

TOPMODEL의 대유역 유량 산정시 지형지수의 영향

Topographic Index Effects of TOPMODEL for Flow Computation in a Large Basin

김진훈* · 배덕효** · 권원태***

1. 서론

홍수예보, 가뭄해석, 수자원 계획등 여러 분야에 응용되는 강우에 의한 유출현상을 규명하기 위해서 과거에는 집중형 모형에 대한 연구가 많이 수행되었지만 최근에는 지형특성을 표현하는 많은 기법들의 개발로 분배형 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그들 가운데 유출에 영향을 미치는 지형특성을 지형지수(topographic index)의 분포로 표현하는 TOPMODEL(Beven과 Kirkby, 1979)은 국외뿐만 아니라 국내(조홍제 등, 1997; 김상현, 1997)에서도 적용되어 모형의 우수성이 검토된 바 있다. 그러나 이러한 대부분의 연구들은 주로 소유역에서 검토된 지역적 제약성을 가지고 있다. 본 연구에서는 TOPMODEL을 대유역에 확장 적용시 지형지수가 유출량 산정에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 지형지수

지형지수는 TOPMODEL에서 지형의 특성을 대표하는 인자로서 DEM(Digital Elevation Model)자료로부터 유역내의 각 단위 등고선 길이당 경사면적 a 와 경사 $\tan\beta$ 로 계산할 수 있는데, a 의 계산을 위해서는 각 격자로 배수되는 전체면적(A)과 등고선 길이(C)의 계산이 선행된다($a = A/C$). 지형지수를 계산하는 알고리즘은 임의의 격자로부터의 흐름은 단 하나의 최고 급경사 방향으로 발생한다는 SFD(Simple Flow Direction) 알고리즘과 모든 경사 방향으로 발생한다는 MFD(Multiple Flow Direction) 알고리즘이 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 MFD 알고리즘을 사용하였으며, 그 기본 개념은 다음과 같다.

MFD 알고리즘은 SFD 알고리즘과 달리 대상 격자의 인접 격자의 표고가 대상 격자의 표고보다 낮은 값이 하나 이상 존재하면 모든 경사방향으로 경사면적을 계산하며 그 순서는 다음과 같다.

- (가) 각 격자의 경사면적 초기값으로 각 격자 면적이 사용된다.
- (나) 계산 시작점의 격자는 가장 높은 고도값을 가지는 격자이며, 이 격자를 중심으로 주변의 4개 주방향 격자와 4개 대각 방향 격자로 경사면적의 계산이 이루어진다. 경사방향 주변격자와의 관계에서 하류방향의 경사도에 비례하는 단위면적당 등고선길이의 합

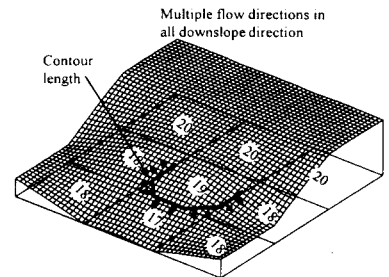


그림 1. MFD 개념도

* 창원대학교 토목공학과 석사과정

** 창원대학교 토목공학과 조교수

*** 기상연구소 예보연구실 연구관

은 다음 식 (1)로 계산된다.

$$C_w = \sum_{i=1}^n (\tan \beta_i C_i) \quad (1)$$

여기서 $\tan \beta_i$ 는 흐름방향의 결정으로 인해 계산되는 경사도이고, C_i 는 흐름방향으로 인한 등고선의 길이로서 정방향 격자에 대해서 주방향 흐름(cardinal direction)에서는 격자간격의 50%, 대각방향 흐름(diagonal direction)에서는 격자간격의 35.4% 이다.

(다) 흐름에 기여한 상류 격자는 하류의 주변 격자에 다음 식 (2)와 같이 분배된다.

$$\Delta A_i = A \frac{\tan \beta_i C_i}{\sum_{i=1}^n \tan \beta_i C_i} \quad (2)$$

여기서 ΔA_i 는 해당 격자점에서 인접 격자 i 에 기여되는 배수 면적을 나타내며, 이는 모든 하향흐름 방향의 이전 A 값에 계속해서 누가된다.

(라) 각 격자점에서의 지형지수 $\ln(a/\tan \beta)$ 값은 다음 식 (3)으로 계산된다.

$$\ln \left[\frac{a}{\tan \beta} \right] = \ln \left[\frac{A}{C_w} \right] = \ln \left[\frac{A}{\sum_{i=1}^n C_i \tan \beta_i} \right] \quad (3)$$

이와 같은 계산과정은 처음 최상류로부터 시작하여 하류 방향의 각 격자에서의 지형지수 $\ln(a/\tan \beta)$ 값을 계산한다.

3. TOPMODEL

개념적으로 복잡한 유역 유출 수문과정을 모의하기 위한 TOPMODEL의 기본 개념은 다음과 같다. 첫째, 유역내 포화층의 거동은 정상상태의 표현으로 접근한다. 둘째, 유역내 포화층의 동수경사는 지표면 지형경사인 $\tan \beta$ 와 동일하다. 셋째, 포화층 내의 거동은 Darcy 법칙을 따르며, 여기에서의 투수계수는 토양수분 부족량 혹은 지하수면 깊이의 지수함수로 감소한다. 위의 세 가지 기본 개념을 근거로 다음 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$q_i = T_{0i} \tan \beta e^{-fz_i} = P a \quad (4)$$

여기서 q_i 는 임의점 i 에서 단위 등고선 길이당 포화층내의 유량, T_{0i} 는 포화상태의 투수량 계수, $\tan \beta$ 는 지표면 경사도, f 는 모형의 매개변수, z_i 는 임의점 i 에서 지하수면의 깊이, P 은 공간적으로 일정한 충전량, a 는 단위 등고선 길이당 경사면의 면적이다. 식 (4)에서 투수량 계수 T_0 가 유역내에서 일정하고 지하수면 깊이의 항을 토양수분 부족량 형식으로 표현해서 정리하면 식 (5)와 같이 임의의점에서 토양수분 부족량 S_i 를 유도할 수 있다.

$$S_i = \bar{S} + m \left(\lambda - \ln \frac{a_i}{\tan \beta_i} \right) \quad (5)$$

여기서 \bar{S} 는 유역 평균 토양수분 부족량이고, m 은 모형의 매개변수, $\ln(a_i/\tan \beta_i)$ 는 지형지수이고, λ 는 지형지수의 유역내 평균값이다. 식 (5)의 S_i 는 모형에서 유출을 계산하는 지표면씩 유역에서 $S_i < 0$ 이면 토양수분이 포화됨을 의미한다. 유역에서 $S_i < 0$ 인 면적을 기여면적(contributing area)이라 하고 이곳에 내리는 모든 강우는 지표유출로 계산된다. 지표유출의 또 다른 형태는 강우강도가 침투능(infiltration capacity)보다 클 때

발생하며, 이는 Philip 공식에 의해 계산될 수 있다. 총 지표유출량은 기여면적에 내리는 강수량(saturation excess overland flow)과 침투능 초과 강수량(infiltration excess overland flow)의 합으로 계산된다. 그림 2는 2장에서와 같이 유역내 각 격자점에서 산정한 지형지수 값을 지형지수 증가분수에 대한 반도해석 결과로 증가분(increment) 형식으로 표현함으로써 하나의 증가분에서 수문학적 거동특성은 같다는 것을 함축한다. 증가분의 각 요소들은 불포화층과 포화층으로 크게 분류되고 불포화층에서 포화층으로의 배수는 다음 식 (6)으로 표현된다.

$$q_v = \frac{S_{uz}}{S_{it_d}} \quad (6)$$

여기서 S_{uz} 는 불포화층(gravity drainage zone)의 토양수분, t_d 는 시간상수이다. 한편 포화층(saturation zone)에서의 흐름은 기저유출(base flow)을 의미하며, 이는 길이가 l 인 m개의 하천에서 지하수의 합계로 분산되었다는 개념하에 다음 식 (7)과 같이 계산된다.

$$Q_b = \sum_{j=1}^m l_j (T_0 \tan \beta) e^{-\frac{S_j}{m}} \quad (7)$$

이상과 같이 총 유출량은 지표유출과 기저유출의 합으로 산정된다.

4. 사례연구

TOPMODEL의 대유역 적용시 지형지수의 영향을 검토하기 위해서 연구대상 유역은 2,703km²의 유역면적을 갖는 소양강 댐 상류유역을 선정하였다(그림 3). 소양강은 총 유로연장 166.2km로써 한강수계를 형성하는 북한강의 최대 지류이며 오대산(EL. 1,563m) 부근에서 발원하여 남으로 유하하다가 춘천시 남북방에서 북한강과 합류한다. 소양강 댐은 북한강 합류지점에서 12km떨어진 소양강 계곡에 위치한 높이 123m, 댐 길이 530m, 체적 약 9,600,000m³의 사력댐으로서 홍수기에 자연 유하량을 저류하여 갈수기에 서서히 유하시킬 수 있는 홍수조절 능력을 갖추고 있다.

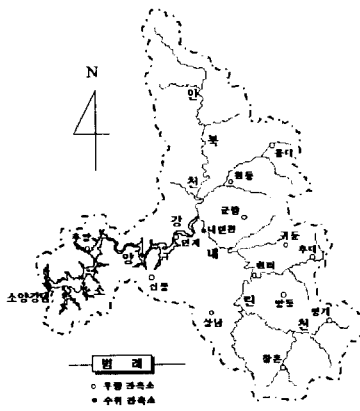


그림 3. 소양강 상류 유역도

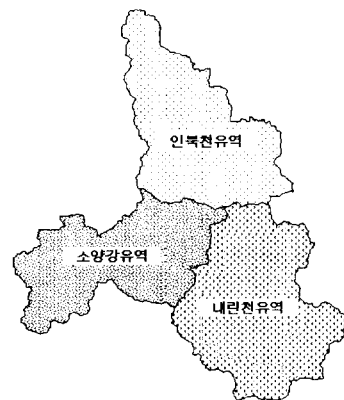


그림 4. 소양강 유역분할도

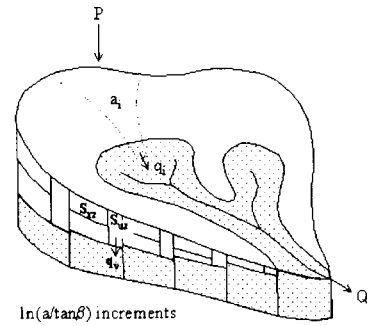


그림 2. 토양수분 산출 개념도

그림 3과 같이 본 연구대상 유역에는 한국수자원공사에서 운영하는 서화, 원통, 현리, 창촌, 인제, 추양, 용대, 군량, 상남, 신평 등 12개의 자기 우량관측소가 있으며 내리천, 소양강댐 수위 관측소가 있다. 또한 증발 자료는 인근 춘천 및 인제 축후소의 증발접시 증발량 자료를 이용할 수 있다.

표 1. 지형지수 통계분석

유역 동계	인북천	내리천	소양강	전체상류유역
평균	7.2878	7.1565	7.1734	7.2321
표준편차	7.7758	7.0504	7.6918	10.2675
왜곡도	-0.8542	-0.9071	-0.8506	-0.6733

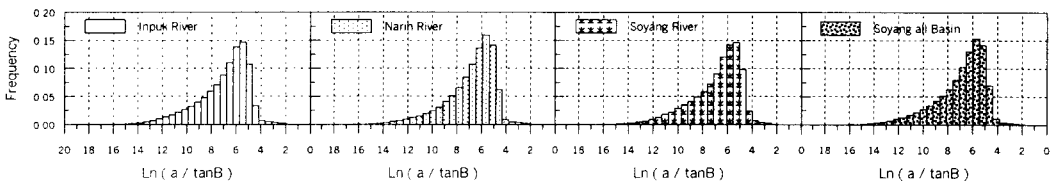


그림 5. 소구역별 지형지수 빈도분포도

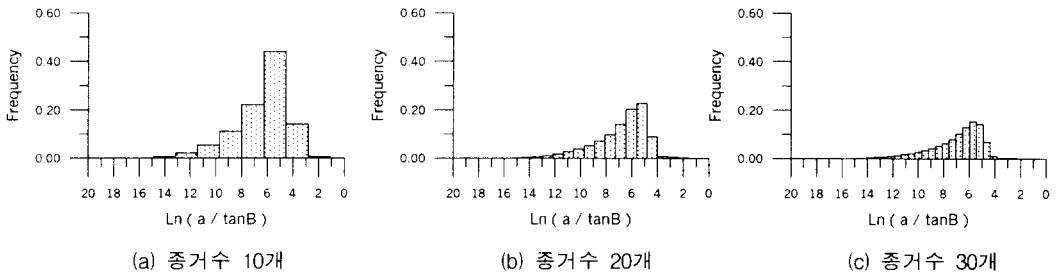


그림 6. 지형지수 종거수에 따른 빈도분포도

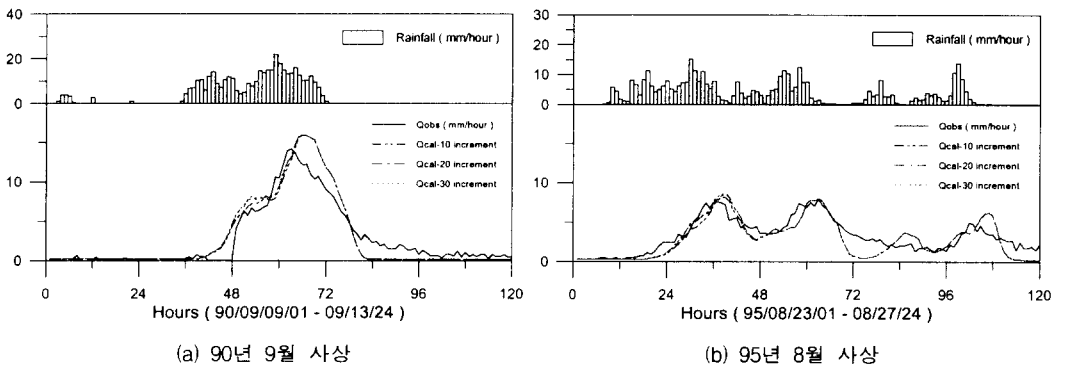


그림 7. 지형지수 종거수에 따른 유량산정 결과

TOPMODEL을 적용하기 위해서는 지형지수 분포의 산정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 소양강 상류유역이 대유역이라는 점을 감안하여 전체 유역을 그림 4와 같이 세 개의 소유역으로 분할하고 각 유역의 지형지수에 대한 분포특성을 규명하였다. 이를 위해 위·경도 3" 단위의 DEM 자료로부터 격자간격 100m의 정방향 DEM 자료를 생성하여 인북천, 내린천, 소양강, 그리고 소양강 상류유역 전체를 대상으로 각각의 격자점에 대한 지형지수 값을 산정하여 분할된 소유역들과 전체 유역과의 차이를 비교하였다. 각 유역의 지형지수 자료값에 대한 통계적 분석결과는 표 1과 같이 평균, 표준편차, 왜곡도에 있어서 유사한 경향을 나타내었고, 여기에서 전체유역의 표준편차는 유역면적의 크기에 기인해서 다소 높은 값으로 나타났다. 또한 실제 TOPMODEL의 입력치로 요구되는 빈도곡선은 그림 5에서와 같이 네 경우 모두 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 본 연구의 TOPMODEL 대유역 적용시 지형지수가 유출량 산정에 미치는 영향 검토는 소양강 상류유역 전체를 대상으로 수행하였으며, 모형의 매개변수는 90년 9월의 시단위 홍수사상을 이용하여 수동보정법으로 추정하였다. 이때 사용된 DEM의 격자간격은 200m, 지형지수 빈도분포의 종거수는 30개로 선정하였다.

지형지수 빈도분석에서 지형지수의 종거수를 10, 20, 30개로 설정하여 소양강 상류유역 전체를 대상으로 90년 9월과 95년 8월의 시단위 강우사상에 대하여 모형을 적용시켜 결과를 검토하였다. 그림 6은 종거수에 따른 지형지수의 빈도분포도를 나타내고 그림 7은 이에 따른 모형의 유량산정 결과를 나타낸다. 그림 6에서는 지형지수 종거수가 감소할수록 빈도의 크기가 증가하는 예상 가능한 결과를 나타내고 있으며, 그림 7은 지형지수 종거수가 10개인 경우 다른 수문곡선보다 곡선의 상승부에서 다소 다른 양상을 보여준다. 이것은 유역내에서 지형지수가 같다는 것은 수문학적 거동 특성이 동일함을 의미하므로 소양강과 같은 대유역을 수문거동 특성이 같은 10개의 구간으로 나눈다는 것은 다소 부적합한 조건으로 판단되며 이에 대한 결과가 그

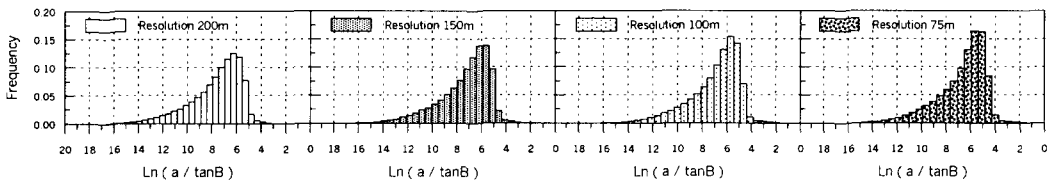
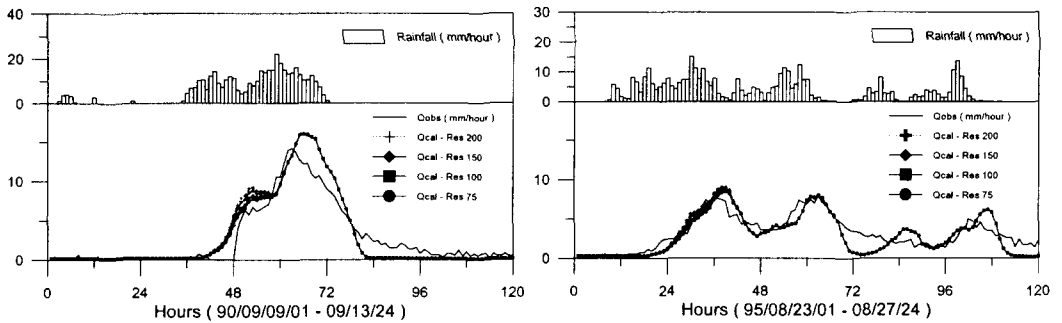


그림 8. 격자간격에 따른 지형지수 빈도분포도



(a) 90년 9월 사상

(b) 95년 8월 사상

그림 9. 격자간격에 따른 유량산정 결과

림 7에서와 같이 나타났다. 이상과 같이 지형지수 종거수가 모형에 미치는 영향은 미약하지만 모형의 대유역 적용시 지형의 대표 인자가 지형지수라는 점을 감안하여 지형지수의 종거수를 최대한 고려하는 것이 모형의 유량산정에서 효율적일 것이다.

한편 대유역에서 DEM 자료의 격자간격이 지형지수와 유량산정에 미치는 영향을 검토하기 위해 소양강 상류유역 전체에 대하여 75, 100, 150, 200m의 정방형격자의 DEM 자료를 IDRISI 소프트웨어를 사용하여 생성하였다. 그림 8은 지형지수의 종거수를 30개로 고정한 경우 DEM 격자간격에 따른 지형지수 빈도분석 결과를 나타내며, 그림 9는 90년 9월과 95년 8월 홍수사상에 대한 유량산정 결과를 나타낸 것이다. 그림 8에서는 격자간격이 감소할수록 지형지수가 낮은 값에서 다소 높은 빈도가 나타나는 것을 알 수 있다. 지형지수가 낮다는 것은 유역의 높은 고도의 지형을 의미하므로 격자간격이 감소할수록 고지대의 표현이 상대적으로 명확해진다고 해석할 수 있다. 이것은 강우의 시간적 변동성에 따라 지하수면의 변화를 더욱 정밀하게 표현할 수 있음을 의미하므로 그림 9에서와 같이 토양수분의 불포화상태에서 포화상태로 변하는 유출곡선의 상승부에 다소 영향을 미치나, 토양수분이 완전히 포화된 침투유량 및 수문곡선의 하강부는 영향을 미치지 못하는 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 소양강 상류유역을 대상 유역으로 TOPMODEL의 대유역 적용시 지형지수가 유출량 산정에 미치는 영향을 검토하였다. 소양강 유역을 3개의 소유역으로 분할하여 지형지수에 대한 빈도분석을 검토한 결과 대상 소유역 모두 유사한 지형지수 분포를 갖는 것으로 나타났다. 이것을 토대로 소양강 상류유역 전체를 대상으로 지형지수 분포곡선의 종거수의 변화에 따른 유량산정 결과를 비교하였나 그 영향은 미약한 것으로 나타났고, DEM 격자간격의 변화에 따른 분석에서는 격자간격이 감소할수록 유역 고지대의 지형지수가 상대적으로 큰 빈도로 나타났고 이것은 모형에서 토양의 포화도 산정에 기여하여 유출 수문곡선의 상승부에 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정과제 약기상 감시예측 및 재해대응 기술개발(PD-01-01-01)과제의 일부로서 수행되었습니다.

참고문헌

조홍제, 조인륜, 김정식 (1997) "TOPMODEL을 이용한 강우-유출해석에 관한 연구", 한국수자원학회지, 제30권 제5호, pp. 515~526

김상현 (1997) "인공배수유역에서의 TOPMODEL의 적용", 한국수자원학회지, 제30권 제5호, pp. 539~548

Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) "A physically based variable contributing area model of basin hydrology", Hydrol. Sci. Bull., Vol. 24, No. 1, pp. 43~69.