

미국의 기후변화에 대비한 지하수 조사·이용 및 관리

2008. 6.

한국수자원공사 수자원연구원

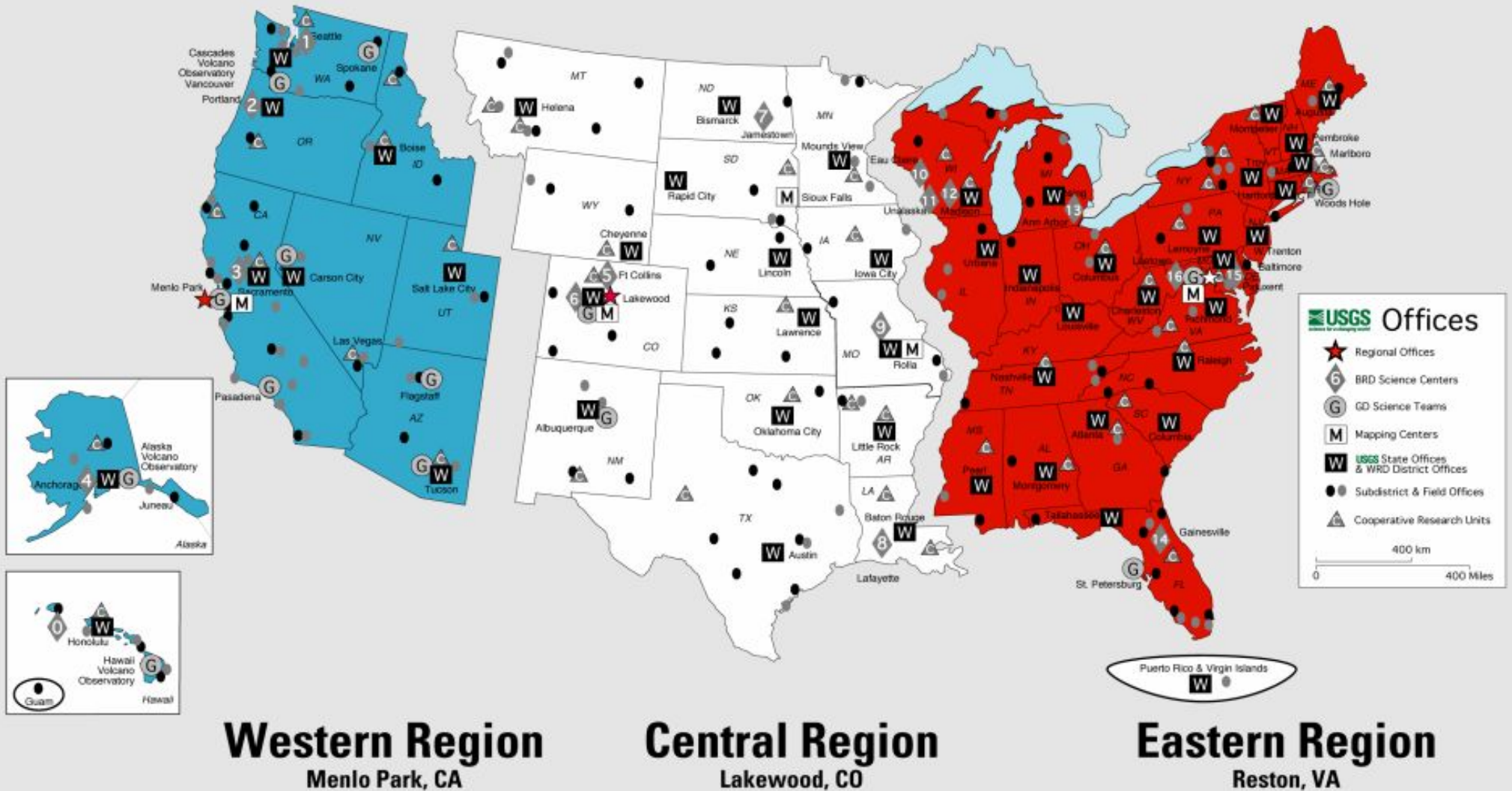
김 규 범 (gbkim@kwater.or.kr)

순서

- 21세기 기후 변화와 수자원 환경
- 지표수와 지하수는 단일 수자원
- 국내 지하수의 변화...
- 미국의 지하수분야 조사 연구 방향
- 우리나라의 지하수 방향은...

미국 지질조사소(U.S. Geological Survey)

U.S. Geological Survey Regions and Location of Major Offices



미국의 지하수 이용

- Domestic wells provide drinking water for about 43 million Americans

About another 90 million Americans are on public supplies from ground-water sources

- ✓ 미국인구 : 276백만명

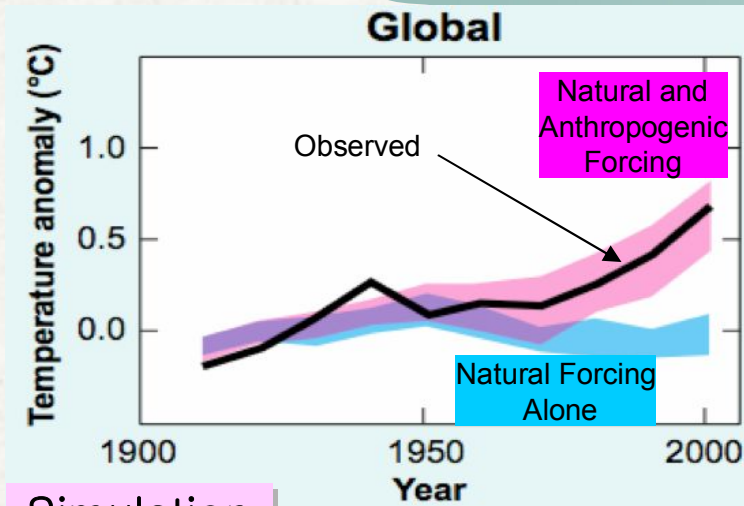
기후 변화와 수자원

Greenhouse 효과 및 Global warming 으로 인하여...

IPCC(Intergovernmental Panel of Climate Change) 2007년 4차 평가보고서에 의하면, 1750년 이후 지구 온난화가 가속되고 있다고 명확히 평가함

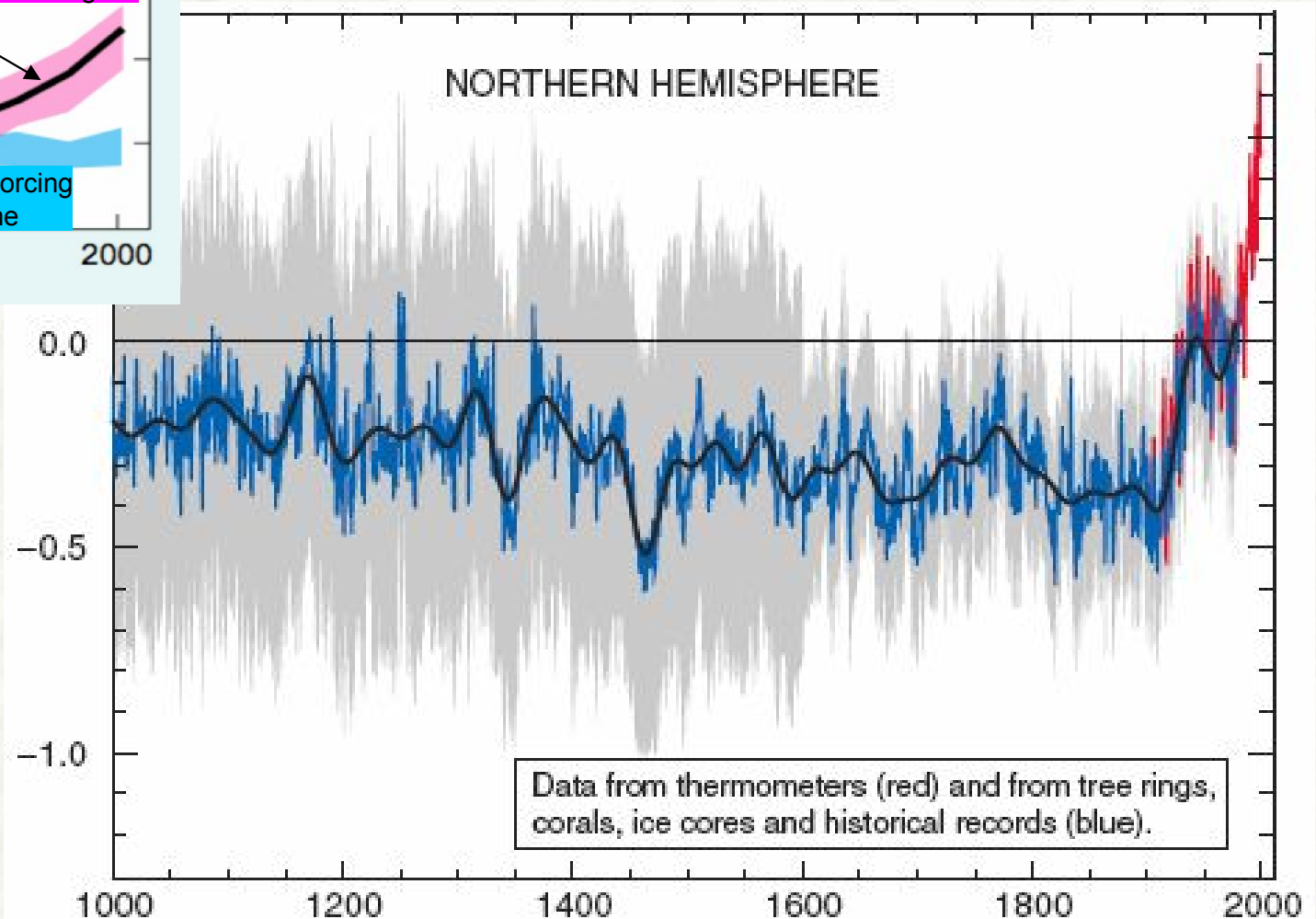
- 증발산량의 증가
- 물 순환 패턴의 변화
- 알래스카 지역의 습도 증가 및 해빙
- 미국 남서부의 건조/가뭄
- 강우 형태의 변화
- 겨울기간중의 눈이 녹은 시기/기간의 변화
- 해수면의 상승
- 홍수 및 가뭄 패턴의 변화 등

Variation in Earth Surface Temperatures

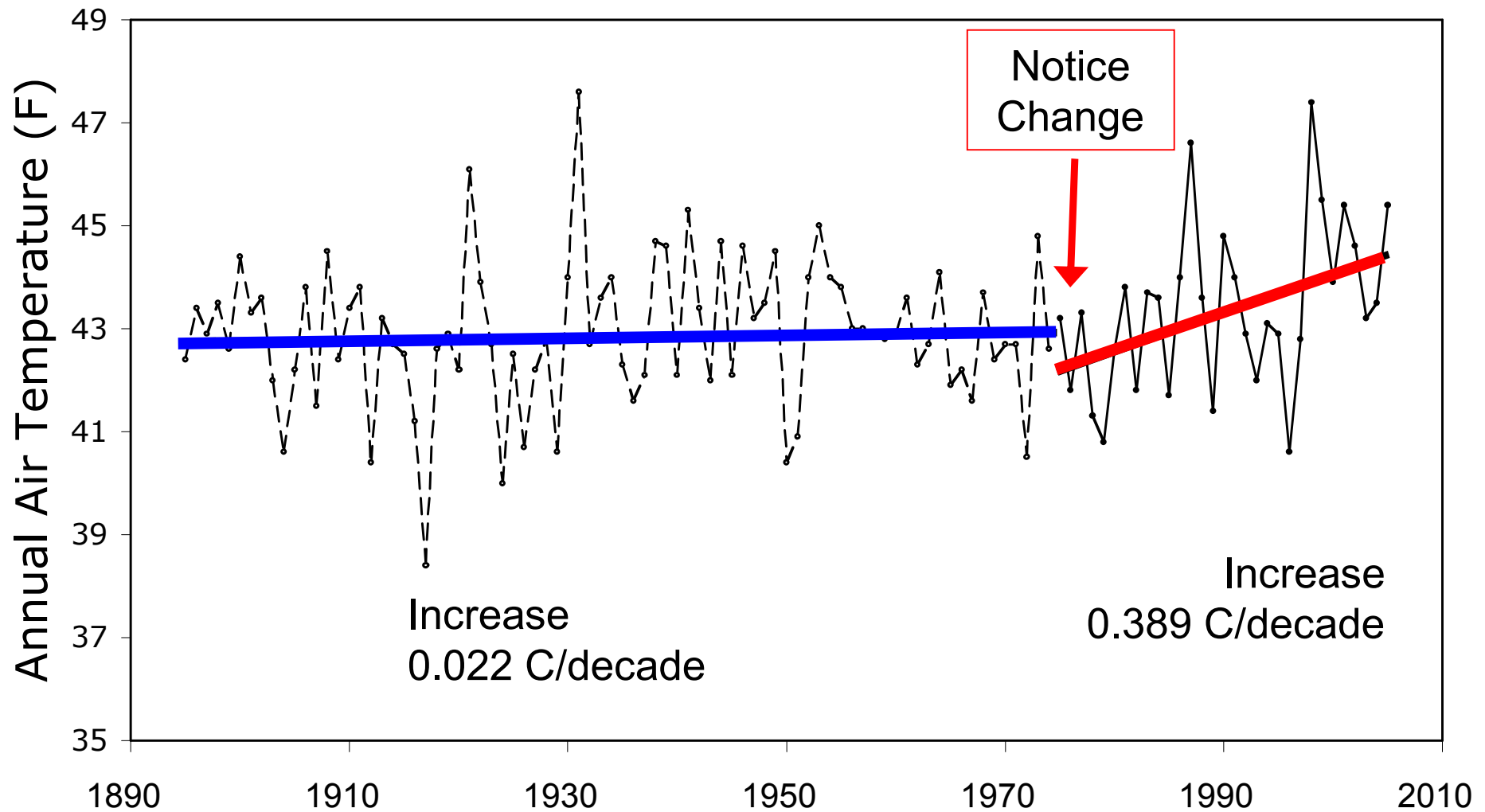


Simulation

Departure in Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
from the 1961 to 1990 average



Wisconsin Air Temperatures 1895–2005

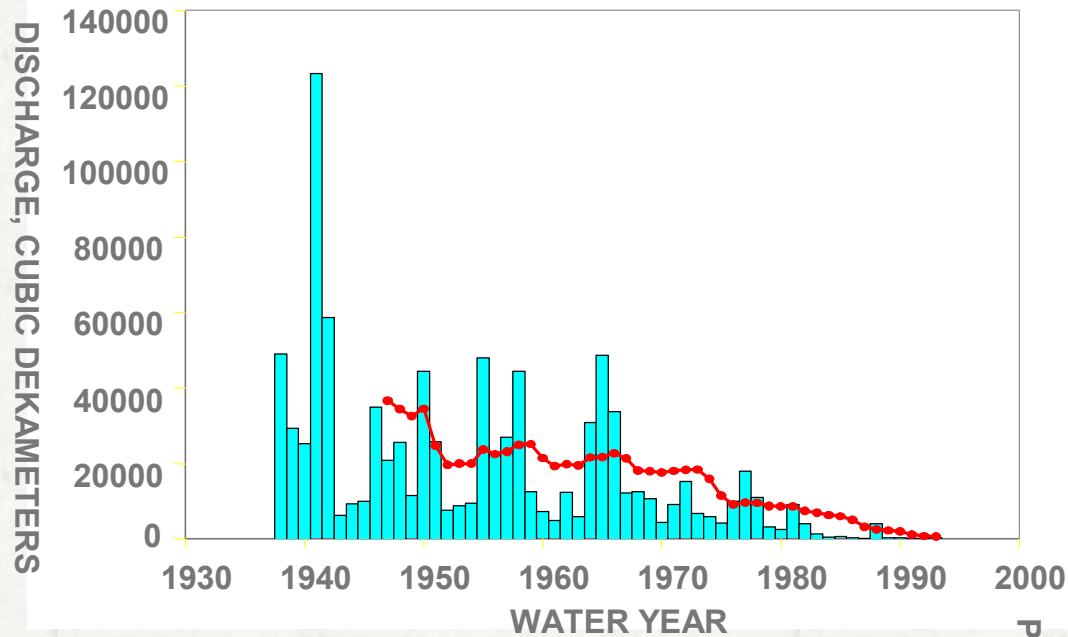


미국내 기후변화의 여러 증거들...

- 극지방 온난화 사례(알래스카)
 - ✓ 봄과 겨울의 온도 상승
 - ✓ 해빙기 하천 유량 급증
 - ✓ 삼림화에도 불구하고 토양 온도 상승으로 유기물로부터의 이산화탄소/메탄 방출
 - ✓ 곤충의 증가
 - ✓ 해안선과 시설물의 침식에 노출
 - ✓ 해빙으로 인한 도로 등 소실 (차량 이동가능 기간이 연 200일에서 100로 감소)
 - ✓ 토양온난화에 따른 탄소방출량 = 화석연료 탄소 방출량 (극지방)

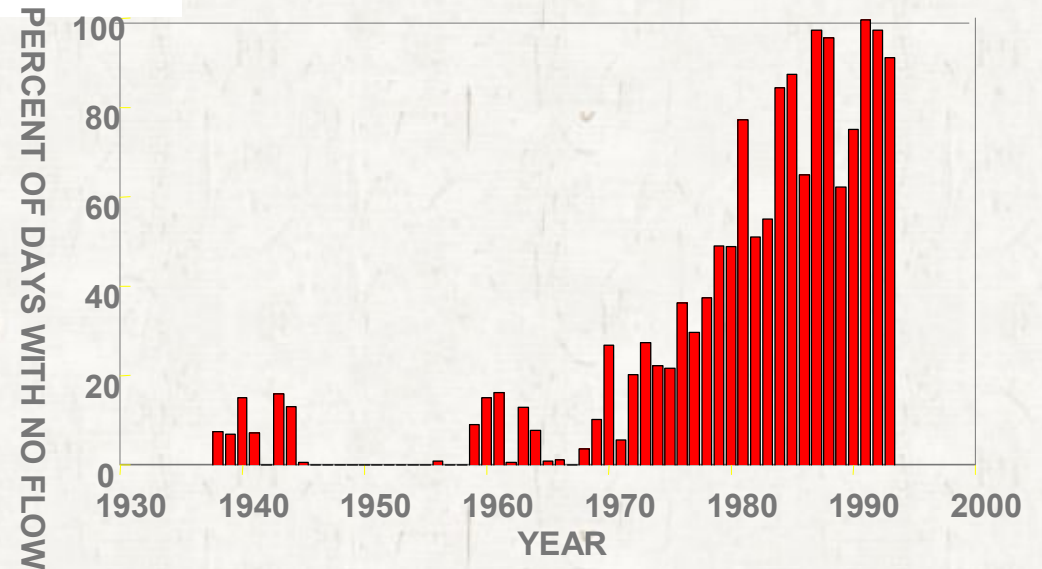
- 미국 본토 사례
 - ✓ 서부지역
 - 지난 50년간 일부 강설이 강우로 변화
 - 봄의 해빙기가 빨라짐
 - 봄의 눈 피복 면적이 줄어듦
 - ✓ 동부지역
 - 100년전에 비하여 해빙기가 1~2주 빨라짐

미국내 하천 유황의 변화



Percentage of no-flow days
(Beaver River, OK)

하천 유량의 감소(Beaver River, OK)



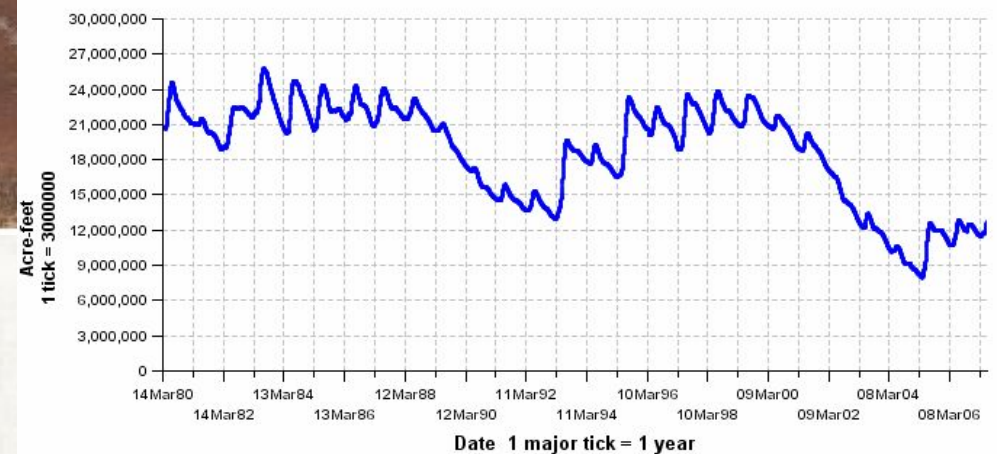


Lake Powell – June 29, 2002



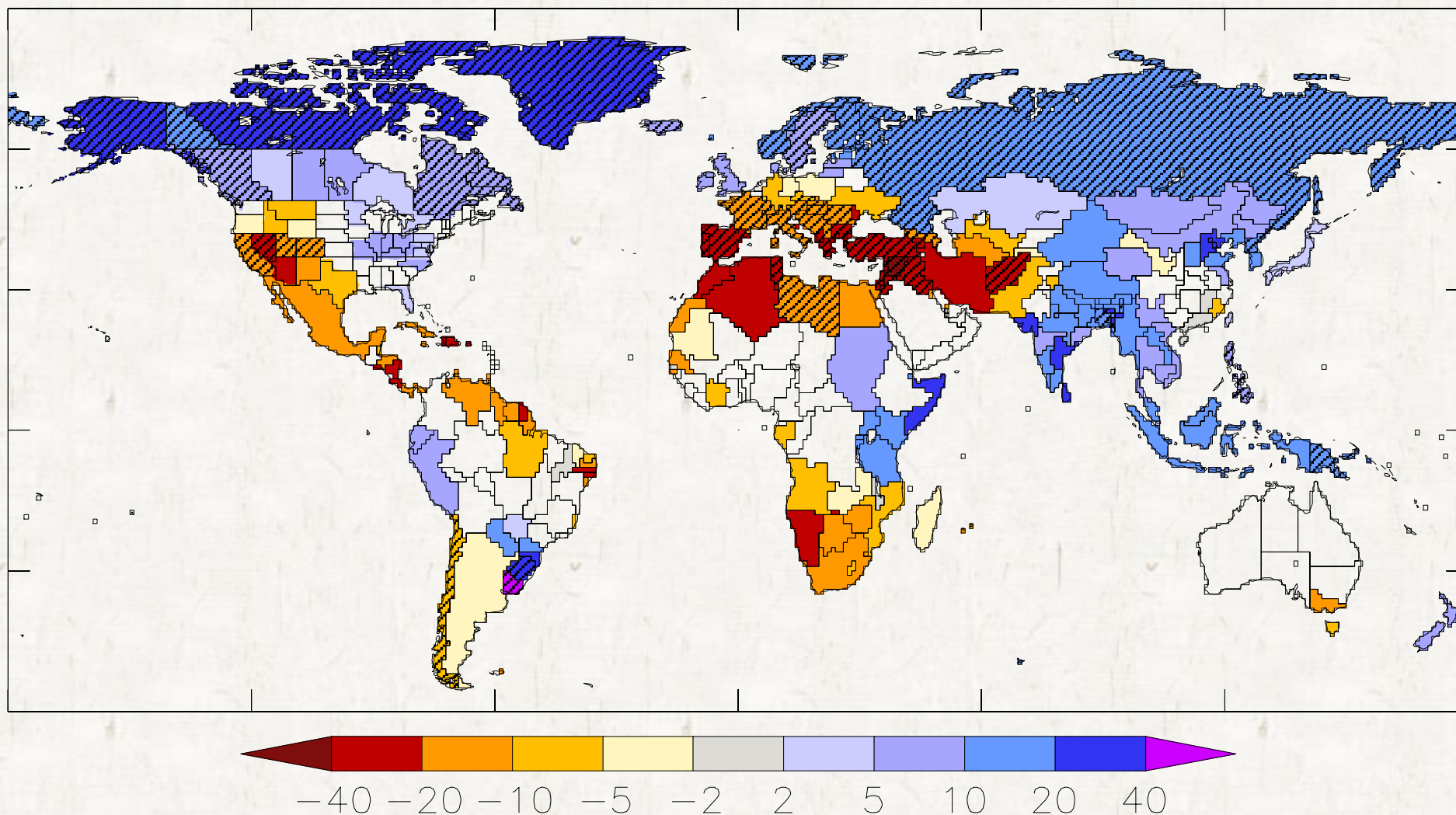
Lake Powell – December 23, 2003

미국 중서부
가뭄 실태
(Glen
Canyon
Dam 상류)



Model-Projected Changes in Annual Runoff, 2041-2060

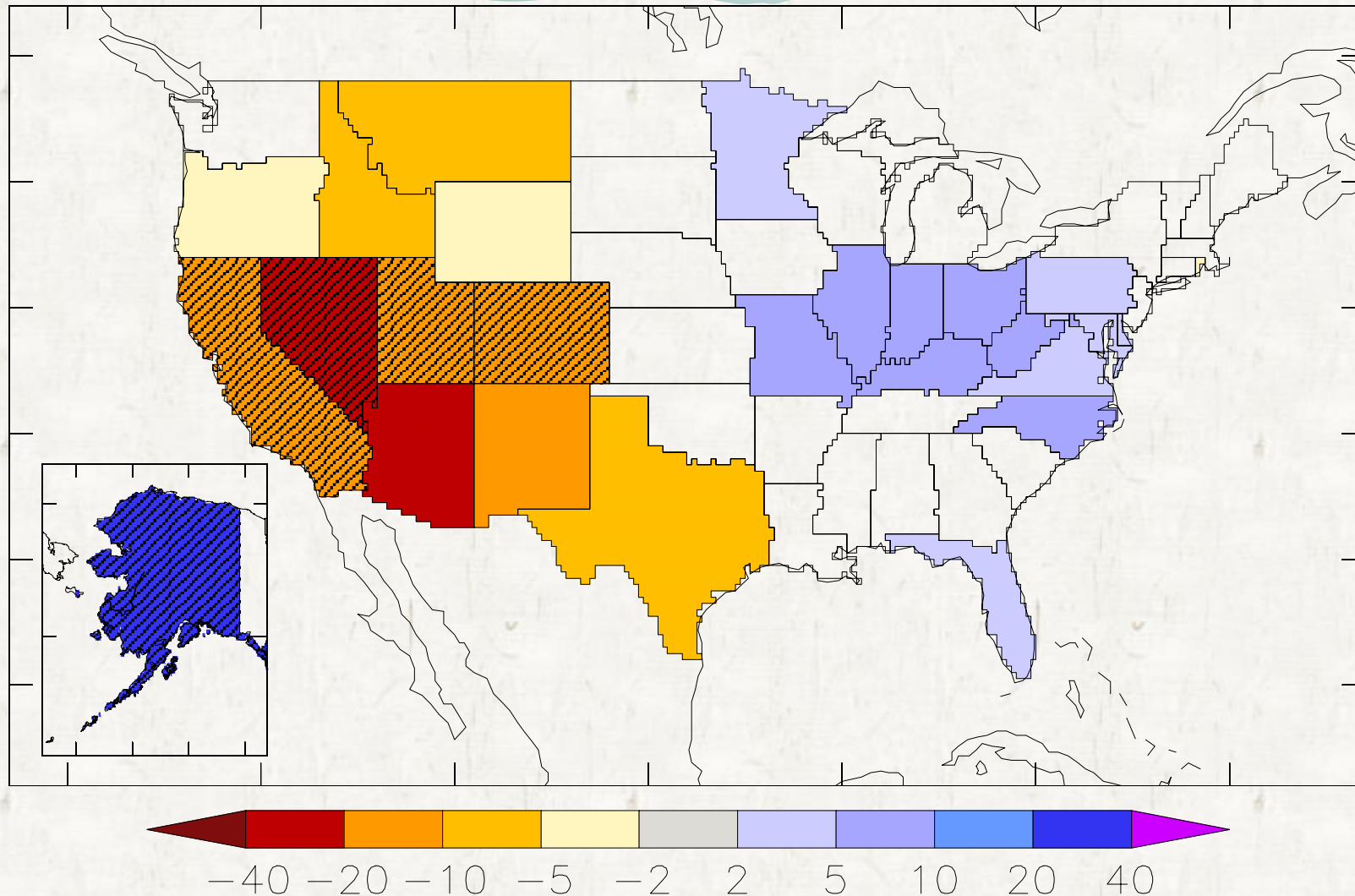
Percentage change relative to 1900-1970 baseline. Any color indicates that >66% of models agree on sign of change; diagonal hatching indicates >90% agreement.



(After Milly, P.C.D., K.A. Dunne, A.V. Vecchia, Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, *Nature*, **438**, 347-350, 2005.)

Model-Projected Changes in Annual Runoff, 2041-2060

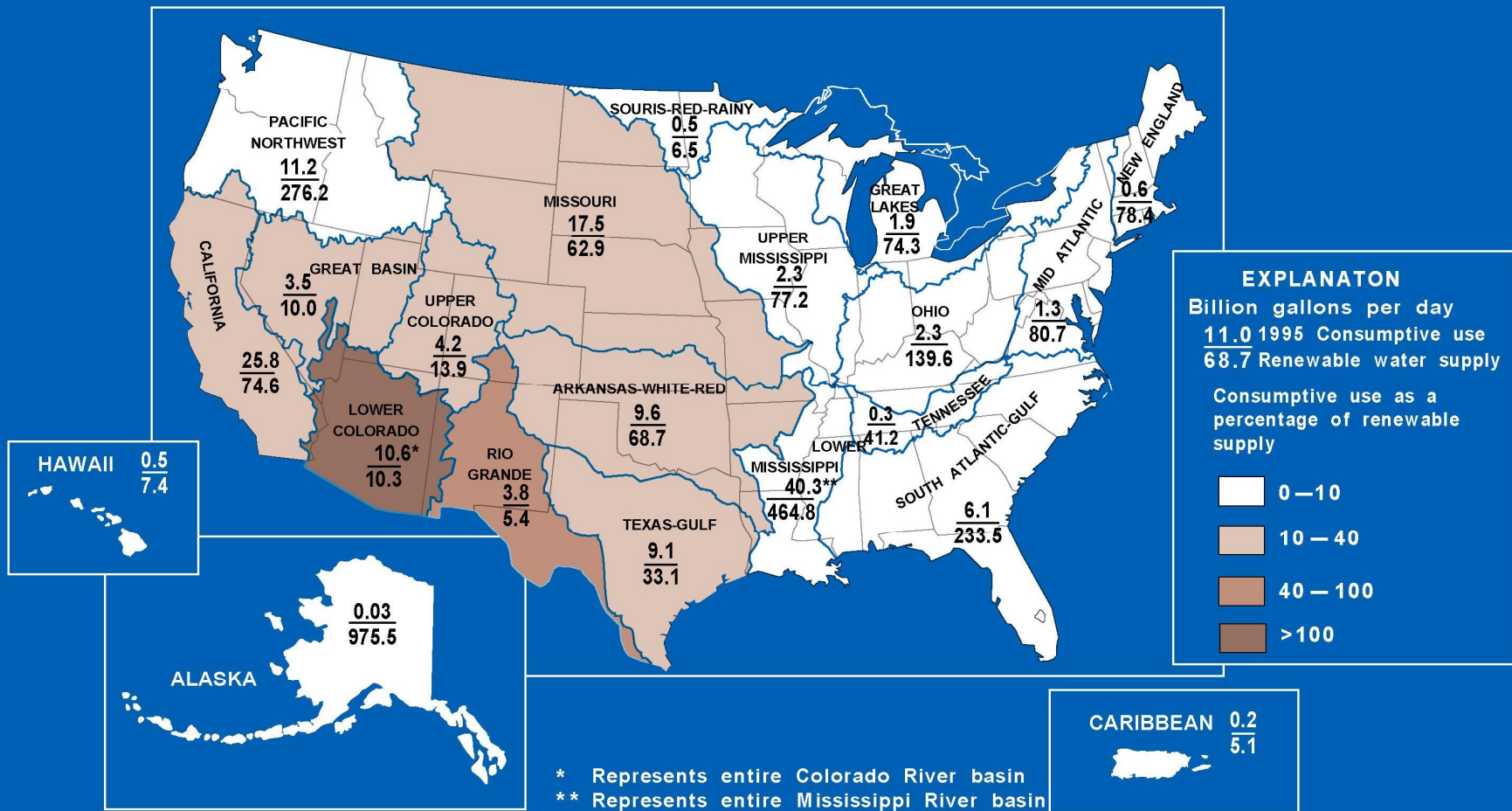
Percentage change relative to 1900-1970 baseline. Any color indicates that >66% of models agree on sign of change; diagonal hatching indicates >90% agreement.



(After Milly, P.C.D., K.A. Dunne, A.V. Vecchia, Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate, *Nature*, **438**, 347-350, 2005.)

Where is there already stress?

CONSUMPTIVE USE AND RENEWABLE WATER SUPPLY, BY WATER-RESOURCES REGION



미국 서부의 대수층의 Storage 감소

Colorado Springs, Colorado



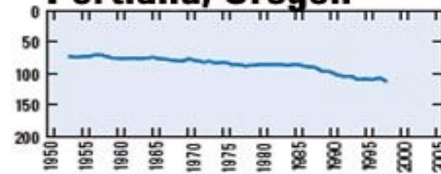
Twin Falls, Idaho



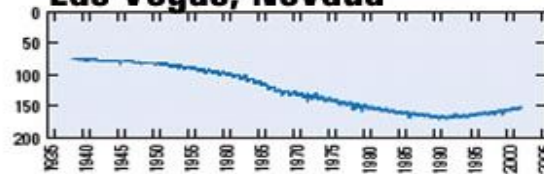
Imperial, Nebraska



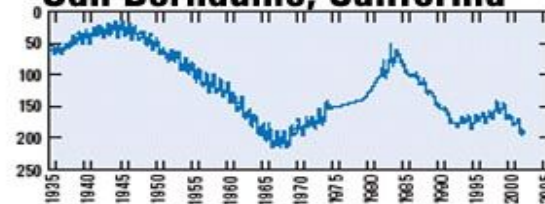
Portland, Oregon



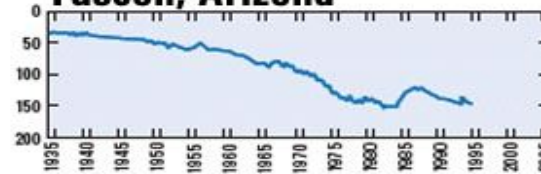
Las Vegas, Nevada



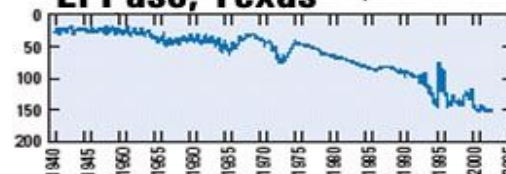
San Bernadino, California



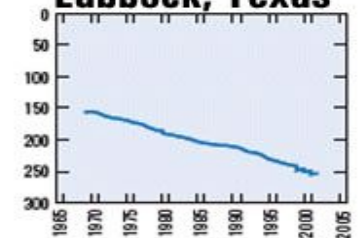
Tuscon, Arizona



El Paso, Texas



Lubbock, Texas

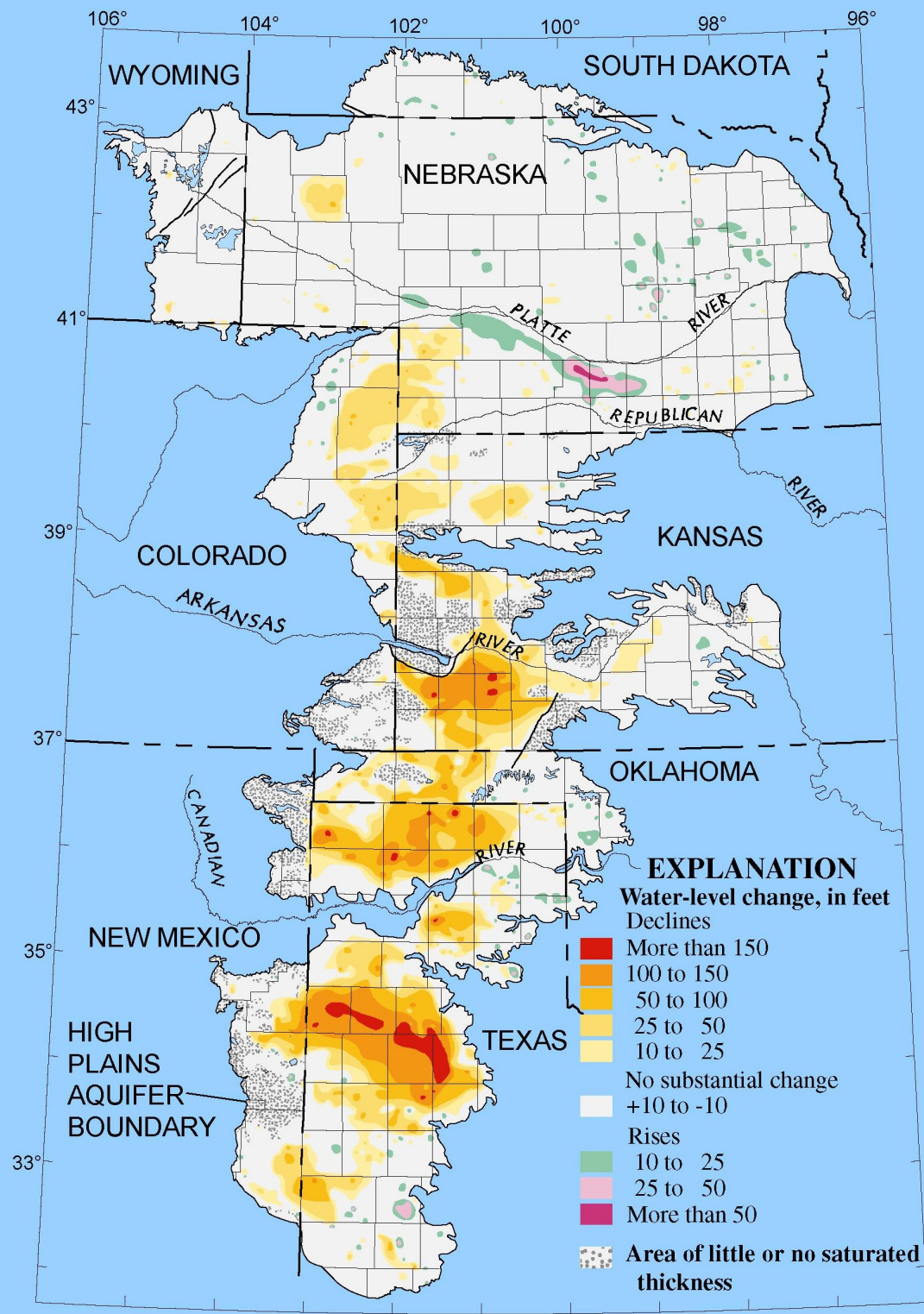


NOTE: All locations depict depth to water, in feet below land surface

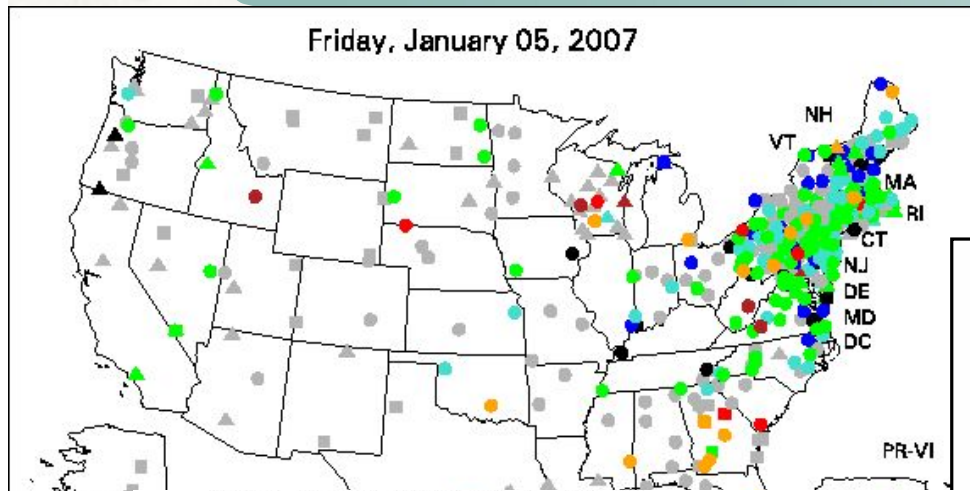


Water-level change in the High Plains Aquifer

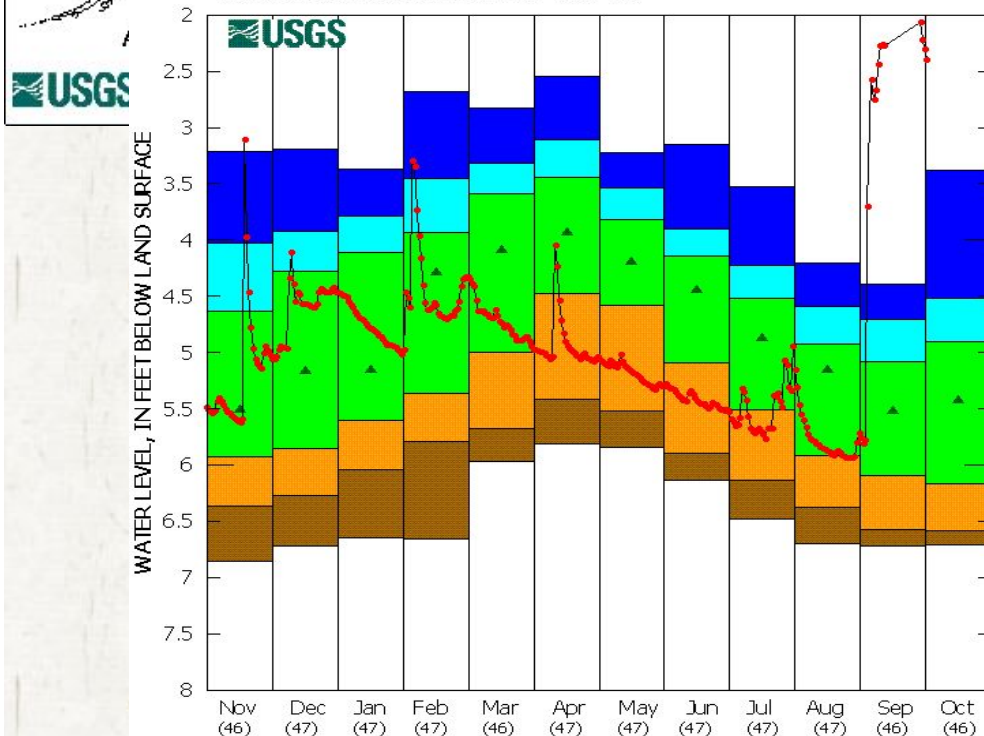
Through 2003



미국의 가뭄 관측정 및 평가



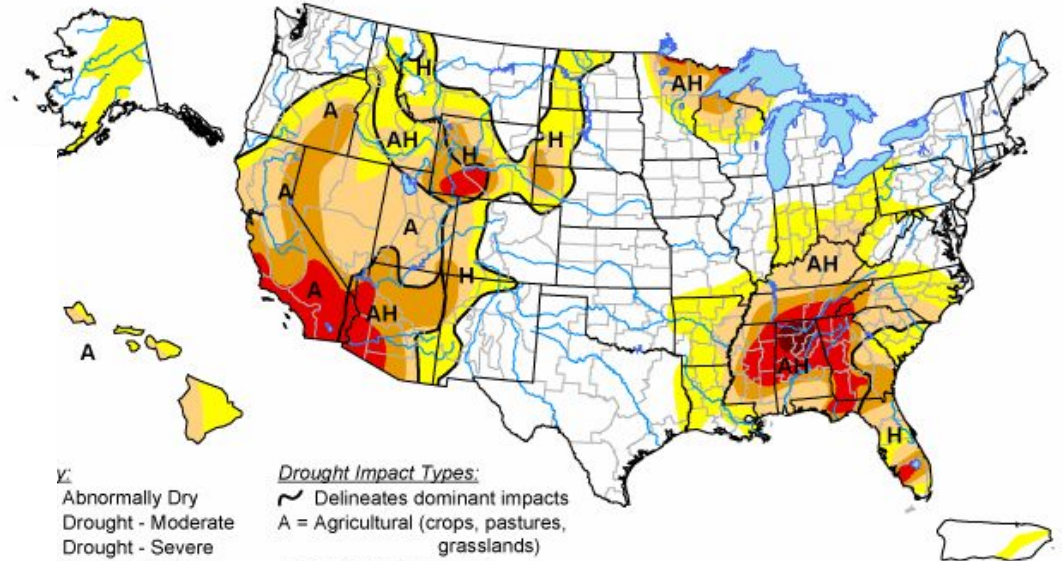
USGS 352315082484401 - NC-40



Climate Response Groundwater Monitoring Network

U.S. Drought Monitor

June 5, 2007
Valid 8 a.m. EDT



Drought Impact Types:
 ~ Delineates dominant impacts
 A = Agricultural (crops, pastures, grasslands)
 H = Hydrological (water)

Drought Monitor focuses on broad-scale conditions. Conditions may vary. See accompanying text summary and past statements.

<http://drought.unl.edu/dm>



Released Thursday, June 7, 2007
Author: Scott Stephens, NOAA/NESDIS/NCDC

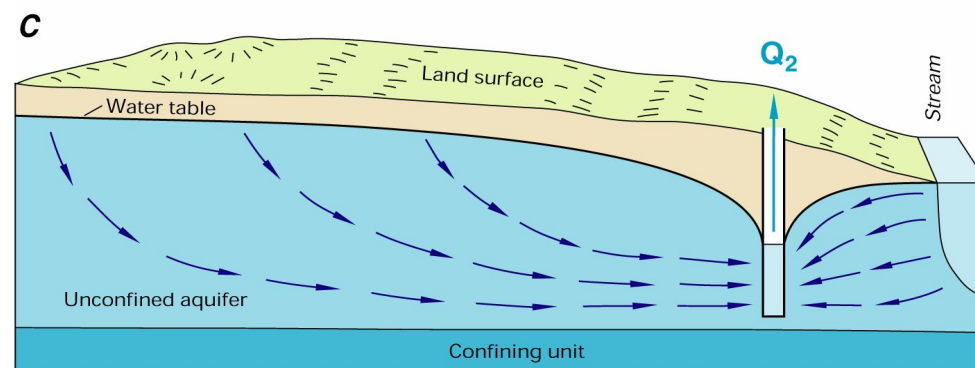
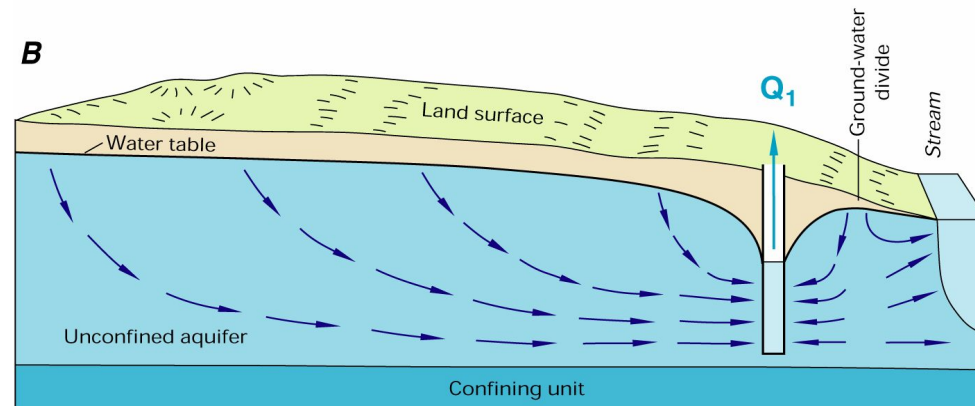
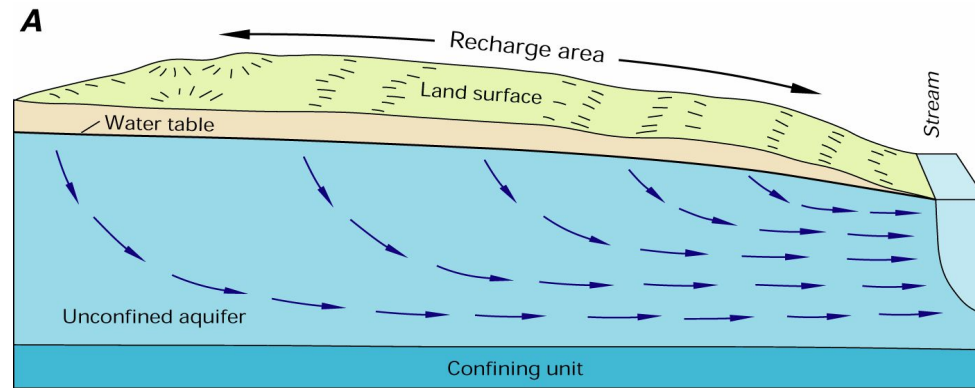
기후 변화에 따른 수자원의 변화

- Groundwater recharge reduced, small streams likely to dry up
- Declines expected in average lake levels
- Pressure to increase water extraction from lakes
- More reliance on irrigation to grow crops, not natural rainfall

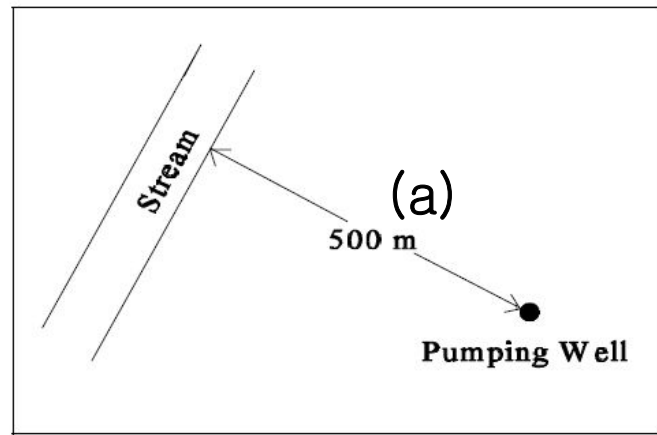


지하수와 지표수는 단일 수자원

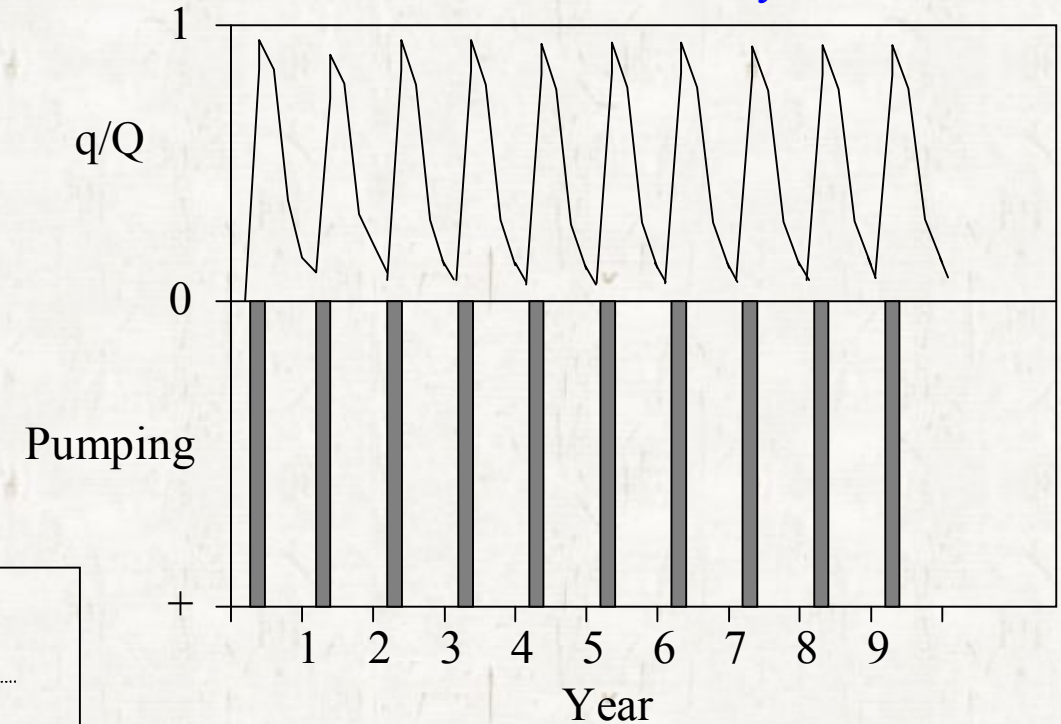
관정의 양수와 물의 흐름



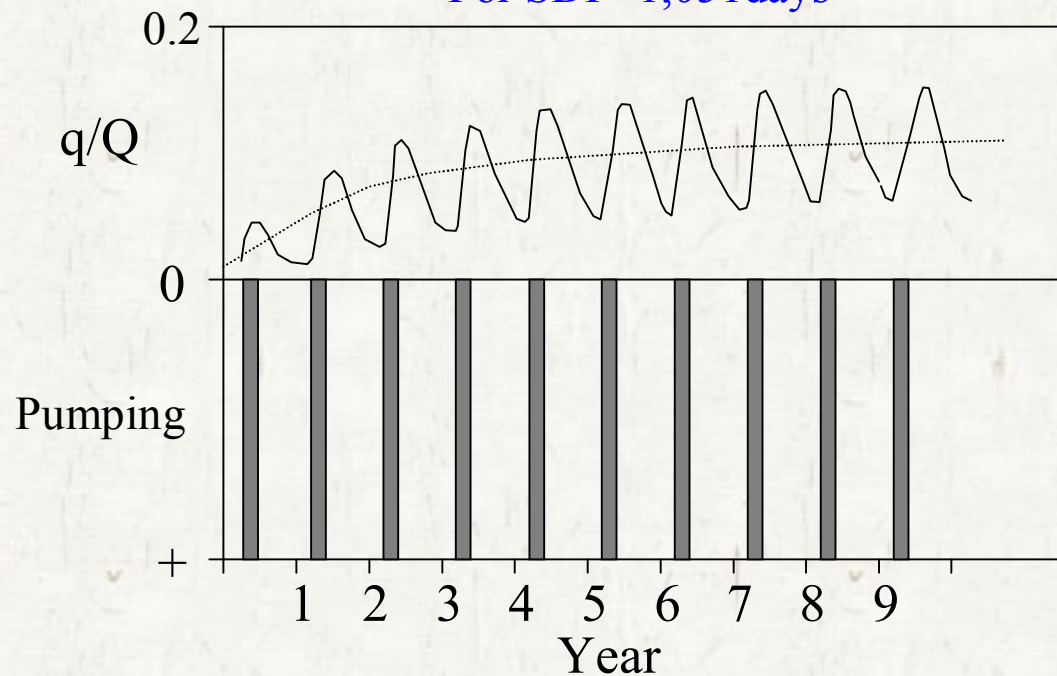
하천 특성과 지하수 장기 양수 관계의 모델링 결과



For SDT=11days



For SDF=1,051days



q/Q : 하천 고갈율

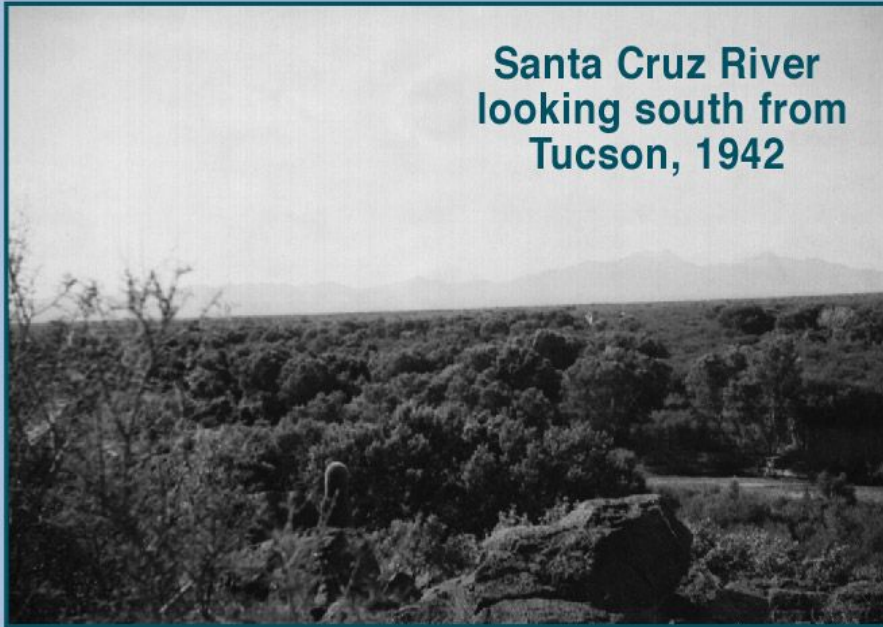
SDF : Jenkin's Stream
Depletion Factor ($SDF=a^2S/T$)

S: Storage coefficient
T: Transmissivity

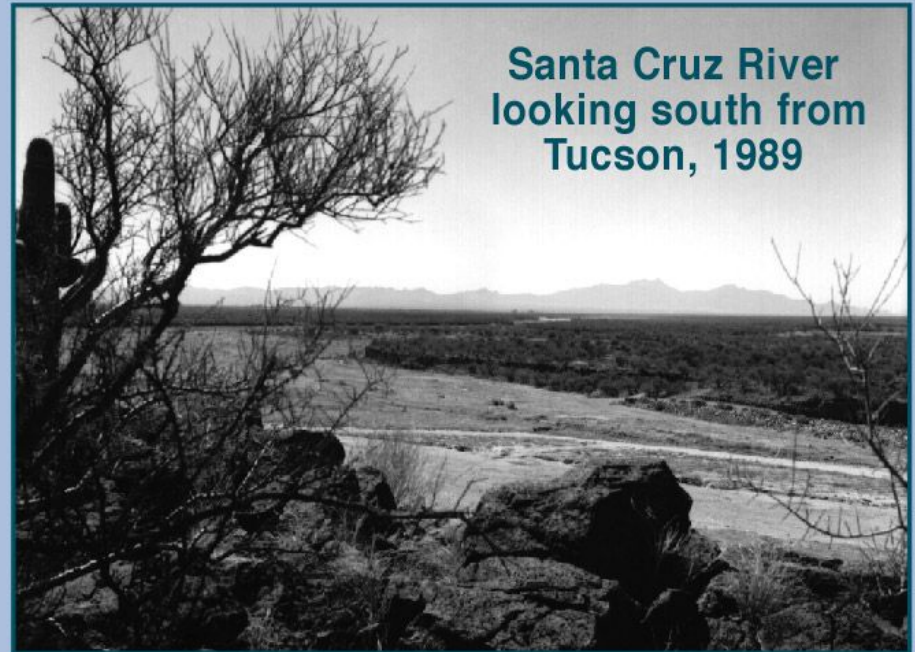
지하수 개발로 인한 하천의 변화

- 주변 양수로 인한 갈수기 하천 환경의 급변
- 하천 수위 고갈과 하상의 변화
- 다양한 식생 환경에서 초지로의 변화 등

Santa Cruz River
looking south from
Tucson, 1942



Santa Cruz River
looking south from
Tucson, 1989



지하수 개발로 인한 호수의 변화

- 호수 상류의 지하수 과다 채수로 인한 수위 저하



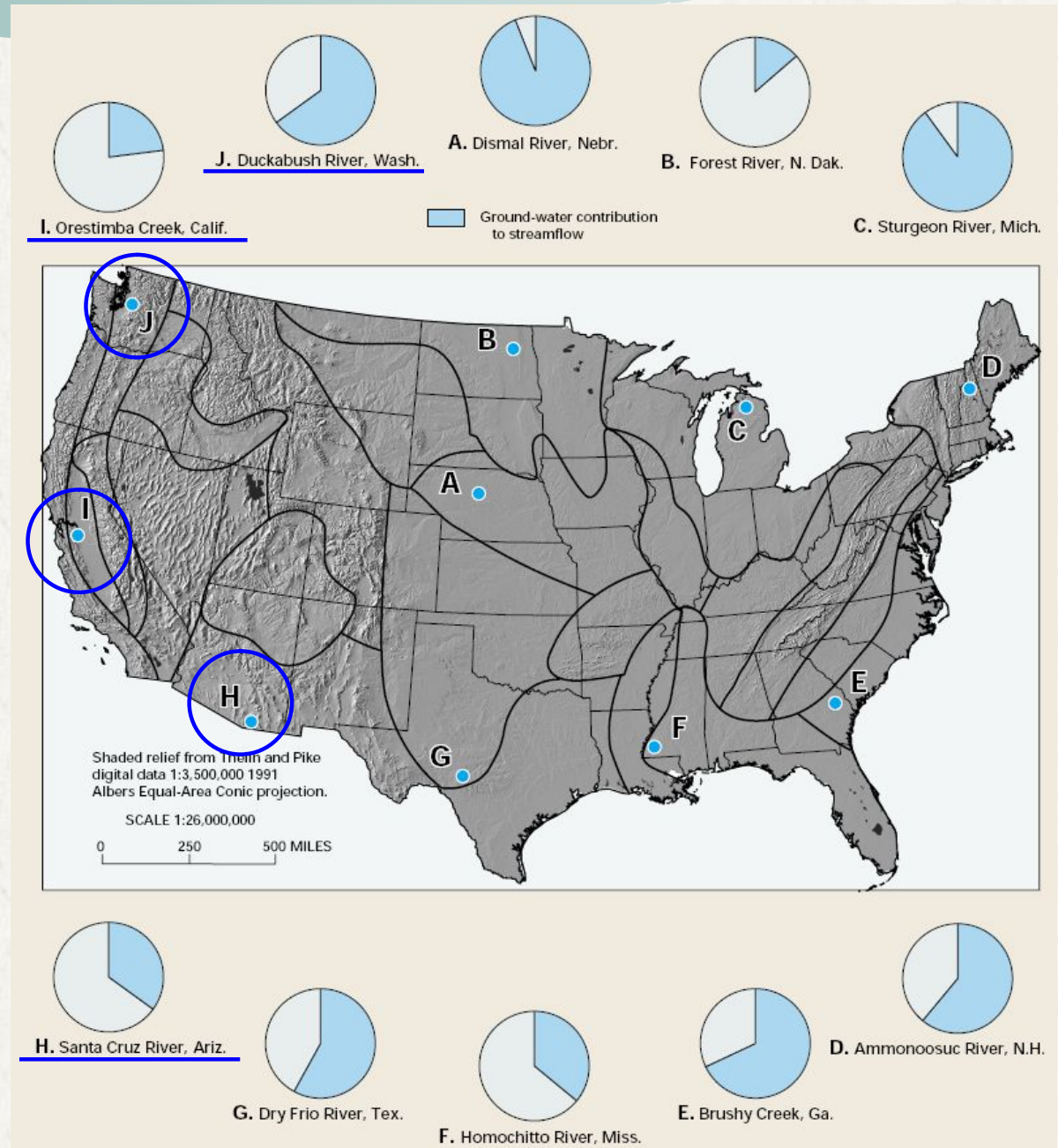
Dock on Crooked Lake in Florida
(1970's)



The same dock (1990)

지하수의 하천 유출 기여

Fig) 미국내 주요 하천
별 지하수의 하천
유량 기여율
(PART 프로그램)



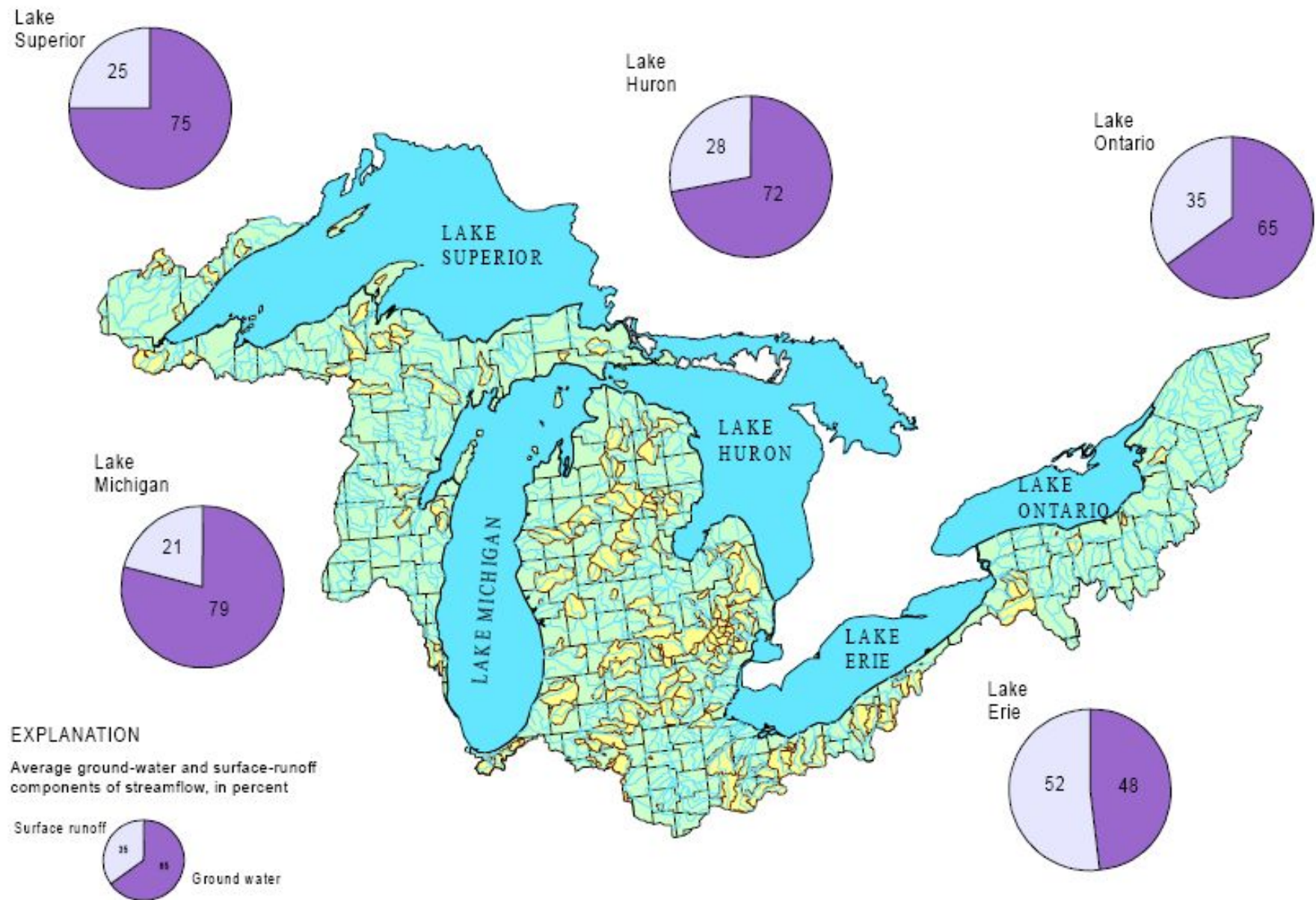
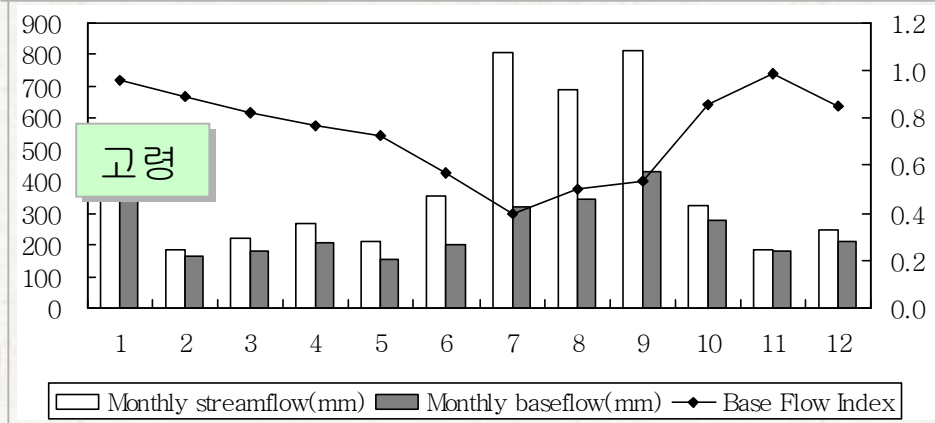
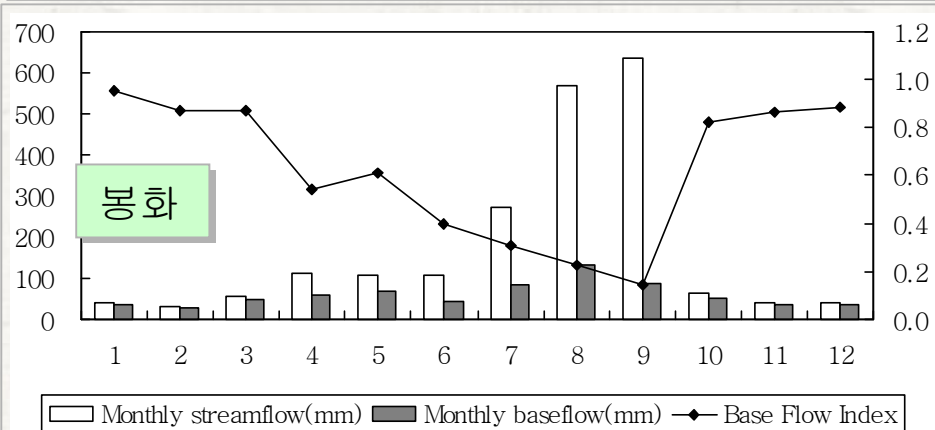
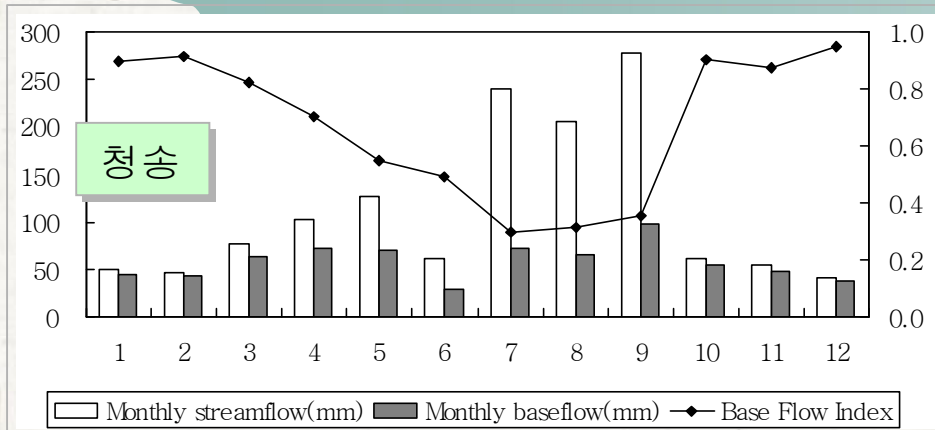


Fig) 미국 오대호 지역의 하천수/지하수 기여율

국내 지하수의 하천 기여도 분석결과(PART)



Site	Water-shed area (km ²)	Period	Mean stream flow	Base flow	Base flow Index (BFI)
			(cms)	(cms)	
청송	304.8	1999-2004	12.5	6.4	0.52
봉화	857.6	1999-2004	56.9	19.4	0.34
고령	438.5	1999-2004	65.0	42.1	0.65

지하수 양수 관리 및 지표수-지하수 연계 관리에 대한 행정적/법적 사례

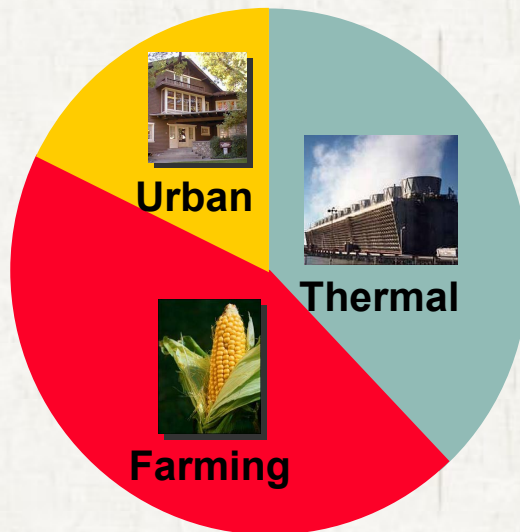
- 미국 IDAHO의 사례 : Snake river / Snake plain aquifer의 물 문제
- 1970년 이후 지하수 고갈에 따른 지표수/지하수 사용자간 갈등 발생
- 물 권리에 대한 변천사
- ✓ 1984년: Swan Falls Agreement (Snake river와 Snake plain aquifer는 동일 수자원으로 유량 유지 필요) : 하류지역 Milner/Weiser gaging stations의 최소 유량 정의 – 하천으로 배출되는 기간 동안의 지하수 이용은 하천 최소 유량에 영향을 주어서는 안된다.
- ✓ 1992~2000: 일부 물사용자의 권한 정지, 통합수자원 연구 시행
- ✓ 1994: 주 정부의 물 정책 기본은 Fall에서의 유출량 유지임을 확인
- ✓ 2001: 지표수 사용자의 지하수 보호구역에 대한 탄원 및 갈등 재현
- ✓ 2007.3.5: 장기간의 정책적/법정 협의 및 중재하에 Idaho 대법정에서는 지표수와 지하수 연계 관리에 대한 규칙 자체는 합헌이라 판정



지하수 지표수 상호 관계에 대한 패러다임의 변화

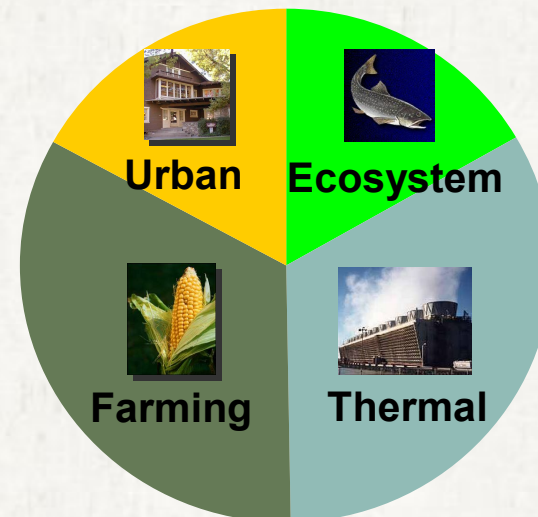
• *Old paradigm*

- 하천 인근에서의 지하수 영향
- 수 시간~수 주의 영향
- 핵심관점: 지하수 양수
- How much water can we reliably withdraw from the river?



• *New paradigm*

- 수 km 떨어진 곳의 영향
- 수개월~수세기의 영향
- 생태계에 미치는 영향
- How much water do we need to leave in the river?



우리나라 지하수의 변화...

국내 총적층 지하수위 변화 단순 추정

(지하수 관측소 112개소 : 분석기간 3~10년)

(m/d)

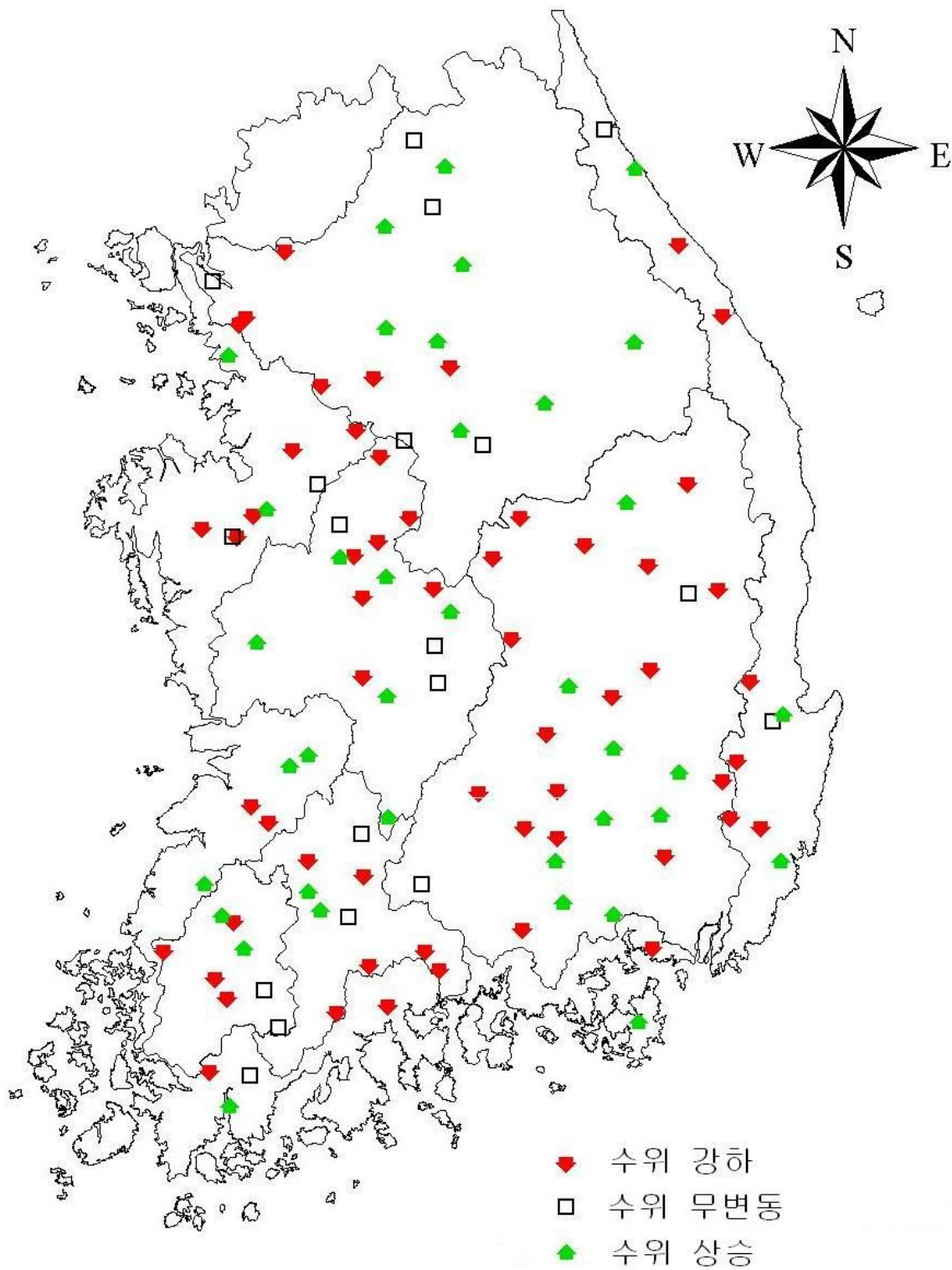
분석갯수	최소값	최대값	평균	표준편차
112	-.0062 (20년후 45m)	.0016 (20년후 12m)	-7.996 E-05 (20년후 58cm)	6.847 E-04

Table) 변동 비율

변동성	n=122	
	개 소	퍼센트(%)
감소	56	50.0
무변동	19	17.0
증가	37	33.0
합계	112	100.0

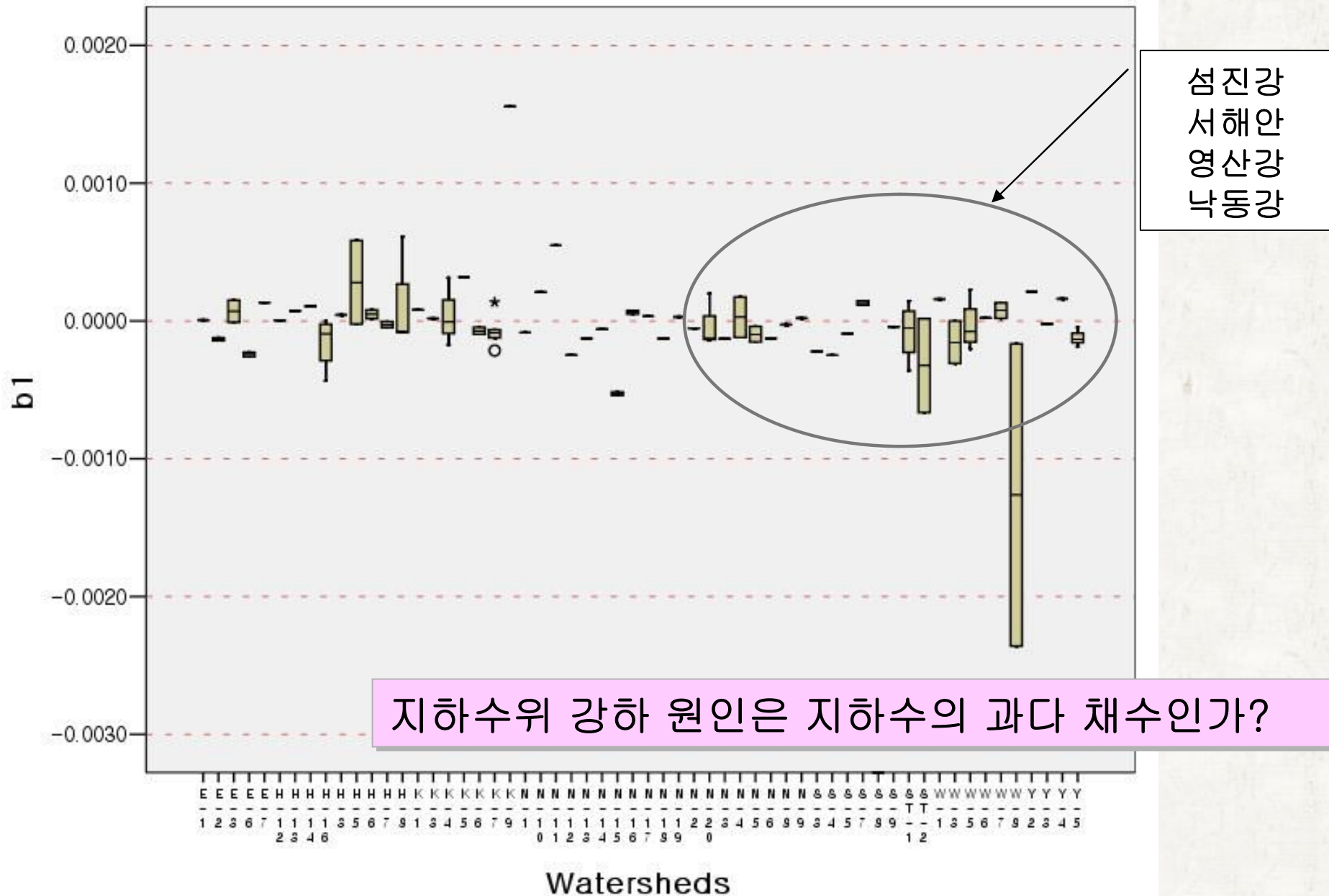
지하수위는 강하하고 있는가?

지하수 관측정 지점의
지하수위 변동 분포
(총적 관측정 112개)



소유역별 지하수위 변화

(주로 서해안/남해안 지역에 과다한 지하수위 강하 현상)

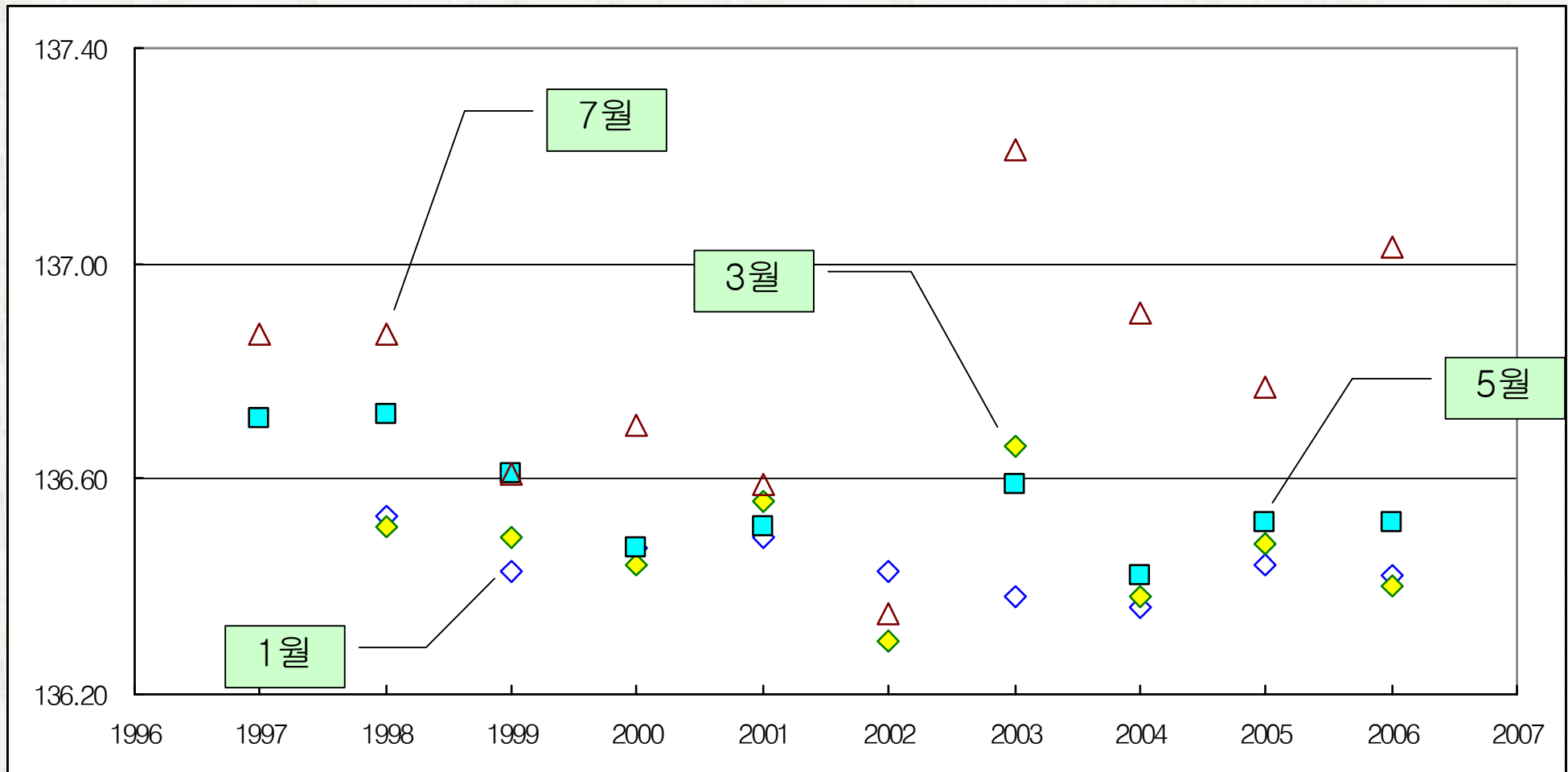


지하수위 변동지점의 일반적 특성

지점 특성 인자	수위 강하와 관계	비 고
관측정 표고	저지대의 경우*	저지대 대용량 관정 및 장기 양수에 의한 영향 가능성
하천과의 거리	상관 없음	하천과의 유입/유출이 어려워 지하수위 강하시 하천으로부터의 함양이 발생하지 않고 수위 강하가 지속될 수 있음
하천의 규모(폭)	상관 없음	소하천의 경우 지하수위를 보충할 수 있는 유량이 하천으로부터 유입되기 어려울 수 있음
지형의 경사	완경사 지역*	저지대 대용량 관정 및 장기 양수에 의한 영향 가능성
지표 피복	논, 밭, 읍소재지	농경지에 발달된 대형 관정의 장기 양수의 영향
지하수위깊이	특수 조건의 경우	수위가 깊은 경우에 + 및 -의 추세를 잘 보인다
수리전도도	적은 경우	적은 경우가 큰 경우보다 추세성을 잘 보이고 있음
투수량계수	적은 경우	적은 경우가 큰 경우보다 추세성을 잘 보이고 있음
암석 성인	상관 없음	퇴적암 분포지역에서 수위강하 추세성의 비율이 상대적 높음

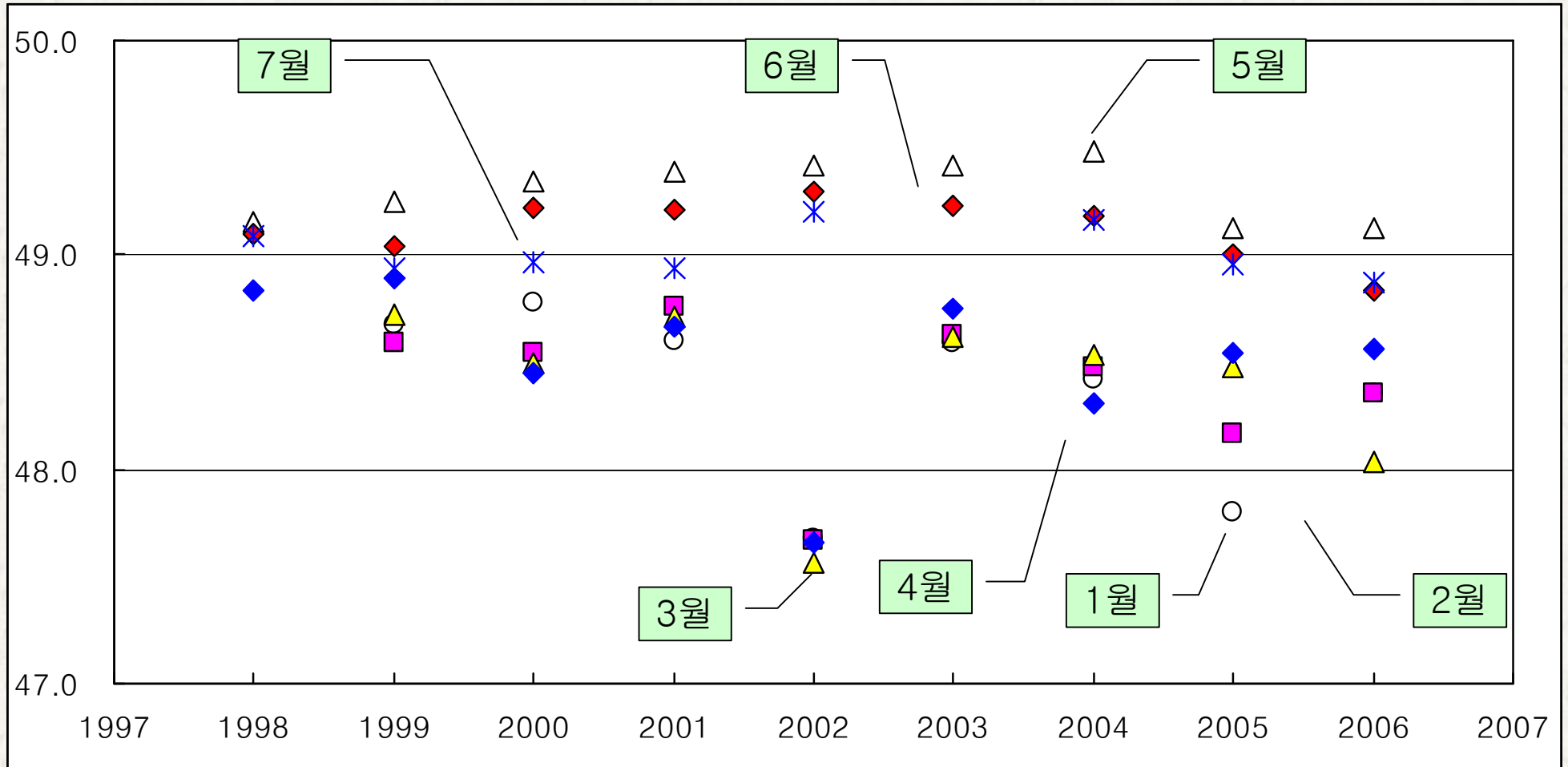
* : 통계적으로 유의한 수준임

충적층 관측정에서의 월별 연도별 지하수위 변화(옥천 청성)



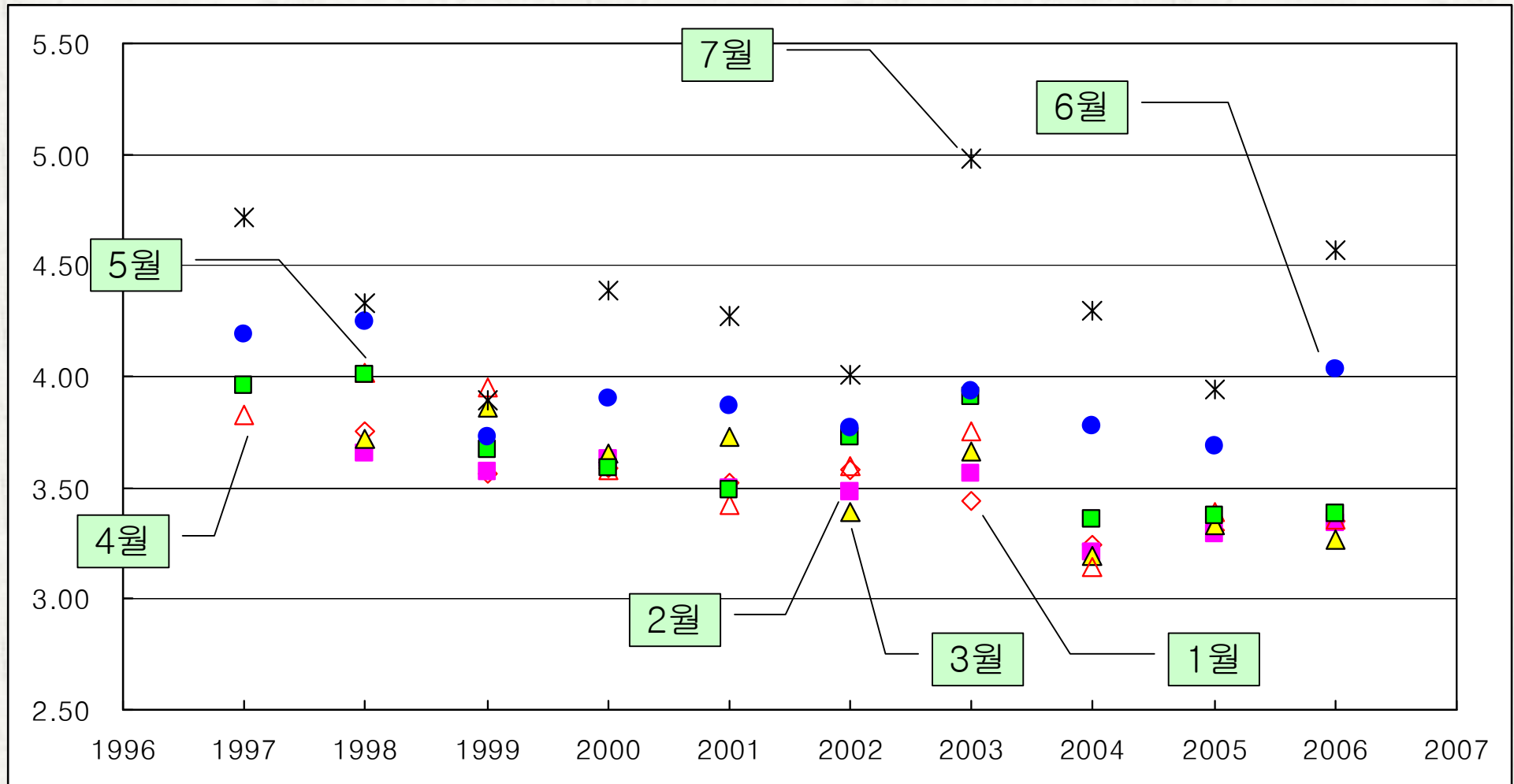
비고) 관개용 수로가 없는 산악지역

총적층 관측정에서의 월별 연도별 지하수위 변화(예산 덕산)



비고) 연소재지 주거 지역

충적층 관측정에서의 월별 연도별 지하수위 변화(나주 삼도)



비교) 농경 지역(논농사 지역)

국내 총적층 지하수위의 변동

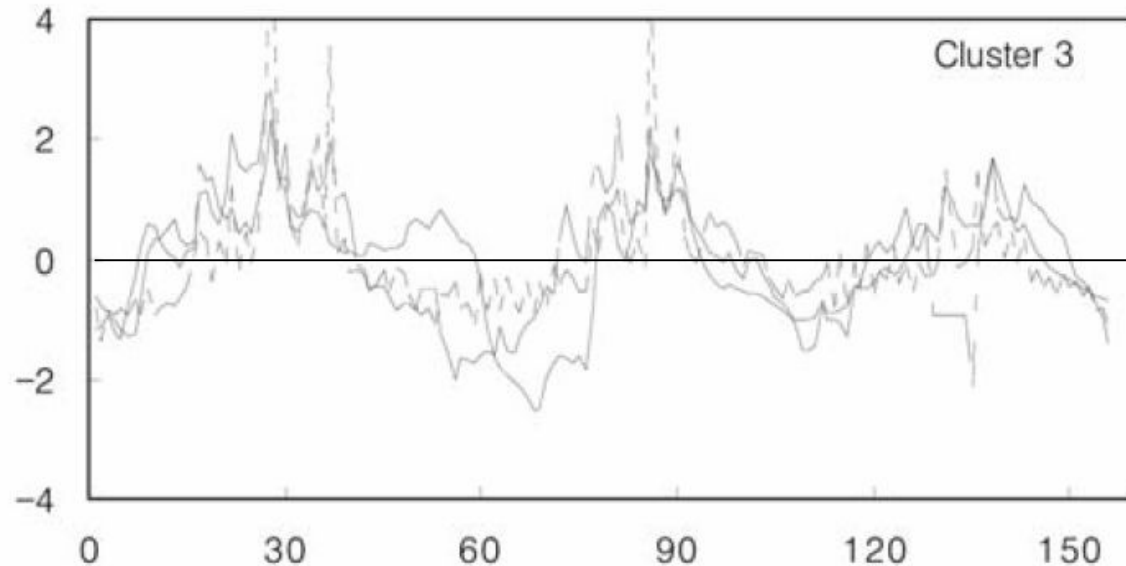
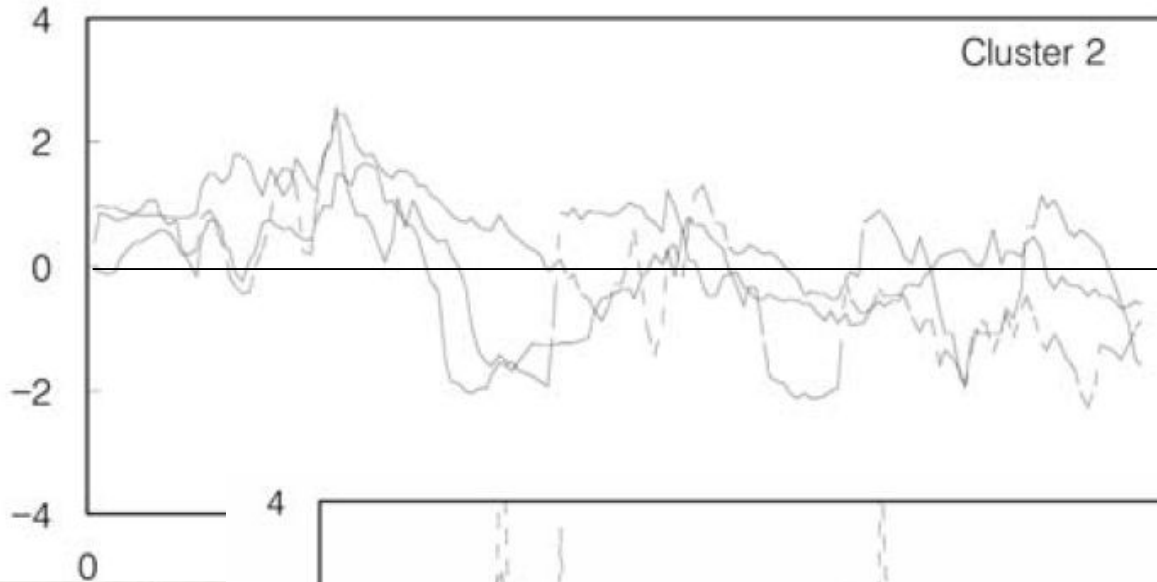
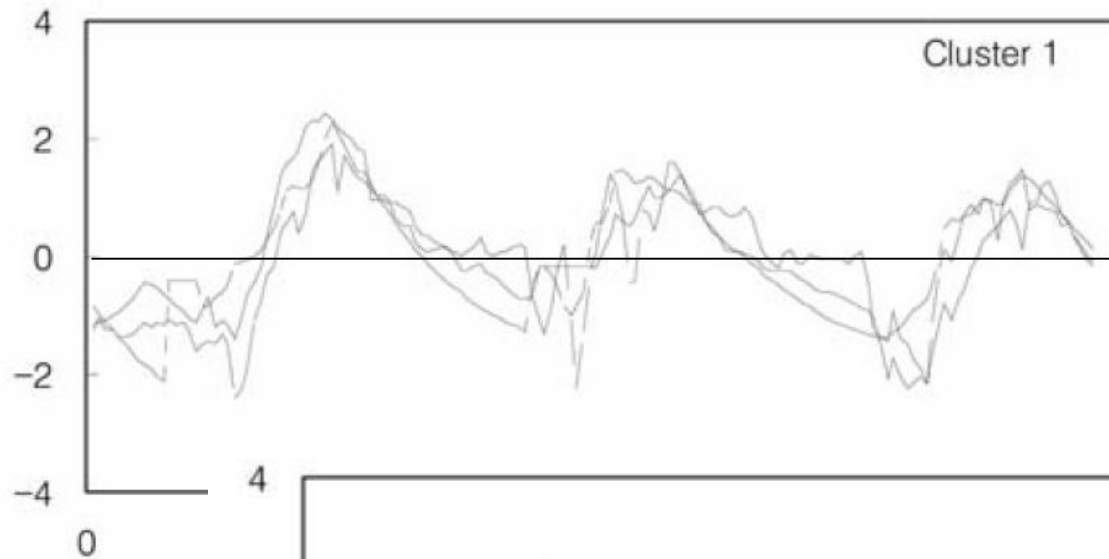
N=103

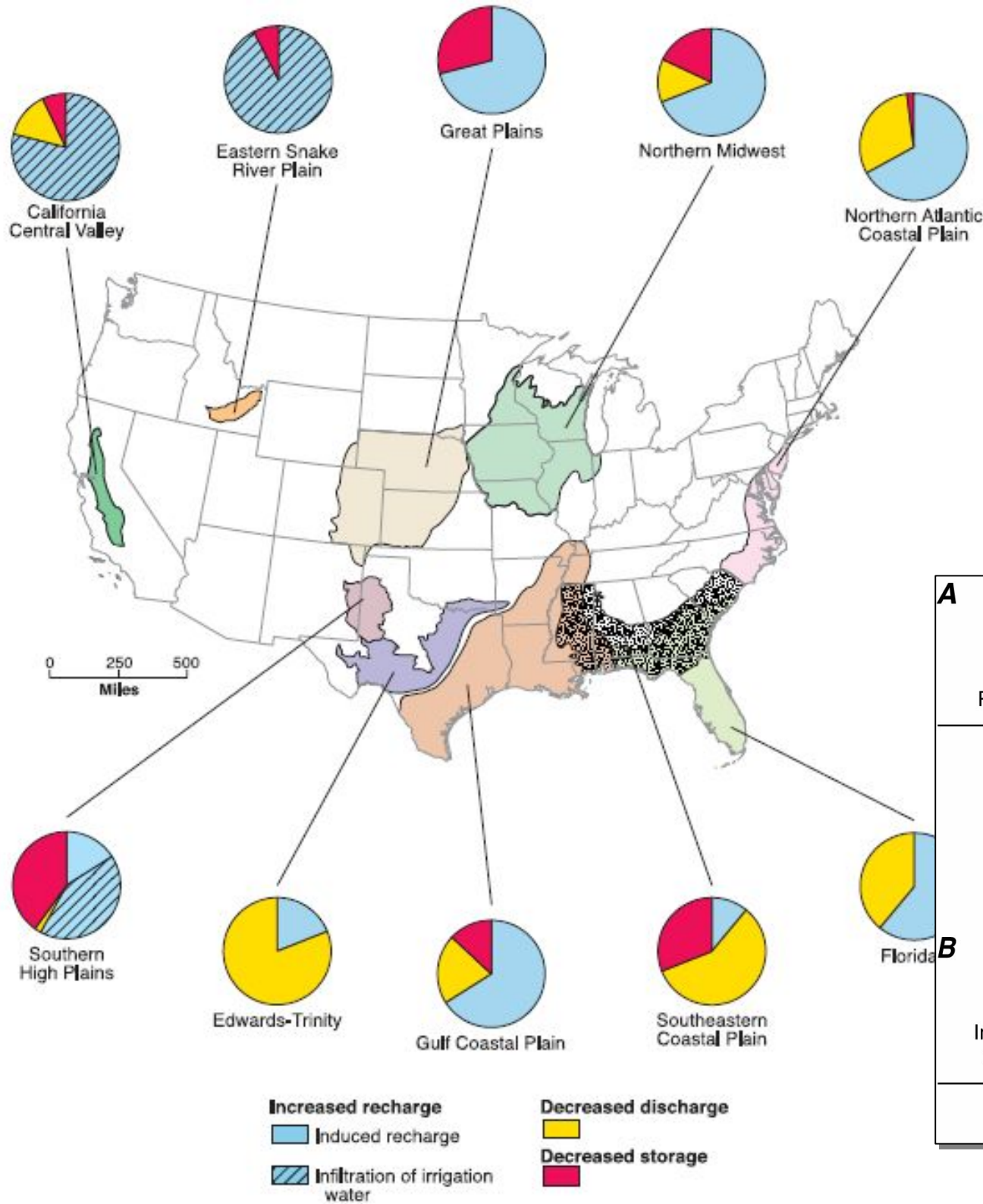
Period : 2003~2005

그룹 1 : 9개소

그룹 2 : 10개소

그룹 3 : 84개소

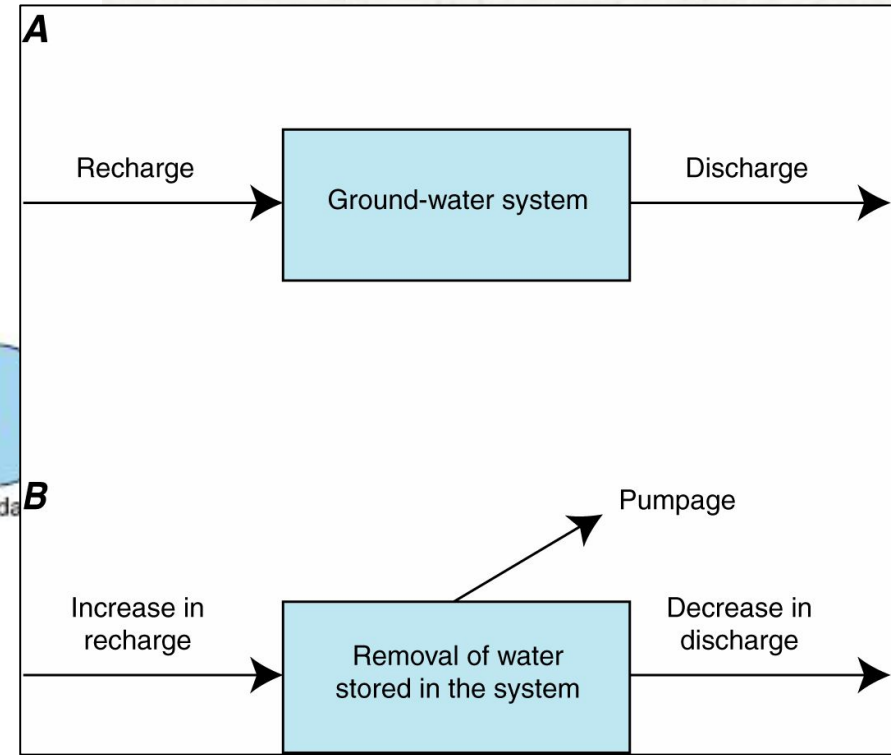




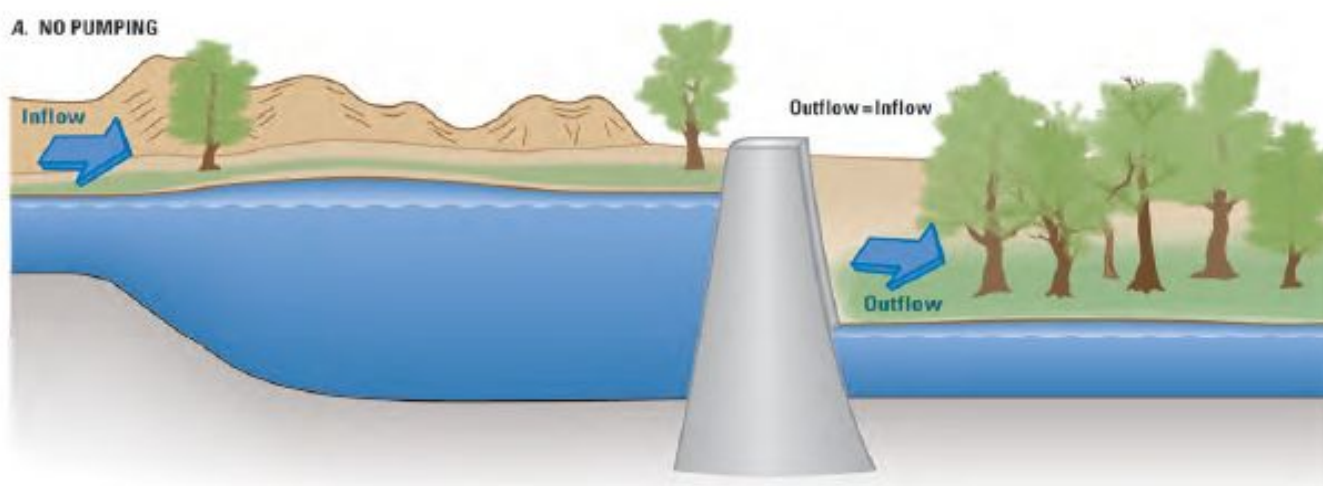
지하수 양수시 총 변화량에서 함양, 배출과 저류량의 변화 비율 분포

(High Plain 지역과 플로리다
지역의 차이)

- 양수에 의한 인위적 함양 증가량
- 양수에 의한 배출 감소량
- 지하수 저류량의 감소량



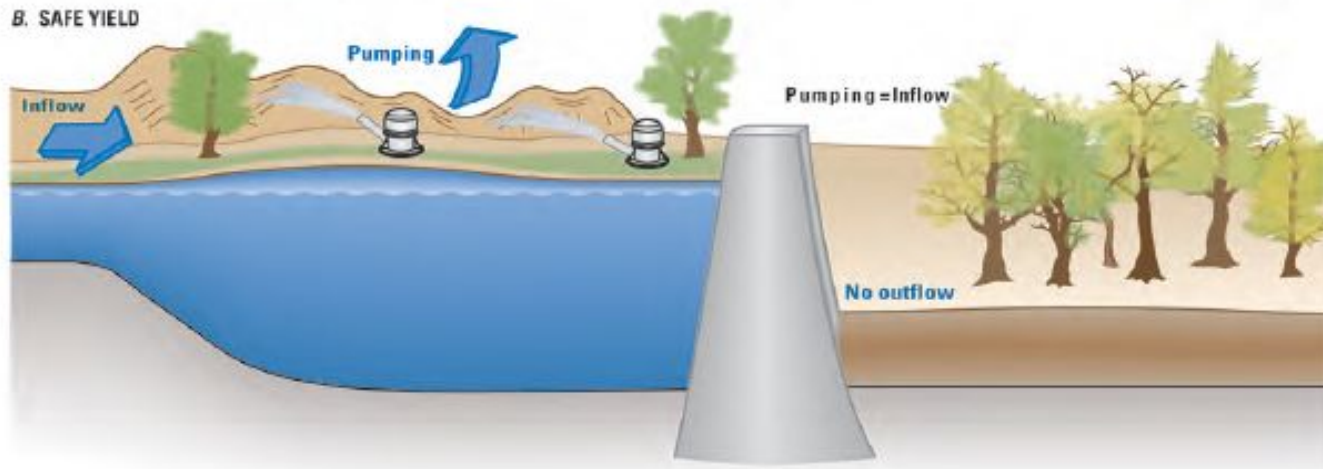
A. NO PUMPING



대수층에서 양수시 배출
의 변화는.....

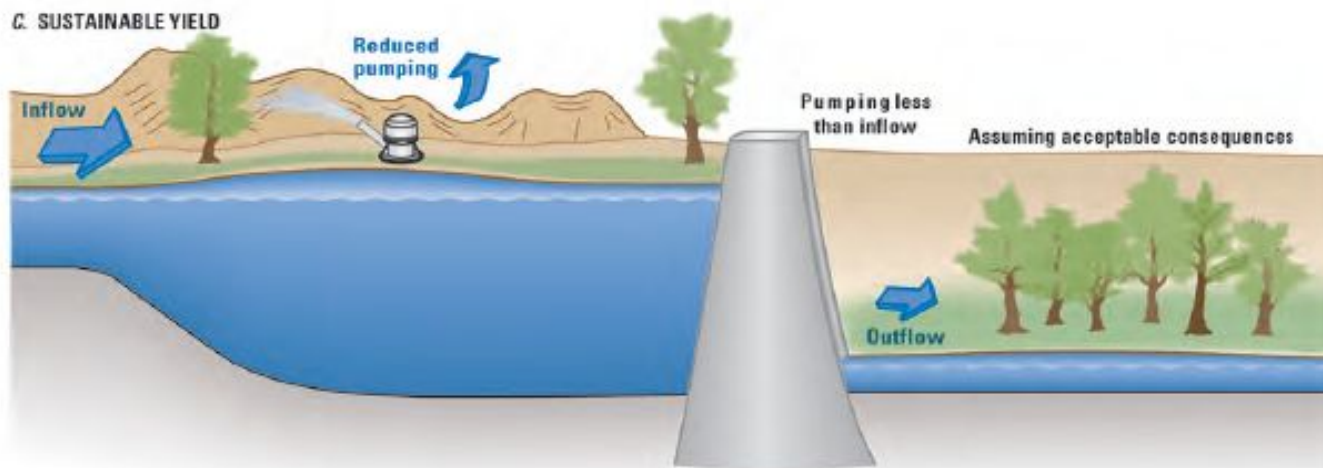
1) 비양수시

B. SAFE YIELD



2) 양수량이 함양량
(=안전채수량=Inflow)과
동일한 경우

C. SUSTAINABLE YIELD



3) 양수량이 함양량
(=안전채수량=Inflow)보다
줄어든 경우

2017 미국의 지하수 관련 미래 핵심 기술 개발 방향

U.S. Geological Survey Science in the Decade 2007–2017

Facing Tomorrow's Challenges (by USGS 2007)

- 생태계 변화에 대한 연구
- 기후 다양성과 변화에 대한 연구
- 미래 에너지와 광물자원에 대한 연구
- 자연재해, 위험 및 복원성 평가 프로그램
- 환경과 야생의 인류 건강에 대한 영향
- Water Sensus
- 기타 신기술의 개발

Water Sensus

- 물의 현황, 가용성 분석
- 물과 관련된 환경, 생태계, 토지이용의 연구

연구방법

연구도구

- 생태계 물의 수요시기/양의 규명
- 인간과 생물종의 수요 추세 자료
- 토지이용/지표피복 DB
- 첨단기술(원격탐사 등) 확보
- 수역/지하수 모델 구축

정보
제공

- DB 및 GIS
- Remote Sensing
- 모델링

2017년에 수자원관측의 통합 운영 및 연계 분석 모델링

- 담수자원의 상태와 변화 (양, 질 및 변화)
- 인류, 생태, 환경이 요구하는 정확한 물수요량 결정
- 담수 가용성에 영향을 미치는 주변 환경의 규명
- 제공 가능한 담수자원의 정확한 인지/평가 방법
- 물의 가용성과 수질, 생태계의 건강성 예측 등

미국의 지하수 자원 관리를 위한 미래의 핵심기술 개발 과제

- 1) 3차원 공간 Mapping 및 관리(지하수, 지질, 탐사 등)
 - 3차원 구현을 통한 관리/행정에 활용
- 2) 대수층의 이방성에 대한 명확한 규명
 - 개발적지, 양수량 확보, 오염평가/복원 등에 활용
- 3) 지하수계로의 함양되는 양의 정확한 산정
- 4) 지하수와 지표수 상호관계에 대한 정량적 평가
- 5) 지하수와 생태 환경간의 상관성에 대한 이해
- 6) 보다 현실적이고 적용성이 높은 전산 모델링의 개발

우리나라 지하수의 방향은...

1. 기초 분야 연구 및 개발/관리 기반 확대

- 기후변화에 대비한 관측 분석 강화 및 연계
 - 지하수 관측+지표수 관측+기상 관측+수질 관측+생태관측
- 지하수 함양 특성의 규명
 - 지하수 함양량 및 개발가능량의 정확한 산정
- 암반 대수층에 대한 특성 규명 연구
 - 국내 지하수의 주 채수 대상으로 향후/현재 개발 관리의 기본
- Database의 통합 연계를 통합 활용 극대화
 - 국토부, 환경부,농림부 등의 독자 DB 추진
- 지하수 관리 전문조직의 설치 및 수량수질 통합 관리
 - 지자체 기술 업무 해결 및 지원 등
 - 수량/수질을 통합한 국가 지하수관리 업무의 대행 등

2. 지속적인 조사 및 정책 Feedback을 통한 행정 선진화

- Water Sensus with Ground Water Sensus
 - 제도의 개선 및 예산 확보
- 지하수 기초조사 지속 시행 및 성과의 통합 분석
 - 대수층, 오염, 수문 특성의 종합 규명 및 예측
- 지표수-지하수 연계 관계에 대한 조사 분석
 - 하천/댐/호수와 수량/수질/생태에 대한 연계성 평가
- 국가 지하수 관리 표준모델 개발
 - 지하수 관리자의 업무 효율 극대화를 위한 지하수 관리 모델 개발
- 국가 사업 성과의 연계 관리, 활용 및 Feedback
 - 지자체 지하수 관리에 대한 정기적 파악, 전파 및 Feedback
 - 각종 타유형의 성과에 대한 종합 연계 분석, 평가 시스템 도입

3. 국민 건강 및 환경 보호를 위한 지하수 활용 사업

- 지하수 수원의 공공 공급 시스템의 확대
 - 음용수의 지하수 사용 확대
 - 강변여과/지하댐/관정군 등의 활성화를 통한 공공급수 체계 확대
 - 지표수-지하수의 연계 활용 체계 운영
 - Groundwater Banking System
- 건강 위해성에 대한 지하수 조사 분석
 - 질산성질소, 의약품 등 건강 위해성 항목에 대한 조사 및 대책
- 지구 생태 보전을 위한 지하수 개발 및 보전 사업
 - 하천/저수지의 수량/수질 유지 관리 등
 - 지하수위 강하 대책: 함양, 용수개발/공급방식 변화, 개발억제 등
- 대체에너지 등 지하수 활용 다변화 사업
 - 지하수 열 이용 에너지 개발 활성화