모자이크기법을 이용한 지표유출모형의 조도계수 리샘플링

박상식 · 강부식*

단국대학교 토목환경공학과

(2010년 10월 21일 접수; 2010년 11월 4일 수정; 2010년 12월 9일 채택)

Resampling for Roughness Coefficient of Surface Runoff Model Using Mosaic Scheme

Sang-Sik Park, BooSik Kang*

Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea

(Manuscript received 21 October, 2010; revised 4 November, 2010; accepted 9 December, 2010)

Abstract

Physically-based resampling scheme for roughness coefficient of surface runoff considering the spatial landuse distribution was suggested for the purpose of effective operational application of recent grid-based distributed rainfall runoff model. Generally grid scale(mother scale) of hydrologic modeling can be greater than the scale (child scale) of original GIS thematic digital map when the objective basin is wide or topographically simple, so the modeler uses large grid scale.

The resampled roughness coefficient was estimated and compared using 3 different schemes of Predominant, Composite and Mosaic approaches and total runoff volume and peak streamflow were computed through distributed rainfall-runoff model. For quantitative assessment of biases between computational simulation and observation, runoff responses for the roughness estimated using the 3 different schemes were evaluated using MAPE(Mean Areal Percentage Error), RMSE(Root-Mean Squared Error), and COE(Coefficient of Efficiency). As a result, in the case of 500m scale Mosaic resampling for the natural and urban basin, the distribution of surface runoff roughness coefficient shows biggest difference from that of original scale but surface runoff simulation shows smallest, especially in peakflow rather than total runoff volume.

Key Words : Grid based model, Distributed hydrologic model, Resampling, Roughness coefficient

1. 서론

최근 우리나라를 포함한 전 세계는 기후변화와 그에 따른 기상이변으로 집중호우에 의한 피해가 급증하고 있으며, 기상재해의 신뢰성있는 모니터링과 예

측을 위하여 강우-유출 현상에 관한 보다 정교한 해석이 필요하게 되었다. 국내의 경우에도 1990년 중반부터 매년 국지적 집중호우나 이상호우로 인해 대규모의 홍수피해와 인명피해가 반복되고 있다. 따라서 홍수와 관련한 정교한 수문모니터링을 위해 지리정보시스템(GIS) 기법이 결합된 프로그램이 개발되거나 이를 활용하여 수문현상을 해석 및 예측할 수 있는 수문유출모형의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 격자기반의 수문모형은 소유역이나 수문반응단위(HRU; Hydrologic Response Unit)를 기반으로하

*Corresponding author : BooSik Kang, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University, Yongin 448-701, Korea
Phone: +82-31-8005-3471
E-mail: bskang@dankook.ac.kr

는 집중형 모형과는 달리 유역특성이나 강우의 공간 변동성을 고려할 수 있다는 장점 때문에 섬세한 수문모의가 필요한 경우 효과적인 도구가 될 수 있다(Fig. 1).

그러나 이론적 장점에도 불구하고 분포형 모형의 적용성에 관해서는 여전히 논란이 계속되고 있다. 유출모형의 본질은 결국 유출과정에 대한 물리적 이해, 강우 및 유역특성의 비균질성, 강우-유출의 비선형성 등을 얼마나 효과적으로 모의할 수 있는가의 문제이며, 현실적으로는 모형구축과정에서 요구되는 고해상도 유역정보의 한계, 과도한 계산부하, 매개변수 검보정의 어려움 등을 극복해야 한다. 운동방정식에서 역학적 항들을 어디까지 고려해야 하는가의 문제는 계산부하 및 런타임과 트레이드오프 관계에 있기 때문에 신속한 계산이 요구되는 현업의 홍수예경보시스템에서는 계산의 정확성과 신속한 계산능력의 최적조합을 고려하여 시스템을 구성하게 된다.

Fig. 1. Conceptual Schematic of General Class for Distributed Rainfall-Runoff Model.

최근에는 컴퓨터와 수치지도의 발달로 인하여 유역의 물리적 특성을 유출계수나 저류상수 등의 경험적 매개변수에 의존하는 집중형 모형과는 달리 해당 지형의 공간적 물리특성을 고해상도로 반영할 수 있는 격자기반의 분포형 강우-유출 모형의 수요가 증가하고 있다. 박과 강(2006)은 용담댐 유역에서의 댐 유역 홍수량 예측을 위하여 GIS 기반의 분포형 모형인 *Vflo*TM와 한국수자원공사의 현업모형인 저류함수기

반의 *K-Water*모형의 유출해석을 비교하였다. 박 등(2008)은 레이더 강우를 이용한 실시간 유량예측을 위하여 *Vflo*TM모형을 적용한 바 있다. 또한, 박(2007)은 중랑천 유역에 대해 *Vflo*TM 모형으로 민감도 및 매개변수 최적화를 연구하였다. Vieux 등(2008)은 용담댐과 남강댐유역을 대상으로 분포형 수문모형(*Vflo*TM) 내에서 초기토양함수비에 대한 유출수문곡선의 민감도 분석을 수행한 바 있다.

일반적으로 개념적인 모형들이 경험적 관계식을 이용하는 반면에 물리기반 모형들은 수문학적 과정을 표현하기 위해 연속방정식과 운동량방정식을 적용한다. 유출해석을 위하여 개발된 모형은 국내의 경우 KIMSTORM(김, 1998; 정 등, 2008a, b), FFC2N(건설교통부, 2007)등이 있으며, 국외모형은 *Vflo*TM, GSSHA, MIKE-SHE모형 등이 있다. 이러한 격자분포형 모형에서는 유역의 특성을 보다 정확하게 표현하기 위하여 입력 변수와 자료를 각 격자(cell)별로 부여한다. 강우-유출을 포함한 일련의 수문과정은 유역 내 높은 비균질성에 의해 영향을 받으므로, 물리적 기반의 접근법에서는 공간적으로 적절히 분포된 매개변수를 필요로 한다. 흔히 분포형 수문모델링과정에서는 제공된 GIS원시주제도의 공간스케일과 모델스케일간에 격차가 존재하게 되며, 원시데이터가 고해상도값을 갖게되는 경우 모형의 계산격자내부에 분포하는 아격자단위의 정보로부터 모델격자단위의 대표값을 추정하는 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 최근 국내에서 활용되고 있는 격자기반의 분포형 모형인 *Vflo*TM 모형을 이용하여 다양한 토지이용 특성을 고려한 유출해석을 수행하고 매개변수 보정(calibration)을 통해 수문학적 지형특성을 나타내는 물리적 인자의 민감도를 분석하였다. 아울러 모델링격자내에서 아격자규모의 식생분포가 존재할 때 지표유출조도계수의 대푯값을 산정하는 기법을 제시하였다.

2. 자료 및 방법

중랑천 유역의 강우-유출 해석을 위해 grid 분석을 기반으로 하여 입력자료를 추출하고 분포형 수문모형인 *Vflo*TM를 선정하여 유역의 유출량을 분석하였다. *Vflo*TM 모형은 분포형 모형으로 지표면 유출에 운동

파 방정식을 사용하며, 수치해를 구하기 위하여 공간적으로는 유한요소법을 사용하였다. 하도망은 지형정보로부터 유도한 흐름방향도로부터 형성되며 하도망의 지형학적 특성은 유역과 수문곡선의 형태와 반응특성을 결정한다. 지표, 하도, 저수지의 수리특성이 강우와 함께 수문모형의 입력자료로 구성된다. 환경사의 하도 및 하천의 저류는 수정 puls 및 Jones 방정식을 이용한다. DEM 생성을 위해 GIS 소프트웨어를 이용하였으며 중랑천 유역의 수치지도로부터 격자의 크기별 DEM을 생성하였다. 생성된 DEM과 하천 shape 파일을 통해서 흐름방향도를 생성하였으며, 수치토지이용현황도와 수치정밀도양도로부터 조도계수, 투수계수, 유효공극율, 모관흡인수 등 초기 입력자료를 생성한 후 이를 ASCII 파일로 변환하여 분포형 모형에 적용하였다.

분포형유출모형은 수치고도자료, 토지이용도, 토양도 등을 이용하여 유역의 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, 시공간적 격자에 대한 수리량(유량, 수위, 유속 등) 계산을 위한 동역학적 유출모의는 유한차분법이나 유한요소법을 적용한다. VfloTM 모형에서는 격자의 유출모의를 위한 지배방정식으로 운동과 가정(Kinematic Wave Analogy)에 의한 운동량 방정식을 채택하였다. 해당 유역의 1차원 지표면 및 하도 흐름에 대한 기본방정식은 식(1), (2)과 같다.

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

$$S_r - S_0 = 0 \text{ (Manning 식 이용)} \quad (2)$$

여기서, h : 격자의 수심, n : 조도계수, R : 강우강도, I : 침투율, S_r : 마찰경사, S_0 : 지표면 경사

조도계수에 대한 수문반응을 스케일별로 분석하기 위해 토지이용특성에 따라 본 연구에서 설정한 불투수율 기준에 따라 시험유역을 자연유역, 복합유역, 도시유역 등으로 세분화하고 모델링스케일을 100, 250, 500 m로 구성하였다. 원시GIS주제도의 스케일은 25 m를 사용하였기 때문에 모델링격자로서의 스케일확장이 필요한데 산술평균법, 지배면적법, 모자이크법 등의 기법을 적용하고 그 결과를 비교검토하였다. 유출 해석은 유역을 격자화한 모델링이 가능한 분포형강우유출모형(VfloTM)을 사용하였다. 또한 유역별, 격자크기별, 기법별로 구분된 모형에 대해 유출반응을 분석하여 관측수문곡선과 비교검토 하였고, 관측치에 대한 각 기법별로 총유출체적과 첨두유량에 대해 MAPE, RMSE, COE를 구해 정량적으로 평가하였다.

3. 시험유역 및 적용강우

3.1. 토지이용특성에 따른 시험유역 선정 및 구분

시험유역은 토지이용특성에 따라 자연, 복합 및 도시유역으로 구분하여 선정하였다. 서울의 동북부에 위치한 중랑천 유역(299 km²)은 Fig. 2와 같이 한강본류의 성수대교 우안으로 유입되는 한강의 제 1지류로 서울권역은 대표적인 도시하천을 형성하고 경기권역에는 상대적인 자연하천을 형성하고 있다. 토지피복의 종류가 단순하고, 자연상태와 도시면적이 적당히 분포하는 계획이 공존하는 유역으로 판단되어 중랑천 유역을 대상유역으로 선정하였다. 유역의 구분기준으로 모형의 유출특성 분석 및 매개변수의 적정성을 검토하고 토지이용특성을 고려하여 Table 1과 같이 투수지역 60 % 이상은 자연유역, 20~60 %는 복합(토지이용)유역, 불투수지역이 80 % 이상 차지하는 유역에 대해서는 도시유역으로 구분하였다. 중랑천 유역 내의 소유역구성을 보면, 자연유역으로는 투수율이 65%인 중랑천 신곡교 상류유역, 복합유역은 투수율 53%의 우이천, 도시유역은 불투수율이 89%로 고밀도의 주거 및 상업지를 형성하고 있는 청계천 유역으로 이루어져있다(Table 1).

Fig. 3. Aggregation scale of mother grid.

사용하였다. 중랑천 유역의 지형분석시 고밀도 주거 지역 및 도시지역에 대한 토지이용현황이 복잡 한데 비하여 100 m 스케일 이상의 격자는 토지이용상황을 지나치게 단순화시킬수 있고, 10 m 이하의 격자 구성은 수문해석의 비효율성을 갖고 있어 DEM 구성시 원시 격자를 25 m로 구성하였다. 또한 25 m의 원시격자에 대한 조도계수의 통합 및 확장을 위해 다음 Figure 3과 같이 25 m의 4, 10, 20 배수로 100, 250, 500 m를 결정하였다. 결정된 공간스케일에 대해 중랑천 유역 내에 토지이용상태로 분류한 중랑천 상류(자연유역), 우이천(복합유역), 청계천(도시유역) 유역에 대해 격자 크기별 DEM, 토지이용 및 토양매개변수를 산정하고, *Vflo*TM 모형에서 유출량 산정 및 각 관측지점의 유출수 문곡선과 계산치를 비교하여 매개변수를 보정하였다.

4.2. 유출량 및 매개변수 보정

유역의 유출에 영향을 미치는 물리적 인자의 최적

화를 위해 유역조건에 따라 수위-유량관계곡선식이 있는 매개변수 보정(calibration) 지점을 선택하였다. 우선, 중랑천 상류 유역의 경우, 다음 Fig. 4와 같이 국토해양부 도시홍수재해관리연구사업단(FFC)의 신곡교 지점의 유량자료를 사용하였으며, 우이천의 경우 장월교를 채택하였으나, 2006년 11월 유수장애 및 노후화로 인하여 철거 되었으나 이번 연구에 사용되는 관측유량자료는 2006년 이전 자료이므로 기존 장월교 지점의 유량관측자료를 사용하였다. 청계천의 경우, 하류부에 위치한 제2마장교 지점의 관측치를 사용하였다(Table 3).

조도계수, 지표면 경사, 초기 함수율 등의 수문학적 지형 및 토양특성을 갖는 물리적 인자를 대상으로 하여 허용 범위 내에서 일정비율로 변화를 주어 침투유량 항목에 대한 실험치와 모의치 간의 상대오차를 최소화하는 최적 매개변수를 추정 및 보정하였다. Fig. 5의 (a)는 자연유역에 대해 100 m 격자크기로 모의한

Fig. 4. Water Profile and Flood gauge station (건설교통부, 2007).

Table 3. Stations for parameter calibration

Basin	Location for parameter calibration	Observation type	Elevation (EL.m)	Remarks
Upstream from Shingok bridge (Natural)	Shingok bridge	T/M	32.905	• The streamflow measurement at the Shingok bridge site was implemented by FFC(Urban Flood Center).
Wui Stream (Complex)	Jangwol bridge	Sonic	15.85	• The rainfall data at the 2 gauge sites were transformed to areal rainfall data using Thiessen method. • The streamflow measurement at the Jangwol bridge site was implemented by the City of Seoul.
Cheonggye Stream (Urban)	2 nd Majang bridge	Sonic	9.81	• The rainfall data at the 6 gauge sites were transformed to areal rainfall data using Thiessen method. • The streamflow measurement at the 2 nd Majang bridge site was implemented by the City of Seoul.

Fig. 5. Calibrated and uncalibrated hydrograph.

결과, 관측치와 비교하면 연속침두사상이 발생하는 것이 바람직하나, 전반부 침두사상을 적절히 모의하지 못하였다. 이는 유출수문반응에 미치는 복합적인 영향으로 정량적인 기저유출량의 평가나 침투에 대한 회복영향 등으로 볼 수 있다. 그러나, 수문곡선의 후반부의 경우는 대체로 일치되었고, 타 경우에도 관측치와 유출수문곡선이 유사한 경향을 나타내었다.

5. 공간스케일 확장기법

격자분포형 강우-유출모형에서 조도계수는 모형의 지배방정식에 직접적인 영향을 미치며, 운동과 가정에 의한 운동량방정식 구성시 격자 유출량의 규모를 결정하는 매개변수로 토지이용현황에 따라 그 값을 구분하는 조도계수를 공간스케일 확장대상 매개변수로 결정하였다. 이에 스케일 확장기법은 대기모형에서 사용하는 기법, 단순한 기법과 물리적 기반에 근거를 둔 질량보존의 법칙을 고려한 방법 등으로 나누어 분석하였다.

5.1. 지배면적법(Predominant Approach)

운동량 방정식(Manning 식) 적용시 조도계수를 해당 격자에서 가장 높은 면적비율을 갖는 식생타입을 결정하고 이 대표 식생에 상응하는 조도계수를 그 격자의 대표값으로 결정하는 방법이다. 식(3)은 운동량 방정식으로 사용되는 Manning 공식이고 식(4)에서 구한 Q_r 를 식(3)에 대입하여 유출량을 산정한다.

$$Q_r = \frac{1}{n_r} AR^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$n_r = \max[area(n_i)], (i=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

여기서, Q_r : 격자간 유출발생량

n_r : 대표조도계수

R : 동수반경

S_0 : 격자간 경사

5.2. 산술평균 방법(Composite Approach)

이질성을 갖는 여러 식생타입이 존재하는 하나의 격자내에 개개의 아격자의 조도계수값을 부여한 후 단순 평균하는 방법이다.

5.3. 모자이크 방법(Mosaic Approach)

대기모형에서는 지표토지피복의 변동성에 대한 지표면의 에너지 평형방정식(Energy Balance Equation)의 수치모의기법에 따라 크게 Mixture와 Mosaic Approach 등으로 구분되며 Mixture 방법은 GCMs 대기가 혼합된 형태로 지표면 부근에서 보이는 것과 같이 격자 전반에 걸쳐 서로 다른 식생타입이 균등하게 혼합되어 있다는 가정으로 계산하고 Mosaic 방법은 모격자(grid)는 서로 다른 식생타입으로 모자이크된 아격자(tile)로 구성되며 각 타일에서의 플럭스의 합이 모격자의 플럭스를 이룬다는 가정으로 계산된다.

Fig. 6. Parameter aggregation approach by Mosaic scheme.

모자이크 방법은 Fig. 6과 같이 불규칙하게 구성되어 토지이용상태가 복잡한 영역에서 해당 모격자의 실제 지형을 규칙적 타일형태로 배열하고 각 타일에서의 유출량과 모격자에서의 유출량간의 질량균형을 통해 대표조도계수를 산정한다. 아격자의 조도계수는 모격자에 기여하는 식생상태에 따라 가중평균되어 모격자의 유출량산정에 이용되는 기법이다. 강우-유출 모형의 특성상 아격자의 해당 유출량을 별도로 구하기 어려워 가중평균계수는 균등하게 가정한다면 대표 조도계수는 결국 식생타입별 조도계수의 조화평균의 형태로 나타내어진다 (Lee, 2008). Fig. 7에 도시한 바와 같이 적용식은 다음 식(6)과 같다. 즉,

Fig. 7. Schematic diagram of Aggregation approach.

식(6)을 정리하면

여기서, n_i : 아격자 i 번째 타일의 조도계수, $\mathbf{W}$: 식생 타입에 따른 가중값, m : 아격자 타일의 갯수
만일 균등가중값을 사용한다면 식(7)은 식(8)과 같은 조화평균의 형태를 갖는다.

Table 5. Distribution of roughness by spatial aggregation scheme

Class	Roughness range	Roughness at original 25 m scale	Distribution of roughness by grid size (%)								
			100 m			250 m			500 m		
			P	C	M	P	C	M	P	C	M
1	0.000~0.015	18.99	39.21	20.90	21.20	41.98	9.77	7.73	43.28	6.31	1.49
2	0.015~0.025	0.00	0.00	7.06	16.29	0.00	15.99	31.92	0.00	19.22	39.93
3	0.025~0.030	1.24	0.25	3.34	3.15	0.15	4.69	3.98	0.00	5.70	4.27
4	0.030~0.035	0.00	0.00	2.87	2.41	0.00	3.81	2.45	0.00	4.41	2.60
5	0.035~0.040	3.78	4.71	3.10	3.04	2.85	3.55	3.07	2.03	4.41	2.60
6	0.040~0.045	0.00	0.00	2.49	2.29	0.00	3.09	2.72	0.00	3.72	2.51
7	0.045~0.050	0.00	0.00	2.61	2.06	0.00	3.27	1.79	0.00	3.34	3.16
8	0.050~0.055	41.08	6.56	2.80	1.95	4.13	3.13	2.08	2.11	2.28	3.44
9	0.055~0.060	0.00	0.00	2.41	1.63	0.00	2.23	2.03	0.00	2.58	2.32
10	0.060~0.090	0.00	0.00	11.45	7.09	0.00	15.71	9.98	0.00	19.76	13.74
11	0.090~0.100	0.00	0.00	4.53	2.11	0.00	10.15	6.34	0.00	14.74	10.03
12	0.100~0.130	34.90	49.27	36.45	36.79	50.89	24.61	25.91	52.58	13.53	13.93
Sum		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

※ P : Predominant Approach, C : Composite Approach, M : Mosaic Approach

1 (8)

5.5. 분석결과

25 m 원시격자의 조도계수는 Vieux(2005)에 의해 제시된 8가지의 토지이용상태별 조도계수 값을 GIS-tool을 이용하여 해당구역의 속성을 부여하였다 (Table 4). 이와 같이 적용된 공간스케일 확장기법인 지배면적(P), 산술평균(C) 및 모자이크(M) 등을 위의 적용식에 따라 원시격자 25 m에 대해 100, 250, 500 m로 확장하여 분석한 결과, 조도계수의 분포특성은 Table 5와 같이 정리하였고, Fig. 8에 격자크기에 따른 구간별 조도계수 특성을 도시하였다.

Table 4. Landuse reclassification for roughness values (Vieux, 2005)

Class	Description	Roughness(n)	Remarks
1	Water Area	0.03	
2	Urbanization	0.015	
3	Eroded Land	0.035	
4	Marsh	0.05	
5	Grassland	0.13	
6	Forest	0.10	
7	Paddy Field	0.05	
8	Cropland	0.035

Fig. 8. Roughness distribution by spatial aggregation scheme.

Fig. 9. RMSE of percent bias from original scale.

스케일 확장시, 25 m 원시격자에서의 조도계수 값은 0.05~0.055구간에 41.08%, 0.1~0.13구간에 34.9%로 두 구간에 75.98%로 집중분포되어 있다. 스케일이 확장되면 조도분포는 일정부분 평활화될 수 밖에 없는데, 각 기법에 따라 조도계수 분포특성에 있어서 다소 차이를 보이고 있다. 조도계수구간별 원시격자스케일(25 m)에서의 조도계수와 100, 250, 500 m 스케일에서의 리샘플링기법별 조도계수와 백분위오차의 RMSE를 전구간누적해 비교분석한 결과 100 m 스케

일에서는 기법별로 큰 차이가 없었고, 250 m와 500 m로 스케일이 증가함에 따라 산술평균법은 다소 증가하는 경향을 보였으며, 모자이크방법은 뚜렷이 증가하는 경향을 보이고 있었다 (Fig. 9). 즉, 원시스케일의 조도계수분포에 대한 보존은 지배면적법이 가장 우수한 것으로 보인다. 그러나, 조도계수분포의 보존이 유출플럭스의 보존을 보장하지는 않기 때문에, 이것이 분포형 강우-유출모형에서의 조도계수 리샘플링에 있어서 지배면적법이나 산술평균법외에 모자이크법이 필요한 이유가 된다. Fig. 10에 중랑천 유역에 대해 격자크기에 따른 조도계수 분포를 도시하였다. 이때 격자의 개수는 100 m 일때는 52,700개, 500 m 2,048개로 구성하여 유출수문반응 모의에 적용하였다(Table 6).

6. 기법별 수문반응 및 정량적 평가

각 기법별 조도계수 분포특성을 분석한 결과를 이용하여 격자분포형 강우-유출 모형인 $Vflo^{TM}$ 에 적용하여 유출수문반응을 검토하였다. 이 때 다른 매개변수의 입력조건인 ASCII 파일은 동일한 조건과 매개변

Table 6. Grid number for flow network by grid scale

Grid-scale(m)	Grid number for flow network				Remarks
	X-dir	Y-dir	Total # of grids	Ratio	
25	681	1,238	843,078	1	Original grid scale
100	170	310	52,700	1/16	
250	68	124	8,432	1/100	
500	32	64	2,048	1/411

Fig. 10. Roughness distribution of grid size change for methods.

수 보정 후의 값을 적용하였다. 정량적 평가를 위해 MAPE(Mean Absolute Percentage Error), RMSE(Root Mean Square Error), COE 등을 이용하였다. 이때 MAPE와 RMSE는 ‘0’에 가까울수록 모형의 항상성(model performance)이 개선되어 수치모의치가 관측치에 근접함을 나타내고, COE(Coefficient Of Efficiency or Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, Nash와 Sutcliffe, 1970)는 $-\infty < COE \leq 1$ 의 범위를 갖고 “1”일 경우 관측치와 모의치가 정확하게 일치할 때로 모형의 항상성이 가장 높은 것을 나타낸다. 이에 산정식은 다음과 같다.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{obs} - Q_{si}}{Q_{obs}} \right| \times 100 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{si})^2} \quad (10)$$

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (-\infty < COE \leq 1) \quad (11)$$

여기서, i : 해당 시간, N : 해당시간의 총 수

Q_{si} : i 시간의 계산치, Q_{obs} : i 시간의 관측치

$\bar{Q}_{obs}$: 관측치 평균

위 식에 대한 정량적 평가대상은 해당유역별 격자 크기별 총유출체적 및 첨두유량 등을 상호 비교하여 평가하였으며 총유출체적의 RMSE 산정시 유역면적을 나누어 수심의 값(mm)을 나타내었다. Fig. 11은 스케일 확장기법에 대한 격자분포형 강우-유출 프로그램인 VfloTM 모형의 유출수문반응 결과를 도시하였으나, 정량적 평가를 위해 위에서 서술한 오차해석기법을 적용하였다.

Table 7을 보면, 자연상태를 고려한 중랑천 상류의

Table 7. Performance evaluation for runoff volume and peak simulation

Basin type	Grid scale	Scheme	MAPE		RMSE		COE(Volume)
			Volume(%)	Peak(%)	Volume(mm)	Peak(cms)	
Upstream from Shingok bridge (Natural)	100 m	Predominant	27.29	2.38	442.16	10	0.59
		Composite	27.56	5.14	446.58	22	0.55
		Mosaic	27.12	0.52	439.41	2	0.60
	250 m	Predominant	26.88	0.47	435.59	2	0.71
		Composite	26.88	2.37	435.58	10	0.71
		Mosaic	26.60	4.48	430.97	19	0.69
	500 m	Predominant	41.62	8.15	674.43	35	0.52
		Composite	41.60	7.06	673.98	31	0.52
		Mosaic	41.41	1.66	670.96	7	0.47
Wui Stream (Complex)	100 m	Predominant	1.51	0.98	4.79	3	0.29
		Composite	2.04	1.20	6.49	4	0.32
		Mosaic	2.04	1.20	6.49	4	0.32
	250 m	Predominant	1.51	1.20	6.49	3	0.29
		Composite	2.04	0.98	4.79	4	0.32
		Mosaic	2.04	1.32	8.25	4	0.32
	500 m	Predominant	17.23	0.35	54.72	1	0.55
		Composite	17.60	0.64	55.88	2	0.52
		Mosaic	17.67	0.46	56.12	2	0.53
Cheonggye Stream (Urban)	100 m	Predominant	3.10	2.52	2.17	2	-0.79
		Composite	1.30	1.36	0.97	1	-0.87
		Mosaic	1.30	1.36	0.91	1	-0.89
	250 m	Predominant	10.81	3.26	7.58	2	0.04
		Composite	4.60	2.49	3.23	2	0.38
		Mosaic	9.55	2.00	6.69	2	0.13
	500 m	Predominant	14.18	4.14	9.94	3	-0.20
		Composite	5.27	3.49	3.70	3	0.40
		Mosaic	11.79	2.13	8.26	2	0.03

Fig. 11. Comparison of hydrologic response by methods.

100 m 격자크기를 보면 모자이크법의 MAPE는 유출체적과 첨두유출에서 각각 27.12%와 0.52%, RMSE는 각각 439.41 mm와 $2 \text{ m}^3/\text{sec}$, COE 0.59로 분석되었고, 500m의 경우는 MAPE에서 마찬가지로 각각 26.60%와 4.48%, RMSE는 각각 430.97 mm와 $19 \text{ m}^3/\text{sec}$, COE 0.69로 자연유역의 경우, 리샘플링기법

중 모자이크법(Mosaic Approach)이 유출모의에 있어서 유출체적과 첨두유출에 있어서의 오차가 상대적으로 가장 작은것으로 나타났다. 그러나 복합 및 도시유역의 경우, 토지이용상태가 상대적으로 일정치가 않고, COE가 “-” 값이 나오는 등 오차범위가 확대되고, 수치의 일관성을 찾기 어려워, 최적의 기법을 구분해 내기는 어려운 것으로 판단된다.

7. 결 론

중랑천 유역의 토지이용상황에 따라 자연유역(중랑천 상류), 복합유역(우이천), 도시유역(청계천)을 구분하여 분포형 강우유출모형의 매개변수 민감도를 산정하였다. 지표유출 조도계수의 리샘플링을 위하여 지배면적법, 산술평균방법 및 대기모델링에서 사용하는 모자이크 방법 등을 사용하여 격자기반 분포형 모형인 *Vflo*TM 프로그램을 사용하여 각 기법별 유출반응을 검토하고 정량적 평가를 통해 아격자규모에서의 스케일확장을 통하여 모델격자에서의 조도계수대표값을 산정하는 최적의 기법을 제시하였다. 본 연구 수행을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 조도계수 구간별 원시격자스케일(25 m)에서의 조도계수와 100, 250, 500 m 스케일에서의 리샘플링 기법별 조도계수와의 백분위오차의 RMSE를 전구간 누적해 비교분석한 결과 100 m 스케일에서는 기법별로 큰 차이가 없었고, 250 m와 500 m로 스케일이 증가함에 따라 산술평균법은 다소 증가하는 경향을 보였으며, 모자이크방법은 뚜렷이 증가하는 경향을 보이고 있었다. 즉, 단순히 원시스케일의 조도계수분포에 대한 산술적 대표값은 조도계수분포를 보존하는데는 유리할 수 있으나, 물리적 근거가 약한 기법이기 때문에 지표유출플럭스의 물리적 보존을 구현할 수 있는 조도계수 리샘플링의 제시가 필요하였다.

2. 지배면적법, 산술평균법, 모자이크법에 의한 조도계수 리샘플링을 수행하였고, 분포형 강우유출모형을 이용하여 총유출체적 및 첨두유량을 산정하였다. 수치모의값과 관측값의 오차에 대한 정량적 평가를 위해 MAPE, RMSE, COE를 적용하여 기법별 유출반응을 평가하였다. 자연유역과 도시유역의 500 m 스케일 모자이크 리샘플링의 경우 모델링결과를 보면, 지표조도계수의 분포는 원시스케일과 가장 큰 차이를 보이고 있었으나, 지표유출모의에 있어서는 가장 작은 오차를 보이고 있었으며, 이는 유출체적보다 첨두유출부면에서 두드러진 개선효과를 보이고 있었다.

3. 본 연구의 성과는 모자이크법 적용에 있어서 식생타입에 따른 가중값을 등가중값으로 가정해서 적용한 결과이다. 이는 등간격의 격자와 평균경사를 사용

하여 얻은 결과로서 아격자에서의 지표경사와 동수반경등을 반영한다면 더욱 개선된 효과를 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단의 신진연구자 기초연구사업(과제번호 92585)의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 강부식, 김서영, 고익환, 2005, 레이더 강우를 이용한 격자기반의 저수지 홍수유입량 모의, 2005 학술발표회, 한국수자원학회, 183-188.
- 건설교통부, 2006, 도시홍수재해관리기술연구사업단 연구성과보고서, 별책 제2권, 도시홍수재해 해석기술.
- 건설교통부, 2007, 도시홍수 재해해석 기술·2, 건설기술혁신사업 제4차년도 중간보고서, 별책 제2권, 제1-5세세부과제, 56-102.
- 박완희, 2007, 강우-유출해석을 위한 분포형 모형의 적용성 향상에 관한 연구, 석사학위논문, 경기대학교.
- 박진혁, 강부식, 2006, 댐유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형 모형과 집중형 모형의 유출해석 비교, 한국지리정보 학회지, 9(3), 171-182.
- 서울특별시, 2007, 대학과 연계한 하천관리에 대한 연구용역(2단계2차)보고서.
- 정인균, 이미선, 박종윤, 김성준, 2008a, 격자기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(I)-이론 및 모형, 대한토목학회논문집, 28(6B), 697-707.
- 정인균, 이미선, 박종윤, 김성준, 2008b, 격자기반 운동과 강우유출모형 KIMSTORM의 개선(II)-적용 및 분석, 대한토목학회논문집, 28(6B), 709-721.
- 진병화, 황수진, 1999, Vegetation Canopy의 접지층 환경에 대한 열적 영향, 한국환경과학회지, 8(2), 145-150.
- Koster, R. D., Suarez, M. J., 1992, A comparative analysis of two land surface heterogeneity representations, Journal of Climate, AMS, 5(12), Article, 1379-1390.
- Lee, K. H., 2008, Integrating remotely sensed data using a simple vegetation parameter aggregation method applicable to a distributed rainfall-runoff model, ASCE J. of Hydrologic Engineering, 13(4), 236-241.

- Nash, J., Sutcliffe, J., 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Vieux, B. E., 2004, *Distributed hydrologic modeling using GIS*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Vieux, B. E., 2005, *Vflo*TM 3.0 Desktop User manual.
- Vieux, B. E., Kang, B., Park, J. H., 2009, Distributed hydrologic prediction: Sensitivity to accuracy of initial soil moisture conditions and radar rainfall input, *ASCE J. of Hydrologic Engineering*, 14(7), 671-689.