

토지이용특성을 고려한 분포형 모형의 적정 매개변수 및 격자크기의 결정

An Assessment of Optimized Parameter and Grid Size for Landuse of the Grid Based Model

박상식*, 박완희**, 이종태***

Sang Sik Park, Wan Hee Park, Jong Tae Lee

요 지

최근 국내에서 사용되고 있는 격자분포형 강우-유출 모형 $Vflo^{TM}$ 을 실무에 효율적으로 적용하기 위하여 매개변수값의 결정과 그 민감도를 분석하고, 중랑천 유역의 토지이용 및 지형특성을 고려한 적정 크기의 격자에 대한 연구를 수행하였다. 연구대상유역으로는 토지이용현황이 상이한 중랑천 상류(자연유역), 우이천(복합유역) 및 청계천(도시유역) 유역을 선택하였다. 2003~2006년까지 5개 호우사상의 실측자료로부터 매개변수값의 최적화를 실시하였으며 수치모의된 결과로부터 조도계수, 투수계수, 초기함수비 등의 매개변수에 의한 계산치의 민감도를 분석하였다. 검토결과 지표면 조도계수가 가장 예민했으며, Green-Ampt식에 적용되는 투수계수의 영향이 큰 것으로 분석되었다. 또한, 수문학적 지형특성 반영을 위한 적정 격자크기는 자연유역(중랑천 상류)과 복합유역(우이천)에서는 100과 200 m에서 관측 유출수문곡선과 대체로 일치하나, 격자크기가 300 m에서는 지형특성을 반영하지 못해 유출수문곡선이 왜곡되는 경향을 나타내어 불투수율 80% 이하인 자연 및 복합유역에서는 DEM 격자크기를 200~300 m이하로 적용하는 것이 적절하다고 판단된다.

핵심용어 : 격자분포형 모형, $Vflo^{TM}$, 민감도, 격자크기

1. 서 론

유역의 물리적 특성을 유출계수나 저류상수 등의 경험적 매개변수에 의존하는 집중형 모형과는 달리 해당지형의 물리적 특성을 직접 반영할 수 있는 격자기반의 분포형 강우-유출 모형의 수요가 컴퓨터 기술의 발달로 인해 계산시간의 단축과 지형자료처리가 용이해지면서 증가하고 있다.

유출해석을 위하여 국내에 소개된 분포형 모형으로는 $Vflo^{TM}$ (2002), KIMSTORM(1998), FFC 2N(2007년) 등이 있으며 각 모형들이 사용하는 적용이론과 매개변수 및 그 적용면에서 또한 차이가 있다. 이 연구에서는 최근 국내에서 활용되고 있는 격자기반의 분포형 모형인 $Vflo^{TM}$ 모형을 이용하여 토지이용 특성을 고려한 유역조건에서의 유출량을 산정하고 매개변수 보정(calibration)을 통해 수문학적 지형특성을 나타내는 물리적 인자의 민감도를 분석하였다. 또한, 관측치와 비교하여 최적화된 매개변수를 이용하여 유출량을 산정하고 연구의 효율성과 관측 유출수문곡선의 적합성을 만족하기 위해 최적 DEM 격자 크기에 대해 평가하였다.

* 정회원 · 경기대학교 토목공학과 박사과정 수료 · E-mail : sangsik74@naver.com
** 정회원 · (주)남원건설엔지니어링 수자원부 사원 · E-mail : waniwana11@kyonggi.ac.kr
*** 정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 교수 · E-mail : jtlee@kyonggi.ac.kr

$Vflo^{TM}$ 모형은 수치고도자료, 토지이용도, 토양도 등을 이용하여 지역의 물리적 인자들을 직접 추출하기 때문에 매개변수의 불확실성이 작으며, 실제 지형을 대표하는 매개변수 값들을 가지고 수치모의 수행이 가능하다. 또한, 매개변수의 추출도 GIS Tool(ArcView, ArcGIS 등)을 이용하기 때문에 입력자료의 구성이 비교적 간단하다. 일반적으로 격자분포형 모형에서 해당 격자의 유출량은 연속방정식의 우변항으로 침투를 고려한 유효유출량을 측방유입량으로 적용하고, 시간과 위치 변화에 따른 격자의 수리량(유량, 수위, 유속등)을 계산하는 연결기법(link scheme)은 유한차분법 및 유한요소법을 채택한다. $Vflo^{TM}$ 모형에서는 격자의 유출모의를 위한 지배방정식으로 운동과 가정(Kinematic Wave Analogy)에 의한 운동량 방정식을 채택하였다. 해당 지역의 1차원 지표면 및 하도 흐름에 대한 기본방정식은 식(1), (2)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{S_0^{1/2}}{n} \frac{\partial h^{5/3}}{\partial x} = R - I \quad (1)$$

$$S_f - S_o = 0 \text{ (Manning 식 이용)} \quad (2)$$

여기서, h : 격자의 수심, n : 조도계수, R : 강우강도, I : 침투율, S_f : 마찰경사, S_o : 지표면 경사

2. 시험구역 및 매개변수 최적화

모형의 유출특성 분석 및 매개변수의 적정성을 검토하기 위해 중량천 지역의 지천을 대상으로 토지이용특성을 고려하여 그림 1과 같이 투수지역 60 % 이상은 자연구역, 20 ~ 60 %는 복합(토지이용)구역, 불투수지역이 80 % 이상 차지하는 구역에 대해서는 도시구역으로 구분하였다.



그림 1. 구역구분기준

표 1. 구역조건에 따른 토지이용현황

구분	구역면적(km ²)	대표토양형	토지이용현황			
			투수지역(km ²)	불투수지역(km ²)		
			임야	주거및상업지	기타	소계
자연구역 (신곡교상류)	78.29	A	50.9(65%)	9.39(12%)	18.00(23%)	27.39(35%)
복합구역 (우이천)	28.76	A, B	15.25(53%)	10.35(36%)	3.16(11%)	13.51(47%)
도시구역 (청계천)	50.96	A, B	5.60(11%)	40.26(79%)	5.10(10%)	45.36(89%)

※참고 : 건설교통부, 도시홍수재해관리기술연구보고서(별책 제2권), 2007

자연구역으로는 투수율이 65%인 중량천 신곡교 상류구역, 복합구역은 투수율 53%의 우이천, 도시구역은 불투수율이 89%로 고밀도의 주거 및 상업지를 형성하고 있는 청계천 유역을 각각 선정하였다(표 1).

적용강우는 2003년 ~ 2006년의 5개 독립호우를 대상으로 국토해양부와 서울시에서 관할하는 9개 우량관측지점의 강우자료를 활용하였다. 자연구역인 신곡교 상류 중량천 유역은 2006년 7월 의정부 지점의 호우를 적용하였다. 우이천(복합구역)의 경우는 2003년과 2006년 7월 호우를, 도시구역인 청계천은 2005년과 2006년 7월 호우로 6개 지점의 우량관측자료를 티센방법을 이용하여 지점강우를 면적강우로 환산하였다. 또한, 표 2와 같이 유역의 유출에 영향을 미치는 물리적 인자의 최적화를 위해 구역조건에 따라 수위-유량관계곡선식이 있는 매개변수 보정(calibration) 지점을

선택하였다. 또한, 중랑천 유역의 경우, 국토해양부 도시홍수재해관리연구사업단(FFC)의 신곡교 지점의 유량자료를 사용하였으며, 우이천 및 청계천 유역은 서울시의 유량관측자료로서 장월교 및 제2마장교 지점의 관측치를 각각 사용하였다.

표 2. 적용강우의 규모 및 매개변수 최적화

적용유역	강우 사상	강우 지점	관할 기관	일 자	총강우량 (mm)	매개변수 보정지점	특 징
중랑천 (자연유역)	E 1	의정부	국토 해양부	2006. 7. 11. 21:00 ~ 2006. 7. 13. 22:00	326.0	신곡교	·신곡교 지점은 FFC(도시홍수연구단)에서 유량관측실시
우이천 (복합유역)	E 2	강북,도봉	서울시	2003. 7. 22. 11:00 ~ 2003. 7. 23. 04:00	115.1	장월교	·2개지점의 강우자료는 티센방법을 이용하여 면적강우로 환산적용 ·장월교는 서울시에서 유량관측실시
	E 3			2006. 7. 12. 00:00 ~ 2006. 7. 12. 22:00	279.3		
청계천 (도시유역)	E 4	동대문, 중로, 중구, 성북, 성동, 강북	서울시	2005. 7. 09. 02:00 ~ 2005. 7. 09. 13:00	42.4	제2마장교	·6개지점의 강우자료는 티센방법을 이용하여 면적강우로 환산적용 ·제2마장교는 서울시에서 유량관측실시
	E 5			2006. 7. 15. 18:00 ~ 2006. 7. 16. 24:00	271.5		

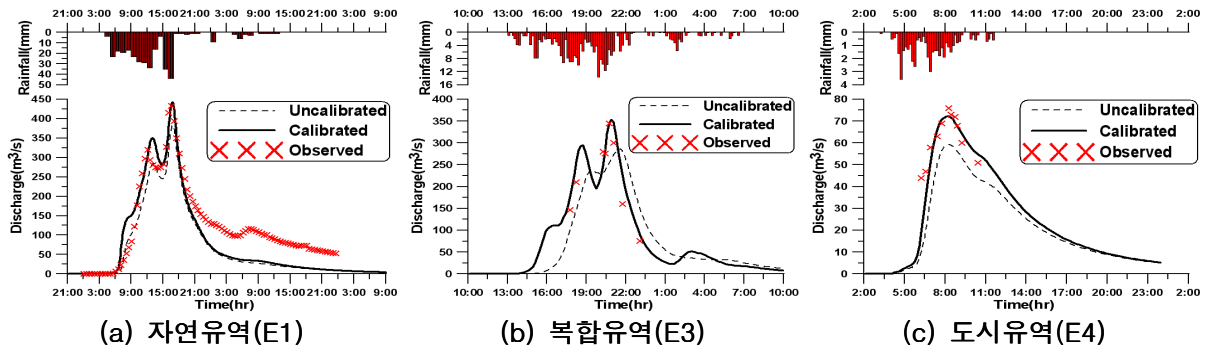


그림 2. 매개변수 최적화 전·후의 유출수문곡선

조도계수, 지표면 경사, 초기 함수율 등의 수문학적 지형 및 토양특성을 갖는 물리적 인자를 대상으로 하여 허용 범위 내에서 일정비율로 변화를 주어 식 (3)과 같이 침투유량 항목에 대한 실측치와 모의치 간의 상대오차를 최소화하는 최적 유출 매개변수를 추정 및 보정하였다. 이에 최적화된 유역별 매개변수값은 표 3과 같이 조도계수 평균치의 경우 중랑천은 0.072, 우이천 0.042, 청계천 0.033과 같이 도시화율에 따른 조도계수 변화를 나타내었고, 그림 2와 같이 매개변수 최적화 전·후를 보면 전체적으로 보정지점의 유량 관측치와 유사한 값을 나타내었다.

$$\text{상대오차(\%)} = \frac{|\text{모의치} - \text{실측치}|}{\text{실측치}} \times 100 \quad (3)$$

표 3. 유역별 최적 매개변수의 범위

적용유역	매개변수					비고
	조도계수	투수계수(cm/hr)	선행흡인수두(cm)	유효공극율	지표면 경사(%)	
중랑천(자연유역)	0.015 ~ 0.160(0.072)	0.00 ~ 10.49(3.51)	0.00 ~ 20.88(11.07)	0.000 ~ 0.486(0.404)	0.16 ~ 49.38(13.61)	()는 평균치
우이천(복합유역)	0.015 ~ 0.040(0.042)	0.10 ~ 3.00(1.63)	6.12 ~ 20.88(12.37)	0.309 ~ 0.486(0.394)	0.05 ~ 57.74(14.54)	
청계천(도시유역)	0.015 ~ 0.040(0.033)	0.10 ~ 3.00(1.28)	6.12 ~ 20.88(10.46)	0.309 ~ 0.486(0.400)	0.00 ~ 42.48(7.93)	

3. 매개변수 민감도

수문학적 지형 및 유출특성을 나타내는 물리적 매개변수의 민감도를 우이천 유역을 대상으로 실시하였다. 민감도는 식(4)에 의해 산정하였으며 100에 가까운 값을 나타낼수록 그 변동폭이 커서 계산결과치에 주는 민감도가 큰 것을 의미한다.

$$S_c = (1 - (Q_{pmin}/Q_{pmax})) \times 100 \quad (4)$$

여기서, S_c : 주요 매개변수 민감도(%), Q_{pmax} , Q_{pmin} : 첨두유량의 최대치, 최소치

유출에 영향을 미치는 물리적 인자 중에서 보다 주관적인 입력치를 요구하는 조도계수, 투수계수, 초기수분 함수율을 주요 매개변수로 선정하여 민감도를 분석하였으며 분석방법은 최적 매개변수를 기준으로 20 %씩 증감시켜 유출반응을 확인하였다.

우이천 유역의 최적화된 모형을 이용하여 조도계수, 투수계수, 초기수분 함수율 등의 매개변수에 대한 변동성과 유출반응에 대한 민감도를 분석한 결과, 총 변화량은 표 4 및 그림 3~4와 같이 각각 30.7, 11.6, 8.3 %로 나타나 발생 유출량의 격자간 연결기법식(유한차분 또는 유한요소법)에 직접 사용되는 조도계수가 가장 예민했으며, Green-Ampt식의 침투능(f) 모의에 직접적인 영향을 미치는 투수계수였으며, 유출영향에 대한 초기수분 함수율이 가장 미미한 것으로 분석되었다.

표 4. 주요 매개변수의 민감도 분석(S_c)

구 분		민감도(%)	
조도계수	침투유량	감소	18.4
		증가	15.1
투수계수	침투유량	감소	8.3
		증가	3.6
초기수분 함수율	침투유량	감소	3.0
		증가	5.4

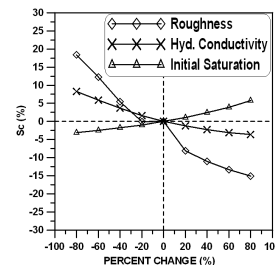


그림 3. 민감도 분석(S_c) 결과

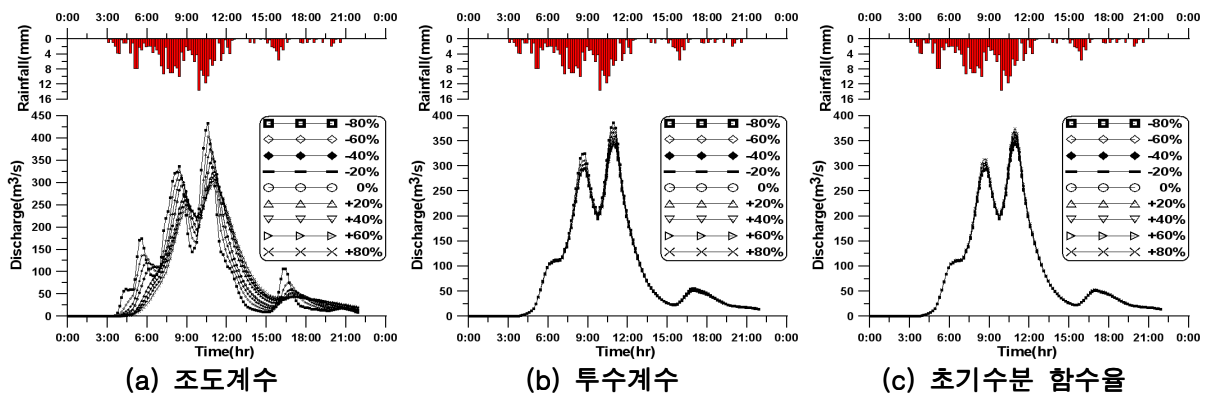


그림 4. 주요매개변수의 민감도 분석

4. 적정 DEM 격자크기

유역의 수문현상을 모의할 경우, 지형의 불규칙성과 강우강도 등 여러 불확실성들이 발생할 수 있으며 수치모의에 사용되는 자료의 규모(scale)나 정확성(accuracy)에 따라 그 결과값이 상이할 수 있다. 이와같이 유출반응에 직접적인 영향을 주는 지형입력자료의 해상도(resolution)는 수문현상을 예측하는데 중요한 요소로 작용한다. 또한, 유역의 격자를 나눌 때 각 단위격자의 크기가 분포형 모형의 모의 결과에 어떠한 영향이 있는지 연구하였으며, 유역의 DEM 격자크기는 100, 200, 300 m로 구분하고 각 경우에 대하여 동일한 매개변수를 적용하여 수치모의를 실행하였다.

수문학적 지형특성 반영을 위한 적정 격자크기는 그림 5와 같이 자연유역과 복합유역에서는

100과 200 m에서 관측유출수문곡선과 대체로 일치하나, 격자크기가 300 m에서는 지형특성을 반영하지 못해 유출수문곡선이 왜곡되는 경향을 나타내었으나 자연 및 복합 유역과 달리 도시유역의 경우, 300 m시에도 관측치와 유사한 결과를 보였다. 이 같은 결과로 유역의 해상도를 비교적 작게 했을 때 실측치와 유사한 결과를 보이지만 도시유역과 같이 인위적인 배수계통을 가지는 경우에는 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

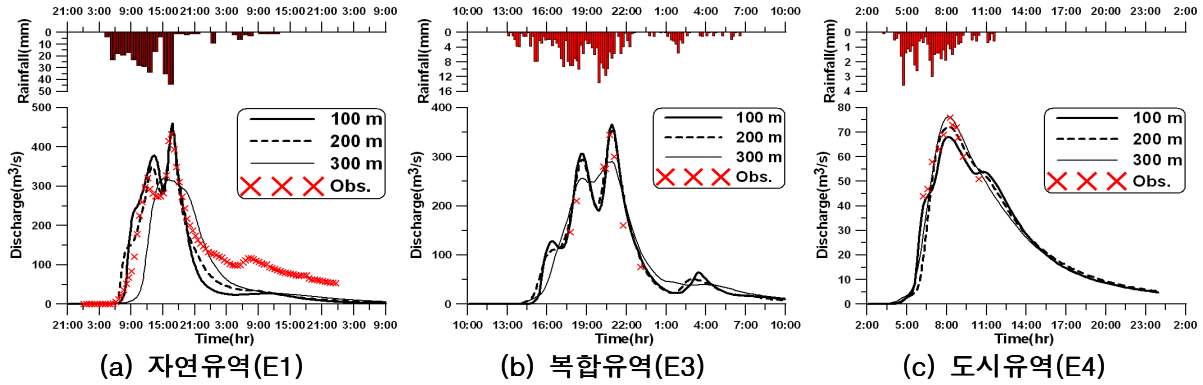


그림 5. 격자크기별 유출수문곡선

5. 결 론

이번 연구에서는 분포형 모형의 유출특성을 알아보고 모형의 적용성 향상을 위해 유역의 최적화를 실시하였으며 민감도, 격자크기에 따른 분석 및 타모형과 비교하였다. 유역별 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 주요 유출관련 매개변수의 보정을 통해 최적화를 실시하였으며 침투유량에 대한 관측치와 모의치 간의 상대오차를 최소화하여 실측치와 대체로 유사한 결과를 나타내었다.
- (2) 민감도 분석 결과, 조도계수가 가장 예민하게 유출에 반응하는 것으로 분석되어 매개변수 최적화 및 실무에서 홍수량 산정시 조도계수값 입력에 대한 충분한 검토를 요하고
- (3) 유역조건별 적정 DEM 격자크기를 분석한 결과 자연 및 복합유역의 경우 300 m에서 수치 모의된 유출수문곡선이 관측치와 왜곡되는 결과로 나타난 바, 불투수율이 80%이하인 자연 및 복합 유역의 경우 200 ~ 300 m 이하를 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심 기술연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과물로서 관계당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2006), 도시홍수재해관리기술연구사업단 연구성과보고서, 별책 제2권, 도시홍수 재해 해석 기술
2. 박완희(2007), 강우-유출해석을 위한 분포형 모형의 적용성 향상에 관한 연구, 석사학위논문, 경기대학교
3. Vieux, B. E.(2004), Distributed Hydrologic Modeling Using GIS, Second Edition, ISBN : 1-4020-2459-2, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands