

하천 네트워크 기반의 유역관리시스템 개발을 위한 프레임워크 공간 DB 구축에 관한 연구*

김경탁^{1*} · 최윤석¹ · 김주훈¹

A Study on the Construction of the Framework Spatial DB for Developing Watershed Management System Based on River Network

Kyung-Tak KIM^{1*} · Yun-Seok CHOI¹ · Joo-Hun KIM¹

요 약

유역의 공간 DB를 DEM을 이용하여 구축할 경우에는 DEM으로부터 유역의 수문학적 지형특성 인자를 손쉽게 추출할 수 있으며, 이들이 자동으로 공간 DB의 속성으로 입력되어 관리될 수 있다. 본 연구에서는 유역정보를 관리하기 위한 기반정보인 프레임워크 공간 DB의 구축방안에 대하여 기술하였다. 이를 위하여 프레임워크 공간 데이터의 범위를 설정하고, 이들의 상호 연관관계를 정의하였으며 실제 유역을 대상으로 프레임워크 공간 DB를 구축하였다. 한편 본 연구에서는 순수 국내기술로 수자원 공간자료 생성 및 수자원 시스템 개발 모듈인 HyGIS(Hydrological Geographic Information System)를 개발하였다. HyGIS를 이용하여 수문학적 지형특성인자 및 공간자료를 추출하였으며, 이들 자료를 실제 유역의 프레임워크 공간 DB를 구축하는 기본 데이터로 이용하였다. 본 연구에서는 이러한 과정을 통하여 하천 네트워크 기반의 유역관리시스템 개발을 위한 프레임워크 공간 DB의 구축방안을 제시하고자 한다.

주요어: 수문학적 지리정보시스템, 프레임워크 DB, 하천 네트워크

ABSTRACT

When watershed spatial database is constructed from DEM, hydrological geographic characteristics of watershed can be easily extracted. And the characteristics can be assigned and managed as the attribute of spatial database. In this study the scheme of constructing framework spatial database which is basic information for managing watershed information is examined. We established framework spatial data and defined the relationship of the data. And framework spatial database of test site was constructed. In this study, HyGIS (Hydrological Geographic Information System) which is developed by

2004년 5월 23일 접수 Recieved on May 23, 2004 / 2004년 6월 20일 심사완료 Accepted on June 20, 2004

* 이 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제:1-2-1)에 의해 수행되었음

¹ 한국건설기술연구원 수자원연구부 Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

* 연락처자 E-mail: ktkim1@kict.re.kr

domestic technology for making hydrological spatial data and developing water resources system is used. Hydrological geographic characteristics and spatial data is extracted by HyGIS. And the data from HyGIS is used for constructing framework spatial database of test site. Finally, this study suggests the strategy of constructing framework spatial database for developing watershed management system based on river network.

KEYWORDS: *Hydrological Geographic Information System(HyGIS), Framework Spatial DB, River Network*

서론

수자원분야에서의 GIS 활용은 사용되는 자료 형태에 따라 두가지로 생각해 볼 수 있다. 첫째는, 격자형 자료를 처리하여 이용하고자 하는 경우로, 위성영상을 이용하여 제작되는 토지피복도, DEM, 분포형 수문모형 등이 이에 해당된다. 둘째는, 벡터형 자료를 처리하여 이용하고자 하는 경우로, 하천관리지리정보시스템(건설교통부/한국수자원공사, 2001) 등과 같이 주로 공간 DB 시스템의 형태를 취한다. 대부분 수자원분야에서 분석을 목적으로 할 경우는 격자형 자료를 많이 선택하는 반면, 관리 시스템형태로 DB화될 경우는 벡터형 자료를 선호하는 경향이 있다. 이는 두 자료의 처리에 대한 기술적 문제에 해당하는 것으로 이들 두 자료형식을 함께 처리하고 시스템화하려는 노력들이 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 임의의 영역에서 영역을 관리할 목적으로 GIS DB를 구축할 경우 DEM을 이용하여 영역의 프레임워크(framework) 공간 DB의 구축 방법 및 절차를 개발하였다. 이를 위하여 프레임워크 공간 DB의 범위를 설정하고, 이들의 상호 연관관계를 정의하였으며 실제 영역을 대상으로 프레임워크 공간 DB를 구축하였다.

한편, 본 연구에는 하천 네트워크 기반 영역 관리시스템을 개발하기 위한 기초 시스템으로 HyGIS(Hydrological Geographic Information System)를 개발하였다. HyGIS에서는 DEM을 이용하여 영역기반의 다양한 공간정보를 생성할 수 있을 뿐만 아니라 수자원 분야에서 필요로

하는 수문학적 지형인자를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 HyGIS를 이용하여 경안천 유역의 수문학적 지형인자 및 공간자료를 추출하였다. HyGIS에서 추출된 유역의 공간정보는 유역의 프레임워크 공간 DB로 활용하였으며, 이를 통하여 하천 네트워크(network) 기반의 유역관리 시스템의 개발을 위한 프레임워크 공간 DB의 구축방안을 제시하고자 한다.

연구동향

격자형 자료인 DEM을 이용하여 유역의 공간정보를 구축하는 기술은 DEM으로부터 하천망을 추출하고, 유역을 분할하며 유역의 수문학적 지형인자를 계산하는 과정으로 요약될 수 있다. 이를 위해서는 DEM 내에 존재하는 sink와 flat area와 같은 오류를 수정하여 지표수 흐름을 모의할 수 있어야 한다. DEM 오류수정에 대한 연구는 국외의 경우 1980년대 이후 꾸준히 수행되고 있으며 국내에서는 2001년부터 한국 건설기술연구원에서 수행 중에 있다.

DEM에 존재하는 sink를 제거하기 위하여 O'Callaghan과 Mark(1984)는 'smoothing' 방법을 제안하였다. Collins(1975)와 Mark등(1984)은 sink 제거를 위하여 'filling' 방법을 제안하였으며, Jenson과 Domingue(1988) 및 Martz와 Jong(1988)에 의해서 개선되었다. 이후 Garbrecht와 Martz(1998)는 sink의 발생원인의 분석과 함께 기존의 연구내용을 보완하여 'breaching' 알고리즘을 제안하였다. 또한 flat area의 제거를 위해

서 Garbrecht와 Martz(1992)는 'relief' 알고리즘을 제안하였으며, 이 알고리즘에서는 하향 경사가 있는 셀에서부터 증가하는 경사를 가지도록 flat area를 처리하게 된다. Garbrecht와 Martz(1997)는 'relief' 알고리즘을 개선한 'combined gradient' 방법을 제안하였으며 실제적이고 지형적으로 타당한 배수 경로를 결정할 수 있었다. 'Breaching' 알고리즘과 'relief' 알고리즘은 현재 TOPAZ(topographic parameterization) v3.1에서 이용되고 있다(Garbrecht와 Martz, 1999).

DEM으로부터 하천망을 추출하고 유역을 분할하기 위해서는 DEM의 각 셀에서의 흐름 방향과 흐름누적수를 계산하여야 한다. 이를 통하여 특정 흐름누적수 이상이 되는 셀을 하천망으로 규정하고, 유역의 유출구로 설정된 셀의 흐름에 기여하는 DEM 셀들을 유역의 범위로 정의한다. Arc Hydro Tools v1.0(ESRI, 2002)에서는 DEM에서 하천망을 추출하기 위하여 기존의 벡터형 하천망을 이용하는 AGREE-DEM (Hellweger, 1997) 기법을 적용하였다. 이렇게 정의된 하천망과 유역은 그리드 형태로 나타나며, 벡터형태의 자료가 필요할 경우에는 그리드 자료를 벡터화 시키는 기술이 필요하게 된다.

유역의 다양한 공간정보를 이용하여 유역관리시스템을 구축하기 위한 데이터모델에 관한 연구는 1990년대 말 이후 국내외에서 꾸준히 수행되고 있다. 국내에서는 지방국토관리청에서 운영되고 있는 하천지리정보시스템을 기준으로 역공학(Re-Engineering) 방식으로 표준하천데이터모델에 대한 연구가 수행된 바 있으며(건설교통부/한국수자원공사, 2001), 김경탁 등(2002, 2003)은 국내 실정에 적합한 네트워크 기반의 수자원 시스템 개발을 위한 데이터모델에 관한 연구를 수행한 바 있고, 김계현 등(2003)은 하천주제도의 효율적인 구축을 위한 데이터모델 설계에 대한 연구를 수행한 바 있다. 국외의 경우 최근 들어 수자원과 관련한 데이터모델 개발을 통해 GIS와 수리·수문모형이 완벽히 결합

된 형태의 시스템 개발을 위한 노력이 이루어지고 있으며 대표적인 데이터모델로 ArcGIS Hydro Data Model(Maidment, 2002)을 들 수 있다. ArcGIS Hydro Data Model은 ESRI (Environmental Systems Research Institute)와 CRWR(Center for Research in Water Resources of the University of Texas at Austin)에 의해 개발된 것으로 크게 'Network', 'Drainage', 'Hydrography', 'Channel' 그룹으로 분류되는 공간객체(feature) 데이터셋과 ArcGIS의 geodatabase 안에 single object class로 저장되는 'Time series'로 구성된다.

HyGIS의 개발

1. HyGIS의 개요

본 연구에서는 수자원 지리정보 데이터모델(김경탁 등, 2002)을 기반으로 유역의 프레임워크 공간 DB를 구축할 수 있는 수자원 공간자료 생성 및 수자원 시스템 개발 모듈인 HyGIS (Hydrological Geographic Information System)를 개발하였다. HyGIS는 네트워크 컴포넌트를 기반으로 유역의 수문학적 지형인자를 추출하기 위한 DEM분석 모듈을 포함하고 있다. 또한 생성된 유역의 공간정보를 이용하여 자동으로 네트워크 기반의 프레임워크 공간 DB를 생성하며, 모든 정보는 데이터베이스로 저장된다. HyGIS는 ArcGIS에서 구동되는 Arc Hydro Tools v1.0(ESRI, 2002; Maidment, 2002)과 같이 국산 GIS 엔진인 GEOMania v3.0을 이용하여 개발되었다. Arc Hydro Tools v1.0과 개발된 HyGIS의 제반사항과 현재의 기술수준을 비교하면 표 1과 같다.

TABLE 1. The comparison of Arc Hydro Tools v1.0 with HyGIS

구분	Arc Hydro Tools v1.0	HyGIS
GIS Engine	ArcGIS	GEOMania
Spatial DB	ArcGIS DB(*.mdb)	GEOMania DB(*.gss)
Data model	ArcGIS Hydro Data Model	수자원 지리정보 데이터모델
Data model component	Network, Drainage, Channel, Hydrography, Time series	배수, 하천, 하도, 유역, 시계열 자료
Feature framework	HydroEdge, HydroJunction, Watershed, MonitoringPoint	Network_Arc, Network_Node, Catchment, Watershed, 유출구
Application tool	Visual Basic etc.	Visual Basic etc, GDK(GEOMania Development Kits)
기술수준	실용화 단계	기본기술의 개발단계를 거쳐 시스템 시범구축. 실용화를 위한 추가적인 연구 필요.

가지는 셀을 이용하여 sink 영역 내에서 거리에 비례하여 보정하게 된다(김경탁 등, 2004). DEM 내에 존재하는 또 다른 오류인 flat area를 제거하기 위해서 HyGIS에서는 'relief' 알고리즘(Garbrecht와 Martz, 1992)을 적용하였다.

HyGIS에서는 실제 하천망과 유사한 형태의 하천망을 추출하기 위하여 AGREE-DEM 기법을 적용하였으며, AGREE-DEM으로부터 생성된 DEM을 이용하여 오류수정 과정을 거치게 된다. 이와 같이 DEM을 이용하여 지표수 흐름을 모의할 수 있도록 보정과정을 거친 후에는 유역의 하천망과 유역경계를 추출하여야 한다. 이를 위하여 HyGIS에서는 각 셀에서의 흐름방향과 흐름누적수를 계산하는 알고리즘을 구현하였으며, 생성된 하천망 그리드와 유역경계 그리드를 벡터화 시키는 기술도 개발하였다.

FIGURE 1. The application of HyGIS

2. Terrain Analysis 기능

HyGIS에서는 유역의 공간정보를 생성하기 위하여 DEM으로부터 하천망과 유역경계를 추출하고, 유역의 지형인자를 계산할 수 있다. 이러한 과정에서 필요한 것은 DEM의 오류를 수정하고, 하천망과 유역경계 그리드를 생성하며, 생성된 그리드 데이터를 벡터화 시키는 기술이다. HyGIS에서는 DEM의 오류인 sink를 제거하기 위하여 거리가중법(DW-method, distance weighting method)을 이용하였다. DW-method에서는 sink 영역을 둘러싸고 있는 셀 중 가장 낮은 고도를 가지는 셀과 두 번째 낮은 고도를

3. 지형인자 계산

DEM으로부터 하천망과 유역경계를 추출한 후에는 유역단위의 수문학적 지형인자를 계산하여야 한다. HyGIS에서는 수자원에서 필요로 하는 지형인자를 유역단위로 계산하며, 이는 분할된 유역의 범위에 포함되는 하천망과 DEM을 이용하여 하천과 유역의 지형특성을 계산한다는 것을 의미한다. 표 2는 HyGIS에서 계산되는 유

TABLE 2. Geographical characteristics from HyGIS(Kim et al., 2004)

약어	지형속성	설명	단위
AREA	유역면적	유역의 면적	km ²
AVEBS	유역평균경사	등고선 고도차/등고선 평균간격	m
AVEOF	평균지표유하거리	그리드 셀 중심에서 하천까지의 유하거리의 평균	m
P	유역둘레길이	유역 둘레의 길이	m
SHAPEF	형상계수	유역면적/최대 하천연장 ²	km ² /(km) ²
AVEBEL	유역평균고도	유역내 각 cell 고도의 평균값	m
STREAMD	하천밀도	하천총연장(본천+지천)/유역면적	l/m
MFD	최대유하거리	(하천흐름+지표수흐름)의 최대값	m
MFS	최대유하거리경사	MFD의 경사	m/m
MSL	최대하천연장	가장 긴 하천의 길이	m
MSS	최대하천연장경사	MSL의 경사	m/m
SEL	백터 하천망 각 edge 길이		m
SES	백터 하천망 각 edge 경사		m/m
NEXTOL	유출구에서 다음 유출구까지의 하천길이		m
NEXTOS	유출구에서 다음 유출구까지의 하천경사		m/m
STREAM ORDER	하천차수	Horton-Strahler method	

역내의 수문학적 지형인자를 나타낸 것이며, 그림 2는 경안천 유역을 대상으로 HyGIS를 이용하여 구축된 하천망과 유역경계의 속성이 공간 DB의 형태로 저장되어진 것을 나타낸 것이다. 그림 2에서 ①과 ②는 각각 유역과 하천의 속성 DB를 정보창을 통해서 나타내고 있다.

프레임워크 공간정보 설정

강우·유출모형, 수리모형, 수질모형 등 모든 수자원관련 모형은 모형의 적용에서 상·하류를 반드시 고려하여 필요한 자료를 입력하고, 흐름의 방향에 따라 하류로 이동하며 원하는 지점에서의 유출량 및 수질, 유속 등을 모의하고 있다. 또한 하천관리를 위해서도 관련 시설물들의 하천에서의 상대적 위치를 파악할 수 있어야 한다. 따라서 수자원의 분석과 효과적인 유역의 관리를 위한 시스템에서는 어떤 지점이 상류이며, 하류인가를 판단할 수 있는 구조인 하천 네트워크상의 선형적 참조가 가능한 위상관계를 제공하여야 한다. 하천 네트워크는 그림 3과 같이 node과 reach로 구성된다. Node는 하천이 합류하는 지점(B, C) 또는 수위관측소(A)와 같이 수문학적인 분석에서 중요한 지점으로 선정될 수 있으며, 이들 node와 reach는 하천 네트워크에서 상대적인 상·하류에 대한 정보를 갖고 있어야 한다(김경탁 등, 2004).

FIGURE 2. HyGIS and spatial DB

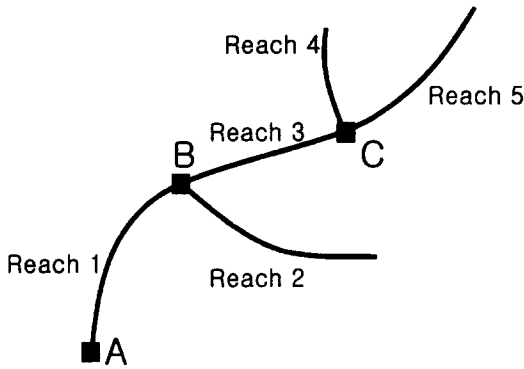


FIGURE 3. River network

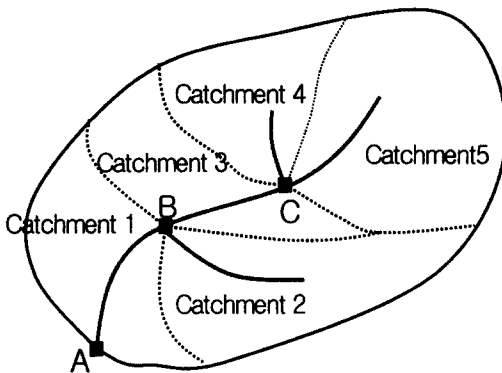


FIGURE 4. Connecting river network with catchment

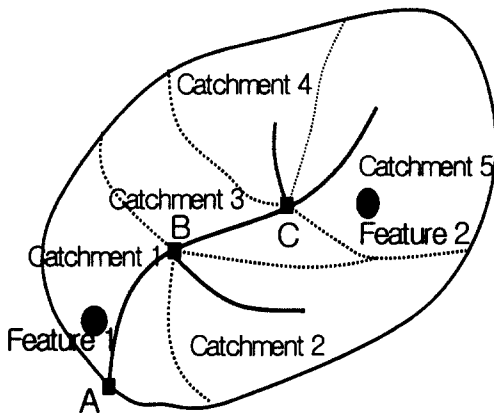


FIGURE 5. Connecting river network with feature

유역을 관리하기 위해서는 하천 네트워크와 연관된 유역정보가 필요하다. 기본적으로 line-to-area 개념(Maidment, 2002)의 유역으로 catchment가 형성될 수 있다. 그림 4에서 reach 3으로 흘러들어 오는 지표면 유출범위를 나타내는 catchment 3이 reach 3과 연관된 유역범위라고 할 수 있다. 또한 point-to-area(Maidment, 2002) 개념의 유역은 수위관측소(A)와 같이 하천 네트워크상의 한 점으로 모여드는 유출수의 상류역에 해당하는 모든 범위로 정의될 수 있으며 이는 node A와 연관된 유역이라고 할 수 있다.

만약 하천 네트워크가 구성되고 이후 해당유역에 대한 정보(feature)가 상호 연결되어 구축된다면, 이들 정보에 추가되는 모든 정보는 하천 네트워크의 위상관계를 이용하여 각각의 feature 사이의 위상관계를 설정하는데 이용될 수 있다. 즉 그림 5에서 feature 1은 catchment 1에 추가된 정보이므로 이는 reach 1과 연결되고 feature 2는 catchment 5에 추가된 정보이므로 이는 reach 5와 연결된다. 따라서 하천 네트워크의 위상관계로 볼 때 reach 5는 reach 1의 상류에 있으므로 feature 2는 feature 1 보다 상류에 존재하는 시설물 정보임을 알아낼 수 있게 된다.

이와 같은 원리로 수자원과 관련된 정보가 구축되면, 하천 네트워크 기반의 유역관리시스템을 구축하여 기존의 시스템과는 달리 상호 유기적이며, 동적으로 관리될 수 있을 것이다. 이러한 기능을 제공하는 공간정보를 본 연구에서는 수자원 공간 DB를 형성하기 위한 프레임워크 공간정보로 보았으며, 이는 하천 네트워크상의 node, reach, 그리고 이와 연결되어 구축되는 catchment 및 유역으로 구성된다.

프레임워크 공간 DB의 구축

HyGIS는 형성된 벡터정보를 이용하여 프레임워크 공간 DB를 구축하기 위해 'Network

tools'를 제공하고 있다. 'Network tools'에서는 벡터하천망의 상류에서 하류방향으로 자동으로 방향성을 부여하는 기능을 포함하여, 벡터하천망을 이용하여 하천 네트워크를 생성하는 기능을 가지고 있다. 그림 6은 하천 네트워크 기반의 유역관리시스템에서 프레임워크 공간 DB들이 내부적으로 어떻게 연관성을 유지할 수 있는가를 나타낸 것이다. 시스템 내에 존재하는 모든 공간객체는 고유한 HydroID를 속성으로 가지고 있다. 벡터하천망으로부터 생성된 하천 네트워크는 Network_Arc와 Network_Node로 구성되며 위상관계를 가지게 된다. 이후 유역의 공간객체와 하천 네트워크의 연관성을 부여하기 위하여 각 공간객체에는 Ref_HydroID가 부여된다. Ref_HydroID는 각 공간객체가 참조하고 있는 하천 네트워크 상의 Network_Node 혹은 Network_Arc의 HydroID의 값을 저장함으로써 하천 네트워크가 가지고 있는 위상관계와의 연관성을 가지게 된다.

그림 7~10은 HyGIS에서 프레임워크 공간 DB를 생성하는 절차를 나타낸 것이다. 그림 7은 하천 네트워크를 생성하고 하천 네트워크와 유역의 공간객체를 연계시키기 위한 'Network tools'를 나타낸 것이며, 그림 8은 벡터하천망을 이용해서 하천 네트워크를 생성하기 위한 대화상자를 나타낸 것이다. 그림 9는 하천 네트워크에 HydroID를 부여하기 위한 대화상자를 나타낸 것이고, 그림 10은 catchment 및 유역 그리고 유역내의 시설물의 HydroID를 생성하고 하천 네트워크와 연계시키기 위한 Ref_HydroID를 부여하기 위한 대화상자이다. 그림 11~14는 각 단계에서 생성된 공간정보를 그림으로 나타낸 것이며, 각 공간객체가 가지고 있는 하천 네트워크와의 상관관계는 각 객체의 속성으로 GEOMania 공간데이터베이스인 GSS에 저장된다. GSS에 저장된 공간데이터베이스는 HyGIS 상에서 테이블 혹은 정보창을 통해서 사용자에게 제공된다.

FIGURE 6. The relationship of framework spatial DB

FIGURE 7. Network tools

FIGURE 8. Creating river network

FIGURE 9. Creating network HydroID

FIGURE 10. Creating HydroID and Ref_HydroID
about features

FIGURE 11. River from HyGIS

FIGURE 12. River network from HyGIS

FIGURE 13. Catchments connected with network

결론

본 연구에서는 하천 네트워크를 기반으로 하는 유역관리시스템을 구축하고자 할 때 필요한 프레임워크 공간 DB의 구축 과정에 대하여 검토되었다. 일반적으로 수자원 정보는 유역단위로 구축되고 관리되어진다. 이러한 경우 지형을 이용하여 생성되는 정보는 DEM으로부터 형성되며 이를 공간 DB화하기 위해서는 공간정보를 벡터화 하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 순수 국내기술로 개발된 수자원 공간자료 생성 및 수자원 시스템 개발 모듈인 HyGIS (Hydrological Geographic Information System)를 이용하여 경안천 유역의 DEM으로부터 수문학적 지형인자 및 공간자료를 추출하였으며, 추출된 자료는 프레임워크 공간 DB를 구축하는 기본 데이터로 이용하였다. DEM으로부터 추출된 하천망을 이용하여 하천 네트워크를 생성하였으며, catchment 및 유역 그리고 유출구로 설정될 수 있는 수위관측소와 같은 유역내의 주요 시설물들을 하천 네트워크에 연계시킴으로써 유역내의 공간객체들의 상·하류 관계를 설정할 수 있었다. 하천 네트워크와의 연계를 위하여 각 객체의 HydroID와 Ref_HydroID를 이용하였으며, 이를 통해서 하천 네트워크를 기반으로 하는 시스템에서 프레임워크 공간 DB가 효과적

FIGURE 14. Watershed and outlet connected with network

으로 구축될 수 있음을 확인하였다.

한편 Arc Hydro Tools v1.0을 벤치마킹하여 개발한 HyGIS는 지형인자 추출 값에 대한 실증적 검증과 시스템 안정화 및 실용화 등을 위한 추가적인 노력이 필요할 것으로 사료되나, 향후 지속적인 연구 개발을 통하여 우수한 성능을 가지는 시스템으로 발전할 수 있을 것으로 기대한다. **HyGIS**

참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사. 2001. 하천관리지리정보시스템(GIS) 구축 보고서(1차년도 사업). 173-230쪽.
- 김경탁, 김주훈, 최윤석. 2002. 수자원지리정보 데이터모델. 2002년도 대한토목학회 학술발표회 논문집. 341-344쪽.
- 김경탁, 김주훈, 최윤석, 박동선. 2003. Network 컴포넌트 기반의 수자원지리정보시스템에 관한 연구. 한국지리정보학회지 6(4):122-134.
- 김경탁, 최윤석, 김주훈. 2004. 수문지형분석을 위한 DEM에서의 sink 처리에 관한 연구. 2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집 CD-ROM. 포스터 발표. 2분과(A-48).

- 김경탁, 최윤석, 김주훈. 2004. 유역단위 framework 공간데이터베이스의 구축에 대한 고찰. 2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집 CD-ROM. 포스터 발표. 2분과(P-38).
- 김경탁, 최윤석, 박동선. 2004. HyGIS를 이용한 유역특성인자 추출에 대한 검토. 2004년 한국수자원학회 학술발표회 논문집 CD-ROM. 포스터 발표. 2분과(P-48).
- 김계현, 김한국, 양수명. 2003. 하천주제도의 효율적 구축을 위한 데이터모델 설계에 관한 연구. 한국지형정보학회, 개방형지리정보시스템학회, 한국GIS학회, 대한원격탐사학회 2003 공동 춘계학술대회 논문집. 623-628쪽.
- Collins, S.H. 1975. Terrain parameters directly from a digital terrain model. Canadian Surveyor 29(5):507-518.
- ESRI. 2002. Arc Hydro Tools v1.0 Release 1 : Overview, Tutorial, HydroID.
- Garbrecht, J. and L.W. Martz. 1992. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. Computers & Geosciences 18(6):747-761.
- Garbrecht, J. and L.W. Martz. 1997. The assignment of drainage direction over flat surface in raster digital elevation models., Journal of Hydrology 193:204-213.
- Garbrecht, J. and L.W. Martz. 1998. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. Hydrological Processes 12(6):843-855.
- Garbrecht, J. and L.W. Martz. 1999. TOPAZ: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation, and subcatchment parameterization, overview. USDA Agriculture Research Service GRL 99(1):7-16.
- Hellweger, F. 1997. AGREE - DEM Surface Reconditioning System. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>.
- Jenson, S.K. and J.O. Dominique. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(11): 1593-1600.
- Maidment, D.R. 2002. Arc Hydro: GIS for Water Resources. ESRI, USA. pp.33-139.
- Marks, D., J. Dozier and J. Frew. 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. GeoProcessing 2:299-311.
- Martz, L.W. and E.D. Jong. 1988. CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models. Computers & Geosciences 14(5): 627-640.
- O'Callaghan, J.F. and D.M. Mark. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 28:324-344. **IEEE**