



A Study on the determination of the optimal resolution for the application of the distributed rainfall-runoff model to the flood forecasting system - focused on Geumho river basin using GRM

Kim, Sooyoung^a · Yoon, Kwang Seok^{b*}

^aSenior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

^bSenior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 18-101

Received: 7 November 2018; Revised: 7 December 2018 / 14 December 2018; Accepted: 14 December 2018

Abstract

The flood forecasting model currently used in Korea calculates the runoff of basin using the lumped rainfall-runoff model and estimates the river level using the river and reservoir routing models. The lumped model assumes homogeneous drainage zones in the basin. Therefore, it can not consider various spatial characteristics in the basin. In addition, the rainfall data used in lumped model also has the same limitation because of using the point scale rainfall data. To overcome the limitations as mentioned above, many researchers have studied to apply the distributed rainfall-runoff model to flood forecasting system. In this study, to apply the Grid-based Rainfall-Runoff Model (GRM) to the Korean flood forecasting system, the optimal resolution is determined by analyzing the difference of the results of the runoff according to the various resolutions. If the grid size is too small, the computation time becomes excessive and it is not suitable for applying to the flood forecasting model. Even if the grid size is too large, it does not fit the purpose of analyzing the spatial distribution by applying the distributed model. As a result of this study, the optimal resolution which satisfies the accuracy of the basin runoff prediction and the calculation speed suitable for the flood forecasting was proposed. The accuracy of the runoff prediction was analyzed by comparing the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE). The optimal resolution estimated from this study will be used as basic data for applying the distributed rainfall-runoff model to the flood forecasting system.

Keywords: Flood forecast, Distributed model, GRM, Optimal resolution, Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

분포형 유역유출모형의 홍수예보시스템 적용을 위한 최적해상도 결정에 관한 연구 - GRM 모형을 활용하여 금호강 유역을 중심으로

김수영^a · 윤광석^{b*}

^a한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원, ^b한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

요 지

한국에서 현재 사용되고 있는 홍수예보모형은 집중형 강우-유출모형을 적용하여 유역의 유출을 계산하고 하도 및 저수지 추적모형 등을 활용하여 하천의 수위를 예측한다. 집중형 모형은 유역을 동질의 배수구역으로 가정한다. 따라서 유역내의 다양한 공간적 특성을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 또한, 사용되는 강우자료도 지점강우를 활용하기 때문에 공간적인 분포를 자세히 고려하지 못한다는 한계가 있다. 따라서 홍수예보모형에 분포형 모형을 적용하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 GRM모형을 한국 홍수예보시스템에 적용하기 위해 모형의 다양한 해상도에 따른 유역유출의 결과의 차이를 분석하여 최적의 해상도를 결정하고자 한다. 모형의 격자가 너무 조밀한 경우 계산시간이 과다하게 되어 홍수예보모형에 적용하기에는 적합하지 않다. 너무 성길 경우에도 분포형 모형을 적용하여 공간적인 분포를 파악하고자 하는 목적에 맞지 않게 된다. 본 연구의 결과로 유역유출 예측의 정확성을 만족시키고 홍수예보에 적합한 계산속도가 나올 수 있는 최적 해상도를 제시하였다. 유출량 예측의 정확도는 Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) 값의 비교를 통해 분석하였다. 본 연구에서 도출된 최적해상도 산정 결과는 분포형 유역유출모형을 홍수예보모형에 적용하기 위한 기초자료로 활용될 것이다.

핵심용어: 홍수예보, 분포형 모형, GRM, 최적 해상도, Nash-Sutcliffe 모형 영향계수

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0270
E-mail: ksyoon@kict.re.kr (K. S. Yoon)

1. 서론

최근 기후변화로 인한 홍수발생 가능성과 위험이 증가하는 경향이다. 따라서 하천의 이용이 빈번해짐에 따라 홍수위험을 사전에 예측하는 기술에 대한 필요성이 증가하고 있다. 우리나라의 홍수예측 시스템은 1974년에 시작되었으며, 현재의 홍수시스템은 2012년에 통합적으로 개선되어 현재까지 사용되고 있다. 한국의 홍수예측시스템은 집중형 강우-유출모형을 이용하여 유역의 유출량을 계산하고 하천의 수위는 하도 및 저수지 추적모형에 의해 예측된다. 집중형 강우-유출모형은 계산속도가 빠르다는 장점을 가지고 있지만 유역을 균일한 배수구역으로 가정하기 때문에 강우의 분포와 지형의 특성이 고려되지 않는 단점이 있다. 따라서 홍수예측시스템에 분포형 강우-유출모형을 적용하기 위한 많은 연구가 진행 중에 있다. Montaldo *et al.* (2005)은 분포형 강우-유출모형의 매개변수를 줄여서 모델의 성능손실을 최소화하기 위한 연구를 진행했다. 지배적인 매개변수를 선정하여 모델의 성능을 향상시키기 위한 노력을 하였다. Park *et al.* (2008)은 분포형 강우-유출모형인 Vflo™ 를 이용하여 국부적인 홍수로 인한 홍수 유출량을 예측했다. Brocca *et al.* (2011)은 연속형 준분포 강우-유출모형인 MIDSc를 이용하여 Tiber 강(중앙 이탈리아)의 홍수예측모형을 제안하였다. Noh *et al.* (2014)은 레이더강우 및 분포형모형에 대해서 공간해상도에 따른 매개변수 추정에 미치는 영향을 평가하였다. 기존의 연구는 대부분 모형의 정확도와 공간해상도에 따른 매개변수의 영향을 평가하는 것이 대부분이었으며 실제 홍수예보모형에 적용하기 위해서는 계산속도에 대한 평가가 추가되어야한다. 따라서 분포형 강우-유출모형을 홍수예보에 적용하기 위해서는 홍수예측의 정확도를 유지하면서 계산시간을 단축시키기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 분포형 강우-유출모형을 홍수예측시스템에 적용하기 위해 예측계산시간을 단축하면서 목표 정확도를 만족시킬 수 있는 최적의 해상도를 제안하였다.

2. 기본이론

본 연구에서 사용 된 GRM (Grid-based Rainfall-Runoff Model)은 한국건설기술연구원에서 개발한 물리적 기반의 분포형 강우-유출모형이며, 병렬계산이 가능하고 계산속도 향상이 가능하여 모형의 최적화를 통해 홍수예보시스템의 선행예보시간을 만족시킬 수 있을 것으로 판단하여 선정하였다.

2.1 모형의 구조

GRM 모형은 흐름방향을 x 방향, 흐름에 수평으로 직각인 방향을 y 방향으로 설정한다. h 는 수심을 나타내며 검사체적에서의 유입성분은 지표유입량, 횡방향 유입량, 강우량이다 (Fig. 1 참조) (KICT, 2018). 검사체적은 지표층(Land surface), 지표하층(Layer A), 기저층(Layer B)로 구성된다. 검사체적에서의 유출성분은 지표유출량과 침투량이다. 이때 침투량은 지표하 유출에 기여하며, 하류가 하천일 때 하천의 횡방향 유입량이 되고, 포화된 지표면인 경우 지표면 유입에 기여하게 된다(Beven, 1979).

2.2 지배방정식

GRM 모형은 지표면과 하도의 유출계산은 운동과 방정식을 지배방정식으로 적용하며, 침투량산정은 Green-Ampt방정식을 지배방정식으로 적용한다(KICT, 2018).

2.2.1 운동과 방정식

운동과 방정식은 연속방정식과 운동량방정식을 만족하며 지표면의 연속방정식은 Eq. (1)과 같고 하도의 연속방정식은 Eq. (2)에 나타냈다. 또한, 운동과 방정식의 운동량 방정식은 Eq. (3)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f + \frac{q_r}{\Delta y} \tag{1}$$

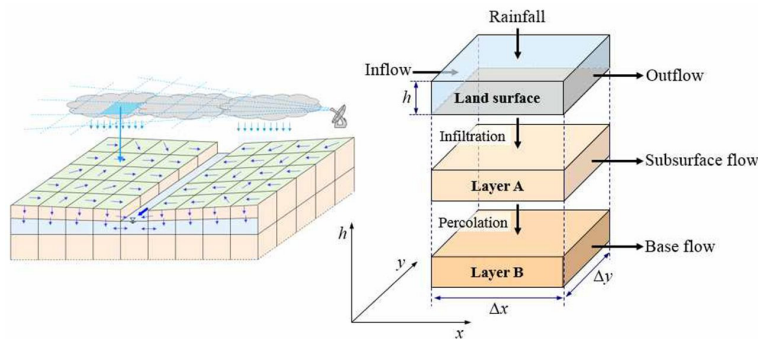


Fig. 1. Schematic of hydrologic input and output in control volume (KICT, 2018)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = r\Delta y + q_L + q_{ss} + q_b \quad (2)$$

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

여기서, q 는 단위폭당 유량($q = uh$), x 는 흐름방향, u 는 x 방향 유속 성분, r 은 강우강도, f 는 침투율, q_r 은 복귀류, A 는 x 방향에 직각인 하도 단면적, Q 는 하도 유량, h 는 수심, q_L 은 지표 흐름에 의한 횡방향 유입량, q_{ss} 는 하도로 유입되는 지표하 유출량, q_b 는 기저유출량, t 는 시간, S_0 는 바닥경사, S_f 는 마찰경사이다.

2.2.2 Green-Ampt 방정식

GRM에서는 강우강도가 침투율 보다 클 때 발생하는 침투 초과유출과 토양의 포화시에 발행하는 포화초과유출을 계산하며 이 때 Green-Ampt방정식을 지배방정식으로 적용한다. 지배방정식은 Eq. (4)과 Eq. (5)에 나타냈다(KICT, 2018).

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (4)$$

$$f(t) = K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \quad (5)$$

여기서, $F(t)$ 는 시간 t 에서의 누가침투량, $f(t)$ 는 시간 t 에서의 침투율, $\Delta\theta$ 는 토양수분함량변화($= (1 - S_e)\theta_e$), S_e 는 유효포화도($= (\theta - \theta_r) / (\eta - \theta_r)$), θ 는 수분함량, θ_r 은 잔류수분함량($= \eta - \theta_e$), η 은 공극률, θ_e 은 유효공극율, ψ 은 습윤전선흡인수두, K 는 수리전도도 이다.

3. 모형구축

본 연구에서는 레이더 강우가 존재하고 유역 내에 유량의 검증이 가능한 수문관측소(금호관측소)가 존재하는 금호강 유역을 대상으로 하여 GRM 모형을 구축하였다. 홍수예보모형의 선행예보시간을 만족할 수 있는 최적 해상도를 찾기 위해 하나의 홍수사상에 대해서 다양한 해상도로 모형을 구축하였다.

3.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 금호강 유역으로 유역면적은 약 2,092.42 km²이다(Water Resources Management Information System). 낙동강 유역의 중권역 중 본류에 접한 유역으로는

최대 유역면적이다. 모형의 계산시간은 유역의 면적과 밀접한 관계를 가지므로 최대유역인 금호강 유역을 대상으로 정확도와 계산시간을 만족시킨다면 타 유역도 만족시킬 수 있다고 판단하여 금호강 유역을 대상유역으로 선정하였다.

금호강 유역은 최상류 유역에 용수전용댐인 영천댐이 위치하고 있다. 하류단은 낙동강 본류와의 합류점이 있으며 금호강 유역은 수자원단위지도(Ver 3.0)에서 총 19개의 표준유역으로 분할된다. 따라서 본 모형에서도 수자원단위지도의 표준유역과 동일하게 소유역을 분할하였으며 7번 소유역에 유량검증이 가능한 금호관측소가 위치하고 있어 보정지점으로 활용하였다(Fig. 2 참조).

3.2 입력자료 및 경계조건

강우-유출 분석은 2016년 9월에 집중호우가 내렸던 9월 2일 16시부터 9월 4일 23시 50분사이에 발생한 강우사상을 대상으로 하였다. 강우입력자료는 국토교통부의 강우레이더 관측자료를 활용하였으며 강우레이더의 해상도는 250 m × 250 m이다. 최대강우가 발생한 2016년 9월 3일 05시30분의 강우분포는 Fig. 3에 나타냈다.

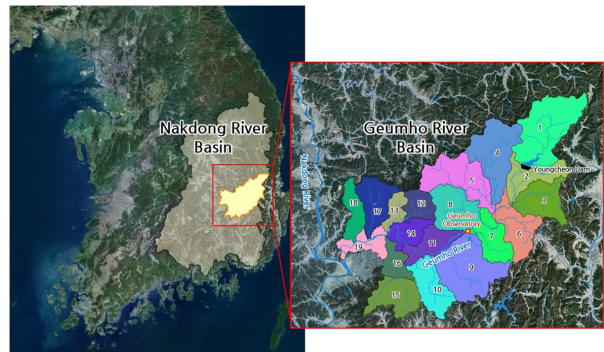


Fig. 2. Geumho river basin and sub-basin

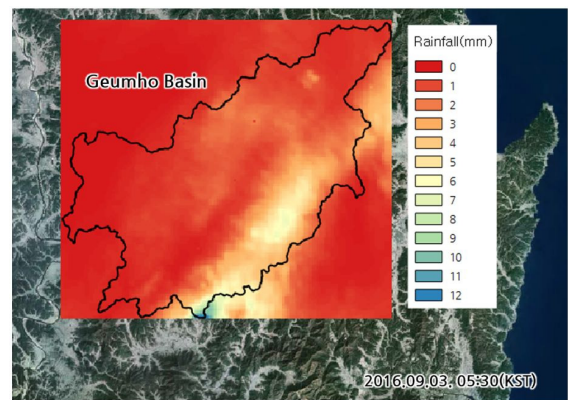


Fig. 3. Radar rainfall data at maximum rainfall

상류의 경계조건으로 영천댐의 10분당 방류량 실측자료를 활용하였으며, 격자의 크기는 500 m, 300 m, 250 m, 200 m, 100 m로 총 5케이스로 설정하였다. 본 연구에서는 별도의 고성능컴퓨터를 활용하지 않고 현재 홍수예측모형이 PC기반이므로 PC에 적용하였으며 추후연구에서 고성능 컴퓨팅 시스템으로 적용하기 위한 연구를 진행할 예정이다(Table 1 참조).

3.3 입력 매개변수

지표면의 조도계수는 Engman (1986)과 Vieux (2004)가 제안한 토지피복별 조도계수를 적용하였으며(Table 2 참조) 토양에 대한 매개변수는 Rawls *et al.* (1983)과 Chow *et al.* (1988)이 제안한 Green-Ampt 모델의 매개변수를 적용하였고 GRM모형에 적용되는 CODE와 함께 Table 3에 나타냈다.

포화초과유출을 계산하기 위한 한국토양의 토양심은 정밀 토양도의 토양층을 기준으로 분류된다. 각 토양심의 분류 범위는 토양조사사업의 성과를 토대로 제안되었으며 GRM에 적용되는 Code값과 함께 Table 4에 나타냈다(National Institute of Agricultural Science and Technology, 1992).

Table 1. Period of flood and simulation conditions

Period of flood	2016.09.02. 16:00 ~ 2016.09.04 23:50	
Input rainfall data	Radar rainfall (250 m × 250 m)	
Upstream	Youngcheon Dam	
Downstream	Confluence with Nakdong river	
Grid size	500 m (Case 01) 300 m (Case 02) 250 m (Case 03) 200 m (Case 04) 100 m (Case 05)	
PC Specification	CPU	Intel Core i7-4790 CPU 3.6 GHz (4 core)
	RAM	32 Gbyte
	OS	Windows 10 64 bit

Table 2. Roughness coefficients according to land cover

7 Classifications of land cover (Ministry of Environment, Korea)		Roughness coefficient
Code	Attributes	
100	Urban/dry area	0.015
200	Agricultural area	0.035
300	Forest	0.1
400	Grass	0.15
500	Wetland	0.07
600	Bare	0.02
700	Water	0.03

Table 3. Green-Ampt model parameters according to the soil texture

Soil Texture	Porosity	Effective porosity	Residual moisture content	Hydraulic conductivity [cm/hr]	Code
Silty clay loam	0.471	0.432	0.039	0.1	1
Silt loam	0.501	0.486	0.015	0.65	2
Sandy loam	0.453	0.412	0.041	1.09	3
Sand	0.437	0.417	0.02	11.78	4
Clay loam	0.464	0.309	0.155	0.1	5
Clay	0.475	0.385	0.09	0.03	6
Loamy sand	0.437	0.401	0.036	2.99	7
Loam	0.463	0.434	0.029	0.34	8

Table 4. Soil depth classification for soil series

Soil depth classification	Soil Depth (cm)		Code
	USDA*	Detailed soil map (Korea)	
Deep	50-60	100-150	1
Very shallow	0-10	0-20	2
Moderation	35-50	50-100	3
Shallow	10-30	20-50	4

*USDA: United States Department of Agriculture

4. 강우-유출 모의 수행

4.1 매개변수 보정

GRM 모형에서 사용되는 유출계산의 지배적인 매개변수는 초기포화도, 최소하상경사, 하도조도계수이다. 초기포화도는 토양의 침투량에 영향을 주는 중요인자로 침투유량과 침투시간, 전체유출량에 민감하게 반응한다. 최소하상경사와 하도조도계수는 침투유량과 침투시간에 민감하게 반응한다(Choi and Kim, 2010). 모든 케이스에 대해서 지배매개변수의 값을 변화시켜 모형을 보정하였으며 모형의 적합도는 NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient)값이 0.9 이상일 때로 정의하였다. NSE의 계산식은 Eq. (6)에 나타냈다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \overline{Q_{obs}})^2} \tag{6}$$

여기서, Q_{obs} 는 관측유량, Q_{sim} 은 계산유량, $\overline{Q_{obs}}$ 은 관측유량의 평균이다.

4.2 GRM 모의 결과

각각의 케이스에 대해서 유출해석 결과에 큰 민감도를 갖는 초기 포화도, 최소하상경사 및 하도 조도계수에 대한 매개변수 보정을 수행하였다. 매개변수 보정은 시행오차법으로 매개변수의 수정과 결과의 분석을 반복적으로 수행하여 첨두홍수량과 첨두홍수량 발생시간이 일치하도록 하였다. 평균적으로 5회정도 매개변수 보정을 수행하면 첨두홍수량과 첨두홍수량 발생시간을 일치 시킬 수 있는 것으로 나타났다.

모든 케이스에 대해서 매개변수 보정된 금호관측소의 하도유량과 평균강우량을 Fig. 4에 도시하였다. 홍수량이 증가하는 구간에서는 모든 케이스에서 높은 정확도를 나타냈으나 홍수량이 감소하는 구간에서는 상대적으로 정확도가 높지 않았다. 이는 기저유출량이 하도유출에 제대로 반영이 되지 않아 과소산정된 것으로 판단된다. 기저유출은 지표면, 하도유출에 비해 반응시간이 느려서 단일 홍수사상에서는 홍수량이 감소하는 구간에서 발생하게 된다. 홍수량 감소구간에서의 정확도를 향상시키기 위해서는 기저유출량에 대한 매개변수를 보정하는 것이 필요하나 홍수예보의 관점에서는 홍수가 증가하는 구간의 첨두홍수량 및 첨두시간에 대한 정확도가 중요하기 때문에 본 연구에서는 별도의 기저유출에 대한 보정을 수행하지 않았다.

대표 매개변수들의 범위와 산정된 NSE 값, 모의 시간은 Table 5에 나타났다. 매개변수 보정은 모든 케이스에 대해서

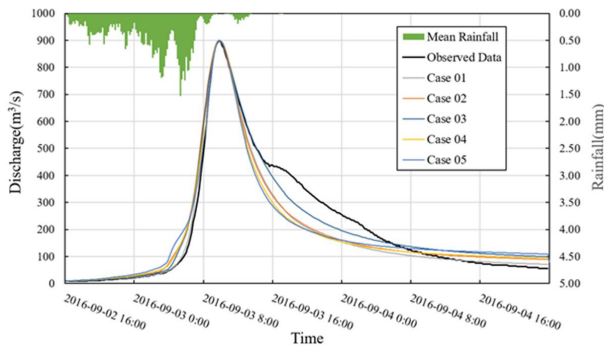


Fig. 4. The results of GRM simulation

Table 5. Results of parameter calibration and simulation time

Case	Initial saturation	Minimum bed slope	Channel roughness coefficient	NSE	Simulation time (sec)
Case01	0.90 ~ 0.98	0.0002	0.040 ~ 0.046	0.93	9
Case02	0.92 ~ 0.94	0.0002	0.042 ~ 0.045	0.92	40
Case03	0.96 ~ 0.97	0.0002	0.036 ~ 0.037	0.96	70
Case04	0.80 ~ 0.90	0.0002	0.042 ~ 0.049	0.91	120
Case05	0.70 ~ 0.76	0.0002	0.039 ~ 0.044	0.90	1087

NSE값이 0.90 이상이 될 때까지 수행하였다. 평균적으로 5회 정도의 매개변수 보정을 수행하면 NSE값 0.90 이상으로 나타났다. 최소하도 경사 값은 하도조도계수에 비해 민감도가 상대적으로 낮아 모든 케이스에 대해서 0.0002 값으로 고정하였다. 초기포화도 값과 하도 조도계수는 대체적으로 격자의 크기가 클수록 높은 값의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 홍수예보시스템에서 레이더 강우의 시간간격은 10분으로 새로운 레이더 강우자료가 입력되기 전에 매개변수 보정을 완료하기 위해서는 평균매개변수 보정수행 횟수 5회를 감안하면 유출모의 계산은 2분(120초)이내에 완료가 되어야한다. 따라서 격자크기가 200 m 이상이 되어야만 선형예보시간을 만족시킬 수 있을 것으로 판단되며, 홍수예보모형의 격자해상도는 레이더 강우자료의 해상도와 동일한 250 m로 하는 것이 적합하다고 판단된다.

4.3 CPU Core에 따른 계산속도 검토

현재의 홍수예보시스템은 PC기반 시스템으로 유출모의가 계산되나 앞으로 고성능컴퓨팅(HPC)기술을 적용하기 위한 연구가 진행 중이다. 따라서 GRM모형에 대해서 CPU core 수에 따른 계산시간의 변화를 검토하였다. 1개~8개까지 CPU core수를 변화시켜 유출모의한 결과는 Table 6과 Fig. 5에 나타났다. CPU core수가 4개 이상인 경우에는 계산속도의 향상이 미미했다. Cpu core수와 계산시간을 1차 역다항식(Inverse Polynomial)형태로 회귀분석한 결과 Eq. (7)과 같이 산정되었으며 이론적으로 CPU core수를 무한대로 늘려도 계산시간은 약 57초에 수렴하는 것으로 나타났다. GRM모형은 Open MP기반의 병렬계산을 수행하는 GRM모형을 그대로 홍수예보시스템에 적용하기 위해서는 계산 CPU Core를 최대 4개로 설정하여 구축하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

$$t = 56.7836 + \frac{86.7343}{N} \tag{7}$$

여기서, t 는 계산시간(sec), N 은 계산에 활용되는 CPU Core 수이다.

Table 6. Results of simulation time according to number of CPU core

Grid size (m)	Number of CPU Core (n)	Simulation time (t) (sec)	Reduction ratio of simulation time (%) $(\frac{t_{core\ 1} - t_{core\ n}}{t_{core\ 1}} \times 100(\%))$
250	1	146	-
	2	96	34.25
	3	83	43.15
	4	77	47.26
	5	75	48.63
	6	72	50.68
	7	71	51.37
	8	70	52.05

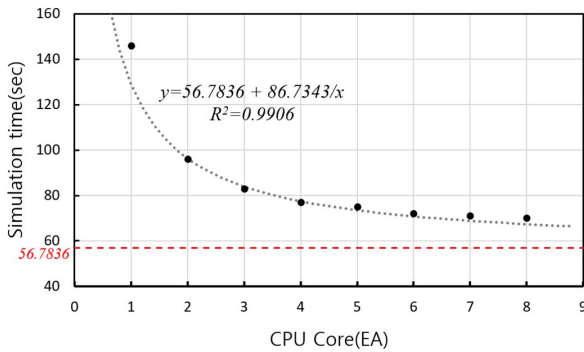


Fig. 5. Simulation time according to CPU Core

5. 결론

본 연구에서는 홍수예보시스템의 선행예보시간을 만족할 수 있는 최적해상도를 도출하기 위해 금호강 유역에 대해서 동일한 홍수사상으로 다양한 격자크기에 대한 강우-유출모의를 수행하였다. GRM을 이용하여 강우-유출모의를 수행한 결과 NSE 값이 0.90 이상이 될 때까지 매개변수 보정을 수행하는데 평균 5회 정도가 소요되었으며 새로운 강우자료가 입력되는 10분 안에 매개변수 보정을 완료하기 위해서는 격자크기가 200 m 이상이 되어야 하는 것으로 나타났다. 레이더 강우 자료의 격자크기가 250 m 인 것을 감안하면 최적 격자 해상도는 250 m로 설정하는 것이 적합하다고 판단된다. 또한, CPU Core 수에 따른 모의시간을 분석한 결과 CPU Core가 4개 이상일 때는 CPU Core 수 증가에 따른 효과가 미미하여 4개로 설정하는 것이 경제적이라고 판단된다.

본 연구에서는 낙동강 중권역 중의 하나인 금호강유역을 중심으로 최적 격자크기를 산정하였다. 이는 유역면적이 큰 금호강에 대한 최적 격자크기 일 뿐 금호강 보다 작은 유역에 대해서는 보다 작은 격자크기라 하더라도 계산시간을 만족시

킬 수 있을 것이다. 또한, 지형적인 공간분포의 변화가 다양해서 격자크기가 더 작게 설정되어야 지형의 공간특성이 반영되는 유역이 존재할 경우 격자크기를 상이하게 구성할 필요도 있다. 그러나 홍수예보모형에 적용하고자 하는 실무적인 판단으로는 레이더 강우의 격자크기가 250 m 이므로 더 작은 격자크기로 구성하여도 강우의 공간분포를 더 상세화 할 수 없다는 한계점도 함께 존재한다. 따라서 추후연구에서 낙동강의 나머지 21개 중권역에 대해서도 검토하여 각각의 최적해상도를 분석하는 연구가 필요할 것으로 판단되며 본 연구의 결과는 홍수예보 시스템의 전체적인 성능을 검토하고 설계하기 위한 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 동일한 홍수사상에 대해서 매개변수를 산정하고 정확도를 검증하였으나 홍수사상이 변화함에 따라 개별적인 매개변수 보정이 수행되어야 한다. 이러한 매개변수의 보정에 대한 횟수를 줄이거나 자동화 할 수 있는 추가적인 연구가 수행되어 홍수예보모형의 활용성을 높이기 위한 노력이 지속적으로 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 물관리연구사업 R&D의 연구비지원 (RE201901045)에 의해 수행되었습니다.

References

Beven, K. J., and Kirkby, M. J. (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 43-69.

- Brocca, L., Melone, F., and Moramarco, T. (2011). "Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting." *Hydrological processes*, Vol. 25, No. 18, pp. 2801- 2813.
- Choi, Y. S., and Kim, K. T. (2010). "Sensitive analysis of GRM parameter." *Proceeding of Annual Conference of Korea Water Resource Association*, Korea Water Resource Association. pp. 1114-1118.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, pp. 110-147.
- Engman, E. T. (1986). "Roughness coefficients for routing surface runoff." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53.
- Korea Institute of Civil engineering and building Technology (KICT) (2018). *Grid based Rainfall-runoff Model User's Manual*.
- Montaldo, N., Rondena, R., Albertson, J. D., and Mancini, M. (2005). "Parsimonious modeling of vegetation dynamics for ecohydrologic studies of water-limited ecosystems." *Water Resources Research*, Vol. 41, No. 10, pp. 1-16.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (1992). *An Introduction to Korean Soils-Supplement, Soil Survey Material 13*, Rural Development Administration, pp. 283-290. (in Korean)
- Noh, S. J., Choi, S. W., Choi, Y. S., and Kim, K. T. (2014). "Impact assessment of spatial resolution of radar rainfall and a distributed hydrologic model on parameter estimation." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 1443-1454.
- Park, J. H., Kang, B. S., and Lee, G. S. (2008). "Application analysis of GIS based distributed model using radar rainfall." *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 16, No. 1, pp. 23-32.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., and Miller, N. (1983). "Green-Ampt infiltration parameters from soils data." *Journal of Hydarulic Engineering*, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.
- Vieux, B. E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*, Kluwer Academic Publishers.
- Water Resources Management Information System (WAMIS) (2003). Republic of Korea, accessed 6 November 2018, <<http://www.wamis.go.kr/eng/main.aspx>>.