

수치표고모형(DEM)의 해상도가 물리 결정 일괄 매개변수 수문모형의 모의 결과에 미치는 영향 평가

김만규^{1*} · 박종철²

Assessment of the Effect of Digital Dlevation Model (DEM) Resolution on Simulation Results of the Physical Deterministic Lumped Parameters Hydrological Model

Man-Kyu KIM^{1*} · Jong-Chul PARK²

요 약

지형경사와 사면방향은 BROOK90 Model과 같은 물리 결정 물수지 모델에서 증발산과 융설, 순복사 등을 계산하기 위해서 사용하는 중요한 매개변수가 된다. 본 연구에서는 수치표고모형(DEM)을 제작하고, DEM의 해상도가 달라짐에 따라서 유역 평균 지형경사와 유역 평균 사면방향이 어떻게 달라지는지, 그리고 이 차이는 물리 결정 일괄 매개변수 물수지 모델인 BROOK90의 물수지 모의 결과에 어떤 영향을 미치는지를 평가하였다.

충청도 병천천 유역을 대상으로, DEM은 1:25,000 수치지형도를 이용하여 TIN과 Topo To Raster 방법으로 제작하였다. 각각의 방법으로 10m~100m 해상도의 DEM을 10m 간격으로 10개씩 총 20개의 DEM을 제작하였다. DEM의 해상도가 높아지면 병천천 유역의 평균 지형경사가 커져서 이는 병천천 유역의 증산량을 증가시키고 하천유출량을 감소시켰다. 이것은 평지보다 경사지가 직달복사량을 많이 받는 물리적 특성이 모델에 반영되어 있기 때문이다. 한편, DEM의 해상도가 낮아지면 병천천 유역에서는 평균 사면방향이 남동방향에서 남향으로 이동하는 경향이 있었다. 이에 따라 증발산량이 증가하고 하천유출량은 감소하는 것으로 나타났다.

주요어: BROOK90 Model, 수치표고모형 해상도, 직달복사량, 증발산량, 하천 유출량

ABSTRACT

Ground slope and aspect are important parameters for physical deterministic water balance models like BROOK90 or hydrological models which attempt to calculate evapotranspiration, snowmelt, and net radiation. This study constructs a Digital Elevation Model(DEM) and examines how DEM resolution can change the average ground slope and aspect of a river

2008년 8월 11일 접수 Received on August 11, 2008 / 2008년 9월 10일 수정 Revised on September 10, 2008 / 2008년 9월 18일 심사완료 Accepted on September 18, 2008

1 공주대학교 지리학과 Department of Geography, Kongju Nat'l Univ.

2 공주대학교 대학원 지리정보학과 박사과정 Doctoral Student, Graduate School of Geographic Information Science, Kongju Nat'l Univ.

* 연락처 E-mail : aquasia@kongju.ac.kr

basin and attempts to evaluate the effects on simulation results of BROOK90, a physical deterministic water balance model. The study area is Byungcheon river basin in Korea. DEM has been constructed using a 1:25,000 digital map with the methods of TIN and Topo To Raster.

The total of 20 DEMs with 10m~100m resolution have been constructed, with a 10m interval. It was found that the higher the DEM resolution, the steeper the average ground slope value of the Byungcheon river basin. In turn, the direct solar radiation of a hilly area in the model increased the evapotranspiration and reduced the stream runoff in the Byungcheon river basin. On the other hand, a lower DEM resolution tends to move the average aspect from southeast to south in the Byungcheon river basin. Accordingly, it was found that stream runoff was reduced and evapotranspiration increased.

KEYWORDS: *BROOK90 Model, DEM Resolution, Direct Solar Radiation, Evapotranspiration, Stream Runoff*

서 론

수문학적 연구를 수행하는 연구자들은 다양한 수문모형(hydrological model)을 연구에 사용하고 있다. 수문모형은 복잡한 수문 과정들(hydrological processes)을 이해할 수 있도록 도와주며, 유역의 수문학적 기능을 가정하고 그에 대한 실험을 하는데 효과적이다(Lazarotto 등, 2006). 수문모형들 중 물리 결정의 모형들은 수문 과정들을 물리적으로 표현하기 위해서 많은 매개변수들을 사용한다. 이들 중 지형경사와 사면방향은 BROOK90 같이 물리 결정 물수지 모델(physical deterministic water balance model) 또는 수문모형(hydrological model)에서 증발산과 응결, 순 복사 등을 계산하기 위해서 사용하는 중요한 매개변수들이다.

수문학을 연구하는 많은 연구자들은 연구지역의 지형경사와 사면방향에 대한 정보를 획득하기 위해서 수치표고모형(Digital Elevation Model ; DEM)을 제작하고 이를 지리정보시스템(Geographic Information System ; GIS)으로 분석하는 방법을 이용하고 있다. 이 때 연구에 사용하는 DEM의 제작방법과 공간해상도의 차이가 분포형 수문모형의 모의 결과에 영향을 미친다는 사실은 여러 연구자들의 연구에

의해 잘 알려져 있다. Zhang과 Montgomery(1994)는 유역면적이 각각 0.3km², 1.2km²인 프랑스의 2개 소유역에서 DEM의 공간해상도를 2, 4, 10, 30, 90 m로 달리하며 TOPMODEL(Beven, 1997)을 사용하여 4시간의 강수에 대한 강우-유출(rainfall-runoff) 실험을 수행하였다. 그 결과 DEM의 공간해상도가 달라지면 지형경사가 달라지고, 이는 유역의 침투 유량과 지하수면 심도에 영향을 준다고 하였다. 그들은 이 유역에서 적절한 DEM의 공간해상도가 10m라고 제안하였다. Wolock과 Price(1994)는 DEM의 공간해상도를 줄였을 때 발생하는 최대 지표의 거칠기 증가는 지하수면의 평균 심도 감소와 총 유출에서 지표류의 비율을 증가시킨다고 하였다. Bruneau 등(1995)은 유역면적이 12 km²인 프랑스의 실험유역에서 TOPMODEL을 이용할 때 50m 공간해상도의 DEM이 사용가능하다고 하였다. Franchini 등(1996)은 프랑스의 Real Collobrier 유역에서 3개월의 시간 자료를 이용하여 실험한 결과 Bruneau 등(1995)과 유사한 결과를 도출하였다. Shrestha 등(2006)은 macro-scale의 분포형 수문모형인 MaScOD를 이용하는 연구에서 유역면적이 각각 132,350km², 29,844km², 2,093km²인 중국의 3개 유역을 대상으로 DEM의 공간해상도를 달리 하며 수행한 실험에서 유역의 규모에 상관없

이 IC-ratio(Input forcing resolution : Catchment area)가 1:10~1:20이 적정하다고 하였다. Vazquez 등(2006)은 벨기에에서 분포형 수문모형인 MIKE-SHE를 이용하여 유역면적이 각각 326 km², 260km² 유역에서 실험한 결과, DEM의 제작 방법에 따라 수문반응이 다르게 나타났으며, 분포형 수문모형에서 Sink 제거 이후에 모의 결과가 개선되었다고 하였다.

이와 같이 DEM의 해상도가 수문모형의 모의 결과에 미치는 영향에 대한 연구는 분포형 수문모형들(distributed hydrological models)을 중심으로 연구되어 왔다. 그러나 일괄 매개변수(lumped parameters)를 사용한 수문모형에 대한 연구 사례는 찾아보기가 어렵다. 일괄 매개변수 수문모형이 유역의 평균적인 지형경사, 사면방향 등을 사용하기 때문에 연구에 사용하는 DEM의 해상도에 대한 논의는 부족하다. 따라서 DEM의 해상도가 물수지 모의 결과에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구한 사례를 찾아보기가 어렵다.

한편 국토지리정보원에서 제작하는 1:5,000 또는 1:25,000 축척의 수치지형도를 이용하여 DEM을 제작할 때에 DEM 자료의 정확도를 고려하여 적정 해상도를 제안한 연구들이 있다. 한국건설기술연구원(2001), 건설교통부(2001), 김연준과 신계중(2002), 이근상 등(2003)은 산지, 구릉지, 도심지 등에 따라서 적정 해상도가 다르지만 공통적으로 10m~30m의 해상도를 사용할 것을 제안하고 있다. 박진형 등(2004)은 1:25,000 축척의 수치지형도를 사용하여 제작한 DEM을 이용하여 도시 소유역의 유출해석을 분석할 때 수치지형도의 주곡선 간격을 고려하여 DEM의 해상도를 10m로 결정하기도 하였다. 그러나 일괄 매개변수 수문모형에서 이러한 DEM의 적정 해상도를 고려하여 자료를 구축하는 것이 왜 중요한지에 대해서는 실험된 바가 없다. 분포형 수문모형에 비해 물리 결정 일괄 매개변수 수문모형은 입력 자료의 준비가 용이하며 수문 과정들

에 대한 연구자의 이해를 증진시킬 수 있다. 따라서 수문연구에 활용 가능한 입력 자료를 확보하는데 많은 어려움이 있는 국내에서는(손일, 1986; 양해근과 김종일, 2004; 홍준범 등, 2006) 물리 결정 일괄 매개변수 수문모형을 매우 유용하게 이용 할 수 있다.

한편, 신선희 등(2006)은 경사지의 직달복사량이 많고 더불어 지표면 온도가 수평 지표면의 온도보다 높다고 하였다. 특히 지형경사가 급한 태백, 소백산맥 지방에서는 경사도에 따라 직달복사량 차이가 잘 나타난다고 하였다. 이에 따라 한반도 지역에서 DEM의 해상도에 따른 유역 평균 지형경사도의 차이가 수문기상과 물수지에 미치는 영향에 대하여 알아볼 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 DEM의 공간해상도가 달라짐에 따라 평균 지형경사와 평균 사면방향이 어떻게 달라지고, 이것이 물리 결정 일괄 매개변수 수문모형인 BROOK90의 물수지 모의 결과에 어떤 영향을 주는지 평가하고자 한다.

연구지역 및 방법

본 논문의 연구지역은 병천천 유역이며 김만규(2008b)에 의해 BROOK90 물수지 모델이 보정(calibration)되고 검증(validation)된 곳이다. 연구지역은 충청남도 천안시와 충청북도 청원군의 경계지역에 위치하며, 충청북도 진천군을 일부 포함한다(그림 1). 세종시가 될 연기군 동면 합강리에서 금강과 합류하는 국가하천인 미호천의 지류인 병천천과 그 지류들인 산방천, 광기천, 승천천, 용두천 등이 연구지역 내에서 흐르고 있다. 이 하천들은 모두 차령산맥 속의 병천 분지 안에 자리한다. 이들 하천은 차령산맥을 이루는 연구지역 주변 산지에서 발원하여 병천천으로 합류한 후 병천 분지 남동쪽 출구를 통과하여 미호천으로 합류한다(김만규, 2008a).

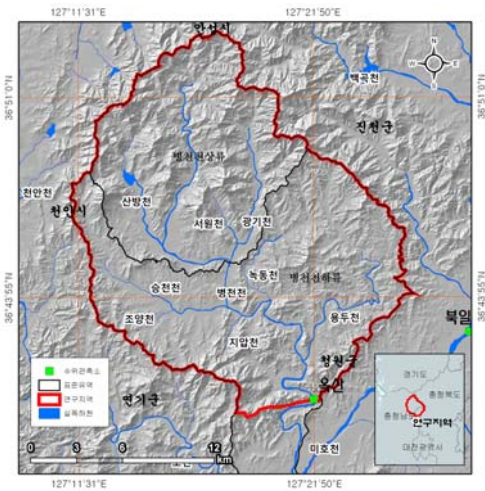


그림 1. 연구지역과 하천 및 표준유역 분포도

본 연구에서는 김만규(2008b)가 연구지역에서 비준한 물수지 모델을 활용하여 DEM의 해상도를 달리하며 획득한 평균 지형경사와 평균 사면방향 값으로 모의를 수행하였다. 그의 연구 결과에서 4년간(2003~2006)의 ALL ALL MBE¹⁾(All All Mean Bias Error, 연간 일 평균 편중 오차)가 0.01mm/d의 차이가 나타났다. 연구지역의 자세한 매개변수 획득결과와 모의 결과는 김만규(2008b)에서 확인할 수 있다.

DEM은 LiDAR 측량을 통해 제작하거나(이근상 외, 2003; 이근상 외, 2004), 항공사진 또는 위성영상 분석을 통해 제작할 수 있으며(박운용 외, 2000; 이병환 외, 2000; 연상호, 2000) 국토지리정보원에서 판매하는 수치지형도를 이용할 수 있다(한국건설기술연구원, 2001). 첫 번째와 두 번째 방법은 DEM 제작에 비교적 고비용이 소요된다. 본 연구에선 세 번째 방법을 사용하여 연구에 필요한 DEM을 제작하였다.

DEM의 제작에는 불규칙 삼각망(Triangulated Irregular Networks ; TIN) 방법과 ESRI의 Topo to Raster 방법을 이용하였다. TIN은 불규칙하게 위치해 있는 데이터의 상호 기하학적 관계를 고려하여 지형의 3차원적인 표현을 가능케 하는 데이터 구조이다(한국건설기술연

구원, 2001). Topo To Raster는 수문학에 적합한 DEM을 제작하기 위해 설계된 보간 방법이다. Topo To Raster는 하천에 의한 침식, 분수령 등이 올바르게 재현된 DEM을 제작하도록 설계되었다(Hutchinson, 1988; 1989; 1993). 단 Topo To Raster 방법은 ESRI의 ArcInfo에서만 사용할 수 있기 때문에 GIS S/W는 ESRI의 ArcInfo를 사용하였다.

수치지형도는 1:25,000 축척의 9도엽을 사용하였다. DEM 제작에 필요한 지표고도 자료는 수치지형도의 주곡선과 계곡선 그리고 표고점 자료를 추출하였으며, 지표고도 자료에서 일반적으로 나타나는 표고 기록의 오류²⁾들은 DEM제작-육안검수-오류수정 과정을 반복 수행함으로써 수정하였다. 아울러 수치지형도를 활용하여 Topo To Raster에서 수문학적 지형을 재현하기 위해 필요로 하는 연구지역의 호수와 하천 중심선 정보를 벡터라이징 하였다. 하천 중심선 제작 대상은 연구지역에 분포하는 국가 하천에서 지방2급 하천까지로 하였다.

DEM은 10m~100m 해상도까지 10m 간격 단위로 제작하였다. TIN 방법으로 10개의 DEM을 제작하고 Topo To Raster 방법으로 10개의 DEM을 제작하여 총 20개의 DEM으로부터 획득한 평균 지형경사와 평균 사면방향에 대한 정보를 연구에 사용하였다. 본 연구의 연구절차를 도식화 한 것은 <그림 2>와 같으며, 연구에서 TIN 방법과 Topo To Raster 방법으로 제작한 최소해상도 10m와 최대 해상도 100m의 DEM 음영 기복도는 <그림 3>에서 보는 것과 같다. 본 연구에서는 TIN 방법으로 제작한 DEM을 이용하여 획득하는 연구지역의 평균 지형경사와 평균 사면방향을 각각 TIN Slope와 TIN Aspect로 명명하였으며, Topo To Raster 방법으로 제작한 DEM을 이용하여 획득한 평균 지형경사와 사면방향을 각각 Topo Slope와 Topo Aspect로 명명하였다.

물리 결정 일괄 매개변수 수문모형은 BROOK90 (Federer, 1995)을 사용하였다. BROOK90 Model의

주요 모듈의 핵심만 간략히 소개하면 다음과 같다. 우선 증발산 모듈은 Penman-Monteith 공식을 개량한 식 1과 식 2인 Shuttleworth & Wallace(1985) 공식을 사용한다. 여기서 식 1은 식생에서의 증산량을 식 2는 토양에서의 발산량을 계산한다.

$$LvpwEc = [(\Delta(A-As) + cp\rho D0 / rac) / (\Delta + \gamma + \gamma(rsc / rac))] \quad (1)$$

$$LvpwEs = [(\Delta(A-As) + cp\rho D0 / ras) / (\Delta + \gamma + \gamma(rss / ras))] \quad (2)$$

Lv : 물의 기화잠열

pw : 물의 밀도

Ec : 증산량

Es : 발산량

Δ: Murray(1967)의 기온(T)에 따르는 증기압 변화율

T ≥ 0 °C 일 때, Δ = 4,098 e* / (T + 237.3)²

e* = 0.61078 exp[17.26939 T / (T + 237.3)]

T < 0 °C 일 때, Δ = 5,808 e* / (T + 265.5)²

e* = 0.61078 exp[21.87456 T / (T + 265.5)]

A : 식생대 상층의 이용 가능 에너지

As : 토양층에서의 이용 가능 에너지

cp : 공기 열용량

ρ : 공기 밀도

D0 : 수증기압 불포화도

γ : psychrometer 상수

rac : 잎 표면 외부에서의 증기 이동 방해 저항

rsc : 잎 내부에서 잎 표면으로의 증기 이동 방해 저항

ras : 토양 표층에서의 증기 이동 방해 저항

rss : 토양 내에서의 토양표층으로의 증기 이동 방해 저항

다음으로 토양수의 형성(soil water formation) 과 유출 형성 과정(runoff formation process) 모듈은 식 3인 Richard-Darcy 불포화 토양수

운동방정식을 중심으로 구성되어 있다.

$$VRFLi = (GRADi * KKMEANi / RHOWG) * (1 - (STONEFi + STONEFi+1) / 2) \quad (3)$$

VRFLi : i 번째 토양층에서의 물 흐름량(침투량)

RHOWG : 중력가속도와 물의 밀도와의 곱

STONEFi : i 번째 토양층에서의 자갈 함유비

KKMEANi : i 번째 토양층에서의 수리전도도

GRADi : i 번째 토양층에서의 잠재 수리경사도

식 3에서의 GRADi는 식 4로 구한다.

$$GRADi = (PSITi - PSITi+1) / RMIN(THICKi, THICKi+1) \quad (4)$$

PSITi : i 번째 토양층에서의 총 토양수 수리잠재능(total soil water potential)

THICKi : i 번째 토양층의 두께

지하수 모듈은 지하수층(GWAT)의 저장량에 대하여 선형함수를 사용하여 지하수 유출량을 계산한다. 김만규(2008b)에 BROOK90 Model의 골격을 소개한 바 있지만, 상세한 Model의 전체 조건과 Model에 사용되는 다양한 모듈별 물리수학 공식 그리고 변수에 대한 정의들 기타 관련된 연구논문은 <http://home.maine.rr.com/stfederer/brook90.htm>에서 살펴 볼 수 있다.

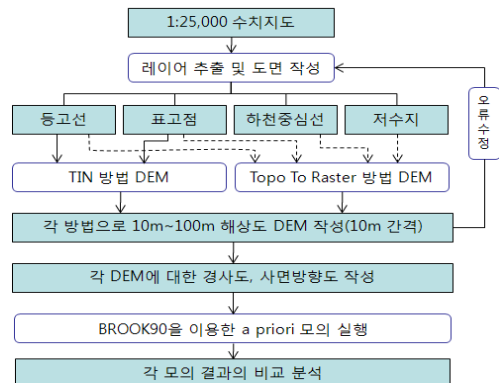
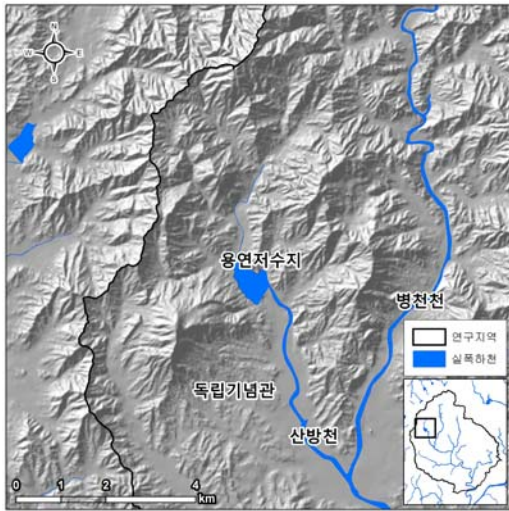
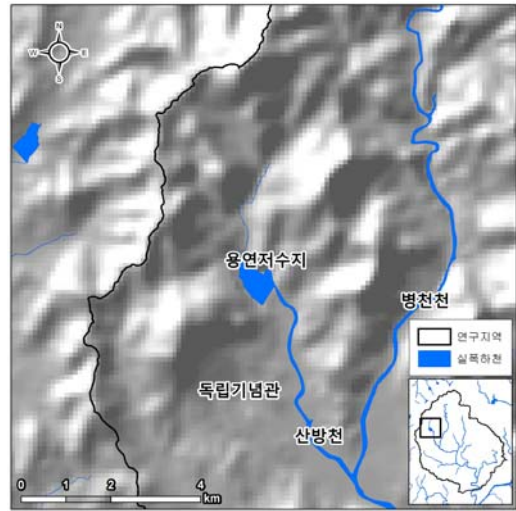


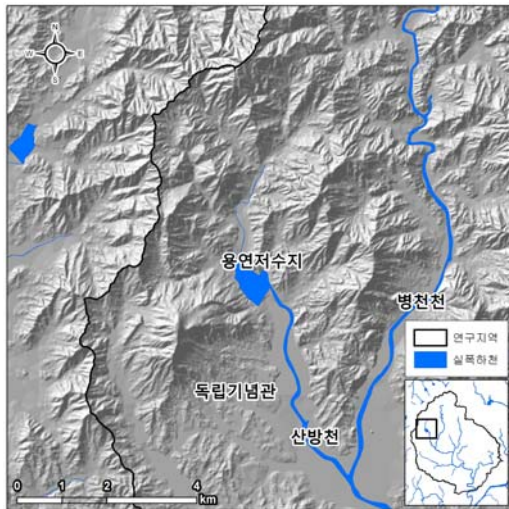
그림 2. 연구 절차



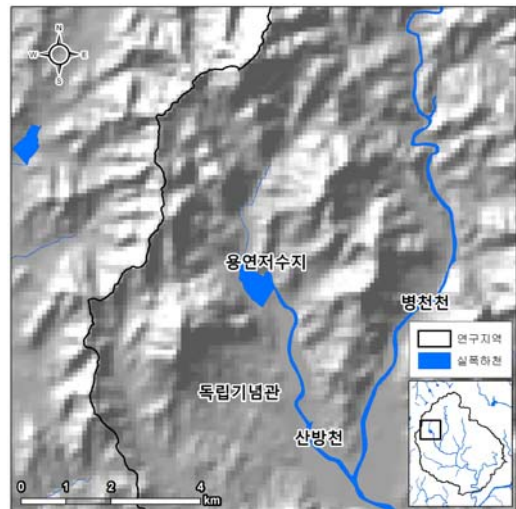
Topo To Raster 10m DEM의 음영기복도



Topo To Raster 100m DEM의 음영기복도



TIN 10m DEM의 음영기복도



TIN 100m DEM의 음영기복도

그림 3. TIN과 Topo To Raster 방법으로 제작한 10m와 100m DEM의 음영기복도

연구 결과

1. TIN Slope와 Topo Slope, TIN Aspect와 Topo Aspect의 비교

10개의 TIN Slope의 평균은 8.8°이고 Topo Slope의 평균은 7.8°이다. 이것은 TIN 방법으로

제작한 DEM이 Topo To Raster 방법으로 제작한 DEM보다 지표면을 거칠게 묘사하고 있다는 것을 의미한다. 각 해상도에서의 TIN Slope와 Topo Slope의 차이를 살펴보면 10m 해상도를 제외한 모든 해상도에서 TIN Slope가 Topo Slope보다 지형경사도가 높은 값을 나타낸다.

한편 TIN Slope와 Topo Slope 모두 해상도가 감소할수록 지형경사 값이 작아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 해상도의 감소에 따른 평균 지형경사의 감소정도는 두 방법에서 차이를 보이고 있다. Topo Slope의 최고값과 최저값의 차이는 6.2°로 TIN Slope의 4.5°보다 크게 나타난다. 동일 해상도에서의 Topo Slope와 TIN Slope의 차이는 10m 해상도에서 70m 해상도까지 점차 커지다가 70m 해상도를 넘어서면서 변화가 없다(표 1), (그림 2).

연구지역의 DEM의 해상도와 평균 지형경사 간의 상관관계식은 식 5, 식 6과 같다. 식 5는 TIN 방법으로 제작한 DEM의 해상도와 평균 지형경사와의 상관관계식이고 식 6은 Topo To Raster 방법으로 제작한 DEM의 해상도와 평균 지형경사의 상관관계식이다.

$$y = -2.00\ln(x) + 11.88 \quad (5)$$

$$y = -2.72\ln(X) + 11.93 \quad (6)$$

$$y = \text{평균 지형경사(°)}$$

$$x = \text{DEM 해상도(m)}$$

평균 사면방향을 분석한 결과에서 TIN Aspect는 해상도의 변화에 따라 사면방향이 크게 변한다. 그러나 Topo Aspect에서는 변화가 거의 나타나지 않는다(표 2). 연구지역에서 TIN Aspect의 경우 10m 해상도에서는 138.4°(남동향)를 보이지만 100m 해상도에서는 170.8°(남향)로 나타나 해상도가 감소할수록 사면방향이 시계방향으로 회전하는 경향이 나타난다.

2. TIN Slope와 Topo Slope, TIN Aspect와 Topo Aspect의 차이가 물수지 모의 결과에 미치는 영향

서로 다른 해상도의 TIN Slope와 Topo Slope를 적용하여 연구지역에 대하여 2003년부터 2006년에 대한 물수지 모의를 수행한 결과 연구지역에서는 해상도가 낮아질수록 모의 하천유출량은 감소하지만 증발산량은 증가하는 것으로 나타난다. TIN Slope를 적용한 모의에서는 해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다 모의 하천유출량, 모의 증산량 그리고 모의 발

표 1. DEM 해상도에 따른 연구지역의 평균 지형경사

	DEM 해상도(m)										평균	최고	최저	표준 편차
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
① (°)	11.5	10.6	9.9	9.3	8.8	8.3	8.0	7.6	7.3	7.0	8.8	11.5	7.0	1.5
② (°)	11.8	10.2	9.0	8.2	7.6	7.0	6.6	6.2	5.9	5.6	7.8	11.8	5.6	2.0
①-②	-0.3	0.4	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.0	-0.3	1.4	-0.5

① : TIN Slope ② Topo Slope

2. DEM 해상도에 따른 연구지역의 평균 사면방향

	DEM 해상도(m)										평균	최고	최저	표준 편차
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
① (°)	138.4	149.6	154.9	158.8	161.8	164.5	166.5	168.2	169.7	170.8	160.3	170.8	138.4	10.3
② (°)	179.4	182.6	182.5	182.7	182.3	182.3	182.3	182.2	181.9	182.4	182.1	182.7	179.4	1.0
①-②	-41.0	-33.0	-27.6	-23.9	-20.5	-17.9	-15.8	-14.0	-12.2	-11.6	-21.8	-11.8	-41.0	9.3

① : TIN Aspect ② : Topo Aspect

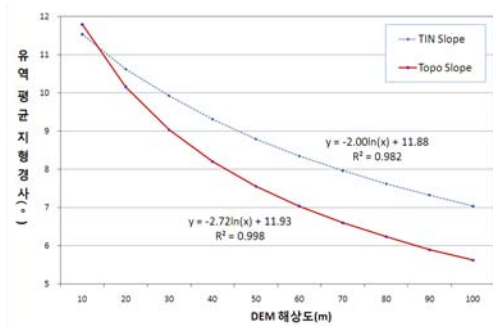


그림 4. DEM 해상도와 유역 평균 지형경사와의 관계

산량 표준편차가 각각 3.4mm/yr, 2.9mm/yr, 0.7 mm/yr 로 나타났으며, Topo Slope를 적용한 모의에서는 표준편차가 각각 4.9mm/yr, 4.2mm/yr, 1.1mm/yr 로 나타난다.

증발산 성분에서는 발산량 보다 증산량의 증가가 두드러지게 나타난다. Topo Slope가 TIN Slope에 비해 전 해상도에 걸쳐서 지형경사가 대부분 작게 나온다. 이에 동일 해상도에서는 10m 해상도를 제외하곤 Topo Slope가 TIN Slope보다 지형경사가 작기 때문에 모의 증발산량은 작게 나타나고 모의 하천유출량이 TIN Slope 적용 시 보다 상대적으로 많이 모의되고 있다(표 3).

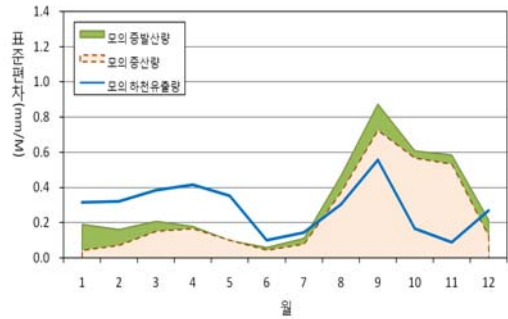


그림 5. TIN Slope 적용 시 해상도(10m - 100m) 변화에 따른 월별 물수지 모의 값 변화량에 대한 표준편차

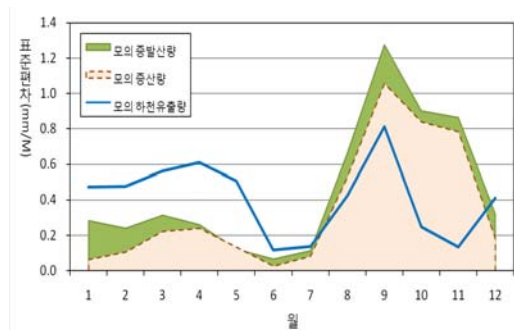


그림 6. Topo Slope 적용 시 해상도(10m - 100m) 변화에 따른 월별 물수지 모의 값 변화량에 대한 표준편차

표 3. TIN Slope와 Topo Slope의 각 해상도에서의 2003년~2006년 물수지 모의 결과

실측 하천 유출량 (mm/yr)	DEM 해상도 (m)	① TIN Slope 적용 시				② Topo Slope 적용 시			
		평균 지형경사 (°)	모의 하천유출량 (mm/yr)	모의 증산량 (mm/yr)	모의 발산량 (mm/yr)	평균 지형경사 (°)	모의 하천유출량 (mm/yr)	모의 증산량 (mm/yr)	모의 발산량 (mm/yr)
706.1	10	11.5	706.7	414.0	232.4	11.8	706.1	414.6	232.6
	20	10.6	711.6	409.7	231.4	10.2	710.1	411.0	231.7
	30	9.9	710.7	410.5	231.6	9.0	712.9	408.6	231.2
	40	9.3	712.2	409.2	231.3	8.2	715.0	406.9	230.7
	50	8.8	713.5	408.1	231.0	7.6	716.6	405.5	230.3
	60	8.3	714.6	407.2	230.8	7.0	717.8	404.5	230.1
	70	8.0	715.5	406.4	230.6	6.6	718.9	403.5	229.8
	80	7.6	716.4	405.7	230.4	6.2	719.7	402.8	229.6
	90	7.3	717.1	405.0	230.2	5.9	720.6	402.1	229.4
	100	7.0	717.8	404.5	230.1	5.6	721.2	401.5	229.3
	평균		8.8	713.6	408.0	231.0	7.8	715.9	406.1
표준편차		1.5	3.4	2.9	0.7	2.0	4.9	4.2	1.1

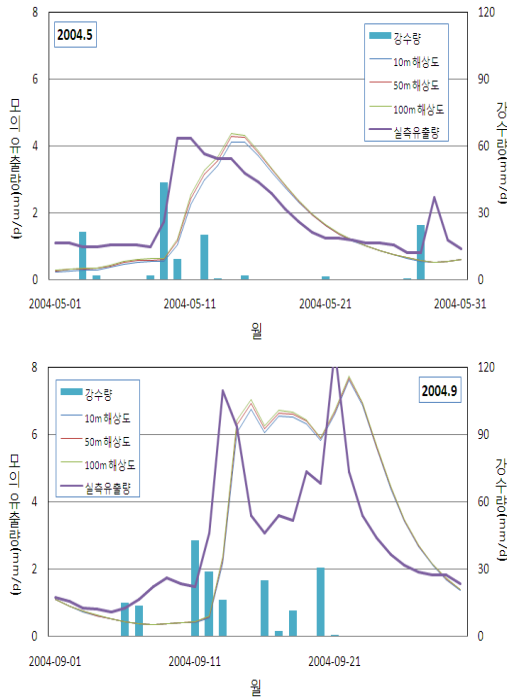


그림 7. TIN Slope 적용 시 해상도 별 2004년 5월, 9월의 일별 모의 유출량

해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다의 물수지 성분의 변화를 살펴보았다. 이를 위해 2003-2006년 기상자료를 이용한 모의 값 중에서 해상도에 따른 월별 물수지 성분 모의 값의 표준편차를 계산하였다. 그 변화를 살펴보면 TIN Slope와 Topo Slope 모두 9월 모의 하천유출량과 모의 증발산량의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다(그림 5, 6). 특히 모의 증

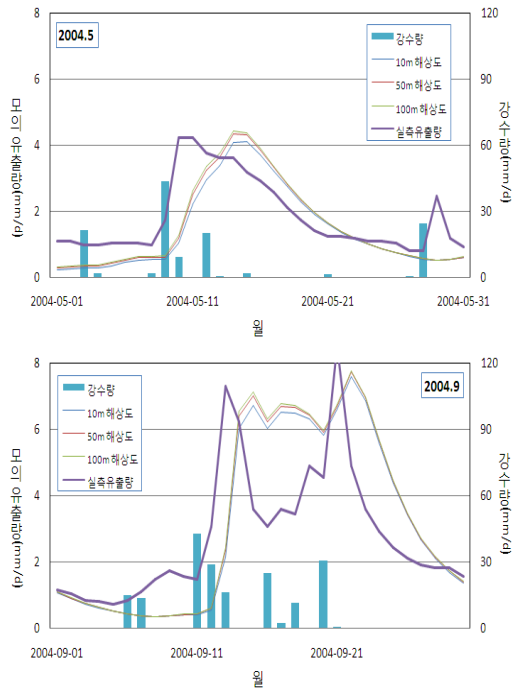


그림 8. Topo Slope 적용 시 해상도 별 2004년 5월, 9월의 일별 모의 유출량

발산량의 변화 중 모의 증산량이 차지하는 비율이 큰 것으로 나타났다. 계절적으로 봄철(3월~5월)엔 모의 하천유출량이, 가을철(9월~11월)엔 모의 증발산량의 변화가 다른 계절에 비해 상대적으로 크게 나타난다(표 4). 그림 7과 그림 8은 DEM 변화에 의해 모의 하천유출량의 변화가 가장 크게 나타나는 5월과 9월의 DEM 해상도 별 일별 모의 하천유출량을 나타낸 것이다.

표 4. TIN Slope와 Topo Slope 적용 시 해상도(10m - 100m) 변화에 따른 물수지 모의 값 변화량에 대한 계절별 표준편차

	TIN Slope 적용 시				Topo Slope 적용 시			
	봄 (3월~5월)	여름 (6월~8월)	가을 (9월~11월)	겨울 (12월~1월)	봄 (3월~5월)	여름 (6월~8월)	가을 (9월~11월)	겨울 (12월~1월)
모의 하천유출량 (mm/M)	0.4	0.2	0.3	0.3	0.6	0.2	0.4	0.5
모의 증발산량 (mm/M)	0.2	0.2	0.7	0.2	0.2	0.3	1.0	0.3

표 5. TIN Aspect와 Topo Aspect의 각 해상도에서의 2003년~2006년 물수지의 모의 결과(년평균)

실측 하천 유출량 (mm/yr)	DEM 해상도 (m)	① TIN Aspect 적용 시				② Topo Aspect 적용 시			
		평균 사면방향 (°)	모의 하천유출량 (mm/yr)	모의 증산량 (mm/yr)	모의 발산량 (mm/yr)	평균 사면방향 (°)	모의 하천유출량 (mm/yr)	모의 증산량 (mm/yr)	모의 발산량 (mm/yr)
706.1	10	138.4	710.5	410.6	231.7	179.4	705.4	415.2	232.7
	20	149.6	708.3	412.6	232.1	182.6	705.4	415.2	232.7
	30	154.9	708.3	412.6	233.0	182.5	705.4	415.2	232.7
	40	158.8	707.1	413.6	232.4	182.7	705.4	415.2	232.7
	50	161.8	706.8	413.9	232.4	182.3	705.4	415.2	232.7
	60	164.5	706.6	414.1	232.4	182.3	705.4	415.2	232.7
	70	166.5	706.5	414.3	232.5	182.3	705.4	415.2	232.7
	80	168.2	706.4	414.3	232.5	182.2	705.4	415.2	232.7
	90	169.7	706.3	414.4	232.5	181.9	705.4	415.2	232.7
	100	170.8	706.3	414.5	232.5	182.4	705.4	415.2	232.7
	표준편차		10.2	1.4	1.2	0.3	1.0	0.0	0.0

표 6. TIN Aspect와 Topo Aspect 적용 시 해상도(10m - 100m) 변화에 따른 계절별 물수지 변화량의 표준편차

	TIN Aspect 적용 시				Topo Aspect 적용 시			
	봄 (3월~5월)	여름 (6월~8월)	가을 (9월~11월)	겨울 (12월~1월)	봄 (3월~5월)	여름 (6월~8월)	가을 (9월~11월)	겨울 (12월~1월)
모의 하천유출량 (mm/M)	0.2	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
모의 증발산량 (mm/M)	0.1	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

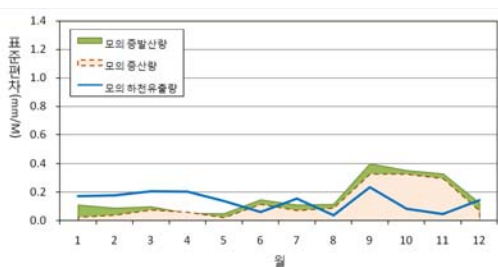


그림 9. TIN Aspect 적용 시 해상도(10m - 100m) 변화에 따른 월별 물수지 변화량의 표준편차

각기 다른 해상도의 TIN Aspect와 Topo Aspect를 적용하여 동일시기에 대하여 물수지

를 모의한 결과는 TIN Aspect에서 해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다 모의 하천유출량, 모의 증산량 그리고 모의 발산량의 표준편차가 각각 1.4mm/yr, 1.2mm/yr, 0.3mm/yr 로 나타난다. 반면 Topo Aspect를 적용한 실험에서는 물수지에서 변화가 나타나지 않았다. TIN Aspect에서는 사면방향이 남동방향에서 남향으로 갈수록 모의 하천유출량이 감소하고 모의 증발산량이 증가하며, 모의 발산량 보다 모의 증산량에서의 증가가 주로 나타난다(표 5).

해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다 해상도에 따른 월별 물수지 성분 모의 값의 표준편차 변화량을 월별로 살펴보면, Topo Aspect에서는 변화가 없었으며, TIN Aspect에서는 9

월의 모의 하천유출량과 모의 증발산량의 변화가 가장 크게 나타났다(그림 9). 계절적으로는 가을철(9월~11월) 모의 증발산량의 변화가 다른 계절에 비해 상대적으로 크게 나타난다(표 6).

3. 결과 고찰

위의 결과를 정리해 보면, DEM의 해상도가 낮아질수록 평균 지형경사는 감소한다. 본 연구에서는 평균 지형경사가 낮아질수록 모의 하천유출량은 증가하며 모의 증발산량은 감소하고 있다. 특히 모의 증발산량의 감소가 두드러지게 나타나고 있다.

DEM의 해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다 나타나는 유역 평균 지형경사의 변화는 봄철(3월~5월)과 가을철(9월~11월)의 물수지 성분의 변화로 나타나고 있으며, 특히 9월에 가장 큰 변화가 나타난다. 한편 TIN 방법으로 DEM을 제작하였을 때는 Topo To Raster 방법으로 DEM을 제작하였을 때 보다 동일 해상도에서 유역 평균 지형경사가 대체로 크게 나타나고 있다. 따라서, 동일 해상도에서 TIN 방법으로 획득한 유역 평균 지형경사를 적용하는 경우에는 Topo To Raster 방법보다 상대적으로 많은 증발산량과 적은 모의 유출량을 모의하는 경향이 있다. 해상도가 10m 간격으로 변화할 때마다 나타나는 유역 평균 지형경사의 변화는 Topo To Raster 방법을 사용할 때가 TIN 방법을 사용하였을 때보다 크게 나타난다. 즉, 해상도가 바뀔 때마다 나타나는 물수지 성분의 변화는 TIN 방법보다 Topo To Raster 방법을 사용하여 획득한 DEM을 모의에 사용할 때 더욱 크게 나타난다.

한편, DEM의 해상도가 낮아지면 평균 사면 방향에도 변화가 나타난다. TIN 방법으로 DEM을 제작하는 경우에는 해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다 평균 사면방향의 변화가 크게 나타났다. 그러나 Topo To Raster 방법을 사용할 때에는 평균 사면방향의 변화가 거

의 없다. 연구지역에서는 TIN 방법으로 제작한 DEM의 해상도를 10m 간격으로 낮출수록 평균 사면방향이 남동방향에서 남향(시계방향)으로 움직이는 경향이 있다. 연구지역의 평균 사면방향이 남동방향에서 남향으로 이동할수록 모의 하천유출량이 감소하고 모의 증발산량은 증가한다. 특히 DEM 해상도가 10m 간격으로 바뀔 때 마다 가을철(9월~11월)의 모의 증발산량의 변화가 다른 시기의 변화보다 상대적으로 크다.

이상의 결과를 통해, 국립지리원에서 제작한 1:25,000 축척의 수치지형도를 이용하여 물리 결정 일괄 매개변수 수문모형 연구에 사용할 DEM을 제작할 경우, TIN 방법과 Topo To Raster 방법 두 가지 중 고민하고 있다면, TIN 방법보다는 Topo To Raster 방법으로 DEM을 제작함이 좋을 듯하다. Topo To Raster 방법의 경우에는 해상도가 바뀔 때 마다 사면방향의 변화가 나타나지 않는 반면에 이 방법은 해상도 차이에 민감하게 지형경사도 값의 차이를 나타내기 때문이다. 한편, 1:25,000 수치지형도의 DEM을 이용하고 물수지 모델링을 위한 최적 해상도를 찾는다면 건설교통부(2001), 김연준과 신계종(2002), 이근상 등(2003)의 여러 선행연구자가 적정하다고 제시한 해상도인 10m~30m 해상도 내에서 물수지를 모의한 결과를 실측치와 비교하여 연구지역을 위한 최적 해상도를 정하는 것이 합리적이다.

본 연구지역에서 평균 지형경사가 높아질수록 증발산량이 증가하고 하천유출량이 감소하는 원인은 한반도와 같은 중위도 지역의 경우 동일 조건에서는 경사지의 직달복사량(direct solar radiation)이 수평 지표면의 직달복사량보다 많은 것이 일반적이기 때문이다. 신선희 등(2006)은 평균 지형경사가 높아짐에 따라 직달복사량과 지표면 온도가 증가한다고 하였다. 이러한 대기 과학적 연구결과를 Penman-Monteith 공식을 개량한 Shuttleworth과 Wallace(1985)

공식이 증발산 모듈인 BROOK90 물수지 Model을 이용한 본 연구를 통하여 다음과 같이 수문학적으로 확인할 수 있다.

BROOK90 Model은 잠재 직달복사량 계산을 위하여 지역의 평균 지형경사각에 해당하는 가상의 위도를 찾는다. 이 가상 위도(지형경사각 상당 수평면 위도, the latitude of equivalent slope)는 다음 식 7과 식 8인 Swift(1976)의 계산법을 이용하여 계산된다. 이 Swift(1976)의 공식엔 연구지역의 위도(Lat), 평균 지형경사도(Slope)와 평균 사면의 방향(Aspect)이 입력 매개변수로 이용된다(Federer, 1995).

$$L1 = \text{ASIN}[\text{COS}(\text{Slope}) \times \text{SIN}(\text{Lat}) + \text{SIN}(\text{Slope}) \times \text{COS}(\text{Lat}) \times \text{COS}(\text{Aspect})] \quad (7)$$

$$L2 = \text{ATAN}\{\text{SIN}(\text{Slope}) \times \text{SIN}(\text{Aspect}) / [\text{COS}(\text{Slope}) \times \text{COS}(\text{Lat}) - \text{SIN}(\text{Slope}) \times \text{SIN}(\text{Lat}) \times \text{COS}(\text{Aspect})]\} \quad (8)$$

L1 : 지형경사각 상당 수평면 위도(the latitude of equivalent slope)

L2 : 시간각(경도) 차이(difference in hour angle (longitude) between the two locations)

위의 식 7과 식 8을 통해 구한 L1과 L2값은 사면에서의 낮 시간 동안의 잠재 직달복사량을 계산하는데 사용되고, 잠재 직달복사량은 Shuttleworth-Wallace 공식에서 사용된다. 이 때 한반도의 경우에는 경사지가 잠재 직달복사량이 평탄지 보다 많이 계산된다. 이에 따라 증산량이 많아지고 물수지에서 하천 유출량의 비율이 작아진다.

또한, 지표수 유출보다 지하수 유출이 많기 때문이다. 지표수 유출이 많다면 지형경사의 영향을 직접적으로 받아서 하천유출량이 늘었을 것이다. 연구지역인 병천천 유역의 토양층 내에서 물 흐름은 수평적인 물의 흐름(토양수 유출)보다는 토양층 경사도의 영향을 받지 않는 수직적인 물의 흐름(지하수 함양량)이 지배

적이기 때문이라고 판단된다. 연구지역 토양층에서의 물의 흐름에 대한 정확한 진단을 위해서는 병천천 유역에 대한 빗물과 지하수 등에 대한 방사성 동위원소 분석 연구가 필요할 것이다. 다만, 방사성 동위원소 분석 결과에 기초한 KIM(1997), Herrmann et al.(1997)의 연구에서는 독일 중북부 하르쯔 산림지역과 북부독일 하이데 농작지대 평원의 경우 강물은 그 성분 중 70~93%가 지하수층을 통해 유출된 물 즉, 지하수이다. 병천천 유역의 토양수와 지하수 흐름도 이 범주에 들어간다면 유역의 지형 경사도가 커질 때 하천유출량이 증산량 증가에 따라 적어지는 현상은 수문학적으로 자연스런 일이 된다.

모의 유출량과 모의 증산량의 변화는 봄철과 가을철에 상대적으로 크게 발생한다. 지표면에서의 지형경사도에 따른 직달복사량 변화의 영향력이 홍수기(강수가 집중되는 여름철)와 갈수기(강수가 드물고 잎이 진 겨울철)보다는 증산과 관련하여 평수기(봄철과 가을철)의 물수지에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

이상의 실험을 통해서 DEM의 해상도가 10m 간격으로 바뀔 때마다 평균 지형경사와 평균 사면방향 모두 변화하고 있으며 이는 물수지 모의에 영향을 미치고 있는 것을 확인할 수 있다. BROOK90 물리 결정 일괄 매개변수 물수지 모델링의 경우 특히 지형경사도에 따라 증산량이 민감하게 반응하였다. 따라서 물리 결정 일괄 매개변수 물수지 모델링의 경우도 그 유역에 가장 적합한 DEM 해상도를 찾는 일이 중요하다.

결론

병천천 유역의 DEM을 제작하고, DEM의 해상도가 달라짐에 따라서 유역 평균 지형경사와 유역 평균 사면방향이 어떻게 달라지는지, 그리고 이 차이는 물리 결정 일괄 매개변수 물수지 모델인 BROOK90의 물수지 모의

결과에 어떤 영향을 미치는 지 연구한 내용과
적정한 DEM 제작방법의 제안 내용은 다음과
같다.

- ① 평균 사면방향은 TIN 방법으로 제작한
DEM에서 해상도가 10m 간격으로 바뀔
때 마다 사면방향이 어느 정도 변화한
다. 이에 반해 Topo To Raster에서는
변화가 거의 없다.
- ② 연구지역에서의 평균 사면방향은 TIN
방법에서 DEM의 해상도가 낮아지면 남
동방향에서 남향으로 이동하는 경향이
있는데, 이는 하천유출량을 감소시키고
증발산량을 증가시킨다.
- ③ Topo To Raster 방법보다 TIN 방법으
로 DEM을 제작하였을 때 지형경사도가
전체적으로 크게 나타난다. 그러나 지형
경사도의 변화율은 Topo To Raster가
TIN보다 크다. 이에 따라 DEM 제작방
법은 Topo To Raster 방법으로 할 것을
제안한다.
- ④ 유역 평균 지형경사도가 커지면 증발산
량 중 증산량이 주로 증가한다. 토양에
서의 발산량 증가는 그에 비하면 훨씬
적다. 이에 따라 하천유출량은 감소한다.
이러한 모의 결과는 연구지역의 토양층
에서는 수직적인 물의 흐름이 수평적인
물의 흐름보다 지배적이라는 것도 의미
한다.

본 연구를 통해 물리 결정 일괄 매개변수
물수지 모델링의 경우도 지형경사도에 따라
증산량이 민감하게 반응한다는 것을 알 수
있었다. 따라서 물리 결정 일괄 매개변수 물수지
모델링 시에도 그 유역에 가장 적합한 DEM
해상도를 찾는 것이 중요하다. 1:25,000 수치지
형도의 DEM을 이용할 경우, 건설교통부
(2001), 김연준과 신계중(2002), 이근상 등
(2003)의 여러 선행연구자가 적정하다고 제시
한 해상도인 10m, 20m, 30m 해상도로 각각
모의(simulation)한 결과를 실측 하천유출량

등과 비교하여 해상도를 정함이 합리적이라고
판단한다. 해상도가 그 이상 커지면 유역의 평
균경사를 현실대로 반영하지 못하고, 이 결과
는 연구 유역의 잠재 적달복사량과 토양수 유
동 계산 등에 영향을 미치기 때문이다.

註

- 1) MBE(Mean Bias Error, 연간 일 평균 편
중 오차) : 실측된 유출량 일평균(M)과
모의된 유출량 일평균(S)의 차이이다.
MBE는 S와 M이 각각의 날에 1:1이 되어
야 하면, 실제 모의된 값은 그 경향을 얼
마나 나타내고 있는지를 보여준다. ALL
ALL MBE는 유역에서 지하수 깊이 침투
되어 다른 유역으로 빠져나가는 물이 없
다면 일일 증발 오류이다(Federer, 2002).
일반적으로 *a priori* 모의 결과의 ALL
ALL MBE가 0.05mm/d 이하로 나오면, 이
모델은 fitting parameter 조작을 적게 하
거나 fitting parameter 조작 없이도 의미
있는 모의실험을 수행하는 것이다(김만규,
2008a).
- 2) 수치지형도의 표고자료들에서 나타나는
일반적인 표고 기록의 오류들에는 산정상
부의 표고점이 0m로 기록되어 있거나 동
일한 등고선에서 서로 다른 표고가 기록
되어 있는 경우 등이 있다.

감사의 글

본 논문에 들어간 그림의 제작과 문장 교정
을 도와준 공주대학교 대학원 지리정보학과
석사과정 유충현 군과 공주대학교 인문사회과
학대학 지리학과 이성우 군 그리고 김유미 양
에게 감사의 마음을 전합니다. **KAGIS**

참고 문헌

- 건설교통부. 2001. 한국지형에 적합한 수치표고자료 구축방안. 1-178쪽.
- 김만규. 2008a. 충청도 병천천 유역에 대한 '물리 결정 물수지 모델 - BROOK90'의 지형, 식생, 토양 parameter 획득 연구와 a priori simulation 결과 해석. 한국지형학회지 15(1): 37-52.
- 김만규. 2008b. 물리 결정 모델링에 의한 충청도 병천천 유역의 하천 유출량 복원과 물수지 수립. 한국지형학회지 15(2):37-53.
- 김연준, 신계중. 2002. DTED와 1:50,000 수치지형도에 의한 격자 DEM의 지형 매개변수 비교. 한국지리정보학회지 5(3):19-32.
- 박운용, 이기철, 이인수, 김진수. 2000. 비 측정용 주사기를 사용한 수치표고모델의 자동생성에 의한 수치정사사진 제작. 한국지리정보학회지 3(2):24-36.
- 박진형, 이관수, 이삼노. 2004. DEM의 정확도 분석에 의한 도시 소유역의 유출해석. 한국지리정보학회지 7(1):28-38.
- 손일. 1986. 소유역분지의 홍수특성과 지형변수와 의 관계. 대한지리학회지 21(1):13-25.
- 신선희, 이영선, 하경자. 2006. 중규모 기상모형에서 지표면 경사를 고려한 직달 복사량의 효과, 한국지리정보학회지 9(4):45-59.
- 양해근. 2004. 도시화에 수반되는 광주천 유역의 물수지 변화. 한국지역지리학회지 10(1):192-205.
- 연상호. 2000. 위성영상을 이용한 춘천지역의 3차원 입체영상지도 생성에 관한 연구. 한국지리정보학회지 3(4):1-10.
- 이근상, 고덕구, 채효석, 신영호. 2003. 항공레이저 측량 자료의 해상도에 따른 DEM 오차 비교평가 연구. 한국지리정보학회지 6(3):33-42.
- 이근상, 고덕구, 김우구. 2004. 수치지형도를 활용한 홍수지도 제작용 지형자료의 효과적인 구축방법 연구. 한국지리정보학회지 7(1):52-61.
- 이병환, 김정희, 박경환, 정일훈. 2000. 고해상도 위성영상을 이용한 축척 1/10,000 수치지도 제작. 한국지리정보학회지 3(2):11-23.
- 한국건설기술연구원. 2001. 국가기반 수치표고자료 구축 및 작업지침 연구. 47-80쪽.
- 홍준범, 김병식, 윤석영. 2006. VfloTM 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가. 대학토목학회논문집(수공학) 26(6B):613-622.
- Beven, K. 1997. TOPMODEL: a critique. *Hydrological Processes* 11(9):1069-1089.
- Bruneau, P., C. Gascuel-Oudou, P. Robin, P. Merot and K. Beven. 1995. Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data. *Hydrological Processes* 9:69-81.
- Federer, C.A. 1995. BROOK90: A simulation Model for Evaporation, Soil Water, and Streamflow. Version 3.1 Computer freeware and documentation. USDA Forest Service, P.O. Box 640, Durham, N.H. 03824. pp.1-45.
- Federer, C.A. 2002. BROOK90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. Documentation for version 4 and 3.2/3/4. <http://home.maine.rr.com/stfederer/b90doc.htm>.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, Ch., Todini, E. 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *Journal of Hydrology* 175(1/4):293-338.
- Herrmann, A., M. K. Kim & J. Buchtele. 1997. Runoff formation, water balances and runoff components from rainfall-runoff models for a small agricultural basin with irrigation in quaternary northern Germany. - Proc. ERB Conf. on Ecohydrological Processes in Small Basins, Strasbourg, 24-28. Sept. 1996, Tech. Doc. in Hydrol., UNESCO, Paris
- Hutchinson, M. F. 1993. Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In *Environmental Modeling with GIS* ed. M.F. Goodchild et al., pp.392-399.
- Hutchinson, M. F. and T. I. Dowling. 1991. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes* 5:45-58.
- Hutchinson, M.F. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Third International Symposium on Spatial Data Handling*. Sydney. Aug. pp.117-133.

- Hutchinson, M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106:211-232.
- Man Kyu KIM. 1997. Klima- und Landnutzungsänderungen und deren hydrologischen Auswirkungen im Harz und Harzvorland - Wasserhaushaltsmodellierung mit modifiziertem Programmpaket BROOK90(BROOKTOP). Institut fuer Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig. ISSN 0170-7299.
- Murray, F.W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteorol.* 6:203-204.
- Lazzarotto, C.P. Stamm, V. Prasuhn and H. Flühler. 2006. A parsimonious soil-type based rainfall-runoff model simultaneously tested in four small agricultural catchments. *Journal of Hydrology* 321(1/4):21-38.
- Romanowicz, A.A., M. Vanclouster, M. Rounsevell and La I. Junesse. 2005. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological modelling* 187(1):27-39.
- Roshan Shrestha, Yasuto Tachikawa and Kaoru Takara. 2006. Input data resolution analysis for distributed hydrological modeling. *Journal of Hydrology* 319(1/4):36-50.
- Swift, L.W. Jr. 1976. Algorithm for solar radiation on mountain slopes. *Water Resour. Res.* 12:108-112.
- Vazquez, R.F. and J. Feyen. 2007. Assessment of the effects of DEM gridding on the predictions of basin runoff using MIKE SHE and a modelling resolution of 600m. *Journal of hydrology* 334(1/2):73-87.
- Widen-Nilsson, E. Halldin, S. Xu, C.y. 2007. Global water-balance modelling with WASMOD-M: Parameter estimation and regionalisation. *Journal of hydrology* 340(1/2): 105-118.
- Wolock, D.M. and C.V. Price. 1994. Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model. *Water Resources Research* 30(11):3041-3052.
- Zhang, W. and D.R. Montgomery. 1994. Digital elevation model grid size, land-scape representation and hydrologic simulations. *Water Resources Research* 30(4):1019-1028. **KAGIS**