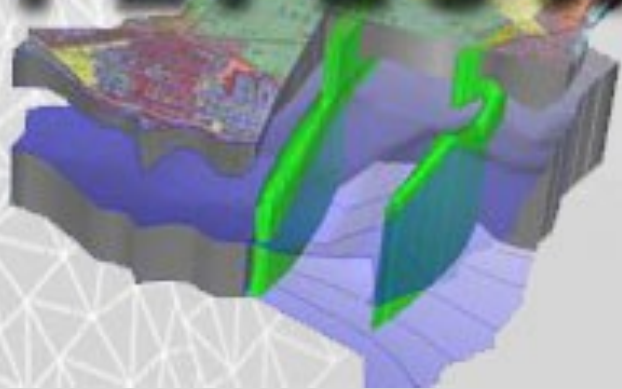


# FEFLOW



## FEFLOW 를 사용해야만 하는 아홉 가지 이유!

- (1) 유한 요소 분할(discretization)
- (2) 유연한 메시 생성기
- (3) GIS/CAD 인터페이스
- (4) 최첨단 가시화 도구
- (5) 진보된 Solvers
- (6) 병렬 처리
- (7) 이해하기 쉬운 모델링 패키지
- (8) 시뮬레이션 벤치마크
- (9) 오픈 프로그래밍 인터페이스

### 개요

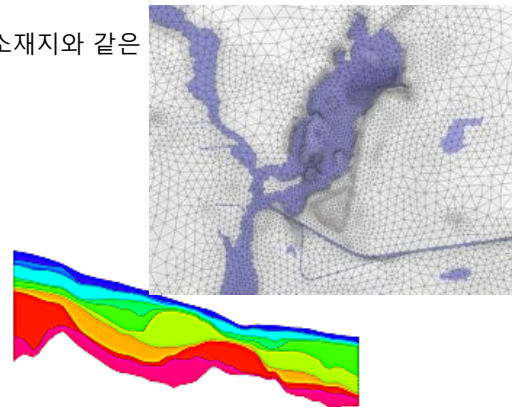
- ▶ FEFLOW 는 지표하에서 유체의 유동, 용존 요소 그리고 열 이송 처리를 모델링합니다.
- ▶ FEFLOW 는 시뮬레이션 엔진, GUI 그리고 프로그래밍 인터페이스가 완전히 통합되어 있습니다.
- ▶ FEFLOW 는 전처리기와 후처리기, 그리고 효율적인 시뮬레이션 엔진을 사용합니다.

### 왜 FEFLOW 를 사용해야 하는가? 그 아홉 가지 이유

#### (1) 유한 요소 분할 (Discretization)

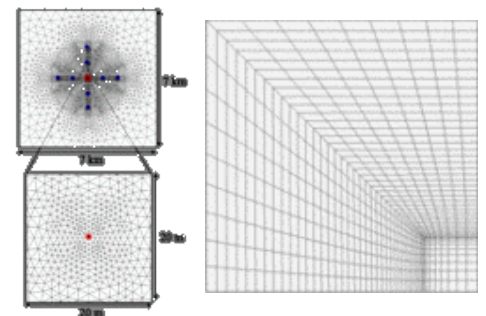
전통적인 지하수 모델링들은 유한 차분 분할을 사용합니다. 대조적으로 FEFLOW 는 유한 요소 기술을 기초로 하고 있습니다. 유한 요소 모델링의 주요 강점은:

- ▶ 구조적이지 않은 메시(meshing), 메시지를 응용하여 하천, 균열(fractures), 우물 소재지와 같은 특징들을 나타내기 훨씬 더 좋습니다.
- ▶ 경사 레이어와 이방성을 표현하기 더 좋습니다.
- ▶ 전체 행/열을 세분화할 필요 없이 로컬 메시지를 세분화할 수 있습니다.
- ▶ 자유 수면을 고려한 메시들을 이동합니다.
- ▶ 자동 메시 세분화(refinement) 그리고 반세분화(coarsening) 합니다.
- ▶ 광대한 지역 모델의 요소 수를 줄여서 수치 계산량을 줄일 수 있습니다.
- ▶ 작은 규모에서 큰 규모까지 폭넓은 범위에 적합합니다.



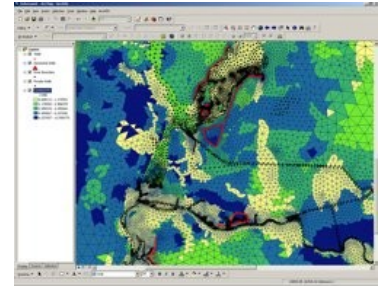
#### (2) 유연한 메시(Mesh) 생성기

- ▶ 유한 요소 분할은 요소의 크기, 각, 등과 같은 요건을 갖는 자연 구조물과 일치시킬 수 있도록, 복잡하고 구조적이지 않은 메시들을 작성 가능
- ▶ 거대한 모델링 지역에 대하여, 효율적인 작업을 위한 정교한 자동 알고리즘으로 메시 생성
- ▶ FEFLOW 는 다양한 메시 생성 알고리즘과 생성 처리에 영향을 주는 다양한 옵션 제공



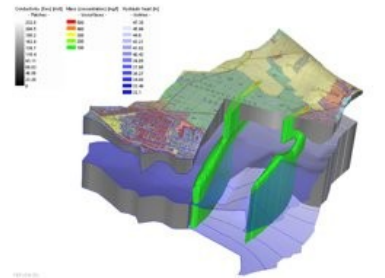
### (3) GIS/CAD 인터페이스

- ▶ 공간 데이터는 GIS 파일 포맷이나 CAD 와 같은 포맷을 사용합니다. 이 파일들의 기본 데이터를 다이렉트로 들여오기 합니다. 또한 모델링의 모든 단계에서 들여오고 내보낼 수 있습니다.
- ▶ 후처리 단계에서, 데이터가 프로젝트 구성에 맞는 데이터 포맷으로 결과를 만들기 위해, GIS 또는 CAD 시스템으로 쉽게 되돌려집니다.
- ▶ GIS 파일들을 사용하여, 속성 데이터를 직접 지하수 모델로 옮길 수 있으며, 모든 데이터 입력을 수동 또는 ASCII 파일로 들여오기 할 수도 있습니다.



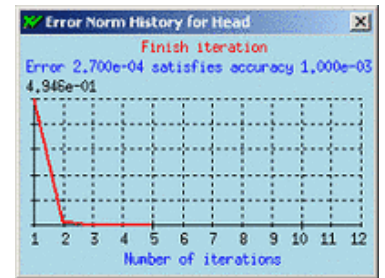
### (4) 최첨단 가시화 도구

- 커다란 숫자 테이블로 모델링 결과를 표현해 왔던 시대는 이제 지났습니다. 고객들은 정교한 등치선도 맵, 유적선 다이어그램, 횡단면과 3D 뷰 그리고 동영상으로 보기 원합니다.
- ▶ FEFLOW 는 평면, 횡단면, 3차원 가시화 특징들의 필요에 대처하고 있습니다.
  - ▶ 모든 모델 파라미터와 모델링 결과를 (오염물질 기둥의 이동과 같은) 3차원 가시화 소프트웨어인 FEFLOW Explorer 를 사용하여 제작할 수 있습니다.



### (5) 진보된 Solvers

- 고등 지하수 모델을 해석하기 위한 방정식 시스템은 거대한 매트릭스 시스템을 이끌어 냅니다. 해법의 안정성과 효율성을 보증하기 위해서는, 매우 정교한 solvers 가 요구됩니다.
- ▶ FEFLOW 에서는 희소행렬 (sparse-matrix) PCG 타입의 solvers 뿐만 아니라 대수 (algebraic) 멀티그리드 solver 를 사용할 수 있습니다. 이들은 노드와 요소의 수에 제한이 없습니다.



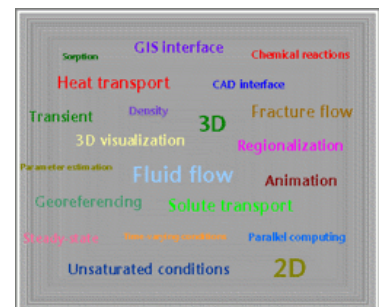
### (6) 병렬 처리

- 장기간 복잡한 지역 모델의 부정류 (Transient) 계산은 주목할 만한 양의 수치 계산이 요구됩니다. 최신 하드웨어를 사용한다고 해도 시뮬레이션 시간이 오래 걸릴 수 있습니다.
- ▶ FEFLOW 의 병렬 처리는 멀티 프로세서 환경의 PC 에서 CPU 시간을 대단히 줄여줍니다. 행렬 집합과 같은 병렬 구조의 FEFLOW 작업들은 여러 CPU 들이 병렬로 작업을 처리합니다.



### (7) 이해하기 쉬운 모델링 패키지

- 대충 보면, FEFLOW 가 제공하는 일부 특징들은 필요 없어 보일지 모릅니다. 그럼에도 불구하고, 많은 모델링 옵션들이 있는 정교한 시스템을 선택하는 것은 훌륭한 결정입니다. 왜냐하면,
- ▶ 현재 모델링 작업과는 매우 다른 미래의 어떤 과업도 동일 시스템으로 작업할 수 있을 것입니다. 이러한 경우, 추가적인 소프트웨어와 교육이 필요하지 않으므로 시간과 비용을 절약할 수 있습니다.
  - ▶ FEFLOW 는 저렴한 2D 유동 모델링 패키지에서 사용하기 쉬운 높은 수준의 모델링 특징들을 제공합니다. 그래서 비교적 단순한 작업들을 다뤄야 한다 해도, 지하수 시뮬레이션에서 부딪히게 되는 대부분의 요구를 충족시킬 수 있는 기능들은 매우 유익할 것입니다.



## (8) 시뮬레이션 벤치마크

FEFLOW 와 같은 복잡한 시뮬레이션 소프트웨어는 신뢰성, 정확성, 그리고 효율성을 요구합니다. 분할(discretization)에 의한 제약 안에서 물리적, 수학적 정확성은 기본입니다. FEFLOW 시뮬레이션 엔진의 모든 부분들과 결과물들은 연구실 실험들과 비교되고, 분석적 해법이나 관찰을 위한 다른 잘 알려진 시뮬레이션 시스템들과 비교하는 광범위한 벤치마킹 과정을 통과하였습니다.

## (9) 오픈 프로그래밍 인터페이스

FEFLOW 는 지표하의 다양함을 광범위하게 처리 할 수 있습니다. 그렇다 하더라도 매우 특수하게 응용해야 하는 경우가 있습니다. 이러한 경우, 사용자는 시스템의 구성요소를 수정하고 싶어합니다.

- ▶ FEFLOW 는 사용자 특유의 부가적인 모듈들을 적용하기 위한 오픈 프로그래밍 인터페이스를 제공합니다.
- ▶ 파라미터들은 어느 때나 변경될 수 있습니다.
- ▶ 경계 조건은 외부의 상관 관계를 사용하여 변경을 가할 수 있으며, 시간 단계가 좌우될 수도 있습니다.
- ▶ 다른 프로그램 (유체 역학 시뮬레이션이나 파라미터 평가 소프트웨어와 같은) 들을 FEFLOW 와 직접 연결될 수도 있습니다.
- ▶ 개발자 프레임워크는 특정 모듈을 설계하는 토대를 제공합니다. 모듈은 C/C++ 로 코딩될 수 있습니다. 또는 Fortran 과 같은 다른 언어와 혼합된 언어로 프로그램을 할 수 있습니다.



## FEFLOW 의 응용 분야:

FEFLOW 는 연구실과 같은 작은 규모도, 거대한 규모라도, 다공성 매질의 유동과 이송 과정의 모의에서 무수히 다양한 응용을 하기에 적절합니다. 몇 가지 대표적인 예는 다음과 같습니다:

- ▶ 오염물질 확산의 연구
- ▶ 개선 그리고 오염물질 제거 계획 평가
- ▶ 채굴 지역에서 지하수 수위 하락과 상승의 연구
- ▶ 광산 배수 연구
- ▶ 염수 침투의 조사
- ▶ 지하수 수량의 탐지를 위한 동위원소 계산
- ▶ 지열 발전소의 설계 (HDR, 열펌프 시스템)
- ▶ Mike11 (DHI) 과 Hydro\_AS-2D (M. Nujic)를 사용하여 지하수/지표수가 연계된 모의
- ▶ 지질 공학에서 응용 (터널 건설, 건설 현장 배수)
- ▶ 댐 누수(seepage) 계산
- ▶ 토양 컬럼 계산
- ▶ 침투 계산
- ▶ 지하수자원의 유효성 평가
- ▶ 지하수 관리에 대한 계획의 평가와 통제
- ▶ 우물 수위 보호 지역의 설계
- ▶ 환경 영향 평가의 연구
- ▶ 지하수 모니터링 프로그램의 설계
- ▶ 학술적 연구에서 응용

확장 가능한 FEFLOW 의 빌트인 능력은, 오픈 프로그래밍 인터페이스 IFM 은 거의 무제한의 가능성을 제공해 줍니다. FEFLOW와 연계된 프로그램 개발에 대해 **소프트팩토리**로 문의하시기 바랍니다.

## 모의 가능한 지하수의 물리적 작용들:

### ※ 일반:

- ▶ 정상류 조건
- ▶ 부정류 조건

### ※ 유동 모델링:

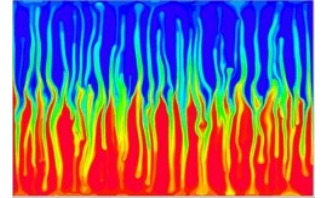
- ▶ 다공성 매질에서 Darcy 흐름
- ▶ 포화류/불포화류/변동 포화류
- ▶ 자유 수면 흐름
- ▶ 가변 밀도류/밀도 의존류
- ▶ 열극(Fracture) 흐름

### ※ 매스(Mass) 이송 모델링:

- ▶ 이류-분산 용질 (Solute) 이송
- ▶ 단일 종/다종 용질 이송
- ▶ 흡착(Sorption)
- ▶ 반응(Reaction)
- ▶ 염수침투
- ▶ 이중/다중 확산 대류
- ▶ 자유, 강제, 그리고 혼합 대류
- ▶ 열극 매스(Fracture mass) 이송

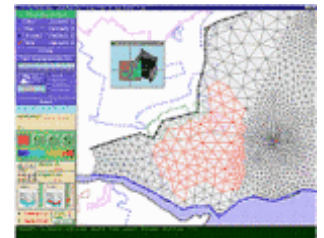
### ※ 열(Heat) 이송 모델링:

- ▶ 이류-전도도 열 이송
- ▶ 자유, 강제, 그리고 혼합 대류
- ▶ 열극 열(Fracture heat) 이송
- ▶ 열염 대류



## 모델의 설계

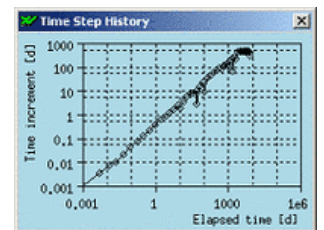
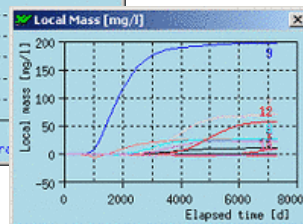
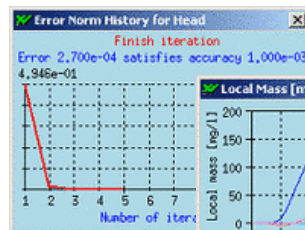
- ▶ 배경 맵들 (ASCII, ArcInfo Generate, ArcView Shape, DXF, TIFF, HPGL) 사용
- ▶ 메시 생성의 기초로 그리고 재료 속성, 초기치 그리고 경계 조건들의 공간 분포의 기초로 맵의 사용
- ▶ FEMAP (inclusive)의 좌표등록 맵들, WGEO 의 확장 기능(좌표 변환 등)
- ▶ 여러 가지 생성 알고리즘을 제공하여 완전히 또는 부분적으로 자동 메시 생성
- ▶ 멀티레이어 우물과 같은 특정 우물 경계 조건뿐 아니라, 제1종, 제2종 그리고 제3종 경계 조건 사용
- ▶ '제약 조건들'을 사용하여 경계 조건에 물리적 제약
- ▶ 들어오기된 ASCII 또는 GIS 데이터에 대하여 여러 가지 보간 루틴들(Kriging, Akima, Inverse Distance Weighting, Linear 1-D) 의 도움을 받아 재료 속성들의 입력
- ▶ 시간 증속 경계 조건들, 제약 조건 그리고 재료 속성들
- ▶ 3D 레이어 구성자를 채용하여 2D 에서 3D 모델로의 확장하기 쉽습니다.



## 시뮬레이션

### 일반

- ▶ 정상 또는 부정류 시뮬레이션
- ▶ 여러 가지 시간 단계 방법들:
  - 일정한 시간 단계들
  - 다양한 사전 정의된 시간 단계들
  - predictor-corrector 또는 적극적인 목표 기반 계획들을 이용한 완전히 자동 시간 단계 처리
- ▶ 자유 표면 계산을 위한 여러 접근법들:
  - 메시 옮기기
  - 잔류 수심이 포함된 상대적인 전도도 곡선 vs. 포화에 대해 선으로 그려진 연관성
  - 완전히 불포화된 모델링
- ▶ PEST (J. Doherty) 에 기반한 자동 보정 도구
- ▶ 모든 중요한 모델 결과에 대해 커스터마이징할 수 있는 실시간 다이어그램으로 효율적으로 시뮬레이션 처리를 제어

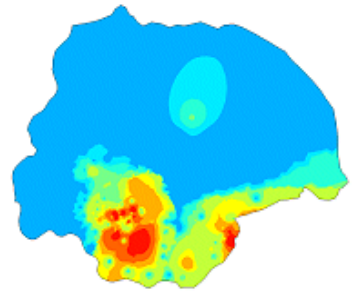


## Solvers

- ▶ 비선형 문제에 대한 Newton 과 Picard 반복 기법
- ▶ 강력한 preconditioner 를 가지고 있는 PCG 와 Restarted-OR-THOMIN 과 같은 해법들과 빠른 반복
- ▶ 또는, 대수 멀티 그리드 해법 (SAMG by K. Stueben)

## 용질(Solute) 이송

- ▶ 선형 (Bear-Scheidegger) 또는 비선형 이산(dispersion)
- ▶ 정교한 상류(upwind) 기법들:
  - Galerkin-FEM
  - Streamline upwinding
  - Shock capturing
  - Least-square upwinding
  - Full upwinding
- ▶ FE-LM<sup>2</sup> (포함) 에서 등온 흡수(sorption isotherm)을 위한 파라미터 맞춤
- ▶ 농도 증속 유체 밀도와 유체 점성 (예를 들어, 염수 침투 문제)에 대한 밀도 연계 모델링
- ▶ 열과 용질 (열염) 이송의 동시 모델링
- ▶ 순방향 또는 역방향 이송 모델링 (반대로 흐르는 필드)



## 단일 종 이송

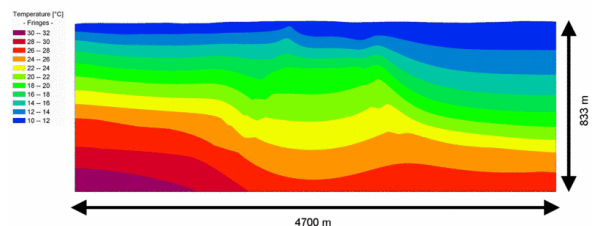
- ▶ Decay 처리:
  - 1차수 반응
  - Michaelis-Menten 반응
  - 외부의 모듈을 사용하여 방사성 분해(붕괴 사슬)
- ▶ 다음에 의한 평균 흡착의 고려:
  - Henry
  - Freundlich
  - Langmuir isotherms

## 다중 반응 이송

- ▶ 임의의 수의 화학종들
- ▶ 용존된 또는 흡착된 종들
- ▶ 반응 운동(kinetics) 편집기를 통한 변덕스런 화학적 반응의 정의

## 열(Heat) 이송

- ▶ 유체 상(fluid phase)에서 열 전도도와 수용력(storage)
- ▶ 발생지(matrix)에서 열 전도도와 수용력(storage)
- ▶ 유체와 발생지의 사용자 정의 열 이송 파라미터
- ▶ 온도에 따른 유체의 밀도와 점성에 대한 밀도 연계 모델링
- ▶ 열과 매스(mass) 이송이 동시에 일어나는 모델링 (열염 이송)

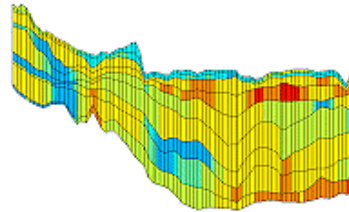
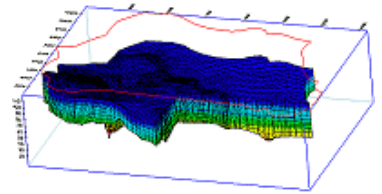


## 불포화 상태 모델링

- ▶ 비선형 문제에 대한 Newton 과 Picard 반복 기법
- ▶ 변동 포화의 고려, 즉 하나의 모델에서 불포화대와 포화대
- ▶ 여러 파라미터 모델들:
  - van Genuchten / Brooks-Corey / van Genuchten modified (variable m) / Haverkamp / Exponential / Linear
- ▶ Richards' 방정식의 여러 형태
- ▶ 모세관 이력현상(capillary hysteresis)의 고려
- ▶ FE-LM<sup>2</sup> (포함) 에서 여러 파라미터 모델들에 대한 파라미터 맞춤

## 디스플레이 및 분석

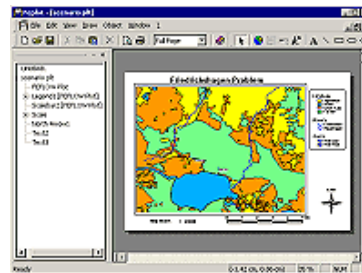
- ▶ 대화형식의 3D 회전과 줌
- ▶ 등치선도, 3D 등가면, 횡단면 등을 가진 모델 영역의 3D 뷰 (유한 요소 메시, 재료 속성들, 계산된 분포들)
- ▶ 등치선도가 그려진 2D 뷰, 유속 벡터, 배경 맵 등. 예를 들어, 수직 횡단면 또는 수평적 투영



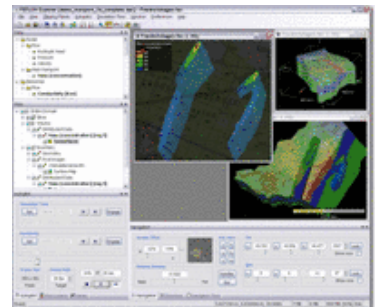
- ▶ 등시곡선 표지가 있는 입자 추적
  - 정상 또는 부정류
  - 2D 또는 3D
- ▶ 광범위한 내보내기 기능: 벡터 그래픽(ESRI Shape 파일, DXF, FEFLOW Plot 파일, ASCII), 화면 덤프, 데이터 triplets/quads, 다이어그램 포인트들, 등
- ▶ 윈도우용 FEPLLOT (포함) 에서 광범위한 부가적 특징들 (배경 맵, 범례, 프레임, 텍스트, 등) 을 가진 도면 생성



- ▶ 차별적인 운영, 매 시간 단계에서 결과물의 분석
- ▶ 참조 데이터와 분포의 비교



- ▶ 'budget analyzer' 를 사용하여 모델 영역 또는 모델 일부에 대한 용질과 에너지 수지의 생성
- ▶ 'fluid flux analyzer' 를 이용하여 횡단면 또는 단일 레이어를 통과하는 흐름율의 계산
- ▶ FEFLOW 모델 속성과 시뮬레이션 결과의 3D 가시화, 애니메이션, 그리고 비디오로 내보내기 위한 FEFLOW Explorer



**전문적인 지하수 모델링을 원하신다면 FEFLOW 를 사용하십시오!**