

GIS를 이용한 수문학적 지형인자 산정에 대한 비교검토

Comparison and Examination of the Calculating Hydrological Geographic Parameters Using GIS

김 경 탁* / 최 윤 석** / 이 효 정***

Kim, Kyung Tak / Choi, Yun Seok / Lee, Hyo Jung

Abstract

Recently, GIS softwares such as WMS, ArcHydro, and HyGIS which can calculate hydrological geographic parameters are popularized. These softwares have the functions to calculate various geographic parameters which are used in water resources from DEM (Digital Elevation Model). In this study, hydrological geographic parameters calculated by WMS and ArcHydro are compared and examined with them from HyGIS to evaluate the applicability of the parameters from HyGIS. Bochungcheon (Riv.), Wicheon (Riv.), Pyungchanggang (Riv.), Gyungancheon (Riv.), Naerincheon (Riv.), and Imjingang (Riv.) watersheds are selected for this study, and the shape of watershed, watershed area, watershed slope, the average slope of watershed, main stream length, main stream slope, maximum flow distance, and the slope of maximum flow distance are calculated to compare and examine the characteristics. Study results show that the average relative error of 7 geographic parameters from all the watersheds is 4.77 %, and all the watershed boundaries are very similar. So, all the geographic parameters calculated by each software show very similar value, and the geographic parameters calculated by HyGIS can be applied to water resources with WMS and ArcHydro which have been generally used.

Keywords : HyGIS, WMS, ArcHydro, geographic parameter

요 지

최근 들어 WMS와 ArcHydro 및 HyGIS와 같이 수문학적 지형인자를 생성할 수 있는 GIS 프로그램이 널리 보급되고 있다. 이러한 프로그램에서는 격자형 고도자료인 DEM (Digital Elevation Model)을 이용하여 수자원에서 필요로 하는 다양한 지형인자를 계산할 수 있는 기능을 제공하고 있다. 본 연구에서는 HyGIS로부터 산정된 수문학적 지형인자의 적용성을 평가하기 위해서 국내에서 주로 사용되고 있는 WMS와 ArcHydro를 이용하여 수문학적 지형인자를 산정하고 그 결과를 HyGIS의 계산 결과와 비교·검토하였다. 연구 대상유역으로는 보청천, 위천, 평창강, 경안

* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원

Corresponding Author, Research Fellow, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 411-712, Korea
(e-mail: ktkim1@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 411-712, Korea

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

Researcher, Water Resources Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do 411-712, Korea

천, 내린천, 임진강 유역을 선정하였으며, 각 유역에 대해서 추출된 유역의 형태와 함께 유역 면적, 유역 경사, 유역 평균고도, 최대유하거리, 최대유하거리 경사, 주하천 길이, 주하천 경사에 대한 산정결과를 비교검토 하였다. 연구결과 전체 유역에 대한 7개의 지형인자의 평균 상대오차는 4.77 %를 나타내었으며, 각 유역에 대해서 추출된 유역 경계 또한 매우 유사하게 생성되었다. 이와 같이 각각의 프로그램은 매우 유사한 지형인자 계산 결과를 나타내고 있으며, 따라서 HyGIS에서 계산된 지형인자는 기존에 국내에서 활용되어 왔던 WMS 및 ArcHydro와 함께 수자원 분야에서 충분히 적용 가능한 것으로 나타났다.

핵심용어 : HyGIS, WMS, ArcHydro, 지형인자

1. 서론

수자원에서 GIS는 수문분석 및 유역관리에 다양하게 이용되고 있으며, 특히 수문순환을 해석하기 위한 모형에서는 수문학적 지형인자의 산정과 입출력 자료의 관리 및 모의결과의 분석에 효과적으로 활용될 수 있다. 이때 수문학적 지형인자의 산정은 주로 유역의 고도자료를 분석해서 계산할 수 있다. 최근에는 WMS와 ArcHydro 및 HyGIS와 같이 수문학적 지형인자를 생성할 수 있는 GIS 프로그램이 널리 보급되고 있으며, 이러한 프로그램에서는 격자형 고도자료인 DEM (Digital Elevation Model)을 이용하여 수자원에서 필요로 하는 다양한 지형인자를 계산할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

ArcHydro는 ESRI (The Environmental Systems Research Institute)의 ArcGIS 환경에서 구동되는 extension 모듈로 ArcGIS Hydro 데이터 모델에서 필요로 하는 유역의 framework 공간데이터를 생성할 수 있다 (Maidment, 2002). ESRI의 ArcView, ArcInfo 및 ArcGIS와 같은 프로그램은 세계적으로 널리 이용되고 있는 범용 GIS 도구로서 1990년대 이후 국내에서 꾸준히 활용되고 있으며, 수자원 관련 분석을 위해 필요한 다양한 수문 지형정보를 생성할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

WMS (Watershed Modeling System)는 미 육군공병단(U.S. Army Corps of Engineers)의 지원하에 Brigham Young 대학의 Engineering Computer Graphics Laboratory (ECGL)에서 1990년대 초에 개발된 이래 현재까지 지속적으로 개발이 진행되고 있으며, GIS를 활용한 수리 및 수문 해석을 위한 포괄적인 그래픽 사용자 환경을 제공하고 있다. WMS에서는 유역분할 및 지형인자 산정을 위해서 DEM과 TIN (Triangulated Irregular Network) 형식의 자료를 이용할 수 있으며, 이때 DEM을 이용한 흐름정보 생성 및 유역 지형정보 생성을 위해서 TOPAZ(TOPographical PAramerization)(Garbrecht and Martz, 2000)를 이용하고 있다. WMS는 김정택(1998)에 의해 국내에 소개된

이래 유역의 수리·수문 해석을 위해 다양하게 이용되고 있으며, 김정택(1998)은 TIN 해석과 Grid 해석, 소유역 분할개수에 따른 유출해석 결과를 비교분석하고, 정밀도양도와 개략도양도 및 토지이용속성의 분류 방법에 따른 유출특성을 분석한 바 있다. 최윤석 등(2000)은 HEC-1 모형의 단위도 적용을 위한 매개변수 추정을 위해서 WMS를 적용하고, DEM 격자크기에 따른 유출해석 결과를 분석한 바 있으며, 이종태 등(2006)은 WMS와 ArcView를 이용해서 DEM으로부터 유역과 하천망을 추출하고, 도시하천에서의 홍수범람도를 작성하기 위한 과정 및 특징을 비교분석 한 바 있다. 이와 같이 WMS는 수문 및 수리모형에서 필요로 하는 매개변수를 산정하거나 지형정보를 생성하는데 효과적으로 활용 가능한 것으로 알려져 있다(오경두 등, 2002; 김정택 등, 2006).

HyGIS (Hydro Geographic Information System)는 수자원의 지속적확보기술개발 사업단의 지원하에 한국건설기술연구원에서 2004년부터 개발이 진행되고 있는 수자원 지리정보시스템이다(한국건설기술연구원, 2007). HyGIS에서는 다양한 수문 및 수리 모형을 GIS 기반에서 구동할 수 있는 통합모의환경을 제공하고 있으며, DEM을 이용하여 수문지형정보를 생성하고 각 모형에서 필요로 하는 매개변수를 자동으로 계산할 수 있는 기능을 제공한다. 김정택 등(2004)은 HyGIS-TOPMODEL을 이용해서 TOPMODEL의 지형지수를 산정하고, 경안천 유역의 유출해석을 수행한바 있으며, 이재남과 노재경(2009)은 용담댐 상류의 천천 유역을 대상으로 HyGIS-TOPMODEL을 적용한 바 있다. 김정택과 최윤석(2006)은 SWAT 모형의 입력자료 생성을 위해 HyGIS를 이용해서 유역의 지형인자를 계산하였으며, 한건연 등(2006)은 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형의 구동을 위해 HyGIS-HMS 및 HyGIS-RAS를 이용하고 그 적용성을 평가하였다.

이와 같이 수자원 분야에서의 지형공간자료의 생성 및 모형의 매개변수 산정에 다양하게 활용되고 있는 ArcHydro, WMS 및 HyGIS는 지형분석을 위해 DEM

을 이용하고 있다. 그러나 각 프로그램에서 적용하고 있는 DEM의 보정기법 및 프로세스상의 특징에 따라서 계산된 지형인자가 상이한 결과를 나타낼 수 있다. 김경탁 등(2004)은 경안천 유역에 대해서 ArcHydro와 HyGIS 및 WMS를 이용해서 유역의 수문학적 지형인자를 산정할 때 HyGIS와 ArcHydro에 대해서는 Agree Burn 기법이 적용된 DEM을 이용하였으며, WMS에 대해서는 Agree Burn 기법을 적용하지 않은 DEM을 이용한 바 있다. 김경탁 등(2004)에서는 하천에 대한 지형인자에서 HyGIS와 ArcHydro가 WMS에 비해서 유사한 값을 나타내었으며, 유역 면적과 유역 평균고도에서는 모든 프로그램에서 유사한 값이 계산됨을 제시함으로써 Agree Burn 기법에 의한 WMS, ArcHydro 및 HyGIS의 지형인자 산정결과를 분석한 바 있다. 또한 김경탁과 최윤석(2005)은 ArcInfo와 HyGIS의 DEM 보정기법의 차이점을 기술하고, 이에 따라서 추출되는 하천망을 수치지도의 하천망과 비교하였으며, 하천의 형태와 하천차수별 지형특성에서 HyGIS를 이용해서 추출한 하천망이 수치지도와 더 유사한 값을 나타내고 있다는 것을 기술하였다.

본 연구에서는 GIS를 이용한 지형정보 생성시 기존에 국내에서 주로 활용되고 있는 WMS와 ArcGIS의 ArcHydro 및 HyGIS를 이용하여 DEM으로부터 지형인자를 산정하고 각각의 프로그램으로부터 계산된 결과를 DEM 보정 기법과 함께 비교검토 함으로써 그 특징을 분석하고자 한다. 또한 이를 통해서 최근 국내에서 개발되어 보급되고 있는 HyGIS로부터 계산된 수문학적 지형인자의 적용성을 평가하고자 한다.

2. DEM 전처리 방법

지표수 해석을 위한 수문학에서의 지형정보는 주로 유역과 하천의 지형적 특성을 의미하며, 유역에서의 지표면 흐름과 하천 흐름을 해석하기 위한 물리적, 통계적 혹은 경험적 방정식의 매개변수로 활용된다. 이와 같은 지형정보는 수치지형도의 등고자료와 원격탐사에 의한 지표면 고도자료 등으로부터 생성된 DEM(Digital Elevation Model)과 이를 이용해서 지형인자를 추출할 수 있는 GIS 도구를 활용할 경우 비교적 손쉽게 획득할 수 있으며, 이때 원시 DEM은 흐름방향을 결정할 수 없는 격자인 sink와 flat area와 같은 오류를 다수 포함할 수 있다. DEM을 이용해서 수문학적 지형정보를 생성하기 위해서는 원시 DEM에 있는 sink와 flat area와 같은 오류를 보정하여야 하는데, 이러한 오류보정 방법에 따라서 각각 다른 흐름정보가 생성되며,

이에 따라 수문학적 지형인자의 계산결과가 다르게 나타나게 된다. 그러므로 DEM의 sink와 flat area의 보정 과정은 DEM을 이용한 지형정보 생성시 가장 핵심적인 과정이라고 할 수 있다.

2.1 ArcHydro의 DEM 보정

ArcHydro는 ArcGIS 환경에서 구동되는 extension 모듈로 ArcGIS Hydro 데이터 모델에서 필요로 하는 유역의 framework 공간데이터를 생성할 수 있으며, ArcGIS에서 제공하는 DEM 보정기능을 이용한 DEM 전처리 기능을 포함하고 있다. ArcGIS에서는 sink 처리를 위해서 Jenson and Domingue (1988) 및 Martz and Jong (1988)에 의해 제안된 filling 알고리즘을 적용하고 있으며, flat area 처리에는 Jenson and Domingue (1988)에 의해 제안된 알고리즘을 이용하고 있다. Filling 알고리즘은 sink로 유입되는 영역을 둘러싸고 있는 셀 중 가장 낮은 셀의 고도를 이용하여 sink 영역을 채우는 방법이며, flat area 보정을 위한 Jenson and Domingue (1988) 알고리즘에서는 flat area를 둘러싸고 있는 DEM의 흐름방향을 참고하여 flat area 내부의 흐름방향을 설정하고 있다. 이 방법은 모든 flat area에 대하여 효과적으로 흐름방향을 부여할 수 있으나, 하천의 종류와 하류에 분포하고 있는 넓은 영역의 flat area에 대해서는 평행한 하천망이 추출되는 단점이 있다 (Tribe, 1992).

2.2 WMS의 DEM 보정

WMS에서는 DEM을 이용한 흐름정보 생성 및 지형인자의 계산을 위해서 TOPAZ (Topographical PArameriZation)를 이용하고 있다. TOPAZ에서는 DEM에 존재하는 sink를 제거하기 위해서 breaching 알고리즘이 적용된 filling 알고리즘을 이용하고 있다. 이 방법에서는 실제보다 고도가 낮게 부여된 것으로 평가되는 sink(Fig. 1(a))에 대해서는 기존의 filling 방법(Fig. 2(a))을 이용해서 sink 기여영역의 고도를 높여 주며, sink의 하류부가 실제보다 높은 고도가 부여됨으로 인하여 발생하는 sink(Fig. 1(b))는 breaching 알고리즘(Fig. 2(b))을 이용해서 하류부의 고도를 낮게 함으로써 sink를 보정한다.

TOPAZ에서는 flat area의 보정을 위해서 combined gradient method (Garbrecht and Martz, 1997)를 적용하고 있다. Combined gradient 방법에서는 기존의 relief 방법(Fig. 3)과 동일한 "gradient towards lower terrain" 과정을 이용해서 flat area로 판명된 영역을 둘러싸고 있는 외부 셀의 고도 중 flat area의 고도보다

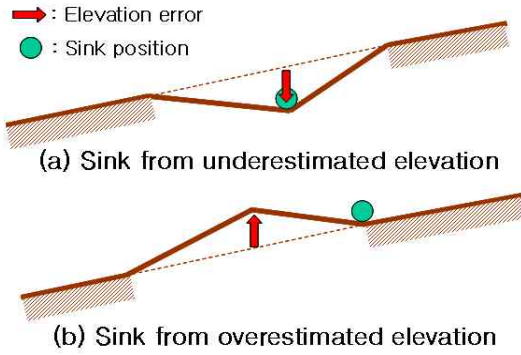


Fig. 1. Schematic Profiles of Two Types of Sink (Martz and Garbrecht, 1998)

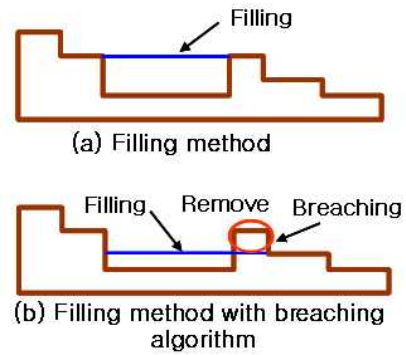


Fig. 2. Filling and breaching Algorithm

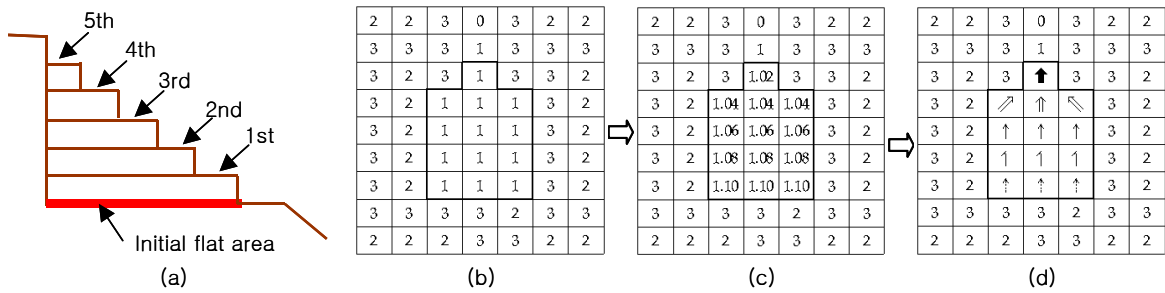


Fig. 3. Gradient Towards Lower Terrain Process (Martz and Garbrecht, 1998)

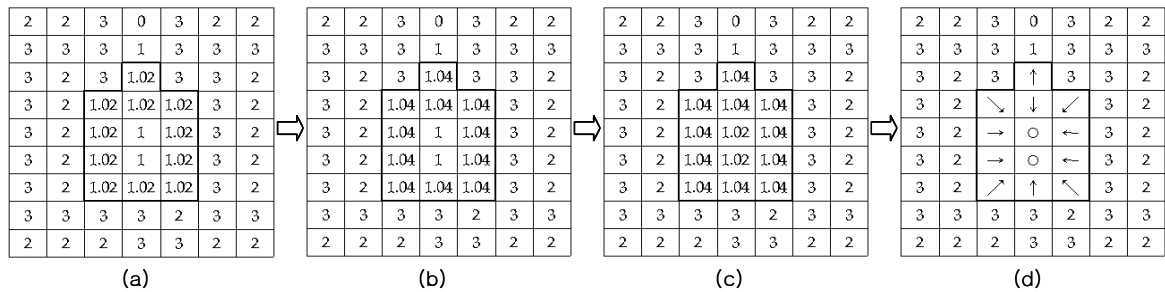


Fig. 4. Gradient Away from Higher Terrain Process (Martz and Garbrecht, 1998)

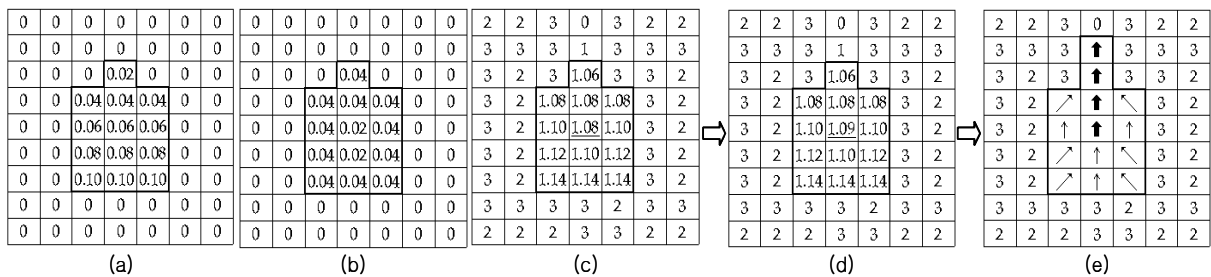


Fig. 5. Combined Gradient Process (Martz and Garbrecht, 1998)

낮은 값을 가지는 셀에서 멀어지는 방향으로 순차적으로 고도를 증가시키고 있으며, 이로 인하여 보정된 flat area의 경사는 낮은 셀이 있는 방향으로 형성된다. 또한 “Gradient away from higher terrain” 과정은 높은 지형으로부터 멀어지는 경사를 부여하기 위하여 적용되는 과정(Fig. 4)이며, combined gradient

방법에서는 이러한 두 과정으로부터 생성된 결과를 합성(Fig. 5)하여 최종적으로 flat area 보정결과로 제시하고 있다. Combined gradient 방법은 넓은 평지에서 주변지형의 기복의 영향이 반영된 형태로 flat area를 처리할 수 있는 특징이 있다(김경탁과 최윤석, 2005).

2.3 HyGIS의 DEM 보정

HyGIS는 DEM 보정을 위하여 TOPAZ와 동일한 알고리즘을 적용하고 있다. 즉, sink 처리를 위해서는 breaching 알고리즘이 포함된 filling 알고리즘을 적용하고 있으며, flat area의 보정을 위해서는 combined gradient 알고리즘을 적용한다(한국건설기술연구원, 2007).

3. 대상 유역의 선정 및 연구 방법

3.1 대상 유역의 선정

본 연구에서는 WMS, ArcHydro, HyGIS를 이용해서 지형인자를 계산하고 그 결과를 비교하기 위한 연구 대상유역으로 국내에서 IHP (International Hydrological Program) 사업을 통해 많은 연구가 진행된 보청천, 위

천 및 평창강과, 도시유역과 농업지역 및 산림지역이 복합적으로 분포된 경안천 유역을 선정하였으며, 각 유역의 DEM을 1/25,000 수치지도의 등고자료를 이용해서 30 m × 30 m 크기로 생성하였다. 또한 격자 크기의 영향을 검토하기 위해서 내린천 유역과 임진강 유역을 선정하였으며, 각각의 DEM은 250 m × 250 m, 1000 m × 1000 m의 크기로 생성하였다. 이때 내린천 유역의 DEM은 1/25,000 수치지도의 등고자료를 이용해서 생성하였으며, 임진강 유역은 90 m × 90 m 크기의 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, <http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>) DEM을 1000 m × 1000 m로 resampling하여 적용하였다(한국건설기술연구원, 2008). Table 1은 본 연구에서의 대상유역별로 적용된 자료와 기준에 알려진 유역 면적을 나타낸 것이며, Fig. 6은 각 유역의 위치와 최하류 지점을 기준으로 분할된 유역의 형태를 나타낸 것이다.

Table 1. Study Watershed and DEM

Watershed	Outlet (stage station)	Area (MLTM, 2007; MOC, 1983) [km ²]	DEM	
			Grid size	Data source
Bochungcheon (Riv.)	Sangyegyo	496	30 m × 30 m	Elevation data from 1/25,000 digital map
Pyungchanggang (Riv.)	Bangrimgyo	520	30 m × 30 m	
Wicheon (Riv.)	Museong	472	30 m × 30 m	
Gyungancheon (Riv.)	Gyeongan	262	30 m × 30 m	
Naerincheon (Riv.)	Naerincheon	1,039	250 m × 250 m	
Imjingang (Riv.)	Jeokseong	6,784	1000 m × 1000 m	90 m × 90 m SRTM

※ MLTM:Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs
MOC:Ministry of Construction

Table 2. Geographic Parameters Calculated from This Study

Geographic para.	Remark	Units	WMS	HyGIS	ArcHydro
Watershed area	The area of a watershed.	km ²	○	○	○
Watershed slope	Average slope of all grids in a watershed.	m/m	○	○	○
Average elevation of watershed	Average elevation of all grids in a watershed.	m	○	○	○
Main stream length	The length of longest stream within a watershed.	m	○	○	○
Main stream slope	The slope of "Main stream length."	m/m	○	○	-
Maximum flow distance	The maximum flow distance within a watershed including both overland and channel flow.	m	○	○	○
Maximum flow distance slope	The slope of "Maximum flow distance."	m/m	○	○	○

3.2 연구 방법

본 연구에서는 각각의 유역에 대해서 WMS, ArcHydro 및 HyGIS를 이용하여 DEM을 보정하고 유역 면적, 유역 경사, 유역 평균고도, 최대유하거리, 최대유하거리경사, 주하천 길이 및 주하천 경사의 7개 항목에 대한 지형인자를 산정한 후 각 프로그램의 계산 결과를 비교검토 하였다. 또한 각 프로그램으로부터 추출된 유역경계를 중첩하여 유역경계의 형태적 차이점을 비교하였다. Table 2는 본 연구에서 검토대상으로 하는 지형인자를 나타낸 것이다.

Table 2에서 WMS를 이용한 지형인자 계산에서는 WMS의 Grid 모듈을 이용하였다. ArcHydro의 경우 주하천 길이와 주하천 경사를 자동으로 계산하지 않고 있다. 따라서 ArcHydro에서의 주하천 길이는 각 유역의 하천망 중 가장 긴 경로 상에 있는 하천선을 추출하고 추출된 하천선의 길이를 합하여 계산하였으며, 주하천 경사는 WMS 및 HyGIS와의 비교대상에서 제외하였다.

4. 연구결과

본 연구에서 선정된 6개의 유역에 대해서 WMS, ArcHydro 및 HyGIS를 이용해서 추출된 유역경계의 형태와 지형인자의 항목별 계산결과를 비교해 보고자하며, 지형인자의 산정결과는 Tables 3~9와 같다. Tables 3~9에서 W는 WMS를 이용해서 산정된 결과를 나타낸 것이며, H와 A는 각각 HyGIS와 ArcHydro를 이용한 지형인자 산정결과를 나타낸 것이다.

4.1 유역의 형태

본 연구에서는 WMS, ArcHydro 및 HyGIS를 이용해서 6개 대상유역에 대한 유역을 추출하고, 각 프로그램별로 추출된 유역의 형태를 비교하고자 한다. Fig. 6은 대상유역의 위치 및 Table 1에서의 유출구를 기준으로 추출한 유역경계를 중첩하여 나타낸 것이다. Fig. 6에서 적색으로 표시된 것은 HyGIS를 이용해서 추출한 유역경계를 나타낸 것이고, 녹색과 황색은 각각 WMS 및 ArcHydro를 이용해서 추출한 유역경계를 나타낸 것이다. 레이어의 중첩 순서는 적색으로 표시된 HyGIS의 추출결과를 맨 위로하고, 그 밑은 WMS 및 ArcHydro에서 추출된 유역경계의 순으로 설정하였으며, 따라서 Fig. 6에서 각각의 유역경계가 일치되는 경우에는 적색의 유역경계만 표시되게 된다.

Fig. 6에서는 각 유역의 유출구 부근에서 WMS와 HyGIS는 거의 일치되는 결과를 보이고 있으나, 경안천, 보청천 및 위천의 경우 황색으로 표시된 ArcHydro의

결과가 다른 두 프로그램과 일부 다르게 생성되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 유출구 지점의 부근에 넓게 분포하고 있는 평지를 보정 할 때 WMS와 HyGIS가 동일한 알고리즘을 적용하고 있기 때문에 이로 인해서 추출되는 유역경계 또한 유사한 결과를 나타내고 있는 것이라고 할 수 있다.

또한 Fig. 6에서 임진강과 경안천의 유역경계에서 점선으로 표시된 원에 해당하는 영역은 상류부에서 유역경계의 차이가 발생하는 부분으로 지형의 기복의 영향을 크게 받는 지역이다. 본 연구에서는 이러한 부분의 발생 원인을 검토하고자 HyGIS와 ArcHydro를 이용해서 추출된 유역경계를 KML (Keyhole Markup Language) 파일로 전환한 후 이를 구글어스에서 위성영상과 중첩하였으며, Fig. 7은 이와 같이 설정된 구글어스에서 임진강과 경안천에서의 점선 원으로 표시된 영역을 확대한 것이다. Fig. 7에서 적색 선과 황색 선은 각각 HyGIS 및 ArcHydro를 이용해서 추출한 유역경계를 나타내고 있으며, 과란색 화살표는 위성영상을 통해서 판단되는 유역경계 차이 영역에서의 흐름방향을 나타낸 것이다.

Fig. 7의 구글어스 영상에서 초록색으로 표시된 부분은 산림을 나타내고 있으며, 산림에 비해서 밝은 색으로 표시되는 수지형 부분은 주거지역, 도로 혹은 계곡의 저지대를 나타내고 있다. Fig. 7(a)의 임진강 유역에 대해 검토한 결과 “A” 영역은 임진강 유역 내부에 포함되고, “B” 영역은 유역에서 제외되는 것이 적합한 것으로 나타났다. 또한 Fig. 7(b)의 경안천 유역에서는 “C” 영역이 유역 내부로 포함되는 것이 적합한 것으로 나타났다. 이는 “A” 영역은 ArcHydro의 유역추출 결과가 적합하고, “B”와 “C” 영역은 HyGIS 및 WMS로부터 추출된 유역경계가 적합하다는 것을 의미하고 있다. 이와 같은 결과는 유역의 상류부에 있는 국부적인 분지 혹은 산 능선을 가로지르는 도로로 인해서 낮은 고도의 영향이 반영된 DEM의 보정과정에서 ArcHydro가 WMS 및 HyGIS와는 다른 알고리즘을 적용하기 때문에 발생하는 현상인 것으로 판단된다.

4.2 유역 면적

유역 면적은 대부분의 수문모형에서 사용되고 있는 가장 기본적인 유역의 지형인자이다. 유역 면적은 DEM으로부터 계산된 유역경계 내부에 포함된 격자 면적의 합에 의해서 계산되며, 유역에서 발생하는 강우, 침투, 지표면 유출 및 기저유출과 같은 수문순환의 계산 영역과 양을 계산하기 위한 범위를 설정하게 된다. Table 3은 각 프로그램을 이용한 유역 면적의 산정결과를 나타낸 것이다.

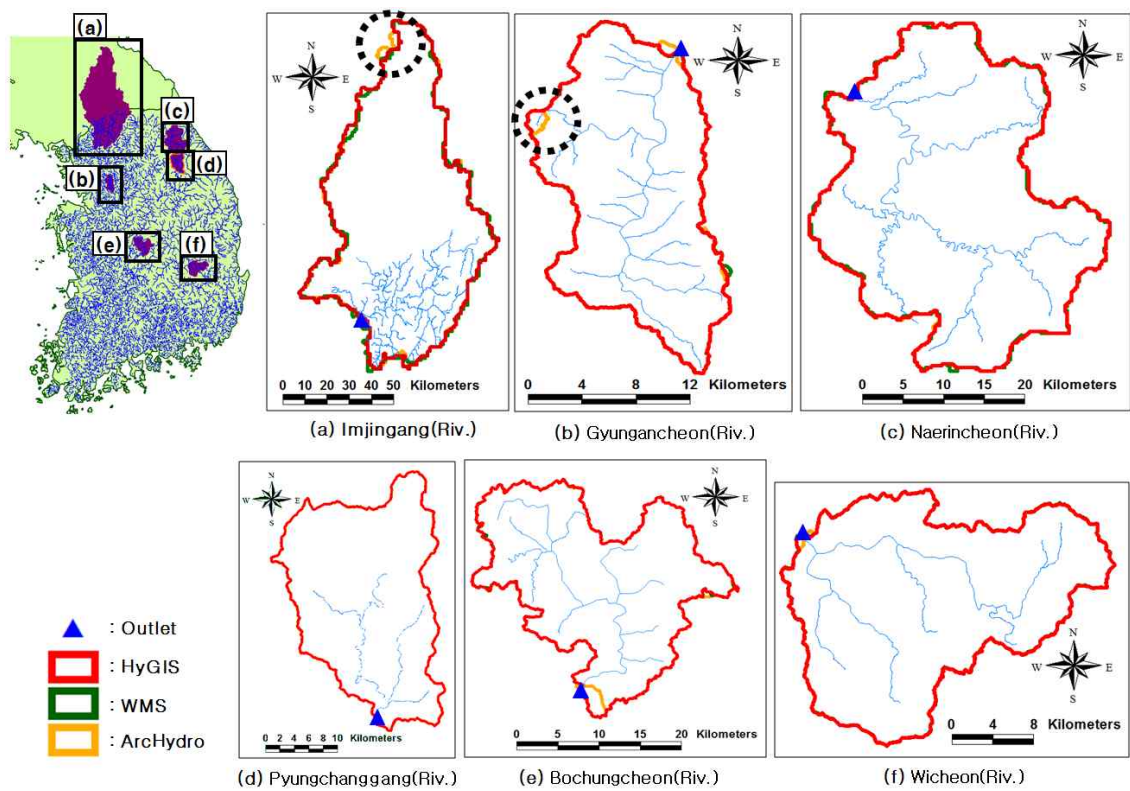


Fig. 6. Positions and Boundaries of Study Areas

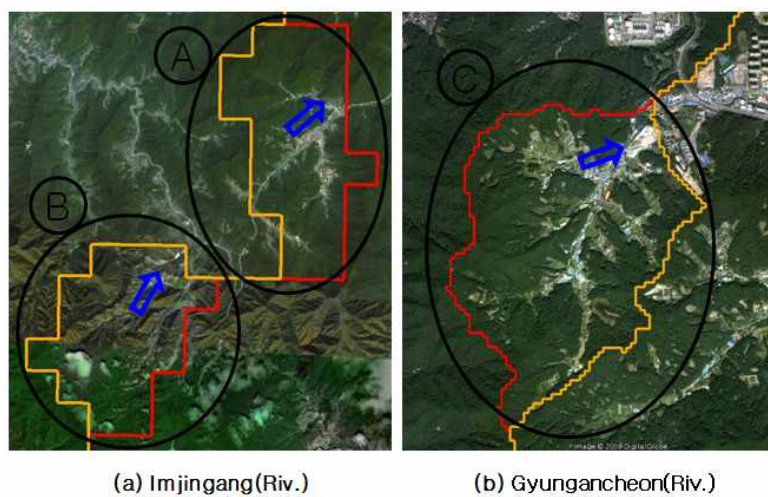


Fig. 7. Overlap Watershed Boundaries with Google Earth Image

Table 3. Watershed Area [km²]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	494	494	486	0.0	1.5	1.5
Pyungchanggang (Riv.)	472	472	471	0.0	0.2	0.2
Wicheon (Riv.)	530	530	530	0.0	0.0	0.0
Gyungancheon (Riv.)	261	261	258	0.1	1.4	1.3
Naerincheon (Riv.)	1,031	1,035	1,035	0.4	0.4	0.1
Imjingang (Riv.)	7,229	7,245	7,278	0.2	0.7	0.5
Average				0.13	0.70	0.58
				0.47		

Table 3에서는 WMS와 HyGIS로부터 계산된 유역 면적이 평균 0.13 %의 상대오차를 보이고 있으며, ArcHydro와 WMS 및 ArcHydro와 HyGIS는 각각 0.70 %와 0.58 %로 상대적으로 큰 오차를 보이고 있다. 이와 같은 유역 면적의 차이는 Fig. 6에서와 같이 WMS와 HyGIS로부터 추출된 유역경계가 ArcHydro에 비해서 좀 더 유사한 형태를 나타내기 때문이나, 각각의 상대오차는 모두 1 % 미만으로서 모든 프로그램에서 매우 유사한 유역 면적 계산결과를 제시한다고 할 수 있을 것이다.

4.3 유역 경사

DEM 격자에서의 경사는 3×3의 격자 영역에서 가운데 셀과 주변 셀의 고도의 최대변화율로 정의될 수 있으며, 이때 각 격자의 경사는 gradient 방법으로 계산된다(ESRI). Gradient 방법에서는 3×3의 격자 영역에서 가운데 셀을 둘러싸고 있는 주변 셀에 대해 고도의 가중치를 부여하고 각 격자간의 거리를 이용해서 x 방향과 y 방향의 경사를 계산한 후 각각의 제곱의 합을 제곱근하여 최종적으로 가운데 셀의 경사를 계산한다. 유역의 경사는 유역내 포함된 각 격자의 gradient 경사

를 평균하여 계산되며, 따라서 동일한 DEM을 적용할 경우 DEM의 보정기법과 유역의 영역에 영향을 받게 된다.

Table 4는 각 프로그램으로부터 계산된 경사를 나타낸 것이다. Table 4에서의 유역 경사는 WMS와 HyGIS의 산정결과가 평균 4.41 %의 상대오차를 보이고 있으며, ArcHydro와 WMS의 상대오차의 평균인 4.90 %보다 작은 값을 보이고 있다. 이와 같은 계산결과는 Table 3의 유역 면적 산정결과에서 WMS와 HyGIS는 ArcHydro에 비해서 좀 더 작은 상대오차를 보이고 있고, WMS와 HyGIS가 동일한 DEM 보정기법을 사용하고 있는 영향이 반영된 것이라고 할 수 있다. 그러나 Table 4에서는 전체적으로 평균 3.25 %의 상대오차를 나타내고 있는 것을 볼 때 각 프로그램에서 모두 유사한 유역 경사를 제시하고 있는 것으로 판단된다.

4.4 유역 평균고도

DEM의 전처리 과정에서는 원시 DEM의 고도를 변화시키면서 sink와 flat area와 같은 오류를 보정한다. 따라서 유역의 평균고도는 각 프로그램 별로 다르게 산정될 수 있으며, 또한 추출된 유역 경계의 범위에 의해

Table 4. Watershed Slope [m/m]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	0.2814	0.2843	0.2852	1.0	1.3	0.3
Pyungchanggang (Riv.)	0.3079	0.3184	0.3189	3.4	3.6	0.2
Wicheon (Riv.)	0.3845	0.3858	0.3859	0.3	0.4	0.0
Gyungancheon (Riv.)	0.2207	0.2230	0.2236	2.9	1.3	0.0
Naerincheon (Riv.)	0.2228	0.2284	0.2300	2.5	3.2	0.7
Imjingang (Riv.)	0.0566	0.0669	0.0677	18.1	19.6	1.2
Average				4.41	4.90	0.44
				3.25		

Table 5. Average Elevation of Watershed [m]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	270.0	270.1	271.4	0.0	0.5	0.5
Pyungchanggang (Riv.)	291.4	291.5	291.8	0.0	0.1	0.1
Wicheon (Riv.)	757.9	757.9	757.9	0.0	0.0	0.0
Gyungancheon (Riv.)	164.3	164.3	164.2	0.0	0.1	0.1
Naerincheon (Riv.)	750.5	751.6	750.9	0.2	0.0	0.1
Imjingang (Riv.)	372.3	372.8	372.2	0.1	0.0	0.2
Average				0.06	0.13	0.16
				0.11		

서 영향을 받게 된다. 이때 DEM 보정과정에서 원시 DEM의 값을 유지하면서 경사가 0보다 큰 값을 가지도록 하기 위해 매우 작은 고도의 변화를 적용하게 되며, 이러한 보정과정은 지역의 평균고도에 미치는 상대적 크기는 매우 작게 된다. 따라서 지역의 평균고도는 DEM의 보정방법보다는 각 프로그램으로부터 추출된 유역경계의 영향을 좀 더 크게 받게 된다.

Table 5는 각 프로그램에 의해서 계산된 유역의 평균고도를 나타낸 것이다. Table 5에서 WMS와 HyGIS의 상대오차는 WMS와 ArcHydro의 상대오차 보다 작게 산정되는 경향을 나타내고 있다. 이는 Fig. 6 and Table 3에서의 유역 경계와 유역 면적 산정결과 및 DEM 보정기법의 영향이 반영된 것으로 볼 수 있을 것이다. 그러나 유역 평균고도 또한 적용된 각 프로그램에 대해서 평균 0.11%의 상대오차를 보임으로써 모든 프로그램에서 유사한 값이 산정되는 것으로 나타났다.

4.5 주하천 길이

수문모형에서 주하천에 관련된 지형인자는 유출모의 시 하도 홍수추적 매개변수로 주로 이용되고 있다. 유역에서의 주하천은 그 유역에서의 하천망 중 가장 긴 흐름경로 상에 있는 하천선의 조합으로 나타낼 수 있으며, 주하천의 길이는 이러한 하천선 길이의 합으로 계산된다. Table 6은 각 프로그램에서 계산된 주하천 길이의 산정결과를 나타낸 것이다. 이때 ArcHydro의 경

우 주하천을 자동으로 추출하는 기능을 제공하지 않고 있다. 따라서 Table 6에서 제시된 ArcHydro에서의 주하천 길이는 각 유역의 하천망 중 가장 긴 경로 상에 있는 하천선을 추출하고, 추출된 하천선의 길이를 합하여 계산된 값이다.

DEM을 이용해서 추출한 하천망의 길이는 DEM의 격자 크기와 각 격자의 흐름방향의 조합에 의해서 결정된다. ArcHydro와 WMS 및 HyGIS에서는 DEM을 이용한 흐름방향 결정을 위해서 Fig. 8과 같은 D8-method (deterministic eight-neighbors method, O'Callaghan and Mark, 1984)를 적용하고 있다. 이때 Fig. 9와 같은 격자의 개수가 동일한 3개의 DEM 영역을 가정할 경우 하천망을 형성하는 격자가 동일한 방향의 대각선 흐름을 나타내는 경우(Fig. 9(a))와 동일한 방향의 직각 흐름을 나타내는 경우(Fig. 9(b))는 서로 다른 하천 길이를 나타내게 되며, 모든 격자에서 다른 방향의 직각 흐름을 나타내는 경우(Fig. 9(c))에서는 가장 긴 하천선이 생성된다. 이때 DEM 격자의 흐름방향은 DEM의 보정과정에서 적용되는 sink와 flat area 처리 방법에 따라서 달라지며, 따라서 DEM의 보정방법은 하천선 및 하천선의 조합인 주하천의 길이와 경사에 영향을 미치게 된다.

Table 6에서 WMS와 HyGIS의 상대오차는 평균 5.88 %로 WMS와 ArcHydro의 9.42 %보다 작게 나타나 있다. 이러한 현상은 WMS와 ArcHydro가 동일한

Elevation			Weighted drop			Flow direction
92	91	90	-1.4	-1.0	0.0	
92	90	89	-2.0	x	1.0	
94	93	90	-2.8	-3.0	0.0	

Fig. 8. Flow Direction from D8-method (Korea Institute of Construction Technology, 2007)

Table 6. Main stream length [m]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	52,693	51,915	46,324	1.5	12.1	12.1
Pyungchanggang (Riv.)	43,109	43,177	39,454	0.2	8.5	9.4
Wicheon (Riv.)	53,889	54,215	54,869	0.6	1.8	1.2
Gyungancheon (Riv.)	33,235	33,874	30,524	1.9	8.2	11.0
Naerincheon (Riv.)	56,467	67,416	63,691	19.4	12.8	5.8
Imjingang (Riv.)	167,997	187,652	190,152	11.7	13.2	1.3
Average				5.88	9.42	6.81
				7.37		

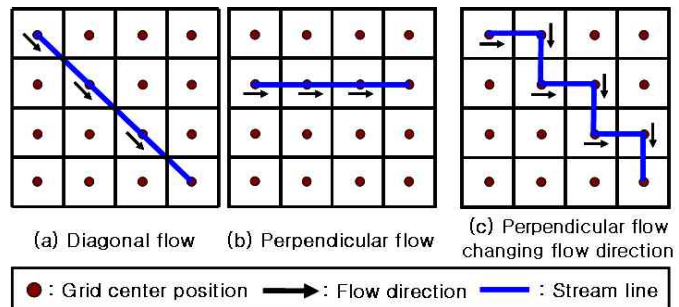


Fig. 9. Stream Lines from Flow Types

DEM 보정기법을 적용하고 있기 때문에 ArcHydro에 비해서 상대적으로 유사한 계산결과가 도출된 것이라고 할 수 있을 것이다.

4.6 주하천 경사

주하천 경사는 주하천의 길이와 함께 유출모의시 하도 홍수추적 매개변수로 주로 이용되고 있으며, 주하천에 포함된 하천선의 경사를 평균해서 계산된다. 주하천에 포함된 하천선의 경사는 DEM을 이용해서 계산할 수 있다. 이때 하천선을 형성하는 격자별 경사는 D8-method를 이용하여 하류의 단방향에 대해서 계산되며, 따라서 DEM의 보정기법에 따라서 서로 다른 하천선 및 주하천의 경사가 계산된다. 주하천 경사는 주하천 길이와 마찬가지로 ArcHydro에서 자동으로 계산되는 항목이 아니다. 따라서 본 연구에서는 ArcHydro를 이용한 주하천 경사는 검토대상에서 제외하였다. 유역과 하천의 경사는 일반적으로 1 미만의 매우 작은 값을 가지며, 이에 따라서 작은 절대오차에 대해서도 큰 상대오차를 나타내게 된다. Table 7은 주하천 경사의 계산결과를 나타낸 것이다. Table 7에서 WMS와 HyGIS의 계산결과 평창강과 임진강에서 큰 상대오차를 나타내고 있으나, 실제 경사 값의 차이가 매우 작고

전체 유역에 대한 상대오차의 평균은 10.78 %를 보이는 것으로 나타났다.

4.7 최대유하거리

지표면 흐름과 하도 흐름의 현상이 함께 발생하는 유역에서의 최대유하거리는 유효강우로 인한 직접유출의 발생지점부터 지표면 흐름을 거쳐 하도로 유입된 후 유역의 최하류 지점까지 흘러가는 경로 중 가장 긴 흐름경로를 통한 유하거리를 의미한다. 소유역 분할을 하지 않은 단일 유역의 경우에는 대부분 주하천의 시작점에 위치한 격자의 상류 격자에서 발생하는 지표면 흐름 경로 중 가장 긴 거리와 주하천의 길이의 합으로 계산된다. 소유역으로 분할된 유역의 경우 소유역별 최대유하거리는 해당 소유역의 가장 긴 하천연장 및 이곳으로 유입되는 가장 긴 지표면 흐름경로의 길이의 합으로 계산된다. Table 8은 대상 유역에 대한 최대유하거리의 산정결과를 나타낸 것이다.

최대유하거리는 주하천 길이와 마찬가지로 DEM 보정기법에 따라 달라지는 격자별 흐름정보에 큰 영향을 받게 된다. Table 8에서 WMS와 HyGIS는 평균 6.50 %의 상대오차를 보이고 있으며, WMS와 ArcHydro는 평균 9.53 %의 상대오차를 나타내고 있다. 이와 같이

Table 7. Main Stream Slope [m/m]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	0.0034	0.0032	-	5.6	-	-
Pyungchanggang (Riv.)	0.0063	0.0064	-	1.0	-	-
Wicheon (Riv.)	0.0130	0.0102	-	21.7	-	-
Gyungancheon (Riv.)	0.0044	0.0046	-	4.9	-	-
Naerincheon (Riv.)	0.0095	0.0096	-	13.4	-	-
Imjingang (Riv.)	0.0032	0.0042	-	30.3	-	-
Average				10.78	-	-

Table 8. Maximum Flow distance [m]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	54,687	53,862	50,473	1.5	7.7	6.7
Pyungchanggang (Riv.)	44,610	44,724	42,916	0.3	3.8	4.2
Wicheon (Riv.)	55,668	56,038	50,473	0.7	9.3	11.0
Gyungancheon (Riv.)	34,868	35,360	32,778	1.4	6.0	7.9
Naerincheon (Riv.)	58,070	70,178	69,196	20.8	19.2	1.4
Imjingang (Riv.)	170,980	195,464	190,152	14.3	11.2	2.8
Average				6.50	9.53	5.67
				7.24		

WMS와 HyGIS의 상대오차가 WMS와 ArcHydro의 상대오차보다 다소 작게 산정되는 것은 WMS와 HyGIS가 동일한 DEM 보정기법을 적용하기 때문에 나타난 결과라고 할 수 있다. 그러나 전체적으로 평균 7.24 %의 상대오차는 나타냄으로서 각 프로그램에서 모두 유사한 계산결과를 제시한다고 할 수 있을 것이다.

4.8 최대유하거리 경사

최대유하거리 경사는 최대유하거리를 나타내는 경로의 평균경사를 의미하며, 이때 적용되는 경사계산 방법은 주하천 경사와 마찬가지로 D8-method을 이용하고 있다. Table 9는 각 프로그램을 이용해서 계산된 유역별 최대유하거리 경사를 나타낸 것이다. 최대유하거리 경사는 주하천 경사와 마찬가지로 격자별 흐름정보와 고도의 영향을 받게 되며, 따라서 동일한 DEM을 적용할 경우 DEM의 보정기법에 따라서 각각 다른 최대유하거리 경사가 계산된다. Table 9에서는 WMS와 HyGIS의 계산결과에 비해서 ArcHydro의 계산결과와의 상대오차가 크게 나타나고 있으며, 이러한 현상 또한 WMS와 HyGIS에서 동일한 DEM 보정기법을 적용하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 그러나 최대유하거리 경사 또한 전체적으로 평균 8.23 %의 상대오차를 나타냄으로써 각 프로그램에서 모두 매우 유사한 계산결과를

제시하고 있다.

4.9 프로그램에 따른 지형인자 산정결과 고찰

본 연구에서 검토 대상으로 하는 7개의 지형인자에 대한 WMS, ArcHydro 및 HyGIS의 계산 결과를 분석한 Tables 3~9를 종합하여 전체 지형인자에 대한 프로그램별 상대오차를 분석하면 Table 10과 같다. Table 10에서는 1 미만의 매우 작은 값을 가지는 유역 경사, 주하천 경사 및 최대유하거리 경사에 대한 항목과 경사에 비해서 매우 큰 값을 가지는 유역 면적, 유역 평균고도, 주하천 길이 및 최대유하거리를 구분하여 상대오차를 분석하였다.

Table 10에서 유역 면적, 유역 평균고도, 주하천 길이 및 최대유하거리는 각 프로그램에서 모두 5 % 미만의 상대오차를 나타내고 있으며, 평균 3.80 %의 상대오차를 보임으로써 각 프로그램에서 유사한 값을 제시하는 것으로 나타났다. 유역 경사, 주하천 경사 및 최대유하거리 경사에서는 각 프로그램에서 모두 10 % 미만의 상대오차를 나타내고 평균 6.31 %의 상대오차를 보이고 있으며, 따라서 매우 작은 값을 가짐으로써 작은 차이에 의해서도 큰 상대오차를 나타내는 경사에 대한 항목 또한 모든 프로그램에서 유사한 계산결과를 얻을 수 있었다.

Table 9. Maximum Flow Distance Slope[m/m]

Watershed	W	H	A	Rel. error [%]		
				H/W	A/W	H/A
Bochungcheon (Riv.)	0.0058	0.0066	0.0067	13.0	16.1	2.7
Pyungchanggang (Riv.)	0.0120	0.0131	0.0135	8.9	12.6	3.3
Wicheon (Riv.)	0.0212	0.0219	0.0187	3.5	11.9	17.5
Gyungancheon (Riv.)	0.0098	0.0099	0.0113	0.6	15.2	12.6
Naerincheon (Riv.)	0.0157	0.0167	0.0167	6.3	6.5	0.1
Imjingang (Riv.)	0.0056	0.0061	0.0058	8.7	3.7	4.9
Average				6.83	11.00	6.86
				8.23		

Table 10. Relative Errors for Overall Geographic Parameters

Geographic parameters	Rel. error [%]			
	H/W	A/W	H/A	All
Watershed area, average elevation of watershed, main stream length, maximum flow distance	3.14	4.95	3.30	3.80
Watershed slope, main stream slope (includes maximum flow distance slope)	5.62(7.34)	7.95	3.65	5.74(6.31)
All(includes maximum flow distance slope)	3.97(4.94)	5.95	3.42	4.44(4.77)

7개의 지형인자 값에 대해서 각 프로그램으로부터 계산된 결과의 상관성을 분석하기 위해서 지형인자의 값의 범위를 4개의 계급으로 구분하면 Table 11과 같고, 각 계급에 대해 그래프를 도시하면 Figs. 10~13과 같다. Figs. 10~13에서는 WMS와 HyGIS, WMS와 ArcHydro 및 ArcHydro와 HyGIS의 계산결과를 그래

프로 나타내고 있으며, 각각의 그래프에 대해서 y 절편이 0인 선형의 추세선과 결정계수를 표시하고 있다. Figs. 10~13의 각 추세선은 기울기가 1에 가까운 값을 보이고 있으며, 결정계수 또한 0.905~1.000의 범위를 보임으로써 각 프로그램에서는 모두 유사한 계산결과를 제시하는 것으로 나타났다.

Table 11. 4 classes of geographic parameters for correlation analysis

Geographic para.	Bochungcheon (Riv.)	Pyungchanggang (Riv.)	Wicheon (Riv.)	Gyunganchon (Riv.)	Naerincheon (Riv.)	Imjingang (Riv.)
Watershed area	C3	C3	C3	C3	C4	C4
Watershed slope	C2	C2	C2	C2	C2	C2
Average elevation of watershed	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Main stream length	C4	C4	C4	C4	C4	C4
Main stream slope	C1	C1	C1	C1	C1	C1
Maximum flow distance	C4	C4	C4	C4	C4	C4
Maximum flow distance slope	C1	C1	C1	C1	C1	C1

※C1: $0 \leq (\text{geographic parameter value}) < 0.05$
 C2: $0.05 \leq (\text{geographic parameter value}) < 1$
 C3: $1 \leq (\text{geographic parameter value}) < 1000$
 C4: $1000 \leq (\text{geographic parameter value})$

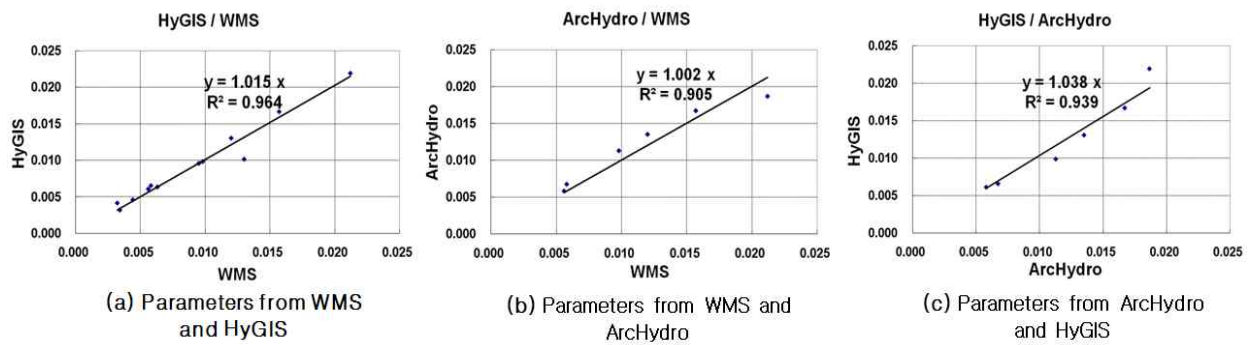


Fig. 10. Correlations of Geographic Parameters for C1

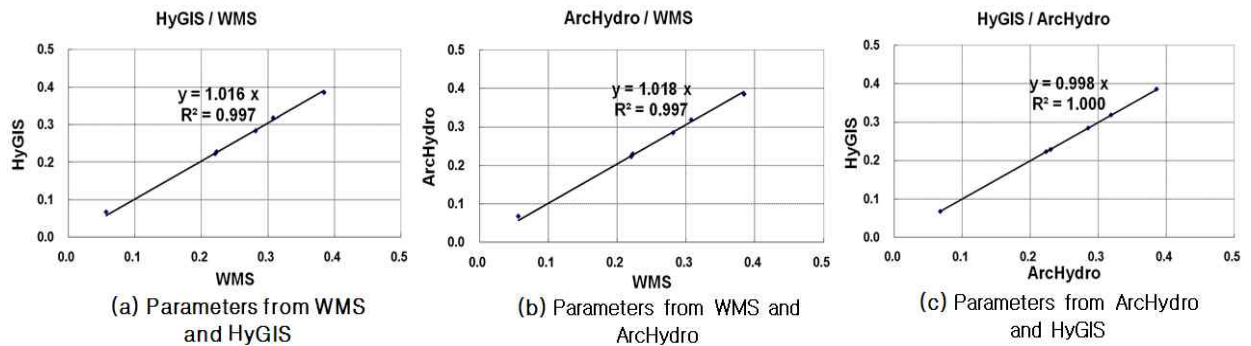


Fig. 11. Correlations of Geographic Parameters for C2

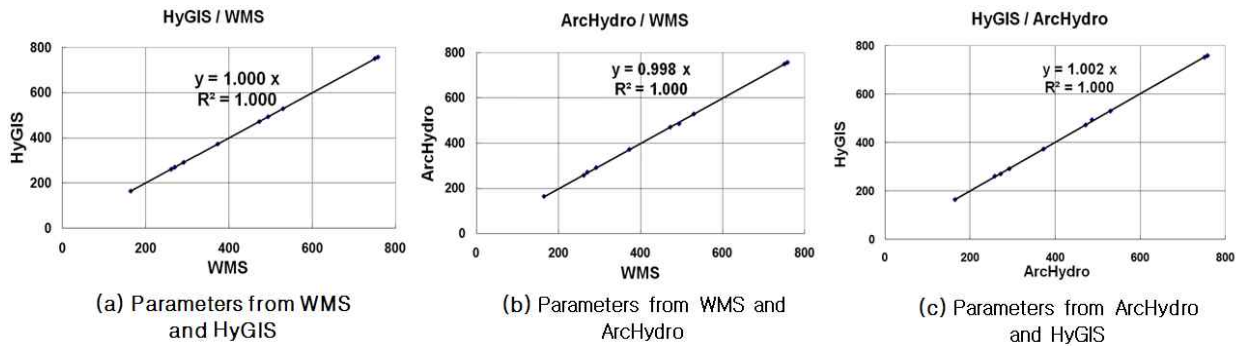


Fig. 12. Correlations of Geographic Parameters for C3

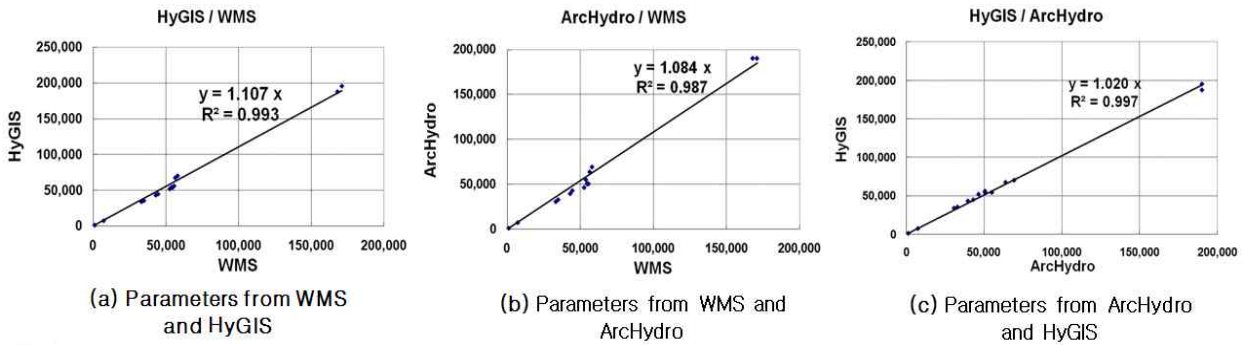


Fig. 13. Correlations of Geographic Parameters for C4

5. 결론

본 연구에서는 국내에서 일반적으로 활용되고 있는 WMS 및 ArcHydro와 HyGIS를 이용하여 보청천, 위천, 평창강, 경안천, 내린천 및 임진강 유역에 대한 지형인자를 산정하고 각각의 결과를 비교 검토함으로써 HyGIS의 지형인자 산정 모듈의 적용성을 평가하였다. 대상 유역에 대해서 각각의 프로그램을 이용해서 DEM을 보정하고 유역을 추출하였으며, 유역 면적, 유역 경사, 유역 평균고도, 주하천 길이, 주하천 경사, 최대유하거리, 최대유하거리 경사의 7가지 항목의 지형인자를 계산하고, 추출된 유역의 형태와 지형인자의 항목별로 각 프로그램의 산정결과를 검토하였다.

각 프로그램을 이용해서 추출된 유역경계의 비교결과 WMS와 HyGIS는 모든 유역에 대해서 유사하게 추출되었다. 그러나 ArcHydro에서는 평창강과 내린천을 제외한 4개 유역에서 하류 유출구 부분과 상류 유역경계 부분에서 WMS 및 HyGIS와 차이를 보이고 있다. 이는 ArcHydro가 WMS 및 HyGIS와 다른 DEM 보정기법을 사용하고 있기 때문인 것으로 판단되나, 대부분의 구간에서 유역경계가 일치하고 유역 면적에서도 0.45 %의 상대오차를 나타냄으로써 각 프로그램에서 추출된 유역경계는 유사한 결과를 보이고 있다고 할 수

있을 것이다.

지형인자 산정결과에서는 7개의 지형인자 각 항목별 평균 상대오차가 최소 0.11 %에서 최대 10.78 %를 보임으로써 각 프로그램은 모든 지형인자에 대해서 유사한 계산결과를 나타내었다. 유역 면적, 유역 평균고도, 최대유하거리 및 주하천 길이에서는 평균 3.80 %의 상대오차를 나타냄으로써 각 프로그램에서 모두 유사한 계산결과를 도출할 수 있었다. 그리고 유역 경사, 주하천 경사 및 최대유하거리 경사와 같은 경사에 대한 항목은 평균 6.31 %의 상대오차를 나타내었으며, 따라서 다른 지형인자에 비해서 작은 값을 가짐으로써 작은 절대오차에 대해서도 큰 상대오차를 나타내는 경사의 항목에서도 각 프로그램은 모두 유사한 값을 산출하는 것으로 나타났다.

또한 ArcHydro에서 자동계산 되지 않는 주하천 경사를 제외한 6개 항목에서 WMS와 HyGIS는 평균 3.97 %, WMS와 ArcHydro는 평균 5.95 %의 상대오차를 나타냈다. 이와 같이 WMS와 HyGIS의 상대오차가 WMS와 ArcHydro의 상대오차보다 작은 값을 나타내는 것은 WMS와 HyGIS가 동일한 DEM 보정기법을 적용하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 주하천 경사를 제외한 6개 항목에 대한 WMS, HyGIS, ArcHydro의 전체 상대오차의 평균이 4.44%를 나타내었으며, 주하천

경사를 포함한 7개 지형인자 전체에 대한 평균 상대오차 또한 4.77 %를 나타냄으로써 각 프로그램은 모두 유사한 지형인자 산정결과를 제시하는 것으로 나타났다.

각 지형인자에 대해서 계산된 값의 크기에 따라 4개의 계급으로 구분하여 비교함으로써 WMS, ArcHydro 및 HyGIS로부터 계산된 값의 상관성을 분석하였다. 분석결과 모든 지형인자에 대해서 WMS, ArcHydro 및 HyGIS는 각각 y 절편이 0이고 기울기가 1에 가까운 선형의 관계를 나타내었으며, 결정계수 또한 0.905~1.000의 범위를 가짐으로써 각 프로그램으로부터 계산된 지형인자는 매우 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 6개의 대상유역에 대해서 WMS와 ArcHydro 및 HyGIS를 이용하여 수문학적 지형인자를 산정하였을 때 각각의 프로그램은 모두 매우 유사한 계산결과를 나타내었다. 따라서 HyGIS에서 계산된 지형인자는 기존에 국내에서 적용되어 왔던 WMS 및 ArcHydro와 함께 수자원 분야에서 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호:1-2-3)과 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업과제(과제번호:07국토정보C03)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

건설부 (1983). 1983년 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서
 김경탁 (1998). GIS 적용에 따른 홍수유출응답에 관한 연구. 인하대학교 토목공학과. 박사학위논문
 국토해양부 (2007). **한국수문조사연보**
 김경탁, 최윤석 (2005). "DEM에서의 sink와 flat area 처리 알고리즘에 대한 비교 검토." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제8권, 제4호, pp. 91-101.
 김경탁, 최윤석 (2006). "HyGIS와 SWAT의 연계 시스템 개발." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제9권, 제3호, pp. 136-145.
 김경탁, 최윤석, 변인경 (2006). "GIS를 이용한 유역유출해석." 제17회 수공학 워크샵 교재, 한국수자원학회, pp. 1-72.
 김경탁, 최윤석, 박동선 (2004). "HyGIS를 이용한 유역 특성인자 추출에 대한 검토." **2004년 한국수자원학회 학술발표회 초록집**, 한국수자원학회, pp. 1267-1270.

김경탁, 최윤석, 장재혁 (2004). "HyGIS와 TOPMODEL의 연계에 관한 연구." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제7권, 제4호, pp. 155-165.
 오경두, 이주현, 강정훈, 최종진 (2002). "수문모형시스템." 제10회 수공학 워크샵 교재, 한국수자원학회, pp. II.1-II.106.
 이재남, 노재경 (2009). "HyGIS-TOPMODEL의 천천유역 적용." **2009년 한국수자원학회 학술발표회 초록집**, 한국수자원학회, pp. 1033-1037.
 이종태, 허성철, 김정희, 한건연 (2006). "제방붕괴조건에 따른 도시하천의 홍수범람 특성 및 홍수지도 작성 - 중랑천 시험유역을 중심으로 -." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 383-394.
 최윤석, 김경탁, 심명필 (2000). "GIS를 응용한 홍수유출해석에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제20권, 제3-B호, pp. 361-367.
 한건연, 안기홍, 김경록, 박홍성 (2006). "HyGIS와 연계한 수리/수문통합 모형의 개발." **2006년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 840-845.
 한국건설기술연구원 (2007). HyGIS 개발. 과학기술부, pp. 29-38.
 한국건설기술연구원 (2008). 위성자료 공공활용연구 - 위성영상을 이용한 하천정보 생산 및 활용에 관한 연구 -. 기초기술연구회, pp. 187-190.
 ESRI. Arc/Info v8.1 Online Help.
 Garbrecht, J. and Martz, L.W. (1997). "The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models." *Journal of Hydrology*, vol. 193, pp. 204-213.
 Garbrecht, J. and Martz, L.W. (2000). *TOPAZ User Manual*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
 Jenson, S.K. and Domingue, J.O. (1988). "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600.
 Maidment D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*, ESRI press, CA, USA.
 Martz, L.W. and Garbrecht, J. (1998). "The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models." *Hydrological processes*, Vol. 12, No. 6, pp. 843-855.
 Martz, L.W. and Jong, E.d. (1988). "CATCH: A

FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models.” *Computers & Geosciences*, Vol. 14, No. 5, pp. 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*, Vol. 28, pp. 324-344.

Tribe, A. (1992). “Automated Recognition of Valley

lines and Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models: a review and a new method.” *Journal of Hydrology*, Vol. 139, pp. 263-293.

Global Land Cover Facility, <http://glcf.umd.edu/index.shtml>

논문번호: 09-100	접수: 2009.09.02
수정일자: 2009.10.15/11.04	심사완료: 2009.11.04