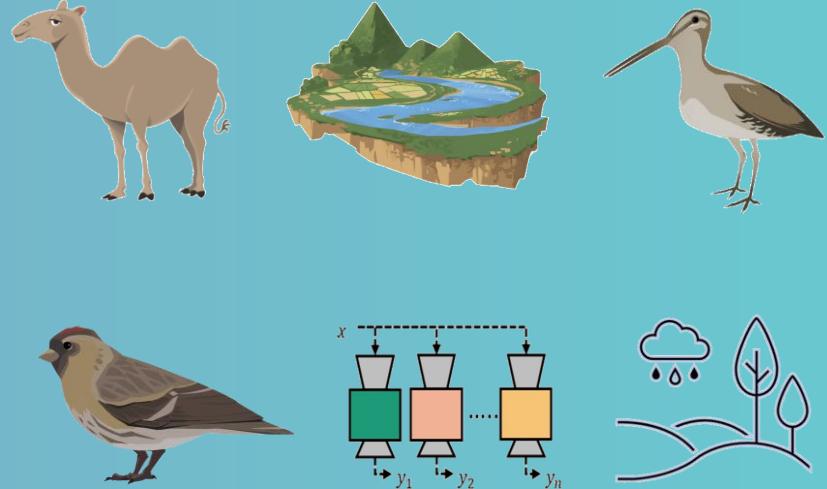


다양한 시공간 규모에 적용 가능한 한국형 유역모델 패키지 소개



2024.08

발표 순서

1

개발과정
소개



2

분포형
CAMEL



3

복합형
STREAM



4

전국규모
SNIPE



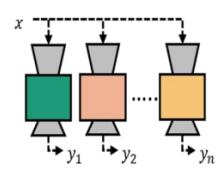
5

개략평가
REDPOLL



6

자료기반
ENNE



7

디지털트윈
WRF-Hydro
-WQ



8

시사점



유역모델 개발과정



1.1 유역모델 개발 및 적용 과정

1. 소개

➤ 개념 설계

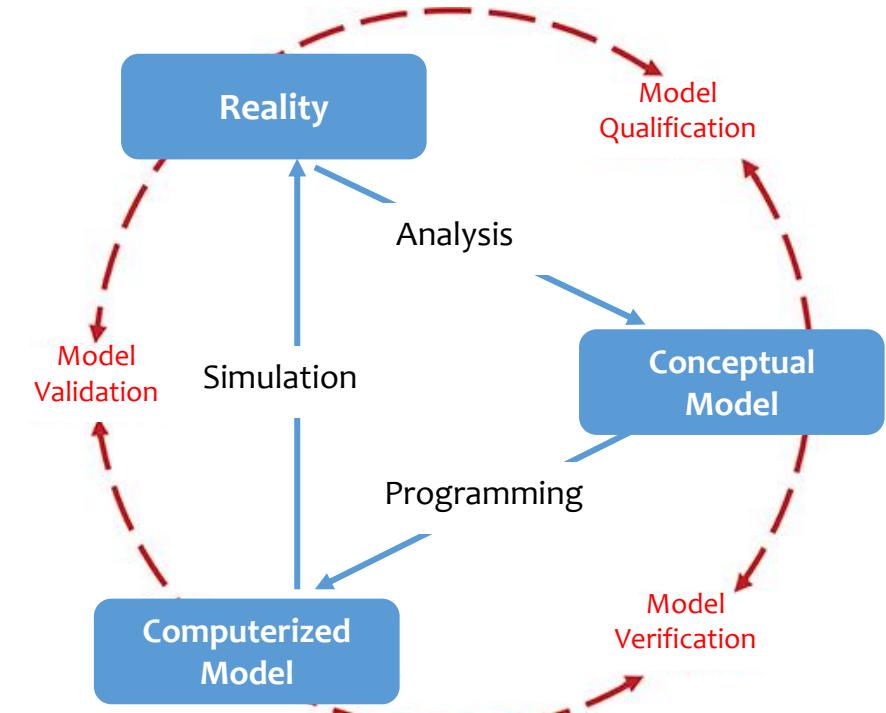
- ✓ 현실구현: 국내 유역상황, 가용자료수준, 선행연구/기술력 고려
- ✓ 고려사항: 추상화 정도, (동일 결과를 얻는다면) 단순할수록 좋다!

➤ 프로그램 코딩

- ✓ 요구사항: 코딩 기술, 개발 시간
- ✓ 고려사항: Open source 활용, 모듈화(코드 재사용)

➤ 현실 재현

- ✓ 보정 및 불확실성 평가
- ✓ 양질의 입력자료 확보
- ✓ 보정 관측자료, 매개변수 범위
 - ❖ 내부 프로세스를 확인할 수 있는 관측 자료 부재
 - ❖ 동일 결과를 도출하는 다양한 매개변수 조합이 존재
- ✓ 자동화



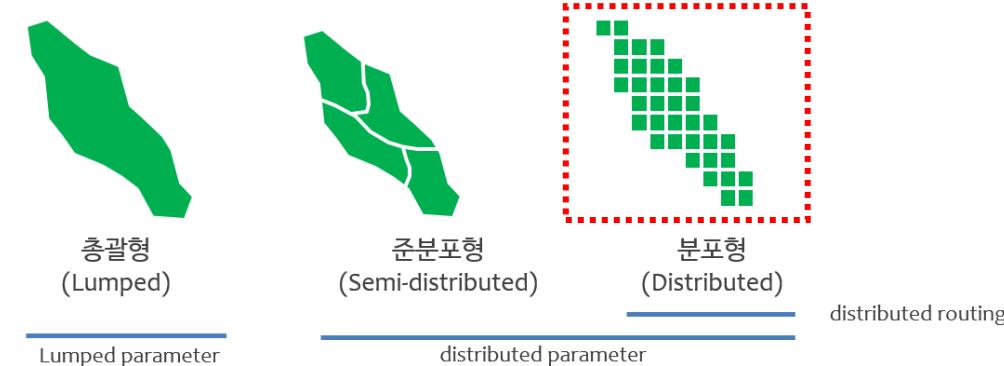
■ 모델 개발 및 적용 과정
(Schlesinger et al., 1979)

1.1 유역모델 개발 및 적용 과정

1. 소개

▶ 공간과 현상의 추상화

✓ 유역분할구조



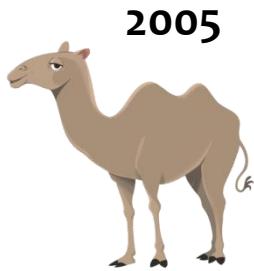
- 공간단위설정문제
(MAUP; Modifiable Areal Unit Problem)
 - 규모 효과, 구획 효과
 - 평가의 일관성 확보 필요

✓ 현상표현 수식

구분	경험식모델(데이터기반모델) (Empirical; Black box)	개념식모델 (Conceptual; Grey box)	물리식모델 (Physically-Based; White box)
장점	쉽게 적용할수있음, 빅데이터 확보 시 우수한 성능 제시	거시적 관점에서 표현	
단점	내부 프로세스 이해 불가능	보검정 필요 다수의 데이터와 계산 시간 필요	보검정의 어려움, 많은 양의 입력 데이터 요구 많은 계산 시간 필요
개념도			

1.2 HydroCore 유역모델 제품군 (1/2)

1. 모델 개발과정



2005

CAMEL

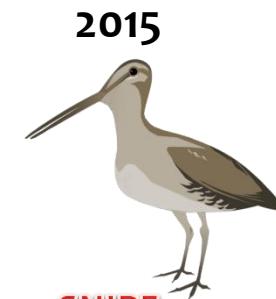
분포형 모형
소유역 상세 모의



2010

STREAM

격자기반 복합형 모델
중대형 유역 모의



2015

SNIPE

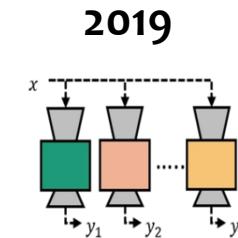
전국규모 평가모델
전국 관리방안 도출



2017

REDPOLL

중급 개략평가 모델
원단위 기법 단점 극복



2019

ANNE

양상블 유역모델과
인공신경망 모델의 결합



2024

WRF-Hydro-WQ

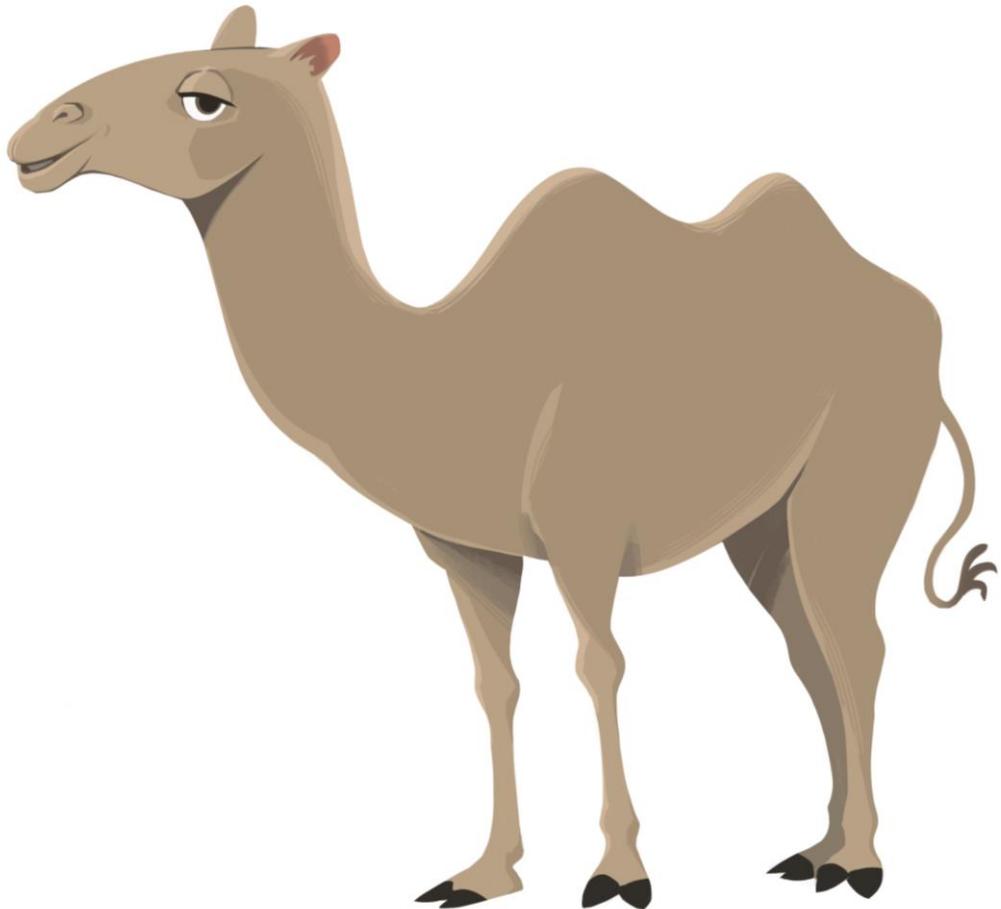
NCAR의 WRF-Hydro 모델에
기반한 수문, 수질 모의 모델

HydroCore 모델 개발 연혁

1.2 HydroCore 유역모델 제품군

1. 소개

Criteria	CAMEL	STREAM	SNIPE	REDPOLL
Watershed representation	Square grids	Square grids	Square grids	Square grids
Temporal scale	1 min. to 1 hour	1 min. to 1 hour	Daily	Daily
Water	Physically-based	Conceptual (+ Physically-based)	Conceptual (+ Physically-based)	Conceptual (CN method)
Sediment transport	Physically-based	Physically-based	Physically-based	EMC
C	O	O	O	EMC
N	O	O	O	EMC
P	O	O	O	EMC
Temperature	O (energy mass balance)	O (regression)	O (regression)	O (regression)
CSOs/SSOs	O	O	O	X



**Chemicals from
Agricultural
Management and
Erosion
Losses**

➤ CAMEL (Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses)

✓ 개발 및 적용

- ❖ 대청호 유입 지천 (금강물환경연구소, 2017)
- ❖ 농촌유역(판교리, 둔리, 소양리) (국립환경과학원 2014 – 2017)
- ❖ 대관령 한우시험장 (농촌진흥청, 2014 – 2016)
- ❖ 경기도 여주군 유역 (농촌진흥청, 2007 – 2011)
- ❖ 시화호 유역 (해양수산부, 2007 – 2010)
- ❖ 마산 우산천 유역 (국립수산과학원, 2010)
- ❖ 영국 TarlandBurn (스코틀랜드 정부, 2002 – 2005)

✓ 개발목적

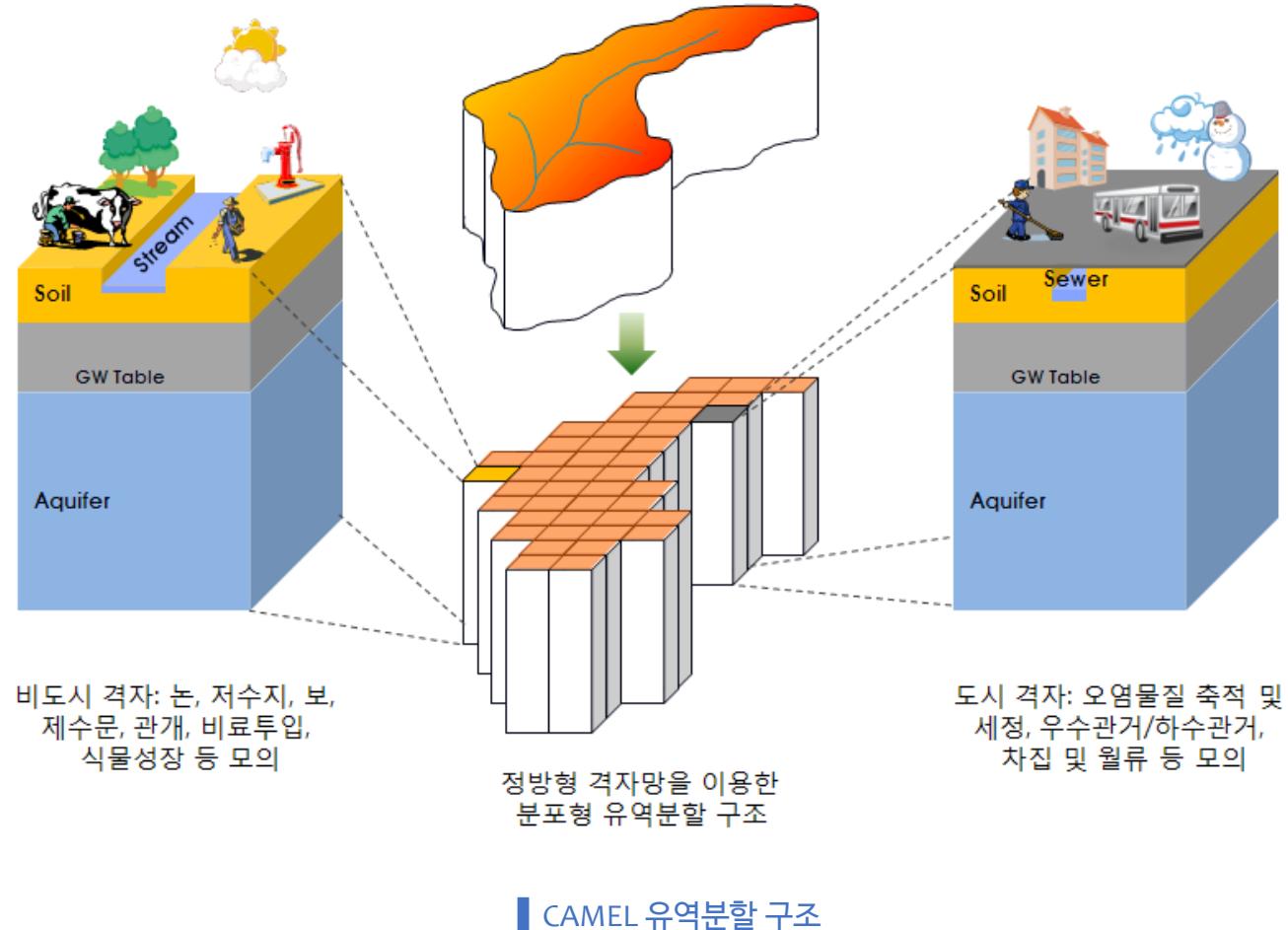
- ❖ 소규모 유역에서의 비점오염 유출과정을 상세 모의하기 위해 개발된 완전 분포형 유역모델
- ❖ 국내 환경특성을 고려한 지속적인 개선

2.1 CAMEL 특징 및 주요기능

2. CAMEL

➤ 주요 특징

- ✓ 완전 분포형 유역모델 지향
- ✓ 물리식에 기초한 개별 프로세스의 명시적 표현
- ✓ 지표수 및 지하수 통합 모의
- ✓ 소규모 유역 수문/수질 분석 및 평가에 적합



2.1 CAMEL 특징 및 주요기능

2. CAMEL

구분	주요 모의 기능
수문	<ul style="list-style-type: none">지표수 및 지하수의 통합 모의농업용 수리시설 (e.g. 논, 저수지, 보, 제수문)도시지역 우하수관거 월류수 (CSOs 및 SSOs)
입자성물질 이동	<ul style="list-style-type: none">4개 입도별 유사이동 (점토, 미사, 세립사 및 조립사)부유사 및 소류사도시지역 오염물질의 축적 및 유출 (build-up and wash-off)
탄소 변환 및 이동	<ul style="list-style-type: none">DOC, POC 및 CO₂ 모의 / 생분해성·난분해성 구분
질소 변환 및 이동	<ul style="list-style-type: none">DON, PON, DIN(NO₃, NH₄) 및 PIN 모의 / 생분해성·난분해성 구분
인변환 및 이동	<ul style="list-style-type: none">DOP, POP, DIP(PO₄) 및 PIP 모의 / 생분해성·난분해성 구분
에너지 수지	<ul style="list-style-type: none">토양 및 수체 온도, 지표면, 토양 및 수체 내 수분의 동경/융해, 지표면 적설 영향

2.2 CAMEL 주요입력자료

2. CAMEL

자료명	속성	자료출처
기상	강수량, 기온, 이슬점 온도, 운량, 풍속 및 대기압	기상청 (AWS, 기상대)
지형	지표면의 고도, 경사도, 유향 및 누적유향	국토지리정보원 10, 30 m DEM
토지피복	토지피복 분류, 토지피복별 불투수지표면 비율	환경부 토지피복분류도
식생	강우차단 저류량, 지표면 조도계수, 식생의 높이, 뿌리 깊이, 식생계수, 엽면적지수, 식생 잔재물 등	식생 조사자료
토양	토양층 깊이, 토양함수량, 포화수리전도도, 토양입도 구성비, 표토의 점착도(cohesivity) 및 유실도(detachability), 대공극 주변의 상호작용 토양 비율 등	농업과학원 정밀토양도
오염원	처리, 미처리 점오염원	환경부 전국오염원조사자료
시비량	작물별 화학비료/퇴애비 시비량, 시비시기	전국 시도 농업기술원 권장시비량

2.3 CAMEL 적용사례 (1)

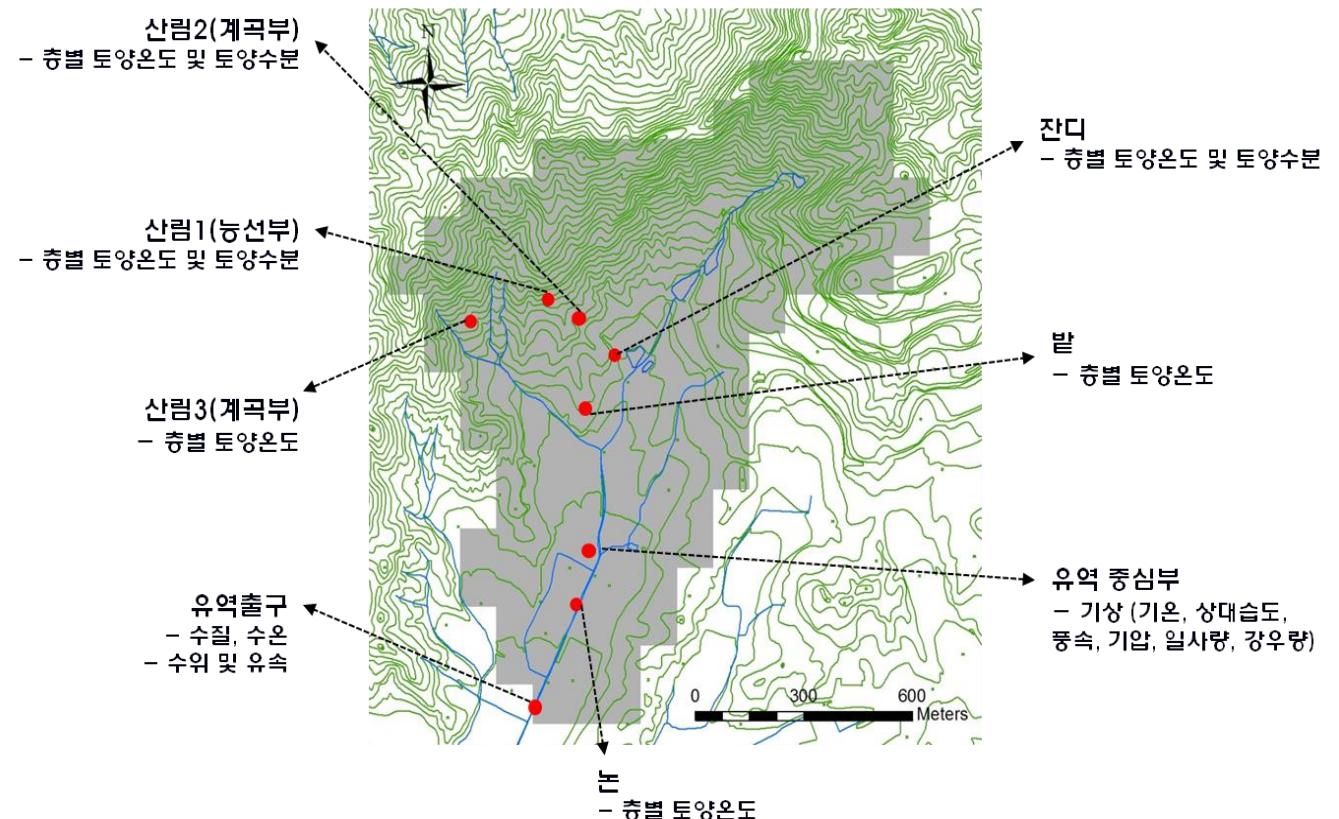
2. CAMEL

➤ 연구명

- ✓ 가축분뇨의 농경지 사용에 따른 환경영향 종합평가를 위한 통합 유역모델 및 의사결정지원시스템의 개발 (농촌진흥청, 2007 – 2011)

➤ 연구대상지역

- ✓ 여주 오계2리 유역
- ✓ 유역 면적: 1.3 km^2
- ✓ 격자 크기: $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$

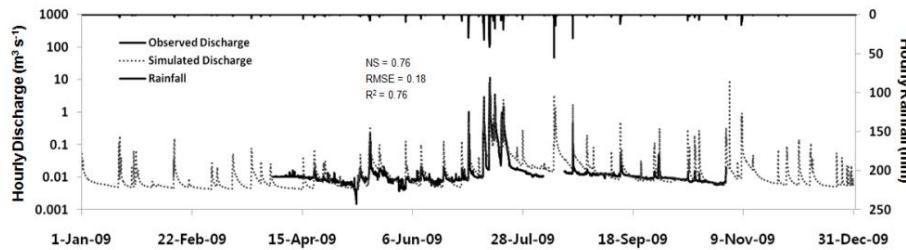
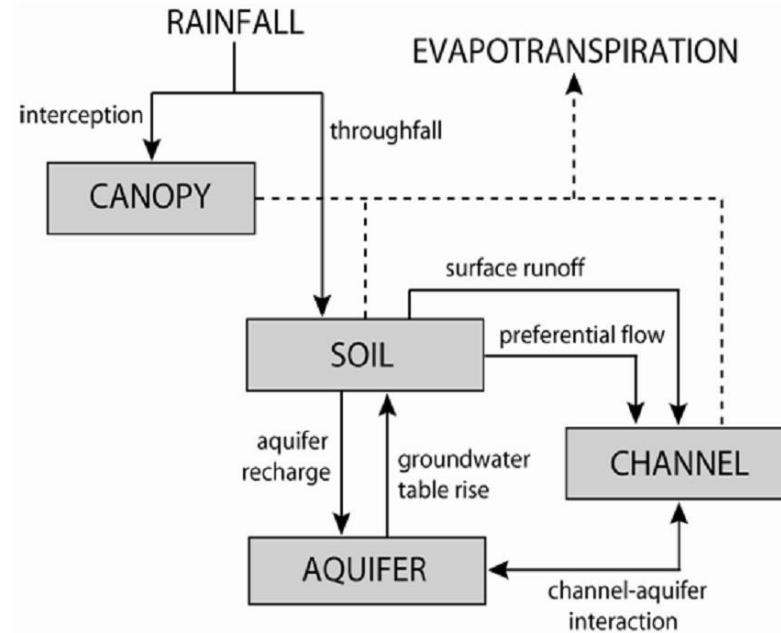


내부 프로세스 확인을 위한 관측지점별 관측내용

2.3 CAMEL 적용사례 (1)

2. CAMEL

▶ 물수지 분석



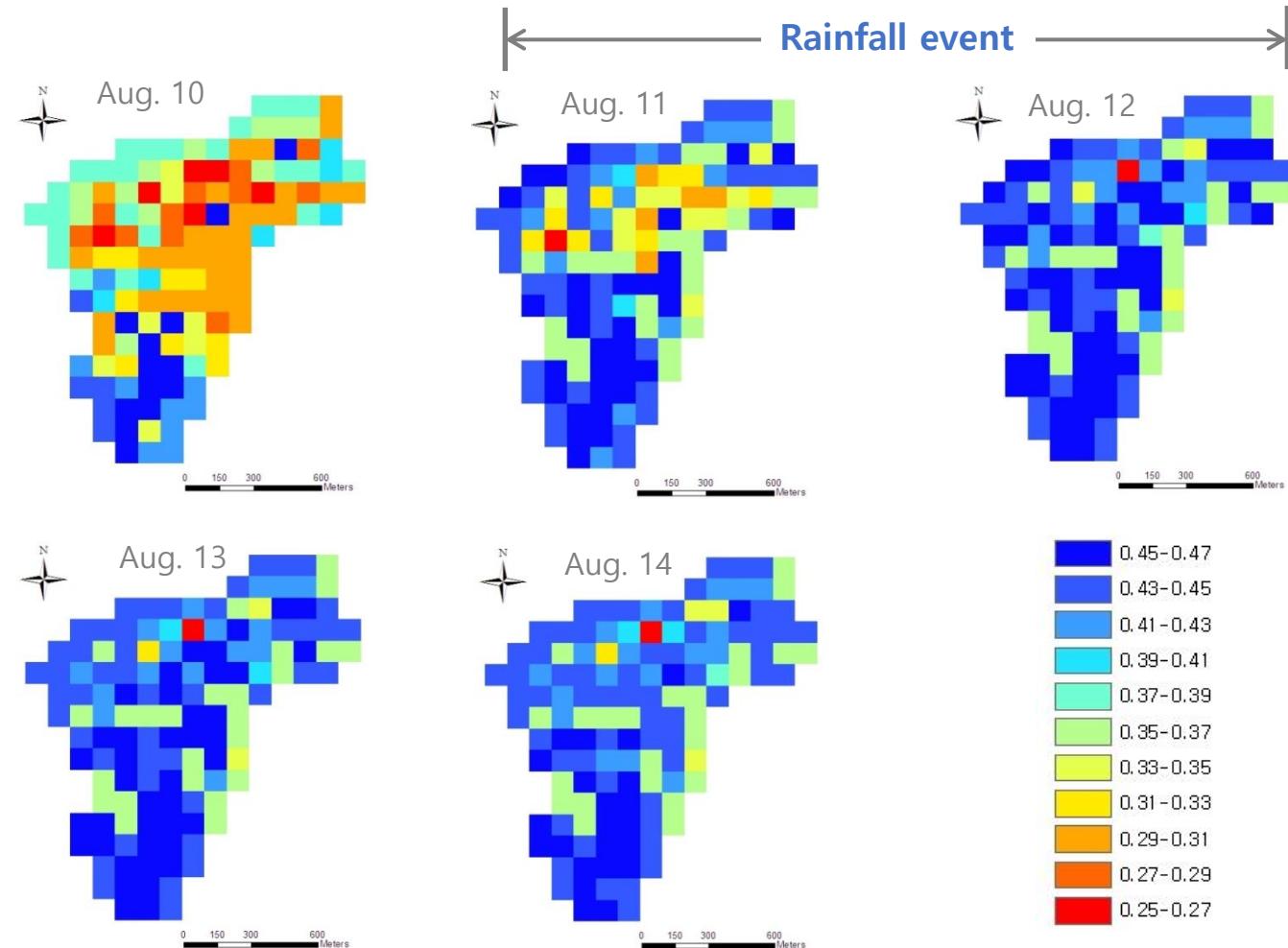
구분	단위	
	mm	%
강우량	2,331	100.0
증발산량	976	41.9
수관 증발량	89	3.8
토양, 수표면 증발량	291	12.5
식생 증산량	596	25.6
하천 유출량	1,379	59.2
지표면 유출량	1,057	45.3
침투초과	451	19.3
포화초과 강우량	580	24.9
지하수 용출량	26	1.1
중간류 유출량	272	11.7
지하수 유출량	50	2.2
총 저류량 변화	-24	-1.0

2.3 CAMEL 적용사례 (1)

2. CAMEL

➤ 토양수분함량

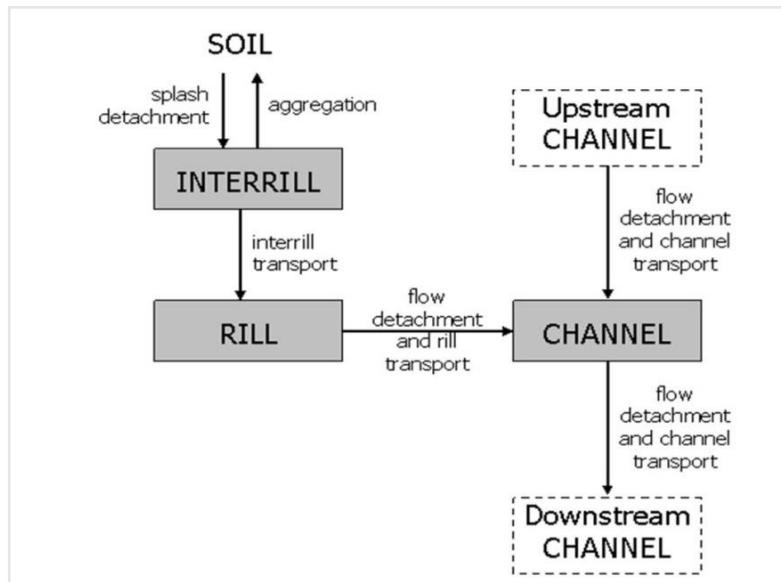
| 강우 발생에 따른 토양수분함량의 시공간적 변동



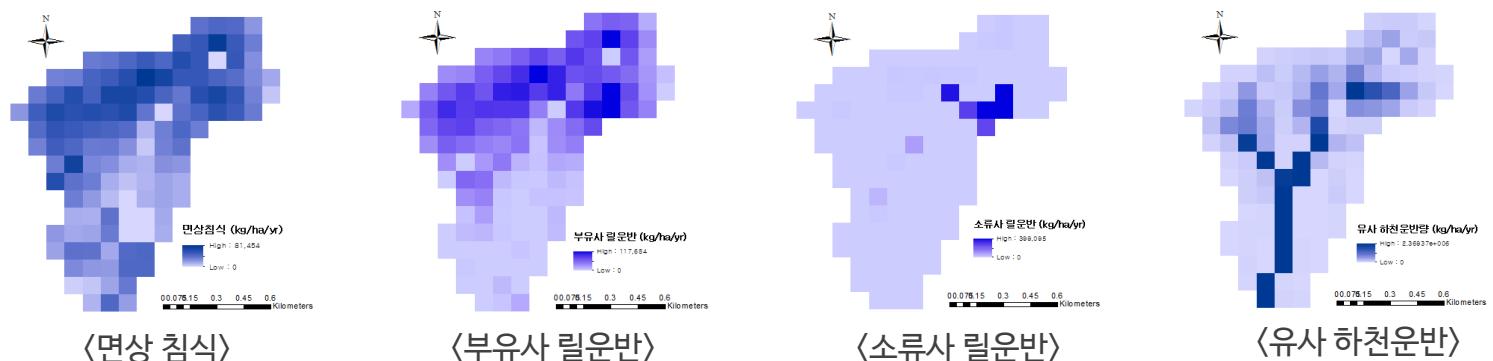
2.3 CAMEL 적용사례 (1)

2. CAMEL

➤ 유사이동



유사 침식과 운반의 공간 분포



유사 입도별 연간 침식량과 운반량 (kg/ha/yr)

운반과정/입도	점토	사질토	세립사	조립사	계
면상 침식	18,805	15,855	0	0	34,660
릴 운반	부유사	12,121	12,914	1,817	0
	소류사	58	103	275	7,726
하천 운반	부유사	3,772	4,236	1,742	0
	소류사	0	0	3	8,063
					8,066

2.3 CAMEL 적용사례 (1)

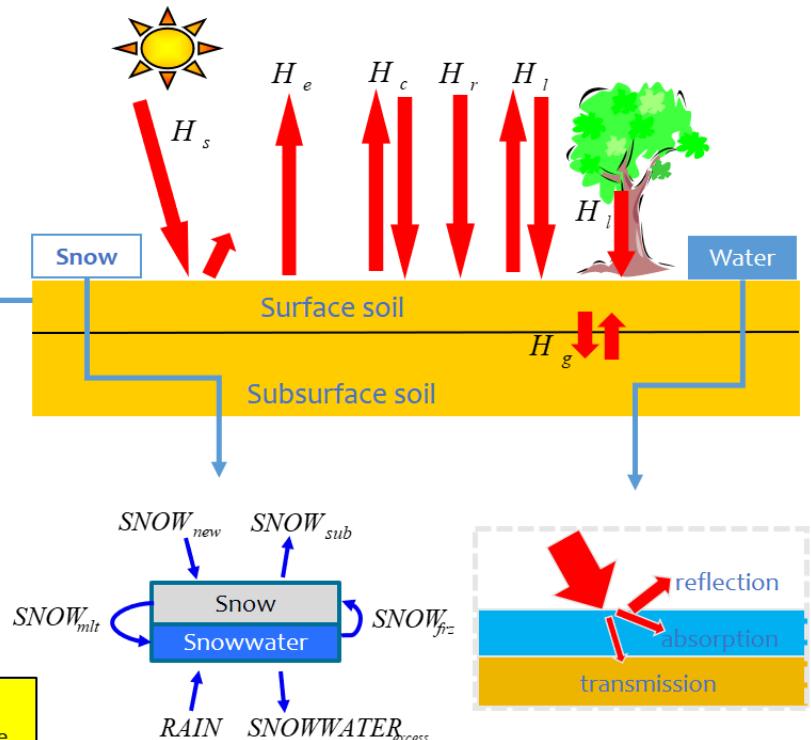
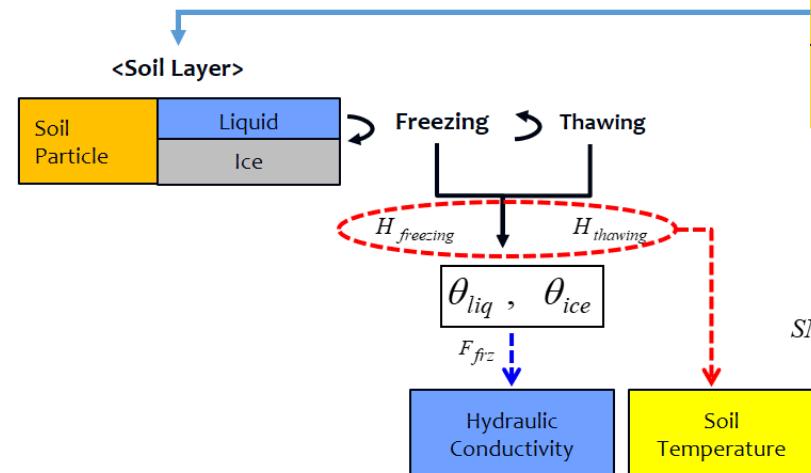
2. CAMEL

➤ 에너지 수지 모의

✓ 토양 및 수체 온도 모의: 융설과 토양 동결-융해 과정 포함

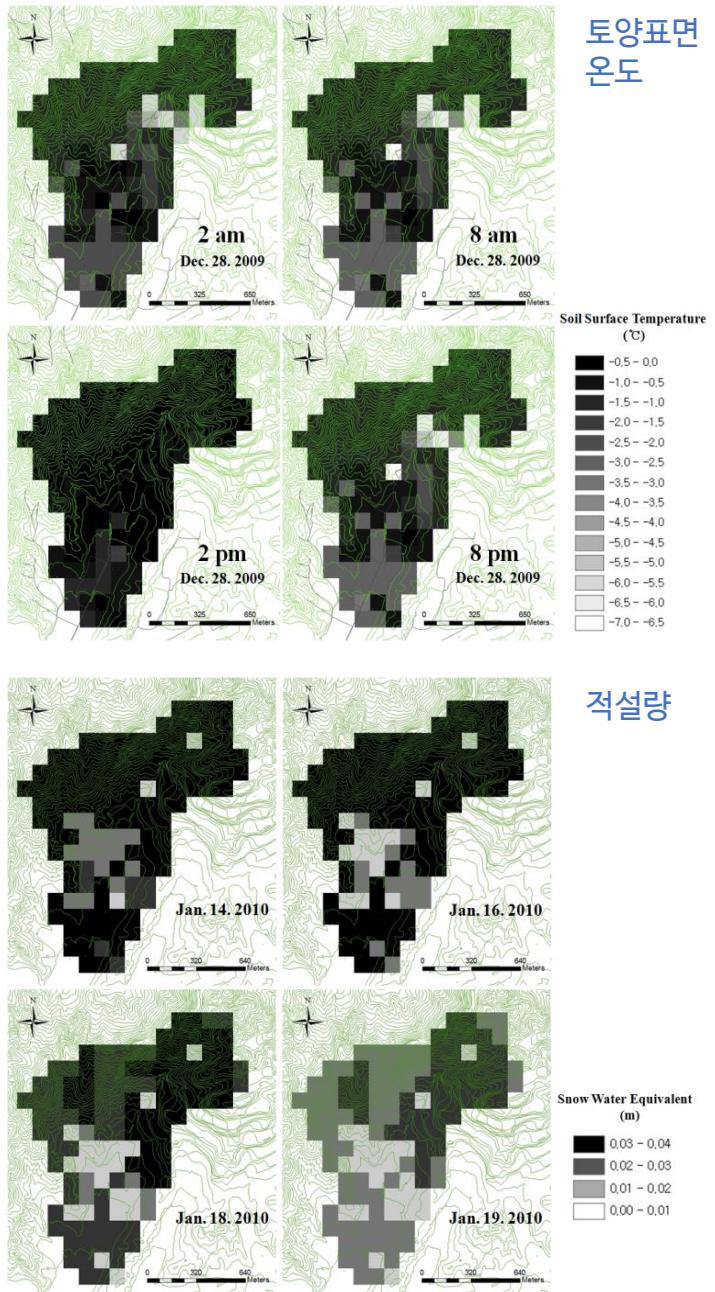
✓ 개발이유: (봄철) 비점오염유출에 큰 영향

- ❖ 미생물에 의한 영양염 분해에 영향
- ❖ 토양 내 물 흐름에 영향
- ❖ 융설과 동결-융해에 따른 봄철 유출량 영향

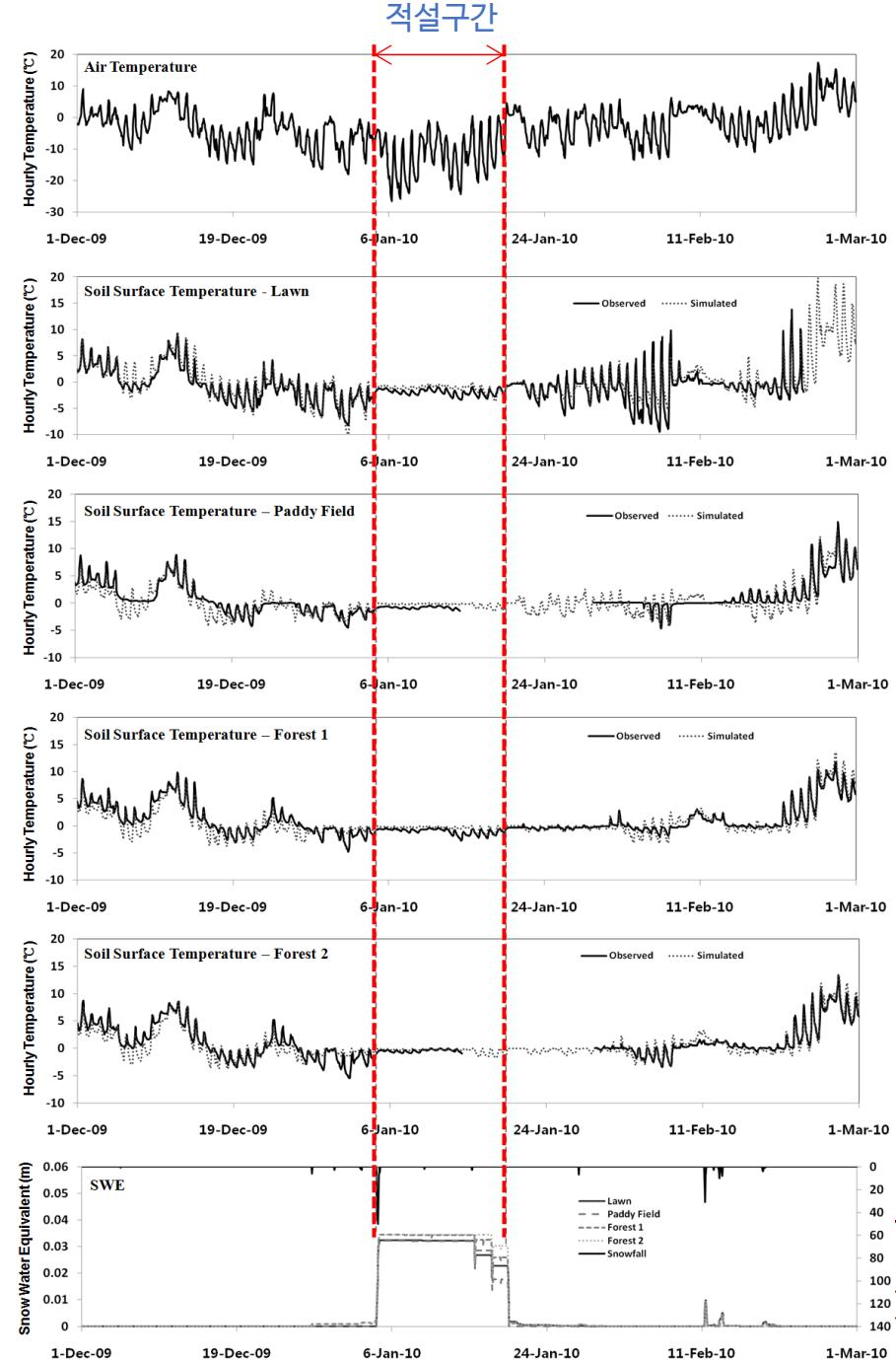


■ CAMEL에서의 에너지 수지 모의

지표면온도의 시공간적 변동



적설구간



기온

지표면온도 (잔디)

지표면온도 (논)

지표면온도 (산림1)

지표면온도 (산림2)

SWE
(Snow Water Equivalent)

2.4 CAMEL 적용사례 (2)

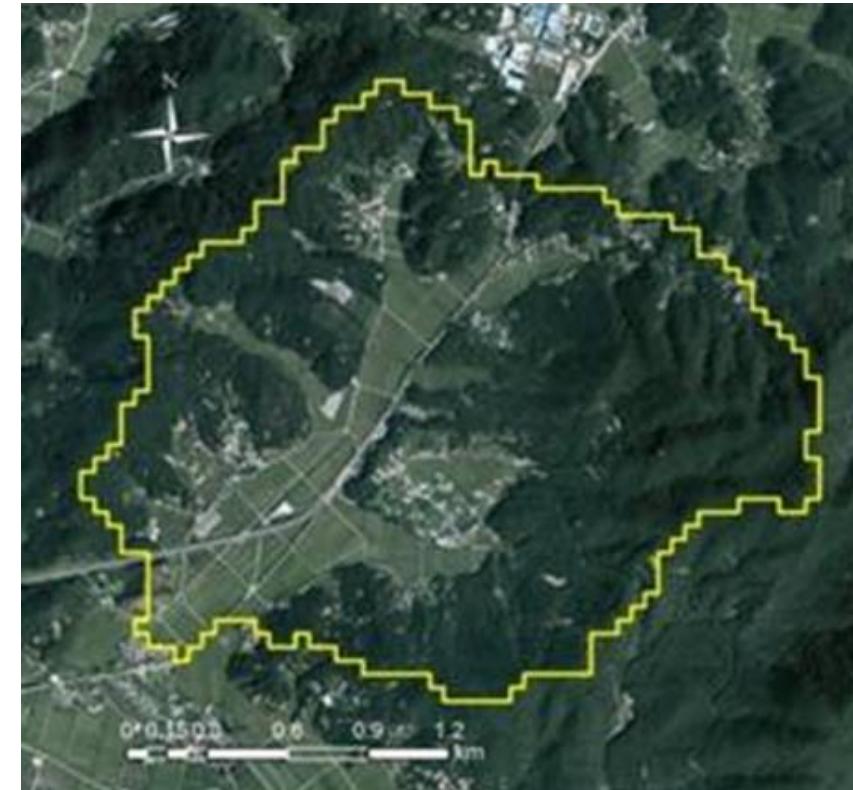
2. CAMEL

➤ 연구명

- ✓ 농축산지역 지하수 중 질산성질소 수질관리 개선방안 (국립환경과학원, 2014 – 2017)

➤ 연구대상지역

- ✓ 보령시 소양리 유역
- ✓ 유역 면적: 3.99 km^2
- ✓ 격자 크기: 50 m X 50 m



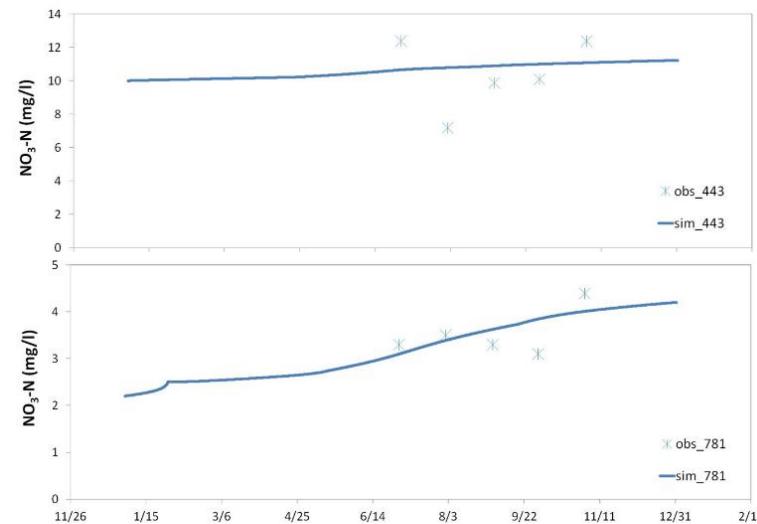
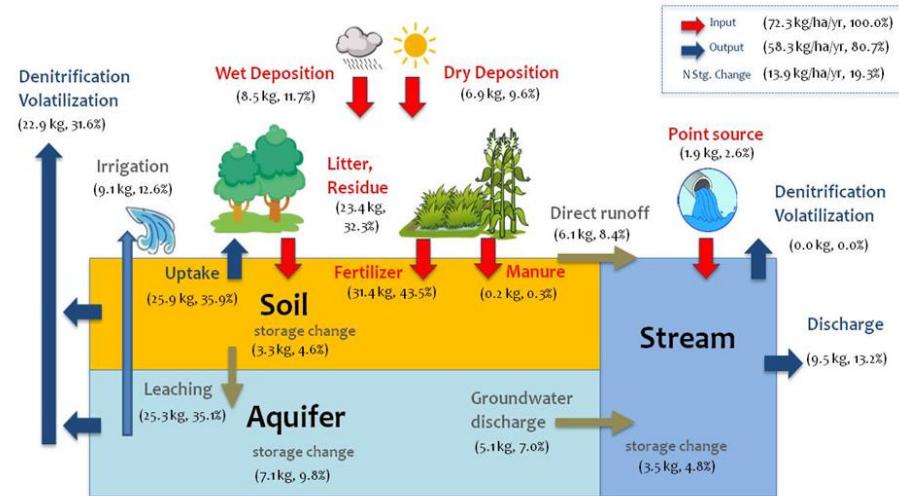
2.4 CAMEL 적용사례 (2)

2. CAMEL

➤ 질소수지 분석

■ 연간 질소수지

구분	항목	kg N/ha/yr	%
유입	식생 잔재물	23.4	32.3
	비료, 퇴액비	31.6	43.7
	대기침적	15.4	21.3
	포인트 소스	1.9	2.6
	소계	72.3	100.0
유출	식생 흡수	25.9	35.9
	유역말단 유출	9.5	13.2
	탈질휘산	22.9	31.6
	소계	58.3	80.7
저장량 변화		13.9	19.3



■ 지하수 NO₃-N 모의

2.4 CAMEL 적용사례 (2)

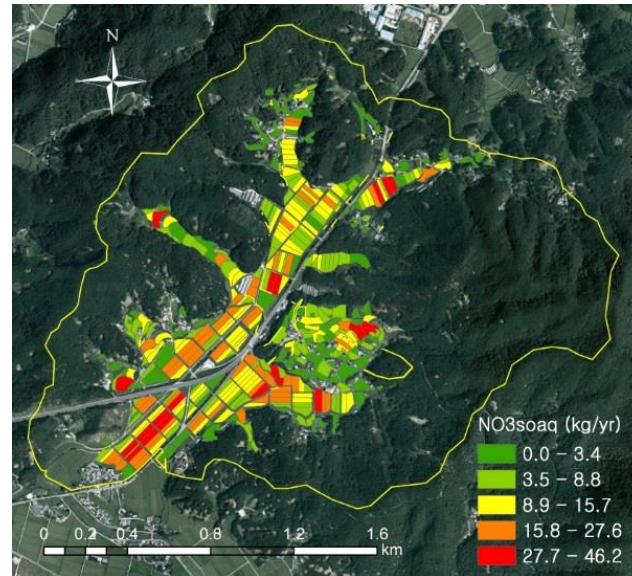
2. CAMEL

➤ 질산성질소 지하침출 관리

- ✓ 토지이용별, 공간별 기여율 평가



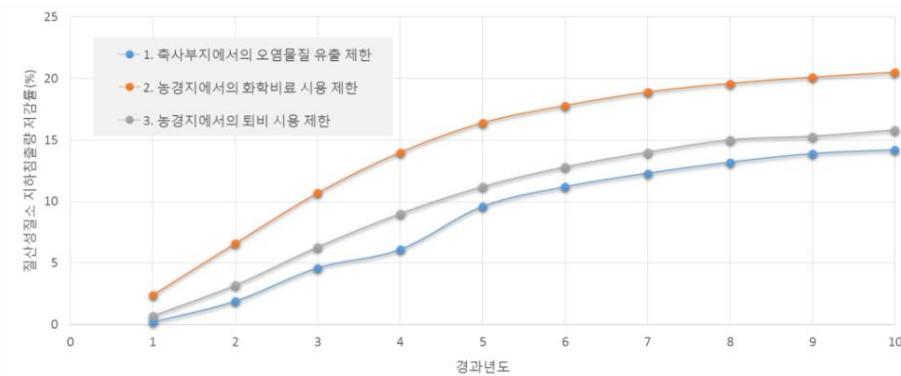
■ 질산성질소 지하침출 기여율



■ 농경지 지적별 지하침출량 모의결과

✓ 시나리오 분석

- ❖ 2014년 조건으로 10년 모의
- ❖ 화학비료 사용제한이 가장 효과적
- ❖ 토양 양분과잉으로 장기간 관리가 필요



■ 질산성질소 지하침출량의 연도별 변화



Spatio-
Temporal
River-basin
Eco-hydrology
Analysis
Model

▶ 유역 면적이 커질수록 계산량이 기하급수적으로 증가

- ✓ 분포형 모델 CAMEL 적용예(천안 병선천 유역)

- ❖ 면적 : 461 ha, 격자크기 : 50 m
- ❖ 소요시간 : 12 시간, 모의항목 : 물, 유사, 탄소, 질소, 인

- ✓ Fully-cascading approach

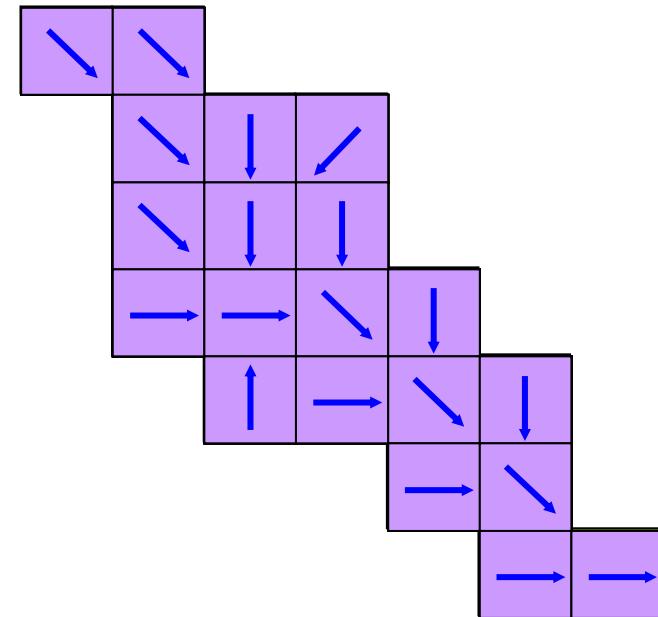
▶ 보정 및 검정의 어려움: 보정 매개변수 개수의 증가

▶ 많은 입력자료의 요구

▶ 초기 조건의 민감성



▶ 병천천 유역



▶ 순차적 모델링

➤ STREAM (Spatio-Temporal River-basin Eco-hydrology Analysis Model)

✓ 개발 및 적용

- ❖ 새만금 유역 (금강유역환경청, 2020)
- ❖ 시화호 유역 (해양수산부, 2011 ~ 2020)
- ❖ 금강 유역 (해양수산부, 2014 ~ 2019)
- ❖ 경안천 유역 (국립생태원, 2018)
- ❖ 자란만 유역 (국립수산과학원, 2017 ~ 2019)
- ❖ 강진만 유역 (국립수산과학원, 2016)
- ❖ 새만금 유역 (농어촌 연구원, 2013 ~ 2015)

✓ 개발목적

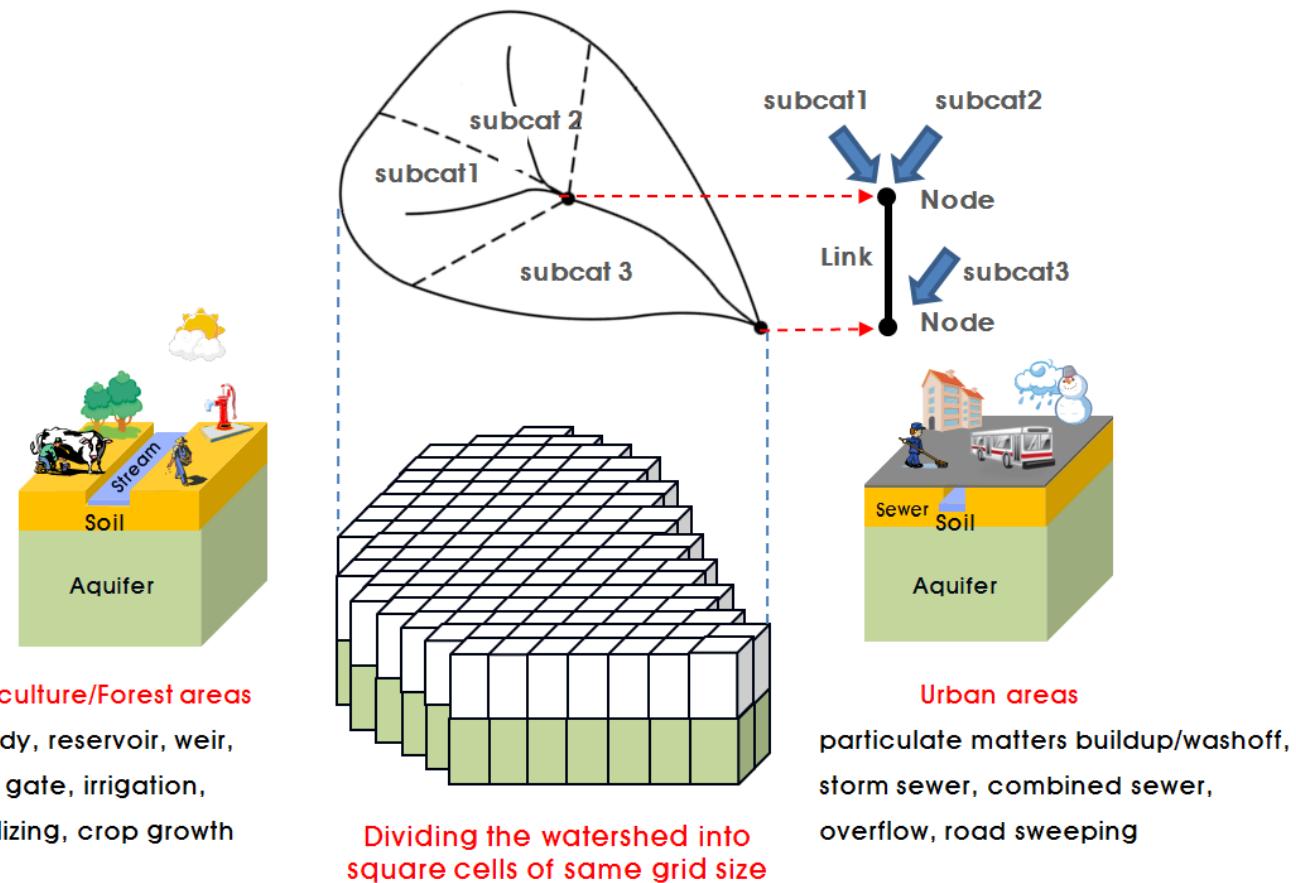
- ❖ 분포형 유역모델 CAMEL을 **중대규모 유역**에 적용할 수 있도록 격자단위의 물질이동을 최소화하고, 하천 모의 구조를 변경
- ❖ 국내 환경특성을 고려한 유역모델의 개발

3.2 STREAM 특징 및 주요기능

3. STREAM

▶ 주요특징

- ✓ 정방형 격자단위에서의 수문현상 모의
- ✓ 논의 저류기능, 관개 등 농촌유역 특성 반영
- ✓ 격자간 물질 이동을 생략하여 모의 시간 단축



➤ 주요 특징

- ✓ 대상 유역을 임의 크기 정방형 격자로 분할, 각 격자에서 물질수지 계산
- ✓ 각 격자는 수직으로 토양층, 지하대수층으로 구성
- ✓ 모의 시간 간격은 하천 길이에 따라 내부적으로 산정
- ✓ 모의 시간 단축을 위해 격자간 물질이동을 하지 않음
- ✓ 논밭의 둑과 하천제방의 높이에 따라 지표수의 흐름 제어
- ✓ 보, 저수지, 제수문, 관개수로 등의 수리구조물은 사용자가 입력한 제원에 따라 모델 내부에서 생성
- ✓ 토양/지표수 중의 탄소 및 질소, 인 변환과정 및 이동 모의
- ✓ 유사 이동은 입도 크기에 따라 점토(clay), 미사(silt), 세립사(fine sand), 조립사(coarse sand)로 구분하고 이동형태에 따라 부유사 (suspended load)와 소류사(bed load)로 구분

➤ 수문단위격자(HUCs)

- ✓ 유사한 환경특성을 갖는 격자들을 수문단위격자(HUCs, Hydrologic Unit Cells)로 정의
 - ❖ HUC 구분 기준: 기상, 지형(경사도), 토성, 토지피복, 관망종류, 흐름누적
- ✓ 각 HUCs에 대한 물질수지 계산결과를 전체 유역의 해당 격자에 할당

3.3 STREAM 적용사례 (1)

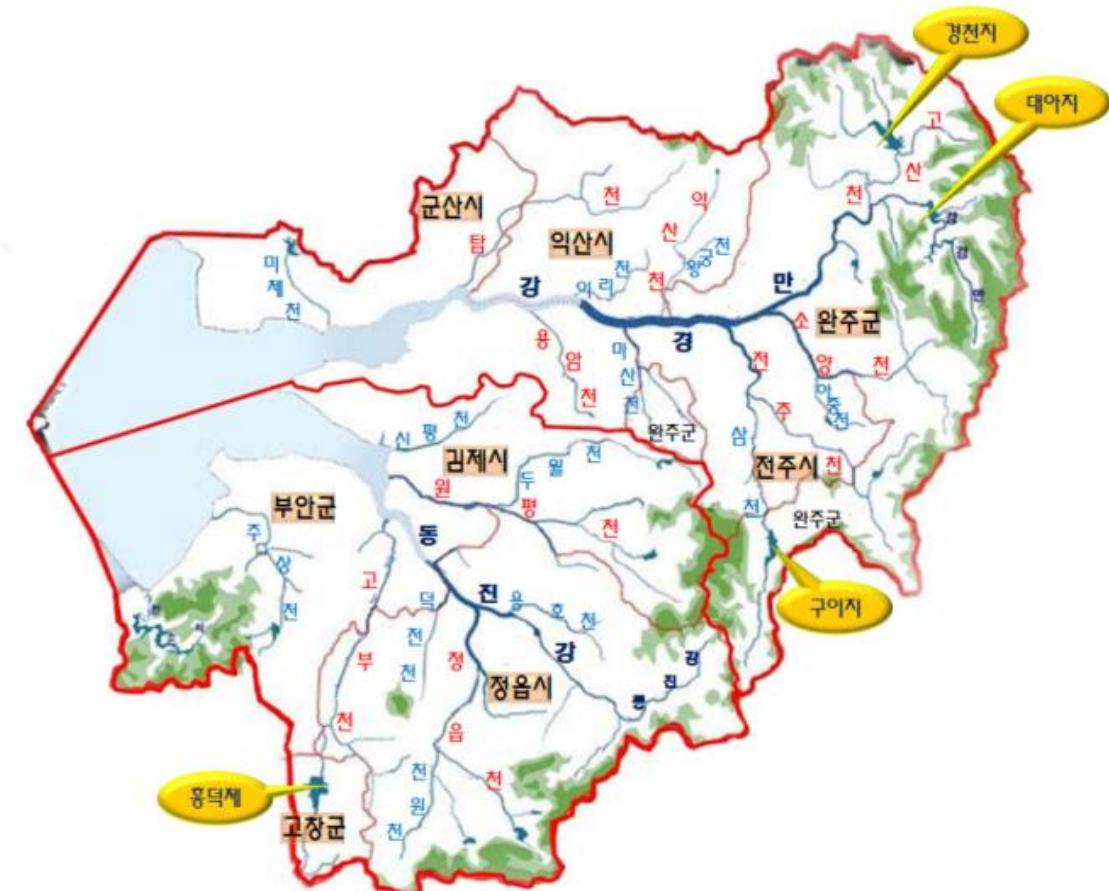
3. STREAM

➤ 연구명

- ✓ 유역모형을 이용한 새만금 유역의 농업 비점오염 저감방안 시나리오 평가
(농어촌연구원, 2013 – 2015)

➤ 연구대상지역

- ✓ 새만금호 유역
- ✓ 유역 면적: 3,022 km²
- ✓ 격자 크기: 50 m X 50 m



3.3 STREAM 적용사례 (1)

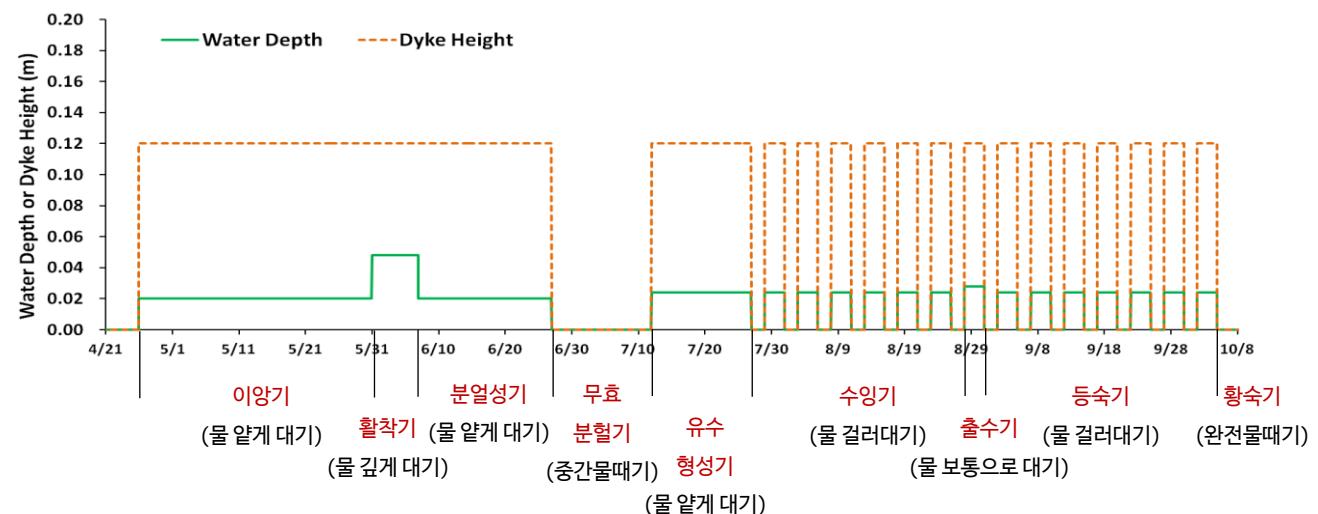
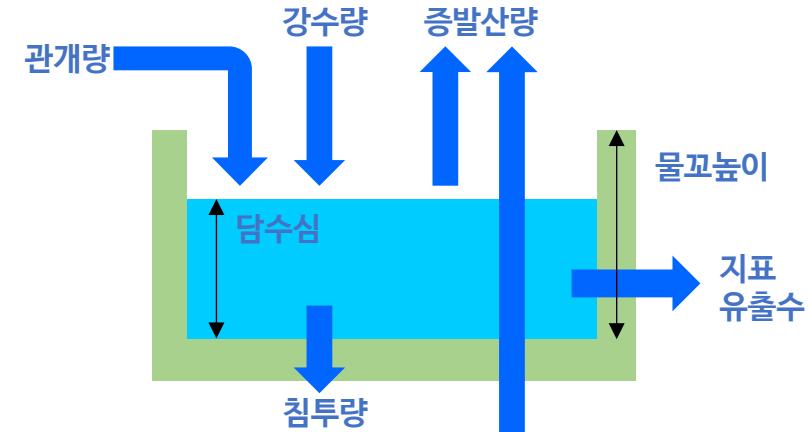
3. STREAM

▶ 논 모의시 고려사항

- ✓ 논의 유입/유출 프로세스
- ✓ 물꼬높이를 통해 지표유출 조절
- ✓ 논의 생육시기별 적정담수심과 물꼬높이 조절

▶ 모델 내에서 자동 관개 수행

- ✓ 산정방법
 - ❖ 적정 담수심
 - ❖ 토양수분함량
 - ❖ 사용자입력값
- ✓ 관개용수 공급원 설정
 - ❖ 저수지
 - ❖ 하천, 관개수로, 지하수

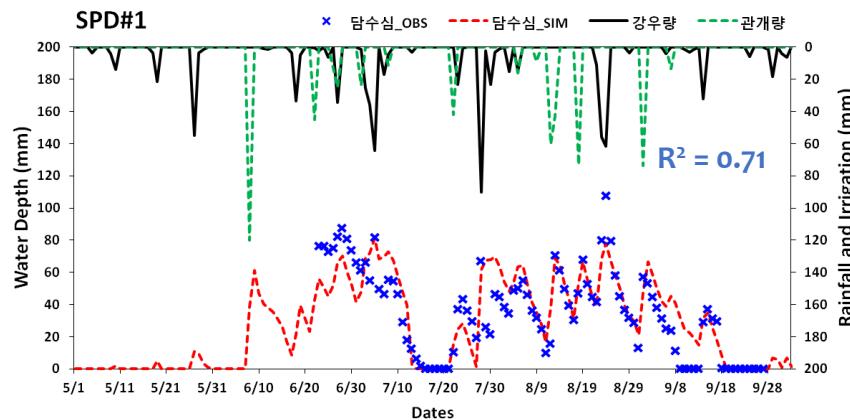


3.3 STREAM 적용사례 (1)

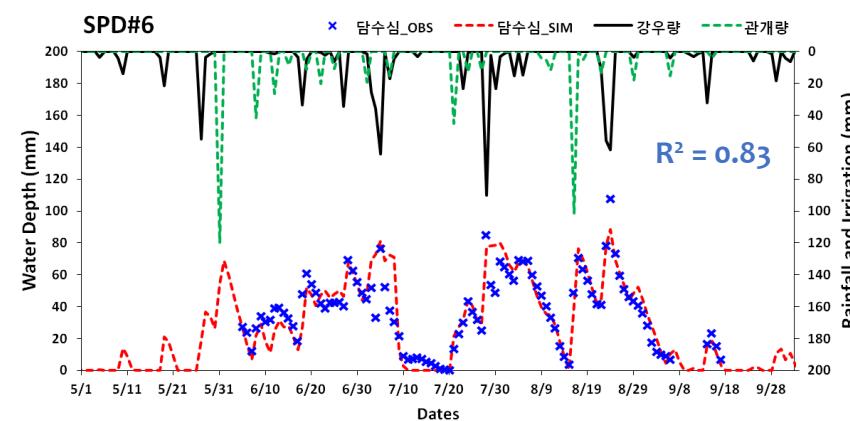
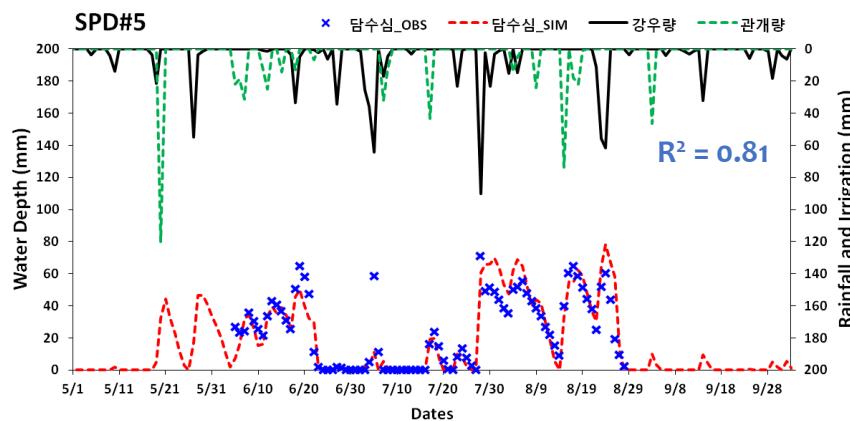
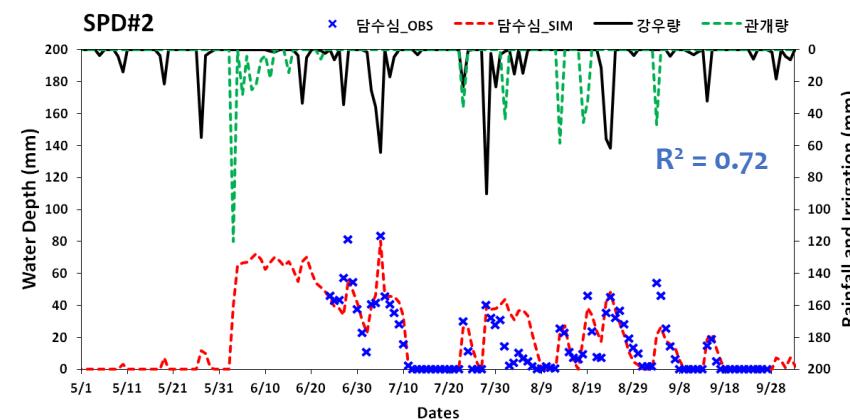
3. STREAM

▶ 논 담수심 모의 정확도 평가(필지규모)

■ 관행조건



■ 물관리 조건

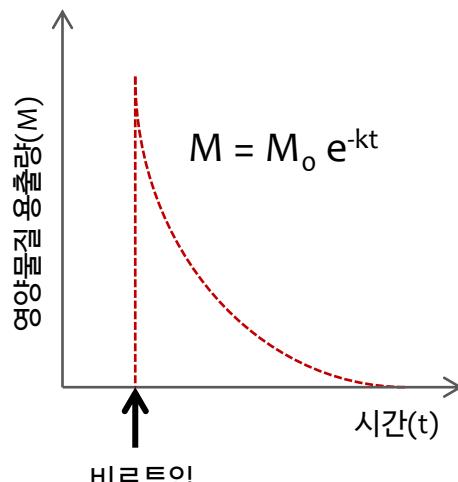


3.3 STREAM 적용사례 (1)

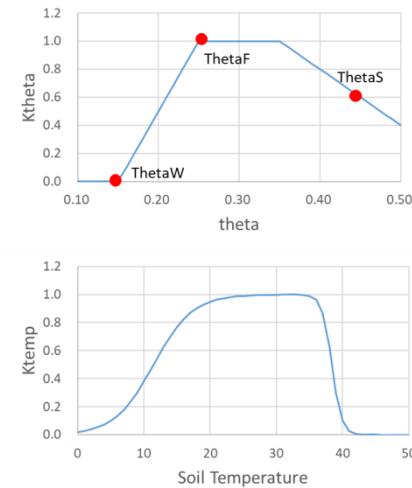
3. STREAM

▶ 시비투입(완효성 비료 사용)

- ✓ 비료 투입 : 사용자가 비료투입시기, 비료투입량, 용출속도상수(k) 입력
- ✓ 용출 : 지수함수에 의해 무기물(NH_4 , NO_3 , PO_4)로 변화
- ✓ 변환 : 토양수분함량과 온도에 따라 속도상수 결정



■ 비료 용출속도상수



■ 토양수분함량 및 온도에
따른 영양염 변환 속도상수의 변화

▶ 지표면 멀칭

- ✓ 지표면에 도달하는 강우에너지 감소
→ 빗방울에 의한 유사 분리 저감

$$KE_l = \max\left(15.8\sqrt{H_c} - 5.87, 0\right) \cdot (R - I_c)$$

- ✓ 지표면 거칠기 증가 $\rightarrow K = \frac{1}{n} AR^{2/3}$

- ✓ 토양개량제: 토수성 증가 \rightarrow 토양의 K_{sat} 증가
- ✓ 토양 저류능 증가: 강우차단 증가



3.4 STREAM 적용사례 (2)

3. STREAM

➤ 연구명

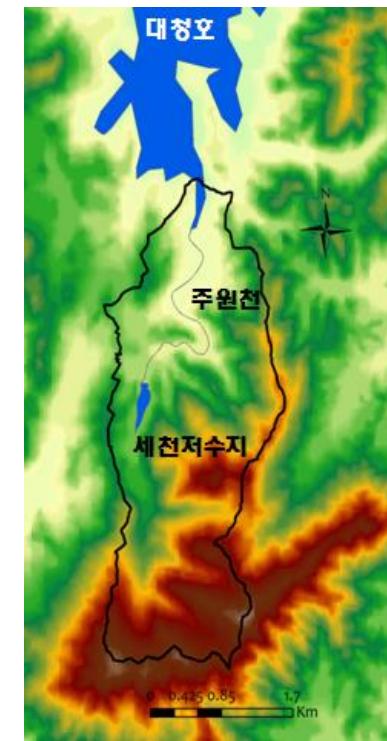
- ✓ 상수원 이용 호소의 산림유래 난분해성물질 거동평가 및 관리(III) (금강물환경연구소, 2017)

➤ 연구대상지역

- ✓ 대청호 수질에 영향을 미치는 주원천, 품곡천

- ✓ 유역 면적
 - ❖ 주원천 7.7 km^2
 - ❖ 품곡천 9.3 km^2

- ✓ 격자 크기: $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$



3.4 STREAM 적용사례 (2)

3. STREAM

➤ STREAM 수질 모의 구조 - 토양 및 수체내 탄소, 질소, 인의 정의

- ✓ 유기물: 생분해성(Labile)과 난분해성(Refractory)으로 구분
 - ❖ POM : Litter, Residue, Biomass, Humus 등의 입자성 유기물
 - ❖ DOM : 입자성 물질의 분해과정에서 생성되는 용존성 유기물
- ✓ 무기물
 - ❖ DIM : 용존성 유기물의 무기화과정에서 생성되는 용존성무기물
 - ❖ PIM : 용존성 유기물이 토양 입자에 흡착된 형태의 무기물
- ✓ 지하대수층에는 용존성 물질만 존재하는 것으로 가정

STREAM 영양염류 모의 항목

구분		탄소	질소	인	
유기물	Particulate (POM)	Labile	LPOC	LPON	LPOP
		Refractory	RPOC	RPON	RPOP
	Dissolved (DOM)	Labile	LDOC	LDON	LDOP
		Refractory	RDOC	RDON	RDOP
Microbial Biomass (MBM)		MBMC	MBMN	MBMP	
무기물	Dissolved	-	DIN (NH_4, NO_3)	PIN (PO_4)	
	Particulate	-	PIN (NH_4)	PIP _a , PIP _s	

EFDC 경계조건과 호환

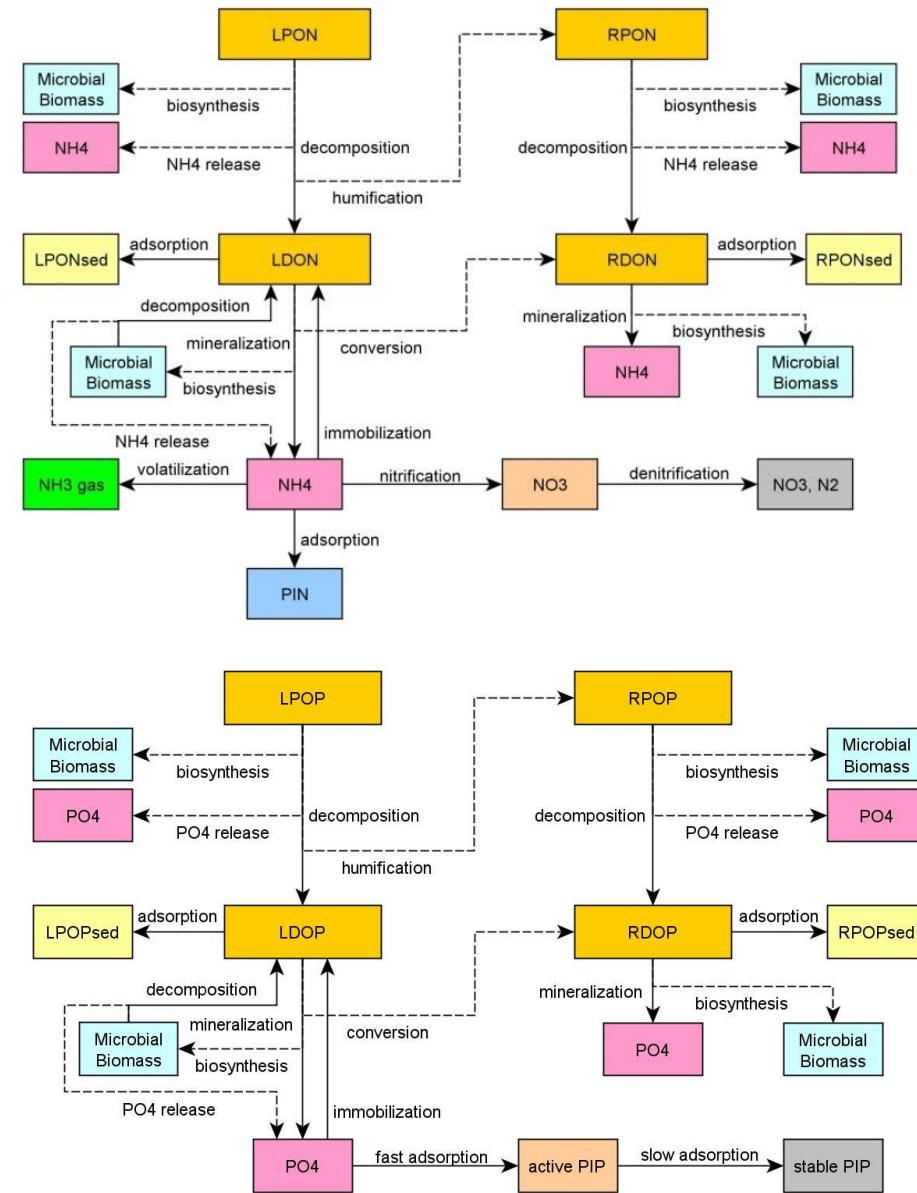
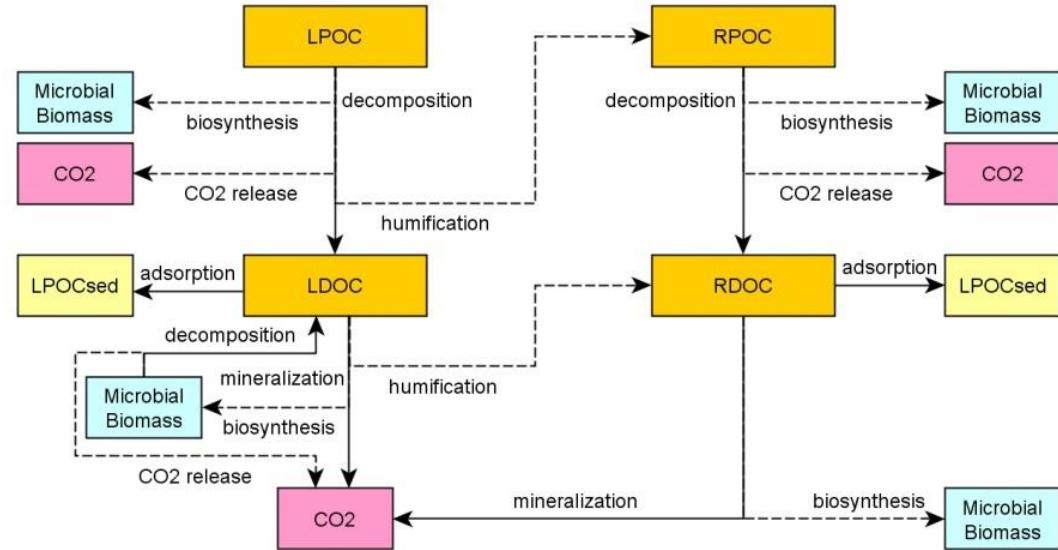
구분	EFDC / Delft3D	STREAM
탄소	LPOC	LPOC
	RPOC	RPOC
	DOC	LDOC
	CO ₂	CO ₂
질소	LPON	LPON
	RPON	RPON
	DON	LDON
	-	RDON
인	PIN	PIN
	NH ₄	NH ₄
	NO ₃	NO ₃
	LPOP	LPOP
	RPOP	RPOP
	DOP	LDOP
	-	RDOP
	PO ₄	PO ₄

3.4 STREAM 적용사례 (2)

3. STREAM

수질 모의구조 – 탄소, 질소, 인의 변환

✓ 토양온도와 토양수분에 따른 물질 변환속도 고려한 1차 반응식 적용

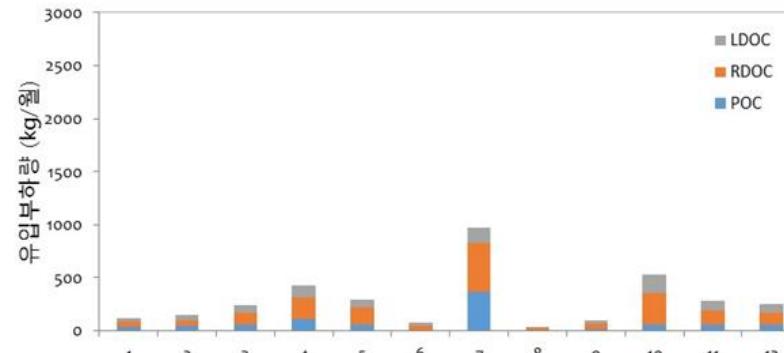


3.4 STREAM 적용사례 (2)

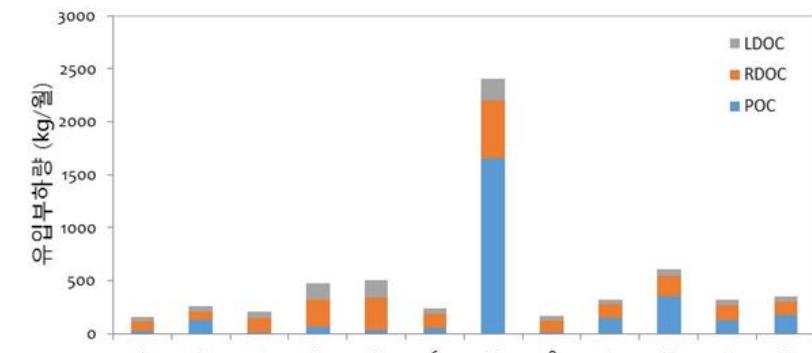
3. STREAM

▶ 대상지역 월별 탄소 유입량 평가

- ✓ DOC 중 LDOC와 RDOC 구성 비율
 - ❖ 주원천 0.34 : 0.66
 - ❖ 품곡천 0.30 : 0.70



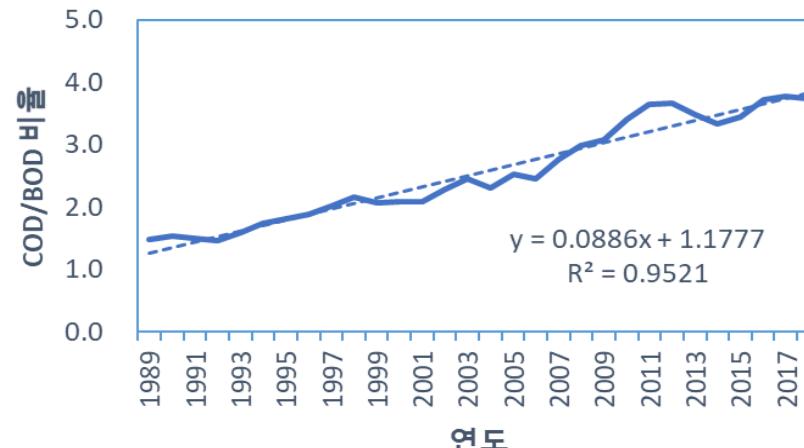
| 월간 대청호 탄소 유입량 (주원천, 2016년)



| 월간 대청호 탄소 유입량 (품곡천, 2016년)

▶ (참고) 난분해성 유기물질 증가추세

- ✓ 연도별 4대강 하천과 호수에서의 COD/BOD 비율 변화



| 연도별 하천 COD/BOD 비율

3.5 STREAM 적용사례 (3)

3. STREAM

➤ 연구명

- ✓ 도로청소를 통한 비점오염물질관리 타당성 조사 연구 (환경부, 2012)

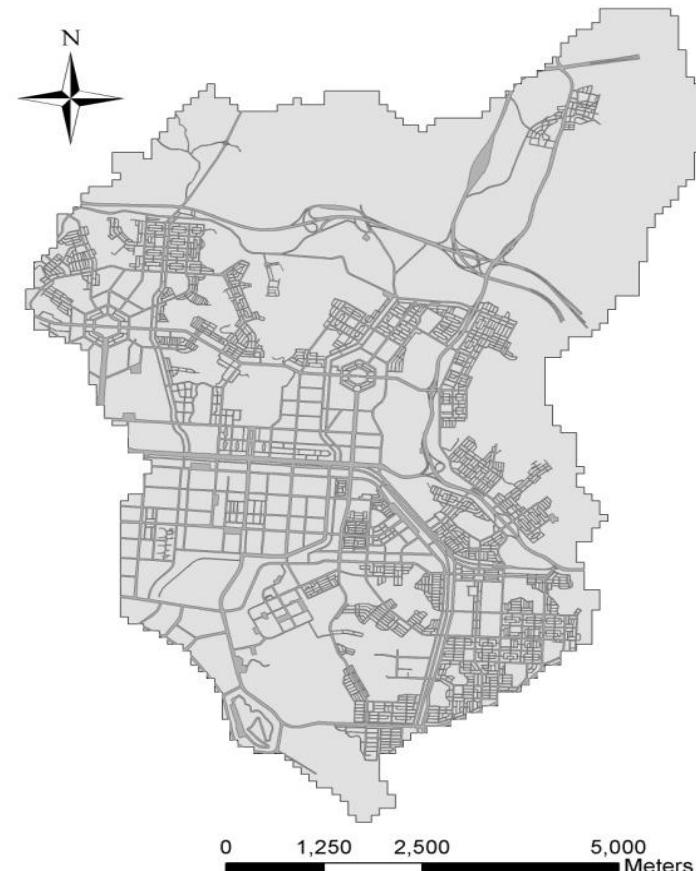
➤ 연구대상지역

- ✓ 안선천 유역

- ✓ 유역 면적: 59.83 km^2

- ❖ 도로구분 : 유역 내 도로를 도로폭에 따라 4개로 구분
 - ❖ 광로(40m이상), 대로(25-40m), 중로(12-25m), 소로(12m미만)
 - ❖ 유역 내 총 도로연장 : 약 290 km

- ✓ 격자 크기: 10 m X 10 m



■ 안산천 유역 도로망 지도

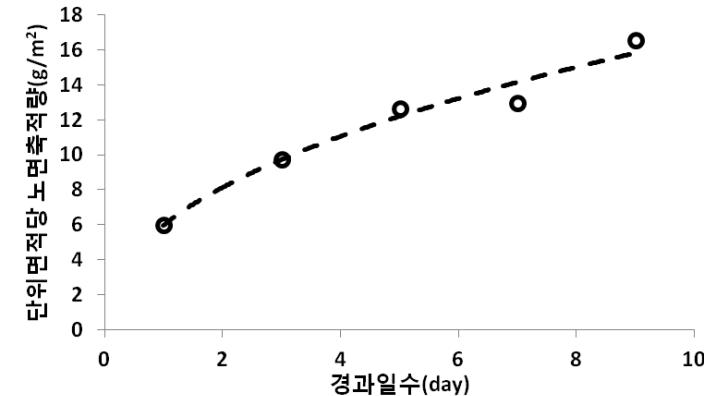
3.5 STREAM 적용사례 (3)

3. STREAM

▶ 불투수지표면 노면축적 오염물질 모의 시 고려사항

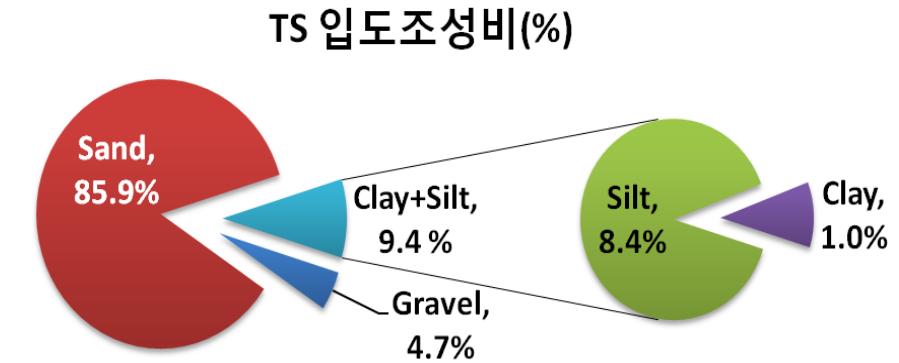
✓ 노면퇴적물 축적함수 선정

Power Function	Exponential Function	Saturation Function
$B = \min(C_1, C_2 t^{C_3})$	$B = C_1(1 - \exp(-C_2 t))$	$B = \frac{C_1 \times t}{C_{1/2} + t}$
$R^2 = 0.9821$	$R^2 = 0.9282$	$R^2 = 0.9758$



✓ 노면퇴적물 입도 및 농도 분포 고려

구분	입도조성비 (%)	TOC (mg kg⁻¹)	TN (mg kg⁻¹)	TP (mg kg⁻¹)
점토 (clay)	1.0			
미사 (silt)	8.4	38,038	4,140	503
모래 (sand)	85.9			
자갈 (gravel)	4.7	13,225	2,103	258

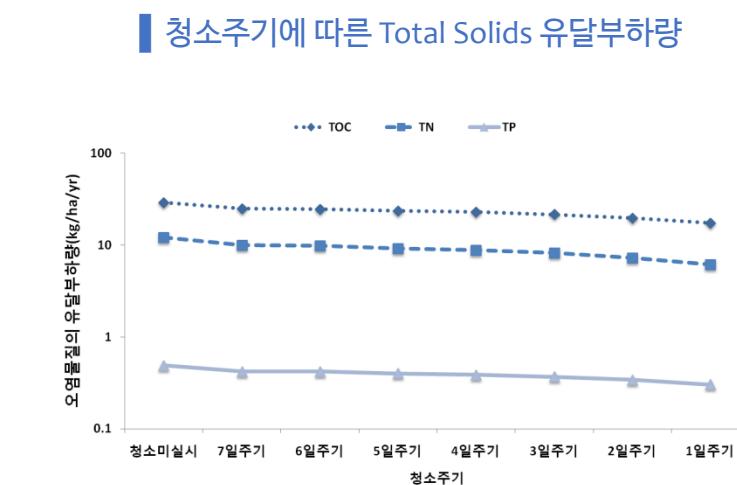
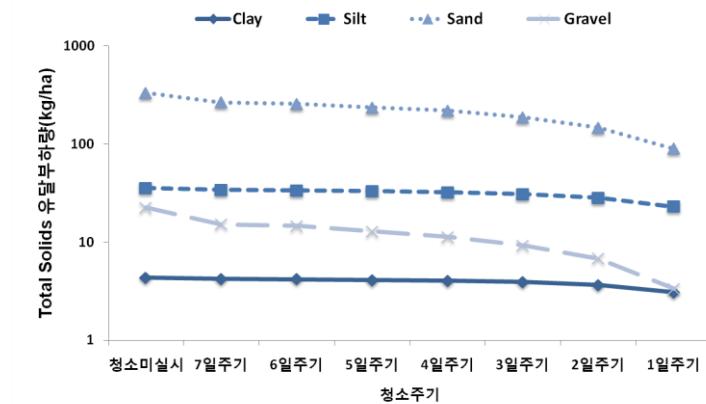
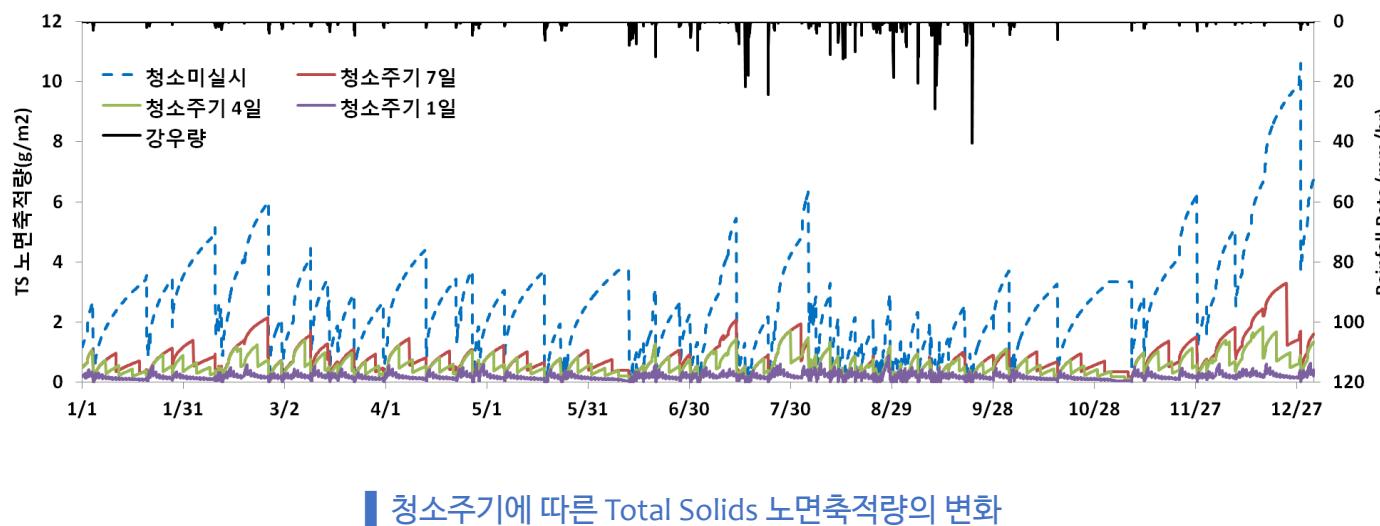


3.5 STREAM 적용사례 (3)

3. STREAM

▶ 유역규모에서 청소효과분석

- ✓ Total Solids에 비해 TOC, TN, TP 유달부하량의 감소폭이 적음
- ✓ Total Solids의 미세입자 저감효율이 낮기 때문인 것으로 판단됨



3.6 STREAM 적용사례 (4)

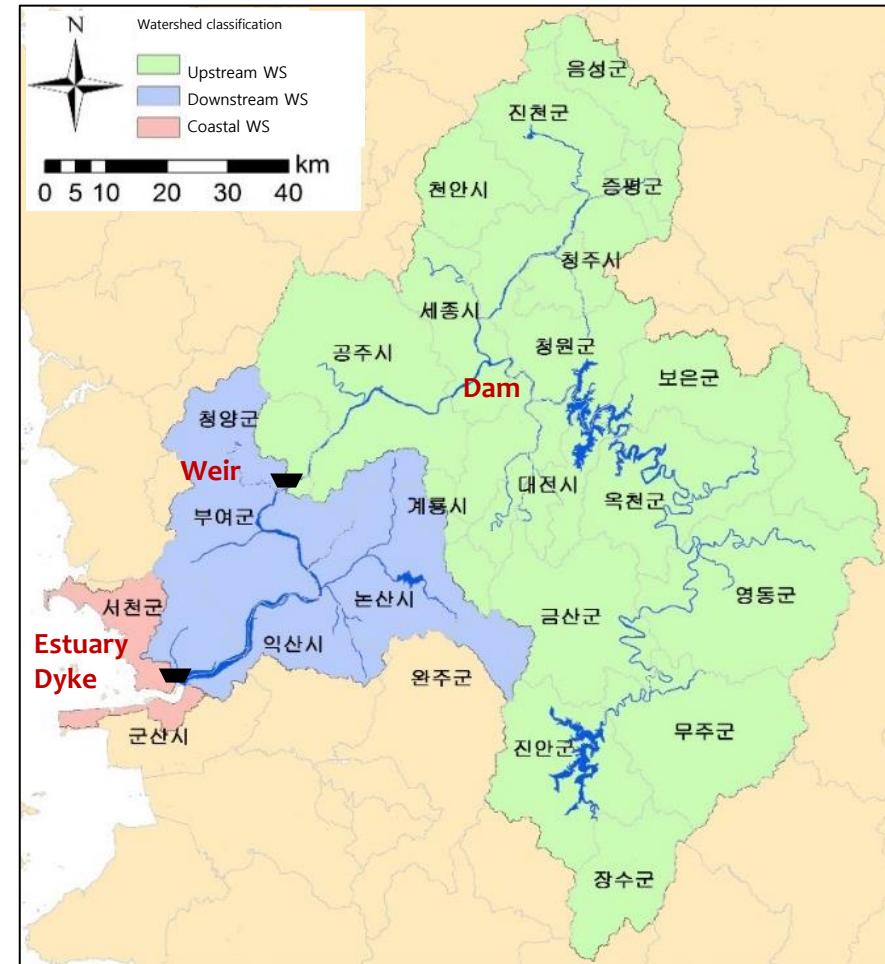
3. STREAM

➤ 연구명

- ✓ 하구역 종합관리시스템 개발연구 II(해양수산부, 2014 – 2019)

➤ 연구대상지역

- ✓ 금강수계
- ✓ 유역 면적: 10,144.5 km²
- ✓ 격자 크기: 100 m X 100 m



STREAM 모의 대상지역 - 금강수계

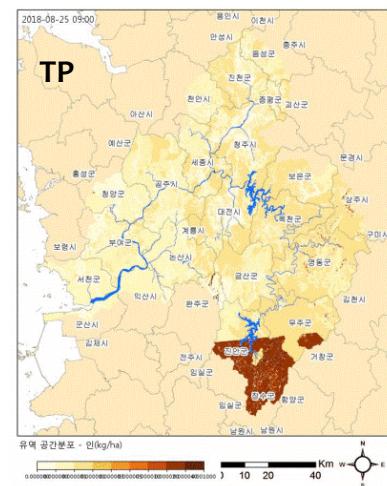
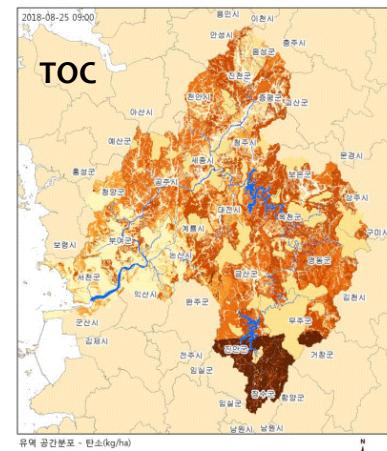
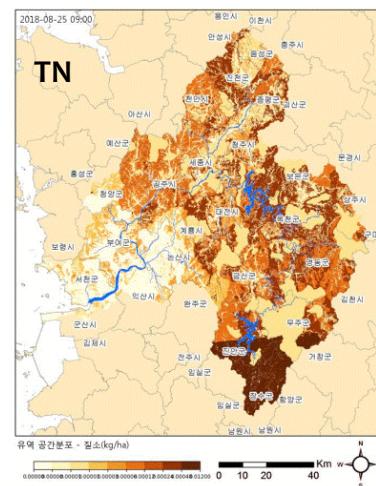
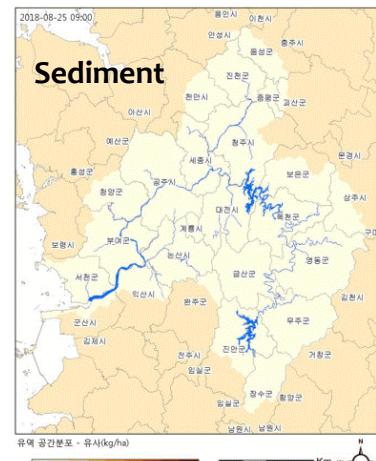
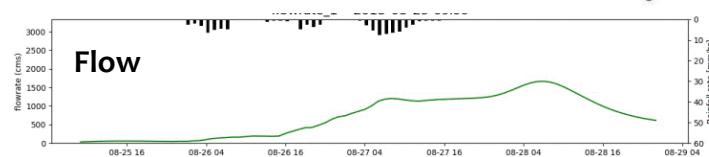
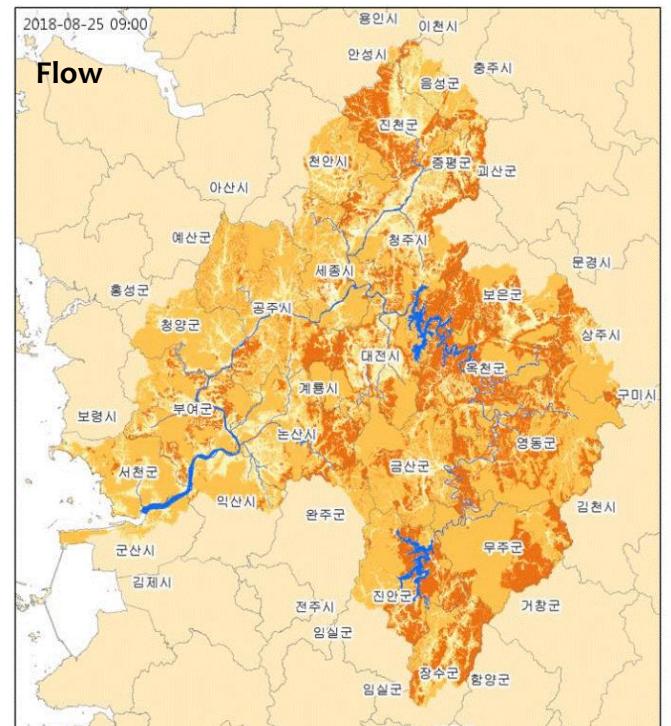
3.6 STREAM 적용사례 (4)

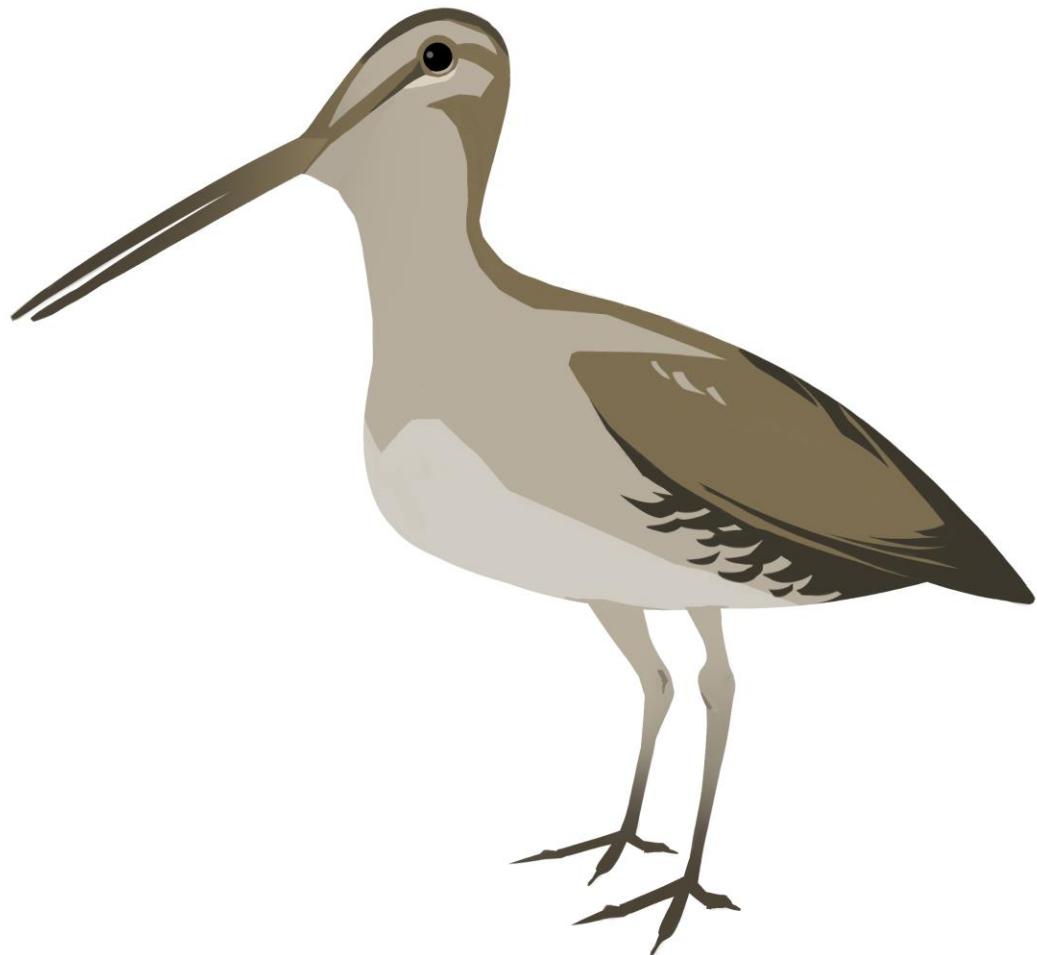
3. STREAM

➤ 실시간 모델링 시스템

- 1일 72시간 예측 해역모델 경계조건 제공

STREAM 모의 결과의 시공간분포





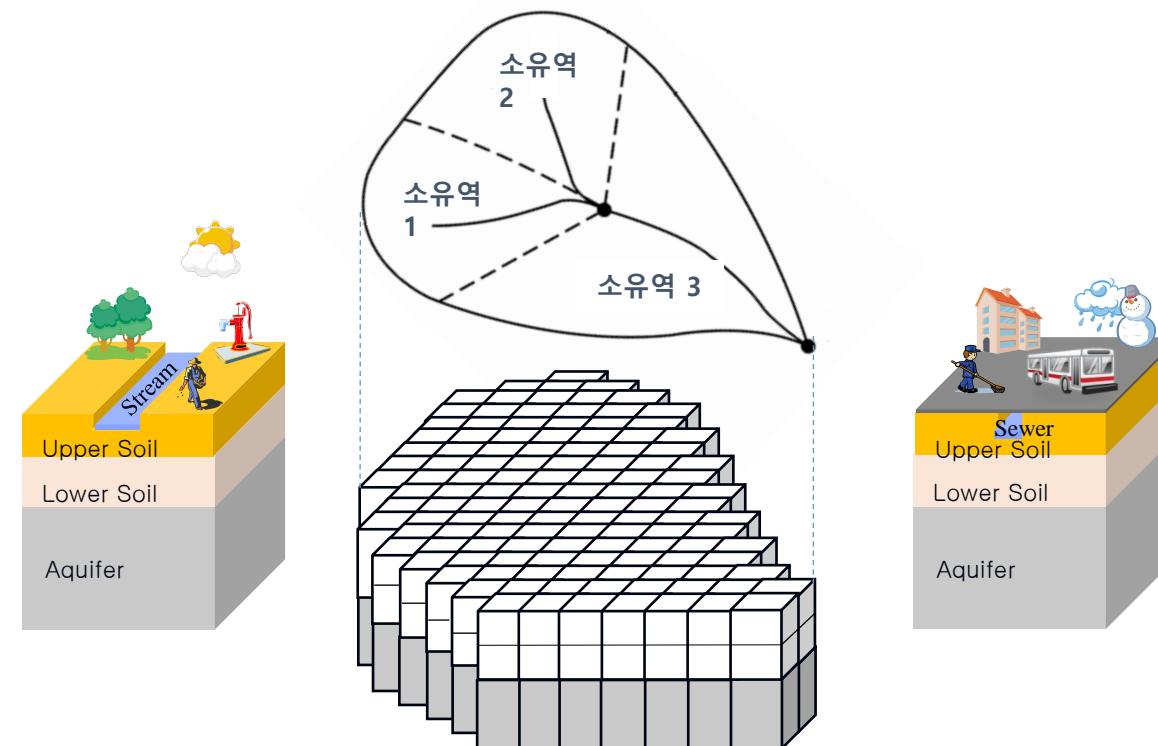
**Subsurface
Nitrogen
Pollution
Evaluation**

➤ SNIPE (Subsurface Nitrogen Pollution Evaluation)

- 개발 및 적용: 국립환경과학원(2014~2017) 축산단지 지역의 지하수 배경농도 등 오염실태 조사
- 개발목적: 국가규모에서의 효과적인 지하수 관리정책 수립을 위한 질소수지모델 개발

➤ 주요특징

- ✓ 모의 시간간격: 1일
- ✓ 격자모의: STREAM과 동일
- ✓ 하천 모의하지 않음



정방형 격자망을 이용한 유역분할 구조

4.2 SNIPE 적용사례 (1)

4. SNIPE

➤ 연구명

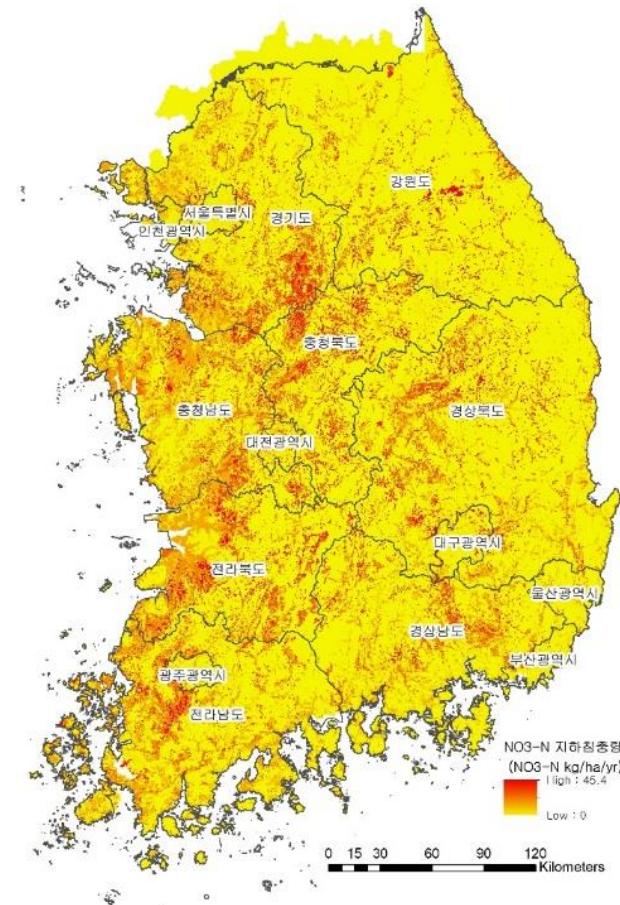
- ✓ 농축산지역 지하수 중 질산성질소 수질관리 개선방안
(국립환경과학원, 2014 – 2017)
- ✓ 목적: 국가규모에서 지하수 오염기여율 평가를 위해 전국규모 질산성질소 지하침출량 지도 작성

➤ 연구대상지역

- ✓ 남한 전지역
- ✓ 유역 면적: $10,144.5 \text{ km}^2$
- ✓ 격자 크기: $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$

➤ 모의결과

- ✓ 토지이용별 단위면적당 질산성질소 침출량
 - 밭: 24.4 kg N/ha/yr , 논: 7.0 kg N/ha/yr
 - 산림/초지/나지 등: 0.07 kg N/ha/yr



■ 전국규모에서의 연간 $\text{NO}_3\text{-N}$ 지하 침출량 공간분포
(2005년 ~ 2014년 모의결과)

■ 유역별 연간 $\text{NO}_3\text{-N}$ 지하침출량

유역	평균 침출량 (kg-N/ha/yr)
한강	3.29
낙동강	2.40
금강	4.08
새만금	5.27
영산-섬진강	3.01

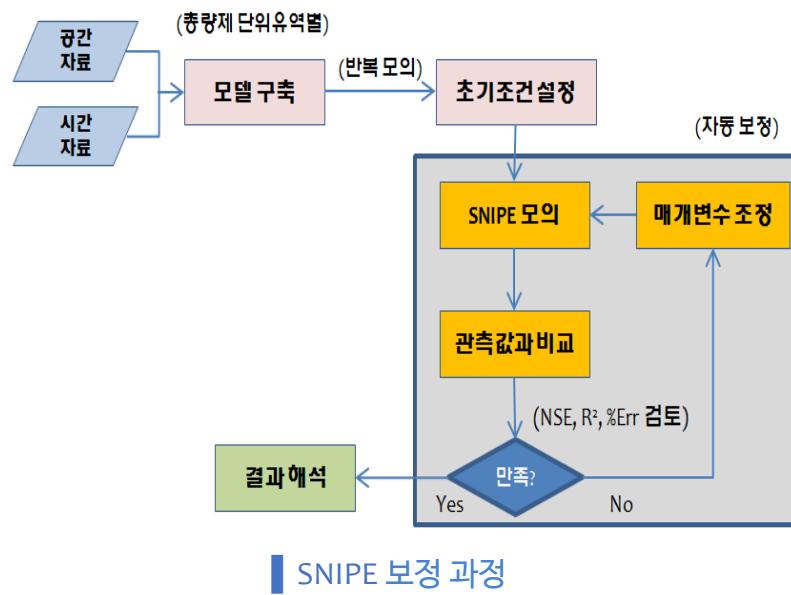
4.2 SNIPE 적용사례 (1)

4. SNIPE

▶ 전국규모 적용 시 수동 보검정에 한계

▶ SNIPE 보검정 방법

- ✓ 유전자 알고리즘을 이용한 자동 보검정 수행
- ✓ 최상류 유역부터 순차적으로 보검정 수행
- ✓ 수질오염총량제 관측자료 이용



▶ 주요 보정 매개변수 (SNIPE 민감도 분석결과 이용)

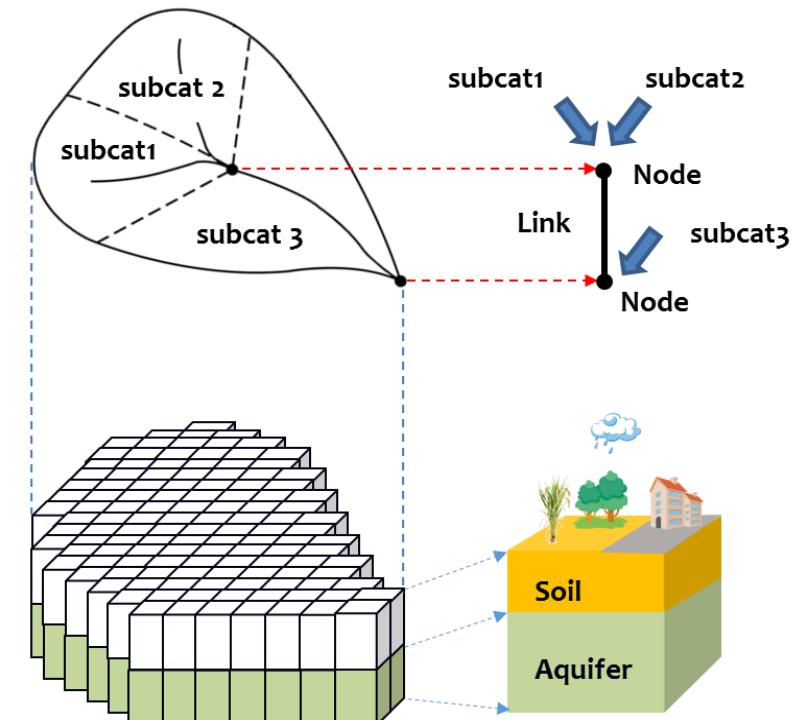
구분	매개변수	설명
수문 매개 변수	Ksat	Hydraulic conductivity
	MacroFator	soil macroporosity factor
질소 변환 및 이동 매개 변수	Kdnit	Denitrification rate constant
	KLDOM	LDOM(Labile Dissolved Organic Matter) decomposition rate constant
	Knitr	Nitrification rate constant
	Q90soaq	groundwater recharge when 90% of available Nsol is transported in 1 hour



Regional
Estimation of
Diffuse
POLution
Loads

➤ REDPOLL (Regional Estimation of Diffuse POLLution Loads)

- 개발 및 적용
 - ❖ 환경부(2015, 2016) 비점오염관리지역 및 총량관리지역 비점오염 정량화체계 적용방안 연구
- 개발목적: 시공간적 특성을 고려한 유달부하량 산정을 위해 개발
- 유역분할 구조
 - ❖ 대상유역을 정방형 격자로 분할
 - ❖ 격자구성: 1개의 토양층과 1개의 지하대수층
 - ❖ 소유역 연결: 노드-링크 네트워크 구성



유역모델 REDPOLL의 유역분할 구조

5.1 REDPOLL 특징 및 주요기능

5. REDPOLL

➤ 수문과정 모의

✓ 직접유출량

- ❖ CN 기법 또는 Green-Ampt 사용자 선택
- ❖ CN 적용 시 토양함수조건 연속적 고려 (Soil Moisture Index 적용)

✓ 증발산량

- ❖ 잠재증발산량 산정 (Hargreaves equation)
- ❖ 식생 증산량 산정 (Larcher, 1975)

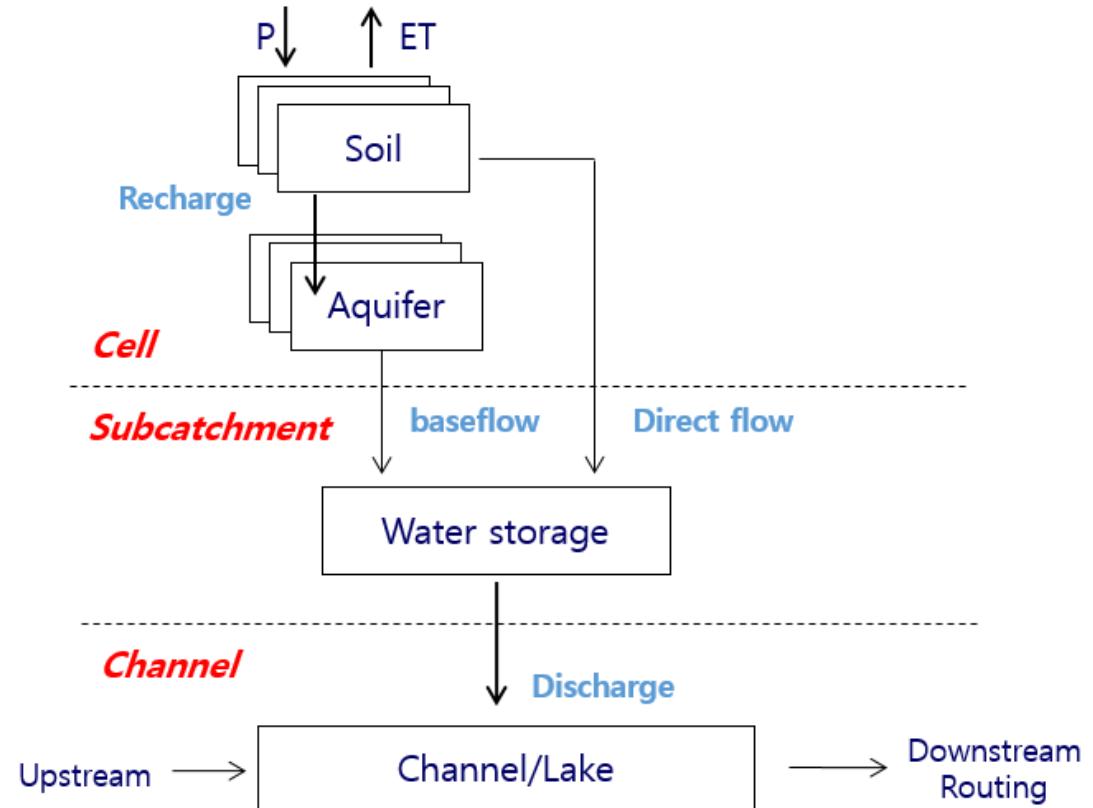
✓ 지하수 충전

- ❖ 토양의 포화수리전도도의 함수(Eagleson, 1978)

✓ 기저유출: 지하수 감쇠계수 K_{gwr} (day^{-1})

✓ 격자 -> 유역말단 이동: 유출지체(runoff lag) 함수 이용

✓ 하천 프로세스: Muskingum Routing Method 이용



■ 유역모델 REDPOLL의 수문과정 구분

5.1 REDPOLL 특징 및 주요기능

5. REDPOLL

➤ 격자별 배출부하량

- ✓ 직접유출량에 토지피복별 유량가중평균 농도(Event Mean Concentration; EMC) 적용

➤ 유달부하량 산정

- ✓ 격자에서 배출된 부하량이 지표면/소규모 하천, 하천 이동과정에서 소멸

$$L_i = Lo_i \cdot e^{-k_1 L_{1,i}} \cdot e^{-k_2 L_{2,i}}$$

L_i = 격자 i의 유달부하량

Lo_i = 격자 i의 배출부하량

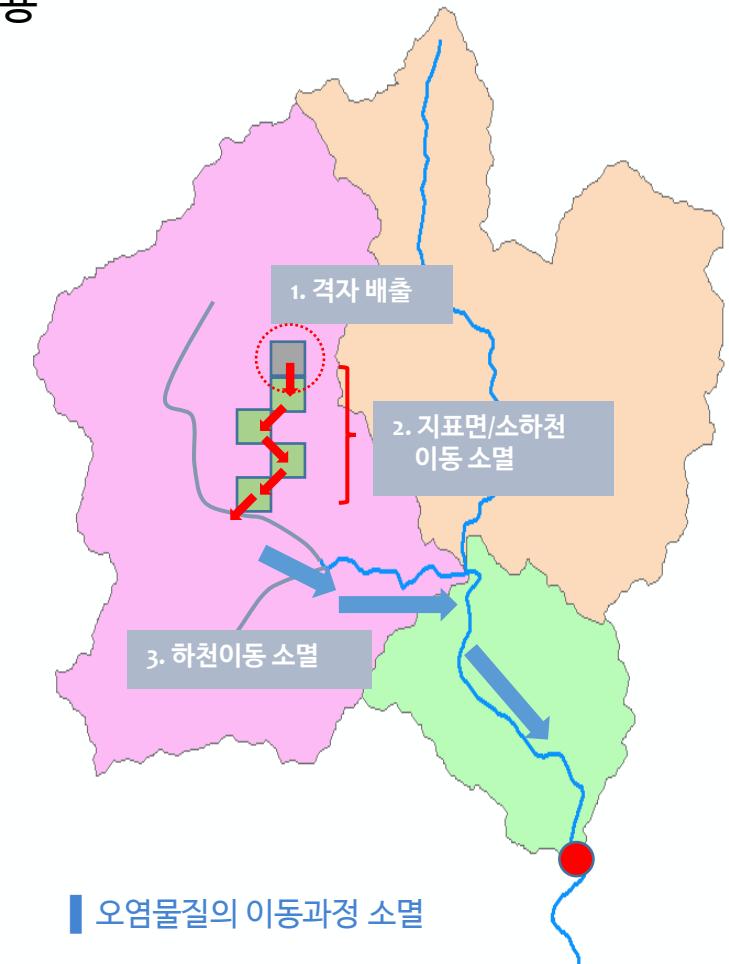
$L_{1,i}$ = 격자 i의 지표면/소하천 이동거리 (m)

$L_{2,i}$ = 격자 i의 하천 이동거리 (m)

K_1 = 지표면/ 소하천 이동 소멸계수 (km^{-1})

K_2 = 하천이동 소멸계수 (km^{-1})

(소멸계수: 오염물질별 지정)



5.2 REDPOLL 적용사례

5. REDPOLL

➤ 연구명

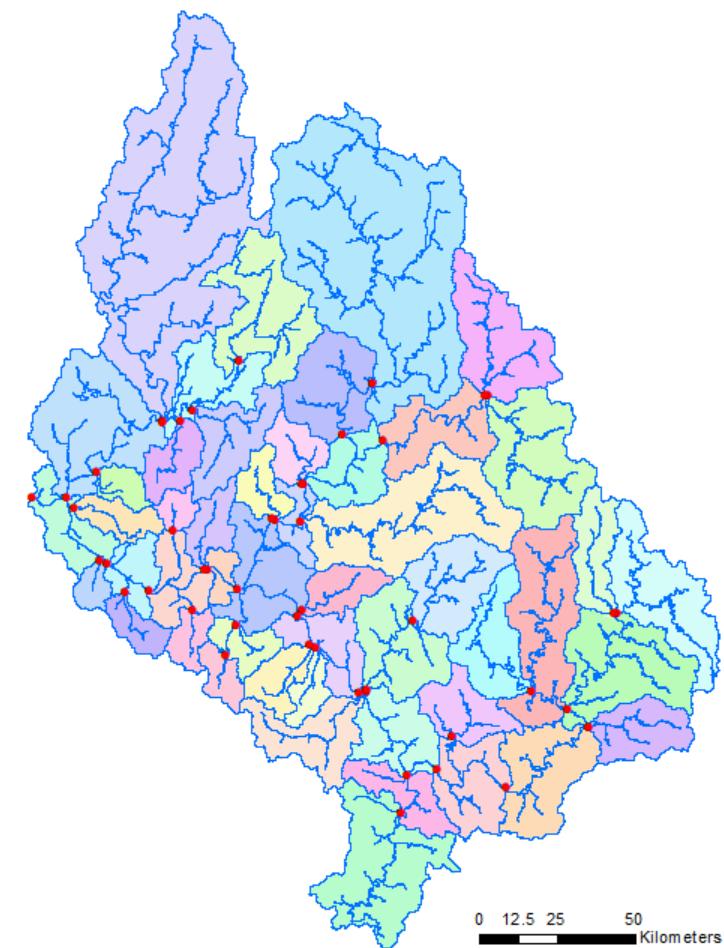
- ✓ 황해 주요 서식지로 유입하는 육상기인 부하량 산정 연구(해양환경공단, 2018)

➤ 연구대상지역

- ✓ 한강수계 유역
- ✓ 유역면적

- ❖ 한강수계 유역: $34,401.9 \text{ km}^2$
- ❖ 기존 수질오염총량제 단위유역도: $27,919.5 \text{ km}^2$
- ❖ 북한지역: $6,482.1 \text{ km}^2$ (한강수계의 18.8%)

➤ 격자크기: 100 m x 100 m



■ 연구대상지역의 설정

5.2 REDPOLL 적용사례

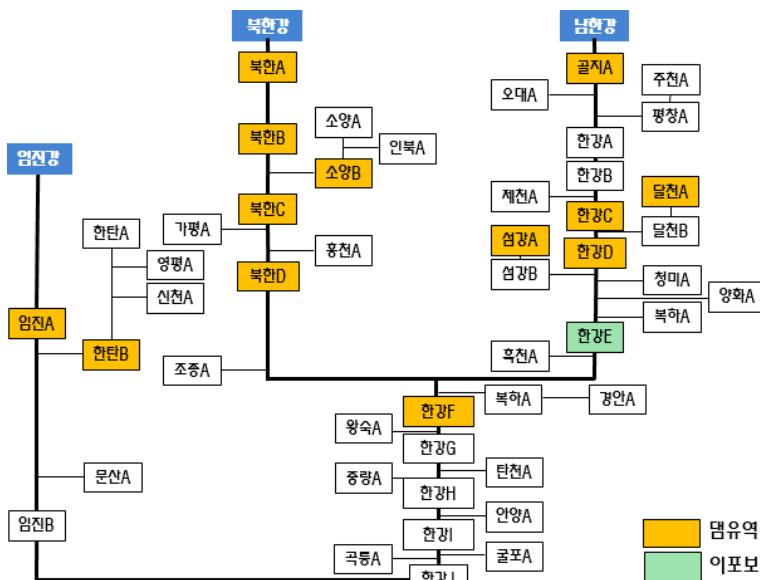
5. REDPOLL

▶ 한강수계 전체 적용시 어려운 점

✓ 댐 운영자료 구축

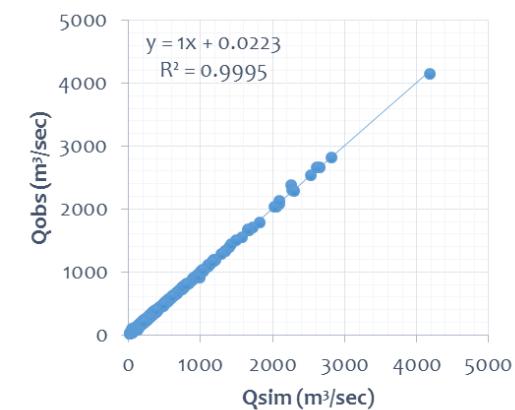
❖ 댐 방류량 = $f(\text{저수율}, \text{유입량}, \text{강우량})$

❖ 비선형 회귀식을 구성하여 모델 반영

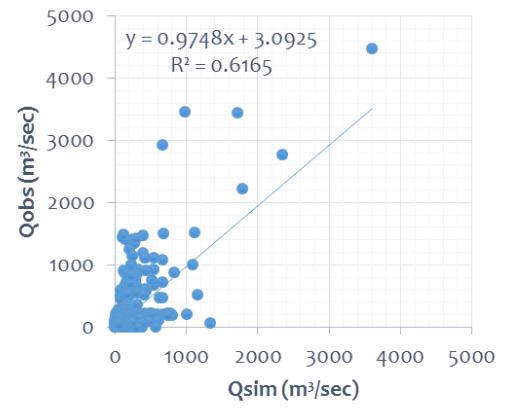


▶ 한강수계 유역별 상하류 네트워크 구성

댐 이름	R ²	댐 이름	R ²
광동댐	0.57	군남댐	0.99
평화의댐	0.99	충주댐	0.62
춘천댐	0.99	이포보	0.99
청평댐	0.99	팔당댐	0.99
소양강댐	0.62	한탄강댐	0.98



▶ 이포보 (2013~2017)

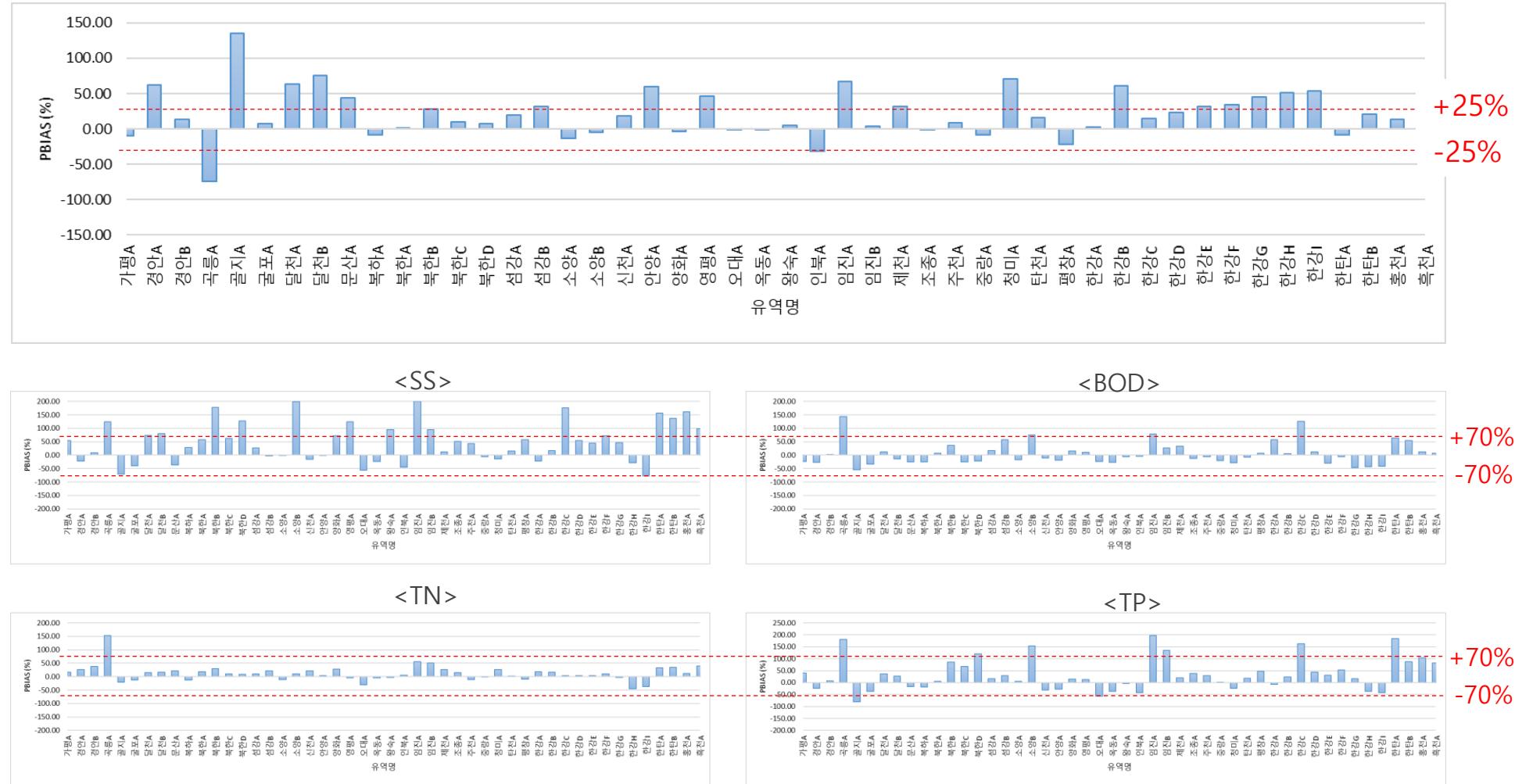


▶ 소양강댐 (1974~2017)

5.2 REDPOLL 적용사례

5. REDPOLL

▶ 유량 보정: 48개 총량측정망 관측자료 보정결과



5.2 REDPOLL 적용사례

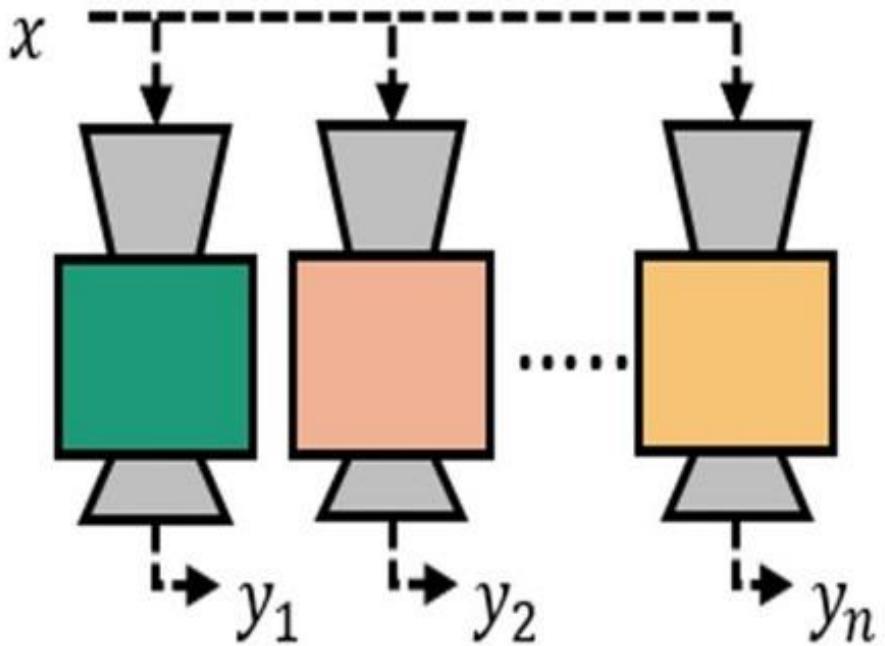
5. REDPOLL

➤ 오염원별 황해유입 부하량

✓ 모의년도 2016년, 1일 간격 모의결과

Sources	SS		BOD		TN		TP	
	ton/year	%	ton/year	%	ton/year	%	ton/year	%
Point source	6860.7	0.2	10,481.7	13.2	27,120.8	24.8	792.8	7.3
Diffuse source	2,741,908.4	99.8	68,733.4	86.8	82,251.4	75.2	10,100.5	92.7
Direct runoff	(2,695,833.4)	(98.1)	(56,238.5)	(71.0)	(51,761.2)	(47.3)	(9,711.3)	(89.1)
Baseflow	(46,075.0)	(1.7)	(12,494.9)	(15.8)	(30,490.3)	(27.9)	(389.2)	(3.6)
Total discharge	2,748,769.1	100.0	79,215.1	100.0	109,372.2	100.0	10,893.3	100.0
Reduction by attenuation	1,912,222.7	69.6	23,071.8	29.1	26,828.4	24.5	7,105.0	65.2
Loads to the Yellow Sea	836,546.4	30.4	56,143.3	70.9	82,543.8	75.5	3,788.3	34.8

**Ensemble
watershed
models and
artificial
Neural
Networks for
Environment
estimation**

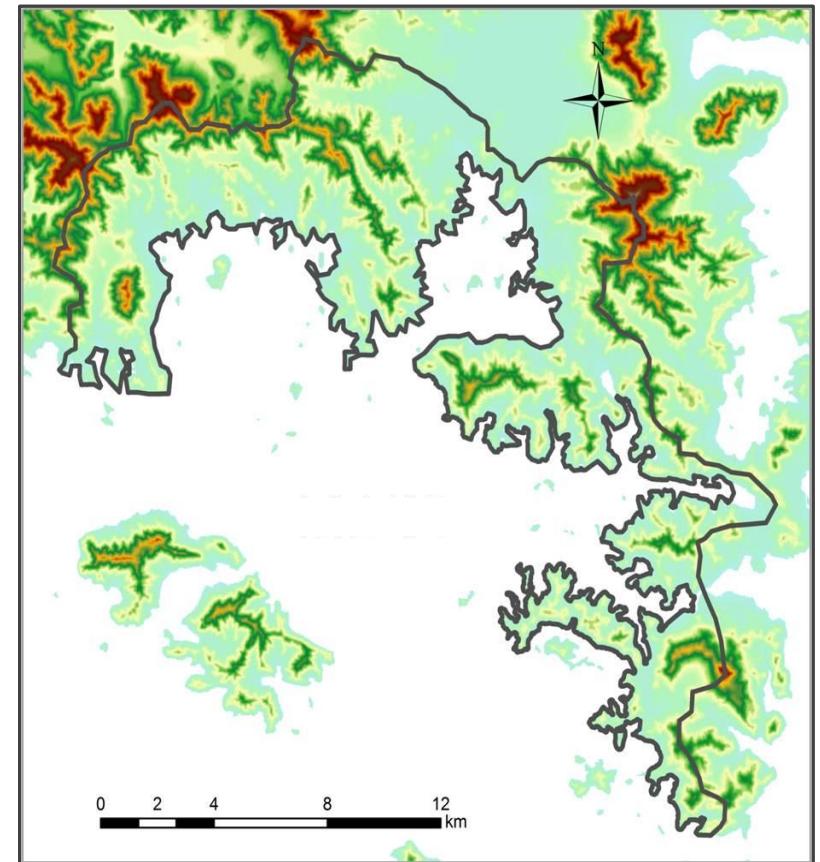


6.1 ENNE를 이용한 대장균 모의

6. ANN

➤ ANN (Artificial Neural Networks)

- 개발 및 적용
 - ❖ 국립수산과학원(2019) 통영자란만 유역 육상기인오염 발생원별 기여율 예측
- 개발목적: 폐류생산(수출) 해역에서의 위생관리
- 현재상황
 - ❖ 토구별 대장균 관측
 - ❖ (미 EPA) 영향범위 콤파스 이용하여
수출 제한지역 설정

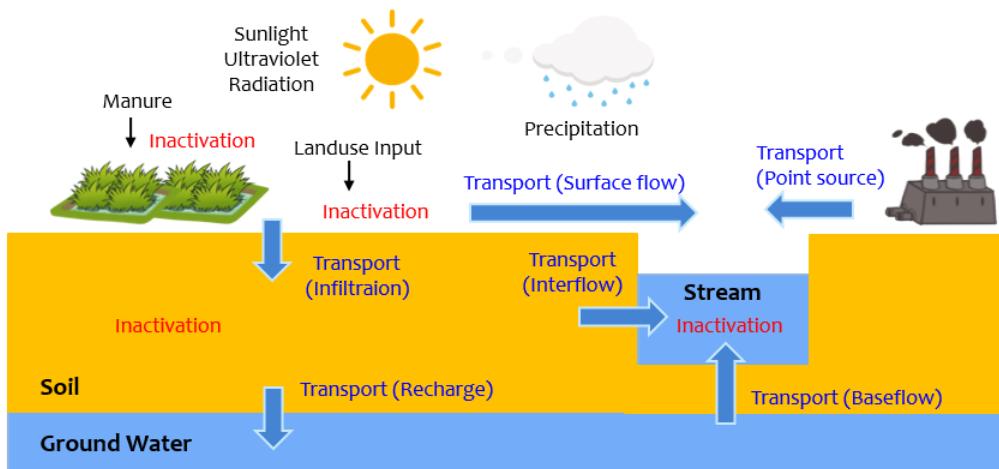


6.1 ANN을 이용한 대장균 모의

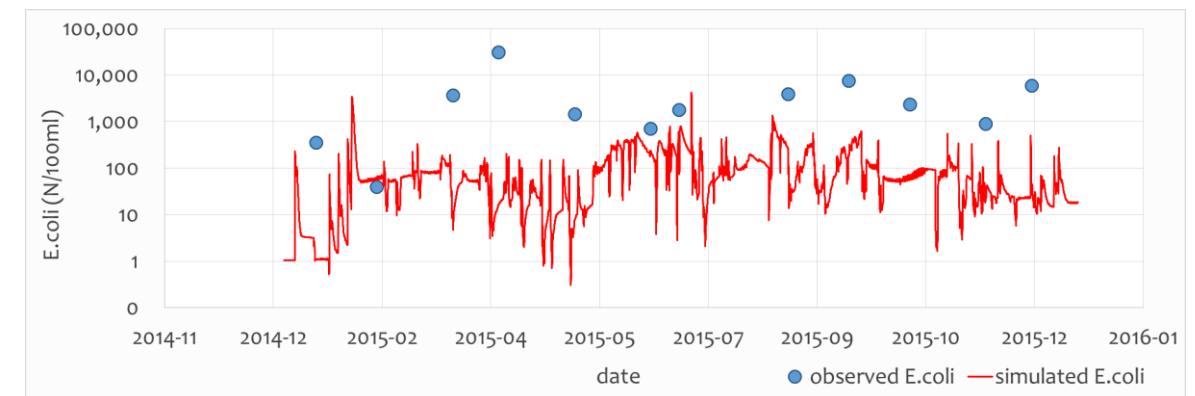
6. ANN

➤ 대장균 모의방안

- ✓ 방안1. 기존 유역모델에 기능추가
 - ❖ 대장균은 토양, 수체 유입 후 사멸하며 증식은 하지 않음
 - ❖ 사멸률: 토양, 수체 온도와 태양 일사량에 따라 변동됨



■ 대장균 발생, 사멸 및 유출 과정



■ 대장균 모듈을 이용한 모의 결과 (곤양천, 2014~2016)

6.1 ANN을 이용한 대장균 모의

6. ANN

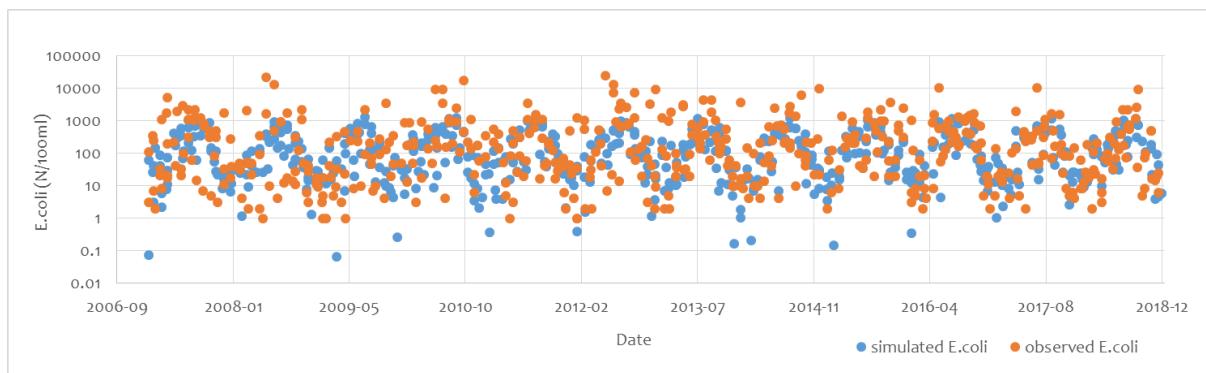
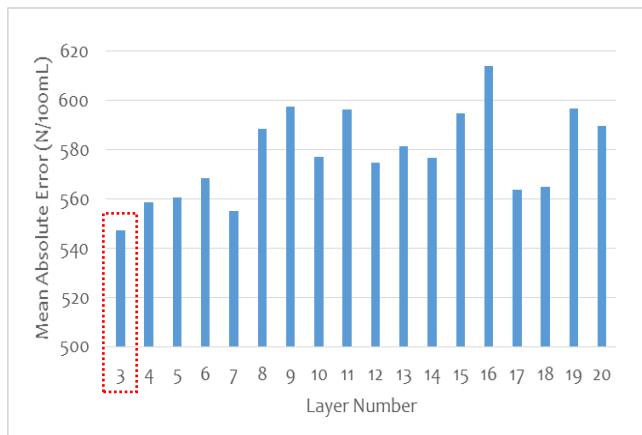
▶ 방안2. 인공신경망 이용

- ✓ Input layer: 유역 속성, 강우, 기온 등
- ✓ Hidden layer: 1~20개 변동하며 정확도 평가
- ✓ 오차함수: mean absolute error
- ✓ 활성화 함수: relu 적용
- ✓ 개발도구: Keras + Tensorflow

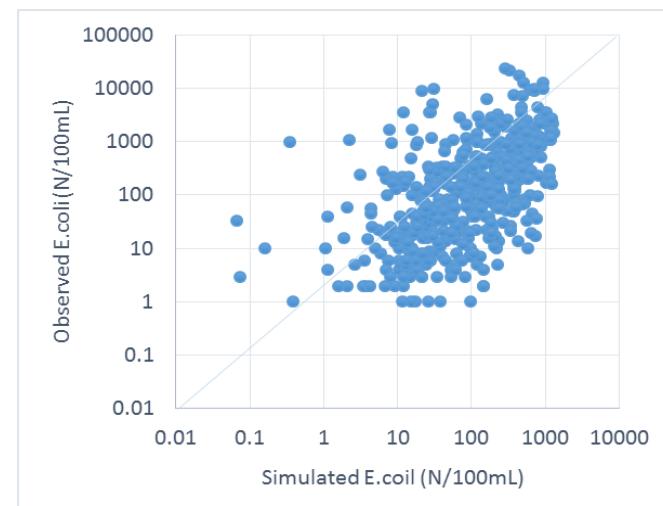
인공신경망 모델의 입력자료

구분	설명	개수
Input Layer (25개)	유역속성	면적, 평균경사도, 고도, 토지파복(6개), 토성(3개)
	강우	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 30일 누적강우
	기온	일기온(평균, 최대, 최소)
대장균 자료	훈련	대장균관측자료의 80%(456개)
	테스트	대장균관측자료의 20%(114개)
		570

Hidden layer 수와 정확도 관계



ANN을 이용한 모의 결과



6.2 ANN 자동화

6. ANN

➤ 입력자료 자동생성

- ✓ 수질, 유량, 기상자료 자동 내려받기

- ✓ 자료 추출

- ❖ 관심지역, 기간

- ✓ 입력자료 생성

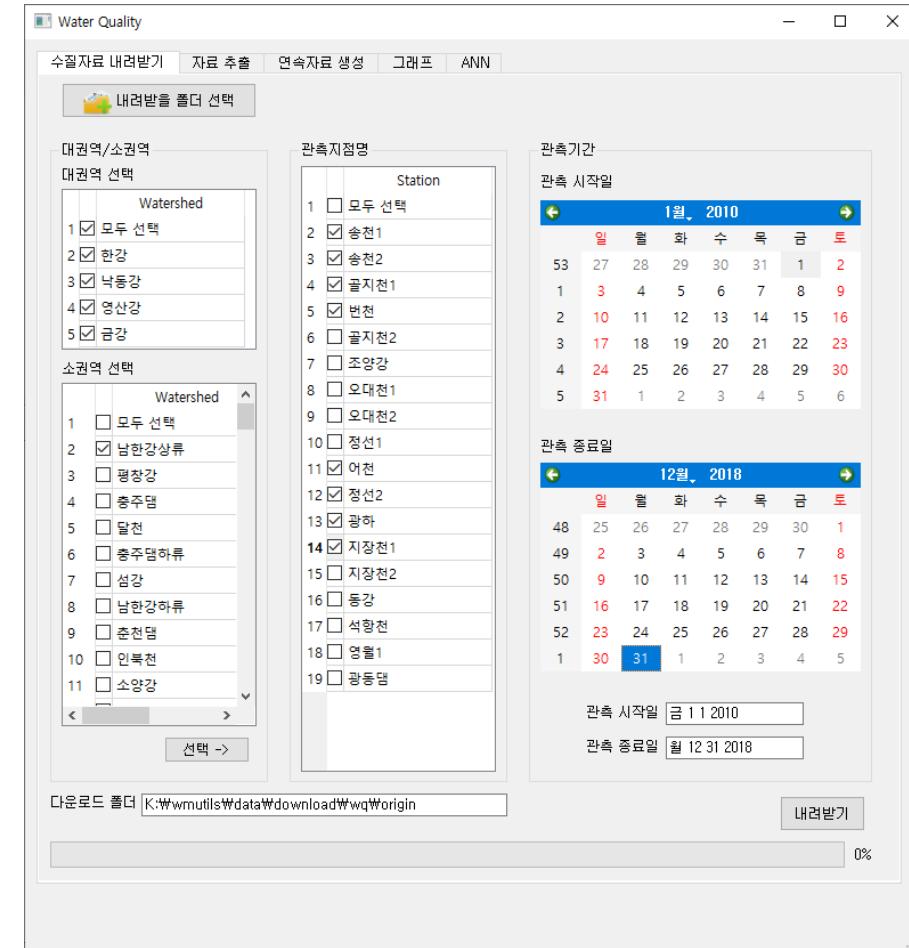
- ❖ 이상치 검토 및 삭제

- ❖ 보간을 통한 연속자료 생성

- ✓ ANN 모델 구축

- ❖ 자동화를 통한

- 은닉층, 노드 개수, 적용 함수 평가



ANN 입력자료 자동생성



WRF-Hydro
-WQ

ARF-
Hydro-
Water
Quality

유역모델 개발 시사점



➤ 최상, 최적의 유역모델은?

- ✓ 다양한 도구가 필요
- ✓ 도구가 많으면 할 수 있는 일이 많다!
 - ❖ 대상지역, 연구목적, 적용범위, 자료확보 가능성 등에 따라 유역모델 선택



■ 다양한 도구 구비

➤ 유역모델 개발

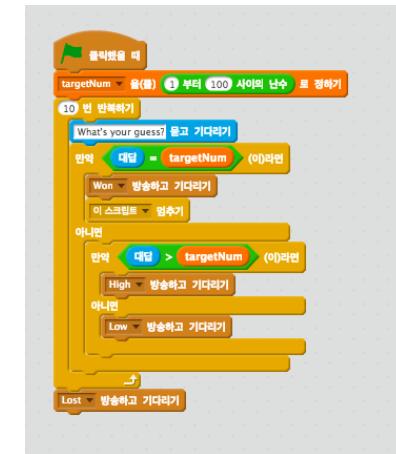
① 추상화 수준: 단순 모델에서 출발하여 복잡성 수준 증대

② 개발방법

- ❖ (레고블럭과 같은) 모듈화 추구
 - 효율적인 통합으로 확장성 확보
 - 유지 보수 편리성 확보
- ❖ Open source 이용



■ 모듈화를 통한 확장성 확보



■ Scratch 개발 모습

➤ 유역모델 개발

③ 한국형 유역모델 개발

- ❖ 국내 유역 환경 고려 필요
- ❖ 밀도 있는 토지이용으로 유역 내 도시 + 농촌 + 산림 혼재

■ 국내 유역 환경의 고려

구분	고려 사항
도시지역	<ul style="list-style-type: none">• 차집 및 관거 월류수• 불명수 유입• 불투수 지표면 오염물질 축적(축적함수)• 처리점오염원, 미처리점오염원(조정계수)
농촌지역	<ul style="list-style-type: none">• 관개, 시비(무기질 비료, 퇴액비)• 논둑에 의한 저류• 대단지 비닐하우스• 축산지역 가축분뇨 유출
산림지역	<ul style="list-style-type: none">• 식생 잔재물(난분해성 물질의 증가)• 식생별 LAI, 뿌리깊이• 식생계수(증발산)

7. 유역모델 개발 시사점

7. 시사점

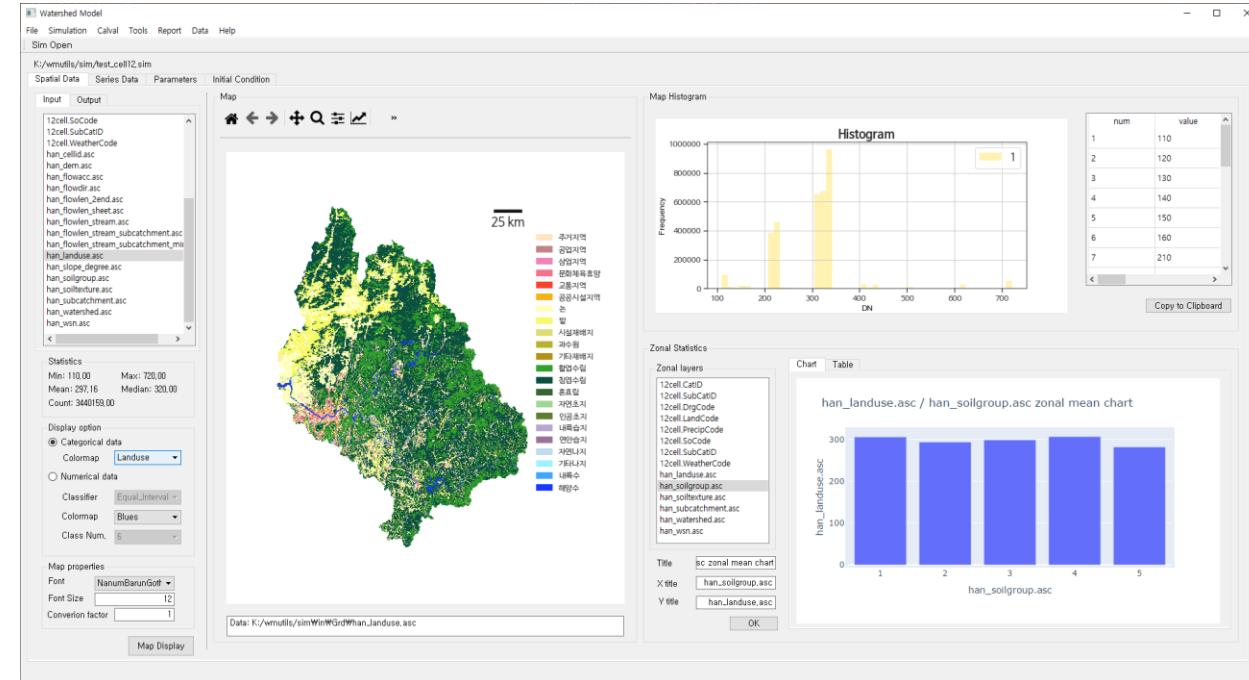
➤ 유역모델 개발

④ 사용자 편의성 고려

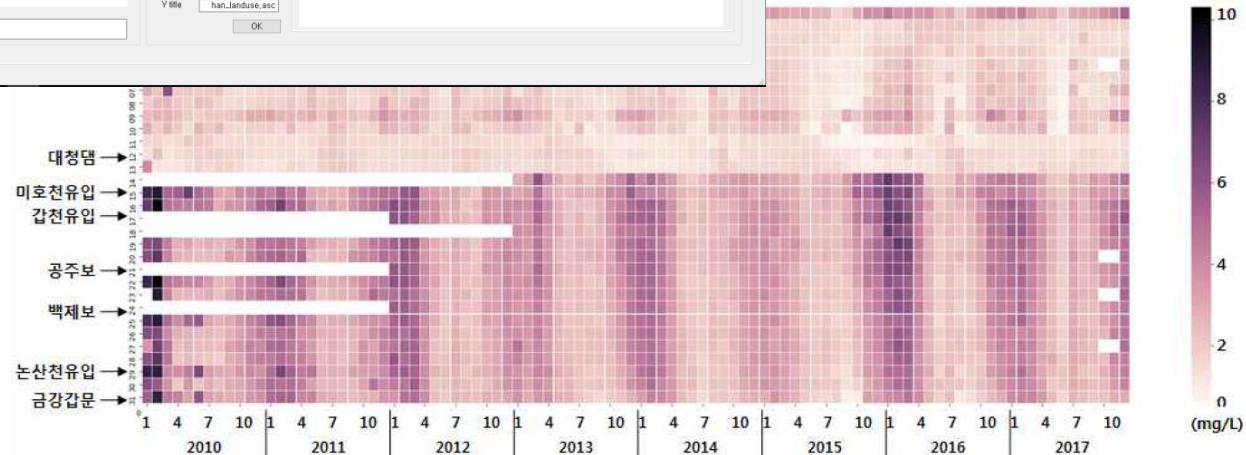
- ❖ 입력자료의 자동생성
- ❖ 보검정 자동화
- ❖ 모의결과 시각화

⑤ 시범유역 장기 적용

- ❖ 모델개발 + 관측
- ❖ 20 ~ 30년 장기 적용



STREAM GUI 환경



Heat map을 이용한 표현 (x 축: 연도/월, y 축: 상류부터 유역명)

경청해주셔서
감사합니다.

(주)아이드로코어

서울시 금천구 가산디지털1로 219
벽산디지털밸리6차 1104호

02-2627-3575

hlcho@hydrocore.co.kr
www.hydrocore.co.kr