

# **능동적 수리제어와 결합된 PRB 원위치 정화공정 에서 수리지질 불균질성 및 지하수질 특성을 고려 한 수치모의를 위한 모델 개발 및 현장 적용 연구**

**2021.6.15**

**석희준 박사 (한국지질자원연구원)**

# 연구배경

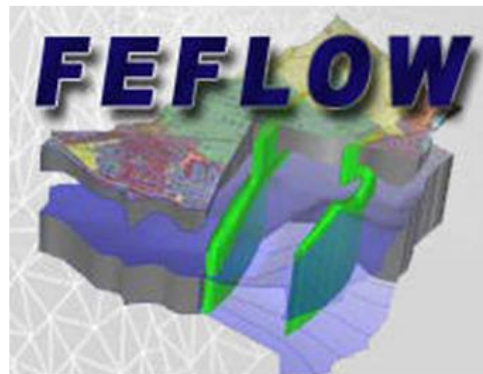
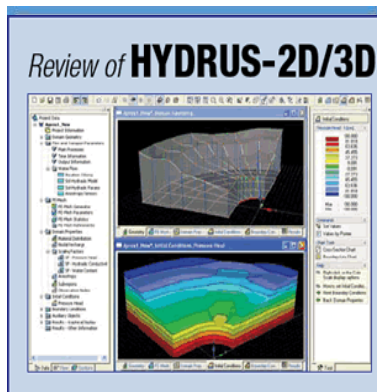
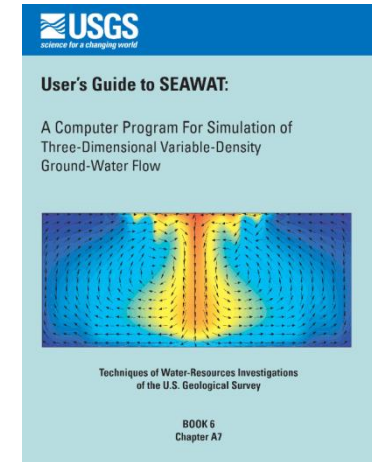
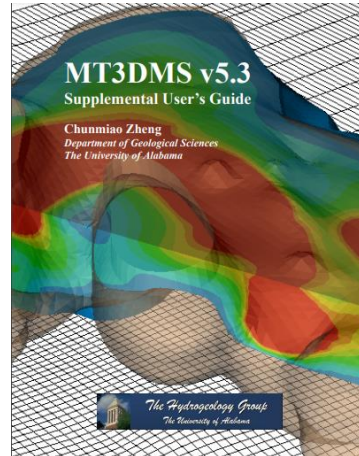
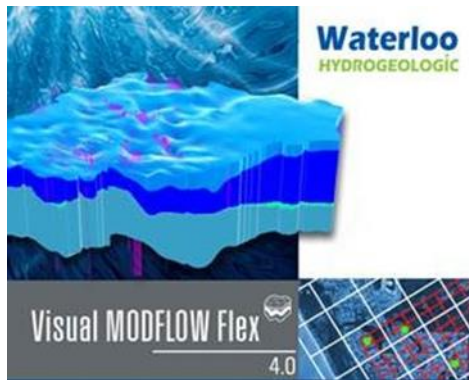
“The **computational disaster** of groundwater modeling doesn't lie in convergence failures but convergence with inaccurate solutions”

-T.P. Clement(RT<sub>3</sub>D developer)-

"**Unrecognized errors** in numerical groundwater models are becoming more possible as “user-friendly” **graphical interfaces** make it easier for models to be used (and to be misused)“

-L.F. Konikow(MOC developer)-

# 연구배경



# 연구배경

## PRB 지하수 흐름 및 오염물질 거동 상용수치모델

### 상용 소프트웨어

### 주요 기작

### 모델링 결과

지하수 흐름  
수치모델

MODFLOW

Darcy' s law  
질량보존

시공간적인 지하수 속도 및 방향 분포

다종 오염물 거동  
수치모델

MT3DMS  
RT3D

이 송  
확산+흡착+반응

시공간적인 오염물 농도분포

오염 이동 경로  
분석

MODPATH

이 송

포획구간 및 범위 산정, 체류시간

지화학반응  
수치모델

PHREEQC,  
MINTEQ,  
HYDROGEOCHEM

Complexation  
Ion exchange  
Precipitation-Dissolution  
Adsorption  
Acid-base reaction  
Redox reaction

다양한 화학종의 분포상태, 몰농도,  
2차 광물 침전

# 연구배경

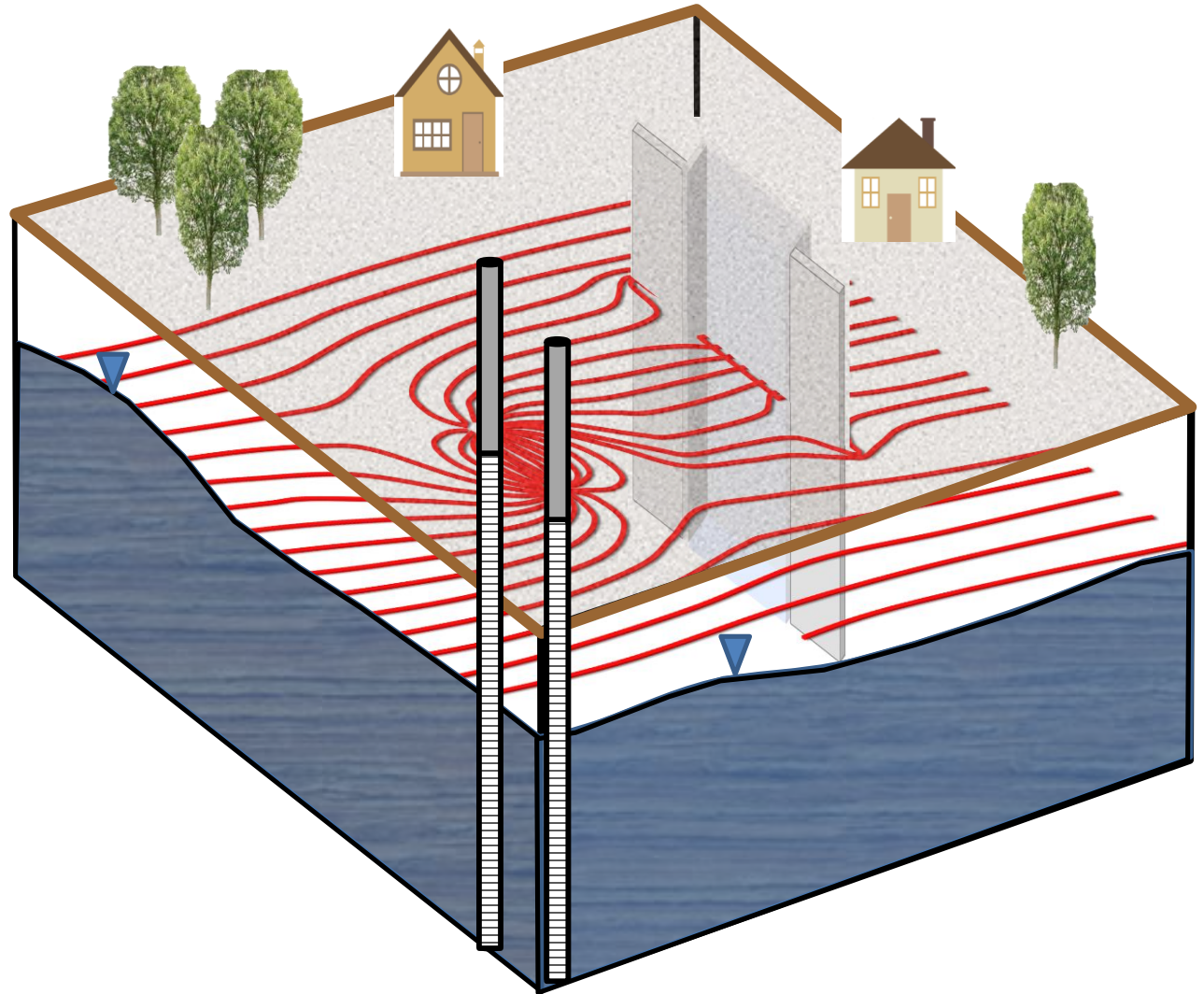
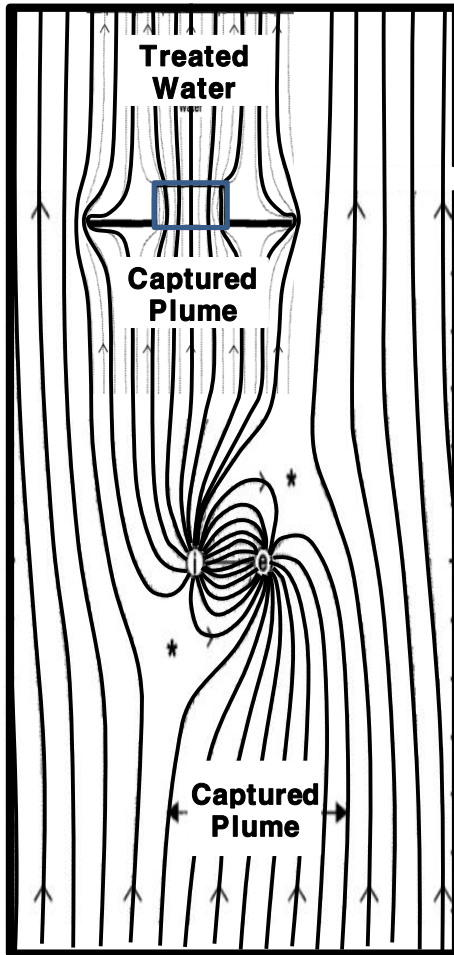
## PRB적용 기존 수치 연구 방법

PRB 특성	상용모델
■ PRB 설계 인자(두께)등을 결정하기 위한 <u>지하수 속도 및 체류시간</u>	MODFLOW, MODPATH
■ PRB 설계인자(길이)등을 결정하기 위한 <u>포획권 및 오염경로 계산</u>	MODPATH
■ PRB 설계 인자(위치,길이,심도)등을 결정하기 위한 시간에 따른 <u>오염운의 분포상태 계산</u>	MT3DMS
■ PRB 원위치 처리 효율 평가를 위한 시간에 따른 PRB 반응에 의해 <u>상 하류 농도차이 계산</u>	RT3D, MT3DMS

투수성 반응벽체의 **장기 성능 저하**를 평가하기 위한 **이차광물침전, 미생물학적인 파울링**에 의한 공극감소에 따른 수리전도도 감소를 평가하는 범용 또는 **상용소프트웨어는 존재하지 않음**

# 연구내용

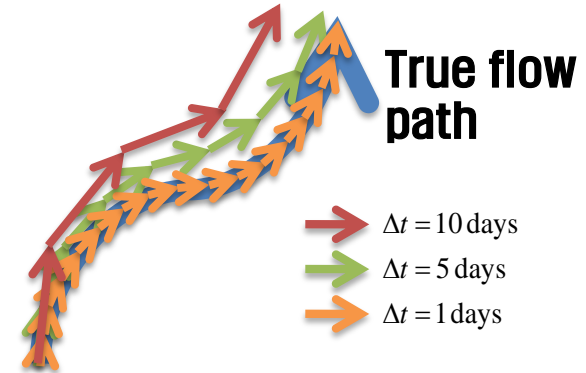
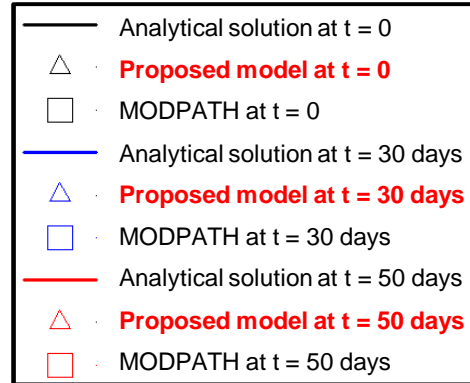
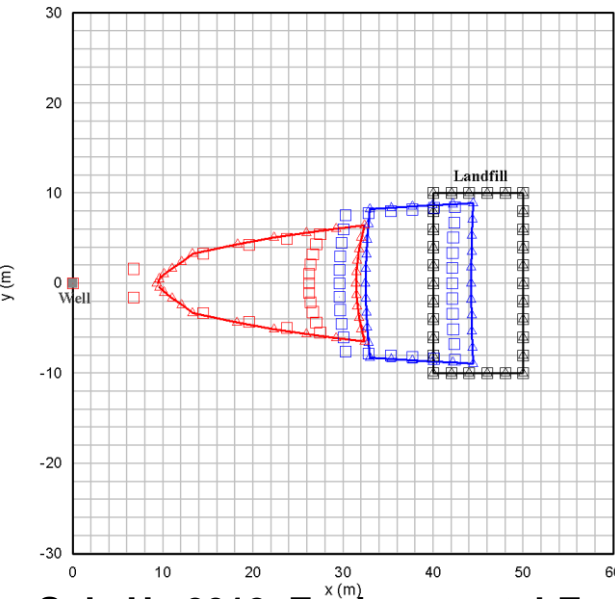
## 능동적 수리제어기능을 가진 PRB 개념 모형 (IETWPS-PRB)





# 연구내용

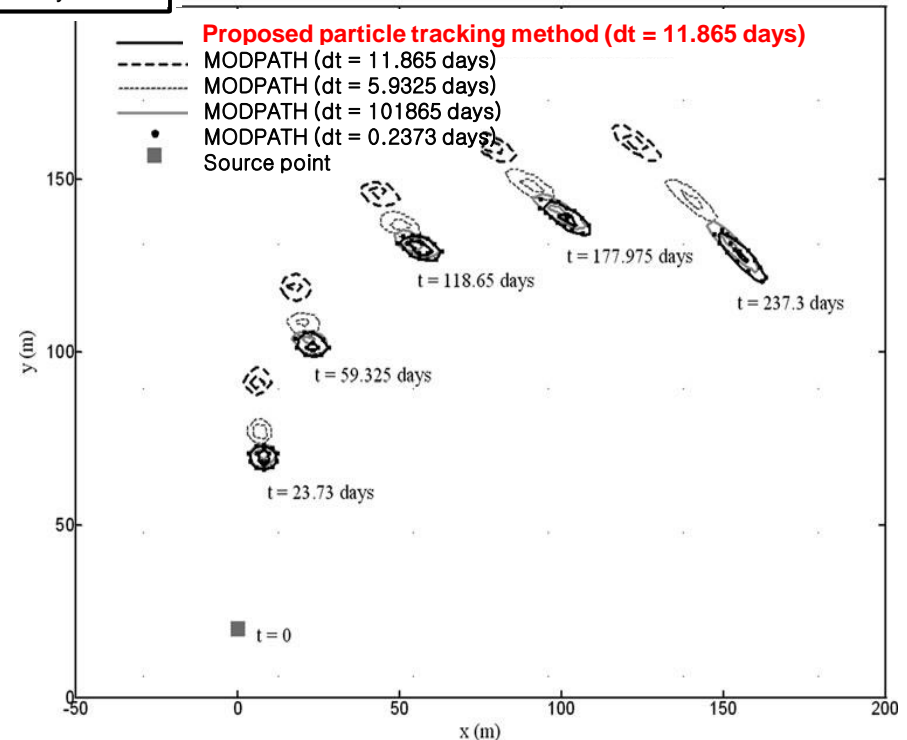
## 새롭게 향상된 입자추적기법을 이용한 능동형 수리제어 수치모의 수행



Suk, H., 2012, Environmental Engineering Science

**MODPATH와 석희준(2012)년에 개발한 입자추적모의프로그램 결과와의 정확성 및 효율성 성능 비교**

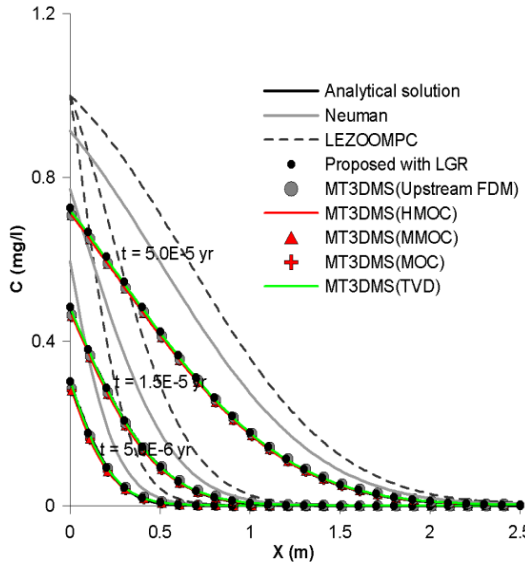
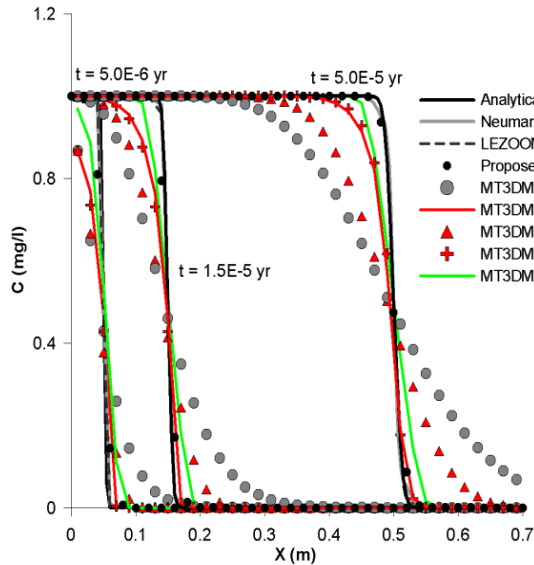
**MODPATH보다 오염물 입자의 거동 모사에서 50배 이상 정확성과 수치연산 효율성을 가짐**



Suk, H. and Yeh, G. T., 2009, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE

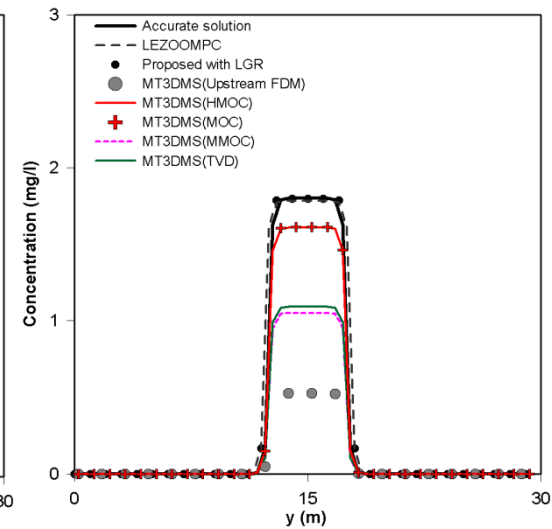
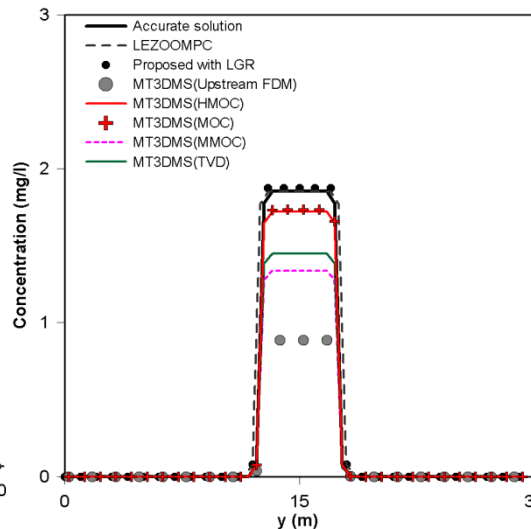
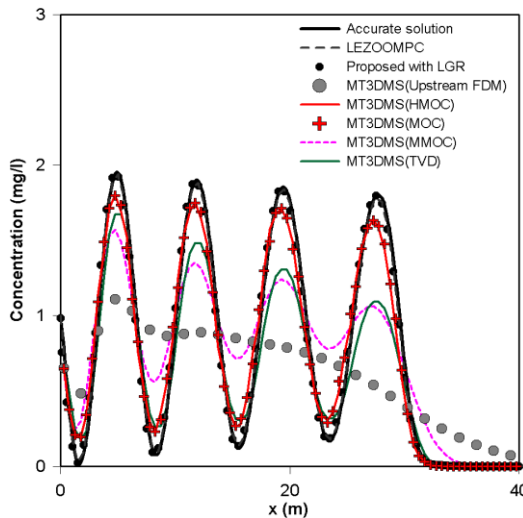
# 연구내용

## 새롭게 향상된 오염물 거동 프로그램을 이용한 오염운 변화 수치모의



MT3DMS와 새롭게 향상된 석희준(2016)에 개발한 오염물 거동 향상 프로그램을 이용한 오염운 변화 수치모의 수행

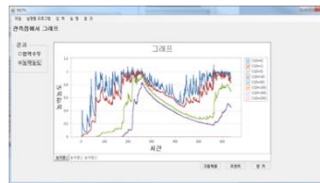
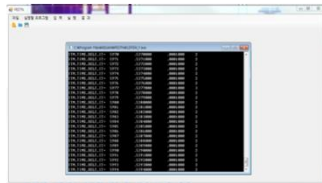
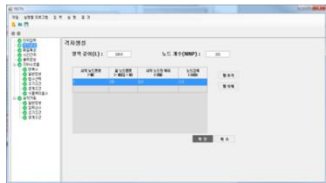
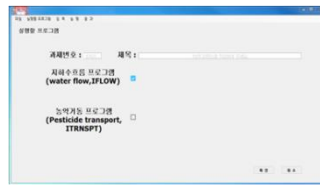
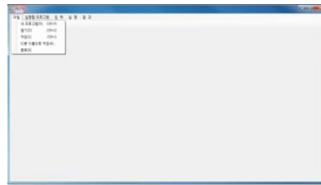
지하수 속도가 빠르거나 불균질성이 높은 지역에서 오염운 거동시 MT3DMS는 정확하게 수치모의결과를 얻을 수 없으나, 석희준(2016)에서 개발한 프로그램은 정확한 수치모의 수행 가능





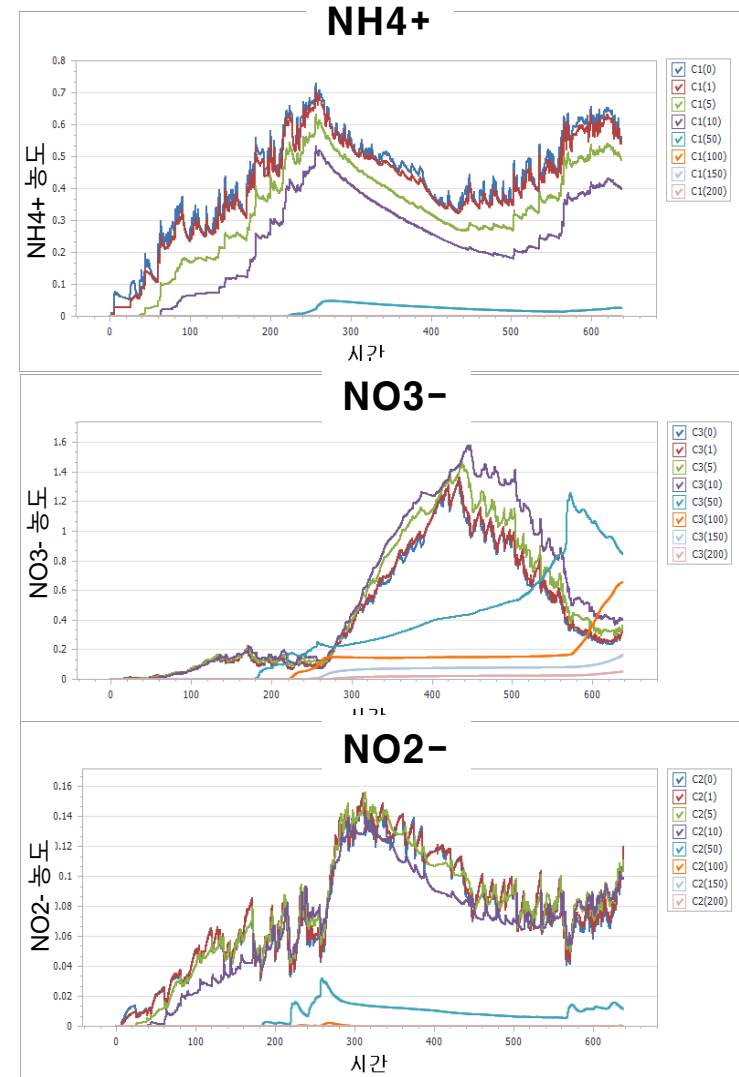
# 연구내용

## 새롭게 향상된 오염물 거동 프로그램을 이용한 질산성 질소변화 수치모의



지하수 및 토양과 같은 농업 환경 내에서 **살포농약 및 질산성 질소**의 거동 예측 모델 개발 (**PESTN 소프트웨어**)

살포농약별, 토양 특성별, 강우 조건별, 증발산, 관개 방법 및 다양한 지구화학 반응 (흡착, 휘발, 생분해 등)을 고려할 수 있는 유해 오염물질거동 예측 모델 개발



# 연구내용

## 새롭게 향상된 오염물 거동 프로그램을 이용한 질산성 질소변화 수치모의

RBS 한국농어촌방송

KFDN 식약일보

HOME > 농축수산 > 식품산업 > 뉴스종합 > 전국 > 지역문화 > 오피니언 > 영상뉴스 > 기사 검색

HOME > 농축수산 > 농업특산

[농진청] 지하수 오염 예측 가능 '한국형 농약 수직이동성 평가모델' 개발

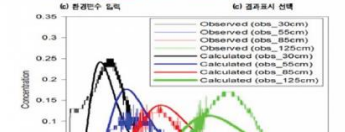
△ 하태웅 기자 | © 승인 2020.04.22 19:15 | 0 댓글 0

f t v - + ( )

선진국 수준 예측 가능... 농업지역 지하수 오염 문제 해결에 기여

[소비자TV 한국농어촌방송/전북=하태웅 기자] 농촌진흥청(청장 김경규)은 토양 중 잔류농약의 수직이동성 평가모델(PESTN)을 개발했다고 밝혔다.

토양 등 환경에 남은 농약은 지하수나 하천수 등 생태계에 2차 오염원으로 작용할 수 있어 이동성 평가모델로 예측 후 사전 관리를 통해 예방하는 것이 중요하다.



소비자 TV X SKYLife 위성방송 164번

FOODPOLIS 한국식품산업융합전시관

영주광역시

생활 속 편리하기

마스크 착용 및 올바른 손씻기 생활화 하기

동해 일일 일출 장소는

평문하지 않기

문화체육관광부, 1600 콜센터

민도서와 함께

사단법인 한국장애인농축산기술협회

최신뉴스

전라북도 대학 산학협력 사업 협의회 개최

솔리스 카페라다, 제철 향기연 주와 유란의 사랑노래 연주회 열려

전북 도내 연역 사해의 거러두

종합 식품/건강 의료 제약/의료기기 위해정보 화장품 기업/유통/외식 동영상뉴스 오피니언 검색

### 농약 수직이동성 평가모델 국내 최초 개발

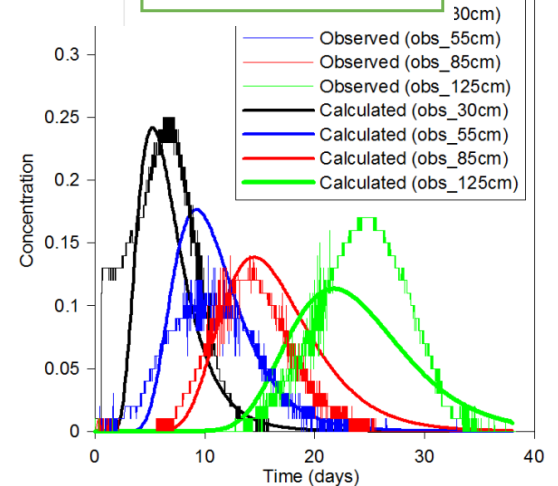
선진국 수준 예측 가능... 농업지역 지하수 오염 문제 해결에 기여

식약일보 | 입력 : 2020/04/23 [17:01]

농촌진흥청(청장 김경규)은 토양 중 잔류농약의 수직이동성 평가모델(PESTN PESTN: Pesticide and Nutrient Transport & Fate)을 개발했다고 밝혔다.

토양 등 환경에 남은 농약은 지하수나 하천수 등 생태계에 2차 오염원으로 작용할 수 있어 이동성 평가모델로 예측 후 사전 관리를 통해 예방하는 것이 중요하다.

일부 선진국에서 개발한 이동성 평가모델이 있으나 우리나라와는 환경이 달라 바로 적용하기가 어렵고 가격이 높아 한국형 농약 이동성 평가모델의 개발이 필요했다.

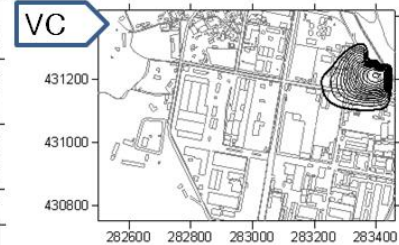
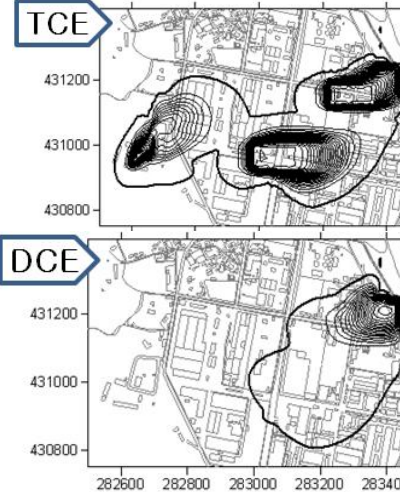
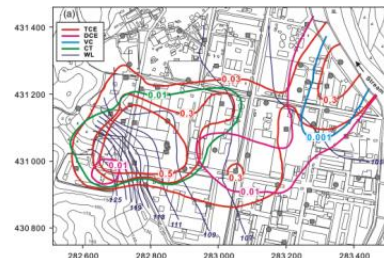
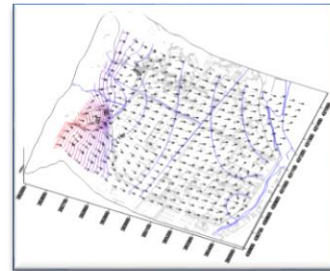
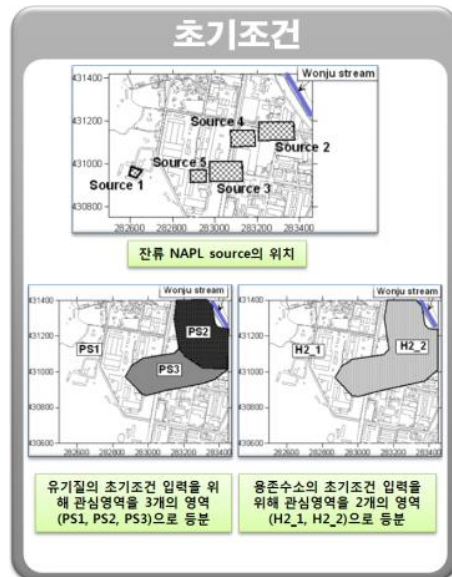


지하수 및 토양과 같은 농업 환경 내에서 살포농약 및 질산성 질소의 거동을 PESTN 모델을 이용해서 현장 실험 및 라이지미터 결과와 비교 분석

# 연구내용

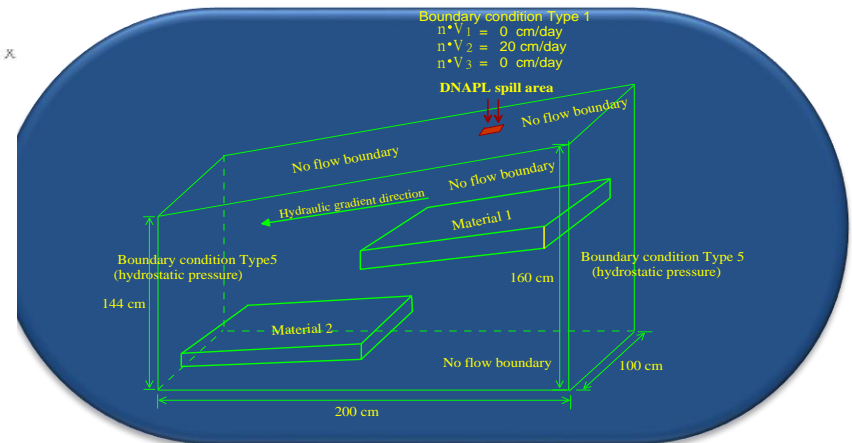
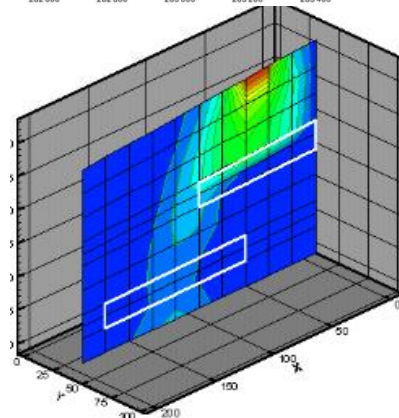
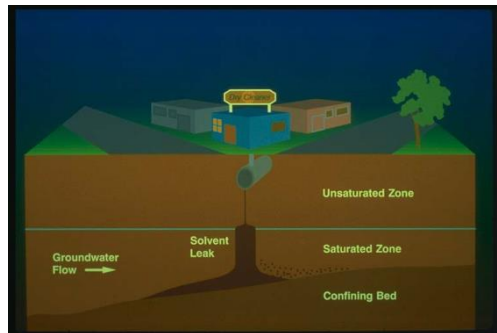
## 불수용성 TCE 및 탈염소화 반응을 모사하는 새로운 수치 모형 적용

환경부 가이아 사업 시 TCE 거동 및 탈염소화 반응을 모사하는 **소프트웨어 개발**  
원주우산공단에 TCE 및 자핵종 거동의 **장기 예측을 위해서 수치모의 수행**



● 개발된 모델을 현장 우산공단에 적용하여 가능한 복수 잔류 NAPL 오염원을 파악하고자 하였음

Heejun Suk(2016), Advances in Water Resources

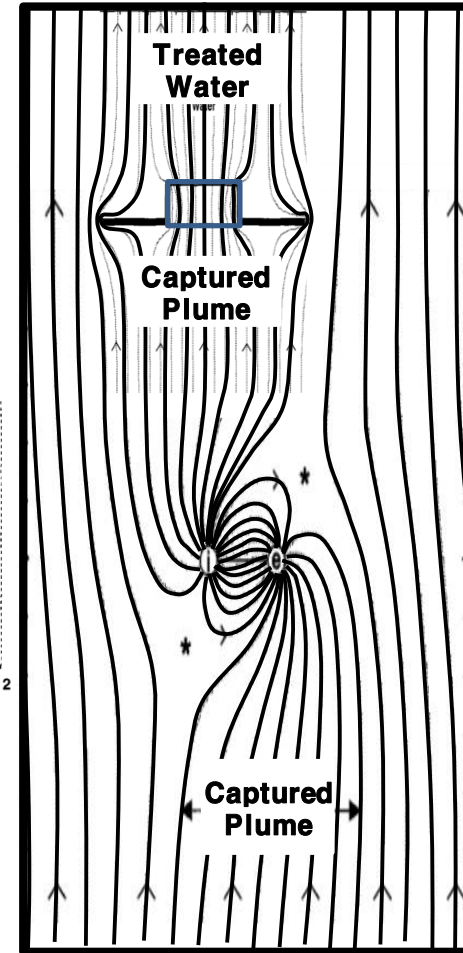
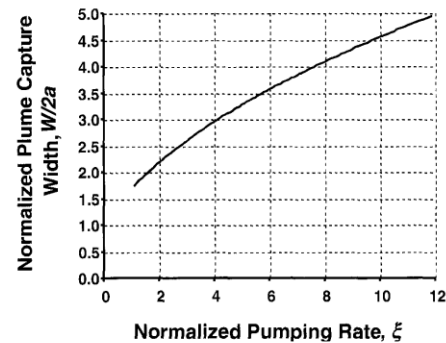
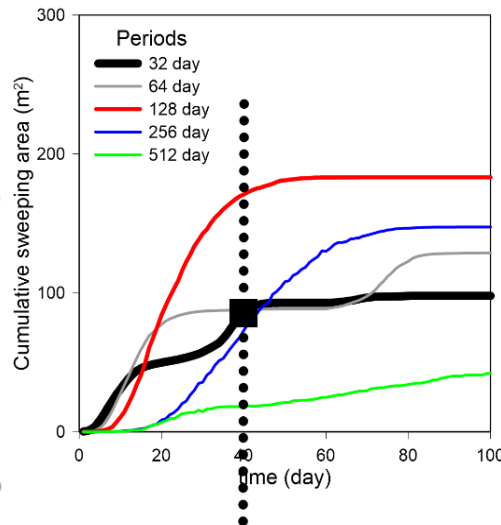
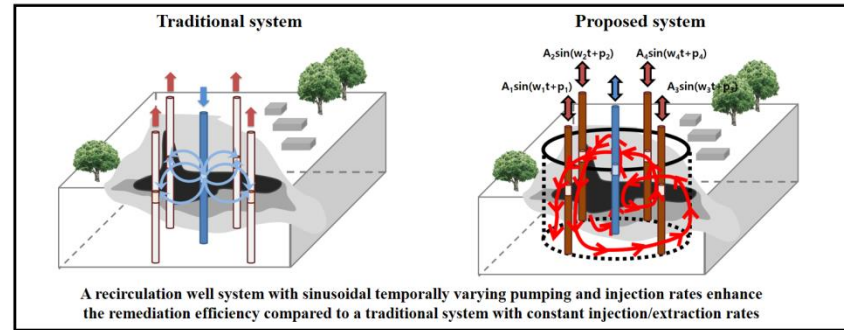
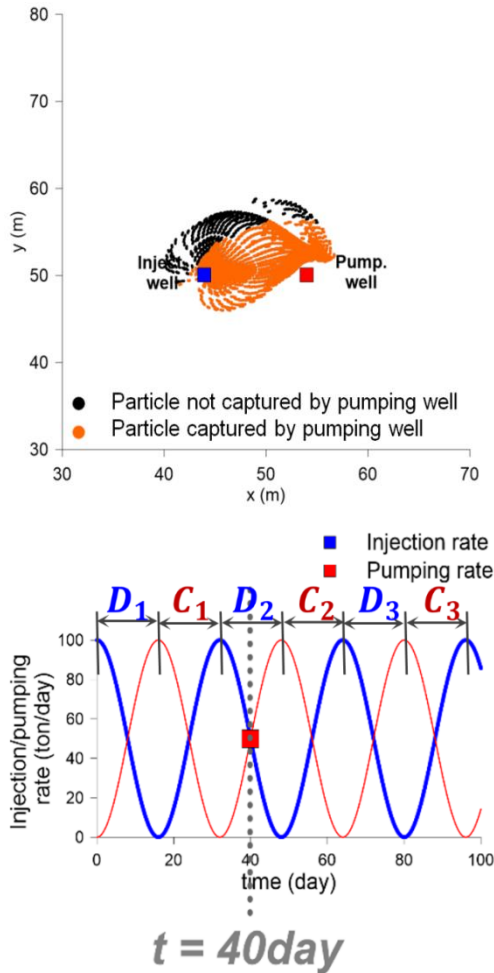


Suk, H. and Yeh, G.T.(2007), Journal of Hydrologic Engineering, ASCE



# 연구내용

## 능동적 수리제어의 효과적인 성능을 위한 설계 인자 수치모의 수행



Suk et al.(2021), Journal of Hydrology

양수/주입 시스템의 상류 오염원 포집 면적을 늘리고, 경제효율적인 운용을 유지하기 위한 가변주입양수기법을 적용. 최적의 주입 및 양수량 크기 및 사인함수 형태의 주입 및 양수정 운영시 최적의 주기 결정을 위한 모델링 수행

# 연구내용

## 능동적 수리제어의 효과적인 성능을 위한 설계 인자 수치모의 수행

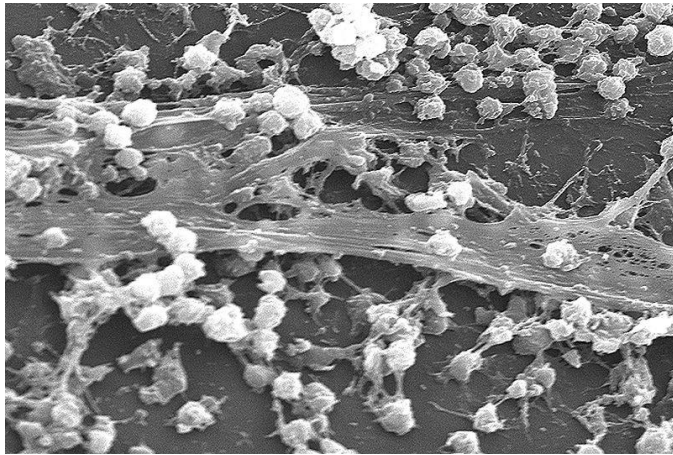
양수/주입 시스템의 **가변운영기법**을 통해서 **재순환되는 영역 면적**의 시간에 따른 변화를 개발된 수치모델을 이용해서 **수치모사를 수행하는 동영상**



01\_32days\_IP\_Q.mp4

# 연구내용

## 생분해 반응에 의한 미생물학적인 성장에 따른 공극 감소 및 수리전도도 변화 모델링 수행(Biofouling)



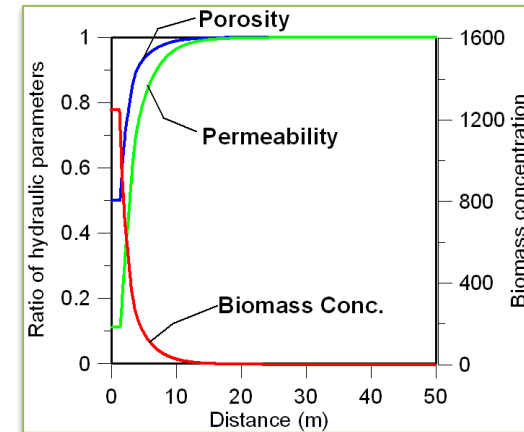
미생물 성장에 의한 수리전도도 변화를 고려하는 모델 개발

Permeability reduction

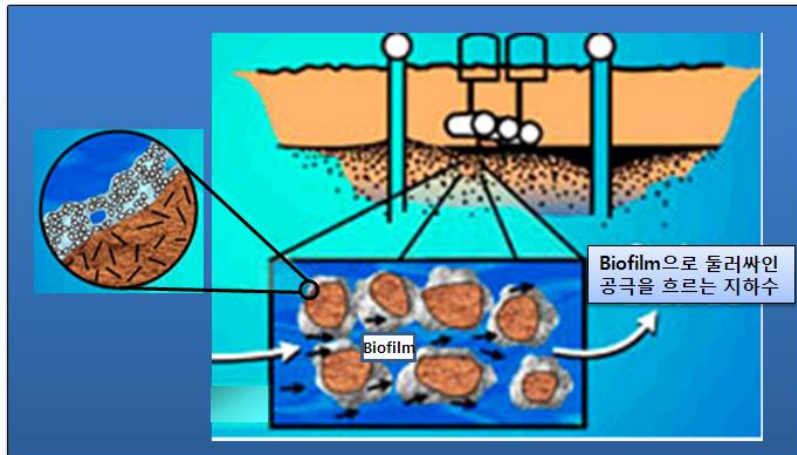
$$k_b = \frac{kn_b^{1/2}}{8} \left[ \int_{r_{ob}}^{R-L_f} \frac{r^3}{(r+L_f)^2} f(r+L_f) dr \right]^2$$

Porosity reduction

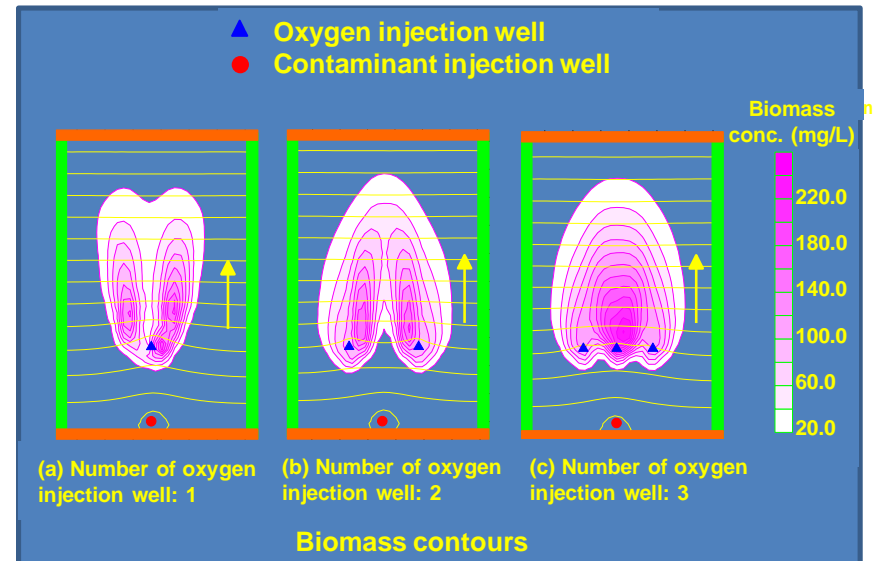
$$n_b = \int_{r_{ob}}^{R-L_f} \frac{r^2}{(r+L_f)^2} f(r+L_f) dr$$



미생물이 성장하여 입자를 둘러싼 모양



토양 내에 분포하는 미생물





# 연구내용

## PRB내 Mineral fouling에 의한 공극율 및 수리전도도 감소 수치 모델 개발

양수/주입 및 PRB와 주변 지하수 배경 흐름(수리분포도 특성)에 따른 지하수 수두 구배 **지하수 흐름 수치 모의**

**수리전도도 변화에 따른 지하수 흐름 변화**

지하수 이송 및 확산과 생지구화학적 산화/환원 반응에 의한 **지하수 오염물 농도 분포 수치 모의**

- ZVI Corroison과 지하수 수질특성에 의한 이차광물의 **침전 반응**
- 생물학적 **황산염 환원반응**, 질산염, 철 **부식반응**
- 주요 양이온, 음이온 거동 및 열역학적 평형에 근거 반응

침전된 이차광물에 의한 **공극율 감소 및 수리전도도 감소 모델링**

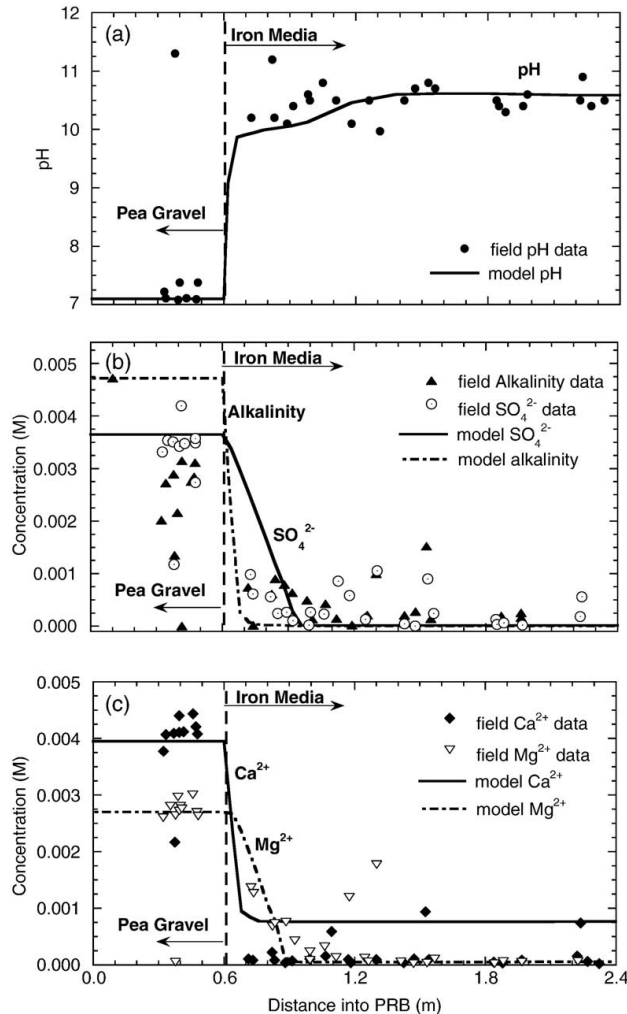
Reaction type	Reaction	Mineral formed	Solubility constant $\log(K_{eq})^a$
Aerobic iron corrosion	$\text{Fe}^0 + \text{H}_2\text{O} + 0.5\text{O}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	—	—
Anaerobic iron corrosion	$\text{Fe}^0 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2(\text{aq}) + 2\text{OH}^-$	—	—
Nitrate iron corrosion	$4\text{Fe}^0 + 7\text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^- \rightarrow 4\text{Fe}^{2+} + 10\text{OH}^- + \text{NH}_4^+$	—	—
Microbial sulfate reduction	$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2(\text{aq}) \rightarrow \text{HS}^- + \text{OH}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	—	—
Equilibrium reaction between bicarbonate and carbonate ions	$\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	—	-10.07
Dissociation of water	$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	—	-14.0
Secondary mineral precipitation/dissolution	$\text{CaCO}_3(\text{s}) \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	Calcite/Aragonite	-8.1
	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{s}) \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$	Ca-Mg-carbonate	-17.7
	$\text{MgCO}_3(\text{s}) \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	Magnesite	-7.2
	$\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^-$	Brucite	-11.2
	$\text{MnCO}_3(\text{s}) \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	Rhodochrosite	-9.3
	$\text{Mn}(\text{OH})_2(\text{am}) \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{OH}^-$	Pyrochroite	-12.9
	$\text{FeCO}_3(\text{s}) \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	Siderite	-10.5
	$\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{am}) \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	Ferrous Hydroxide	-15.2
	$\text{FeS}(\text{am}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{HS}^- + \text{OH}^-$	Ferrous Sulfide	-18.4

$$S_t = \left( S_0 - \frac{\Delta n}{T_c} \right) \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^{2/3}$$

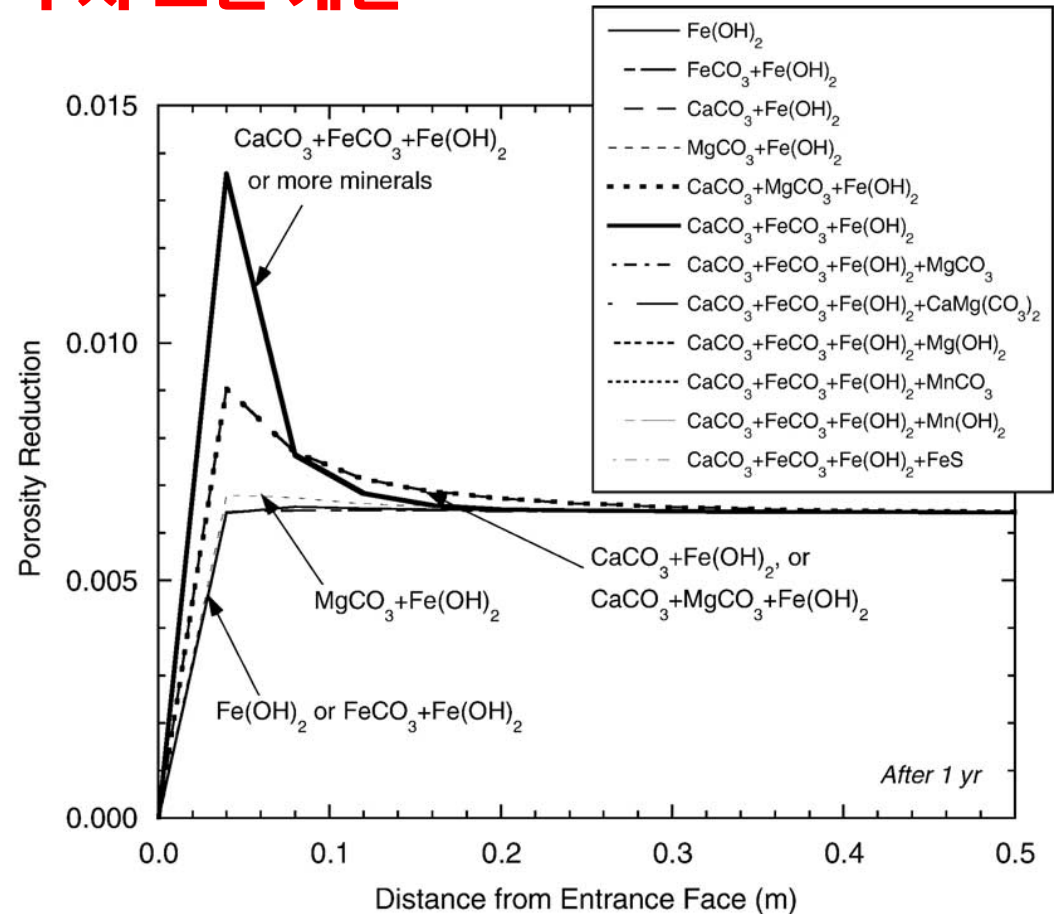
$$K_{pt} = K_{p0} \left[ \frac{n_0 - \Delta n_t}{n_0} \right]^3 \left/ \left[ \frac{1 - n_0 + \Delta n_t}{1 - n_0} \right]^2 \right.$$

# 연구내용

## PRB내 Mineral fouling에 의한 공극율 및 수리전도도 감소 수치 모델 개발



PRB 및 주변 대수층에서 주요 양이온/  
음이온 농도 변화 수치모의 결과



PRB 내부에서 탄산염 및 산화철 광물 침전에 의한 공극 감소  
분포 수치모의결과

**감사합니다**