

홍수유출예측에 있어서 분포모형과 집중모형의 비교분석

Comparative Analysis of Distributed model and Lumped model on Flood Flow Forecast

안선복*, Jia Peng**, 최은혁***, 지홍기****

An Shanfu · Jia Peng · Eun Hyuk Choi · Jee Hong Kee

요 지

본 연구에서는 홍수유출예측을 위해서 국제수문계획(IHP) 대표시험유역인 위천유역을 대상으로 집중모형인 HMS모형의 SCS단위도법과 분포모형인 TOPMODEL을 이용하여 홍수유출을 비교분석한 결과 TOPMODEL이 현실에 더욱 적합하였다. TOPMODEL의 매개변수는 물리적 의미를 가지고 있으며, 위천유역의 14개 호우사상으로부터 추정된 매개변수로 다른 5개 호우사상에 적용한 결과 홍수사상을 비교적 정확히 모의한 것으로 봐서 국내 홍수예경보모델의 일부로 사용될 때 그 역할을 훌륭히 수행할 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 홍수유출예측, 분포모형, 집중모형

1. 서 론

최근의 극심한 가상이변으로 인하여 하천유역에서 발생하는 이상홍수의 홍수유출과정에 대한 정확한 해석과 유출예측은 수자원의 효율적인 활용과 하천의 이수, 치수는 물론 친수관점에서 볼 때 자연하천관리에 매우 중요하다. 홍수유출을 해석하고 예측하기 위해서는 유역 내에서 발생하는 수문기상학적 요소와 유역의 특성인자들의 정확한 상호 관련성의 규명이 필요하다.

유역수문모형은 20세기 50년대부터 연구를 시작하여 반세기동안 각종 목적을 위하여 여러 가지 가정과 개념에 의해 발전되어 왔다. 최근 20년 동안 수문학 분야에서도 컴퓨터, 지리정보시스템, 원격탐사기 등 과학기술의 발전으로 인해 강우와 유출과의 물리적인 관계를 수학적으로 표현하여 해석하고자 하는 개념적 강우-유출 모형(Conceptual Rainfall-Runoff Model)들이 개발되었다. 수문모형은 유역의 물순환과정 중에서 증발, 침투, 지표유출, 지표하유출 혹은 하도유출 등에 대한 과정변수의 공간적 변화를 고려하는가의 여부에 따라 집중형 수문모형(Lumped Model)과 분포형 수문모형(Distributed Model)으로 구분하고 있다.

2. 분포모형의 기본이론

2.1 TOPMODEL의 이론 및 방법

TOPMODEL에서 묘사한 단위 격자(grid)의 수문운동과정은 그림 1과 같이 근저류부는 수문지질학중의 토양수대에 대응하고; 과도대 함수층에 대응하는 중간수대와 모관수대가 있으므로 저류 함수구조는 매우 강한 물리적 특성을 가지고 있다.

강우는 지면저류, 식생 및 낙엽낙지 층에 의한 차단을 그친 후 불포화토양층으로 침투된다. 불포화토양층

* 영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정 E-mail : asf0290@hanmail.net

** 영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정 E-mail : Jerzy.peng@gmail.com

*** 영남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 E-mail : hyuk1102@nate.com

**** 영남대학교 토목환경공학부 교수 E-mail : hkjee@yu.ac.kr

은 근저류부와 과도대 함수층으로 구분하고, 침투된 강우량은 직접 근저류부로 공급되며, 포화(농지 함수량 포화)된 후 밀층으로 침투된다. 동시에 근저류부에 저장되어 있는 토양수분은 일정한 속도로 갈수가 될 때까지 증발산이 일어난다. 과도대 함수층에서 일부분의 수분만 대기공간을 통과하여 직접 포화지하수층으로 유입되기 때문에 지하수위가 즉시 지표면까지 상승하지 않는다. 오직 이 층의 함수량이 중력배수 함수량을 만족하여야만 중력 작용 하에서 유동할 수 있다. 수직으로 배수 및 유역내의 사면 수분운동으로 하여 일부분 면적의 지하수가 지표면까지 상승하여 지표면 유출이 발생할 수 있는 포화기여면적이 생성된다(그림 2.2.2).

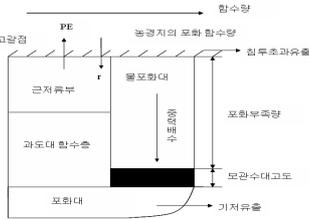


그림 1 TOPMODEL의 토양수분 변화 모식도

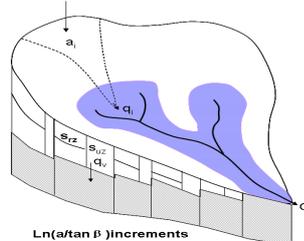


그림 2 토양수분 산출 개념도

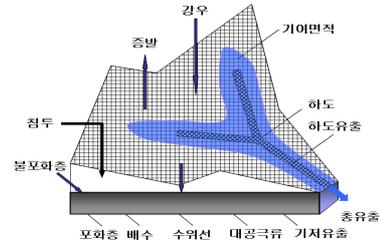


그림 3 TOPMODEL의 유역유출 운동

강우시 지표유출을 일으키는 유출기구(Runoff Mechanism)는 크게 침투초과유출(Infiltration Excess Runoff)과 포화초과유출(Saturation Excess Runoff)로 구분할 수 있다.

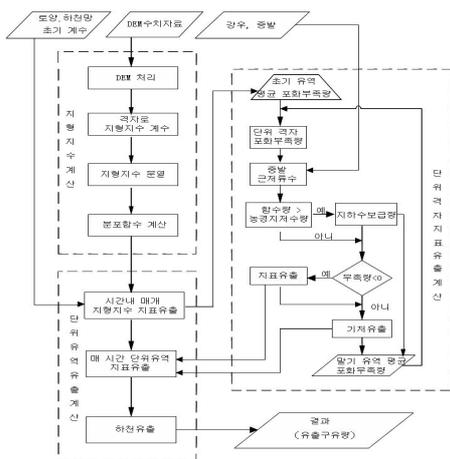


그림 4. 단위유역 유출과정 모식도

지하수 흐름이 집중되는 오목한 지형이나 갑자기 경사가 완만해지는 지역의 면적을 포화기여면적(Saturation Contributing Area)이라 한다. 포화기여면적의 위치는 유역의 지형 및 토양수리 특성의 영향을 받는다. 지하수가 사면으로 이동할 때 오목한 지형이나 경사가 완만한 지역을 중심으로 집중하게 되며, 지형의 평탄한 정도는 유역면적에서의 포화기여면적의 크기를 결정하고, 완만한 지역의 경사는 사면 아래로 계속 유동하는 능력에 영향을 준다. 또 토양수리특성, 수리전도도와 토양 깊이는 입점의 전도도를 결정하기에 수분이 아래로 계속 유동하는 능력에 영향을 준다.

포화기여면적은 보통 하도 근처에 있고 침투가 지속됨에 따라 포화면적은 하도 두변으로 확장되며, 동시에 산언덕의 비포화초과유출의 영향을 받는다. 그러므로 일정한 의미에서 변동지표유출 면적은 하도계통의 확장으로 볼 수 있다(그림 3).

2.2. TOPMODEL의 기본구조

수문과정의 개념으로 유역 유출계산은 크게 불포화층의 물수지 계산, 포화초과유출(기저 유출) 및 지표 유출 계산 등 3부분으로 나눈다. 매개 단위 유역에 대하여 유출을 계산하고 지표 유출과 기저 유출은 모두 공간적으로 상등하며, 지체시간함수 등 방법으로 하천유출을 계산하여 단위 유역 출구점의 유출량을 구한다. 단위 유역의 유출과정 모식도는 그림 4와 같다.

단위유역에서 유출을 계산할 때 매개 격자마다 계산하는 것이 아니고 TOPMODEL에서 유사한 지형지수 값을 가지는 격자들의 기여도가 서로 동일하다고 가정하고 “지형지수-면적분포함수”로 수문특성의 공간불균일성을 묘사하였다. 그러므로 오직 지형지수가 다른 격자들의 수문과정을 계산하면 되고, 지형 지수가 같은 격자는 하나만 계산하면 된다. “지형지수-면적분포함수”는 지형지수가 같은 유역 공간분포를 묘사하고 통계 방법으로 지형지수의 분포를 계산한다.

2.3. 기존방정식의 유도 및 가정

TOPMODEL은 토양함수량을 통하여 포화기여면적의 크기와 위치를 결정한다. 포화부족량 D 를 토양함수량과 포화함수량간의 차로 정의하고 0보다 작은 것을 정수로 한다. $D_i \leq 0$ 의 포화기여면적에서 포화지표유출이 생성된다. 포화부족량 계산 방정식을 유도하는데 연속방정식과 Darcys 법칙을 사용하였다.

이런 포화기여면적에서 포화지표유출이 생성된다. 포화부족량 계산 방정식을 유도하는데 연속방정식과 Darcys 법칙을 사용하였다. 그림 5와 같이 너비가 다른 물 흐름 대로부터 연속방정식을 유도하였다.

포화부족량 D 의 변화 = 유입량 - 유출량

$$\text{그러므로 } a \frac{\partial j}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial t} = (i - j) \quad (2.3.1)$$

여기서 : i - 강우강도, D - 포화부족량, j - 원위면적상의 유량, 즉 유출율,
수평거리 x - 경사가 제일 큰 수로 곡선의 길이

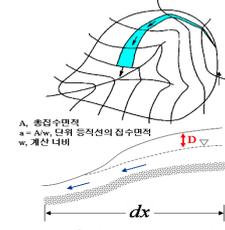


그림 5 단위 물 흐름 대 정의

첫 번째 가정은 **포화면적의 수리학적 구배는 지표면의 경사 $\tan\beta$ 와 근사하다**. 일반적으로 지하수면은 수평이지 않고 배수구로 경사진 곡선이며, 기복은 대체로 지표면과 평행함으로 포화지하수의 실제상화과 비교적 적합하다. 그러나 포화 지표면상의 지표유출과는 다르므로 지표-지하유출을 구분하여 계산한다.

수문지질학 지식으로부터 포화대 중에서 입입의 특징적인 균일한 토층에서의 투수계수는 상수이나 통기대에서의 투수계수는 함수량이 적어짐에 따라 신속히 감소되는 함수량의 비선형성함수이다. 절대다수 상황에서 지하수의 운동은 Darcys선형침투법칙을 따른다. 두 번째 가정은 **토양의 전도도는 포화부족량의 지수감소함수로** 한다. 그러므로 입입 지점의 지하유출은 다음과 식 (2.3.2)과 같이 표시할 수 있다.

$$q = \tan\beta f(D) = \tan\beta T_0 e^{-D/m} = aj \quad (2.3.2)$$

시중 : q - 단위 유량, $\tan\beta$ - 경사도, m - 지수전도계수, T_0 - 완전 포화되었을 때 전도도(m^2/h)

식 (2.3.2)에 근거하여 유역 내 매개 지점의 포화부족량과 유량의 관계는

$$D_i = -m \ln\left(\frac{aj}{T_0 \tan\beta}\right) \quad (2.3.3)$$

전 유역에서 지하수위에 영향을 미치는 유역면적을 적분하면

$$\bar{D} = \frac{1}{A} \sum_i A_i \left[-m \ln\left(\frac{aj}{T_0 \tan\beta}\right) \right] \quad (2.3.4)$$

그다음으로 세 번째 가정은 **유출 j (단위면적상의 유량)은 공간적으로 균일하다**. 방정식의 일치한 해를 얻기 위하여 강우보급 i 와 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 항이 공간적으로 일정하다고 가정한 다음 식 (2.3.3)과 식 (2.3.4)을 연합하면

$$\frac{\bar{D} - D_i}{m} = \left[\ln \frac{a}{\tan\beta} - \lambda \right] - [\ln T_0 - \ln T_e] \quad (2.3.5)$$

여기에서 $\lambda = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln \frac{a}{\tan\beta}$; $\ln T_e = \frac{1}{A} \sum_i A_i \ln T_0$

본 모형 중에서 T_0 은 공간적으로 균일하다고 가정하였으므로 식 (2.3.5)의 마지막 항을 없어진다. 즉

$$\frac{\bar{D} - D_i}{m} = \ln \frac{a}{\tan\beta} - \lambda \quad (2.3.6)$$

$\ln(a/\tan\beta)$ 는 지형지수이다. 여기서 우리가 흥취 있는 것은 식 (2.3.6)을 이용하여 지하수위가 지표($z_i < 0$)의 점 혹은 특수한 포화상태에 근접하는 모관변계($z_i - \psi_0$) 점을 초과하는 점들을 예측하는 것이다. 이러한 점들의 공간분포는 변화하는 포화기여면적을 구성하는 것이다. 또 식 (2.3.6)은 지형지수 $\ln(a/\tan\beta)$ 가 동일하면 수문특성도 완전히 동일하다고 표현된다. 그러므로 $\ln(a/\tan\beta)$ 변량도 수문모형의

지수이다.

3. 실제 유역에의 수문모형 적용 및 비교분석

3.1 유역현황

본 연구대상 위천유역의 유역면적은 472.3 km^2 이고 유로연장은 44.42 km 이며, 군위남, 효령, 대율, 고매, 우보, 산성, 신령서, 의흥, 회수, 화산, 석산 등 11개 우량관측소가 있으며, 무성, 병천, 미성, 고로, 동곡, 효령 등 6개의 수위관측소가 있다.

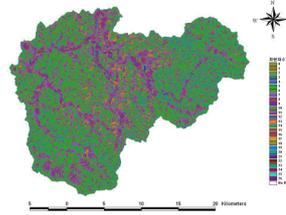


그림 6. 지형지수 분포

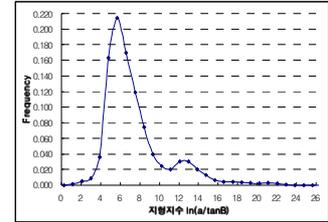


그림 7. 지형지수 분포도

3.2 지형지수 계산

지형지수의 공간적 분포를 계산하기 위하여 축척 1/25000지형도를 이용하여 DEM자료를 구축한 다음 “40m×40m”의 Grid파일 생성하며, 그다음 ASC파일로 전환한다. Microsoft Visual Basic 6.0으로 프로그램을 짜서 ASC파일을 이용하여 위천유역의 지형지수 분포와 지형지수 분포를 각 지수급별 총 유역면적에 대한 지수급의 면적비를 구한다.

지형지수(Topographic index)는 $\ln(a/\tan\beta)$ 로서, a 는 단위 등고선 길이당 상부사면(Upslope) 면적을 가리키고, $\tan\beta$ 는 경사구배를 말한다. 수치지형지도로부터 지형지수는 다방향 흐름 알고리즘(MFD : Multiple Flow Direction Algorithm)으로 계산한다.

3.3 매개변수 산정

표 1은 TOPMODEL을 이용하여 14개 각 수문사상별로 모의된 최적의 모의 결과를 나타내는 매개변수와 분석결과이다. 모형의 효율성 계수(CEM, Coefficient of Model Efficiency)는 상당히 이상적이었으며, 모의치와 관측치의 첨두유량 오차율(PEP, Percent Error for Peakflow)은 영이었고, 유출용적 오차율(PEV, Percent Error for Volume)은 대부분 10%안에 들었으며, 첨두시간 차(EPT, Error for Peak Time)도 2시간을 초과하지 않았다. 그리하여 유천유역의 매개 변수를 14개 호우 사상의 평균값으로 지정하였다.

표 1. TOPMODEL 매개변수 및 분석결과

No	S_{rmax}	S_{rz}	m	$L_n(T_o)$	R_v	실측 강우량	실측 유량	계산 유량	PEV	PEP	EPT	CME
920824	0.013	0.013	0.0157	5.0	9343.0	88.95	74.30	72.28	2.71	0	0	0.97
970624	0.001	0.001	0.0063	3.5	9644.5	93.74	85.14	79.50	6.62	0	1	0.92
040822	0.006	0.006	0.0126	10.0	9560.5	95.27	91.74	81.43	11.24	0	2	0.75
920715	0.010	0.010	0.0167	8.0	9657.0	98.90	66.85	70.45	-5.38	0	0	0.91
970803	0.005	0.005	0.0112	5.0	9529.7	105.26	77.41	84.40	-9.03	0	0	0.96
000722	0.001	0.001	0.0090	3.5	9645.2	111.20	95.17	92.76	2.53	0	1	0.95
930728	0.001	0.001	0.0199	6.0	9785.0	127.63	83.60	89.04	-6.50	0	-1	0.74
960616	0.010	0.010	0.0169	3.0	9606.5	140.47	125.27	125.90	-0.50	0	0	0.95
000824	0.0001	0.0001	0.0160	2.7	9557.0	154.05	126.72	110.87	12.51	0	-1	0.69
930713	0.008	0.008	0.0140	6.0	9494.5	162.21	114.82	128.49	-11.91	0	0	0.84
970705	0.001	0.001	0.0091	3.0	9643.0	183.10	143.39	160.44	-11.89	0	1	0.91
040619	0.020	0.020	0.0178	6.0	9550.0	218.34	163.52	169.40	-3.59	0	-2	0.85
030911	0.050	0.050	0.0156	4.6	9570.0	205.38	146.32	151.78	-3.73	0	-2	0.96

표 2. 유천유역의 TOPMODEL의 적정 매개변수

S_{rmax}	S_{rz}	m	$L_n(T_o)$	R_v
0.05	0.007	0.014	4.87	9587.1

4. 홍수유출의 비교분석

유천유역을 6개의 소유역으로 나누어서 집중모형인 HMS모형을 사용하여 SCS단위도법으로 5개 호우사상에 대하여 홍수모의를 한것과 표 2의 적정 매개변수를 사용한 TOPMODEL으로 5개 호우사상에 대한 홍수모의를 분석한 결과는 표 3 및 그림 8과 같다. TOPMODEL은 HMS모형에 비하여 계산유량, PEV, PEP, EPT 및 CME 등 모두 크게 나타났으며, 실척치와 더 적합하였다. TOPMODEL의 PEV는 모두 10%오차를 초과하지 않았고, 오직 하나만 PEP오차가 20%를 초과했으며, 또 EPT는 2시간을 초과하지 않았고 CME는 몽땅 90%를 초과하지 않았으므로 모의 정확성이 높았다.

표 3. TOPMODEL과 HMS의 비교분석

No	실측 강우량	실측 유량	계산유량		PEV		PEP		EPT		CME	
			TOPMODEL	HMS	TOPMODEL	HMS	TOPMODEL	HMS	TOPMODEL	HMS	TOPMODEL	HMS
900718	81.75	70.71	74.26	48.6	-5.02	31.27	0.03	0.07	-1	-2	0.97	0.78
930627	102.31	76.86	75.43	65.1	1.86	15.30	0.39	0.35	-2	-3	0.90	0.77
960826	91.21	81.66	76.88	55.3	5.85	32.28	0.17	0.31	-1	-2	0.96	0.91
030817	133.99	101.03	95.81	92.3	5.17	8.64	-0.01	0.07	0	-1	0.95	0.82
960624	157.29	150.17	143.98	114.3	4.12	23.89	-0.11	0.22	2	-1	0.94	0.91

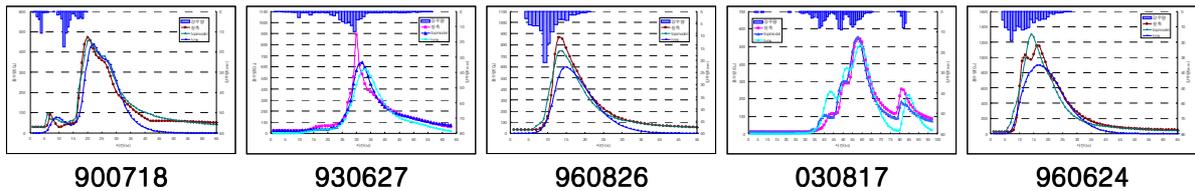


그림 8. TOPMODEL과 HMS의 홍수유출 비교분석

5. 결 론

TOPMODEL은 변동유출의 개념을 기초로 하여 지형지수로 지표면 공간변의가 수문순환과정에 미치는 영향을 반영함으로 유역수문모형 매개변수의 공간화를 위해 좋은 해결방법을 제출하였다. 또 집중모형보다 실제수문과정과 더욱 적절히 반영하고, 특히 불포화대의 수분운동과 지하수층의 운동을 모의하였다. 게다가 TOPMODEL은 지형지수와 유역평균 갈수량으로 각 점의 갈수량을 계산할 수 있으며, 기여면적의 크기와 분포를 모의 할 수 있다.

TOPMODEL의 매개변수는 물리적 의미를 가지고 있고, 유천유역의 14개 호우사상으로부터 추정된 매개변수로 다른 5개 호우사상에 적용한 결과 홍수사상을 비교적 정확히 모의한 것으로 봐서 국내 홍수예경보모델의 일부로 사용될 때 그 역할을 훌륭히 수행할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최병태(2001). 분포형 수문모형 TOPMODEL을 이용한 삼림유역 강우-유출모형의 개발, 박사학위논문, 서울대학교
2. 장대혁(2002). 분포형 강우-유출 모형을 이용한 하천 유출량 추정에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교.
3. 劉青娥, 左其亭(2003). TOPMODEL 模型探討, 鄭州大學學報(工學版), 제23권 제4호, pp. 82-86.
4. KEITH, J.BEVEN(2001)., Rainfall-Runoff Modelling, JOHN WILEY & SONS, New York.