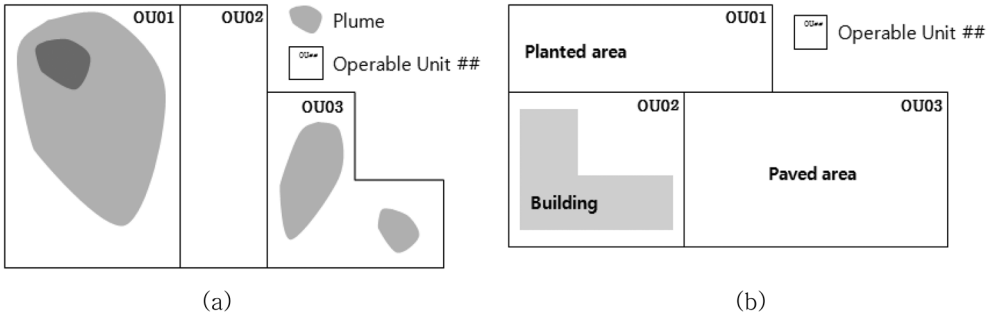

Fig. 2. Examples of operable unit division according to (a) contamination distribution and (b) land use.

이 지역을 집중적으로 정화/관리하는 것이 바람직하다. 기존의 위해성평가 소프트웨어는 이러한 평가단위 구분 기능이 제공되지 않으며, 오염농도나 부지 내부 특성에 따라 단위를 나누어 평가를 수행하려면 평가단위의 수만큼 평가작업을 반복해야 하는 번거로움이 있다. 그러나 본 소프트웨어는 평가자가 토지이용용도나 오염분포에 따라 나눈 평가단위의 개수를 입력할 수 있는 기능을 추가하여 한 번에 위해성평가가 가능하도록 하였다. 평가단위 개수를 입력하면 평가단위별로 오염농도와 현장 특성 자료를 입력하고, 노출경로모델을 작성할 수 있도록 하였으며, 결과 확인 시에도 평가단위 별로 구분하여 살펴볼 수 있도록 하였다.

3.3. 매체별 오염농도 입력 기능

오염농도 입력은 평가단위별, 오염물질별, 매체별(표토, 심토, 지하수)로 각각 입력하도록 개발하였다. 매체 구분 설정에서 RBCA Tool Kit과 기본적인 차이가 있는데, RBCA Tool Kit은 기본적으로 매체를 토양과 지하수로만 구분하고 있는 반면, 개발한 소프트웨어는 표토, 심토, 지하수로 매체를 구분하고 있다. RBCA Tool Kit은 표토에서 조사된 오염농도를 입력하면 이동 및 거동 모델링을 적용하여 심토로 유출되는 농도를 추정하여 위해성을 평가하는 방식이기 때문에 표토와 심토의 구분이 필요하지 않다. 하지만 개발한 소프트웨어는 이동 및 거동 모델링 기능을 지원하지 않으므로 오염매체를 표토, 심토, 지하수로 구분하였으며 각 매체별로 오염농도를 입력하는 방식을 사용하였다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 매체이동에 따른 농도변화를 예측할 수 없어 주변 지역의 수용체에 대한 위해성평가가 어려운 단점이 있다. 그러나 필요한 경우, 오염지역 외부에 존재하는 원하는 평가지역의 현장 실측치를 직접 이용하여 목표정화수준과 비교할 수 있다. 여기서 한 가지 유의해야 할 점은, 오염원이 존재하는 이외의 지역에서의 오염물질의 노출농도를 결정할 때, 오염물질의 거동 및 이동 모델링을 통해 도출한 오염농도와 현장 실측치 중 어떤 것이 더 정확한 값인지는 현장상황, 노출경로의 종류 등에 따라 다를 수 있다는 점이다. 이는 위해성평가 및 거동/이동 모델링에 대한 전문적인 지식을 가진 전문가의 분석 및 판단을 따라야 할 것이다. 표토와 심토의 구분과 모델링 프로그램 사용 여부에 따른 위해성평가 결과에 어떤 차이가 있는지는 같은 호의 '한국형 소프트웨어를 이용한 유류중금속 복합오염지역 인체위해성평가 및 RBCA Tool Kit와의 비교분석' 연구에서 확인하였다.

3.4. 노출경로 작성 기능

위해성평가의 가장 기본이 되는 노출경로모델(conceptual site model, CSM) 작성 환경을 제공하여, 평가자가 유효한 노출경로를 선택하여 노출경로모델을 작성할 수 있도록 지원하고 있다(Fig. 3). Tier 1 단계 평가 시 최대 노출경로를 대상으로 평가를 하지만 보다 정확한 평가를 하는 Tier 2 단계에서는 현장 특이성을 반영하기 위해 유효노출경로만 사용하여 평가하기 때문에, 오염물질과 오염매체에 따른 일반적인 최대 노출경로를 제공하는 한편, 현장 특이성을 반영하기 위하여 유효 노출경로를 평가자가 선택할 수 있도록 하였다. 개발한 소프트웨어가 이동 및 거동 모델링 기능이 없어 주변 지역까지 포함하는 완벽한 Tier 2 단계의 평가를 수행할 수 없으나, 유효 노출경로 선택이 가능하도록 하여 수용체가 오염현장에 있는 경우에는 Tier 2 단계의 평가가 가능하다.

노출경로모델 작성은 평가자가 편리하게 이용할 수 있게, Source · Pathway · Receptor 세 단계에 포함되는 항목을 선택할 수 있는 선택상자를 만들어 선택/취소에 따라 유효 노출경로를 작성할 수 있다. 또한, 평가단위별로 다르게 노출경로모델을 작성할 수 있도록 하여 사용자의 편의를 도모하였다.

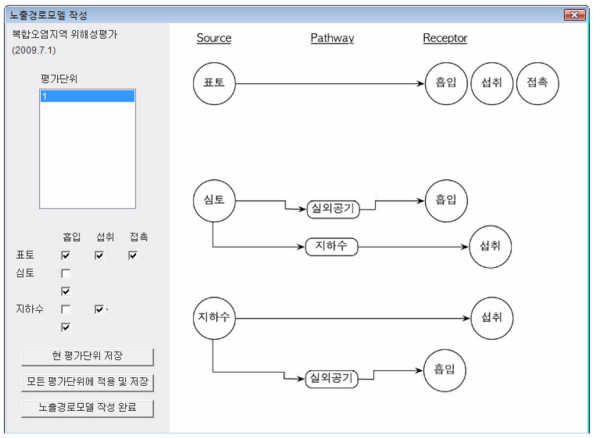

Fig. 3. Exposure pathway screen of K-RBCA.

3.5. 현장 특성 자료 입력 기능

현장 특성 자료 입력 기능에서는 목표정화수준 평가 계산식에 사용되는 주요 노출계수와 현장 특성 자료를 입력하고 수정할 수 있다. 대기 및 수환경/토양환경 및 기타/주요노출계수에 대한 값을 입력할 수 있으며, 기본값을 제공하고 있다. 현장에 따라 특성값이 다른 경우 수정하여 현재 프로젝트에만 적용할 수 있는 기능이 있으며, 데이터베이스를 수정할 수도 있다. 주요노출계수 입력값은 US EPA guidance(US EPA, 1991a; 1992; 1997)에서 제공하는 값을 기본으로 하였으며, 수명 · 체중 · 체표면적 · 호흡량 · 물/토양 섭취량 등 인체에 대한 자료를 기본값으로 제시하고, 토지이용용도에 따른 접촉량, 흡입량 등의 노출 인자 자료를 보수적인 값으로 데이터베이스를 제공하고 있다. 현장 특성 자료는 ASTM의 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action(ASTM, 2000)에서 제공하는 기본값을 사용하였다. 그러나 보다 정확한 위해성평가를 위해서는 평가대상 오염지역의 철저한 현장조사를 통하여 수리지질학적 특성 등 해당 지역의 특이적 자료를 최대한 활용해야 한다.

3.6. 위해도 계산 기능

위해도 계산 기능은 위해성평가에 사용되는 일반적인 계산식을 적용하여, 목표위해도에 따른 목표정화수준을 최종 결과로 도출할 수 있도록 하였다. 목표정화수준 도출 방법은 Tier 1 평가로 산출된 목표정화수준과 현장 측정 농도를 비교하여 위해 여부를 판별할 수 있다. 개발한 소프트웨어에 사용된 모든 계산식과 기본 제공 값은 ASTM RBCA Standard(1995)를 따른다.

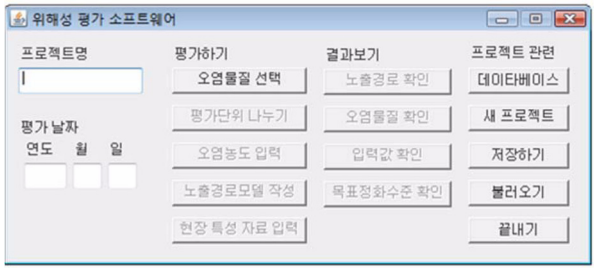

Fig. 4. Main screen of K-RBCA.

3.7. 결과 출력 기능

위해성평가 과정에서 입력된 자료와 결과는 표, 그림, 그래프 등으로 출력이 가능하다. 기본적으로 작성한 노출경로를 확인할 수 있으며, 선택된 오염물질과 현장 특성 자료 및 노출계수도 확인할 수 있고, 구분한 평가단위별로 입력값을 확인할 수 있다.

평가 결과는 산정된 목표정화수준을 현장 측정 농도와 비교하기 쉽도록 그래프로 출력되며, 오염물질별로 매체에 따라 구분하여 결과를 확인할 수 있고 평가단위 구분에 따른 결과도 확인할 수 있다. 또한 결과 확인 화면에서 결과 내보내기 기능을 선택하면, 엑셀 프로그램으로 결과를 전송하여 정확한 수치를 확인할 수 있다.

4. 한국형 위해성평가 소프트웨어 사용 방법

4.1. 시작하기

소프트웨어를 실행하면 Fig. 4와 같은 시작화면이 나타난다. 모든 평가와 결과 확인은 이 시작화면을 통해 이루어진다. 시작화면 좌측의 프로젝트명과 평가 날짜를 입력하여 프로젝트에 관한 정보를 입력할 수 있다. '평가하기' 부분이 위해성평가를 위해 필요한 자료들을 입력하는 항목이고 '결과보기' 부분이 평가 시 입력한 값과 노출경로 시나리오 및 평가 결과를 확인하는 부분으로, 평가를 할 때 오염물질 선택부터 단계별로 입력하지 않으면 다음 평가 항목이 활성화되지 않는다. '결과보기' 항목들은 평가가 완료된 후에 활성화 된다.

4.2. 평가하기

4.2.1. 오염물질 선택

시작화면에서 '오염물질' 선택 단추를 누르면 Fig. 5와 같은 화면이 나타난다. 화면의 좌측에서 대상오염물질을 선택한 후 '추가' 단추를 누르면 우측의 대상오염물질 항목으로 옮겨가게 되고, 이 물질들을 대상으로 평가를 하

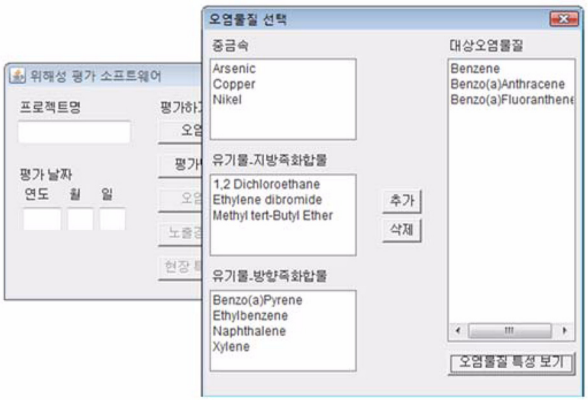

Fig. 5. Dialog box for selecting COCs.

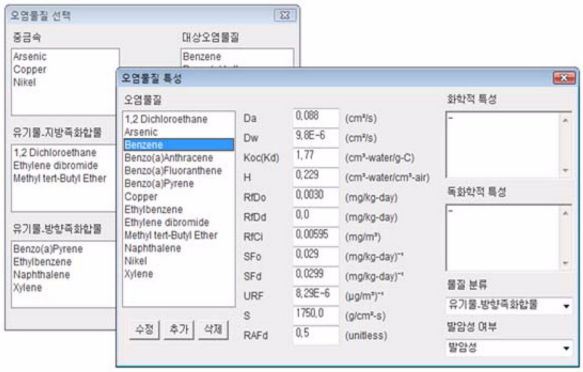

Fig. 6. Chemical database input screen.

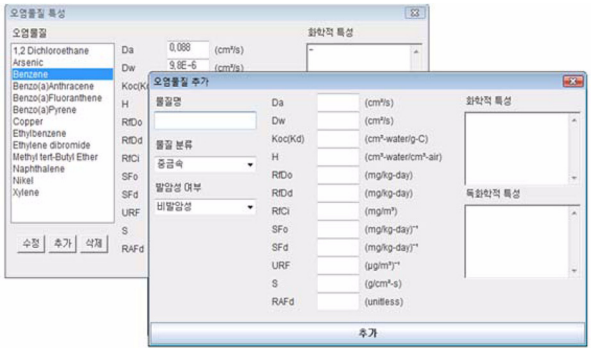

Fig. 7. Chemical database update screen.

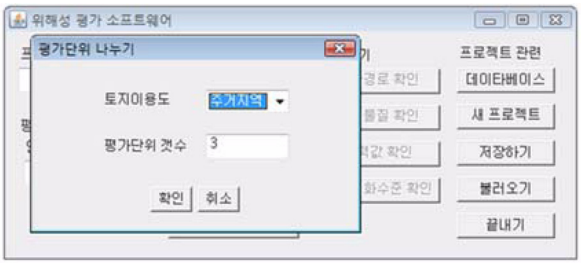

Fig. 8. Operable unit division screen.

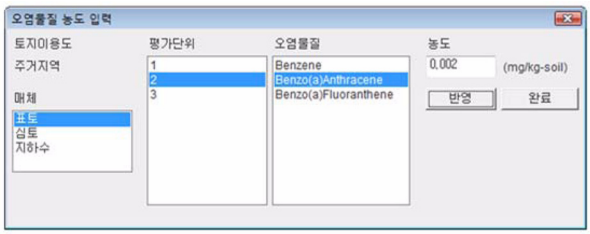

Fig. 9. Concentration input screen.

게 된다. 대상물질을 모두 선택한 후에 창을 닫으면 시작화면으로 돌아간다. 오염물질 선택 화면에서 우측 하단의 '오염물질 특성 보기' 단추를 누르면 데이터베이스에 구축되어 있는 모든 오염물질의 독성학적/화학적 특성을 확인할 수 있다(Fig. 6). '추가' 단추를 누르면 Fig. 7과 같이 오염물질 추가 화면이 나타난다. 오염물질명을 입력하고 물질 분류 및 발암성 여부를 선택할 수 있으며 독성학적/화학적 특성값을 입력할 수 있다. 해당하는 값이 없는 경우 값을 '0'으로 두고, 우측에 있는 화학적 특성, 독성학적 특성 칸에는 사용되는 값 외에 필요한 정보를 입력할 수 있다(CAS-number 등). 오염물질 수정은 특성 창에서 값을 수정하고 수정단추를 누르면 수정이 가능하다.

4.2.2. 평가단위 나누기

평가대상오염물질의 선택을 완료한 후 '오염물질 선택' 창을 닫고 시작화면으로 돌아오면 '평가단위 나누기' 단추가 활성화되어 있다. 이 단추를 누르면 Fig. 8과 같이 '평가단위 나누기' 화면이 나타난다. 이 화면에서는 토지이용도를 선택할 수 있으며, 평가단위 개수를 입력할 수 있다. 평가단위는 현장조사 결과 오염물질의 농도가 불균일한 경우 혹은 일부 지역의 노출경로가 다른 경우 나누도록 한다. 평가단위를 나누면 오염농도 입력과 노출경로 모델 작성을 평가단위별로 할 수 있다.

4.2.3. 오염물질 농도 입력

평가단위를 나눈 후 '오염농도 입력' 단추를 누르면 Fig. 9와 같은 '오염물질 농도 입력' 화면이 나타난다. 이 창에서는 매체별, 평가단위별, 오염물질별로 실측 농도값을 입력할 수 있다. 여기서 입력된 농도값은 소프트웨어가 계산한 목표정화수준과 비교하여 정화여부를 결정하는데 사용된다. 화면에 나타난 바와 같이 매체를 선택한 후 평가단위를 선택하고 오염물질을 선택하여 농도를 입력한

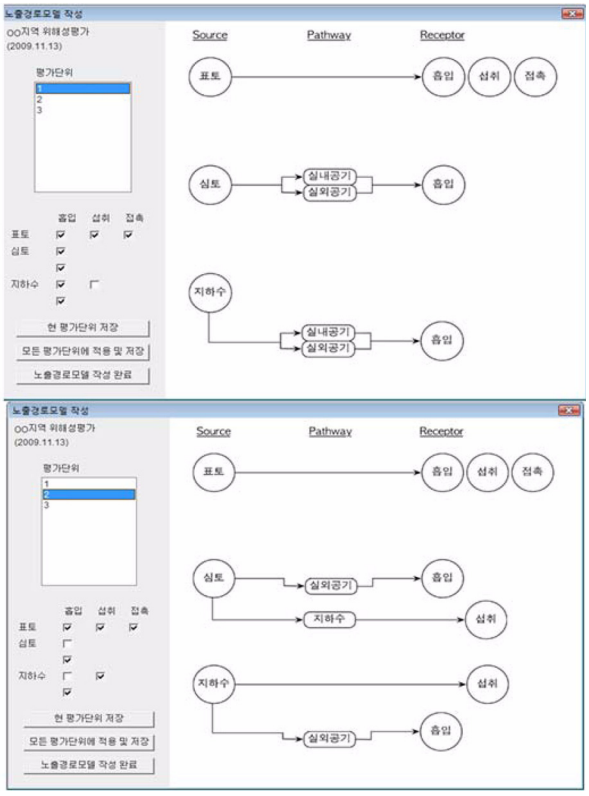

Fig. 10. Conceptual site model creation screen.

다. 입력하는 농도는 실측값을 권장하며, 그렇지 않은 경우 표토에서 심토/지하수로 이동하는 농도를 계산하여 입력하도록 한다. 농도를 입력할 때마다 '반영' 단추를 눌러주어야 저장이 되며 모든 농도를 입력한 후에는 '완료' 단추를 누른다.

4.2.4. 노출경로모델 작성

다음 단계로 노출경로모델을 작성한다. Fig. 10과 같이 노출경로모델 작성 화면은 사용자가 선택하는 방법으로 이루어져있다. 노출경로는 표토의 흡입/섭취/접촉, 심토에서의 휘발에 의한 흡입/지하수용출에 의한 섭취, 지하수에서의 휘발에 의한 흡입/섭취로 총 9개 경로이다. 화면 좌측에서 평가단위를 선택하고 해당 평가단위의 노출경로를 아래의 버튼을 선택하는 방식으로 작성한다. '√' 표시가 된 것이 선택한 경로이다. 처음 화면이 나타나면 모든 경로가 선택되어 있으므로 유효하지 않은 경로를 지우는 방식으로 작성할 수 있다. 평가단위에 해당하는 노출경로를 작성하고 '현 평가단위 저장'을 누르면 저장이 되고, 다른 평가단위를 선택하여 노출경로 작성을 계속한다. 모든 평가단위의 노출경로가 같은 경우 '모든 평가단위에 적용 및 저장'을 선택한다. 완료가 되면 '노출경로모델작성 완료'를 누르고 화면을 종료한다.

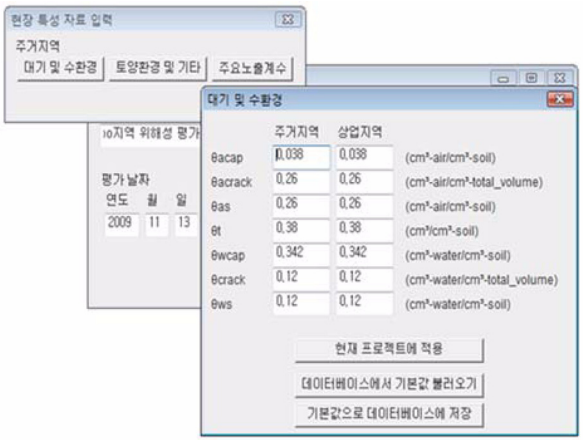

Fig. 11. Site-specific parameters input screen.

4.2.5. 현장 특성 자료 입력

이 단계에서는 현장조사를 통해 확보한 토양/대기/수환경 및 기타환경에 대한 현장 특성 자료와 주요노출계수를 입력할 수 있다(Fig. 11). 대기 및 수환경, 토양환경 및 기타, 주요노출계수로 구분하여 값을 입력하도록 한다. 모든 변수에 대해 기본값이 데이터베이스로 입력되어 제공되며, 평가자가 수정할 수도 있게 하였다. 값을 수정하는 경우 해당 변수에서 값을 수정한 후 '현재 프로젝트에 적용'을 선택하면 된다. 만약, 데이터베이스를 수정하는 경우 '기본값으로 데이터베이스에 저장'을 선택한다.

4.3. 결과보기

4.3.1. 선택한 노출경로, 오염물질, 입력값 확인

모든 입력 작업이 끝나면 시작화면에서 '결과보기' 아래 단추들이 활성화되고, 이들을 통하여 계산에 사용된 노출경로와 입력값들, 위해도평가 결과를 확인할 수 있다.

시작화면에서 '노출경로 확인' 단추를 누르면 Fig. 12와 같은 '노출경로 확인' 창이 열리고, 평가자가 선택한 노출경로를 평가단위별로 확인할 수 있다.

또한 단추를 누르면 Fig. 13과 같은 '오염물질 확인' 창이 열리고, 평가자가 선택한 오염물질과 각 물질의 물리화학적, 독성학적 특성을 확인할 수 있다.

마지막으로 '입력값 확인' 단추를 누르면 Fig. 14와 같은 '입력값 확인' 창이 열리고, 평가자가 입력한 오염물질의 매체별 농도와 현장특성자료를 평가단위별로 확인할 수 있다.

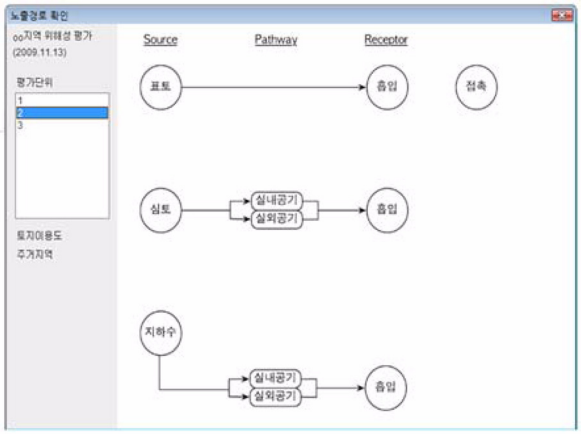

Fig. 12. Conceptual site model.

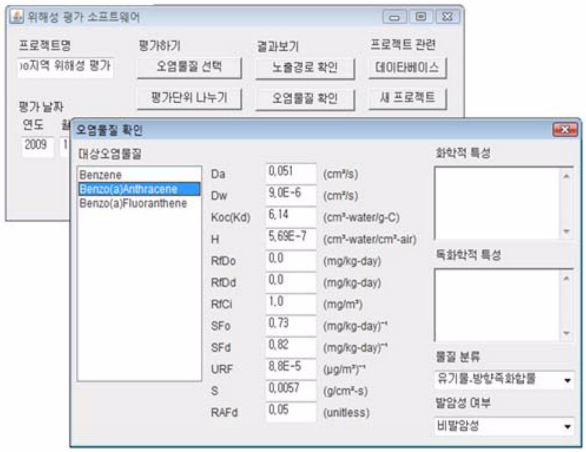

Fig. 13. User-specified COCs.

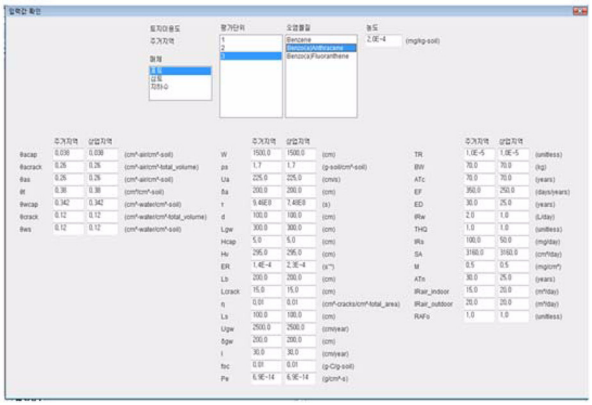

Fig. 14. Concentration for selected COCs and input parameters summary.

4.3.2. 목표정화수준 확인

본 화면에서는 계산된 목표정화수준과 현장 오염농도

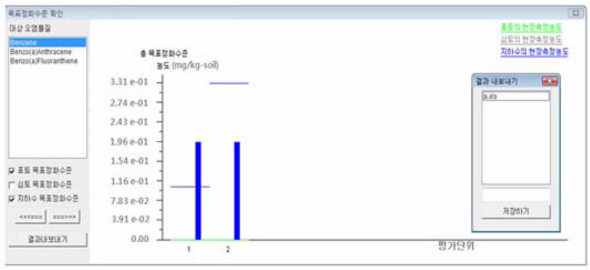

Fig. 15. Risk-based screening levels (RBSLs) screen. Vertical bars represent RBSLs for each OU and horizontal bars represent corresponding soil concentrations.

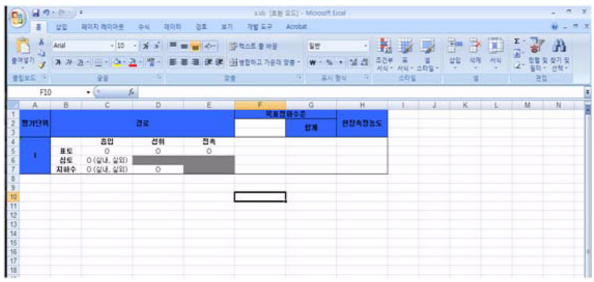

Fig. 16. Exported RBSLs result (EXCEL file).

실측값을 비교하여 정화여부를 판단할 수 있다. 오염물질별, 평가단위별, 매체별로 결과를 확인할 수 있다(Fig. 15). 화면과 같이 x축이 평가단위를 나타내며, y축은 농도를 나타낸다. 세로 막대가 목표정화수준이며 가로로 표시되는 선이 입력농도(현장 측정 농도)이다. 입력농도를 나타내는 가로선이 막대보다 높은 위치에 있으면 정화가 필요한 것이며, 가로선(입력농도, 현장 농도)이 막대보다 낮은 위치에 있으면 이 지역(또는 평가단위)의 위해성은 허용할 만한 수준이라는 것을 의미한다. Fig. 15에서 평가단위 1의 결과의 경우가 정화가 필요하지 않은 경우이며, 평가단위 2의 결과가 정화가 필요한 경우이다. 이처럼 평가단위별로 결과가 도출되므로 평가단위별로 정화 수행 여부를 결정할 수 있다.

'결과내보내기'를 선택하면 엑셀 파일로 저장을 할 수 있고, 이 파일에서 계산된 수치를 확인할 수 있다(Fig. 16).

5. 한국형 위해성평가 소프트웨어의 장점과 한계

기존 상용 위해성평가 소프트웨어와 차별화되는 가장 큰 특징은 평가단위 구분 기능이다.

평가단위를 구분하여 위해성평가를 하는 것은 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있도록 한다. 오염지역 위해성

평가 시 대상 부지 면적이 넓은 경우 토지이용용도가 다르거나 오염물질의 농도 분포가 균일하지 않은 경우가 있다. 이러한 경우 이를 무시하고 평가를 수행하면 오염지역의 특성을 제대로 반영하지 못하여 합리적인 위해성평가 결과를 도출할 수 없다. 따라서 토지지용용도에 따라 혹은 오염농도 분포에 따라 평가단위를 구분해서 평가해야만 오염부지의 특성을 반영할 수 있고 보다 정확한 평가결과를 얻을 수 있다. 기존의 소프트웨어를 이용하여 평가자가 임의로 평가단위를 구분하여 평가하고자 할 때 구분한 평가단위 개수에 따라 여러 번 평가해야 하는 불편함이 있었으며, 위해성평가자의 숙련 정도가 미미한 경우에는 소프트웨어 자체에서 가이드라인이 없었기 때문에 평가단위 구분을 하지 않는 경우도 있었다. 하지만 한국형 위해성평가 소프트웨어에서는 1차적으로 토지이용용도를 기준으로 평가단위를 구분할 수 있도록 기능을 제공하고 있어 오염부지의 토지이용용도가 다양한 경우 또는, 오염농도의 분포가 균일하지 않은 경우에도 평가자가 이 기능을 활용할 수 있게 유도하고 있다.

한국형 위해성평가 소프트웨어는 사용방법이 간단하여 초보자도 쉽게 사용할 수 있다. RBCA Tool Kit과 같은 국외의 소프트웨어는 이동 및 거동 모델링이 포함되어 노출경로모델 작성과정과 오염매체의 현장 특성 자료 확보 및 입력과정이 초보자가 사용하기에는 다소 복잡하였다. 하지만 한국형 위해성평가 소프트웨어는 이동 및 거동 모델링을 제외하여 가장 기본적이고 보수적인 값을 사용하는 Tier 1 단계의 평가를 수행할 수 있도록 하여 초보자가 사용하기에도 무리가 없다. Tier 1 단계의 평가 결과는 현장 특이성을 충분히 반영하지 못하여 Tier 2 단계의 평가 결과보다 과대평가되는 경향이 있지만 위해성평가의 가장 기본이 되는 평가과정이기 때문에 의미가 있는 평가이다. 또한 오염농도 실측치를 사용하도록 권장하고 있어 Tier 1 평가 결과인 목표정화수준과 비교하여 위해 여부를 판단할 때 보다 정확한 판단을 할 수 있다. 그리고 '한국형 소프트웨어를 활용한 복합오염지역 위해성평가 및 RBCA Tool Kit와의 비교분석' 연구를 수행하여 한국형 위해성평가 소프트웨어의 평가결과 신뢰성을 검증하였다. 따라서 한국형 위해성평가 소프트웨어는 위해성평가 시행 시작 단계에 있는 국내의 현황을 고려해볼 때 사용하기 편리하고 평가결과도 신뢰할 수 있어 국내 실정에 적합하다고 할 수 있다. 그러나 궁극적으로는, Tier 2 평가를 수행할 수 있도록 오염물질 이동 및 거동 모델링 기능이 보완된 완전한 위해성평가 소프트웨어가 개발되어야 할 것이다.

6. 결 론

국내의 위해성평가 시행에 대한 기술적 기반을 마련하기 위하여 국외 주요 소프트웨어를 분석하여 우리나라의 실정에 맞게 수정하여 한국형 위해성평가 소프트웨어를 제작하였다. 많은 입력 계수 및 오염물질 이동 및 거동 모델링이 포함되어 광범위하게 만들어진 기존 선진국 모델과는 달리 이동 및 거동 모델링을 제외하고 Tier 1 평가를 위해 간편하게 제작하여 초보자도 사용하기 쉬우며, 평가결과도 신뢰할만하므로 위해성에 근거한 오염토양의 관리에 관한 기초적인 지식을 가진 사람이라면 누구나 개발한 소프트웨어를 이용하여 정화여부를 판단할 수 있을 것이다.

본 소프트웨어 개발은 위해성평가의 초기 단계에 있는 우리나라에서 사용자들이 위해성평가에 대한 개념을 쉽게 이해하고 사용할 수 있도록 기반을 마련하는 데 그 목적이 있으므로 현 수준의 개발단계가 충분히 의미가 있다. 하지만 수용체가 오염현장이 아니라 주변 지역에 있는 경우, 오염물질이 환경매질을 따라 이동, 거동을 하는 경우, 시간에 따른 오염물질의 농도 저감을 고려하는 경우 등을 고려하는 Tier 2 평가를 수행할 수 있도록 기능을 보완해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 "토양 지하수 오염방지기술개발사업" 인 GAIA(Geo-Advanced Innovative Action) Project와 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0001448)입니다. 또한 서울대학교 공학연구소의 기술적 지원에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

ASTM, 1995, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites (E 1739-95), American Society for Testing Materials, PA, USA.

ASTM, 2000, Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (E 2081-00), American Society for Testing Materials, PA, USA.

DEFRA and EA, 2002, The Contaminated Land Exposure Assessment Model (CLEA): Technical Basis and Algorithms, Department for Environment, Food and Rural Affairs & Environment Agency, UK.

RIVM, 2001, Technical evaluation of the Intervention Values for

Soil/sediment and Groundwater (report 711701 023), Research for Man and Environment, Netherlands.

TPHCWG, 1999, Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing the Working Group Approach, Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Amherst Scientific Publishers, MA, p. 60.

US EPA, 1991, Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I, Human Health Evaluation Manual Supplemental Guidance: Standard Default Exposure Factors (OSWER Directive 9285.6-03), Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C., USA.

US EPA, 1992, Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications (EPA/600/8-91/011B), Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment, Exposure Assessment Group, Washington, D.C., USA.

US EPA, 1996, Soil Screening Guidance: User's Guide (EPA/540/R-96/018), Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C., USA.

US EPA, 1997, Exposure Factors Handbook (EPA/600/P-95/002F), Office of Research and Development, Washington, D.C., USA.