분포형 유출모형의 지형 및 강우 격자크기가 유출계산에 미치는 영향

Effect of Terrain and Rainfall Grid Size on Distributed Runoff Simulations

박민규*

Park, Minkyu*

Abstract

This study examined the effect of terrain and rainfall grid size on runoff calculations based on the distributed runoff model. If the ratio of the number of flow network grids to the total number of grids is $>10\%$ for a watershed, then runoff calculations, including the complex hydrologic curve, can be limited to obtain adequate results. The rainfall grid size did not significantly influence the simulation results of the distributed runoff model in medium or large watersheds. Caution was needed for application to small watershed areas of $<100 \text{ km}^2$. Further, upscaling the rainfall grid size to over 1,000 m to reduce simulation time can cause large errors.

Key words : Distributed Runoff Model, Terrain Grid Size, Rainfall Grid Size, Error

요 지

본 연구에서는 분포형 유출모형의 지형 및 강우 격자크기가 유출계산에 미치는 영향을 검토하였다. 우선 지형격자크기와 관련해서는 유역의 전체격자수에 비해 흐름망의 격자수의 비율이 10%가 넘어서는 경우 분포형 모형을 이용하여 복합수문곡선과 같은 세밀한 유출현상의 모의하는데 제한적일 수 있었다. 강우의 격자크기는 중대유역에서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 다만, 100 km^2 미만의 소유역에서 유출모형의 계산속도를 높이기 위해 1000 m 이상 크기의 강우격자로 업스케일링할 경우 큰 오차를 유발할 수도 있으므로 주의가 필요하였다.

핵심용어 : 분포형유출모형, 지형격자크기, 강우격자크기, 오차

1. 서 론

유출해석은 수문모형을 이용하여 강우로 인한 유출발생을 모델링하는 과정이다. 유출해석 과정에 적용되는 다양한 방법들은 적용상에 많은 불확실성이 내포되어 있어 모형에 의한 계산결과와 실제 관측치 간에 일치를 얻는 것은 매우 어렵다. 이러한 유출해석의 불확실성 또는 오차의 발생은 적용하는 모형에 따라 다를 수 있지만 특정모형을 선택하고 적용하는 단계에서는 매개변수의 추정, 강우

입력자료, 관측유량자료 등 3가지 요소로 구분 할 수 있다. 이 중 관측유량자료는 측정방법의 표준화 및 품질관리 방법으로 관리되어야 하는 것이므로 결국 모형을 구축하고 적용하는 엔지니어의 관심사는 매개변수 추정과 면적강우의 적절한 처리에 있다.

분포형 수문모형의 매개변수 추정과 면적강우의 적절한 처리는 지형 및 강우의 시공간적 변동성에 영향을 받는다. 특히 강우는 강우와 무강우의 불연속성을 나타내는 간헐성(intermittency)의 특성도 함께 가지고 있어 그 관측뿐만

*교신저자, 정회원, 중원대학교 창의융합공학부 소방방재공학전공 교수(Tel: +82-43-830-8683, Fax: +82-43-830-8683, E-mail: mkhojin@daum.net)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Jungwon University

아니라 정량화 자체가 매우 까다로운 것으로 알려져 있어 전통적인 수문모형에서 면적평균강우를 사용하는 것은 필연적으로 오차를 내포하게 된다(Yoo et al., 2006; Yoo et al., 2008). 이러한 측면에서 대안으로 사용되는 강우자료 중 하나인 레이더 자료는 강우로부터 반사되는 신호세기를 간접적으로 관측하기 때문에 지상강우강도와 같이 직접적으로 관측할 수는 없지만 공간적으로 고분해능 자료를 얻을 수 있고, 광범위한 영역을 관측할 수 있다. 또한 10분 이내로 관측반경 내 모든 분포형 강우의 표출이 가능하여 신속한 정보 전달이 요구되는 예경보에도 그 활용빈도가 높아지고 있다.

본 연구에서는 분포형 유출모의 결과에 영향을 미치는 지형 및 강우의 격자크기 적용이 유출해석 결과에 미치는 영향을 검토하기로 한다. 분포형 모형의 격자 크기, 레이더 강우의 격자크기에 대해서는 그 동안 다양한 연구결과가 있으며 수 십건 이상의 연구결과들에서 특정한 성격의 지역에서 특정 격자크기가 적합하다고 발표되기도 하였으나 오히려 반박과 재반박 등을 통해 다양한 경우에 사용가능한 적합한 격자크기를 제시하는 것은 어렵다고 인식되고 있다. 때문에 분포형 모형의 적용을 다루는 여러 국제학회의 토론에서는 분포형 모형의 적용에서 격자크기는 **technical art** 부분에 해당하는 것으로 지역별 특성에 따라 적절한 검·보정 과정을 거친 모델링 결과 중에서 그 수행정도가 높은 좋은 참고사례(best practice)를 참고하는 것이 바람직하다고 이야기되고 있다. 본 연구에서는 격자크기의 결정과 관련하여 이러한 취지의 좋은 모델링의 참고사례가 될 사항들을 도출하고자 한다.

2. 분포형 모형의 구축 및 검증

본 연구에서는 분포형 강우-유출 모형을 위해 Vieux (2001), Vieux and Vieux (2002) Vieux (2004)의 과정으로 개발된 VfloTM 모형을 사용하였다. VfloTM 모형은 물리적 기반의 분포형 강우유출과정의 수치해를 구하기 위하여 공간적으로는 유한요소법을 시간적으로는 유한차분 음해법을 사용하고 지표유출 산정을 위하여 운동과 방정식(Kinematic Wave Equation)을 사용한다. 대상유역은 남강댐 유역의 상류에 위치한 함양수위표 지점이다. 유역의 크기는 124 km²이며, 하도경사는 0.0149 (m/m)이다. DEM, 개략토양도, 토지이용도, 그리고 토양유효토심을 기초로 모형의 지형 입력 자료를 구축한 결과는 Fig. 1과 같다. 함양유역은 표고가 145~1253 m로 분포되어 있으며, 산림이 70% 이상인 대표적인 산림유역에 해당한다. 반면에 토양의 유효토심은 대체적으로 얇거나 암석으로 인한 불투수지역이 유역의 대부분을 차지한다.

모형의 적용성 검증을 위해 4개 호우사상을 선정하여 검보정을 수행한 결과는 Table 1 및 Fig. 2와 같다. 결과를 도출한 지형 격자크기는 250 m이며, 강우의 경우 동일하게 250 m를 적용하였으며 지상관측한 강우를 티센평균한 후 유역에 균등하게 적용함으로써 지형 격자크기의 영향만을 고려할 수 있도록 하였다. 이 결과를 보면 적용된 4개의 호우사상의 유출모의 결과 모두 전반적으로 관측유량 수문곡선이 모의유량 수문곡선과 유사하게 나타났으며 특히, 호우사상 1과 3의 모의결과는 관측수문곡선의 상승부와 하강부 형태를 잘 모의하고 있는 것으로 검토되었다.

Fig. 1. Terrain Data

Table 1. Comparison Results Between Observed Flow and Simulated Flow

Storm event	Runoff volume ($10^6 m^3$)			Peak discharge (m^3/sec)		
	observed	simulated	error (%)	observed	simulated	error (%)
Event 1	1689.7	1781.1	5.41	117.1	116.9	0.17
Event 2	1014.0	919.2	9.35	45.8	46.0	0.44
Event 3	635.3	606.5	4.53	44.6	44.8	0.45
Event 4	2747.3	1957.7	28.74	159.1	159.0	0.06

Fig. 2. Observed and Simulated Hydrograph

3. 지형 격자크기에 따른 유출영향 분석

본 연구에서는 우선 지형입력자료의 격자크기를 결정하기 위한 민감도 분석을 수행하였다. 이때 강우는 유역평균강우를 고려하여 그 영향을 최소화하였다. 지형자료의 격자는 digital elevation model (DEM)의 최소격자 크기인 30 m부터 1000 m 까지 총 5가지(30, 100, 250, 500, 1000 m) 크기로 구분하였다. 이를 도식화한 결과는 Fig. 3과 같다. 그림을 살펴보면, 격자의 크기가 증가함에 따라 유역과 하도의 형상이 다소 상이한 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 격자크기별 실제 모의에 고려되는 격자의 개수를 정리한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2의 running time을 살펴보면, 지형입력자료의 격자 크기가 30 m인 경우가 오랜 모델링 시간이 요구되는 반면

정확도의 상승은 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 모델링 시간은 180분 지속기간을 가진 호우사상에 적용된 것으로 강우지속기간이 보다 길어진다면 요구되는 소요시간의 크기 역시 훨씬 커질 것을 알 수 있다. 이를 고려할 때 유출해석의 정확도를 높이기 위해 지형 격자크기를 무작정 작게 하는 것은 큰 의미가 없으며 오히려 컴퓨팅능력을 고려하여 일정 시간 이내에 그 결과를 확인할 수 있도록 사전분석이 주요함을 알 수 있다.

검증과정에서 가장 우수한 결과를 보였던 호우사상1과 3을 이용하여 지형입력자료의 격자크기에 따른 유출모의결과를 비교분석하였다. 지형입력자료의 격자크기에 따른 유출모의 결과는 Fig. 4와 같으며, 이 결과를 Table 3에 정리하였다.

Fig. 3. Flow Network According to Terrain Grid Size

Table 2. Terrain Data According to Grid Size

Grid size (m)	Grid number (row $\times$ column = total)	Stream grid number	Running time
30	$232 \times 251 = 58232$	512 (0.9%)	over 5 minutes
100	$136 \times 151 = 20536$	393 (1.9%)	within 1 minute
250	$54 \times 60 = 3240$	157 (4.8%)	within 1 minute
500	$28 \times 30 = 840$	79 (9.4%)	within 1 minute
1000	$14 \times 15 = 210$	38 (18.1%)	within 1 minute

Note: () refer to stream grid number / total grid number * 100

Fig. 4. Runoff Simulation According to Terrain Input Grid Size

Table 3. Comparison of Runoff Volume and Peak Discharge with Terrain Grid Size

Storm event	Grid size (m)	Runoff volume ($10^6 m^3$)		Peak discharge (m^3/s)		Peak time
		Simulated	Simulated / Observed (%)	Simulated	Simulated / Observed (%)	Observed - Simulated (min)
1	30	1742.8	106.2	115.6	98.7	0
	100	1684.5	102.7	113.7	97.1	0
	250	1751.5	106.8	115.3	98.4	0
	500	1751.4	106.8	115.3	98.4	0
	1000	1745.3	106.4	112.8	96.3	-30
3	30	625.1	98.6	33.7	75.4	0
	100	664.3	104.7	41.3	92.6	0
	250	691.6	109.1	43.3	97.0	0
	500	709.8	111.9	46.7	104.6	0
	1000	1014.4	159.9	77.5	173.6	-60

이 결과를 살펴보면, 총 유출량의 경우 적용한 호우사상 1과 3의 결과 모두 격자크기의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 침투유출량의 결과에서도 호우사상 1은 격자크기의 변화에 둔감한 반응을 나타냈으며, 호우사상 3의 격자크기 1000 m를 적용한 결과는 다른 적용사례와 차이가 발생하였다. 침투시간의 경우 또한 격자크기에 따라 큰 차이는 발견되지 않았으며, 격자크기 1000 m를 적용한 경우만 다소 침투유출량에 도달하는 시간이 빠르게 나타났다. 이러한 결과들을 미루어 볼 때, 500 m 이내의 격자의 변화에 따른 총 유출량, 침투유출량, 그리고 침투시간의 민감도는 낮은 것으로 판단할 수 있다. 호우사상 3과 같이 침투홍수량 발생시의 거동특성이 매끄럽지 않고 변동성이 크다면 격자크기를 1000 m이상으로 크게 하는 것은 세밀한 변화를 모의하지 못할 가능성이 크므로 주의를 요한다.

이 결과를 고찰할 때 특정한 숫자크기로 표현되는 격자크기가 의미가 있기 보다는 Fig. 3에서 확인할 수 있는 지형 격자크기별 흐름망이 직관적으로 파악하기에 하천의 흐름망을 보여주기애 애매한 형상으로 변화하는 경우에 세밀한 유출을 모의하는데 한계를 보일 수 있다고 판단할 수 있다. 이를 보다 정량적으로 정리하면 물리적인 격자크기가 직접적으로 유출계산의 오차발생에 영향에 미치는 보다는 모형의 구축측면에서 격자의 구성비율 등이 실제 유역의 비율과 차이가 클 경우 오차가 나타날 가능성이 커진다고 할 수 있다. 이를 기초로 위 결과를 다시 해석하면 다음과 같다. 먼저 우리나라 전체를 대상으로 전체면적 대비 하천충면적의 비율은 1%가 되지 않는다. 지역별 구성비율의 다양성과 국지적인 호우시 침수지역을 고려한다 하더라도 이 비율은 10%를 넘지 않는 것으로 알려져 있다. 제한된 결과이지만 이를 기준으로 해석하면 수치해석의 격자는 대상유역의

전체면적과 홍수시 흐름이 발생하는 면적의 비율을 어느 정도 유사하게 구현하고 있어야 한다. Table 2에서 전체 격자수 대비 흐름망 격자수의 비율이 10%를 넘어서는 경우 Table 3의 결과와 같이 오차가 상당히 큰 유출계산 결과를 초래할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 양상은 호우사상 1처럼 하나의 침투를 가지는 수문곡선의 경우보다 호우사상 2와 같이 두 개 이상의 침투를 가지는 복합수문곡선에서 보다 현저한 영향을 미치는 것으로 검토되었다. 이를 고려하면 흐름망 격자의 비율이 가지는 영향은 예경보 업무와 같이 복합수문곡선의 세밀한 유출곡선 변화를 다룰 경우 더 크게 나타날 수 있다.

4. 분포형 강우의 격자크기에 따른 유출영향 분석

유역의 상하류 지점에 따른 흐름변화를 분포형 모형이 적절히 모의할 수 있는지를 검토하기 위해 2011년 7월 9일 함양유역을 대상으로 유량관측을 시행하였다. 최하류인 함양 수위지점을 기준지점으로 그 상류지점 4개소를 포함한 5개 유역의 형상은 Fig. 5와 같다. 같은 시기의 품질관리(QA/QC) 과정을 거친 기상청 강우 레이다자료를 제공받은 내용은 Fig. 6과 같다. 이를 기초로 본 장에서는 레이다 강우의 격자크기에 따른 영향을 검토하였다. 앞서 분석에서는 전통적인 수자원실무 과정에서 수집가능한 지상강우관측소와 유량측정결과를 활용하여 검·보정을 통해 분포형 수문모형의 매개변수를 검토하였다. 본 장에서는 이렇게 검·보정된 모형의 매개변수를 적용함으로써 강우를 제외한 유출에 미치는 영향인자의 요인을 최소화하고자 하였다. 일반적으로 강우는 아주 짧은 거리에서도 큰 차이를 보일

Fig. 5. Dividing Watershed by Drainage Area Size

Fig. 6. Radar Rainfall Spatio-temporal Distribution

수 있는 것으로 알려져 있으며, 유역 상하류 5개 지점의 유출현상을 동시에 비교함으로써 분포형 강우가 가지는 간헐성이나 이동성 특성이 일부 반영되어 있더라도 유출현상을 모의가능한지를 격자크기를 변화시켜가며 확인하고자 하였다. 한편, Table 4는 5번 지점(station 5)에서의 분포형 강우의 격자크기별 입력정보를 정리한 것으로, 분포형 강우의 격자크기에 따른 모형의 구동은 모든 경우에서 1분 이내에 완료되는 것으로 나타났다.

분포형 강우의 격자크기는 총 5가지(250, 500, 1000, 3000, 5000 m)로 구분하였다. 분포형 강우의 격자가 커짐에 따라

각 격자의 값은 산술평균법을 이용하여 업스케일링(upsampling) 하였다. 지형 입력자료는 250 m로 동일하게 적용하였다. Fig. 7은 분포형 강우의 격자크기별 누적강우량을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 격자의 크기의 변화에 따라 누적강우의 분포가 상이한 것을 확인할 수 있다. 특히, 격자의 크기가 증가함에 따라 지역적으로 상이한 강우의 규모가 일정한 값으로 변환되었으며, 그 강우의 크기는 상대적으로 작은 격자의 크기와 비교하여 과소하게 결정되는 것으로 나타났다. 이는 업스케일링을 통하여 분포형 강우의 특성이 평균화되어 지역적으로 상이한 강우의 분포특성이 반영되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4. Radar Data According to Grid Size at Station 5

Grid size(m)	Grid number (row × column = total)	Stream grid number	Running time
250	54 × 60 = 3240	157	within 1 minute
500	28 × 30 = 840	79	within 1 minute
1000	14 × 15 = 210	38	within 1 minute
3000	5 × 5 = 25	14	within 1 minute
5000	3 × 3 = 9	9	within 1 minute

Fig. 7. Cumulative Rainfall According to Grid Size

레이다 강우자료를 기반으로 유출모의를 수행한 결과는 Fig. 8에 정리하였다. □로 표시된 것은 분포형모형의 수행결과로 나머지 범례표시는 적용가능한 몇 가지 수위유량관계곡선식에 따른 유량값을 나타내고 있다. 이를 통해 레이다 강우를 사용할 경우에도 전반적인 수문곡선의 양상을 유사하게 모의하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다만, 4번 지점의 경우 상승구간의 양상이 실측치와 모델링 결과가 약간의 차이를 보이는데 이는 기존 유역의 1/3이상의 면적을 가지는 소유역이 합류하는 효과를 구축된 흐름망이 합류점을 정확하게 반영하고 있지 못하고 조금 이격된 격자에 있기 때문으로 검토되었다.

Fig. 8의 관측유량값들은 적용가능한 수위유량관계곡선에 따라 그 값이 서로 차이가 있으므로 이를 기준으로 레이다 강우의 모의능력을 평가하기는 어렵다고 판단되어 최소격자인 250 m 크기를 기준(reference)으로 해서 모의된 레이다 강우에 따른 유출해석 결과의 차이를 검토하였다. 그 결과는 Table 5와 같다. 이를 살펴보면 유역면적이 100 km² 미만인 유역의 경우 레이다 강우격자를 250 m를 기준으로 4배

크기인 1000 m까지 업스케일링을 적용한 경우까지는 큰 차이가 없었다. 그러나 1000 m를 넘어선 격자를 사용하면서 오차가 증가하여 동일한 지형자료를 이용한 모델링이었음에도 강우격자의 차이만으로 10-15%이상의 오차가 나타나고 있었다. 이는 기존의 수문모델링에서 격자크기의 영향을 다룬 많은 연구들에서 언급된 내용과 유사한 것으로 소유역의 유출모델링을 수행하면서 격자크기가 일정 이상이 되면 오차가 급격히 증가하는 양상을 보인다고 정리할 수 있다. 제한된 결과이기는 하나 급회 모델링의 결과를 이용해서 판단한다면 유역면적 30~100 km²의 경우 계산속도를 빠르게 하기 위해 레이다 강우격자 크기는 1000 m 이상으로 업스케일링해서 사용하는 것은 적용상 조심해야할 필요가 있다.

앞서 언급된 정리 내용은 유역면적이 100 km²를 넘어서면 거짓말처럼 그 양상이 사라지는 경우가 여러 연구에서 보고된 바 있는데 Table 5에서도 그 유사한 결과를 확인할 수 있다. 이는 연구에 따라 강우격자크기의 효과가 사라지는 기준면적의 경우 100~300 km²의 차이가 있기는 하지만 공통적인 내용을 정리하면 중대유역의 모델링에서 레이다 강우

Fig. 8. Comparison Between Simulated and Observed Flow According to the Station

Table 5. Comparison Results According to the Watershed Area

Station	Grid size (m)	Grid size change value / observed value of runoff volume (%)	Grid size change value / observed value of peak discharge (%)
1 (31.0 km ²)	250m	-	-
	500m	100.4	100.5
	1000m	100.0	100.3
	3000m	100.7	100.5
	5000m	103.2	99.4
2 (61.2 km ²)	250m	-	-
	500m	100.2	100.4
	1000m	100.6	101.1
	3000m	105.6	110.2
	5000m	113.8	116.0
3 (85.4 km ²)	250m	-	-
	500m	100.2	100.2
	1000m	100.5	100.4
	3000m	104.1	106.8
	5000m	111.4	112.4
4 (108.6 km ²)	250m	-	-
	500m	100.2	100.0
	1000m	99.8	99.5
	3000m	99.3	100.1
	5000m	102.2	102.6
5 (124.0 km ²)	250m	-	-
	500m	100.2	100.2
	1000m	99.7	99.8
	3000m	99.5	101.1
	5000m	99.1	100.1

격자크기는 유출결과에 미치는 영향이 제한적이라는 것이다. 이는 레이더 강우의 격자크기가 실제 유출모의에 큰 영향을 그리 크지 않는다는 것을 확증하는 것은 아니지만 적어도 전통적인 강우유출모형에서 강우의 입력으로 면적 평균강우량을 사용하는 것이 적절한 모델링 과정을 거치기만 한다면 공간적으로 분포된 강우를 사용하는 것과 비교해서 큰 오차를 보이지 않는 유효한 방법임을 보여주는 내용으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 분포형 모형의 적용과정에서 입력으로 사용되는 지형 및 강우의 격자크기가 유출해석 결과에 미치는 영향을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

우선 유출계산의 정도를 높이기 위해 지형 격자크기를 무작정 세밀화 하는 것은 유출모의 결과의 정확도는 증가하지 않으면서 계산시간의 급격한 증가만을 가져올 수 있다. 따라서 홍수예경보 등에서 분포형 모형을 적용할 때는 주어진 시간 이내에 유출계산결과를 얻어질 수 있는지 가장 먼저 확인할 필요가 있다. 또한 수자원 실무에서 사용되는 격자크기인 30~500 m 격자크기의 경우 어느 것을 사용하여도 정확도 측면에서 큰 문제가 없는 것으로 검토되었다. 다만 지형과 관련된 모형구축 과정에서 전체 격자수 대비 하도흐름망의 격자수가 차지하는 비율이 10%를 넘어서는 경우 하천망의 형상이 실제 모의대상의 흐름망에 비해 과도하게 단순화된 것으로 볼 수 있으며 이 경우 복합수문곡선의 등과 같이 세밀한 유출곡선 변화를 모의하는 것은 부적절할 수 있으므로 예경보 측면의 모형구축에서 주의할 필요가 있었다.

분포형 유출모형에서 레이더 강우자료를 사용할 때 격자크기가 유출계산에 미치는 영향은 100 km² 이상의 중대유역에서는 크지 않은 것으로 검토되었다. 이는 전통적인 강우유출모형에서 강우의 입력으로 면적평균강우량을 사용하는 것이 적절한 모델링 과정을 거치기만 한다면 공간적으로 분포된 레이더 강우를 사용하는 것과 비교해서 큰 오차를 보이지

않는 유효한 방법임을 보여주는 내용이 될 수 있다. 한편 중소하천의 홍수예경보 측면에서 100 km² 미만의 면적을 가지는 대상으로 레이더강우를 적용하면서 계산시간 단축을 위해 강우격자크기를 1000 m 이상으로 업스케일링 하는 것은 유출계산결과에 큰 오차를 발생할 수 있는 것으로 검토되었다.

References

- Vieux, B.E. (2001). Distributed hydrologic modeling using GIS. *Wat. Sci. Tech. Series, Vol. 38*. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers. ISBN: 0-7923-7002-3
- Vieux, B.E., and Vieux, J.E. (2002). VfloTM: A real time distributed hydrologic model. *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada.
- Vieux, B.E.(2004). Distributed hydrologic modeling using GIS (2nd ed.). *Wat. Sci. Tech. Series, Vol. 48*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. ISBN: 1-4020-2459-2
- Yoo, C.S, Ha, E.H, and Kim, K.J. (2006). Effect of zero measurements on the spatial correlation structure of rainfall. *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 127-138.
- Yoo, C.S, Ha, E.H, Kim, B.S., Kim, K.J., and Choi, J.H. (2008). Sampling error of area average rainfall due to radar partial coverage. *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 41, No. 5, pp. 545-558.

Received	November 16, 2018
Revised	November 16, 2018
Accepted	November 23, 2018