



## 수자원 분포의 시공간적 변동

김 성 준

건국대학교 지역건설환경공학과

(2002년 5월 23일 접수; 2002년 7월 5일 수락)

## Temporal Variation and Spatial Distribution of Water Resources

Seong-Joon Kim

Department of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

(Received May 23, 2002; Accepted July 5, 2002)

### ABSTRACT

The increase of meteorological uncertainty and unstable fluctuation of its behavior due to the global warming affect the temporal variation and spatial distribution of water resources and water use patterns in agriculture. There have been steady efforts to understand hydrological components and deal with such water related problems. This paper reviews firstly, the future effect of water resources due to climate changes, secondly, recent progress for precipitation, evapotranspiration, soil moisture, and thirdly, GIS/RS based integrated information systems conducted by both researchers and government ministries. There should be continuous studies and investments to cope with climate changes, and to accomplish sustainable development with the help of agricultural water resources. Some research topics were suggested to attempt with substantial contents considering our present capability and situation.

**Key words** : water resources, precipitation, evapotranspiration, soil moisture, information systems, GIS, RS

### I. 서 론

“수자원의 부족 및 남용은 지속가능한 개발과 환경 보호 차원에서 심각한 위협이 되고 있다. 인류의 건강과 복지, 식량안보, 산업발전 그리고 생태계는 수자원과 토지자원 면에서 과거에 해왔던 것보다 더욱 효율적으로 관리하지 않는다면 엄청난 위기에 처하게 될 것이다”(ICWE, 1992). 지난 수십년 동안의 급격한 인구증가와 산업발전은 지구상의 거의 대부분의 지역에서 토지와 수자원에 압박을 가해왔다. 생활, 농업, 공업, 위락 및 기타 목적의 물 수요량의 증가와 지표수 및 지하수 오염의 확대로 인하여 우리나라의 수자원도 부족한 자연자원으로 전환되었다.

한편 심각해지고 있는 수자원 문제에 대한 새로운

관리기법은 합리적이고도 과학적인 원칙과 효과적인 기술에 기반을 둔 향상된 수자원 관리도구를 요구한다. 향상된 기술의 주요 특징으로는 수자원의 전반적인 상황을 보여줄 수 있고 또한 수자원 관리와 관련된 서로 다른 원칙과 영역간의 협력을 촉진시킬 수 있어야만 한다. 이는 특별히 설계된 정보시스템에서 수문순환의 전반적인 양상, 수량·수질·생태관련 정보 그리고 수문학적, 생태학적, 경제학적, 행정적 정보를 다양한 수준별로 의사 결정자에게 제공할 수 있어야 한다.

수자원의 평가는 수자원의 지속가능한 개발, 관리, 제어에 대한 평가가 가능하다는 기반 하에 수자원의 양, 질, 그리고 이용성을 평가하는 것이다. 견고한 수자원 평가는 양질의 수문/환경자료의 확보와 적절한 모델링 기법의 적용을 모두 요구한다. 초점이 지표수

에만 집중되어 있는 경우, 또는 지하수에만 집중되어 있는 경우에는 적절한 모델링 도구는 개념적인 집중형 강우-유출모델 또는 전형적인 2차원 지하수 모델을 적용하는 것이 일반적이다. 지표수와 지하수의 상호관계가 중요한 경우에는 물리적인 기반의 분포형 유역통

합모델과 같은 보다 포괄적인 모델링 도구가 요구된다.

### 1.1. 수자원 분포의 시공간적 변동파악을 위한 전 세계적 정보시스템 현황

다양한 수자원 문제를 해결하기 위하여 수자원 평가,

**Table 1.** Status of application of hydrological modelling systems to various problem types

Field of Problem	Status of Application				
	Adequacy of Scientific Basis	Scientifically Well Tested ?	Validation on Pilot Schemes ?	Practical Applications	Major Constraint for Practical Application
Water resources assessment					
* Groundwater	Good	Good	Adequate	Standard/Part	Administrative
* Surface water	Very Good	Very Good	Adequate	Standard/Part	Administrative
Irrigation	Good	Good	Partially	Very limited	Techno/Admin
Soil erosion	Fair	Fair	Very limited	Nil	Science
Surface water pollution	Good	Good	Adequate	Some cases	Administrative
Groundwater pollution					
* Point sources (landfills)	Good	Good	Partially	Standard/Part	Techno / Admin
* Non-point (agriculture)	Fair	Fair	Very limited	Very limited	
On-line forecasting					
* River flow/waer levels	Very good	Very good	Adequate	Standard	Nil
* Surface water quality	Good	Good	Adequate	Standard/Part	Data/Admin
* Groundwater heads/w.table	Very good	Very good	Partially	Very limited	Data/Techno
* Groundwater quality	Fair	Fair	Nil	Nil	Science
Effects of land use changes					
* Flows	Good	Fair	Fair	Very limited	Science
* Water quality	Fair	Fair	Fair	Nil	Science
Aquatic ecology	Fair	Fair	Very limited	Very limited	Science/Techno
Effects of climate changes					
* Flows	Good	Good	Fair	Very limited	Science
* Water quality	Fair	Fair	Nil	Nil	Science

#### LEGEND:

- Adequacy of scientific basis
  - Poor: Large and crucial needs for improvements in scientific basis
  - Fair: Considerable needs for improvements in scientific basis
  - Good: Some needs for improvements in scientific basis
  - Very good: No present significant need for improvements in scientific basis
- Scientifically well tested?
  - Poor: Large needs for fundamental tests of scientific method
  - Fair: Considerable needs for testing(some) of the scientific basis
  - Good: Some needs for testing of the scientific basis
  - Very good: No present significant need for testing of the scientific basis
- Validation on pilot schemes?
  - Nil: No successful validation on well controlled pilot schemes so far-urgent need for validation on pilot schemes
  - Very limited: A few (a couple of) validation cases-considerable needs for more validation projects on pilot schemes
  - Partially: Some cases with successful validation on pilot schemes-some needs for further validations
  - Adequate: Many good validation-no further present needs
- Practical applications
  - Nil: Practically no operational applications
  - Very limited: A few well proven cases of operational practical applications
  - Some cases: Some cases of well proven operational practical applications
  - Standard/Part: Standard professional tool in some regions
  - Standard: Standard professional tool in many regions of the world
- Major constraint for further practical application
  - Data: Data availability a major constraint
  - Science: Inadequate scientific basis is a major constraint
  - Technology: A technology push is required in order to make well proven methods more widely applicable
  - Administrative: Administrative tradition or missing economical motivation is a major constraint

관개, 토양침식, 지표수/지하수 오염, 하천유량/지하수량 및 수질 실시간 예측, 토지이용 및 기후변화의 영향 등 다양한 분야에서 정보 및 분석시스템의 개발이 진행되고 있다. 이러한 현황의 최신 내용들을 정리하면 Table 1과 같다. 현재 각각의 기관들이 적용하고 있는 다양한 모델링 시스템들의 과학적, 기술적 현황은 매우 다양하다는 것을 알 수 있다.

특히 농업에 있어서 관개영역은 몇몇 특출한 예를 제외하고는 수문보다는 훨씬 낮은 기술수준에 머무르고 있다고 평가된다. 따라서 현대기술을 활용한 보다 향상된 관개관리에 대한 잠재력은 경제 및 환경 측면에서 엄청나다고 할 수 있지만, 이와 같은 시도는 극히 드물게 이루어지고 있다. 관개관리의 현대화를 위한 필요조건은 다음과 같은 내용으로 정리할 수 있다:

- ① 최신 센서, 실시간 자료전송, 원격탐사자료로부터의 공간정보를 포함한 보다 향상된 자료수집기술.
- ② 해당 지역의 공간적 분포에 기반을 둔 토양수분과 지하수 상태를 전반적으로 묘사할 수 있는 자세한 수문/수리 모델링 뿐만 아니라, 배분체계와 배수로 시스템에서의 흐름과 저류에 대한 동력학적 모델링. 이에 대한 좋은 예는 Lohani 등 (1993)에서 찾아볼 수 있다.
- ③ 저수지 운영 및 수리제어 구조물의 관리를 위한 최적화 기술. 관리자 및 기술자들의 기술혁신에 대한 배타적인 관념과 통합적인 사용자 편의제공 기술의 진척이 미흡하지만, 현재의 과학적인 기반으로 판단할 때 문제가 없다.

일반적으로 어떠한 유형의 적용이든지 간에 적절한 모델 코드가 존재하며, 여러 경우에 실제로 사용되고 있다. 한편 수자원 평가를 위한 다양한 모델의 적용은 앞으로 더욱 필요하게 될 것이다. 이에 대한 주요한 제약사항은 기존의 시스템을 유지하려는 기관의 고정관념을 들 수 있다. 그러나 보다 향상된 사용자 편의 시스템을 이용한 매개변수 추정방법과 같은 기술의 혁신 또한 중요하므로 이에 신속히 적용할 필요가 있다.

본 고에서는 수자원의 시공간적 변동과 관련된 강수, 증발산, 토양수분 등의 수문순환인자들에 대한 최근의 연구동향과 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 살펴보고, 수자원과 관련된 정부부처들의 정보시스템 구축 현황을 파악함으로써, 이를 바탕으로 앞으로 우리나라의 기후변화 및 농업환경변화에 대응하기 위한 연구방향을 제시하고, 마지막으로 제시한 연구들이 실질적으로

로 효과를 보기 위한 제언과 더불어 현실적이고도 실현가능한 과제 제안을 하면서 마치고자 한다.

## II. 기후변화에 따른 수자원 변동 고찰

21세기에는 지금까지의 전통 수문학에서 다루어 오던 물순환에 커다란 변동이 발생하리라고 예상되고 있다. 이는 산업혁명 이후의 인간활동으로 인한 것이라고 지목되고 있다. 즉 19세기 이후의 급격한 화석연료 사용으로 대기중의 이산화탄소 농도가 급증하여 왔고 21세기 중에는 현재의 두 배 내외로 증가하리라고 예상되는 가운데 이로 인한 지구 대기온도가 1.5°C~4.5°C로 증가하게 될 것으로 예측되고 있다. 지구 대기의 온도상승은 해양과 대기의 에너지 순환 변동을 야기하여 물순환 양상을 크게 변화시킬 수 있다. 또한 온난화로 인한 해수면 상승도 크게 우려되고 있다. 수문순환 변동은 곧 강수량, 증발량, 토양함수량 등이 달라지는 것을 의미하므로 21세기의 국가수자원 관리는 현재의 방식에 대폭적인 변화를 요구할 수도 있다. 본 장에서는 이러한 국가적, 세계적 변화에 대비하여 미래의 수자원 상황을 고찰하고 향후의 과제를 제시하고자 한다. 본 장에서 조망하는 미래의 범위는 21세기 100년을 대상으로 하며, 전 지구의 상황을 살펴본 후 우리나라에 대한 국지적 영향을 기술하고자 한다.

### 2.1. 과거 지구의 기후변화

지구의 기후는 지질시대를 거쳐 변화되어 왔으며, 현재도 여전히 변화하고 있다. 기후변화를 일으키는 자연적인 요인은 세 가지로 분류된다. 첫째로 판구조의 이동과 같은 지구 내부적인 변화를 들 수 있다. 판의 이동은 지반 구조나 고도를 재분배하게 되고 이로 부터 대기순환이나 수문순환, 생물학적인 체계에 변동을 가져온다. 또한 동반된 화산활동은 화산재나 기체를 분출하여 기후변화의 요인으로 작용한다. 일반적으로 화산활동에 의한 장기적인 기후변화는 온난효과로 분류할 수 있다. 지질 시대 중에서 백악기에는 수백 만년 또는 수천 만년 동안 화산활동이 지속되어 온실기체의 양을 증가시켜 온난화를 초래하였고, 해양 지각의 융기나 뜨겁게 달아오른 해양지각으로 말미암아 바다의 평균수심이 얕아져서 마치 해수면이 상승한 것과 같은 현상을 보였다. 이 시기에는 해수면이 현재보다 수백 미터나 높았다고 추정된다. 판구조의 이동은

몇 억년에 걸친 장기적인 기후변화요인으로 지목되고 있다. 대륙의 판들은 연간 몇 mm에 달할 정도로 매우 천천히 움직이고 있으며, 이에 따라 대륙의 위치가 변하거나 지표면적이 달라지게 된다.

둘째로 Milankovich에 의하여 주장된 지구궤도의 변화가 지구 기후의 변화를 일으키는 요인으로 지적된다. 지구 자전축의 기울어짐은 약 19,000~23,000년의 주기로 변하고 있으며 공전궤도의 타원형상은 약 10만 5천년과 40만년을 주기로 편심(eccentricity)을 달리하고 있다고 이야기되고 있다. 이러한 지구 자전과 공전의 변화는 일사량을 변화시키고 이것이 기후변화를 일으키고 있으며 빙하기의 도래도 이러한 이론으로 설명되고 있다. 태양 흑점의 변화도 지표면의 일사량을 변화시켜서 대기-해양 환경에 영향을 미친다. 1700년 이후의 태양 흑점 기록을 분석한 결과는, 약 11년과 200년의 태양 활동 주기를 제시하고 있다. 보통 태양 흑점이 최소값을 가지기 2년 전에는 성층권 오존농도가 높아지며 이것이 성층권의 온난효과를 유발하면 아열대의 편서풍이 줄어들고, 이어서 선선하고 맑은 날씨가 태양 흑점 주기와 약간의 위상차로 지속되기 때문으로 분석하고 있다.

셋째로, 대규모 유성의 충돌로 야기된 재앙도 환경 변화의 요인중 하나이다. 유성이 충돌하여 생태계를 파괴하고 그에 따라 생물체의 엄청난 사멸이 발생할 수 있다. 유성의 충돌로 인한 지구 기후의 변화 중에서 주요한 사건은 6,500백만년 전에 발생하였는데, 이는 중생대 백악기와 신생대 제4기의 경계(Cretaceous-Tertiary; K-T)를 이루는 기간에 일어났다. 몇 개의 충돌지역 중에서 가장 주목받는 곳은 Mexico 만 Yukatan 반도 부근에 있다. 유성의 충돌은 광범위한 화재를 일으켰고, 대기에 화산재를 내뿜었으며 이로부터 햇빛이 차단되어 냉각현상이 나타났다. 그리고 발열물질(pyrotoxins)의 유발로 공룡을 포함한 대부분의 생물체를 사멸시켰다. 또한 강한 산성비를 형성하여 성층권의 오존층을 고갈시켰고 바다의 석회성분을 줄인 것으로 보인다. 또 하나의 대규모 생물 사멸 사건은 2억 5천 만년 전에 발생하였는데, 이 시기는 페름기(Permian Period) 근처의 트라이아스기(Triassic Period) 초기이다. 이 때 지구상 생물 중의 95%가 사멸하였다. 그 이유는 적도와 저위도에 걸친 초대륙(super-continent; 현재의 여러 대륙은 과거에 하나의 초대륙으로 뭉쳐 있었음)의 성장 때문으로 보인다. 초대륙의 성장은 생

물체의 서식지를 엄청나게 파괴하였고 영양분을 고갈시켜 대부분의 생물체를 사멸시켰다.

과학자들은 종종 신생대 제4기의 기후상황을 이용하여 미래의 기후변화를 예측한다. 이는 제4기의 여러 가지 자료들이 이용 가능한 형태로 남아 있기 때문이다. 제4기는 빙하기의 시작과 함께 약 2백만년 전에 시작되었다. 빙하기는 평균기온이 0°C 이하로서 빙하의 두께가 커지고 약 10만~20만년 동안 지속된다. 빙하기와 빙하기 사이의 간빙기(Holocene)는 1만~2만년 동안 지속되고, 평균기온이 훨씬 따뜻한 기간이다. 이러한 빙하의 출현은 지구 자전축 및 공전궤도의 변화를 설명하는 Milankovich 주기와 관련을 맺고 있는 것으로 보인다. 빙하기에 대한 변천 연구는 최근 빙하기로부터 현재 간빙기까지의 기간에 집중되어 있다. 이 시기는 생물학적인 생산성이 크게 증가하였고 해수면은 하강하였다. 이제까지 지구 또는 지역적인 기후 변화 요인과 과정, 결과들을 설명하였다. 이러한 과거 지구 기후변화를 이해하는 것은 지구의 자연적인 기후 변화와 인간 활동에 의한 변화를 구분하는데 도움을 줄 것이다.

## 2.2. 인간활동(현재)에 의한 기후변화

전체 지질시대에는 네 번의 빙하기와 네 번의 간빙기가 있었다. 첫 빙하기는 신생대 제4기로 들어서면서 시작되었다. 지금은 간빙기의 마지막 단계로 이해되어 왔다. 즉 19세기의 소빙하기 이후에 기온이 하강하는 것이 자연의 추세라고 생각하였다. 그런데 최근의 기후 자료는 이 마지막 단계에서 기온이 오히려 상승하고 있는 것으로 나타나고 있다. 대기의 변화는 기후변화를 야기하는 여러 가지 요인 중의 하나이므로 최근에 관측된 기후변화는 지구 대기성분의 변화에 기인하고 있다는 주장이 심각하게 제기되고 있다. 지구의 기후변화로서 지적되는 현상은 크게 성층권 오존층의 오존 고갈과 대기의 온난화이다.

### 2.2.1. 온난화

최근 여러 매체를 통하여 들을 수 있는 '온실효과(greenhouse effect)'는 1896년에 스웨덴 화학자 Arrhenius와 미국의 지질학자 Chamberlain에 의하여 독립적으로 처음 관측되었다. 당시 Arrhenius는 자연의 대기에 CO<sub>2</sub>가 2배 되면 기온이 5~6°C 상승할 것이라고 제시하였다. 온난화를 유발시키는 주범은 수증기, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 대기권 내의 오존(O<sub>3</sub>), 질소

산화물, 암모니아, CFCs(chlorofluorocarbons), halon 등의 기체이다. 이들은 서로 온난화 능력이 다르고 대기 중에 체류하는 시간도 다르다. 이러한 온실기체의 증가는 산업혁명 이후에 화석연료를 급격하게 사용하였기 때문으로 생각하고 있다. 최근의 지구 기후 기록을 살펴보면 기온이 상승해 왔으며 해수면도 상승하여 왔다. 기온상승의 원인은 주로 이산화탄소에 기인하고 있다. IPCC는 대기대순환 모형을 이용하여 온난효과의 미래 영향을 예측하여, CO<sub>2</sub>가 2배로 증가하면 지구의 표면온도가 1.5~4.5°C 상승할 것이라고 1990년에 발표하였다. 그리고 북극의 빙하두께가 줄어드는 이유가 지구의 자연적인 변동에 기인하는지 인간활동에 의한 것인지 아직 밝혀지지 않았지만, 북극의 지열을 관측한 결과는 분명히 지난 세기에 2~4°C의 온도 상승을 보여주고 있다.

### 2.2.2. 해수면 상승

온난화의 주요 결과로서 미래의 해수면 상승문제가 제기되어 왔다. 이 문제는, 해수면이 점진적으로 상승하리라고 보는 견해와 급작스런 극지방 빙원붕괴 가능성을 제시하는 우려 깊은 견해의 두 부류로 나누어져 있다. '90년대 들어서는 IPCC의 본격적인 활동에 힘입어 수정된 견해가 제시되었다. IPCC(1990)는 2100년까지의 해수면 상승을 예측하여 제시하였고 현재 기후변화와 관련된 문제의 전개는 위의 예측을 중심으로 예상되고 있다. 즉 매년 0.6 cm의 해수면 상승에 의하여 2100년에는 1990년 보다 약 66 cm가 상승할 것으로 예상하고 있다.

### 2.3. 미래의 기후변화 예측기법

기후란 매일 매일 나타나는 날씨를 오랜 기간 동안 평균했을 때 나타나는 대기의 상태를 말한다. 여기서 오랜기간이란 보통 30년을 말하는데 이것은 한 세대의 활동기간을 의미하고 있다. 그러므로 기후변화에 대한 언급은 적어도 30년 이상의 자료가 있어야 비로소 의미를 가질 수 있다. 현재 인간활동에 의한 기후변화 야기의 주원인으로 이산화탄소의 농도 증가가 지목되고 있다. 그런데 1990년 시점으로 약 350 ppm 인 이산화탄소는 1992년의 방출정책을 유지할 경우 2100년에 약 2배의 농도를 가지게 된다. 과학계에서는 논의의 편의성도 추구할 겸 이산화탄소 농도의 배증에 따른 제반 기후영향을 분석하고 있으므로 기후변화와 관련된 미래의 범위는 21세기 전체를 대상으로 함이 편

리하다. 본 절에서는 이런 점들을 반영하여 미래의 범위를 21세기 100년간으로 설정하였다.

물의 순환과 기후의 관계를 규명하는데 중요한 수단으로 사용되는 것은 대기대순환 모형(general circulation model; GCM)으로 명명된 대기의 수치모의 모형이다. 이는 2차 세계대전 이후로 매일 매일의 풍향, 풍속을 예측하는데 도움을 주는 대기 역학적 도구로서 사용되다가 발전되어, 대기 순환과 물 순환의 연결관계를 규명하는 수학적 수단이 되었다. 예로서, 대기대순환 모형의 모의 결과로부터 지표면으로부터의 증발이 강수의 형태로 지역기후에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 그렇지만 대기대순환 모형으로는 아직까지 몇 년간에 걸친 온도, 강수, 증발 등의 평균값을 제시할 수 있을 뿐, 이들 평균값을 국지적인 값으로 분해하여 관측값을 재현하는 데는 능력이 미치지 못하고 있다. 예를 들어, 대기대순환 모형 모의 결과로부터 얻어진 연 평균 강수량을 살펴보면, 우리나라가 2 mm/day 이하의 지역으로 나타내는 반면에 실제 관측값은 2 mm/day 이상의 지역임이 분명하다(National Research Council, 1991). 대기대순환 모형에 이러한 한계가 있을지라도, 이를 사용함으로써 기후를 유지시키는 주요 요소들과 그 역할을 확인하는데 훌륭한 성과를 거두어 왔다. 대기대순환 모형의 각 격자에 대하여 증발율과 유출율 등을 합리적으로 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 그 이유는 수 km에서 수백 km에 달하는 길이를 가진 격자평면이, 매우 이질적인 성분들로 구성되어 있기 때문이다. 예를 들어 증발량은 식생에 영향을 받는데 그러한 효과를 명시적으로 고려하기란 매우 어려운 일이기 때문이다. 따라서 광역적인 격자를 사용하여 증발량과 유출량을 계산할 때, 이질적인 지표면의 변동이 적절하게 매개변수화 되도록 고안하는 것이 기후와 수문순환 모의에 신뢰성을 높일 수 있는 주요과제가 되고 있다. 구체적으로는 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>의 면적을 가진 격자평면이 주어질 때 수문과정의 공간적인 이질성이 미칠 수 있는 영향을 적절히 표현해야만 한다. 마찬가지로 습성습성한 대기대순환 모형 격자를 사용하여 계산한 열수지와 물수지를 국지적인 열수지와 물수지로 연결시켜 주는 방안도 개발되어야 한다.

### 2.4. 기후변동에 따른 미래 수문지표 변화

물의 순환은 기후 상황에 직접 연관된 현상이므로, 기후 변화는 곧 수문 순환의 변화를 야기한다. 사실,

기후 변화로 인한 영향은 다양한 형태로 나타날 수 있다. 그럼에도 불구하고 수문 순환 과정에 특별한 관심을 두지 않을 수 없는 이유는, 가장 영향받기 쉬운 문제이고 완화시키기 어려운 일이며 우리 생활에 밀접하게 관련되기 때문이다. 기후 변화로 영향받는 수문학적 변수들은 강수량, 유출량, 토양 함수량 그리고 가뭄이나 홍수 등의 극단적인 사건들로서 이들의 발생 시점, 발생 지역, 지속기간, 크기 등이 달라질 수 있다.

#### 2.4.1 강수량

우선 지적해야 할 것은 현재의 수준에서 국지적인 강수량 변화특성을 단적으로 제시하기가 어렵다는 점이다. 모든 대기대순환 모형들에 의한 분석 결과가 지구의 연평균 강수량이 증가할 것이라고 예측하고 있지만, 이러한 결과는 아직 지역적인 변화양상을 설명하기에 부족하다. 그렇지만 지역적인 강수량 변동은 가장 관심을 가져야 할 문제임은 분명한 사실이다.

CCC(Canadian Climate Center), CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), GISS(Goddard Institute of Space Sciences), MRI(Meteorological Research Institute), UKMO(United Kingdom Meteorological Office), NCAR(National Center for Atmospheric Research), SNU(Seoul National University) GCM 등 10여 종류의 대기해양접합 대기대순환 모형 모두 미래에 이산화탄소가 증가함에 따라 강수량이 증가하는 모의결과를 산출하고 있다. 영국 기상연구소의 대기 대순환 모형 수행결과(Houghton *et al.*, 1996)를 살펴보면, 겨울철에는 고위도 지역에 강수량이 증가하고 중위도 지역까지 확장되어 있으며, 여름철의 열대지방은 아시아 남동지역에서 강수량 증가가 더 크고 남부유럽은 대체로 감소하는 결과를 보인다. 우리 나라 지역은 5개의 GCM(CCC, UI, GISS, MRI, GFDL)에 근거하여 CO<sub>2</sub>의 배증에 따라 여름 3개월 동안 하루 평균 1~2 mm의 강수량 증가가 예상되고 있다(한국과학기술연구원, 1994, 1995a). 이를 3개월 총량으로 보면 90~180 mm의 강수량 증가이다. 현재의 연평균 강수량을 1274 mm로 볼 때 여름철에만도 약 7~14%의 강수량 증가가 예상되고 있다.

국내의 연구로는 김영준 등(1997)이 우리나라에서 기상관측을 시작한 1904년부터 1925년까지를 한랭기, 1936~1963년의 28년간을 온난기로 설정하여, 과거자료를 통하여 지구규모의 온난기후가 우리나라의 강수

량에 미친 영향을 조사하였다. 온난기와 한랭기의 구분은 북반구의 평균 기온값에 의존하였다. 그 이유는 동일 지역의 기온과 강수량 자료를 이용하는 경우, 여름철 강수 기간이 길고 강수일수가 많은 해에 오히려 기온이 낮은 역상관계가 나타나는 것이 일반적이기 때문이다. 5개의 기상 관측소에 대하여 한랭기간과 온난기간의 평균 기온 및 평균 강수량을 구한 결과는 Table 2에 제시되어 있다. 온난기에는 강수량이 3, 6, 9월에 두드러지게 많았으나, 7, 8월은 오히려 한랭기에 강수량이 많았다. 연 평균값은 온난기가 한랭기보다 55.8 mm 더 많았다. 5개 지점별로 한랭기와 온난기의 기온과 강수량을 비교한 결과는 Table 3에 제시되어 있다. 부산의 경우를 제외하면 온난기의 연평균 강수량이 많았다. 특히 목포의 경우는 연 강수량의 차이가 111.7 mm에 달하여 매우 크다. 이 사실이 시사하는 바는 우리 나라와 같이 국토 면적이 좁은 곳에서도

**Table 2.** Monthly temperature and precipitation of warm and cold period (Kim, *et al.*, 1997)

Month	Temp. (°C)			Precipitation (mm/month)		
	Warm	Cold	Warm-Cold	Warm	Cold	Warm-Cold
1	-1.53	-0.85	-0.68	23.06	34.47	-11.41
2	0.68	0.30	0.38	29.46	28.08	1.38
3	5.33	4.60	0.73	62.87	40.10	22.77
4	11.40	10.97	0.43	82.65	95.13	-12.48
5	16.51	15.72	0.79	91.86	91.02	0.48
6	20.40	20.23	0.17	166.46	140.51	25.95
7	24.45	24.01	0.44	251.25	263.41	-12.16
8	25.64	25.29	0.35	180.72	193.67	-12.95
9	21.07	20.84	0.23	160.05	120.34	39.71
10	15.17	14.94	0.23	56.08	47.29	8.79
11	8.74	7.58	1.16	40.52	41.53	-0.01
12	2.04	1.22	0.82	30.77	24.38	6.39
annual*	12.50	12.07	0.43	1175.82	1119.99	55.83

\*: Temp.-annual average, Precipitation-annual total

**Table 3.** Annual average temperature and precipitation at 5 meteo. station (Kim, *et al.*, 1997)

Station	Temp. (°C)			Precipitation (mm/yr)		
	Warm	Cold	Warm-Cold	Warm	Cold	Warm-Cold
Seoul	11.19	10.69	0.50	1267.7	1233.5	34.20
Incheon	11.24	10.63	0.61	1119.3	993.4	12.59
Daegu	12.59	12.32	0.27	973.7	943.6	30.10
Busan	13.80	13.40	0.40	1402.5	1428.4	-25.90
Mokpo	13.48	13.06	0.42	1146.7	1035.0	111.70
average	12.46	12.02	0.44	1182.0	1126.8	55.20

강수량 변화의 지역성이 분명히 나타날 수 있다는 점이다. 김영준 등(1997)의 연구는, 앞으로 기후변화 예상 시나리오를 작성하고 특정 지역의 물수지 변화를 예측하는 방향으로 전개될 예정에 있으므로 그 결과가 주목된다.

#### 2.4.2. 토양수분

대기대순환 모형의 모의 결과 중에서 토양 함수량이 크게 주목받고 있는데, 그 이유는 작물의 생육과 직접 관련되어 있기 때문이다. 예로서 어떤 대기대순환 모형은, 중위도의 대륙 중앙 지역에서 여름철의 토양 함수량이 감소할 수 있다는 결과를 제시하고 있다. 여름철은 작물의 생산성에 가장 중요한 시기이므로 여름의 토양 함수량 감소는 작물 수확의 저하를 야기할 것이다. 보통 온난화에 의해 연평균 강수량이 증가한다고 하여도, 상승된 온도 때문에 토양 함수량은 감소할 수 있다. 이러한 양상은, 우리나라와는 달리 봄철에 응설로 인한 유출이 많은 지역에서는 특별히 더 문제시된다. 즉, 온도가 상승하면 겨울철에 눈보다 비가 많이 내리므로 눈이 녹는 시기가 봄에 빨리 다가오게 되고 초여름의 건조시기도 그만큼 빨라지게 된다. 세계 전체의 전망을 보면 겨울철에는 북반구 고위도 지역에서 토양 함수량이 증가한다. 이는 앞에서 전망한 겨울철 강수량 증가와 온난해진 날씨 탓에 눈 대신 비로 내리는 비율이 커지기 때문이다. 여름철에는 북반구 중위도 지역에서 토양 상태가 건조해질 것으로 예상된다. 주된 이유는 여름철 증발량이 커지기 때문이다. 증발량은 보통 다른 요소가 고정되었을 때 온도에 따라 지수함수 형태로 증가하는 경향이 있다.

우리 나라는 여름과 겨울 모두 0~1 cm의 토양 함수량이 감소될 것으로 예상된다. 작물의 성장은 강수량 자체보다는 토양수분의 지속성에 직접 영향을 받으므로 감소될 토양 함수량을 보충하려면 농업용수의 수요는 더욱 늘어날 전망이다.

#### 2.4.3. 유출

지표면 유출량의 변화는 온도변화에 의해 나타날 수 있다. 어떤 지역에서는 평균 강수량이 거의 변화하지 않는다고 하여도 지표면 유출의 시기적인 분포가 바뀔 수 있음이 예측되고 있다. GFDL 대기대순환 모형으로써 모의한 California 지역의 월평균 유출량 분포와, 관측된 과거 기록 월평균 유출량의 경우는 연평균 유출량이 거의 비슷한 반면, 대기대순환 모형의 결과는 겨울철 유출이 크게 증가하고 여름철 유출이 감소함을

나타내고 있다. 이러한 결과에 작용하고 있는 물리적인 과정은, 토양 함수량 변화에서 기술하였듯이 겨울의 적설두께가 작아지고 겨울철 유출이 많아지며 봄의 응설이 빨라지는 과정과 동일한 것이다. 후속 결과로서 유출할 수 있는 것은, 유출이 집중된 달에 더 많은 유출이 일어남으로써 홍수의 빈도가 증가할 수 있다는 점이다. 그와 유사하게 여름철의 최소 유출에 취약한 지역에서는 바람직하지 못한 결과를 야기할 것이다.

오재호(1994)는 CCC, UI, GFDL 대기대순환 모형으로 이산화탄소 배증 상태의 미래기후를 모의한 바 있다. 이 연구에서는 한반도 내 기상 관측소의 강수량 값을 대기대순환 모형의 대규모 격자점으로부터 변환하는 방식으로 지역강수량을 추정하였다. 한국 내의 강수량 변화는 이산화탄소 증가에 따라 전국적으로 증가하였다. CCC 및 UI 대기대순환 모형은 13~15%의 증가를 나타낸 반면 GFDL은 2%의 적은 증가량으로 모의되었다. 여름철 강수는 CCC와 UI 대기대순환 모형에서 각각 15%, 26% 증가하였으나 GFDL은 20~30% 감소하였다. 겨울철은 여름과 반대로 CCC 대기대순환 모형이 25~30% 감소하였고 UI는 -4~40% 변화하였으며 GFDL은 4~12% 증가하였다. 각 모형마다 모의결과가 상이한 것은 모형마다 물리적 역학과정 이 서로 차이나는 점과 해상도가 낮은(coarse) 격자로부터 강수 관측지점의 강수량을 변환하는 방법의 적합성 부족을 이유로 들고 있다. 이러한 한계를 인정하면서 세 가지 모형의 출력 결과들을 평균하여 한반도 내 강수 변화의 유력한 시나리오를 Table 4와 같이 작성하였다.

오재호의 연구결과로부터 기후변화가 한국의 수자원

**Table 4.** Precipitation changes due to doubling of CO<sub>2</sub> in Korea (%) (Oh, 1994)

Region	Year ave.	Spring	Summer	Autumn	Winter
Korea	15	10	15	25	-7
Hamgyeong-do	10	10	10	30	-10
Pyeongang-do	10	10	10	25	-10
Hwanghae-do	10	15	15	25	-20
Middle-west	10	15	15	20	5
East seashore	15	10	15	20	10
Honam	15	10	15	20	-5
Yeongnam	15	10	15	20	-5
South seashore	15	10	15	20	-5

에 미치는 영향을 분석하려는 시도가 있었다(김승과 김현준, 1994; 한국과학기술연구원, 1995b). 전자의 연구에서는 CO<sub>2</sub> 증가에 따른 강수량 증가 시나리오를 이용하여 우리나라 5대강 유역에 적용한 결과, 평균적으로 약 25%의 유출증가를 예측하고 있으나, 이 연구의 문제점은 대기대순환 모형의 시간 및 공간 단위가 너무 커서 정교한 수문모형을 사용하지 못했다는 점과 기온 증가의 영향을 유출분석에 반영하지 못했다는 것이다.

### 2.5. 기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 결론 및 향후과제

미래의 기후는 해양대기접합 대기대순환 모형에 의하여 예측되고 있다. 대부분의 모형에서는 비록 한 두 개의 격자로 우리 나라 전체를 포함하는 과대한 격자망으로 모의하고 있다고 하여도 미래의 강수량이 증가할 것임을 예측하고 있다. 여름철 3개월만 하더라도 90~180 mm 내외의 총 강수량이 증가할 것임을 보이고 있다. 어느 기간의 강수량이 증가하는 것은 곧 빈도분석에 의한 특정 재현기간 사상의 크기가 커지는 결과를 초래하게 된다.

특히 기온이 1°C 상승하게 되면 해수면상의 포화증기압이 10% 상승되므로 가능 최대강수량은 매우 커질 것으로 예상된다. 가능 최대강수량은 수공구조물의 수문학적 설계에 사용된다. 그리고 댐의 수명은 보통 50년 이상이므로 앞으로 계획하여 축조할 댐은 21세기의 기후변화에 직면하게 된다. 따라서 여수로, 홍수조절용량 등 홍수시 운영과 관련된 수문설계 지침은 기후변화의 영향을 감안해야 할 것이다.

강수량 분포의 지역적 변화도 예상된다. 강수량 분포의 지역적 변동에 대해서는 오성남(1997)의 연구가 오재호의 1994년 연구에 비하여 특별히 달라진 바가 없다. 앞으로 한반도 주변의 대기순환 모의 규모를 세밀화 하는 작업이 이루어져야 하고 그에 의존하여야 지역적인 강수량 분포 변동에 대하여 구체적으로 분석할 수 있다.

기후변화와 직접적인 관련이 있는 문제로 농업용수를 들 수 있다. 21세기의 우리 나라 토양 함수량은 잠재증발산량의 증가로 인하여 줄어들 전망이다. 따라서 작물재배에는 추가적인 농업용수량이 필요할 것이다. 이에 대해서는 강수량 증가와 토양 함수량 감소, 식물기간 등의 농업지표를 종합화하여 작물재배에 미

치는 영향 또는 민감도를 분석할 필요가 있다.

엘니뇨는 우리나라에 간접적인 영향을 미치고 있지만 저위도 지역을 중심으로 전세계적인 기상 재해를 야기하고 있을 뿐만 아니라 사회, 경제적 파급효과 또한 막대하다. 그리고 '93~'94년의 우리 나라 가뭄은 전체 국가경제에 커다란 장애를 일으켰다. 이러한 기상 상황은 국가적인 예보가 필요한 시점에 이르렀다. 그러므로 엘니뇨와 가뭄에 대비한 기상 및 경제정보를 생산, 수집하여 6개월~1년 내외의 예보를 수행할 수 있는 체계를 조직적으로 구축할 필요성이 있다.

## III. 수자원 관련 수문순환인자 연구동향

### 3.1. 강수(precipitation)

강수는 지역 규모에서부터 전지구적 규모에 이르는 모든 규모에서 수자원 관리에 있어 중요한 인자이다. 우리에게 주어지는 강수는 그 양이 제한되어 있고 시기적으로도 변동이 크지만, 수자원의 적절한 관리와 수문학적 모델링과 예측을 위한 강수의 시간적·공간적 변화와 그 양의 적절한 평가에 필요한 모니터링 체제는 많은 지역에서 수준 미달이라고 할 수 있다.

전통적으로 강수는 관측소의 기록계에 의한 관측망을 통하여 모니터링되어 왔다. 그러나 이러한 방법의 임의 시간에 지구표면의 1% 또는 그 이하로 영향을 줄 수 있는(Barrett and Martin, 1981) 그리고 “임의 지점에서 아주 작은 시간동안 전형적으로 발생하는”(Theon, 1992) 매개변수에는 부적합하다. 순간강우강도는 0부터 125 mm/hr 이상의 범위를 가지며, 이는 수십 m의 거리에서도 변화하며, 강도는 수 분 심지어는 수 초 후에도 변화한다. 한편 강우강도의 변화도는 매우 알기 때문에, 본질적으로 강우가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역의 경계를 정확하게 구분한다는 것은 어려운 일이다. 또한 기록계에 의한 강우관측의 문제는 기록계 자체에서 야기되는 문제들로 악화되어 왔다는 것은 널리 알려져 있다. 현재 다양한 기록계가 사용되고 있고, 기록계에 따라 관측되는 시간간격도 다르고, 기록계 자체가 계속하기 위하여 설계된 매개변수들에 영향을 주고, 강우관측소가 부족한 상황에서의 이러한 자료관리는 계속자료의 시의 적절, 가용성 및 질에 불리하게 영향을 미친다.

#### 3.1.1. 인공위성에 의한 강우 모니터링

강수는 시간과 공간에서 끊임없이 변하는 매개변수



이므로 이를 인공위성으로 관측하고 모니터링하려는 노력은 자연스러운 것이다. 강우의 지표면 기반의 원격탐사는 원칙적으로 기상레이더를 포함한다. 이는 지구상에서 아직은 상대적으로 작은 지역(주로 선진국)에 국한되어 있고, 대부분 단기예측, 이와 관련된 연구에 사용되는 자료를 제공하고 있다. Collier(1989)는 “... 정량적인 강우자료를 생성하는 레이더시스템”들이 있지만 “... 강우의 특징 특히 수직적인 레이더 관측에는 큰 오차의 원인을 제공한다”고 결론지은 바 있다.

우리나라는 세계기상기구(WMO)의 일원으로 일본의 정지궤도 기상위성인 GMS(Geostationary Meteorological Satellite)와 미국의 NOAA 위성(극궤도 위성) 자료를 무료로 수신 받아, 강수강도, 운형분류, 바람장, 연직고도정보, 안개 및 황사탐지, 해수면 온도 등 다양한 정보를 제공하고 있다. 국내에서는 주로 일본의 정지궤도 기상위성인 GMS 영상자료를 이용한 강수량 추정 연구가 이루어져 왔다. 이 영상에서 얻을 수 있는 운정온도, 운량, 구름에 관한 정보는 강수량과 밀접한 관계가 있기 때문에 이들 정보를 이용해 강수량을 추정하는 방법들이 많이 개발되어 왔다. 대표적인 연구로는 기상청에서 수집한 전국 약 400개소의 지상관측 AWS (Automatic Weather System) 강수량 자료와 GMS-4 영상자료간의 상관관계를 조사함으로써 강수량 산출방법을 향상시키는 연구(서애숙 등, 1994), GMS-5 적외 split window 채널 관측자료로부터 전구 관측영역중 청전역에 대한 가강수량을 산출함으로써, 수치예보의 객관분석 초기자료로 활용하는 연구(손승희 등, 1998) 등 현재 SSM/I, GMS-5, 레이더, TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 등을 이용한 강수량 추정연구가 활발하게 진행되고 있다.

한편 위성 강우자료는 광범위한 지역을 대상으로 공간적으로 분포하는 격자정보를 가지고 있으므로, 이와 같은 자료를 수자원 분야에서 효과적으로 활용하기 위해서는 GIS와의 결합이 필수적이다. 위성강우자료와 수자원 관련 GIS 자료간의 결합시에 고려하여야 할 기본적인 사항으로는 규모(scale)와 해상도(resolution) 문제를 들 수 있다. 모델링 연구에서 특히 광역의 공간적·시간적 규모로 그 과정을 수행할 때, “어떠한 규모와 해상도로 어떻게 접근해야 하는가?” 하는 문제는 대단히 중요한 사항이다. 왜냐하면 서로 다른 해상도를 이용하면 그 분석결과가 상이하게 나타나게 되는데, 이는 지리학적 현상의 근본적인 속성으로 알려져

있다. 일반적으로 기상위성자료는 수 km - 수십 km 격자단위이지만, 수자원 분야에서는 그 적용규모(구역; local, 지역; regional, 광역; meso)에 따라 수십 m - 약 1 km의 격자가 사용된다. 따라서 적용규모에 따라 기상위성자료의 재구성(resampling) 또는 재생성(regeneration)이 요구된다.

수자원 분야에서는 위성강우자료가 강우-유출해석에 기본적으로 활용될 수 있는데, 홍수유출해석은 기존의 총괄형(lumped) 수문모형보다는 분포형(distributed) 수문모형으로 접근하는 것이 바람직하다. 강우에 의한 분포형 수문모형의 수행결과인 유역전반에 걸친 지표면 및 하천의 유출상황을 시간적·공간적으로 파악하게 되므로서, 홍수에·경보시스템의 운영효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 분포형 모형에 대한 연구는 1970년 후반부터 많은 연구자들에 의해 시작되었으며, 특히 다양한 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)의 사용 및 제작이 가능하게 되면서 국내에서도 이 분야의 연구는 더욱 가속화될 것으로 예상된다.

### 3.1.2. 레이더 관측소에 의한 강우모니터링

최근 발생되는 예기치 못하는 홍수범람의 문제는 여전히 수자원 관리분야에서 반드시 관심을 가지고 노력해야 할 사항이다. 홍수예측을 토대로 한 홍수경보는 이와 같은 문제를 감소시키는 한가지 방법이며, 또 다른 방법으로는 저수지의 저류효과를 극대화하여 홍수를 감소시키는 방법이다. 홍수시 저수지 수위의 적절한 운영과 홍수 경보의 목적은 실시간(real time) 홍수 예측을 위해 필요하다. 홍수 예측의 lead-time을 얻기 위해서는 실시간으로 획득된 강우를 토대로 하여 홍수를 예측하는 시스템의 개발이 필수적이다. 이미 언급하였듯이 시간과 공간에 따라 강우의 변동은 매우 높아서 요구되는 해상도를 지닌 원격탐사 장비의 도움으로 강우를 모니터링하여야 하는데, 이러한 목적에는 지상에 설치된 기상 레이더가 매우 유용하다. 따라서 현재 우리나라의 5개 지점(관악산, 제주, 부산, 동해, 군산)에 설치·운영되고 있는 기존의 레이더 강우관측소와 더불어 임진강 유역의 홍수예경보를 목적으로 2000년 7월부터 강화도에 설치하여 초기 운영중인 레이더 강우관측소의 자료들을 적극 활용하는 방안을 강구할 필요가 있다. 기상청 본 청에서는 관측자료를 수신하여 영상 합성 후, 다시 지방기상청과 전국의 기상대급 기상관서에 매 30분마다 분배하고 있다.

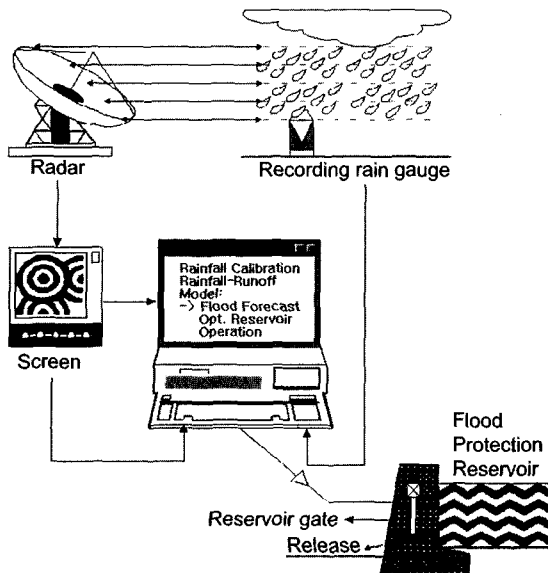


Fig. 1. Schematic ground-based radar rainfall measurement (after Schultz 1988).

수자원 관리 특히 홍수 예·경보의 운영에 있어 강우의 시간적·공간적 변화와 예측을 통하여 유역의 유출양상을 제대로 파악한다는 것은 시스템의 운영상 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 현재 운영중인 레이다 강우를 잘 활용하면 태풍, 집중호우, 뇌우 등 재해를 동반하는 기상현상의 추적 및 단시간 예측에 대단히 유효하며, 특히 유역의 상류로 올라갈수록 소규모 돌발성 악기상으로 인하여 지상관측소의 관측오차가 크므로 소규모 유역에서의 강우관측 및 예측에 대해서는 그 효과가 클 것으로 판단된다. Fig. 1은 실시간 홍수예측을 위하여 레이다 강우정보를 이용한 저수지 운영과정을 보여주고 있다.

### 3.2. 증발산

#### 3.2.1. 증발산량의 실측 및 계산

증발산(evapotranspiration)은 다양한 토지이용 또는 피복조건 하에서 발생하는 증발산량을 직접 측정하거나, 기상자료를 입력자료로 하는 잠재증발산량 산정식에 의하여 간접적으로 추정하므로써, 유역 물수지 분석 시에 사용된다.

증발산량을 실측하는 방법으로는 Lysimeter라고 불리는 증발산계를 현장에 고정 설치하고, 매일의 증발산량을 수동으로 계측하여야 하므로, 이의 관리를

위한 고정인력과 많은 시간이 소요된다. 따라서 지역 내 기상관측소 또는 AWS 시스템에 의하여 관측되는 일별 기상자료를 이용하여 토지피복별 증발산량을 산정하는 것이 최선의 방법일 것으로 판단된다. 산림지역의 증발산량 측정방법은 요구되는 높이의 관측탑을 설치하여 원하는 높이에서의 온도·습도 및 풍향, 풍속을 측정하는 다층 증발산량 관측 시스템을 구성하여 설치하고, 주요 관측 요소로는 현열, 잠열, 토양열 플럭스 및 순복사량이 일반적이다. 관측 방법으로는 에디공분산법이 일반적으로 적용되는데, 이 방법은 확산성과 연직속도 변동성이 큰 반면에 기온과 습도의 연직 경도는 작은 산악지형과 같은 거친 식생지에서 이용하기에 적절한 방법으로 플럭스를 직접 측정할 수 있고, 장기간 연속적인 관측이 가능하고 넓은 관측지에 대해 적분한 값이라는 점이 장점이다.

농경지의 증발산량은 증발산을 일으키는 기상상태와 물을 소비하는 작물과 포장상태에 따라 결정되는데, 일반적으로 최적 물관리 및 비료조건, 병충해가 없는 생육환경 하에서 최대수확을 거두는 증발산량을 말한다. 논에서의 증발산량은 단위 구획의 논에서 순수히 소비되는 기본적인 양으로 비가 체표면으로부터 방출하는 수분량인 증산량과 수면으로부터 증발하는 수분량인 증발량으로 구성된다. 증발산량은 비가 성장함에 따라 점점 증가하여 생육단계가 다르더라도 7월 하순~8월 상순에 최대값을 보이고 생육단계의 차이보다는 기상조건에 의해 크게 영향을 받는다. 관개기간의 총 증발산량은 관개기간을 100일로 한 경우 440~550 mm 정도이며, 1일 평균량은 5 mm, 1일 최대량은 8.5 mm이다.

잠재증발산량(potential evapotranspiration: PET)은 기준작물(잔디나 알팔파)이 완전히 덮인 지표면에 물의 공급이 충분한 경우에 손실되는 증발산량을 말한다. 따라서 잠재증발산량은 주어진 기상, 지형의 조건하에서의 증발산량의 최대값을 의미한다. 잠재증발산량을 계산하기 위한 식은 Blaney-Criddle 식, Jensen & Haise 식, Penman 식 등 여러 가지가 있으나, 우리나라 농업분야에서는 수정 Penman 식을 적용하여 오고 있다. Penman 식은 1948년에 처음 발표된 식으로서, 에너지수지항(energy balance term)과 공기동력학적항(aerodynamic term)인 Dalton 법을 조합하여 제시한 것으로 습윤지대에서 기온, 습도, 일조시간, 증기압 및 풍속 등의 기상자료를 이용하여 잠재증발산량을 구하는데 적

합하다. 이 식의 장점은 복합적 기상요인을 많이 포함하고 있기 때문에 정확성이 높다는 것이다. Penman 식은 일평균 기상자료를 사용하는 것이지만, 주간과 야간의 기상상태가 매우 다른 지역에서는 그 차를 계산상 고려할 필요가 있다. FAO의 관개배수자료에서는 주간과 야간의 기상상태의 차이를 고려한 Frevert 등(1983)이 수식화 한 보정계수를 도입한 수정 Penman 식이 이용되고 있다.

### 3.2.2. 원격탐사에 의한 증발산량 추정

증발산은 하천 유역의 물수지 모델링을 수행하는 경우에 대단히 중요한 요소이지만, 원격탐사기법을 이용하여 직접 관측할 수는 없다. 그러나 에너지 수지식을 이용하여 증발산을 계산하는데 필요한 매개변수 및 변수(태양복사량, 지표면 알베도, 지표면 온도, 토지피복, 식생밀도 및 토양수분)들은 원격탐사자료를 이용하여 추정할 수 있다. 원격탐사자료를 이용한 국내의 최근 증발산량 관련연구는 안충현 등(1995), 신사철(1996), 채효석 등(1999)에서 찾아볼 수 있다. 채효석 등(1999)은 인공위성 영상자료로부터 작성한 토지피복도에서 각 토지피복별 알베도 값과 지중열 계수 등을 이용하고, DEM을 이용하여 일사량을 보정하여 유역의 공간적인 증발산량을 파악할 수 있는 격자형 증발산량 산정 모델을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 Morton 법을 이용하는 보완관계식에 의한 실제 증발산량 산정식을 이용하였으며, 알고리즘의 타당성과 적용성을 검토하기 위하여 1995년도 보청천 유역에서의 토지피복별 일 증발산량을 계산하였다. 개발된 격자형 증발산량 산정 모델은 분포형 수문모델과 통합할 수 있는 장점을 가지고 있다.

## 3.3. 토양수분

### 3.3.1. 침투량(infiltration) 현장측정

침투량은 다양한 토양조건 하에서 토양 중으로 침투되는 속도 및 양을 파악하므로써, 유역내의 지표수 유출량, 토양 중의 수분함량, 지하수로의 충전량 추정 등 유역물수지 분석시에 활용된다.

침투량을 측정하는 방법은 침투계(infiltrimeter)를 현장에 설치하여 시간별 침투 하강깊이를 측정하여 침투곡선을 작성하므로써 Kostikov, Horton, Holtan 등 경험적인 침투식을 이용하는 방법과 투수계(permeameter)라는 장비를 이용하여 토양별 투수계수(hydraulic conductivity), 토양 흡수력 등을 측정하여 Philip, Green

& Ampt, Richards 등 물리적인 침투식을 이용하여 산정하는 방법이 있다. 이 두 가지 방법 중에서, 현재의 추세로는 전국 정밀토양도, 개략토양도와 같은 GIS 자료가 보편화되고 있는 실정이므로, 이들 자료를 적극적으로 활용한다는 차원에서 투수계를 이용하여 토양의 물리적인 매개변수인 투수계수, 흡수력 등을 측정하므로써, 시험유역에서 측정하는 결과들을 타 유역에도 적용할 수 있는 물리적인 침투식을 이용하는 방법을 채택하는 것이 바람직하다. 현재 투수계는 미국 SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.의 Guelph Permeameter, 네덜란드 Eijkelkamp 사의 Permeameter 등 상품화된 이동 계측기들이 있다. 이 장비는 현장의 어느 지역에서든지 오거홀을 만들어 사용할 수 있는 장점이 있다.

### 3.3.2. 토양수분함량(soil moisture content) 현장측정

토양수분함량은 홍수-유출 모형에 의한 하천유출량 추정시에 유역의 초기 토양수분조건을 입력자료로 제공하고 또한 물수지 분석시에 일유출 모형에 의하여 생성되는 유역의 토양수분 상태를 검증하는 자료로 활용하기 위하여 관측한다. 이 경우, 토양수분 상태의 파악은 강우개시 후 하천으로의 유출량과 유역에서 함유하는 수분함량을 물질수지(mass balance)화 하여 유역의 물수지(water balance)를 합리적으로 평가하는 중요한 수단이 된다.

토양수분을 측정하는 방법은 현재 여러 가지가 있으나, 최근에는 TDR(Time Domain Reflectometry)이란 이동계측기를 이용하는 방법이 가장 좋은 것으로 알려져 있다. TDR은 두 개의 평행 탐침을 토양 중으로 삽입하여 탐침으로 전달된 전자펄스의 이동시간과 소멸시간을 측정하여 토양함수량을 측정하는 방법으로서, 현장의 어느 지역에서든지 간편하게 설치하여 신속하게 측정하는 것이 가장 큰 장점인 반면에, 토양 표면이 건조하고 토양속이 단단할 때에는 토양 중으로 삽입할 때 탐침이 굽거나 부러지는 경우가 발생하기 때문에 조심스럽게 다루어야 하는 단점이 있다.

### 3.3.3. 원격탐사에 의한 토양수분 추정

토양수분은 수문, 농업, 기상 및 기후연구에 있어 중요한 변수이다. 토양수분의 현장계측은 시간과 노동력이 요구될 뿐만 아니라 유역 전체에 고르게 분포시켜 계측한다는 것은 매우 어렵다. 원격탐사기법은 지표면 근처의 토양수분을 대상으로 공간적으로 분포된 자료를 수집할 수 있는 가능성을 제공한다.

지표면 근처의 토양수분에 대한 원격탐사 관측은 다음과 같이 이루어질 수 있다:

- ① 가시 및 근적외 영역에서 나지 토양의 반사율을 계측한다. 토양반사는 토성 및 토양의 색깔에 의하여 크게 영향을 받기 때문에, 이 자료는 토양 수분정보를 제대로 제공하지 못한다.
- ② 열적외 영역에서 지표면 온도를 계측한다. 이는 구름, 식생, 각종 기상요인에 의하여 계측에 한계가 있다.
- ③ 극초단파 영역에서 밝기온도(brightness temperature)를 계측한다. 이 수동기법은 지표토층 약 5 cm 내에서의 토양수분을 결정하기 위하여 물과 건조토양에 대한 유전상수의 현저한 차이를 이용한다 (Schmugge, 1985; Jackson, 1993; Hollenbeck 등, 1996). 식생밀도가 증가함에 따라 극초단파 복사의 감쇠는 증가하므로, 이 방법은 식생밀도가 낮은 지역에서만 유효하다.
- ④ 능동 극초단파 센서로 후방산란(backscattering) 계수를 계측한다. 지표면 근처의 토양수분을 관측하는 기술을 개발하기 위하여 MACHYDRO'90, MACEUROPE'91, EMAC'94 등의 연구가 수행되고 있다. 극초단파 주파수의 선택, 지표면의 조도 및 식생피복의 영향을 정량화하는데 진전이 있어 왔다(Ulaby 등, 1978; Ulaby 등, 1984). 최근에는 간헐적으로 탐사된 지표면 토양수분자료로부터 토양수분의 프로파일을 모델링하는 과정이 개발되고 있다(Ragab, 1995).

#### 3.3.4. GIS 기법에 의한 토양수분 모델링

토양수분을 예측하기 위한 기법은 주로 격자화된 자료를 입력자료로 하는 분포형 모형의 개발 및 적용과 관련된 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 국외의 대표적인 분포형 모형으로는 ANSWERS(Beasley, *et al.*, 1980), TOPMODEL(Beven, *et al.*, 1979, 1984), AGNPS(Young, *et al.*, 1989) 등이 있는데, 이 모형들에 대한 자세한 내용은 Singh(1996)의 "Computer Models of Watershed Hydrology"에서 찾아 볼 수 있다. 국내에서는 김성준 등(2000)은 격자 물수지 기법을 이용하여 유역내의 토양수분변화를 일단위로 추적할 수 있는 격자기반의 일유출 모델을 개발하고, 래스터 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 모델의 입력자료를 추출하는 모델의 전처리 과정과 모델의 결과를 시간적·공간적으로 표현해 주는 후처리 과정을 개발하였다. 한

편 이들 모형들은 대부분 소유역(수십 km<sup>2</sup> 이내)을 대상으로 개발된 모형이고, 농촌지역에서 큰 비중을 차지하고 있는 논에 대한 기작을 고려하지 않고 있다. 따라서 이 분야에서 해결해야 할 가장 큰 숙제로 삼고 있는 규모(scale)의 확대문제와 특히 우리나라 고유의 지형 및 토지이용을 고려한 토양수분 예측기법이 요구된다.

#### 3.4. 산림 및 농업용 저수지의 역할

지난 수 십년 동안 농촌지역에서는 산림(녹화, 벌채, 개간 등), 토지이용(주거지 조성, 경지정리 등), 물이용(지하수 개발, 경지내 비닐하우스 재배 등)의 변화 및 자원·환경관련 시설물(수리시설물, 환경기초시설 등)의 개발 등 꾸준한 변화가 지속되어 왔다.

유역의 상류인 산림지역은 과거와는 달리 조밀한 상태로 변하여 증발산량의 증가 등으로 산림녹화가 반드시 수자원 함양량을 증대시키는데에 대한 구멍이 필요하다. 이는 전국적으로 대부분 산림지역에 위치해 있는 농업용 저수지의 유입량에 영향을 미치게 되며, 우리나라의 전반적인 수자원 부족량과 농업용 저수지의 이수 및 치수능력에 대한 변화와 산림내에서는 탄소와 질소 함유량의 변동을 의미하는데, 이에 대한 과거와 현재의 변화를 비교·평가하고 예측해 볼 필요가 있다. 한편 토지이용의 변화는 물이용의 변화와 직결된다. 특히 하천 주변의 농경지에 지하수를 관개수로 사용하는 비율이 높아지는 등 농촌지역 소하천의 자연유량은 현저하게 줄어들어 하천의 건천화가 상당부분 진행된 상태이다. 이는 농촌 수자원, 특히 관개용수의 확보에 어떠한 형태로든 영향을 주고 있다고 말할 수 있다.

따라서 산림을 포함한 농촌유역 내에 존재하는 자원 관련 정보(하천유량, 증발산량, 토양수분 저장량, 지하수 함양량 등)를 예측하더라도 이들에 대한 동적관리(dynamic management)가 필요하다. 토양수분 변화량은 농민에게는 자신의 경작지에 대한 토양의 기본지식을 함양시켜 최적의 경작지 관리 및 작물 재배관리에 도움을 주는 한편, 작물의 정상적인 발육을 도모하기 위한 차기 관개시기 및 관개량 판단을 위한 의사결정 자료를 제공할 수 있다. 지하수 함양량은 농촌지역에서 그 비중이 자못 큰 지하수의 이용과 개발에 영향을 미치므로 이에 대한 예측정보는 농촌수자원 개발의 계획수립에 기초자료로 제공될 수 있다.

#### IV. 수자원관련 정부부처별 정보시스템의 구축 동향

최근 들어 수자원관련 정보의 효율적 관리 및 분석을 위한 정부부처별 정보시스템의 개발은 대단히 활발하게 이루어지고 있다. 농업과학기술연구원의 “농업토양환경정보 DB 구축”, 농업기반공사의 “농촌지형정보시스템(Rural Geographic Information Systems)”, 건설기술연구원 GIS 사업단의 “토지이용현황도 수치지도화 사업”, 항공우주연구원의 “KOMPSAT-1 영상 활용사업”, 한국수자원공사의 “수자원관리종합정보시스템(Water Resources Management Information System; WAMIS)”, “수자원단위지도(Water Resources Unit Map)”, “하천지도 전산화 사업(하천 GIS)”, “5대 강권역 유역조사사업” 내 수자원관련 GIS, RS 자료의 정보화 등 수자원 분야의 관련 정보를 중복 투자없이 순차적으로 구축 및 관리하고, 궁극적으로는 전문가, 공공기관, 국민이 각각 수준별로 요구하는 다양한 수자원 정보들을 신속하게 지원/서비스하고자 노력하고 있다. 본 절에서는 농림부, 건교부, 환경부 등의 전체적인 구축동향을 살펴 보면서 수자원을 대상으로 앞으로 농업관련 학계, 연구소, 산업계에서 연구하여야 할 방향 및 주제를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

##### 4.1. 농림부

###### 4.1.1. 농촌지형정보시스템(Rural Geographic Information Systems)

농촌지형정보시스템(<http://rgis.karico.co.kr/>)은 농업기반공사가 “종합적인 농촌정보 체계”를 구축하기 위한 목적으로 1994년부터 착수한 정보화 사업이다. 이 시스템은 농지의 이용 및 관리에 관한 제반 문자 및 도형정보를 체계적으로 관리하는 한편, 궁극적으로는 농지와 관련된 농정자료를 표준화하여 과학적인 농지행정을 실현하는데 그 목표를 두고 있다.

이 시스템은 향후 농업기반공사가 농지관리, 농지지적, 지하수관리, 농공단지 및 정주권 개발 등의 업무를 GIS를 기반으로 하여 수행하게 된다. 농지관리란 각 지역의 농지에 대한 등급, 농지의 용도 등 각종 농지에 관한 정보를 관리하고, 농지지적은 각각의 농지 필지에 대한 소유권, 고시지가, 거래지가, 지번, 소유내력 등 농지지적과 관련된 각종 정보를 관리하고, 지하수 관리는 가뭄발생시 지하수의 시추 위치정보,

지하수위 면 정보, 지하수 상태 정보 등을 관리하며, 농공단지는 농촌지역에 공장을 유치할 경우에 발생하는 문제점과 공장의 유치로 발생하는 이익 및 유치할 경우에 최적합 지역을 선정하기 위한 정보를 관리하며, 정주권 개발은 농촌지역의 환경개선 및 생활능력 향상을 위한 정주권을 계획하고 그 실시과정을 구상 및 후보지를 선정하기 위한 정보를 관리하게 된다.

이 시스템의 구축은 3단계로 나뉘어 있는데, 1단계('94-'99)는 기반조성기로서 농어촌관련정보의 DB 화, 자료관리 P/G 개발, Web을 통하여 일선 행정기관에 자료를 제공하는 농어촌지형정보 DB의 구축기간, 2단계(2000-2001)는 활용보급기로서 부문별 시스템의 통합구축, Web 중심의 Intranet/Internet 통신망 구성, GIS 전문인력을 양성하는 농어촌지형정보 DB 업무 활용기간, 3단계(2001 이후)는 정착기로서 국가지리정보시스템 및 타 기관과 정보를 공유하고 활용하는 통합정보시스템의 구축기간으로 계획되었다. 이에 수질개선기획단의 “물관리 정보화 기본계획”에 따라, 3단계 사업(2002-2011)은 “농촌용수 물관리 정보화”라는 이름으로 농촌용수의 효율적인 물관리를 위하여 수자원 및 수리시설물 등에 대한 정보를 구축하여 용수 개발에 필요한 사업의 우선순위 조정 및 재해우심지역을 선별하는 것에 목표를 두어 추진할 예정이다.

###### 4.1.2. 농업토양환경정보시스템

농업토양환경정보시스템 (<http://soils.niast.go.kr/gishome/>)은 농촌진흥청 산하 농업과학기술원이 2001년 6월부터 전국 농지의 성질 및 성분 등을 분석한 정밀토양도를 GIS로 제작하고, 이를 기반으로 분석된 각 토양별 적합한 생물 및 생물의 성장환경에 맞는 토양연구 등의 자료를 관련 행정기관 및 농민들에게 인터넷으로 서비스 할 목적으로 구축하고 있다. 정밀토양도는 5000분의 1 비율, 4400 도폭으로 제작하고, 이를 효과적으로 활용할 수 있는 토양관리처방 프로그램, 토양수분 측정, 지역별 물 유출량 산출, 전국 잠재증발산량 분포도 등을 GIS로 구축하는 물관리시스템을 개발하여 농업에 필요한 효율적 물관리 체계를 수립하고자 하는 시스템이다. GIS로 전국 토양도가 작성되면 어떤 토양에서 어떤 생물이 잘 자라는지 과학적 분석과 시뮬레이션을 할 수 있게 되어 토지이용을 체계적으로 할 수 있게 되고, 토양정보의 전산화 토대를 마련해 농업정보화체계를 구축할 수 있게 된다.

#### 4.2. 건설교통부

건설교통부의 수자원정보화사업군에서는 5개의 정보화사업; ① 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS), ② 지하수정보관리시스템, ③ 광역상수도종합관리시스템, ④ 하천 GIS, ⑤ 통합홍수 예경보시스템 개발이 현재 추진 중에 있다. 이들은 각 시스템 내에서 초기 단계로는 자료관리시스템 구축, 다음 단계로는 자료분석시스템(①, ④, ⑤) 또는 업무관리시스템(②, ③) 구축사업으로 구분하여 개발되고 있다.

건설교통부의 자료관리시스템(<http://wamis.kowaco.or.kr>)으로서 ①은 수자원 단위지도 기반 하에 수위·유량, 하천, 용수이용, 기상, 수질, 댐운영, 지하수 등 7개 분야의 수자원 정보 구축, ②는 지하수 시추, 측정, 수위, 이용실태, 수문지질도 제작 등의 지하수관련정보 구축, ③은 한국수자원공사 관리하에 있는 전국의 광역 및 공업용 수도시설관련정보 구축, ④는 국가, 지방 1급, 지방 2급 하천에 대한 하천구간별 GIS 자료(중단도, 횡단도, 구조물도) 및 D/B 자료(하천대장) 구축, ⑤는 하천현황을 화상으로 실시간 감시하는 정보시스템이다. ③을 제외한 시스템들은 모두 인터넷 기반의 자료제공시스템으로 구축하여 대국민 서비스를 지향하고 있다. 자료분석 시스템으로서 ①은 홍수예경보, 수문분석, 수질분석, 물수지분석, 용수수요추정시스템 개발, ④는 홍수위험지도 제작, 하천정비 및 유역 계획 정책지원시스템 개발, ⑤는 홍수예경보 프로그램 개발 등 자료관리시스템을 기반으로 하는 응용시스템들이다. 업무관리시스템으로서 ②는 광역상수도관련 시설관리 및 운영정보시스템(MIS) 개발, ③ 지하수 행정 업무관리시스템 개발로서 데이터베이스 기반의 자료관리시스템이다.

수자원관리종합정보시스템(<http://wamis.kowaco.or.kr>)은 수자원관련 분야의 모든 정보를 종합적이고 체계적으로 관리·분석·정책 지원하는 것을 목표로 하여, 정부의 '98 정보화 지원사업(정보통신부 지원)으로 시작되었다. 이 시스템의 최종목표는 물관련 전 기관을 대상으로 물정보 인프라를 구축하여 국가수자원의 정보관리체계를 완성하므로써 궁극적으로는 전문가, 공공기관, 국민이 각각 수준별로 요구하는 다양한 수자원 정보들을 신속하게 지원·서비스하는 것이다.

수자원관리종합정보시스템은 기초자료 관리시스템, 분석 시스템 및 정책지원 시스템의 3분야로 구분하여 추진하고 있으며, 전체를 단기, 중기 및 장기계획의 3

단계로 설정하여, 1단계인 1999년까지는 우선적으로 기초자료 관리시스템 구축을 완료하였으며, 2단계로 2000~2005년(6년)까지 분석시스템을 개발하고 최종단계인 2006년~2011년(6년)에는 기초자료관리 및 분석시스템을 연계하여 수자원 정책지원시스템을 구축하는 것으로 추진하고 있다

1단계에서 구축한 기초자료 관리시스템의 내용은 ① 수자원단위지도, ② 기상정보, ③ 수위유량정보, ④ 하천정보, ⑤ 댐운영정보, ⑥ 용수이용정보, ⑦ 지하수정보, ⑧ 수질정보로 구성되어 있다. 수자원단위지도(<http://wamis.kowaco.or.kr/pass/Default.htm>)는 전국을 유역단위의 수량과 수질 공동관리를 통한 수자원 이용 및 관리 효율을 극대화하기 위하여 전국을 1174개의 표준화된 유역단위로 분할한 지도이다.

#### 4.3. 환경부

환경부는 1999년 정보화 근로사업을 통해 기존의 환경기초자료수집 전산망을 개선한 환경종합정보시스템(<http://www.me.go.kr/>)을 구축하고, 2000년도부터 인터넷상으로 대국민 서비스(정보창고→측정망 자료)를 시작하였다. 이 시스템은 기존의 시스템에 GIS 기능을 추가하고, 전국에 산재한 환경기초자료 약 550만 건과 환경시설물 약 15만건의 위치좌표(TM)를 확보하여, 이를 수치지도(1:25,000)에 입력하고, 환경부와 일선 지방자치단체(시도 및 시군구)가 네트워크로 연결, 실시간으로 주고받을 수 있도록 한 시스템이다. 이와 더불어 환경부는 환경관련 지리정보(원격탐사정보: 토지피복지도, 위성사진, 항공사진, 수치고도자료, 지상기준점), 자연환경정보(자연환경현황도, 현존식생도, 녹지자연도, 생물종정보, 지형경관정보)를 인터넷으로 제공하고 있다.

또한 환경부는 '97년도 정보화 지원사업으로서 한강 권역에 대한 수질환경정책수립 지원시스템을 구축(1997년 9월 9일-1998년 5월 31일) 하였던 바, 이 시스템을 통하여 지방자치단체의 환경자료 이용시스템은 기존의 환경부 환경기초자료 수집시스템의 기능을 보완하고 지자체의 환경관련 담당자들의 자발적인 업무협조 유도 및 시스템의 활성화 방안을 수립하여 담당자들이 환경부 관련기관에서 검색 및 통계처리할 수 있는 GUI 환경의 프로그램을 개발하였으며, 업무분석 과정에서 현업의 요구사항을 반영하였다. 환경기초자료 관련업무의 기능을 구현하였고, 배출업소 관리 지

하수 관정현황을 조회할 수 있는 기능을 추가하였다. 수질예측 모델링 시스템의 경우, 한강전체 수역 및 관심구역의 수질예측에 적합한 모델을 개발하였고, 하천 유량변동(갈수기, 평수기, 풍수기)에 따른 한강권역의 배수구역별/호소별 수질예측시스템을 구현하였고, 향후 2011년까지의 연도별 용수 수요, 오염원 변화 및 하천유량 변화 등 대상 수역의 주요 수질인자 변화 추이분석이 될 수 있도록 하였다. 또한 점·비점원 오염물질 부하량 산정 알고리즘 개발 및 배수구역별 리·동 단위 행정 구역별(발생, 유달) 부하량 산정, 하천별로 점오염원 및 비점오염원 등의 각종 인자에 따른 하천 환경변화 등의 중·장기 수질예측 시스템을 개발하였다. 또한 물수지 분석과 수질모델 운용 및 데이터베이스를 검색, 수정, 삭제, 추가 및 통계 처리할 수 있는 GUI 환경의 입·출력 체계를 구축하였다. 오염물질삭감 계획수립시스템의 경우, 적정 오염물질 배출량 산정프로그램 개발 및 배출량 산정과 한강권역의 수질보전계획 수립을 위한 최적의 환경기초시설 설치 방안 도출, 오염 우심하천에 대해서는 상세한 배출량 및 환경기초 시설 설치방안 도출하였고, 오염원, 하천 유지용수, 용수사용량 등 하천환경 변화에 따라 적정 배출량 산정 및 환경기초시설 설치방안 수립을 용이하게 하는 GUI 환경의 프로그램을 개발하였다. 수리·수문 관련자료 공동이용 시스템의 경우, 수리·수문 관련자료 이용을 위한 유관기관의 연계프로그램 개발과 데이터를 검색, 수정, 삭제, 및 통계 처리할 수 있는 GUI 환경의 프로그램을 개발하였다.

## V. GIS/RS와 수자원 분포의 시공간적 변동

### 5.1. GIS/RS 기반의 수자원변동 관리

GIS와 수자원의 결합은 이 분야 모델개발의 새로운 장을 열고 있다. 특히 국내외의 분포형 수문/수질관련 모델의 개발양상은 격자기반(grid-based)으로 그 방향을 잡아가고 있다. 국내에서 수자원 연구분야에 적용되고 있는 모델들을 보면 그 경향을 잘 파악할 수가 있다. 국외의 분포형 모델 중에서 현재 국내에서 그 적용이 활발한 모델들은 TOPMODEL, AGNPS, SWAT 등이다. 이들 분포형 모델들이 활발하게 적용되는 가장 큰 이유 중의 하나는 기존의 총괄형 모델에서는 불가능하였던 유역내 수문/수질 거동의 시간적·공간적 분포상황을 파악할 수 있다는 것이라고 할 수 있다.

즉 유역의 어느 지역에서 문제가 발생되어 이들이 궁극적으로는 어떻게 하천의 유량과 수질에 영향을 미치는지를 파악하므로써 유역단위(watershed scale)의 계획(planning), 관리(management), 복원(restoration) 등의 문제를 해결할 수 있다는 것이다.

기상분야에서는 RS, GIS를 이용한 전지구적 대기순환모델(General Circulation Model; GCM)에 집중적인 연구가 진행되고 있다. 이는 미래 지구의 다양한 기후변화 시나리오에 의한 지구자원의 변동상황을 예측하고, 이에 대한 범세계적인 차원의 대책수립을 지원하기 위함이다. GCM에 사용되는 계산격자의 크기는  $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (위도 $\times$ 경도)로 그 규모가 상당히 크다. 따라서 GCM과 같은 전지구적 규모(global-scale)의 모델 결과를 지역적/구역적 규모(regional/local-scale); 수문학적인 측면에서는 광역적 규모; meso-scale)의 수문모델과 결합하기 위해서는 공간수문학(Spatial Hydrology)의 근본 문제인 규모(scale)와 해상도(resolution)와 관련된 다양한 연구가 필요하다.

### 5.2. GIS/RS 기반의 시간적·공간적 적용기법 제언

수자원관련 GIS/RS 자료들을 효율적으로 활용을 위해서는 다음과 같이 반드시 공간 축, 규모(scale)와 해상도(resolution)와 시간(time) 문제를 고려하여야 한다.

5.2.1. 규모별 적용(scale-dependent application) - 광역(meso), 지역(region), 구역(local)

#### (1) 광역적(meso-scale) 적용

남한 전체(축척 1: 250,000-1: 500,000)를 대상으로 하여 수자원관련 정보를 작성 및 분석한 후에 단위유역, 단위유역군, 수계단위, 전국단위 등으로 재구성하여 원하는 정보를 추출하고, 보고서를 작성하는 방법이다.

#### (2) 지역적(regional-scale) 적용

수계(축척 1: 50,000-1: 250,000, 예; 5대강 유역)를 대상으로 하여 광역적 적용보다는 자세한 자료를 가지고 수자원관련 정보를 작성 및 분석한 후에 단위유역, 단위유역군, 수계단위 등으로 재구성하여 원하는 정보를 추출하고, 보고서를 작성하는 방법이다.

#### (3) 구역적(local-scale) 적용

하천구간, 댐 지점(축척 1: 5,000-1: 50,000) 등을 대상으로 하여 지역적 적용과 동일한 정도 또는 자세한 자료를 가지고 수자원관련 정보를 작성 및 분석한 후에 단위유역, 단위유역군 등으로 재구성하여 원하는

정보를 추출하고, 보고서를 작성하는 방법이다.

5.2.2. 시간별 적용(time-dependent application) - 정적(static), 동적(dynamic)

(1) 정적(static)인 적용

현재의 통계적인 자료들을 수집하여 각각에 대한 주제를 설정 및 작성하는 방법이다. 이는 특정시기의 현황 또는 통계특성을 보여주며, 대부분의 자료들은 주기적으로 갱신하여야 한다.

(2) 동적(dynamic)인 적용

시단위, 일단위, 년단위 등 시간을 고려한 프로그램을 개발하여 수자원관련 자연현상들이 시간적, 공간적으로 변화하는 양상을 모의발생 또는 예측하는 방법이다.

5.3. 수자원 분야별 GIS/RS의 활용가능 내용

5.3.1. 수문분야

수문분야에서 GIS/RS를 활용할 수 있는 내용으로는 Table 5와 같이 정리할 수 있다. 필요로 하는 GIS

자료로는 수자원단위지도(hydrologic unit map), 수치고도모델(digital elevation map), 기상관측소 위치도, 토양도, 토지이용도, 지하수관정 위치도, 지질도, 하천 GIS 이다.

지난 수십 년간 개발된 많은 수문모형들은 상기의 GIS 자료들로부터 각기 나뉠대로의 입력자료나 매개변수들을 추출하여 모형을 수행하는데 이용하고 있다. 이들은 공간적인 변화의 고려 유무에 따라 크게 집중형 모형(lumped model)과 분포형 모형(distributed model)으로 구분된다. 집중형 모형은 모형의 매개변수들을 추출하는 정도로 이용이 가능하며, 분포형 모형은 상기의 GIS 자료들을 그대로 입력자료로 사용하고 있다. 우리나라에서 사용되고 있는 대표적인 집중형 모형은 저류함수모형, HEC-1 모형 등이 있으며, 분포형 모형으로는 NWSRFS(Hydrologic Research Laboratory, 1972), ANSWERS(Beasley *et al.*, 1980), TOPMODEL(Beven *et al.*, 1979, 1984), CASC2D(Julien *et al.*, 1995), KIMSTORM(김, 김 등, 1998) 등이 있다.

Table 5. GIS/RS-based hydrological application contents

	Hydrologic Unit Map(HUM) (①)	HUM+DEM(②)	②+Meteo. station(③)	③+Soil map(④)
Basic items	○Watershed area ○Watershed perimeter	○Watershed average slope ○Slope/aspect distribution	○Station location	
Low level application		○Stream network generation	○Thiessen network ○Watershed ave. rainfall	○Soil type distribution ○Hydrologic soil group
High level application		○Flow direction & accumulation ○Watershed charac. (Bifercation ratio, Stream order, Stream length, Stream frequency, Drainage density etc.)	○Spatial interpolation of meteo. factors ○Water resources estimation ○Spatial hydrograph	○Soil physical parameters (porosity, field capacity, wilting point etc.) ○Storage capacity ○Subsurface flow
	④+Land use map(⑤)	⑤+Groundwater well +Geology map(⑥)	②+River GIS +Land use map(⑦)	
Basic items	○Water resources estimation	○Water resources estimation ○Groundwater use	○Flood inundation mapping	
Low level application	○Watershed runoff ○Dam inflow	○Watershed runoff ○Dam inflow	○River discharge	
High level application	○Spatial ET ○Direct runoff (SCS method) ○Storm runoff (lumped & distributed model) ○Storm runoff using radar rainfall distribution ○Continuous rainfall-runoff & soil moisture prediction	○Continuous rainfall-runoff & soil moisture prediction ○Drought index & distribution ○Groundwater recharge ○Groundwater flow	○River flow ○Flood inundation forecasting ○Shock wave propagation by dam break ○Water propagation by river bank collapse	



**Table 6.** GIS/RS-based water use and planning contents

	①+Administration boundary(⑧)	②+⑤ or ⑥+⑧
Basic items	○Water use by Administration boundary	○Water supply planning ○Dam planning
Low level application	○Water use by watershed or benefited region	○Optimum dam site determination ○Area submerged by water
High level application		○Water demand estimation ○Reservoir capacity planning ○Dam construction cost estimation

5.3.2. 용수이용 및 계획분야

각종 용수별 이용현황 파악을 위해서는 수자원단위 지도, 행정구역도(도형정보)와 구역별 통계자료(문자정보)가 필요하며, 용수계획 및 댐계획을 위해서는 “수문분야”에서 요구되는 모든 GIS 자료가 필요하다. 용수이용의 현황 파악 및 계획은 댐지점을 기준으로 상류유역과 하류 수혜지역으로 구분하여 정리하여야 한다. 상류유역의 경우는 유역관리(watershed management) 측면에서 각종 용수의 이용현황을 파악할 필요가 있다. 하류유역은 기존댐의 경우, 용수별 공급현황을 저수지 운영실적으로 처리하고, 용수별 이용현황은 수혜지역을 행정구역별 통계자료로 처리할 필요가 있다. 계획댐의 경우는 각종 수요량을 추정한 후, 저수지 모의운영프로그램을 이용하여 저수지의 규모를 결정하게 된다. 이 경우, 댐 개발적지 분석, 댐개발로 인한 수몰지역 확인 및 보상비 추정 등의 내용을 수자원단위지도 기반의 프레임워크 자료로부터 분석이 가능하다.

5.3.3. 지하수분야

지하수 분야에서 수자원단위지도를 활용할 수 있는 내용을 정리하면 Table 7과 같다. GIS 기반의 대표적인 유한차분 지하수모형은 USGS의 MODFLOW로서, 현재 상용화되어 가장 널리 사용되고 있는 모형 중의 하나이다(McDonald and Harbaugh, 1988). 이와 더불어 강력한 3차원 지하수 유한요소모형들이 개발되고 있다. 이 중에 하나는 Battelle Pacific Northwest 연구실(Gupta *et al.*, 1987)에서 개발한 CFEST(Coupled Fluid Energy and Solute Transport)이다. CFEST는 유한요소법을 이용하여 대규모, 다층구조의 자연 수문

**Table 7.** GIS/RS-based groundwater application contents

	⑤+Groundwater well +Geology map(⑥)	⑥+Groundwater GIS/DB
Basic items	○Water resources estimation ○Groundwater use distribution	○Groundwater quality
Low level application	○Free & deep groundwater level dist. ○Watershed runoff ○Dam inflow	○Groundwater quality dist.
High level application	○Continuous rainfall-runoff & soil moisture prediction ○Soil moisture dist. ○Drought dist. ○Groundwater discharge ○Groundwater flow	○Pollutant movement in soil ○Pollutant movement in groundwater

시스템에서의 압 또는 수두, 온도, 물질의 농도를 계산할 수 있도록 설계되어 있다. CFEST는 수평, 수직 또는 3차원 영역에서의 흐름을 모의할 수 있다. 또한 정상상태와 천이상태에서의 모의가 모두 가능하다.

지하수의 흐름과 이를 동반한 오염물질 이동기작을 향상시키기 위해서는 수문학적 연구에서 지표하 흐름을 특성화하는 것이 일반적이다. 이는 기존 지하수 모형의 상부 경계조건을 제공하는데 있어 필수적이라고 말할 수 있다.

5.3.4. 수질환경분야

수질환경분야에서 수자원단위지도를 활용할 수 있는 내용으로는 Table 8과 같이 정리할 수 있다. 필요로 하는 자료로는 수문분야에서 필요로 하는 GIS 자료 외에 각종 오염원위치도가 추가적으로 요구된다.

유역의 토양침식과 오염물질이동을 추적하는 모형으로서, 현재 국내에서 잘 알려진 모형으로는 USLE(Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1965, 1978), MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation, Williams, 1975; Onstad and Foster, 1975), ANSWERS(Beasley *et al.*, 1980), AGNPS(Agricultural Nonpoint Source, Young *et al.*, 1987), CREAMS(Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems, USDA SEA-AR), SWMM(Storm-Water Management Model, Metcalf and Eddy, Inc., 1971; Huber *et al.*, 1981), KIMEROM(Kim, 2001) 등이 있다.

**Table 8.** GIS/RS-based water quality application contents

	⑧+Administration boundary(㉔)	㉔+DEM +Point source location(㉔)	⑤	⑥
Basic items	○Pollutant load produced	○Pollutant load produced ○Pollution vulnerable area	○Soil erosion vulnerable area ○Sediment load ○Pollutant inflows	○Soil erosion vulnerable area ○Sediment load ○Pollutant inflows
Low level application	○Pollutant load discharged	○Tracing pollutants	○Soil erosion (event)	○Soil erosion (continuous)
High level application	○Delivery ratio		○Pollutograph ○Distributed water quality modeling	○Pollutograph ○Remained pollutants in soil ○Pollutant movement to groundwater ○Distributed modeling (MUSLE, MODFLOW etc.)

## VI. 결론/제언 및 과제제언

### 6.1. 결론 및 제언

지난 20여년 동안 기상재해는 전 세계적으로 더욱 빈번해지고 극심해지고 있다. 우리나라도 최근 10여년을 돌이켜 보면 과거에는 경험하지 못했던 엄청난 규모의 홍수와 극심한 가뭄을 겪어오고 있다. 이 기간동안의 주요 홍수사상 및 피해지역으로는 1990년 경기, 강원을 중심으로 한 중부지방의 집중호우, 1995년 한강유역을 비롯한 중부지방, 1996년 임진강유역의 집중호우, 1998년 전국적인 홍수피해를 들 수 있다. 주요 가뭄사상으로는 1994년~1995년의 영호남 및 중부일부 지역의 가뭄을 들 수 있다. 특히 1995년에는 지역적으로 가뭄과 홍수를 동시에 겪는 이례적인 현상도 발견할 수가 있다. 한마디로 최근의 홍수는 단시간 동안 특정지역에 편중되어 발생되고 있으며, 가뭄은 그 빈도와 심각한 정도가 과거보다 훨씬 커지고 있다는 것이다. 이와 같은 이상 기상현상은 그 동안 우리가 관행적으로 해 왔던 수자원 관리에 변화를 예고하고 있다.

이와 같은 변화에 신속하고도 능동적으로 대응하기 위한 가능성 있는 방법으로서, 현재 수자원 분야에서 그 활용성이 높은 GIS, RS 기법을 도입한 체계적인 수자원 관리기술의 개발이 필수적이라고 판단된다. 이제는 GIS와 RS가 우리나라에서도 수자원 분야에 응용되는 널리 알려진 기법으로서 현재 수문모델링 등에 많이 이용되고 있는 기법들이다. 수자원 분야에서 이들 기법을 이용하는 것은 주로 원격탐사 자료와 GIS

에서 얻어진 분석결과를 수문모델의 입력자료로서 사용하는 것이다. 앞으로는 어떻게 하면 통합된 분석시스템 내에 이 두 가지 기법을 수문모델과 연계시킬 것인가에 연구의 초점이 맞추어지고 있다. 인공위성으로는 시간과 공간적으로 광범위한 지역을 규칙적으로 관찰하고, 레이더나 항공사진으로는 필요한 시기의 강우 그리고 특정지역의 동적인 자료를 얻게 된다. GPS는 효과적인 GIS 자료수집기술로 발전하고 있으며, RS, GIS 사용자들이 필요한 자료(주요 시설물 위치, 침수 피해지역 등)들은 현장에서 직접 수집할 수 있게 되었다. 이와 더불어 GIS는 모니터링 및 예측관련 연구에 있어서 수자원 관리에 지대한 기여를 하고 있는 것이 사실이다. GIS 기법은 수자원 관리자와 의사결정자들에게 원격탐사 정보와 공간 및 비공간 정보들의 효율적인 저장과 조작도구로서 제공될 수 있다. GIS와 통합된 원격탐사 자료는 관측, 지도제작, 모니터링 및 모델링 등을 위해 매우 효과적으로 이용될 수 있다.

21세기에는 우주경쟁이 더욱 치열해질 것으로 예측하고 있다. 현재 지구상공에는 지구자원탐사위성을 비롯하여 기상 관측위성, 범세계 위치정보위성, 통신위성, 첩보위성 등이 미국, 일본, 프랑스, 인도, 캐나다 등의 국가에 의해 제 각각의 목적에 따라 운영되고 있다. 특히 과거 군사적인 목적위주로 활용되던 원격탐사기술이 탈냉전 시대 이후부터는 지구의 자원, 기상, 환경 등 인류의 번영을 위한 목적으로 전환되어 사용되기 시작하였다. 우리나라도 시기적으로 늦은 감이 있으나, 1999년 12월 한국항공우주연구소에서 다목적 실

용위성 아리랑 1호(KOMPSAT-1)를 발사하여 현재 한반도 주변의 위성영상을 저가로 공급하고 있으며, 2004년에는 1 m 공간해상도를 가지는 KOMPSAT-2를 발사할 계획에 있어, 이를 이용하는 응용분야에서의 활발한 연구가 기대된다. 농업분야는 RS(Remote Sensing; 원격탐사) 기법을 활용하는데 무한한 잠재력을 가지고 있는 응용분야이다. 예를 들어 위성영상을 활용한 구름 및 강우분포, 홍수와 기뭇 피해지역, 작물의 생육상태와 수확량, 토양수분과 증발산량의 파악, 자연 생태계의 변화, 수질오염 감시 등 무궁무진하다.

21세기는 이미 많은 학자들이 정보화 시대가 될 것이라고 말하고 있다. GIS(Geographic Information System; 지리정보시스템)는 우리나라에서는 '80년 초부터 관심이 일기 시작하여 현재는 국가차원의 NGIS 사업이 계획대로 진행되면서 우리나라의 사회기반산업으로 그 자리를 확고히 다진 상태이다. 따라서 농업분야에서도 이들 자료를 이용하는 수요와 응용이 기하급수적으로 증가될 것이 자명하다. GPS(Global Positioning System; 범세계위지정보시스템)는 미 국방성이 '70년대에 고속으로 이동하는 선박, 항공기, 로켓 등의 위치를 파악하기 위하여 개발을 시작하여 '93년에 실용화시킨 인공위성 항법시스템이지만, GPS가 농업분야에서도 효과적인 GIS 자료수집기술로 발전하고 있다. GPS 기술은 해상도의 한계로 인한 불명확한 위치자료를 수집하고, 계속 변화하는 자료를 최신의 자료로 갱신(update)할 수 있다는 데 그 장점이 있다.

상기의 정보기술(RS, GIS, GPS)들은 상호 보완적인 관계를 유지하면서 급진적으로 발전을 거듭하고 있다. 특히 농업분야에서는 그 활용범위가 넓고, 활용도 또한 높은 만큼 이 기술들을 이용한 농업관련 연구가 필요하다고 생각된다.

앞으로는 농업 수자원 분야의 연구계획 및 개발은 이제는 현실성이 있어야 한다. 무조건 모든 종류의 시스템을 계획하기보다는 실현 가능한 주요한 분석시스템을 선정하여 자체개발하는 것이 바람직하다고 본다. 시스템은 남한 전체를 대상으로 어느 지역을 선택하더라도 적용이 가능하도록 개발되어야 함을 간과해서는 안된다. 이는 시스템의 프로그램들이 되도록 물리적인 기반의 프로그램이어야 하고, 프로그램 개발을 위해서는 여러 전문가들이 컨소시엄을 이뤄 장기간에 걸쳐 개발되어야 한다. 외국의 유명한 프로그램들을 보더라도 잘 이해가 될 것이다.

## 6.2. 과제제안

농업에서의 수자원 분포 및 시기적 변동은 우선 농경지와 직접적인 관련이 있다. 따라서, 농경지의 정확한 분포와 경지내 작물재배의 정확한 파악이 필수적이다. 다음 단계에서는 농경지에서의 담수상태(논) 및 토양수분(밭 및 과수)을 관리하기 위한 분석시스템 개발을 제안하고자 한다. 또한 농업 수자원 분야에서 보다 관심을 기울여야 할 부분은 과거부터 현재까지 산림이 지니는 수자원 함양량의 변화가 농업용 저수지에 미치는 영향과 특히 논이 가지는 다기능 중에서 논의 담수가 생태계에 미치는 효과 및 홍수시 논내 저류에 의한 치수능력을 계절별로 보다 구체적으로 정량화할 필요가 있다.

### 6.2.1. GIS/RS 기반의 논 관리시스템 개발

● **본 과제의 필요성**으로는 우리나라 전체용수의 약 50%를 차지하고 있고, 전국에 걸쳐 광범위하게 분포되어 있는 논을 대상으로 공간적으로 관리할 수 있는 시스템의 개발이 요구되기 때문이다. 경지정리는 매년 대규모로 실시되고 있어 1년 단위의 공간적인 변화의 파악이 필요하고, 특히 논내의 비닐하우스 재배는 신고제로서, 현재 지역적인 통계자료가 없는 상태이므로, 영상자료의 도입 및 활용이 최적이라고 판단된다.

● **본 시스템의 최종 목표**는 논내의 경지정리지역, 논내의 비닐하우스 재배현황도 제작을 통한 논관련 토지 이용 및 수자원 관리시스템 개발이다. 연구내용으로는 적절한 인공위성영상의 선정 및 DB화 기준(도엽번호 및 촬영시기) 설정, 좌표체계 정립(geo-referencing)을 위한 기준점(ground control points) 설정 및 GPS 측량, 해상도 향상을 위한 기법(filtering) 개발, 해당시기의 논면적 및 비닐하우스 재배면적 추출기법 개발, GPS 측량 및 용배수로 추출기법 개발, 논 관리시스템 모듈 설계 및 개발, 논관련 분석시스템 개발(관개현황, 논배수가 하천수질에 미치는 비율분석) 등이다.

● **본 연구의 결과**는 최신의 경지정리지구 파악자료, 논내의 비닐하우스 재배현황 통계자료, 논에서의 배수가 하천수질에 미치는 영향분석 자료로 활용이 가능할 것으로 판단되며, 인공위성영상자료를 이용한 논내의 관리현황 및 통계자료 수집방법의 정보화 확립, 논내의 담수현황파악을 통한 기뭇의 정도 파악, 논내의 비닐하우스 재배현황 파악을 통한 지자체별 비닐하우스 최적관리를 기대할 수 있다.

### 6.2.2. GIS/RS 기반의 논 담수심 및 토양수분 예측 시스템 개발

● **본 과제의 목적 및 필요성**은 농민에게 자신의 경작지에 대한 수자원 및 토양의 기본지식을 함양시켜 최적의 경작지 관리 및 작물 재배관리에 도움을 주는 한편, 작물의 정상적인 발육을 도모하기 위한 차기 관개시기 및 관개량 판단을 위한 의사결정 자료를 제공하는데 있다. 농지관련 정책결정자에게는 토양별 토성을 고려한 토지등급 구분정보의 제공 및 가뭄정도를 판단할 수 있도록 논 담수심 및 토양수분상태 정보시스템 개발할 필요가 있다.

● **본 과제의 연구내용**으로는 GIS 자료의 구축 (DEM, 하천도, 토양도, 토지이용도, 기상관측소, 지하수위 분포도 등), RS 자료의 분석(전처리, 논 담수심 및 토양수분 현황분석), 분포형 모델의 개발 및 적용 (공간 증발산량, 논 담수심 및 토양수분 예측), GUI 시스템 개발 등이다.

● **본 연구의 결과**는 단기 관개계획, 지하수 충전량 추정, 단기 가뭄예보 등에 활용될 수 있을 것으로 생각되며, 농업 수자원 분야의 정량적 정책대응논리 개발, 농경지관련 자원(기상정보, 토지이용/피복, 토양정보, 수자원정보; 부존량, 지하수 충전량 등)의 정보화로 효율적인 농경지관리, 농경지정보 및 분석체계가 타 분야와 대등하게 발전될 수 있는 계기가 될 수 있을 것으로 기대된다.

### 6.2.3. 논 다기능성(多機能性, Multifunctionality) 정량화 연구

● **본 과제의 필요성인 동시에 목표**는 우리나라의 주곡 생산지인 논에 대한 국민적 인식을 보다 긍정적으로 함양시키는데 있다. 수자원 측면에서 논 다기능성은 홍수방어능력, 지하수 함양능력 등 이미 잘 알려져 있으나, 지금까지는 단순한 산술계산에 의한 것이지, 지난 수십년간 이루어진 경지정리, 논면적의 꾸준한 감소, 영농방법의 변화(이앙재배, 직파재배), 생육기와 비생육기에 있어서 논이 가지는 수자원, 환경적(농지배수가 하천수질에 미치는 영향) 및 생태적(생물보존능력) 기능에 대한 체계적인 정량화 연구는 없는 실정이다.

이와 관련된 연구의 범위와 내용은 실로 방대하다. 그 이유는 수자원, 기상, 관개배수, 환경, 생태관련 전문기들이 권소시업을 이뤄 장기적인 안목에서 체계적으로 연구하여야 할 분야이기 때문이다.

### ● 연구분야 및 내용으로는

- 산림, 논, 밭 등의 상대적인 토지이용 변화가 홍수유출에 미치는 영향→과거 수십년간의 RS 자료를 이용하여 토지이용의 경년변화를 분석하고, GIS 기반의 수문모형에 의하여 이러한 변화가 농촌 수자원에 미치는 영향 구명
- 생육기별 논 저류효과가 홍수유출에 미치는 영향→농민들의 현장 물꼬관리 상태를 고려하여 홍수기에 논이 가지는 실질적인 저류량을 파악하므로써 논의 홍수방어능력의 정량화
- 이앙재배, 직파재배, 논내 비닐하우스 재배가 하천유량과 수질에 미치는 영향→재배방식의 변화에 따른 농업용 저수지 운영 및 시기별 저수율의 변화 파악; 지하수 위주에 의한 비닐하우스 재배가 농업용수 사용패턴 변화 및 하천의 건천화에 미치는 영향 구명
- 겨울철 무논 담수가 논 생태적 기능에 미치는 영향→겨울철 무논 담수가 여름철 작물생육기 동안에 미치는 영양물질의 순환 파악; 무논 담수를 통한 야생조류의 유인으로 논 영양물질 제공에 기여하는 동시에 농업용 저수지에 도래하여 수질을 부영양화 시키는 것을 방지할 수 있는 기회 제공
- 여름철 비 생육기간 동안에 논이 지나는 생태적 기능의 구명→담수기 동안 미생물을 비롯한 갑각류, 절지동물 등의 생육장소를 제공하며, 이들이 해충을 구제하는 역할을 하고; 논 생태계의 생물다양성을 제고하며 논 생태계 먹이사슬을 보호하는 유기농법과 관련성 제고
- **본 연구의 결과**는 그 동안 우리가 알고 있었던 논 다기능성을 보다 확장하여 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 정부와 국민 모두 논에 대한 인식을 성숙시켜 정부는 논에 대한 꾸준하고 세심한 투자가 기대되며, 국민은 보다 친근감 있게 논에 다가갈 수 있을 것으로 생각된다.

### 인용문헌

- 건설교통부·한국수자원공사, 2002: 수자원관리종합정보시스템. <http://wamis.kowaco.or.kr/>  
 김성준, 1998: 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(1)-이론 및 모형-. 한국수자원학회논문집. 31(3), 303-308.  
 김성준, 채효석, 신사철, 1998: 격자기반의 운동과 강우유출

- 모형 개발(II)-적용에-. 한국수자원학회논문집. **31**(3), 309-315.
- 김성준, 채효석, 2000: 격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수 함양량 추정기법 개발. 한국수자원학회논문집. **33**(1), 61-72.
- 김승, 김현준, 1994: 기후변화가 한국의 수자원에 미치는 영향. 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 한국과학기술연구원, 23-46.
- 김영준, 박희경, 이종범, 임원근, 정관영, 윤순창, 1997: 이상기상에 대비한 신기술 개발 연구(I). 연구보고서 KOWACO-IPD-97-05, 한국수자원공사.
- 농림부·농업과학기술원, 2001: 농업토양환경정보시스템. <http://soils.niast.go.kr/gishome/>
- 농림부·농업기반공사, 2002: 농촌지형정보시스템. <http://rgis.karico.co.kr/>
- 서애숙, 이미선, 김금란, 이희훈, 1994: GMS 영상자료와 관측강수량 자료의 비교. 대한원격탐사학회지. **10**(1), 1-14.
- 손승희, 정효상, 김금란, 이정환, 1998: GMS-5 Split Window 자료를 이용한 강수량 산출. 대한원격탐사학회지. **14**(1), 53-68.
- 신사철, 최윤수, 안기원, 1996: NDVI를 이용한 한반도의 피복분류. 대한토목학회 논문집. **16**(III-2), 139-146.
- 오성남, 1997: 기후변화가 한반도의 농업과 수자원에 미치는 영향 예측: GCM 시나리오 분석. 한국과학재단 한연산연구교류회, 1-25.
- 오재호, 1994: 한반도 강수량 변화 예측 시나리오. 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 한국과학기술연구원, 1-21.
- 이상호, 1998: 지구 기후변화에 따른 미래의 물문제, 한국수자원학회지. **31**(3), 43-52.
- 채효석, 김성준, 정관수, 1999: 격자기반의 일 증발산량 추정모형 개발. 한국수자원학회논문집. **32**(6), 721-730.
- 한국과학기술연구원, 1994: 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구 I. 과학기술처.
- 한국과학기술연구원, 1995a: 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구 II. 과학기술처.
- 한국과학기술연구원, 1995b: 기후변화 영향 평가 및 영상처리 기술개발 연구 III. 과학기술처.
- 환경부, 2002: 환경종합정보시스템. <http://www.me.go.kr/>
- Kim, Seong J., 2001: Grid-Based Soil-Water Erosion and Deposition Modeling Using GIS and RS. *Korea Water Resour. Assoc.*, **2**(1), 49-61.
- Barrett, E.C. and D.W. Martin, 1981: *The use of satellites in Rainfall Monitoring*. Academic Press. London.
- Beasley, D.B., L.F. Huggins and E.J. Monke, 1980: ANSWERS: A model for watershed planning. *Trans. of ASAE.*, **23**(4), 938-944.
- Beven, K.J. and M.J. Kirkby, 1979: A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydro. Sci. Bull.*, **24**, 43-49.
- Beven, K.J., M.J. Kirkby, N. Schofield and A.F. Tagg, 1984: Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. *J. of Hydrology.*, **65**, 119-143.
- Collier, C.G., 1989: *Applications of Weather Radar Systems*. Ellis Horwood, Chichester.
- Gupta, V.K., C.R. Cole, C.T. Kincaid and C.J. McDonald, 1987: *Coupled fluid, energy and solute transport (CFEST) model: formulation and user's manual*. ONWI Report 660. Columbus. OH: Battelle Memorial Institute.
- Hollenbeck, K.J., T.J. Schmutge, G.M. Hornberger and J.R. Wang, 1996: Identifying soil hydraulic heterogeneity by detection of relative change in passive microwave remote sensing observations. *Water Resources Research.*, **32**(1), 139-148.
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, K. (Eds.), 1996: *Climate Change 1995*. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp. 572.
- Huber, W.C., J.P. Heaney, D.A. Aggidis, R.E. Dickinson and R.W. Wallace, 1981: *Urban Rainfall-Runoff-Quality Data base*. EPA-600/2-81-238 (NTIS PB82-221094). Environmental Protection Agency. Cincinnati. OH.
- ICWE, 1992: *The Dublin Statement and report of the conference*. International Conference on Water and the Environment : Development issues for the 21st century. 26-31 January 1992, Dublin, Ireland.
- IPCC, 1990: *Climate Change-The IPCC Scientific Assessment*. WMO/UNEP.
- Jackson, T.J., 1993: Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrological Processes.*, **7**(2), 139-152.
- Julien, P.Y., B. Saghafian and F.L. Ogden, 1995: Raster-based Hydrologic Modeling of Spatially-varied Surface Runoff. *Water Resources Bulletin. AWRA.*, **31**(3), 523-536.
- Lohani, V.K., J.C. Refsgaard, T. Clausen, M. Erlich and B. Storm, 1993: Application of the SHE for irrigation command area studies in India. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.*, **119**(1), 34-49.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, 1988: A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. *Techniques of Water Resources Investigations Book 6*. Reston. VA. U.S. Geological Survey, 586.
- Metcalfe and Eddy, 1971: *Storm Water Management Model*. Univ. of Florida and Water Resources Engineers Inc.. Vol 1-Final Report. EPA Report 11024 DOC 17/71 (NTIS PB-203289). Environmental Protection Agency. Washington, DC.
- National Research Council, 1991: *Opportunities in the hydrologic sciences*, Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences, Water Science and Technology Board, 110-111.
- Schmutge, T.J., 1985: Remote sensing of soil moisture, in M.G. Anderson and T.P. Burt (eds.). *Hydrological Forecasting*, John Wiley and Sons, Chichester, 101-124.
- Singh, V.P., 1995: *Computer Models of Watershed*

- Hydrology*, WRP. Colorado.
- Theon, J.S., 1992: *The Global Role of Tropical Rainfall*. Deepak. Hampton. Virginia.
- Ulaby, F.T., P.P. Batlivala and M.C. Dobson, 1978: Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture : Part I, Bare soil. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **16**, 286-295.
- Ulaby, F.T., C.T. Allen and G. Eger, 1984: Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. *Remote Sensing Environ.*, **14**, 113-133.
- Young, R.A., C.A. Onstad, D.D. Bosch and W.P. Abderson, 1989: AGNPS: a nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J. of Soil and Water Conservation.*, **44**, 168-173.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, 1965: *Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains*. Agricultural Handbook No 282. Agricultural Research Service. USDA. Purdue Agricultural Experimental Station.